České vysoké učení technické v Praze
Fakulta stavební
Katedra ocelových a dřevěných
konstrukcí

# DIPLOMOVÁ PRÁCE

# Chování šikmého mostu s řídící tyčí MW při brzdných silách

**Autor:** Bc. Martin Werunský

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Pavel Ryjáček, Ph.D.

Praha, 2017

Touto cestou bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce panu doc. Ing. Pavlu Ryjáčkovi, Ph.D. za jeho čas, ochotu a především rady, které byly nezbytné pro vypracování této diplomové práce.

**Abstrakt:** Tato diplomová práce se zabývá vlivem účinků brzdných sil na interakci bezstykové koleje a obloukového mostu s výraznou šikmostí opatřeného systémem řízení dilatace mostu. V této práci je obsaženo stručné teoretické shrnutí problematiky, výsledky naměřených experimentálních dat, způsob stanovení brzdných sil od vlakové soupravy, vytvoření nelineárního modelu reprezentujícího interakci mostu a bezstykové koleje a jeho následné porovnání s naměřenými experimentálními daty. Práce obsahuje také parametrickou studii.

**Klíčová slova:** šikmý obloukový most**,** řídící tyč Meyer-Wunstorf, brzdná zatěžovací zkouška, experiment, interakce bezstykové koleje a mostu, CSI Bridge, validace modelu

**Abstract:** This diploma thesis concernes on influence of braking forces on interaction of continuous welded rail and significantly skewed arch steel bridge equiped with control-rod-system. This thesis consist brief theoretical summary, method of determination braking forces of the train, results of experimental measurements, making of non-linear model that represents behaviour of interaction of continuous welded rail and bridge and comaprement between model results and experimental results. Thesis also constist paramteric study.

**Key words:** skew bridge, control-rod-system, train braking experiment, interaction of continous welded rail and bridge, CSI Bridge, validation of the model

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
**Fakulta stavební**
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Werunský Jméno: Martin Osobní číslo:

Zadávající katedra: Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Chování šikmého mostu s řídící tyčí MW při brzdných silách

Název diplomové práce anglicky: Behaviour of the skew railway bridge with MW guiding at brake forces

Pokyny pro vypracování:
Vyhodnocení brzdných zkoušek mostu Oskar v Břeclavi se zaměřením na interakci kolej/most a funkci systému MW, tvorba nelineárního numerického modelu, validace a verifikace a srovnání s experimentem.
Zhodnocení chování mostu.

Seznam doporučené literatury:
Frýba, L. Dynamika železničních mostu. 1. vyd. Praha: Academia, 1992. 328 s. ISBN 80-200-0262-6

Jméno vedoucího diplomové práce: doc. Ing. Pavel Ryjáček, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 3.10.2016 Termín odevzdání diplomové práce: 8.1.2017
*Údaj uveďte v souladu s datem v příslušném ak. roku*

[redacted]

Podpis vedoucího katedry

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

*Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové 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".*

3.10.16

Datum převzetí zadání

[redacted]

Podpis studenta(ky)

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 8. ledna 2016 Martin Werunský

# Obsah

1 Úvod ... 1

2 Cíle práce ... 1

3 Problematika interakce bezstykové koleje a mostu ... 2

3.1 Bezstyková kolej obecně ... 2

3.2 Bezstyková kolej na mostě ... 3

3.3 Způsoby snížení dilatační délky mostu ... 6

3.3.1 Rozdělení mostní konstrukce do dilatačních délek ... 6

3.3.2 Dilatační kolejové zařízení ... 7

3.3.3 Systém řízení dilatace mostu (SŘDM) ... 8

4 Sledovaný most OSKAR ... 11

4.1 Železniční svršek ... 13

4.2 Nosná konstrukce ... 14

4.2.1 Trámy hlavního nosníku (S355): ... 14

4.2.2 Oblouky hlavního nosníku (S355) ... 15

4.2.3 Systém ztužidel oblouků hlavního nosníku ... 16

4.2.4 Táhla hlavního nosníku (S460) ... 16

4.2.5 Mostovkový plech (S355) ... 17

4.2.6 Podélné výztuhy mostovkového plechu (S355) ... 17

4.2.7 Příčné výztuhy (S355) ... 17

4.2.8 Koncové příčné výztuhy (S355) ... 18

4.3 Ložiska ... 18

4.4 Břeclavská a Vídeňská opěra ... 19

4.5 Systém řízení dilatace mostu (SŘDM) ... 19

5 Experimentální měření ... 22

5.1 Dlouhodobý monitoring ... 22

5.1.1 Použité snímače, měřená místa ... 22

5.1.2 Měřící ústředny ... 27

5.2 Zatěžovací zkoušky ..... 30
5.2.1 Brzdná zatěžovací zkouška NOK1 ..... 30
6 Vyhodnocení brzdných zatěžovacích zkoušek NOK1 ..... 34
6.1 Způsob stanovení vnitřních sil ..... 35
6.2 ZS 211 ..... 37
6.3 ZS 211A ..... 41
6.4 ZS 211B ..... 45
6.5 ZS 221 ..... 49
6.6 ZS 221A ..... 49
6.7 ZS 232 ..... 50
6.8 ZS 232A ..... 54
6.9 ZS 242 ..... 58
6.10 ZS 221B ..... 62
6.11 ZS251 ..... 66
6.12 ZS 251A ..... 70
6.13 Závěr ..... 74
7 Numerický model ..... 75
7.1 Nosná konstrukce ..... 75
7.2 Kolej a kolejové lože ..... 80
7.3 SŘDM ..... 82
7.3.1 Tření SŘDM ..... 83
7.4 Ložiska ..... 84
7.5 Zobrazení modelu ..... 87
7.6 Stanovení zatížení ..... 89
7.6.1 Svislé zatížení ..... 89
7.6.2 Stanovení brzdných a rozjezdových sil ..... 89
7.7 Zatížení zadané do modelu ..... 92
7.7.1 ZS 221B ..... 92
8 Validace modelu ..... 97

8.1 Úvod ....97
8.1.1 ZS221B – Brzdění ....98
8.1.2 ZS221B - Rozjezd ....99
8.1.3 ZS 242 – Brzdění ....100
8.1.4 ZS 242 – Rozjezd ....102
8.2 Zhodnocení validace ....103
9 Parametrická studie ....106
9.1 Úvod ....106
9.1.1 Změna tuhosti kolejového lože ....106
9.1.2 Změna tření v sedlech systému řízení dilatace mostu ....109
9.1.3 Změna tření v ložiskách ....113
9.2 Závěr ....116
10 Závěr ....117
Literatura ....119
Seznam obrázků ....120
Seznam tabulek ....127

# 1 Úvod

Dnes se v drtivé většině případů zřizují železniční tratě s bezstykovou kolejí. Bezstyková kolej je z hlediska údržby ekonomicky výhodná a i v extrémních teplotních podmínkách vykazuje vysokou míru spolehlivosti. Bezstyková kolej, která je převáděná přes mostní konstrukci, je dodatečně namáhána od jejího působení. Výrazný vliv na namáhání koleje má dilatace mostní konstrukce. Aby se namáhání co nejvíce snížilo, je snaha budovat mosty s co nejmenší dilatační délkou. Docílit toho lze rozdělením mostů do více dilatačních úseků. Možné je použít i dilatační kolejové zařízení. V Německu byl vyvinut systém řízení dilatace mostu Meyer-Wunstorf. Jedná se o pákový systém, který je vhodný pro mosty s rozpětím 60-120m. Tento systém zkracuje jejich dilatační délku až na polovinu.

Výrazně šikmý most Oskar, nacházející se na I. železničním koridoru tři kilometry jižně od města Břeclav, je tímto systémem vybaven. Abychom lépe pochopili chování interakce bezstykové koleje a tohoto mostu, byl na něm v roce 2015 zřízen dlouhodobý nepřetržitý monitoring. V srpnu 2016 byly na mostě provedeny zatěžovací zkoušky. Součástí zatěžovacích zkoušek byly i brzdné zkoušky, které měly ověřit chování systému řízení pro dilataci mostu při zatížení brzdnými silami.

# 2 Cíle práce

Cílem této diplomové práce je vytvoření a validace nelineárního modelu mostu Oskar. Model je validován podle vyhodnocených experimentálních dat, která byla naměřena při brzdných zatěžovacích zkouškách. Na základě vyhodnocených dat a výsledků z validovaného modelu je zhodnoceno chování systému řízení dilatace mostu a interakce bezstykové koleje a mostu. Součástí této práce je také parametrická studie, která má objasnit, jaké faktory nejvíce ovlivní chování SŘDM a interakci koleje a mostu.

# 3 Problematika interakce bezstykové koleje a mostu

## 3.1 Bezstyková kolej obecně

Dnes je standardem zřizovat železniční tratě s bezstykovou kolejí. Výhody bezstykové koleje jsou jednoznačné: jízda drážního vozidla je po ní klidná, okolí tratě není vystaveno hlukovým emisím způsobeným přejezdem kola přes kolejnicový styk a nedochází k opotřebení kol drážních vozidel. Z hlediska životnosti a údržby kolejnic je konstrukce bezstykové koleje jednoznačně výhodnější než konstrukce koleje stykové, neboť u bezstykové koleje nedochází k opotřebení temen kolejnic působením drážních vozidel.

I přes výše zmíněné výhody má zřizování bezstykové koleje negativa. Absence kolejových styků neumožňuje bezstykové koleji volně dilatovat. Z toho důvodu vznikají v koleji normálové síly od teplotních změn. Při nadměrných kladných teplotách hrozí nebezpečí, že kolej nevydrží napětí do ní vnesené a vybočí. Toto nebezpečí roste se zmenšujícím se poloměrem traťového oblouku. Opatřením, aby se tak nestalo, je zřizování nadvýšeného kolejového lože v oblouku o poloměru R<450m, dále smí být zřizovány oblouky s poloměrem R>200m. V budoucnu se počítá s novelizací normy, kdy bude připuštěno zřízení oblouku o poloměru R>150m. Naopak, při nízkých teplotách hrozí, že dojde k mrazovému lomu kolejnice

Obrázek 1: Vybočení bezstykové koleje v důsledku nadměrného tepelného namáhání

Obrázek 2: Trhlina kolejnice způsobená mrazem

## 3.2 Bezstyková kolej na mostě

Bezstyková kolej zřízená na mostní konstrukci je ovlivněna, kromě teplotních změn, které na ní působí, ještě dalšími faktory. Tyto faktory jsou:

1) Teplotní změny mostní konstrukce
2) Účinky brzdných a rozjezdových sil
3) Účinky od deformace mostní konstrukce od provozních zatížení

1) Teplotní změny mostní konstrukce

Změna teploty výrazně ovlivňuje vznik napětí v bezstykové koleji. Největšího nárůstu napětí dochází v místech nad opěrami. Změna normálové síly bezstykové koleje je závislá na posunu mostní konstrukce. Posun lze pospat vztahem:

$$u_m = l_m . \alpha_m . \Delta T_m$$

$u_m$ - posunutí mostu vlivem změny teploty [m],

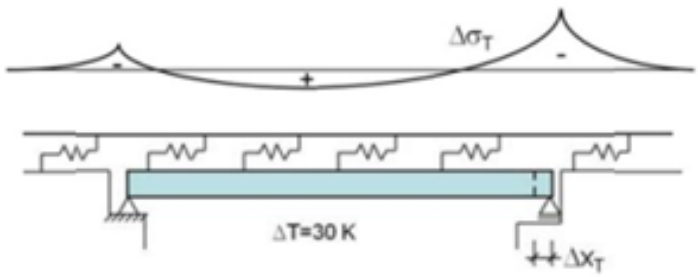
$\alpha_m$ - součinitel ekvivalentní teplotní roztažnosti pro mostní konstrukce zohledňující nerovnoměrné prohřívání mostní konstrukce a také materiál, ze kterého byla konstrukce vyrobena [$K^{-1}$],

$\Delta T_m$ - teplotní rozdíl mezi aktuální teplotou mostu a teplotou mostu, při níž byla zřízena bezstyková kolej na mostě [K],

$l_m$ – dilatační délka konstrukce [m].

| Most | | $\alpha_m$ [$10^{-6}$ $K^{-1}$] |
|---|---|---|
| Průběžné kolejové lože | Ocelový | 6 |
| | Ocelobetonový | 5 |
| | Betonový | 5 |
| Prvková otevřená mostovka | | 9 |
| Kolejnice | | 12 |

Tabulka 1: Hodnoty součinitele ekvivalentní teplotní roztažnosti. [1]




Obrázek 3: Schéma průběhu normálových sil v koleji od teplotní změny mostní konstrukce. [2]

2) Účinky brzdných a rozjezdových sil

Změna osové síly v koleji, uvažovaná po její délce, je úměrná aktivovanému podélnému odporu koleje proti posunutí a spojitému podélnému zatížení brzdnými nebo rozjezdovými silami.

$$\frac{dN_x}{dx} = r_x - q_x, [kN/m]$$

$r_x$ – podélný odpor proti posunutí [kN/m]

$q_x$ – spojité zatížení brzdnými nebo rozjezdovými silami [kN/m]

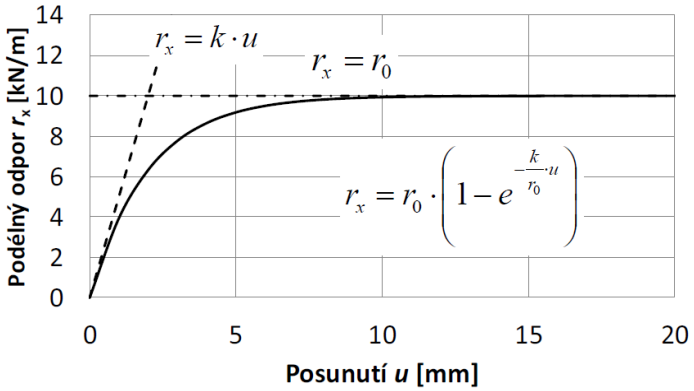
Podélný odpor je klíčový parametr pro popis chování bezstykové koleje na mostě. Matematicky ho lze vyjádřit vztahem:

$$r_x = k_m.(u-u_m)$$

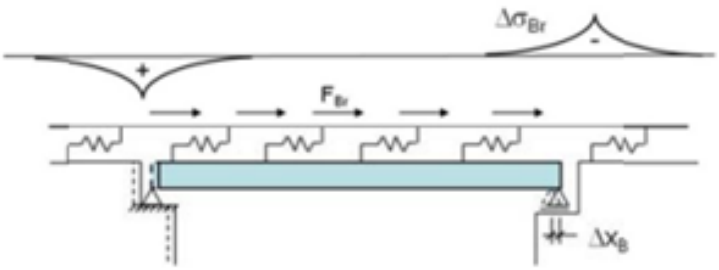
$k_m$ - konstanta vyjadřující lineární závislost mezi posunutím koleje a podélným odporem na mostě [kN/m$^2$],

$u$ - podélné posunutí koleje [m],

$u_m$ - posunutí mostu vlivem změny teploty [m], viz.2.



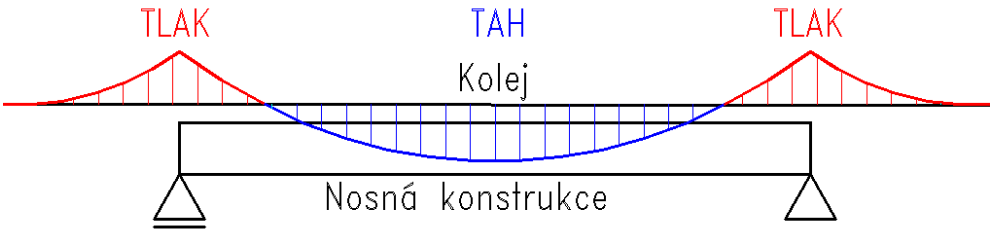

**Obrázek 4: Model podélného odporu, pro výpočetní modely se konzervativně používá lineární závislost podélného odporu na posunutí koleje. [1]**




Obrázek 5: Průběh normálových sil od zatížení brzdnými nebo rozjezdovými silami. [2]

3) Účinky od deformace mostní konstrukce od provozních zatížení

Změna normálových sil v bezstykové koleji je také způsobena průhybem mostu od statického účinku vlaku. Část koleje nad opěrami, které ohraničují zatížené pole, je tlačená. Část koleje, která se nachází na mostě, je tažená. Průběh normálových sil koleje má totožný průběh, jako je průběh napětí spodního pásu spojitého nosníku o stejném počtu polí jako má nosná konstrukce a který je na obou svých koncích zakončen vetknutím.




Obrázek 6: Průběh normálové síly v koleji od statického zatížení vlaku

Aby bylo zabráněno porušení koleje od výše zmíněných faktorů, jsou normou stanoveny limitní hodnoty přídavných napětí, které nesmí přesáhnout:

$\sigma_{max,tah} \leq 92$ MPa – maximální přídavné tahové napětí pro bezstykovou kolej ve štěrkovém loži nebo v pevné jízdní dráze

$\sigma_{max,tlak} \leq 92$ MPa – maximální přídavné tlakové napětí pro bezstykovou kolej v pevné jízdní dráze

$\sigma_{max,tlak} \leq 72$ MPa – maximální přídavné tlakové napětí pro bezstykovou kolej ve štěrkovém loži

Snížení hodnot přídavných napětí lze spolehlivě dosáhnout upínáním koleje při ideálních teplotách, jejichž rozmezí je od 17°C do 23°C.

Při zřizování bezstykové koleje na mostě je nezbytně nutné dodržet následující podmínky:

1) Síla v koleji je při maximálním oteplení mostu i kolejnic menší, než je polovina kritické síly pro vybočení.
2) Napětí v kolejnici vyhoví z hlediska únosnosti kolejnic pro maximální oteplení a ochlazení mostu i kolejnic, s ojetím kolejnic se napětí zvyšuje. Maximální mezní hodnota srovnaného ojetí kolejnic UIC60 E1/E2 se připouští do 12mm.
3) Spára vzniklá po lomu kolejnice způsobeném působením mrazu v zimním období je menší než 50mm.
4) Síla působící na upevnění kolejnic u mostů bez kolejového lože nepřekročí přípustnou mez – posuzuje se hodnota vzájemného posunutí mezi mostem a kolejí.

## 3.3 Způsoby snížení dilatační délky mostu

Dilatace mostní konstrukce má výrazný vliv na namáhání převáděné bezstykové koleje. Z toho důvodu je snaha snížit dilatační délku koleje na co nejmenší hodnotu, neboť tato hodnota je klíčová ve vztahu:

$$u_m = l_m . \alpha_m . \Delta T_m$$

Dilatační délku mostů lze snížit:

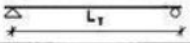
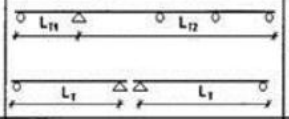
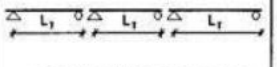
1) Rozdělením mostní konstrukce do několika dilatačních délek
2) Instalací velkého nebo malého kolejového dilatačního zařízení
3) Instalací systémů řízení dilatace mostu, tzv. řídící tyče

### 3.3.1 Rozdělení mostní konstrukce do dilatačních délek

Rozdělení mostů do dilatačních délek je závislé na:

- uspořádání mostních ložisek a dilatující délce $l_m$
- tvaru kolejnice
- na materiálu, ze kterého byl most vyroben
- na tom, zda je na mostě použito štěrkové lože, mostnice nebo přímé upevnění
- mostů s prvkovou mostovkou, zda jsou mostnice uloženy centricky nebo plošně
- na materiálu pražců – betonové/dřevěné

**Tab.1** Největší přípustné dilatující délky $L_T$ nosných konstrukcí mostů pro zřízení bezstykové koleje

| Případ č. | Uspořádání mostních ložisek a dilatující délka $L_T$ | Tvar kolejnice 2) | Mosty s nosnými konstrukcemi | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | ocelovými | | | | | ocelobetonovými | | betonovými | |
| | | | s kolejovým ložem pražce | | s mostnicemi uloženými | | s přímým uložením koleje | s kolejovým ložem pražce | | s kolejovým ložem pražce | |
| | | | dřevěné | betonové | centricky | plošné | | dřevěné | betonové | dřevěné | betonové |
| | | | $L_T$ [m] | | | | | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 1 |  | R 65<br>UIC 60<br>T,S 49 | 125<br>110<br>85 | 90<br>80<br>60 | 70<br>66<br>60 | 23<br>23<br>23 | 20<br>20<br>20 | 160<br>140<br>100 | 120<br>103<br>70 | 180<br>156<br>110 | 130<br>113<br>80 |
| 2 |  | | | | | | | | | | |
| 3 |  počet konstrukcí není omezen | R 65<br>UIC 60<br>T,S 49 | 125<br>108<br>75 | 86<br>74<br>51 | 70<br>63<br>50 | 25<br>25<br>25 | 23<br>23<br>23 | 160<br>136<br>90 | 110<br>93<br>60 | 180<br>153<br>100 | 125<br>106<br>70 |
| 4 | 1) | R 65<br>UIC 60<br>T,S 49 | 65<br>61<br>55 | 46<br>44<br>40 | 35<br>35<br>35 | 19<br>19<br>19 | 17<br>17<br>17 | 100<br>86<br>60 | 70<br>61<br>45 | 110<br>96<br>70 | 80<br>70<br>50 |

Při kombinaci jednotlivých případů rozhoduje přísnější kritérium.
1) Pro nové mosty nepřípustný případ. 2) Kolejnice tv. T jen u dosavadního stavu.

Tabulka 2: Omezení dilatačních délek mostu v závislosti na statickém schématu a na zřízeném železničním svršku. [3]

### 3.3.2 Dilatační kolejové zařízení

Dilatační kolejové zařízení rozděluje bezstykovou kolej na menší dilatační prvky. Jedná se o zařízení v koleji, které je tvořeno dvěma podélně seříznutými kolejnicemi, uloženými na výhybkových pražcích. Toto upořádání dovoluje kolejnicím dilatovat nezávisle na sobě. V dnešní době se standardně vyrábí malé kolejové dilatační zařízení (MKDZ) a velké kolejové dilatační zařízení (VKDZ).

a) Malé dilatační kolejové zařízení (MKDZ)

Malé dilatační kolejové zařízení je vhodné pro nosné konstrukce, jejichž dilatující délka je v rozsahu 30-80m. Toto zařízení umožňuje posun kolejnic až o cca 100mm.

Obrázek 7: Malé dilatační kolejové zařízení

b) Velké dilatační kolejové zařízení (VDKZ)

Velké dilatační kolejové zařízení se používá pro nosné konstrukce s dilatační délkou 80-400m. Umožňuje vzájemný posun kolejnic až o cca 300mm.

Obrázek 8: Velké dilatační kolejové zařízení

Dilatační zařízení dostatečně řeší problematiku dilatujících délek bezstykové koleje. V případě dlouhých mostů je nutná přítomnost více těchto zařízení, což zvyšuje finanční náklady. Nesmíme také opomenout, že také vyžadují pravidelnou údržbu.

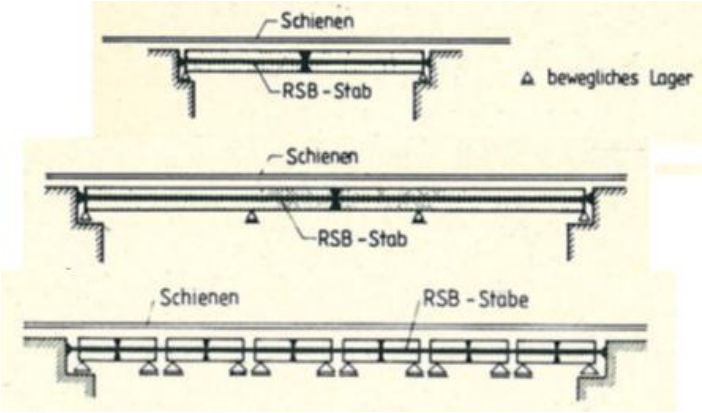
### 3.3.3 Systém řízení dilatace mostu (SŘDM)

V Německu se u mostů s rozpětím mezi 60-120 metry standardně používají tzv. Systémy řízení dilatace mostu (SŘDM) neboli řídící tyče. SŘDM je horizontální zařízení, které redukuje dilatační délky mostů na polovinu tím, že přenese pevný bod doprostřed rozpětí mostu. Tím je docíleno menšího normálového namáhání koleje způsobeného změnou. Největších napětí je díky funkci řídící tyče dosaženo nad opěrami, nikoliv uprostřed rozpětí mostu.

V Německu byly vyvinuty dva druhy řídících tyčí: RSB – Stab a tyče Meyer/Wunstorf.

a) RSB – Stab

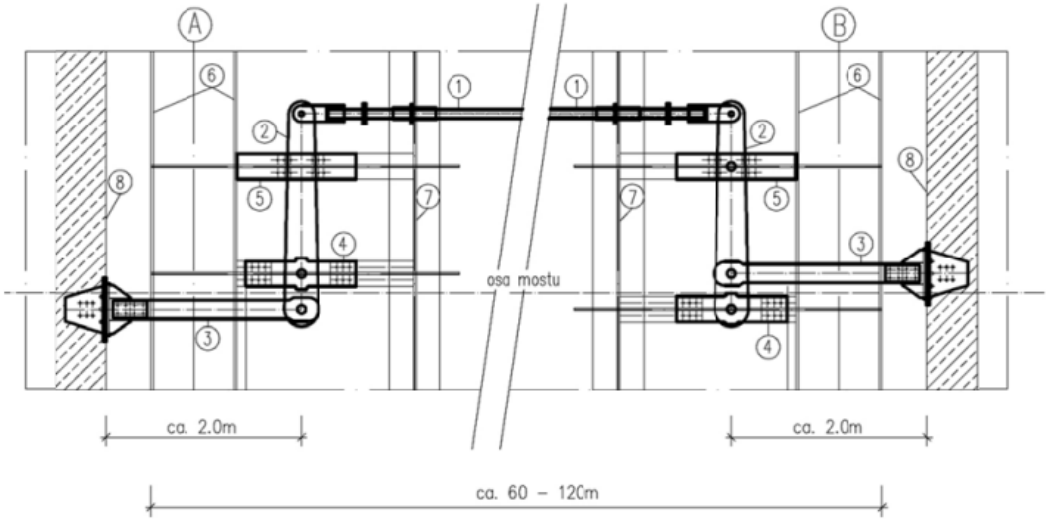
Řídící tyče RSB – Stab jsou konstruovány tak, že je mezi opěry umístěn tuhý prut, k němuž je ve středu rozpětí pevně připojena mostovka. Díky tomu je docíleno stejnoměrného teplotního rozpínání na obou stranách konstrukce. Z popisu konstrukce tyče je zřejmé, že se jedná o staticky neurčitou konstrukci. To má za následek vznik normálových napětí v důsledku teplotních změn. Řídící tyč také přenáší zatížení od brzdných nebo rozjezdových sil drážních vozidel. Při velkém zatížení může docházet k nežádoucímu poměrnému přetvoření tyče, které je důsledkem zvýšených normálových namáhání koleje. Z toho důvodu jsou tyto tyče konstruovány z velkých profilů. Dnes se tyto tyče již nepoužívají.




Obrázek 9: Schéma řídící tyče RSB – Stab. [2]

b) Tyče Meyer/Wunstorf (MW)

Řídící tyč Meyer/Wunstorf je unikátní zařízení pákového charakteru, které bylo poprvé představeno v 70. letech 20.století. Je tvořeno řídícím prutem, brzdnými nosníky a kotevními tyčemi, které jsou zakotveny do opěr. Tyto komponenty jsou kloubově spojeny. Konstrukce řídící tyče je staticky určitá, takže při jejím oteplení dochází pouze k posunům, nikoliv ke vznikům normálových napětí. Zatížení od brzdných nebo rozjezdových sil je přenášeno do brzdných nosníků a z nich následně do kotevních tyčí a do opěry. Díky tomu, je do řídícího prutu přenášen jen zlomek brzdných/rozjezdových sil a proto může být tvořen relativně malými profily typu TR na rozdíl od tyče RSB-Stab.

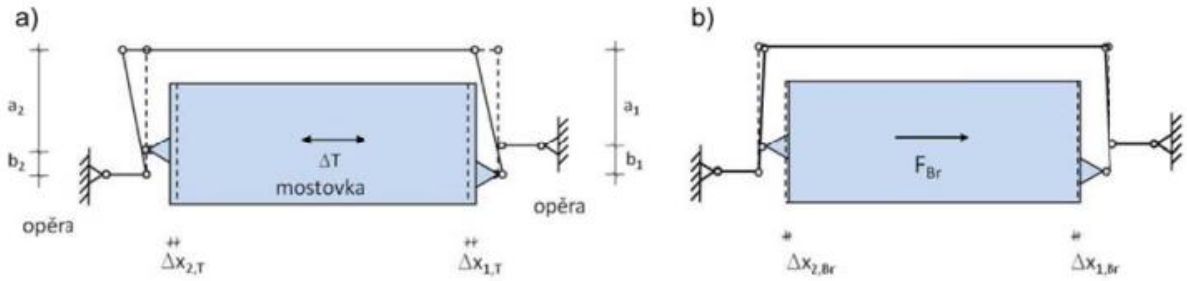



① řídící prut (*Steuerstab*), ② brzdný nosník (*Bremsträger*), ③ držící prut (*Haltestab*), ④ připevnění k mostovce, ⑤ aretace pro případ údržby, ⑥ koncový příčník, ⑦ příčník, ⑧ opěra

Obrázek 10: Schéma řídící tyče s popisem jednotlivých částí. [2]

Typickým znakem těchto tyčí je asymetrické uspořádání kotevních tyčí. Tímto uspořádáním lze docílit libovolného poměru protažení koncových částí mostu při teplotním zatížení. V případě, že požadujeme, aby oba konce mostu dilatovaly rovnoměrně, musíme zkonstruovat celý systém s následujícími geometrickými parametry:

$$\frac{a_2}{b_2} = \frac{a_1 + b_1}{b_1}$$




**Obrázek 11: Funkce řídící tyče a) při změně teploty, b) od působení brzdných sil. [2]**

Tímto geometrickým uspořádáním taktéž docílíme rovnoměrného rozdělení brzdných nebo rozjezdových sil $F_{i,br}$ do obou opěr:

$$F_{1,Br} = F_{1,Br} = \frac{1}{2} F_{Br}$$

$$\Delta x_{1,Br} = \Delta x_{1,Br} = \frac{1}{2} \Delta x_{Br}$$

Dnes jsou tyto tyče díky svým přednostem primárně používány na úkor systému RSB-stab.

# 4 Sledovaný most OSKAR

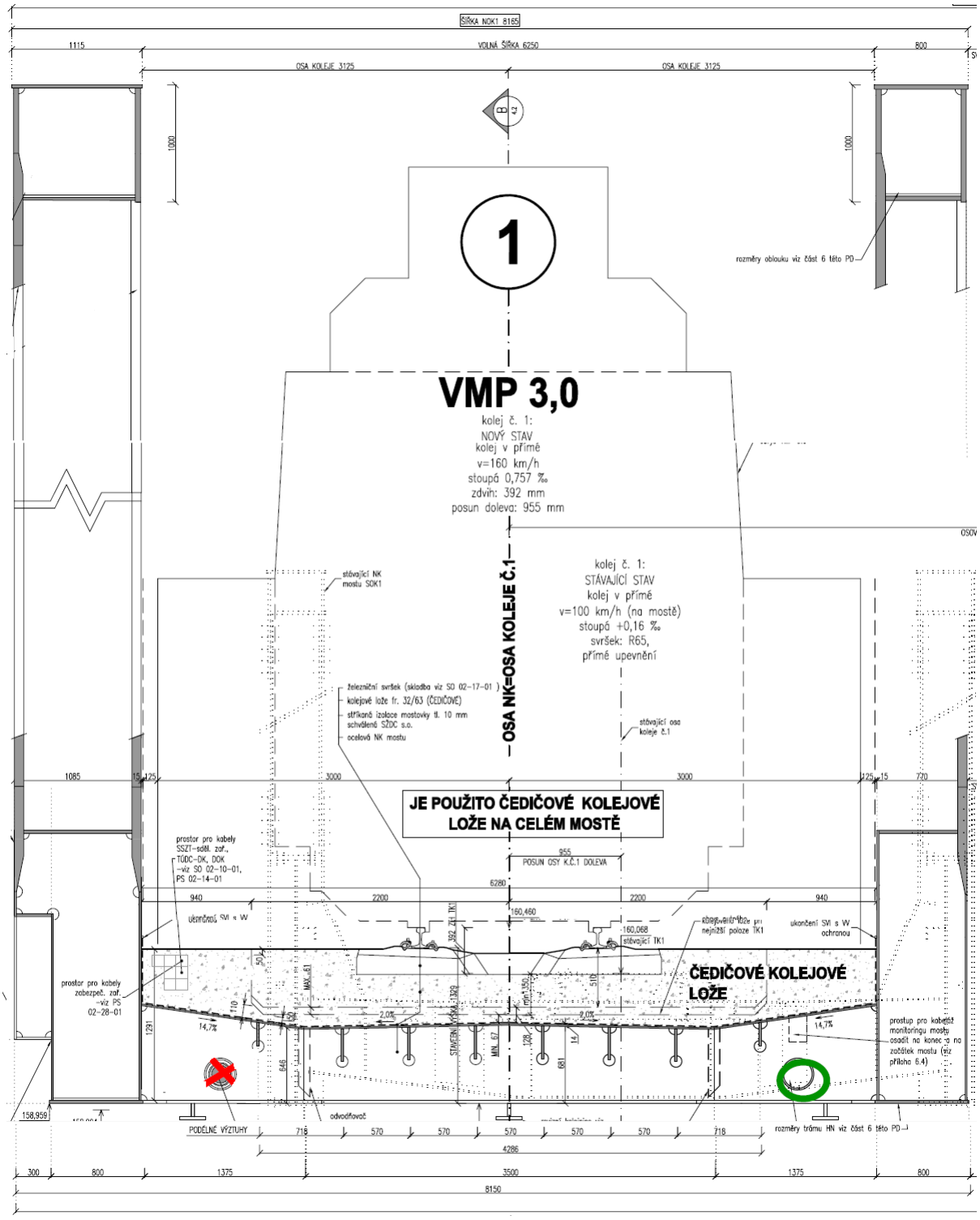
Most Oskar je ocelový most nacházející se na 1. železničním koridoru, který spojuje Prahu s Vídní. Je tvořen dvěma konstrukcemi NOK1 a NOK2, z nichž každá přemosťuje jednu traťovou kolej. Most přemosťuje zhruba 30 metru široké odlehčovací rameno řeky Dyje.

Dominantou tohoto mostu je vysoký oblouk se síťovým uspořádáním závěsů, jehož vzepětí je 14 metrů. Most je konstruován s výraznou šikmostí, která činí 41°. Je vybaven řídící tyčí Meyer/Wunstorf. Konstrukce obloukového mostu s výraznou šikmostí, který je opatřen řídící tyčí, je v České republice, dokonce i v Evropě unikátní.

Návrhová rychlost trati, kterou most převádí je 160km/h, most je ovšem projektován až na rychlost 192km/h.

Obrázek 12: Poloha mostu Oskar (zdroj mapy.cz)

Obrázek 13: Pohled zleva




Obrázek 14: Příčný řez NOK 1, zeleně je vyznačena skutečná poloha SŘDM. [3]

## 4.1 Železniční svršek

Železniční svršek je tvořen kolejnicemi UIC 60, které jsou upevněny k pražcům B91S pomocí pružných svěrek Skl.24. Pražce B91S jsou uloženy do amfibolitového kolejového lože. Nestandardní materiál kolejového lože je použit ze statických důvodů. V místě 10m před a za dilatačními spárami (celkem 36 pražců na obou stranách mostu), jsou mezi nosnou konstrukcí a opěrami použity místo pražců B91S výhybkové pražce VPS. Kolejnice jsou k těmto pražcům uchycené pomocí svěrek se sníženou držebností. Toto uspořádání si klade za cíl, aby nedošlo k nadměrnému normálovému namáhání koleje od teplotní dilatace mostu.

Obrázek 15: Pohled na železniční svršek v místě změny pražců

Základní tabulkové údaje:

| | |
|---|---|
| Rozpětí nosné konstrukce: | 97,500m |
| Stavební výška: | 1329mm |
| Konstrukční výška: | 15,64m v polovině rozpětí |
| Vzepětí oblouku: | 14,00m |
| Kolmá světlost: | 61,770m |
| Šikmá světlost: | 93,89m |
| Šikmost mostu: | levá, 41° |
| Délka přemostění: | 93,89m |
| Délka mostu: | 129,90m |
| Šířka mostu: | 16,90m (1 NOK 8,15m) |
| Použitý materiál: | Ocel S355, S460 pro táhla hlavního nosníku a páky SŘDM |
| Přemostěná překážka: | odlehčovací rameno řeky Dyje |
| Staničení | km: 80,930 |
| Trať: | Hohenau (ÖBB) – Přerov |

| | |
|---|---|
| VMP: | 3,0 m |
| Počet kolejí na mostě: | 1 kolej na NOK1 (k.č. 1), 1 kolej na NOK2 (k.č. 2) |
| Směrové poměry: | kolej v přímé |
| Sklonové poměry: | niveleta NOK1 i NOK2 je částečně ve výškovém zakružovacím oblouku, před lomem niveleta v obou kolejích stoupá 0,757‰, za lomem klesá 1,561‰<br>NOK1: $R_v$ = 26000m, $t_z$=30,134m, $y_z$ = 0,017m<br>NOK2: $R_v$ = 26000m, $t_z$=30,134m, $y_z$ = 0,017m |
| Traťová třída: | D4 |
| Traťová rychlost: | 160km/h |
| Trakce: | 25kV, 50Hz |

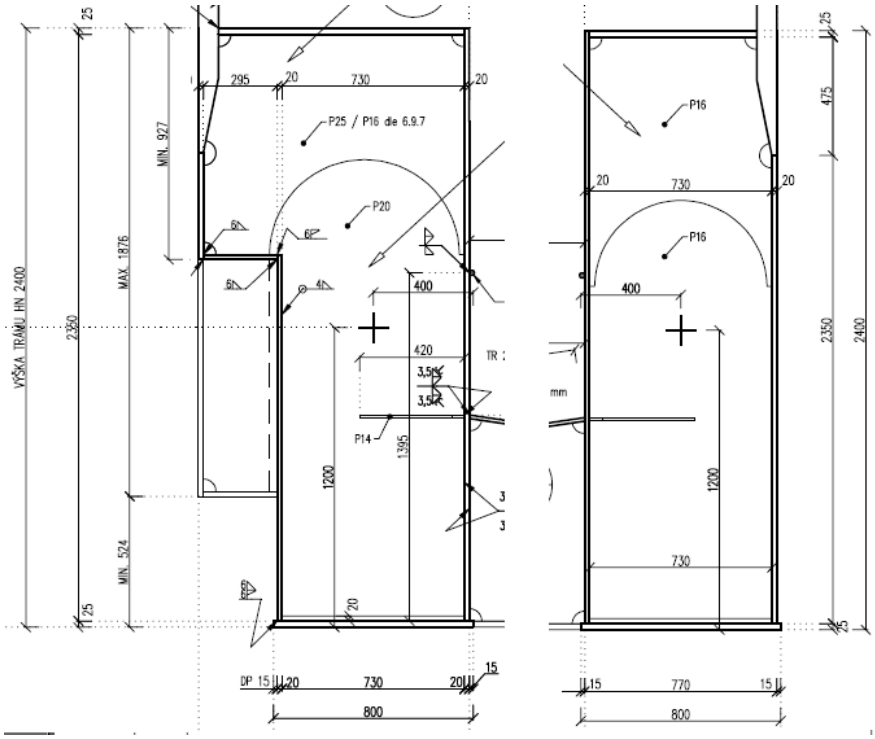
## 4.2 Nosná konstrukce

### 4.2.1 Trámy hlavního nosníku (S355):

Vnitřní trám hlavního nosníku je obdélníkového průřezu s rozměry 0,800x2,400m. Vnější trám hlavního nosníku je tvořen obdélníkovým průřezem s rozměry 0,800x2,400m s tím, že je v horní části na vnější straně rozšířen o 315mm. Výška rozšíření se spojitě mění tak, že jeho maximální výška (1876mm) se nachází nad ložisky a minimální výška (927mm) ve středu rozpětí trámů. Spodní a horní stěny trámů jsou tvořeny plechy o tloušťce 25mm. V místě uložení mostu na ložiska je spodní stěna trámů rozšířena na 45mm. Boční stěny jsou tvořeny plechy o tloušťce 20mm. V krajních částech mostu je tloušťka bočních stěn rozšířena na 35mm.

Trámy hlavních nosíků jsou konstruovány s nadvýšením 90mm. Nadvýšení vyrovnává průhyby od tíhy ocelové konstrukce, stálého zatížení a od 25% účinku nahodilého zatížení od železniční dopravy.

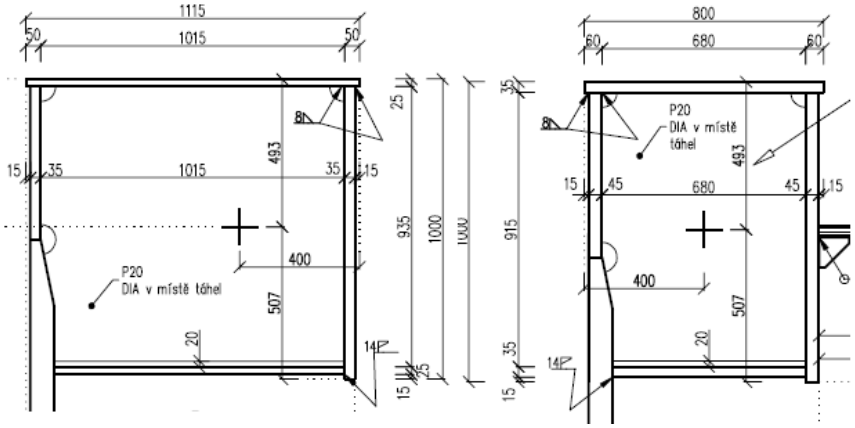
Uprostřed rozpětí trámů se nachází prostor pro zabudování případného balastu.




Obrázek 16: Příčný řez vnějším a vnitřním trámem. [3]

### 4.2.2 Oblouky hlavního nosníku (S355)

Oblouky hlavního nosníku mají vzepětí 14m a jejich tvar lze popsat parabolou 2°. Jsou obdélníkového průřezu. Vnitřní oblouk má rozměry 0,800x1,000m. Vnější oblouk má rozměry 1,115x1,000m. Je rozšířen tak, aby jeho šířka byla totožná s rozměry horního plechu rozšířené části vnějšího trámu hlavního nosníku. Spodní a horní stěny obou oblouků jsou tvořeny plechy o tloušťce 25mm. Boční stěny vnitřních oblouků jsou tvořeny plechy o tloušťce 45mm. Boční stěny vnějších oblouků jsou tvořeny plechy o tloušťce 35mm.




Obrázek 17: Příčný řez vnějším a vnitřním obloukem. [3]

### 4.2.3 Systém ztužidel oblouků hlavního nosníku

Oblouky hlavních nosníků jsou ztuženy třemi typy ztužidel: diagonála portálová – uzavřený obdélníkový průřez, diagonála běžná – trubka a příčel – uzavřený obdélníkový průřez. Na ztužidlech jsou navrženy svislé trubky sloužící k uchycení trakčního vedení.

Obrázek 18: Pohled na ztužení oblouků hlavního nosníku NOK2

### 4.2.4 Táhla hlavního nosníku (S460)

Táhla hlavního nosníku jsou navržena v síťovém uspořádání s osou symetrie podle středu rozpětí příslušného hlavního nosníku. Jsou použity dva druhy táhel. Táhla v poli mají plný kruhový průřez o průměru 80mm, táhla v koncových částech mostu mají plný kruhový průřez o průměru 120mm. Všechna táhla jsou k obloukům i trámům přivařena. Počet táhel na každém nosníku je 40ks. Délka nejkratšího táhla činí 4209mm, nejdelšího 14883mm. Táhla jsou propojena tlumícími spojkami, aby nedocházelo k jejich nadměrnému rozkmitávání při přejezdu vlaků.

Obrázek 19: Pohled na táhla pravého nosníku NOK1 a levého nosníku NOK2

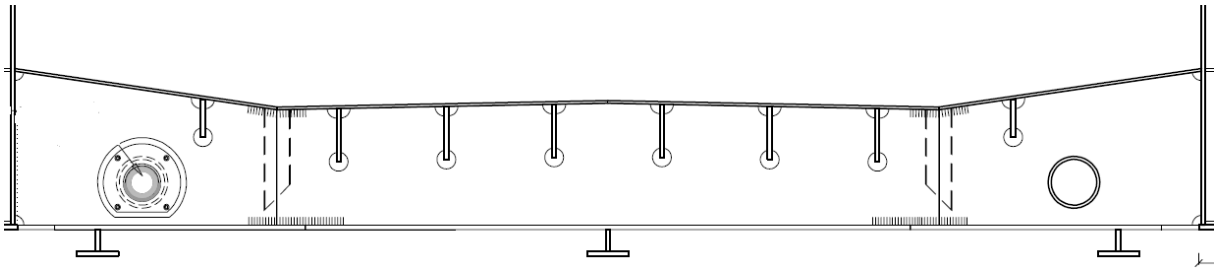
Obrázek 20: Pryžová tlumící spojka křížících se táhel

### 4.2.5 Mostovkový plech (S355)

Mostovkový plech je vyroben z plechu o tloušťce 14mm. V koncových oblastech se tloušťka plechu skokově zvyšuje na 25mm a na 35mm s největší hodnotou mezi krajní příčnou výztuhou a koncovou příčnou výztuhou. Mostovkový plech je spádován ve spádu 14,7% ve směru od hlavního nosníku do úžlabí a pod spádem 2% od středu příčníků od úžlabí.

### 4.2.6 Podélné výztuhy mostovkového plechu (S355)

Mezi úžlabími je celkem 6 podélných výztuh, které jsou tvořeny z plechu P22x280mm. Osová vzdálenost výztuh je 570mm. Mezi úžlabím a hlavním nosníkem je vždy přidaná jedna příčná výztuha tvořená z plechu P22x200mm. V koncových oblastech je tloušťka podélných výztuh zvýšena na 25mm. V místech, kde dochází ke spojení kotevních tyčí SŘDM s brzdnými nosníky je tloušťka podélných výztuh zvýšena až na 30mm.



Obrázek 21: Tvar mostovky s podélnými výztuhami. [3]

### 4.2.7 Příčné výztuhy (S355)

Příčné výztuhy jsou od sebe v poli osově vzdálené 2,420m. Jsou proměnné výšky v závislosti na sklonu mostovkového plechu. V koncových oblastech se jejich osová vzdálenost zvyšuje až na 2,820m. Stojina příčných výztuh mezi úžlabími je tvořena z plechu tloušťky 14mm, mezi úžlabím a hlavním nosníkem je tvořena z plechu tloušťky 16mm. Dolní

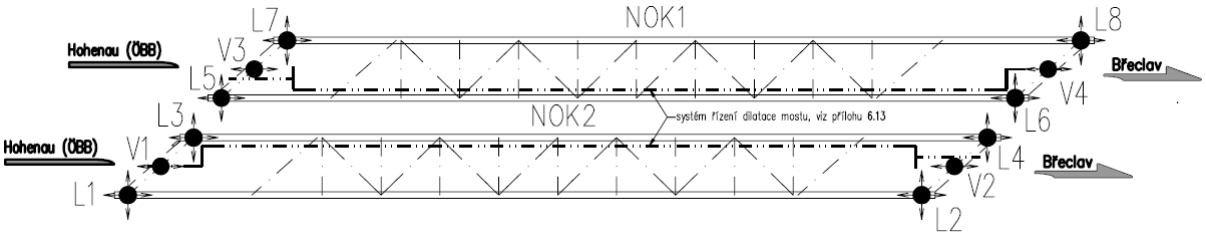
pásnice tvoří plech P25x250mm. V koncových oblastech mostu jsou příčné výztuhy zkrácené kvůli šikmosti mostu.

Obrázek 22: Pohled na podélné a příčné výztuhy. Z fotografie je patrný tvar plechu mostovky

### 4.2.8 Koncové příčné výztuhy (S355)

Koncové příčné výztuhy jsou tvořeny 3-stěnným uzavřeným obdélníkovém průřezem. Jejich teoretická délka je 10,720mm.

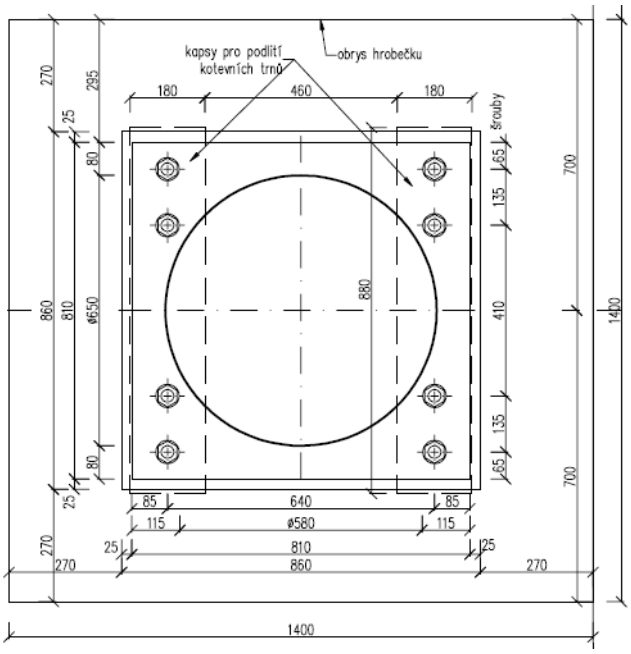
## 4.3 Ložiska




Obrázek 23: Schéma ložisek, šipky ukazují uvolněný směr. [4]

Obě nosné konstrukce jsou uloženy na čtyřech elipsovitých kalotových ložiskách s rozměry 0,65x0,58m Požadovaná svislá únosnost ložisek je 16MN. Ložiska umožňují vodorovný posun o 100mm, v příčném směru o 15mm.

Vodící ložiska přenášejí vodorovné příčné síly a jsou umístěna uprostřed rozpětí krajních příčníků. Jejich minimální vodorovná příčná únosnost je 1,5MN a umožňují posun v podélném směru o 100mm.




