

# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí



## DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Únavová životnost železničního mostu v Púchově**

The residual fatigue life of the railway bridge in Púchov

**Bc. Pavla Fialová**

Studijní program:

Stavební inženýrství

Studijní obor:

Konstrukce a dopravní stavby

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Pavel Ryjáček, Ph.D.

Praha 2021





## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Fialová Jméno: Pavla Osobní číslo: 458697  
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: Únavová životnost železničního mostu v Púchově  
Název diplomové práce anglicky: The fatigue residual life of the railway bridge in Púchov

Pokyny pro vypracování:

Numerická analýza ve 3D kritických detailů táhel a trámů. Zhodnocení statické a dynamické zatěžovací zkoušky. Validace modelu a následná hot-spot analýza s predikcí zbytkové životnosti.

Seznam doporučené literatury:

ČSN EN 1991-2, ČSN EN 1993-2

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

Datum zadání diplomové práce: 21.9.2020 Termín odevzdání diplomové práce: 3.1.2021  
*Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku*

Podpis vedoucího práce

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“.*

23.9.2020

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

**Únavová životnost železničního mostu v Púchově**





**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

**Únavová životnost železničního mostu v Púchově**

## **PROHLÁŠENÍ AUTORA**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne .....

.....

Pavla Fialová



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

**Únavová životnost železničního mostu v Púchově**



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

**Únavová životnost železničního mostu v Púchově**

## **PODĚKOVÁNÍ**

Především bych chtěla poděkovat vedoucímu této diplomové práce doc. Ing. Pavlovi Ryjáčkovi, Ph.D. za zajímavé téma, jeho konzultace, ochotu, trpělivost, nápady a také za možnost zúčastnit se statické a dynamické zatěžovací zkoušky mostu.

V souvislosti se zatěžovacími zkouškami patří mé poděkování i všem zúčastněným, kteří je připravovali, zpracovali a poskytli mi výsledky svých měření.

Děkuji tímto doc. Ing. Jiřímu Litošovi, Ph.D. a jeho kolegům z Experimentálního centra FSV ČVUT, jež se podíleli na všech zkouškách a byli ochotní navíc připravit na měření tenzometry, které sloužily pro účely této diplomové práce.

Mé poděkování patří i Ing. Vojtěchu Stančíkovi, který metodou digitální korelace obrazu zjišťoval deformace konstrukce při obou zatěžovacích zkouškách.

Pak bych ráda poděkovala prof. Ing. Michalovi Polákovi, CSc. a Ing. Tomáši Plachému, Ph.D., jež se zabývali dynamickými vlastnostmi konstrukce a její odezvou na dynamické zatížení.

Dále děkuji také Ing. Antonínu Směťákovi z firmy FIRESTA-Fišer, rekonstrukce, stavby a.s. za poskytnutí dalších doplňujících podkladů z realizace mostu.

V neposlední řadě jsem samozřejmě vděčná i své rodině a přátelům, kteří mě po celou dobu podporovali.



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

**Únavová životnost železničního mostu v Púchově**



## **ANOTACE**

Diplomová práce zkoumá dva detaily na ocelovém železničním mostě na Slovensku u stanice Púchov. Most se skládá ze šesti prostě uložených nosníků. První a poslední dvě pole jsou konstrukce spřažené, zatímco dvě hlavní pole jsou tvořeny Langerovými trámy a překlenují rozpětí 124,8 m přes řeku Váh.

Řešenými detaily jsou připojení styčnickových plechů pro závěsy na hlavní nosníky Langerových trámů a konzoly pro sloupky protihlukové stěny přivařené k horní pásnici pravého trámu. Konstrukčně jsou tyto detaily navrženy poměrně neobvykle a předpokládá se, že v těchto místech budou vznikat velká normálová napětí. Cílem práce je prověřit jejich namáhání použitím metody hot-spot a stanovit únavovou životnost mostu, jež je na těchto detailech pravděpodobně závislá.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

most, ocelový, železniční, Langerův trám, únava, únavová životnost, hot-spot, kumulace poškození, zatěžovací zkoušky, validace

## **ANNOTATION**

The thesis analyses two details of a steel railway bridge in Slovakia near the station Púchov. The bridge consists of six several simple spans. The first and last two spans are composite, while two main spans are formed by the Langer beams and they are crossing the Váh river with the 124,8 m spans.

Analysed details are connections of gusset plates for hangers to main beams of the Langer beam-bridge and cantilevers for columns of noise barrier wall, which are welded to top flange of the right beam. These details are designed quite unusually and it is assumed, that high normal stresses can occur in these areas. The aim of the thesis is to analyse and check the stresses using the hot-spot method and predict the residual fatigue life of the bridge, that probably depends on those details.

## **KEY WORDS**

bridge, steel, railway, Langer beam, fatigue, fatigue life, hot-spot, cumulative damage, load tests, validation



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

**Únavová životnost železničního mostu v Púchově**



## **OBSAH**

<b>1. ÚVOD .....</b>	<b>15</b>
<b>2. CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE.....</b>	<b>16</b>
<b>3. ÚNAVA MATERIÁLU.....</b>	<b>17</b>
3.1. Úvod .....	17
3.2. Fáze únavy .....	19
3.3. Přístupy k řešení únavy .....	21
3.3.1. Jmenovitá napětí .....	22
3.3.2. Metoda hot-spot .....	28
3.3.3. Metoda efektivního vrubového napětí .....	33
<b>4. MOST V KM 159,038.....</b>	<b>36</b>
4.1. Souhrnné informace .....	36
4.2. Detaily .....	42
4.2.1. Připojení závěsů .....	42
4.2.2. Konzola pro protihlukovou stěnu .....	45
<b>5. MODEL CSI BRIDGE .....</b>	<b>47</b>
5.1. Průřezy.....	48
5.2. Zatížení .....	54
5.2.1. Stálé.....	54
5.2.2. Proměnné.....	55
5.3. Výsledky.....	58
5.3.1. Vlastní frekvence a tvary.....	58
5.3.2. Průhyby trámů .....	64
5.3.3. Vnitřní síly .....	65
<b>6. MODEL ABAQUS .....</b>	<b>73</b>
6.1. Geometrie.....	73
6.2. Síť prvků .....	75
6.3. Podepření .....	79
6.4. Zatížení .....	79
6.5. Výsledky.....	80
6.5.1. Model připojení závěsu (T6).....	80
6.5.2. Model s konzolou (T9) .....	82
6.5.3. Shrnutí.....	83



<b>7. ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKY MOSTU .....</b>	<b>84</b>
7.1. Sledovaná místa a metody měření.....	85
7.1.1. Snímače pro vyhodnocení globálního chování.....	85
7.1.2. Tenzometry pro stanovení napětí na detailech.....	88
7.2. Statická zatěžovací zkouška .....	94
7.2.1. Průběh zkoušky.....	94
7.2.2. Výsledky měření.....	95
7.2.3. Porovnání výsledků zkoušky s výpočty .....	102
7.3. Dynamická zatěžovací zkouška .....	105
7.3.1. Průběh zkoušky.....	105
7.3.2. Výsledky měření.....	106
7.3.3. Porovnání výsledků zkoušky s výpočty .....	121
7.4. Zhodnocení zatěžovacích zkoušek .....	125
<b>8. VALIDACE VÝPOČETNÍCH MODELŮ .....</b>	<b>128</b>
8.1. Model CSI Bridge.....	128
8.1.1. Průřezy.....	129
8.1.2. Útlum.....	138
8.1.3. Zatížení .....	138
8.2. Model Abaqus .....	140
8.3. Vlastní frekvence a tvary .....	143
8.4. Výpočty zatěžovacích zkoušek .....	143
8.4.1. Průhyby.....	143
8.4.2. Normálová napětí.....	144
<b>9. ÚNAVOVÁ ŽIVOTNOST DETAILŮ .....</b>	<b>152</b>
9.1. Posouzení únavy modelem LM71 .....	153
9.1.1. Jmenovitá napětí.....	155
9.1.2. Modifikovaná jmenovitá napětí .....	158
9.1.3. Metoda hot-spot.....	167
9.2. Posouzení únavy kumulací poškození .....	172
9.2.1. Výpočty přejezdů normových vlaků .....	172
9.2.2. Analýza namáhání konstrukce normovými vlaky .....	176
9.2.3. Dílčí výsledky pro vybrané vlaky .....	178
9.2.4. Kumulace poškození za použití napětí hot-spot.....	179
9.3. Srovnání posudků.....	186





**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

**Únavová životnost železničního mostu v Púchově**

<b>10. ZÁVĚR.....</b>	<b>189</b>
<b>SEZNAM LITERATURY .....</b>	<b>191</b>
<b>POUŽITÉ PROGRAMY .....</b>	<b>193</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>193</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>194</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>200</b>
<b>SEZNAM GRAFŮ.....</b>	<b>203</b>



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

**Únavová životnost železničního mostu v Púchově**



## **1. ÚVOD**

Předmětem diplomové práce je nový ocelový železniční most na trati Púchov – Považská Bystrica v km 159,038 přes Nosický kanál. Dvě jeho pole tvoří stejné prostě uložené Langerovy trámy, u nichž jsou netypicky navrženy některé detaily, které tato práce podrobněji zkoumá. Předpokládá se, že tyto detaily rozhodují o únavové životnosti mostu.

Na pásnice komorových průřezů hlavních nosných trámů i oblouků jsou přivařeny styčnickové plechy táhel ve směru kolmém k ose mostu. Během průjezdu vlaků působí na tyto svary kromě tahové síly i zdánlivě malý ohybový moment, který však odpovídá významnému normálovému napětí. Tohoto problému se už dotklo Expertní statické [1] a dynamické posouzení [2], zpracované doc. Pavlem Ryjáčkem a Ing. Martinem Machem, na něž tato práce navazuje.

V Expertním statickém posouzení [1] byly prověřeny z hlediska únavového namáhání přípoje táhel. Proto byl vytvořen globální model v programu CSI Bridge z převážně prutových prvků a blízké okolí přípoje prostředního závěsu bylo zpřesněno skořepinovými prvky. Z nich pak bylo zjišťováno modifikované jmenovité napětí. Únavové posudky byly pro oba detaily nevyhovující. Horší z nich byl přípoj závěsu k trámu. V závěru bylo upozorněno na další nevhodný detail. Jedná se o konzolu vystupující z pravého trámu sloužící pro umístění sloupku protihlukové stěny. Její vrchní plech je přivařen na boční stranu horní pásnice trámu bez jakéhokoliv zaoblení pro dosažení plynulého přechodu průřezu. Zde jednoznačně dochází ke koncentraci napětí. Tento detail ale zatím nebyl podrobněji zkoumán.

Na základě závěrů z Expertního posouzení [1] nebyly podniknuty konstrukční úpravy, které by mohly prodloužit zbytkovou únavovou životnost mostu. Předmětem diplomové práce se proto stalo prověření konzoly a také podrobnější analýza přípoje závěsu na trám. Pro posudky je totiž úměrně s nepřesností modelů a metod zavedená určitá míra bezpečnosti. Proto by podrobnější modely měly teoreticky vést k příznivějším výsledkům posouzení a v tomto případě tedy k vyšší zbytkové únavové životnosti.



## **2. CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE**

### **Cíle práce**

Na základě poznatků z Expertního posouzení [1] se stala cílem diplomové práce podrobnější analýza a posouzení nevyhovujících detailů – přípoje závěsu k trámu a konzoly. K tomu byla určena metoda hot-spot. Dalším cílem bylo ověření chování numerických modelů, které bylo porovnáváno s experimentálně zjištěnými veličinami ze statické a dynamické zatěžovací zkoušky. Rozdíly byly nezanedbatelné, a proto musely být modely validovány.

### **Metody dosažení cílů**

Analýza vybraných detailů vyžaduje nejprve globální model. Ten byl již vytvořen v programu CSI Bridge pro Expertním posouzení [1] a byl poskytnut jako podklad pro tuto práci. Zde byl dále upravován a zatížení bylo přizpůsobeno programům plánovaných zatěžovacích zkoušek – statické a dynamické. Model v CSI Bridge byl využit ke zjištění globálního chování konstrukce a vnitřních sil.

Pro řešení únavy byla vybrána metoda hot-spot, jež vyžaduje model ze skořepinových nebo objemových prvků s jemnou sítí a několik bodů poblíž hrany svaru, kde je pak stanoveno normálové napětí. Proto byl na zkoumání těchto napětí v okolí vybraných detailů zvolen program Abaqus. Zde byl objemovými prvky vytvořen jen výsek části nosníku a táhla odpovídající skutečné geometrii. Jako vstupní data pro zatížení byly na jeho okrajích použity vnitřní síly z programu CSI Bridge.

Dále byl popsán průběh zatěžovacích zkoušek a porovnání vyhodnocených veličin s výpočty. Následuje validace modelů, jejímž cílem bylo dosáhnout co nejmenších rozdílů mezi výsledky výpočtů a naměřených hodnot během experimentu.

Poté byly pro posouzení únavové životnosti vytvořeny nové zatěžovací stavy. Na konstrukci se aplikovalo zatížení modelem LM71 a přejezdy dalších normových (reálných) vlaků. Pro ně pak byly spočteny rozkmity napětí na detailech metodou hot-spot. U zatížení LM71 byly navíc stanoveny i jmenovité a modifikované jmenovité rozkmity napětí.

Na závěr byla posouzena únavová životnost mostu. Pro model LM71 bylo posouzení provedeno pomocí ekvivalentních rozkmitů napětí a zatížení od skutečných vlaků bylo použito pro výpočet metodou kumulace poškození.



## 3. ÚNAVA MATERIÁLU

### 3.1. Úvod

Stavební konstrukce bývají zpravidla unikátní. Kromě nejrůznějších účelů, je to dáno širokým spektrem materiálů, konstrukčních prvků, detailů, ale také množstvím technologie během realizace a lokálními podmínkami umístění stavby. S prostředím pak přímo souvisí zatížení (např. sníh, vítr, zemětřesení, intenzita dopravy), dále chemické reakce s materiálem jako koroze nebo karbonatce a také estetické vnímání. Největší vliv na jedinečnost má však lidský faktor, který na základě daných podmínek vymýšlí konkrétní řešení.

Během návrhu se dbá na bezpečnost a spolehlivost konstrukce. I tento obor prochází svým postupným vývojem a neobejde se bez selhání některých staveb. Bohužel to bývají právě katastrofy, jež často dávají podněty k hlubšímu zkoumání a poznání chování přírody, konstrukcí a materiálů z nových úhlů pohledu. Podobně tomu bylo i u objevování únavy materiálů.

Poškození únavovým namáháním je typické pro ocel a může nastat u stavebních i strojních konstrukcí. Jedná se o cyklické namáhání materiálu typicky nižší intenzitou zatížení, než jsou meze kluzu nebo pevnosti. V závislosti na počtu cyklů a velikosti zatížení pak může dojít ke vzniku a šíření tzv. *únavové trhliny*, při jejímž dostatečném rozvoji dojde k selhání konstrukčního prvku.

### Historie

Zpočátku se mluvilo o únavě v souvislosti s lodními stožáry, ale až do příchodu průmyslové revoluce se tomu nevěnovala větší pozornost. [3]

Výsledky prvních testů na únavu zveřejnil v roce 1837 William Albert, který pozoroval opakované poškození dopravních řetězů v dolech v Clausthalu. V návaznosti na tento problém vynalezl drátěná lana. [3]

S vývojem kovových materiálů a jejich aplikací na mostech a železnici nabývalo únavové poškození na důležitosti a nehody spojené s tímto typem namáhání byly častější. [3]

Příkladem je například tragédie na železnici poblíž Versailles v roce 1842. Tehdy došlo ke zlomení nápravy motorové lokomotivy, což způsobilo vykolejení vlaku a následný požár. Během této události zemřelo 46 až 200 lidí. Neštěstí vedlo k zájmu vědecké obce o únavu a souvisejícímu výzkumu, a to v několika zemích. [3], [4]

Ještě v témže roce upozornil britský inženýr Rankin na místa se zvýšenou koncentrací napětí, kde většinou dochází k selhání prvků. [3]

Nejvíce se však v oblasti únavy proslavil německý inženýr August Wöhler (1819-1914), který prováděl výzkum únavového namáhání na nápravách železničních vagónů. Na základě jeho poznatků se začaly následně používat *S-N křivky*, také známé jako *Wöhlerovy křivky*. [3]

Roku 1919 pak došlo k tzv. Bostonské melasové tragédii, jež byla způsobena protržením zásobníku z důvodu únavy a přibližně 7,5 milionů litrů melasy se vylilo do ulic. 12 lidí zemřelo a dalších 40 bylo zraněných. [3]



V souvislosti s rozvojem průmyslu bylo zaznamenáno několik nehod zapříčiněných únavovým namáháním, které podněcovaly další výzkum. Šlo zejména o součástky do automobilů a letadel. [3]

V roce 1948 byla navržena a vyrobena letadla zvaná Havillandovy komety. Jejich první let o rok později byl velkým úspěchem. Časem je však postihla série katastrof, kdy byly roztrženy jejich trupy uprostřed letu. Tyto události vedly k rozsáhlému testování na poli únavy a poukázaly na detaily s vysokou koncentrací napětí, kde vznikají únavové trhliny. [3]

Další nešťastný příklad je z oblasti medicíny. Zde začaly být užívány ocelové náhrady kyčlí. Je známo minimálně 21 pacientů, kterým musely být kvůli rozsáhlému poškození následně odstraněny. [3]

Únavové trhliny začaly být pozorovány i na ocelových mostech. V mnoha zemích se stále nachází staré nýtované ocelové mosty a problém zbytkové únavové životnosti je na nich třeba pečlivě zkoumat. Zpravidla ale není snadné určit historii zatěžování, konkrétní modely dopravy a jejich intenzitu po celou dobu existence konstrukce. [3]

### Únava a únavová životnost

*Únava* je proces postupné degradace materiálu počínající strukturními změnami, které vedou ke vzniku a šíření únavové trhliny v části prvku se zvýšenou koncentrací napětí. Nakonec dochází k tomu, že je příslušné místo na konstrukci natolik oslabeno trhlinou, že nastane lom. Příčinou tohoto jevu je cyklické zatěžování, jež nemusí zdaleka dosahovat meze kluzu, nebo pevnosti materiálu. Zmíněný lom pak bývá náhlý a nastává bez dalšího varování konstrukce. Právě proto je nutné se únavou zabývat.

Je známo, že únava není jen problém oceli, ale je zkoumána i na jiných nekovových materiálech. Obecně může být únavové chování vyvoláno různými podněty, např. namáháním mechanickým, teplotním nebo korozním. Nejběžnějším případem ale zůstává mechanicky namáhaná ocel.

Napětí, při kterém dojde za daného počtu cyklů k porušení prvku, se nazývá *únavová pevnost*. Důležitým faktorem návrhu a posouzení konstrukcí je tzv. *únavová životnost*. Tento pojem v sobě zahrnuje počet zatěžovacích cyklů při daných rozmětech napětí nutných ke vzniku trhliny a k jejímu rozvoji až do kolapsu prvku. Pokud je zkoumána stávající konstrukce, užívá se termín *zbytková únavová životnost*, která předpokládá částečné vyčerpání této únavové životnosti od počátku existence konstrukce a stanovuje zbývající počet cyklů do porušení.

Únavové namáhání je zkoumáno z několika perspektiv. V první řadě je důležitá znalost silových účinků na konstrukci a historie namáhání jejích prvků. Dále to zasahuje do problematiky materiálových struktur a vlastností. V neposlední řadě je klíčové chápání principů lomové mechaniky pro porozumění vzniku a šíření únavové trhliny.



### 3.2. Fáze únavy

Únavový cyklus se dá charakterizovat čtyřmi stádii. [5], [6]

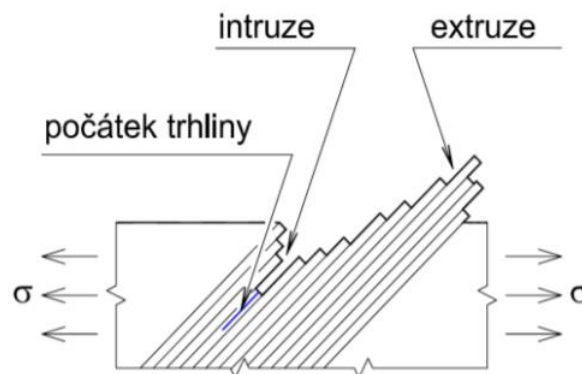
#### 1) Změny mechanických vlastností

Nejprve dochází ke změnám v mikrostruktuře materiálu, které mají za následek změnu fyzikálních vlastností (např. mechanických, elektrických, magnetických). V tomto stádiu se mění odpor k zatížení u cyklicky nestabilních materiálů. Může docházet k tzv. cyklickému zpevnění, nebo cyklickému změkčení. [5], [6]

#### 2) Nukleace únavové trhliny

Do stádia nukleace únavové trhliny patří iniciace mikrotrhlin a jejich propojování. Únavové mikrotrhliny vznikají v místech s vyšší koncentrací napětí. Těmi mohou být významnější vady či vměstky uvnitř materiálu, ale především se jedná o povrchové nerovnosti a zvýšené lokální napjatosti vzniklé při výrobě, opracování materiálu, svařování a působením koroze. [5], [6]

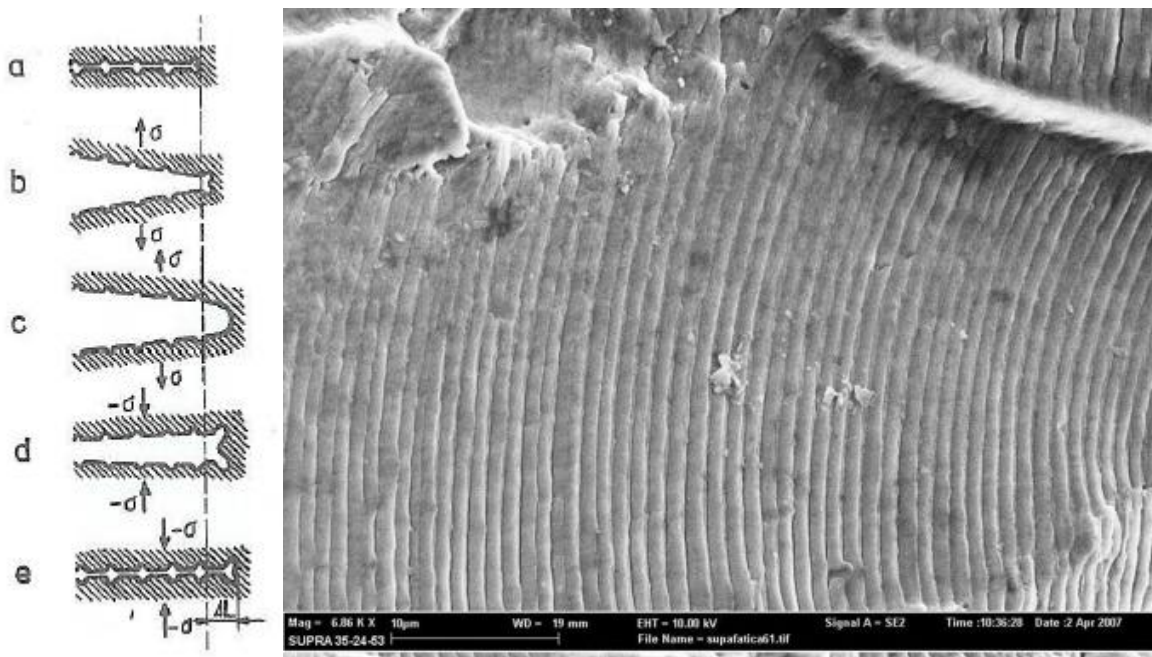
Během cyklického zatěžování vznikne vlivem smykové složky napětí skluzový pás a na povrchu se objeví *intruze* (propad původního materiálu) a *extruze* (vytlačení původního materiálu) - viz Obr. 1. Napětí se koncentruje v intruzích, z nichž se začnou po smykové ploše šířit mikrotrhliny. Postupně se mikrotrhliny stáčí do směru kolmého na hlavní tahové napětí. [5], [6]



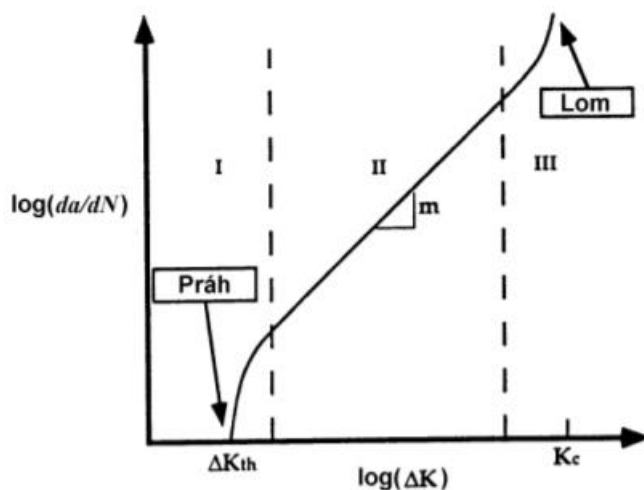
Obr. 1: Stadium nukleace únavové trhliny [7]

#### 3) Šíření trhliny

Trhlina se dále šíří postupně po zátěžových cyklech, které jsou doprovázeny opakovaným otevíráním a uzavíráním trhliny. Během otevírání dochází k posunu čela trhliny, kde se vytvoří nový žlábek, tzv. striace. Posun příslušný jednomu zátěžovému cyklu, z něž lze zjistit rychlost šíření trhliny, pak odpovídá vzdálenosti sousedních striací. [5], [6]



Obr. 2: Šíření trhliny [8]



Obr. 3: Graf rychlosti šíření únavové trhliny [9]

Graf na Obr. 3 popisuje závislost rychlosti šíření trhliny ( $da/dN$ ) na rozkmitu faktoru intenzity napětí ( $\Delta K$ ). Rychlost šíření trhliny je definována jako změna délky trhliny během určitého počtu cyklů. Faktor intenzity napětí je veličina závislá na velikosti napětí, geometrii prvku a délce trhliny. Velikost rozkmitu je dána částí cyklu, při němž dochází ve směru kolmém na trhlínu k tahovému namáhání, včetně zohlednění počátečního stavu napjatosti materiálu ovlivněného např. válcováním nebo reziduálním pnutím. [5], [6]





Graf je rozdělen do tří oblastí. V oblasti I je stanovení šíření trhliny náročné, pod hraniční hodnotou označenou  $\Delta K_{th}$  k jejímu šíření vůbec nedochází. Oblast II je charakterizována lineární závislostí popsanou *Parisovým zákonem*. Konstanty  $C$  a  $m$  jsou závislé na materiálu. [5], [6]

$$v = da/dN = C(\Delta K)^m$$

Oblast III se vyznačuje nestabilním šířením, kde trhliny rostou velmi rychle a po dosažení hodnoty lomové houževnatosti  $K_c$  nastává zpravidla křehký lom. [5], [6]

### 4) Lom

Konečným stádiem únavy je porušení prvku lomem. Tato konečná fáze nastává náhle, a proto může být poměrně nebezpečná. [5], [6]

### Rozdílné vnímání únavy

Z pohledu strojných konstrukcí je klíčová fáze vzniku trhliny, stádium šíření trhliny do vzniku lomu je pak již velice krátké. Je to dáno velkým množstvím rychle po sobě jdoucích zatěžovacích cyklů. Snahou o dokonale hladký povrch s pozvolnými plynulými přechody lze dosáhnout prodloužení první etapy únavového cyklu do vzniku trhliny. Tyto úpravy je možné provádět díky typicky sériové výrobě menších rozměrů.

Na stavebních konstrukcích jsou povrchové nedokonalosti materiálů běžné a vznik únavové trhliny nebývá okamžitou hrozbou. Vzhledem k podstatně menšímu množství pomaleji se opakujících cyklů během životnosti konstrukce může probíhat šíření trhliny i desítky let. Po zjištění takové trhliny se ohrožení konstrukce posoudí výpočtem množství cyklů potřebných pro rozšíření trhliny do její kritické délky. Pokud trhlina nepředstavuje brzké nebezpečí je dále sledována v průběhu životnosti konstrukce.

### 3.3. Přístupy k řešení únavy

V této kapitole jsou uvedeny tři metody, při jejichž výpočtech lze postupovat lineárně pružnou analýzou. S využitím přesnější metody roste kromě náročnosti řešení problému i množství a citlivost vstupních dat. Jednodušší metody mají bezpečnost schovanou v méně příznivých koeficientech a také v nižších *kategoriích detailů*, což jsou únavové pevnosti pro  $2 \cdot 10^6$  cyklů, s nimiž se rozkmity napětí od zatížení pro posouzení únavy porovnávají. Tyto hodnoty jsou pro různé typy detailů a přístupy řešení definovány v normě ČSN EN 1993-1-9 [10].

### Základní rozdíly metod

Z Obr. 4 je patrné, že tyto metody zkoumají napětí v různých částech vybraného detailu, a proto vedou k jiným velikostem.

Základní metodou, o níž se opírá i ČSN EN 1993-1-9 [10], je výpočet *jmenovitých napětí*. Ta odpovídají na Obr. 4 (*nominal stress region*) nejvzdálenějším místům

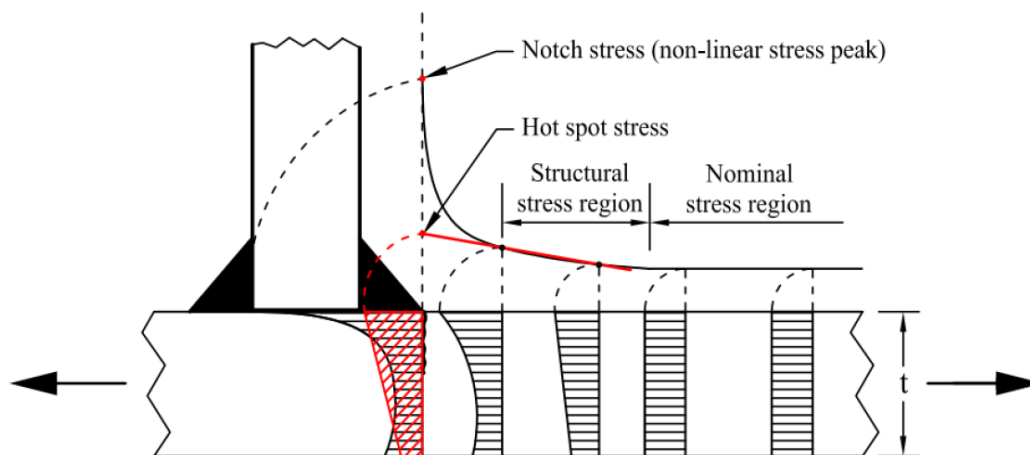


od vzniku potenciální trhliny. Lze proto využít standardní prutové modely a základní vztahy mezi vnitřními silami a normálovým napětím.

V *metodě hot-spot* je již zohledněn nárůst napětí vlivem geometrie detailu – mimo samotný svar, kde napětí nabývá nelineárního vrcholu. Proto je napětí zjišťováno v určité vzdálenosti od svaru, a to ve dvou nebo třech uzlech, z nichž je lineárně nebo kvadraticky provedena extrapolace k patě svaru, tedy k místu vzniku trhliny.

Nejpodrobnější a nejpresnější je z uvedených přístupů *metoda efektivního vrubového napětí*, kde je napětí odečítáno přímo z místa vzniku trhliny (paty nebo kořene svaru).

Všechny tyto přístupy mají svoje zvláštní kategorie detailů, se kterými je dané napětí porovnáváno. Čím přesnější je metoda, a tedy vyšší napětí, tím vyšší jsou i hodnoty kategorií detailů.



Obr. 4: Jmenovité, hot-spot a efektivní vrubové napětí [11]

### 3.3.1. Jmenovitá napětí

Nejjednodušší přístup je stanovení jmenovitých napětí. Ta se určují v místě vzniku potenciální trhliny, ale s vyloučením všech účinků koncentrace napětí. Posouzení únavového namáhání je pak prováděno na základě S-N křivek a kategorií detailů pro tuto metodu definovaných normou ČSN EN 1993-1-9 [10].

### Únavové namáhání

Opakující se působení zatížení na konstrukci lze popsat pomocí napěťových cyklů. V závislosti na počtu cyklů do porušení se rozlišuje oblast kvazistatického lomu, nízkocyklové a vysokocyklové únavy. [12]

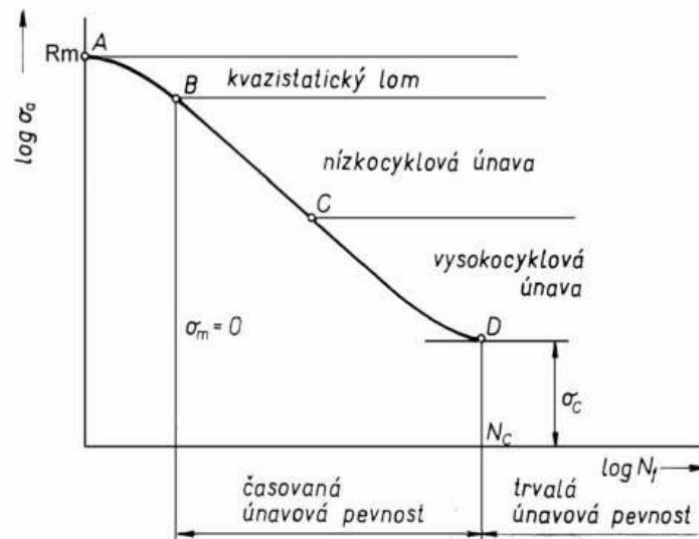
*Kvazistatický lom* nastává při jednotkách nebo několika desítkách cyklů při napětích blízkých se mezi pevnosti materiálu. V tomto případě není výstižné užít pojem únava vzhledem k velmi malé četnosti cyklů a způsobu porušení tvárným lomem. [12]



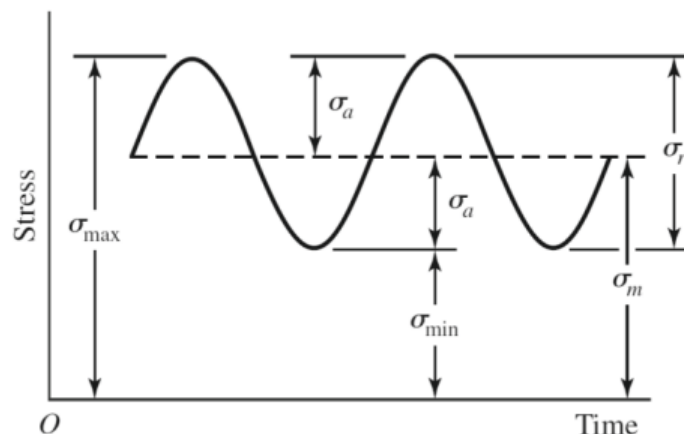
## Únavová životnost železničního mostu v Púchově

Nízkocyklová únava se vyznačuje namáháním nad mezí kluzu, a tedy opakovaně vyvolávanou plastickou deformací. Hranice mezi nízkocyklovou a vysokocyklovou únavou je okolo  $10^5$  cyklů do porušení. [12]

Napětí u vysokocyklové únavy se pohybuje zpravidla pod mezí kluzu, čímž roste počet cyklů do porušení. Tento jev je typický pro stavební konstrukce, především ocelové. [12]

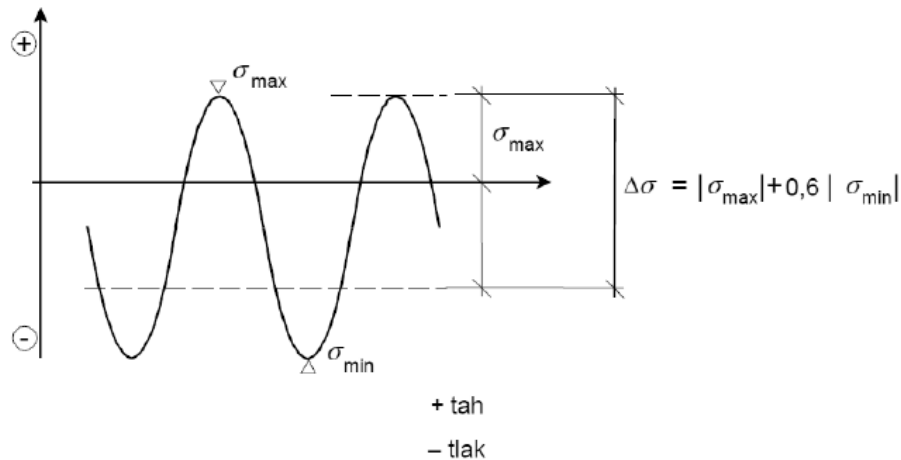


Obr. 5: Křivky únavové pevnosti pro rozkmity normálových napětí [12]



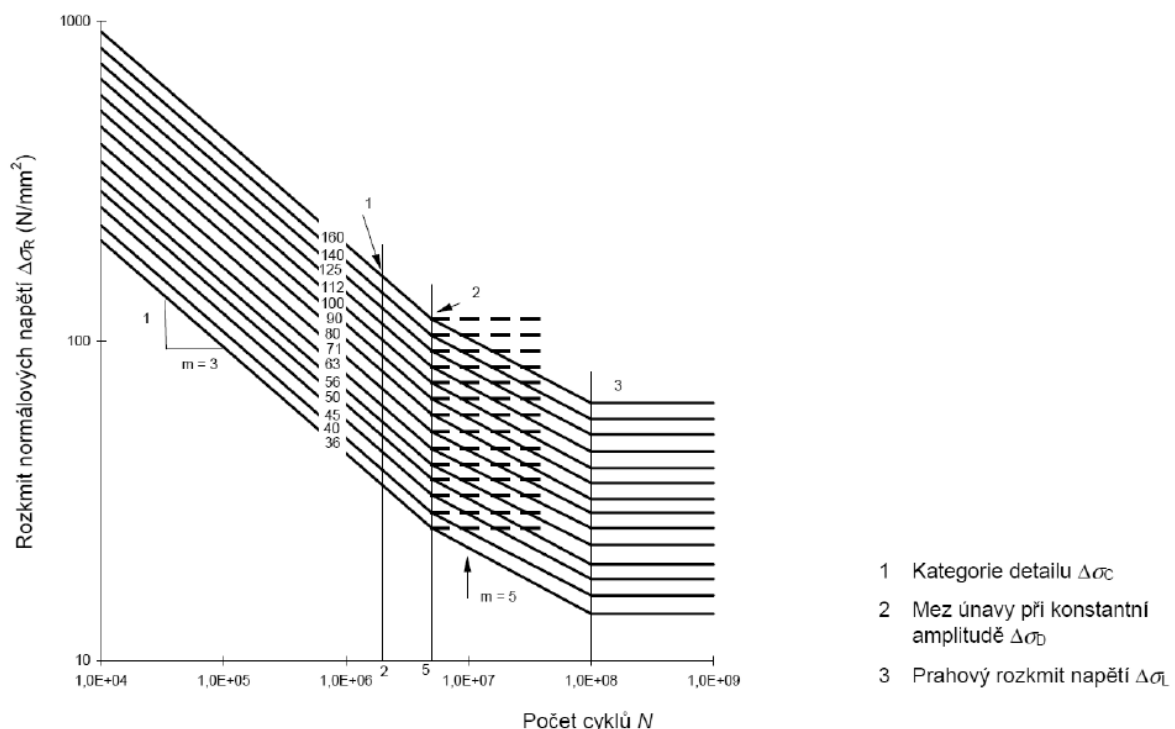
Obr. 6: Příklad průběhu napětí při harmonickém zatěžování [13]

Při opakovaném zatěžování vznikají na konstrukci napěťové cykly. Dají se charakterizovat maximem  $\sigma_{max}$  a minimem  $\sigma_{min}$ . Z těchto hodnot lze pak snadno dopočítat rozkmit napětí  $\sigma_r$  (také  $\Delta\sigma$ ), amplitudu  $\sigma_a$  a střední napětí  $\sigma_m$ . Kromě rozkmitu je důležitá i poloha křivky v grafu, zda je celá v tahové oblasti, v tlakové, nebo střídavě. Nejnepriznivější je namáhání čistě tahové, protože právě v tahu dochází ke vzniku a rozvoji únavové trhliny. Proto se minimální napětí v tlakové oblasti redukuje součinitelem 0,6 - viz Obr. 7. [10]



Obr. 7: Redukce napětí v tlaku [10]

### Křivky únavové pevnosti



Obr. 8: Křivky únavové pevnosti pro rozkmit normálových napětí [10]

Pro popis únavové životnosti se používá tzv. *S-N* nebo také *Wöhlerova křivka*, která vykresluje závislost mezi velikostí rozkmitu napětí a odpovídajícího počtu cyklů do porušení. Standardně má pro vyhodnocení normálových napětí tři oblasti s měnícím se sklonem v  $5 \cdot 10^6$  a  $1 \cdot 10^8$  cyklů. První hranice se nazývá *mez únavy při konstantní amplitudě*. Pokud žádný rozkmit v průběhu životnosti tuto hodnotu nepřekročí, pak nenastane únavové porušení. Od  $1 \cdot 10^8$  cyklů je na vodorovné



## Únavová životnost železničního mostu v Púchově

křivce definovaný *prahový rozkmit napětí*. Pro nižší velikosti rozkmitu nikdy k únavovému porušení nedojde, zároveň ani při řešení kumulace poškození tato část zatížení k vyčerpání únavové životnosti nijak nepřispívá. Křivka se pro různé konstrukční detaily liší. Je vždy definovaná hodnotou únavové pevnosti pro  $2 \cdot 10^6$  cyklů, tzv. *kategorií detailů* (viz kapitola 4.2., Tab. 8, str. 44 a Tab. 11, str. 46). [10]

Křivky únavové pevnosti lze při konstantním rozkmitu normálového napětí popsat následujícími rovnicemi.<sup>1</sup> [10]

$$\Delta\sigma_R^m \cdot N_R = \Delta\sigma_C^m \cdot 2 \cdot 10^6 \quad m = 3 \text{ pro } N \leq 5 \cdot 10^6, m = 5 \text{ pro } 5 \cdot 10^6 \leq N \leq 10^8$$

$$\Delta\sigma_D = \left(\frac{2}{5}\right)^{1/3} \cdot \Delta\sigma_C$$

$$\Delta\sigma_L = \left(\frac{5}{100}\right)^{1/5} \cdot \Delta\sigma_D$$

### Ekvivalentní rozkmit napětí

Wöhlerova křivka uvažuje jen rozkmit napětí jedné konstantní velikosti. Jednou z možností, jak posuzovat nestejně namáhanou konstrukci na únavu, je pomocí *ekvivalentního rozkmitu napětí*  $\Delta\sigma_{E,2}$ . Tato hodnota vychází z teoretického rozkmitu napětí  $\Delta\sigma_p$  od modelu zatížení na únavu definovaného normou ČSN EN 1990 [14], pro železniční mosty to je model LM71. Ekvivalentní rozkmit napětí se porovnává s příslušnou kategorií detailu  $\Delta\sigma_C$  se zohledněním součinitelů  $\gamma_{Ff} = 1,0$  a  $\gamma_{Mf}$  dle Tab. 1. [10]

$$\Delta\sigma_{E,2} = \lambda \cdot \Phi_2 \cdot \Delta\sigma_p$$

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2} \leq \frac{\Delta\sigma_C}{\gamma_{Mf}}$$

Metoda hodnocení	Důsledky porušení	
	mírné	závažné
Přípustná poškození	1,00	1,15
Bezpečná životnost	1,15	1,35

Tab. 1: Doporučené hodnoty dílčích součinitelů únavové pevnosti  $\gamma_{Mf}$  [10]

Dynamický součinitel  $\phi_2$  závisí na náhradní délce  $L_\phi$ , která se liší podle typu posuzovaného prvku. Její definice lze najít v normě ČSN EN 1991-2 [15].

<sup>1</sup>  $\Delta\sigma_C$  – kategorie detailu,  $\Delta\sigma_D$  – mez únavy při konstantní amplitudě,  $\Delta\sigma_L$  – prahový rozkmit napětí



$$\Phi_2 = \frac{1,44}{\sqrt{L_\Phi - 0,2}} + 0,82$$

$$1,00 \leq \Phi_2 \leq 1,67$$

Součinitel  $\lambda$  je složen z několika dílčích. Podrobně jsou popsány v ČSN EN 1993-2 [16].

$$\lambda = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4$$

$$\lambda \leq \lambda_{max} = 1,4$$

- $\lambda_1$  – součinitel účinků poškození od dopravy, který závisí na délce kritické příčinkové čáry
- $\lambda_2$  – součinitel objemu dopravy
- $\lambda_3$  – součinitel návrhové životnosti mostu
- $\lambda_4$  – součinitel pro konstrukční prvky zatížené více než jednou kolejí

L	EC Mix
0,5	1,6
1	1,6
10	0,85
20	0,67
50	0,63
100	0,6

Tab. 2: Součinitel  $\lambda_1$  pro standardní kolejovou dopravu [16]

Doprava za rok [ $10^6$ t/kolej]	5	10	15	20	25	30	35	40	50
$\lambda_2$	0,72	0,83	0,90	0,96	1,00	1,04	1,07	1,10	1,15

Tab. 3: Součinitel  $\lambda_2$  [16]

Návrhová životnost [roky]	50	60	70	80	90	100	120
$\lambda_3$	0,87	0,90	0,93	0,96	0,98	1,00	1,04

Tab. 4: Součinitel  $\lambda_3$  [16]



$\Delta\sigma_1/\Delta\sigma_{1+2}$	1,00	0,90	0,80	0,70	0,60	0,50
$\lambda_4$	1,00	0,91	0,84	0,77	0,72	0,71
$\Delta\sigma_1$	je rozkmit napětí v posuzovaném průřezu od zatěžovacího modelu 71 na jedné koleji;					
$\Delta\sigma_{1+2}$	rozkmít napětí ve stejném průřezu od zatěžovacího modelu 71 podle EN 1991-2 na dvou kolejích.					

Tab. 5: Součinitel  $\lambda_4$  [16]

### Modifikovaný ekvivalentní rozkmit napětí

Standardně je ekvivalentní rozkmit napětí stanoven z rozkmitu napětí jmenovitých. Kategorie detailů, s nimiž se porovnává, jsou však typizované pro základní případy. Konkrétní geometrie detailu se tedy může lišit. V tom případě i skutečné rozložení napětí může vykazovat menší či větší nepřesnosti od předpokladu zavedeného do posouzení normovými kategoriemi detailů. Pro zpřesnění byl proto zaveden *modifikovaný ekvivalentní rozkmit napětí*, pro nějž je třeba stanovit *součinitel koncentrace napětí*  $k_f$ . Ten lze určit z příruček nebo vhodnými konečně prvkovými modely. [10]

$$\Delta\sigma_{E,2} = k_f \cdot \lambda \cdot \Phi_2 \cdot \Delta\sigma_p$$

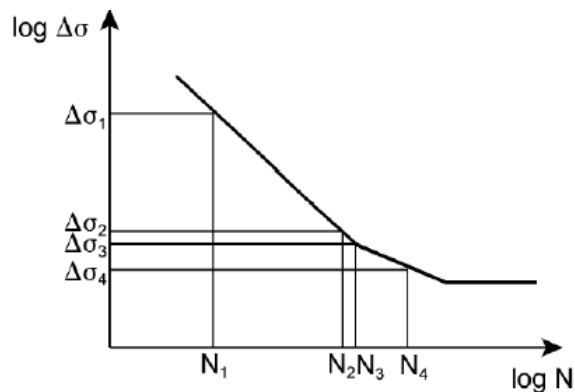
### Kumulace poškození

Pro různorodé zatěžování v průběhu životnosti rozvíjí řešení únavy také *Palmgren-Minerova hypotéza o kumulaci poškození*. Ta předpokládá, že při určitém počtu cyklů stejného rozkmitu dojde k vyčerpání části únavové životnosti. Zatěžování se proto roztřídí do skupin stejných rozkmitů napětí např. *metodou stékajícího deště* nebo *metodou nádrže*. Podle jejich velikosti se z příslušného grafu S-N křivky zjistí odpovídající únavová životnost. K porušení dojde tehdy, pokud součet podílů četnosti cyklů  $n_{Ei}$  ku odpovídající únavové životnosti  $N_{Ri}$  pro jednotlivé velikosti rozkmitů bude větší než 1. [10]

$$D_d = \sum_i \frac{n_{Ei}}{N_{Ri}} \leq 1$$

V souvislosti s kumulací poškození se ještě ověřuje *kritérium ekvivalentního rozkmitu napětí*. [10]

$$\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E,2} \leq \sqrt[m]{D_d} \frac{\Delta\sigma_C}{\gamma_{Mf}}; \quad m = 3$$



Obr. 9: Únavové životnosti ve vztahu k velikosti rozkmitů napětí [10]

### 3.3.2. Metoda hot-spot

Tato metoda slouží zejména pro stanovení únavové životnosti svařovaných konstrukcí, kde výpočet jednodušším postupem již není dostatečně přesný kvůli zvýšenému nárůstu napětí, který může vzniknout složitější geometrií nebo zatěžováním. Tento způsob hodnocení únavové životnosti se u svařovaných konstrukcí využívá již od 60. let 20. století. [11], [17]

Výpočet metodou hot-spot je vhodný v případě, že únavová trhlinka vznikne v patě svaru (právě toto místo se nazývá „hot-spot“) a zároveň dominantní účinek napětí je kolmý na tuto svarovou linii. Pokud naopak trhlinka vznikne v kořeni svaru, pak by měla být použita metoda napětí jmenovitých nebo efektivních vrubových. [11], [17]

Únavová pevnost svařovaného detailu je dána třemi hlavními parametry. Prvním z nich je geometrie detailu způsobující koncentraci napětí. Dále to ovlivňuje tvar a dimenze samotného svaru, které také způsobují nárůst napětí. Nejobtížněji se však stanovuje třetí faktor – kvalita provedení svaru, jeho dokonale přesný tvar, přítomnost zápalů, pórů a dalších vad. Všechny tyto parametry musí být při stanovení únavové pevnosti uvažovány. Pokud nejsou zavedeny do výpočtu napětí, pak jsou zahrnuty na druhé straně rovnice – v kategoriích detailů. [11], [17]

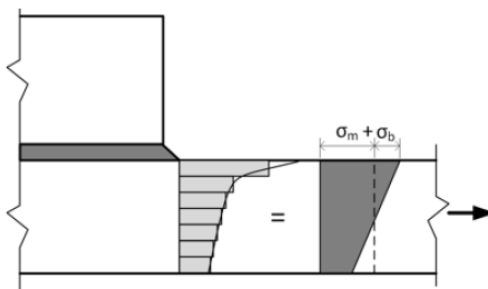
Napětí hot-spot se získá vyloučením nelineárního vrcholu napětí vzniklého geometrií svaru, zatímco zbytek geometrie detailu a jeho vliv na koncentraci nebo změny v napětí uvažován je. Tímto je v metodě během výpočtu zahrnut první parametr, jež má výrazný vliv na únavovou pevnost. Vyloučení zmíněného vrcholu lze provést linearizací napětí po tloušťce plechu s trhlinou (např. integrací) nebo častěji využívanou extrapolací napětí na povrchu plechu do místa potenciální trhliny. Následná analýza únavy využívá S-N křivek a kategorií detailů pro hot-spot metodu stanovených v ČSN EN 1993-1-9 [10], příloha B. [11], [17]





Kategorie detailu	Konstrukční detail	Popis	Požadavky
112	①	1) Plně provařený tupý svarový spoj.	1) Všechny svary zabrousit do roviny plechu rovnoběžně se směrem šípky. Použít a odborně odstranit příložky pro začátek a výběh svaru, hrany plechu obrousit ve směru namáhání. Svařovat z obou stran, kontrola NDT. Pro přesazení viz poznámku 1.
100	②	2) Plně provařený tupý svarový spoj.	2) Nezaobroušené svary. Použít a odborně odstranit příložky pro začátek a výběh svaru, hrany plechu obrousit ve směru namáhání. Svařovat z obou stran. Pro přesazení viz poznámku 1.
100	③	3) Křížový spoj s plně provařenými K-svary.	3) Úhel v přechodu svaru do základního materiálu $\leq 60^\circ$ . Pro přesazení viz poznámku 1.
100	④	4) Nezatížené koutové svary.	4) Úhel v přechodu svaru do základního materiálu $\leq 60^\circ$ . Viz také poznámku 2.
100	⑤	5) Konce konzol, konce podélných výztuh.	5) Úhel v přechodu svaru do základního materiálu $\leq 60^\circ$ . Viz také poznámku 2.
100	⑥	6) Konce krycích desek a podobné spoje.	6) Úhel v přechodu svaru do základního materiálu $\leq 60^\circ$ . Viz také poznámku 2.
90	⑦	7) Křížový spoj se zatíženými koutovými svary.	7) Úhel v přechodu svaru do základního materiálu $\leq 60^\circ$ . Pro přesazení viz poznámku 1. Viz také poznámku 2.

Obr. 10: Kategorie detailů pro metodu hot-spot [10]



$$\sigma_m = \frac{1}{t} \int_0^t \sigma(y) \cdot dy$$

$$\sigma_b = \frac{6}{t^2} \int_0^t (\sigma(y) - \sigma_m) \times \left(\frac{t}{2} - y\right) \cdot dy$$

Obr. 11: Linearizace napětí po tloušťce plechu [17]



### Extrapolace napětí

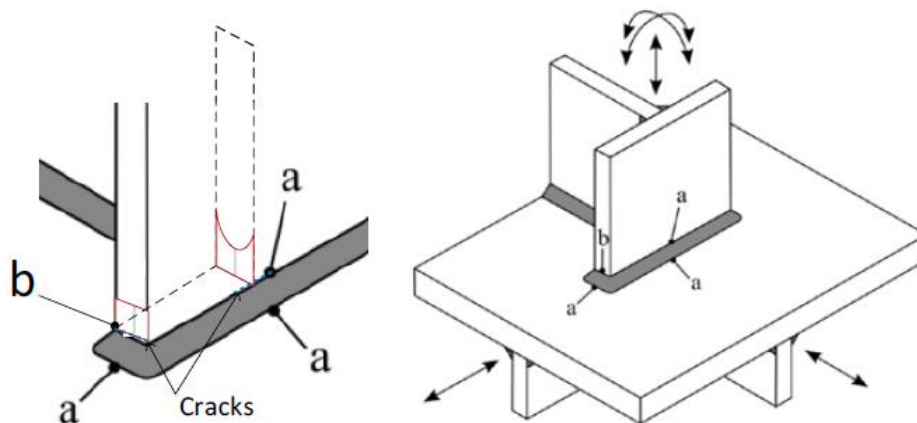
Napětí hot-spot se dá určit extrapolací povrchových napětí z přesně definovaných referenčních uzlů na místo možného vzniku trhliny v patě svaru. Umístění referenčních bodů závisí na typu hot-spot, druhu konečně-prvkové sítě a postupu extrapolace. [11], [17]

Dle Obr. 12 se rozlišují dva typy hot-spot: typ „a“ a typ „b“. Rozdíl mezi těmito dvěma typy je vidět v rozložení napětí po tloušťce plechu s očekávaným vznikem trhliny. [11], [17]

Hot-spot *typu „a“* se vyznačuje vznikem trhliny u paty svaru na povrchu plechu, přičemž hodnoty napětí se v tomto případě po tloušťce plechu výrazně liší. [11], [17]

*Typ „b“* představuje vznik únavové trhliny na okraji plechu, kde napětí v místě hot-spot není závislé na tloušťce plechu. [11], [17]

Proto je i umístění extrapoláčních bodů pro typ „a“ závislé na tloušťce plechu, zatímco pro typ „b“ je nezávislé. [11], [17]



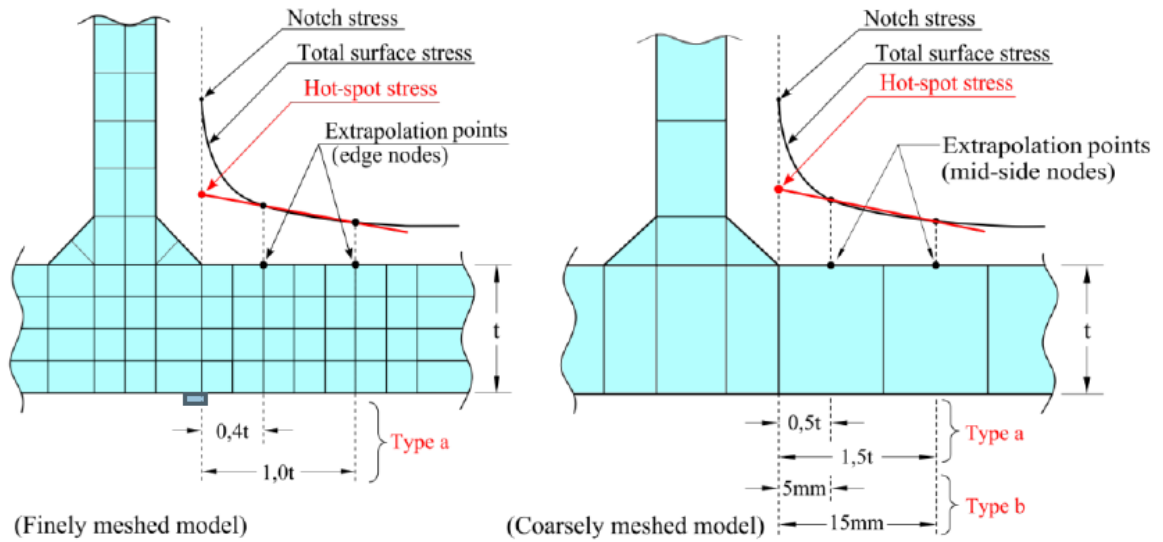
Obr. 12: Typy hot-spot [17]

Extrapolace povrchových napětí využívá lineární nebo kvadratickou funkci. Lineární extrapolaci je možné uplatnit pro většinu konstrukčních detailů a zatěžovacích stavů. Kvadratická extrapolace by měla být využita v případech prudkého nárůstu napětí, např. kvůli náhlé lokální změně tuhosti nebo zatížení. [11], [17]

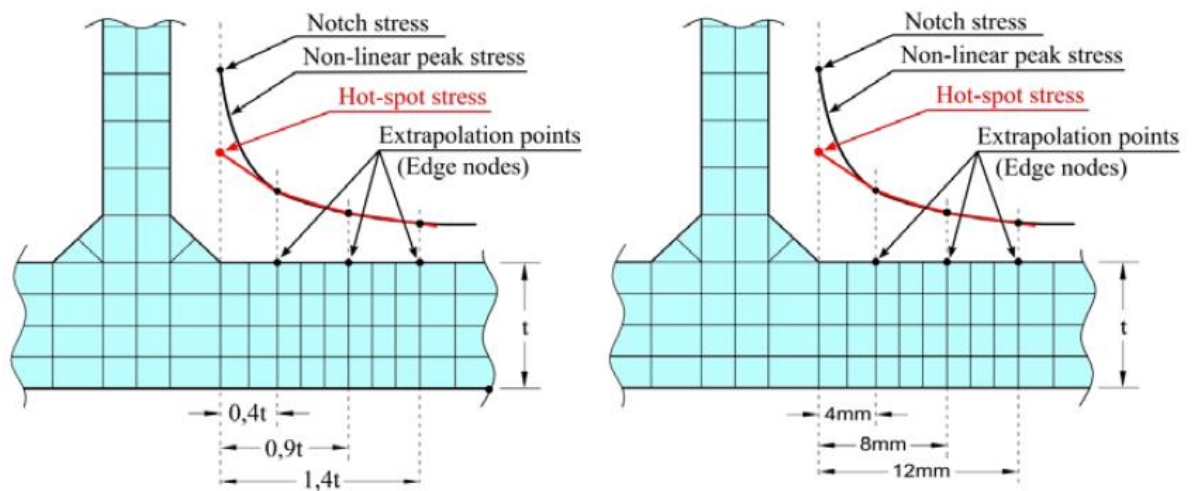
Konečně-prvkové modely, ve kterých se využívá metoda hot-spot, jsou tvořeny hrubou, nebo jemnou sítí. Hrubá síť má zpravidla definovaný jeden konečný prvek na tloušťku plechu, zatímco jemná obvykle vyžaduje několik prvků po tloušťce. [11], [17]

Jemná síť může být tvořena lineárními, nebo kvadratickými prvky. Velikost prvku by neměla přesáhnout vzdálenost od místa očekávaného vzniku trhliny k prvnímu bodu extrapolace, viz Obr. 13 a Obr. 14. [11], [17]

V konečně-prvkových modelech s hrubou sítí by měl být použit vyšší řád prvků (např. 20-uzlové, druhého řádu), které jsou vhodné i pro zachycení náhlého nárůstu napětí v oblastech klíčových pro únavu. [11], [17]



Obr. 13: Lineární extrapolace s jemnou (vlevo) a hrubou sítí (vpravo) [17]



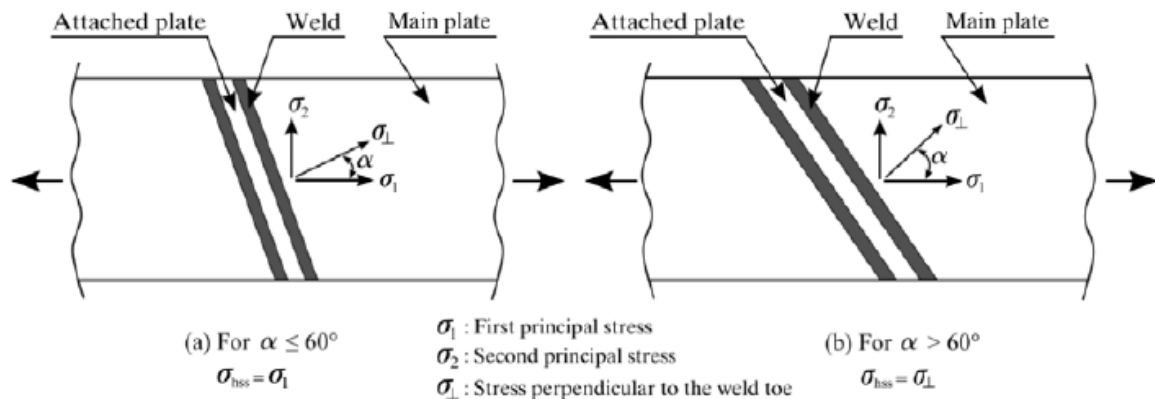
Obr. 14: Kvadratická extrapolace s jemnou (vlevo) a hrubou sítí (vpravo) [17]

Typ hot-spot	Lineární extrapolace		Kvadratická extrapolace
	Jemná síť	Hrubá síť	Jemná síť
Typ „a“	0,4t a 1,0t	0,5t a 1,5t	0,4t, 0,9t a 1,4t
	$1,67\sigma_{0,4t} - 0,67\sigma_{1,0t}$	$1,5\sigma_{0,5t} - 0,5\sigma_{1,5t}$	$2,52\sigma_{0,4t} - 2,24\sigma_{0,9t} + 0,72\sigma_{1,4t}$
Typ „b“	-	5 mm a 15 mm	4 mm, 8 mm a 12 mm
	-	$1,5\sigma_{0,5t} - 0,5\sigma_{1,5t}$	$3\sigma_{4mm} - 3\sigma_{8mm} + \sigma_{12mm}$

Tab. 6: Pravidla pro lineární a kvadratickou extrapolaci pro různé typy hot-spot a hustoty sítě [17]



Pro metodu hot-spot by měla být využita složka napětí kolmá k linii svaru. V případě dvouosé napjatosti na povrchu plechu se nahradí prvním hlavním napětím, pokud svírá se složkou kolmou ke svaru maximálně  $60^\circ$ . [11], [17]



Obr. 15: Dvouosá napjatost ve vztahu k metodě hot-spot [17]

### Doporučení pro konečně-prvkové modely využívající metodu hot-spot

Modely mohou být dvojího druhu, se skořepinovými, nebo objemovými prvky. Kromě této volby bývají detaily citlivé na zvolenou síť, velikost a typ prvků. [11], [17]

Poměr mezi nejdelším a nejkratším rozměrem prvku by měl být menší než 1:3. V oblasti extrapolace by měl být tento poměr pro hrubou síť 1:1 a pro jemnou síť maximálně do 1:2. [11], [17]

Je možné v jednom modelu přecházet z jemné sítě na hrubou. Změna velikosti prvků by však měla být postupná a hladká, obzvláště pokud se tento přechod nachází blízko referenčních bodů. [11], [17]

Svary by měly být modelovány, pokud jsou hlavním zdrojem koncentrace napětí, nebo když jsou rozhodující pro správnou reprezentaci tuhosti detailu, např. plechy s lokálním velkým ohybem blízko svaru. [11], [17]

Velikost konečných prvků v oblasti extrapolace napětí v detailu by měla být volena tak, aby referenční body pro extrapolaci odpovídaly středním nebo krajním uzlům prvků. [11], [17]

### Modely skořepinové

Skořepinová konstrukce bývá jednodušší na vytvoření a svary v nich většinou nejsou vůbec modelovány. Nutné jsou pouze v případech uvedených výše. Jejich zavedení do modelu bývá problematické. [11], [17]

Prvky by měly být umístěny do své střednicové roviny. V případě excentricity mezi plechy jsou prvky modelovány odsazením. [11], [17]

Nedoporučuje se používat skořepinové prvky pro křížové spoje, kdy k jednomu průběžnému plechu jsou přivařeny kolmo dva další, „T“ spoje a pro příčné tupé svary. Výsledná napětí by totiž v podstatě odpovídala napětím jmenovitým. [11], [17]



### **Modely s objemovými prvky**

Tento přístup je vhodnější pro zkoumání složitějších detailů a v tomto případě bývá detail modelovaný i se svary. [11], [17]

### **Výhody hot-spot metody**

Hlavní výhodou je zpřesnění rozložení napětí v detailu zahrnutím podrobnější geometrie, čímž výsledky v konkrétních bodech obsahují napětí globální i lokální. Tím je výrazně snížen počet kategorií detailů, které při využití standardní metody jmenovitých napětí musí tento vliv geometrie zahrnovat. [11], [17]

Zároveň by mělo platit, že při užití metody jmenovitých napětí bude výpočet z důvodu menší přesnosti bezpečnější. Proto při využití metody hot-spot by měl být výsledek stejného problému příznivější, což lze využít v případě, že konstrukce pro metodu jmenovitých napětí nevyhoví. [11], [17]

### **Nevýhody hot-spot metody**

Především je tato metoda oproti jmenovitým napětím náročnější. Vyžaduje mnohem přesnější model tvořený skořepinovými nebo objemovými prvky s celkem podrobnou sítí. Pro výpočet jmenovitých napětí je většinou postačující prutový model s poměrně hrubou sítí prvků. [11], [17]

Metodu lze využít pouze pro očekávaný vznik trhliny v patě svaru, nikoli v kořeni. [11], [17]

Další nevýhodou je citlivost na zvolenou síť, velikost a typ prvků. Také se mohou lišit výsledky v závislosti na tom, zda byl u detailu modelován svar. [11], [17]

Současný Eurokód ČSN EN 1993-1-9 [10] neuvádí postup a doporučení pro užití této metody, pouze kategorie detailů. [11], [17]

### **3.3.3. Metoda efektivního vrubového napětí**

Nejnáročnější z uvedených postupů pro řešení únavy je metoda efektivního vrubového napětí. Tou je stanoveno napětí přímo v místě vzniku potenciální trhliny dle Obr. 4, str. 22, kterým může být pata i kořen svaru. Je tedy zohledněna geometrie detailu včetně samotného svaru. [11], [17]

Tento přístup vede oproti ostatním k vyšším napětím, která se porovnávají s vyššími kategoriemi detailů. Jelikož jsou v modelu zahrnuty všechny parametry, jež lze reálně vymodelovat, vede tato metoda na další redukci kategorií detailů. Nyní záleží jen na tzv. referenčním poloměru a typu napětí. [11], [17]

<b>Referenční poloměr</b>	<b>Hlavní napětí</b>	<b>Misesovo napětí</b>
r = 1,0 mm	FAT225	FAT200
r = 0,05 mm	FAT630	FAT560

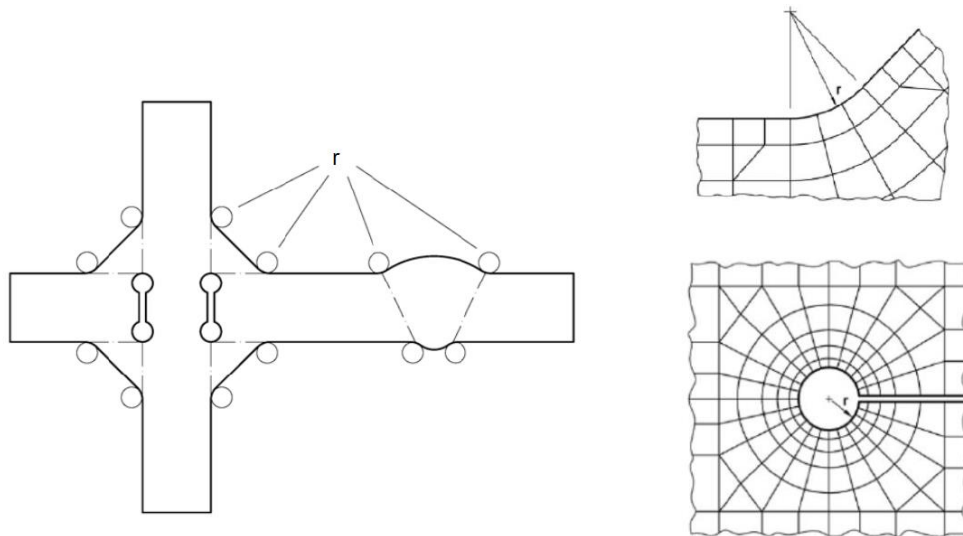
*Tab. 7: Kategorie detailů pro efektivní vrubové napětí [11]*



**Únavová životnost železničního mostu v Púchově**

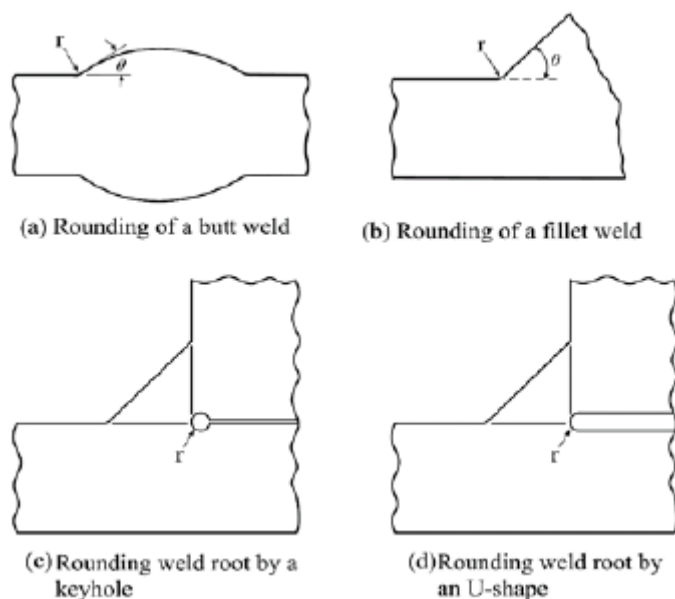
Je možné použít první hlavní napětí, pokud jsou účinky zatížení převážně jednoosé a kolmé k linii svaru. Víceosé namáhání je také možné řešit prvním hlavním napětím, pokud má stejné znaménko jako druhé hlavní napětí. V jiných případech je tato metoda závislá na Missesovu napětí. [11], [17]

Referenční poloměr se užívá pro zaoblení paty nebo kořene svaru, čímž se eliminuje problém se singularitami v těchto bodech. Pro plechy tlouštěk větších než 5 mm je doporučený 1 mm, pro tenčí by měl být nahrazen poloměrem 0,05 mm. [11], [17]



Obr. 16: Příklady míst s referenčními poloměry [11]

Dále je stanovená i idealizovaná geometrie svarů. Koutové svary by měly být konstruovány s úhlem 45°. U tupých svarů se oproti tomu předpokládá plynulé nadvýšení s nabíhajícím úhlem 30°. [11], [17]



Obr. 17: Idealizace svarů s referenčními poloměry [17]

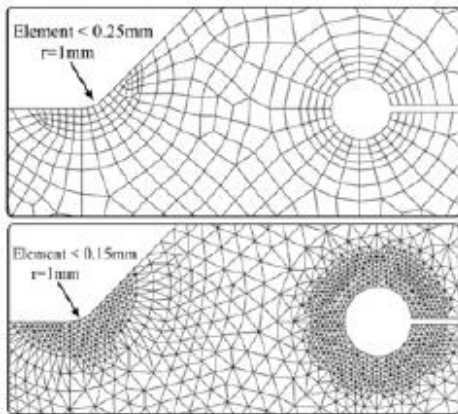


**Únavová životnost železničního mostu v Púchově**

Na Obr. 17 jsou zobrazeny dvě úpravy kořene svaru. Preferovaná je varianta (c). Druhá možnost (d) je vhodná pouze pro odhad porušení v kořeni svaru pro zatížené koutové svary. [11], [17]

Metoda by neměla být použita pro tzv. mírné vruby, které jsou definovány tím, že jejich efektivní vrubové napětí je menší než 1,6krát napětí hot-spot. [11], [17]

Stejně jako pro metodu hot-spot i zde jsou doporučení pro typ a velikost sítě prvků. [11], [17]



Element type		Element size
Hexahedral	Quadratic	0.25mm
	Linear	0.15mm
Tetrahedral	Quadratic	0.15mm

Obr. 18: Doporučení pro tvorbu sítě prvků [11]





## **4. MOST V KM 159,038**

### **4.1. Souhrnné informace**

Ocelový železniční most, který je předmětem této diplomové práce, se nachází na Slovensku. Je umístěn na dvoukolejné trati Púchov – Považská Bystrica v km 159,038 přes Nosický kanál řeky Váh. [18]

Jeho celková délka 414,920 m je rozdělena do šesti prostě uložených polí. Dvě střední pole o rozpětí 124,8 m jsou řešena jako trámy vyztužené obloukem, tzv. Langerovy trámy. Zbýlá pole tvoří spřažené ocelobetonové konstrukce o rozpětí 30,6 m. [18]

Celým mostem vede průběžné kolejové lože, kolej je dělena pomocí kolejových dilatačních zařízení. [18]

Nově postavený most byl v srpnu a září 2020 podroben předepsaným zatěžovacím zkouškám. V září 2020 se uváděla do provozu kolej č. 1.