Obrázek 24: Půdorys kalotového ložiska. [4]

Obrázek 25: Pohled na levé ložisko NOK1 na opěře 01

## 4.4 Břeclavská a Vídeňská opěra

Obě opěry jsou uloženy na 1,5m vysokém a více jak 25m širokém základovém bloku. Základový blok je uložen na 30 velkoprůměrových pilotách o průměru 1,2m. Piloty jsou dlouhé od 15m do 18,8m. Opěry jsou vysoké 3,6m a jsou kotveny osmy zemními kotvami. Po obou stranách opěr jsou vybudována mostní křídla, jejichž šířka je 2,354m a délka více jak 15m.

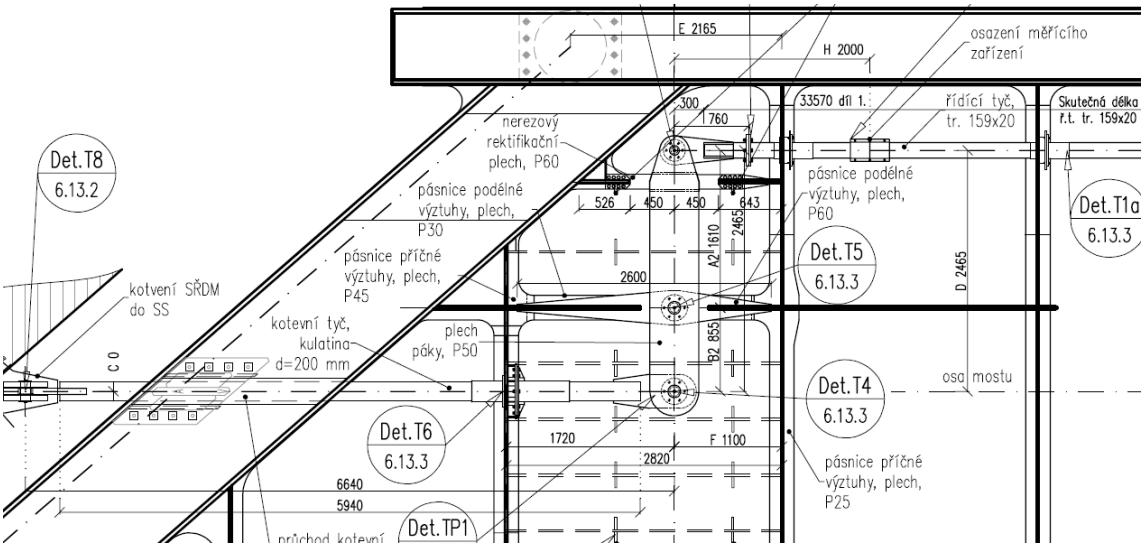
## 4.5 Systém řízení dilatace mostu (SŘDM)

Most Oskar je vybaven řídící tyčí typu Meyer/Wunstorf. Řídící tyč je tvořena z trubky TR159x20, brzdné nosníky jsou tvořeny ze dvou plechů P50x500mm a kotevní tyče jsou

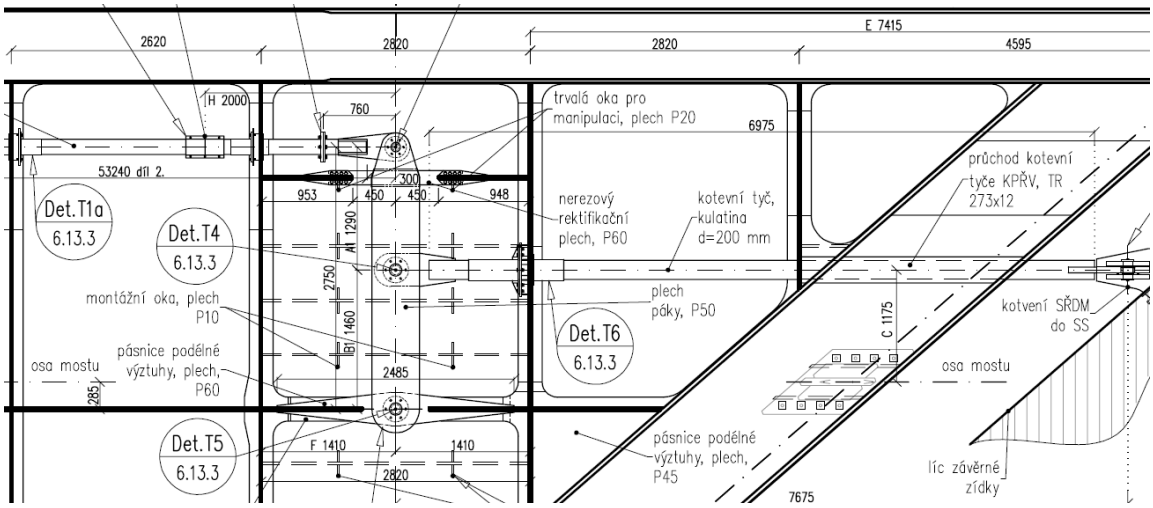
vyrobeny z trubky uzavřeného průřezu o průměru 200mm. Brzdný nosník je vyroben z oceli S460, ostatní prvky SŘDM jsou z oceli S355.

Řídící tyč prostupuje kruhovými otvory, které jsou situovány ve stojinách příčných výztuh. Otvory příčných výztuh jsou opatřeny kluznými sedly z nerezové oceli, aby nedocházelo ke tření a tím i normálovému namáhání řídící tyče.

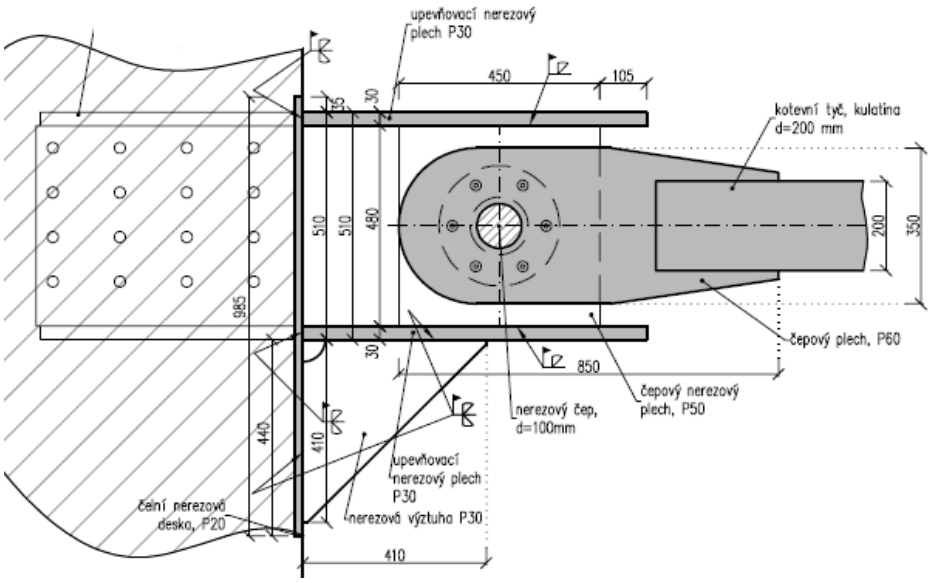
Kotevní tyč prostupuje na obou stranách mostu otvorem v druhém krajním příčníku. Otvory jsou také opatřeny kluznými sedly z nerezové oceli. Skrz krajní příčníky vedou průchody kotvení, které jsou vyrobeny z trubky TR271x12. Tyč je zakotvena do základů tak, aby bylo v místě zakotvení umožněno její pootočení kolem vodorovné osy.



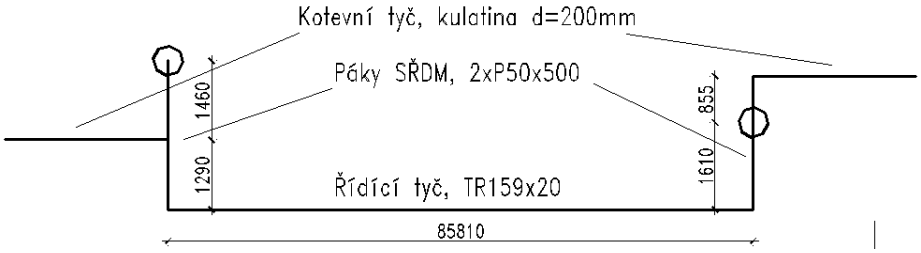

Obrázek 26: Výkres SŘDM NOK2, směr Hohenau. [4]




Obrázek 27: Výkres SŘDM NOK2, směr Břeclav. [4]




Obrázek 28: Kotvení kotevní tyče do spodní stavby umožňující pootočení kolem svislé osy. [4]




Obrázek 29: Schéma SŘDM NOK1

# 5 Experimentální měření

## 5.1 Dlouhodobý monitoring

Od roku 2015 probíhá na obou nosných konstrukcích nepřetržitý dlouhodobý monitoring. Účelem tohoto monitoringu je shromažďování dat, která mají osvětlit chování interakce bezstykové koleje a mostu s výraznou šikmosti. Na NOK1 jsou také umístěny snímače zrychlení, jejichž účelem je měření změny tuhosti nosné konstrukce a kolejového lože. Monitoring je plánován až do roku 2018.

### 5.1.1 Použité snímače, měřená místa

#### *5.1.1.1 Tenzometry*

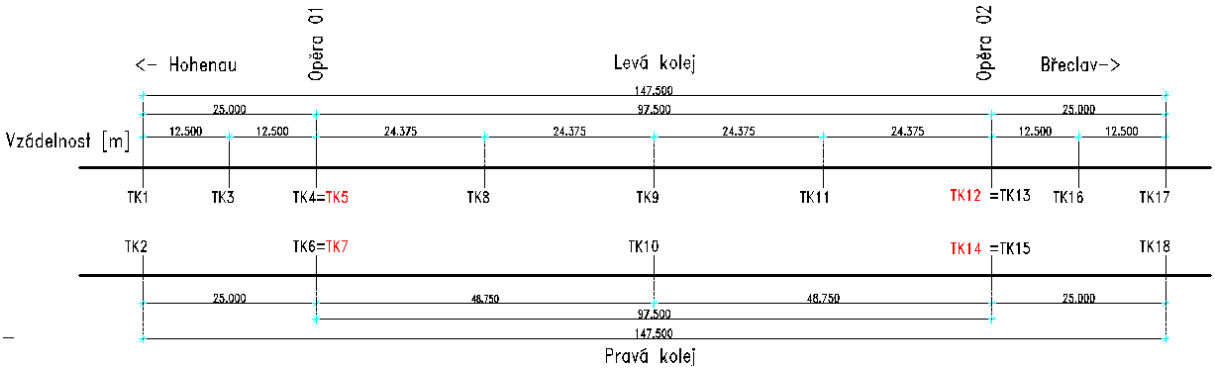
Pro měření poměrných deformací, ze kterých jsou následně vypočítávány napětí, jsou použity odporové tenzometry mřížky HBM 10/120LY11. Okolí místa nalepení tenzometrů, je chráněno proti korozi zinkovým nátěrem. Ochrana před nepříznivými klimatickými jevy je tvořena vrstvami gelu SG250 a tmelu 1-AK22. Všechny tenzometry jsou umístěny do těžišť měřených prvků. Podle potřeby jsou tenzometry zapojeny tenzometrického čtvrtmostu, polomostu nebo plného mostu.

**Obrázek 30:Umístění tenzometrů do těžiště měřeného prvku, vlevo: kolejnice, vpravo: kotevní tyč SŘDM**

#### *5.1.1.2 Tenzometry na kolejnicích*

Tenzometry jsou přilepeny na obou kolejnicích NOK1 v takové hustotě, abychom byly schopni vyčíslit přesný průběh napětí od teplotních nebo provozních zatížení. Na levé kolejnici se nachází celkem 11 tenzometrů, na pravé 7 tenzometrů. Tenzometry jsou umístěny do obou předpolí do vzdálenosti cca 25m od opěr, nad opěry a celkem 4 tenzometry jsou rozmístěny na kolej na mostě tak, aby vzdálenost mezi opěrami rozdělovaly na 4 stejné části. Tenzometry jsou na kolejnice instalovány tak, aby se nacházely mezi pražci, což zapříčiňuje odchylku od plánované polohy o zhruba 20-30cm. Umístění mezi pražci si klade za cíl to, aby byly všechny tenzometry vystaveny stejnému teplotnímu sálání.

Tenzometry jsou zřízeny v tenzometrickém čtvrtmostu, vyjma „špičkových“ tenzometrů, nacházejících se nad opěrami, které jsou zřízeny v tenzometrickém půlmostu. Při přejezdu kola drážního vozidla se na záznamu z těchto tenzometrů objeví výrazná špička. Tyto tenzometry slouží k určení rychlosti přejezdů vlakových souprav.




Obrázek 31: Schéma rozmístění tenzometrů, červeně – tenzometrické polomosty

Tenzometry byly také umístěny na tři kompenzační kolejnice o délce cca půl metru. Tyto kolejnice jsou volně položené v obou předpolích a uprostřed mostu. Díky jejich volné dilataci je možné změřit jejich poměrné přetvoření způsobené od teplotních účinků, které lze následně převést na normálové napětí, které od těchto účinků vzniká v kolejnicích kolejového roštu.

Obrázek 32: Kompenzační kolejnice

### 5.1.1.3 Tenzometry na SŘDM

Na SŘDM každé nosné konstrukce jsou umístěny čtyři tenzometrické plné mosty. Umístěny jsou na kotevních tyčích zhruba v místě líců krajních příčníků. Na řídících tyčích jsou umístěny na jejich koncích.

Obrázek 33: Plný tenzometrický most – kotevní tyč. [5]

#### 5.1.1.4 Tenzometry uprostřed rozpětí krajních příčníků (není součástí DP)

Doprostřed krajních příčníků NOK1 a NOK2 byly umístěny tenzometry uspořádané do tenzometrického polomostu.

Obrázek 34: Tenzometrický polomost měřící poměrnou deformaci krajního příčníku. [5]

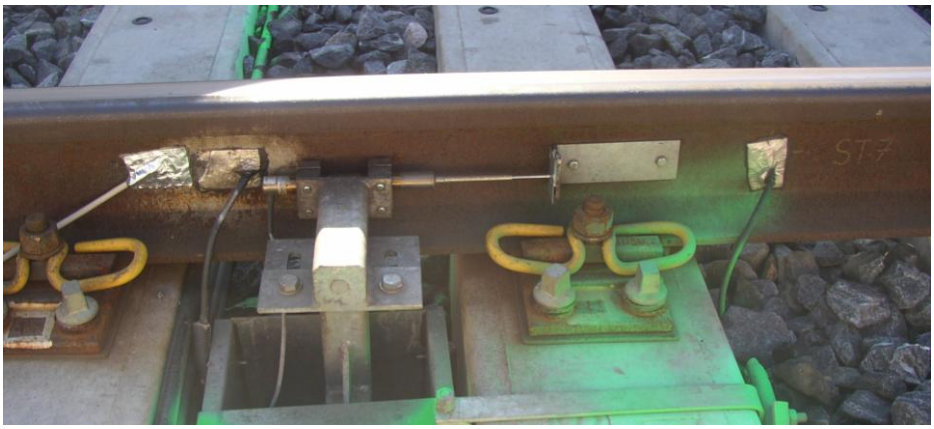
#### 5.1.1.5 Měření posunu koleje

K měření posunu levé koleje vůči mostu na NOK1 jsou použity induktivní snímače dráhy, typu Megatron ISDT50-K2405-rozsah 0-50mm, IP68. Snímače jsou umístěny nad oběma opěrami do předem určeného přípravku, který je zapuštěn v kolejovém loži.

Označení snímačů:

NOK1: ISD1 – snímač nad opěrou směr Hohenau

ISD2 – snímač nad opěrou směr Břeclav

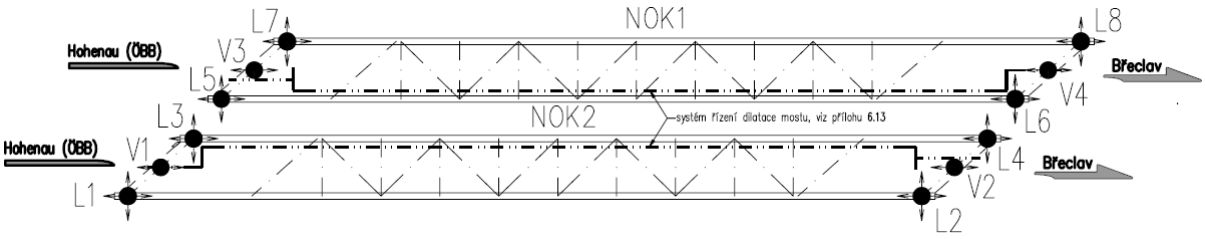


Obrázek 35: Snímač Megatron ISDT50-K2405

### 5.1.1.6 Měření posunu mostu

Posun obou nosných konstrukcí je měřen v místě vodících ložisek. Měřen je potenciometrickým snímačem Megatron MSLPC 100 D 5K 1M5 s rozsahem 0-100m.

Obrázek 36: Potenciometrický snímač dráhy MSLPC 100 D 5K 1M5. [5]




Obrázek 37:Schéma ložisek. [4]

Označení snímačů:

NOK1: PSD1 – snímač u vodícího ložiska V3, směr Hohenau

PSD2 – snímač u vodícího ložiska V4, směr Břeclav

NOK2: PSD5 – snímač u vodícího ložiska V1, směr Hohenau

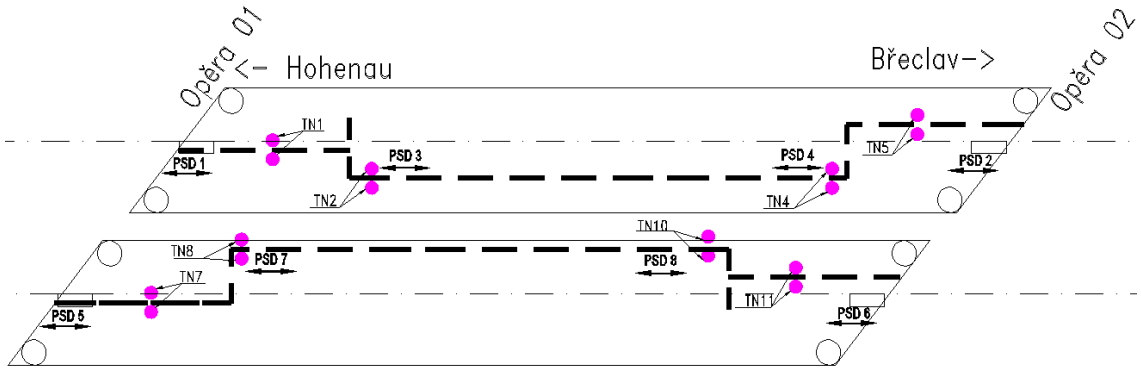
PSD7 – snímač u vodícího ložiska V2, směr Břeclav

### 5.1.1.7 Posun SŘDM

Je měřen potenciometrickým snímačem Megatron MSLPC 100 D 5K 2M5 s rozsahem 0-200mm. Snímač je umístěn na koncích řídících tyčí NOK1 a NOK2 a měří její relativní posun vůči příčníku.

Obrázek 38: Snímač MSLPC 100 D 5K 2M5

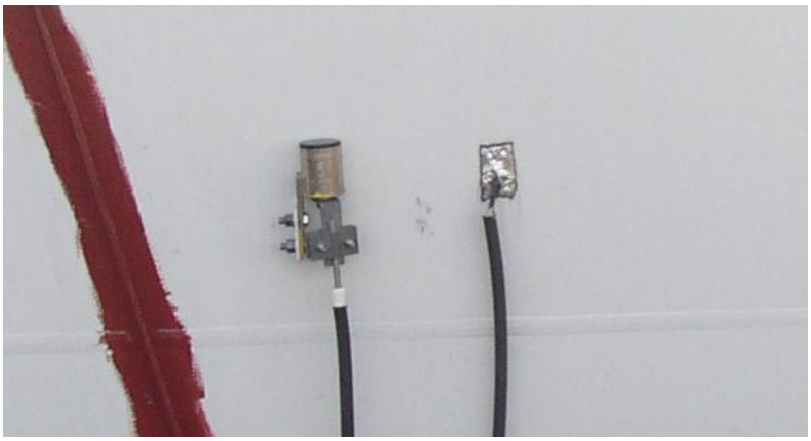
NOK1: PSD3 – snímač u konce řídící tyče směr Hohenau
PSD4 – snímač u konce řídící tyče směr Břeclav
NOK2: PSD7 – snímač u konce řídící tyče směr Hohenau
PSD8 – snímač u konce řídící tyče směr Břeclav




Obrázek 39: Schéma rozmístění snímačů pro měření interakce koleje a mostu

### 5.1.1.8 Měření teploty

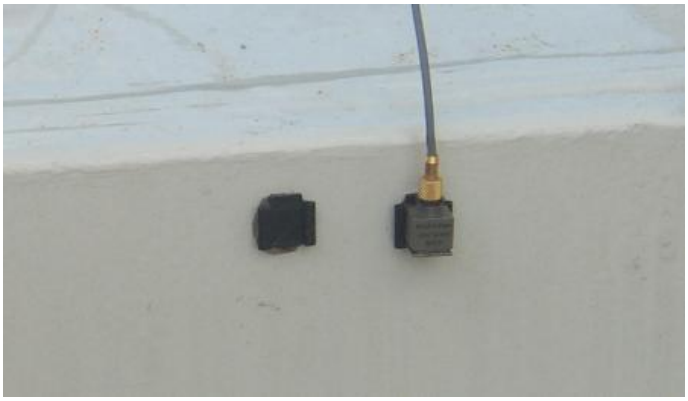
Teplota je měřena teplotními čidly Analog Devices AD 592. Teplota je měřena na nosné konstrukci a na kolejnicích. V rámci brzdných zkoušek nebyla teplota vyhodnocována.



Obrázek 40: Snímač teploty na NOK1 (vpravo)

#### *5.1.1.9 Snímače zrychlení (není předmětem DP)*

NOK1 byla osazena snímači zrychlení ADXL326 od společnosti Analog Devices s rozsahem do 5g. Účelem zřízení těchto snímačů je měření změny tuhosti nosné konstrukce a kolejového lože.



Obrázek 41: Snímač zrychlení ADXL326

### 5.1.2 Měřící ústředny

Pro měření, uložení a přenos dat je použita dvojice ústředen EMS DV 803.

Ústředna EMS DV 803 měří 32 hlavních a 16 pomocných kanálů. Měří tenzometry, akcelerometry, termočlánky, odporové teploměry a napěťové a proudové vstupy. Její vzorkovací frekvence je 3200Hz. Přesnost měření je 0,1%. Data jsou ukládána do paměti ústředny. Data lze stáhnout do osobního počítače nebo poslat do cílového počítače přes Wi-fi. Provozní teplota ústředny je od -20 do 75 $^{o}$C.

Obrázek 42: Ústředna EMS DV 803. [5]

První ústředna s pracovním názvem Master (MJ-1) se nachází v předpolí NOK1 na straně Hohenau. Druhá ústředna s pracovním názvem Slave (MJ-1) se nachází v předpolí NOK1 na straně Břeclav. Do obou ústředen jsou kabely Li2YCYv a Li2YCY přiváděna naměřená data ze snímačů. Obě ústředny snímají s krokem 0,02 s

Obrázek 43: Ústředna Master (MJ-1) - strana Hohenau. [5]

Obrázek 44: Ústředna Slave (MJ-2) - strana Břeclav. [5]

Do ústředny Master (MJ-1) jsou zapojeny tyto snímače:

| Master ústředna (MJ-1) - zapojení | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Kanál | Označení | Popis | NK | Zapojení |
| S01 | TN1 | Tenzometr NK | 1 | Plný most |
| S02 | TN3 | Tenzometr NK | 1 | Polomost |
| S03 | TN2 | Tenzometr NK | 1 | Plný most |
| S04 | TN9 | Tenzometr NK | 2 | Polomost |
| S05 | TN7 | Tenzometr NK | 2 | Plný most |
| S06 | TK1 | Tenzometr kolejnice | 1 | *Čtvrtmost* |
| S07 | TN9 | Tenzometr NK | 2 | Plný most |
| S08 | TK2 | Tenzometr kolejnice | 1 | *Čtvrtmost* |
| S09 | TK3 | Tenzometr kolejnice | 1 | *Čtvrtmost* |
| S10 | TK4 | Tenzometr kolejnice | 1 | *Čtvrtmost* |
| S11 | TK5 | Tenzometr kolejnice | 1 | Polomost |
| S12 | TK6 | Tenzometr kolejnice | 1 | *Čtvrtmost* |
| S13 | TK7 | Tenzometr kolejnice | 1 | Polomost |
| S14 | TK8 | Tenzometr kolejnice | 1 | *Čtvrtmost* |
| S15 | TK9 | Tenzometr kolejnice | 1 | *Čtvrtmost* |
| S16 | TK10 | Tenzometr kolejnice | 1 | *Čtvrtmost* |
| S17 | TK19 | Tenzometr kolejnice | 1 | *Čtvrtmost* |
| S18 | A1 | Akcelerometr NK | 1 | Zrychlení |
| S19 | A4 | Akcelerometr NK | 1 | Zrychlení |
| S20 | A5 | Akcelerometr NK | 1 | Zrychlení |
| S21 | PSD1 | Snímač dráhy | 1 | Potenciometrický snímač |
| S22 | PSD3 | Snímač dráhy | 1 | Potenciometrický snímač |
| S23 | *PSD5* | *Snímač dráhy* | *2* | Potenciometrický snímač |
| S24 | *PSD7* | *Snímač dráhy* | *2* | Potenciometrický snímač |
| S25 | ST1 | Teplota | 1 | Teploměr |
| S26 | ST2 | Teplota | 1 | Teploměr |
| S27 | ST3 | Teplota | 1 | Teploměr |
| S28 | ST4 | Teplota | 1 | Teploměr |
| S29 | ST7 | Teplota | 1 | Teploměr |
| S30 | STK | Teplota komp. Kolej. | 1 | Teploměr |
| S31 | ISD1 | Snímač dráhy | 1 | Induktivní snímač |
| S32 | synchronizace | | 1 | |

**Tabulka 3: Zapojení snímačů do ústředny Master (MJ-1). [6]**

Do ústředny Slave (MJ-2) jsou zapojeny tyto snímače:

| Slave ústředna (MJ-2) - zapojení | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Kanál | Označení | Popis | NK | Zapojení |
| S01 | TN4 | Tenzometr NK | 1 | Plný most |
| S02 | TN6 | Tenzometr NK | 1 | Polomost |
| S03 | TN5 | Tenzometr NK | 1 | Plný most |
| S04 | TN12 | Tenzometr NK | 2 | Polomost |
| S05 | TN10 | Tenzometr NK | 2 | Plný most |
| S06 | TK11 | Tenzometr kolejnice | 1 | *Čtvrtmost* |
| S07 | TN11 | Tenzometr NK | 2 | Plný most |
| S08 | TK12 | Tenzometr kolejnice | 1 | Polomost |
| S09 | TK13 | Tenzometr kolejnice | 1 | *Čtvrtmost* |
| S10 | TK14 | Tenzometr kolejnice | 11 | Polomost |
| S11 | TK15 | Tenzometr kolejnice | 1 | *Čtvrtmost* |
| S12 | TK16 | Tenzometr kolejnice | 1 | *Čtvrtmost* |
| S13 | TK17 | Tenzometr kolejnice | 1 | *Čtvrtmost* |
| S14 | TK18 | Tenzometr kolejnice | 1 | *Čtvrtmost* |
| S15 | TK20 | Tenzometr kolejnice | 1 | *Čtvrtmost* |
| S16 | TK21 | Tenzometr kolejnice | 1 | *Čtvrtmost* |
| S17 | - | neobsazen | 1 | - |
| S18 | A2 | Akcelerometr NK | 1 | Zrychlení |
| S19 | A3 | Akcelerometr NK | 1 | Zrychlení |
| S20 | A6 | Akcelerometr NK | 1 | Zrychlení |
| S21 | PSD2 | Snímač dráhy | 1 | Potenciometrický snímač |
| S22 | PSD4 | Snímač dráhy | 1 | Potenciometrický snímač |
| S23 | *PSD6* | *Snímač dráhy* | *2* | Potenciometrický snímač |
| S24 | *PSD8* | *Snímač dráhy* | *2* | Potenciometrický snímač |
| S25 | ST5 | Teplota | 1 | Teploměr |
| S26 | ST6 | Teplota | 1 | Teploměr |
| S27 | ST8 | Teplota | 1 | Teploměr |
| S28 | ST9 | Teplota | 1 | Teploměr |
| S29 | STV | Teplota | 2 | Teploměr |
| S30 | STK2 | Teplota komp. kolej. | 1 | Teploměr |
| S31 | ISD2 | Snímač dráhy | 1 | Induktivní snímač |
| S32 | synchronizace | | 1 | |

**Tabulka 4: Zapojení snímačů do ústředny Slave (MJ-2). [6]**

## 5.2 Zatěžovací zkoušky

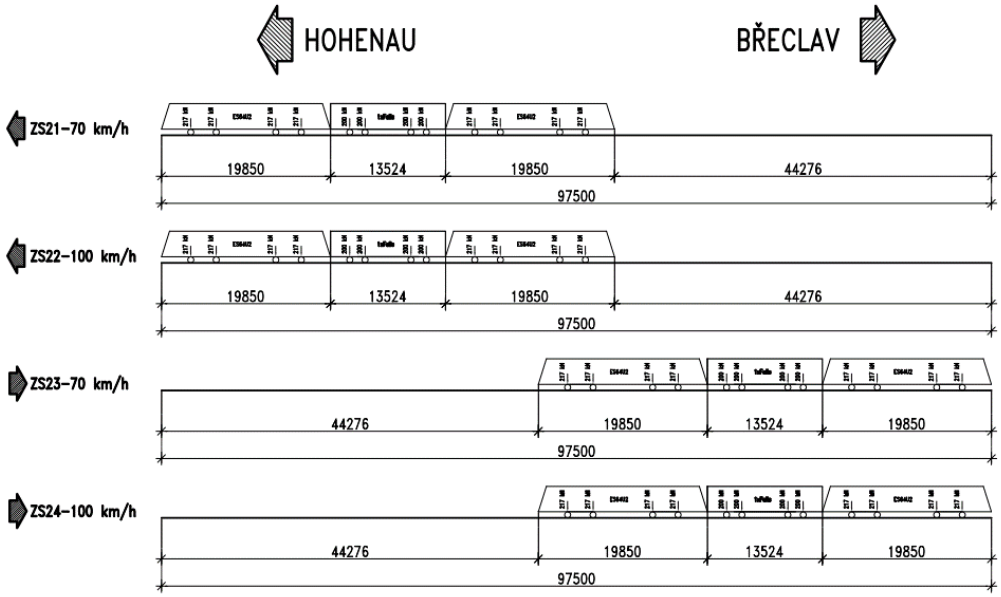
Ve dnech 24.8. a 25.8.2016 byly obě nosné konstrukce podrobeny zatěžovacím zkouškám.

Dne 24.8 byla na NOK1 provedena dynamická a brzdná zatěžovací zkouška. Cílem dynamické zatěžovací zkoušky bylo vyvolání maximálních dynamických účinků táhel. Účelem brzdných zkoušek bylo vyvolání maximálních silových účinků v SŘDM.

Dne 25.8 byla NOK2 osazena snímači, které snímaly chování konstrukce od zatížení běžnou železniční dopravou. Jeden vlak byl vybrán, aby na mostě zastavil. To mělo ověřit účinek SŘDM na brzdné síly.

### 5.2.1 Brzdná zatěžovací zkouška NOK1

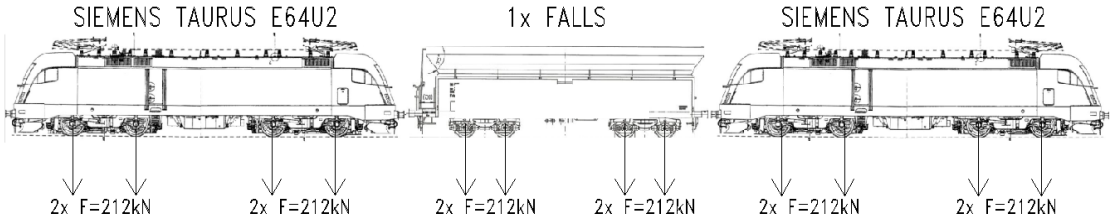
Brzdná zatěžovací zkouška NOK1 proběhla odpoledne v čase mezi 13:10 a 13:45. Účelem této zkoušky bylo vyvolání maximálních sil v SŘDM. Při zatěžovací zkoušce bylo vyžadováno, aby vlaková souprava zastavila na předem definovaném místě a brzdila pokud možno s největším účinkem, následně se souprava měla rozjet s co největším zrychlením proti směru původní jízdy. Předem byly definovány celkem čtyři zatěžovací stavy, kdy dva zatěžovací stavy měly být ve směru Břeclav – Hohenau. První zatěžovací stav byl koncipován tak, že souprava pojede 70km/h rychlostí a začne naplno brzdit, při druhém zatěžovacím stavu jela souprava rychlostí 100km/h. Stejně se postupovalo i ze směru Hohenau – Břeclav.




Obrázek 45:Schéma původně plánovaných zatěžovacích stavů. [7]

Zatěžovacím břemenem byla souprava Siemens Taurus ES64U2 + 1x plně naložený nákladní Falls + Siemens Taurus ES64U2. Ke konci brzdné zatěžovací zkoušky bylo rozhodnuto odpojit od soupravy Falls a pokračovat jen s dvojicí lokomotiv Taurus. Předpokládalo se, že dvojice samotných Taurusů může vyvinout větší brzdné účinky.

Zatěžovacích stavů bylo provedeno víc, než bylo původně plánováno, neboť se několikrát stalo, že se strojvůdcům nepodařilo zastavit na předem definovaném místě.




Obrázek 46: Zatěžovací souprava brzdné zatěžovací zkoušky

| Číslo pokusu | Kód přejezdu | Počáteční rychlost brždění [km·h$^{-1}$] | Směr jízdy | Poznámka |
|---|---|---|---|---|
| 23 | ZS211 | 70 | 1 | |
| 24 | ZS211A | 70 | 1 | Opakovaný pokus |
| 25 | ZS211B | 70 | 1 | Opakovaný pokus |
| 26 | ZS221 | 100 | 1 | x) |
| 27 | ZS221A | 100 | 1 | x) |
| 28 | ZS232 | 70 | 2 | |
| 29 | ZS232A | 70 | 2 | |
| 30 | ZS242 | 100 | 2 | |
| 31 | ZS221B | 100 | 1 | |
| 32 | ZS251 | 60 | 2 | o) |
| 33 | ZS251A | 70 | 1 | o) |

Tabulka 5: Stručný přehled zatěžovacích stavů brzdné zkoušky. x - přejeté místo zstavení, o – jen dvojice lokomotiv Taurus, ZS končící 1 – směr Břeclav - Hohenau, ZS končící 2 – směr Hohenau – Břeclav. [6]

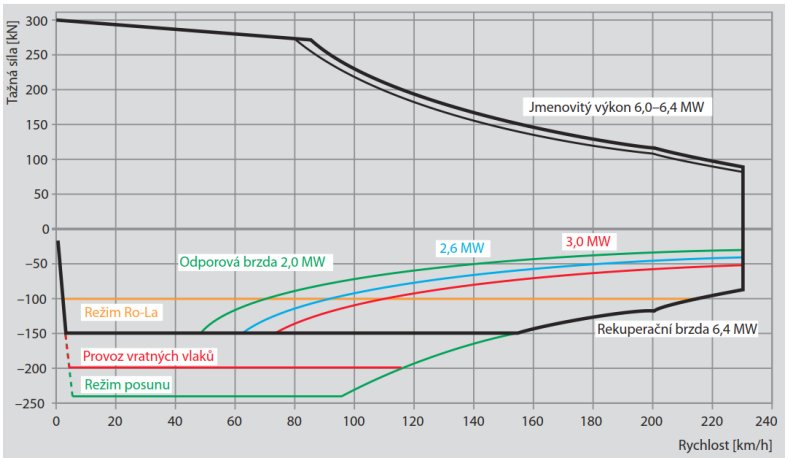
#### *5.2.1.1 Parametry zkušebního zatížení*

Lokomotiva Siemens Taurus ES64U2

Základní údaje:

- hmotnost 87t
- tažná síla 300kN
- maximální rychlost 230km/h
- délka přes nárazníky 19 850 mm
- rozvor podvozku 3000 mm
- vzdálenost čepů podvozků 9900 mm

Obrázek 47: Lokomotiva Siemens Taurus ES64U2




Obrázek 48: Obálka brzdné a rozjezdové síly v závislosti na rychlosti a provozním režimu. [7]

Nákladní vůz Falls

- maximální hmotnost 80 t
- maximální rychlost 100 km/h
- délka přes nárazníky 13 524 mm
- rozvor podvozku 1800 mm
- vzdálenost čepů podvozků 7200 mm

Obrázek 49: Nákladní vůz Falls

# 6 Vyhodnocení brzdných zatěžovacích zkoušek NOK1

Pro vyhodnocení brzdných zatěžovacích zkoušek byly z dlouhodobého monitoringu využity tyto snímače:

Tenzometry TK1 – TK18 na kolejnicích

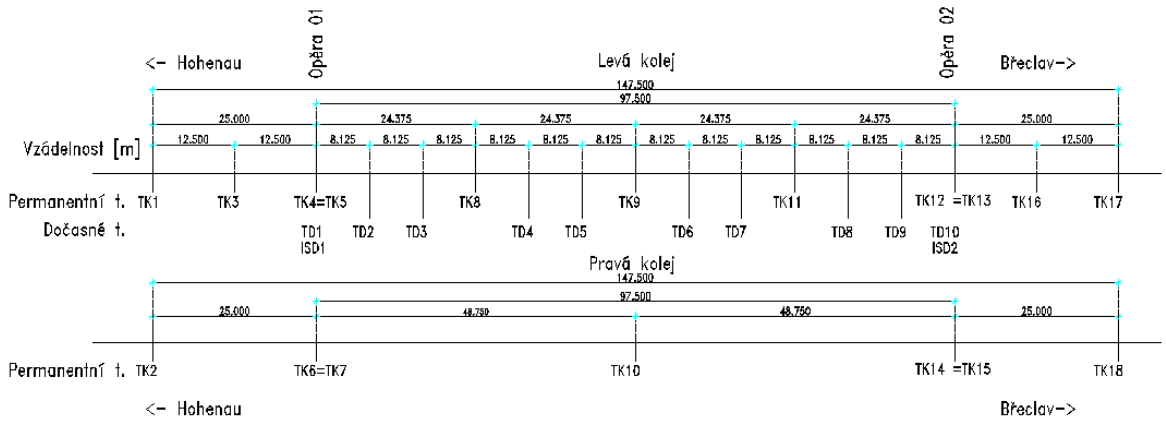
Potenciometrické snímače dráhy PSD1, PSD2 snímající posun NOK1

Potenciometrické snímače dráhy PSD3, PSD4 umístěné na řídící tyči NOK1

Induktivní snímače dráhy ISD1 a ISD2 snímající posun koleje NOK1

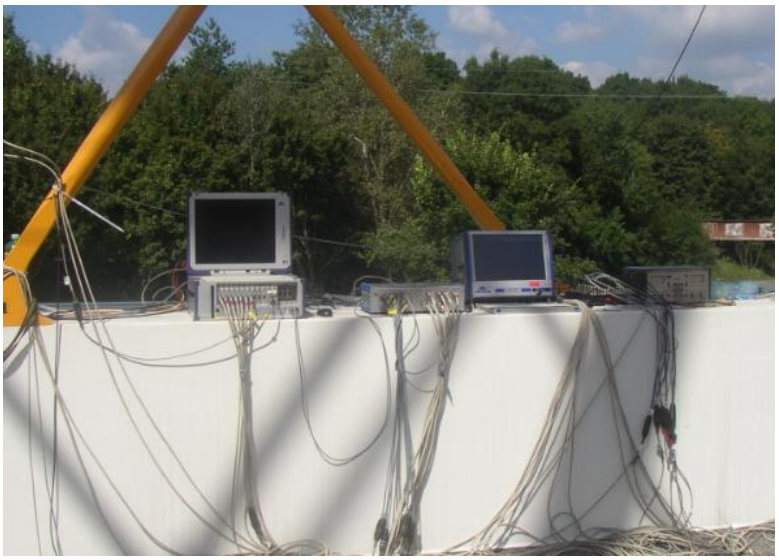
Dále bylo na levou kolejnici umístěno deset „špičkových“ tenzometrů TKD1 - TDK10, snímající pouze čas přejezdu náprav zatěžovacího vlaku. Dva tenzometry byly umístěny nad obě opěry. Tyto tenzometry sloužily k určení rychlosti vlaku během dynamických zatěžovacích zkoušek, dále je bylo možno využít k synchronizaci dat z ústředen Master a Slave. Ostatní „špičkové“ tenzometry byly umístěny na kolej na mostě za účelem sledování polohy zatěžovacího vlaku.

Záznam z těchto tenzometrů byl veden kabely do ústředny Dewetron. Vzorkování probíhalo s krokem 0,01s.




Obrázek 50: Rozmístění tenzometrů s doplněnými dočasnými tenzometry

Obrázek 51: Schéma rozmístění snímačů PSD a TN



Obrázek 52: Pohled na ústředny použité při zatěžovacích zkouškách

## 6.1 Způsob stanovení vnitřních sil

Normálové síly

Kolejnice:

$N = (h_t - h_{poč}) \cdot 0{,}21 \cdot 1000 \cdot 0{,}00767$ [kN]

Řídící tyč a kotevní tyč:

$N = (h_t - h_{poč}) \cdot 0{,}21 \cdot 1000 \cdot A_{SŘDM} / 2{,}6$ [kN]

$h_t$ - hodnota poměrné deformace v čase t [-]

$h_{poč}$ - hodnota poměrné deformace cca 10-15 sekund před vjezdem vlaku na most [-]

0,21 - konstanta zohledňující modul pružnosti oceli a přesnost čtení tenzometru

1000 - konstanta převádějící vztah na kN [-]

0,00767 - plocha jedné kolejnice UIC60 [$m^2$]

$A_{SŘDM}$ - plocha řídící nebo kotevní tyče v [$m^2$]

2,6 - konstanta zohledňující zapojení tenzometrů do tenzometrického plného mostu [-]

V grafech normálových sil kolejnic byly vyhlazeny špičky, způsobené přejezdem kola přes tenzometr.

Posuny:

$u = (u_t - u_{poč})$ [mm]

$u_t$ - hodnota posunu v čase t [mm]

$u_{poč}$ - hodnota posunu cca 10-15 sekund před vjezdem vlaku na most [mm]

## 6.2 ZS 211

Čas: 14:16

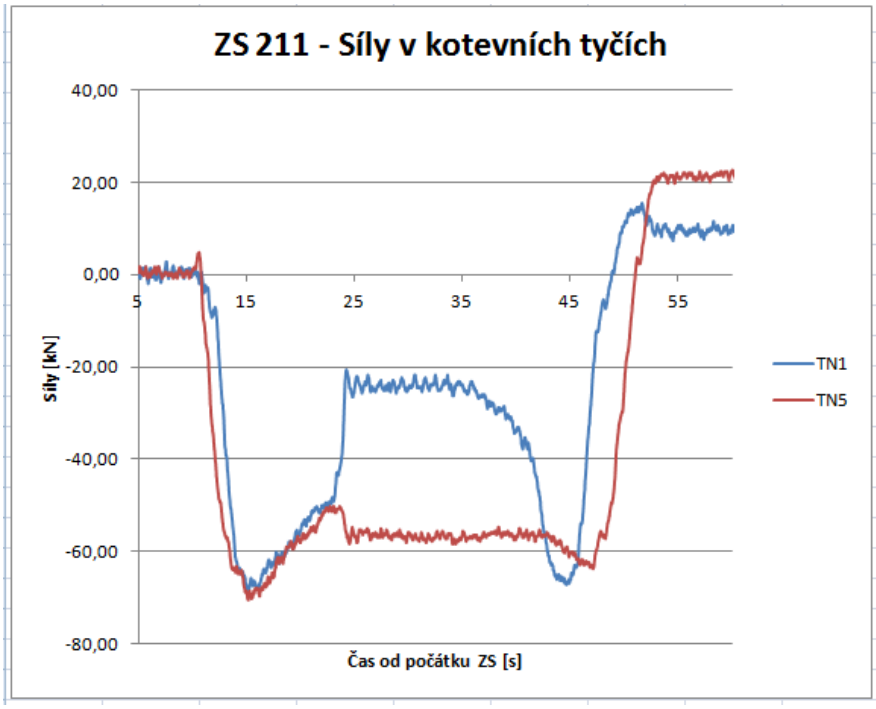
Brzdění z rychlosti: 70km/h

Směr brzdění: Z Břeclavi na Hohenau (ÖBB), následně rozjezd na Břeclav

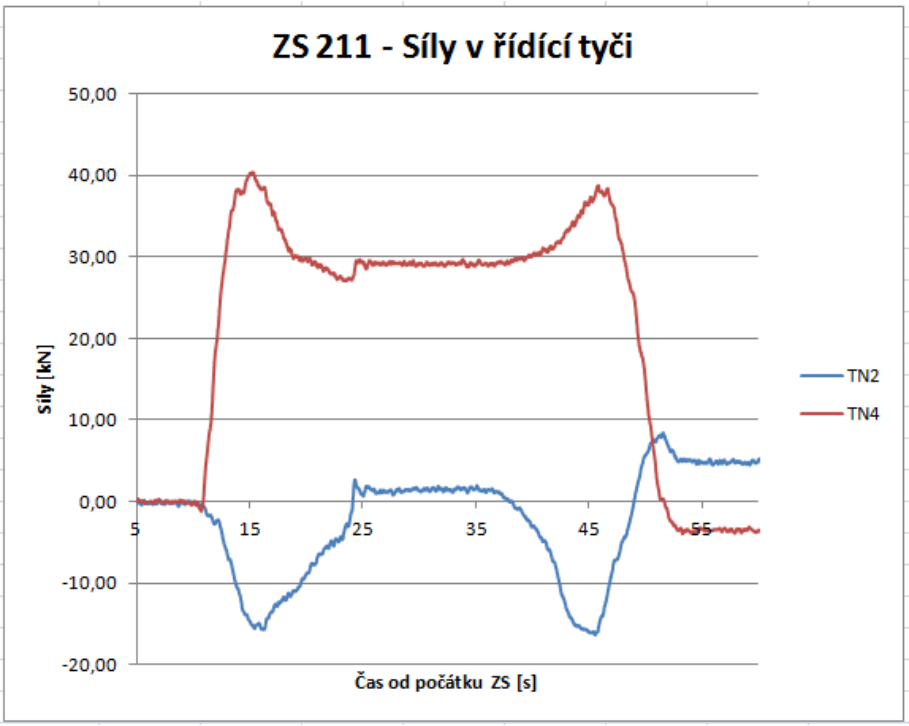
Vlak: Taurus + 1x Falls + Taurus

**◄ BŘECLAV** **HOHENAU (ÖBB) ►**

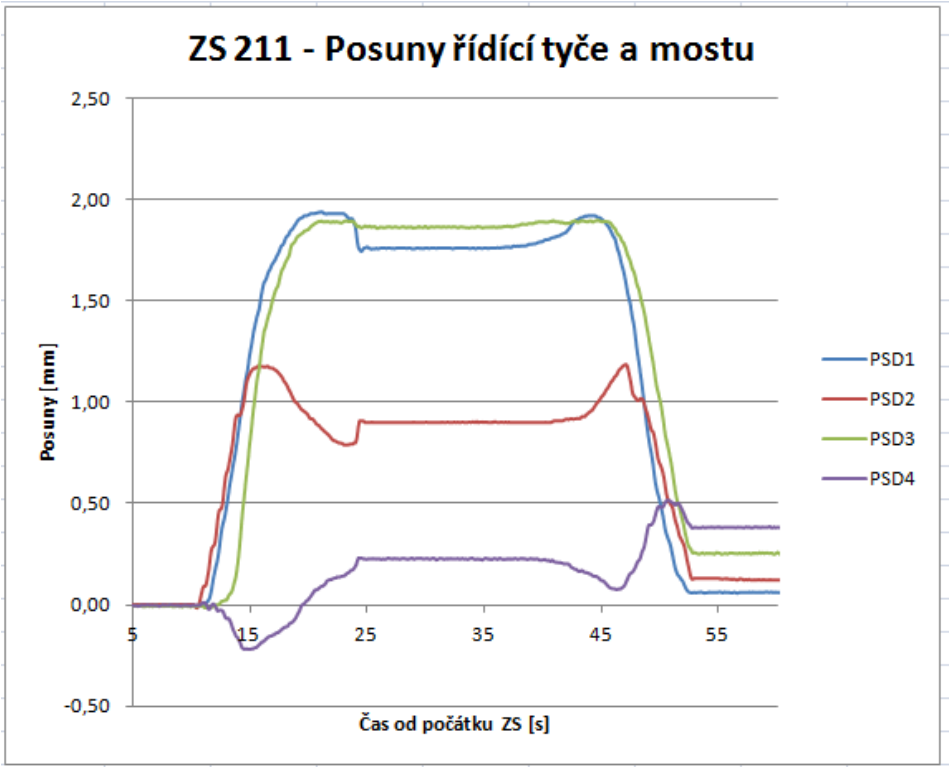
Obrázek 53: ZS211: Poloha vlaku po zastavení



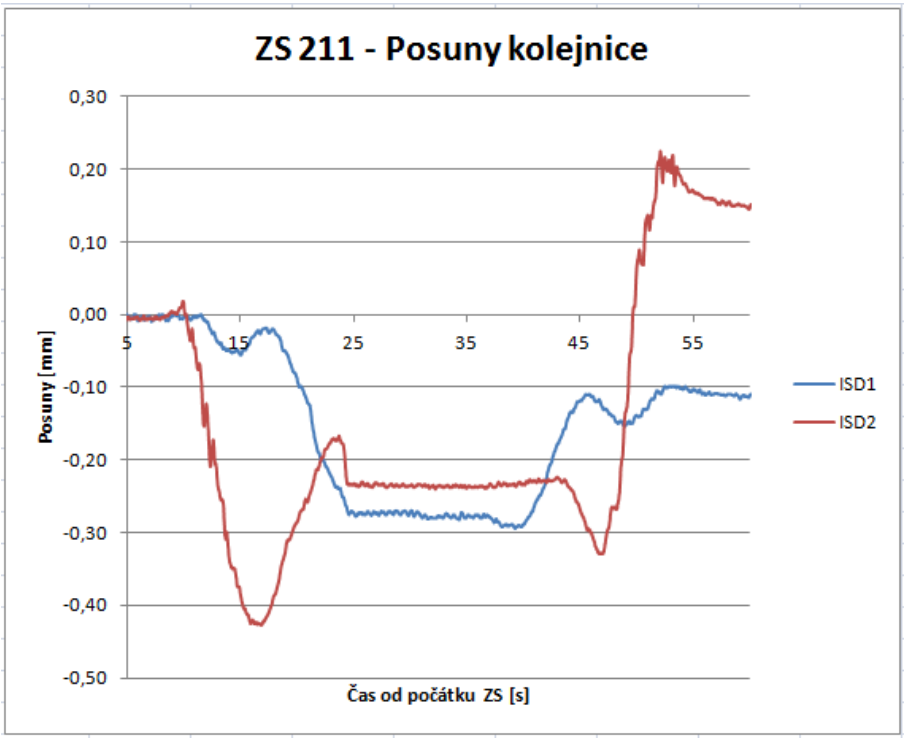

Obrázek 54: ZS211: Normálové síly v kotevních tyčích



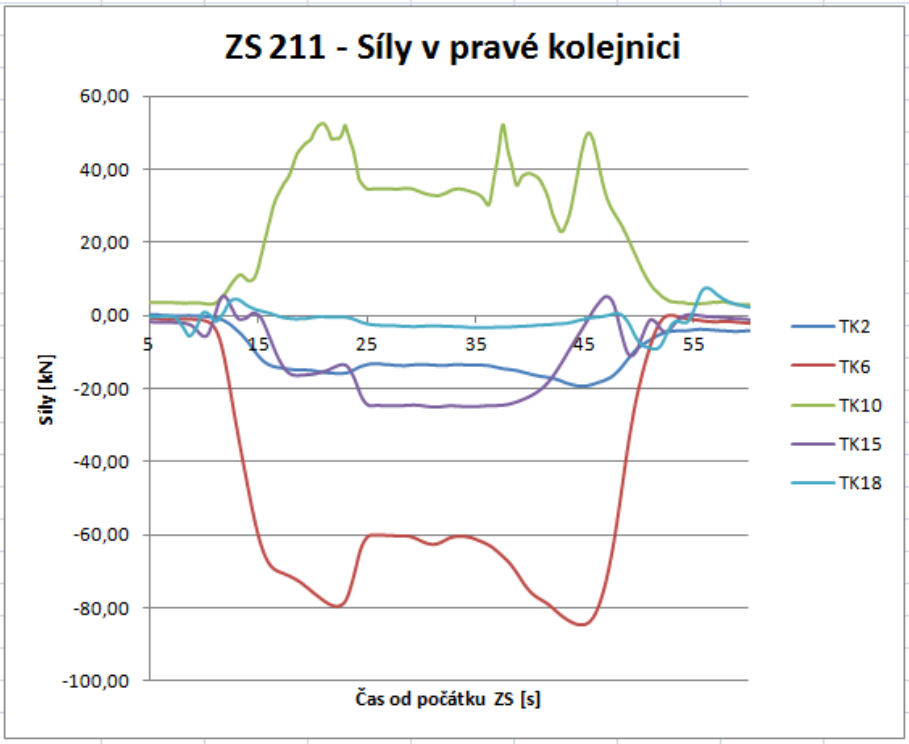

Obrázek 55: ZS211: Normálové síly v řídící tyči



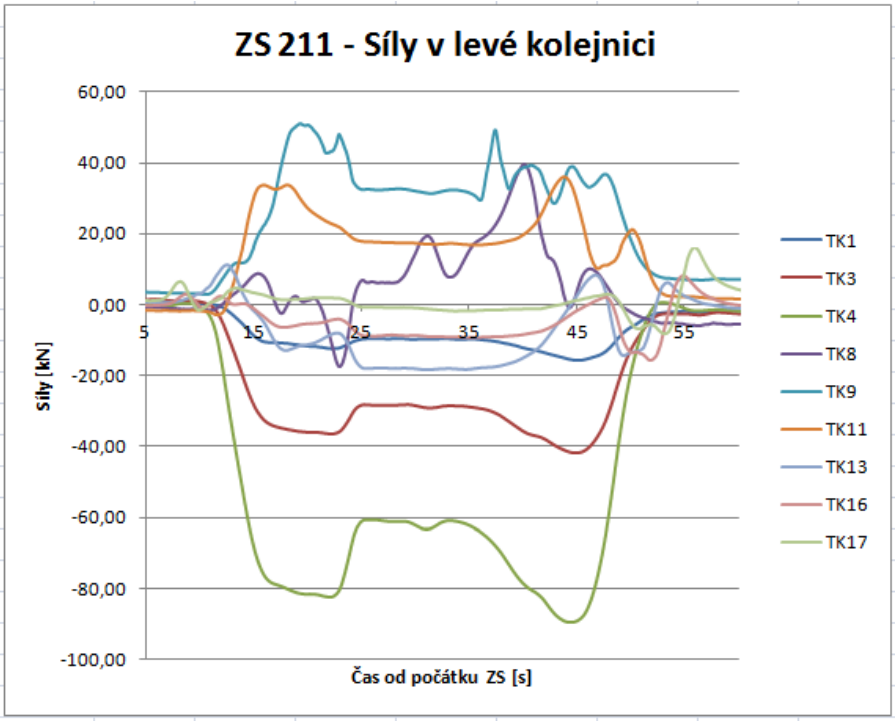

Obrázek 56: ZS211: Posun řídící tyče vůči příčníku a posun vodících ložisek NK




Obrázek 57: ZS211: Posuny levé kolejnice




Obrázek 58: ZS211: Normálové síly v pravé kolejnici




Obrázek 59: ZS211: Normálové síly v levé kolejnici

## 6.3 ZS 211A

Čas: 14:22

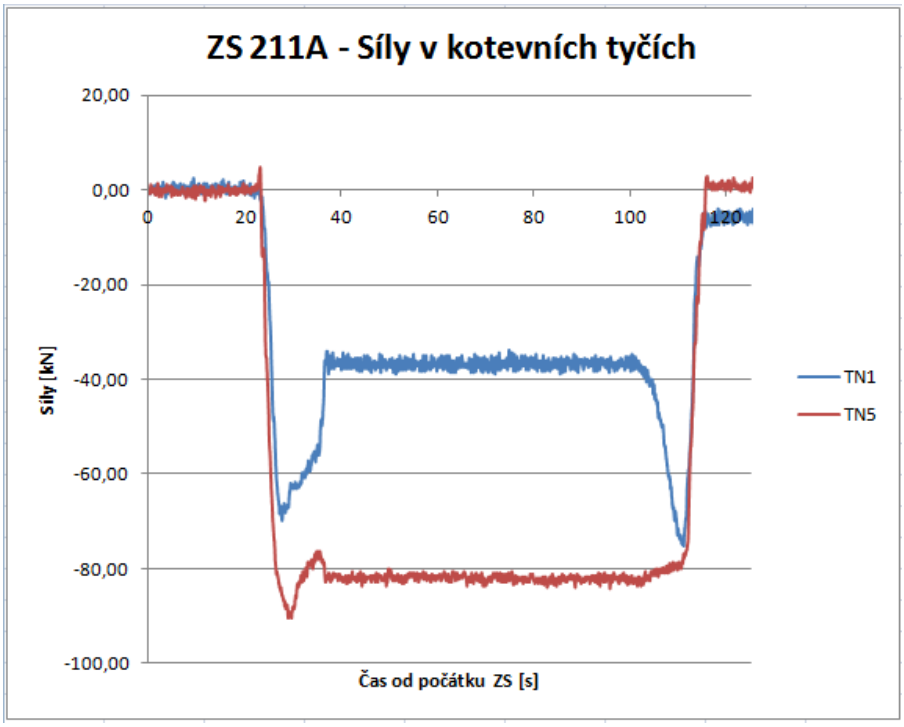
Brzdění z rychlosti: 70km/h

Směr brzdění: Z Břeclavi na Hohenau (ÖBB), následně rozjezd na Břeclav

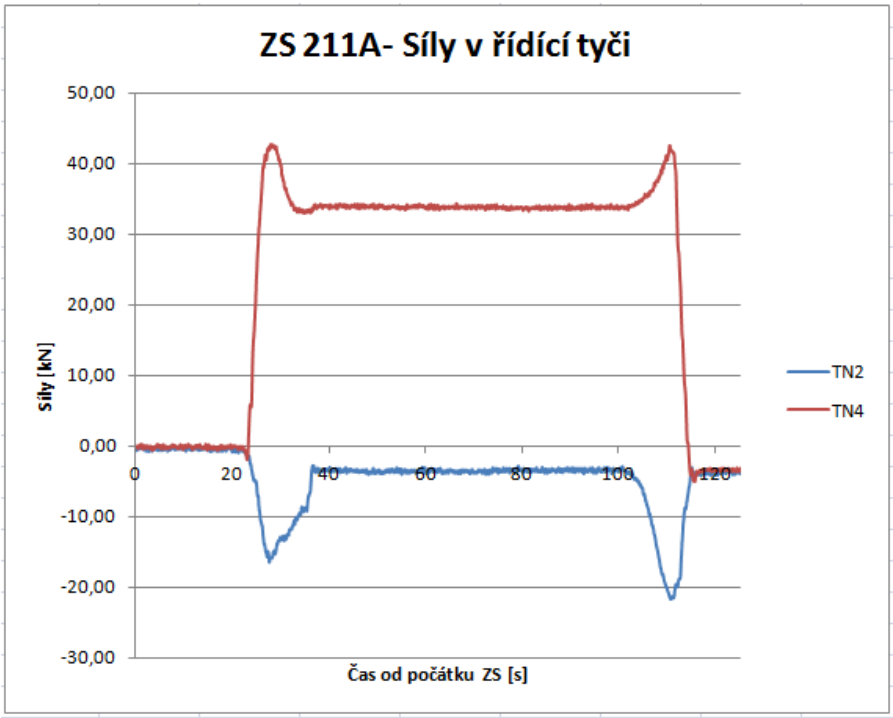
Vlak: Taurus + 1x Falls + Taurus

**◄ BŘECLAV** **HOHENAU (ÖBB) ►**

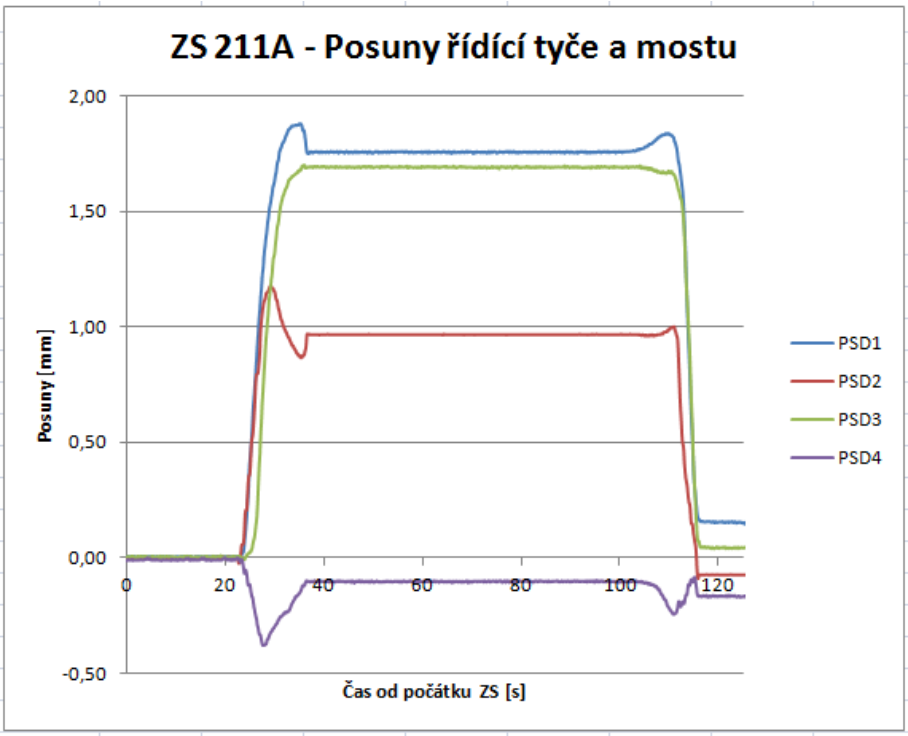
Obrázek 60: ZS211A: Poloha vlaku po zastavení



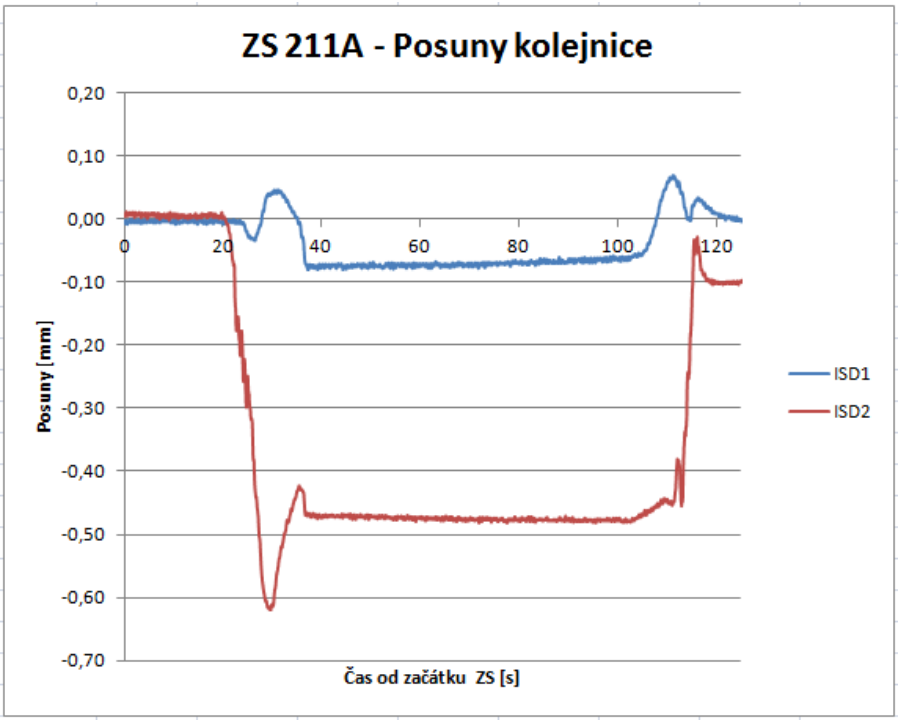

Obrázek 61: ZS211A – Normálové síly v kotevních tyčích



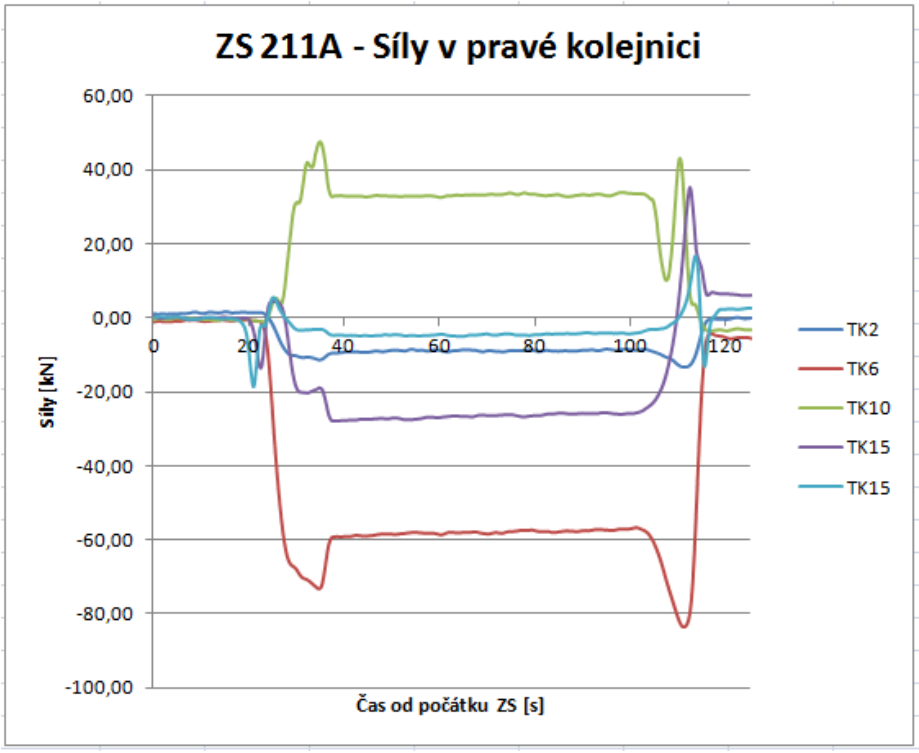

Obrázek 62: ZS211A: Normálové síly v řídící tyči



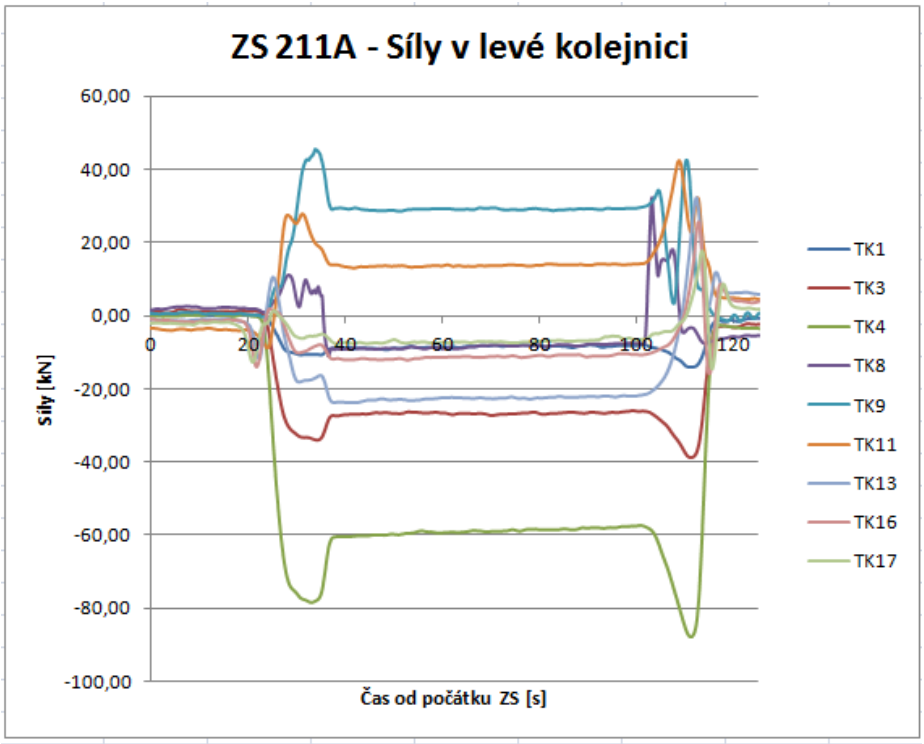

Obrázek 63: ZS211A: Posun řídící tyče vůči příčníku a posun vodících ložisek NK




Obrázek 64: ZS211A: Posuny levé kolejnice




Obrázek 65: ZS211A: Normálové síly v pravé kolejnici




Obrázek 66: ZS211A: Normálové síly v levé kolejnici

## 6.4 ZS 211B

Čas: 14:32

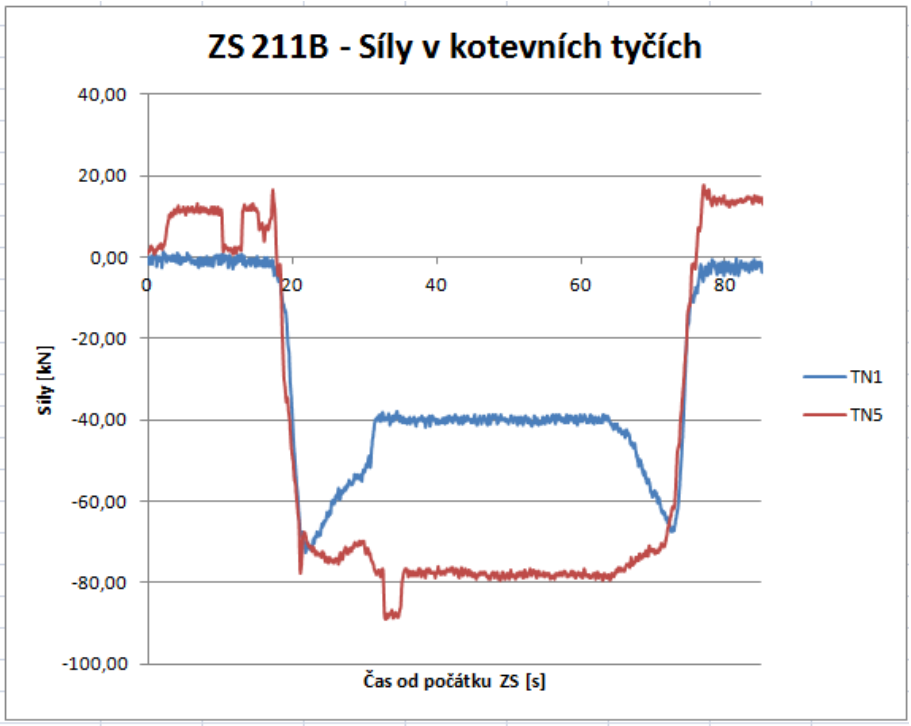
Brzdění z rychlosti: 70km/h

Směr brzdění: Z Břeclavi na Hohenau (ÖBB), následně rozjezd na Břeclav

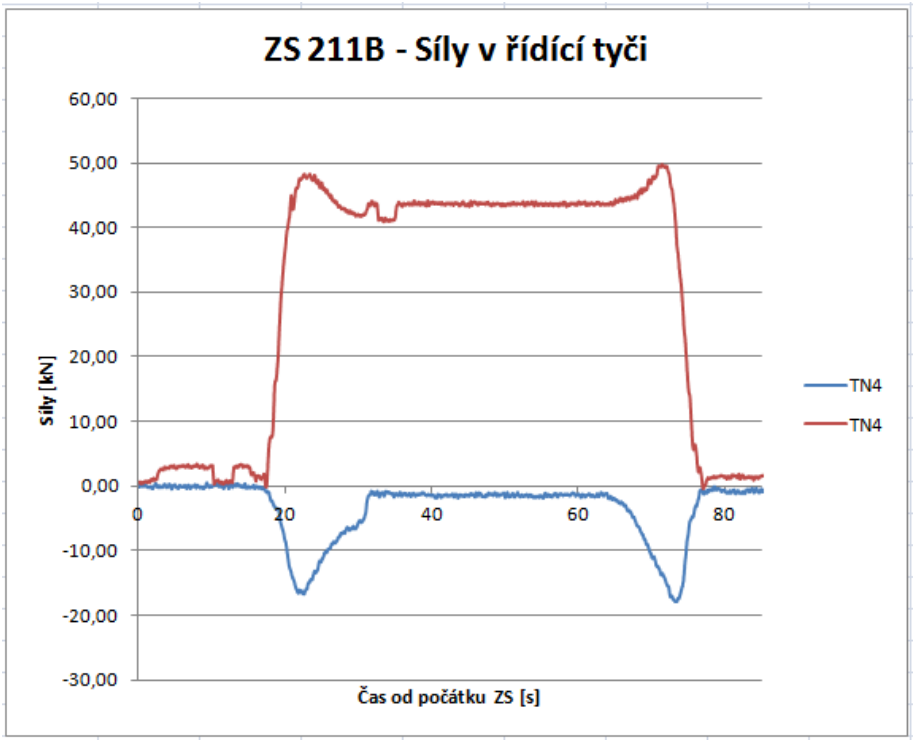
Vlak: Taurus + 1x Falls + Taurus

**◄ BŘECLAV** **HOHENAU (ÖBB) ►**

Obrázek 67: Z211B: Poloha vlaku po zastavení

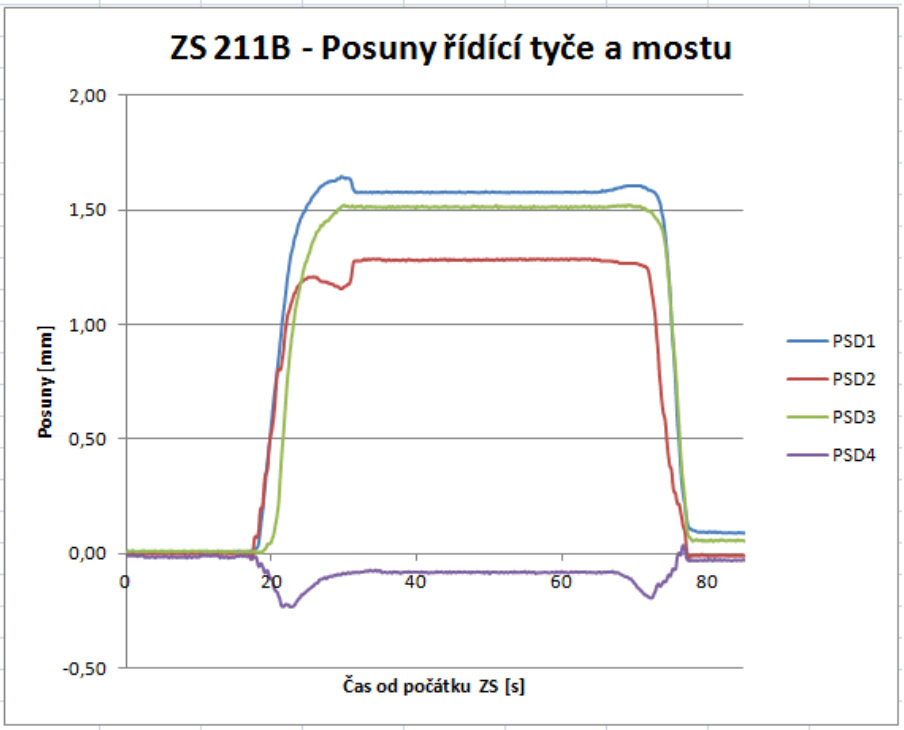



Obrázek 68: ZS211B: Normálové síly v kotevních tyčích

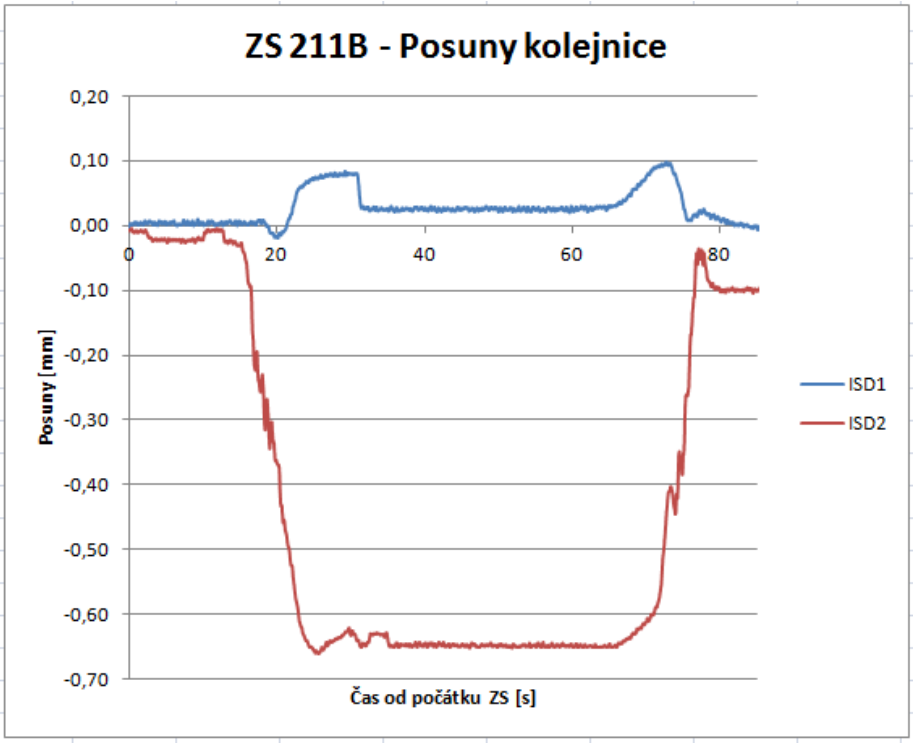



Obrázek 69: ZS211B: Normálové síly v řídící tyči

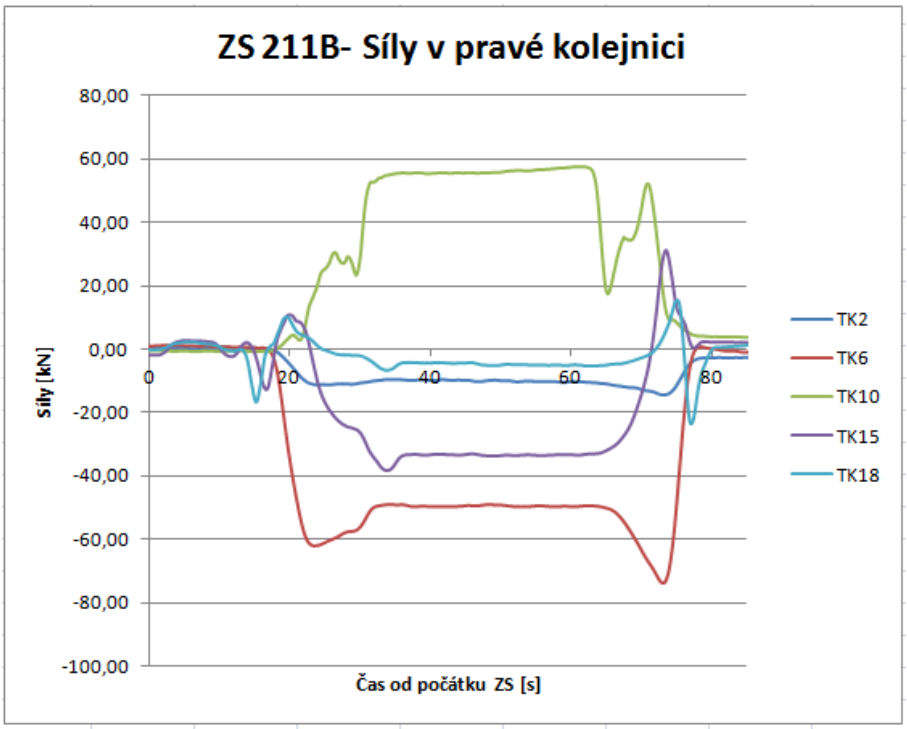
*Pozn: Skoky v s normálových silách TN1 a TN4 jsou způsobeny rozkmitáním NOK1 od přejezdu vlaku NOK2.*



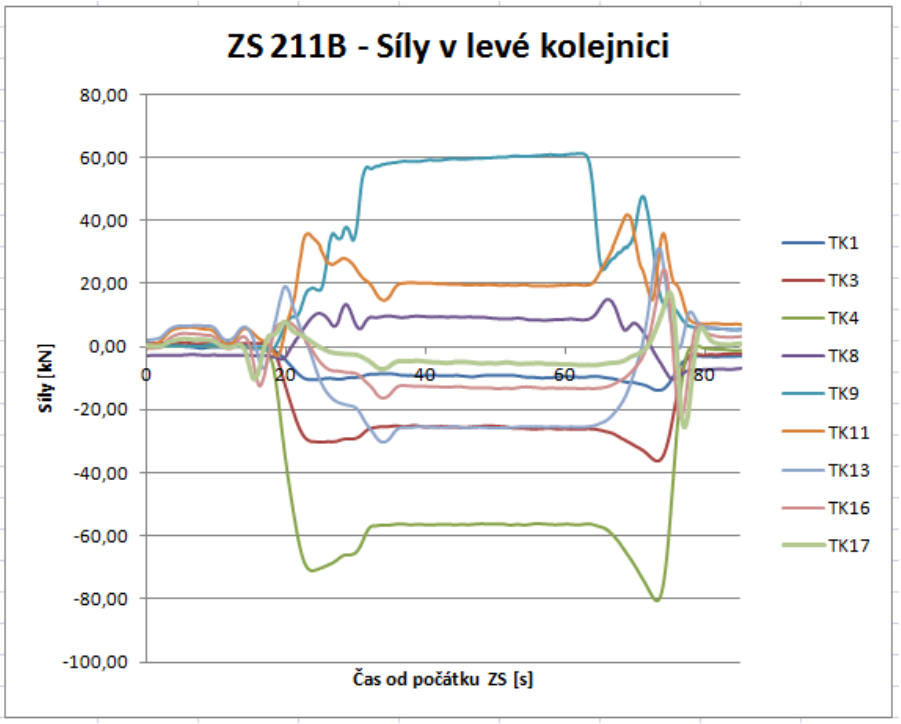

Obrázek 70: ZS211B: Posun řídící tyče vůči příčníku a posun vodících ložisek NK




Obrázek 71: ZS211B: Posuny levé kolejnice




Obrázek 72: ZS211B: Normálové síly v pravé kolejnici




Obrázek 73: ZS211B: Normálové síly v levé kolejnici

*Pozn: Síly v TK9 a TK10 jsou způsobeny od normálového namáhání v důsledku zastavení nápravy v blízkosti snímačů.*

## 6.5 ZS 221

Brzdění z rychlosti: 100km/h

Směr brzdění: Z Břeclavi na Hohenau (ÖBB)

Vlak: Taurus + 1x Falls + Taurus

*Komentář: Nepovedený stav, vlak přejel most. Systémy lokomotiv nedovolily zabrzdit naplno.*

## 6.6 ZS 221A

Čas: 14:46

Brzdění z rychlosti: 100km/h

Směr brzdění: Z Břeclavi na Hohenau (ÖBB)

Vlak: Taurus + 1x Falls + Taurus

*Komentář: Nepovedený stav, vlak přejel most. Selhání EDB systému v lokomotivách zapříčinilo nedostatečnou brzdící kapacitu a následné přejetí.*

## 6.7 ZS 232

Čas: 15:05

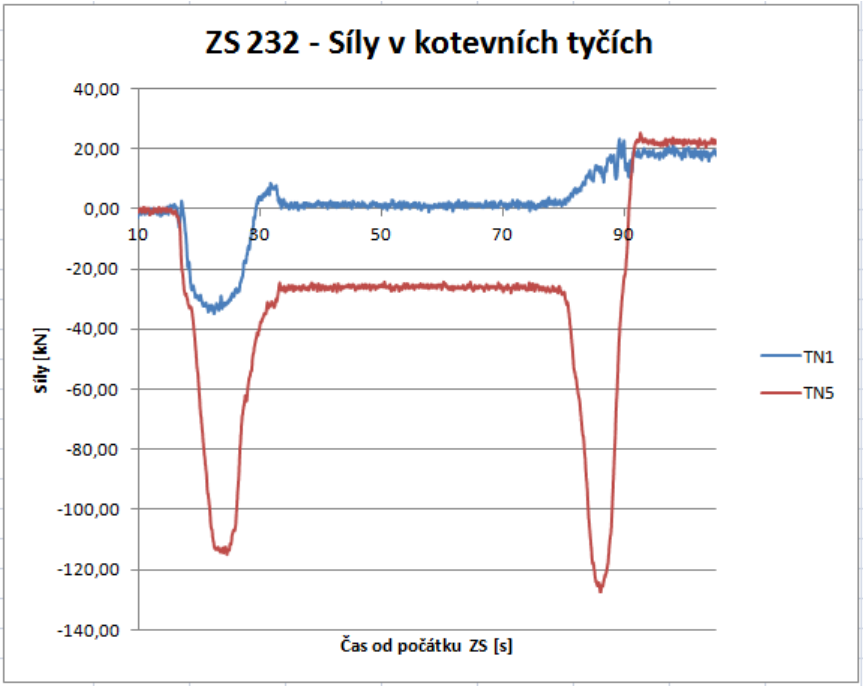
Brzdění z rychlosti: 70km/h

Směr brzdění: Z Hohenau (ÖBB) na Břeclav, následně rozjezd na Hohenau (ÖBB)

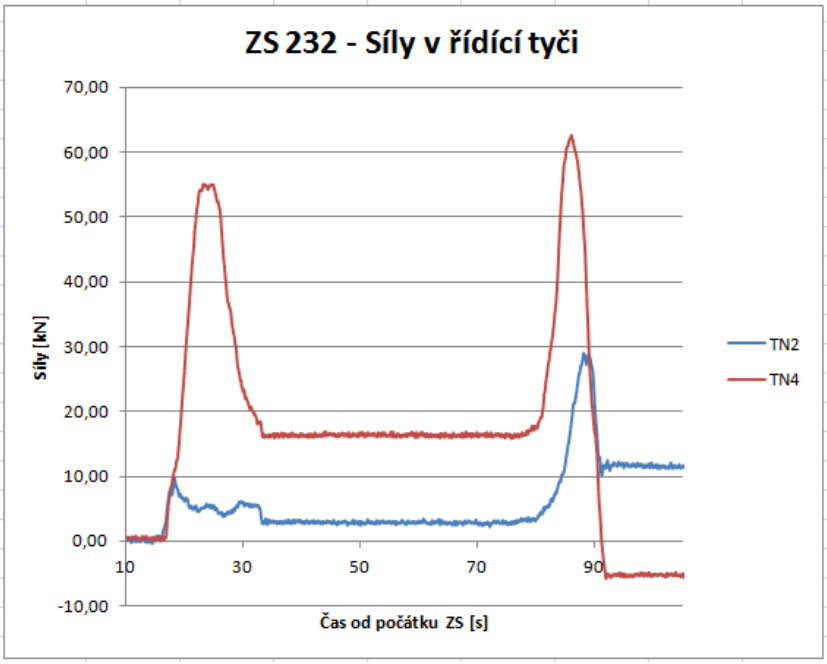
Vlak: Taurus + 1x Falls + Taurus

**◄ BŘECLAV** **HOHENAU (ÖBB) ►**

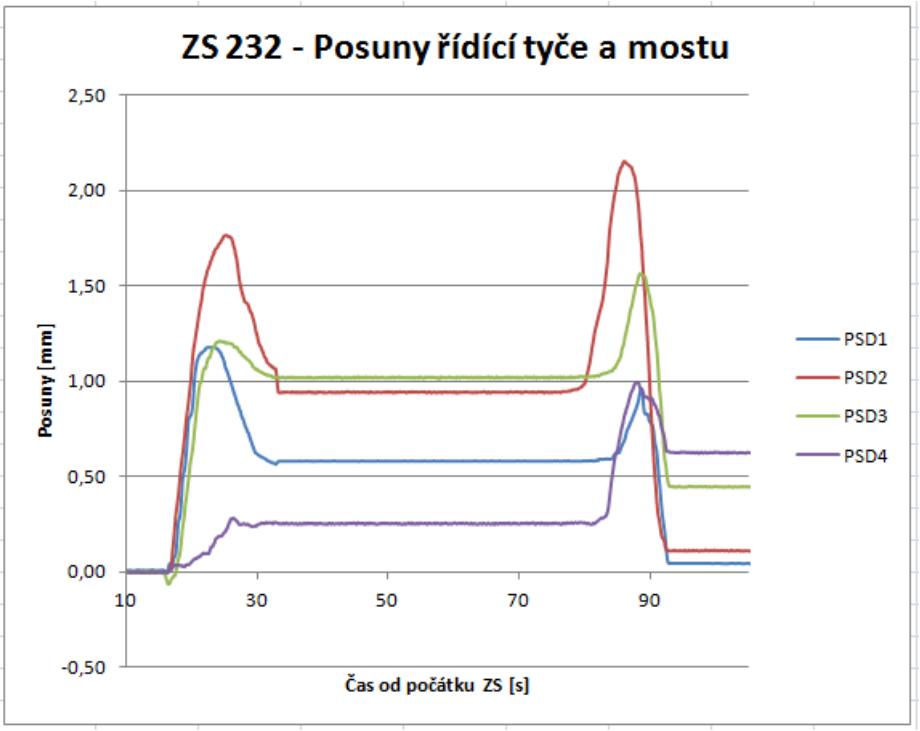
Obrázek 74: Z232: Poloha vlaku po zastavení



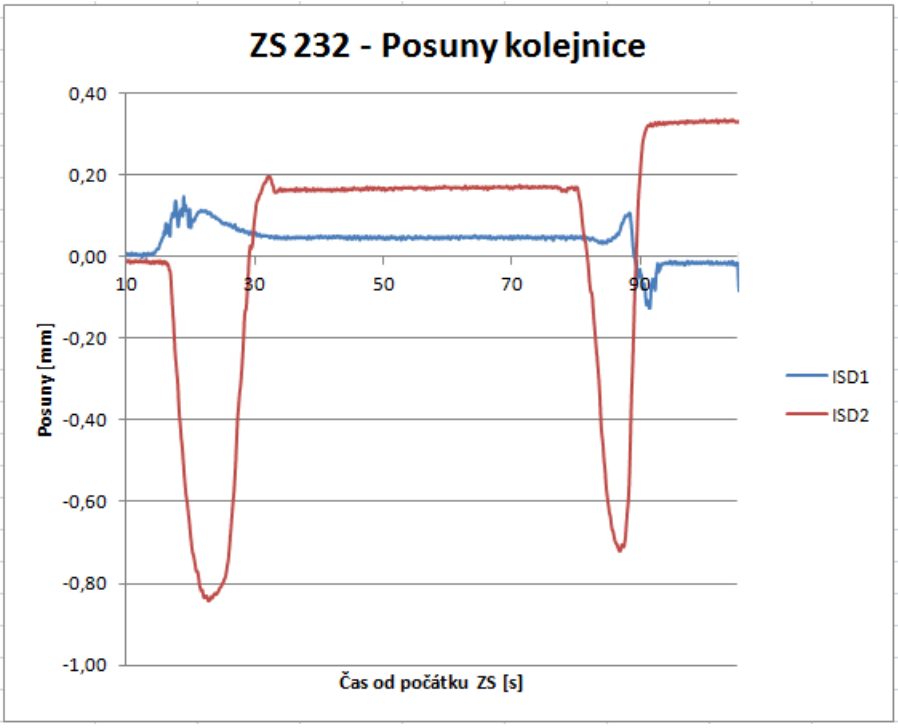

Obrázek 75: ZS232: Normálové síly v kotevních tyčích



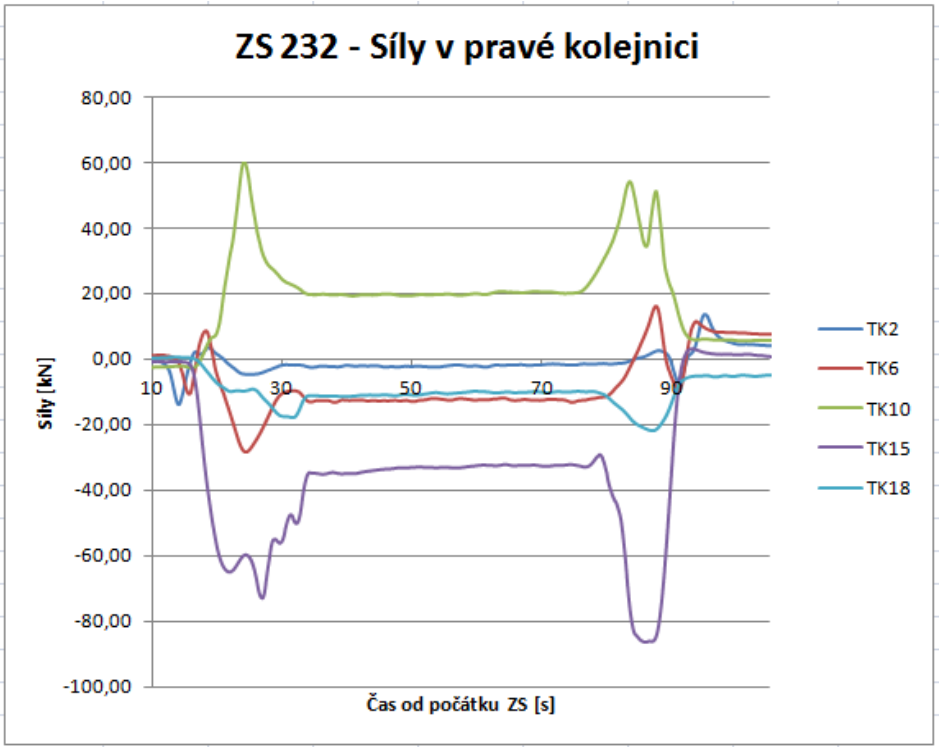

Obrázek 76: ZS232: Normálové síly v řídící tyči



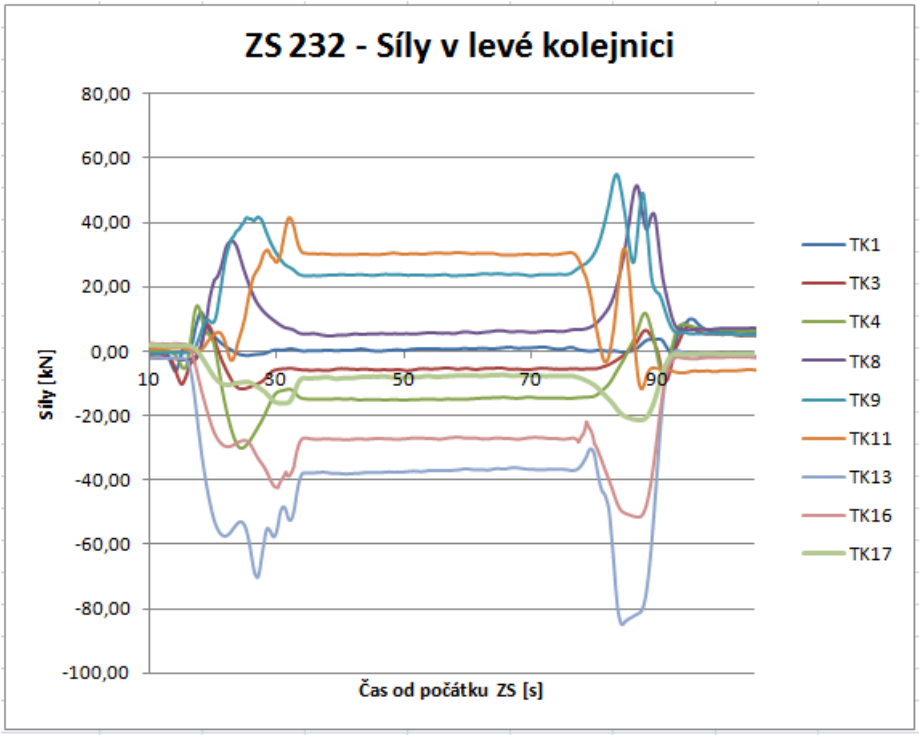

Obrázek 77: ZS232: Posun řídící tyče vůči příčníku a posun vodících ložisek NK




Obrázek 78: ZS232: Posuny levé kolejnice




Obrázek 79: ZS232: Normálové síly v pravé kolejnici




Obrázek 80: ZS232: Normálové síly v levé kolejnici

## 6.8 ZS 232A

Čas: 15:13

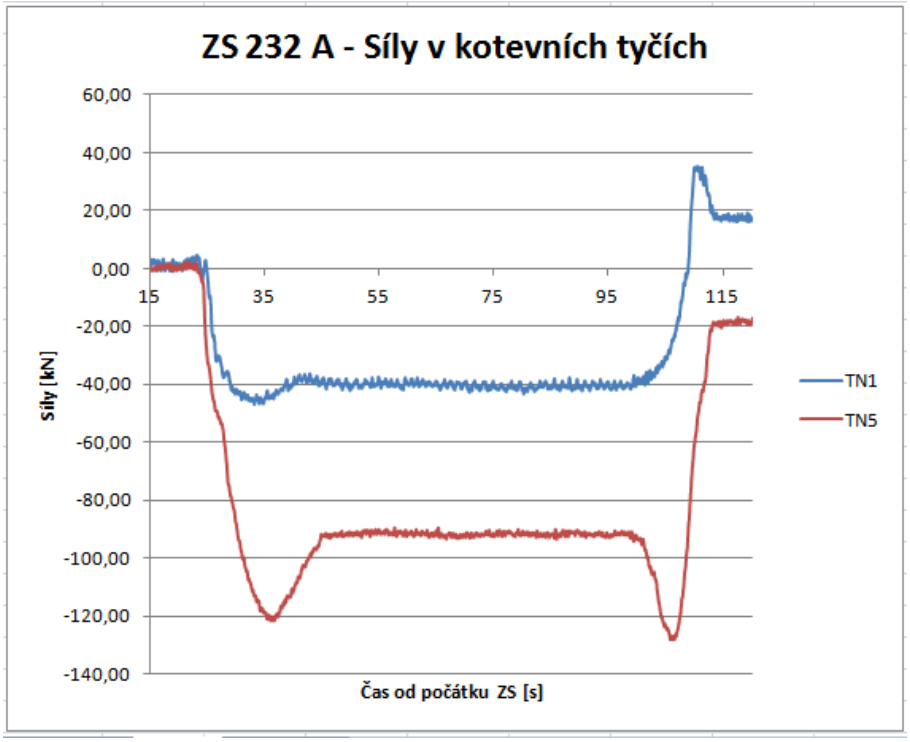
Brzdění z rychlosti: 70km/h

Směr brzdění: Z Hohenau (ÖBB) na Břeclav, následně rozjezd na Hohenau (ÖBB)