*Obr. 19: Celkový pohled na most*





# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

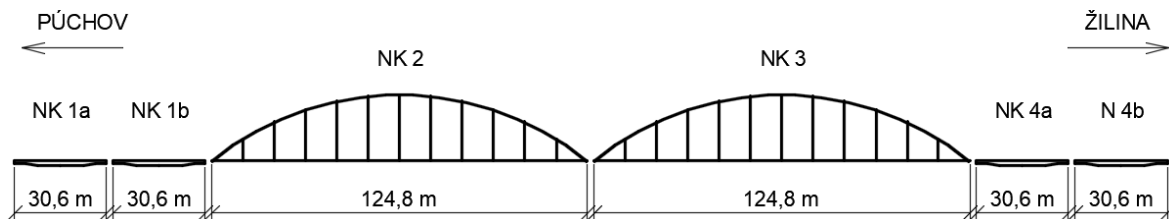
## Únavová životnost železničního mostu v Púchově

### IDENTIFIKAČNÍ ÚDAJE<sup>2</sup>

Stavba:	ŽSR, Modernizácia trate Púchov – Žilina pre rýchlosť do 160 km/h, I. etapa, optimalizácia
Objekt:	SO 44.33.11 Púchov – Považská Bystrica, nový železničný most nad Nosickým kanálom
Místo objektu:	katastrální území Horné Kočkovce, Nosice
Okres:	Púchov
Kraj:	Trenčiansky
Stavebník:	Železnice Slovenskej republiky Bratislava, Klemensova č. 8, 813 61 Bratislava
Generální projektant:	REHING Consult a.s. Trnavská cesta č. 27, 831 04 Bratislava 3
Zpracovatel PD objektu:	Žilinská univerzita v Žiline, Stavebná fakulta, Katedra stavebných konštrukcií a mostov, Univerzitná 1, 010 26 Žilina
Traťová rychlost:	160 km/h
Směrové poměry:	širá trať, v přechodnici + v přímé + v přechodnici + v oblouku, převýšení proměnné (max 100 mm)
Sklonové poměry:	stoupání 8,27 ‰ ve směru staničení
Svršek:	UIC60, B91, průběžné kolejové lože
Překážka:	koryto Nosického kanálu a jeho inundační území
Úhel křížení:	19,53 °
Rozpětí:	30,6 + 30,6 + 124,8 + 124,8 + 30,6 + 30,6 m
Délka přemostění:	379,045 m
Délka mostu:	414,920 m
Spodní stavba:	železobetonové gravitační opěry a železobetonové pilíře, založení na pilotách a mikropilotách

---

<sup>2</sup> převzato z DSPRS [19]



Obr. 20: Schéma uspořádání mostu

### Ocelobetonová spřažená konstrukce

Krajní pole (NK1a, NK1b, NK4a, NK4b) jsou tvořeny šesti nesymetrickými nosníky průřezu "I" proměnné výšky spřaženými se železobetonovou deskou. Tyto konstrukce nejsou předmětem diplomové práce. [18]

### Langerův trám

Konstrukce NK2 a NK3 jsou stejné. Liší se pouze mírně ve směrovém vedení kolejí.

Rozpětí 124,8 m překlenují dva komorové hlavní nosníky ležící ve vzdálenosti 12,6 m. V jejich průřezu o světlych rozměrech 1270x3000 mm se střídají pásnice tloušťek 40 mm a 50 mm. [18], [19], [20]

Z nosníků vystupují oblouky komorových průřezů se světlostí otvoru 1220x1710 mm dosahující teoretického vzepětí 22,0 m. Oblouky jsou mezi sebou vzájemně propojeny pěti trubkovými příčlemi o průměru 914 mm rozmístěnými v půdorysných vzdálenostech 20,8 m. Na první a poslední příčli navazují dvojice diagonálního ztužení z trubek o průměru 610 mm. [18], [19], [20]

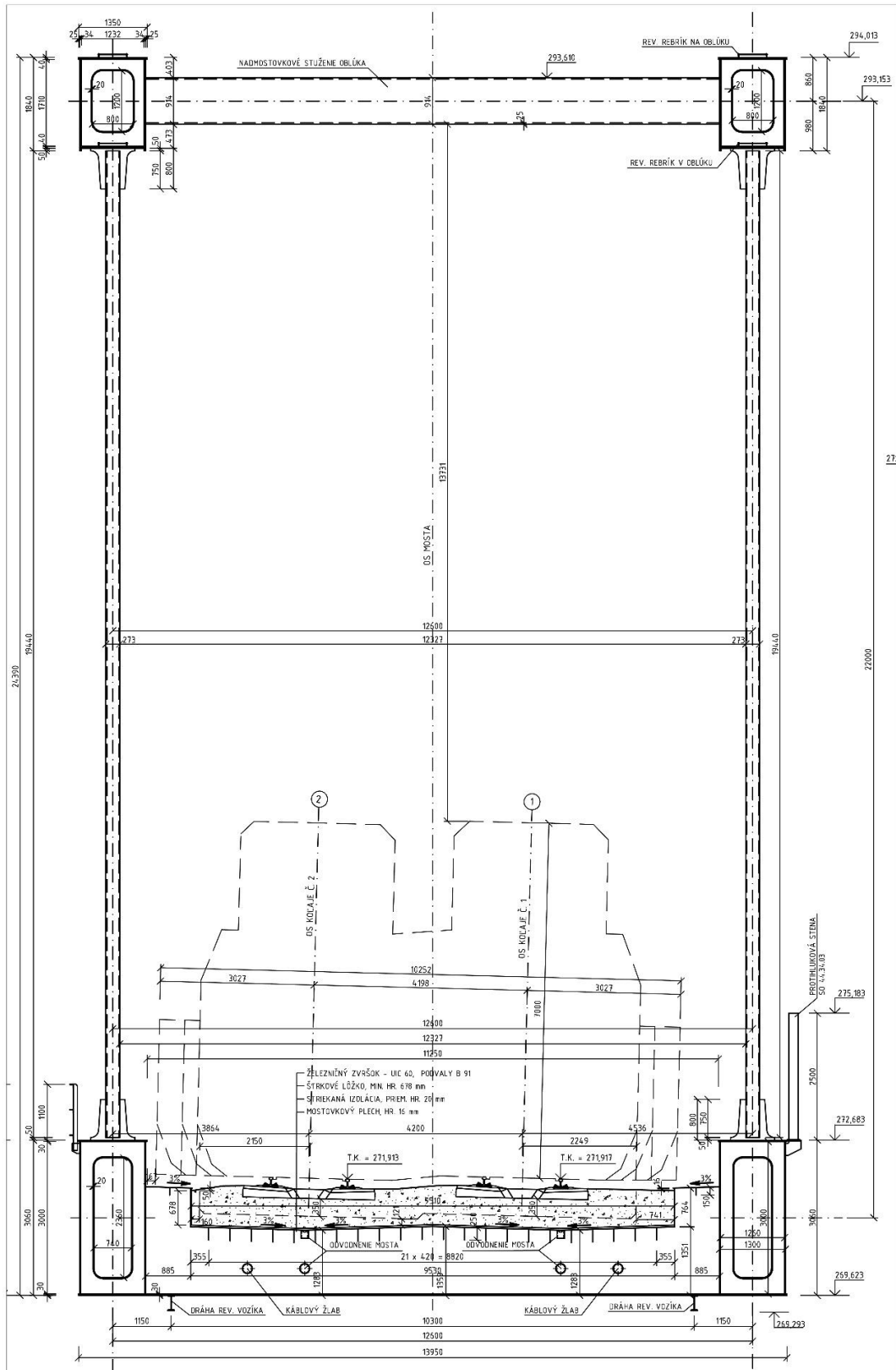
Hlavní nosník je propojen s obloukem jedenácti závěsy po konstantní vzdálenosti 10,4 m. Závěsy jsou tvořeny trubkami 273x20 mm vyplněnými křemičitým pískem. K trámu i oblouku jsou připojeny styčnickovými plechy. [18], [19], [20]

Ortotropní mostovka vytváří žlab pro kolejové lože. Plech mostovky je vyspádován do úžlabí pod každou kolejí, kde se nachází odvodnění. Příčníky obráceného "T" průřezu spojují mostovkový plech o tloušťce 16 mm s hlavními nosníky po vzdálenostech 2,6 m. Podélné ploché výztuhy jsou vedeny po 420 mm. [18], [19], [20]

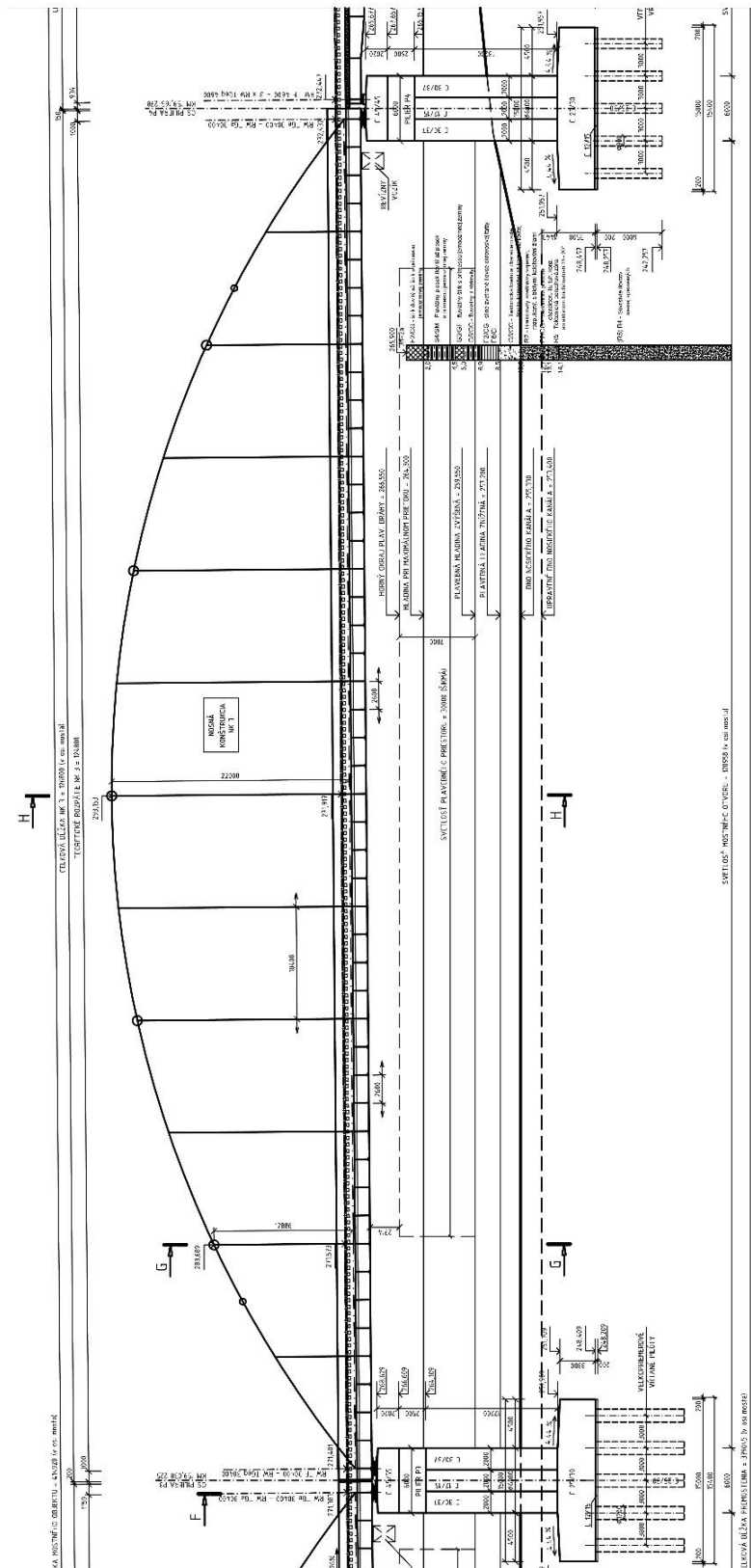
Hlavní nosníky jsou uloženy běžným způsobem na čtyřech hrncových ložiskách – pevném, příčně posuvném, podélně posuvném a všesměrně posuvném. Pevné ložisko je umístěno pod levým trámem a směrem k Púchovu. [18], [19], [20]

Na pravém trámu ve směru staničení se nachází protihluková stěna a na levém je osazeno zábradlí. Zespodu konstrukce vedou čtyři profily zajišťující dráhu reviznímu vozíku. [18], [19], [20]

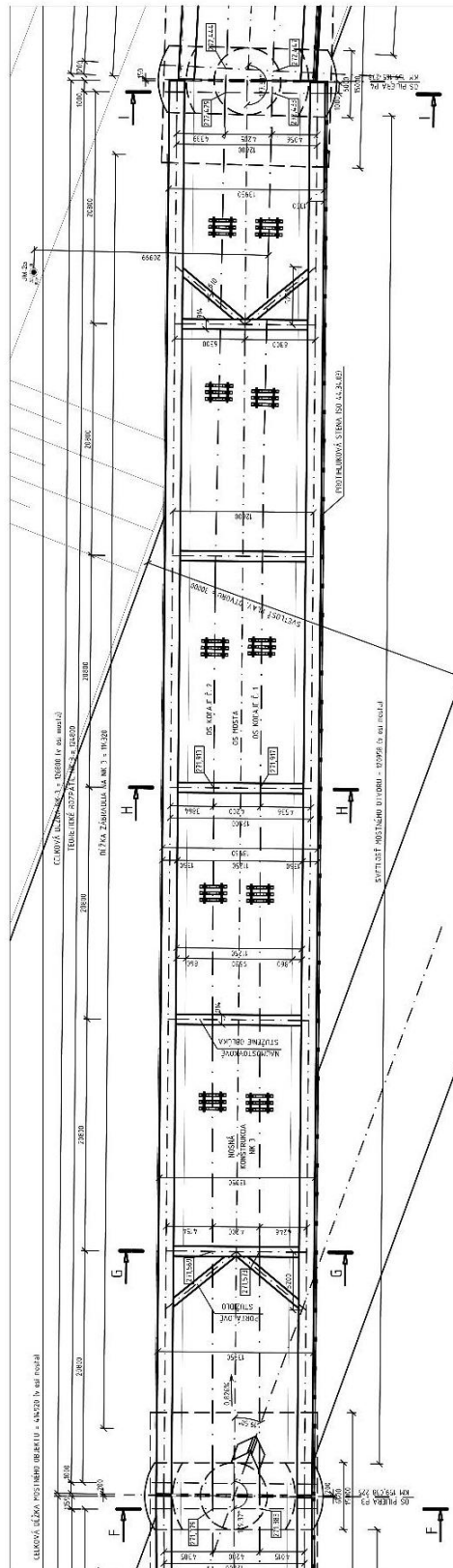
Pro výrobu nosné konstrukce mostu byla použita ocel S355. [18], [19], [20]



Obr. 21: Příčný řez NK 3 uprostřed rozpětí [19]



Obr. 22: Podélný řez NK 3 [19]



Obr. 23: Půdorys NK 3 [19]



## **4.2. Detaily**

### **4.2.1. Připojení závěsů**

Táhla jsou připojena k trámu i oblouku styčnickovými plechy tloušťky 30 mm, které jsou přivařeny „K“ swarem k pásnicím komorových průřezů. Právě u tohoto svaru se podle Expertního posouzení [1] předpokládá největší namáhání přípoje. Kromě tahové síly závěsů je detail namáhán i ohybovými momenty. U svaru tak vznikají značná napětí při průjezdech vlaků, která se v průběhu životnosti budou cyklicky opakovat. Podle normy ČSN EN 1993-1-9 [10] odpovídá tento detail na základě skutečných výšek svarů jednotlivých plechů kategoriím 56-71. U oblouku nebyly tyto výšky změřeny, proto se bezpečně uvažuje kategorie detailu 56, obdobně jako v [1].



*Obr. 24: Připojení styčnickového plechu táhla na hlavní nosník*







Kategorie detailu	Konstrukční detail		Popis	Požadavky	
80	$l < 50$ mm	všechny tloušťky $t$ (mm)		<p><u>Křížové a T spoje:</u></p> <p>1) Vady v přechodu svaru do základního materiálu u plně provařených tupých svarů a všech částečně provařených spojů.</p> <p>2) Vady v přechodu svaru do základního materiálu u okraje plechu, se špičkovým (koncentrovaným) napětím na konci svaru, způsobeným lokální deformací plechu.</p> <p>3) Vady v kořeni T spoje s částečně provařeným tupým svarem nebo koutovým svarem a vady v tupém T spoji podle obrázku 4.6 EN 1993-1-8:2005.</p>	
71	$50 < l \leq 80$				
63	$80 < l \leq 100$				
56	$100 < l \leq 120$				
56	$l > 120$				$t \leq 20$
50	$120 < l \leq 200$ $0 < l > 200$				$t > 20$ $20 < t \leq 30$
45	$200 < l \leq 300$ $l > 300$	$t > 30$ $30 < t \leq 50$	<p>– na porušení v kořeni svaru pro napětí definovaná v kapitole 5 za použití kategorie detailu 36* pro <math>\Delta\sigma_w</math>.</p> <p>– na porušení v přechodu svaru do základního materiálu pro rozkmit napětí <math>\Delta\sigma</math> v nosném plechu.</p> <p><u>Detaily 1) až 3):</u> Přesazení nosných plechů nesmí být větší než 15 % tloušťky středního plechu.</p>		
40	$l > 300$	$t > 50$			
Stejně jako pro detail 1	<p>ohebný prvek</p>				
36*					

Tab. 8: Kategorie detailů pro křížové a T spoje [10]

Přípoj závěsu k trámu (přípoj dolní) - LEVÝ TRÁM						
Závěs	tloušťka pásnice	výška svaru - závěs	výška svaru - výztuha	tloušťka celkem		kategorie detailu
	$t_p$	$t_{at}$	$t_{av}$	$t$		$\Delta\sigma_c$
č.	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]		[MPa]
1	40,0	37,0	37,0	114,0	>100	56,0
2	50,0	26,0	26,0	102,0	>100	56,0
3	50,0	18,0	18,0	86,0	>80	63,0
4	50,0	22,0	22,0	94,0	>80	63,0
5	40,0	23,0	23,0	86,0	>80	63,0
6	40,0	20,0	20,0	80,0	<80	71,0
7	40,0	21,0	21,0	82,0	>80	63,0
8	50,0	20,0	20,0	90,0	>80	63,0
9	50,0	21,0	21,0	92,0	>80	63,0
10	50,0	29,0	29,0	108,0	>100	56,0
11	40,0	26,0	26,0	92,0	>80	63,0

Tab. 9: Stanovení kategorií detailů pro levý trám [1]





Přípoj závěsu k trámu (přípoj dolní) - PRAVÝ TRÁM						
Závěs	tloušťka pásnice	výška svaru - závěs	výška svaru - výztuha	tloušťka celkem		kategorie detailu
	$t_p$	$t_{at}$	$t_{av}$	t		$\Delta\sigma$
č.	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]		[MPa]
1	40,0	28,0	28,0	96,0	>80	63,0
2	50,0	26,0	26,0	102,0	>100	56,0
3	50,0	20,0	20,0	90,0	>80	63,0
4	50,0	30,0	30,0	110,0	>100	56,0
5	40,0	25,0	25,0	90,0	>80	63,0
6	40,0	21,0	21,0	82,0	>80	63,0
7	40,0	29,0	29,0	98,0	>80	63,0
8	50,0	23,0	23,0	96,0	>80	63,0
9	50,0	22,0	22,0	94,0	>80	63,0
10	50,0	20,0	20,0	90,0	>80	63,0
11	40,0	21,0	21,0	82,0	>80	63,0

Tab. 10: Stanovení kategorií detailů pro pravý trám [1]

### 4.2.2. Konzola pro protihlukovou stěnu

Pro sloupky protihlukové stěny jsou přivařeny k horní části pravého trámu konzoly po vzdálenostech 2,6 m, jež odpovídají rozmístění příčníků. Vzhledem k tomu, že na přechodu mezi pásnicí a připojovaným vrchním plechem konzoly není provedeno žádné zaoblení, které by vytvářelo plynulý náběh změny průřezu, dochází v tomto místě ke koncentraci napětí. Horní pásnice hlavního nosníku proto odpovídá podle ČSN EN 1993-1-9 [10] kategorii detailu 40.



Obr. 28: Konzola na sloupek protihlukové stěny



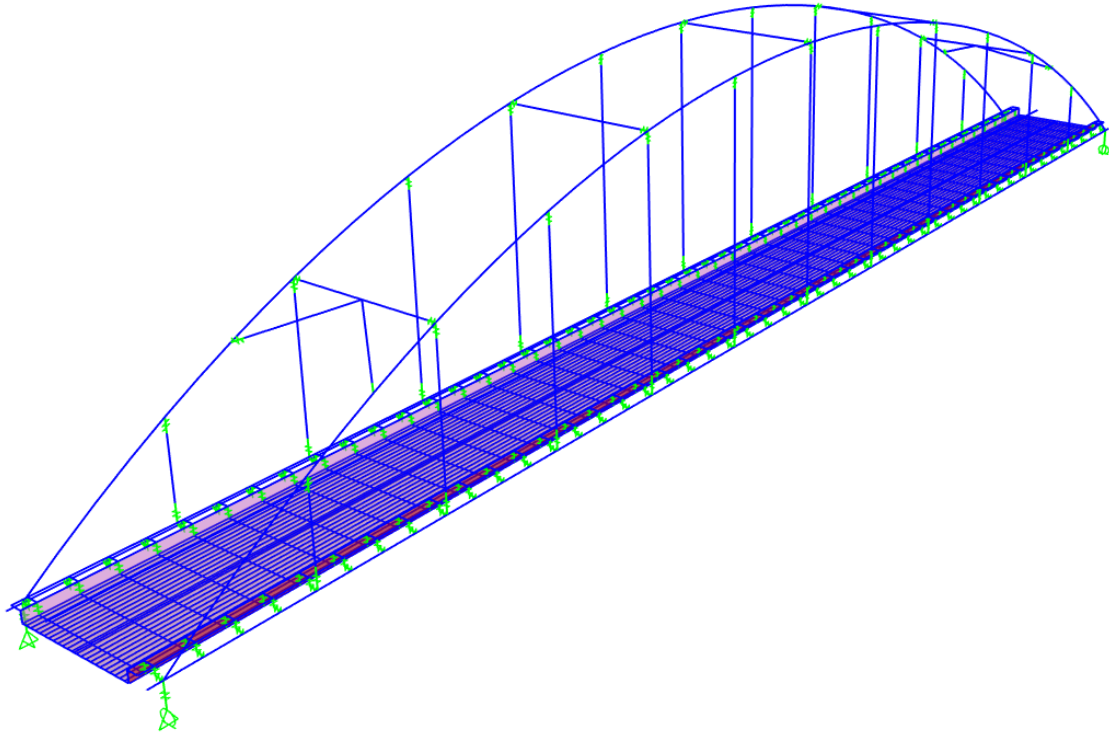
Kategorie detailu	Konstrukční detail		Popis	Požadavky
80	$L \leq 50\text{mm}$		<p><u>Podélně připojené prvky:</u></p> <p>1) Kategorie detailu se mění podle délky připojení <math>L</math>.</p> <p>2) Podélně připojené prvky k plechu nebo trubce.</p> <p>3) Podélný styčnickový plech přivařený koutovým svařem, v přechodu k plechu nebo trubce s opracováním o poloměru <math>r</math>, konec koutového svaru je zesílen (plný průvar), délka zesílení svaru <math>&gt; r</math>.</p> <p>4) Styčnickový plech, přivařený k hraně plechu nebo k pásnici nosníku.</p> <p>5) Svařeno bez zaobleného přechodu.</p>	<p>Tloušťka připojeného prvku musí být menší než jeho výška. Jestliže není, viz detaily 5 nebo 6 v tabulce 8.5.</p> <p><u>Detaily 3) a 4):</u> Hladký přechod o poloměru <math>r</math> vytvořený před svařením strojním opracováním nebo řezáním kyslíkem původního styčnickového plechu, potom se svarová plocha obrousí rovnoběžně se směrem šipky, tak aby úpatí příčného svaru bylo plně odstraněno.</p>
71	$50 < L \leq 80\text{mm}$			
63	$80 < L \leq 100\text{mm}$			
56	$L > 100\text{mm}$			
71	$L > 100\text{mm}$ $\alpha < 45^\circ$			
80	$r > 150\text{mm}$			
90	$\frac{r}{\ell} \geq \frac{1}{3}$ nebo $r > 150\text{mm}$			
71	$\frac{1}{6} \leq \frac{r}{\ell} \leq \frac{1}{3}$			
50	$\frac{r}{\ell} < \frac{1}{6}$			
40				

Tab. 11: Kategorie detailů pro podélně připojené prvky [10]



## 5. MODEL CSI BRIDGE

V programu CSI Bridge bylo navázáno na model od Ing. Martina Macha, který jej vytvořil pro Expertní statické a dynamické posouzení [1], [2].



Obr. 29: Model mostu v CSI Bridge

Hlavní nosníky, oblouky, závěsy, styčnickové plechy u připojení závěsů, příčníky a podélné výztuhy byly modelovány prutově. Mostovkový plech byl vytvořen ze skořepinových prvků odpovídající tloušťky.

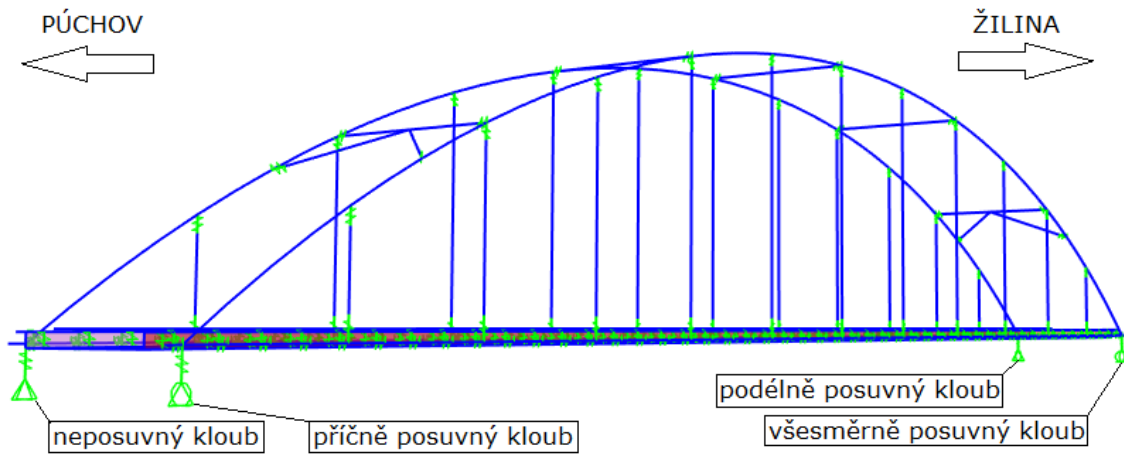
Směrově byly koleje uvažovány jako přímé a výškové řešení mostu bylo zjednodušeno na nulový podélný a příčný sklon.

Příčníky byly modelovány s konstantní výškou 1305 mm pod kolejovým ložem a 2112 mm u hlavních nosníků. Pro urychlení výpočtu byla v modelu ponechána jen každá třetí podélná výztuha se zvětšenou průřezovou plochou.

Útlum konstrukce byl stanoven s přihlédnutím k rozdílným vlastnostem jednotlivých prvků.

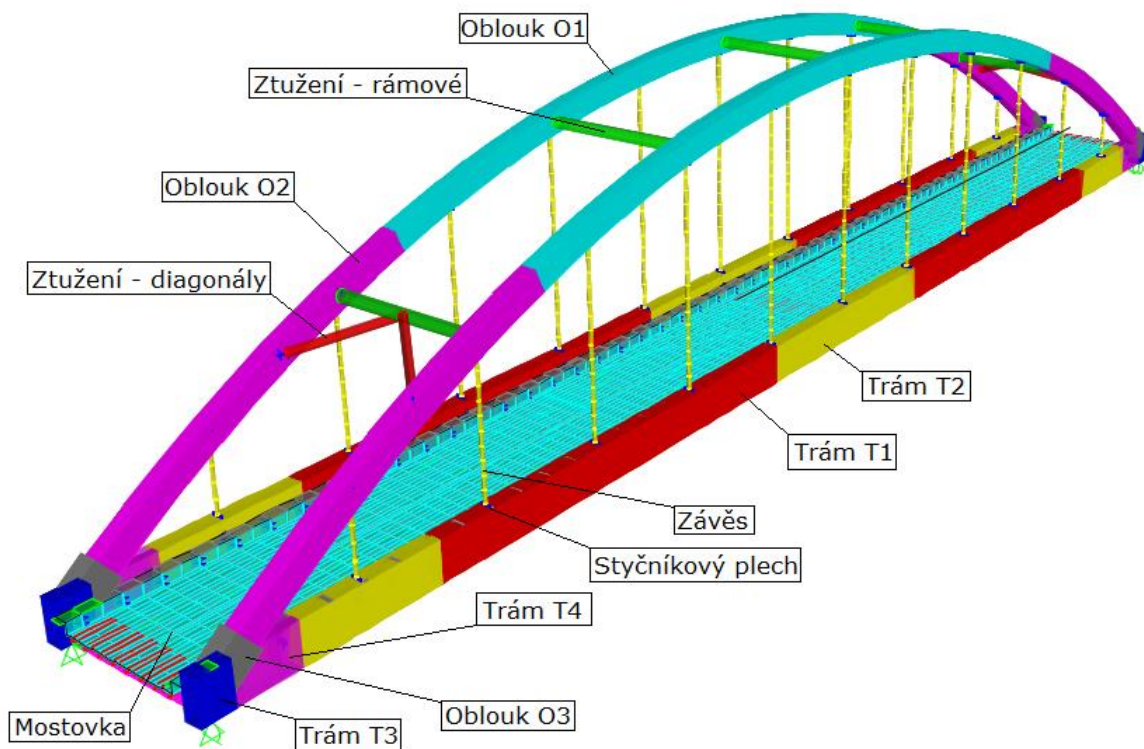
- mostovka a trám  $\zeta = 0,0064$
- oblouk a ztužení  $\zeta = 0,0032$
- závěsy  $\zeta = 0,0040$

Úpravy poskytnutého modelu spočívaly ve zpřesnění rozmístění průřezů trámů včetně zavedení průřezu T4. Dále byl upraven průřez příčníku na nesymetrické „I“ v místě připojení na trám (původně obrácený „T“ průřez a skořepina). Na závěr pak bylo definováno nové zatížení podle programů zkoušek [21],[22].



Obr. 30: Uložení mostu

## 5.1. Průřezy



Obr. 31: Model s vykreslenými průřezy

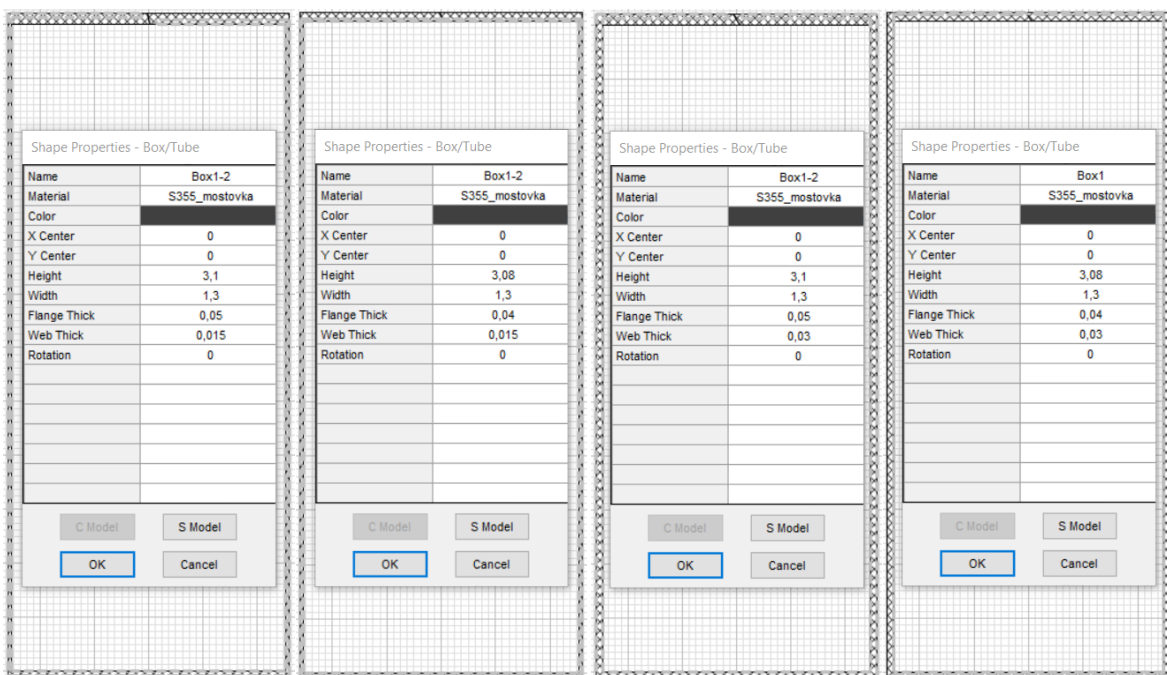




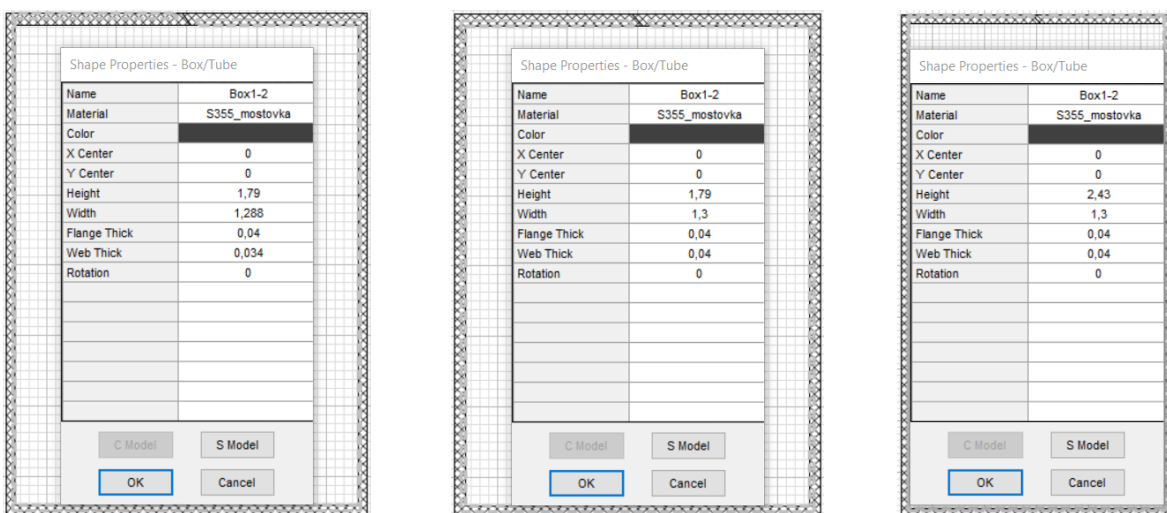
### Trámy a oblouky

Přímé nosníky byly rozděleny celkem do čtyř oblastí s různými průřezy. Hlavním průřezem je trám T1 s tloušťkou pásnic 50 mm. Ve středu rozpětí a v blízkosti uložení je vystřídán průřezem T2 s tloušťkou pásnice 40 mm. Přimo nad ložisky jsou kromě pásnic zesíleny i stěny průřezu T3 z 15 mm na 30 mm. Přejechod průřezů T2 a T3 je pozvolný, proto je mezi změnou tloušťky pásnic a stěn rozestup řešen průřezem T4.

U oblouků se je také proměnná tloušťka pásnic, 40 mm průřezu O2 je sníženo ve středu oblouku na 34 mm u průřezu O1. Náběh na krajích oblouku je řešen zvýšeným průřezem O3.



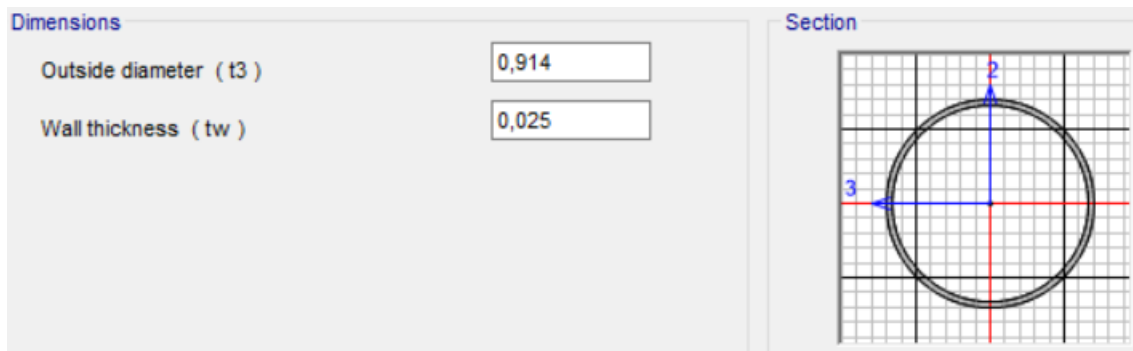
Obr. 32: Průřezy trámů (zleva) T1, T2, T3, T4



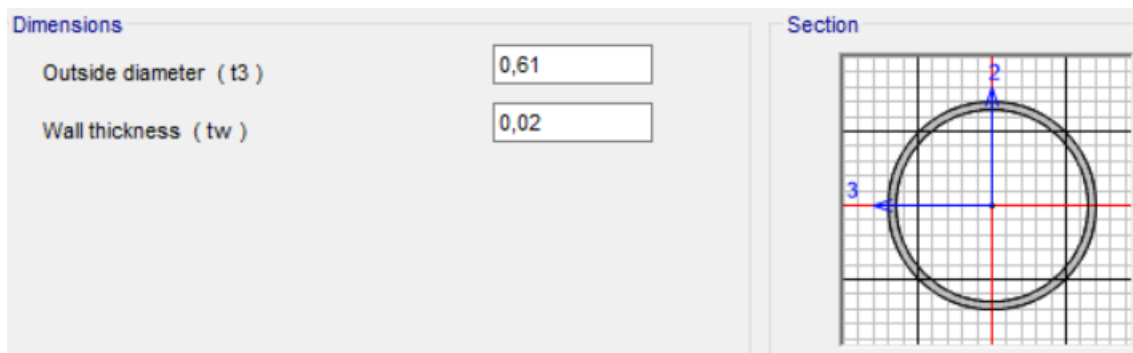
Obr. 33: Průřezy oblouků (zleva) O1, O2, O3



## Ztužení



Obr. 34: Průřez rámového ztužení oblouku

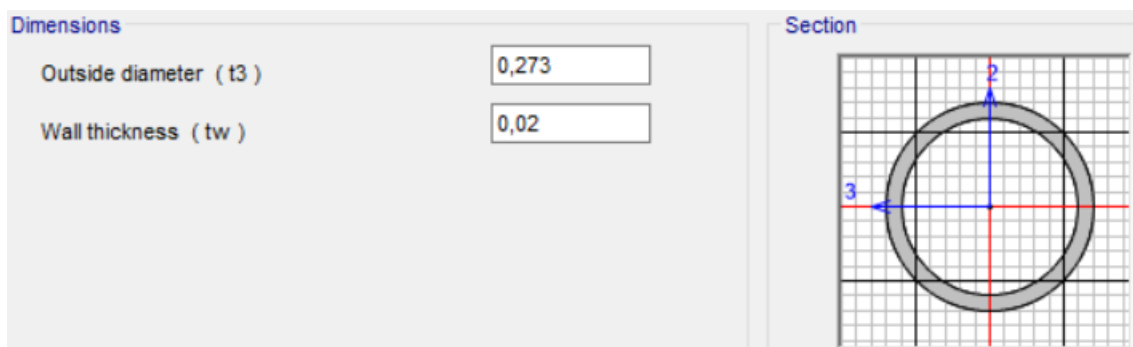


Obr. 35: Průřez diagonál

## Závěsy

Na okraje závěsů navazují pruty představující styčnickové plechy, které jsou tuhými vazbami vedeny do těžišť hlavních nosníků.

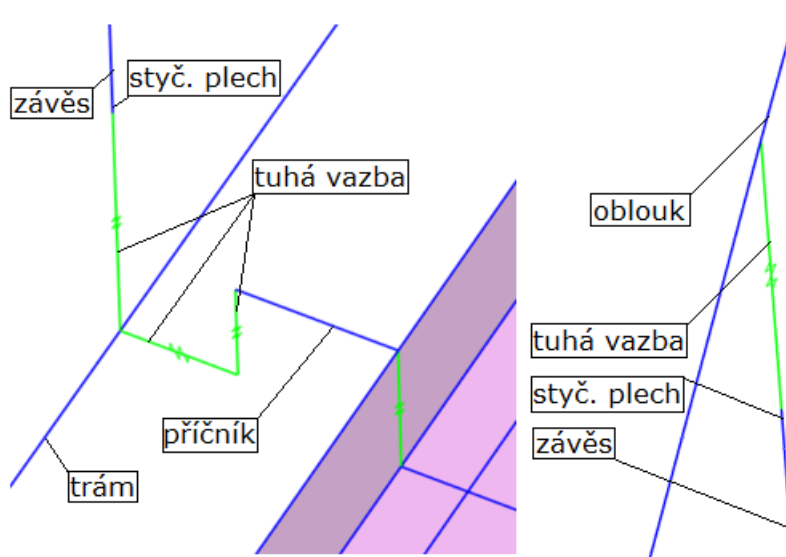
Písek tvořící výplň závěsů není součástí definovaného průřezu. Byl přidán na základě své hmoty do stálého zatížení a byl stanoven jeho příspěvek do útlumu závěsů.



Obr. 36: Průřez závěsů



Obr. 37: Průřez styčnickového plechu u závěsů



Obr. 38: Detail připojení závěsu na trám (vlevo) a na oblouk (vpravo)

### Mostovka

Plech mostovky byl vytvořen skořepinovými prvky o tloušťce 16 mm. Na rozdíl od původního modelu byla ponechána jen část žlabu tvořící písmeno „U“. Část plechu u trámů byla nahrazena průřezem příčníků tvaru nesymetrického „I“ s délkou pásnice odpovídající jejich vzdálenosti. Tato úprava byla provedena za účelem zjištění vnitřních sil na tomto náhradním průřezu, který je připojen k trámu. Tyto síly budou použity jako statické okrajové podmínky při řešení detailů v programu Abaqus. Pod kolejovým ložem zůstal příčníkům průřez obráceného „T“. Příčníky i podélné výtzuhy nejsou vedeny v těžiškové ose, ale ve střednicové rovině plechu mostovky s příslušnými excentricitami.

Množství podélných výtzuh bylo z důvodu délky výpočetního času redukováno na každou třetí. Průřez těchto náhradních výtzuh byl upraven tak, aby jejich celková plocha v řezu zůstala stejná jako ve skutečnosti.

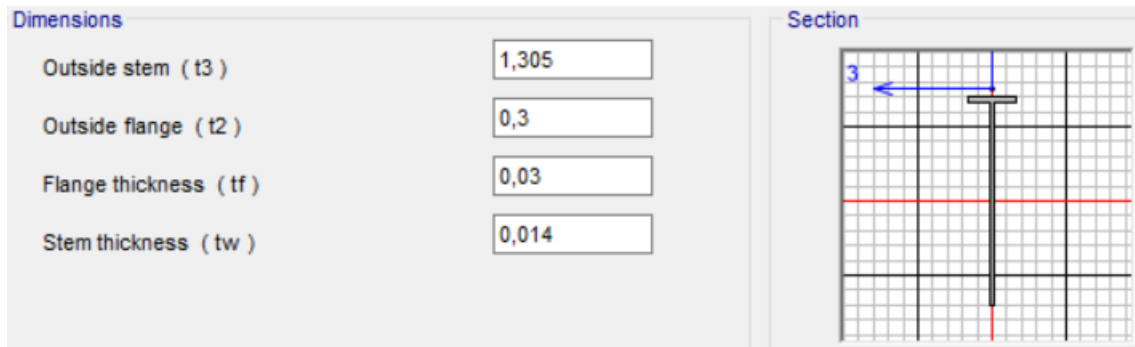


# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

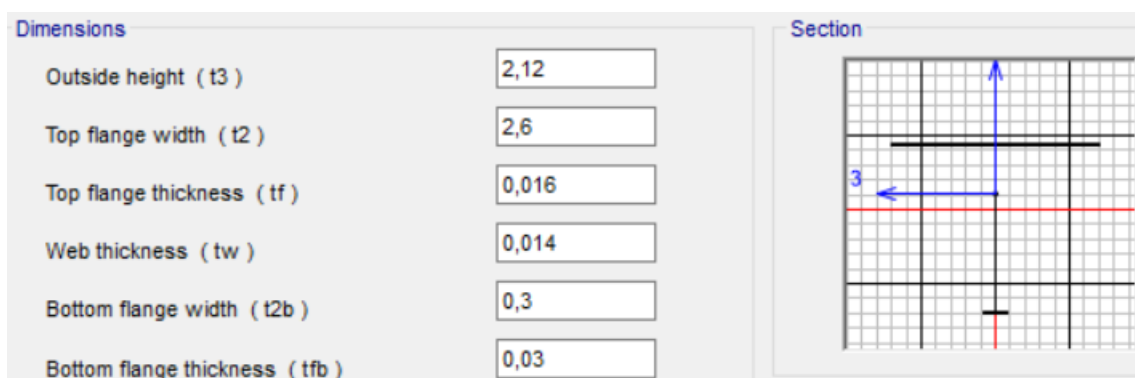
## Únavová životnost železničního mostu v Púchově



Obr. 39: Průřez příčnicku pod kolejovým ložem

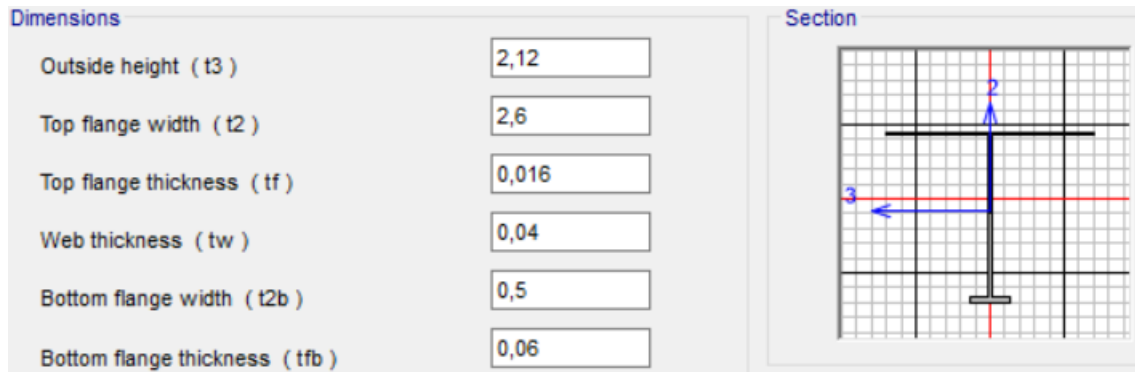


Obr. 40: Průřez krajního příčnicku pod kolejovým ložem

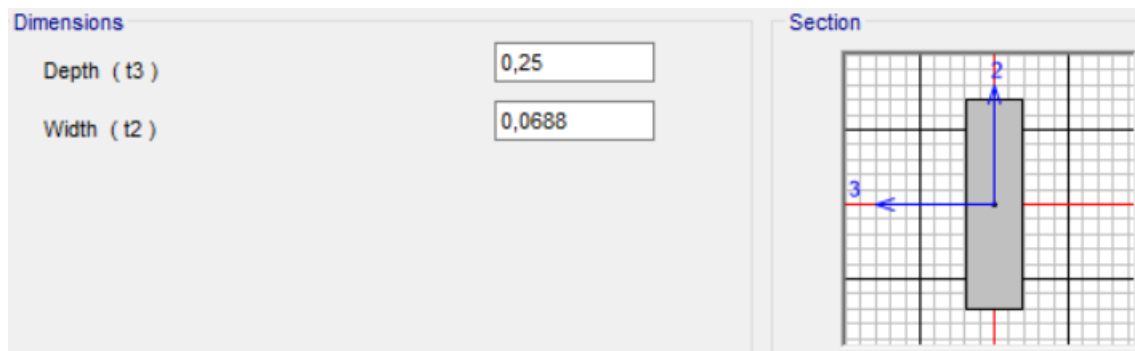


Obr. 41: Průřez příčnicku u trámu





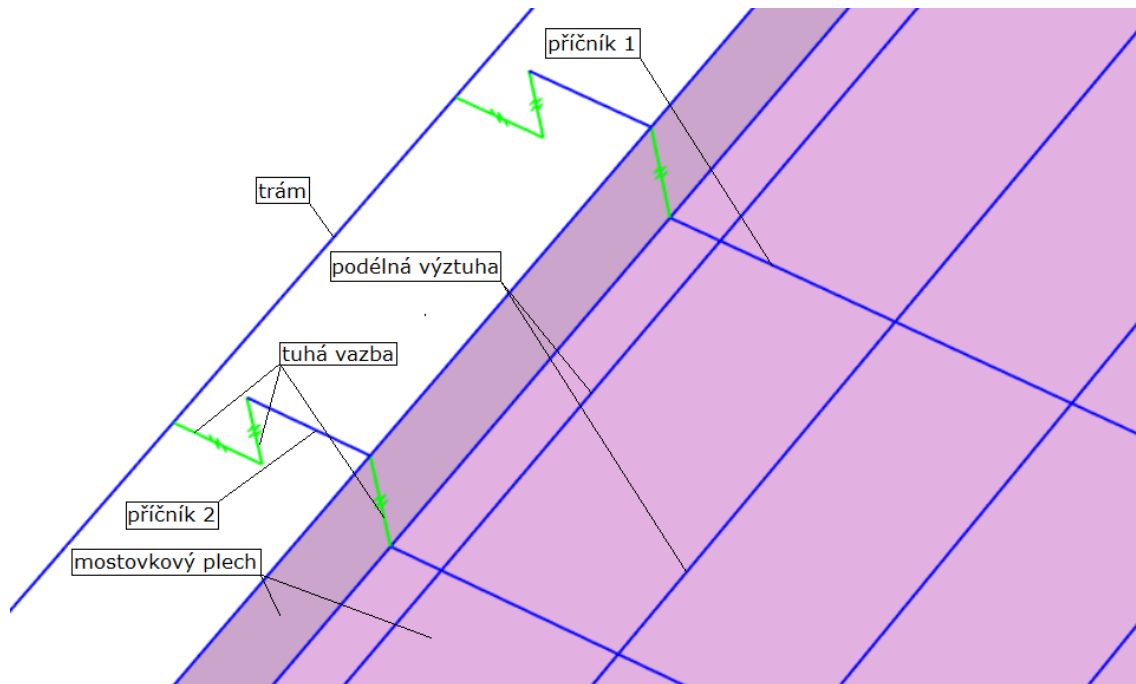
Obr. 42: Průřez krajního příčnicku u trámu



Obr. 43: Průřez podélné výztuhy



Obr. 44: Průřez krajní podélné výztuhy



Obr. 45: Detail mostovky s připojením na trám

## 5.2. Zatížení

### 5.2.1. Stálé

Stálé zatížení zahrnuje vlastní tíhu a ostatní stálé zatížení. Je klíčové pro stanovení počáteční tuhosti konstrukce před aplikací zatížení proměnného. Hodnoty byly převzaty z Expertního posouzení [1] a [2].

#### Vlastní tíha

Vlastní tíha prvků byla spočtena programem na základě objemové hmotnosti materiálu a průřezové plochy prvků. Objemová hmotnost oceli je  $7850 \text{ kg/m}^3$ . Tato hodnota byla uměle zvětšena pro zahrnutí výztuh, styčnickových plechů a svarů. Materiál plechu mostovky, podélných výztuh, příčníků a závěsů byl násoben součinitelem 1,05. Pro trámy, oblouky a ztužení oblouků byla použita konstanta 1,15.

#### Ostatní stálé

Kromě přiřazení tíhy prutům a deskám vytvořeným v modelu formou objemové hmotnosti materiálů je nutno uvažovat navíc zatížení od železničního svršku, vybavení mostu, případně dalších hmotných prvků nacházejících se trvale na mostě. Níže jsou uvedeny charakteristické hodnoty zatížení<sup>3</sup>, jež je zároveň zadáno patřičným prutům jako hmota pro dynamický výpočet.

<sup>3</sup> podrobněji v Expertním posouzení statického a dynamického chování [1], [2]



Štěrkové lože	15,1 kN/m <sup>2</sup>
Kolejový svršek (pro 1 kolej)	6,0 kN/m
Izolace	0,44 kN/m <sup>2</sup>
Zábradlí (levý trám)	0,5 kN/m
Protihluková stěna (pravý trám)	1,0 kN/m
Revizní vozík a dráha (oba trámy)	1,5 kN/m
Výplň závěsů	0,68 kN/m

### 5.2.2. Proměnné

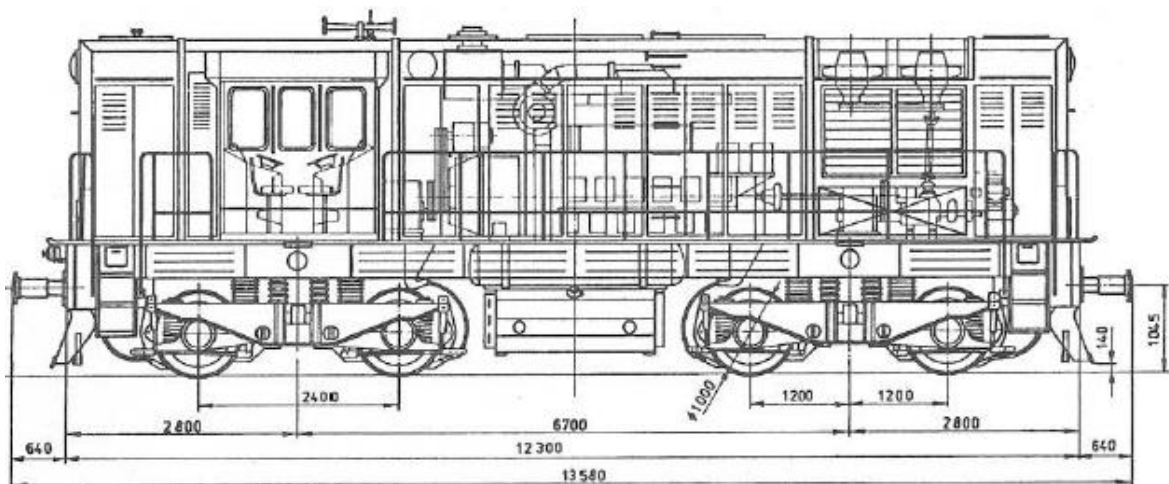
Proměnné zatížení bylo definováno v souladu se zatěžovacími zkouškami mostu. Byla naplánována zatěžovací zkouška statická a dynamická.

Výpočty proměnného zatížení byly provedeny lineárně a navazují na tuhost konstrukce od působení zatížení stálého. Níže uvedené výsledky pro proměnné zatěžovací stavy nezahrnují síly a deformace od výchozího stálého zatížení.

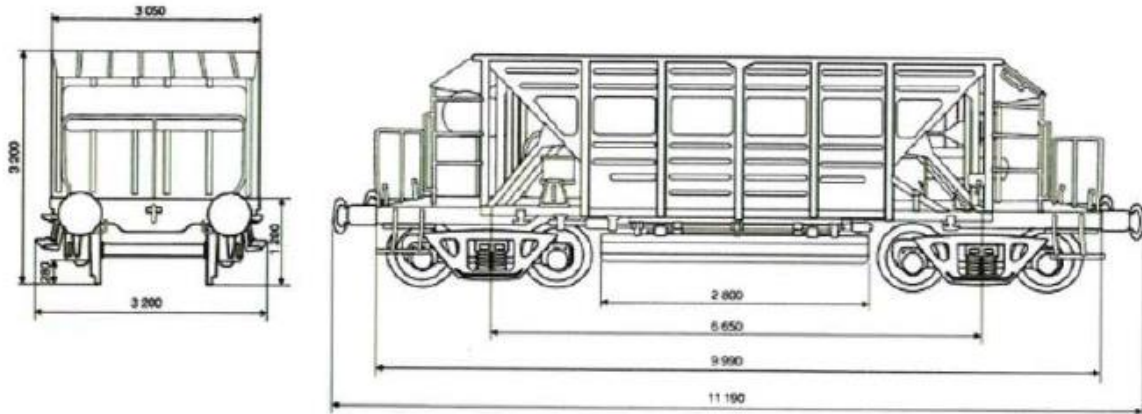
### Statická zatěžovací zkouška

Pro statickou zatěžovací zkoušku byla zvolena soustava lokomotivy 742 a pěti vozů Faccp typu 9-429.0 (Chopper). Tato sestava byla umístěna na obě koleje do stejného místa v podélném směru. Na konstrukci zkoumanou v této práci bylo zatížení situováno do dvou poloh, a to pro dosažení maximálního průhybu ve čtvrtině rozpětí (ZS1) a v polovině rozpětí mostu (ZS2).

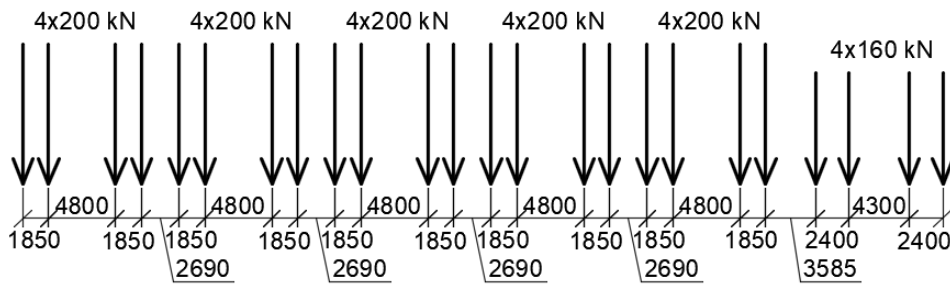
Tíha jedné lokomotivy 742 je 64 t, jež se rozkládá do čtyř náprav po 16 t. Pro jeden vůz Faccp je uvažována celková hmotnost 80 t, tj. 20 t na nápravu.



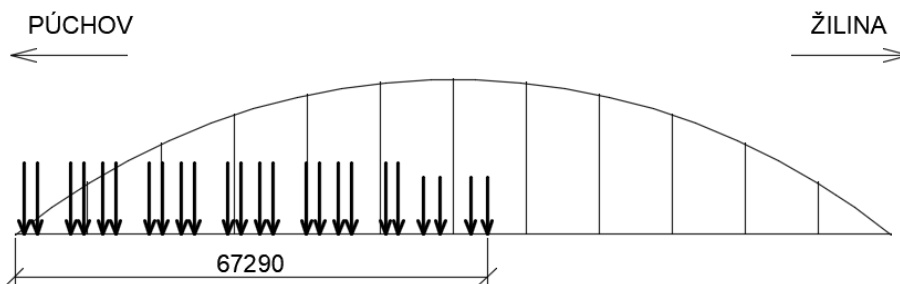
Obr. 46: Lokomotiva 742 [21]



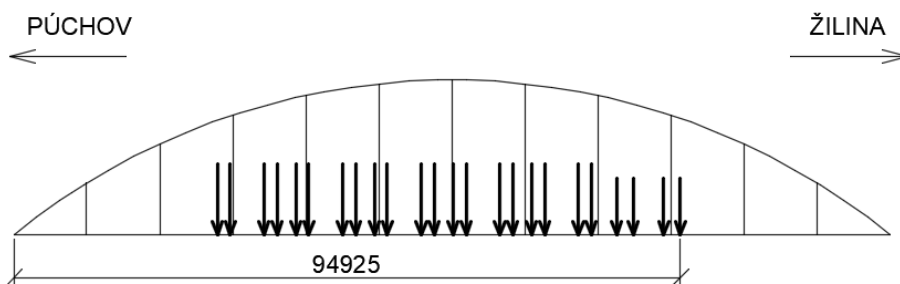
Obr. 47: Vůz Faccp [21]



Obr. 48: Zatížení pro SZZ na jedné koleji (na druhé totožné)



Obr. 49: Umístění zatížení pro ZS1 – SZZ – max. průhyb ve čtvrtině rozpětí



Obr. 50: Umístění zatížení pro ZS2 – SZZ – max. průhyb v polovině rozpětí

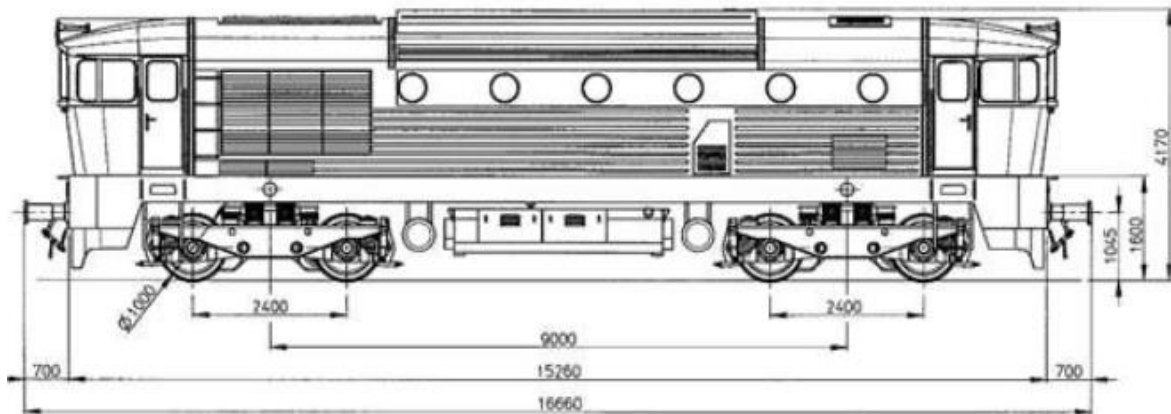


### Dynamická zatěžovací zkouška

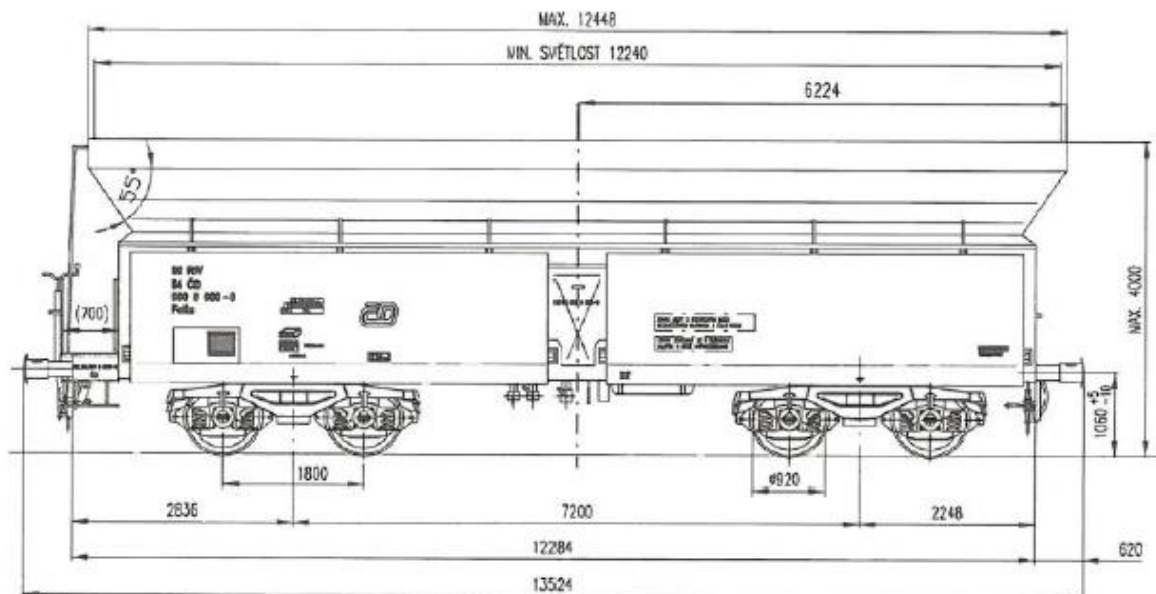
Zkušební zatížení vybrané pro zjištění dynamických účinků na konstrukci bylo tvořeno ze dvou lokomotiv 756 a vozu Falls umístěného mezi nimi. Tato sestava pojíždí pouze po levé koleji různými rychlostmi.

Jedna lokomotiva 756 je modelována 18t zatížením na nápravu, dohromady tedy 72 t. Celková hmotnost vozu Falls má být 80 t, což odpovídá 20 t na nápravu.

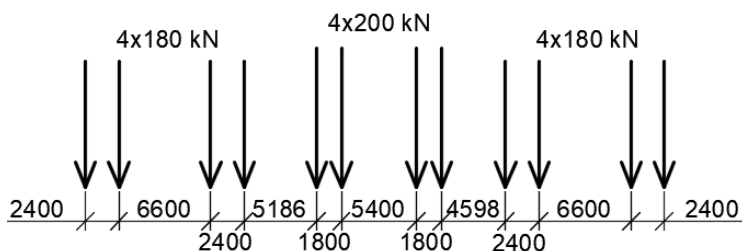
Pro dynamický výpočet byla v programu zvolena časově závislá analýza řešená přímou integrací. Krok integrace byl stanoven na 0,025 s shodně s krokem pohyblivého zatížení.



Obr. 51: Lokomotiva 756 [22]



Obr. 52: Vůz Falls, ČD Cargo [22]



Obr. 53: Zatížení pro DZZ

### Zatěžovací stavy proměnného zatížení

- ZS1 – SZZ – max. průhyb v L/4
- ZS2 – SZZ – max. průhyb v L/2
- ZS3 – DZZ – 5 km/h
- ZS4 – DZZ – 10 km/h
- ZS5 – DZZ – 15 km/h
- ZS6 – DZZ – 20 km/h
- ZS7 – DZZ – 30 km/h
- ZS8 – DZZ – 40 km/h
- ZS9 – DZZ – 50 km/h
- ZS10 – DZZ – 60 km/h
- ZS11 – DZZ – 70 km/h
- ZS12 – DZZ – 80 km/h
- ZS13 – DZZ – 90 km/h
- ZS14 – DZZ – 100 km/h

## 5.3. Výsledky

### 5.3.1. Vlastní frekvence a tvary

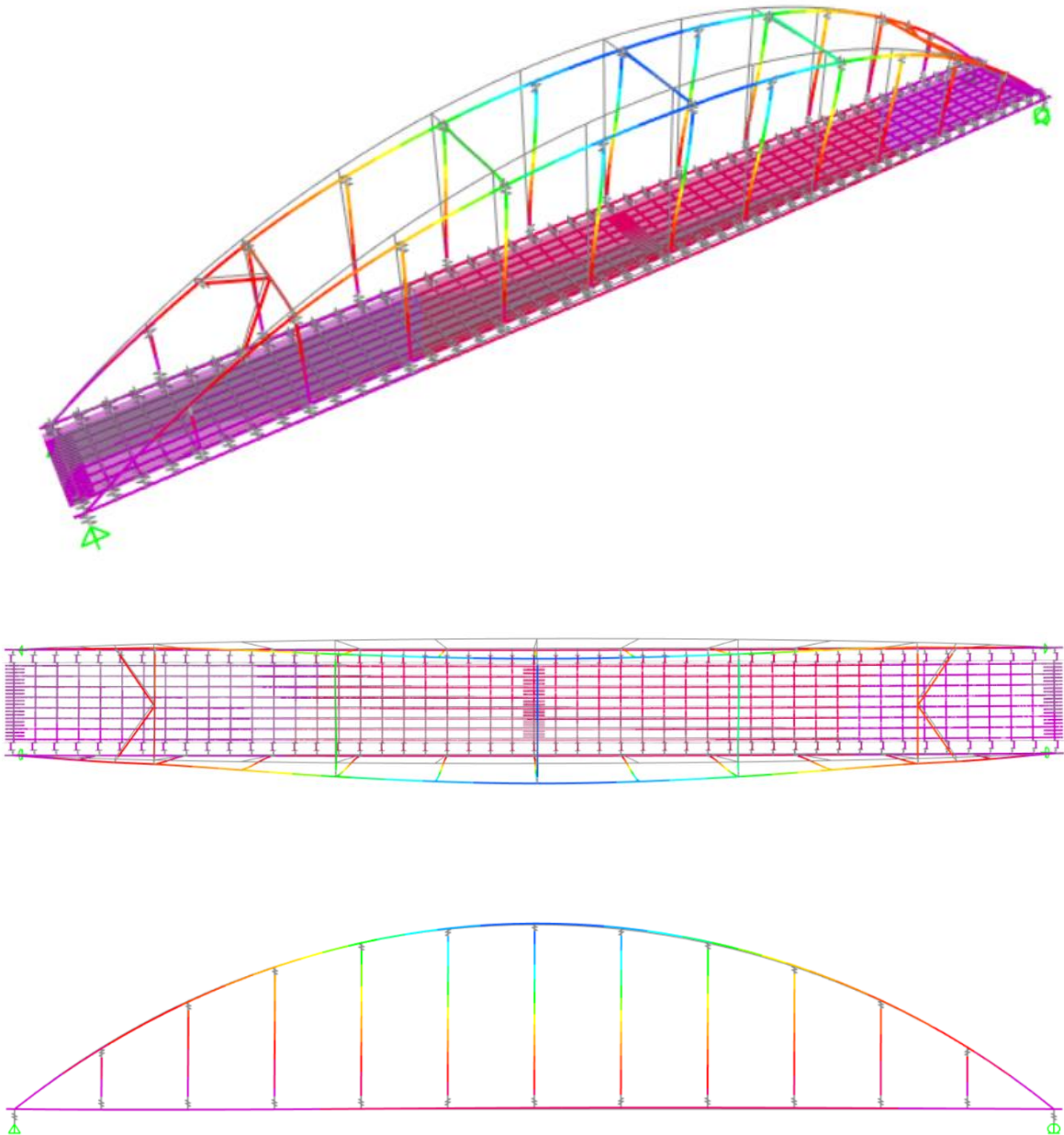
pořadí	vlastní frekvence [ $s^{-1}$ ]	vlastní perioda [s]
1	0,98439	1,01586
2	0,98484	1,01540
3	1,59836	0,62564
4	1,67980	0,59531
5	2,01617	0,49599

Tab. 12: Nejmenší vlastní frekvence a největší vlastní periody konstrukce



1. Vlastní frekvence a vlastní tvar

$$f = 0,98439 \text{ s}^{-1}$$



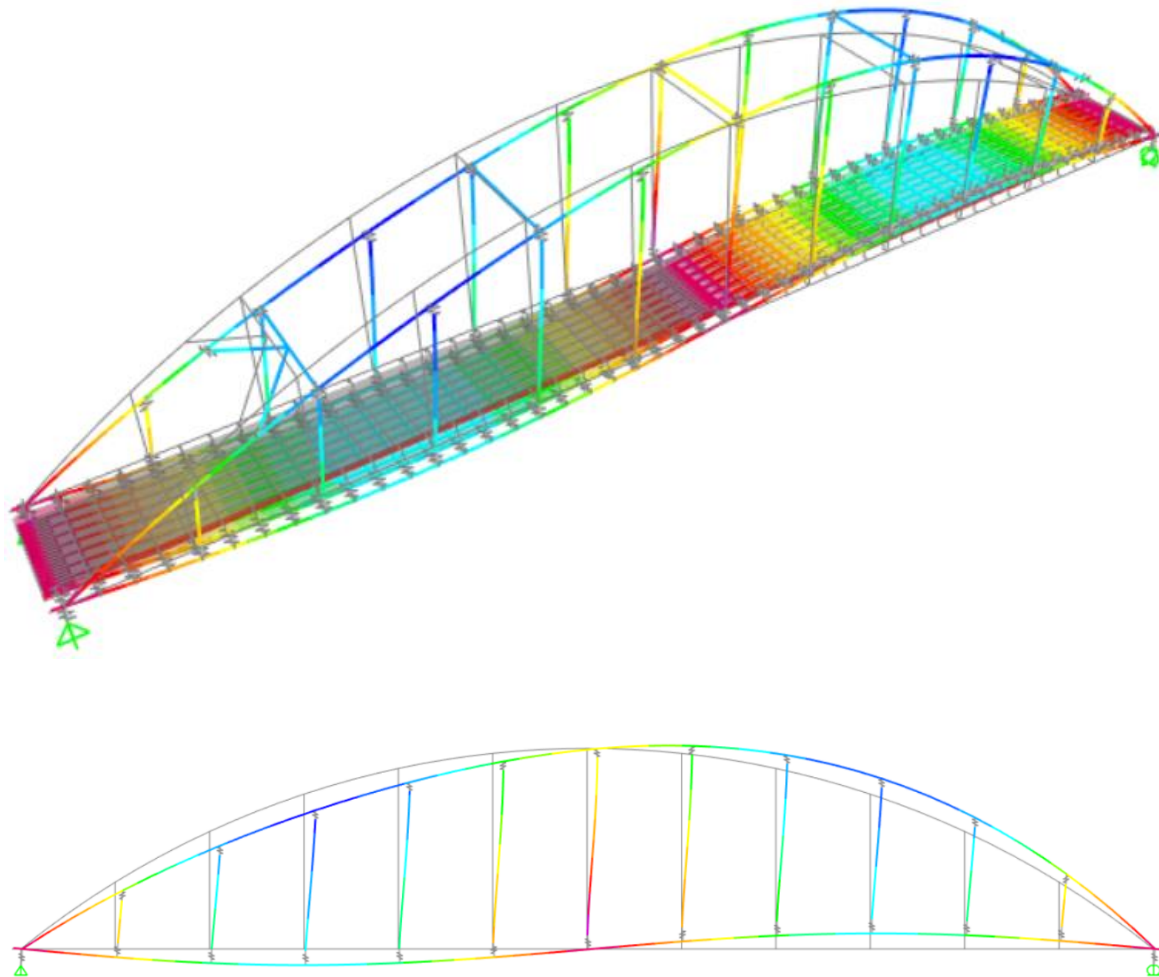
Obr. 54: 1. vlastní tvar





**2. Vlastní frekvence a vlastní tvar**

$f = 0,98484 \text{ s}^{-1}$



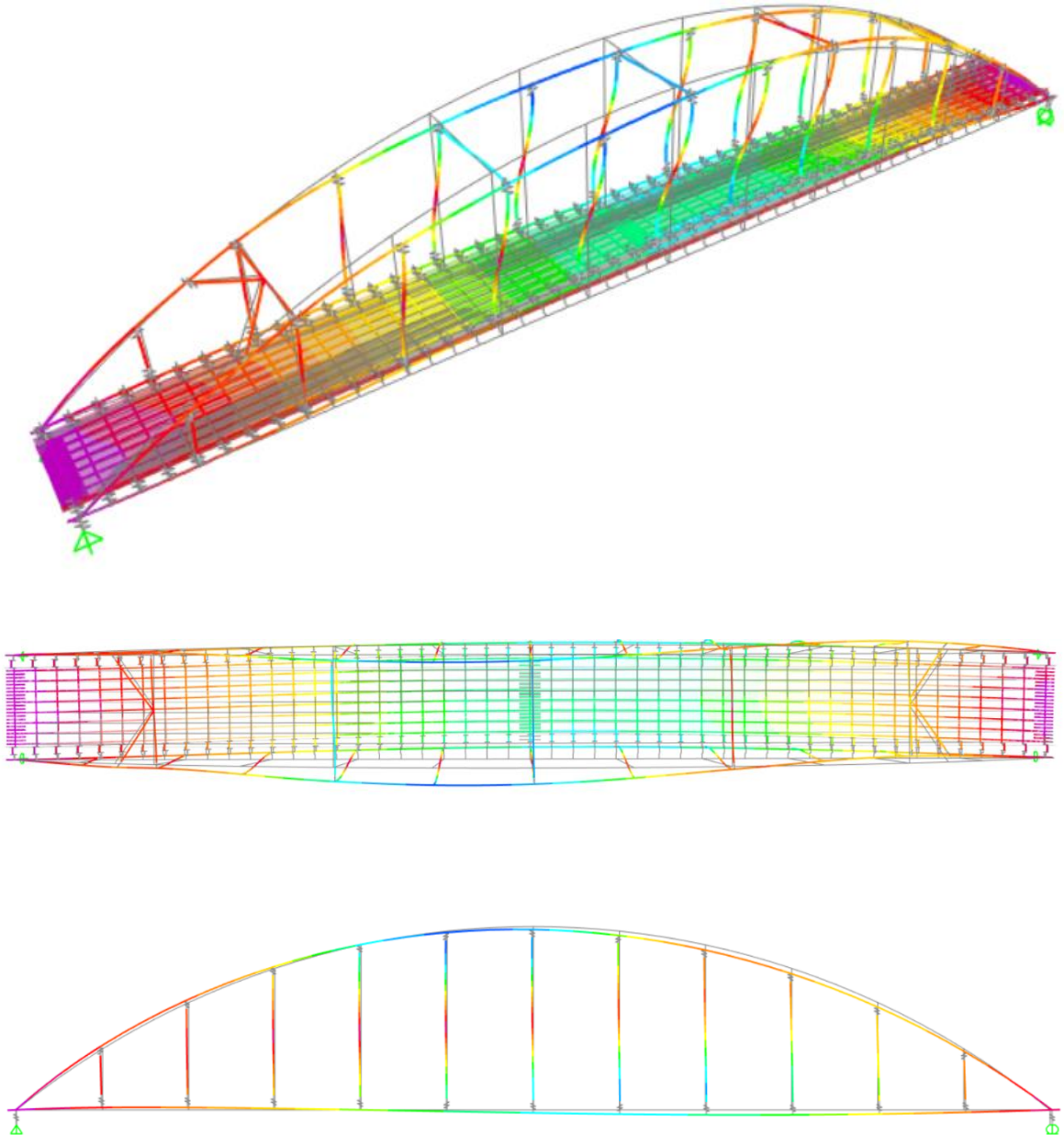
*Obr. 55: 2. vlastní tvar*





### 3. Vlastní frekvence a vlastní tvar

$$f = 1,59836 \text{ s}^{-1}$$

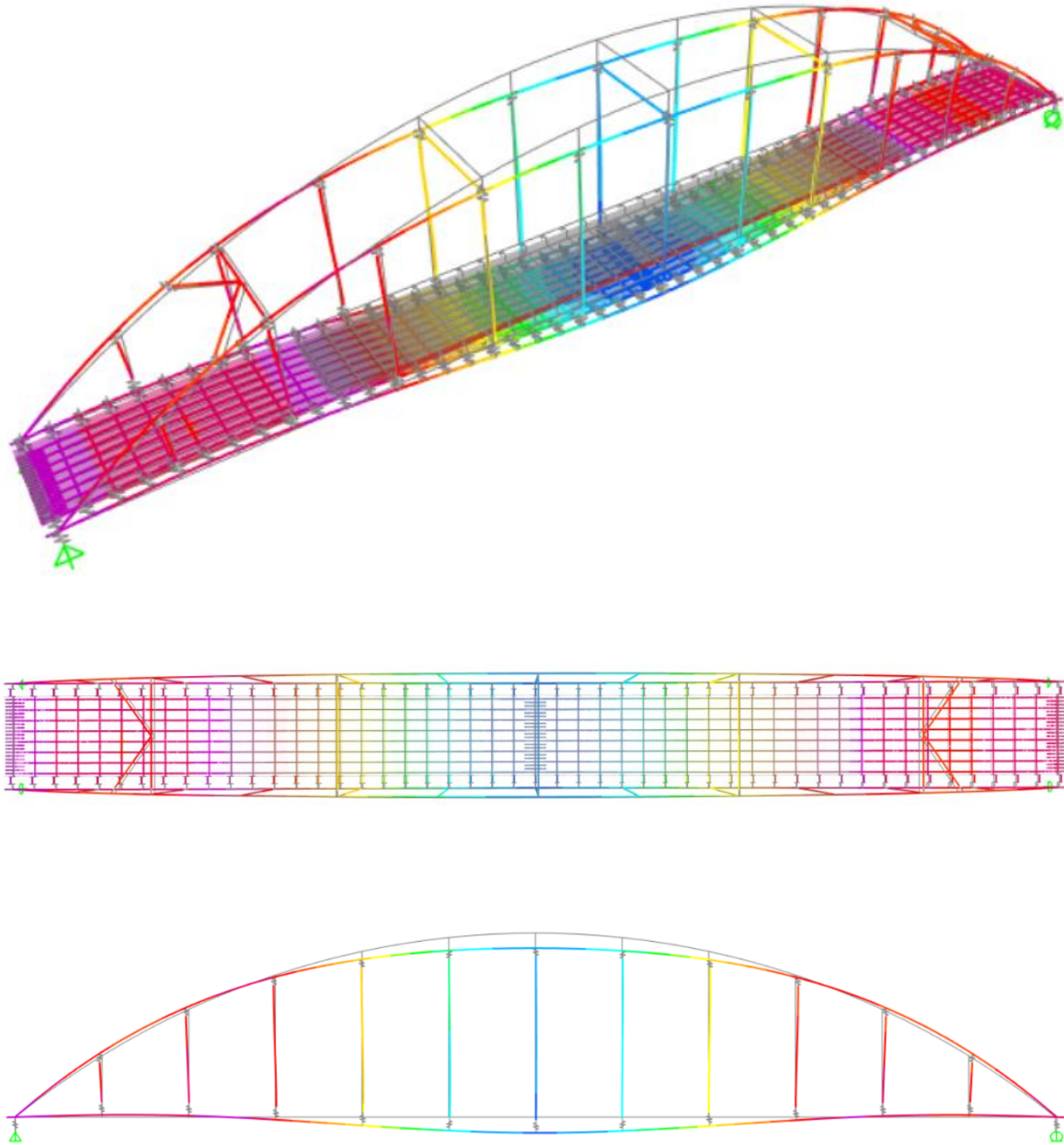


Obr. 56: 3. vlastní tvar



#### 4. Vlastní frekvence a vlastní tvar

$$f = 1,67980 \text{ s}^{-1}$$

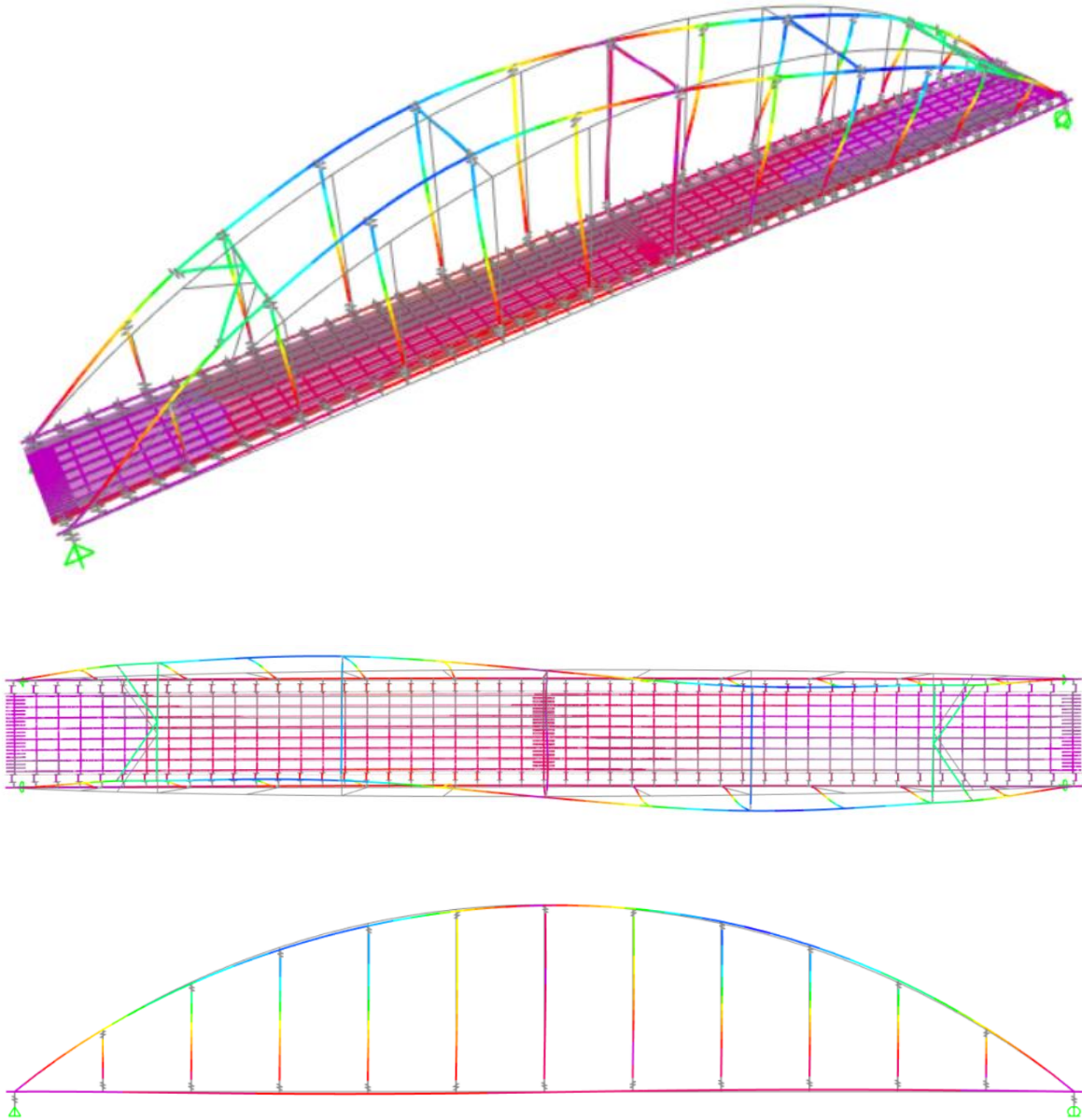


Obr. 57: 4. vlastní tvar



5. Vlastní frekvence a vlastní tvar

$$f = 2,01617 \text{ s}^{-1}$$



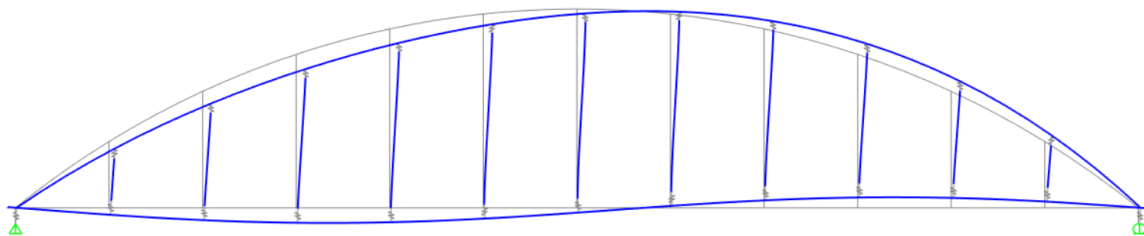
Obr. 58: 5. vlastní tvar



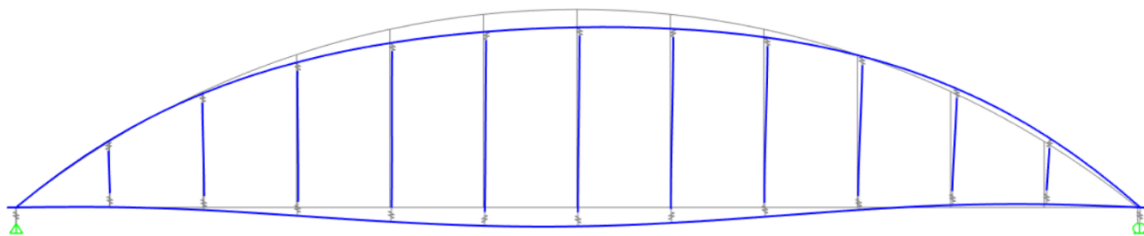
### 5.3.2. Průhyby trámů

Zatěžovací stav	průhyb v L/4 [mm]		průhyb v L/2 [mm]		průhyb v 3/4 L [mm]	
	levý	pravý	levý	pravý	levý	pravý
ZS1	83,1	83,1	26,5	26,5	-57,0	-57,0
ZS2	23,2	23,2	52,7	52,7	6,9	6,9
ZS3	30,6	23,7	21,4	12,6	31,4	22,7
ZS4	30,8	23,9	21,5	12,6	31,5	22,8
ZS5	30,7	23,8	21,6	12,7	31,6	22,8
ZS6	30,6	23,7	21,5	12,6	31,5	22,8
ZS7	30,9	24,2	21,5	12,6	31,9	23,2
ZS8	30,9	24,0	21,5	12,6	31,8	23,0
ZS9	31,6	24,6	21,7	12,7	32,3	23,5
ZS10	30,9	24,1	21,6	12,7	31,9	23,0
ZS11	31,7	24,9	21,6	12,7	31,5	22,8
ZS12	31,2	24,1	21,7	12,9	32,5	23,8
ZS13	31,4	24,4	21,6	12,8	32,2	23,5
ZS14	32,2	25,3	21,7	12,9	32,2	23,4

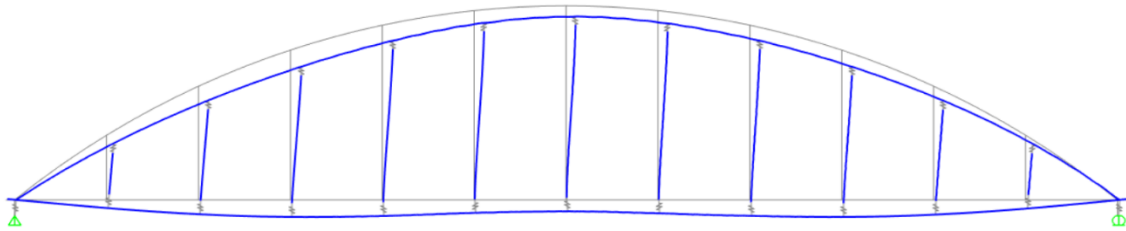
Tab. 13: Maximální svislé deformace na trámech



Obr. 59: Deformace konstrukce v ZS1



Obr. 60: Deformace konstrukce v ZS2



Obr. 61: Obálka maximálních deformací od ZS14

### 5.3.3. Vnitřní síly

Pro další analýzu byly zpracovávány jen vnitřní síly od proměnných zatížení dopravou (ZS1-ZS14), které odpovídají změně napjatosti během statické a dynamické zatěžovací zkoušky.

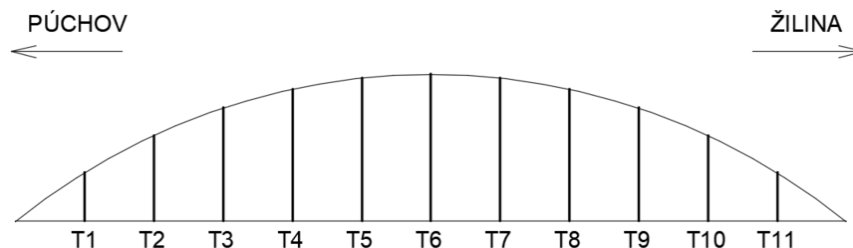
V následující části diplomové práce je podrobně řešena napjatost v okolí připojení styčnickových plechů a konzol na trám. Připojení styčnickového plechu na oblouk měl na základě Expertního statického a dynamického posouzení [1] nižší rozkmity a příznivější únavovou životnost, proto zde není více rozpracován.

Pro další výpočty byl zvolen program Abaqus, kde namísto celé konstrukce byla modelována jen její část přiléhající zkoumaným místům. Jedná se o část trámu délky 1 m na obě strany od osy závěsu, trubku táhla také délky 1 m a 200mm část připojeného příčnicku, případně konzolu pro protihlukovou stěnu (podrobněji viz kapitola 6 a Příloha A).

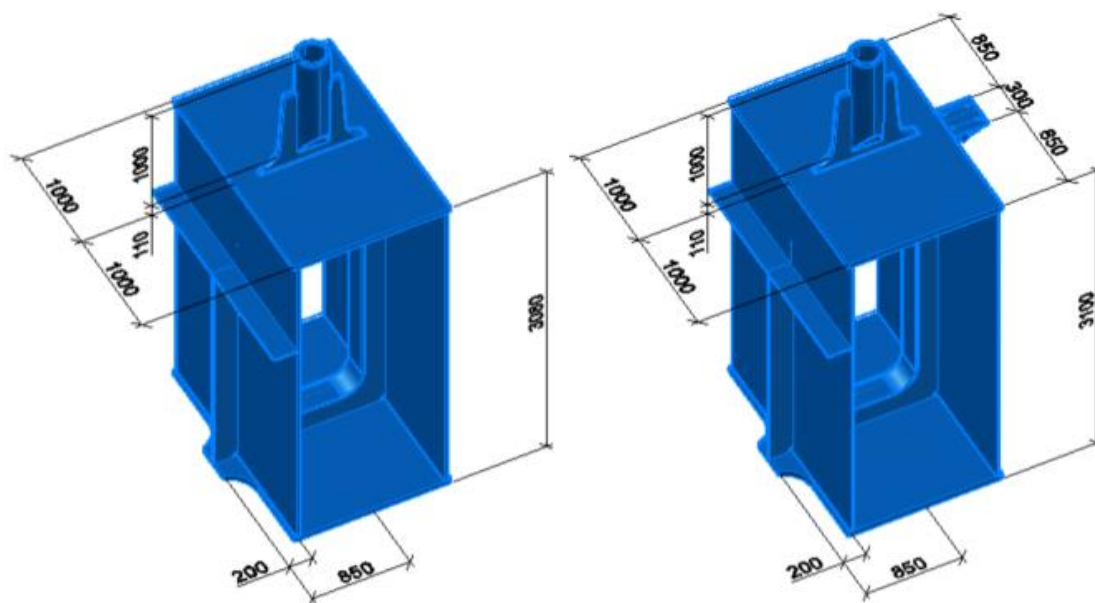
Na konstrukci v CSI Bridge byly proto provedeny myšlené výseky těchto detailů u všech závěsů. V jejich koncových bodech byly pruty rozděleny vloženými uzly, kde byly pro všechny zatěžovací stavy spočteny hodnoty vnitřních sil, které odpovídají svým směrem a orientací lokálnímu souřadnému systému prutů. Lze je zároveň při respektování zavedené konvence chápat jako koncové síly na detailu, tedy statické okrajové podmínky pro další výpočty v Abaqusu.

Nejdůležitější vnitřní síly během přejezdů při dynamické zatěžovací zkoušce jsou vykresleny v grafech v Příloze B.

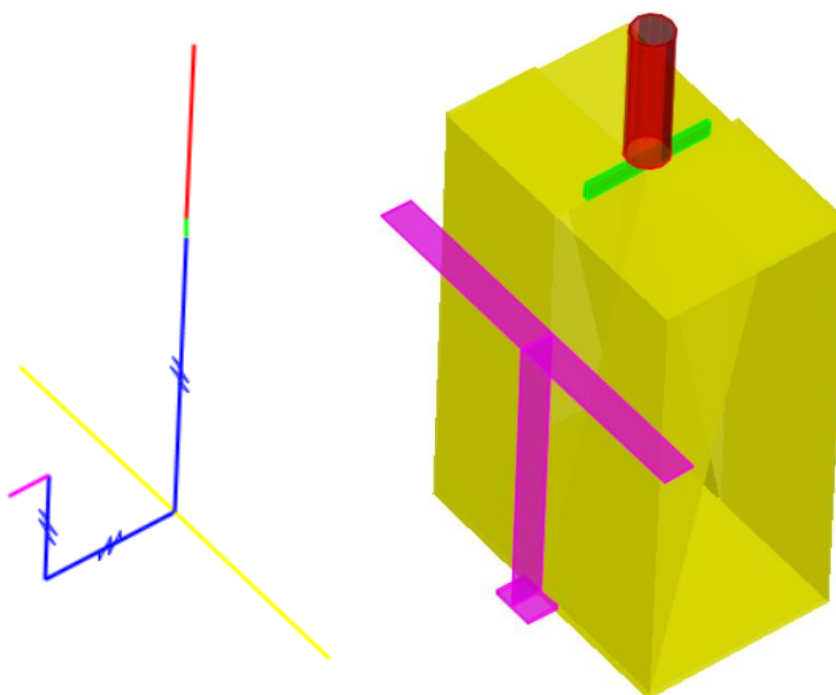
Na Obr. 62 je patrné označení závěsů na konstrukci. Levá a pravá strana odpovídá při pohledu ve směru staničení, tj. do Žiliny. Na levém trámu je zábradlí a jemu přilehlá kolej byla pojížděna při dynamické zatěžovací zkoušce. Na pravé straně vede protihluková stěna, jejíž sloupky jsou na konzolách přivařených k horní části trámu.



Obr. 62: Označení jednotlivých táhel T1-T11



*Obr. 63: Detail u připojení táhla T6 (vlevo) a T9 (vpravo)*



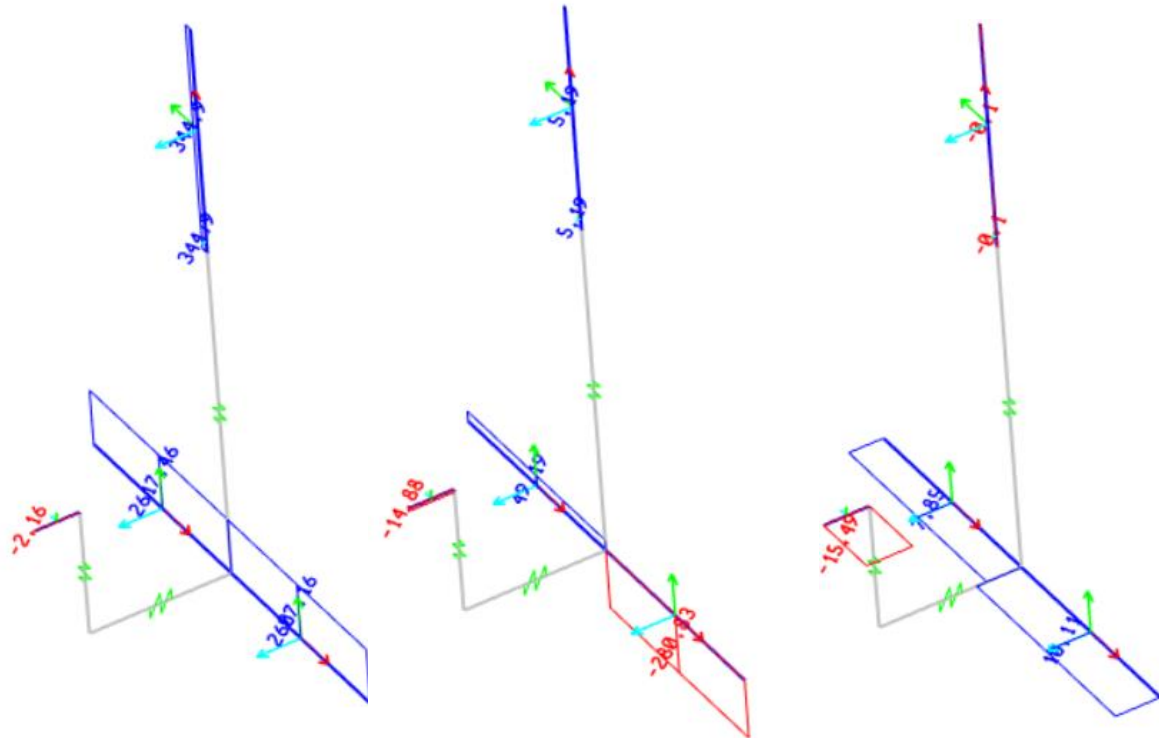
*Obr. 64: Detail v CSI Bridge*



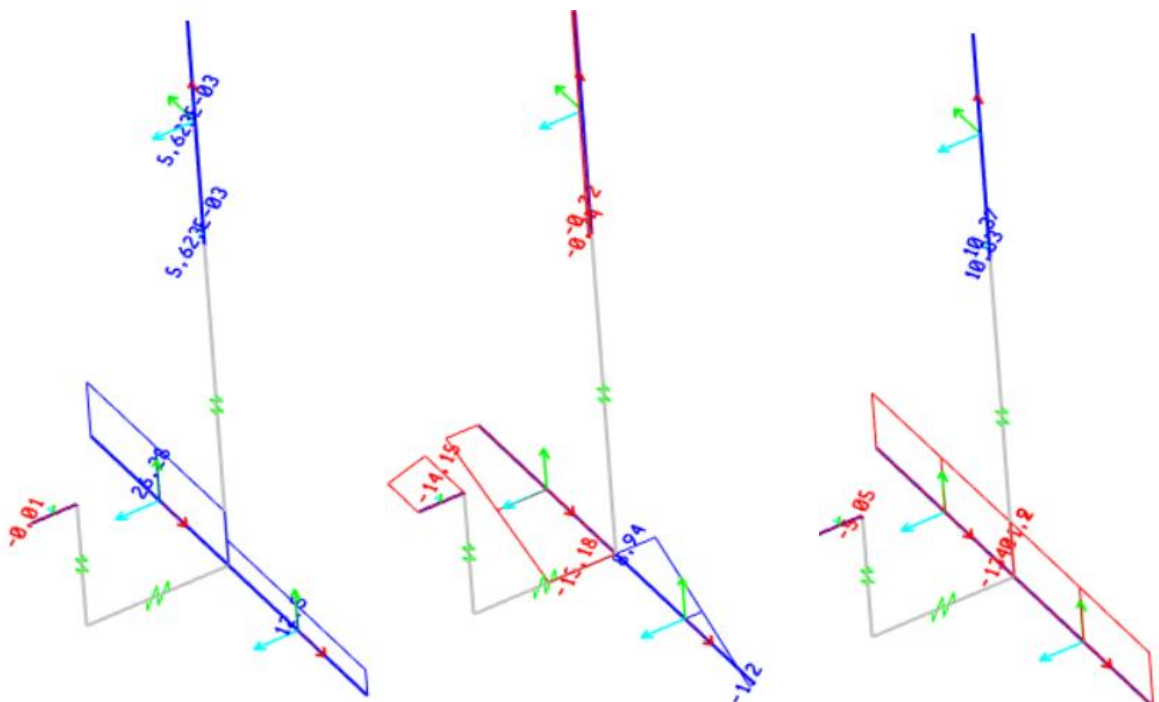


**Vnitřní síly – ZS1 – detail u táhla T9 na pravém trámu**

Dále je ukázán postup zpracování vnitřních sil a jejich převod na síly koncové. Kvůli značnému objemu dat (zatěžovacích stavů a táhel) je uveden příklad pouze pro jeden zatěžovací stav (ZS1) u jednoho připojení závěsu (T9) k trámu.



Obr. 65: Vnitřní síly [kN] (zleva - N, V2, V3) na T9 pro ZS1

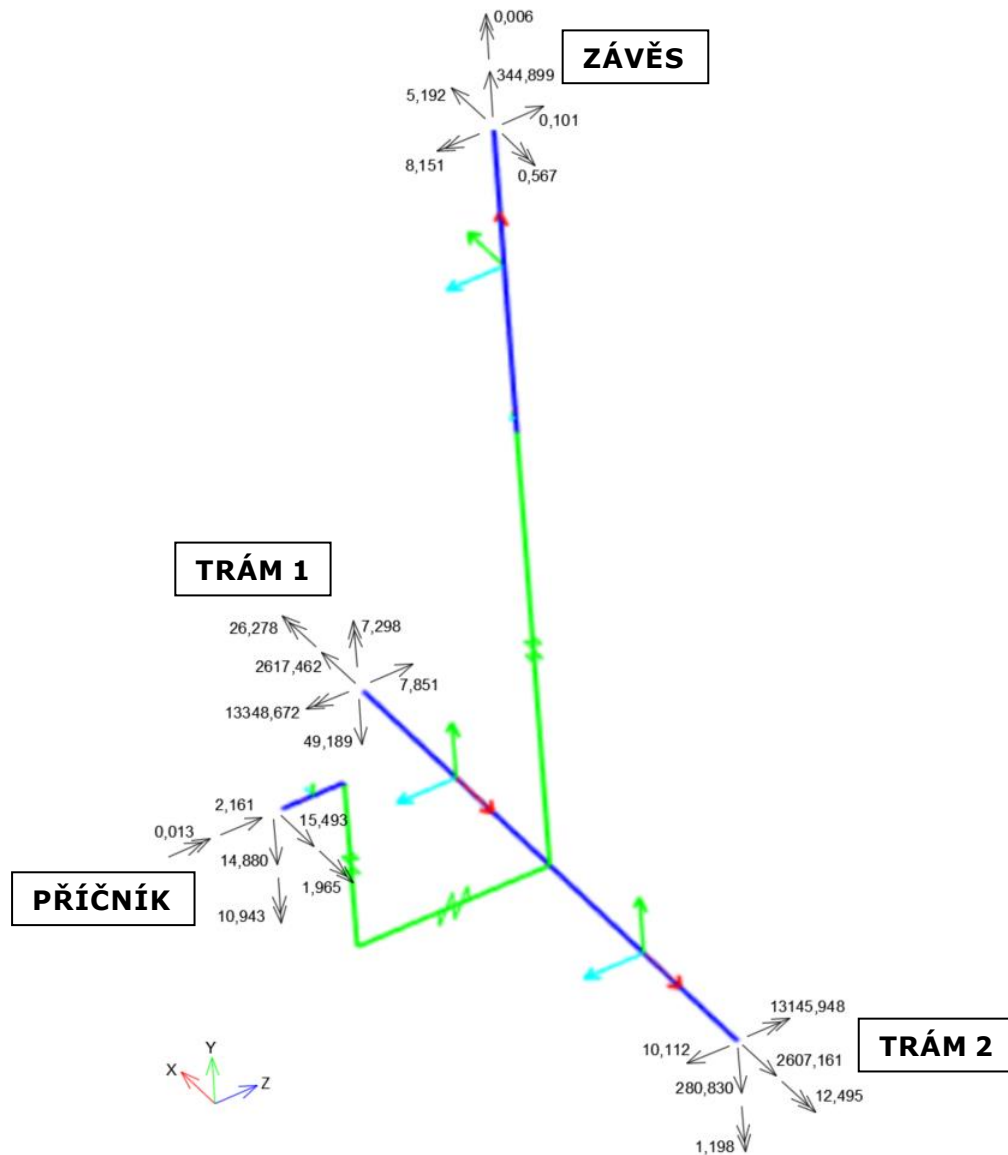


Obr. 66: Vnitřní síly [kNm] (zleva - T, M2, M3) na T9 pro ZS1



**Koncové síly – ZS1 – detail u táhla T9 na pravém trámu**

Globální souřadný systém pro koncové síly byl zvolen shodně s orientací souřadného systému v programu Abaqus (viz Obr. 67).



Obr. 67: Koncové síly na T9 pro ZS1 [kN, kNm]

bod/síla	F1 [kN]	F2 [kN]	F3 [kN]	M1 [kNm]	M2 [kNm]	M3 [kNm]
trám 1	2617,462	-49,189	7,851	26,278	7,298	-13348,672
trám 2	-2607,161	-280,830	-10,112	-12,495	-1,198	13145,948
závěs	5,192	344,899	0,101	-0,567	0,006	-8,151
příčník	-15,493	-14,880	2,161	-1,965	-10,943	0,013

Tab. 14: Koncové síly na T9 pro ZS1





## Únavová životnost železničního mostu v Púchově

Pro další postup bylo třeba zredukovat velké množství dat a stanovit místa a časy očekávaných maximálních hodnot normálových napětí ve zkoumaných místech detailů. Byl proto proveden zjednodušený výpočet na konstantních průřezech trámu a styčnickového plechu (v místě připojení na trám těsně nad svarem), pro něž byly využity ze získaných sil na okrajích detailu příslušné síly normálové, posouvající a ohybové momenty okolo globální osy z.

Na horní pásnici trámu byla stanovena průměrná hodnota normálového napětí z koncových bodů trámu. Pro styčnickový plech bylo napětí stanoveno na obou jeho vnějších stranách.

### Výpočet odhadu napětí na horní pásnici trámu – ZS1 – T9

$$A = 0,225 \text{ m}^2$$

$$I = 0,3815 \text{ m}^4$$

$$z = 1,55 \text{ m}$$

$$N_{\text{trám1}} = 2617,462 \text{ kN}, V_{\text{trám1}} = 49,189 \text{ kN}, M_{\text{trám1}} = 13348,672 \text{ kNm}$$

$$N_{\text{trám2}} = 2607,161 \text{ kN}, V_{\text{trám2}} = 280,830 \text{ kN}, M_{\text{trám2}} = 13145,948 \text{ kNm}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{trám1}} &= \frac{N_{\text{trám1}}}{A} + \frac{M_{\text{trám1}}}{I} \cdot z = \frac{2617,462 \cdot 10^{-3}}{0,225} + \frac{(13348,672 + 49,189 \cdot 1) \cdot 10^{-3}}{0,3815} \cdot 1,55 = 11,63 + 54,43 = \\ &= 66,06 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{trám2}} &= \frac{N_{\text{trám2}}}{A} + \frac{M_{\text{trám2}}}{I} \cdot z = \frac{2607,161 \cdot 10^{-3}}{0,225} + \frac{(13145,948 + 280,83 \cdot 1) \cdot 10^{-3}}{0,3815} \cdot 1,55 = 11,59 + 54,55 = \\ &= 66,14 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\sigma_{\text{trám,prům}} = \frac{\sigma_{\text{trám1}} + \sigma_{\text{trám2}}}{2} = \frac{66,06 + 66,14}{2} = 66,10 \text{ MPa}$$

### Výpočet odhadu napětí na styčnickovém plechu – ZS1 – T9

$$A = 0,026 \text{ m}^2$$

$$I = 1,958 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

$$z = \pm 0,015 \text{ m}$$

$$N_{\text{závěs}} = 344,899 \text{ kN}, V_{\text{závěs}} = 5,192 \text{ kN}, M_{\text{závěs}} = 8,151 \text{ kNm}$$

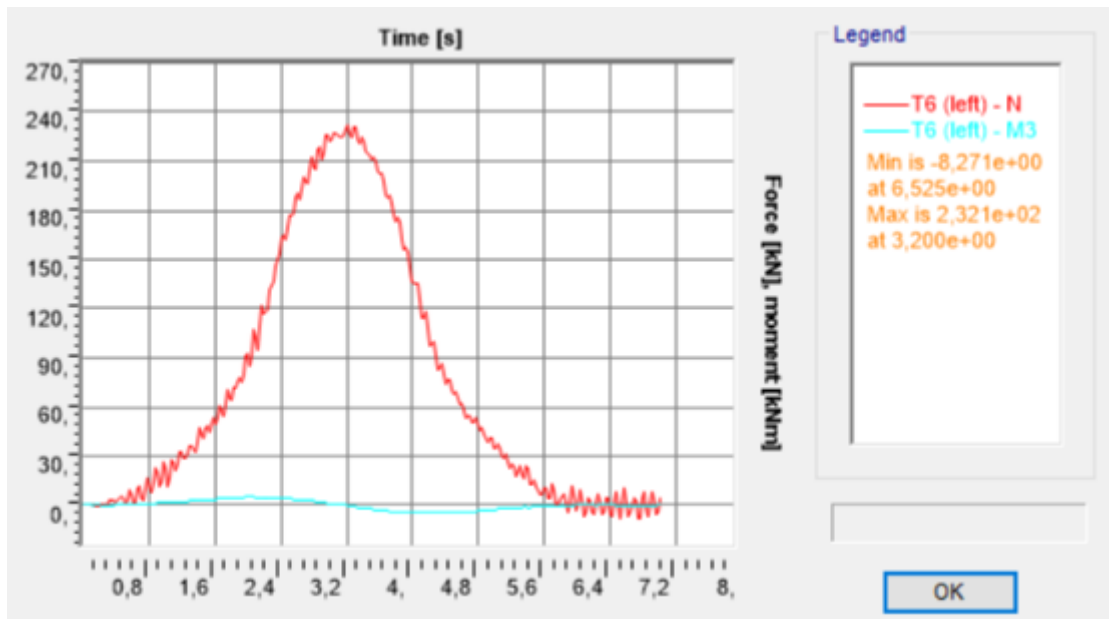
$$\begin{aligned} \sigma_{\text{závěs1}} &= \frac{N_{\text{závěs}}}{A} + \frac{M_{\text{závěs}}}{I} \cdot z_1 = \frac{344,899 \cdot 10^{-3}}{0,026} + \frac{(8,151 + 5,192 \cdot 1,09) \cdot 10^{-3}}{1,958 \cdot 10^{-6}} \cdot 0,015 = 13,27 + 105,80 = \\ &= 119,07 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{závěs2}} &= \frac{N_{\text{závěs}}}{A} + \frac{M_{\text{závěs}}}{I} \cdot z_2 = \frac{344,899 \cdot 10^{-3}}{0,026} + \frac{(8,151 + 5,192 \cdot 1,09) \cdot 10^{-3}}{1,958 \cdot 10^{-6}} \cdot (-0,015) = 13,27 - 105,80 = \\ &= -92,53 \text{ MPa} \end{aligned}$$

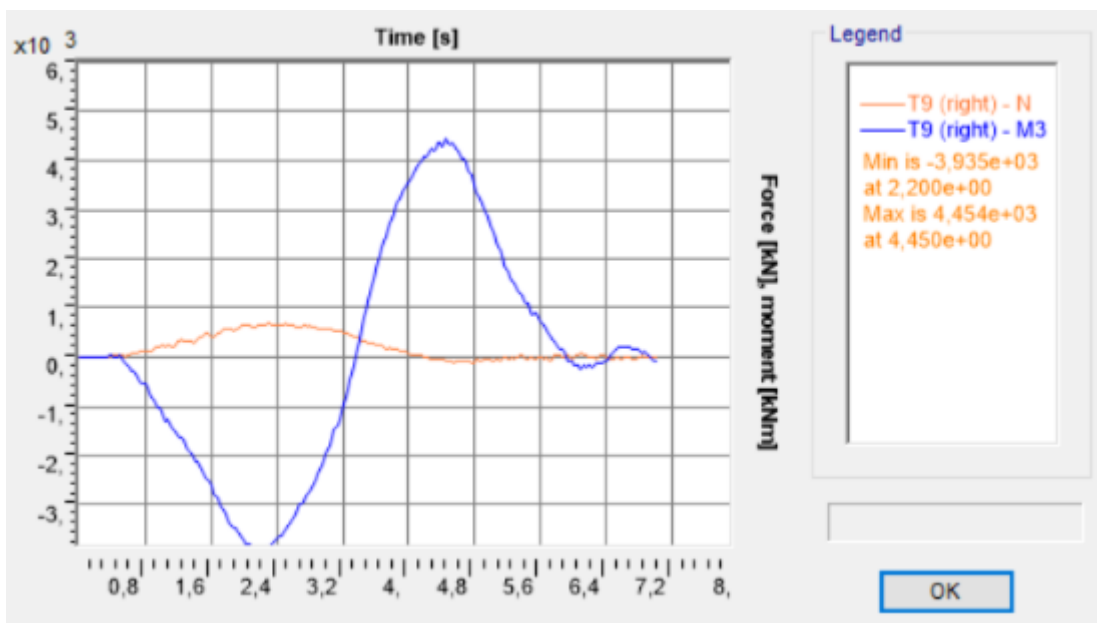


### Vnitřní síly u dynamických zatěžovacích stavů – ZS14

V Grafech 1 a 2 jsou pro ZS14 vykresleny průběhy normálových sil a ohybových momentů, jež mají vliv na normálová napětí. Pro jiné rychlosti jsou tyto závislosti velmi podobné, u žádné není patrné významné dynamické chování. Grafy pro všechny stavy jsou uvedeny v Příloze B.



Graf 1: Normálová síla a moment v čase na táhle T6 levého trámu v místě kraje myšleného řezu (ZS14)



Graf 2: Normálová síla a moment v čase na pravém trámu u závěsu T9 v místě kraje myšleného řezu (ZS14)



### Analýza vnitřních sil

Z výpočtu pro ZS1 je patrné, že dominantní vliv na normálové napětí mají ohybové momenty. Analýzou dat pro všechny závěsy se potvrdil předpoklad, že největší rozkmity napětí ve styčnickovém plechu vznikají u prostředního táhla T6 a v horní pásnici trámu u závěsu T9, a to u statických i dynamických zatížení, v blízkosti maxim ohybových momentů. Právě tyto dva konkrétní detaily budou dále podrobněji zkoumány. Přípoj závěsu T6 bude řešen na levé straně mostu, protože na levé koleji bude probíhat dynamická zatěžovací zkouška, a budou zde proto vznikat větší rozkmity napětí. Konzoly se však nachází pouze na straně druhé, a tak bude dále vytvořen model u táhla T9 na pravém trámu.

Níže uvedené Tab. 15-17 jsou pouze s údaji o zmíněných nejvíce namáhaných závěsech pro každý zatěžovací stav v čase, kde byl zjednodušeným výpočtem zjištěn maximální rozkmit napětí. Výsledné hodnoty budou značně odlišné, protože tyto odhady nezohledňují vliv koncentrace napětí plynoucí ze změny průřezů. Proto zejména u detailu T9 jsou očekávány velké rozdíly. Jelikož se však geometrie nemění, tak by maxima (příp. minima) měla odpovídat takto zjištěným časům. Pro styčnickové plechy se nepatrně lišily rozkmity na jejich vnějších stranách. Tučně vyznačené stavy s většími rozkmity v Tab. 15 a 16 a všechny stavy z Tab. 17 byly použity pro další výpočty v Abaqusu. Konkrétní koncové síly pro všechny tyto zatěžovací stavy v příslušných okamžicích jsou uvedeny v Příloze C.

Z Tab. 15-17 a grafů v Příloze B plyne, že se ve výpočtech velikostí vnitřních sil a normálových napětí neprojevovalo významnější dynamické namáhání. Mírně zvýšená napětí se objevují u vyšších rychlostí 70-100 km/h a také u 30 km/h.

Zatěžovací stav	km/h	Maximum		Minimum		Rozkmit
		$\sigma$ [MPa]	čas [s]	$\sigma$ [MPa]	čas [s]	$\Delta\sigma$ [MPa]
ZS1	-	141,57	-	141,57	-	-
ZS2	-	35,19	-	35,19	-	-
ZS3	5	51,05	43,375	-44,32	84,475	95,36
ZS4	10	51,51	22,000	-44,44	42,850	95,95
ZS5	15	54,31	14,550	-43,65	28,450	<b>97,96</b>
ZS6	20	51,41	10,875	-43,45	21,350	<b>94,86</b>
ZS7	30	57,37	7,300	-49,89	14,075	<b>107,26</b>
ZS8	40	51,42	5,425	-43,81	10,475	95,23
ZS9	50	51,41	4,125	-44,70	8,600	<b>96,11</b>
ZS10	60	52,32	3,575	-46,52	7,025	<b>98,84</b>
ZS11	70	56,58	3,000	-48,04	6,075	104,62
ZS12	80	<b>56,79</b>	<b>2,800</b>	<b>-51,73</b>	<b>5,525</b>	<b>108,52</b>
ZS13	90	53,97	2,400	-46,78	4,775	<b>100,75</b>
ZS14	100	54,33	2,075	-47,92	4,375	<b>102,25</b>

Tab. 15: Maximální odhadované rozkmity napětí pro všechny zatěžovací stavy na styčnickovém plechu levého táhla T6 na straně k Púchovu



Zatěžovací stav	km/h	Maximum		Minimum		Rozkmit
		$\sigma$ [MPa]	čas [s]	$\sigma$ [MPa]	čas [s]	$\Delta\sigma$ [MPa]
ZS1	-	-112,64	-	-112,64	-	-
ZS2	-	6,08	-	6,08	-	-
<b>ZS3</b>	5	50,69	81,575	-44,85	40,450	<b>95,53</b>
<b>ZS4</b>	10	51,44	40,675	-44,84	20,150	<b>96,28</b>
ZS5	15	53,24	27,375	-44,35	13,830	97,59
ZS6	20	51,15	20,300	-43,01	9,750	94,16
ZS7	30	57,78	13,700	-48,99	6,200	106,77
<b>ZS8</b>	40	52,39	10,475	-43,43	5,075	<b>95,82</b>
ZS9	50	51,26	8,425	-44,51	3,950	95,77
ZS10	60	52,83	7,025	-45,39	3,175	98,22
<b>ZS11</b>	70	57,80	5,700	-48,11	2,925	<b>105,91</b>
ZS12	80	57,72	5,150	-49,52	2,450	107,24
ZS13	90	53,92	4,500	-45,79	2,050	99,71
ZS14	100	53,85	4,075	-48,04	2,000	101,89

Tab. 16: Maximální odhadované rozkmity napětí pro všechny zatěžovací stavy na styčnickovém plechu levého táhla T6 na straně k Žilině

Zatěžovací stav	km/h	Maximum		Minimum		Rozkmit
		$\sigma$ [MPa]	čas [s]	$\sigma$ [MPa]	čas [s]	$\Delta\sigma$ [MPa]
ZS1	-	66,16	-	66,16	-	-
ZS2	-	31,27	-	31,27	-	-
ZS3	5	17,78	44,425	-17,21	88,425	35,00
ZS4	10	17,89	22,950	-17,33	43,850	35,22
ZS5	15	17,85	14,600	-17,34	29,425	35,19
ZS6	20	17,85	10,75	-17,36	22,375	35,22
ZS7	30	18,31	7,325	-17,74	14,775	36,05
ZS8	40	17,86	5,800	-17,09	10,850	34,95
ZS9	50	18,29	4,200	-17,70	8,650	35,99
ZS10	60	18,09	3,525	-17,50	7,275	35,59
ZS11	70	18,76	3,125	-17,65	6,325	36,41
ZS12	80	19,00	2,900	-18,43	5,550	37,43
ZS13	90	18,45	2,600	-18,26	4,925	36,71
<b>ZS14</b>	<b>100</b>	<b>19,09</b>	<b>2,200</b>	<b>-18,64</b>	<b>4,450</b>	<b>37,73</b>

Tab. 17: Maximální odhadované rozkmity napětí pro všechny zatěžovací stavy na horní pásnici pravého trámu u připojení konzoly u táhla T9

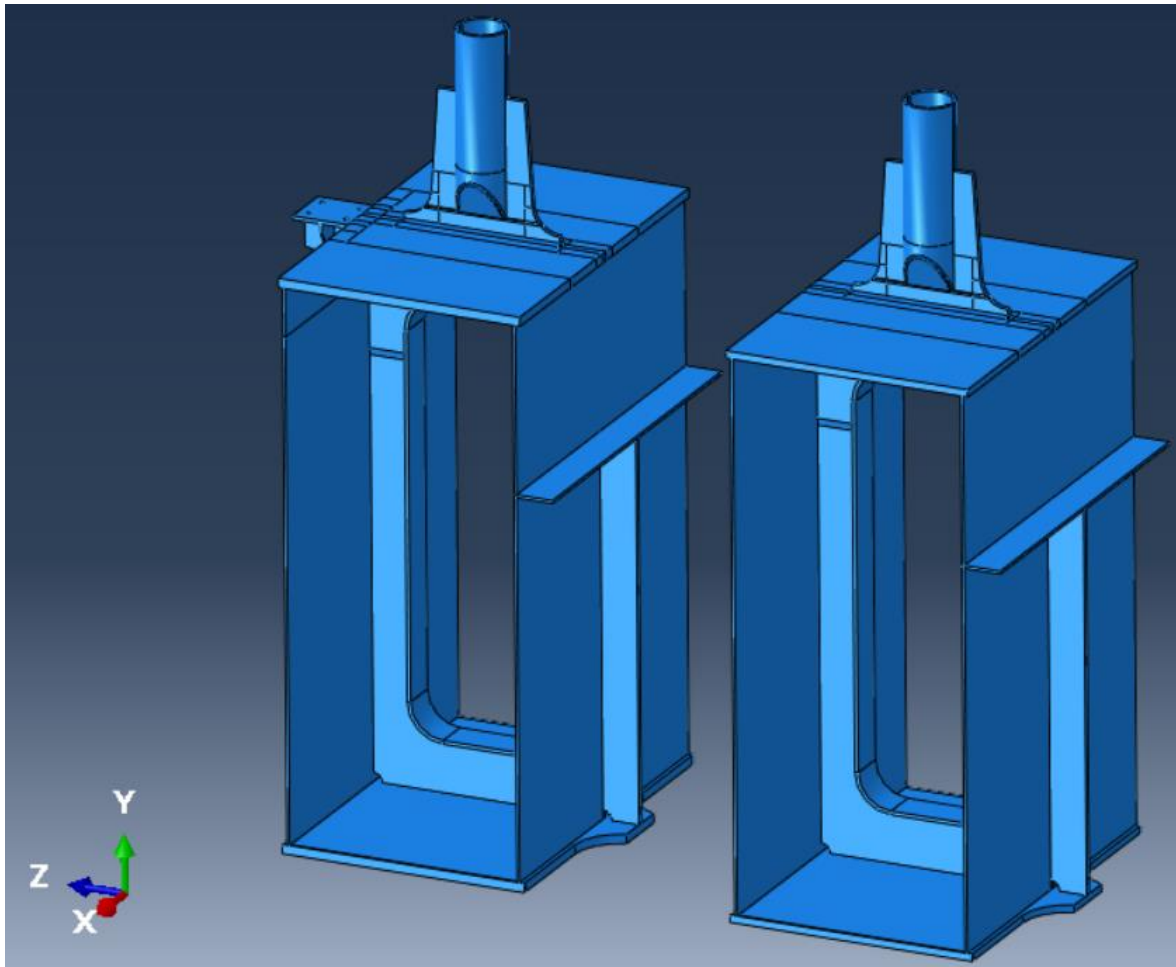


## 6. MODEL ABAQUS

### 6.1. Geometrie

V Abaqusu byl dále zkoumán jen detail vyjmutý z konstrukce mostu se statickými okrajovými podmínkami odpovídajícími účinkům jednotlivých zatěžovacích stavů.

Z výsledků v programu CSI Bridge bylo patrné, že nejvíce namáhaný styčnickový plech se nachází na táhle T6 a největší rozkmit napětí v horní pásnici vzniká v okolí táhla T9. Pojezdy na dynamické zatěžovací zkoušce byly provedeny v levé koleji (při pohledu ve směru staničení – do Žiliny), a proto bylo zkoumáno táhlo T6 na levém trámu. Konzola pro protihlukovou stěnu s očekávaným maximem napětí u závěsu T9 se však nachází jen na trámu pravém, tudíž právě z něj musel být vybrán výsek konstrukce. Geometricky se tyto dva detaily (kromě postranní konzoly) liší i v tloušťce pásnic. Na táhle T6 jsou ze 40mm plechů a na T9 z 50mm.



Obr. 68: Modely detailů T9 (vlevo) a T6 (vpravo)



Pro dostatečné roznesení sil, a tedy přiblížení se skutečnému chování detailu byl zvolen metrový výsek trámu na každou stranu od osy závěsu a délka táhla také 1 m. Neoddělitelně k tomuto výseku patří i příčník. U něj byla zvolená jen krátká část (200 mm od vnější hrany stěny) kvůli proměnnému průřezu. Zároveň se významně nepodílí rozložení napětí u zkoumaných oblastí. Podrobněji je detail rozkreslen v Příloze A.

Většina geometrie svarů byla zanedbána. Největší význam měly 3 svary. Bohužel v době tvorby těchto modelů nebyla známá jejich přesná geometrie. První byl u připojení vrchního plechu konzoly, kde byl předepsán tupý svar „půl V“, který se teoreticky svým tvarem do geometrie neprojeví a takto to bylo v modelu T9 uvažováno. Další významný byl svar „K“, jenž připojoval styčnickový plech k horní pásnici. Výška tohoto svaru, který byl významný pro model T6, byla zvolena 20 mm (viz Obr. 27, str. 43). Z poskytnutých fotografií v době tvorby modelu bylo zřejmé, že se svar směrem k pásnici mírně rozšiřuje. Konkrétní šířka paty nebyla známa, proto se na základě odhadu svar rozšiřoval pod úhlem 20°. Svar mezi styčnickovým plechem a víčkem trubky byl velmi důležitý pro rozložení napětí. Bez něj by se totiž napětí ze závěsu šířilo jen ve dvou úzkých místech, kde je přivařena trubka. Tímto svarem dochází k rovnoměrnějšímu rozložení zatížení pod koncem trubky. V dílenské dokumentaci [20] je zde předepsáno opět „půl V“. Jeho geometrie byla odhadnuta tak, že směrem k plechu se ve svislém směru zvýšil o 1 mm (cca úklon 6,5° od vodorovné).



Obr. 69: Svary na styčnickovém plechu



Pro oba modely T6 a T9 bylo v programu Abaqus postupováno stejně. Mimo geometrie se rozdíly promítly už jen při sestavování sítě prvků.

Jednotlivé části detailu byly v Abaqusu sloučeny do jedné sestavy „assembly“. Tím bylo zajištěno dokonalé propojení ve svarových spojích.

Materiál byl definován jednotně jako ocel. Pro účely těchto výpočtů napjatosti bylo dostatečné definovat objemovou hmotnost  $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$ , modul pružnosti  $E = 210 \text{ GPa}$  a Poissonovo číslo  $\nu = 0,3$ .

### 6.2. Síť prvků

Pro analýzu detailů byly vybrány objemové homogenní prvky. Síť musela být vytvořena v souladu s pravidly pro použití metody hot-spot (viz kapitola 3.3.2.), u níž bylo zvoleno řešení s jemnou sítí. Proto bylo potřeba použít hexagonální prvky o rozměrech 6 mm až 10 mm, v závislosti na tom, zda bude hot-spot metoda využita pouze na styčnickovém plechu (6 mm) nebo i na horní pásnici (8 mm nebo 10 mm), což ještě nebylo při tvoření modelu zcela jasné. Při prvních výpočtech však bylo prokázáno, že napětí na horní pásnici jsou nízká a není potřeba se jimi zabývat ve vztahu k metodě hot-spot a únavové životnosti.

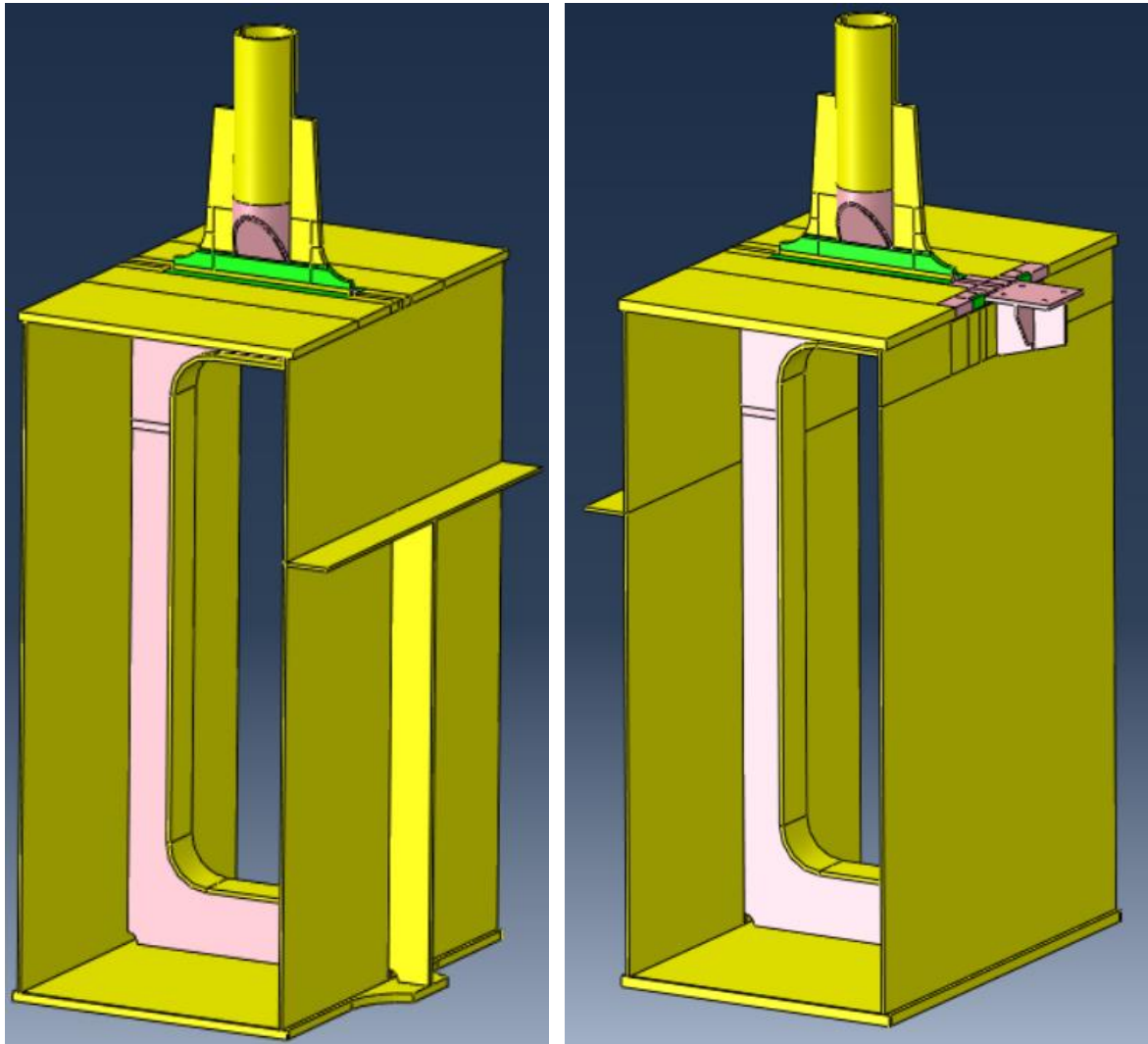
Není vhodné nechat tak jemnou síť po celém modelu. Snahou tedy bylo za oblastí, ve které bude využita metoda hot-spot, pozvolna rozšiřovat prvky na velikost hrany až 15 mm. Tato hodnota byla stanovena na základě rozměrů plechů na detailu a pravidel sítě. Stěny trámu mají tloušťku 15 mm a mají na ní definované 2 prvky. Zároveň poměr mezi nejmenší a největší hranou jednoho prvku by neměl překračovat hodnotu 1:3.