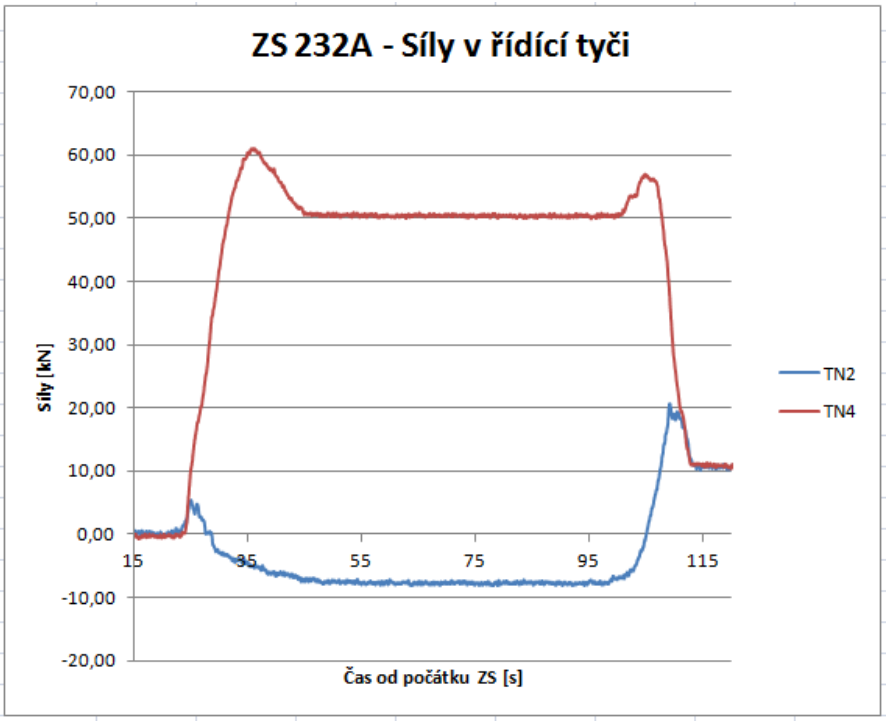
Vlak: Taurus + 1x Falls + Taurus

**◄ BŘECLAV** **HOHENAU (ÖBB) ►**

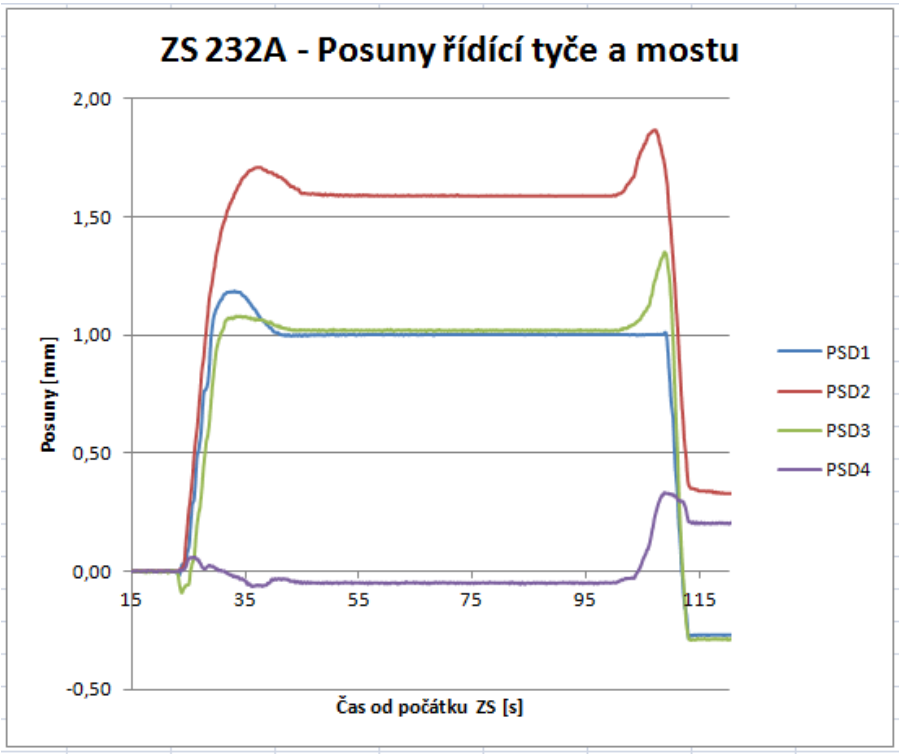
Obrázek 81: ZS 232A: Poloha vlaku po zastavení



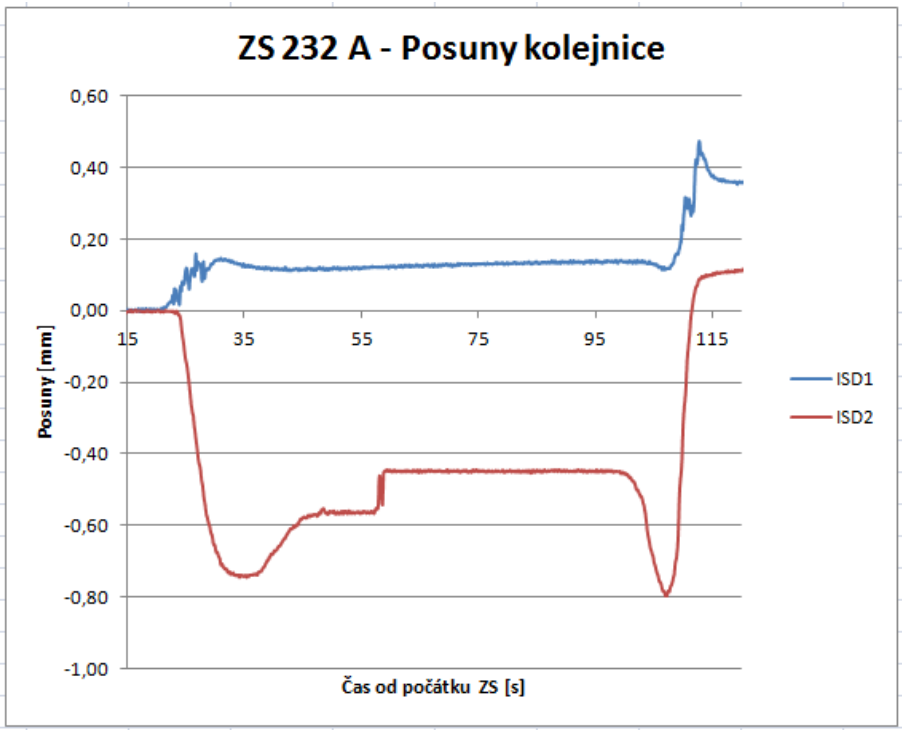

Obrázek 82: ZS232A: Normálové síly v kotevních tyčích



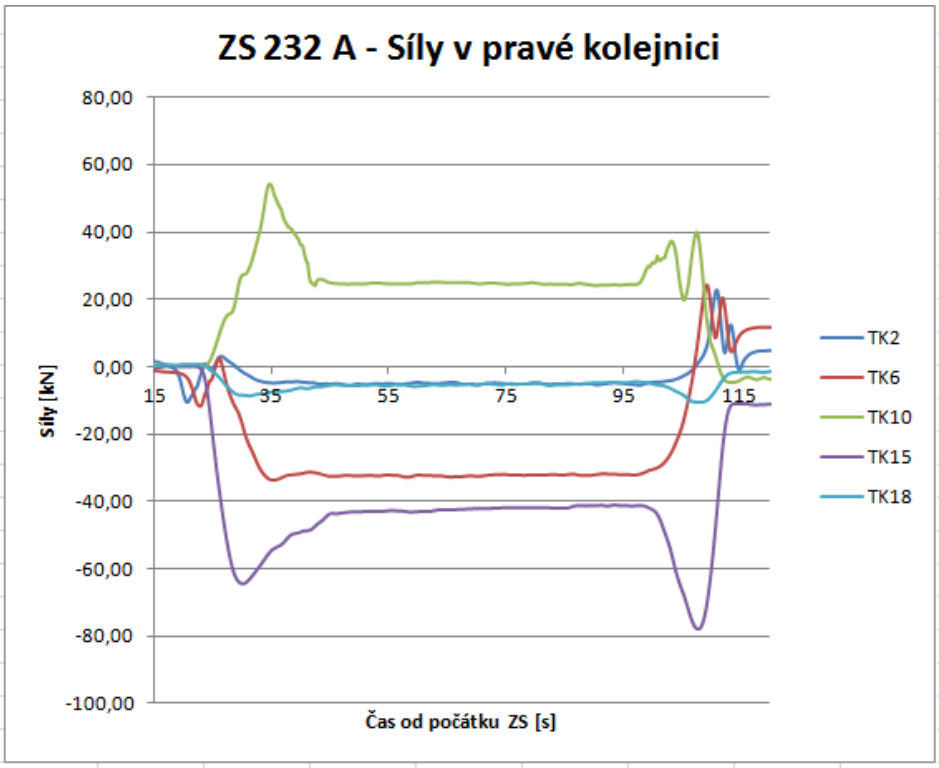

Obrázek 83: ZS232A: Normálové síly v řídící tyči



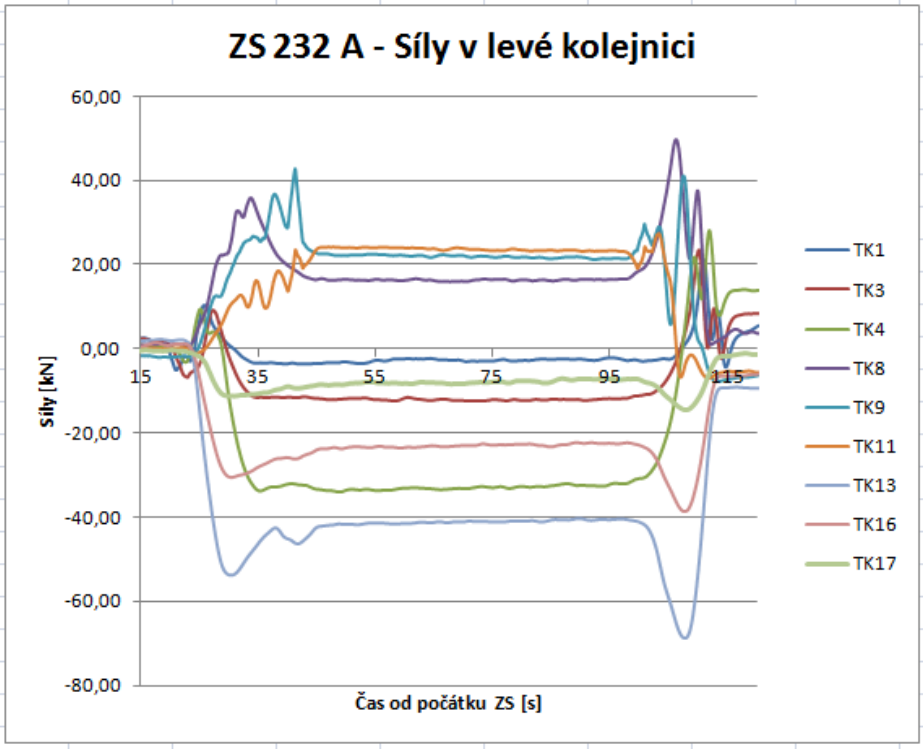

Obrázek 84: ZS232A: Posun řídící tyče vůči příčníku a posun vodících ložisek NK




Obrázek 85: ZS232A: Posuny levé kolejnice




Obrázek 86: ZS232A: Normálové síly v pravé kolejnici




Obrázek 87: ZS232A: Normálové síly v levé kolejnici

## 6.9 ZS 242

Čas: 15:27

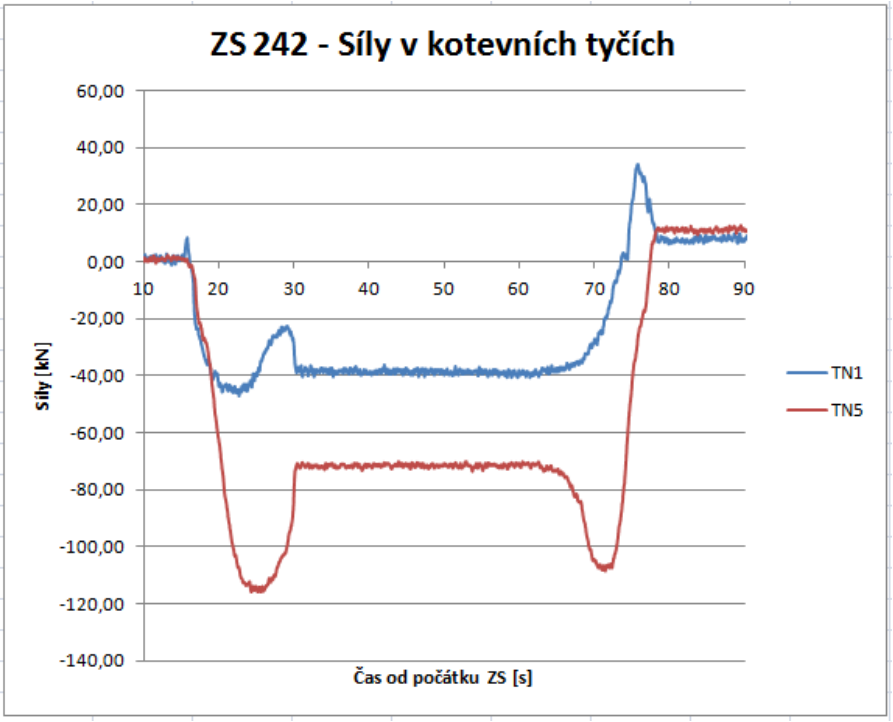
Brzdění z rychlosti: 100km/h

Směr brzdění: Z Hohenau (ÖBB) na Břeclav, následně rozjezd na Hohenau (ÖBB)

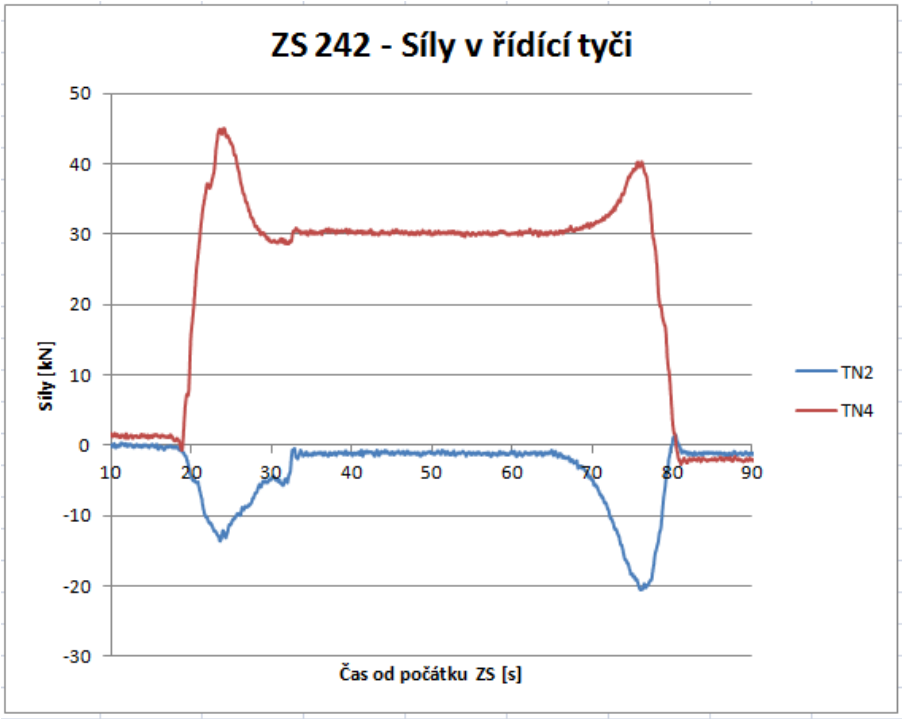
Vlak: Taurus + 1x Falls + Taurus

**◄ BŘECLAV** **HOHENAU (ÖBB) ►**

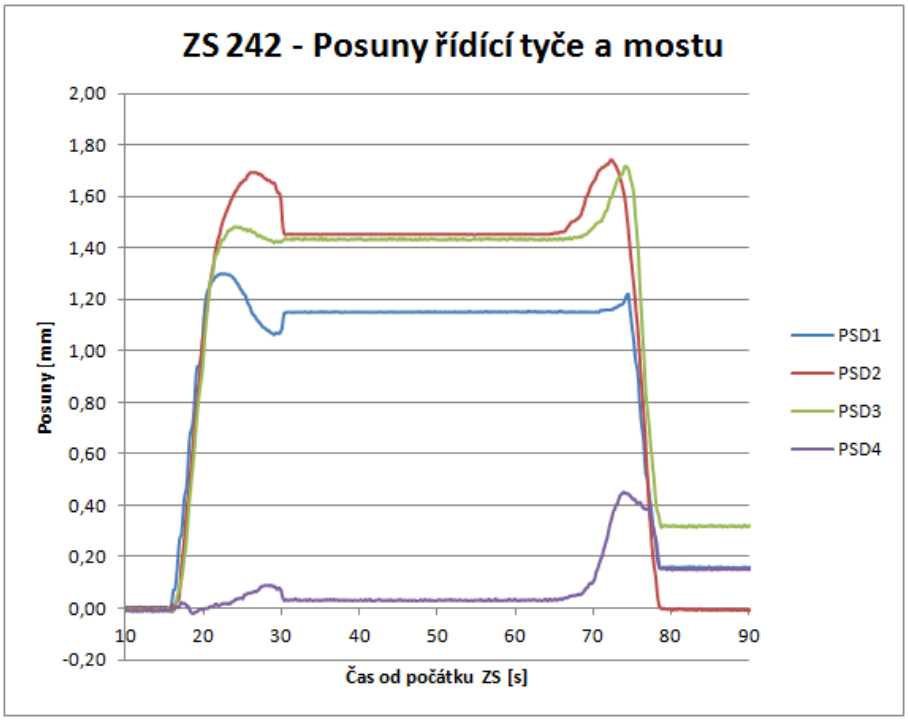
Obrázek 88: Z242: Poloha vlaku po zastavení



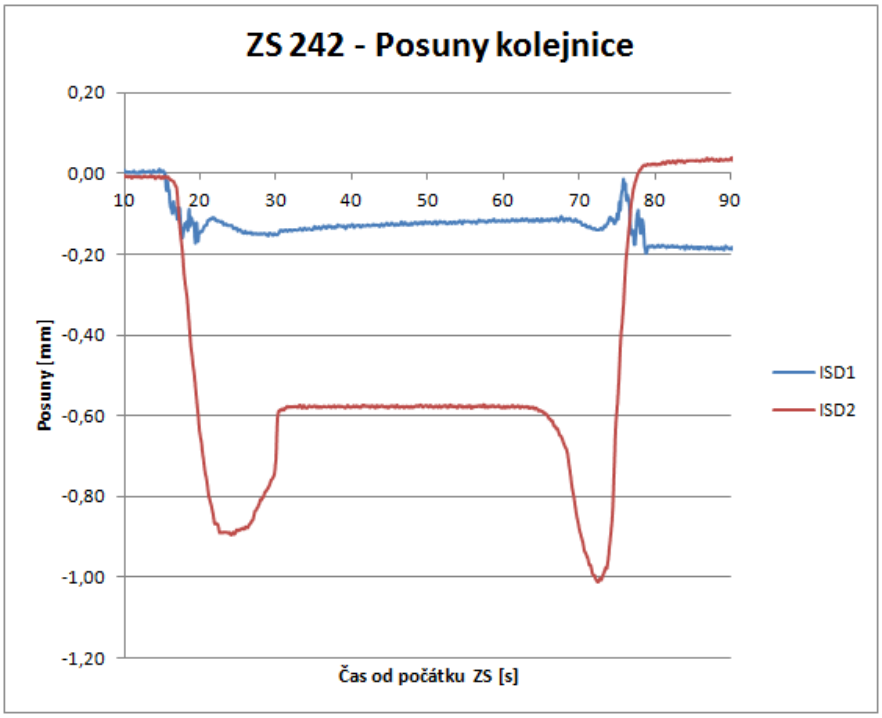

Obrázek 89: ZS242: Normálové síly v kotevních tyčích



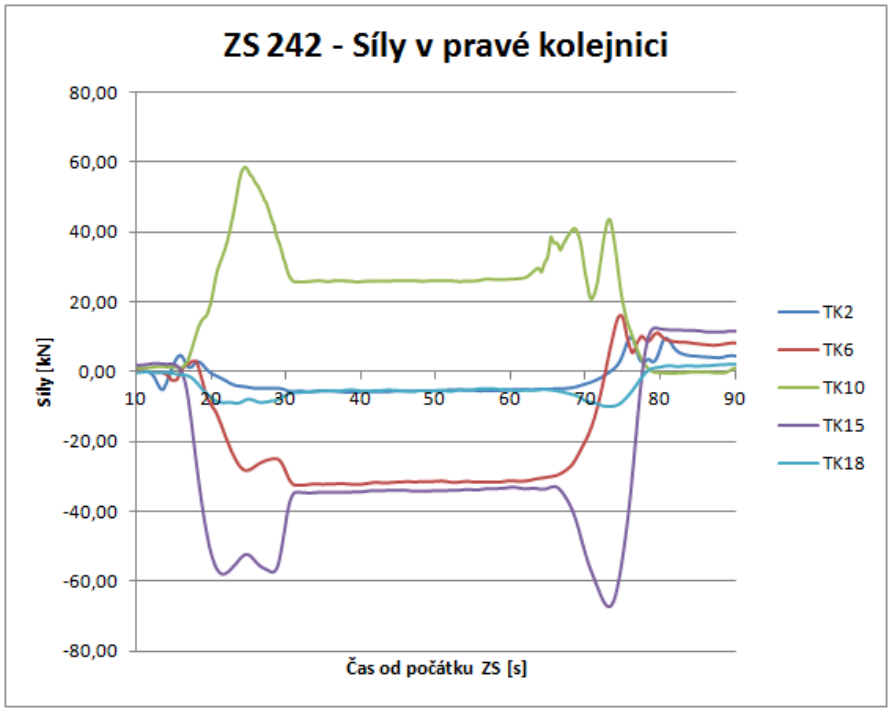

Obrázek 90: ZS242: Normálové síly v řídící tyči



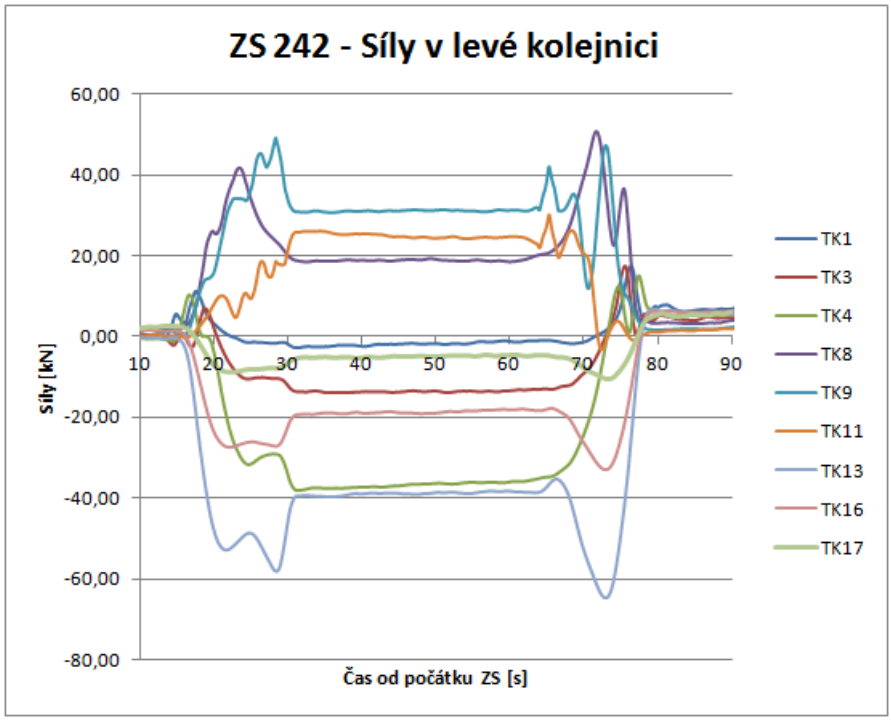

Obrázek 91: ZS242: Posun řídící tyče vůči příčníku a posun vodících ložisek NK




Obrázek 92: ZS242: Posuny levé kolejnice




Obrázek 93: ZS242: Normálové síly v pravé kolejnici




Obrázek 94: ZS242: Normálové síly v levé kolejnici

## 6.10 ZS 221B

Čas: 15:44

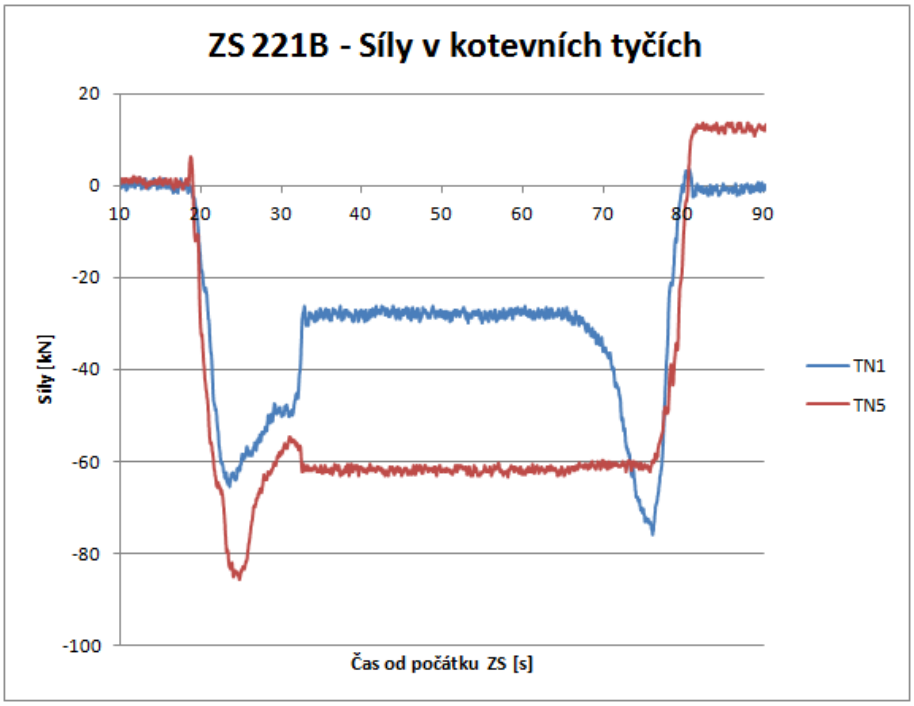
Brzdění z rychlosti: 100km/h

Směr brzdění: Z Břeclavi na Hohenau (ÖBB), následně rozjezd na Břeclav

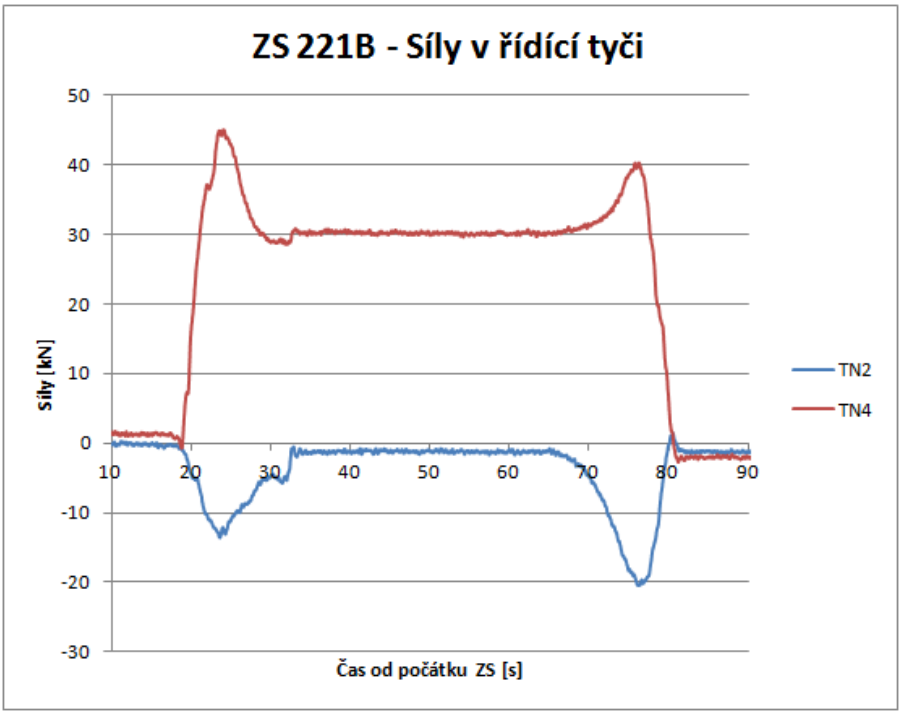
Vlak: Taurus + 1x Falls + Taurus

**◄ BŘECLAV** **HOHENAU (ÖBB) ►**

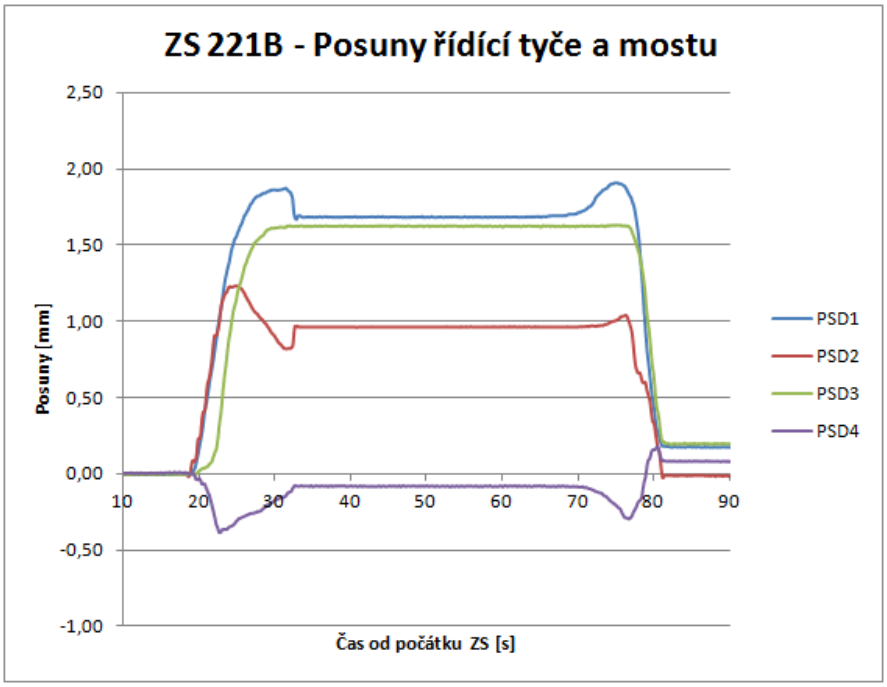
Obrázek 95: Z221B: Poloha po zastavení



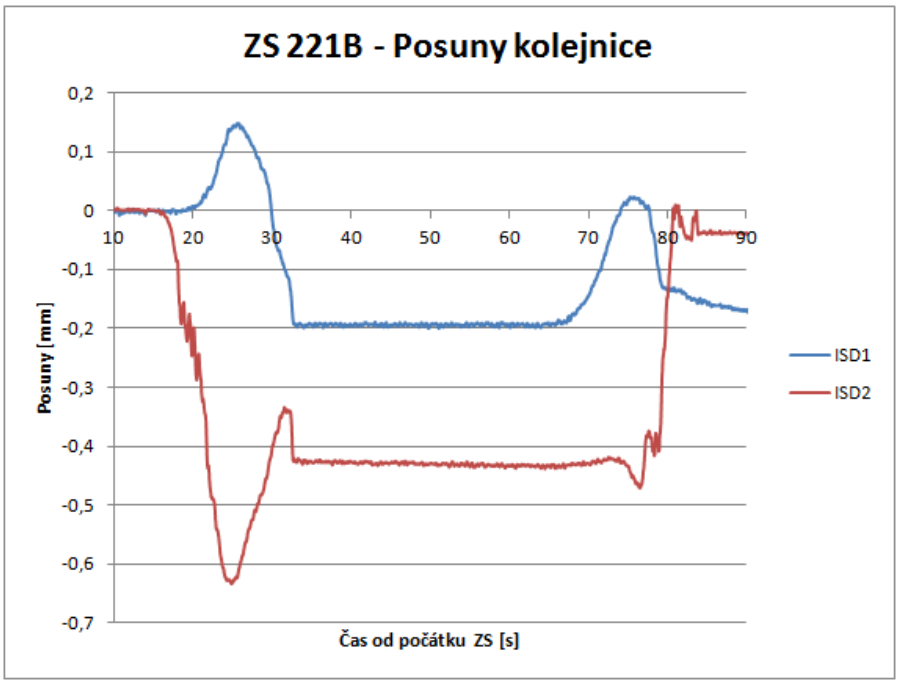

Obrázek 96: ZS221B: Normálové síly v kotevních tyčích



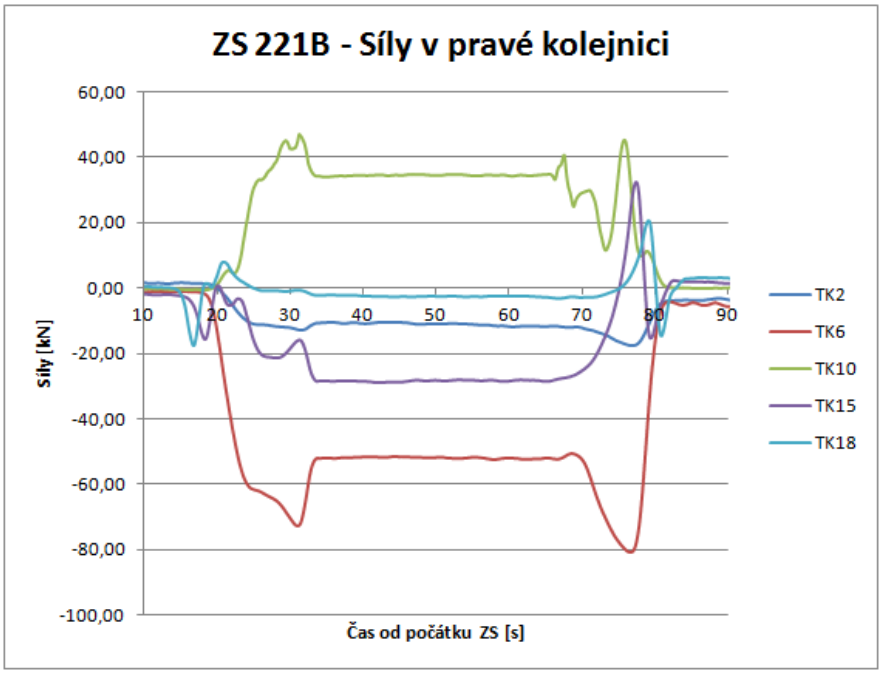

Obrázek 97: ZS221B: Normálové síly v řídící tyči



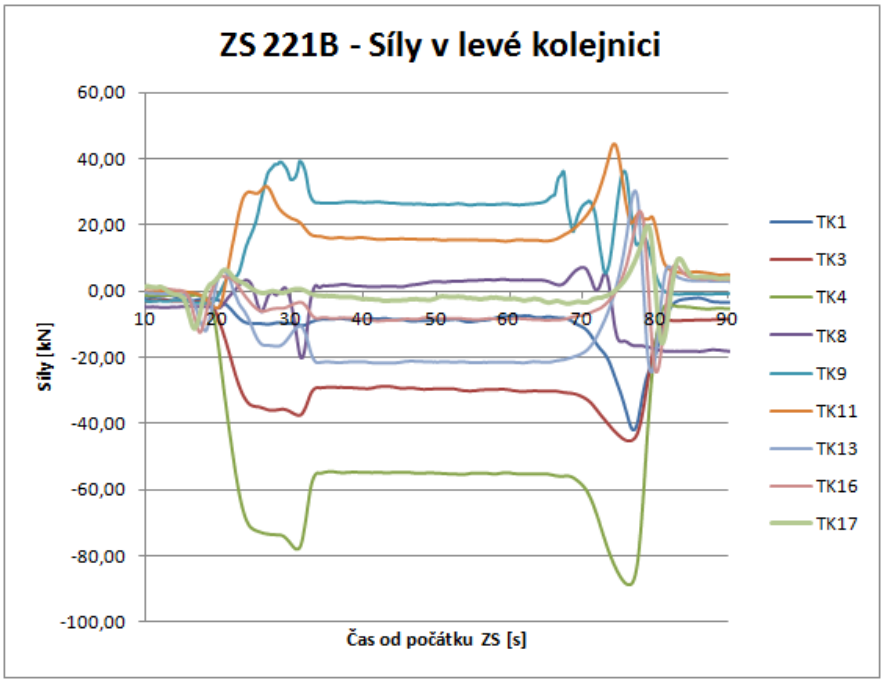

Obrázek 98: Posun řídící tyče vůči příčníku a posun vodících ložisek NK




Obrázek 99: ZS221B: Posuny levé kolejnice




Obrázek 100: ZS221B: Normálové síly v pravé kolejnici




Obrázek 101: ZS221B: Normálové síly v levé kolejnici

## 6.11 ZS251

Čas: 16:19

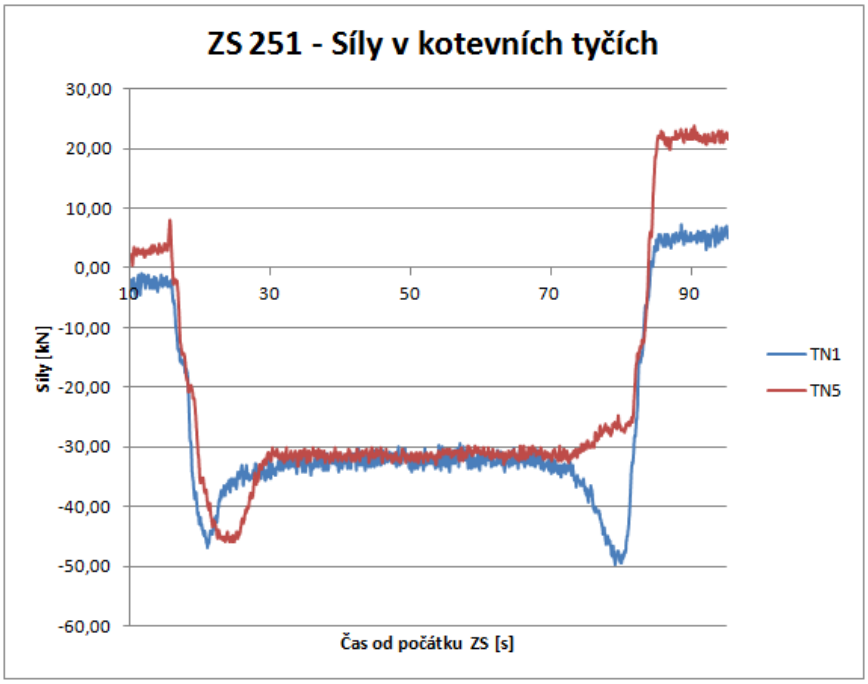
Brzdění z rychlosti: 100km/h

Směr brzdění: Z Břeclavi na Hohenau (ÖBB), následně rozjezd na Břeclav

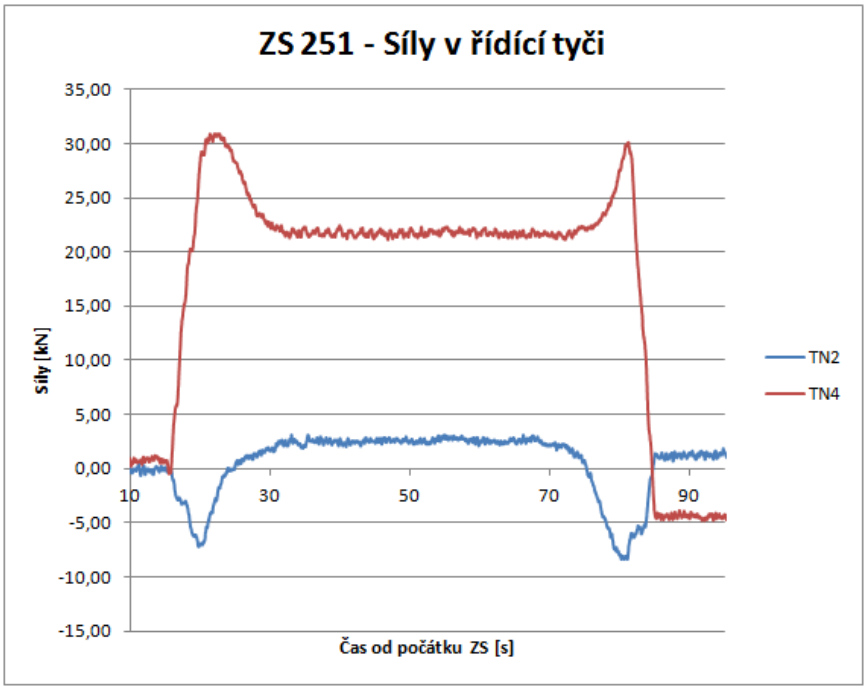
Vlak: 2x Taurus

**◄ BŘECLAV** **HOHENAU (ÖBB) ►**

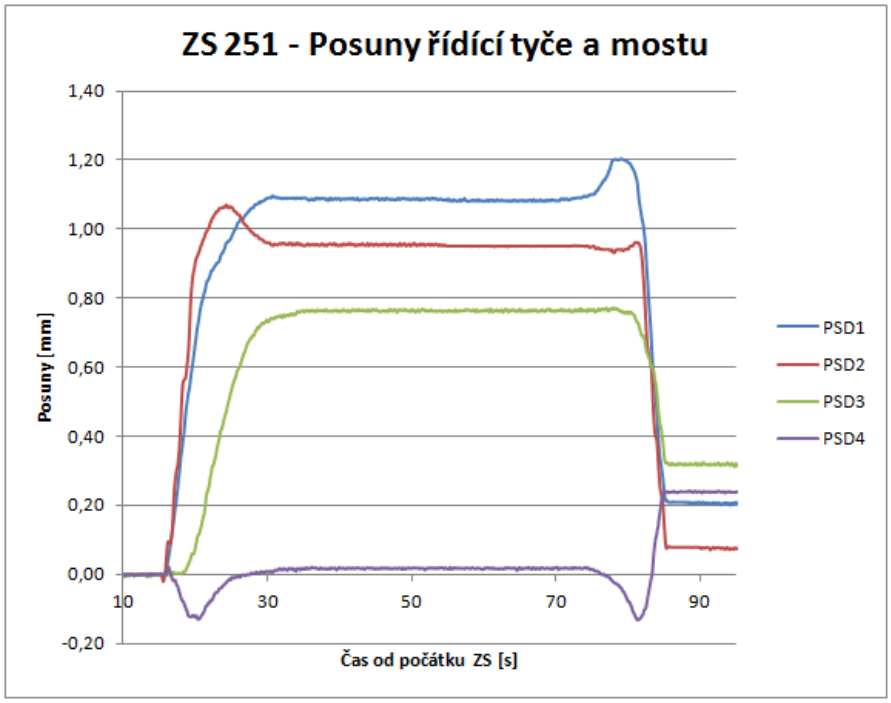
Obrázek 102: ZS251: Poloha po zastavení



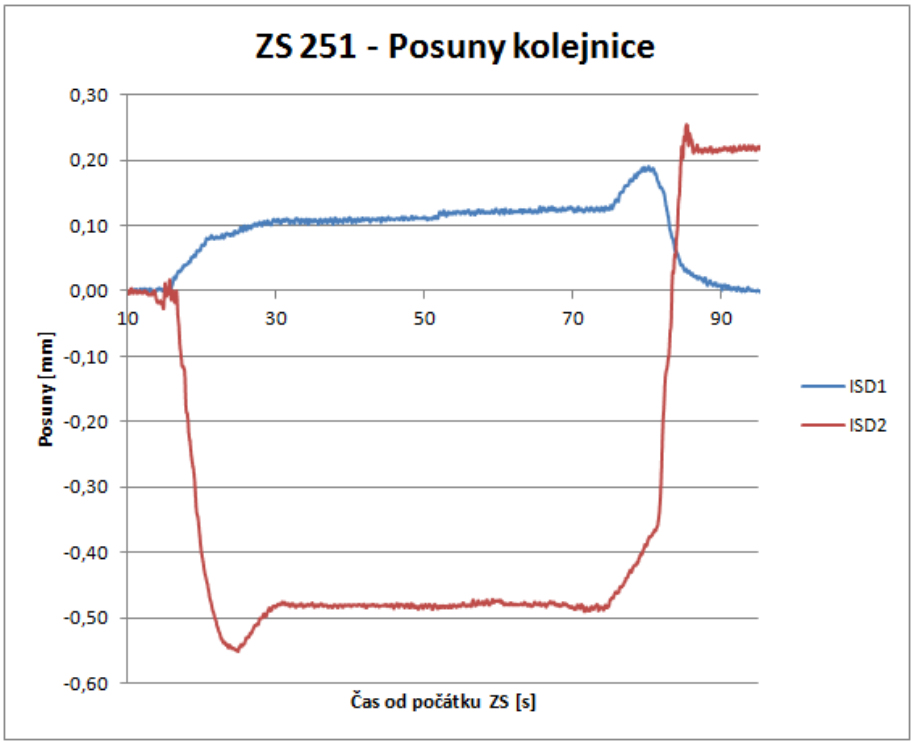

Obrázek 103: ZS251: Normálové síly v kotevních tyčích



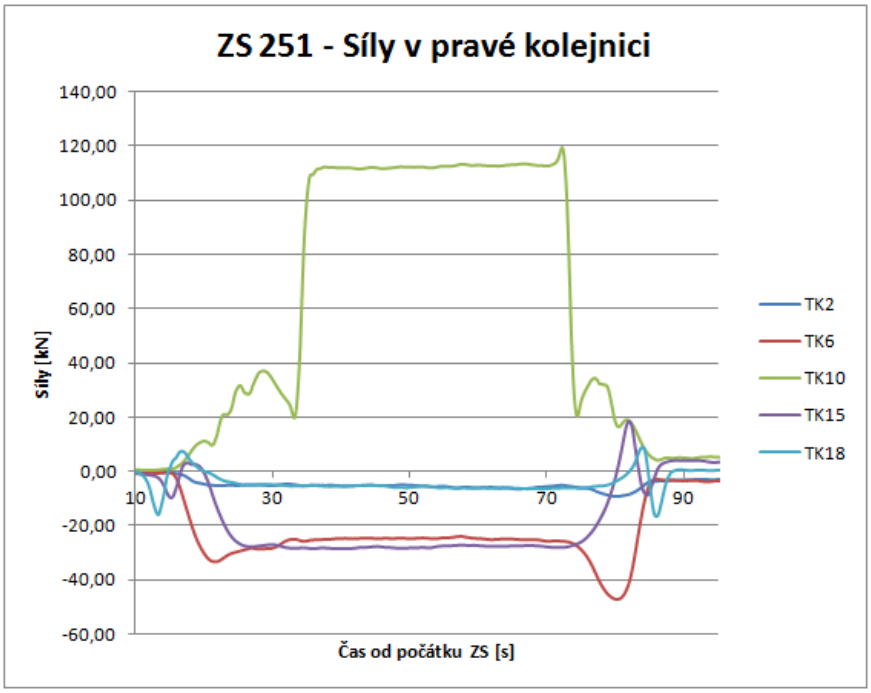

Obrázek 104: ZS251: Normálové síly v řídící tyči



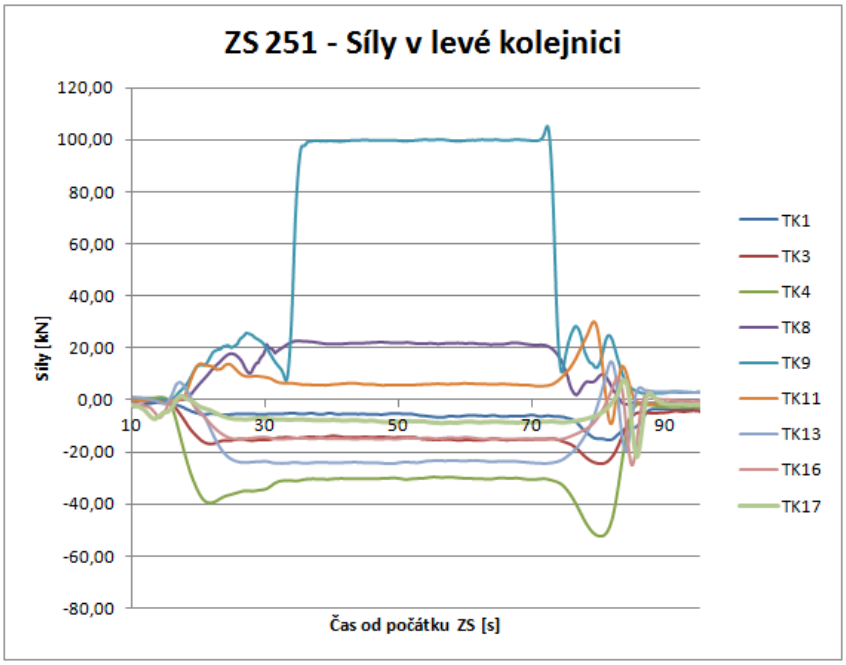

Obrázek 105: ZS251 Posun řídící tyče vůči příčníku a posun vodících ložisek NK




Obrázek 106: ZS251: Posuny levé kolejnice




Obrázek 107: ZS251: Normálové síly v pravé kolejnici




Obrázek 108: ZS 251: Normálové síly v levé kolejnici

*Pozn: Síly v TK9 a TK10 jsou způsobeny od normálového namáhání v důsledku zastavení nápravy v blízkosti snímačů.*