Hexagonální prvky mají však svá úskalí při jejich použití na složité geometrii a při přechodu na hrubší síť, protože se nemohou zvětšovat ve všech třech směrech. Proto byly kombinovány s prvky tetraedrickými, které byly použity na víčkách trubky a jejím zúžení, výztuže trámu a okrajích svaru styčnickového plechu k pásnici. Konec trubky, víčka a okraje svaru byly problematické pro hexagonální prvky svou geometrií. Výztuha trámu navazuje na horní pásnici a zároveň svar a styčnickový plech. Pokud jsou na styčnickovém plechu elementy o délce hrany 6 mm, je jich po tloušťce plechu celkem pět. Hexagonální síť pak těchto pět prvků prokreslí do svaru, horní pásnice a následně výztuhy. Výztuha se z tloušťky 30 mm zužuje na 14 mm a pět prvků v takovém plechu má pak délku hrany 2,8 mm, což umožňuje zbylé rozměry prvků maximálně 8,4 mm. Proto zde byly také použity tetraedrické prvky, které mohou snadno plynule zvětšovat rozměry ve všech směrech.

Detail T9 tuto síť přivařenou konzolou zkomplikoval. V okolí vrchního plechu konzoly bylo potřeba mít 2mm elementy. Proto byly tetraedrické prvky použity ještě na konzole i v okolí zahuštění sítě. V místech, kde budou odečítány hodnoty napětí, byly opět prvky hexagonální.

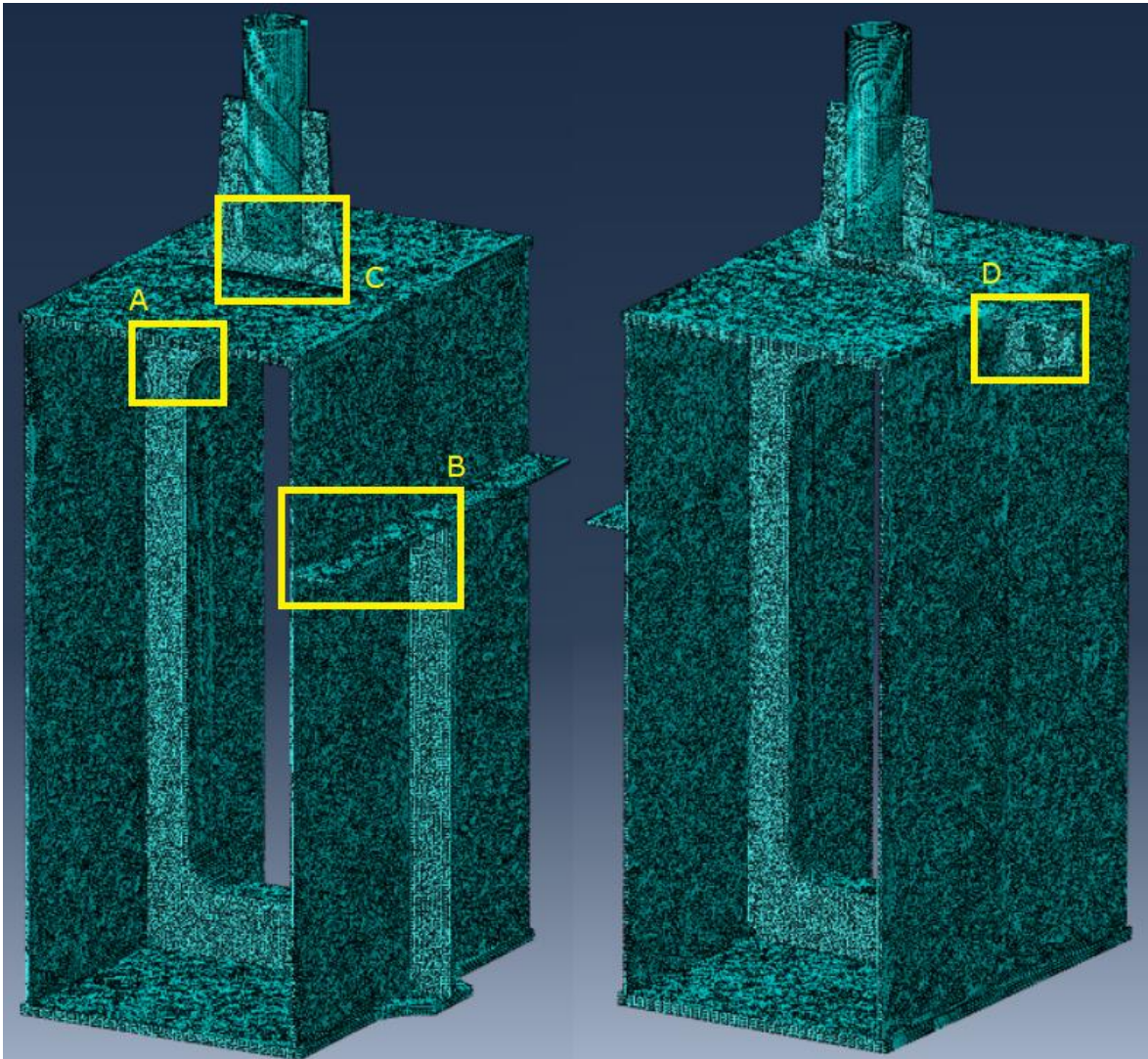
Na hranicích mezi hexagonálními a tetraedrickými prvky byly Abaqusem automaticky vygenerovány propojující vazby „tie constraints“.

Model T6 byl rozdělen celkem na 712 780 elementů a model T9 na 1 079 922.

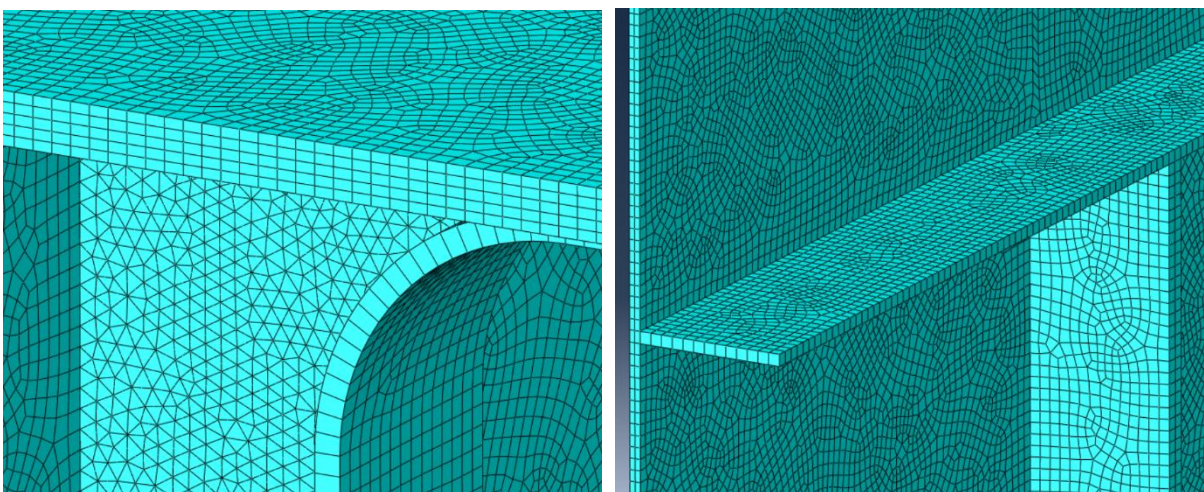


*Obr. 70: Volba prvků na modelu T6 (vlevo) a T9 (vpravo), zelená a žlutá – hexagonální, růžová – tetraedrické*



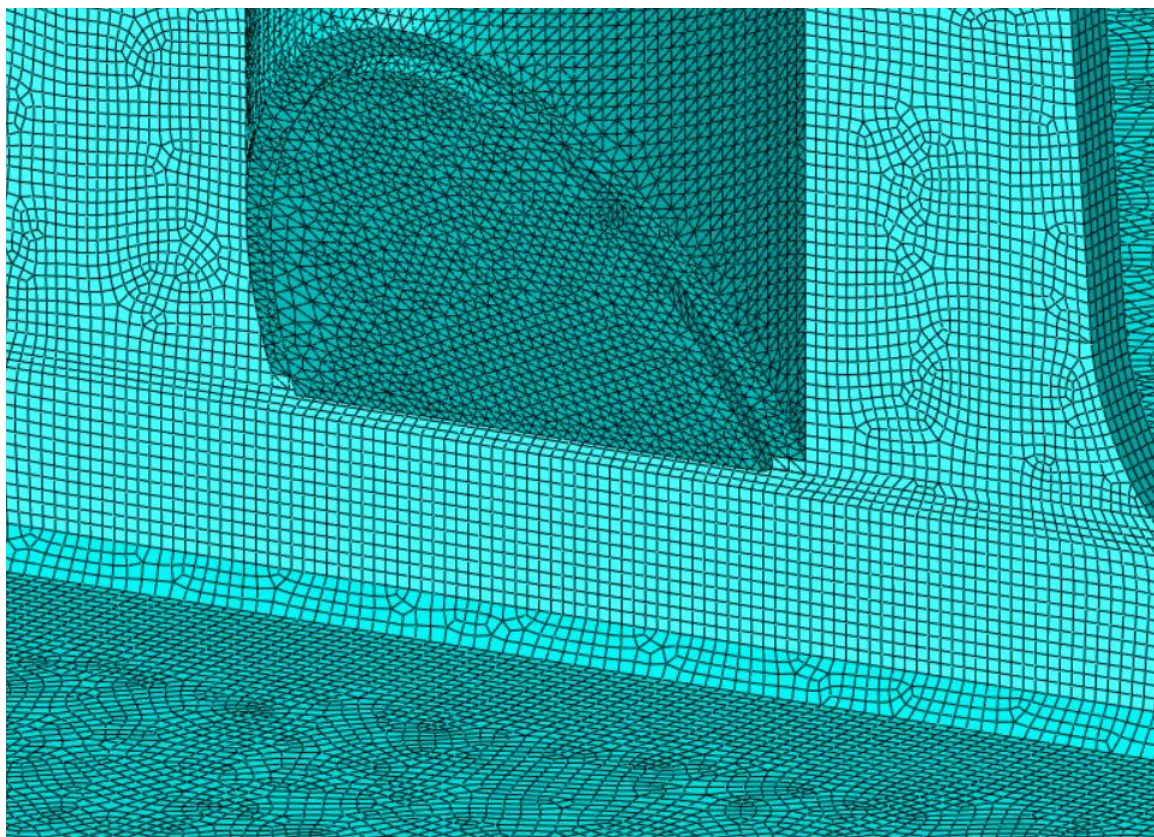


Obr. 71: Síť na T6 (vlevo) a T9 (vpravo)

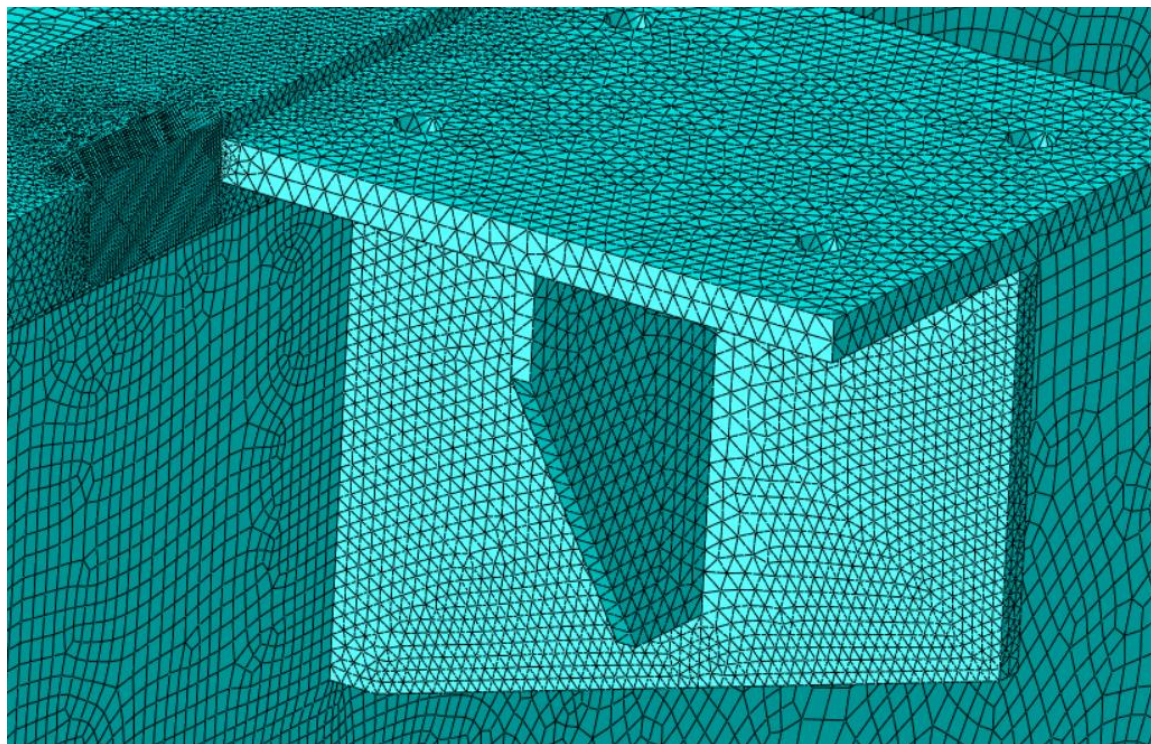


Obr. 72: Detail A (vlevo), detail B(vpravo)





*Obr. 73: Detail C*



*Obr. 74: Detail D*





### 6.3. Podepření

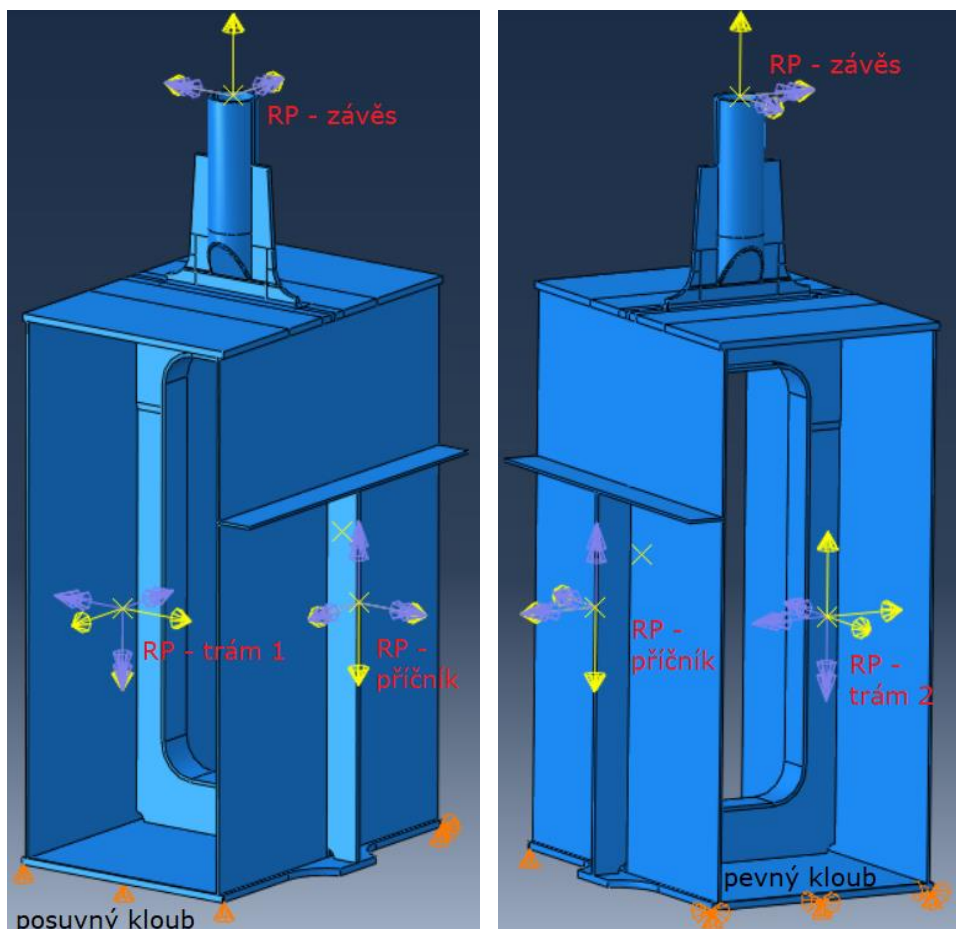
Detailu bylo nutno specifikovat geometrické okrajové podmínky ve formě podpor, ačkoliv se ve skutečnosti v této oblasti žádné nenacházejí a tento výsek je držen přílehlými částmi konstrukce. Na okrajích detailu je zadáno zatížení a nelze je tedy zároveň využít pro odebrání stupňů volnosti. Proto bylo použito prosté podepření okrajů trámu. Na jedné straně pevný liniový kloub a na straně druhé všesměrně posuvný. Kvůli roznášení zatížení na celou plochu krajního průřezu byly podpory posunuty o 15 mm (jeden prvek) vodorovně směrem ke středu.

### 6.4. Zatížení

Z globálního modelu v CSI Bridge byly zjištěny koncové síly a momenty. Nyní bylo třeba je roznést do průřezových ploch. Tento efekt byl dosažen použitím tuhé roznášecí desky „constraint“ – „rigid body“, která propojuje povrch krajního průřezu s referenčním bodem, jenž je předsazen těsně (1 mm) před průřez do místa těžiště a kam jsou vkládány koncové síly.

Výpočet je rozdělen do dvou kroků. V počátečním jsou definovány geometrické okrajové podmínky a ve druhém kroku je aplikováno zatížení. Analýza byla pro větší přesnost zvolena jako geometricky nelineární.

Konkrétní hodnoty koncových sil a momentů jsou uvedeny v Příloze C.



Obr. 75: Podepření, referenční body a příklad zatížení na modelu



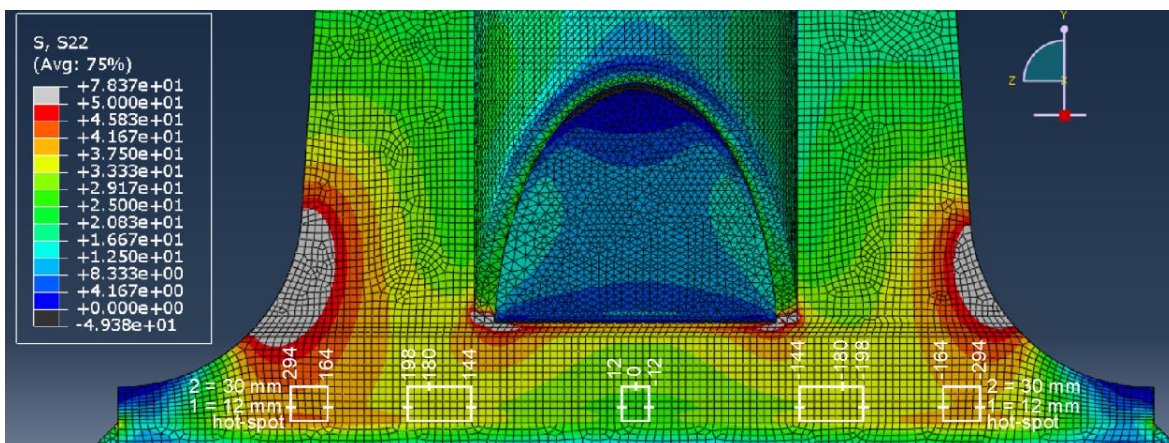
## 6.5. Výsledky

Metoda hot-spot pracuje se dvěma nebo třemi hodnotami napětí, které je kolmé k linii svaru (viz kapitola 3.3.2.). Bylo proto vybráno několik míst, kde dosahovala napětí nejvyšších hodnot. V Tab. 18 a 19 jsou uvedena zjištěná maxima napětí, případně maximální rozkmity během přejezdu pro každý zatěžovací stav včetně souřadnice určující polohu. V této kapitole je ukázáno jen pár příkladů rozložení normálových napětí. Napětí pro všechny zatěžovací stavy je součástí Přílohy D. Konkrétní hodnoty ve zkoumaných oblastech jsou uvedeny v Příloze E.

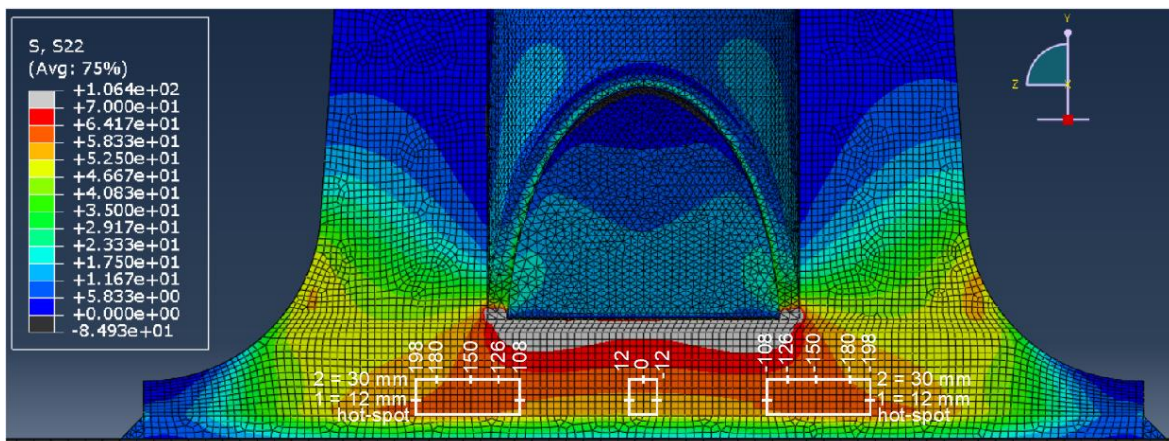
Počátek globálního souřadného systému se nachází v ose táhla na vrchní hraně horní pásnice trámu, osa „X“ je rovnoběžná s osou trámu, „Y“ je svislá osa mířící vzhůru a kladná osa „Z“ vede směrem na konzolu (kraj mostu).

### 6.5.1. Model připojení závěsu (T6)

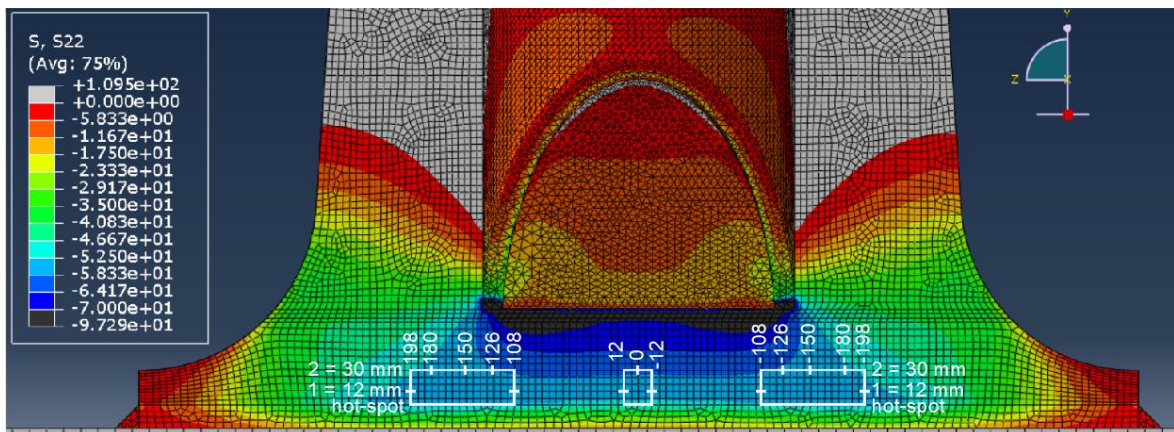
Na modelu T6 je zkoumáno normálové napětí ve směru globální (svislé) osy „Y“ v patě svaru na styčnickovém plechu, který jej připojuje k horní pásnici trámu. Body pro použití metody hot-spot typu „a“ s lineární extrapolací se nachází ve vzdálenosti 12 a 30 mm od hrany svaru.



Obr. 76: Normálové napětí ve směru Y – na T6 (ZS2)



Obr. 77: Maximální normálové napětí ve směru Y – na T6 (ZS12 v  $t = 2,8$  s)



Obr. 78: Minimální normálové napětí ve směru Y – na T6 (ZS12 v  $t = 5,525$  s)

Na Obr. 76-78 je zobrazeno rozložení napětí s vyznačením oblastí, kde byly v referenčních bodech (1 = 12 mm a 2 = 30 mm) odečteny hodnoty a z nich dopočteno napětí v místě „hot-spot“. Z dynamických zatěžovacích stavů vycházelo velmi podobné rozložení napětí včetně velikostí (viz Obr. 77 a 78). Statický zatěžovací stav ZS1 vykazoval stejné chování, pouze s vyššími hodnotami odpovídajícími vyššímu zatížení. Proto pro všechny tyto zatěžovací stavy byla zkoumána stejná oblast. U ZS2 se ale napětí po styčnickovém plechu liší z důvodu malého ohybového momentu v táhle, a tedy dominantnímu působení normálové síly. Proto byla upravena oblast pro použití metody hot-spot dle Obr. 76. Čísla označující vodorovný směr odpovídají v modelu souřadnicím „Z“.

Rovnice pro výpočet napětí na hraně svaru:  $\sigma_{\text{hot-spot}} = 1,67 \cdot \sigma_1 - 0,67 \cdot \sigma_2$

Zatěžovací stav	$\Delta\sigma_{\text{odhad}}$ [MPa]	hot-spot Z [mm]	strana plechu	$\sigma_{\text{h-s,max}}$ [MPa]	$\sigma_{\text{h-s,min}}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{\text{hot-spot}}$ [MPa]
ZS1	141,57	186	Púchov	<b>133,635</b>	-	-
ZS2	35,19	277	Púchov	<b>39,456</b>	-	-
ZS3	95,53	180	Žilina	53,744	-48,897	<b>102,642</b>
ZS4	96,28	180	Žilina	54,537	-48,934	<b>103,472</b>
ZS5	97,96	-156	Púchov	57,510	-46,657	<b>104,166</b>
ZS6	94,86	180	Púchov	54,608	-47,541	<b>102,149</b>
ZS7	107,26	180	Púchov	61,079	-54,616	<b>115,695</b>
ZS8	95,82	180	Žilina	55,979	-47,283	<b>103,262</b>
ZS9	96,11	180	Púchov	55,265	-48,908	<b>104,173</b>
ZS10	98,84	180	Púchov	55,767	-50,724	<b>106,490</b>
ZS11	105,91	-174	Žilina	61,509	-51,820	<b>113,329</b>
<b>ZS12</b>	<b>108,52</b>	<b>180</b>	<b>Púchov</b>	<b>60,159</b>	<b>-57,071</b>	<b>117,230</b>
ZS13	100,75	180	Púchov	57,597	-51,296	<b>108,892</b>
ZS14	102,25	180	Púchov	58,161	-52,783	<b>110,944</b>

Tab. 18: Maximální rozkmit napětí hot-spot v patě svaru na modelu T6

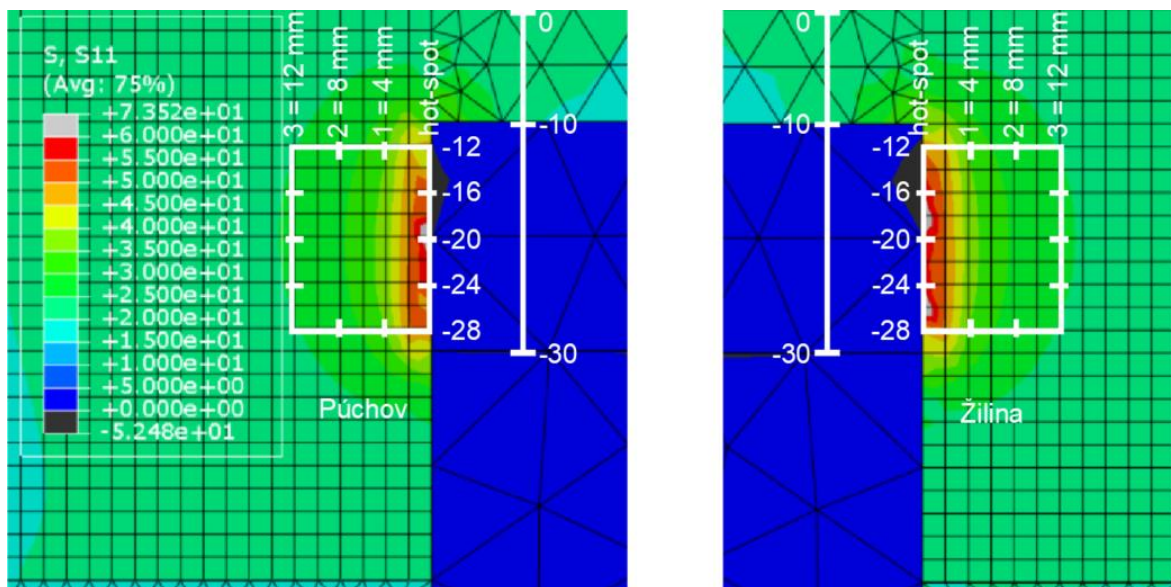




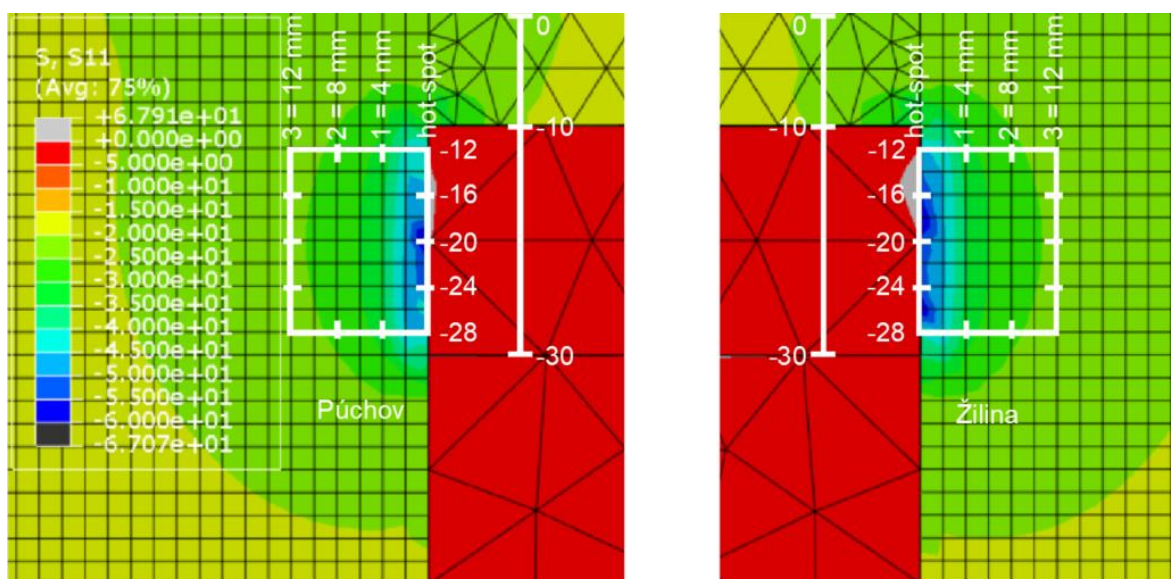
Z rozložení napětí je patrné, že více je namáháno místo připoje konce trubky ke styčnickovému plechu. V této fázi práce však nebyla jasná geometrie tohoto svaru, jež má na napětí v jeho okolí velký vliv. Předpokládá se tedy na základě Expertního posouzení [1] i nadále, že rozhodující bude svar u pásnice trámu.

### 6.5.2. Model s konzolou (T9)

Model T9 byl využit pro zjištění normálového napětí ve směru globální osy „X“ na horní pásnici trámu v blízkosti připojení vrchního plechu konzoly. Zde byla využita metoda hot-spot typu „b“ s kvadratickou extrapolací. Referenční body jsou pro tento postup stanoveny ve vzdálenostech 4, 8 a 12 mm. Hlavní proměnná souřadnice je zde „Y“, přičemž „0“ odpovídá vrchní straně horní pásnice.



Obr. 79: Maximální normálové napětí ve směru X – na T9 (ZS14 v  $t = 2,2$  s)



Obr. 80: Minimální normálové napětí ve směru X – na T9 (ZS14 v  $t = 4,45$  s)



Obr. 79 a 80 ukazují rozložení napětí v okolí přivařeného plechu konzoly (velké modré/červené trojúhelníkové prvky – na svislé ose mezi -10 a -30) na bok horní pásnice trámu (pravidelné čtvercové prvky) se zobrazením zkoumaných oblastí pro metodu hot-spot, kde jsou naznačena místa referenčních bodů (1 = 4 mm, 2 = 8 mm, 3 = 12 mm). Všechny stavy generovaly stejné rozdělení napětí, dynamické dokonce s podobnými velikostmi. Vybraná oblast byla jednotná.

Rovnice pro výpočet napětí na hraně svaru:  $\sigma_{\text{hot-spot}} = 3 \cdot \sigma_1 - 3 \cdot \sigma_2 + \sigma_3$

Zatěžovací stav	$\Delta\sigma_{\text{odhad}}$ [MPa]	hot-spot Y [mm]	strana plechu	$\sigma_{\text{h-s,max}}$ [MPa]	$\sigma_{\text{h-s,min}}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{\text{hot-spot}}$ [MPa]
ZS1	66,16	-24	Púchov	<b>175,636</b>	-	-
ZS2	31,27	-22	Žilina	<b>85,239</b>	-	-
ZS3	35,00	-24	Púchov	47,058	-42,387	<b>89,445</b>
ZS4	35,22	-24	Púchov	47,358	-42,700	<b>90,058</b>
ZS5	35,19	-24	Púchov	47,256	-42,721	<b>89,977</b>
ZS6	35,22	-24	Púchov	47,289	-42,390	<b>89,679</b>
ZS7	36,05	-24	Púchov	48,230	-43,747	<b>91,977</b>
ZS8	34,95	-24	Púchov	47,187	-41,988	<b>89,175</b>
ZS9	35,99	-24	Púchov	48,341	-43,538	<b>91,879</b>
ZS10	35,59	-24	Púchov	47,766	-43,052	<b>90,818</b>
ZS11	36,41	-24	Púchov	49,449	-43,215	<b>92,664</b>
ZS12	37,43	-24	Púchov	50,199	-45,445	<b>95,643</b>
ZS13	36,71	-24	Púchov	48,738	-45,255	<b>93,992</b>
<b>ZS14</b>	<b>37,73</b>	<b>-24</b>	<b>Púchov</b>	<b>50,480</b>	<b>-46,168</b>	<b>96,648</b>

Tab. 19: Maximální rozkmit napětí hot-spot v patě svaru na modelu T9

### 6.5.3. Shrnutí

Odhadované výpočty napětí v kapitole 5.3.3. mají podle předpokladu nižší hodnoty především z důvodu nezahrnutí skutečné geometrie z hlediska koncentrace napětí. Nicméně při seřazení hodnot odhadů a výpočtů podle velikosti si pořadí odpovídá, pouze v pár případech jsou některé stavy prohozeny – viz Tab. 20. To zřejmě může být drobným příspěvkem ostatních vnitřních sil. Potvrdil se ale dominantní účinek momentu na styčnickový plech i prudký nárůst napětí u připojení konzoly. Zajímavé rychlosti by mohly být dle výsledků 100 km/h (ZS14), 80 km/h (ZS12), 70 km/h (ZS11) a 30 km/h (ZS7).

		1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.
T6	odhad	ZS12	ZS7	ZS11	ZS14	ZS13	ZS10	ZS5	ZS4	ZS9	ZS8	ZS3	ZS6
	výpočet	ZS12	ZS7	ZS11	ZS14	ZS13	ZS10	ZS9	ZS5	ZS4	ZS8	ZS3	ZS6
T9	odhad	ZS14	ZS12	ZS13	ZS11	ZS7	ZS9	ZS10	ZS4	ZS6	ZS5	ZS3	ZS8
	výpočet	ZS14	ZS12	ZS13	ZS11	ZS7	ZS9	ZS10	ZS4	ZS5	ZS6	ZS3	ZS8

Tab. 20: Seřazení velikostí odhadovaných a vypočtených napětí přejezdů



## **7. ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKY MOSTU**

Na závěr realizace mostu byly před uvedením do provozu naplánovány zatěžovací zkoušky – statická a dynamická. Zkoušky provedla Fakulta stavební ČVUT v Praze a jejich program [21], [22] zpracoval doc. Ing. Pavel Ryjáček, Ph.D. z katedry ocelových a dřevěných konstrukcí, který pak i celý průběh zkoušek koordinoval.

Z Fakulty stavební spolupracovali na místě s doc. Ryjáčkem i kolegové z Experimentálního centra vedeni doc. Ing. Jiřím Litošem, Ph.D. Ti zajišťovali zejména přípravu a osazení snímačů dráhy, zrychlení a tenzometrů. Také připravili budič pro dynamickou zkoušku.

Během statické zatěžovací zkoušky prováděla Geodetická kancelář Nedoma & Řezník, s.r.o. měření deformací na všech polích mostu.

Dále Ing. Vojtěch Stančík z katedry ocelových a dřevěných konstrukcí měřil deformace levého trámu NK2 metodou digitální korelace obrazu. Záznamy z přejezdů během dynamické zatěžovací zkoušky také vyhodnotil a poskytl je pro tuto práci.

Rozmístění snímačů zrychlení pro přejezdy bylo konzultováno s prof. Ing. Michalem Polákem, CSc. z katedry mechaniky, který se také zkoušek zúčastnil a provedl následné vyhodnocení této části. Diplomové práci poskytl do následné validace hodnoty útlumu.

Z katedry mechaniky ještě do zkoušek zapojen Ing. Tomáš Plachý, Ph.D., jenž se zabýval dynamickými vlastnostmi konstrukce – rozmístěním snímačů zrychlení, průběhem dynamické zatěžovací zkoušky a vyhodnocením vlastních frekvencí a tvarů, které mi pro následnou validaci v diplomové práci poskytl.

Na základě výpočtů z Abaqusu jsem navrhla rozmístění tenzometrů v okolí řešených detailů. Zkoušek jsem se také zúčastnila a podílela se na přípravách snímačů i průběhu měření. Pak jsem provedla vyhodnocení naměřených napětí.

Zatěžovací zkoušky proběhly ve spolupráci se zhotovitelem – firmou FIRESTA-Fišer, rekonstrukce, stavby a.s., jíž zde zastupoval Ing. Antonín Směták.





## 7.1. Sledovaná místa a metody měření

### 7.1.1. Snímače pro vyhodnocení globálního chování

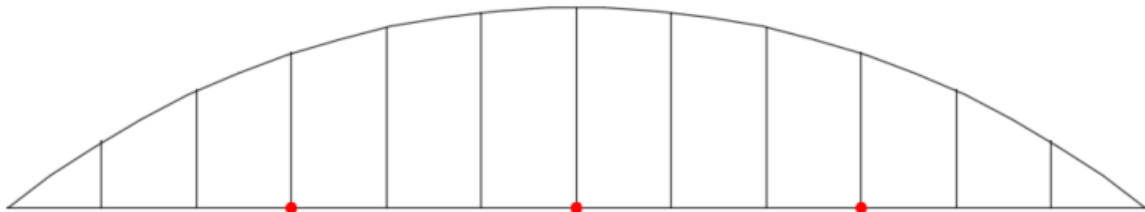
#### Statická zatěžovací zkouška

Deformace nejrozsáhlejší sítě bodů na mostě (na všech polích) byla sledována Geodetickou kanceláří Nedoma & Řezník, s.r.o. Na NK2 a NK3 byly totální stanicí měřeny body na obou trámech v místě uložení, v polovině a ve čtvrtinách rozpětí. Také byly sledovány deformace podpěr. U sprážených konstrukcí byly měřeny nivelačním přístrojem body na římsách v polovině rozpětí a v místě uložení. [23]

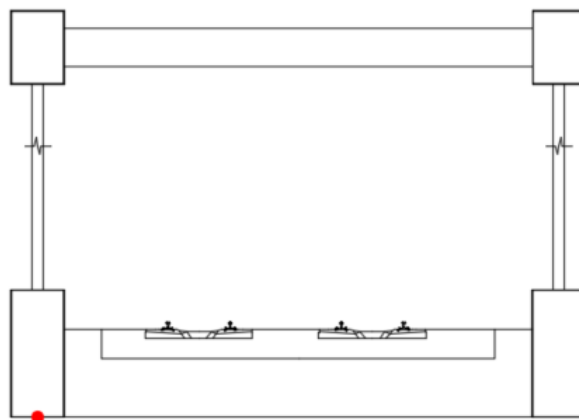


Obr. 81: Rozmístění geodeticky sledovaných bodů [23]

Ing. Vojtěch Stančík sledoval deformace bodů na spodní pásnici levého trámu NK2 systémem digitální korelace obrazu VIC-3D firmy Correlated Solutions (DIC – digital image correlation), jež vychází z principů fotogrammetrického měření. Vybraná místa byla ve čtvrtinách a v polovině rozpětí.



Obr. 82: Rozmístění terčů pro DIC v podélném směru



Obr. 83: Rozmístění terčů pro DIC v příčném směru



Na NK1b byl v polovině rozpětí měřen průhyb na každém nosníku relativními snímači dráhy WA50 Hottinger Baldwin Messtechnik. [21]

Dále bylo ještě sledováno zatlačení ložisek na NK2 a NK1b indukčními LVDT snímači dráhy Micro-Epsilon DTA-3G-CA. [21]

Také byla sledována teplota vzduchu ve stínu a na konstrukci platinovými teploměry Pt 100 třída A a teploměrem ALMEMO 2290-2. Rychlost větru byla měřena pomocí elektronického anemometru s analogovým převodníkem typu ANA 954. [21]

### Dynamická zatěžovací zkouška

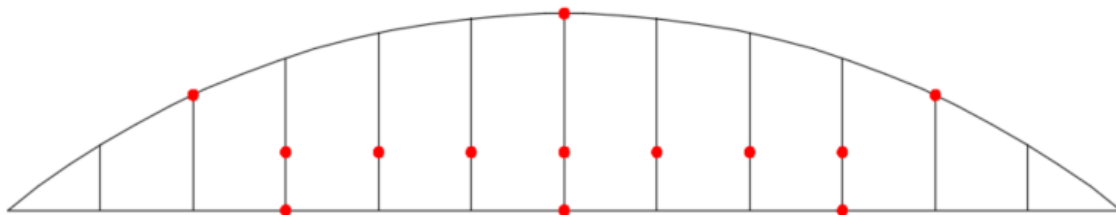
Podobně jako při statické zatěžovací zkoušce probíhalo sledování stejných bodů metodou DIC. Měření i vyhodnocení provedl opět Ing. Vojtěch Stančík.

Pro sledování vodorovné deformace byly osazeny v podélném směru indukční LVDT snímači dráhy Micro-Epsilon DTA-3G-CA u pohyblivých ložisek NK2. [22]

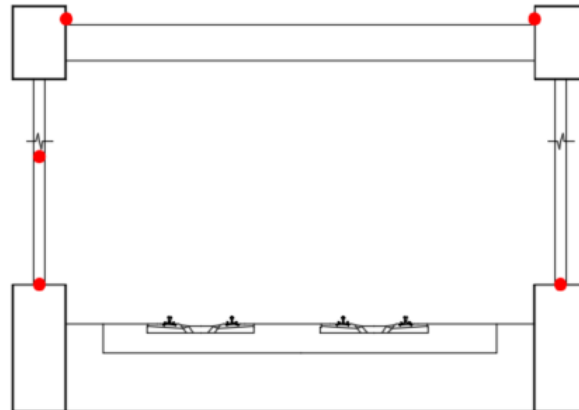
Během dynamické zatěžovací zkoušky bylo využito několik typů snímačů zrychlení. [22]

- 8344 - seismický piezoelektrický snímač zrychlení (Brüel&Kjaer)
- 4507 B005 – miniaturní piezoelektrický snímač zrychlení (Brüel&Kjaer)
- B12/200 – indukční snímač zrychlení (Hottinger-Baldwin Messtechnik)
- TLA 05N – absolutní snímač zrychlení (Techlab, s.r.o.)

Snímače byly pro přejezdy soupravy rozmístěny na trámech ve čtvrtinách a polovině rozpětí. Na obloucích se nacházely v místě portálů a také v polovině rozpětí. Vlevo (u pojezdové koleje) bylo měřeno zrychlení ve svislém i příčném směru, vpravo jen ve svislém. Dále byly snímače podélně osazeny i na 7 středních táhel na levé straně mostu.



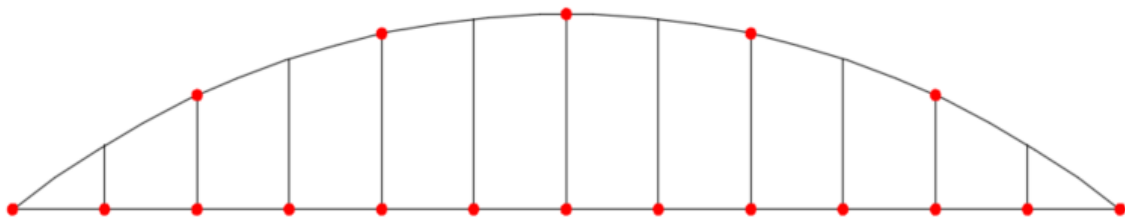
Obr. 84: Rozmístění snímačů zrychlení pro přejezdy v podélném směru



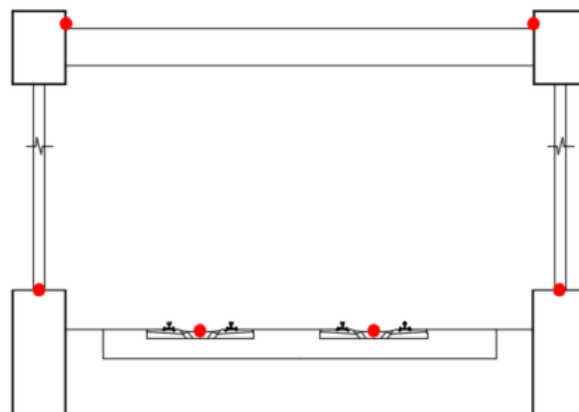
*Obr. 85: Rozmístění snímačů zrychlení pro přejezdy v příčném směru*

Dynamická zkouška s budičem vyžadovala podrobnější síť. Měřilo se ve 4 bodech (na trámech a v osách kolejí) v místě všech 11 závěsů a na koncích mostu. Na obloucích byly měřené body u přípojů rámových ztužidel.

Budič byl umístěn na pravém trámu NK2 mezi 1/4 a 1/3 rozpětí.



*Obr. 86: Rozmístění snímačů zrychlení v podélném směru pro modální analýzu*

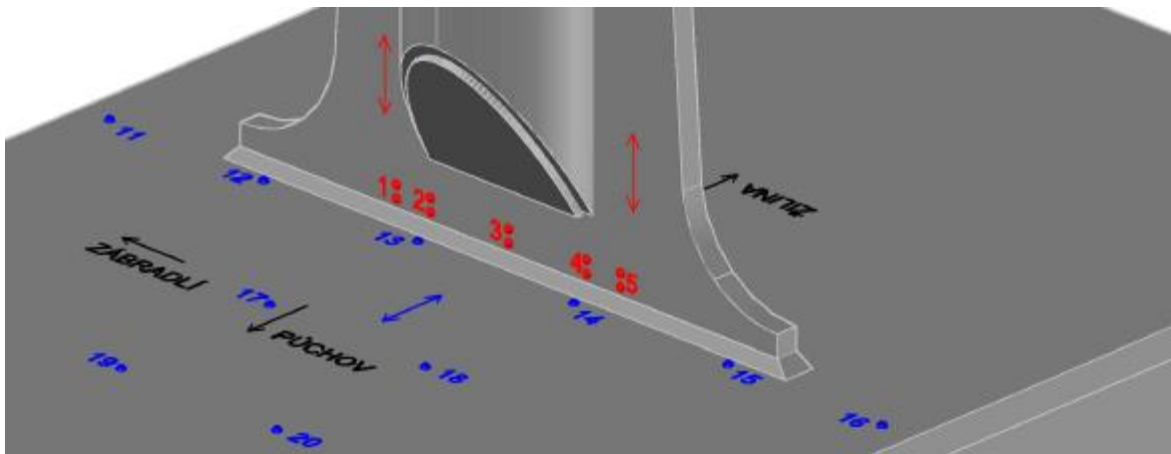


*Obr. 87: Rozmístění snímačů v příčném směru pro modální analýzu*

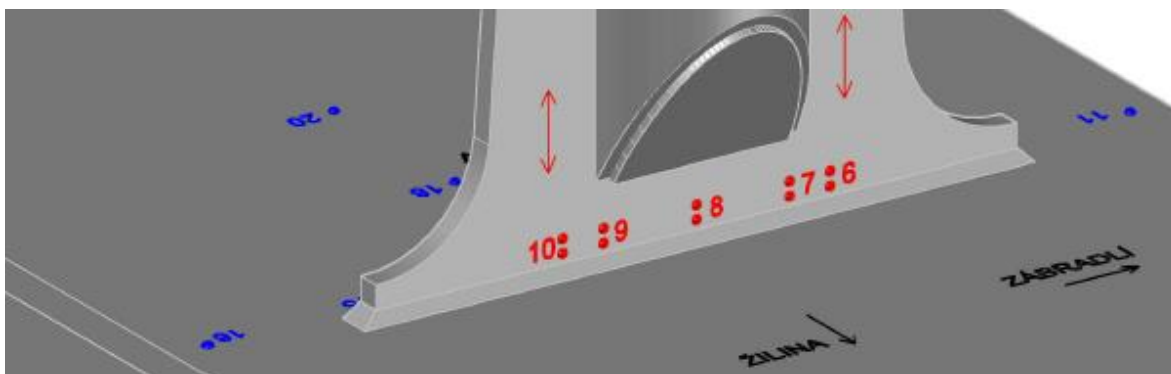


### 7.1.2. Tenzometry pro stanovení napětí na detailech

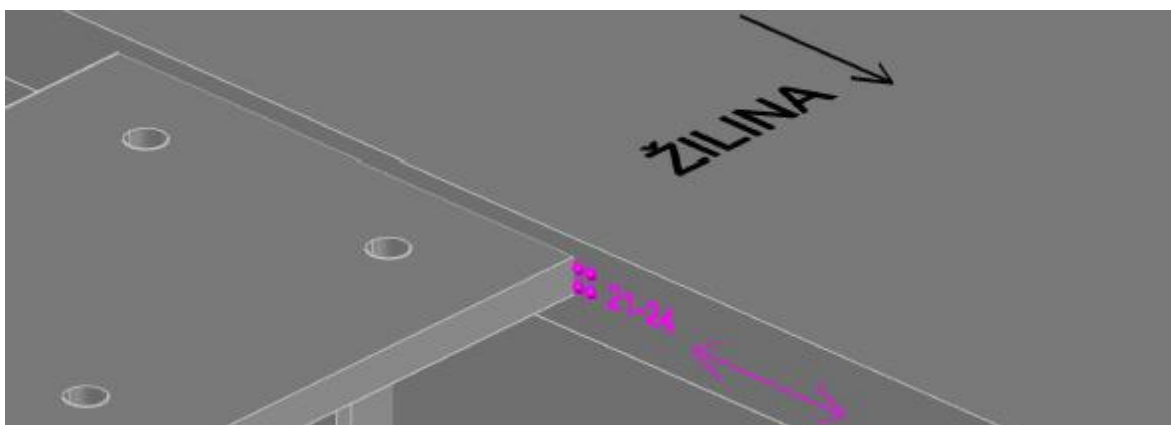
Na zatěžovací zkoušky bylo na základě teoretických výpočtů navrženo rozmístění 34 tenzometrů na konstrukci NK2 (označení konstrukcí dle Obr. 20, str. 38). Všechny tenzometry byly typu HBM 10/120 LY11, uspořádány jako čtvrtmosty se samokompenzací na feritickou ocel a zapojeny do ústředny EMS DV803. [21]



Obr. 88: Tenzometry u připojení levého středního táhla T6 (1/2)



Obr. 89: Tenzometry u připojení levého středního táhla T6 (2/2)

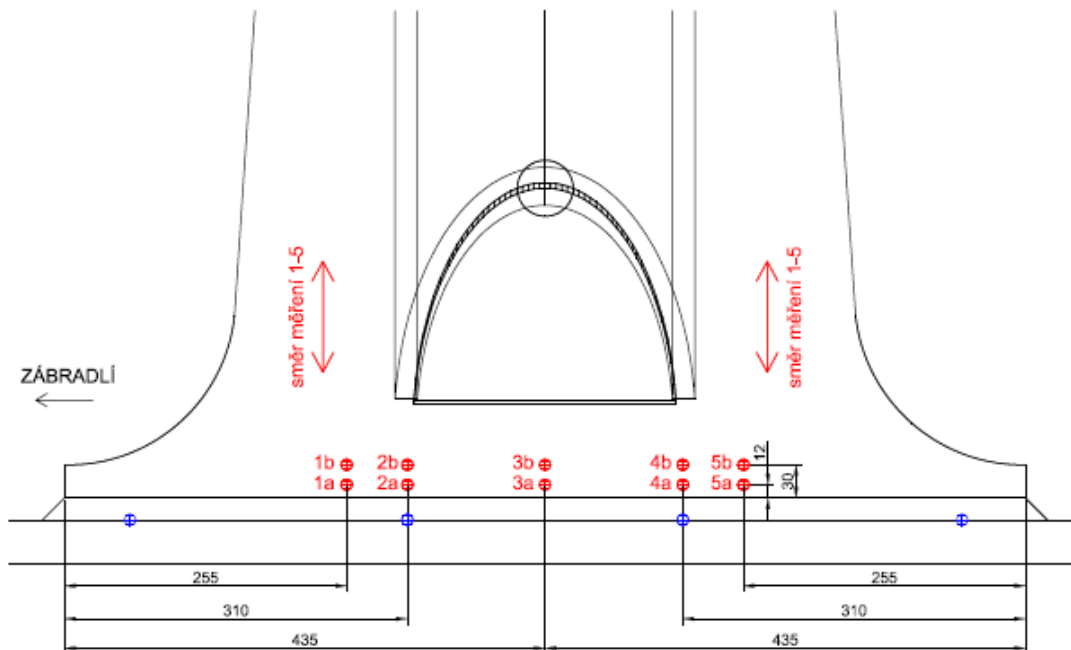


Obr. 90: Tenzometry u konzoly u pravého táhla T9

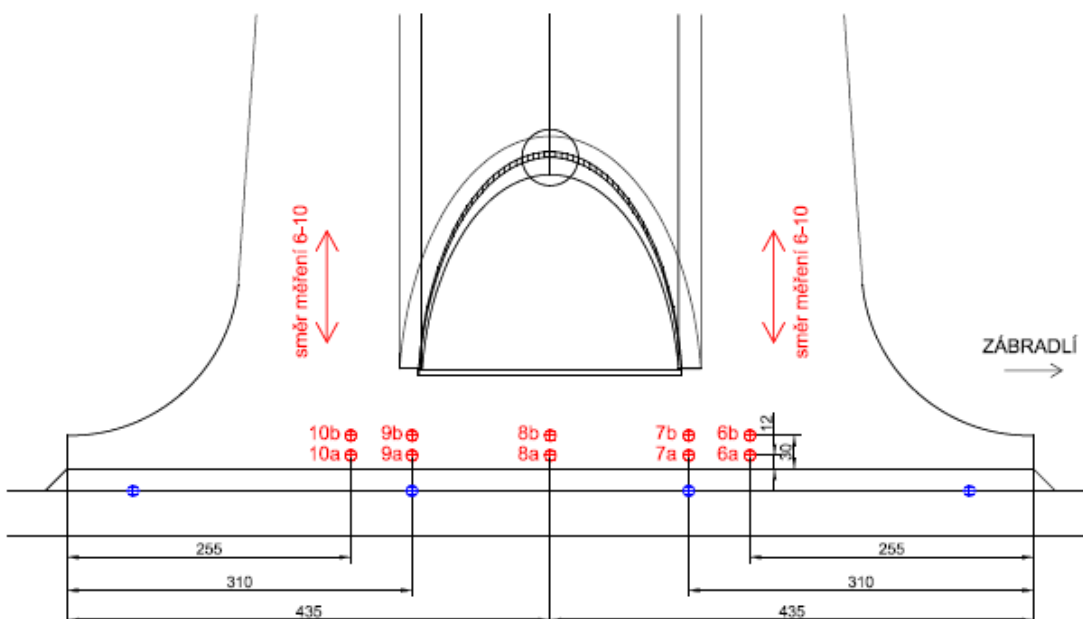


## Únavová životnost železničního mostu v Púchově

První skupina byla umístěna svisle z obou stran na styčnickový plech u trámu připojující střední levé táhlo (viz Obr. 91, 92). Po výšce byl zvolen rastr odpovídající uzlům potřebným pro výpočet metodou hot-spot, tj. 12 mm (označení „a“) a 30 mm (označení „b“) nad hranou svaru. Po šířce byly zvoleny uzly ve středu plechu, pod stěnou trubky a v místě největších očekávaných napětí dle výpočtu v programu Abaqus – viz Příloha E.



Obr. 91: Rozmístění dvojic tenzometrů 1-5 na púchovské straně styčnickového plechu

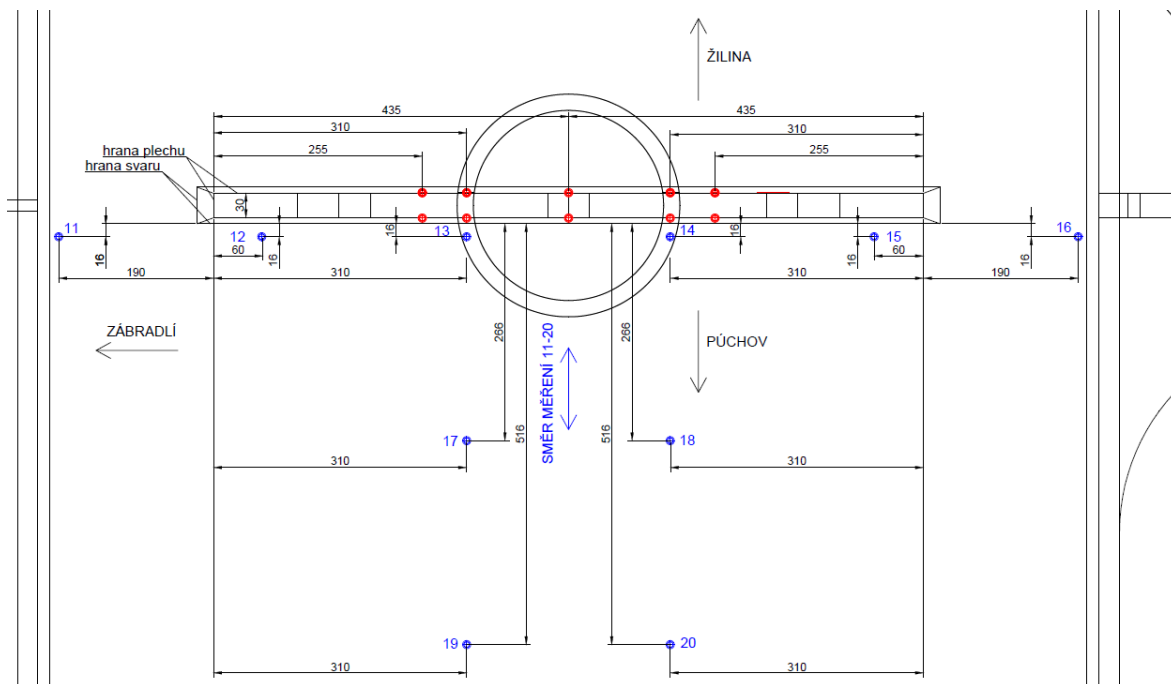


Obr. 92: Rozmístění dvojic tenzometrů 6-10 na žilinské straně styčnickového plechu



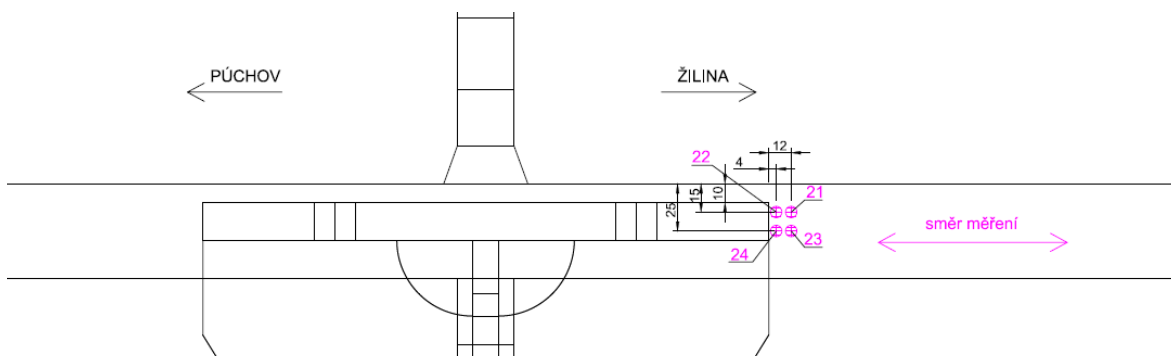
## Únavová životnost železničního mostu v Púchově

Dále bylo pro zjištění napětí na horní pásnici trámu rozmístěno 10 tenzometrů ve vodorovném směru po vzdálenostech 250 mm (viz Obr. 93). Vzdálenější tenzometry mají sloužit pro stanovení napětí v místech, která nejsou ovlivněna geometrií způsobující koncentraci napětí, a tedy nejsou ve výpočtu tolik citlivá. Tím lze ověřit správnost fungování globálního modelu v CSI Bridge a roznášení koncových sil na trámu v širším okolí zkoumaných detailů.



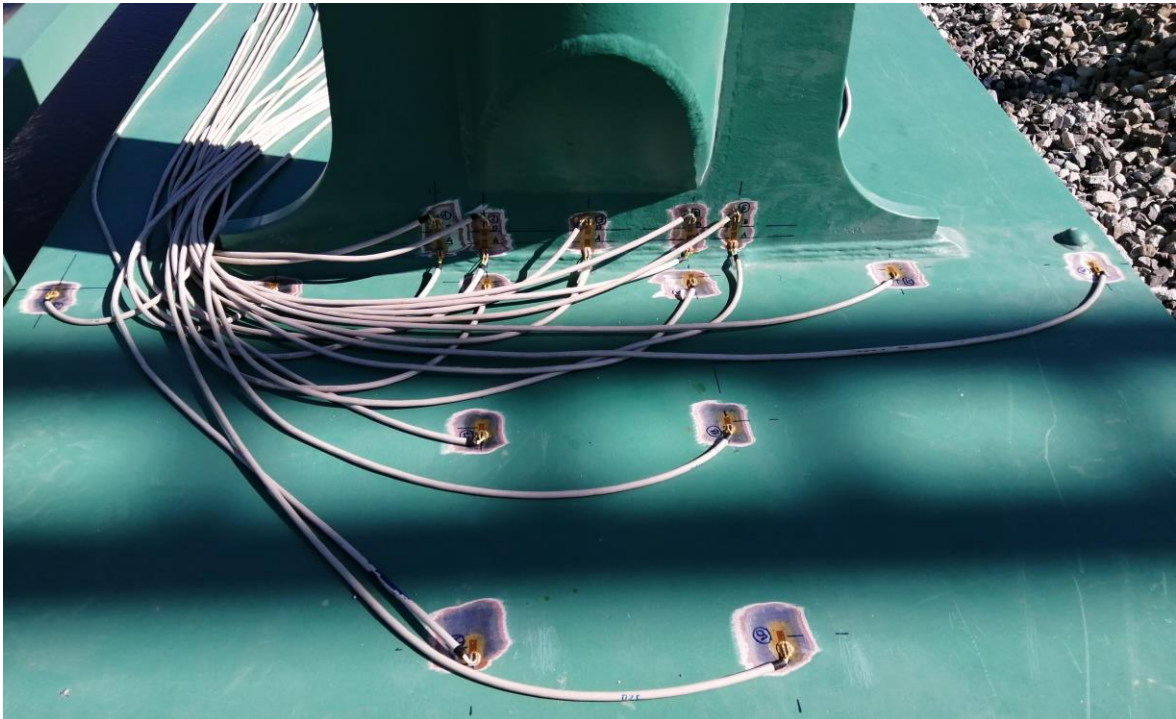
Obr. 93: Rozmístění tenzometrů 11-20 na horní pásnici trámu

Poslední skupina tenzometrů byla umístěna u vrchního plechu konzolky pro sloupek protihlukové stěny u pravého závěsu T9 v místě největší koncentrace napětí (Obr. 94). Z důvodu velkého zahuštění sítě a potřebných uzlů pro výpočet metodou hot-spot na velmi malém prostoru byly zvoleny 2 dvojice tenzometrů nad sebou odpovídající prvním a třetímu referenčnímu uzlu, tj. 4 mm a 12 mm od hrany svaru vzdálených od sebe 10 mm. Mírně větší napětí vycházela na púchovské straně, kde byly tenzometry také navrženy. Po přezkoumání detailu na místě bylo rozhodnuto o přesun tenzometrů na druhou stranu kvůli méně příznivému náběhu svaru.



Obr. 94: Rozmístění tenzometrů 21-24 u konzoly





*Obr. 95: Tenzometry u připojení levého středního táhla T6*



*Obr. 96: Tenzometry u konzoly u pravého táhla (T9)*



**Očekávané hodnoty napětí v místech tenzometrů**

číslo tenzometru	rozkmit napětí $\Delta\sigma$ [MPa]						
	SZZ L/4	SZZ L/2	5 km/h	10 km/h	15 km/h	20 km/h	30 km/h
1a	131,7	35,3	100,7	101,5	97,7	100,3	113,5
1b	129,1	35,8	97,9	98,6	95,3	97,4	110,2
2a	130,7	35,6	100,8	101,6	103,7	100,3	113,6
2b	136,6	33,6	104,8	105,6	107,7	104,3	118,0
3a	122,9	29,6	96,8	97,5	99,3	96,1	108,9
3b	134,1	28,0	105,9	106,7	108,6	105,2	119,1
4a	130,4	34,5	100,8	101,5	103,3	100,0	113,2
4b	136,0	32,8	105,0	105,7	107,6	104,1	117,7
5a	131,1	34,1	100,6	101,4	97,3	99,8	112,9
5b	128,2	34,1	98,0	98,7	95,1	97,2	109,8
6a	-99,6	10,7	100,7	101,5	97,7	100,3	113,5
6b	-95,7	11,8	97,9	98,6	95,3	97,4	110,2
7a	-100,8	9,0	100,8	101,6	103,7	100,3	113,6
7b	-104,6	9,9	104,8	105,6	107,7	104,3	118,0
8a	-100,2	4,2	96,8	97,5	99,3	96,1	108,9
8b	-110,6	3,6	105,9	106,7	108,6	105,2	119,1
9a	-101,8	8,1	100,8	101,5	103,3	100,0	113,2
9b	-105,7	8,7	105,0	105,7	107,6	104,1	117,7
10a	-100,8	9,3	100,6	101,4	97,3	99,8	112,9
10b	-97,2	10,1	98,0	98,7	95,1	97,2	109,8
11	3,6	-13,9	1,7	2,3	3,0	3,0	2,5
12	11,5	-14,3	10,4	10,8	5,7	5,5	6,9
13	21,2	-12,7	18,5	18,9	14,2	13,8	16,3
14	20,5	-13,5	9,4	18,4	13,8	13,3	15,8
15	10,1	-16,0	9,5	9,9	5,1	5,0	6,3
16	2,5	-14,5	1,1	1,3	3,4	3,4	3,0
17	6,4	-17,2	7,7	8,1	2,9	2,9	3,9
18	6,7	-17,3	7,7	8,1	2,9	2,8	4,0
19	-2,2	-20,3	2,1	2,5	3,1	3,1	2,6
20	-1,9	-20,4	1,9	2,4	3,2	3,1	2,7
21	87,9	40,4	45,5	45,8	45,7	45,7	46,9
22	124,6	58,2	64,1	64,5	64,5	64,3	66,0
23	88,0	40,5	45,5	45,8	45,7	45,7	46,9
24	128,7	60,9	65,9	66,3	66,3	66,1	67,8

Tab. 21: Očekávaná napětí při zkouškách (1/2)





číslo tenzometru	rozkmit napětí $\Delta\sigma$ [MPa]						
	40 km/h	50 km/h	60 km/h	70 km/h	80 km/h	90 km/h	100 km/h
1a	101,2	102,2	104,5	111,0	115,0	106,9	108,8
1b	101,9	99,3	101,5	107,9	111,8	103,9	105,8
2a	98,8	102,4	104,6	111,2	115,1	107,0	109,0
2b	105,4	106,7	108,7	115,6	119,6	111,2	113,2
3a	97,5	98,2	100,3	106,8	110,3	102,6	104,4
3b	106,7	104,5	109,8	116,8	120,5	112,3	114,2
4a	101,4	102,0	104,2	111,4	115,1	106,8	108,5
4b	105,5	106,2	108,5	115,9	119,7	111,1	112,9
5a	101,2	111,7	103,9	111,3	115,0	106,6	108,3
5b	98,4	99,0	101,1	108,3	111,8	103,7	105,4
6a	101,2	102,2	104,5	111,0	115,0	106,9	108,8
6b	101,9	99,3	101,5	107,9	111,8	103,9	105,8
7a	98,8	102,4	104,6	111,2	115,1	107,0	109,0
7b	105,4	106,7	108,7	115,6	119,6	111,2	113,2
8a	97,5	98,2	100,3	106,8	110,3	102,6	104,4
8b	106,7	104,5	109,8	116,8	120,5	112,3	114,2
9a	101,4	102,0	104,2	111,4	115,1	106,8	108,5
9b	105,5	106,2	108,5	115,9	119,7	111,1	112,9
10a	101,2	111,7	103,9	111,3	115,0	106,6	108,3
10b	98,4	99,0	101,1	108,3	111,8	103,7	105,4
11	0,6	1,7	1,2	4,9	4,8	2,0	2,0
12	9,0	6,9	7,5	14,2	4,7	6,6	7,1
13	17,3	15,3	16,1	23,1	14,2	15,3	16,1
14	16,9	14,8	15,6	22,6	14,0	14,9	15,5
15	8,3	6,2	6,8	13,3	4,3	5,9	6,3
16	0,2	3,2	1,7	8,1	4,5	2,8	2,4
17	6,6	4,4	4,8	11,3	1,8	3,7	4,3
18	6,4	4,2	4,7	11,4	1,8	3,8	4,4
19	0,8	1,6	1,4	5,2	5,0	2,4	2,0
20	0,6	1,7	1,5	5,0	5,1	2,7	2,1
21	45,4	46,8	46,3	47,2	48,6	47,8	49,2
22	63,9	65,9	65,2	66,5	68,5	67,3	69,3
23	45,4	46,8	46,2	47,2	48,6	47,8	49,2
24	65,7	67,8	67,0	68,3	70,4	69,3	71,3

Tab. 22: Očekávaná napětí při zkouškách T6 (2/2)



## **7.2. Statická zatěžovací zkouška**



*Obr. 97: Soupravy před zahájením statické zatěžovací zkoušky*

### **7.2.1. Průběh zkoušky**

Statická zatěžovací zkouška proběhla 25.8.2020.