## 6.12 ZS 251A

Čas: 16:26

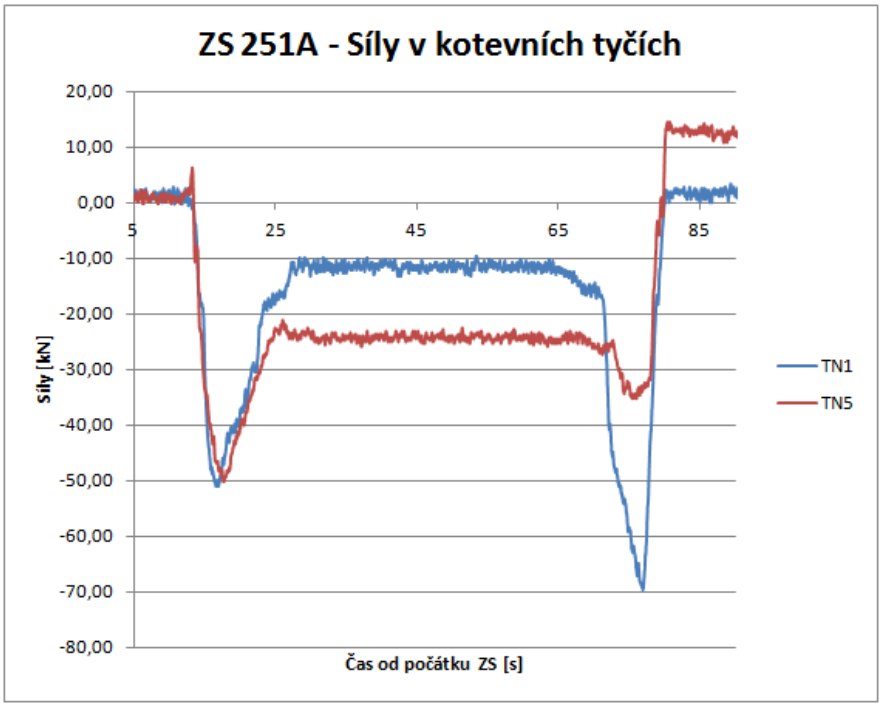
Brzdění z rychlosti: 100km/h

Směr brzdění: Z Břeclavi na Hohenau (ÖBB), následně rozjezd na Břeclav

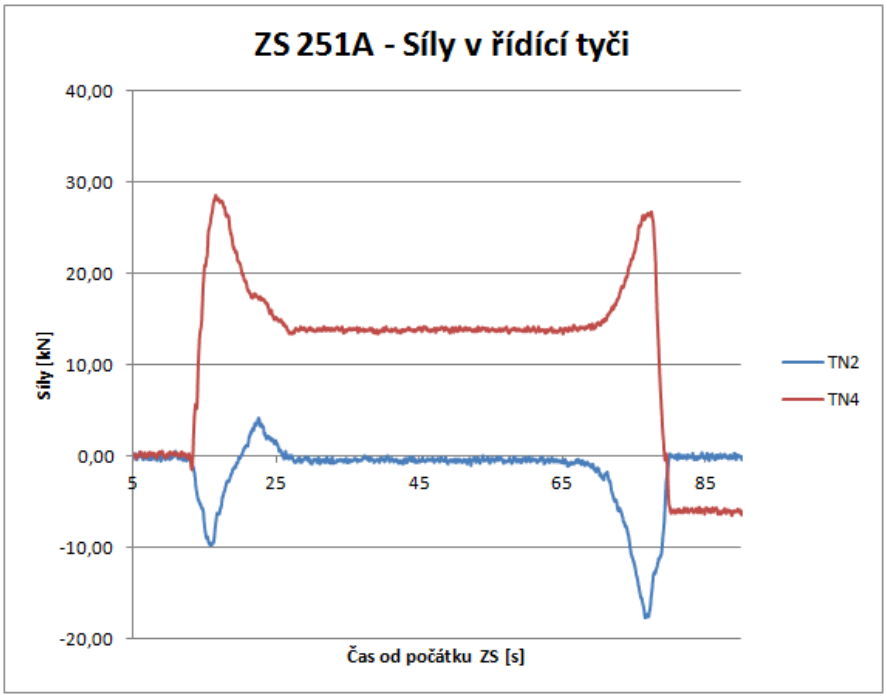
Vlak: 2x Taurus

**◄ BŘECLAV** **HOHENAU (ÖBB) ►**

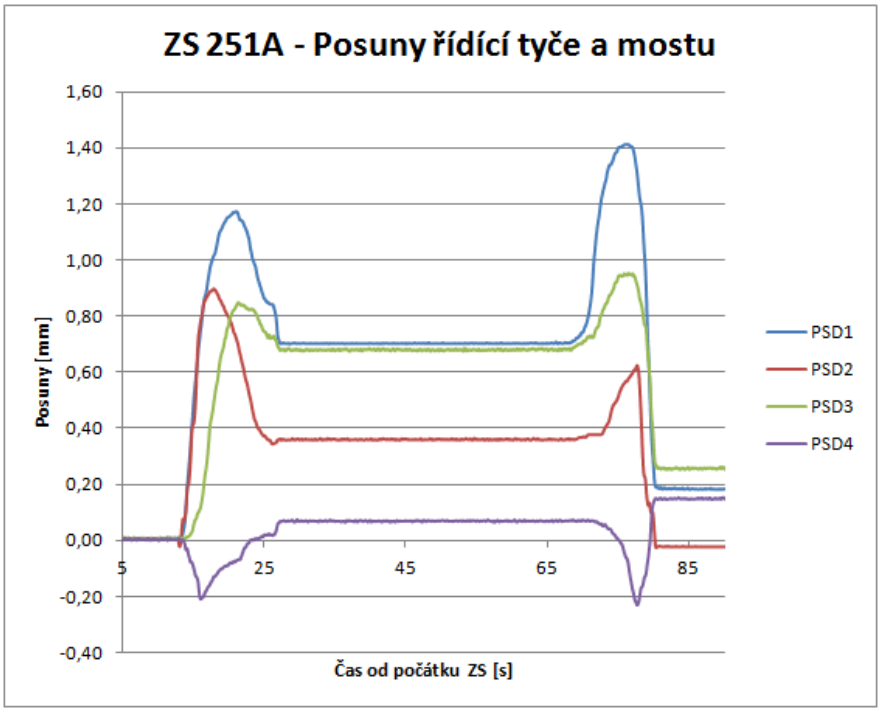
Obrázek 109: ZS251A: Poloha po zastavení



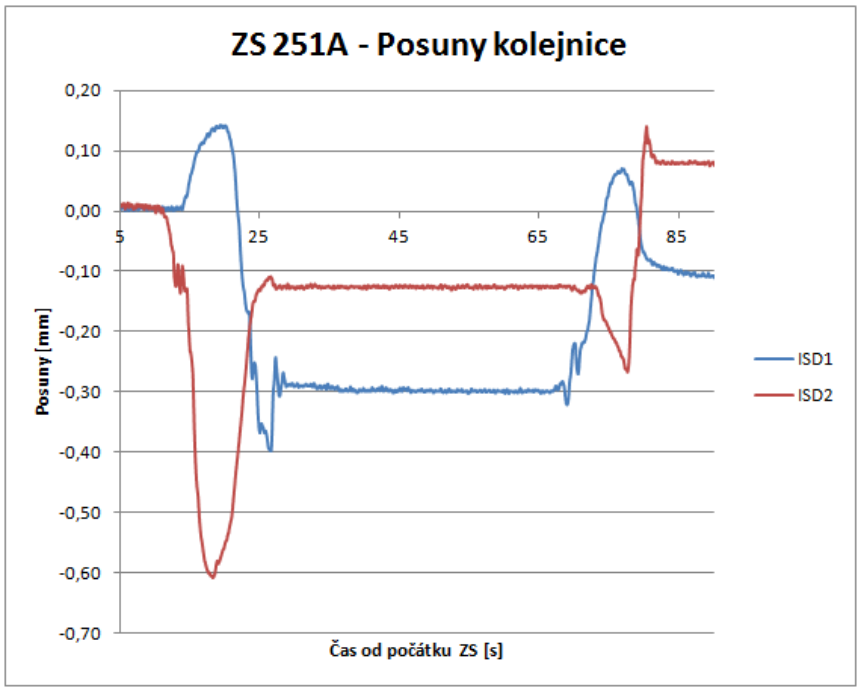

Obrázek 110: ZS251A: Normálové síly v kotevních tyčích



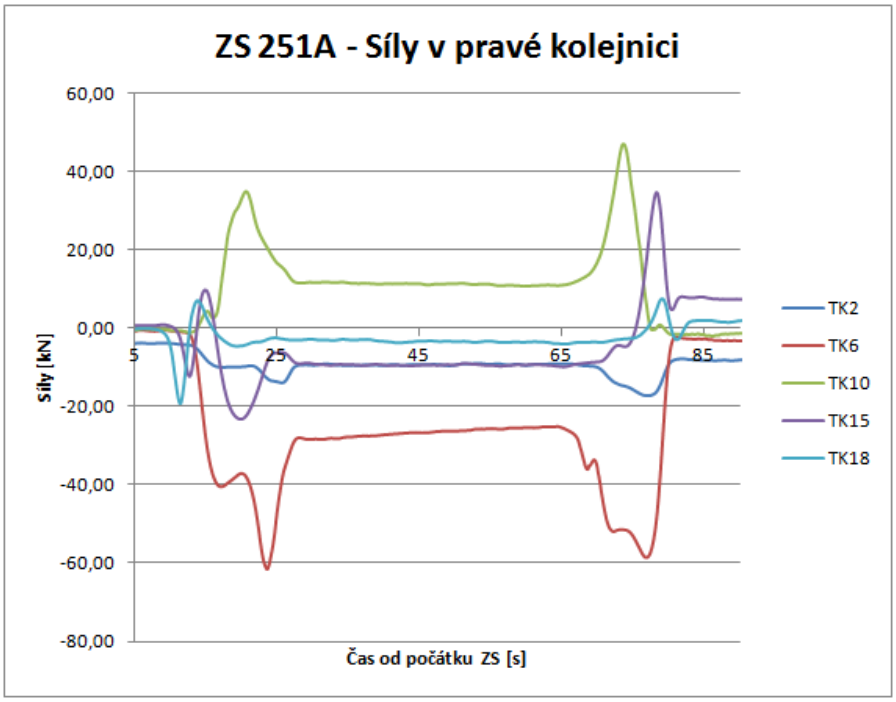

Obrázek 111: ZS251A: Normálové síly v řídící tyči



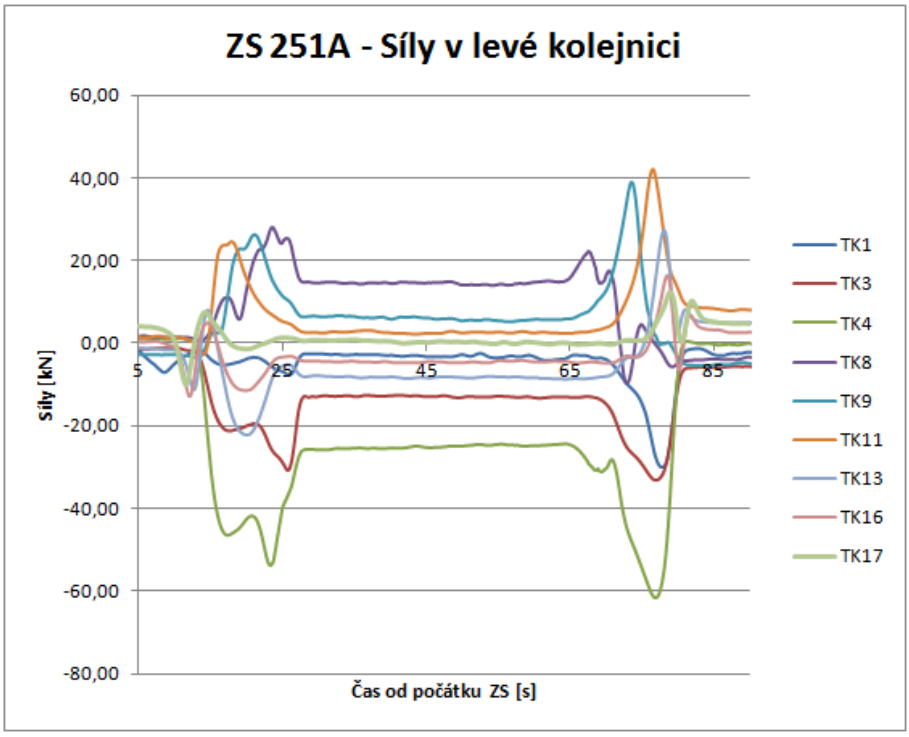

Obrázek 112: ZS251A: Posun řídící tyče vůči příčníku a posun vodících ložisek NK




Obrázek 113: ZS251A: Posuny levé kolejnice




Obrázek 114: ZS251A: Normálové síly v pravé kolejnici




Obrázek 115: ZS251A: Normálové síly v levé kolejnici

## 6.13 Závěr

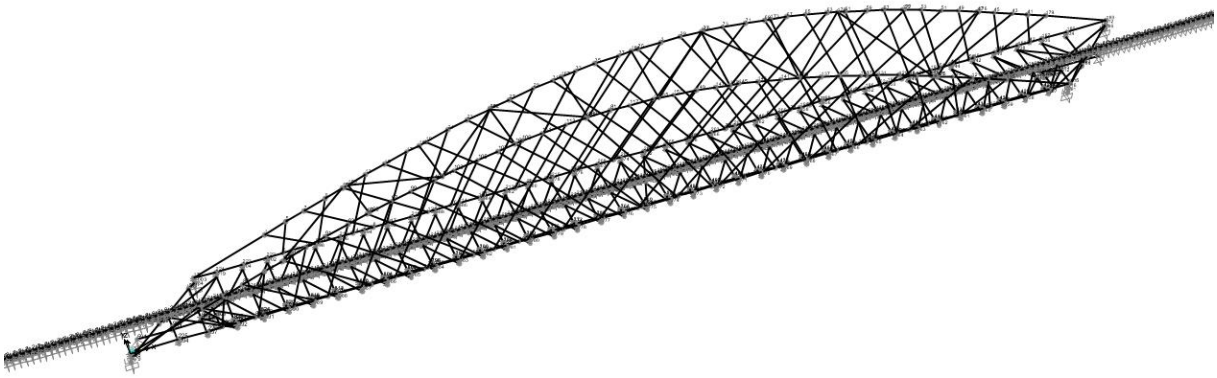
Na základě vyhodnocených experimentálních dat z brzdných zatěžovacích zkoušek, které byly provedeny dne 24.8.2016 na NOK 1 lze vyvodit následující:

Zatěžovací stav ZS232 byl nejúčinnější zatěžovací stav. Zatěžovací stavy ZS221B a ZS242 byly zhruba stejně účinné, vlaky při nich začali brzdit ze stejné rychlost (100km) a lze tvrdit i to, že zastavily stejně daleko od opěr. Z toho důvodu budou tyto stavy zadány jako zatěžovací stavy do numerického modelu. Oproti předpokladu zatěžovací stavy ZS251 a ZS251A, kdy byla zatěžovací souprava tvořena jen dvěma lokomotivami Taurus, nebyly účinnější. Z průběhu sil v kolejnicích a SŘDM lze říci, že rozjezdové síly vyvolaly větší odezvu než síly brzdné.

Po zastavení vlaků je zřejmé přerozdělení sil v kolejnicích a kotevních tyčích. Hodnotu normálových sil v klidovém stavu lze považovat za statický účinek zatěžovacího vlaku. Z průběhu normálových sil lze určit, jakou míru brzdných zatížení přenáší. K výrazně větší změně normálové síly dochází po zastavení v kotevní tyči TN1 při brzdění v obou směrech. Hodnota změny normálové síly do klidového stavu je kolem 30-35kN při brzdění ve směru Břeclav – Hohenau. Při brzdění z druhého směru je to kolem 20kN. U kotevní tyče TN5 na straně Břeclav dojde k přerozdělení jen do 5kN normálové síly při brzdění ve směru Břeclav – Hohenau. Při brzdění z druhého směru přebírá kotevní tyč TN5 do 20kN z brzdné síly vlaku. Z celkových 300kN brzdné síly, která je vyvolána zatěžovacím vlakem, je přeneseno jen kolem do 45kN (15%) systémem SŘDM. Zbytek sil je přenášen kolejnicemi a ložisky. Lze konstatovat, že kotevní tyč TN1 lépe přenáší brzdné síly. Kotevní tyč TN5 reaguje spíše na účinky statické. Normálové namáhání kotevních tyčí je větší od statického účinku než od brzdných sil. Oproti teoretickému předpokladu nebylo dosaženo stejného namáhání v kotevních tyčích při brzdění. To je nejspíše způsobeno třením, které vzniká v sedlech příčníků. Na tření v sedlech příčníků ukazují i velmi rozdílné normálové síly na obou koncích řídící tyče.

Po odjetí zatěžovacího vlaku jsou patrné zbytkové normálové síly v kolejnicích a SŘDM. Také byly patrné reziduální posuny SŘDM, kolejnice a mostu.

# 7 Numerický model



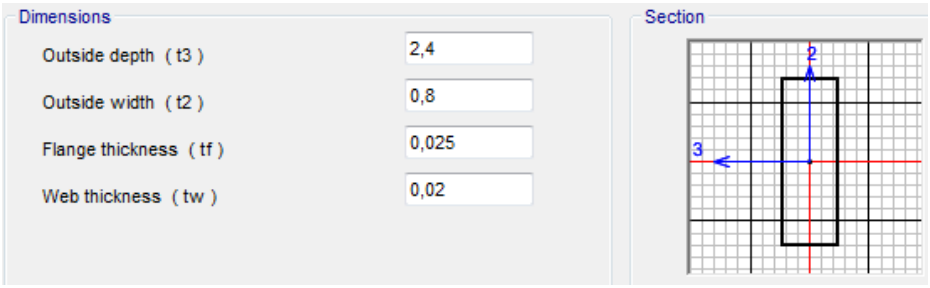
Obrázek 116: Prutové zobrazení mostu Oskar

Nelineární model mostu OSKAR byl vytvořen v americkém programu CSI Bridge 2016. Model se především zaměřuje na interakci bezstykové koleje a mostu a chování SŘDM při zatížení od brzdných a rozjezdových sil od zatěžovacího vlaku, který byl použit při zatěžovací brzdné zkoušce ve dne 24.8. 2016 na NOK1. Všechny prvky modelu, včetně mostovky, byly vymodelovány prutovými prvky. Bezstyková kolej byla k mostní konstrukci připojena pomocí linků s pružnoplastickými průběhy zatěžovací větve. Mostní ložiska byla modelována nelineárními linky tak, abychom přibližně vystihly jejich skutečné chování.

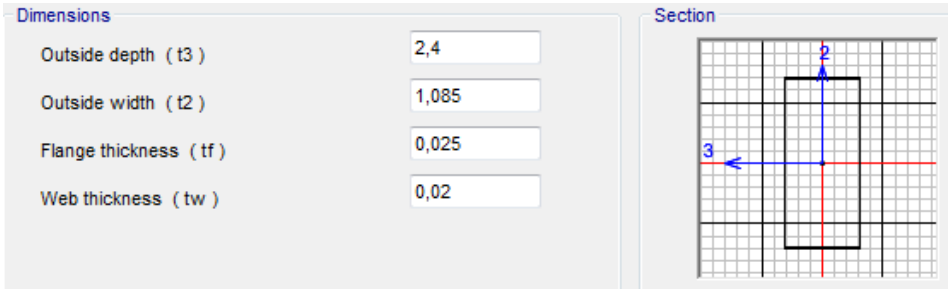
*Pozn. Základní geometrie, průřezy hlavního nosníku a průřezy SŘDM byly přejaty z modelu mostu, který vytvořily: Angela Damato a Frederica Paglia. S předáním modelu souhlasil Doc. Ryjáček. Nejedná se o duplikát.*

## 7.1 Nosná konstrukce

Trámy

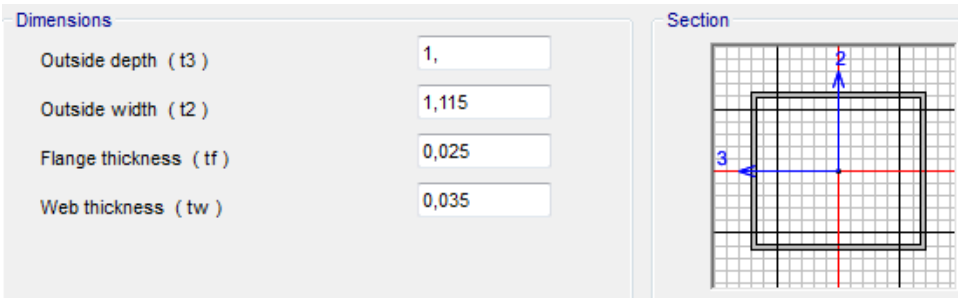



Obrázek 117: Příčný řez vnitřního trámu

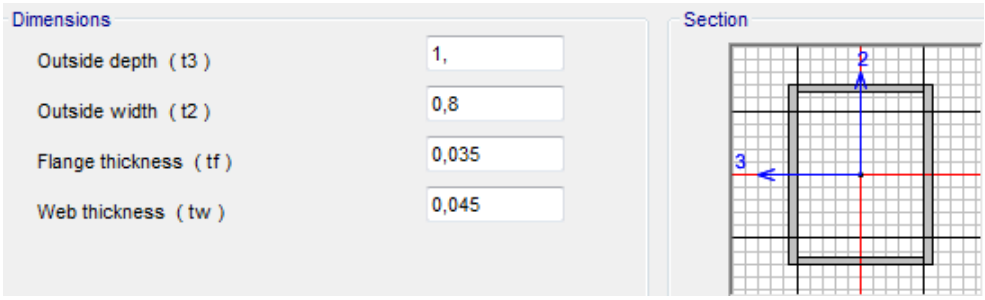



Obrázek 118: Příčný řez vnějšího trámu

## Oblouky




Obrázek 119: Příčný řez vnitřního oblouku

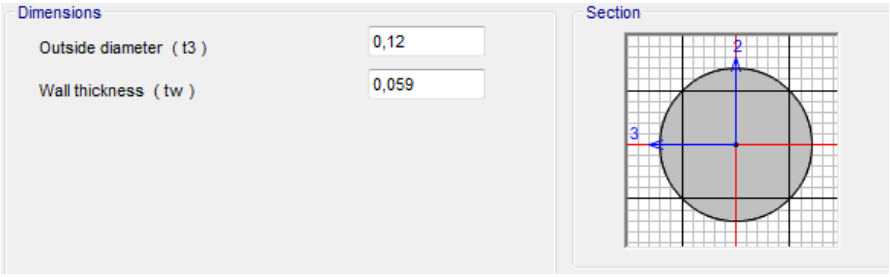



Obrázek 120: Příčný řez vnějšího oblouku

## Táhla oblouků

Táhla oblouků jsou vymodelovány pruty o průměru 80mm a 120mm. V krajních částech mostu jsou použita táhla o průměru 120mm. Materiál táhel je ocel S460.

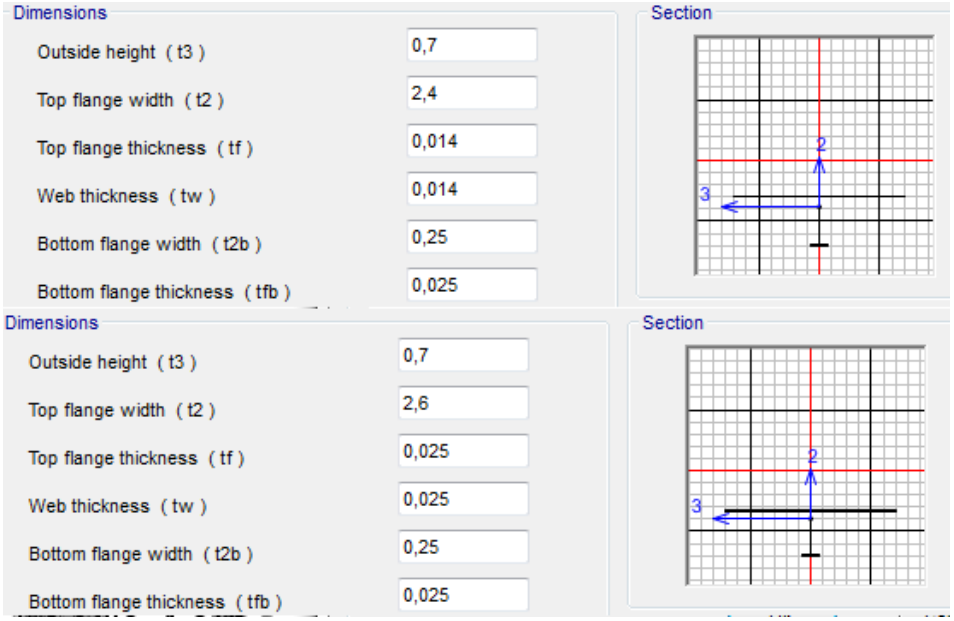
Obrázek 121: Příčný řez táhel v poli



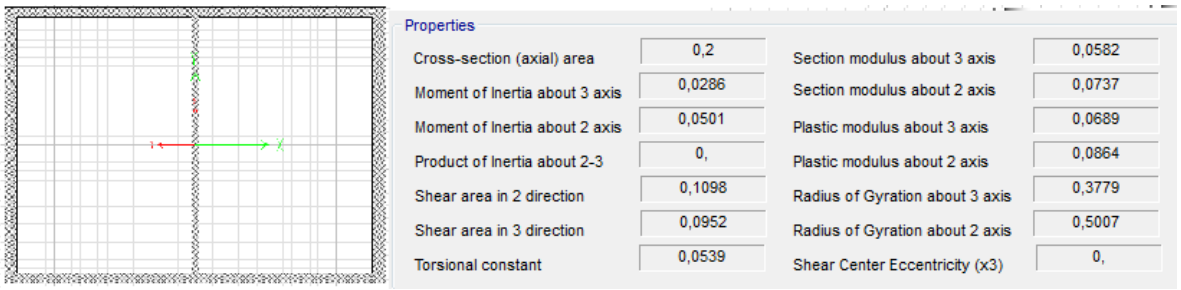

Obrázek 122: Příčný řez táhel v krajních částech mostu

Příčníky

V modelu byly použity celkem 3 druhy příčníků: příčníky v poli, příčníky v krajních částech mostu a koncové příčníky. Příčníky v poli a příčníky v krajních částech mostu byly modelovány pomocí T průřezu. Horní pásnice T průřezu reprezentuje plech mostovky. Koncové příčníky byly modelovány jako obdélník se třemi stěnami.



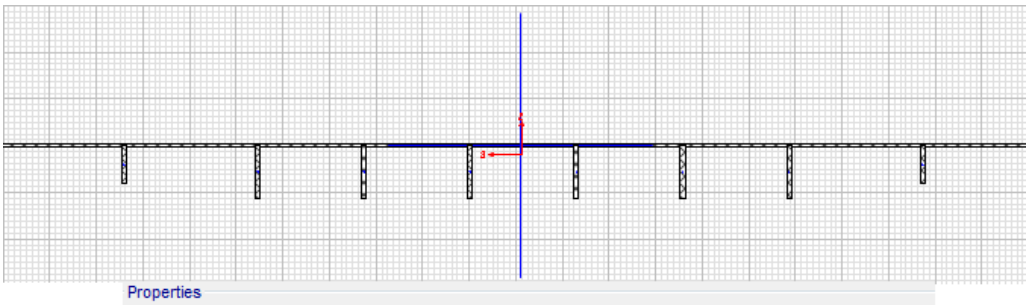

Obrázek 123: Nahoře: rozměry příčníku v poli, dole: rozměry příčníku v krajních částech mostu




Obrázek 124: Tvar koncového příčník a jeho průřezové charakteristiky

Mostovka

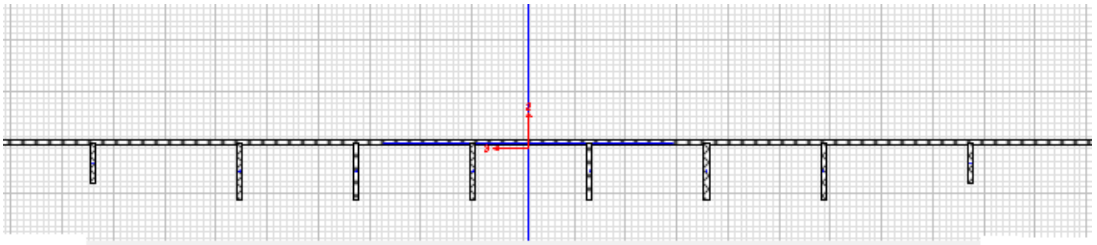
Mostovka byla reprezentována prutem, který má přibližně stejné průřezové charakteristiky, jako má plech mostovky s podélnými výztuhami. Plech mostovky byl modelován přímý, bez lomů. V modelu byly rozlišeny průřezové charakteristiky mostovky v poli a v krajních částech.



Properties

| | | | |
|---|---|---|---|
| Cross-section (axial) area | 0,1493 | Section modulus about 3 axis | 3,915E-03 |
| Moment of Inertia about 3 axis | 9,159E-04 | Section modulus about 2 axis | 0,1394 |
| Moment of Inertia about 2 axis | 0,4919 | Plastic modulus about 3 axis | 7,130E-03 |
| Product of Inertia about 2-3 | 6,818E-05 | Plastic modulus about 2 axis | 0,2297 |
| Shear area in 2 direction | 0,0483 | Radius of Gyration about 3 axis | 0,0783 |
| Shear area in 3 direction | 0,0814 | Radius of Gyration about 2 axis | 1,8152 |
| Torsional constant | 1,710E-05 | Shear Center Eccentricity (x3) | 0, |

Obrázek 125: Prut, reprezentující mostovku v poli



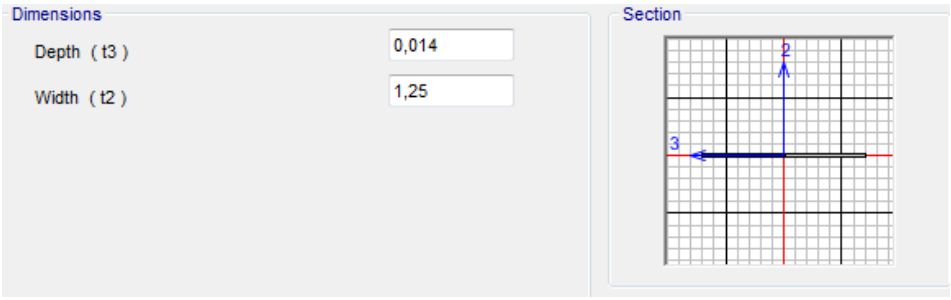
Properties

| | | | |
|---|---|---|---|
| Cross-section (axial) area | 0,2258 | Section modulus about 3 axis | 4,132E-03 |
| Moment of Inertia about 3 axis | 1,031E-03 | Section modulus about 2 axis | 0,2299 |
| Moment of Inertia about 2 axis | 0,8111 | Plastic modulus about 3 axis | 7,879E-03 |
| Product of Inertia about 2-3 | 8,039E-05 | Plastic modulus about 2 axis | 0,365 |
| Shear area in 2 direction | 0,0505 | Radius of Gyration about 3 axis | 0,0676 |
| Shear area in 3 direction | 0,1486 | Radius of Gyration about 2 axis | 1,8955 |
| Torsional constant | 4,788E-05 | Shear Center Eccentricity (x3) | 0, |

Obrázek 126: Prut, reprezentující mostovku v koncových oblastech

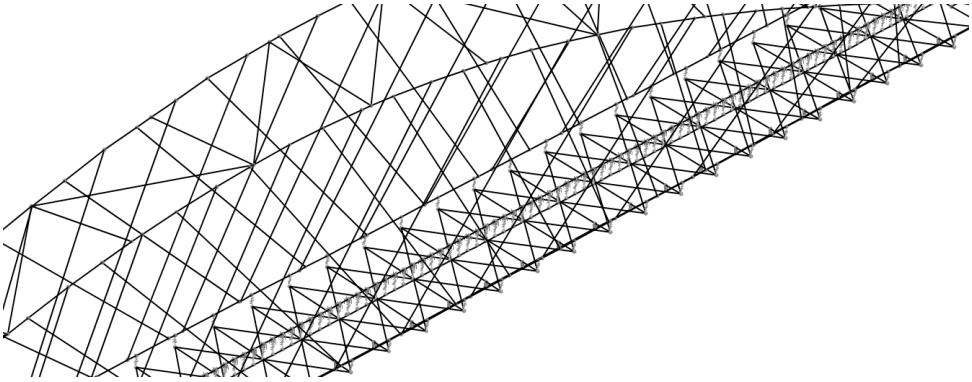
Ztužení

Ztužení bylo reprezentováno prutem s obdélníkovým průřezem o šířce 1m a tloušťky 14mm.

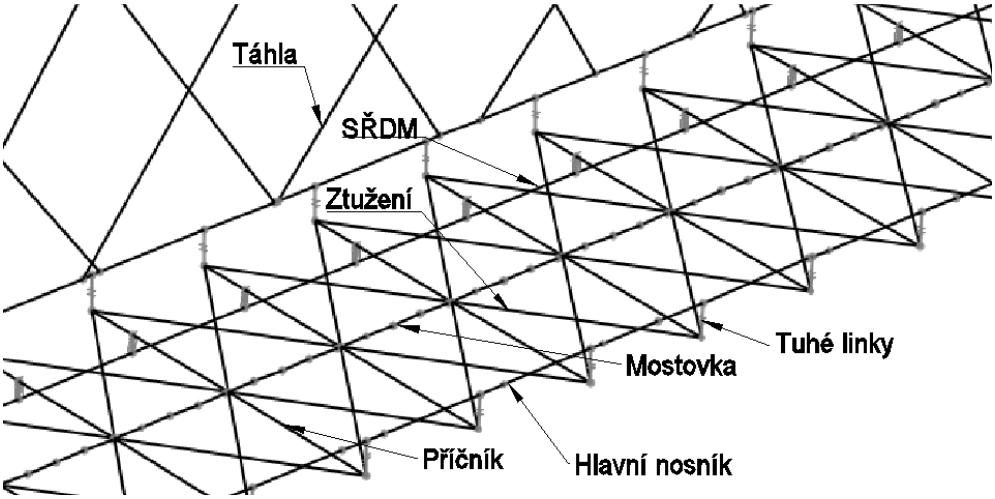



Obrázek 127: Ztužení mostovky

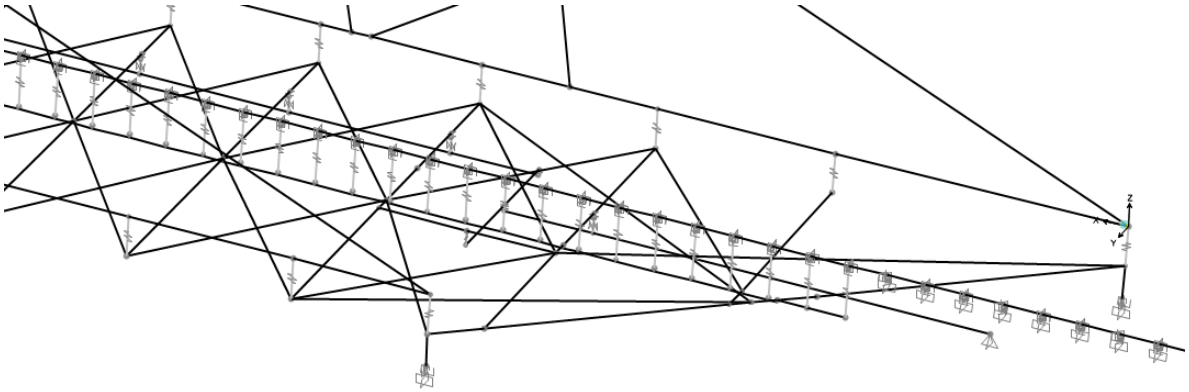
Jednotlivé pruty byly propojeny tuhými vazbami tak, aby byly respektovány excentricity jejich umístění a aby bylo dosaženo pokud možno skutečného chování konstrukce.



Obrázek 128: Nosná konstrukce



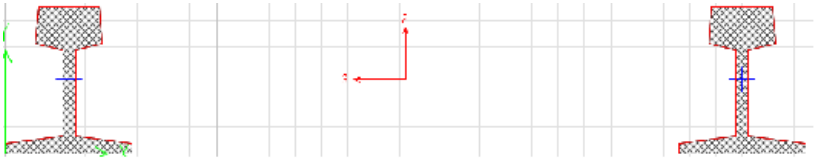

Obrázek 129: Pohled na model mostovky



Obrázek 130: Koncová oblast mostu

## 7.2 Kolej a kolejové lože

Kolej byla modelována 100 metrů před a 100 metrů za mostem. Byla reprezentována prutem, který je tvořen dvěma kolejnicemi UIC60 s rozchodem 800mm. Tento atypický rozchod má vystihnout skutečné chování koleje v příčném směru. Kolej byla modelována pouze jedním prutem, neboť po předchozích zkušenostech, kdy byla modelována každá kolejnice zvlášť, trval výpočet velmi dlouhou dobu.



Properties

| | | | |
|---|---|---|---|
| Cross-section (axial) area | 0,0152 | Section modulus about 3 axis | 7,035E-04 |
| Moment of Inertia about 3 axis | 6,153E-05 | Section modulus about 2 axis | 5,146E-03 |
| Moment of Inertia about 2 axis | 2,445E-03 | Plastic modulus about 3 axis | 8,920E-04 |
| Product of Inertia about 2-3 | 0, | Plastic modulus about 2 axis | 6,084E-03 |
| Shear area in 2 direction | 5,889E-03 | Radius of Gyration about 3 axis | 0,0636 |
| Shear area in 3 direction | 0,0152 | Radius of Gyration about 2 axis | 0,4009 |
| Torsional constant | 4,395E-06 | Shear Center Eccentricity (x3) | 0, |

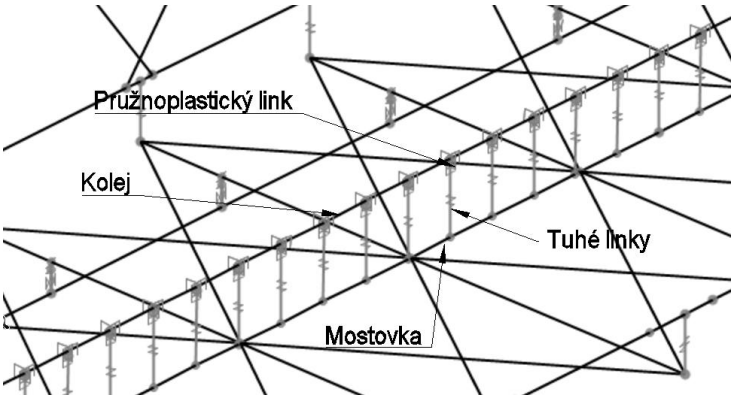
Obrázek 131: Prut reprezentující kolej a jeho průřezové charakteristiky

Kolejové lože bylo modelováno pomocí pružno-plastických linků, které mají vystihovat jeho skutečné chování v zatíženém i nezatíženém stavu. Tyto linky reprezentují tuhost kolejového lože v trati, v oblastech kolem opěr a na mostě. Vzdálenost linků je 0,6m, což je skutečná vzdálenost pražců.

Zatížený stav byl modelován tak, že k tuhosti nezatíženého linku $k_{nezatížený}$ se při přejezdu nápravy přidala tuhost zatíženého linku $k_{přidaný}$, jehož tuhost je rozdíl tuhosti kolejového lože v zatíženém a nezatíženém stavu.

$$k_{přidaný} = k_{zatížený} - k_{nezatížený}$$

Pružno-plastické linky jsou k mostovce připojeny pomocí tuhých linků.

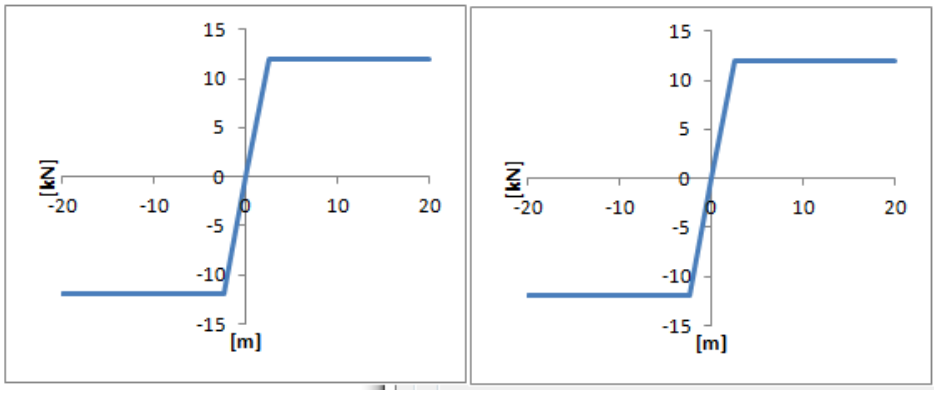



Obrázek 132: Způsob upevnění koleje k mostovce

*Vodorovná a příčná tuhost kolejového lože:*

Trať: nezatížené: $u_{lim}$ = 2,5 mm, $r_o$ = 12 kN/m na pražec

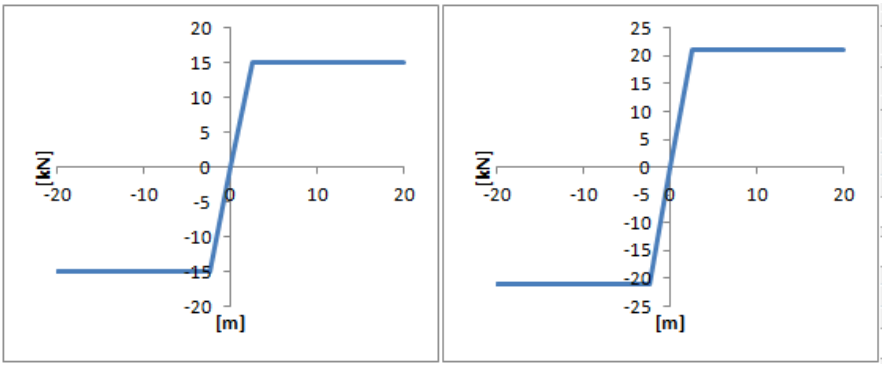
zatížené: $u_{lim}$ = 2,5 mm, $r_o$ = 24 kN/m na pražec




Obrázek 133: Tuhost linků zadaných linků do modelu – TRAŤ: Vlevo: nezatížený, vpravo: zatížený

Most: nezatížené: $u_{lim}$ = 2,5 mm, $r_o$ = 15 kN/m na pražec

zatížené: $u_{lim}$ = 2,5 mm, $r_o$ = 36 kN/m na pražec




Obrázek 134: Tuhost linků zadaných linků do modelu – MOST: Vlevo: nezatížený, vpravo: zatížený

| | *Kvalita podloží* | | | |
|---|---|---|---|---|
| | *Velmi špatná* | *špatná* | *standardní* | *tuhé podloží* |
| Spojitá svislá tuhost kolejové jízdní dráhy $k_z$ [$10^6$ N.m$^{-2}$] | 5 | 10 | 25 | 40 |

Tabulka 6: Svislá tuhost kolejového lože v závislosti na kvalitě podloží [9]

*Svislá tuhost (pro standardně udržovanou trať)*

V trati: $k^-$ = 15 MN/m na pražec

$K^+$ = 5,76 kN/m na pražec

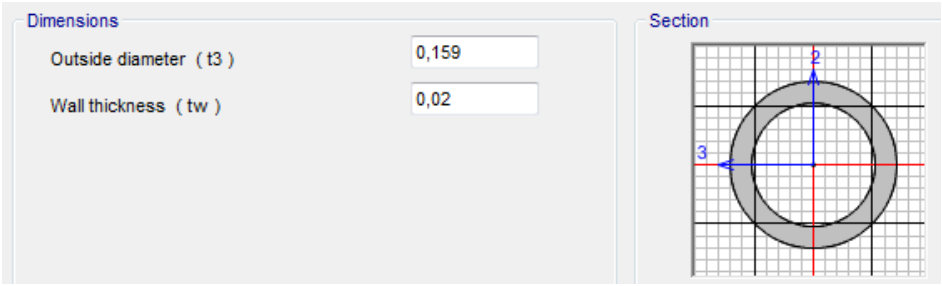
Na mostě: $k^-$ = 15 MN/m na pražec

$k^+$ = 5,76 kN/m na pražec

## 7.3 SŘDM

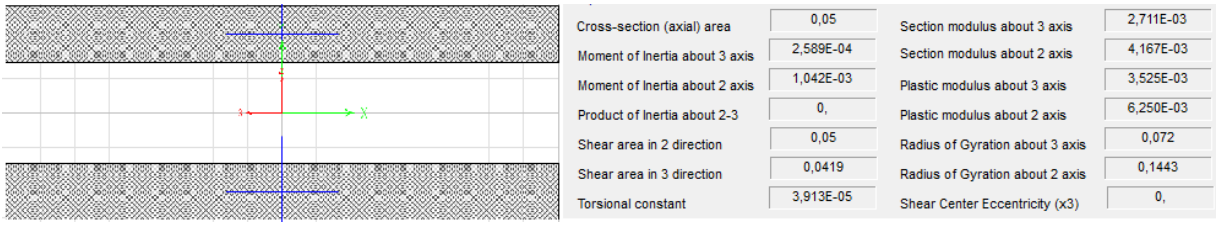
Systém řízení dilatace mostu byl vymodelován pomocí prutových prvků a linků reprezentujícími kloubové spoje. Tření bylo zohledněno plastickými linky.

Průřezy:



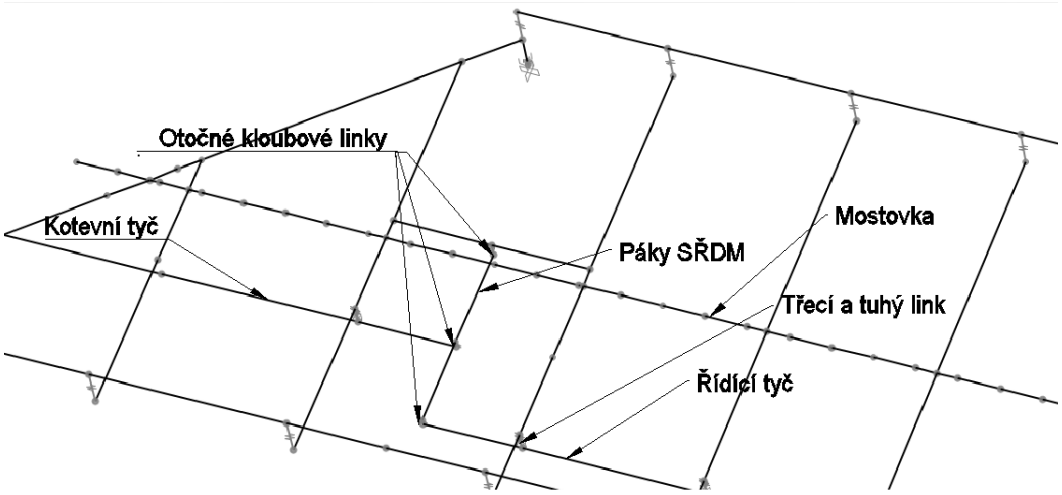

Obrázek 135: Příčný řez řídící tyče

Obrázek 136: Příčný řez kotevní tyče

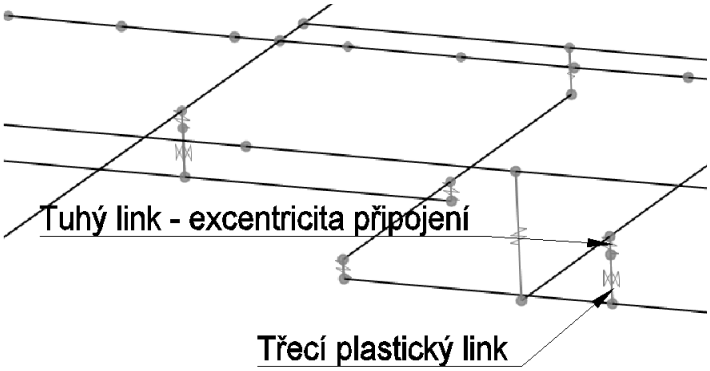


| | | | |
|---|---|---|---|
| Cross-section (axial) area | 0,05 | Section modulus about 3 axis | 2,711E-03 |
| Moment of Inertia about 3 axis | 2,589E-04 | Section modulus about 2 axis | 4,167E-03 |
| Moment of Inertia about 2 axis | 1,042E-03 | Plastic modulus about 3 axis | 3,525E-03 |
| Product of Inertia about 2-3 | 0, | Plastic modulus about 2 axis | 6,250E-03 |
| Shear area in 2 direction | 0,05 | Radius of Gyration about 3 axis | 0,072 |
| Shear area in 3 direction | 0,0419 | Radius of Gyration about 2 axis | 0,1443 |
| Torsional constant | 3,913E-05 | Shear Center Eccentricity (x3) | 0, |

Obrázek 137: Příčný řez pákami SŘDM a jejich průřezové charakteristiky




Obrázek 138: Model SŘDM




Obrázek 139: Způsob propojení řídící tyče a příčníku

### 7.3.1 Tření SŘDM

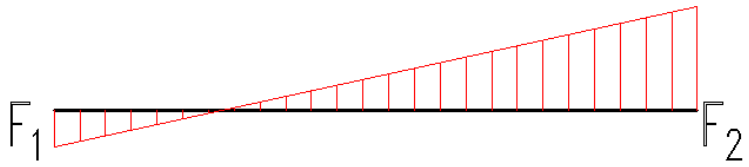
Tření řídící i kotevní tyče bylo modelováno nelineárními linky, u kterých dojde k tečení po překročení třecí síly v sedlech. Třecí síla v sedlech $F_t$ byla stanovena podle:

$$F_t = (|F_1| + |F_2|)/n, \text{ [kN]}$$

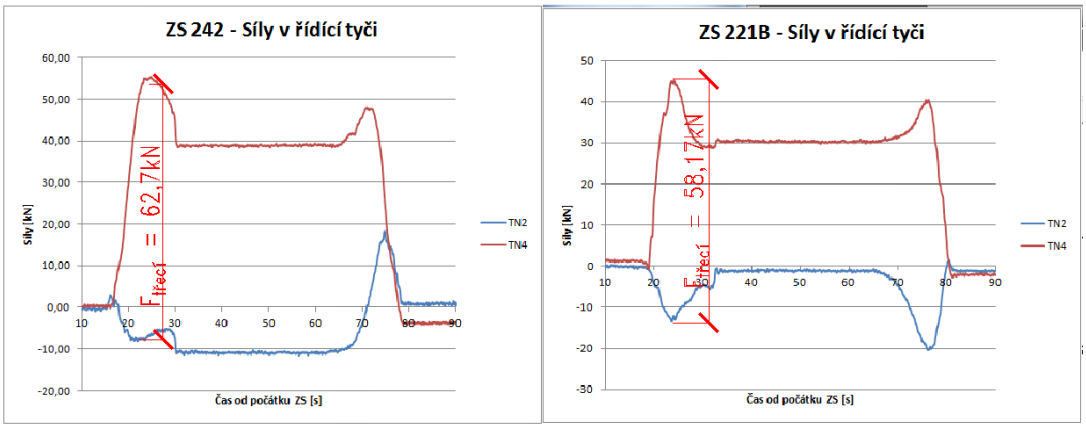
$F_1$ – normálová síla na levém konci řídící tyče [kN],

$F_2$ – normálová síla na pravém konci řídící tyče [kN],

n – počet sedel řídící tyče [-].




Obrázek 140: Průběh normálové síly v řídící tyči od tření v sedlech




Obrázek 141: Rozdíly normálové síly v řídící tyči od ZS 242 a ZS 221B

$$F_{t,ZS242} = 62,7 / 36 = 1,72kN$$

$$F_{tZS221B} = 58,17 /36 = 1,62\ kN$$

Průměrná třecí síla $F_{t,SŘDM}$: = (1,72 + 1,62) / 2 = 1,68 kN

Třecí síla byla pro oba směry pohybu vlaku stanovena: $F_{t,SŘDM} = 1,68kN$. Hodnota třecí síly je vyšší, než by se očekávalo. Po aplikaci této síly do třecích linků se průběh sil v SŘDM a v koleji začal více přibližovat hodnotám, které byly stanoveny experimentem.