Břemena na statickou zatěžovací zkoušku byla lehčí než v předpokládaném výpočtu, kde se uvažovalo s celkovou hmotností každého vagonu 80 t.



Souprava	Hmotnost [t]	
	Levá kolej	Pravá kolej
Lokomotiva	64,000	64,000
Vůz 1	79,205	78,590
Vůz 2	79,205	77,215
Vůz 3	78,520	76,975
Vůz 4	78,525	78,720
Vůz 5	78,190	78,120

Tab. 23: Skutečné hmotnosti břemen pro SZZ

Zatěžovací zkouška se posunula oproti plánu kvůli čekání na ustálení teplotních podmínek, které by měly významný vliv na výsledky. Zatěžovací stavy označené dle programu [21] proběhly v následujícím pořadí.<sup>4</sup>

19:30-20:44 - SZS1 (na krajních konstrukcích NK1, 3 nápravy lokomotiv přesahují z NK1 na NK2)

20:49-21:39 - SZS4 (v DP ZS2 na NK2)

21:43-22:17 - SZS5 (v DP ZS1 na NK3)

22:23-23:03 - SZS2 (na krajních konstrukcích NK4)

23:03-23:11 - SZS6 – navíc, přejezd přes most 5 km/h ze směru od Žiliny do Púchova – z místa posledního zatěžovacího stavu ZS2 zpět před most

23:18-23:58 - SZS3 (v DP ZS1 na NK2)

U zkoušky došlo k jistým nepřesnostem při umístění zatížení kvůli netěsnému sledu vozů způsobeného nájezdem souprav ve směru stoupání. V průběhu zkoušky se podařilo u některých zatěžovacích stavů tento nedostatek vyřešit. Nejvíce se souprava rozšířila o 35 cm mezi první a poslední nápravou. První náprava byla umístěna vždy do správné polohy. Z hlediska tenzometrického měření na NK2 byly při SZS4 posunuty zadní nápravy o 14 a 17 cm, při SZS3 byly přední i zadní nápravy soupravy v předepsané poloze.

### 7.2.2. Výsledky měření

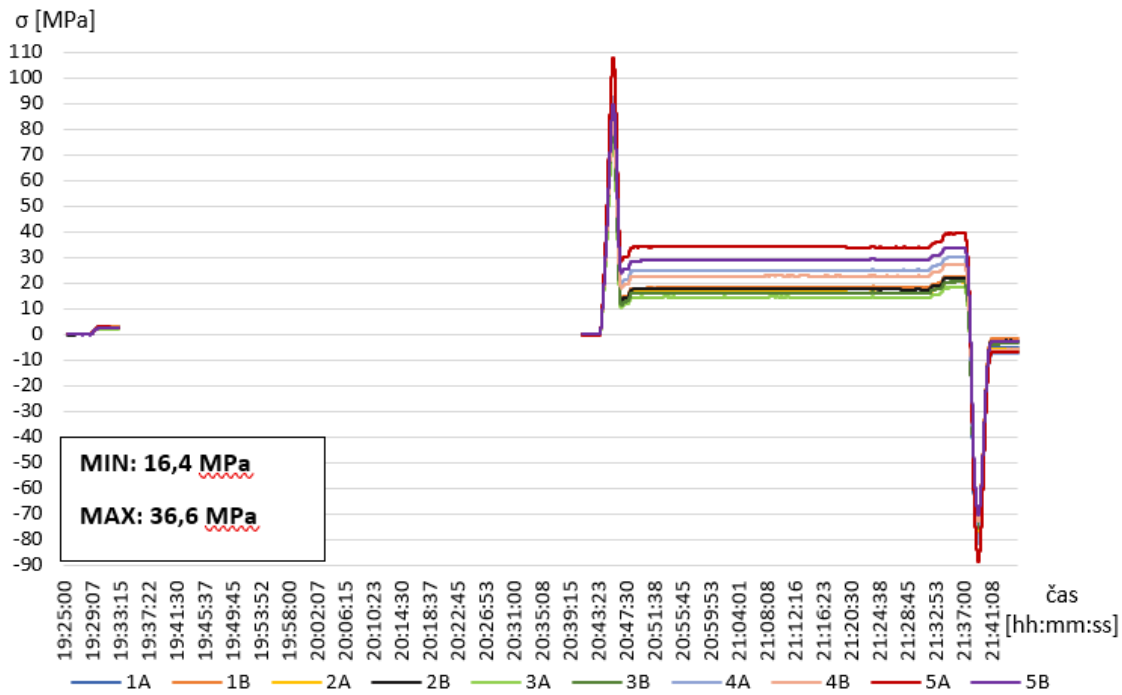
#### SZS4 (dle DP ZS2)

Souprava vlaků se přemístila do SZS4 ihned po dokončení SZS1, kdy na konstrukci NK2 již stály lokomotivy. Oba zatěžovací stavy jsou vykresleny v grafech odděleně s posunutým počátkem do 0 MPa a s odečtením vlivu teploty, která se projevovala ustáleným nárůstem napětí v čase při neměnném zatížení. Vyjmutá část průběhu napětí z grafu je doba, po kterou byly soupravy umístěny v SZS1. Zde docházelo k velkému (nelineárnímu) nárůstu napětí, který byl způsoben teplotou. V této

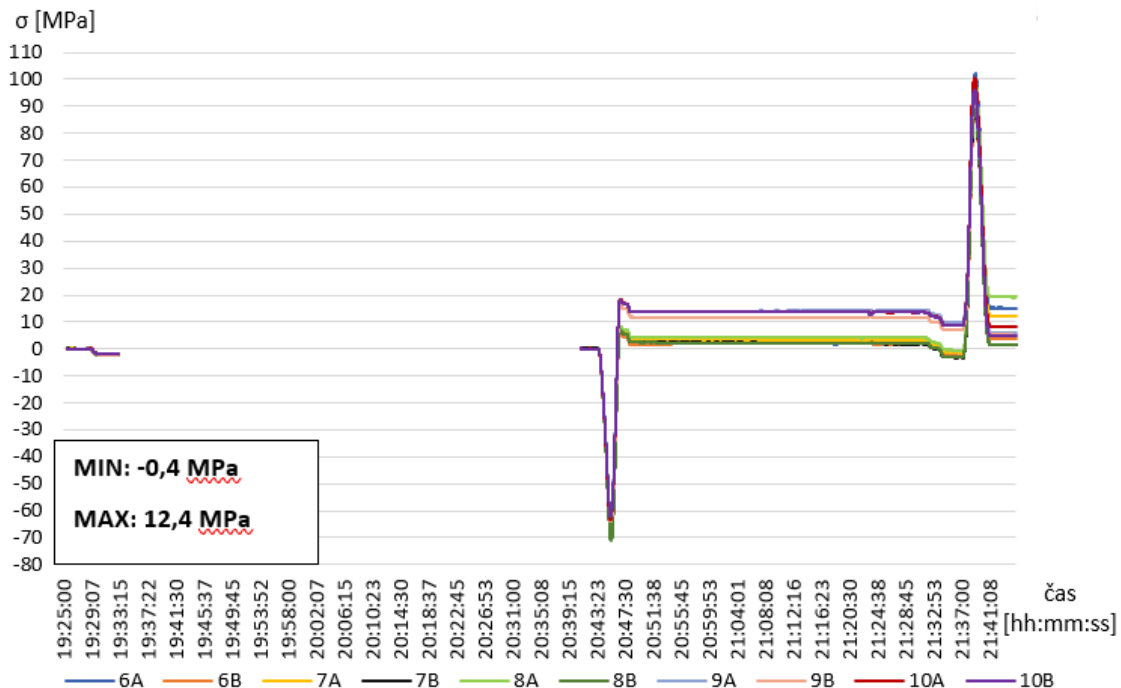
<sup>4</sup> Pro přehlednost jsou zatěžovací stavy z experimentu označeny jako SZS (statické) a DZS (dynamické).



části nemělo smysl se pokoušet vliv teploty odstranit. Minimální a maximální hodnoty vypsané v grafu odpovídají minimální a maximální změně napětí vyvolané příslušným zatěžovacím stavem. Pro SZS4 je v tom obsažen i vliv ze SZS1.



Graf 3: Normálové napětí při SZS1+SZS4 na 1A-5B

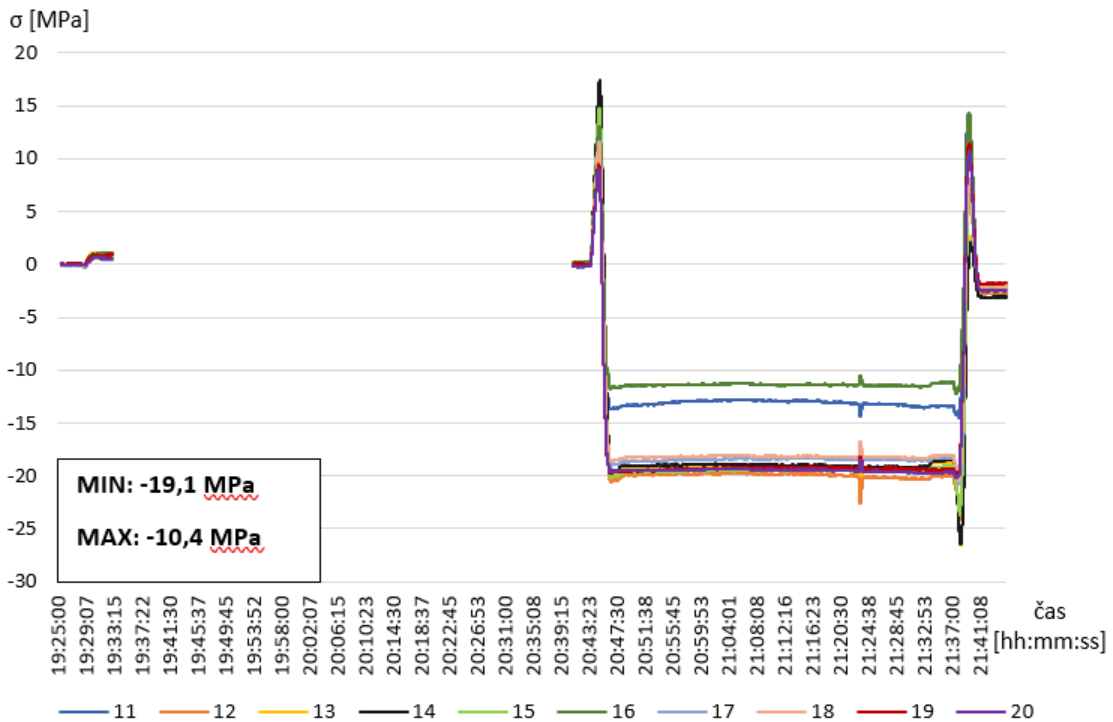


Graf 4: Normálové napětí při SZS1+SZS4 na 6A-10B

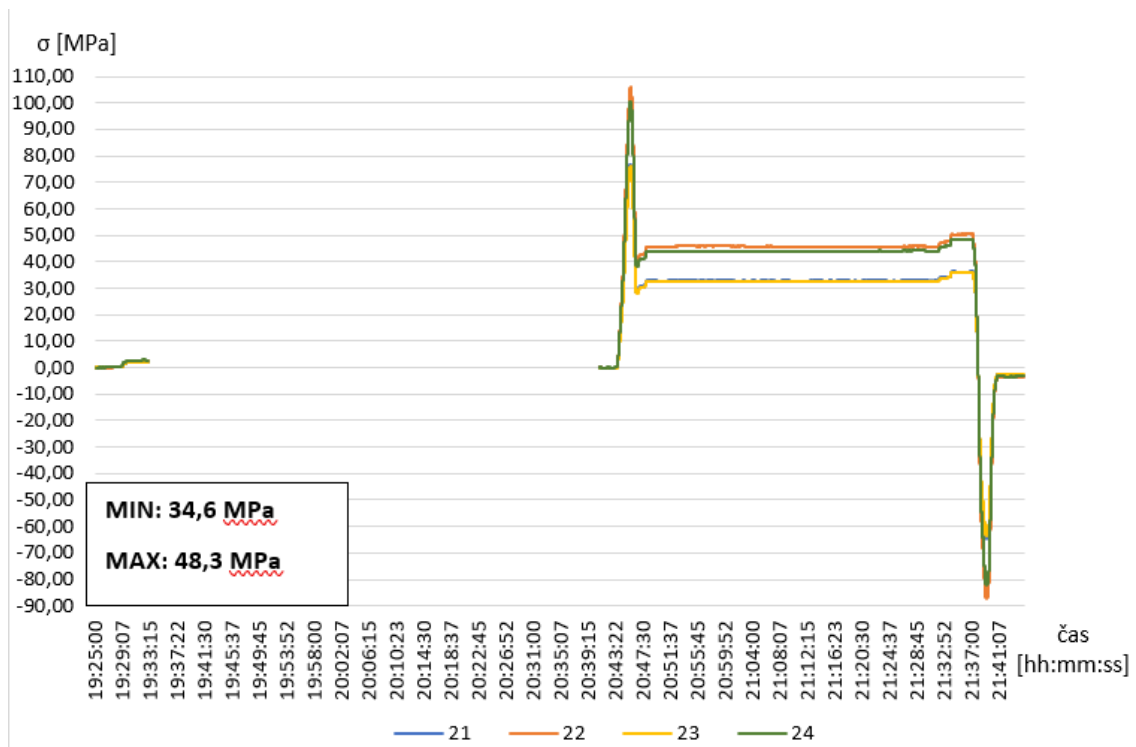


## Únavová životnost železničního mostu v Púchově

V čase 21:23 nastal na tenzometrech 11-20 skok napětí, kterému nelze přiřkládat váhu. U vlaků tou dobou totiž žádný pohyb nenastal, a tedy to nevystihuje chování konstrukce v důsledku SZS4.



Graf 5: Normálové napětí při SZS1+SZS4 na 11-20



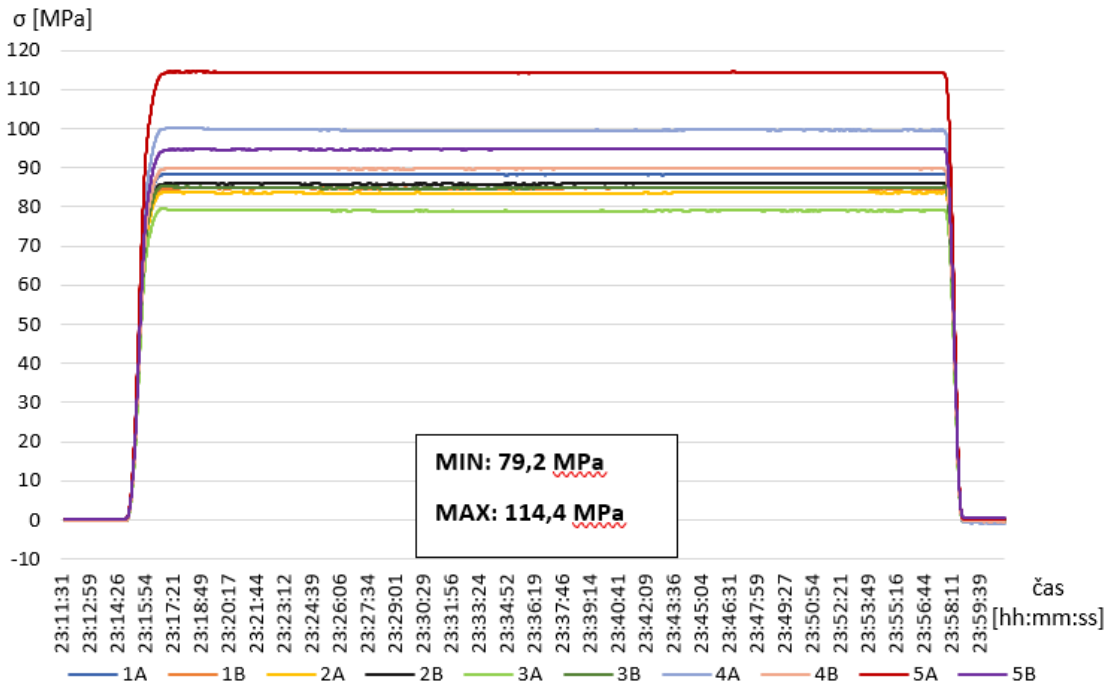
Graf 6: Normálové napětí při SZS1+SZS4 na 21-24



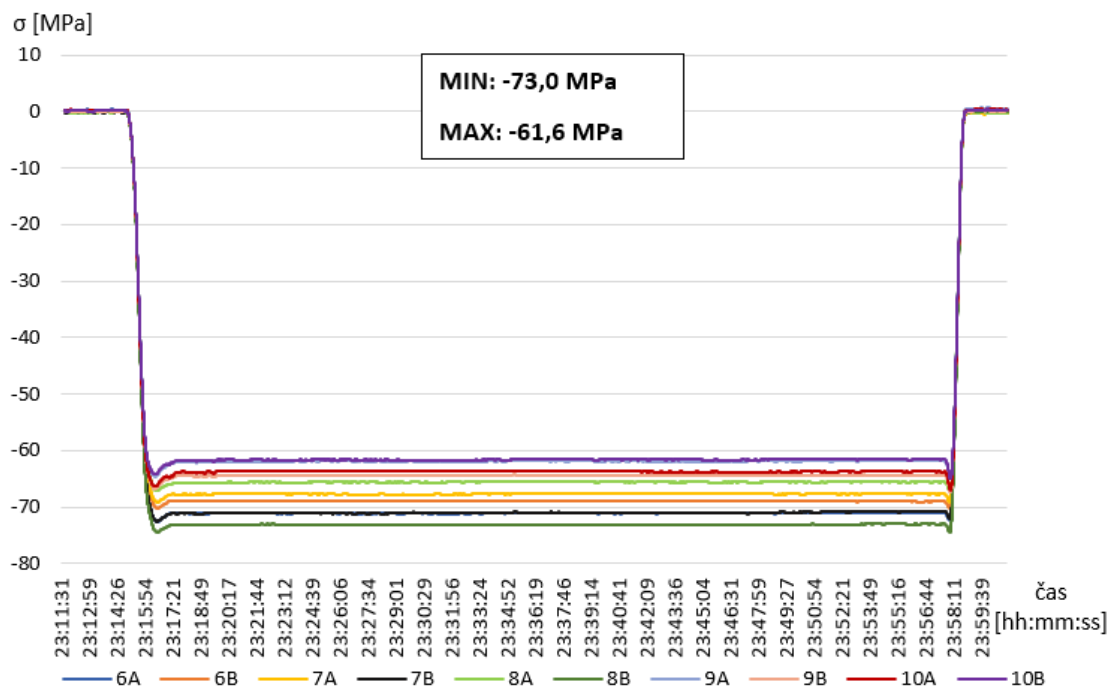


### SZS3 (dle DP ZS1)

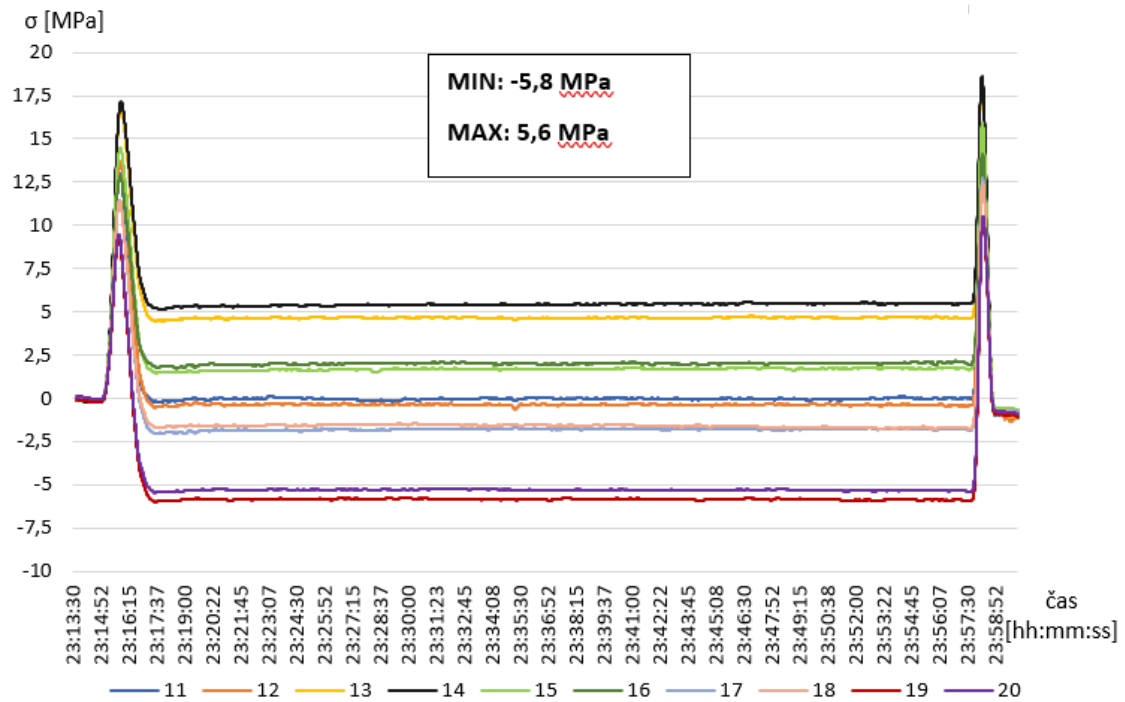
SZS3 nastal již za poměrně ustálené teploty a naměřené hodnoty nevykazují žádné odchylky od očekávaného působení nebo náhlé změny napětí. Vliv teploty byl minimální a byl odstraněn stejným způsobem jako u SZS4.



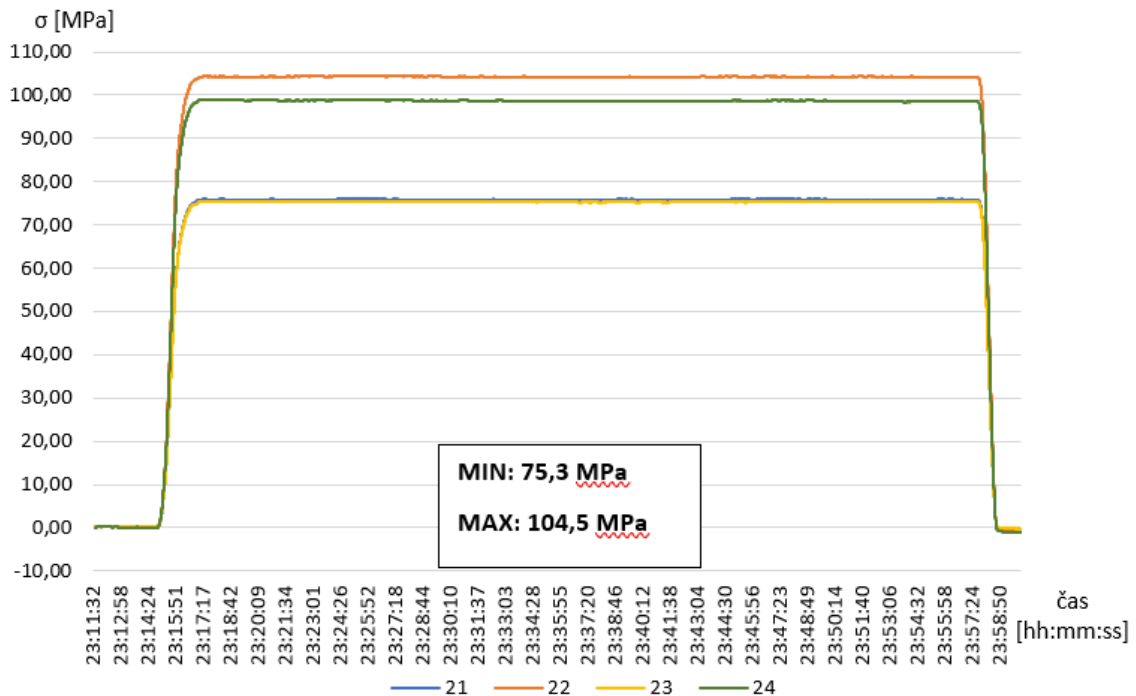
Graf 7: Normálové napětí při SZS3 na 1A-5B



Graf 8: Normálové napětí při SZS3 na 6A-10B



Graf 9: Normálové napětí při SZS3 na 11-20

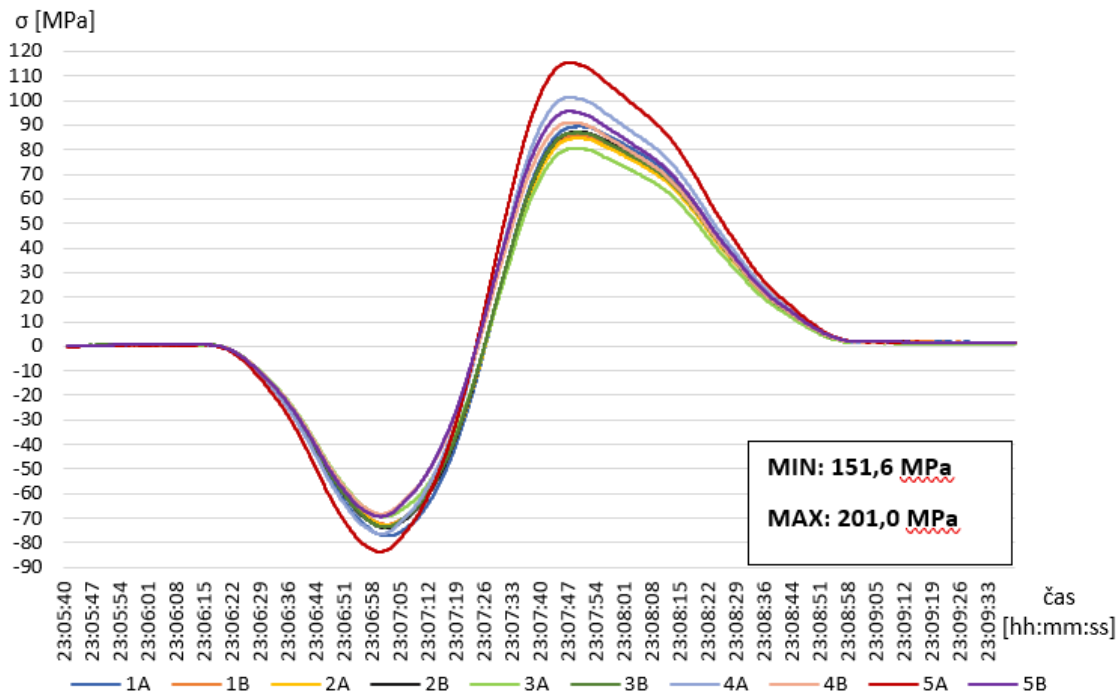


Graf 10: Normálové napětí při SZS3 na 21-24

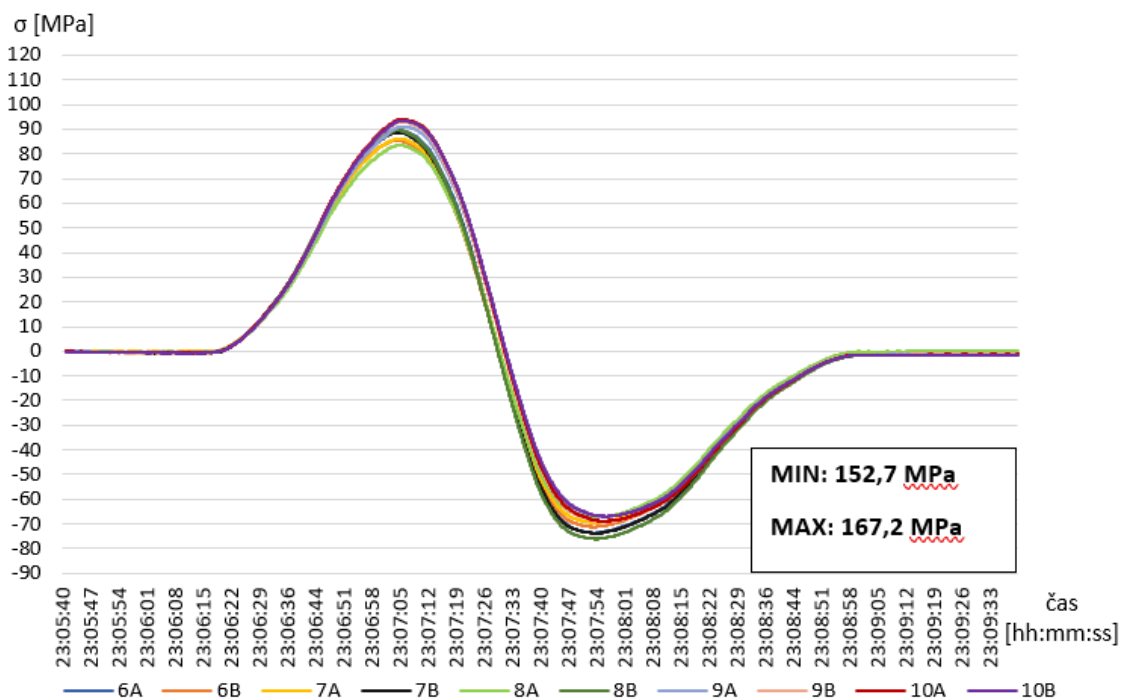


### SZS6 (bez výpočtu v DP)

Tento stav (přejezd rychlostí 5 km/h) nebyl původně v programu uvažován, byl navržen až v průběhu zkoušky. Pro SZS6 nebyla vzhledem ke krátkému trvání vůbec zohledněna teplota. V grafech je uvedena minimální a maximální velikost rozkmitu napětí.

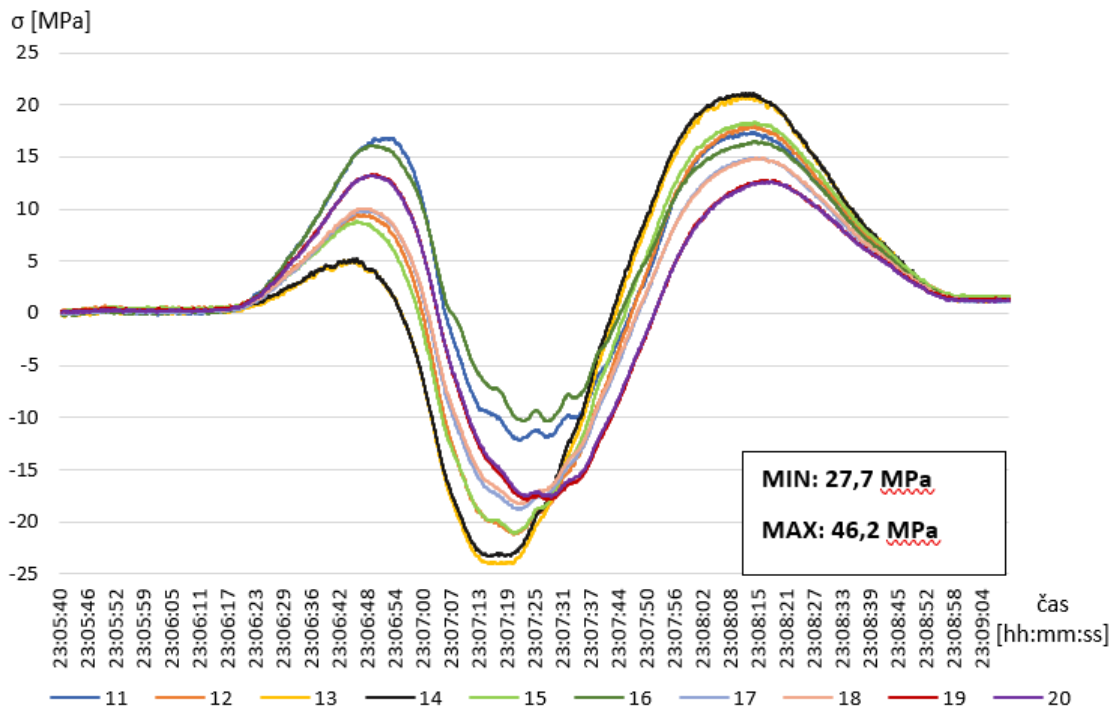


Graf 11: Normálové napětí při SZS6 na 1A-5B

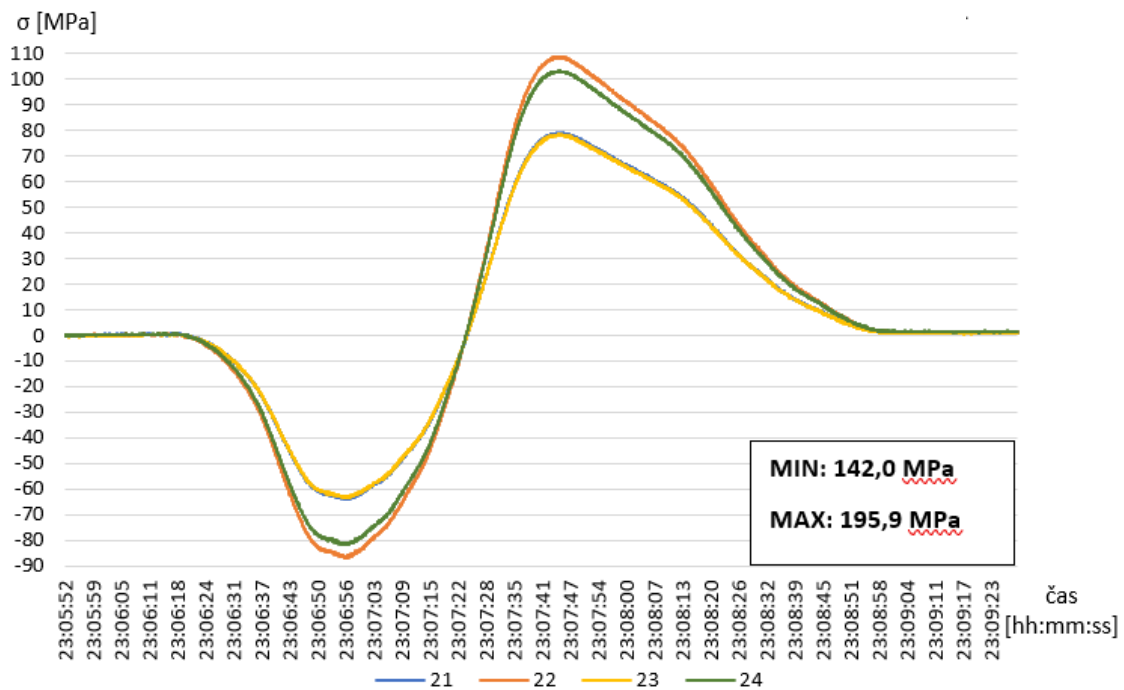


Graf 12: Normálové napětí při SZS6 na 6A-10B





Graf 13: Normálové napětí při SZS6 na 11-20



Graf 14: Normálové napětí při SZS6 na 21-24



### 7.2.3. Porovnání výsledků zkoušky s výpočty

Níže jsou v Tab. 24 vypsána napětí z výpočtu, z experimentu a jejich rozdíl. Vyznačena jsou vyšší napětí v absolutní hodnotě. Výsledky dle výpočtu byly upraveny poměrem skutečného zatížení k předpokládanému, které bylo o něco těžší. Pouze SZS6 nemá srovnání, protože nebyl před zkouškou uvažován.

Nejvyšší shoda byla dosažena u konzoly, kde byly výsledky ze zkoušky nižší o 10–20 %. To může být způsobeno zjištěným příznivějším tvarem svaru.

U styčnickového plechu se jednalo většinou o rozdíly mezi 30–40 %, přičemž experiment opět udává ve většině případů nižší hodnoty. Reálná geometrie přilehlých svarů je však o něco plynulejší, než bylo předpokládáno. Dále je většina napětí způsobena ohybovým momentem, který se dle experimentu jeví nižší. Oproti podkladům jsou navíc prostřední závěsy vzájemně sepnuty lany, jež mohou tento malý, ale významný ohybový moment ve styčnickovém plechu zčásti redukovat. Větší procentuální neshody jsou v místech, kde je napětí nízké. Většinou se zde (ZS2 – tenzometry 6-10) jedná o rozdíl kolem 10 MPa.

Napětí naměřená v horní pásnici trámu v blízkosti styčnickového plechu byla při obou zatěžovacích stavech menší. To znamená, že vliv ohýbaného styčnickového plechu je na pásnici v jeho okolí nižší, než udával výpočet, což potvrzuje i zmíněný plynulejší náběh svaru a reálně nižší ohybový moment ve spodní části styčnickového plechu.

Ačkoliv z porovnání výpočtu s experimentem plyne poměrně velká neshoda velikostí napětí, bylo potvrzeno, že v těchto místech opravdu velká normálová napětí vznikají. U styčnickového plechu je to vlivem ohybového momentu působícího na průřez s nízkým průřezovým modulem. V blízkosti konzoly naproti tomu napětí narůstá v důsledku náhlé změny průřezu. Přesná geometrie detailů a volba sítě může mít také velký vliv na napětí v těchto místech. Zároveň i některé předpoklady tvaru svarů byly nepřesné. Také na závěs působí zřejmě nižší ohybový moment. Dále proto bude upraven globální model v CSI Bridge i podrobné modely v Abaqusu (viz kapitola 8).

Po ukončení zatěžovacích stavů se v grafech objevují zbytková napětí. Jsou většinou do  $\pm 2$  MPa, což lze přisoudit nepřesnému odstranění vlivu teploty v kombinaci s přesností měření poměrné deformace  $\pm 1 \cdot 10^{-6}$  (tj. 0,21 MPa) a kolísání jejich ustálených hodnot v rozmezí  $2 \cdot 10^{-6}$  až  $3 \cdot 10^{-6}$ . Nezanedbatelné poměrné deformace (a tedy přepočtená napětí) se objevují v SZS4 na styčnickovém plechu. Na většině těchto tenzometrů dosahují do 5 MPa, kromě 6A (12,8 MPa), 7A (9,9 MPa), 8A (17,3 MPa) a 10A (6,6 MPa). Při tomto zatěžovacím stavu se na mostě objevilo poprvé takové velké zatížení, které způsobilo v tomto detailu při najetí kolem 90-100 MPa tah, nebo na druhé straně cca 60-70 MPa tlak. Od vlastní tíhy zde může být tah zhruba 35 MPa. Teplota v tento den rozehrála konstrukci až na hodnotu cca 40 °C a dle polohy Slunce se jednalo o nerovnoměrné ohřátí a následné chladnutí. Nejsou k dispozici přesné údaje, ale dle odhadů z průběhu dne se mohlo jednat o změnu napětí cca 20–50 MPa. Při vyšších počátečních pnutích (např. vlivem svařování styčnickového plechu k pásnici a trubky ke styčnickovému plechu) lze tato zbytková napětí přisoudit lokální plastifikaci. Toto lze podložit i tím, že na tenzometrech 1A-5B, které byly nejprve při nájezdu zatížení přes první čtvrtinu rozpětí tažené, zůstávají záporná zbytková napětí (-4,68 MPa až 0 MPa) a na 6A-10B, které byly při nájezdu tlačené, se objevuje převážně zbytkový tah (-0,6 MPa až 17,3 MPa).



# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

## Únavová životnost železničního mostu v Púchově

číslo tenzometru	rozkmit napětí $\Delta\sigma$ [MPa] na T6						
	ZS1/SZS3			ZS2/SZS4			SZS6
	výpočet	zkouška	rozdíl	výpočet	zkouška	rozdíl	zkouška
1a	126,9	88,4	30%	34,0	20,8	39%	168,0
1b	124,4	84,8	32%	34,5	21,2	38%	160,0
2a	125,9	83,7	34%	34,3	18,9	45%	159,0
2b	131,6	86,0	35%	32,4	20,2	38%	162,5
3a	118,4	79,2	33%	28,5	16,4	43%	151,6
3b	129,2	85,1	34%	27,0	18,3	32%	162,5
4a	125,6	99,8	21%	33,2	27,9	16%	179,3
4b	131,0	89,9	31%	31,6	25,0	21%	160,4
5a	126,3	114,4	9%	32,8	36,6	-11%	201,0
5b	123,5	94,9	23%	32,8	31,7	3%	166,1
6a	-95,9	-71,1	26%	10,3	-0,4	103%	164,9
6b	-92,2	-69,0	25%	11,4	0,0	100%	157,9
7a	-97,1	-67,7	30%	8,7	0,8	91%	157,3
7b	-100,8	-70,9	30%	9,5	-0,3	103%	163,8
8a	-96,5	-65,7	32%	4,0	2,3	44%	152,7
8b	-106,5	-73,0	31%	3,5	0,0	100%	167,2
9a	-98,1	-62,0	37%	7,8	12,4	-59%	159,6
9b	-101,8	-64,5	37%	8,4	9,5	-13%	163,4
10a	-97,1	-63,8	34%	9,0	11,9	-33%	164,2
10b	-93,6	-61,6	34%	9,7	11,8	-21%	161,7
11	3,5	-0,2	106%	-13,4	-12,5	7%	31,3
12	11,1	-0,6	105%	-13,8	-19,3	-40%	40,3
13	20,4	4,7	77%	-12,2	-18,2	-49%	46,2
14	19,7	5,6	72%	-13,0	-18,2	-40%	45,6
15	9,7	1,9	81%	-15,4	-19,1	-24%	40,3
16	2,4	2,1	15%	-14,0	-10,4	26%	27,7
17	6,2	-1,8	128%	-16,6	-18,1	-9%	34,7
18	6,5	-1,8	128%	-16,7	-17,6	-6%	34,2
19	-2,1	-5,8	-176%	-19,6	-18,5	6%	32,6
20	-1,8	-5,3	-191%	-19,7	-19,1	3%	32,1
číslo tenzometru	rozkmit napětí $\Delta\sigma$ [MPa] na T9						
	ZS1/SZS3			ZS2/SZS4			SZS6
	výpočet	zkouška	rozdíl	výpočet	zkouška	rozdíl	zkouška
21	84,7	75,8	10%	38,9	34,6	11%	143,2
22	120,0	104,5	13%	56,1	48,3	14%	195,9
23	84,8	75,3	11%	39,0	34,7	11%	142,0
24	124,0	98,8	20%	58,7	46,8	20%	185,4

Tab. 24: Porovnání napětí při SZZ s výpočtem



### Průhyby

Při ZS2 byla ještě konstrukce ovlivněna teplotou a chladnutí konstrukce bylo nerovnoměrné. Je to patrné z velkého rozdílu průhybů mezi levým a pravým trámem při velmi podobném zatížení na obou kolejích.

Při ZS1 byla teplota již ustálená a rozdíly mezi průhyby trámů ve stejném místě příčného řezu už jsou nižší. Pořád se ale jedná o větší rozdíly, než jaké by mohly být dosaženy výpočtem i při uvážení mírně odlišných hmotností souprav.

Vzhledem k vlivu teploty a delší časové prodlevě mezi geodetickými měřeními jsou uvedené průhyby průměry ze zatěžovací a odtěžovací větve příslušného stavu, jejichž rozdíly byly větší, než by se dalo očekávat. Tato úprava je možná zejména proto, že u globálního chování zkoumané konstrukce se nepředpokládají zbytkové deformace, případně jen minimální. V Tab. 25 jsou již vypočtené průhyby upraveny poměrem celkového zatížení skutečného k uvažovanému.

Zatěžovací stav		průhyb v L/4 [mm]		průhyb v L/2 [mm]		průhyb v 3/4 L [mm]	
		levý	pravý	levý	pravý	levý	pravý
ZS1/ SZS3	výpočet	80,1	80,1	25,5	25,5	-54,9	-54,9
	zkouška	67,5	72,0	23,0	24,8	-46,2	-46,7
	rozdíl	16%	10%	10%	3%	16%	15%
ZS2/ SZS4	výpočet	22,3	22,3	50,8	50,8	6,6	6,6
	zkouška	20,0	23,4	43,3	48,1	6,5	9,6
	rozdíl	11%	-5%	15%	5%	2%	-44%

Tab. 25: Porovnání průhybů při SZZ s výpočtem



### 7.3. Dynamická zatěžovací zkouška



Obr. 98: Přejezd soupravy během dynamické zatěžovací zkoušky

#### 7.3.1. Průběh zkoušky

Dynamická zatěžovací zkouška se konala 9.-10.9.2020. 9.9. byly realizovány přejezdy a 10.9. byly zkoumány vlastní frekvence a tvary konstrukce NK2 pomocí budiče.

Souprava pro dynamickou zatěžovací zkoušku měla odlišné lokomotivy, než se předpokládalo. Typ 756 byl nahrazen typem 751. Vzdálenosti náprav jsou shodné, pouze celková délka je o 160 mm kratší, ale především je tato lokomotiva o 3 t těžší. Prostřední vagon byl také zaměněn a měl o 1,01 m větší vzdálenost mezi druhou a třetí nápravou.

Souprava	Hmotnost [t]
	Levá kolej
Lokomotiva	75,000
Vůz	79,400
Lokomotiva	75,000

Tab. 26: Skutečné hmotnosti břemen pro DZZ



Zkouška proběhla pro všechny plánované rychlosti kromě 15 km/h. Přejezdy totiž probíhaly současně i na dalším mostě, který tuto rychlost ve svém programu neměl. Pro poslední přejezd v jednom směru byla zvolena rychlost 75 km/h, protože ve výpočtu vyvolala pro styčnickový plech největší napětí rychlost 80 km/h a při srovnání 70 a 90 km/h se jeví 70 km/h méně příznivě (viz Tab. 20, str. 83).<sup>5</sup>

11:32 – DZS1 (5 km/h) – směr ze Žiliny do Púchova  
11:41 – DZS2 (5 km/h) – směr z Púchova do Žiliny  
12:01 – DZS3 (10 km/h) – směr ze Žiliny do Púchova  
12:09 – DZS4 (10 km/h) – směr z Púchova do Žiliny  
12:22 – DZS5 (20 km/h) – směr ze Žiliny do Púchova  
12:28 – DZS6 (20 km/h) – směr z Púchova do Žiliny  
12:38 – DZS7 (30 km/h) – směr ze Žiliny do Púchova  
12:41 – DZS8 (30 km/h) – směr z Púchova do Žiliny  
12:51 – DZS9 (40 km/h) – směr ze Žiliny do Púchova  
12:58 – DZS10 (40 km/h) – směr z Púchova do Žiliny  
13:09 – DZS11 (50 km/h) – směr ze Žiliny do Púchova  
13:13 – DZS12 (50 km/h) – směr z Púchova do Žiliny  
14:04 – DZS13 (60 km/h) – směr z Púchova do Žiliny  
14:30 – DZS14 (70 km/h) – směr ze Žiliny do Púchova  
14:37 – DZS15 (80 km/h) – směr z Púchova do Žiliny  
15:02 – DZS16 (90 km/h) – směr ze Žiliny do Púchova  
15:08 – DZS17 (100 km/h) – směr z Púchova do Žiliny  
15:39 – DZS18 (100 km/h) – směr ze Žiliny do Púchova  
15:45 – DZS19 (90 km/h) – směr z Púchova do Žiliny  
16:05 – DZS20 (80 km/h) – směr ze Žiliny do Púchova  
16:13 – DZS21 (70 km/h) – směr z Púchova do Žiliny  
16:36 – DZS22 (60 km/h) – směr ze Žiliny do Púchova  
16:47 – DZS23 (75 km/h) – směr z Púchova do Žiliny

### 7.3.2. Výsledky měření

#### Tenzometry 1A-10B

Bylo vybráno pouze několik zatěžovacích stavů s vykreslením průběhu napětí v čase. Tyto stavy jsou v následujících Tab. 27-30 vyznačeny barevně.

<sup>5</sup> Pro přehlednost jsou zatěžovací stavy z experimentu označeny jako SZS (statické) a DZS (dynamické).





Rychlost [km/h]	Zatěžovací stav	Tenzometry									
		1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	5A	5B
5	DZS1	64,5	60,9	60,7	62,0	58,4	62,4	67,2	60,5	75,0	62,4
	DZS2	64,1	63,4	63,0	61,7	57,5	62,0	67,4	60,7	75,0	62,8
10	DZS3	64,3	60,7	60,1	62,2	57,5	62,0	67,4	60,1	75,0	62,2
	DZS4	64,3	60,9	60,5	61,7	57,8	61,7	68,5	60,5	75,2	62,6
20	DZS5	64,7	61,3	60,7	62,4	57,8	62,4	67,8	60,5	75,4	62,6
	DZS6	64,9	60,9	60,9	62,2	58,0	62,4	67,6	60,5	75,4	62,4
30	DZS7	64,7	61,1	61,1	62,2	57,8	62,2	67,4	60,3	75,0	62,4
	DZS8	64,3	61,3	60,7	62,4	57,8	62,4	68,0	61,1	75,8	63,0
40	DZS9	64,3	60,7	60,3	61,3	57,1	62,2	67,6	60,7	75,6	62,8
	DZS10	65,3	61,5	61,3	62,8	58,6	62,6	68,3	60,9	76,7	63,2
50	DZS11	65,9	62,8	62,2	63,4	59,4	63,8	69,7	62,2	77,3	64,3
	DZS12	65,7	62,4	62,2	63,4	59,2	63,2	69,3	62,0	77,5	64,5
60	DZS13	68,3	64,9	64,3	65,5	61,3	65,5	72,2	64,7	80,4	67,0
	DZS22	68,0	64,5	63,8	65,1	61,1	64,9	71,0	63,4	78,8	65,5
70	DZS14	70,1	66,6	65,5	67,4	62,6	67,2	74,6	66,2	82,3	68,5
	DZS21	73,5	69,7	69,3	71,0	66,2	70,8	77,7	69,7	87,6	72,2
75	DZS23	70,8	67,0	66,6	68,3	63,4	67,0	74,8	67,0	83,4	68,7
80	DZS15	70,4	67,0	66,8	68,5	63,2	67,6	74,8	66,6	83,4	68,7
	DZS20	66,8	63,4	63,0	64,5	59,9	64,3	70,8	63,2	78,5	64,9
90	DZS16	70,6	67,2	66,6	68,0	63,6	68,0	74,1	67,0	83,4	68,9
	DZS19	66,6	63,2	63,2	64,3	60,1	64,3	70,4	63,2	78,5	65,1
100	DZS17	68,0	64,7	63,8	65,3	60,5	64,9	72,0	64,9	81,5	66,8
	DZS18	69,3	65,5	64,9	66,2	62,0	65,7	72,5	64,5	80,6	66,8

Tab. 27: Rozkmitý napětí [MPa] na tenzometrech 1A-5B pro všechny ZS

Rychlost [km/h]	Zatěžovací stav	Tenzometry									
		1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	5A	5B
5	DZS1/2	64,3	62,2	61,8	61,8	58,0	62,2	67,3	60,6	75,0	62,6
10	DZS3/4	64,3	60,8	60,3	62,0	57,6	61,8	67,9	60,3	75,1	62,4
20	DZS5/6	64,8	61,1	60,8	62,3	57,9	62,4	67,7	60,5	75,4	62,5
30	DZS7/8	64,5	61,2	60,9	62,3	57,8	62,3	67,7	60,7	75,4	62,7
40	DZS9/10	64,8	61,1	60,8	62,1	57,9	62,4	67,9	60,8	76,1	63,0
50	DZS11/12	65,8	62,6	62,2	63,4	59,3	63,5	69,5	62,1	77,4	64,4
60	DZS13/22	68,1	64,7	64,1	65,3	61,2	65,2	71,6	64,1	79,6	66,3
70	DZS14/21	71,8	68,1	67,4	69,2	64,4	69,0	76,1	67,9	84,9	70,4
75	DZS23	70,8	67,0	66,6	68,3	63,4	67,0	74,8	67,0	83,4	68,7
80	DZS15/20	68,6	65,2	64,9	66,5	61,5	65,9	72,8	64,9	81,0	66,8
90	DZS16/19	68,6	65,2	64,9	66,2	61,8	66,2	72,2	65,1	81,0	67,0
100	DZS17/18	68,7	65,1	64,4	65,7	61,2	65,3	72,2	64,7	81,1	66,8

Tab. 28: Průměrné rozkmitý napětí [MPa] na tenzometrech 1A-5B pro stejné rychlosti



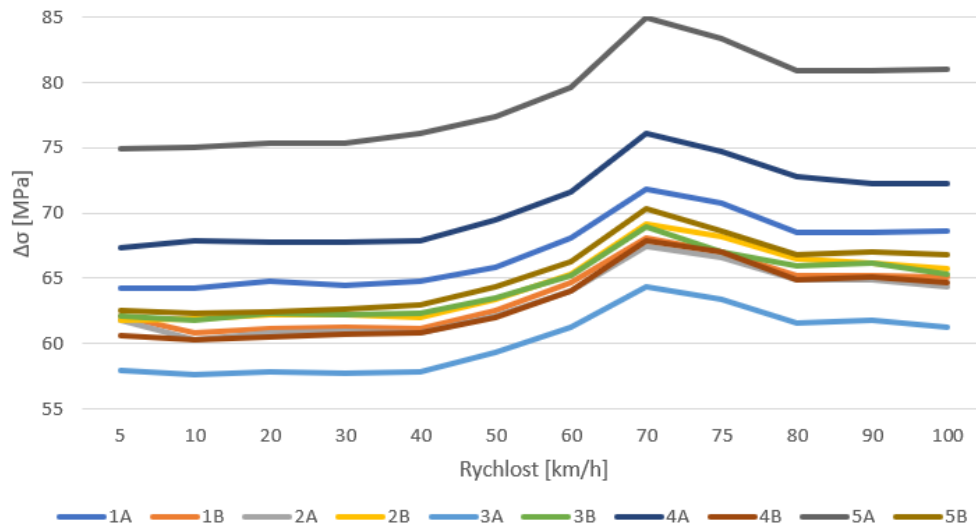
Rychlost [km/h]	Zatěžovací stav	Tenzometry									
		6A	6B	7A	7B	8A	8B	9A	9B	10A	10B
5	DZS1	64,1	60,7	60,3	62,8	58,6	64,1	60,5	62,0	62,6	61,7
	DZS2	63,0	60,7	59,9	62,4	57,8	63,4	59,9	61,5	62,0	60,9
10	DZS3	62,8	60,1	59,6	62,8	57,5	63,2	59,9	61,3	61,3	61,1
	DZS4	63,4	60,5	60,5	63,0	59,0	64,3	60,7	62,2	62,4	61,3
20	DZS5	63,6	61,1	60,5	63,2	58,2	63,8	60,5	62,2	62,4	61,3
	DZS6	63,8	60,9	60,1	63,2	58,2	64,3	60,9	62,0	62,2	61,1
30	DZS7	63,8	61,1	60,3	62,8	58,2	64,1	60,9	62,6	62,8	61,7
	DZS8	63,2	60,5	60,5	62,8	57,5	63,6	60,1	61,5	62,0	60,9
40	DZS9	62,8	60,5	59,6	62,2	57,5	63,4	60,5	62,0	62,2	61,7
	DZS10	64,1	60,9	60,5	63,0	58,4	64,3	60,9	62,2	62,4	61,7
50	DZS11	66,2	63,4	63,2	65,7	60,1	65,9	62,8	63,8	64,5	63,4
	DZS12	64,9	61,7	61,3	64,5	60,1	64,9	62,6	63,8	64,9	63,4
60	DZS13	66,6	64,5	63,6	66,2	61,5	67,4	63,2	65,3	64,7	63,8
	DZS22	67,0	64,1	63,8	66,8	61,5	67,8	64,7	66,2	66,6	65,1
70	DZS14	68,9	65,3	65,7	68,0	62,8	69,1	65,7	67,6	68,3	67,0
	DZS21	72,5	69,1	68,9	72,0	66,6	72,5	69,1	70,8	71,4	70,4
75	DZS23	68,0	65,3	64,7	67,4	63,2	69,1	64,9	67,0	67,0	65,7
80	DZS15	68,9	65,7	65,3	67,6	62,8	68,9	64,9	67,0	67,0	65,9
	DZS20	65,7	62,8	62,8	64,9	60,3	65,7	62,8	64,5	65,1	64,5
90	DZS16	69,5	66,6	65,9	68,5	63,2	69,3	66,2	68,0	68,3	67,0
	DZS19	65,5	62,8	62,6	65,1	60,9	66,4	62,8	64,5	64,7	63,6
100	DZS17	66,4	63,8	63,0	65,7	60,9	66,4	63,4	65,1	65,3	64,5
	DZS18	67,8	64,9	64,7	67,4	62,6	68,5	65,9	67,4	68,0	66,6

Tab. 29: Rozkmitý napětí [MPa] na tenzometrech 6A-10B pro všechny ZS

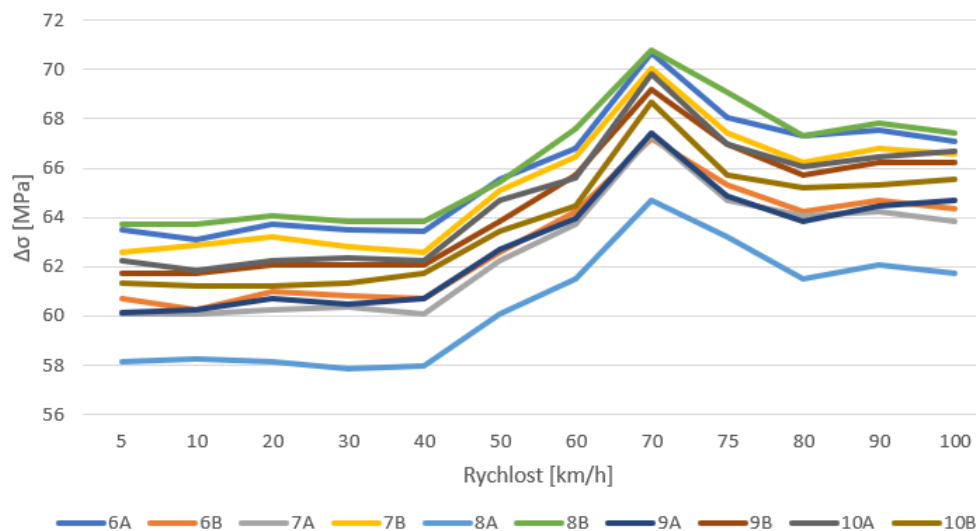
Rychlost [km/h]	Zatěžovací stav	Tenzometry									
		6A	6B	7A	7B	8A	8B	9A	9B	10A	10B
5	DZS1/2	63,5	60,7	60,1	62,6	58,2	63,7	60,2	61,7	62,3	61,3
10	DZS3/4	63,1	60,3	60,1	62,9	58,3	63,7	60,3	61,7	61,8	61,2
20	DZS5/6	63,7	61,0	60,3	63,2	58,2	64,1	60,7	62,1	62,3	61,2
30	DZS7/8	63,5	60,8	60,4	62,8	57,9	63,8	60,5	62,1	62,4	61,3
40	DZS9/10	63,4	60,7	60,1	62,6	58,0	63,8	60,7	62,1	62,3	61,7
50	DZS11/12	65,5	62,6	62,3	65,1	60,1	65,4	62,7	63,8	64,7	63,4
60	DZS13/22	66,8	64,3	63,7	66,5	61,5	67,6	63,9	65,7	65,6	64,5
70	DZS14/21	70,7	67,2	67,3	70,0	64,7	70,8	67,4	69,2	69,8	68,7
75	DZS23	68,0	65,3	64,7	67,4	63,2	69,1	64,9	67,0	67,0	65,7
80	DZS15/20	67,3	64,3	64,1	66,3	61,5	67,3	63,8	65,7	66,0	65,2
90	DZS16/19	67,5	64,7	64,3	66,8	62,1	67,8	64,5	66,3	66,5	65,3
100	DZS17/18	67,1	64,4	63,8	66,6	61,7	67,4	64,7	66,3	66,7	65,5

Tab. 30: Průměrné rozkmitý napětí [MPa] na tenzometrech 6A-10B pro stejné rychlosti





Graf 15: Průměrný rozkmit napětí na 1A-5B



Graf 16: Průměrný rozkmit napětí na 6A-10B

Dle uvedených tabulek a grafů je vidět, že nejnižší hodnoty rozkmitů napětí dosahují rychlosti od 5 do 40 km/h. Pro rychlosti od 5 do 60 km/h mají oba přejezdy se stejnou rychlostí velmi podobné rozkmit napětí. Větších rozptylů nabývají zatěžovací stavy s rychlostmi 70 až 100 km/h. Zároveň to jsou nejzajímavější zatěžovací stavy, které vyvolaly největší rozkmit napětí, a proto jsou právě pro ně níže uvedeny grafy průběhu napětí v čase.

Ve výpočtech byl zaveden jen jeden směr přejezdu z Púchova do Žiliny. Rychlost 75 km/h nebyla původně součástí programu, byla navržena až na místě, proto nemá srovnání s výpočtem.

Ve většině zatěžovacích stavů jsou patrné větší výkmity po delší době, kdy souprava byla mimo most. Tento jev nastává převážně cca po 1 minutě a byl přisouzen rušení způsobenému propojením kolejových obvodů při přejezdu vlaku



# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

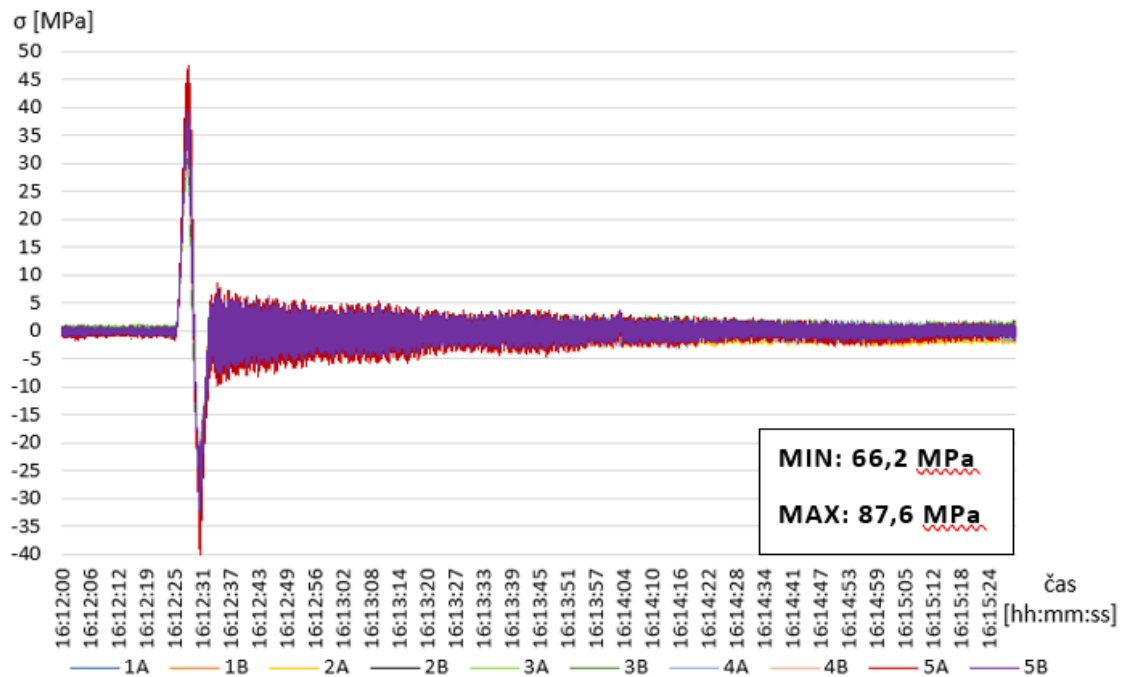
Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

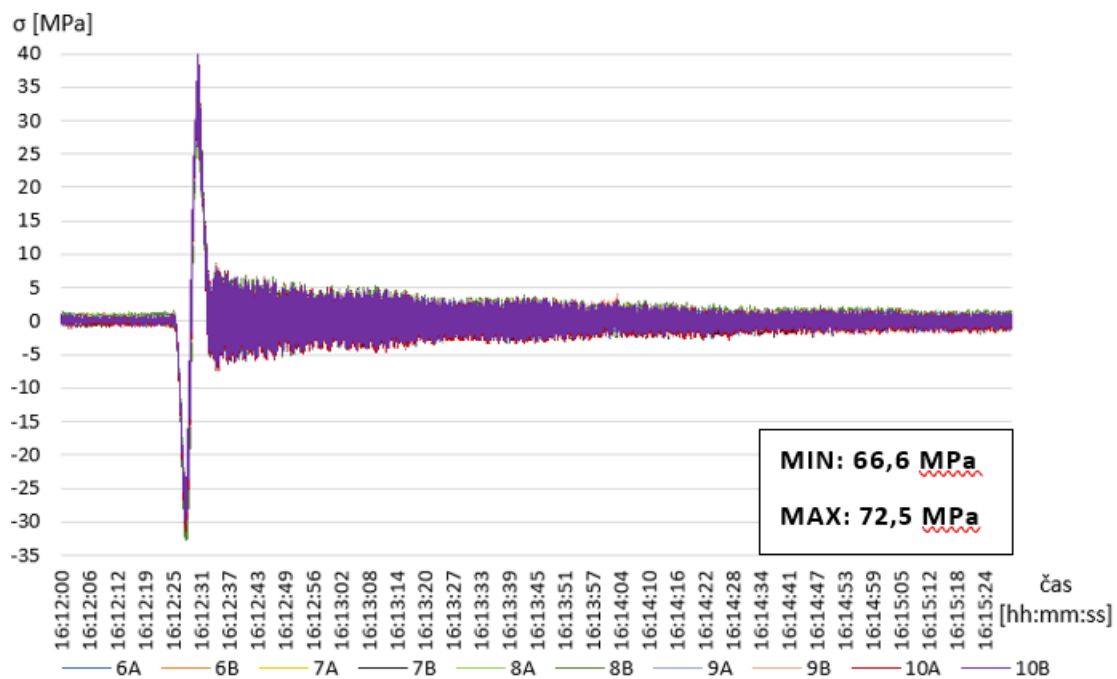
## Únavová životnost železničního mostu v Púchově

přes izolovaný styk. Na obou stranách styčnickového plechu zde vzniká tah, který by musel být způsobený normálovou silou, jež by nemohla vyvolat takové vysoké napětí na tak krátký okamžik. Toto bylo potvrzeno i faktem, že jiné poblíž umístěné snímače nic takového nezaznamenaly. V grafech níže jsou vpravo dole vypsány minimální a maximální rozkmity napětí na tenzometrech.