## 7.4 Ložiska

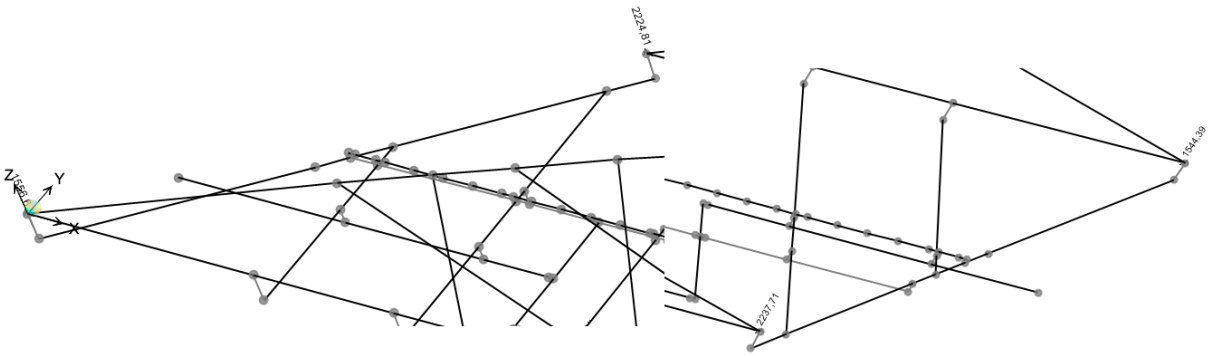
Ložiska byla modelována pomocí pružnoplastických linků, u kterých docházelo při posunu o 0,01mm k dosažení třecí síly a následnému tečení. K hlavnímu nosníku byla připojena pomocí prutů, které mají stejné průřezové charakteristiky jako trámy hlavního nosníku. Délka těchto prutů je polovina výšky trámů.

Třecí síla byla stanovena jako součin tíhy mostu $F_{most}$ a součinitele tření ložiska μ.

$$F_{třecí} = F_{most} \cdot \mu$$

V případě mostu Oskar, který se vyznačuje výraznou šikmostí, byla stanovena hodnota třecí síly zvlášť pro ložiska v ostrých rozích a pro ložiska v tupých rozích. Tíha

mostu byla spočtena jako součet tíhy nosné konstrukce, tíhy kolejového lože, tíhy balastu a tíhy zatěžovacího vlaku.




Obrázek 142: Reakce od tíhy nosné konstrukce

Z obrázku 23 jsou patrné rozdílné síly, které se přenášejí do ložisek v tupých a ostrých rozích. 41% svislých sil se přenese do ostrých ložisek, 59% se přenese do tupých ložisek. Stejným poměrem byla rozdělena tíha od balastu a od kolejového roštu. Tíha zatěžovacího vlaku byla do ložisek rozdělena rovnoměrně.

| Liniové zatížení na mostní konstrukci od kolejového roštu | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | m.j. | poč. m.j. | hmotnost 1 m.j. | hmotnost celkem (t) | hmotnost na 1 bm (t) | |
| Kolejnice UIC 60 | m | 97,4 | 120 | 11,688 | 0,120 | |
| Pražec výhybkový - podkladnicové upevnění vč. Vystrojení | ks | 36 | 442,16 | 15,91776 | 0,796 | |
| Pražec B 91S - bezpodkladnicové upevnění vč. Vystrojení | ks | 131 | 311 | 40,741 | 0,526 | |
| **Zatížení na mostě:** | | | | **gk1=** | **9,16** | **kN/mb** |
| | | | | **gk2=** | **6,46** | **kN/mb** |
| **Hmotnost na mostě celkem** | | | | **68,3468** | **t** | |

Tabulka 7: Zatížení mostu od kolejového roštu. [7]

| | objem všech komor (m3) | celkem naplněno (m3) | celkem naplněno (t) |
|---|---|---|---|
| vnitřní trám | 40,850 | 39,130 | 66,674 |
| vnější trám | 47,990 | 39,839 | 67,727 |
| celkem | 88,840 | 78,969 | 134,401 |
| rozdíl mezi trámy (t) | 7,140 | 7,230 | 1,053 |
| vyplnění (%) | 88,89% | | |

Tabulka 8: Zatížení mostu od tíhy balastu. [7]

Součinitel tření μ se stanoví podle tabulky:

| Kontaktní tlakové napětí $\sigma_p$ (MPa) | ≤5 | 10 | 20 | ≥ 30 |
|---|---|---|---|---|
| PTFE s mazacími kapsami/austenitická ocel nebo tvrdé pochromování | 0,053 | 0,04 | 0,027 | 0,02 |
| PTFE s mazacími kapsami/anodicky okysličená hliníková slitina | 0,08 | 0,06 | 0,04 | 0,03 |

Mezilehlé hodnoty se získají interpolací podle vzorce
$\mu = 0{,}8\ k/\ (10+\sigma_p)$
kde:
$k = 1{,}0$ pro kontaktní plech z austenitické oceli a tvrdé pochromování
$k = 1{,}5$ pro kontaktní slitinu hliníku
$\sigma_p$= je kontaktní tlakové napětí v PTFE v MPa.

**Tabulka 9:Součinitel tření ložiska v závislosti na kontaktním tlakovém napětí. [7]**

Stanovení třecí síly v ložiscích:

Tíha kolejového lože: 683 kN

Tíha balastu: 1340 kN

Svislá reakce v ložisku v ostrém rohu: 1560 kN

Svislá reakce v ložisku v tupém rohu: 2240 kN

Tíha zatěžovacího vlaku: 2540 kN

0,41 – poměr přenosu tíhy do ložiska v ostrém rohu

0,59 – poměr přenosu tíhy do ložiska v tupém rohu

*Třecí síla v ložiska ostrém rohu:*

svislá síla: $F_{ostrý} = 1560 + 683 \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}41 + 1340 \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}41 + 2540 / 4 = 2500kN$

napětí v ložisku: $\sigma_{ostrý} = 2500 / \pi \cdot 0{,}650/4 = 7{,}5MPa$

součinitel tření: $\mu_{ostrý} = 0{,}8 \cdot 1 / (10 + 7{,}5) = 0{,}046$

třecí síla: $F_{třecí} = 2500 \cdot 0{,}046 = 115kN$

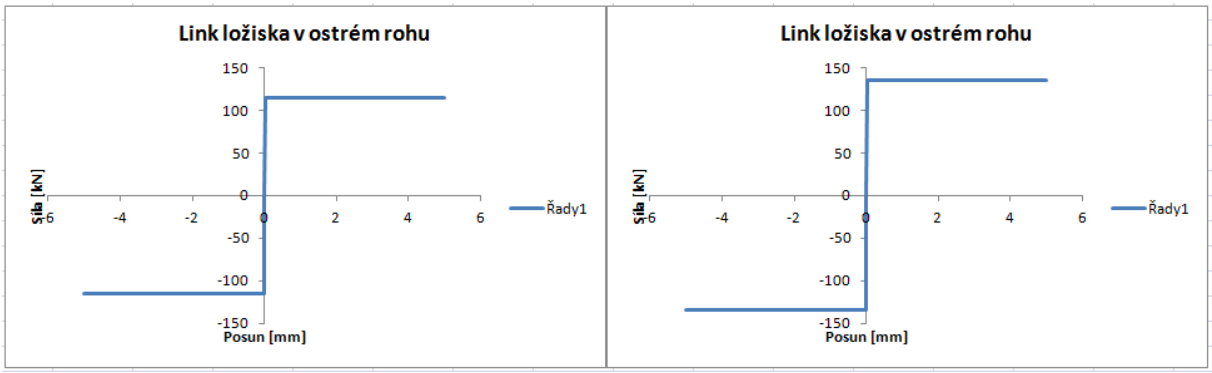
*Třecí síla v ložiska tupém rohu:*

svislá síla: $F_{ostrý} = 2240 + 683 \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}59 + 1340 \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}59 + 2540 / 4 = 3350kN$

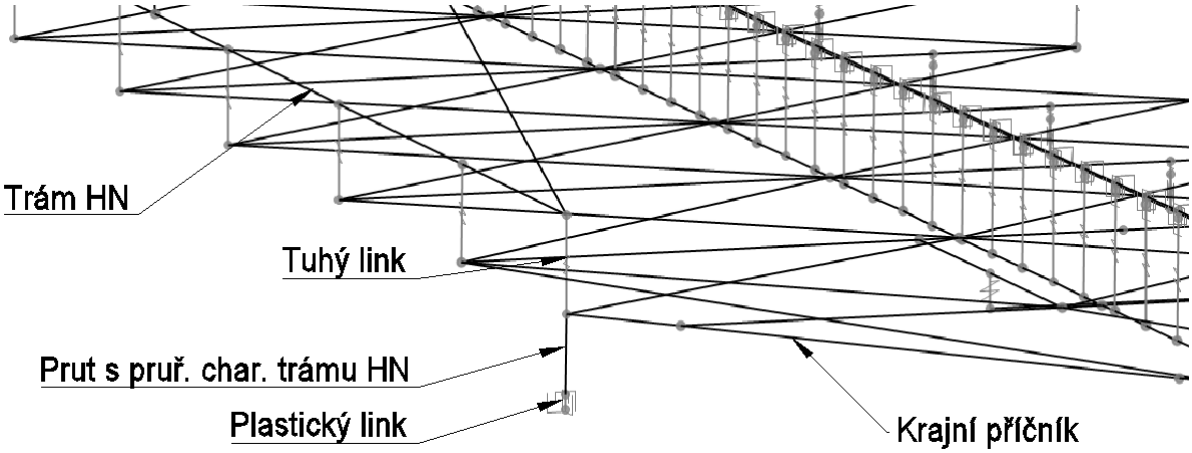
napětí v ložisku: $\sigma_{ostrý} = 3350 / \pi \cdot 0{,}650/4 = 10{,}0MPa$

součinitel tření: $\mu_{ostrý} = 0{,}8 \cdot 1 / (10 + 10{,}0) = 0{,}040$

třecí síla: $F_{třecí} = 3350 \cdot 0{,}040 = 135kN$

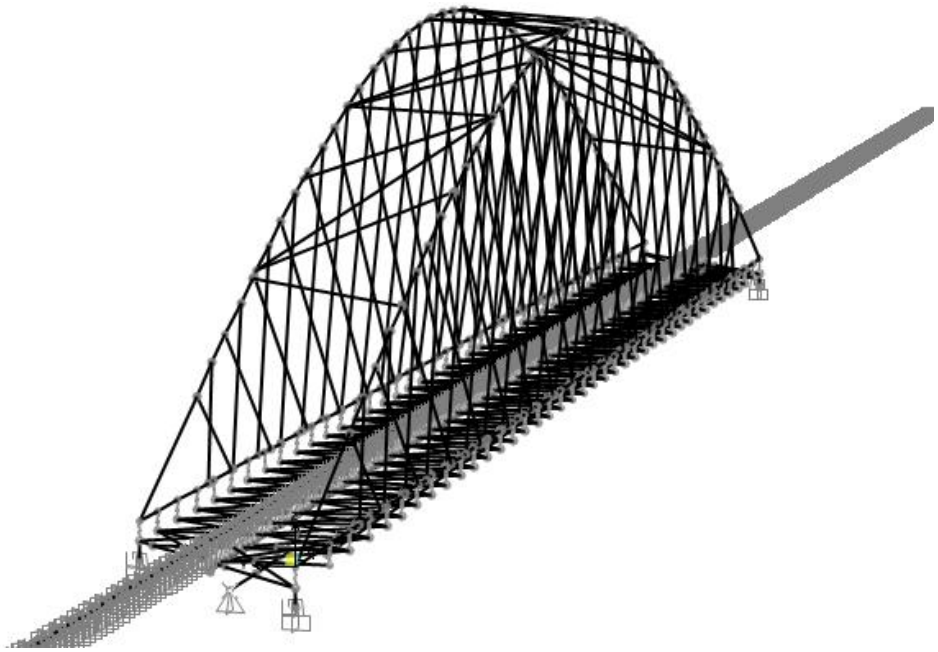



Obrázek 143: Linky obou ložisek

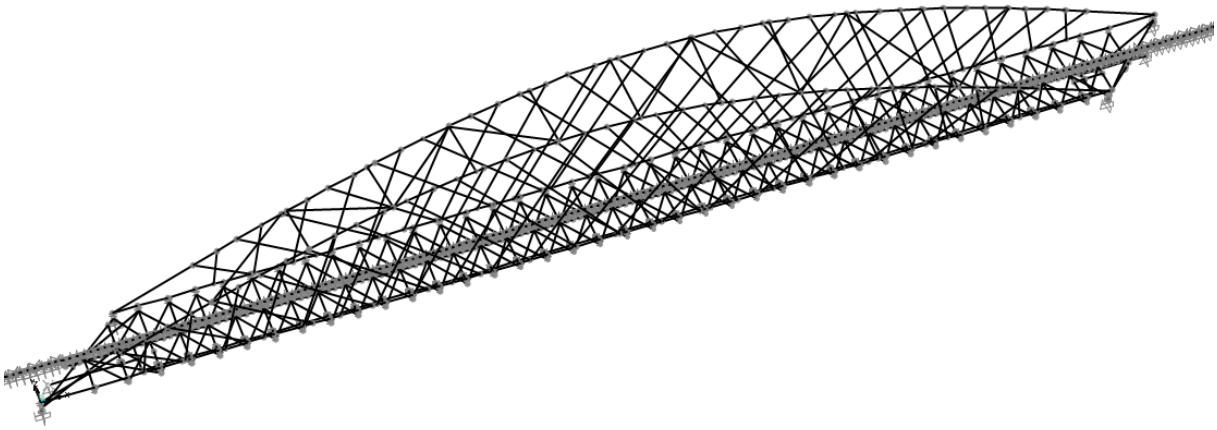



Obrázek 144: Model ložiska

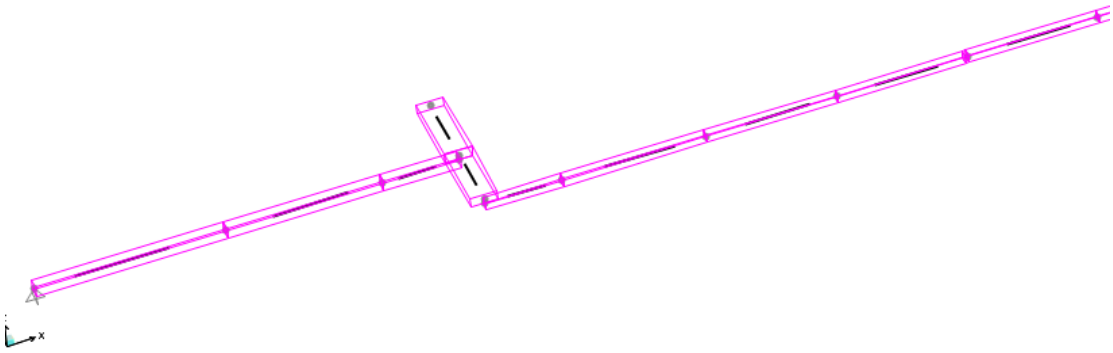
## 7.5 Zobrazení modelu



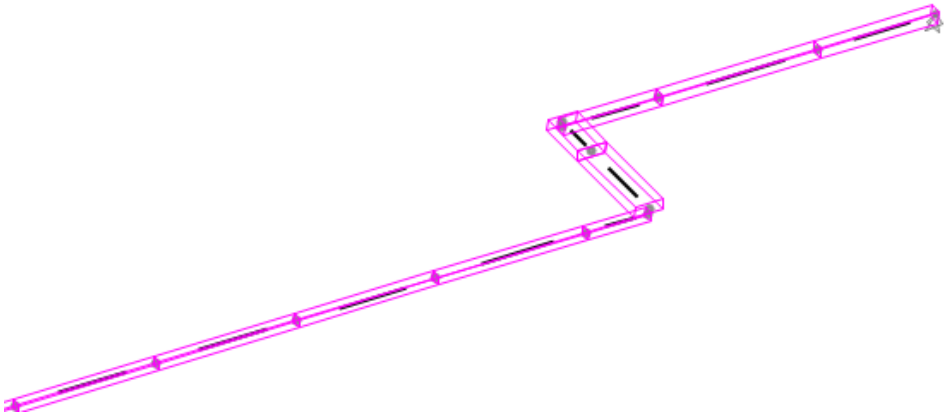
Obrázek 145: Pohled na model ve směru od Hohenau



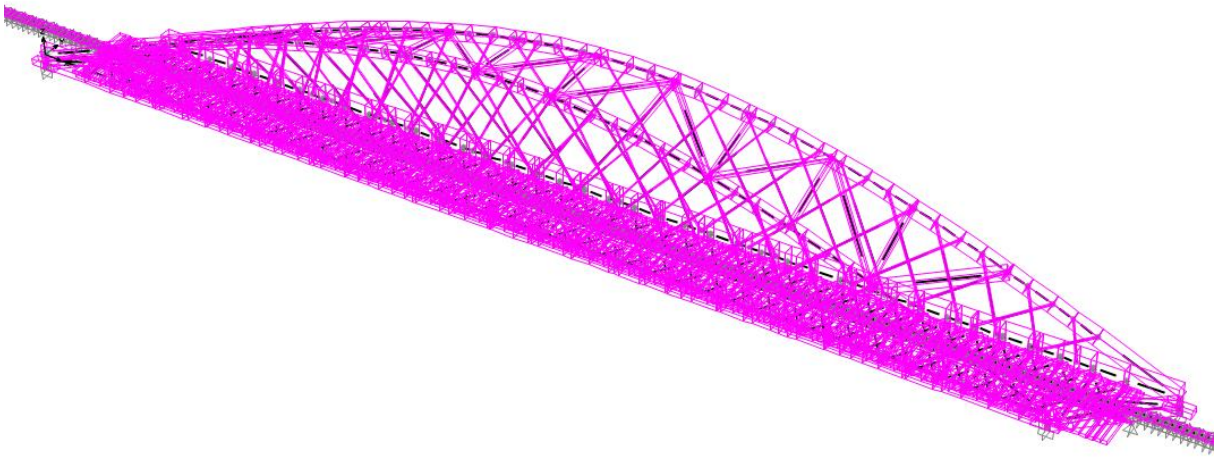
Obrázek 146: Pohled na model ze shora



Obrázek 147: SŘDM na straně Hohenau



Obrázek 148: SŘDM na straně Břeclav

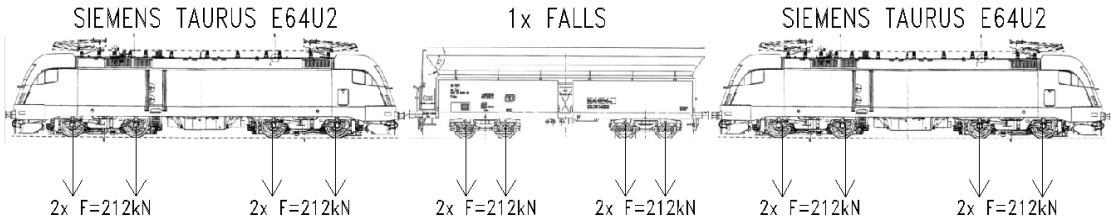


Obrázek 149: Pohled od Břeclavi

## 7.6 Stanovení zatížení

### 7.6.1 Svislé zatížení

Svislé zatížení bylo stanoveno tak, že byla spočtena celková tíha vlaku a následně podělena počtem náprav. Vzhledem k tomu, že tíha Taurusu (87t) a tíha Falsu (80t) se příliš neliší, má toto zjednodušení zanedbatelný vliv.




Obrázek 150: Svislé zatížení zadané do modelu

### 7.6.2 Stanovení brzdných a rozjezdových sil

Hodnota brzdných a rozjezdových sil byla spočtena podle vztahu:

$$F = m_{vlak} \cdot a_{zs}$$

$m_{vlak}$ - tíha vlaku [kg]

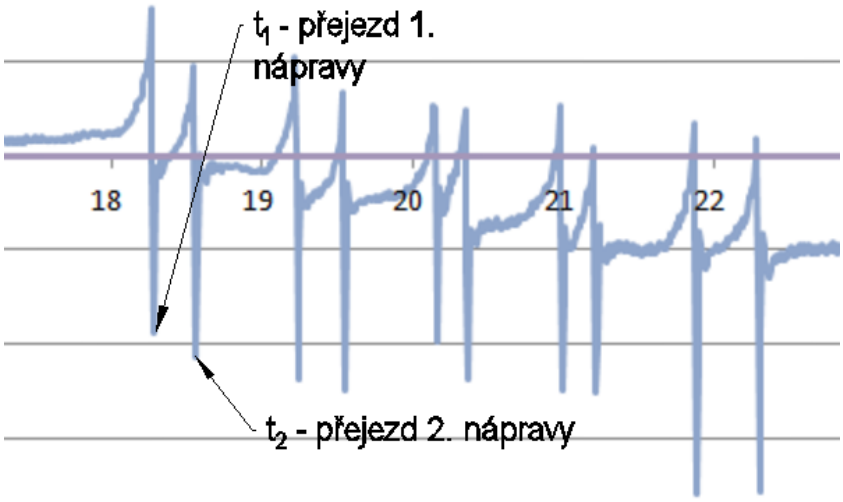
$a_{zs}$ – zpomalení nebo zrychlení zatěžovacího vlaku [m/s$^2$]

#### *7.6.2.1 Brzdné síly*

Rychlost vlaku při přejezdu přes jednotlivé tenzometry byla odečtena z jejich záznamů, tak že byly zaznamenány časy přejezdů prvních dvou náprav přední lokomotivy.

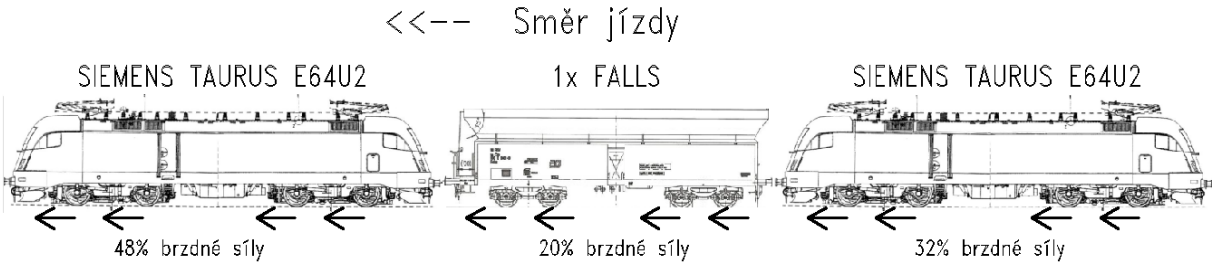
Rychlost se stanovila podělením rozdílu časů přejezdů vzdáleností náprav. Následně byla vytvořena funkce popisující rychlost vlaku v závislosti na čase – funkce v(t). Tato funkce byla popsána parabolou 4° a následně derivována – derivací se získalo zpomalení – funkce a(t). Brzdná síla se následně vyčíslila součinem tíhy vlaku a zpomalením.

Lze namítnout, že zpomalení by se dalo stanovit tak, že bychom spočetli rychlost třetí a čtvrté nápravy, tu pak odečetli od rychlosti první a druhé nápravy a vzniklý rozdíl by se vydělil rozdílem časů přejezdů prvních náprav dvojkolí. Tato metoda je možná, nicméně při příjezdu vlaku k mostu jel vlak rychlostí cca 14m/s. Při této rychlosti přejede první dvojkolí tenzometr za necelých 0,3 sekundy. Vzhledem k tomu, že permanentní tenzometry, které se nacházely v předpolí mostu, snímaly záznam s krokem 0,02 sekundy, vznikaly při stanovování zrychlení velké nejistoty. Při pomalejších rychlostech odpovídaly hodnoty zpomalení, které byly stanoveny touto metodou, hodnotám zpomalení získané derivací funkce v(t).




Obrázek 151: Záznam přejezdů náprav přes tenzometr

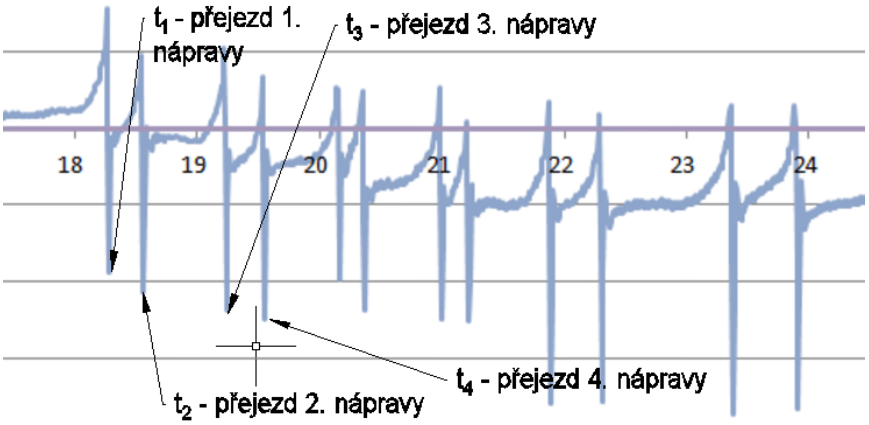
Do modelu byla brzdná síla zadána do jednotlivých náprav tak, že Falls přebíral 20% brzdné síly, čelní lokomotiva 48% brzdné síly a zadní lokomotiva 32% brzdné síly.




Obrázek 152: Rozložení brzdných sil vlakové soupravy zadané do modelu

### 7.6.2.2 *Rozjezdové síly*

Rozjezdové síly byly stanoveny ze změny rychlostí přejezdů prvního a druhého dvojkolí. Tato metoda byla na rozdíl od stanování brzdných sil výhodnější, neboť vlak se zpočátku rozjížděl přes dočasné tenzometry, které snímaly s krokem 0,01 sekundy. Díky tomu se dalo přesně stanovit zrychlení vlaku a průběh funkce zrychlení a(t). Při přejezdu přes permanentní tenzometry v předpolí mostu vlak již výrazně neměnil rychlost, proto při odečtu zrychlení z těchto tenzometrů nedocházelo k velkým nejistotám.

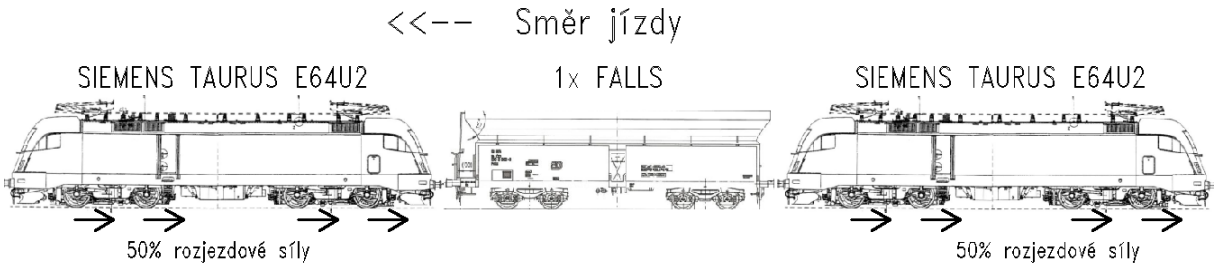



$$a = \frac{\frac{d}{t_4 - t_3} - \frac{d}{t_2 - t_1}}{t_3 - t_1}$$

$t_1$ - $t_4$ – časy přejezdů náprav přes tenzometr [s]

d - vzdálenost dvojkolí [m]

Do modelu byla rozjezdová síla zadána do jednotlivých náprav tak, že obě lokomotivy měly stejný účinek.




**Obrázek 153: Rozložení rozjezdových sil vlakové soupravy zadané do modelu**

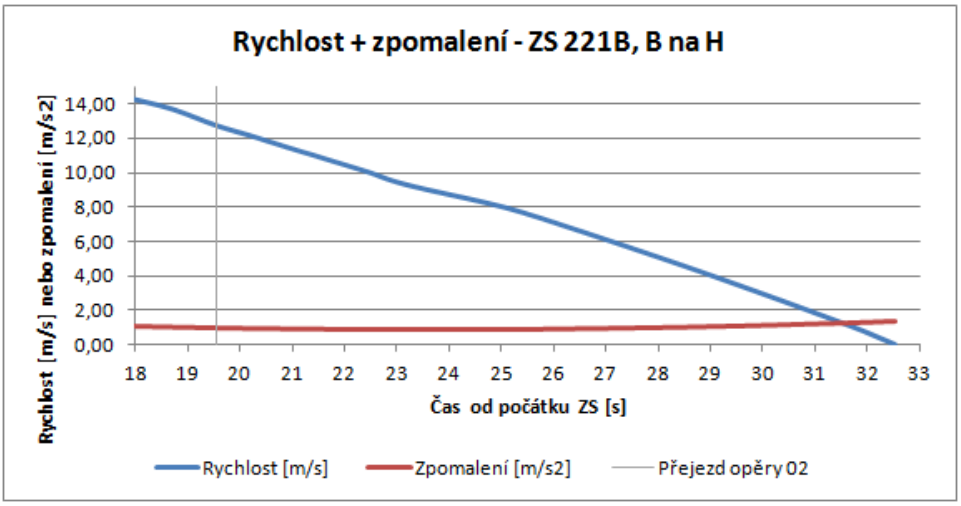
## 7.7 Zatížení zadané do modelu

Velikost a průběh brzdných a rozjezdových sil, které vyvolaly zatěžovací stavy ZS242 a ZS221B, byly zadány do numerického modelu. Tyto zatěžovací stavy byly vybrány, neboť jejich počáteční rychlost byla 100km/h a vlakovým soupravám se podařilo zastavit téměř ve stejné vzdálenosti od opěr.

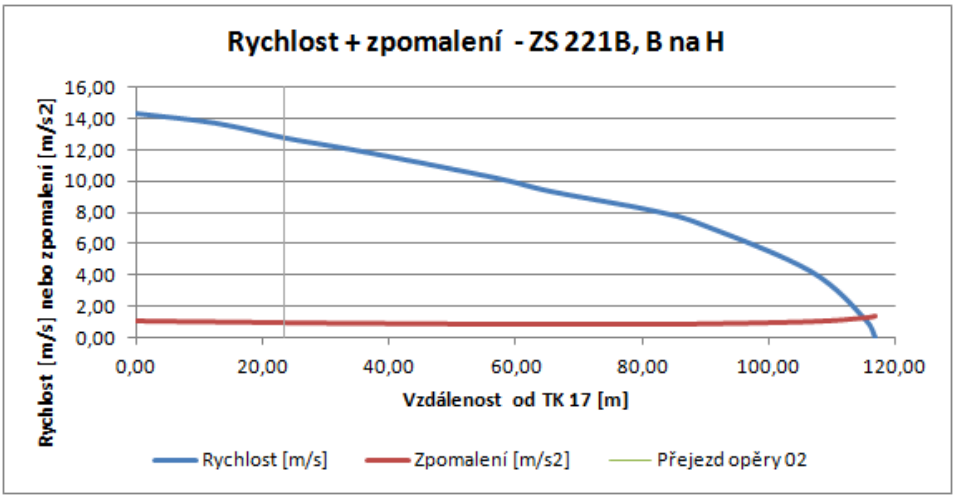
Pro každý zatěžovací stav jsou pro brzdění a rozjezd připraveny tři grafy, na kterých je zobrazená změna rychlosti, zrychlení a brzdné nebo rozjezdové síly při pohybu vlaku. Grafy jsou nepatrně rozvlněné, neboť při stanovování rychlosti a zrychlení docházelo k nepatrným odchylkám, které byly způsobené délkou snímacího kroku tenzometrů.

### 7.7.1 ZS 221B

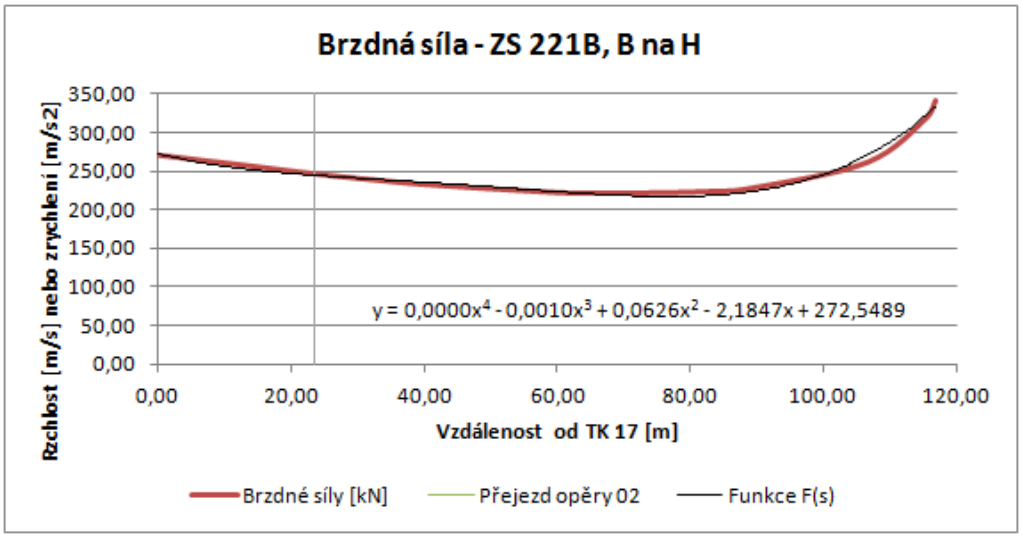
#### *7.7.1.1 ZS 221B - Brzdění*




Obrázek 154: ZS221B: rychlost a zpomalení v závislosti na čase

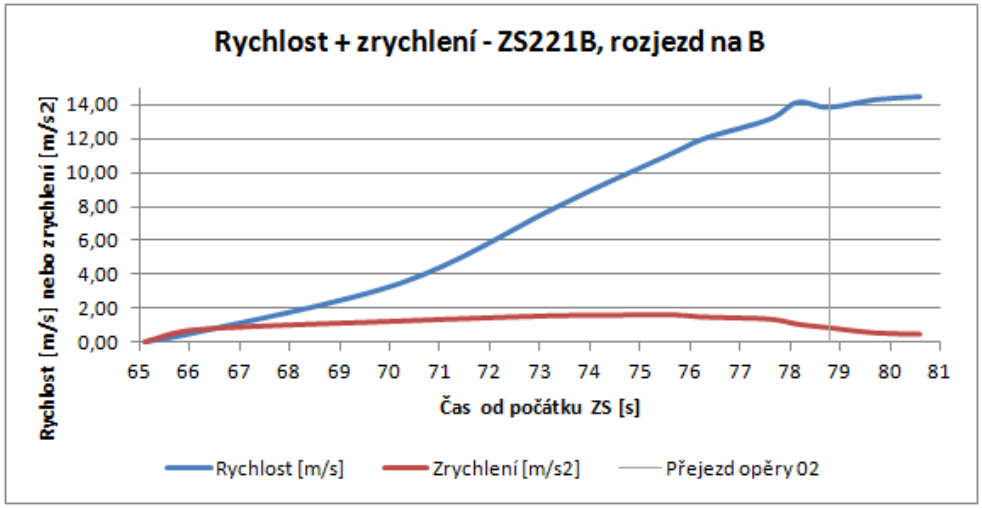



Obrázek 155: ZS 221B: rychlost a zpomalení v závislosti na dráze

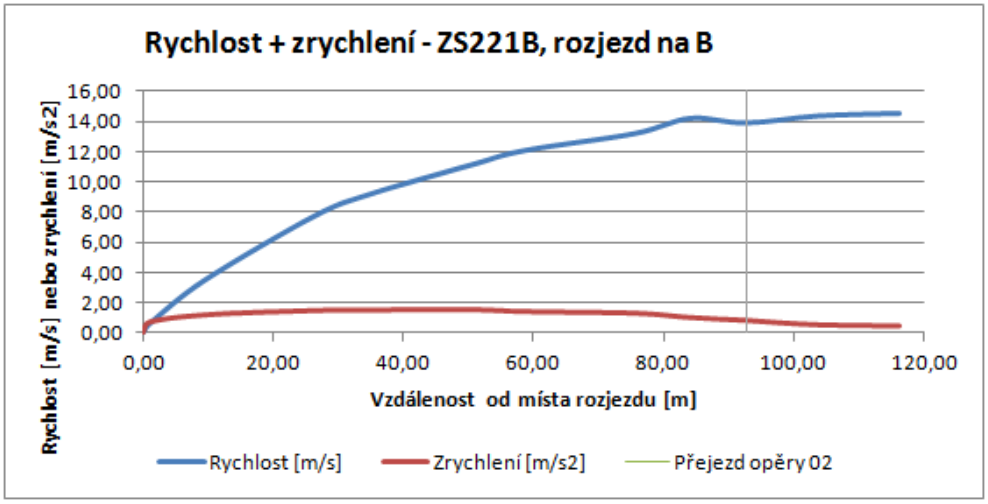



Obrázek 156: : ZS221B: Brzdná síla v závislosti na dráze. Funkce F(s) byla zadána do modelu jako zatěžovací funkce.

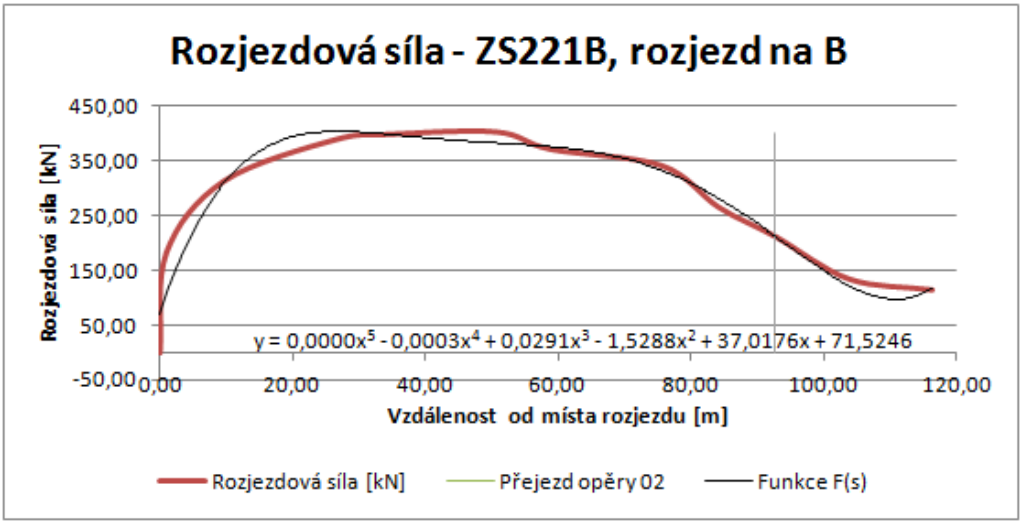
### 7.7.1.2 ZS 221B – Rozjezd




Obrázek 157: ZS221B: rychlost a zrychlení v závislosti na čase

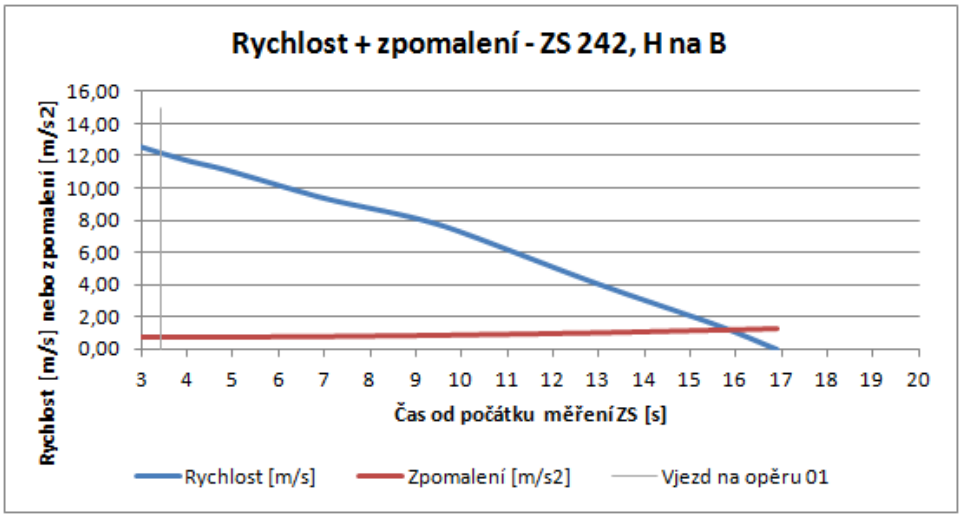



Obrázek 158: ZS221B: rychlost a zrychlení v závislosti na dráze

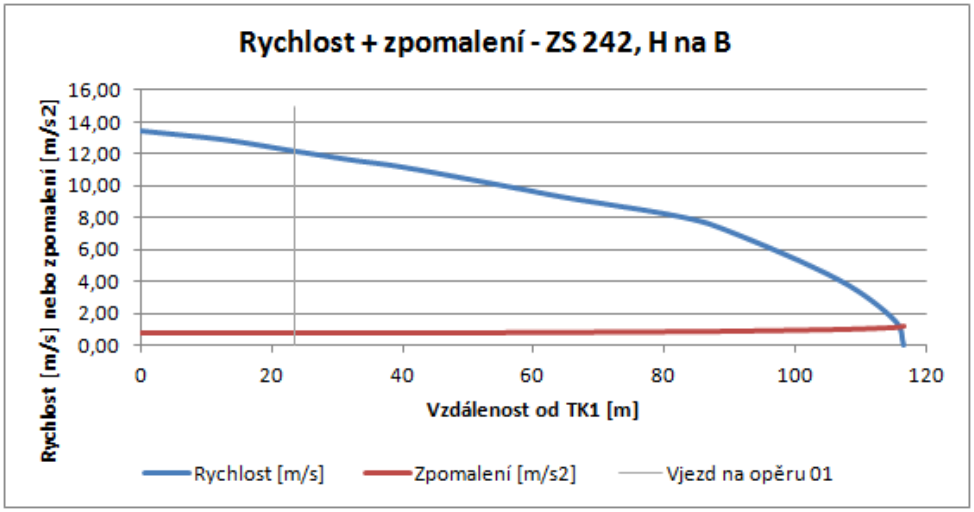



Obrázek 159: Obrázek 87:ZS221B: Brzdná síla v závislosti na dráze. Funkce F(s) byla zadána do modelu jako zatěžovací funkce.

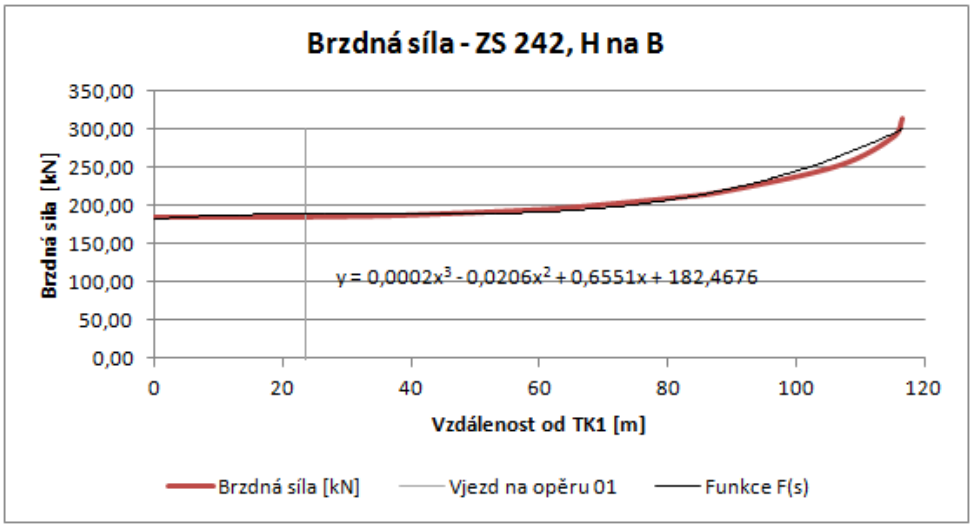
### 7.7.1.3 ZS 242 – Brzdění




Obrázek 160: ZS 242: Rychlost a zpomalení v závislosti na čase

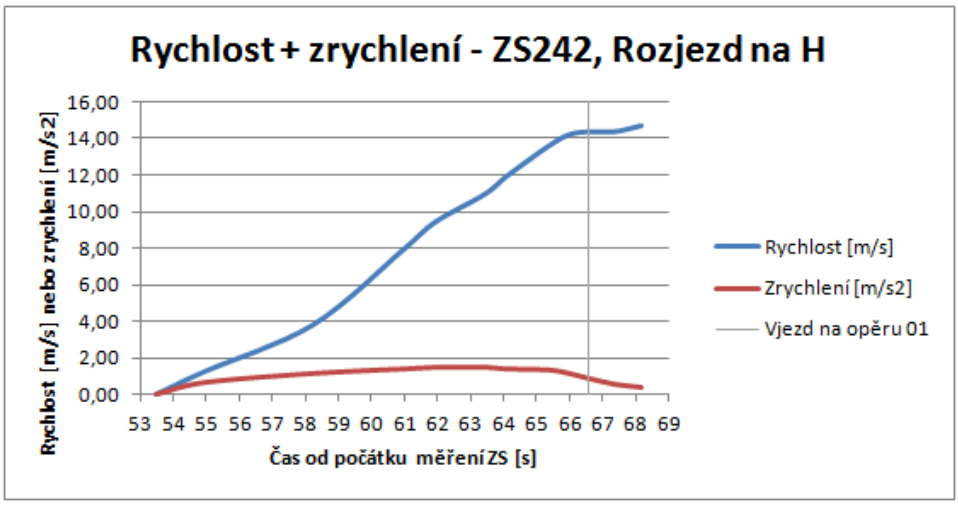



Obrázek 161: ZS242: Rychlost a zpomalení v závislosti na dráze

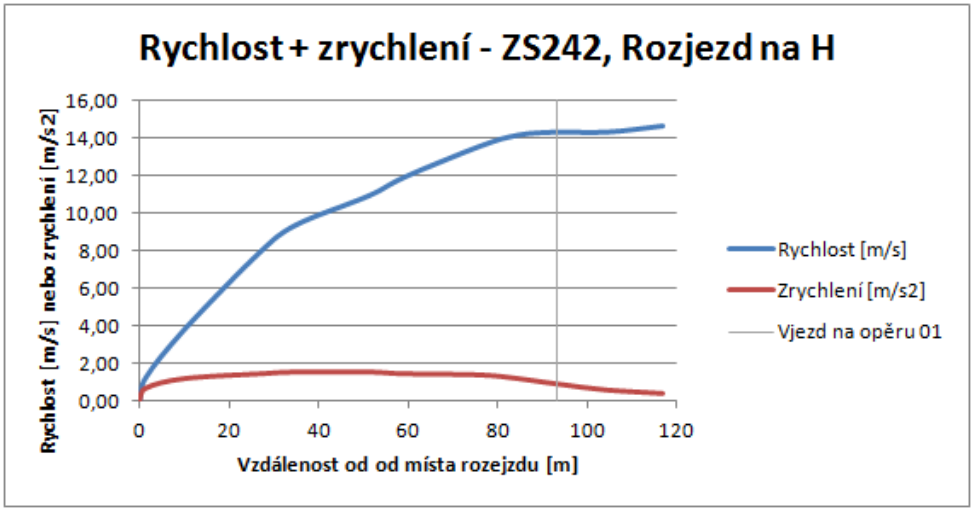



Obrázek 162: ZS242: Brzdná síla v závisloti na dráze. Funkce F(s) byla zadána do modelu jako zatěžovací funkce

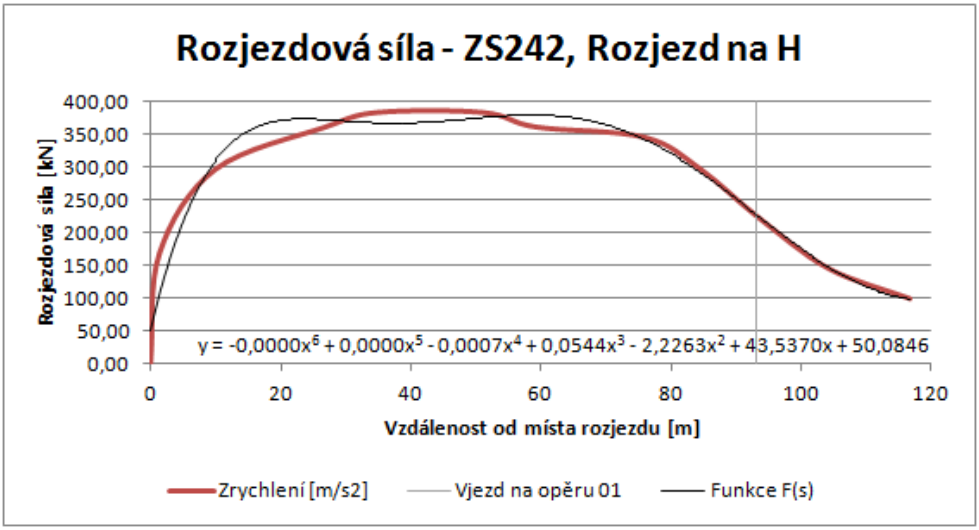
### *7.7.1.4 ZS 242 – Rozjezd*




Obrázek 163: ZS242: Rychlost a zrychlení v závislosti na čase




Obrázek 164: ZS242: Rychlost a zrychlení v závislosti na dráze



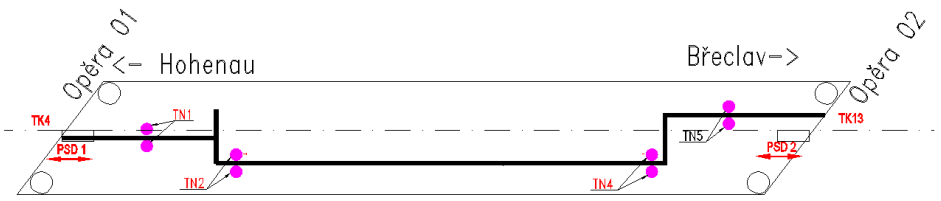

**Obrázek 165: ZS242: Rozjezdová síla v závislosti na dráze. Funkce F(s) byla zadána do modelu jako zatěžovací funkce.**

# 8 Validace modelu

## 8.1 Úvod

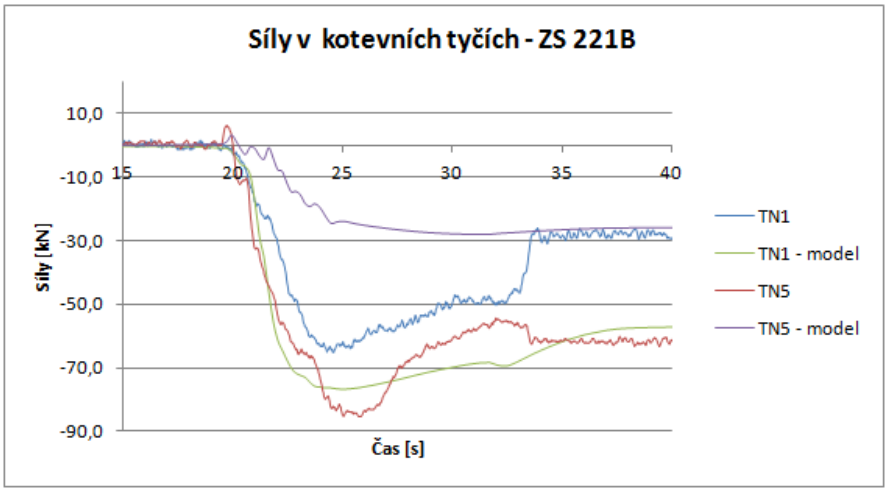
Model byl validován s tuhostí kolejového lože v širé trati $k_{trať}$ = 12 kN/m na pražec a s tuhostí kolejového lože na mostě $k_{most}$=17 kN/m na pražec. Hodnoty linků, které reprezentovaly zatížené kolejové lože, byly zvoleny tak, aby součet tuhostí nezatíženého a přidaného linku byl $k_{trať,zat}$ = 40 kN/m, na mostě činil součet obou linků $k_{most,zat}$ = 60 kN/m. Tuhost přidaných linků měla na konečné výsledky naprosto zanedbatelný vliv. Třecí síla v sedlech SŘDM byla zvolena $F_t$ = 1,68 kN. Třecí síla v ložiscích v ostrém rohu činila $F_{t,loz,ostrý}$ = 115 kN, v tupém rohu měla hodnotu $F_{t,loz,tupý}$ = 135 kN.

Sledovány byly hodnoty normálových sil v kotevních tyčích (TN1, TN5), v řídící tyči (TN2 a TN4) a v koleji (TK4 a TK13). Sledován byl také vodorovný posun mostu (PSD1 a PSD2). Hodnoty normálových sil reálné koleje v následujících grafech byly získány zdvojnásobením experimentálně naměřených hodnot osových sil levé kolejnice.

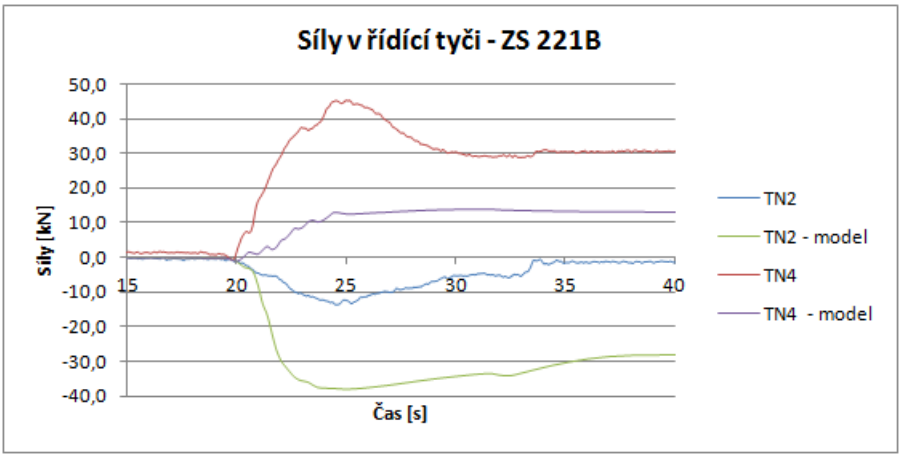



**Obrázek 166: Schéma sledovaných snímačů na NOK1.**

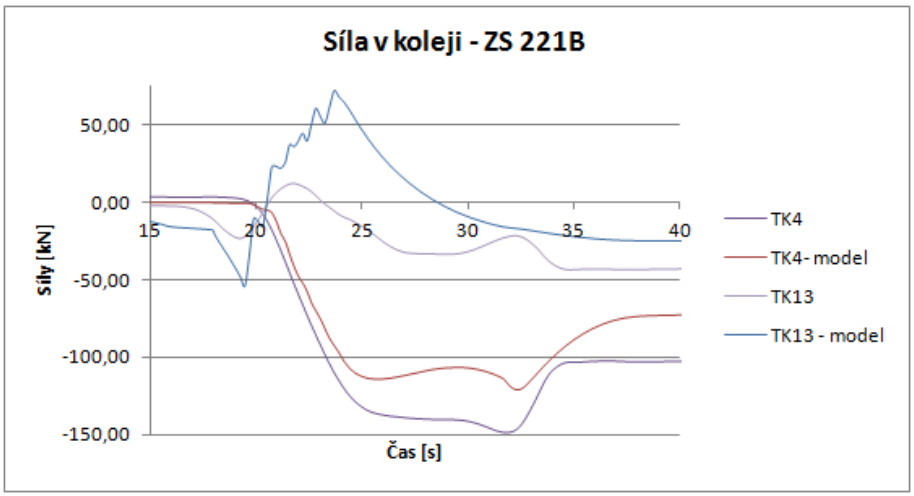
### 8.1.1 ZS221B – Brzdění



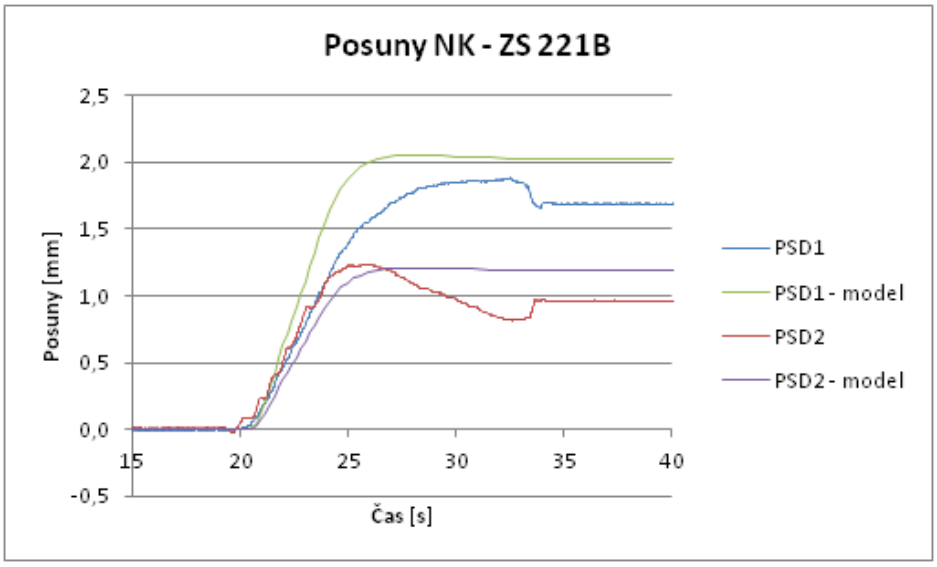

Obrázek 167: ZS221B - brzdění: Porovnání normálových sil v kotevních tyčích - model/experiment




Obrázek 168: ZS221B- brzdění: Porovnání normálových sil z koncu řídící tyče - model/experiment

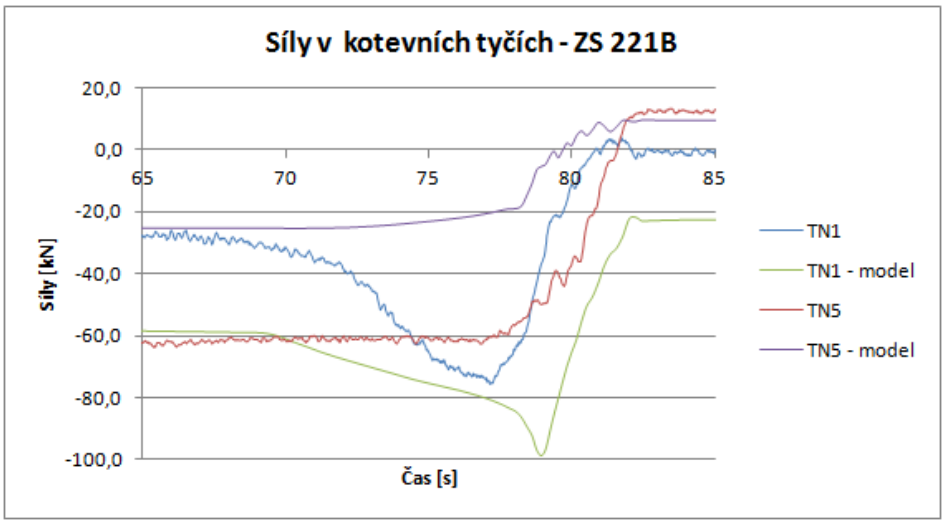



Obrázek 169: ZS221B- brzdění: Porovnání normálových sil koleje - model/experiment

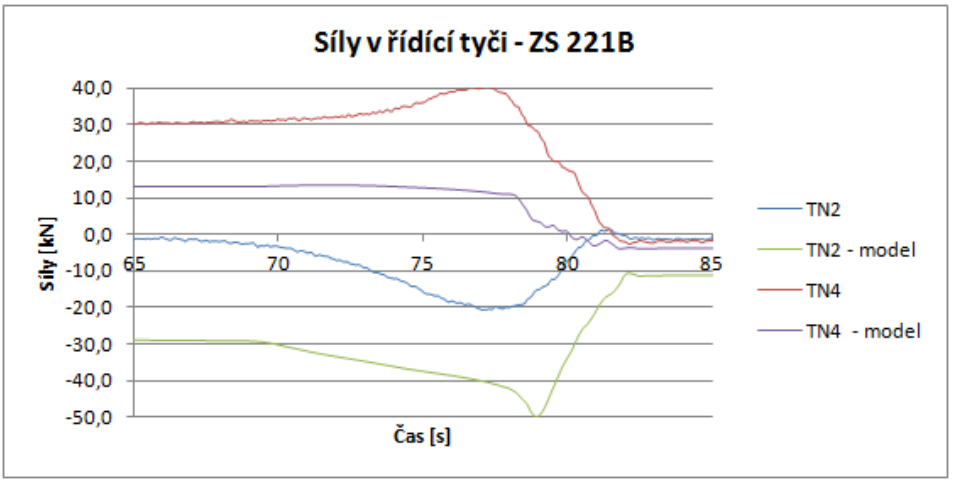



Obrázek 170: ZS221B- brzdění: Porovnání posunů NK - model/experiment

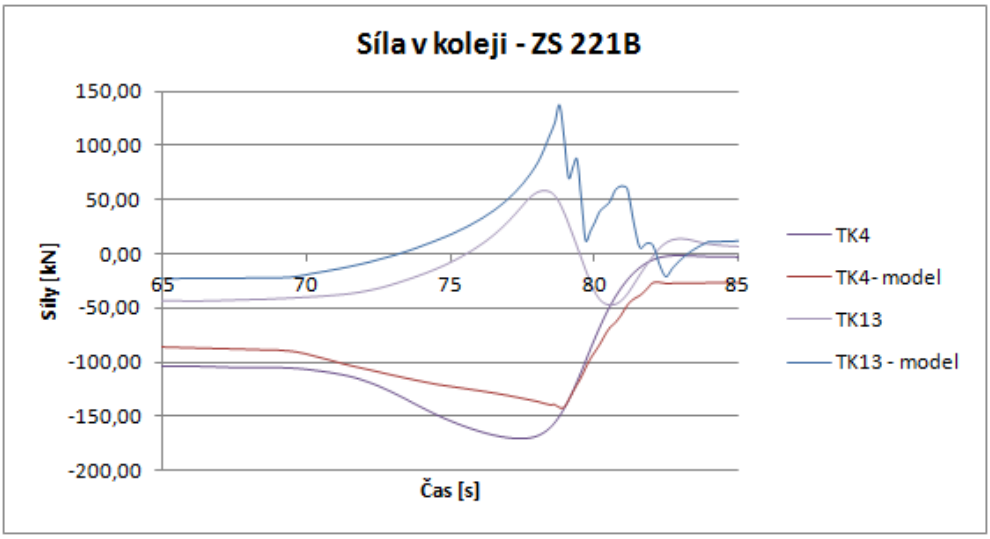
### 8.1.2 ZS221B - Rozjezd



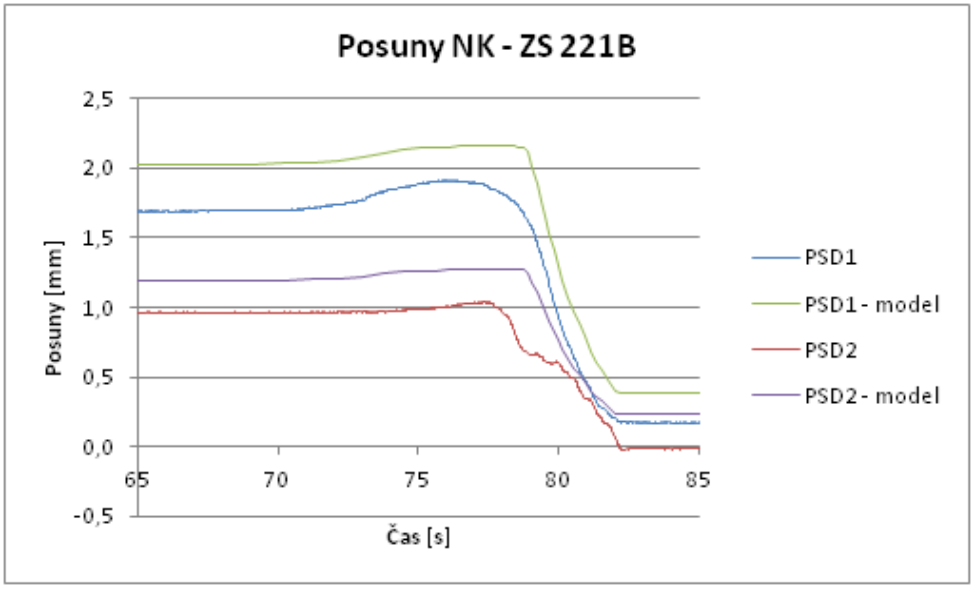

Obrázek 171: ZS221B – rozjezd: Porovnání normálové síly v kotevních tyčích – model/experiment




Obrázek 172: ZS221B - rozjezd: Porovnání normálové síly v řídící tyči - model/experiment

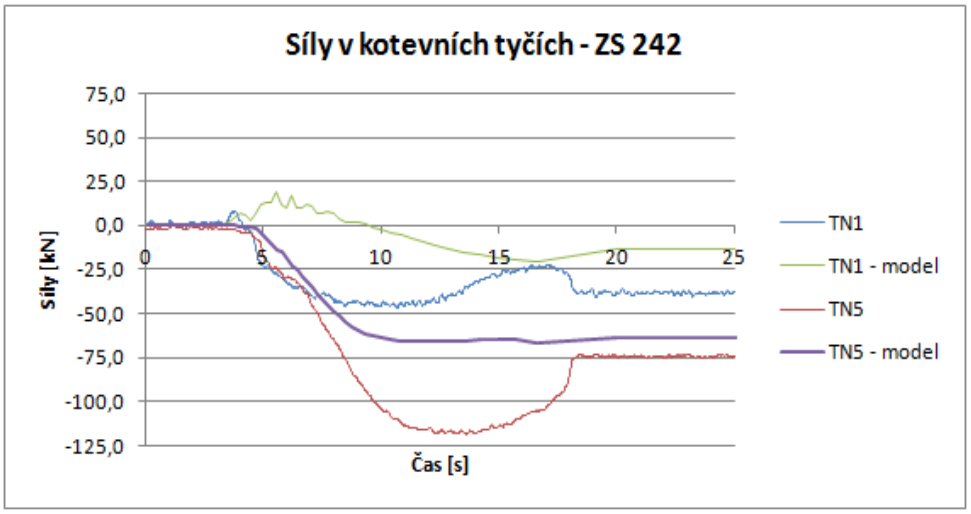



Obrázek 173: ZS221B - rozjezd: Porovnání normálové síly v koleji - model/experiment

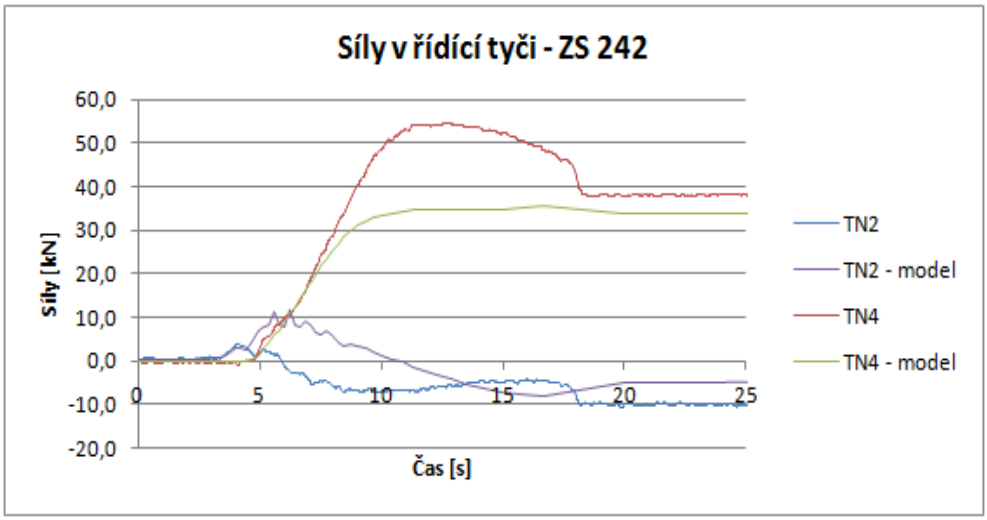



Obrázek 174: ZS221B - rozjezd: Porovnání posunů NK - model/experiment

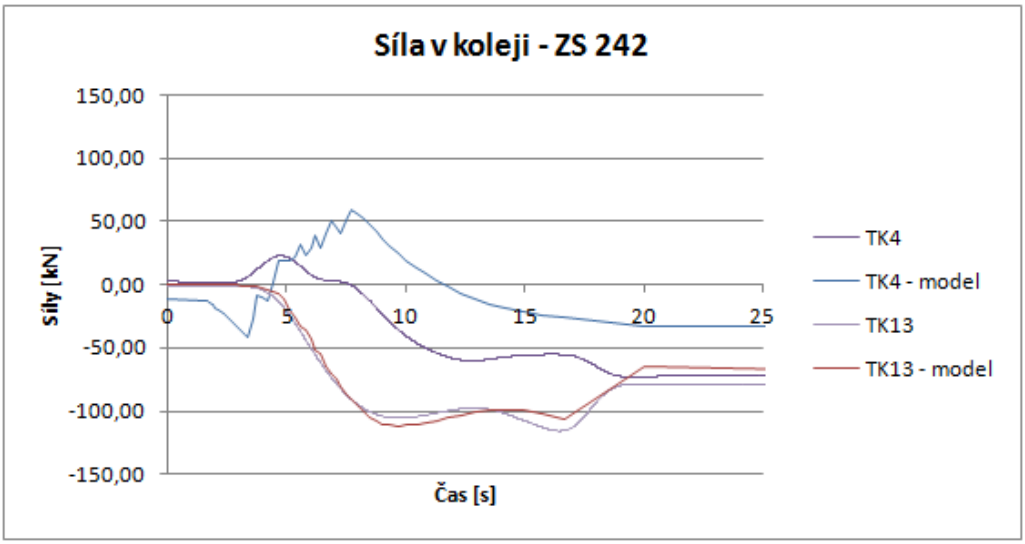
### 8.1.3 ZS 242 – Brzdění



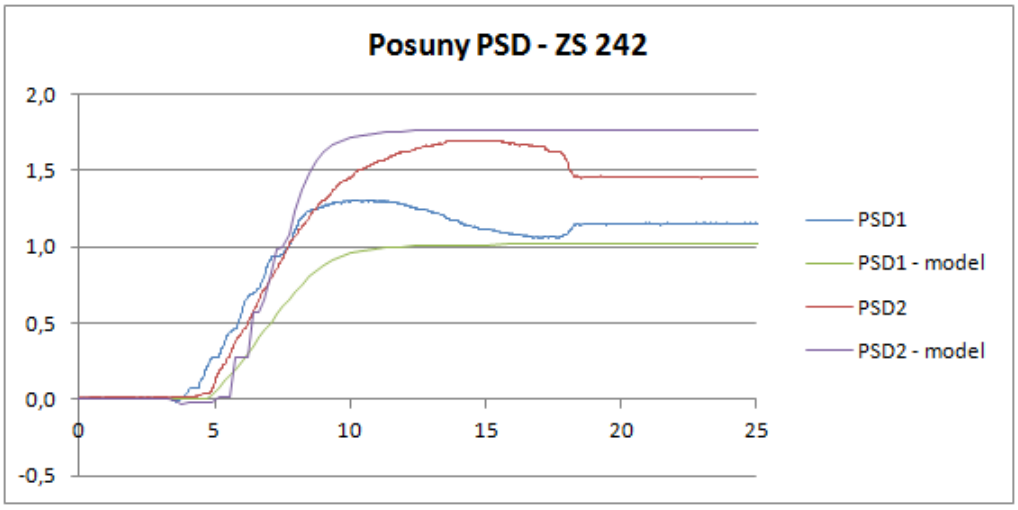

Obrázek 175: ZS242 - brzdění: Porovnání normálových sil v kotevních tyčích - model/experiment




Obrázek 176: ZS 242 - brzdění: Porovníní normálových sil v řídící tyči - model/experiment

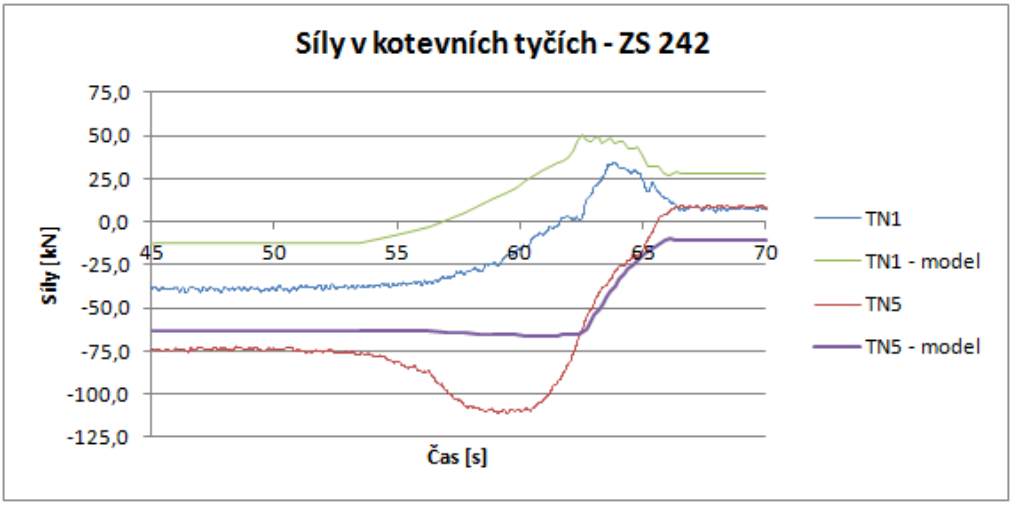



Obrázek 177: ZS 242 - rozjezd: Porovnání normálových sil v koleji - model/experiment

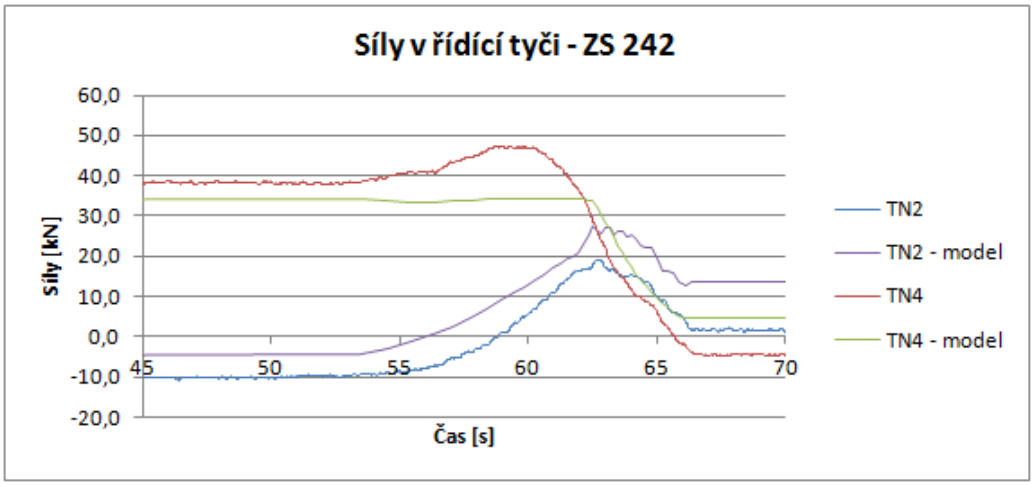



Obrázek 178: ZS242 - brzdění: Porovnání posunů NK - model/experiment

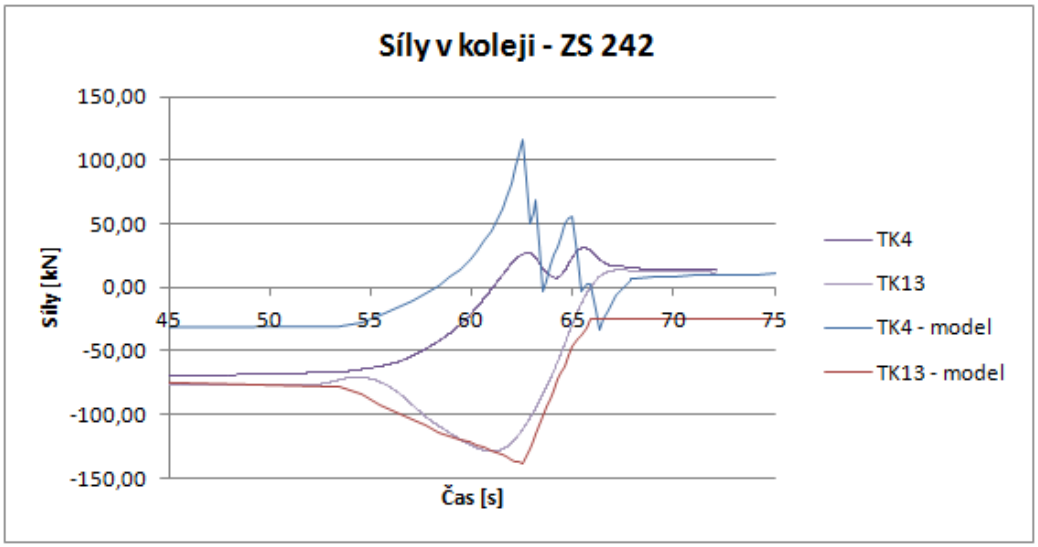
### 8.1.4 ZS 242 – Rozjezd



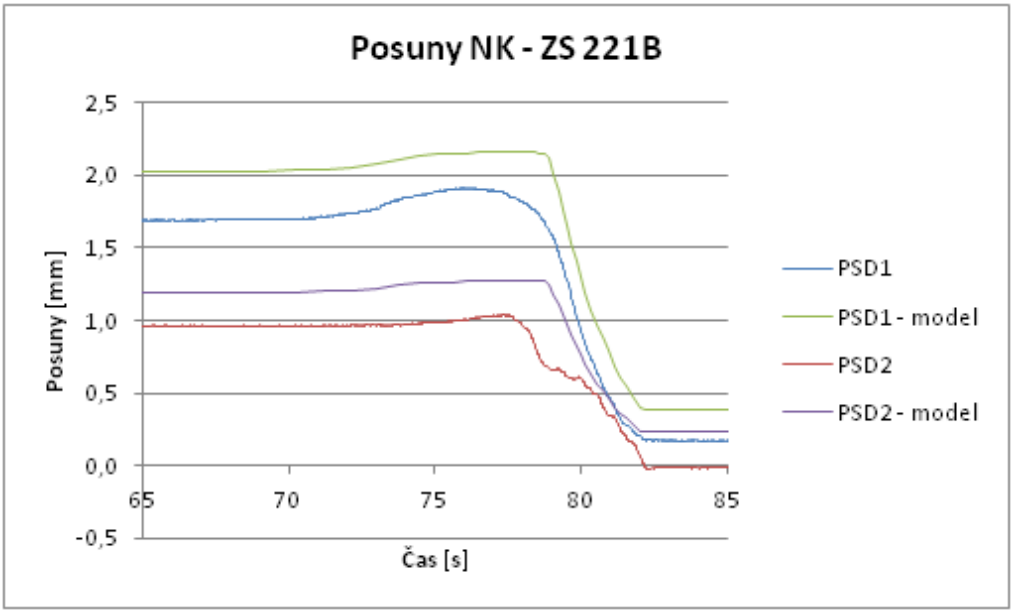

Obrázek 179: ZS242 - rozjezd: Porovnání normálových sil v kotevních tyčích - model/experiment




Obrázek 180: ZS242 - rozjezd: Porovnání normálových sil v řídící tyči - model/experiment




Obrázek 181: ZS242 - rozjezd: Porovnání normálových sil v koleji - model/experiment




Obrázek 182: ZS242 - rozjezd: Porovnání posunů NK - model/experiment

## 8.2 Zhodnocení validace

Chování validovaného modelu částečně odpovídá chování reálného mostu. K tomu, aby se dospělo alespoň k této shodě, bylo vytvořeno velké množství modelů, na kterých byla měněna tuhost kolejového lože, tření v řídící tyči a tření v ložiskách.

Změna tuhosti kolejového lože jen nepatrně ovlivnila hodnotu normálových sil, které byly vyvolané brzdnými a rozjezdovými účinky vlaku. Projevila se spíše při statických účincích a to tak, že se zvýšením tuhosti vzrostla záporná normálová síla nad oběma opěrami. Aby se chování modelu alespoň částečně podobalo chování reálného mostu, byla zvolena tuhost nezatíženého kolejového lože na mostě k = 17kN/m. Tato hodnota je vyšší poněkud vyšší než se běžně udává. Předpokládá se, že během dynamických a brzdných zatěžovacích zkoušek došlo k přerovnání zrn štěrkového lože a tím i k jeho ztužení. K tomuto předpokladu se lze přiklonit i z toho důvodu, že ZS242 a ZS221B byly provedeny téměř na konci zatěžovacích zkoušek, kdy tuhost kolejového lože mohla být ovlivněna předchozí působením zatěžovacího vlaku.

Změna třecí síly v sedlech řídící tyče výrazně ovlivňovala hodnoty normálových sil v celém SŘDM. Byly testovány třecí síly s hodnotou kolem 0,5kN. Při těchto hodnotách ale nebylo možné dosáhnout tlaku v obou kotevních tyčích, tak jak je tomu ve skutečnosti. Reálnějšího chování modelu bylo dosaženo až po tom, co byla aplikována třecí síla kolem 1,5-1,7kN, které byly i stanoveny výpočtem. Proto bylo nakonec zvoleno, že třecí síla v sedlech řídící tyče zadaná do modelu bude mít hodnotu $F_t$=1,68kN.

Změna třecí síly v ložiscích prakticky neovlivnila hodnotu normálových sil koleje a SŘDM. Předpokládá se, že při pohybu vlaku dojde k okamžitému překonání třecí síly v ložisku a tím i k jeho následnému tečení. Výraznější změny bylo dosaženo, pokud

k plastickému tečení ložiska docházelo po jeho posunutí o 0,8-1,1mm. V tom případě bylo dosaženo velkých tlakových namáhání v koleji nad opěrou, která byla pouze přejížděna.

Vcelku přesně se podařilo podchytit chování koleje na opěře, u které má vlak zastavit. Rozdíl mezi experimentálně naměřenými hodnotami osových sil a hodnotami osových sil v modelu je cca 30% s tím, že vyšší hodnoty vycházejí z experimentálního měření. Naopak, při přejezdu vlaku přes opěru, na které nemá zastavit je zřejmé, že kolej nad touto opěrou reaguje opožděně.

Kotevní tyče reagují lépe na té straně mostu, na které měl vlak zastavit. U ZS221B je vcelku uspokojivý průběh normálové síly v kotevní tyči na straně Hohenau, hodnota této síly je v rámci tolerance akceptovatelná. Bohužel, na straně mostu, která je přejížděná, řídící tyče téměř nereagují na brzdné síly.

V řídících tyčích bylo dosaženo podobného průběhu klidových normálových sil jako v experimentu. Součet absolutních hodnot normálových sil na koncích řídící tyče přibližně odpovídá experimentálně naměřeným. Za povšimnutí stojí, že hodnoty normálových sil z experimentu a z modelu jsou vůči sobě posunuty. Lze z toho usoudit, že statické působení vlaku na reálném mostě je jiné, než v modelu. Nejspíše se jedná o vliv šikmosti, který není v modelu dostatečně zohledněn.

Hodnoty posunů bodů v modelu, které reprezentují vodící ložisko, odpovídají maximální hodnotou spíše na té straně mostu, na které bylo vyžadováno zastavení vlaku. U PSD1-model (vodící ložisko na straně Hohenau) si lze povšimnout, že reaguje opožděně na straně mostu, kterou vlak přejíždí a naopak reaguje s předstihem na té straně mostu, na které vlak zabrzdí. Bohužel, v modelu se nepodařilo podchytit změnu posunu vodících ložisek po tom, co se vlak na mostě přestal pohybovat.

Aby bylo dosaženo lepších výsledků, je nutné lépe podchytit statické chování nosné konstrukce. Je nutné si uvědomit, že kolejové lože na skutečném mostě výrazně ovlivňuje jeho tuhost. V modelu se dá změna tuhosti nosné konstrukce dosáhnout změnou průřezu trámu nebo oblouků, lze také přidat nebo odebrat pruty vyztužující mostovku nebo měnit jejich průřez.

Zohlednění tření v ložiscích při pohybu vlaku na mostě by mohlo ovlivnit průběh a velikost vnitřních sil v koleji a v SŘDM. Lze toho docílit tak, že k původnímu linku s třecí silou, který reprezentuje ložisko, by byly v průběhu přejezdu vlaku přidávány další třecí linky tak, aby součet tření v lincích dosáhl požadované hodnoty. Druhou možností, jak lépe zohlednit chování ložisek, je modelovat ložiska s jedním linkem, který odebírá stupeň volnosti ve svislém směru a k tomu přidat link s lineární závislostí třecí síly. Tento link by byl

v určité fázi přejezdu odebrán. Odebrání linku by reprezentovalo dosažení třecí síly a následné tečení ložiska.

# 9 Parametrická studie

## 9.1 Úvod

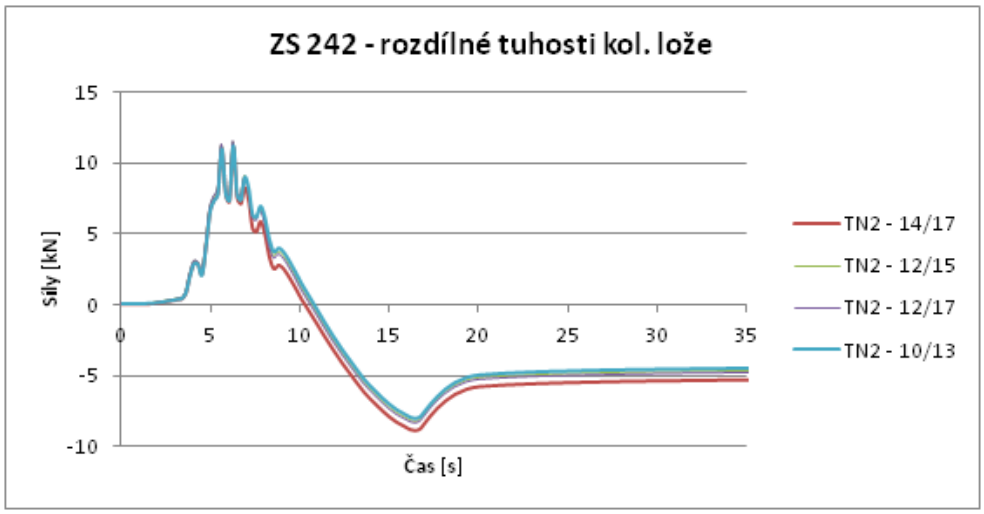
Na validovaném modelu byla provedena parametrická studie, která měla objasnit, jak se změní síly v kolejnicích a v SŘDM s měnící se hodnotou tuhosti kolejového lože a tření v řídící tyči. Ke studii byly vybrány tyto části, neboť na validovaném modelu vykazovaly nejreálnější chování. Vyšetřováno bylo také tření v ložiskách. Hodnoty, které jsou v grafech vyneseny lze brát pouze relativně, neboť model nebyl plně vyladěn. I tak ale poskytnou informace o chování interakce mezi SŘDM a kolejí. Parametrická studie byla provedena u zatěžovacího stavu ZS242. Pro přehlednost byla vyšetřována reakce jen při brzdění. Při rozjezdu docházelo ke stejným změnám v normálových silách a posunech, proto bylo rozhodnuto tuto část zatěžovacího stavu vynechat.

### 9.1.1 Změna tuhosti kolejového lože

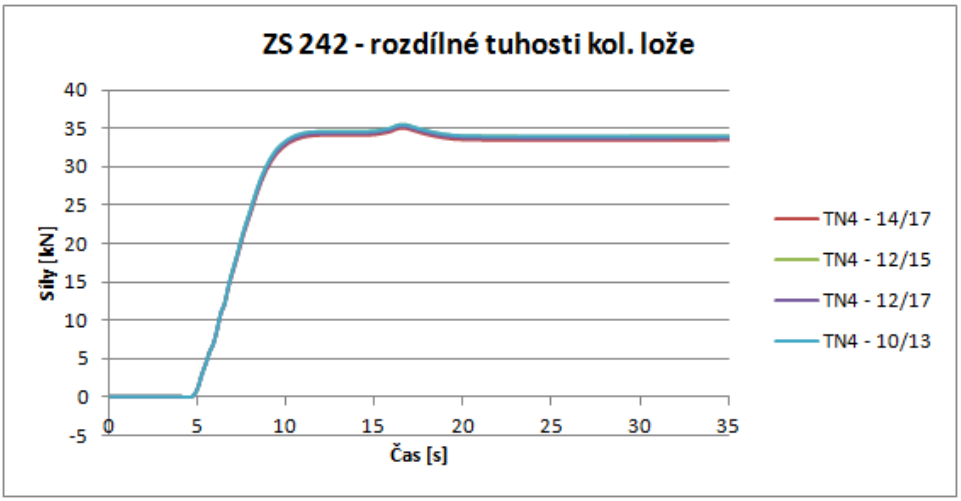
V této podkapitole bude zobrazeno, jak dochází ke změně normálových sil při změně tuhosti kolejového lože. Byly zvoleny celkem čtyři případy:

a) 14/17 – zvýšená tuhost kolejového lože, která může nastat například při přejetí podbíječkou
b) 12/15 – tuhost kolejového standardně podle normy
c) 12/17 – tuhost kolejového lože, pro kterou byl model validován
d) 10/13 – snížená tuhost kolejového lože v důsledku jeho stáří

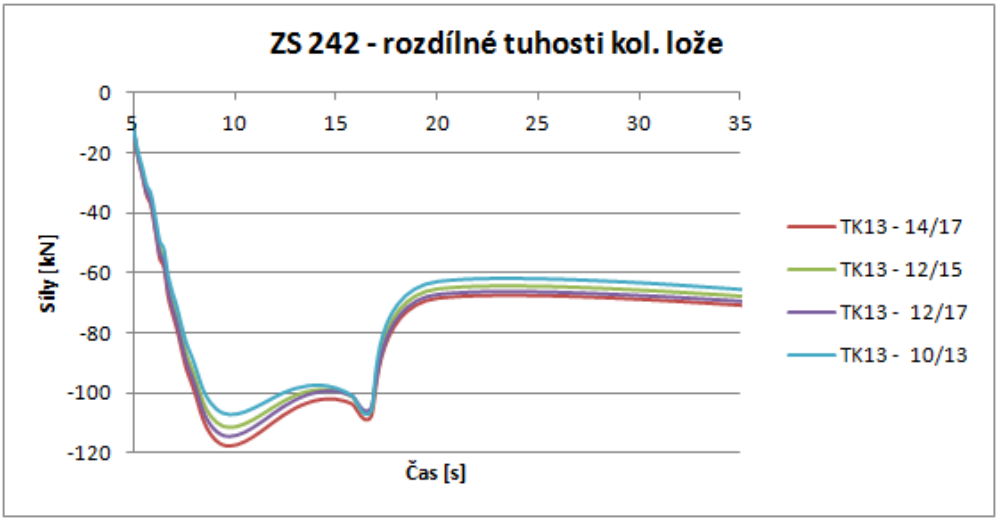
*Vysvětlení popisku obrázků: TK13 -14/17 – měřený tenzometr TK13, tuhost kol. lože v trati: k=14kN/m, tuhost kol. lože na mostě: k=17kN/m*



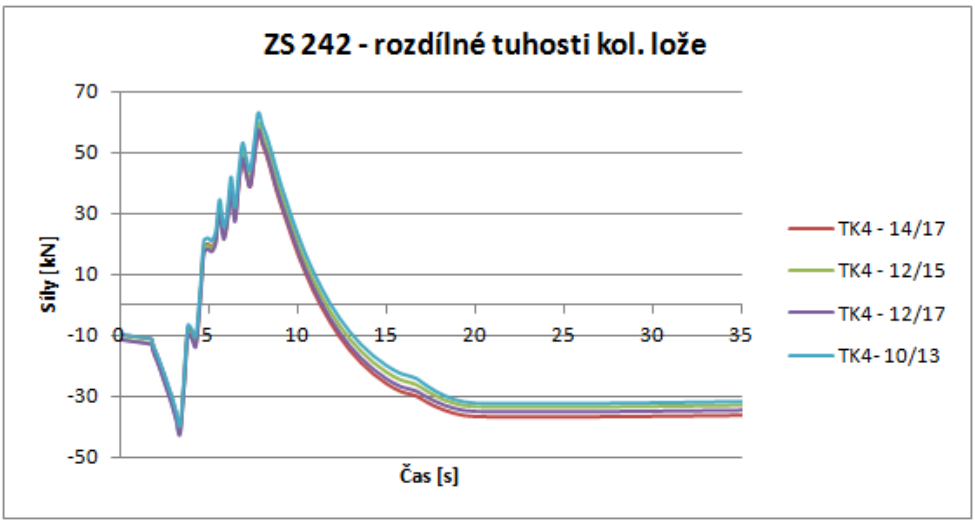

Obrázek 183: ZS242 – rozdílná tuhost k. lože: Porovnání normálových sil v místě TN2




Obrázek 184: ZS242 – rozdílná tuhost k. lože: Porovnání normálových sil v místě TN4

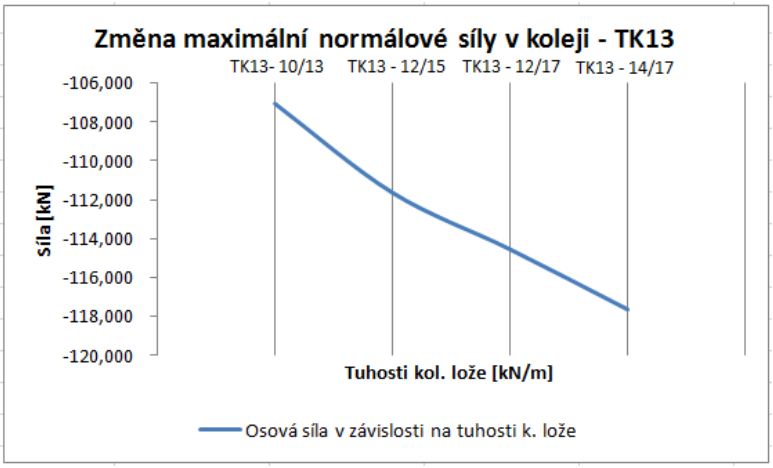



Obrázek 185: ZS242 – rozdílná tuhost k. lože: Porovnání normálových sil v místě TK13

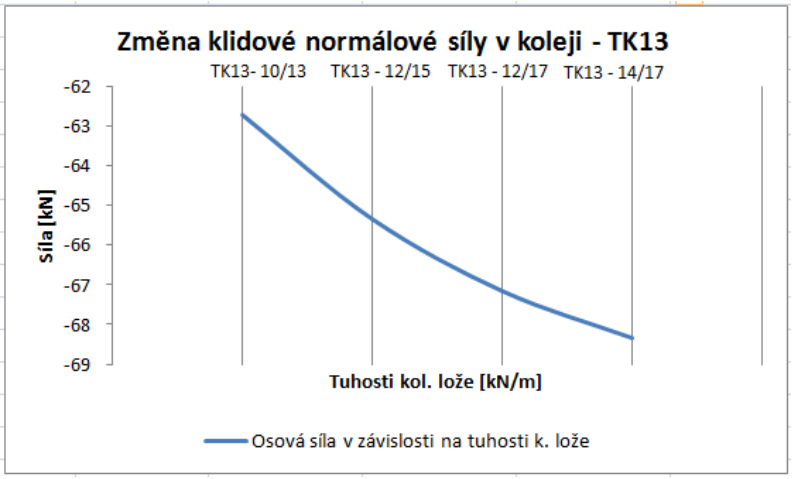



Obrázek 186: ZS242 – rozdílná tuhost k. lože: Porovnání normálových sil v místě TK4

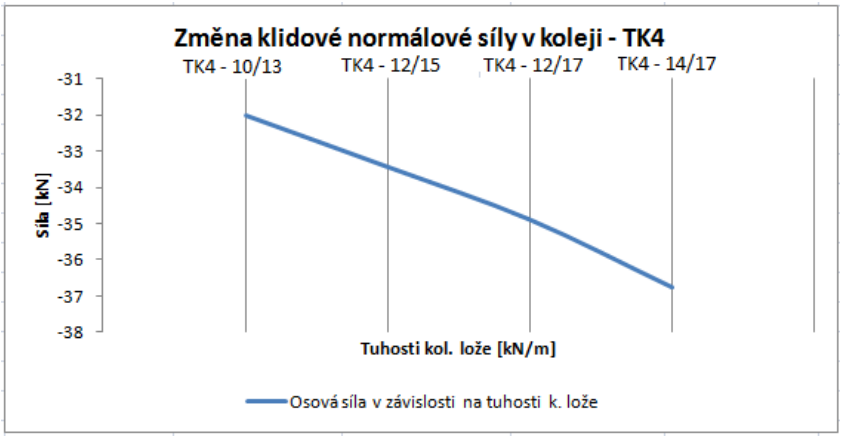
Na následujících obrázcích jsou znázorněny změny normálové síly v koleji v závislosti na tuhosti kolejového lože. Zobrazeny jsou případy maximální osové síly v místě TK13 v čase 8,5 sekundy, klidové síly v místě TK13 a TK4 v čase 25 sekund.




Obrázek 187: ZS242: Závislost změny max. osové síly na tuhosti kolejového lože v místě TK13 (čas 8,5s)




Obrázek 188: Závislost změny klidové normálové na tuhosti kolejového lože síly v místě TK13 (čas 25s)




Obrázek 189: Závislost změny klidové normálové na tuhosti kolejového lože síly v místě TK4 (čas 25s)

Změna tuhosti kolejového lože vykazuje daleko menší rozdíly v normálových silách, než bylo očekáváno. Změna osových sil v koleji je velmi malá, řádově se jedná o jednotky kilonewtonu. Změna tuhosti byla vyzkoušena ještě na nezávislém modelu, i v tomto případě vycházely velmi malé rozdíly mezi normálovými silami. Trend změny normálové síly je na straně Břeclav (TK13) parabolický s konvexním průběhem. Na straně Hohenau (TK4) je trend parabolický s konkávním průběhem. Z obrázků 186 a 187 lze odhadnou, že při změně tuhosti dochází k přerozdělení normálových sil v koleji mezi oběma opěrami. Při zvyšování tuhosti se v místě TK13 normálová síla zmenšuje, na opačné straně mostu v TK4 se oproti tomu zvyšuje.

Ve velmi malé míře je změna tuhosti patrná v normálových silách SŘDM. I přesto lze říci, že se zvyšující se tuhostí dochází k menšímu namáhání SŘDM.

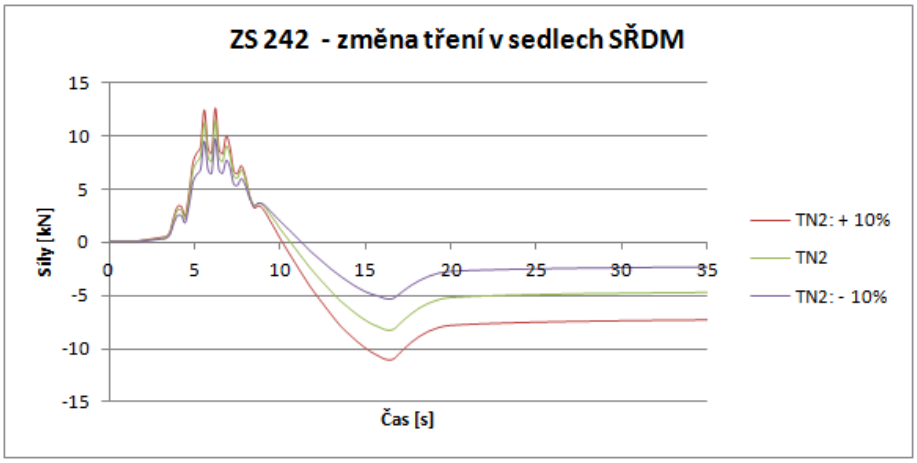
### 9.1.2 Změna tření v sedlech systému řízení dilatace mostu

V následující části je ukázáno, jak se změní normálové síly v řídící tyči a v kolejnicích, pokud se sníží nebo zvýší tření v sedlech SŘDM. Vyšetřované byly oba konce řídící tyče (TN2, TN4) a kolej v místech nad oběma opěrami (TK4 a TK13).