### 70 km/h – DZS21 (Púchov → Žilina, v DP ZS11)



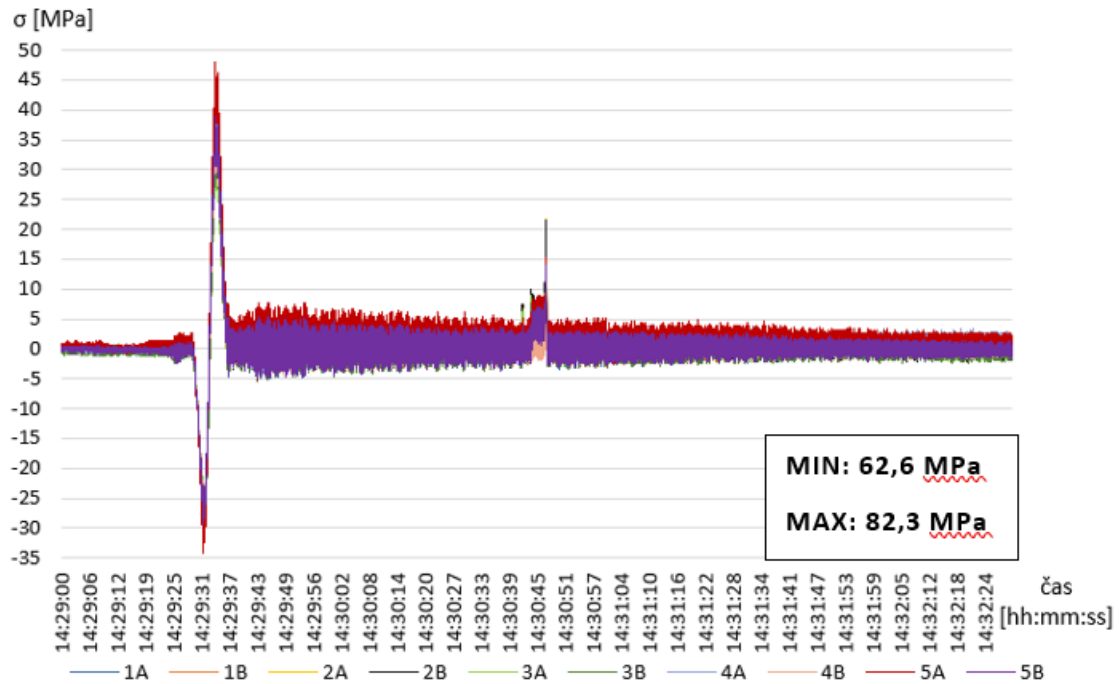
Graf 17: Normálové napětí při DZS21 na 1A-5B



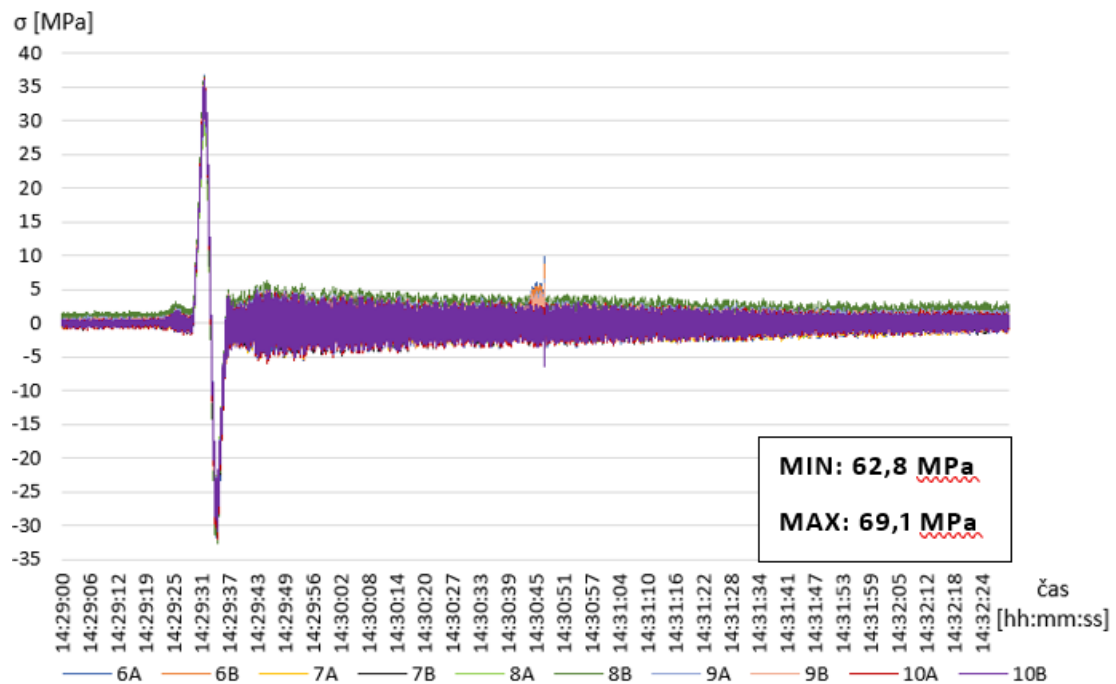
Graf 18: Normálové napětí při DZS21 na 6A-10B



70 km/h – DZS14 (Žilina → Púchov)



Graf 19: Normálové napětí při DZS14 na 1A-5B



Graf 20: Normálové napětí při DZS14 na 6A-10B



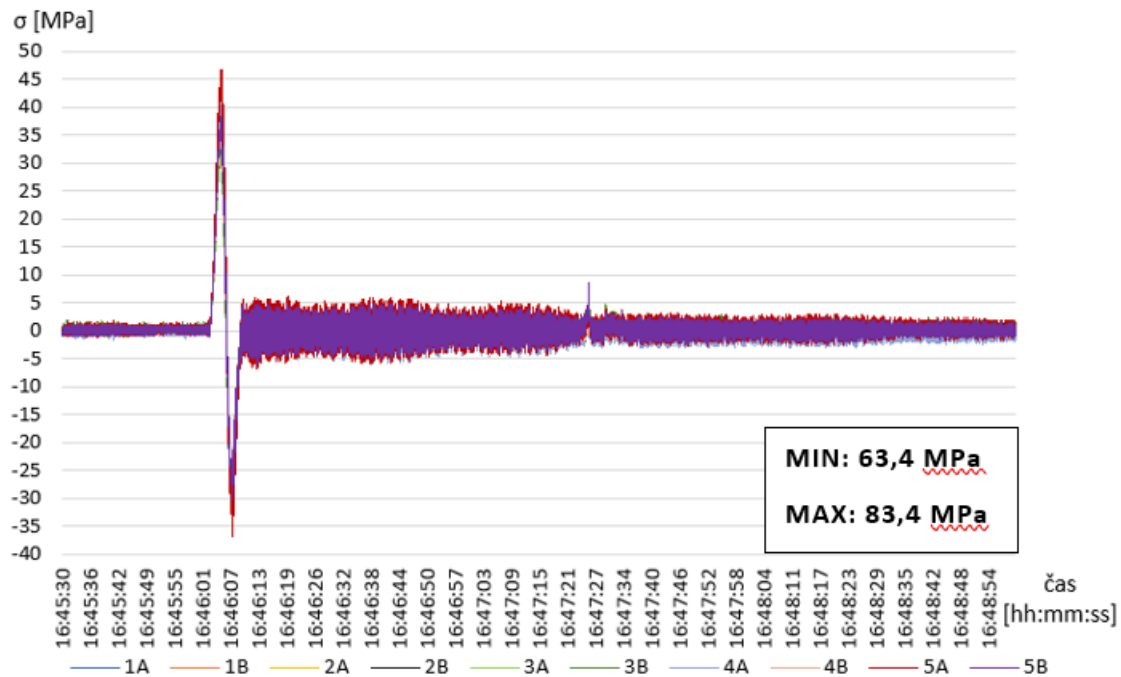
# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

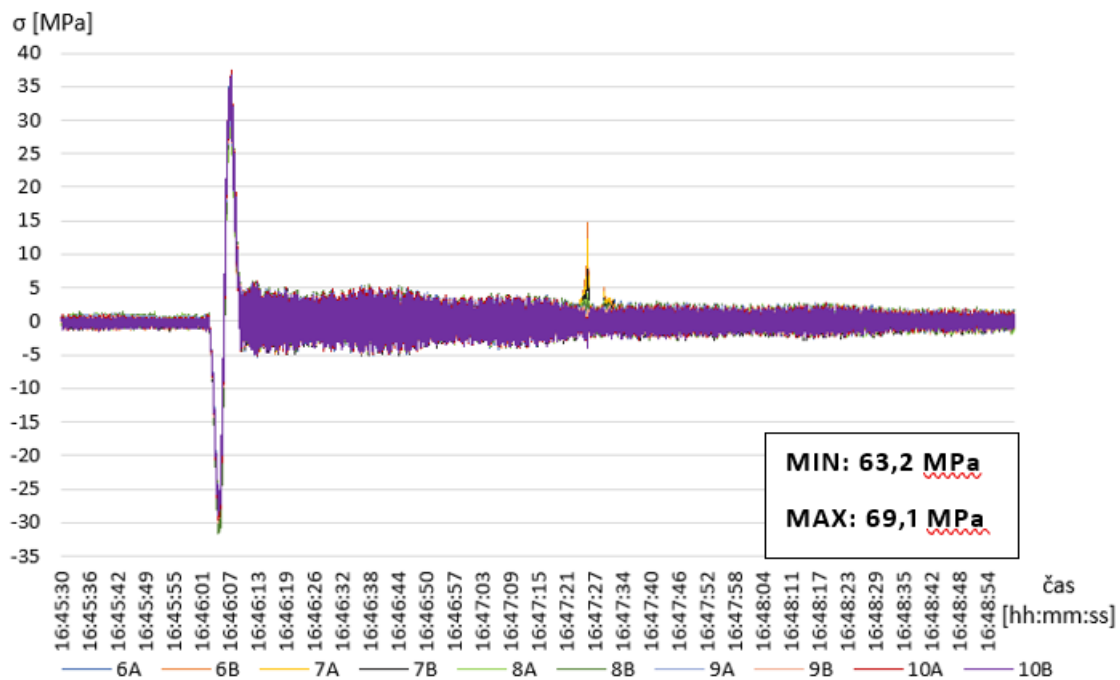
Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

## Únavová životnost železničního mostu v Púchově

75 km/h – DZS23 (Púchov → Žilina)



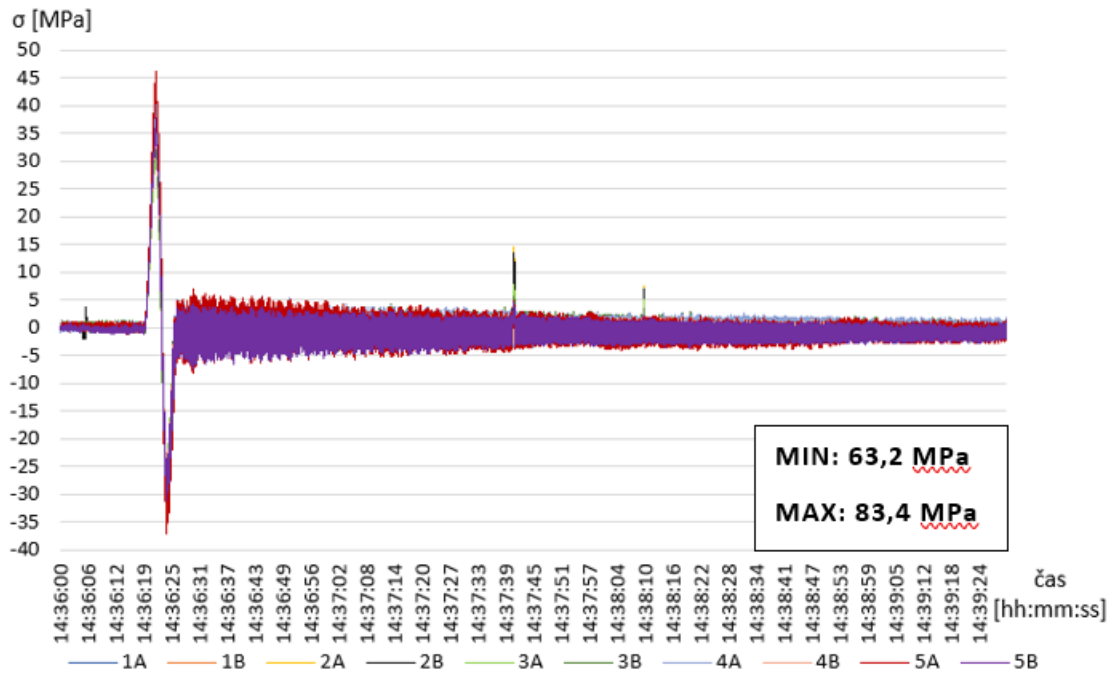
Graf 21: Normálové napětí při DZS23 na 1A-5B



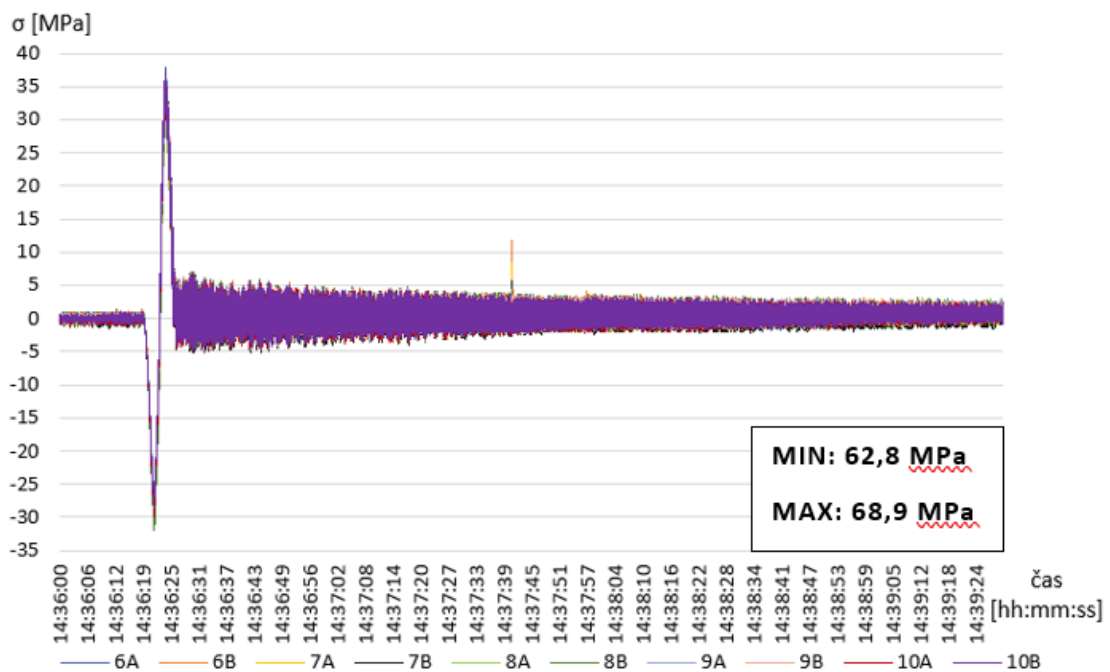
Graf 22: Normálové napětí při DZS23 na 6A-10B



80 km/h – DZS15 (Púchov → Žilina, v DP ZS12)



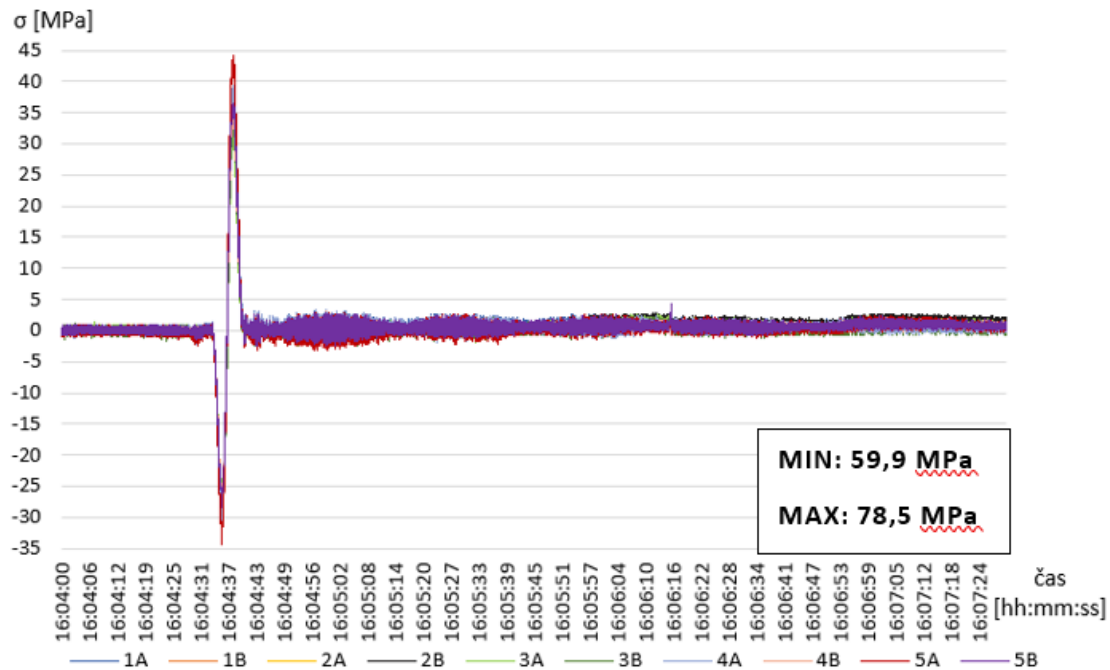
Graf 23: Normálové napětí při DZS15 na 1A-5B



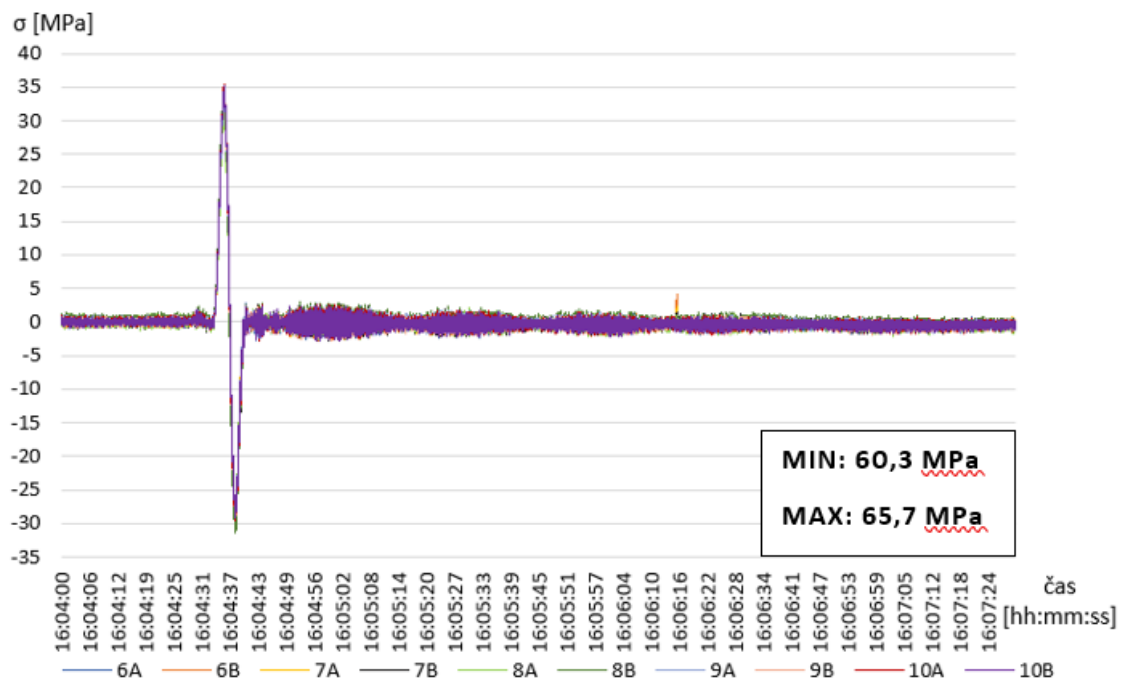
Graf 24: Normálové napětí při DZS15 na 6A-10B



80 km/h – DZS20 (Žilina → Púchov)



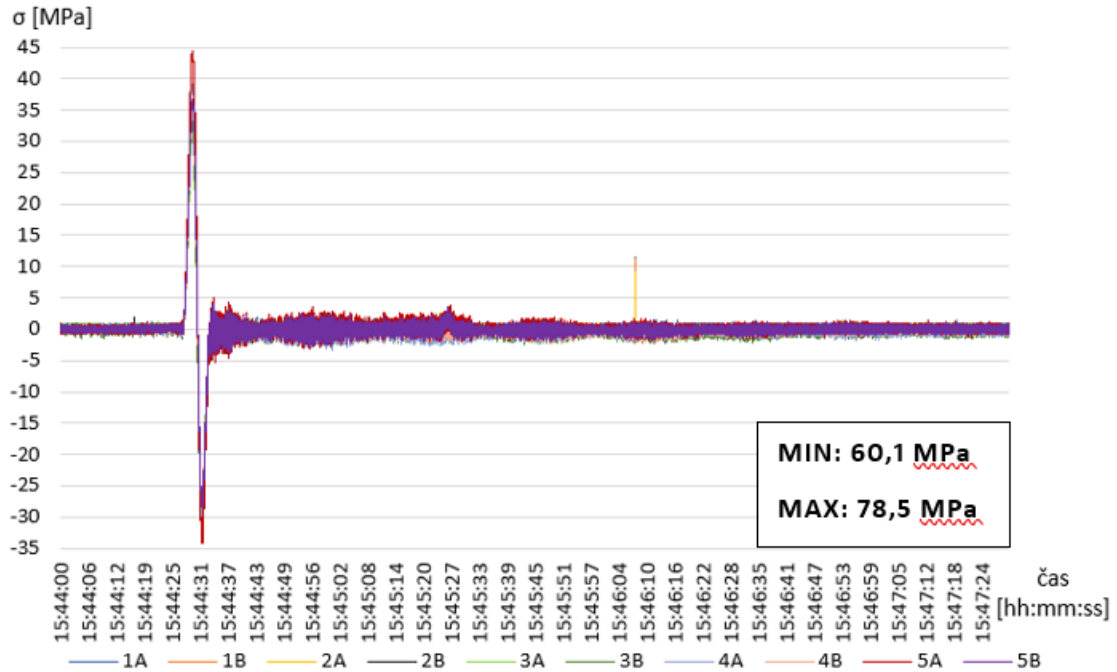
Graf 25: Normálové napětí při DZS20 na 1A-5B



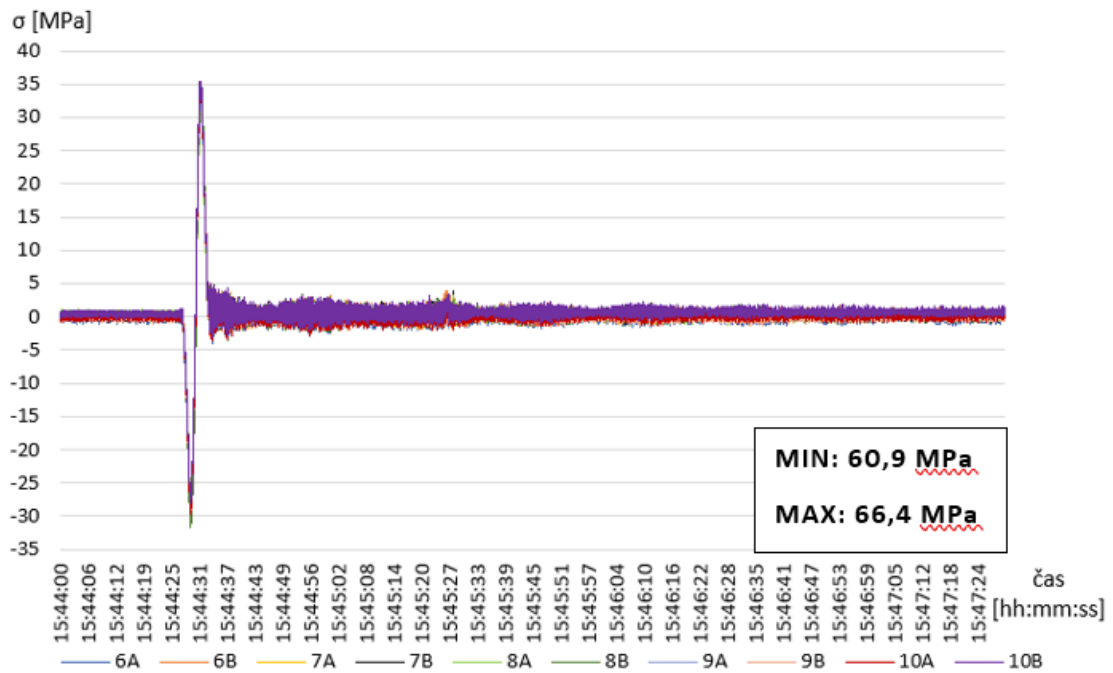
Graf 26: Normálové napětí při DZS20 na 6A-10B



90 km/h – DZS19 (Púchov → Žilina, v DP ZS13)



Graf 27: Normálové napětí při DZS19 na 1A-5B

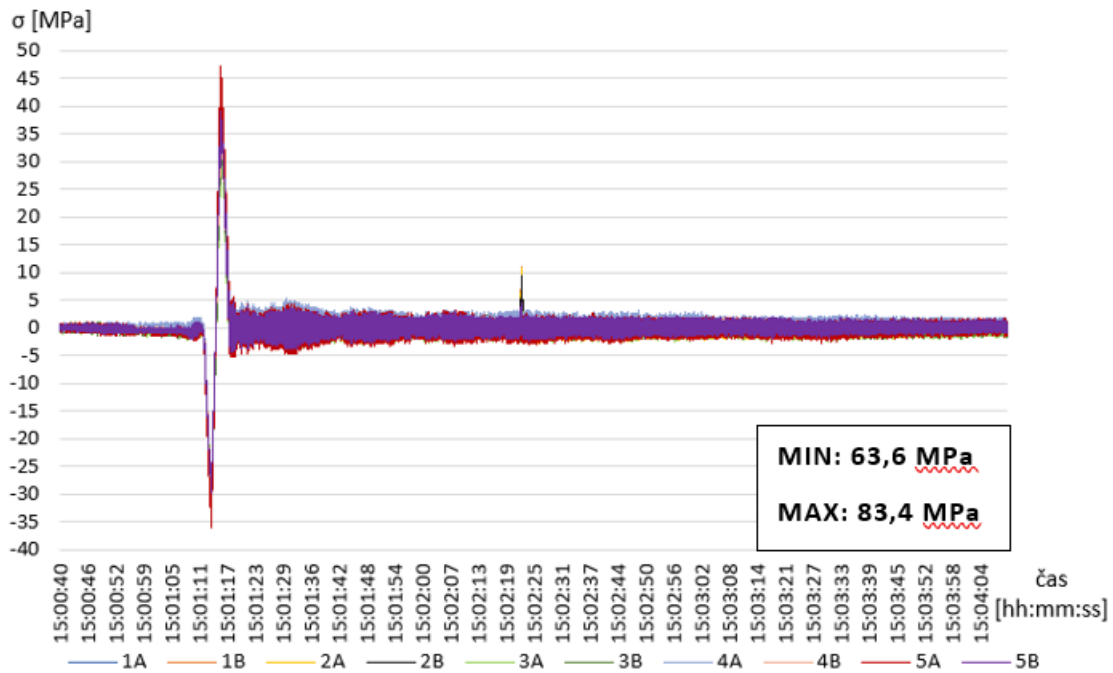


Graf 28: Normálové napětí při DZS19 na 6A-10B

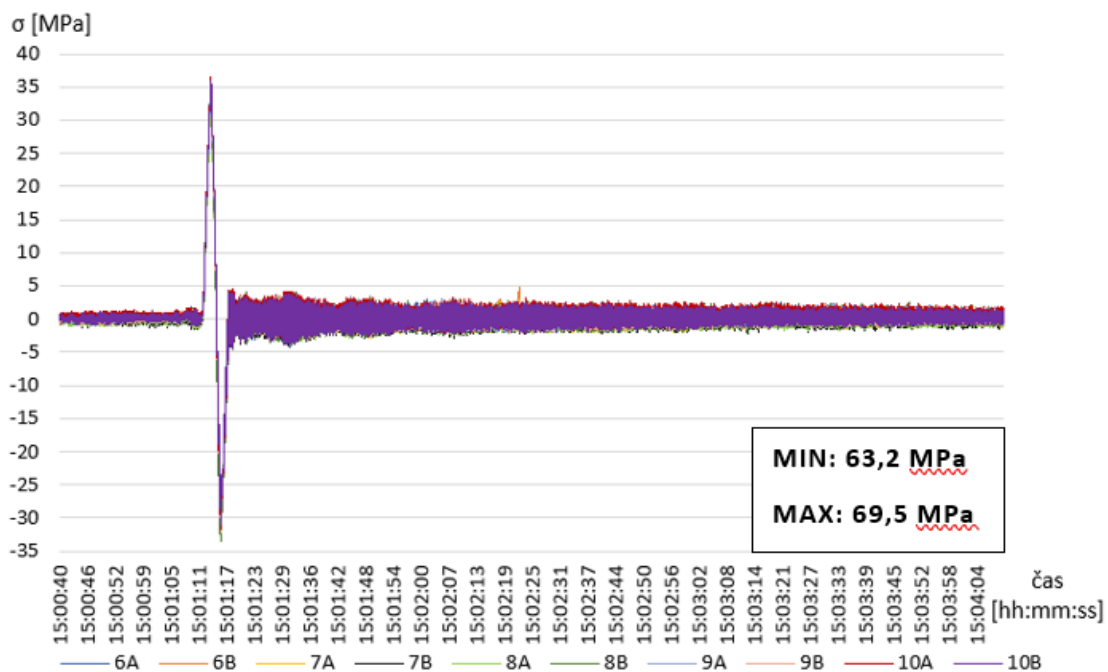




90 km/h – DZS16 (Žilina → Púchov)



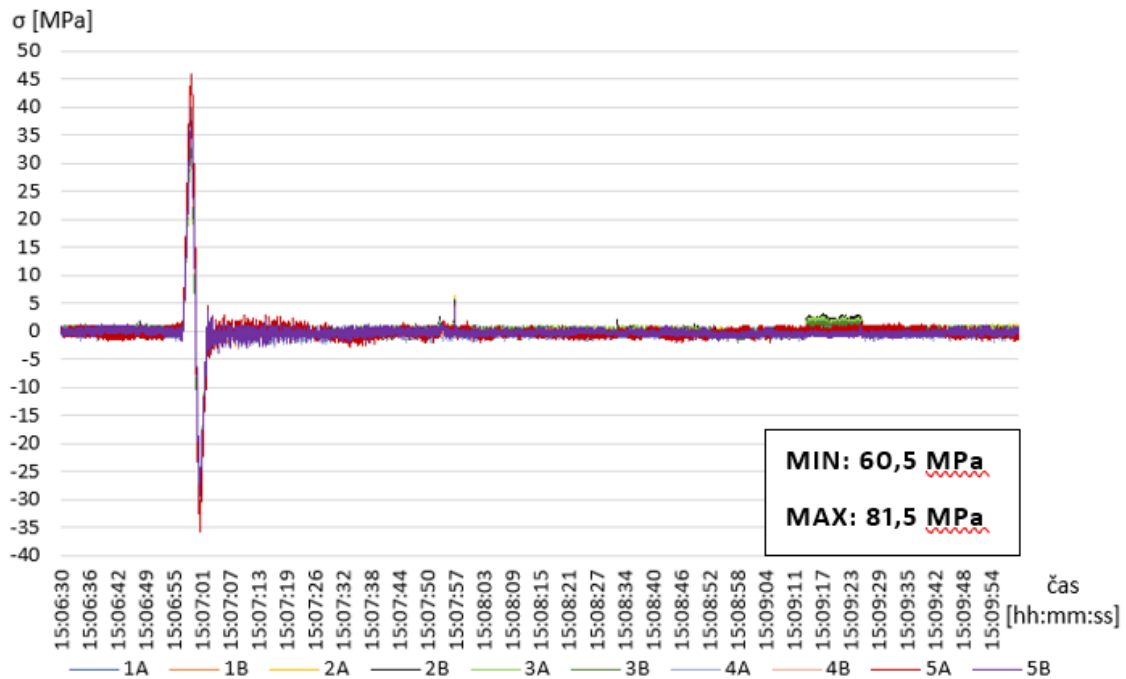
Graf 29: Normálové napětí při DZS16 na 1A-5B



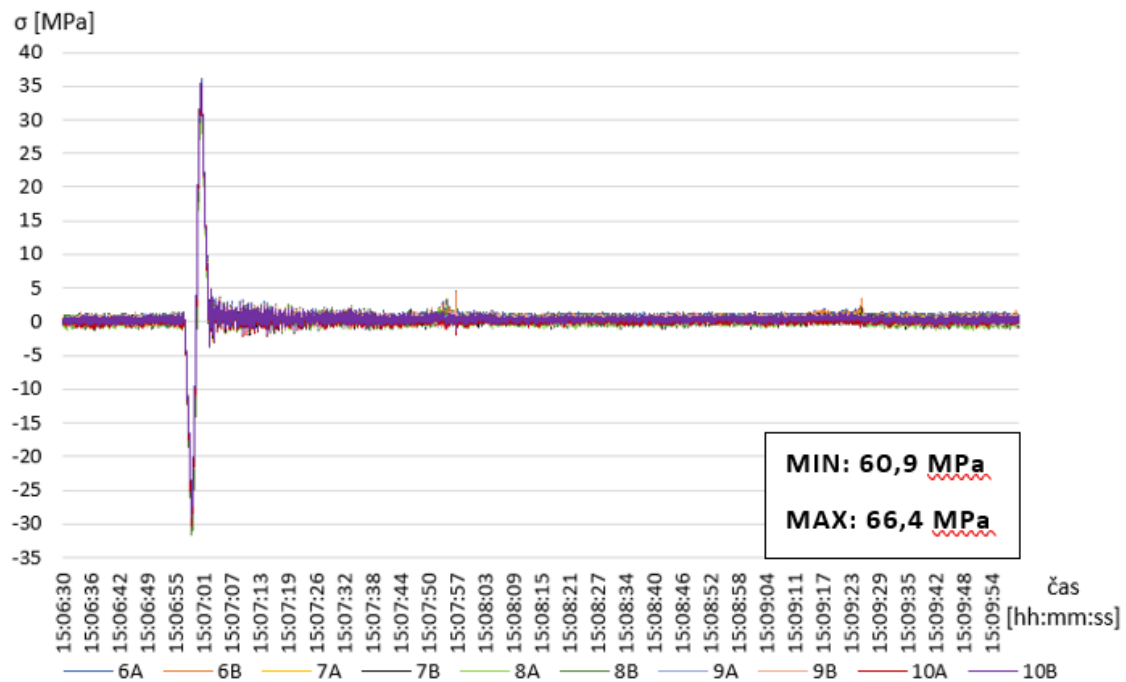
Graf 30: Normálové napětí při DZS16 na 6A-10B



100 km/h – DZS17 (Púchov → Žilina, v DP ZS14)



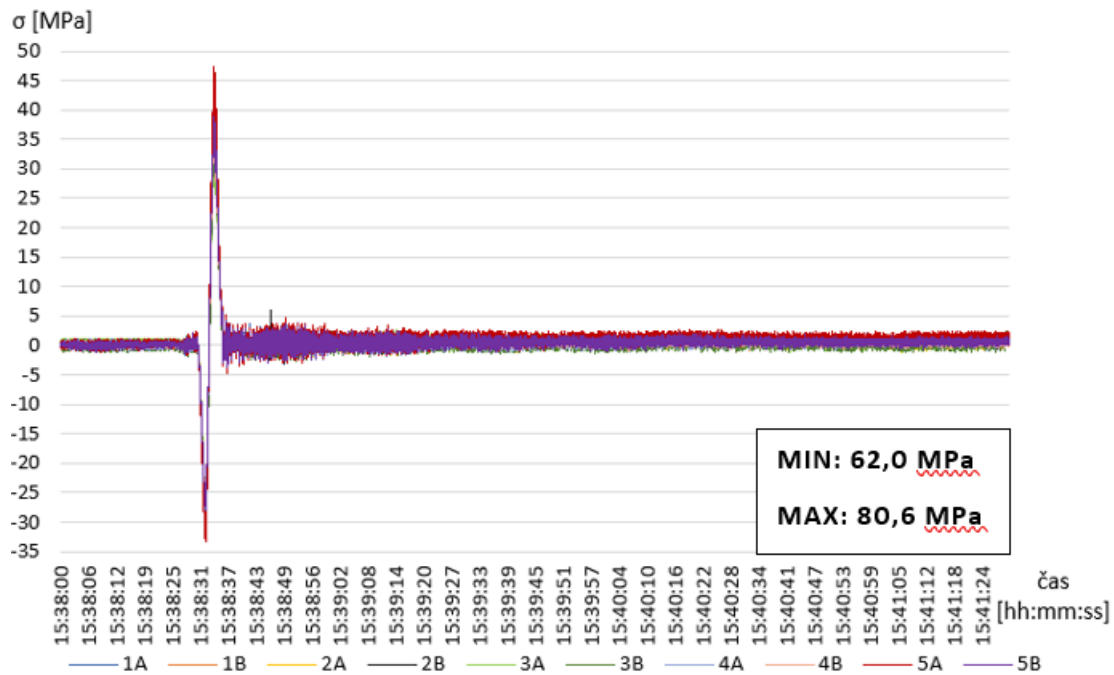
Graf 31: Normálové napětí při DZS17 na 1A-5B



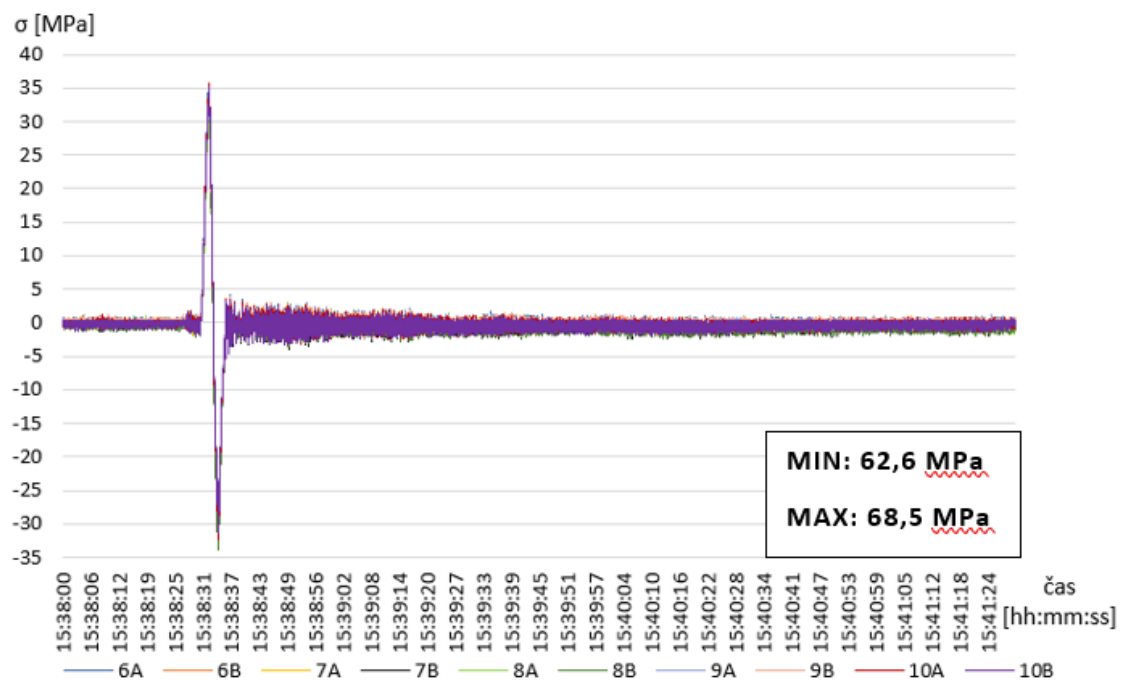
Graf 32: Normálové napětí při DZS17 na 6A-10B



100 km/h – DZS18 (Žilina → Púchov)



Graf 33: Normálové napětí při DZS18 na 1A-5B



Graf 34: Normálové napětí při DZS18 na 6A-10B



### Tenzometry 21-24

Rychlost [km/h]	Zatěžovací stav	Tenzometry							
		Rozkmit $\Delta\sigma$ [MPa]				Průměrný rozkmit $\Delta\sigma$ [MPa]			
		21	22	23	24	21	22	23	24
5	DZS1	40,1	55,0	39,7	52,1	40,2	54,9	39,7	52,1
	DZS2	40,3	54,8	39,7	52,1				
10	DZS3	40,1	55,0	39,9	52,1	40,1	55,1	39,9	52,2
	DZS4	40,1	55,2	39,9	52,3				
20	DZS5	40,7	55,7	40,1	52,5	40,6	55,8	40,2	52,7
	DZS6	40,5	55,9	40,3	52,9				
30	DZS7	41,0	56,1	40,5	52,9	40,8	56,3	40,5	53,0
	DZS8	40,7	56,5	40,5	53,1				
40	DZS9	41,4	56,7	40,7	53,6	41,2	56,7	40,8	53,6
	DZS10	41,0	56,7	41,0	53,6				
50	DZS11	41,4	56,9	41,2	53,6	41,6	57,2	41,4	54,0
	DZS12	41,8	57,5	41,6	54,4				
60	DZS13	42,2	58,2	42,0	54,4	41,7	57,2	41,3	53,8
	DZS22	41,2	56,3	40,5	53,1				
70	DZS14	42,0	57,5	41,8	54,6	42,0	57,8	41,7	54,5
	DZS21	42,0	58,2	41,6	54,4				
75	DZS23	42,0	57,5	41,8	54,4	42,0	57,5	41,8	54,4
80	DZS15	41,8	57,3	41,6	54,8	42,0	57,3	41,6	54,5
	DZS20	42,2	57,3	41,6	54,2				
90	DZS16	42,8	59,0	42,4	55,4	42,8	59,1	42,3	55,7
	DZS19	42,8	59,2	42,2	55,9				
100	DZS17	43,9	60,1	43,5	57,1	42,9	58,8	42,4	55,8
	DZS18	42,0	57,5	41,4	54,4				

Tab. 31: Rozkmit napětí [MPa] na tenzometrech 21-24 pro všechny DZS

Na Grafu 35 je vidět nárůst napětí se zvyšující se rychlostí. Dle Tab. 31 je patrné, že většina zatěžovacích stavů stejných rychlostí má velmi podobné hodnoty napětí, největší rozptyly se objevují v rychlostech 60 a 100 km/h. V porovnání s tenzometry 1A-10B a statické zatěžovací zkoušce jsou naměřeny nižší rozkmit napětí. To je především způsobeno tím, že pojížděná kolej při dynamické zatěžovací zkoušce byla ta vzdálenější od protihlukové stěny. Proto je dále uveden jen jeden příklad grafu rozložení napětí v čase pro zatěžovací stav, kde byly naměřeny největší hodnoty napětí, tj. DZS17.

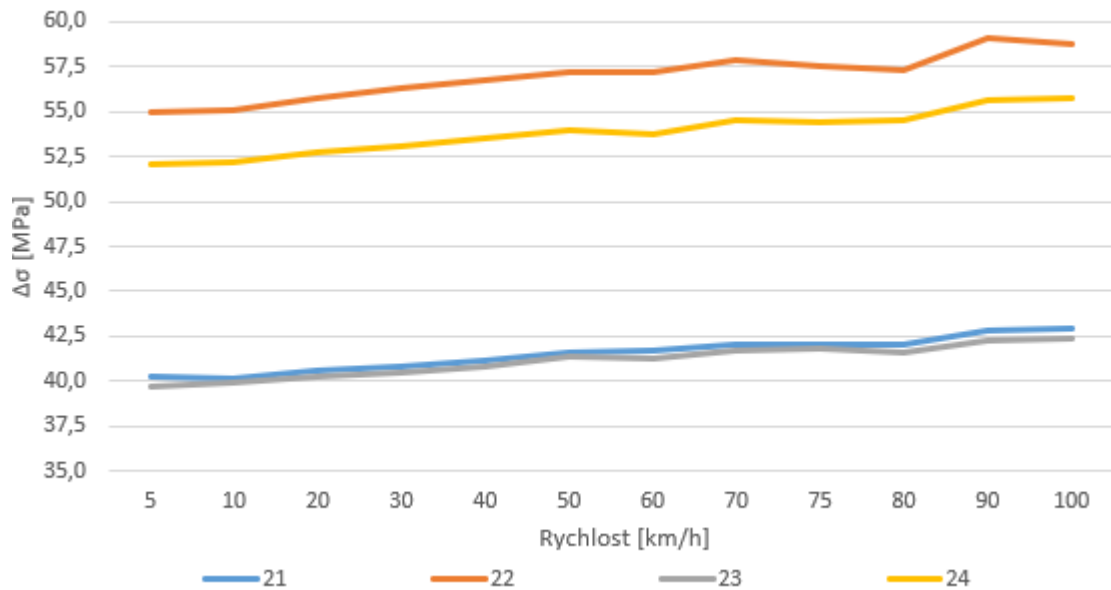


# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

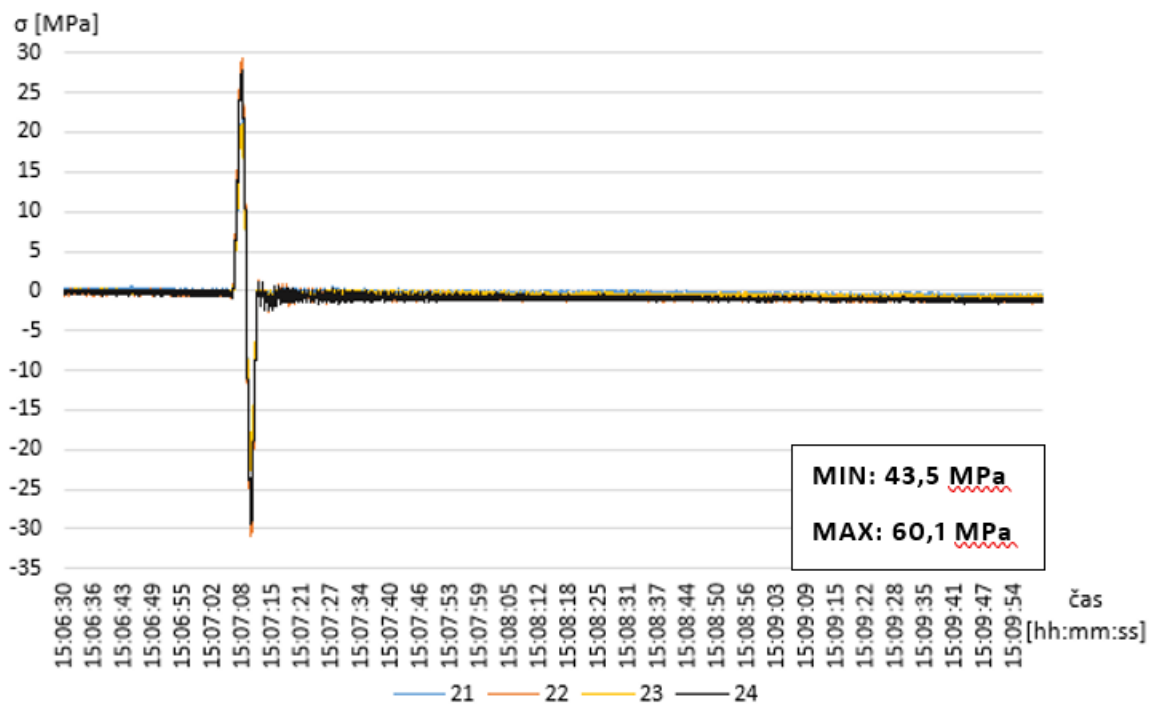
Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

## Únavová životnost železničního mostu v Púchově



Graf 35: Průměrný rozkmit napětí na 21-24

### 100 km/h – DZS17 (Púchov → Žilina, ve výpočtu ZS14)



Graf 36: Normálové napětí při DZS17 na 21-24



### 7.3.3. Porovnání výsledků zkoušky s výpočty

V Tab. 32-35 níže jsou vypsána napětí z výpočtu, z experimentu (průměrné hodnoty pro dané rychlosti) a jejich rozdíl. Vyznačena jsou vyšší napětí v absolutní hodnotě.

Napětí naměřená během zkoušky jsou o cca 35-45 % nižší, než bylo stanoveno výpočtem. Na místě byla zjištěna příznivější geometrie svarů v blízkosti tenzometrů, zároveň to ukazuje také na nižší ohybový moment. Větší shoda byla opět dosažena pro tenzometry 21-24, a to 7-23 %. Odlišnosti výpočtu a experimentu se podobají rozdílům ze statické zatěžovací zkoušky.

Pro přejezdy byla využita mírně odlišná souprava od předpokládané, jiný typ lokomotiv i jiný vagon. Protože nebyly pozorovány zvýšené dynamické účinky při zvolených rychlostech ani v modelu ani při zkoušce, nemohlo být odlišné rozdělení náprav příčinou takového rozdílu v napětích.

V průběhu zkoušky bylo měřeno i tenzometry 11-20 na horní pásnici trámu pro lepší představu rozložení napětí v okolí detailu styčnickového plechu. Tato napětí však nebyla nějak vysoká, rozkmitly se zpravidla pohybovaly mezi 15-25 MPa. Ani připravenými výpočtovými modely nebylo cíleno na tato napětí, která nabíhají svých vrcholů pro výpočet rozkmitu v jiných okamžicích než na styčnickovém plechu (je patrné z Grafů 11-13 str. 100, 101). Tato naměřená napětí budou použita při validaci výpočtových modelů.

číslo tenzometru	rozkmit napětí $\Delta\sigma$ [MPa] na T6					
	70 km/h			80 km/h		
	výpočet	zkouška	rozdíl	výpočet	zkouška	rozdíl
1a	111,5	71,8	36%	115,5	68,6	41%
1b	108,4	68,1	37%	112,3	65,2	42%
2a	111,7	67,4	40%	115,6	64,9	44%
2b	116,1	69,2	40%	120,2	66,5	45%
3a	107,3	64,4	40%	110,8	61,5	44%
3b	117,3	69,0	41%	121,1	65,9	46%
4a	111,9	76,1	32%	115,6	72,8	37%
4b	116,4	67,9	42%	120,3	64,9	46%
5a	111,8	84,9	24%	115,5	81,0	30%
5b	108,8	70,4	35%	112,3	66,8	41%
6a	111,5	70,7	37%	115,5	67,3	42%
6b	108,4	67,2	38%	112,3	64,3	43%
7a	111,7	67,3	40%	115,6	64,1	45%
7b	116,1	70,0	40%	120,2	66,3	45%
8a	107,3	64,7	40%	110,8	61,5	44%
8b	117,3	70,8	40%	121,1	67,3	44%
9a	111,9	67,4	40%	115,6	63,8	45%
9b	116,4	69,2	41%	120,3	65,7	45%
10a	111,8	69,8	38%	115,5	66,0	43%
10b	108,8	68,7	37%	112,3	65,2	42%

Tab. 32: Porovnání DZZ s výpočtem na T6 (70, 80 km/h)



# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

## Únavová životnost železničního mostu v Púchově

číslo tenzometru	rozkmit napětí $\Delta\sigma$ [MPa] na T6					
	90 km/h			100 km/h		
	výpočet	zkouška	rozdíl	výpočet	zkouška	rozdíl
1a	107,4	68,6	36%	115,5	68,7	41%
1b	104,4	65,2	38%	112,3	65,1	42%
2a	107,5	64,9	40%	115,6	64,4	44%
2b	111,7	66,2	41%	120,2	65,7	45%
3a	103,1	61,8	40%	110,8	61,2	45%
3b	112,8	66,2	41%	121,1	65,3	46%
4a	107,3	72,2	33%	115,6	72,2	38%
4b	111,6	65,1	42%	120,3	64,7	46%
5a	107,1	81,0	24%	115,5	81,1	30%
5b	104,2	67,0	36%	112,3	66,8	41%
6a	107,4	67,5	37%	115,5	67,1	42%
6b	104,4	64,7	38%	112,3	64,4	43%
7a	107,5	64,3	40%	115,6	63,8	45%
7b	111,7	66,8	40%	120,2	66,6	45%
8a	103,1	62,1	40%	110,8	61,7	44%
8b	112,8	67,8	40%	121,1	67,4	44%
9a	107,3	64,5	40%	115,6	64,7	44%
9b	111,6	66,3	41%	120,3	66,3	45%
10a	107,1	66,5	38%	115,5	66,7	42%
10b	104,2	65,3	37%	112,3	65,5	42%

Tab. 33: Porovnání DZZ s výpočtem na T6 (90, 100 km/h)

číslo tenzometru	rozkmit napětí $\Delta\sigma$ [MPa] na T9					
	70 km/h			80 km/h		
	výpočet	zkouška	rozdíl	výpočet	zkouška	rozdíl
21	47,4	42,0	11%	48,8	42,0	14%
22	66,8	57,8	13%	68,8	57,3	17%
23	47,4	41,7	12%	48,8	41,6	14%
24	68,6	54,5	21%	70,7	54,5	23%

Tab. 34: Porovnání DZZ s výpočtem na T9 (70, 80 km/h)

číslo tenzometru	rozkmit napětí $\Delta\sigma$ [MPa] na T9					
	90 km/h			100 km/h		
	výpočet	zkouška	rozdíl	výpočet	zkouška	rozdíl
21	48,0	42,8	11%	49,4	52,9	-7%
22	67,6	59,1	13%	69,6	58,8	16%
23	48,0	42,3	12%	49,4	42,4	14%
24	69,6	55,7	20%	71,6	55,8	22%

Tab. 35: Porovnání DZZ s výpočtem na T9 (90, 100 km/h)





### Průhyby

Během dynamické zatěžovací zkoušky byly sledovány 3 body na levém trámu metodou DIC. Toto měření a jeho zpracování zajistil Ing. Vojtěch Stančík. S vypočtenými hodnotami se porovnával průměr průhybů od stejných rychlostí.

Naměřené průhyby byly o cca 13-20 % nižší než spočtené, což se podobá i rozdílům ze statické zatěžovací zkoušky.

Zatěžovací stav		průhyb v L/4 [mm]	průhyb v L/2 [mm]	průhyb v 3/4 L [mm]
ZS3	výpočet	30,6	21,4	31,4
	zkouška	26,0	18,4	27,1
	rozdíl	15%	14%	14%
ZS4	výpočet	30,8	21,5	31,5
	zkouška	26,5	17,6	27,7
	rozdíl	14%	18%	12%
ZS6	výpočet	30,6	21,5	31,5
	zkouška	26,6	17,8	28,4
	rozdíl	13%	17%	10%
ZS7	výpočet	30,9	21,5	31,9
	zkouška	27,3	18,8	28,2
	rozdíl	12%	13%	12%
ZS8	výpočet	30,9	21,5	31,8
	zkouška	26,0	17,3	26,0
	rozdíl	16%	20%	18%
ZS9	výpočet	31,6	21,7	32,3
	zkouška	26,9	17,8	28,3
	rozdíl	15%	18%	12%
ZS10	výpočet	30,9	21,6	31,9
	zkouška	26,9	18,1	27,7
	rozdíl	13%	16%	13%
ZS11	výpočet	31,7	21,6	31,5
	zkouška	26,8	17,6	27,5
	rozdíl	15%	19%	13%
ZS12	výpočet	31,2	21,7	32,5
	zkouška	26,5	17,4	28,2
	rozdíl	15%	20%	13%
ZS13	výpočet	31,4	21,6	32,2
	zkouška	27,5	18,0	28,7
	rozdíl	12%	17%	11%
ZS14	výpočet	32,2	21,7	32,2
	zkouška	27,3	18,2	28,1
	rozdíl	15%	16%	13%

Tab. 36: Porovnání vypočtených a naměřených průhybů z DZZ



### Vlastní frekvence a tvary

Předmětem dalšího zkoumání byly vlastní frekvence a tvary konstrukce, které zjišťovali prof. Ing. Michal Polák, CSc. a Ing. Tomáš Plachý, Ph.D. Budič byl umístěn mezi 1/4 a 1/3 rozpětí na horní pásnici pravého trámu.

V porovnání vlastních frekvencí pro globální vlastní tvary konstrukce se ukazují větší odlišnosti. Ohybové tvary svislého kmitání mají ve skutečnosti vyšší vlastní frekvence, naopak vodorovné kmitání oblouku by mělo mít vlastní frekvence nižší.

pořadí frekvence	vlastní tvar	vlastní frekvence [ $s^{-1}$ ]		
		výpočet	měření	rozdíl
1	1. svislé ohybové kmitání	0,98	1,15	-17,3%
2	1. vodorovné kmitání oblouku	0,98	0,85	13,3%
3	1. příčné kmitání	1,58	1,61	-1,9%
4	2. svislé ohybové kmitání	1,67	1,87	-12,0%
5	2. vodorovné kmitání oblouku	2,01	1,73	13,9%
6	3. svislé ohybové kmitání	2,43	2,98	-22,6%
7	1. krouživé kmitání	2,72	2,42	11,0%
8	3. vodorovné kmitání oblouku	2,89	2,76	4,5%
15	2. krouživé kmitání	3,3	3,36	-1,8%

Tab. 37: Porovnání vypočtených a vyhodnocených vlastních frekvencí a tvarů



### 7.4. Zhodnocení zatěžovacích zkoušek

Z porovnání výsledků ze zkoušek a výpočtů plyne poměrně velká neshoda. V průhybech se jedná převážně cca o 10-20 % a v napětích 30-45 %. Bude proto nutné provést validaci výpočetních modelů a dosáhnout co největší shody s naměřenými hodnotami.

Upravován bude globální model v CSI Bridge i detaily v Abaqusu. U detailů byla zjištěna příznivější geometrie svarů, v jejichž blízkosti jsou odečítány hodnoty napětí. Vzhledem k větším rozdílům v průhybech i ve vlastních frekvencích a tvarech je zřejmé, že ani globální model přesně neodpovídá skutečnosti.

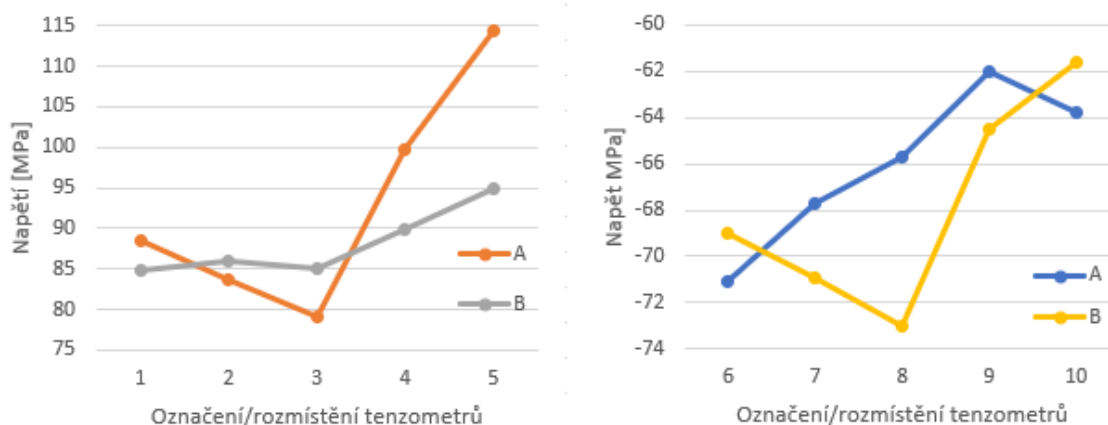
Během zkoušek byla použita mírně jiná břemena. Výsledky výpočtů byly proto upraveny poměrem skutečného zatížení k předpokládanému a nelze očekávat touto příčinou větší chybu.

### Napětí na styčnickovém plechu

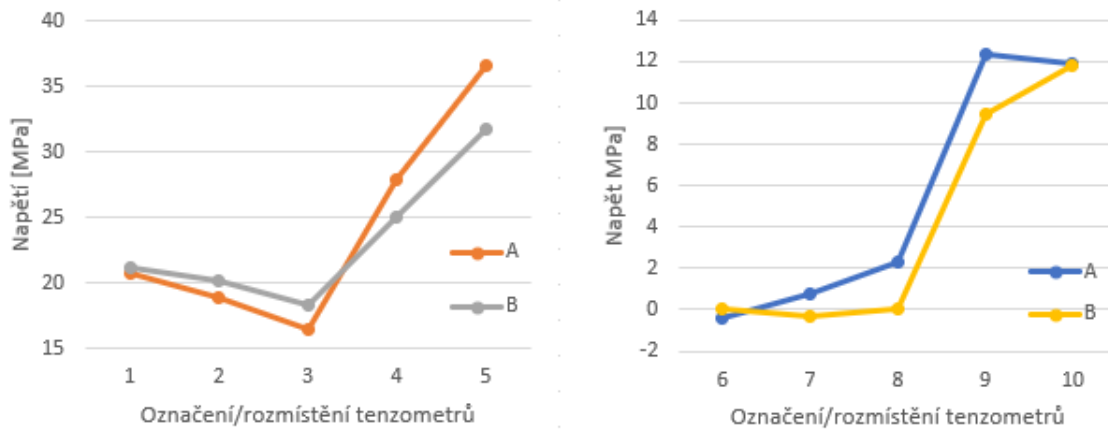
Poměrně zajímavé se ukázalo rozložení napětí na styčnickovém plechu u středního závěsu. Na základě geometrie i provedených výpočtů by mělo být velmi podobné napětí v místech na jedné straně plechu osově souměrných s osou závěsu. To by měly být dvojice tenzometrů 1 a 5, 2 a 4, 6 a 10, 7 a 9. Výsledky zkoušek tomuto předpokladu úplně neodpovídají.

U statických zatěžovacích stavů je rozdíl významný a mohl by zde figurovat i vliv teploty, který se nemuselo podařit úplně odstranit (viz Graf 37 a 38).

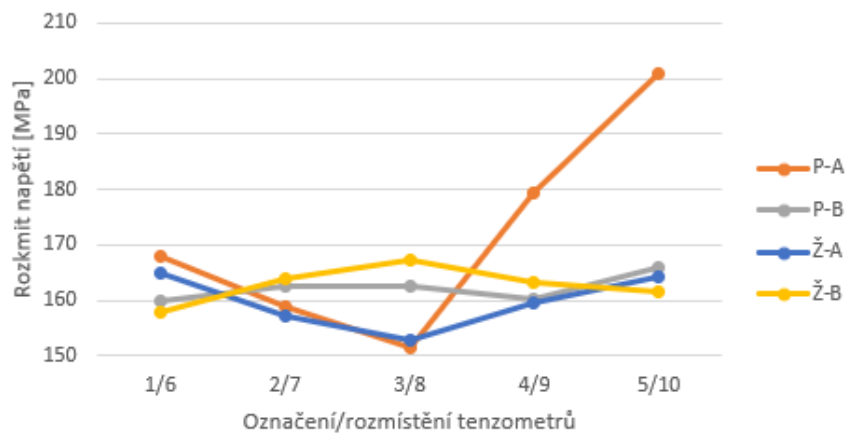
Kvazistatický přejezd u statické zatěžovací zkoušky a dynamické přejezdy zobrazují jednotné rozložení rozkmitů napětí (viz Grafy 39-41). Je patrné velké odchýlení tenzometrů 4A a 5A, jež mohly být vystaveny působení lokálních geometrických a materiálových vlivů. I u tenzometrů v řadě B na púchovské straně plechu (č. 1-5) jsou viditelné menší rozdíly napětí pravděpodobně z podobných důvodů. Lépe si odpovídají rozkmity napětí na žilinské straně plechu – u tenzometrů č. 6-10. Tyto poznatky jsou potvrzeny i Grafy 42 a 43, kde je zobrazeno napětí ve dvou časových okamžicích, kdy dosahovala napětí na jedné straně maximálních hodnot a na druhé minimálních – souvisí s Grafy 31 a 32, str. 117. Toto bude potřeba zohlednit při porovnání výsledků u validace.



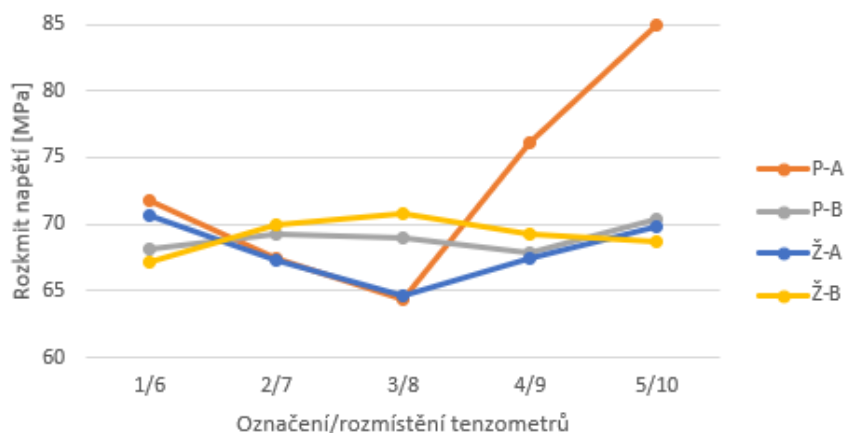
Graf 37: SZS3 – napětí na tenzometrech 1A-10B



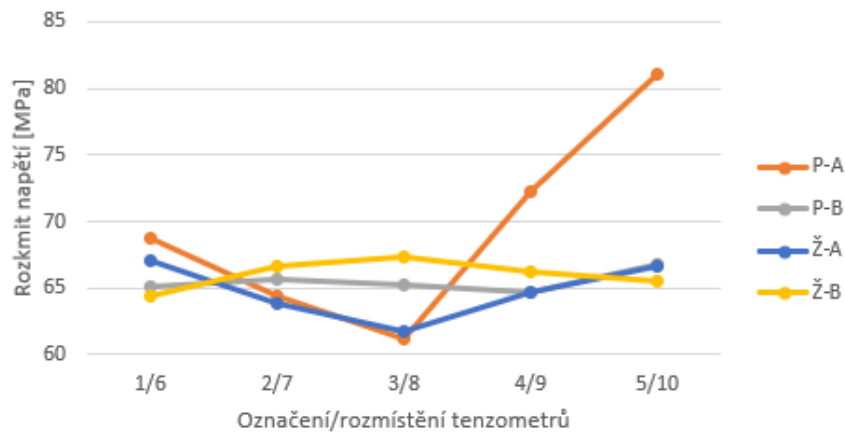
Graf 38: SZS1+SZS4 – napětí na tenzometrech 1A-10B



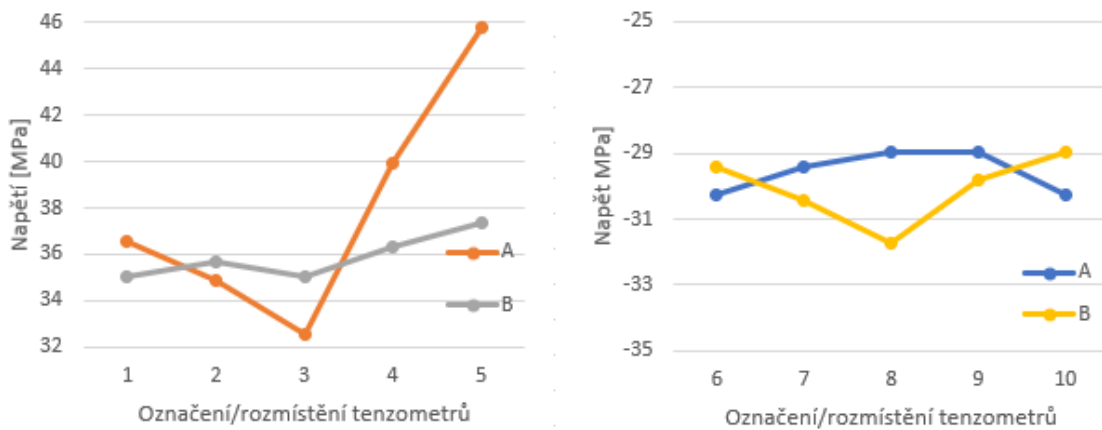
Graf 39: SZS6 – rozkmit napětí na tenzometrech 1A-10B



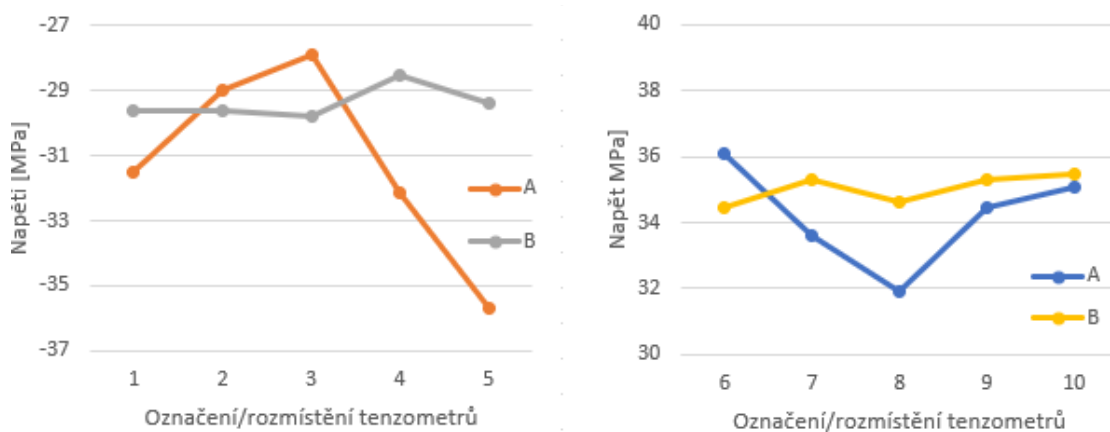
Graf 40: DZZ – 70 km/h – rozkmit napětí na tenzometrech 1A-10B



Graf 41: DZZ – 100 km/h – rozkmit napětí na tenzometrech 1A-10B



Graf 42: DZZ – 100 km/h – napětí na tenzometrech 1A-10B v čase  $t_1$



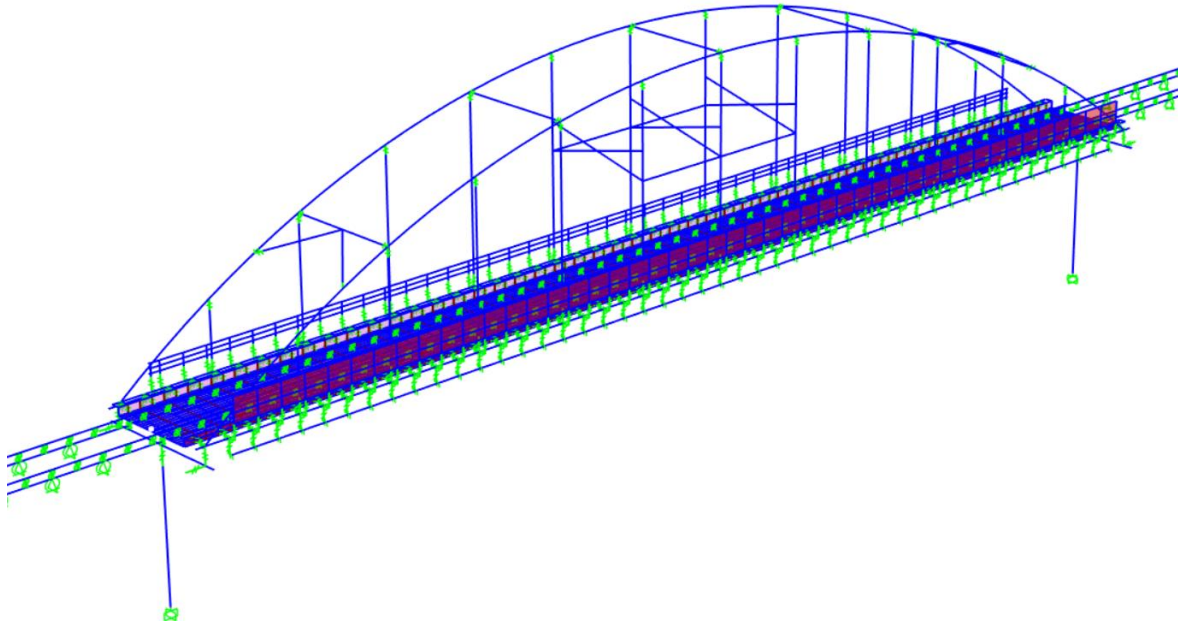
Graf 43: DZZ – 100 km/h – napětí na tenzometrech 1A-10B v čase  $t_2$



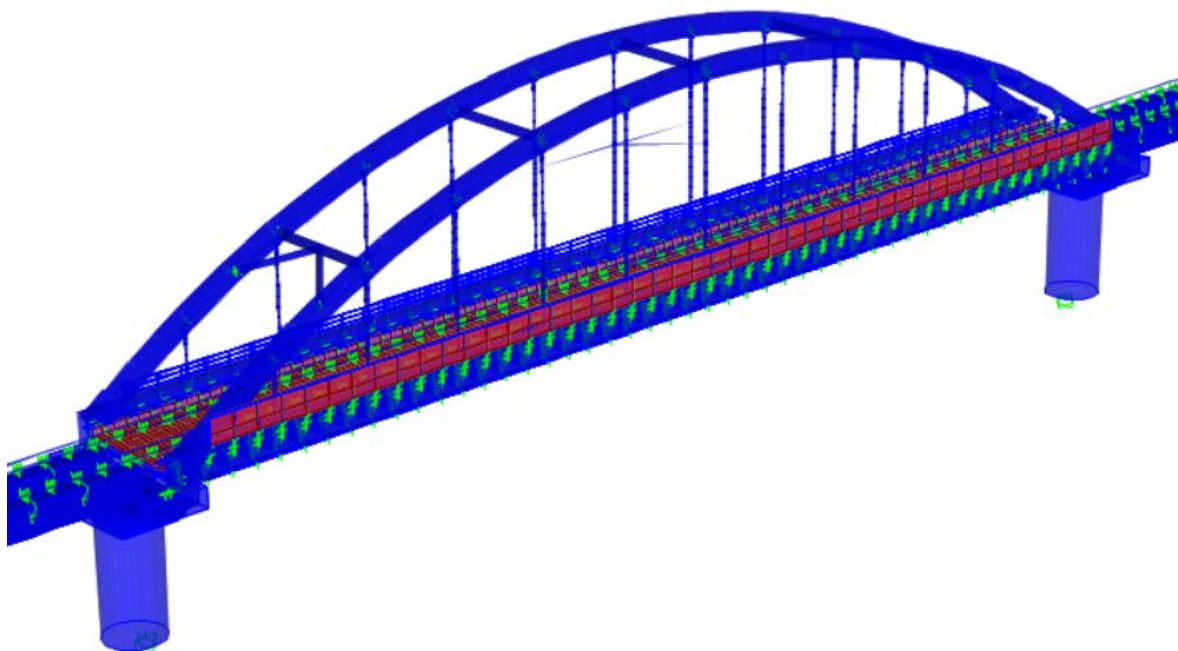
## 8. VALIDACE VÝPOČETNÍCH MODELŮ

### 8.1. Model CSI Bridge

Snahou bylo upravit model tak, aby došlo ke sladění vypočtených průhybů s experimenty, dále pak vlastními frekvencí, tvarů a nakonec i vnitřních sil vyvolávajících napětí, jež mají odpovídat naměřeným hodnotám.