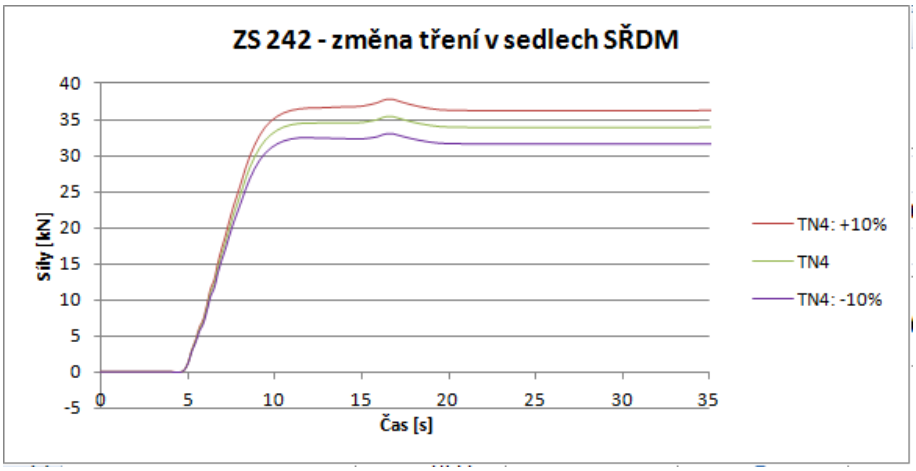
Byly vyšetřeny tři případy tření:

1) Tření vypočtené v kap. 6.3.1 zvýšené o 20%, - $F_t$ = 2,01 kN
2) Tření vypočtené v kap. 6.3.1, $F_t$ = 1,68 kN
3) Tření vypočtené v kap. 6.3.1 snížená o 20%, $F_t$ = 1,34 kN

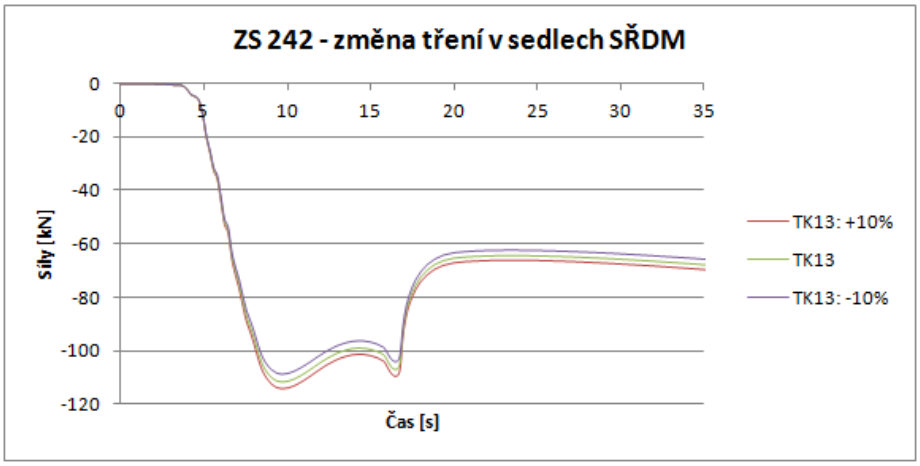
*Vysvětlení popisku obrázku: TN2: +20% – měřený tenzometr TN2, tření stanovené v kap. 6.3.1 zvýšené o 20%.*



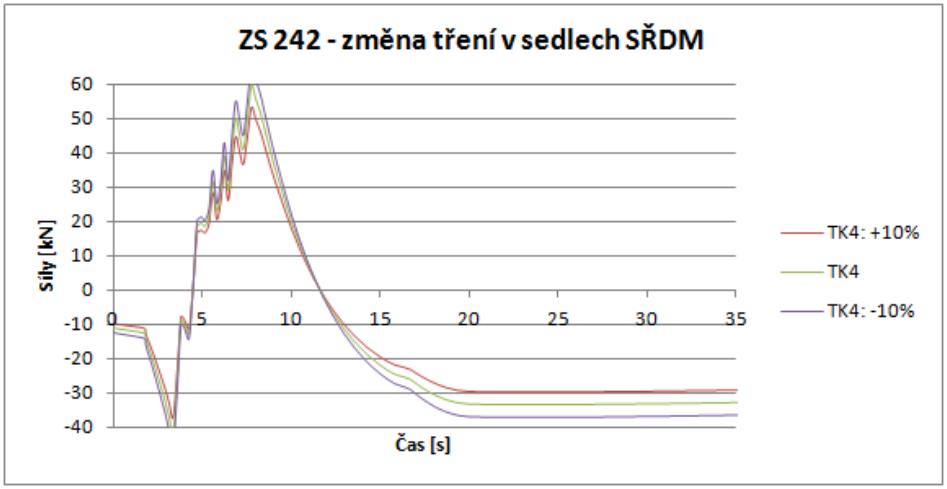

Obrázek 190: ZS242: Změna normálové síly řídící tyče od tření v sedlech SŘDM, místo TN2




Obrázek 191: ZS242: Změna normálové sily řídící tyče od tření v sedlech SŘDM, místo TN4

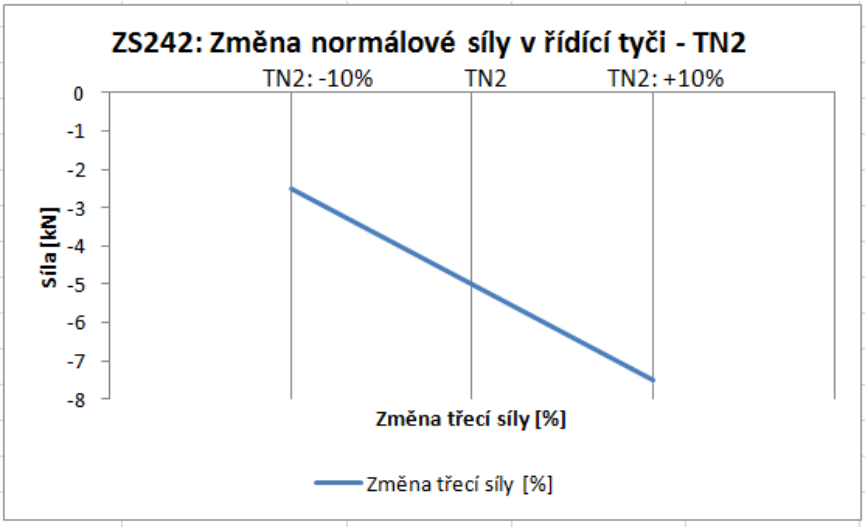



Obrázek 192: ZS242: Změna normálové sily koleje od tření v sedlech SŘDM, místo TK13

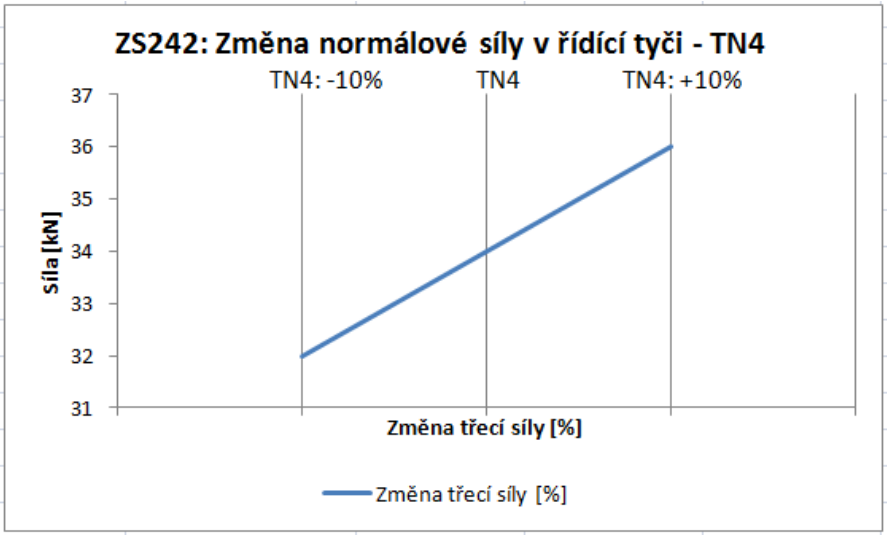



Obrázek 193: ZS242: Změna normálové síly koleje od tření v sedlech SŘDM, místo TK4

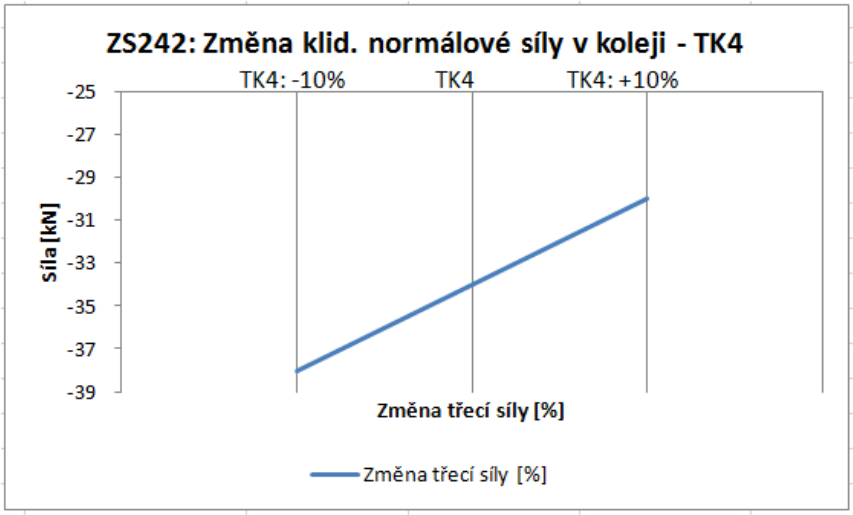
Na následujících obrázcích jsou znázorněny změny normálové síly v řídící tyči a v koleji v závislosti na třecí síle v sedlech SŘDM. Zobrazeny jsou normálové síly na obou koncích řídící tyče v klidovém stavu v čase 25 sekund. Zobrazeny jsou také maximální osové síly v místě TK13 v čase 8,5 sekundy a klidové síly v místě TK13 a TK4 v čase 25 sekund.



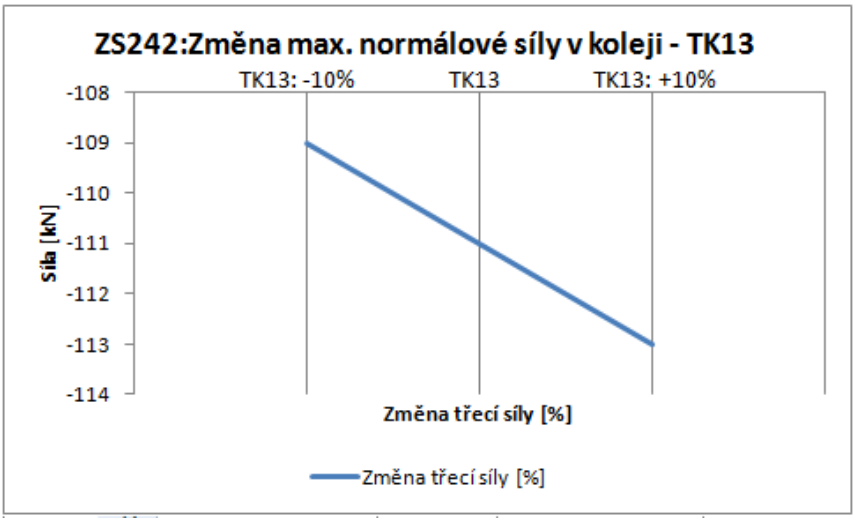

Obrázek 194: ZS242: Změna normálové síly řídící tyče v místě TN2 v závislosti na tření v sedlech SŘDM (čas 25s)



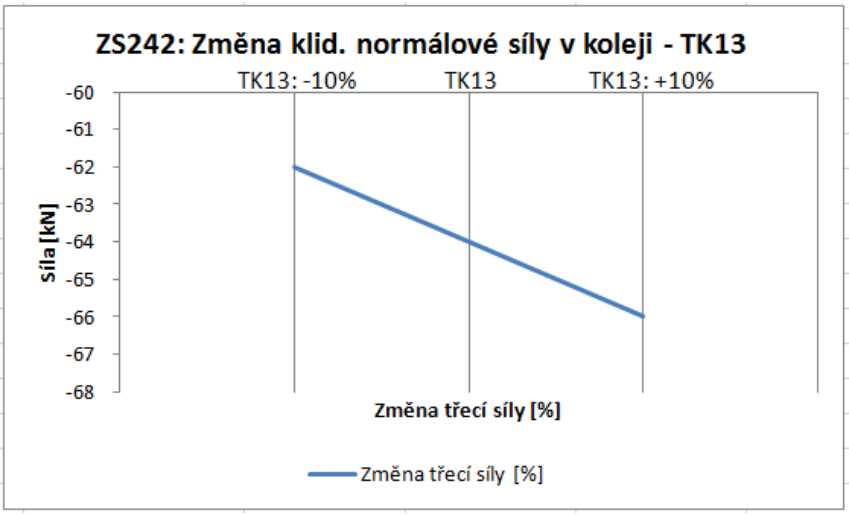

Obrázek 195: ZS242: Změna normálové síly řídící tyče od změny tření v sedlech SŘDM, místo TN4 (čas 25s)




Obrázek 196: Změna normálové síly v koleji od změny tření v sedlech SŘDM, místo TK4 (čas 25s)




Obrázek 197: ZS242: Změna max. osové síly koleje od tření v sedlech SŘDM, místo TK13 (čas 8,5s)



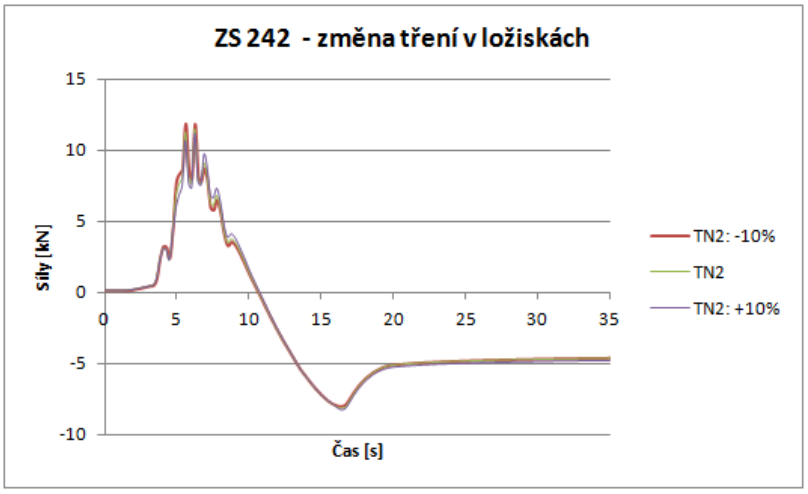

Obrázek 198: ZS242 Změna klidové osové síly koleje od tření v sedlech SŘDM, v místo TK13 (čas 25s)

Při změně třecí síly v sedlech se průběh změny normálové síly v řídících tyčích mění lineárně. Tato změna se do kotevních tyčí přenese díky celé geometrii SŘDM 1,9x. Na straně Hohenau, kde jsou místa TK4 a TN2, dojde se snížením třecí síly ke zvýšení normálové síly v řídící tyči TN2 a zároveň vzroste normálová síla koleje v TK4. Na opačné straně mostu je tomu naopak. Změny sil jsou velice malé, opět v řádově v kilonewtonech, jako v předchozím případě.

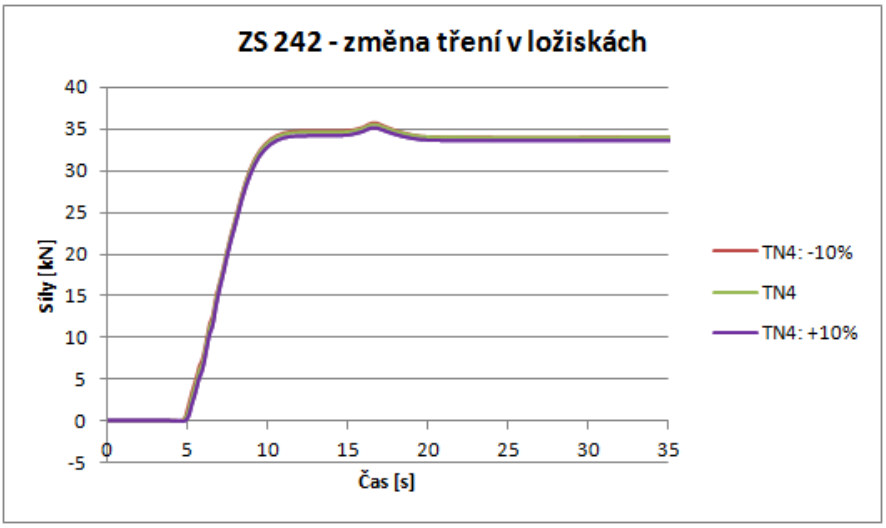
### 9.1.3 Změna tření v ložiskách

V poslední části parametrické studie bylo vyšetřováno, jak se projeví změna třecí síly v ložiskách na průběhu normálových sil v koleji a v SŘDM. Byly zvoleny celkem tři případy třecích sil:

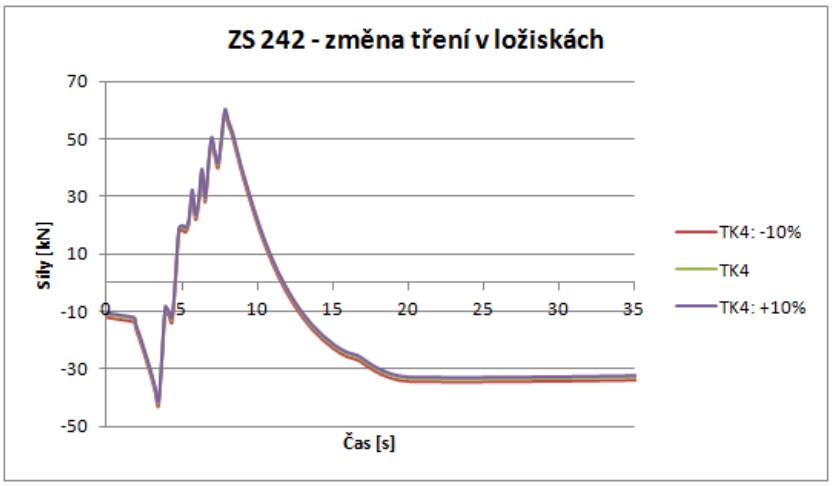
1) Třecí síla snížená o 10% než byla stanovena v kap.XX (třecí síla v ostrém rohu $F_{t,ostrý}$ = 104 kN, v tupém rohu $F_{t,tupý}$ = 150 kN)
2) Třecí síla stanovená v kap. XX (třecí síla v ostrém rohu $F_{t,ostrý}$ = 115 kN, v tupém rohu $F_{t,tupý}$ = 135 kN)
3) Třecí síla zvýšená o 10% než byla stanovena v kap.XX (třecí síla v ostrém rohu $F_{t,ostrý}$ = 126 kN, v tupém rohu $F_{t,tupý}$ = 165 kN)



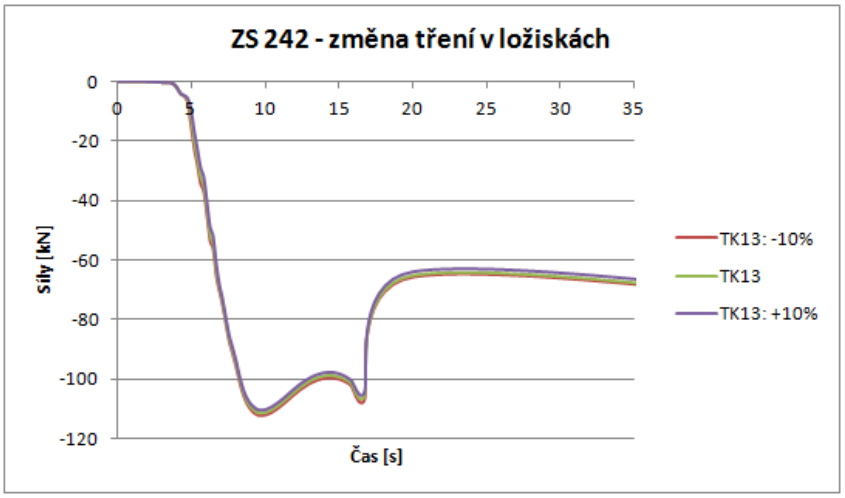

Obrázek 199: ZS242: Porovnání změny normálové sily v místě TN2 – změna tření v ložiskách



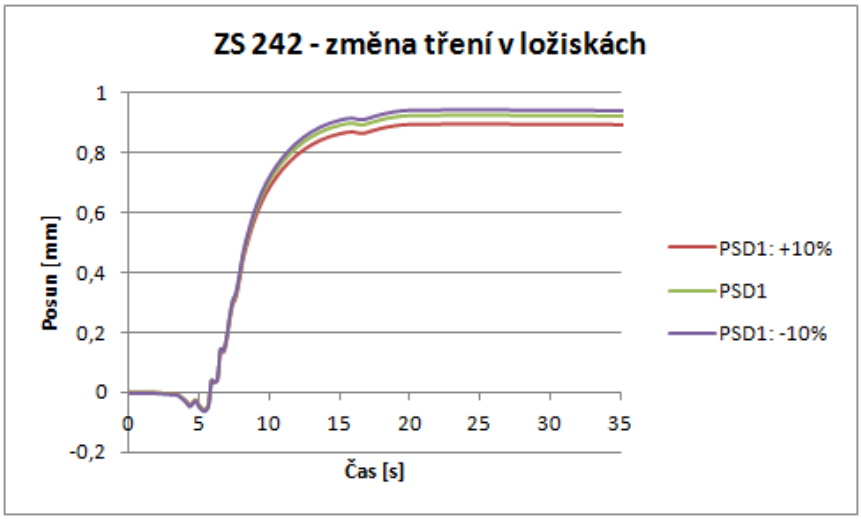

Obrázek 200: Změna normálové síly řídící tyče v místě TN4 – změna tření v ložiskách



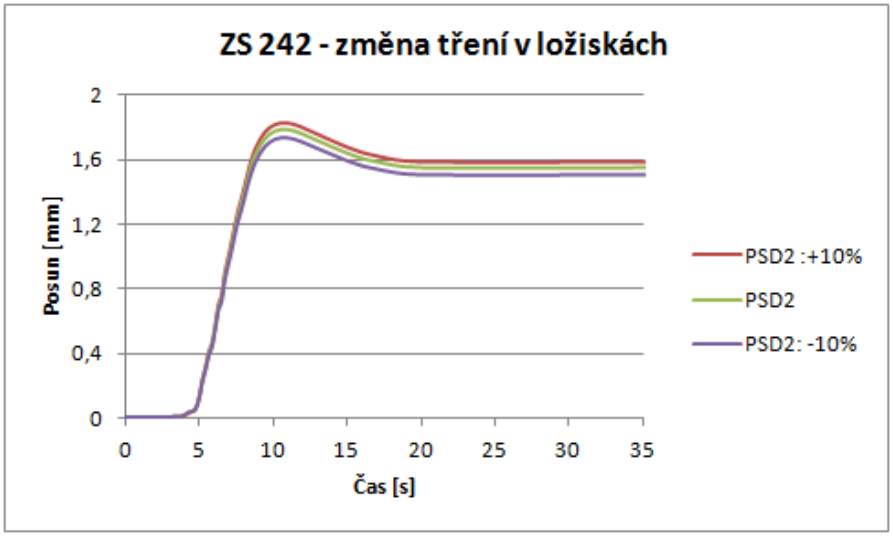

Obrázek 201: Změna normálové sily koleje v místě TK4 – změna tření v ložiskách




Obrázek 202: ZS242:  Změna normálové sily v koleje v místě TK13 – změna tření v ložiskách




Obrázek 203: Změna posunu vodícího ložiska od změny tření v ložiskách, místo PSD1




Obrázek 204: Změna posunu vodícího ložiska od změny tření v ložiskách, místo PSD1

Z obrázků je patrné, že změna třecí síly v ložiskách má oproti předpokladům naprosto zanedbatelný vliv na normálové síly koleje a SŘDM a jen nepatrně ovlivní posun. Lze argumentovat tím, že modelováním ložisek pomocí pružnoplastických linků tekoucích při velmi krátkém posunu (0,01mm) nebylo dosaženo přebrání brzdné síly. Možné také je, že délka kroku zatížení je příliš velká na to, aby bylo přesně zohledněno přebrání brzdné síly ložiskem a následné tečení. Během validace modelu byly zkoušeny různé linky, které měly vyšší hodnotu posunu pružné deformace. Se zvyšující se hodnotou posunu při tečení docházelo sice k přenosům brzdných sil do ložisek, bohužel také docházelo k velkému nežádoucímu tahovému namáhání koleje a kotevní tyče u opěry, kterou vlak pouze přejížděl. Proto bylo rozhodnuto, že se budou pro modelování ložisek používat linky s velmi malou

hodnotu posunu pružné deformace. Chování modelu s takto vymodelovanými ložisky se nejvíce podobalo chování reálného mostu.

## 9.2 Závěr

V této studii bylo krátce nastíněno, jak se změní jednotlivé parametry v SŘDM a koleji, pokud se bude měnit tuhost kolejového lože, třecí síla v sedlech řídící tyče a tření v ložiskách. Rozsah změny tuhostí a třecích sil byl zvolen tak, jak se očekává, že by se mohly v průběhu životnosti mostu měnit. Ze studie je zřejmé, že tyto vlivy ovlivní chování mostu minimálně.

# 10 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo objasnit problematiku chování šikmého mostu s řídící tyčí při brzdných zatěžovacích zkouškách. Dnes se téměř každá železniční trať zřizuje s bezstykovou kolejí. Bezstyková kolej v trati je namáhána od teplotních účinků a od působení drážních vozidel. Pokud bezstyková kolej vede přes mostní konstrukci, je dodatečně namáhaná od působené této konstrukce. Významný vliv na namáhání koleje má dilatace konstrukce. Pro mosty s rozpětím pole 60-120m je vhodným řešením instalace systému řízení dilatace mostu Mayer/Wunstorf. Toto zařízení má podle teoretických předpokladů snížit dilatační délku až na polovinu. Součástí systému řízení dilatace mostu jsou kotevní tyče a brzdné nosníky. Tyto prvky mají přenášet brzdné a rozjezdové síly do podpor. V létě 2016 byly na mostě Oskar, který je tímto systém vybaven, provedeny brzdné zatěžovací zkoušky. Účelem brzdných zkoušek bylo zjistit, jakou mírou se podílí SŘDM na přenosu brzdných sil.

V první části této práce je nastíněno, jaké vlivy ovlivňují chování interakci bezstykové koleje a mostu a jak tímto vlivům zamezit. V této části je také popsána problematika řídících tyčí s důrazem na systém Meyer/Wunstorf.

V praktické části byla vyhodnocena data z brzdných zatěžovacích zkoušek. Předpokládalo se, že brzdné a rozjezdové síly vyvolané zatěžovacím vlakem budou v daleko větší míře přeneseny brzdnými nosníky a kotevními tyčemi do podpor s tím, že do obou podpor budou přeneseny rovnoměrně, neboť SŘDM bylo geometricky sestrojeno tak, aby byl tento předpoklad splněn. Brzdné zatěžovací zkoušky tento předpoklad vyvrátily. Většina brzdných a rozjezdových sil byla přenášena kolejí a ložisky. Jen kolem 45kN (15%) z celkových 300kN, které vyvolaly brzdné síly, bylo přeneseno do podpor. Kotevní tyče byly spíše namáhány více od statických účinků než od účinků brzdných a rozjezdových. Rovnoměrného rozdělení sil do kotevních tyčí také nebylo dosaženo, neboť chování řídící tyče je ovlivňováno třením, které vzniká v sedlech příčníků.

V další části diplomové práce je pospáno, jak byl vytvořen nelineární numerický model mostu se zaměřením na chování SŘDM při brzdných silách. Model byl následně validován tak, aby jeho chování odpovídalo chování reálného mostu, které bylo experimentálně zjištěno během brzdných zatěžovacích zkoušek. I přes to, že bylo vytvořeno velké množství modelů a zkoušeny různé varianty podpor, linků, průřezů prvků a podobně, nebylo dosaženo uspokojujícího chování modelu. Až po aplikaci velké třecí síly v sedlech řídící tyče se chování modelu začalo přibližovat chování reálné konstrukce. I tak ale nebylo dosaženo úplné shody. Za dílčí úspěch lze považovat, že se v modelu podařilo podchytit chování koleje nad opěrou, u které měl vlak za úkol zastavit. Průběh a velikost normálové síly na více než 70% odpovídá realitě s tím, že větší síly vycházejí v experimentu. V modelu

se také povedlo částečně podchytit chování kotevních tyčí na té straně mostu, na které měl vlak zastavit. V řídící tyči odpovídají spíše průběhy normálových sil, hodnoty jsou oproti realitě posunuté. Celkově lze říci, že lépe reaguje ta strana modelu, na které měl vlak zastavit a že model hůře reaguje na statické účinky zatížení.

V poslední části této práce byla na validovaném modelu provedena parametrická studie, která měla objasnit, jak se změní síly v koleji a v SŘDM, pokud se změní tuhost kolejového lože, tření v sedlech řídící tyče a tření v ložiskách. V části studie, ve které se měnila tuhost kolejového lože, bylo zjištěno, že normálové síly se mění velice málo v závislosti na tuhost kolejového lože – řádově v kN. Přesto je možné spatřit trend, podle kterého změna normálových sil probíhá. Ve studii, ve které se posuzovalo chování prvků v závislosti na změně třecí síly v sedlech řídící tyče, mohl být zvolen větší rozsah sil než jen 10%. Díky tomu také vycházely relativně malé změny v silách. I tak lze získat informace o tom, jak se kolej a SŘDM chová při změně tohoto parametru. V poslední části bylo zkoušeno, jak ovlivní třecí síla chování koleje a SŘDM.

Systém řízení dilatace mostu jako takový splňuje svoji funkci, nicméně brzdné síly jsou jím přenášeny méně, než bylo teoreticky předpokládáno. I tak bude počet mostů, které budou tímto systémem vybaveny, vzrůstat, neboť primárním účelem je snížení dilatační délky a to tento systém splňuje spolehlivě.

# Literatura

[1] Bezstyková kolej na mostech, 17. Konference železniční dopravní cesta 2012, Doc. Ing. Otto Plášek, Ph.D

[2] Uplatnění řídících tyčí u ocelových železničních mostů, Dr.-Ing. RichardBuba, SSF München

[3] SŽDC S3, díl XII

[4] Rekonstrukce mostu v km 80,930 trati Hohenau (ÖBB) – Přerov, SO 02-19-01 Železniční most v km 80,930 trati Hohenau (ÖBB) – Přerov, Dopracování projektového souhrnného řešení (DPSŘ), Výkresová dokumentace

[5] Zpráva o zahájení monitoringu pro NK1 a NK2, doc. Ing. Pavel Ryjáček, Ph.D

[6] Dynamická zatěžovací zkouška a brzdná zkouška, rekonstrukce železničního mostu v KM 80,930 trati Hohenau (ÖBB) – Přerov, prof. Ing. Michal Polák, CSc.

[7] Program dynamické zatěžovací zkoušky a brzdných zkoušek**,** „Rekonstrukce mostu v km 80,930 trati Hohenau (ÖBB) – Přerov“, doc. Ing. Pavel Ryjáček, Ph.D.

[8] Dynamická zatěžovací zkouška a brzdná zkouška, rekonstrukce železničního mostu v KM 80,930 trati Hohenau (ÖBB) – Přerov, prof. Ing. Michal Polák, CSc.

[9] Průběžná zpráva za rok 2014 „Funkčnost a spolehlivost mostů s řídící tyčí MW“, doc. Ing. Pavel Ryjáček, Ph.D.

# Seznam obrázků

Obrázek 1: Vybočení bezstykové koleje v důsledku nadměrného tepelného namáhání ..... 2
Obrázek 2: Trhlina kolejnice způsobená mrazem ..... 2
Obrázek 3: Schéma průběhu normálových sil v koleji od teplotní změny mostní konstrukce. [2] ..... 3
Obrázek 4: Model podélného odporu, pro výpočetní modely se konzervativně používá lineární závislost podélného odporu na posunutí koleje. [1] ..... 4
Obrázek 5: Průběh normálových sil od zatížení brzdnými nebo rozjezdovými silami. [2] ..... 5
Obrázek 6: Průběh normálové síly v koleji od statického zatížení vlaku ..... 5
Obrázek 7: Malé dilatační kolejové zařízení ..... 7
Obrázek 8: Velké dilatační kolejové zařízení ..... 8
Obrázek 9: Schéma řídící tyče RSB – Stab. [2] ..... 9
Obrázek 10: Schéma řídící tyče s popisem jednotlivých částí. [2] ..... 9
Obrázek 11: Funkce řídící tyče a) při změně teploty, b) od působení brzdných sil. [2] .....10
Obrázek 12: Poloha mostu Oskar (zdroj mapy.cz) .....11
Obrázek 13: Pohled zleva .....11
Obrázek 14: Příčný řez NOK 1, zeleně je vyznačena skutečná poloha SŘDM. [3] .....12
Obrázek 15: Pohled na železniční svršek v místě změny pražců .....13
Obrázek 16: Příčný řez vnějším a vnitřním trámem. [3] .....15
Obrázek 17: Příčný řez vnějším a vnitřním obloukem. [3] .....15
Obrázek 18: Pohled na ztužení oblouků hlavního nosníku NOK2 .....16
Obrázek 19: Pohled na táhla pravého nosníku NOK1 a levého nosníku NOK2 .....16
Obrázek 20: Pryžová tlumící spojka křížících se táhel .....17
Obrázek 21: Tvar mostovky s podélnými výztuhami. [3] .....17
Obrázek 22: Pohled na podélné a příčné výztuhy. Z fotografie je patrný tvar plechu mostovky .....18
Obrázek 23: Schéma ložisek, šipky ukazují uvolněný směr. [4] .....18
Obrázek 24: Půdorys kalotového ložiska. [4] .....19
Obrázek 25: Pohled na levé ložisko NOK1 na opěře 01 .....19
Obrázek 26: Výkres SŘDM NOK2, směr Hohenau. [4] .....20
Obrázek 27: Výkres SŘDM NOK2, směr Břeclav. [4] .....20
Obrázek 28: Kotvení kotevní tyče do spodní stavby umožňující pootočení kolem svislé osy. [4] .....21
Obrázek 29: Schéma SŘDM NOK1 .....21
Obrázek 30:Umístění tenzometrů do těžiště měřeného prvku, vlevo: kolejnice, vpravo: kotevní tyč SŘDM .....22

Obrázek 31: Schéma rozmístění tenzometrů, červeně – tenzometrické polomosty .....23
Obrázek 32: Kompenzační kolejnice .....23
Obrázek 33: Plný tenzometrický most – kotevní tyč. [5].....24
Obrázek 34: Tenzometrický polomost měřící poměrnou deformaci krajního příčníku. [5] .....24
Obrázek 35: Snímač Megatron ISDT50-K2405.....25
Obrázek 36: Potenciometrický snímač dráhy MSLPC 100 D 5K 1M5. [5] .....25
Obrázek 37:Schéma ložisek. [4] .....25
Obrázek 38: Snímač MSLPC 100 D 5K 2M5 .....26
Obrázek 39: Schéma rozmístění snímačů pro měření interakce koleje a mostu .....26
Obrázek 40: Snímač teploty na NOK1 (vpravo) .....27
Obrázek 41: Snímač zrychlení ADXL326.....27
Obrázek 42: Ústředna EMS DV 803. [5] .....28
Obrázek 43: Ústředna Master (MJ-1) - strana Hohenau. [5] .....28
Obrázek 44: Ústředna Slave (MJ-2) - strana Břeclav. [5].....28
Obrázek 45:Schéma původně plánovaných zatěžovacích stavů. [7].....30
Obrázek 46: Zatěžovací souprava brzdné zatěžovací zkoušky.....31
Obrázek 47: Lokomotiva Siemens Taurus ES64U2 .....32
Obrázek 48: Obálka brzdné a rozjezdové síly v závislosti na rychlosti a provozním režimu. [7] .....32
Obrázek 49: Nákladní vůz Falls .....33
Obrázek 50: Rozmístění tenzometrů s doplněnými dočasnými tenzometry .....34
Obrázek 51: Schéma rozmístění snímačů PSD a TN .....35
Obrázek 52: Pohled na ústředny použité při zatěžovacích zkouškách.....35
Obrázek 53: ZS211: Poloha vlaku po zastavení .....37
Obrázek 54: ZS211: Normálové síly v kotevních tyčích .....38
Obrázek 55: ZS211: Normálové síly v řídící tyči .....38
Obrázek 56: ZS211: Posun řídící tyče vůči příčníku a posun vodících ložisek NK .....39
Obrázek 57: ZS211: Posuny levé kolejnice .....39
Obrázek 58: ZS211: Normálové síly v pravé kolejnici .....40
Obrázek 59: ZS211: Normálové síly v levé kolejnici .....40
Obrázek 60: ZS211A: Poloha vlaku po zastavení .....41
Obrázek 61: ZS211A – Normálové síly v kotevních tyčích.....42
Obrázek 62: ZS211A: Normálové síly v řídící tyči .....42
Obrázek 63: ZS211A: Posun řídící tyče vůči příčníku a posun vodících ložisek NK.....43
Obrázek 64: ZS211A: Posuny levé kolejnice .....43
Obrázek 65: ZS211A: Normálové síly v pravé kolejnici.....44
Obrázek 66: ZS211A: Normálové síly v levé kolejnici .....44

Obrázek 67: Z211B: Poloha vlaku po zastavení ....45
Obrázek 68: ZS211B: Normálové síly v kotevních tyčích....46
Obrázek 69: ZS211B: Normálové síly v řídící tyči....46
Obrázek 70: ZS211B: Posun řídící tyče vůči příčníku a posun vodících ložisek NK....47
Obrázek 71: ZS211B: Posuny levé kolejnice ....47
Obrázek 72: ZS211B: Normálové síly v pravé kolejnici....48
Obrázek 73: ZS211B: Normálové síly v levé kolejnici ....48
Obrázek 74: Z232: Poloha vlaku po zastavení ....50
Obrázek 75: ZS232: Normálové síly v kotevních tyčích ....51
Obrázek 76: ZS232: Normálové síly v řídící tyči ....51
Obrázek 77: ZS232: Posun řídící tyče vůči příčníku a posun vodících ložisek NK ....52
Obrázek 78: ZS232: Posuny levé kolejnice ....52
Obrázek 79: ZS232: Normálové síly v pravé kolejnici ....53
Obrázek 80: ZS232: Normálové síly v levé kolejnici ....53
Obrázek 81: ZS 232A: Poloha vlaku po zastavení....54
Obrázek 82: ZS232A: Normálové síly v kotevních tyčích....55
Obrázek 83: ZS232A: Normálové síly v řídící tyči....55
Obrázek 84: ZS232A: Posun řídící tyče vůči příčníku a posun vodících ložisek NK....56
Obrázek 85: ZS232A: Posuny levé kolejnice ....56
Obrázek 86: ZS232A: Normálové síly v pravé kolejnici....57
Obrázek 87: ZS232A: Normálové síly v levé kolejnici ....57
Obrázek 88: Z242: Poloha vlaku po zastavení ....58
Obrázek 89: ZS242: Normálové síly v kotevních tyčích ....59
Obrázek 90: ZS242: Normálové síly v řídící tyči ....59
Obrázek 91: ZS242: Posun řídící tyče vůči příčníku a posun vodících ložisek NK ....60
Obrázek 92: ZS242:  Posuny levé kolejnice ....60
Obrázek 93: ZS242: Normálové síly v pravé kolejnici ....61
Obrázek 94: ZS242: Normálové síly v levé kolejnici ....61
Obrázek 95: Z221B: Poloha po zastavení ....62
Obrázek 96: ZS221B: Normálové síly v kotevních tyčích....63
Obrázek 97: ZS221B: Normálové síly v řídící tyči....63
Obrázek 98: Posun řídící tyče vůči příčníku a posun vodících ložisek NK ....64
Obrázek 99: ZS221B: Posuny levé kolejnice ....64
Obrázek 100: ZS221B: Normálové síly v pravé kolejnici....65
Obrázek 101: ZS221B: Normálové síly v levé kolejnici ....65
Obrázek 102: ZS251: Poloha po zastavení ....66
Obrázek 103: ZS251: Normálové síly v kotevních tyčích ....67

Obrázek 104: ZS251: Normálové síly v řídící tyči .....67
Obrázek 105: ZS251 Posun řídící tyče vůči příčníku a posun vodících ložisek NK .....68
Obrázek 106: ZS251:  Posuny levé kolejnice .....68
Obrázek 107: ZS251: Normálové síly v pravé kolejnici .....69
Obrázek 108: ZS 251: Normálové síly v levé kolejnici .....69
Obrázek 109: ZS251A: Poloha po zastavení .....70
Obrázek 110: ZS251A: Normálové síly v kotevních tyčích .....71
Obrázek 111: ZS251A: Normálové síly v řídící tyči .....71
Obrázek 112: ZS251A: Posun řídící tyče vůči příčníku a posun vodících ložisek NK .....72
Obrázek 113: ZS251A: Posuny levé kolejnice .....72
Obrázek 114: ZS251A: Normálové síly v pravé kolejnici .....73
Obrázek 115: ZS251A: Normálové síly v levé kolejnici .....73
Obrázek 116: Prutové zobrazení mostu Oskar .....75
Obrázek 117: Příčný řez vnitřního trámu .....75
Obrázek 118: Příčný řez vnějšího trámu .....76
Obrázek 119: Příčný řez vnitřního oblouku .....76
Obrázek 120: Příčný řez vnějšího oblouku .....76
Obrázek 121: Příčný řez táhel v poli .....76
Obrázek 122: Příčný řez táhel v krajních částech mostu .....77
Obrázek 123: Nahoře: rozměry příčníku v poli, dole: rozměry příčníku v krajních částech mostu .....77
Obrázek 124: Tvar koncového příčník a jeho průřezové charakteristiky .....77
Obrázek 125: Prut, reprezentující mostovku v poli .....78
Obrázek 126: Prut, reprezentující mostovku v koncových oblastech .....78
Obrázek 127: Ztužení mostovky .....79
Obrázek 128: Nosná konstrukce .....79
Obrázek 129: Pohled na model mostovky .....79
Obrázek 130: Koncová oblast mostu .....80
Obrázek 131: Prut reprezentující kolej a jeho průřezové charakteristiky .....80
Obrázek 132: Způsob upevnění koleje k mostovce .....81
Obrázek 133: Tuhost linků zadaných linků do modelu – TRAŤ: Vlevo: nezatížený, vpravo: zatížený .....81
Obrázek 134: Tuhost linků zadaných linků do modelu – MOST: Vlevo: nezatížený, vpravo: zatížený .....81
Obrázek 135: Příčný řez řídící tyče .....82
Obrázek 136: Příčný řez kotevní tyče .....82
Obrázek 137: Příčný řez pákami SŘDM a jejich průřezové charakteristiky .....83

Obrázek 138: Model SŘDM....83
Obrázek 139: Způsob propojení řídící tyče a příčníku....83
Obrázek 140: Průběh normálové síly v řídící tyči od tření v sedlech....84
Obrázek 141: Rozdíly normálové síly v řídící tyči od ZS 242 a ZS 221B....84
Obrázek 142: Reakce od tíhy nosné konstrukce....85
Obrázek 143: Linky obou ložisek....87
Obrázek 144: Model ložiska....87
Obrázek 145: Pohled na model ve směru od Hohenau....87
Obrázek 146: Pohled na model ze shora....88
Obrázek 147: SŘDM na straně Hohenau....88
Obrázek 148: SŘDM na straně Břeclav....88
Obrázek 149: Pohled od Břeclavi....89
Obrázek 150: Svislé zatížení zadané do modelu....89
Obrázek 151: Záznam přejezdů náprav přes tenzometr....90
Obrázek 152: Rozložení brzdných sil vlakové soupravy zadané do modelu....90
Obrázek 153: Rozložení rozjezdových sil vlakové soupravy zadané do modelu....91
Obrázek 154: ZS221B: rychlost a zpomalení v závislosti na čase....92
Obrázek 155: ZS 221B: rychlost a zpomalení v závislosti na dráze....93
Obrázek 156: : ZS221B: Brzdná síla v závislosti na dráze. Funkce F(s) byla zadána do modelu jako zatěžovací funkce....93
Obrázek 157: ZS221B: rychlost a zrychlení v závislosti na čase....94
Obrázek 158: ZS221B: rychlost a zrychlení v závislosti na dráze....94
Obrázek 159: Obrázek 87:ZS221B: Brzdná síla v závislosti na dráze. Funkce F(s) byla zadána do modelu jako zatěžovací funkce.....94
Obrázek 160: ZS 242: Rychlost a zpomalení v závislosti na čase....95
Obrázek 161: ZS242: Rychlost a zpomalení v závislosti na dráze....95
Obrázek 162: ZS242: Brzdná síla v závisloti na dráze. Funkce F(s) byla zadána do modelu jako zatěžovací funkce....96
Obrázek 163: ZS242: Rychlost a zrychlení v závislosti na čase....96
Obrázek 164: ZS242: Rychlost a zrychlení v závislosti na dráze....96
Obrázek 165: ZS242: Rozjezdová síla v závislosti na dráze. Funkce F(s) byla zadána do modelu jako zatěžovací funkce....97
Obrázek 166: Schéma sledovaných snímačů na NOK1.....97
Obrázek 167: ZS221B - brzdění: Porovnání normálových sil v kotevních tyčích - model/experiment....98
Obrázek 168: ZS221B- brzdění: Porovnání normálových sil z koncu řídící tyče - model/experiment....98

Obrázek 169: ZS221B- brzdění: Porovnání normálových sil koleje - model/experiment .....98
Obrázek 170: ZS221B- brzdění: Porovnání posunů NK - model/experiment .....99
Obrázek 171: ZS221B – rozjezd: Porovnání normálové síly v kotevních tyčích – model/experiment.....99
Obrázek 172: ZS221B - rozjezd: Porovnání normálové síly v řídící tyči - model/experiment.99
Obrázek 173: ZS221B - rozjezd: Porovnání normálové síly v koleji - model/experiment.....100
Obrázek 174: ZS221B - rozjezd: Porovnání posunů NK - model/experiment.....100
Obrázek 175: ZS242 - brzdění: Porovnání normálových sil v kotevních tyčích - model/experiment.....100
Obrázek 176: ZS 242 - brzdění: Porovníní normálových sil v řídící tyči - model/experiment .....101
Obrázek 177: ZS 242 - rozjezd: Porovnání normálových sil v koleji - model/experiment.....101
Obrázek 178: ZS242 - brzdění: Porovnání posunů NK - model/experiment.....101
Obrázek 179: ZS242 - rozjezd: Porovnání normálových sil v kotevních tyčích - model/experiment.....102
Obrázek 180: ZS242 - rozjezd: Porovnání normálových sil v řídící tyči - model/experiment102
Obrázek 181: ZS242 - rozjezd: Porovnání normálových sil v koleji - model/experiment.....102
Obrázek 182: ZS242 - rozjezd: Porovnání posunů NK - model/experiment .....103
Obrázek 183: ZS242 – rozdílná tuhost k. lože: Porovnání normálových sil v místě TN2.....106
Obrázek 184: ZS242 – rozdílná tuhost k. lože: Porovnání normálových sil v místě TN4.....107
Obrázek 185: ZS242 – rozdílná tuhost k. lože: Porovnání normálových sil v místě TK13...107
Obrázek 186: ZS242 – rozdílná tuhost k. lože: Porovnání normálových sil v místě TK4.....107
Obrázek 187: ZS242: Závislost změny max. osové síly na tuhosti kolejového lože v místě TK13 (čas 8,5s).....108
Obrázek 188: Závislost změny klidové normálové na tuhosti kolejového lože síly v místě TK13 (čas 25s).....108
Obrázek 189: Závislost změny klidové normálové na tuhosti kolejového lože síly v místě TK4 (čas 25s) .....108
Obrázek 190: ZS242: Změna normálové sily řídící tyče od tření v sedlech SŘDM, místo TN2 .....109
Obrázek 191: ZS242: Změna normálové sily řídící tyče od tření v sedlech SŘDM, místo TN4 .....110
Obrázek 192: ZS242: Změna normálové sily koleje od tření v sedlech SŘDM, místo TK13110
Obrázek 193: ZS242: Změna normálové síly koleje od tření v sedlech SŘDM, místo TK4 .110
Obrázek 194: ZS242: Změna normálové síly řídící tyče v místě TN2 v závislosti na tření v sedlech SŘDM (čas 25s).....111

Obrázek 195: ZS242: Změna normálové síly řídící tyče od změny tření v sedlech SŘDM, místo TN4 (čas 25s) ..... 111
Obrázek 196: Změna normálové síly v koleji od změny tření v sedlech SŘDM, místo TK4 (čas 25s) ..... 112
Obrázek 197: ZS242: Změna max. osové síly koleje od tření v sedlech SŘDM, místo TK13 (čas 8,5s) ..... 112
Obrázek 198: ZS242 Změna klidové osové síly koleje od tření v sedlech SŘDM, v místo TK13 (čas 25s) ..... 112
Obrázek 199: ZS242: Porovnání změny normálové sily v místě TN2 – změna tření v ložiskách ..... 113
Obrázek 200: Změna normálové síly řídící tyče v místě TN4 – změna tření v ložiskách ..... 114
Obrázek 201: Změna normálové sily koleje v místě TK4 – změna tření v ložiskách ..... 114
Obrázek 202: ZS242: Změna normálové sily v koleje v místě TK13 – změna tření v ložiskách ..... 114
Obrázek 203: Změna posunu vodícího ložiska od změny tření v ložiskách, místo PSD1 .... 115
Obrázek 204: Změna posunu vodícího ložiska od změny tření v ložiskách, místo PSD1 .... 115

# Seznam tabulek

Tabulka 1: Hodnoty součinitele ekvivalentní teplotní roztažnosti. [1]..... 3
Tabulka 2: Omezení dilatačních délek mostu v závislosti na statickém schématu a na zřízeném železničním svršku. [3]..... 7
Tabulka 3: Zapojení snímačů do ústředny Master (MJ-1). [6] .....29
Tabulka 4: Zapojení snímačů do ústředny Slave (MJ-2). [6] .....29
Tabulka 5: Stručný přehled zatěžovacích stavů brzdné zkoušky. x - přejeté místo zstavení, o – jen dvojice lokomotiv Taurus, ZS končící 1 – směr Břeclav - Hohenau, ZS končící 2 – směr Hohenau – Břeclav. [6] .....31
Tabulka 6: Svislá tuhost kolejového lože v závislosti na kvalitě podloží [9] .....82
Tabulka 7: Zatížení mostu od kolejového roštu. [7].....85
Tabulka 8: Zatížení mostu od tíhy balastu. [7] .....85
Tabulka 9:Součinitel tření ložiska v závislosti na kontaktním tlakovém napětí. [7] .....86