Obr. 99: Model v CSI Bridge po validaci



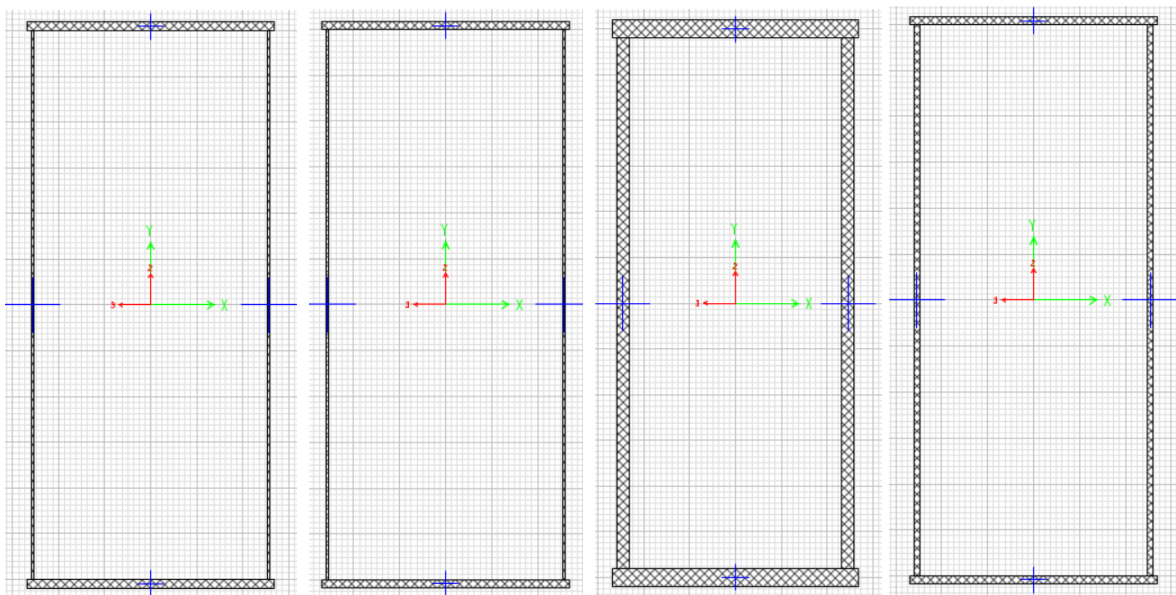
Obr. 100: Model v CSI Bridge po validaci s vykreslením průřezů



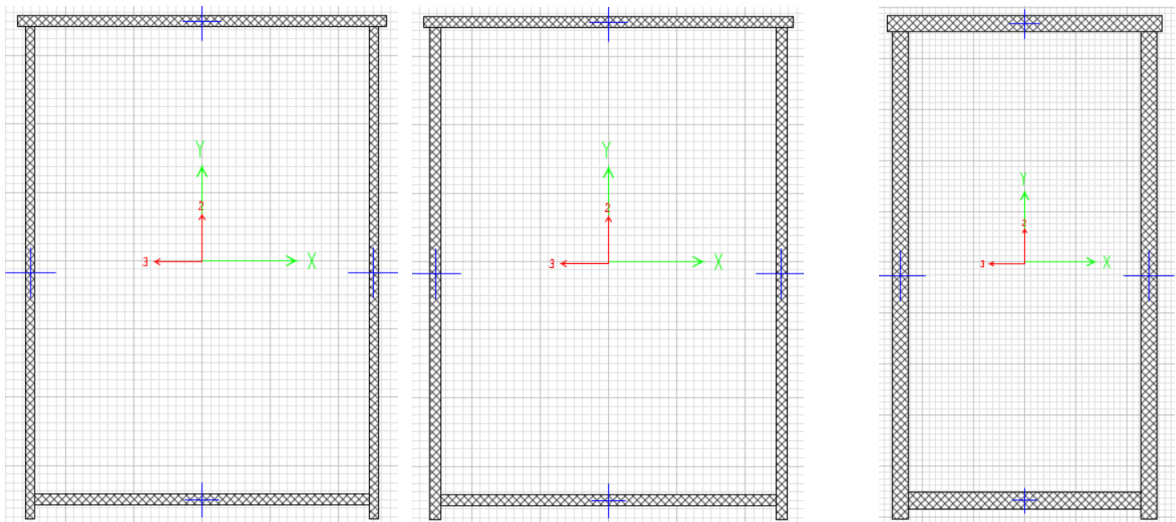
### 8.1.1. Průřezy

#### Trámy a oblouky

Průřezy trámů a oblouků byly zpřesněny dle výrobní dokumentace [20] doplněním přesahů pásnic, nebo stěn a všem plechům byla zvýšena tloušťka o 1 mm vzhledem k tolerancím třídy B a podélným svarům. Místům přechodu trámu na oblouk (průřezy T3 a O3) byla zvýšena tuhost tím, že se zvětšila tloušťka pásnic a stěn na 100 mm, což simulovalo skutečný náběh v tomto místě (výztuhy, svary). Tyto úpravy byly provedeny kvůli navýšení tuhosti a vedly ke snížení průhybů a také k přiblížení vlastních frekvencí experimentálním hodnotám.



Obr. 101: Nové průřezy trámů (zleva) T1, T2, T3, T4



Obr. 102: Nové průřezy oblouků (zleva) O1, O2, O3

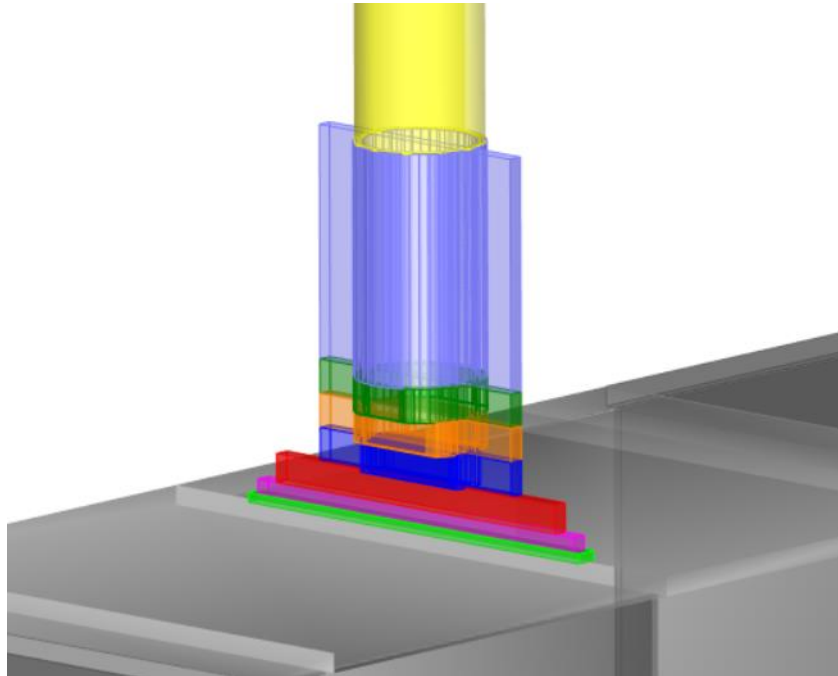




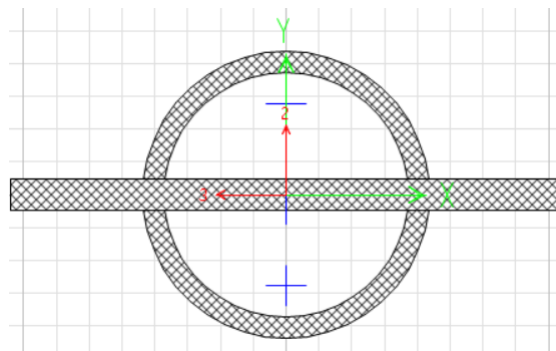
### Závěsy

Na základě porovnání výsledků ze zkoušek s původními modely bylo zřejmé, že ohybový moment působící na styčnickový plech je ve skutečnosti nižší.

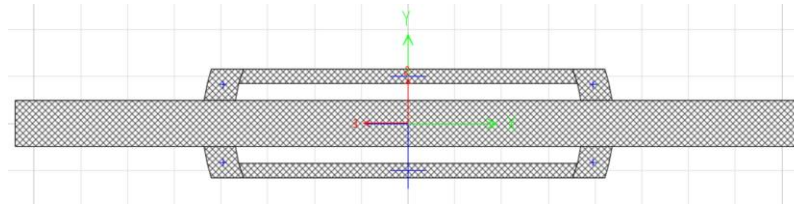
Jedním z hlavních vlivů na velikost ohybového momentu bylo zpřesnění geometrie přípoje. Z horní pásnice nejprve vychází náhradní průřez svaru, na nějž navazuje styčnickový plech. Nejprve do výšky 30 mm nad svarem dosahuje plech ve skutečnosti jednotné šířky. Pak se však jeho šířka mění z 870 mm na 665 mm. Zjednodušeně byla tato část plechu nahrazena jedním o průměrné šířce 766 mm. Pak pokračuje samotná trubka s procházejícím styčnickovým plechem. Na počátku má ale pozvolný náběh, což je potřeba také zohlednit. Tato oblast byla rozdělena na 3 pruty stejné délky 71 mm, jejichž průřez odpovídá geometrii v jejich středech. Styčnickovému plechu byla navíc upravena tloušťka na 30,5 mm podle skutečnosti.



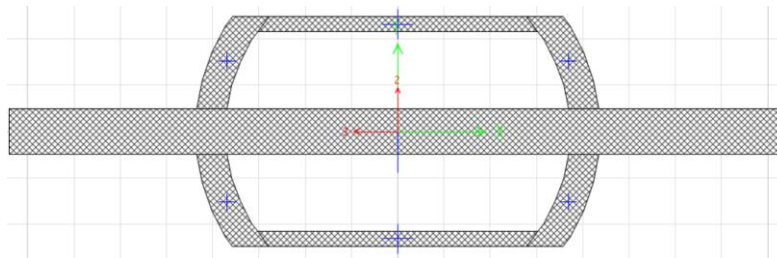
Obr. 103: Přípoj závěsu



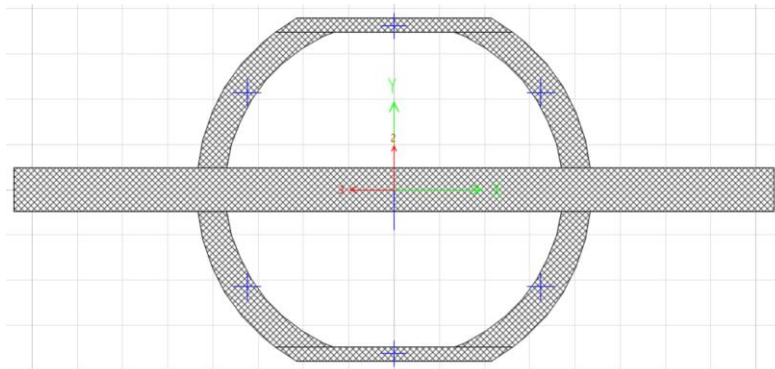
Obr. 104: Trubka s procházejícím styčnickovým plechem



Obr. 105: Zúžení trubky – průřez 1



Obr. 106: Zúžení trubky – průřez 2



Obr. 107: Zúžení trubky – průřez 3

Přípoje mezi závěsy a trámem (příp. obloukem) byly nejprve tvořeny tuhými vazbami. Reálně však ideálně tuhé nejsou a nějaká natočení okolo vodorovných os v příčném směru mostu vznikají, což také přispívá ke snížení ohybového momentu. Ke zjištění tuhosti byl použit model v programu Abaqus, kde byl závěs zatížen pouze ohybovým momentem a natočení se stanovilo ve středu styčnickového plechu těsně nad svarem. To bylo provedeno pro 3 různé velikosti momentů a torzní tuhost byla spočtena jako  $k_\varphi = M/\varphi$ .<sup>6</sup> Všechny hodnoty se blížily tuhosti 8 MNm/rad, jež byla pro další výpočty do modelu zavedena.

Oproti projektu bylo dodatečně navrženo a realizováno sepnutí prostředních 6 táhel ocelovými lanky o průměru 10 mm ve výškách 10 a 13 m nad těžišti trámů (viz Obr. 108). Lana jsou uchycena do ok ocelových objímek kolem závěsů.

<sup>6</sup>  $k_\varphi$  – torzní tuhost [Nm/rad],  $M$  – ohybový moment [Nm],  $\varphi$  – natočení [rad]



V modelu byla tato úprava zavedena kloubově připojenými pruty s vyloučením přenosu tlakové síly.



Obr. 108: Dodatečně přidaná lana

### Interakce kolej-most

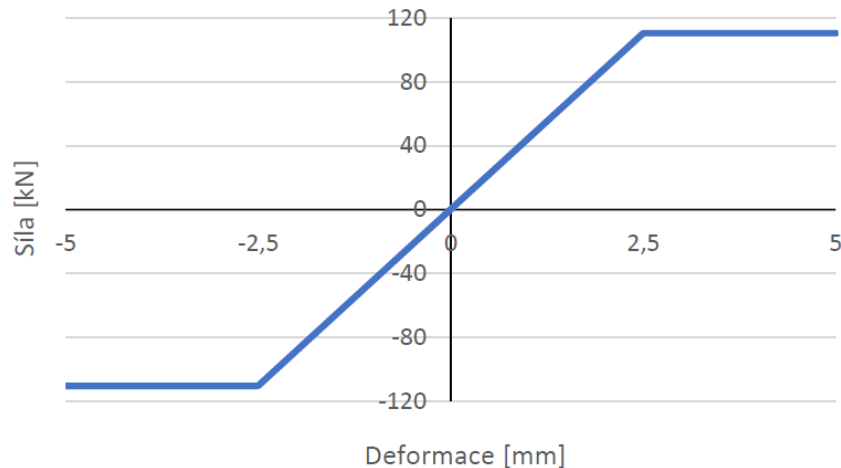
Pro odpovídající chování mostu se ukázalo nezbytné zahrnutí jeho spolupůsobení s kolejí. I v průběhu zkoušek byla patrná interakce s navazujícími konstrukcemi zprostředkovaná právě kolejí. Nastávalo totiž kmitání NK2 a změna napětí u zkoumaných detailů v časech, kdy bylo zatížení na vedlejších konstrukcích – přestože konstrukce nebyly propojeny a bylo zde i KDZ (kolejnicové dilatační zařízení). Lze odhadovat určité propojení vlastní ohybovou tuhostí KDZ.

Každá kolej byla modelována jedním prutem s průřezem dvou kolejnic UIC60 s osovými vzdálenostmi 1,5 m, jež byly propojeny s mostem vazbami v příčnicích, tj. po 2,6 m. K vystižení interakce byla kolej protažena dalších 100 m před a za NK2. Tuhosti připojení koleje k mostu byly stanoveny z podkladů [24], [25]. Reálně se však tyto hodnoty liší pro zatíženou a nezatíženou kolej. V rámci zjednodušení výpočtů byla uvažována pouze jedna střední tuhost a tuhost příčná byla sjednocena s podélnou. Přesahující části koleje byly uloženy stejným typem vazeb na spojitě uložených nosnících tvořených průřezem trámu T1.



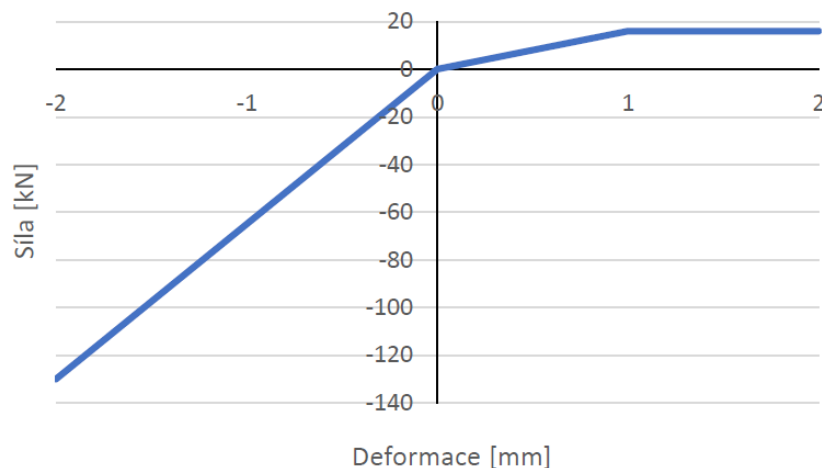
## Únavová životnost železničního mostu v Púchově

Ve vodorovném směru dochází od deformace 2,5 mm k plastickému přetváření. Tomuto posunu odpovídá plastický odpor  $r_0 = 25,5 \text{ kN/m}$  na pražec při rozdělení „u“ (po 0,6 m).<sup>7</sup> Při zvoleném rozmístění podpor po 2,6 m je pak síla potřebná k limitní deformaci 110,5 kN.



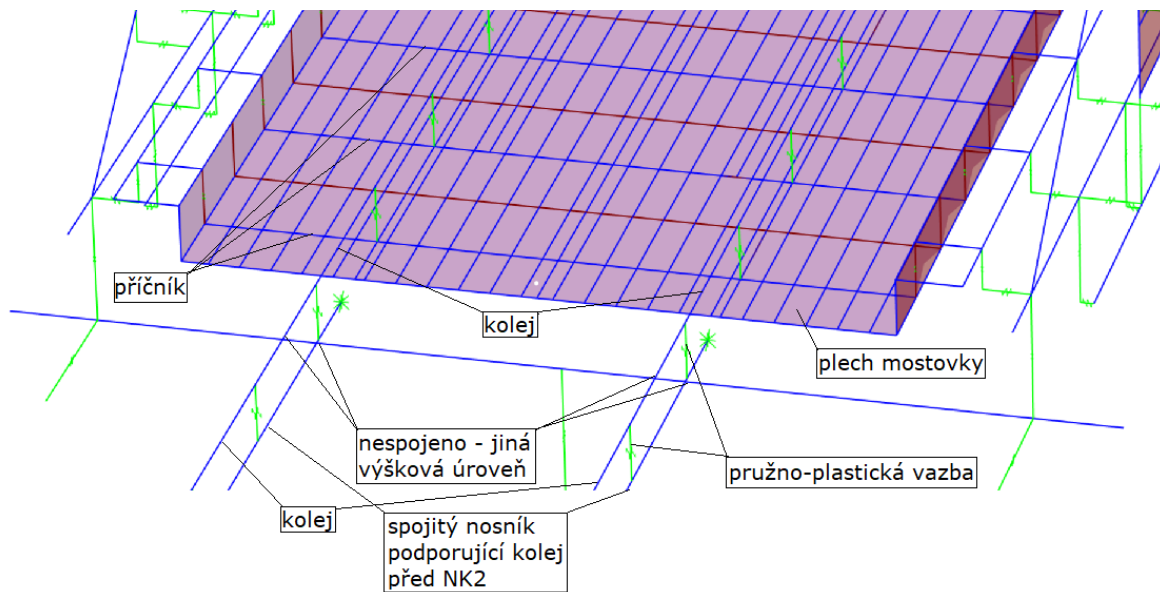
Graf 44: Závislost síly a deformace ve vodorovných směrech

Spojité svíslé tuhost při standardní kvalitě podloží je  $25 \text{ MN/m}^2$  [24], rozdíl mezi zatíženou a nezatíženou kolejí je zde malý. Tedy v tomto modelu je k deformaci 1 mm potřebná síla 65 kN. Na druhé straně je však nutné zohlednit i odpor proti nadzdvížení. Hmotnost betonového pražce je 300 kg a 1,2 m kolejnice váží 72 kg, což při rozdělení pražců po 0,6 m odpovídá hmotnosti 620 kg/m. Pro každou podporu po vzdálenostech 2,6 m se jedná o 1612 kg, tj. cca 16 kN. Tuhost této části vazby bude aktivní do posunu 1 mm. [25]

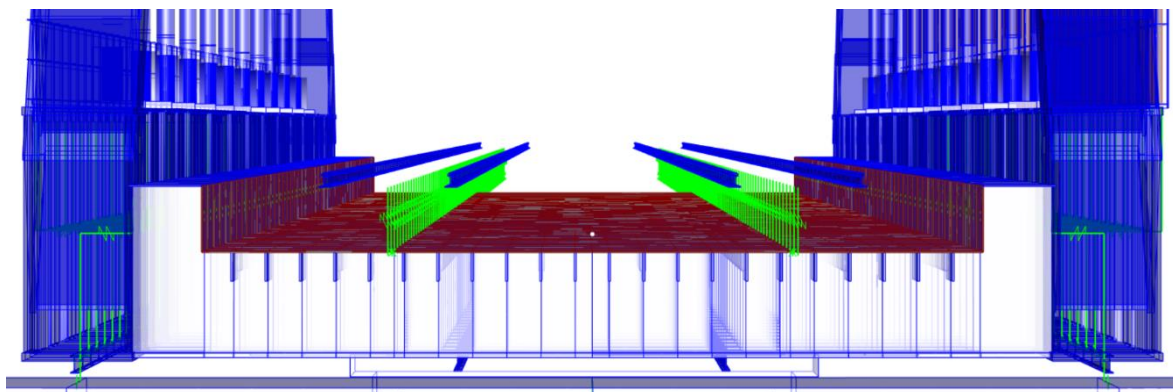


Graf 45: Závislost síly a deformace ve svíslém směru

<sup>7</sup> nezatížená kolej 15 kN/m na pražec, zatížená kolej 36 kN/m na pražec – dle [24]



Obr. 109: Koleje a jejich uložení

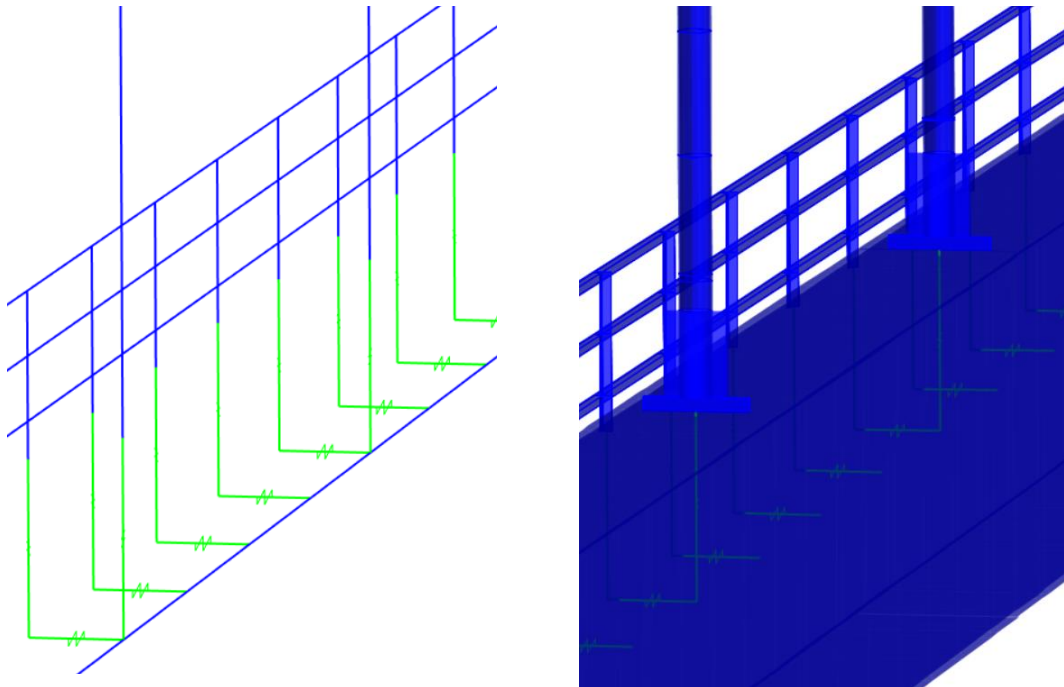


Obr. 110: Pohled na umístění kolejí

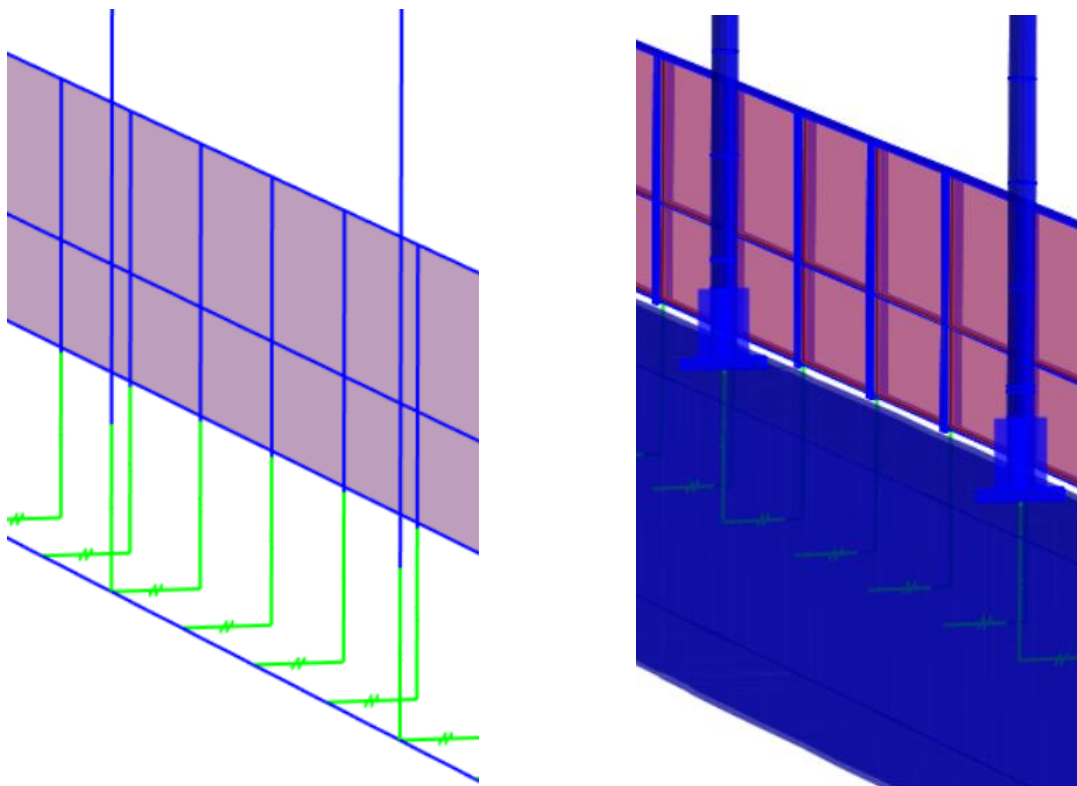
### Zábradlí, protihluková stěna, revizní dráha

Spolupůsobení s konstrukcí vykazalo i zábradlí, protihluková stěna a revizní dráha, jež byly propojeny s trámem (příp. mostovkou) tuhými vazbami. Zábradlí (L80x8, L70x8) a revizní dráha (4xIPN220) byly namodelovány a umístěny dle skutečnosti. Bohužel se nepodařilo sehnat podklady k protihlukové stěně, proto byly její parametry odhadnuty. V modelu je tvořena ocelovými sloupky HEB160 a vodorovnými plechy P15x130 s výplní z polykarbonátových desek o tloušťce 1 cm. Výška stěny je 2,5 m nad horní hranu pásnice trámu.

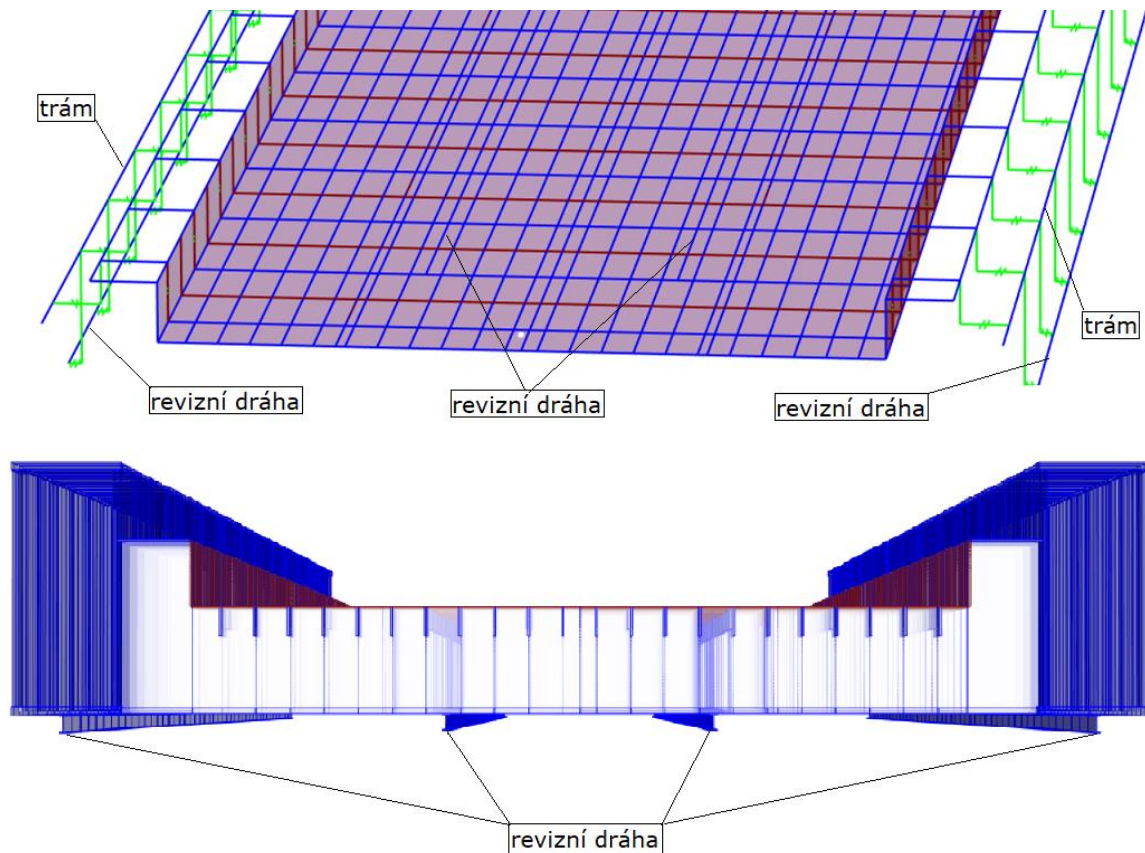




Obr. 111: Zábradlí



Obr. 112: Protihluková stěna



Obr. 113: Revizní dráha

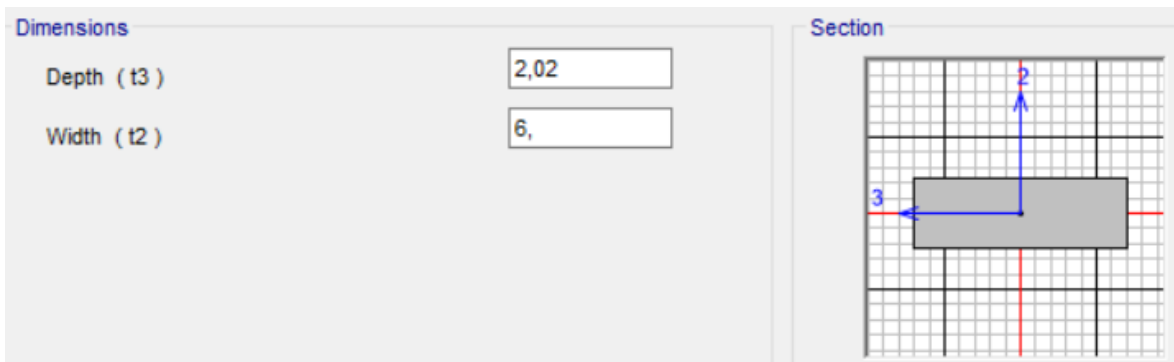
### Spodní stavba

Pro přiblížení se k vlastním tvarům vodorovného kmitání oblouku se ukázalo klíčové i spolupůsobení se spodní stavbou. Do modelu byly proto přidány železobetonové pilíře. Náběh dřívku přecházející do stativa byl rozdělen na úseky po 0,5 m s odpovídající náhradní průřezovou plochou. Uvolnění vazeb dle typů ložisek zůstalo zachováno. Pilíř byl umístěn s excentricitou k uložení NK2 a tuhými vazbami byly do stativ přidány očekávané svislé reakce okolních konstrukcí od stálého zatížení. Reakce identické konstrukce NK3 byla stanovena z modelu NK2 jako 8080 kN na ložisko a pro NK1b byla odhadnuta na základě výsledků ze statického výpočtu [26] jako 1335 kN na ložisko. Založení na pilotách bylo zjednodušeno jen na vetknutí pat pilířů.

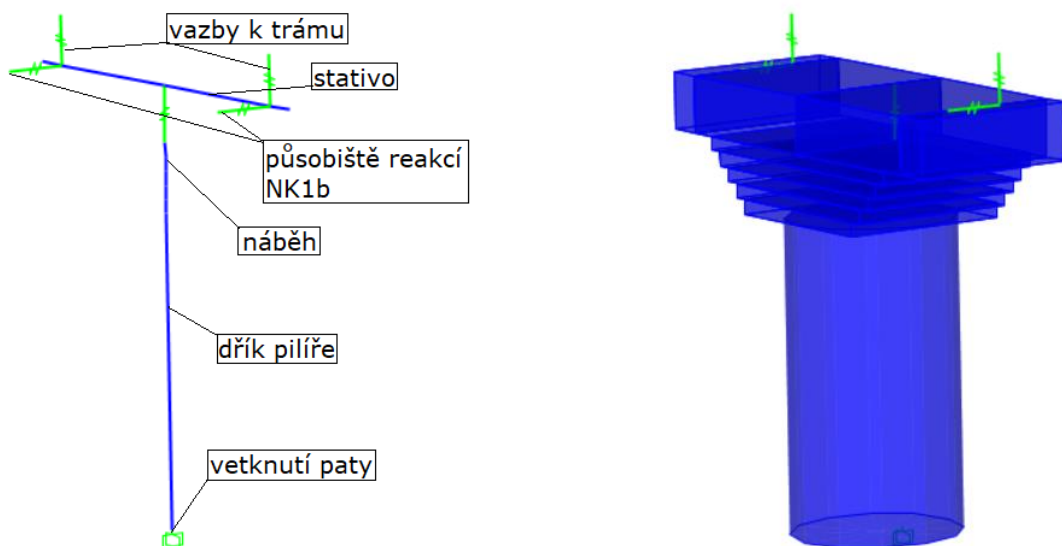




Obr. 114: Průřez dřívku pilíře



Obr. 115: Průřez stativa



Obr. 116: Pilíř



### 8.1.2. Útlum

Prof. Michal Polák provedl vyhodnocení útlumu konstrukce ze snímačů zrychlení použitých při dynamické zatěžovací zkoušce. Na základě jeho doporučení byl nyní uvažovaný poměrný útlum konstrukce 0,0064. Tato hodnota byla stanovena pro nejnižší vlastní frekvence, u nichž je předpokládán dominantní vliv.

### 8.1.3. Zatížení

#### Stálé

Stálé zatížení vycházelo z původního modelu (viz kapitola 5.2.1.). Přidáním prvků formou prutů (zábradlí, protihluková stěna, revizní dráha, koleje) bylo příslušné ostatní stálé zatížení odstraněno.

Významnému zvýšení vlastních frekvencí u ohybových vlastních tvarů ve svislém směru přispěla úprava objemové tíhy šterkového lože, jež byla původně uvažována jako  $\rho = 20 \text{ kN/m}^3$ . Nová hodnota vychází z použitých zatěžovacích vlaků. Při statické zkoušce byly vozy Faccpp naloženy 40 t šterku. Jejich ložný objem bez vrchlíku je  $30,6 \text{ m}^3$ , což odpovídá objemové hmotnosti  $1307 \text{ kg/m}^3$ . Šterk však nebyl ve vozech úplně po okraj, proto byla zvolena o něco vyšší hodnota objemové tíhy  $\rho = 14 \text{ kN/m}^3$ .

Všechna ostatní stálá zatížení byla opět do příslušných prvků aplikována i spojitě rozloženou hmotou.

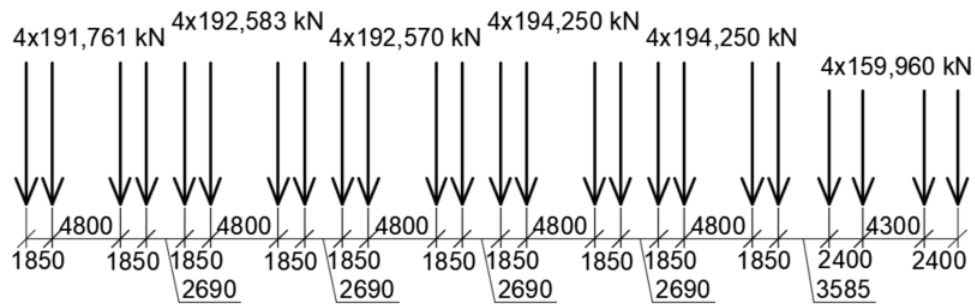
#### Proměnné

Zatěžovací vlaky byly upraveny na základě skutečně působících sil dle Tab. 23, str. 95 a Tab. 26, str. 105. Původní výpočet byl proveden s hodnotou tíhového zrychlení  $g = 10 \text{ m/s}^2$ , která byla nyní zpřesněna na  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ .

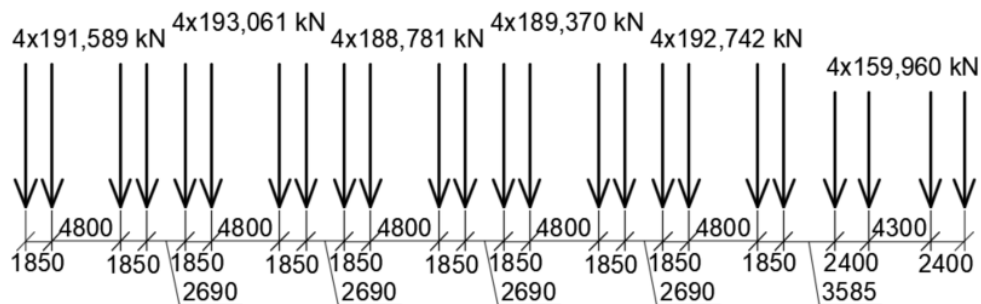
Vzhledem k úpravám modelu (vyloučení tlaku, vazby koleje) je nutné počítat v globálním modelu v CSI Bridge nelineární analýzou. Na rozdíl od výpočtu lineárního zde neplatí princip superpozice. V předchozích výpočtech bylo nelineárně počítáno jen stálé zatížení a z tuhosti konstrukce na konci tohoto stavu se vycházelo pro nadcházející lineárně počítané zatěžovací stavy s tím, že síly a deformace způsobené stálým zatížením nebyly součástí výsledků proměnných zatěžovacích stavů. To bylo výhodné, protože i během zatěžovacích zkoušek byla měřena pouze změna deformace a napětí způsobená zatěžovacími soupravami. V následujících výpočtech nelze oddělit výchozí stálé zatížení od navazujících zatěžovacích stavů a je možné získat výsledky jen pro jejich společné působení. Pro zjištění odezvy konstrukce pouze od proměnného zatížení byly od výsledků společného působení odečteny síly (příp. deformace) způsobeny pouze zatížením stálým. Předpokládá se, že chyba způsobená tímto nedokonalým postupem bude velmi malá a neovlivní významněji výsledky těchto i navazujících výpočtů.

#### Statická zatěžovací zkouška

Pro statickou zatěžovací zkoušku odpovídaly soupravy předpokladu, byly jen změněny velikosti sil dle skutečnosti.



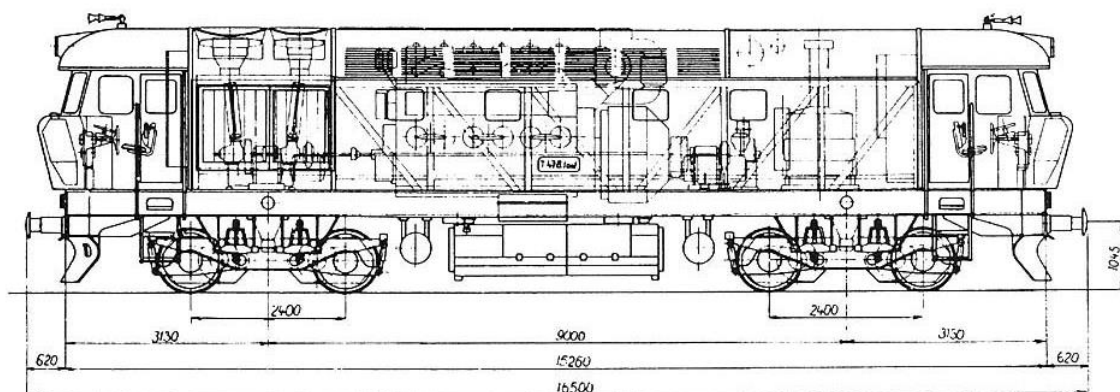
Obr. 117: Skutečné zatížení při SZZ na levé koleji



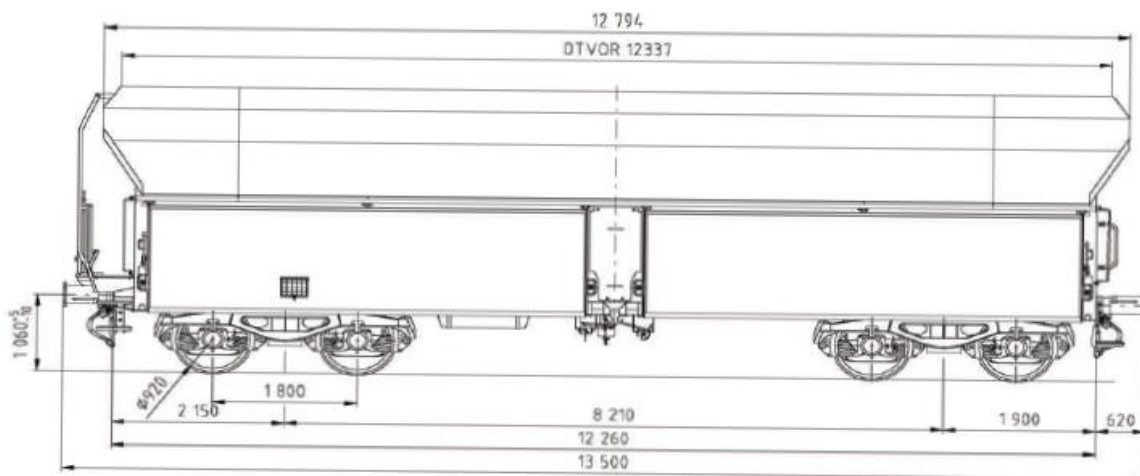
Obr. 118: Skutečné zatížení při SZZ na pravé koleji

### Dynamická zatěžovací zkouška

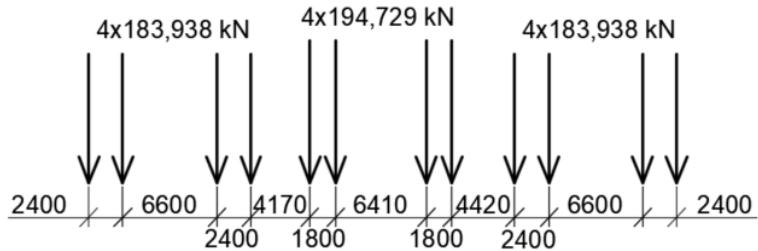
Na přejezdy při dynamické zkoušce byly využity lokomotivy 751 a vagon Falns. Uspořádání sil a jejich velikosti jsou patrné z Obr. 121.



Obr. 119: Lokomotiva 751



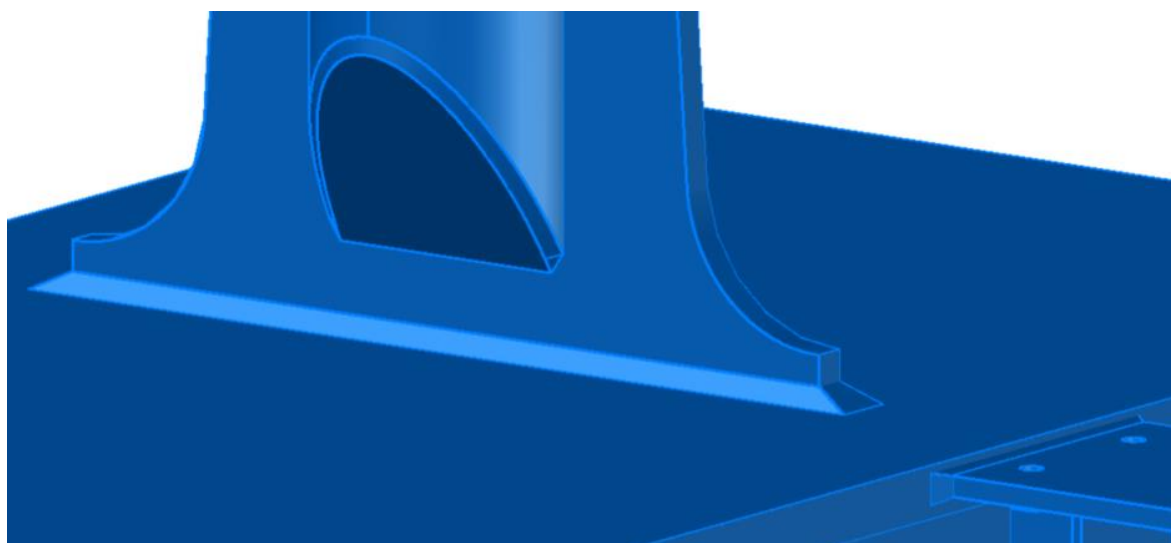
Obr. 120: Vůz Falns



Obr. 121: Skutečné zatížení při DZZ

## 8.2. Model Abaqus

### Geometrie

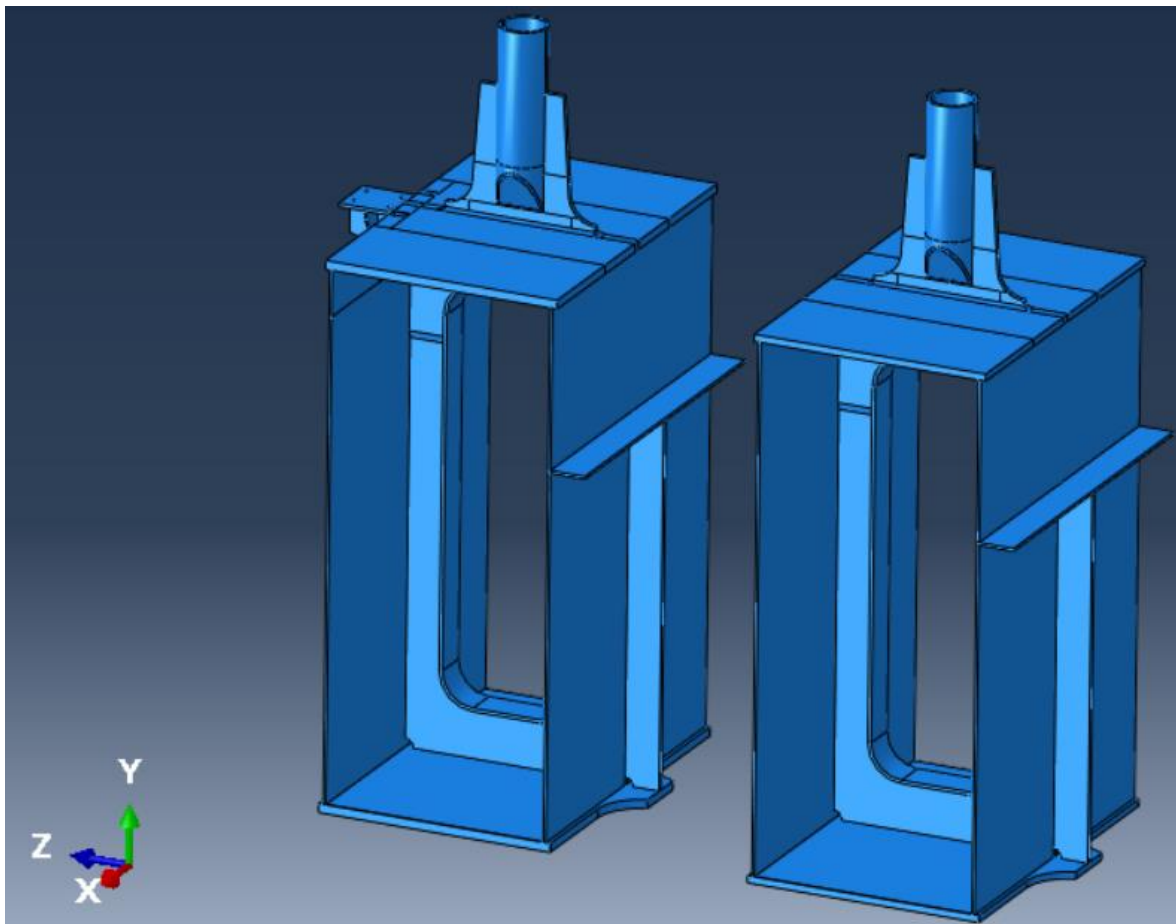


Obr. 122: Model T9 s upravenými svary



Po ověření skutečné geometrie byly opraveny svary styčnickového plechu k horní pásnici, k trubce a svar vrchního plechu konzoly. Všechny vytvářely plynulejší náběh, což by mělo vést k příznivějším napětím v jejich blízkém okolí. Reálné svary jsou viditelné na Obr. 24, str. 42 a Obr. 28, str. 45. Úpravy svarů jsou detailněji zobrazeny v Příloze A.

Styčnickový plech měl při kontrolním měření tloušťku 31 mm. Při uvážení části pro protikorozní ochranu, která se běžně může pohybovat kolem 200-300  $\mu\text{m}$ , byla tloušťka plechu zvětšena z 30 na 30,5 mm. Zbytek globální geometrie zůstal stejný jako v dřívějších modelech.



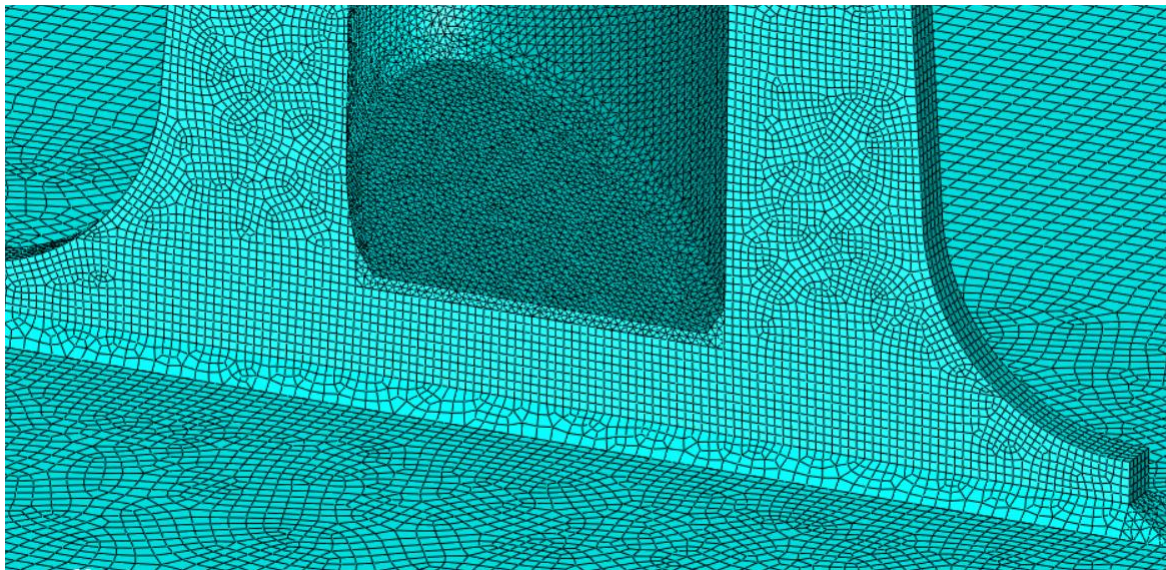
Obr. 123: Model T9 (vlevo) a T6 (vpravo)

### Sít prvků

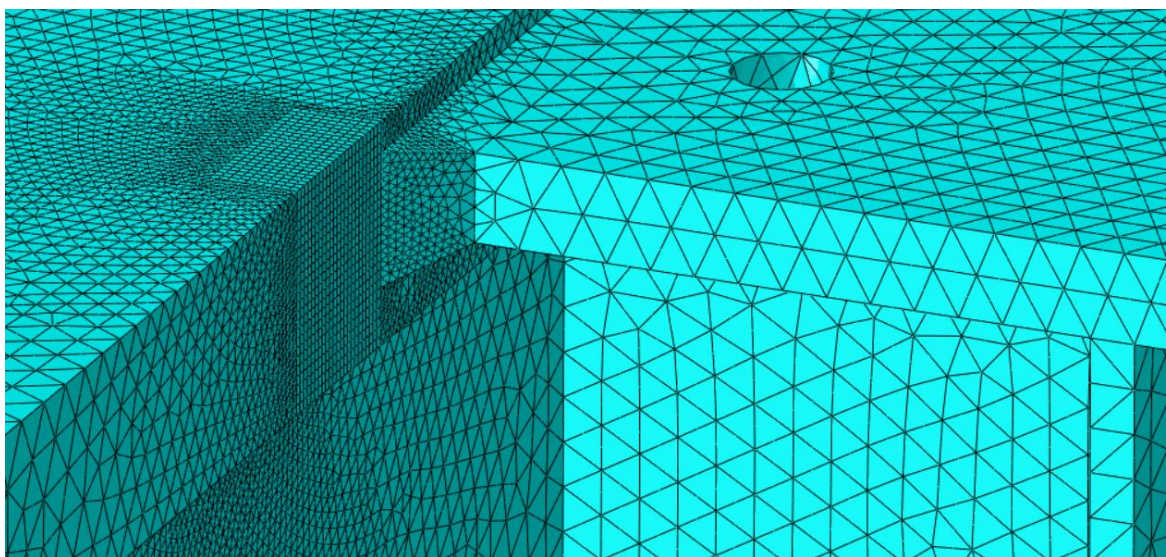
Tvorba sítě probíhala velmi podobně jako v předchozích modelech. Základní rozměry prvků zůstaly stejné podle aplikovaných zásad v kapitole 6.2. Mírná redukce počtu prvků byla dosažena jejich zvětšením ve vzdálenějších oblastech. Např. stěny trámu už měly po své tloušťce definovaný jen jeden prvek a horní pásnice zvětšovala své prvky dříve. Základní definovaný rozměr prvků v této hrubší síti měl nyní 20 mm. Pro model T9 byly navíc zvětšeny prvky závěsu a jeho připojení, jež má velmi malý vliv na zkoumanou oblast.

Na modelu T6 bylo nyní vytvořeno celkem 512 916 prvků a na T9 651 857.





*Obr. 124: Zobrazení sítě u připojení styčnickového plechu*



*Obr. 125: Zobrazení sítě u připojení konzoly*

### **Podepření a zatížení**

Následně bylo postupováno dle kapitol 6.3. a 6.4. Stejným způsobem byly zadány geometrické a statické okrajové podmínky.

### **Význam validace modelů**

Při pokusu výpočtů se vstupními hodnotami stejnými jako v kapitolách 5 a 6 bylo zjištěno, že úprava geometrie svarů, nevyvolala velké změny ve velikostech napětí. Větší vliv měla úprava tloušťky styčnickového plechu. Nejzásadnější však byla pro validaci úprava globálního modelu v CSI Bridge.



### 8.3. Vlastní frekvence a tvary

Vyhodnocení vlastních frekvencí a tvarů konstrukce na základě dynamické zatěžovací zkoušky poskytl Ing. Tomáš Plachý, Ph.D. Po validaci se větší odchylky nachází až u vyšších vlastních frekvencí.

pořadí frekvence	vlastní tvar	vlastní frekvence [s <sup>-1</sup> ]		
		výpočet	měření	rozdíl
1	1. vodorovné kmitání oblouku	0,90	0,85	5,6%
2	1. svislé ohybové kmitání	1,10	1,15	-4,5%
3	1. příčné kmitání	1,55	1,61	-3,9%
4	2. svislé ohybové kmitání	1,80	1,87	-3,9%
5	2. vodorovné kmitání oblouku	1,85	1,73	6,5%
6	3. svislé ohybové kmitání	2,52	2,98	-18,3%
13	1. kroutivé kmitání	2,74	2,42	11,7%
14	3. vodorovné kmitání oblouku	2,83	2,76	2,5%
20	2. kroutivé kmitání	3,37	3,36	0,3%

Tab. 38: Porovnání vlastních frekvencí a tvarů

### 8.4. Výpočty zatěžovacích zkoušek

Validace modelů byla ověřena také novými výpočty s břemeny z uskutečněných zatěžovacích zkoušek. Nyní byly vzhledem k časové náročnosti výpočtů využity pro porovnání napětí jen ZS1, ZS6 (20 km/h) a ZS14 (100 km/h). Další stav statické zatěžovací zkoušky ZS2 bude uveden pouze v průhybech, protože dle Grafu 38, str. 126 je patrné, že rozložení napětí neodpovídají ideálnímu případu při umístění tohoto zatížení a je zde zřejmý značný vliv teploty.

Nové průběhy vnitřních sil jsou uvedeny v Příloze B, koncové síly jsou k náhledu v Příloze C.

#### 8.4.1. Průhyby

Zatěžovací stav	průhyb v L/4 [mm]		průhyb v L/2 [mm]		průhyb v 3/4 L [mm]		
	levý	pravý	levý	pravý	levý	pravý	
ZS1	výpočet	69,5	70,0	24,9	25,9	-44,8	-43,8
	zkouška	67,5	72,0	23,0	24,8	-46,2	-46,7
	rozdíl	3%	-3%	8%	4%	-3%	-7%
ZS2	výpočet	20,8	21,7	46,6	47,9	8,5	9,6
	zkouška	20,0	23,4	43,3	48,1	6,5	9,6
	rozdíl	4%	-8%	7%	0%	24%	0%

Tab. 39: Porovnání průhybů pro SZZ





Zatěžovací stav		průhyb v L/4 [mm]	průhyb v L/2 [mm]	průhyb v 3/4 L [mm]
ZS6	výpočet	26,6	19,3	27,6
	zkouška	26,6	17,8	28,4
	rozdíl	0%	8%	3%
ZS14	výpočet	27,7	19,4	28,6
	zkouška	27,3	18,2	28,1
	rozdíl	1%	6%	2%

Tab. 40: Porovnání průhybů pro DZZ

### Kritérium normy ČSN 73 6209

Norma ČSN 73 6209 [27] srovnává pružné složky účinku ( $S_e$ ) s vypočtenými ( $S_{cal}$ ). Jako účinek zde bude posouzena svislá deformace odrážející globální chování konstrukce.

$$0,8 = \beta < \frac{S_e}{S_{cal}} \leq \alpha = 1,05$$

$$\beta = 0,8; \quad \alpha = 1,05$$

Z důvodu dlouhých časových intervalů mezi měřeními deformací, vlivu teploty a nedokonalé odtěžovací větve, jejíž příčinou bylo spolupůsobení konstrukcí během navazujících stavů, nelze stanovit pro statickou zatěžovací zkoušku trvalou deformaci. V globálním chování (průhybu trámů) se však nepředpokládá (příp. jen velmi malá), proto jsou zjištěné průhyby uvažovány jako pružné.

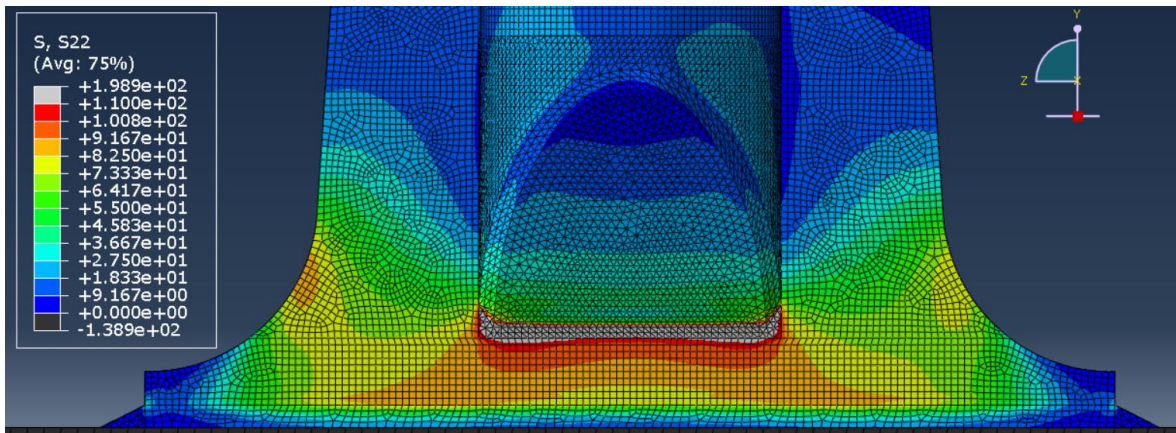
Kritérium nevychází ve statické zatěžovací zkoušce u tří případů, nicméně limitní hodnoty nejsou přesaženy výrazně.<sup>8</sup> Je však třeba uvážit výše vyjmenované nezanedbatelné vlivy a nepřesnosti vzniklé samotným měřením. S přihlédnutím k dobré shodě pro dynamickou zatěžovací zkoušku, jež je podpořeno i blízcími se vlastními frekvencemi a tvary, je globální chování modelu pro účely této práce považováno za dostatečně odpovídající skutečnosti.

### 8.4.2. Normálová napětí

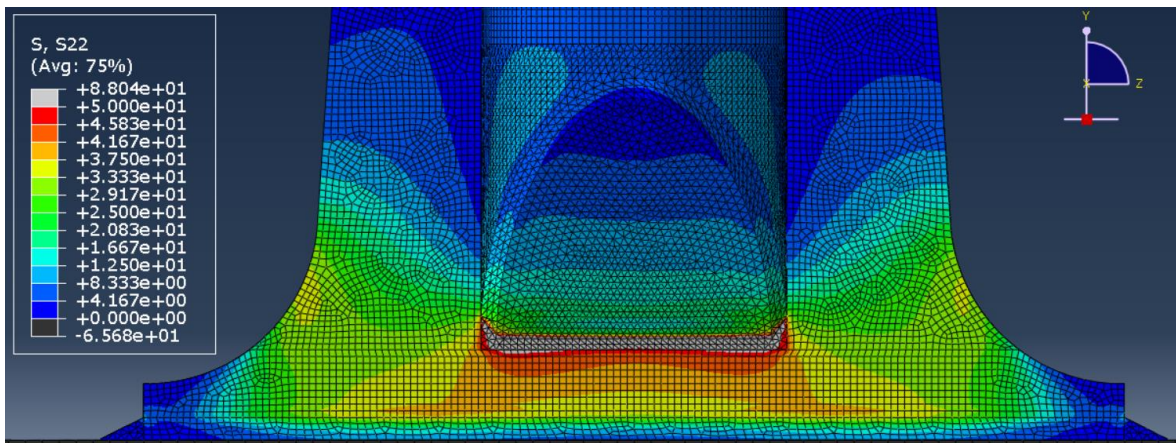
Níže je vykresleno rozložení napětí v okolí detailů pro ZS1 a maximum a minimum pro ZS14. Napětí pro ZS6 je velmi podobné ZS14.

Z průběhů normálových napětí je zřejmé, že i po úpravě geometrie svarů je stále nejvíce namáhán přípoj konce trubky ke styčnickovému plechu. V následujících posouzení detailů na únavu (kapitola 9) budou proto hledány maximální rozkmity napětí v patách obou svarů.

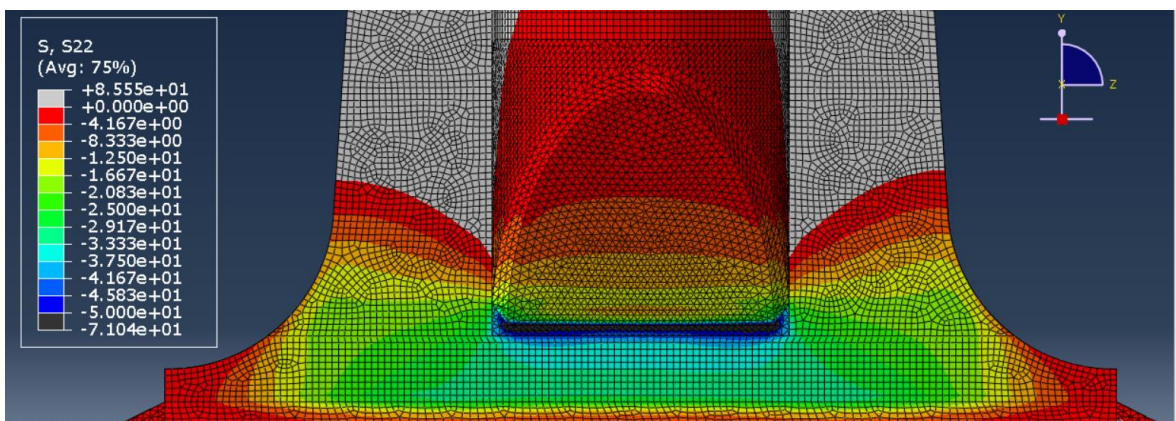
<sup>8</sup> Rozdíly hodnot v Tab. 39 a Tab. 40 by se měly na základě kritéria pohybovat mezi -5% a 20%.



Obr. 126: Normálové napětí ve směru Y – maximum na T6 (ZS1)

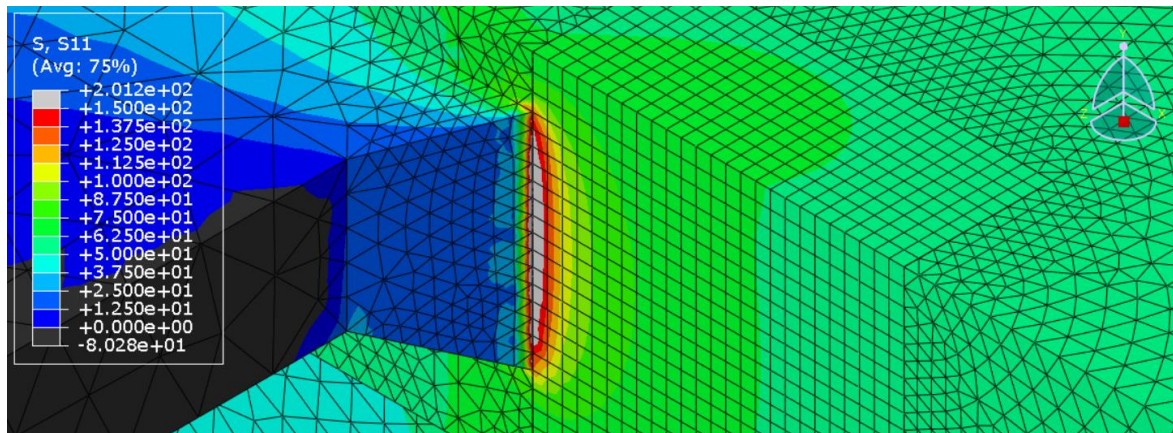


Obr. 127: Normálové napětí ve směru Y – maximum na T6 (ZS14 v  $t = 4,075$  s)

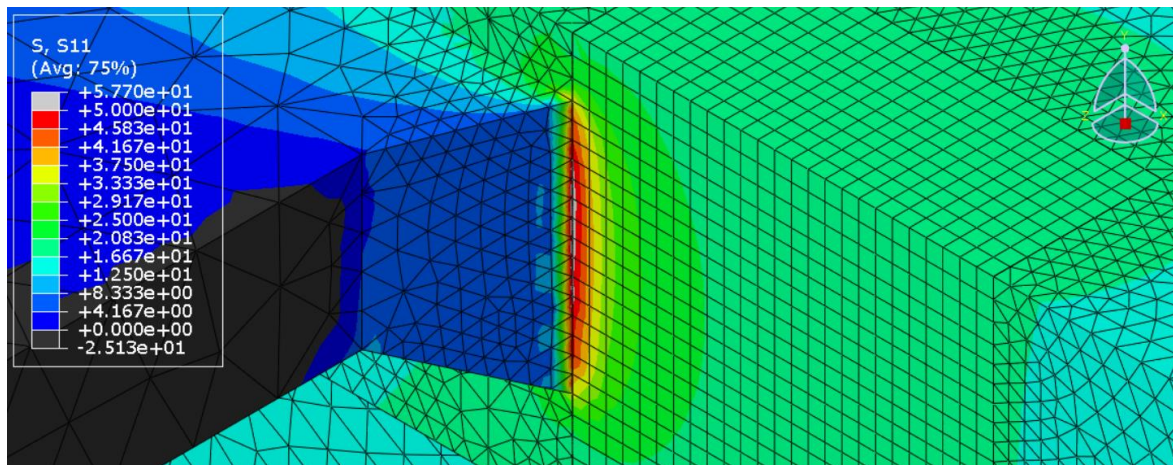


Obr. 128: Normálové napětí ve směru Y – minimum na T6 (ZS14 v  $t = 2,025$  s)

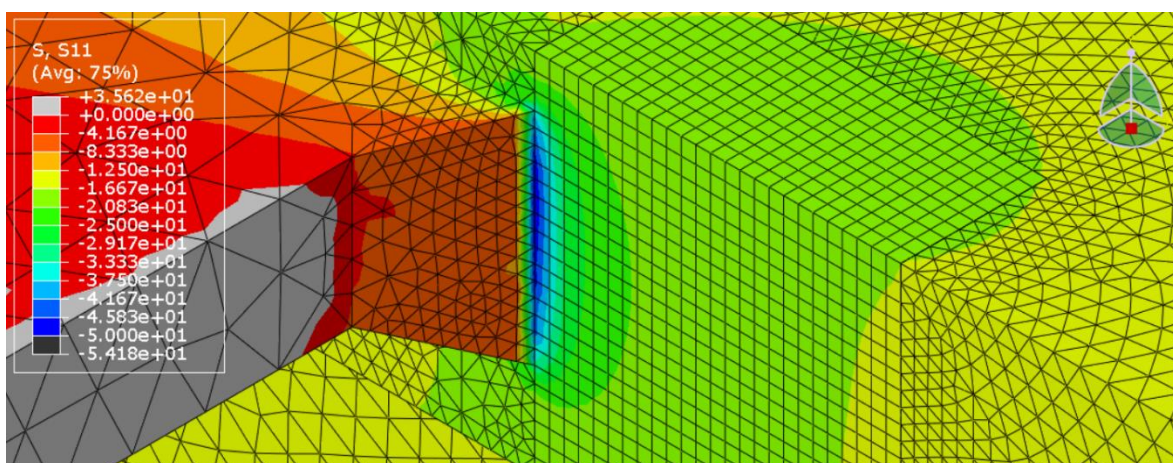




Obr. 129: Normálové napětí ve směru X – maximum na T9 (ZS1)



Obr. 130: Normálové napětí ve směru X – maximum na T9 (ZS14 v  $t = 2,2$  s)



Obr. 131: Normálové napětí ve směru X – minimum na T9 (ZS14 v  $t = 4,45$  s)

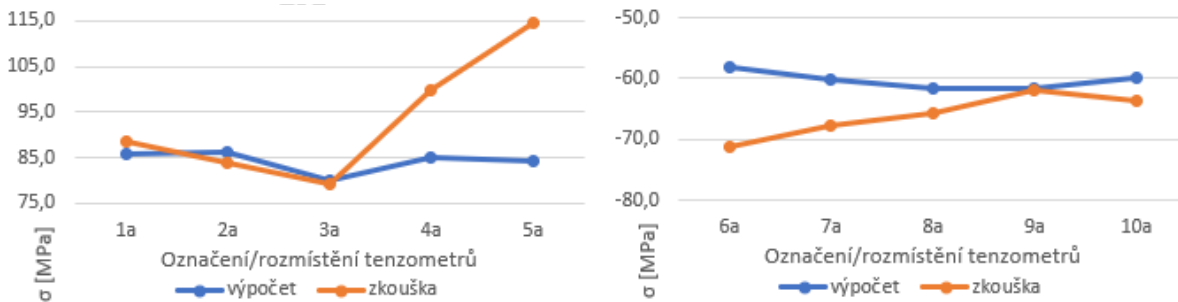


### Porovnání napětí

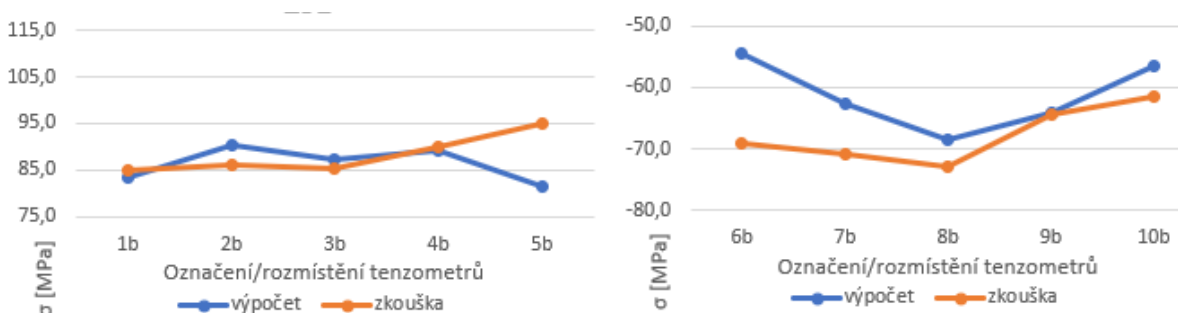
Z Tab. 41-44 a Grafů 46-54 je patrná lepší shoda mezi naměřenými a nově spočtenými napětími. Jsou porovnány velikosti napětí v místech tenzometrů a u styčnickového plechu jsou také dopočteny v bodech hot-spot stejně jako v kapitole 6.5.1. U konzoly napětí hot-spot stanoveno není, protože byly měřeny místo 3 potřebných bodů v řadě jen 2.

Právě napětí u detailu T9 dobře odpovídají realitě, proto budou zřejmě shodné i napětí v patě svaru. Nižší hodnoty z tenzometru 24 mohly vzniknout lokálními vlivy na povrchu plechu, zakřivením svaru, nebo také nepřesným umístěním tenzometru. V této oblasti je strmý nárůst napětí a posun i o 1 mm představuje poměrně výrazné změny. Shoda na tomto detailu potvrzuje kromě vystižení geometrie v okolí svaru i správné globální chování trámu.

Detail T6 nevykazuje takovou přesnost jako T9, což je dáno jeho větší citlivostí. Napětí u konzoly závisí na ohybovém momentu a normálové síle v trámu společně s podrobnou geometrií připojení na pásnici. Napětí na styčnickovém plechu se odvíjí především od ohybového momentu v závěsu, jež je sám o sobě malý. Napětí z něj pak nabývá velkých hodnot kvůli malé tloušťce styčnickového plechu. Takže i velmi jemná změna tohoto momentu je v důsledku poměrně výrazná. Velikost momentu lze ovlivnit např. úpravou tuhosti přípoje styčnickového plechu a celkového zpřesnění místa, nebo změnou útlumu závěsu a výplňové hmoty. Obecně se jen tenzometry 4a a 5a vymykají trendu u všech zatěžovacích stavů a zřejmě vykazují lokální koncentraci napětí. Tím je zde samozřejmě ovlivněna i hodnota hot-spot dopočítaná v patě svaru. Mimo tyto tenzometry má detail u T6 dostatečnou shodu pro pokračování ve výpočtech s normovými zatíženími.



Graf 46: ZS1 – Porovnání rozložení napětí – tenzometry 1a-10a

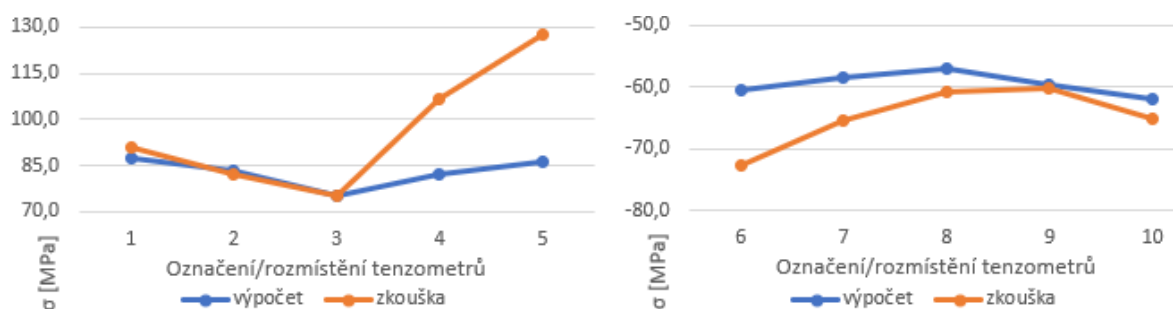


Graf 47: ZS1 – Porovnání rozložení napětí – tenzometry 1b-10b



číslo tenzometru	napětí $\sigma$ [MPa] na T6		
	SZZ – ZS1		
	výpočet	zkouška	rozdíl
1a	85,8	88,4	-3%
1b	83,2	84,8	-2%
2a	86,1	83,7	3%
2b	90,4	86,0	5%
3a	80,1	79,2	1%
3b	87,3	85,1	3%
4a	84,9	99,8	-18%
4b	89,0	89,9	-1%
5a	84,1	114,4	-36%
5b	81,3	94,9	-17%
6a	-58,0	-71,1	-23%
6b	-54,4	-69,0	-27%
7a	-60,1	-67,7	-13%
7b	-62,6	-70,9	-13%
8a	-61,7	-65,7	-6%
8b	-68,6	-73,0	-6%
9a	-61,5	-62,0	-1%
9b	-64,2	-64,5	0%
10a	-59,8	-63,8	-7%
10b	-56,5	-61,6	-9%
číslo tenzometru	napětí $\sigma$ [MPa] na T9		
	SZZ – ZS1		
	výpočet	zkouška	rozdíl
21	76,6	75,8	1%
22	105,9	104,5	1%
23	77,4	75,3	3%
24	107,5	98,8	8%

Tab. 41: Porovnání naměřených napětí s vypočtenými po validaci – SZZ



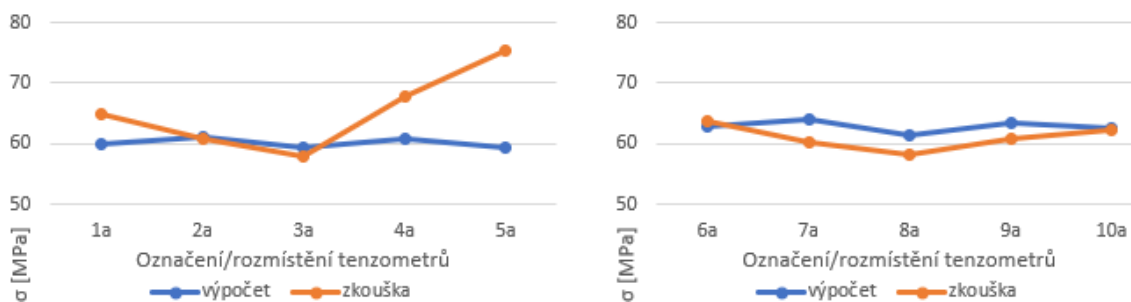
Graf 48: ZS1 – Porovnání rozložení hot-spot napětí – tenzometry 1-10



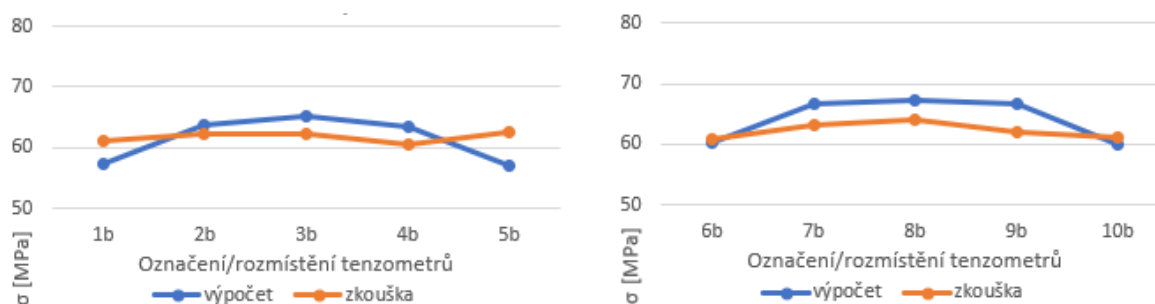


číslo tenzometru	napětí hot-spot $\sigma$ [MPa] na T6		
	SZZ – ZS1		
	výpočet	zkouška	rozdíl
1	87,5	90,8	-4%
2	83,2	82,2	1%
3	75,3	75,2	0%
4	82,2	106,4	-30%
5	86,0	127,5	-48%
6	-60,4	-72,6	-20%
7	-58,4	-65,5	-12%
8	-57,1	-60,8	-7%
9	-59,7	-60,3	-1%
10	-62,0	-65,2	-5%

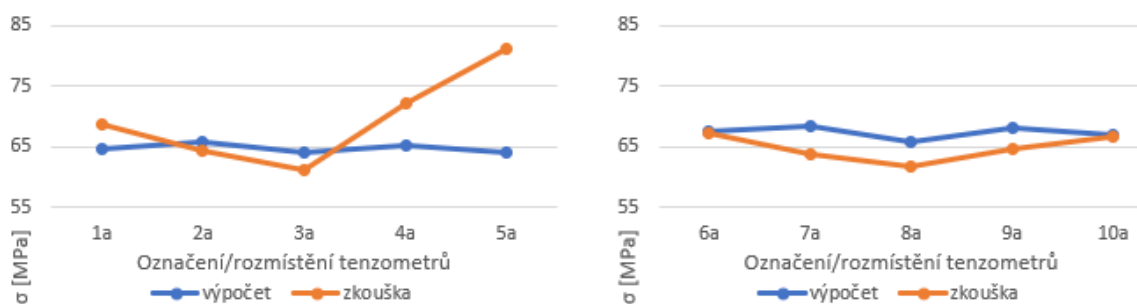
Tab. 42: Porovnání hotspot naměřených napětí s vypočtenými po validaci – SZZ



Graf 49: ZS6 (DZZ 20 km/h) - Porovnání rozložení napětí – tenzometry 1a-10a



Graf 50: ZS6 (DZZ 20 km/h) - Porovnání rozložení napětí – tenzometry 1b-10b



Graf 51: ZS14 (DZZ 100 km/h) - Porovnání rozložení napětí – tenzometry 1a-10a



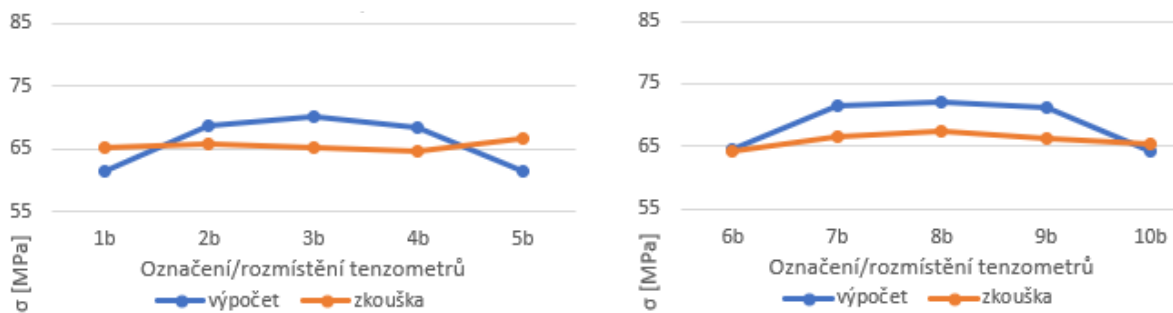


# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

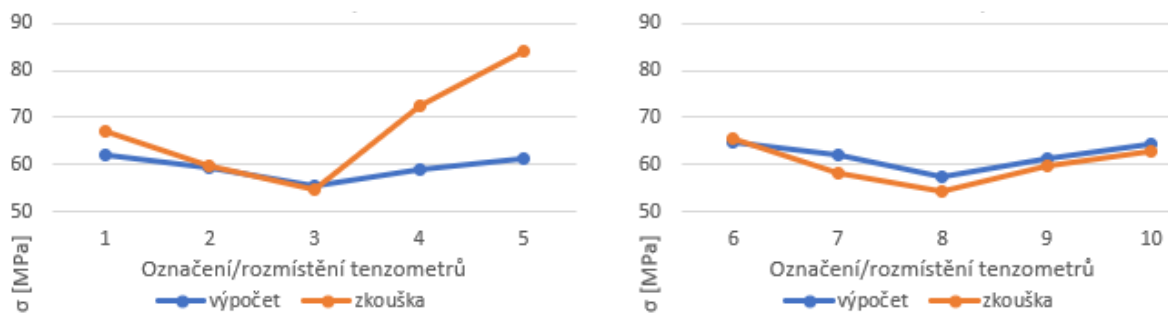
## Únavová životnost železničního mostu v Púchově



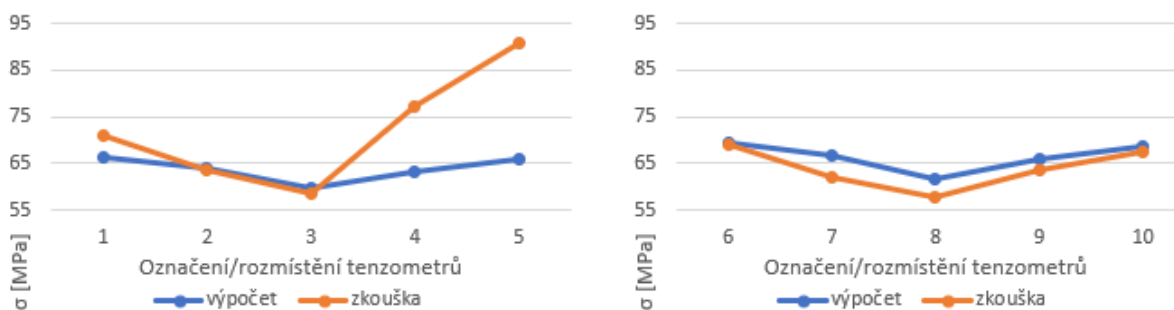
Graf 52: ZS14 (DZZ 100 km/h) - Porovnání rozložení napětí – tenzometry 1b-10b

číslo tenzometru	rozkmit napětí $\Delta\sigma$ [MPa] na T6					
	20 km/h			100 km/h		
	výpočet	zkouška	rozdíl	výpočet	zkouška	rozdíl
1a	60,0	64,8	-8%	64,5	68,7	-6%
1b	57,2	61,1	-7%	61,5	65,1	-6%
2a	61,1	60,8	0%	65,8	64,4	2%
2b	63,7	62,3	2%	68,6	65,7	4%
3a	59,4	57,9	3%	63,9	61,2	4%
3b	65,3	62,4	4%	70,2	65,3	7%
4a	60,7	67,7	-12%	65,3	72,2	-11%
4b	63,5	60,5	5%	68,4	64,7	5%
5a	59,5	75,4	-27%	64,0	81,1	-27%
5b	56,9	62,5	-10%	61,3	66,8	-9%
6a	62,9	63,7	-1%	67,5	67,1	1%
6b	60,2	61,0	-1%	64,5	64,4	0%
7a	63,9	60,3	6%	68,5	63,8	7%
7b	66,6	63,2	5%	71,4	66,6	7%
8a	61,3	58,2	5%	65,8	61,7	6%
8b	67,4	64,1	5%	72,2	67,4	7%
9a	63,5	60,7	4%	68,0	64,7	5%
9b	66,6	62,1	7%	71,2	66,3	7%
10a	62,6	62,3	1%	66,9	66,7	0%
10b	60,1	61,2	-2%	64,2	65,5	-2%
číslo tenzometru	rozkmit napětí $\Delta\sigma$ [MPa] na T9					
	20 km/h			100 km/h		
	výpočet	zkouška	rozdíl	výpočet	zkouška	rozdíl
21	40,8	40,6	0%	43,2	42,9	1%
22	56,0	55,8	0%	59,2	58,8	1%
23	41,2	40,2	2%	43,5	42,4	3%
24	56,7	52,7	7%	59,9	55,8	7%

Tab. 43: Porovnání naměřených napětí s vypočtenými po validaci – DZZ



Graf 53: ZS6 – Porovnání rozložení hot-spot napětí – tenzometry 1-10



Graf 54: ZS14 – Porovnání rozložení hot-spot napětí – tenzometry 1-10

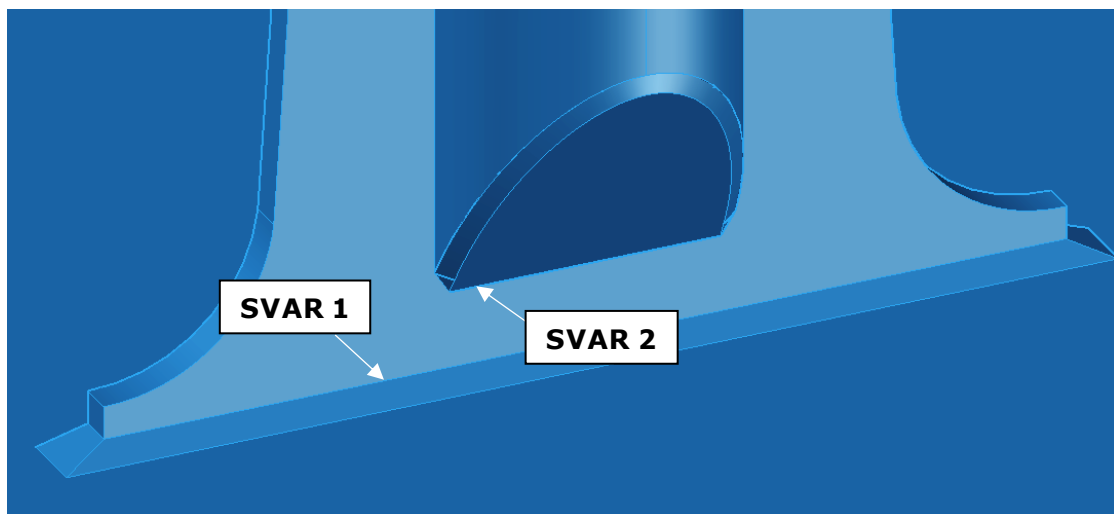
číslo tenzometru	rozkmit napětí $\Delta\sigma$ [MPa] na T6					
	20 km/h			100 km/h		
	výpočet	zkouška	rozdíl	výpočet	zkouška	rozdíl
1	61,9	67,2	-9%	66,5	71,1	-7%
2	59,4	59,8	-1%	63,9	63,5	1%
3	55,4	54,8	1%	59,7	58,5	2%
4	58,8	72,6	-23%	63,2	77,3	-22%
5	61,2	84,0	-37%	65,8	90,6	-38%
6	64,7	65,6	-1%	69,5	68,9	1%
7	62,1	58,3	6%	66,6	62,0	7%
8	57,2	54,2	5%	61,5	57,9	6%
9	61,4	59,8	3%	65,9	63,6	3%
10	64,3	63,0	2%	68,7	67,4	2%

Tab. 44: Porovnání hotspot naměřených napětí s vypočtenými po validaci – DZZ

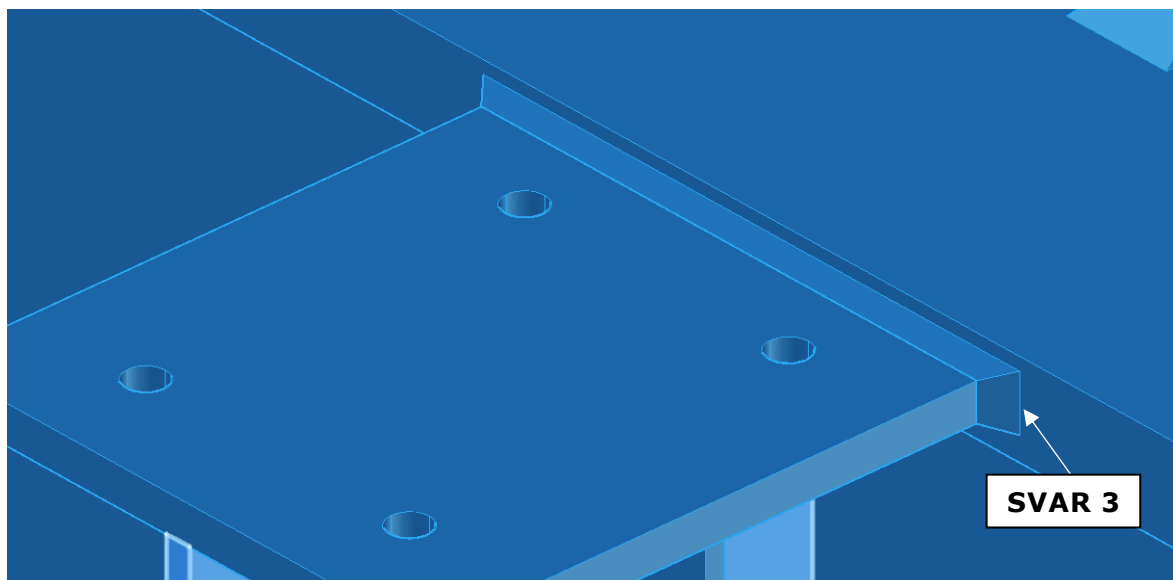


## 9. ÚNAVOVÁ ŽIVOTNOST DETAILŮ

V této kapitole budou posuzovány 3 místa s očekávanými velkými rozkmity napětí. Pro detail T6 bude rozhodující svar konce trubky ke styčnickovému plechu (svar 2), což plyne z rozložení normálových napětí v kapitole 8.4.2. Ve stejných okamžicích a polohách zatížení bude však nejvíce namáhán i svar styčnickového plechu k horní pásnici trámu (svar 1). Pro porovnání bude odečítáno napětí z referenčních uzlů i pro něj.



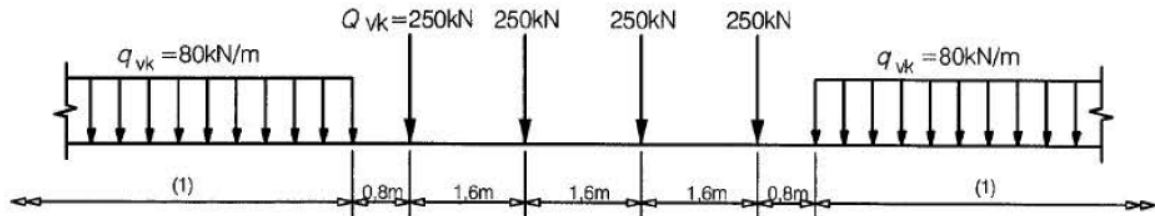
Obr. 132: Místa pravděpodobného vzniku únavových trhlin u přípoje závěsu



Obr. 133: Místo pravděpodobného únavové vzniku trhliny u přípoje konzoly



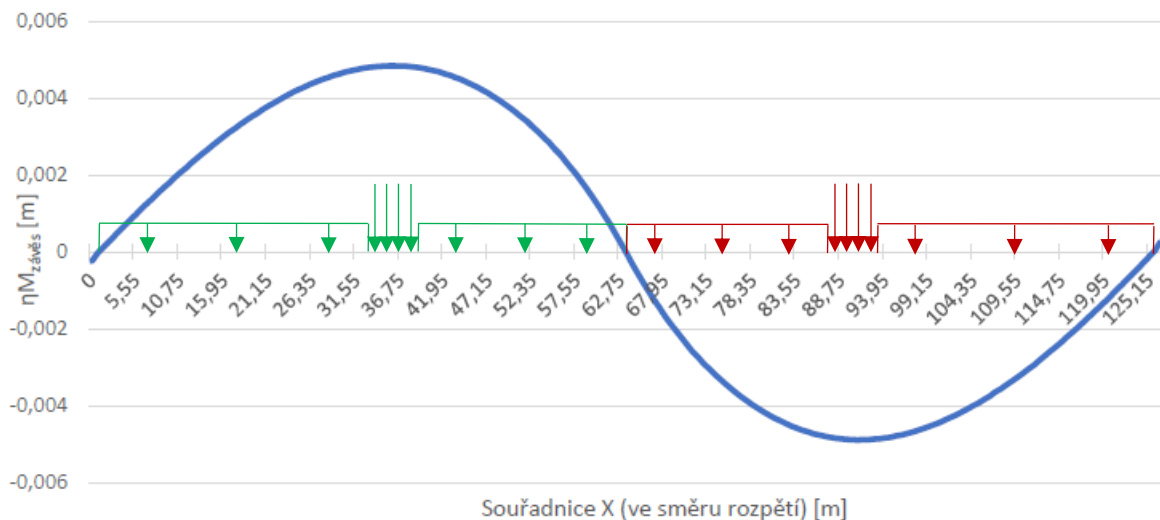
### 9.1. Posouzení únavy modelem LM71



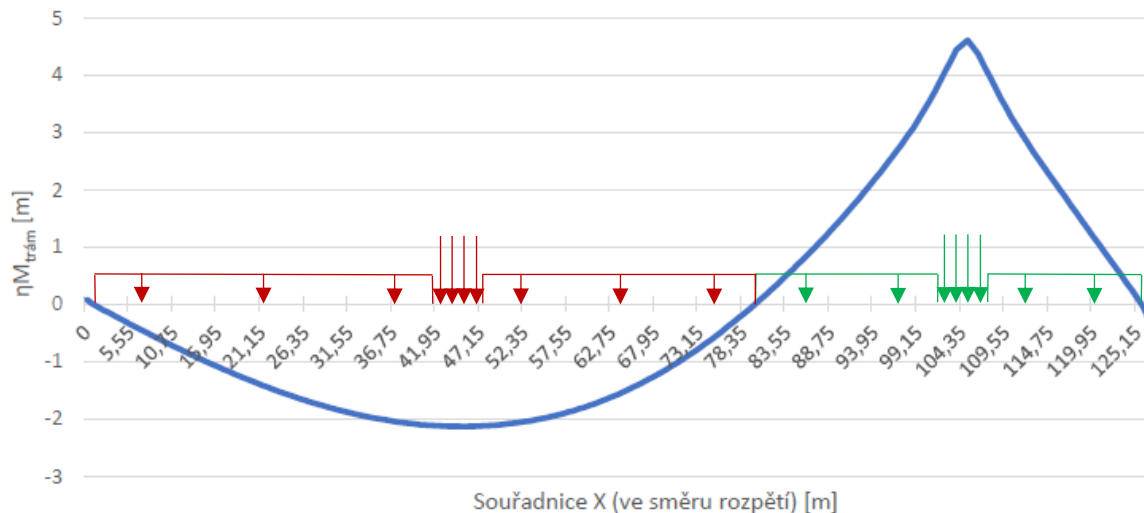
Obr. 134: Model zatížení LM71 [15]

Na most bylo umístěno zatížení LM71 na základě příčinkových čar, protože je třeba dát zatížení do poloh, kde vyvolává maximální napětí (příp. vnitřní síly), a zároveň ho odebrat z míst, kde by se projevily odlehčující účinky. Analýza „Moving-load“, která sama aplikuje zatížení podle příčinkových čar a zároveň umožňuje jejich zobrazení, počítá pouze lineárně. V modelu jsou však zavedeny nelineární vazby koleje a také je vyloučen tlak u lanek spínající táhla. Proto byly příčinkové čáry spočteny na původním lineárním modelu před validací. Podle nich byly stanoveny konkrétní polohy vyvolávající maximální a minimální ohybový moment v levém závěsu T6 nad přípojem a v pravém trámu pod T9 (viz Grafy 55 a 56). Předpokládá se, že validací nedošlo k významné změně tvaru příčinkových čar a že chyba nebude mít velký vliv na výsledek posouzení.

Dále byl problém zavést v tomto programu do výpočtu klasické spojitě zatížení, proto bylo nahrazeno osamělými silami diskretizovanými po vzdálenosti 1 m.



Graf 55: Příčinková čára momentu na závěsu T6 s vyznačením poloh zatížení



Graf 56: Příčinková čára momentu na trám u T9 s vyznačením poloh zatížení

Norma ČSN EN 1991-2 [15] stanovuje, že návrh mostu musí vyhovovat libovolné poloze kolejí v příčném řezu při dodržení volného mostního průřezu a nejmenších přípustných osových vzdáleností kolejí. Přestože se jedná o nový most, bylo v rámci jeho posouzení rozhodnuto, že rozmístění kolejí bude uvažováno pouze v souladu se současnou polohou.

Naproti tomu bylo však uvažováno s excentricitou polohy zatížení vůči ose koleje v důsledku nerovnoměrně rozloženého nákladu, přestože podle normy ČSN EN 1991-2 [15] může být zanedbána. Poměr zatížení mezi nápravami je stanoven 1,25:1. Při vzdálenosti kolejnic 1,5 m vychází tato excentricita 83 mm.

$$e = \frac{r}{18} = \frac{1500}{18} = 83 \text{ mm}$$

### Dynamický součinitel

- $L_{\Phi}$  pro závěs – čtyřnásobek vzdálenosti závěsů v podélném směru

$$L_{\Phi, \text{zav}} = 4 \cdot L_{\text{zav}} = 4 \cdot 10,4 = 41,6 \text{ m}$$

$$\Phi_{2, \text{zav}} = \frac{1,44}{\sqrt{L_{\Phi, \text{zav}} - 0,2}} + 0,82 = \frac{1,44}{\sqrt{41,6 - 0,2}} + 0,82 = 1,05$$

$$1,00 \leq \Phi_{2, \text{zav}} \leq 1,67; \quad 1,00 < 1,05 < 1,67$$

$$\Phi_{2, \text{zav}} = 1,05$$

- $L_{\Phi}$  pro trám – rozpětí ve směru hlavních nosníků

$$L_{\Phi, \text{trám}} = 124,8 \text{ m}$$

$$\Phi_{2, \text{trám}} = \frac{1,44}{\sqrt{L_{\Phi, \text{trám}} - 0,2}} + 0,82 = \frac{1,44}{\sqrt{124,8 - 0,2}} + 0,82 = 0,95$$



$$1,00 \leq \Phi_{2,tram} \leq 1,67; 1,00 > 0,95$$

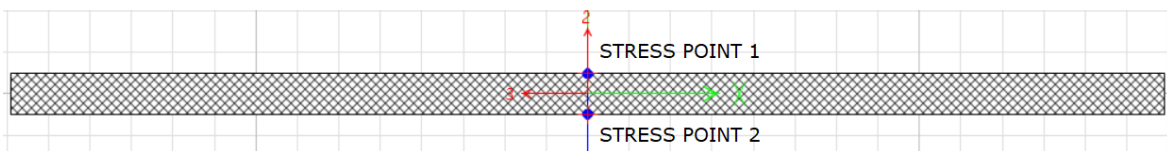
$$\Phi_{2,tram} = 1,00$$

### 9.1.1. Jmenovitá napětí

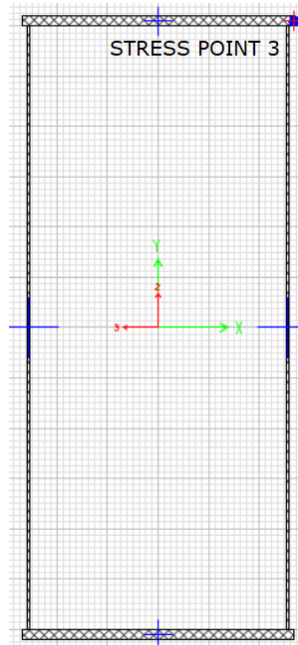
#### Výsledky ze CSI Bridge

U detailu T6 bylo normálové napětí stanoveno na okrajích plechu v ose závěsu. Pro posouzení byla vybrána žilinská strana s větším rozkmitem. Kvůli poměrně obtížnému místu pro získání napětí (proměnný tvar styčnickového plechu řešený náhradními průřezy) v kombinaci s hrubou sítí bylo pro oba svary na T6 odečteno napětí z jednoho místa mezi nimi.

Normálové napětí u konzoly bylo určeno na pravém horním okraji průřezu trámy v místě osy pravého závěsu T9.



Obr. 135: Body na styčnickovém plechu, kde bylo odečteno normálové napětí



Obr. 136: Bod na trámu, z něž bylo odečteno normálové napětí





Místo		Normálové napětí [MPa]		
Závěs	Strana	Extrém	Zatížené koleje	
			jedna	obě
T6	Žilina	max	65,9	109,8
		min	-42,4	-79,5
		<b>rozkmit</b>	<b>108,3</b>	<b>189,3</b>
	Púchov	max	61,1	108,1
		min	-45,9	-79,3
		<b>rozkmit</b>	<b>107,0</b>	<b>187,4</b>
T9	Púchov	max	43,7	77,4
		min	-31,1	-57,7
		<b>rozkmit</b>	<b>74,8</b>	<b>135,1</b>

Tab. 45: Rozkmitý jmenovitých napětí

### Součinitel $\lambda$

$$\lambda = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4$$

- $\lambda_1$  – definováno maximálně pro  $L = 100$  m

$$\lambda_1 = 0,6$$

- $\lambda_2$  – dle Expertního posouzení [1] je uvažováno  $30 \cdot 10^6$  t/kolej za rok

$$\lambda_2 = 1,04$$

- $\lambda_3$  – návrhová životnost mostu je 100 let

$$\lambda_3 = 1,0$$

- $\lambda_4$  – poměr rozkmitů pro závěs

$$\Delta\sigma_1 = 108,3 \text{ MPa}$$

$$\Delta\sigma_{1+2} = 189,3 \text{ MPa}$$

$$\Delta\sigma_1/\Delta\sigma_{1+2} = 108,3/189,3 = 0,572$$

$$\lambda_4 = 0,717$$

- $\lambda_4$  – poměr rozkmitů pro trám

$$\Delta\sigma_1 = 74,8 \text{ MPa}$$

$$\Delta\sigma_{1+2} = 135,1 \text{ MPa}$$

$$\Delta\sigma_1/\Delta\sigma_{1+2} = 74,8/135,1 = 0,554$$

$$\lambda_4 = 0,715$$



- $\lambda$  pro závěs

$$\lambda = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4 = 0,6 \cdot 1,04 \cdot 1,0 \cdot 0,717 = 0,447$$

$$0,447 = \lambda \leq \lambda_{max} = 1,4$$

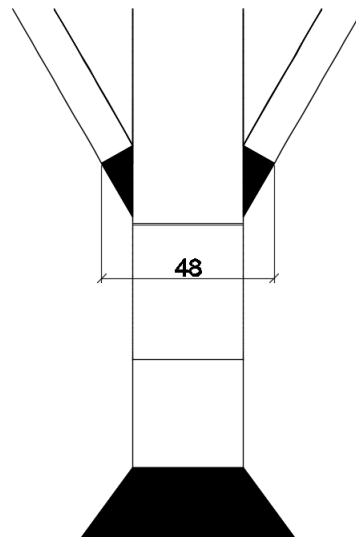
- $\lambda$  pro trám

$$\lambda = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4 = 0,6 \cdot 1,04 \cdot 1,0 \cdot 0,715 = 0,446$$

$$0,446 = \lambda \leq \lambda_{max} = 1,4$$

### Kategorie detailů<sup>9</sup>

- pro závěs  $\Delta\sigma_{c,zav,1} = 71$  MPa (pravá strana 63 MPa)
- pro závěs  $\Delta\sigma_{c,zav,2} = 80$  MPa



Obr. 137: Parametr „l“ pro stanovení kategorie detailu (křížové a T spoje)

- pro trám  $\Delta\sigma_{c,tram} = 40$  MPa

### Ekvivalentní rozkmit napětí

- pro závěs – svar 1

$$\Delta\sigma_{E,2} = \lambda \cdot \Phi_2 \cdot \Delta\sigma_p = 0,447 \cdot 1,05 \cdot 189,3 = 88,8 \text{ MPa}$$

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2} \leq \frac{\Delta\sigma_c}{\gamma_{Mf}} \rightarrow \frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_c / \gamma_{Mf}} \leq 1,0$$

$$\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_c / \gamma_{Mf}} = \frac{1,0 \cdot 88,8}{71 / 1,15} = \frac{88,8}{61,7} = 1,44 > 1,0$$

**NEVYHOVÍ**

<sup>9</sup> dle kapitol 4.2.1. a 4.2.2.



- pro závěs – svar 2

$$\Delta\sigma_{E,2} = \lambda \cdot \Phi_2 \cdot \Delta\sigma_p = 0,447 \cdot 1,05 \cdot 189,3 = 88,8 \text{ MPa}$$

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2} \leq \frac{\Delta\sigma_C}{\gamma_{Mf}} \rightarrow \frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_C/\gamma_{Mf}} \leq 1,0$$

$$\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_C/\gamma_{Mf}} = \frac{1,0 \cdot 88,8}{80/1,15} = \frac{88,8}{69,6} = \mathbf{1,28 > 1,0}$$

### **NEVYHOVÍ**

- pro trám – svar 3

$$\Delta\sigma_{E,2} = \lambda \cdot \Phi_2 \cdot \Delta\sigma_p = 0,446 \cdot 1,0 \cdot 135,1 = 63,0 \text{ MPa}$$

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2} \leq \frac{\Delta\sigma_C}{\gamma_{Mf}} \rightarrow \frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_C/\gamma_{Mf}} \leq 1,0$$

$$\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_C/\gamma_{Mf}} = \frac{1,0 \cdot 63,0}{40/1,15} = \frac{63,0}{34,8} = \mathbf{1,81 > 1,0}$$

### **NEVYHOVÍ**

## 9.1.2. Modifikovaná jmenovitá napětí

Jmenovité napětí není většinou pro posouzení únavy dostatečně přesné. Nevypovídá totiž o koncentraci napětí v okolí konkrétních detailů. Čím více se tedy liší zkoumaný detail od normovaných kategorií detailů, tím je do posudku vnášena větší nepřesnost. Tímto bude lépe vystiženo rozložení napětí v místech náhlých změn průřezů.

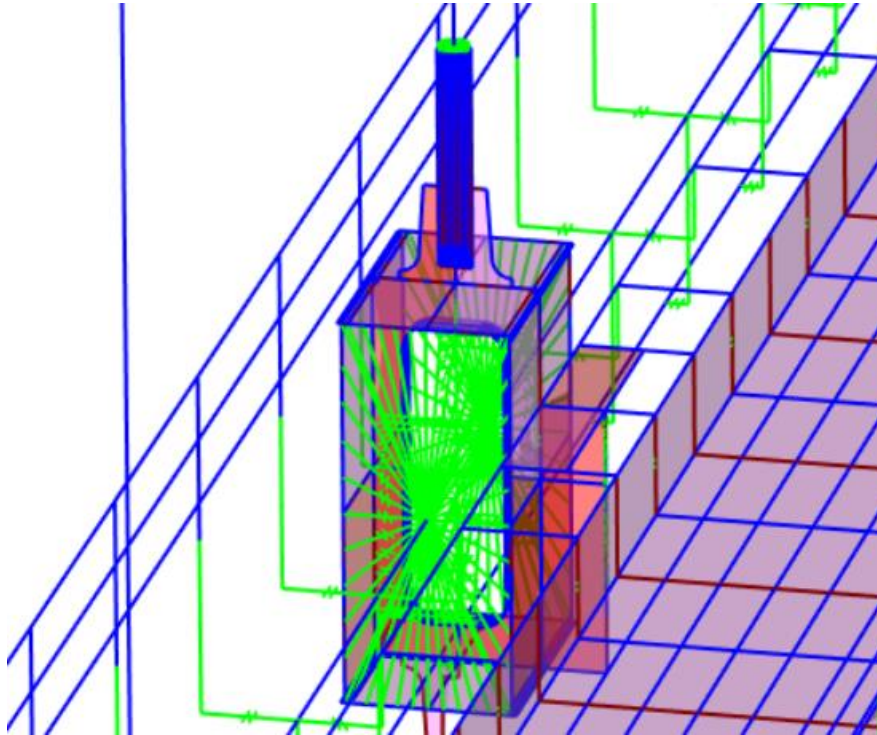
Pro stanovení tohoto napětí bylo postupováno podobně jako v Expertním posouzení [1]. V globálního modelu v CSI Bridge byly detaily zpřesněny pomocí skořepinových prvků. V místě napojení na prutový model byla vytvořena síť tuhých vazeb.

Opět byly provedeny nelineární výpočty, což znamená, že zobrazené výsledky pro modely LM71 jsou včetně stálých zatížení. V Tab. 46, str. 165 je již normálové napětí způsobené stálým zatížením odečteno.

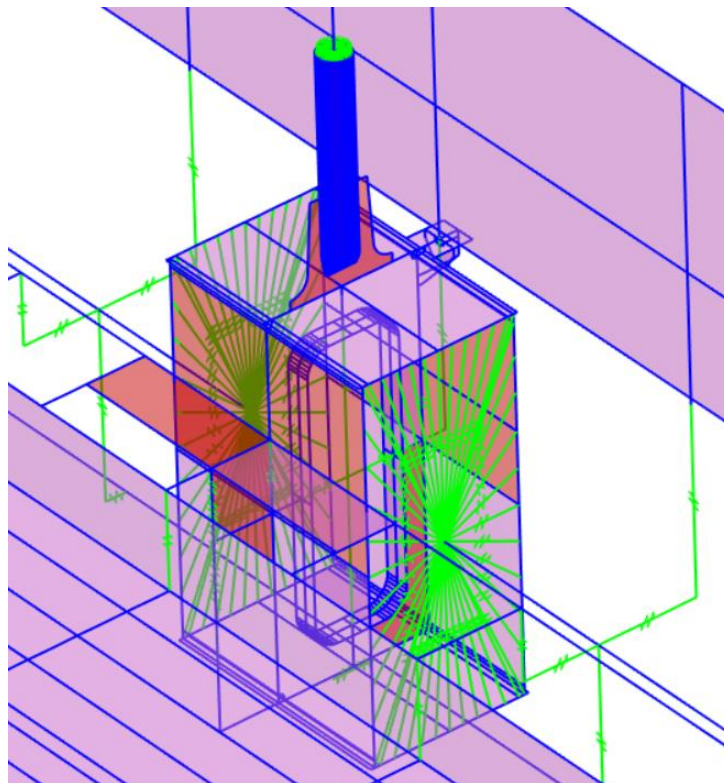
Největší rozkmit napětí se zde na styčnickovém plechu nachází u obou svarů pod stěnou trubky, tj. cca 125 mm od osy závěsu – pod pravým úhlem u zobrazených částí plechů s výsledky. Napětí bylo odečítáno v místě paty svarů.

Během výpočtů obou modelů se projevila velká citlivost na volbu sítě prvků. Nakonec byly zavedeny prvky s rozměry odpovídajícími tloušťce plechů (alespoň v oblastech, kde bylo zjišťováno napětí).<sup>10</sup>

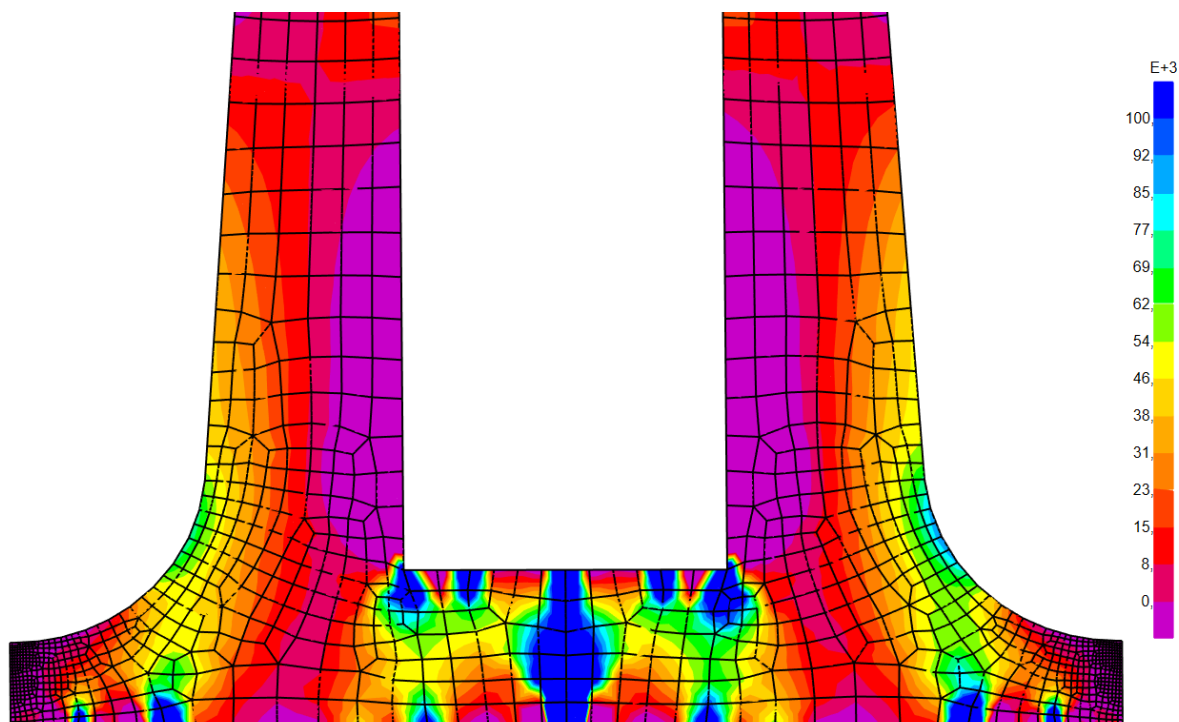
<sup>10</sup> styčnickový plech – 30 mm, horní pásnice trámu u T9 – 50 mm



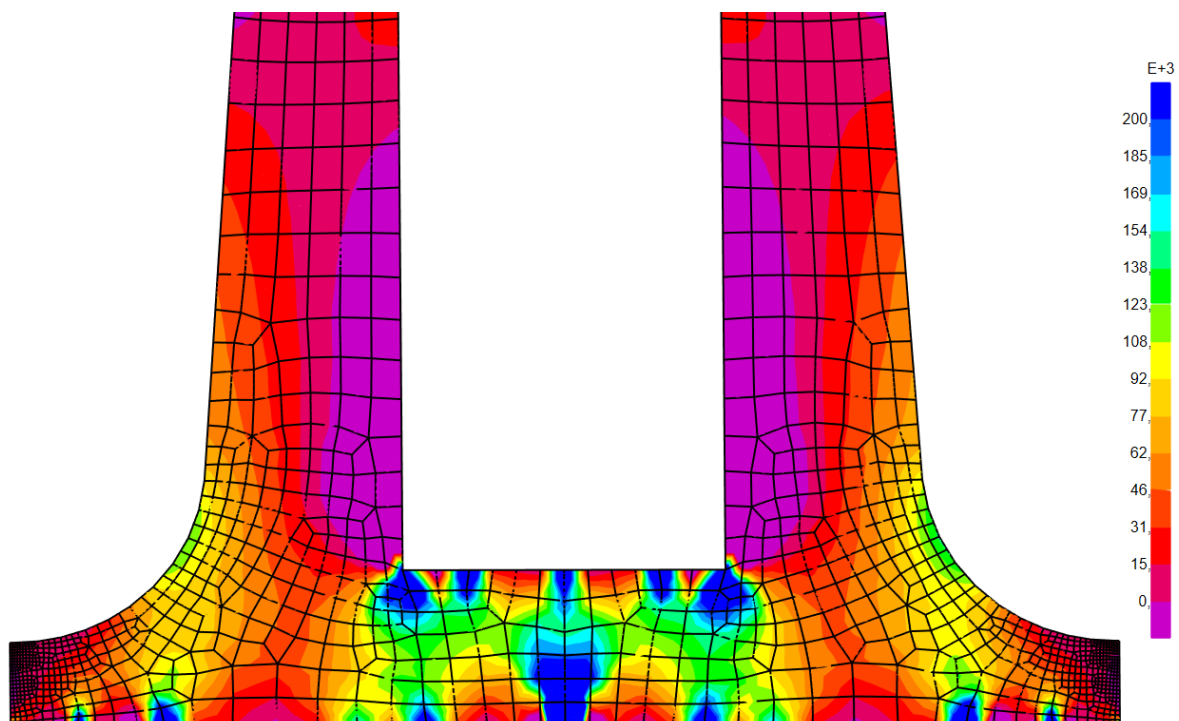
*Obr. 138: Zpřesnění detailu u T6 skořepinovými prvky*



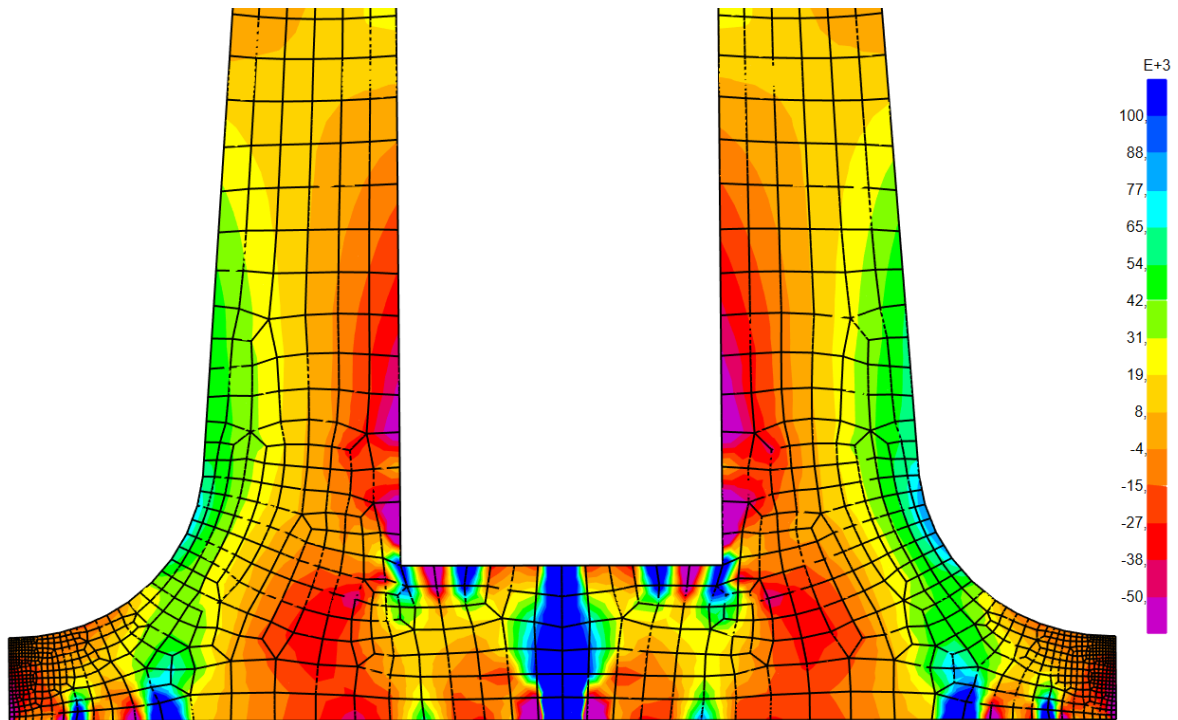
*Obr. 139: Zpřesnění detailu u T9 skořepinovými prvky*



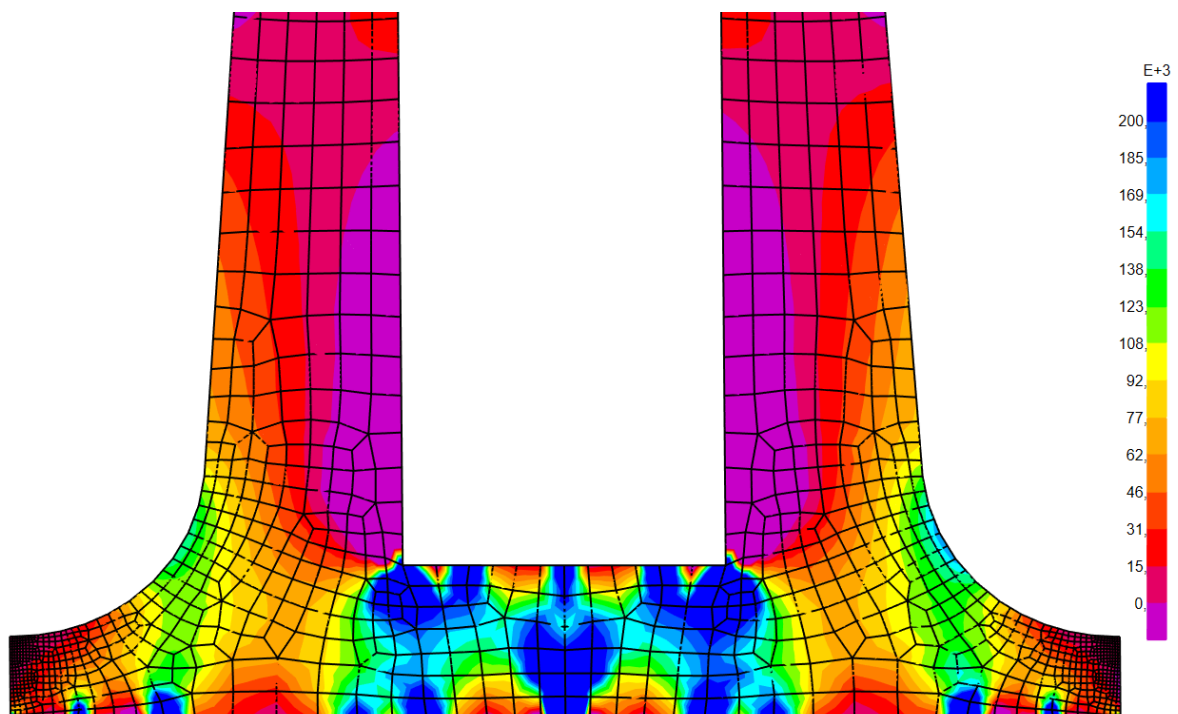
Obr. 140: Normálová napětí [kPa] na T6 (stálé zatížení)



Obr. 141: Max. normálová napětí [kPa] na T6 (LM71-1)

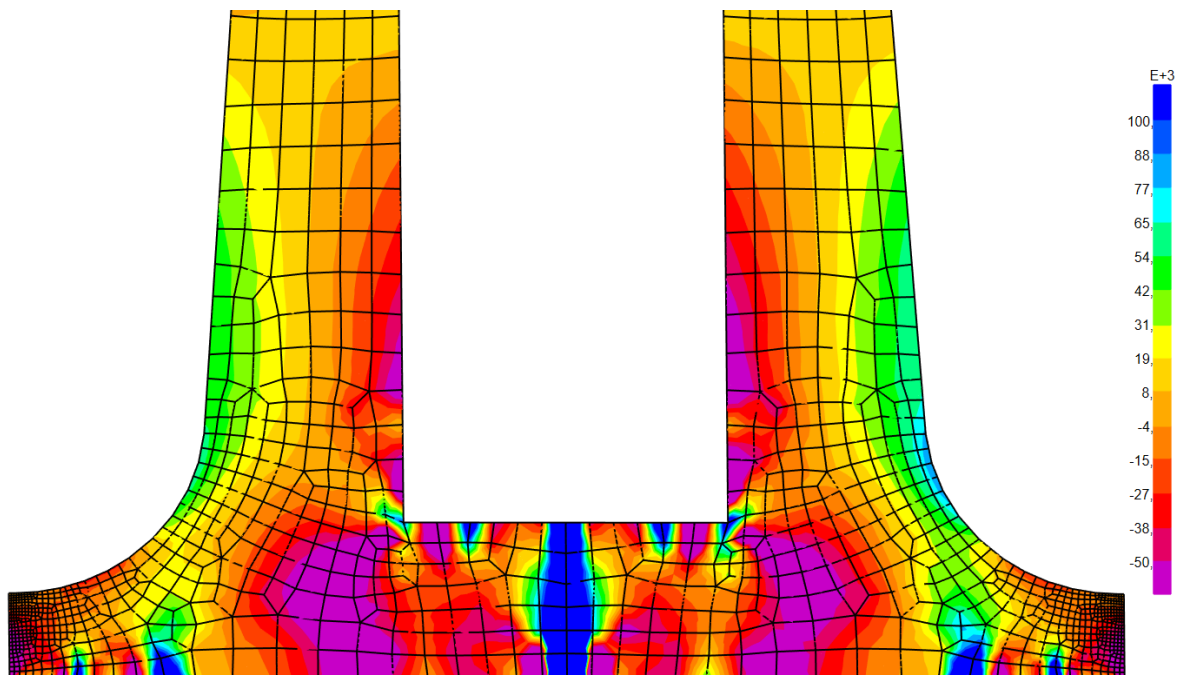


Obr. 142: Min. normálová napětí [kPa] na T6 (LM71-1)

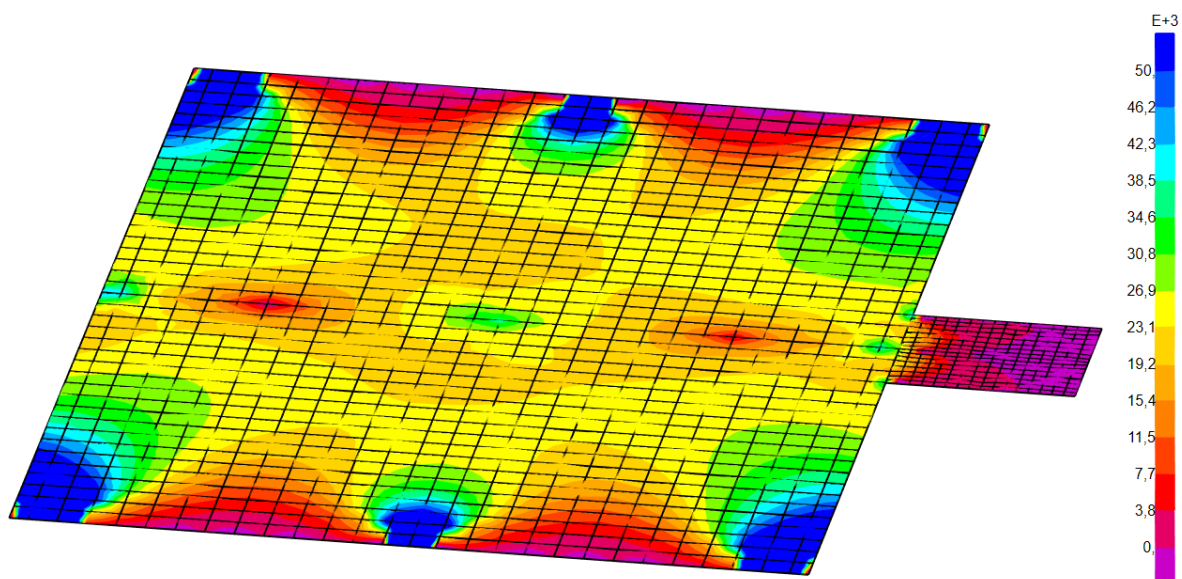


Obr. 143: Max. normálová napětí [kPa] na T6 (LM71-2)

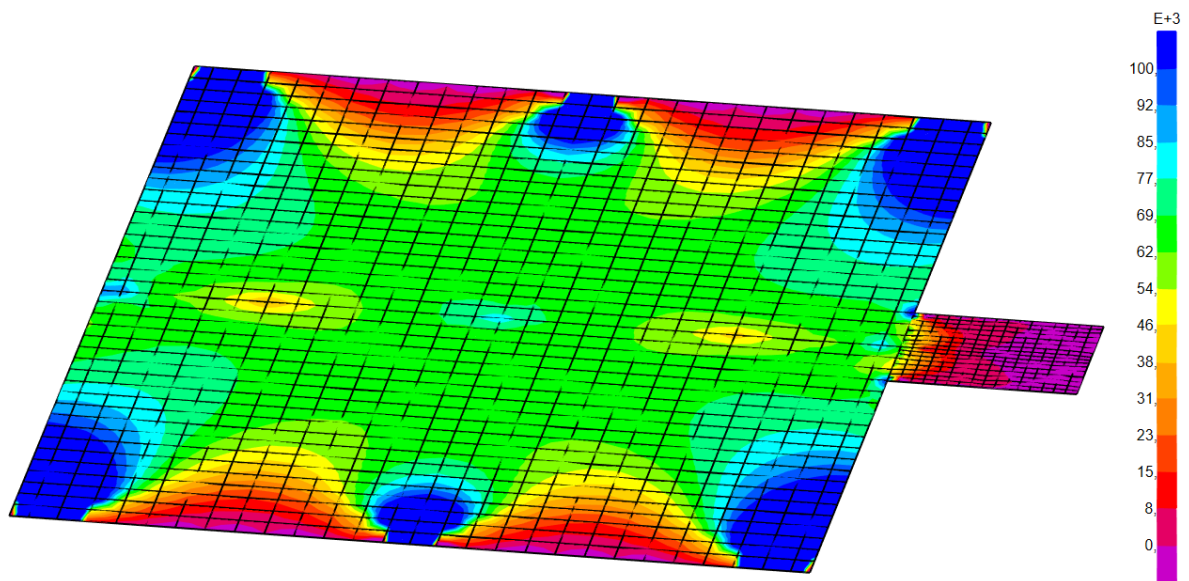




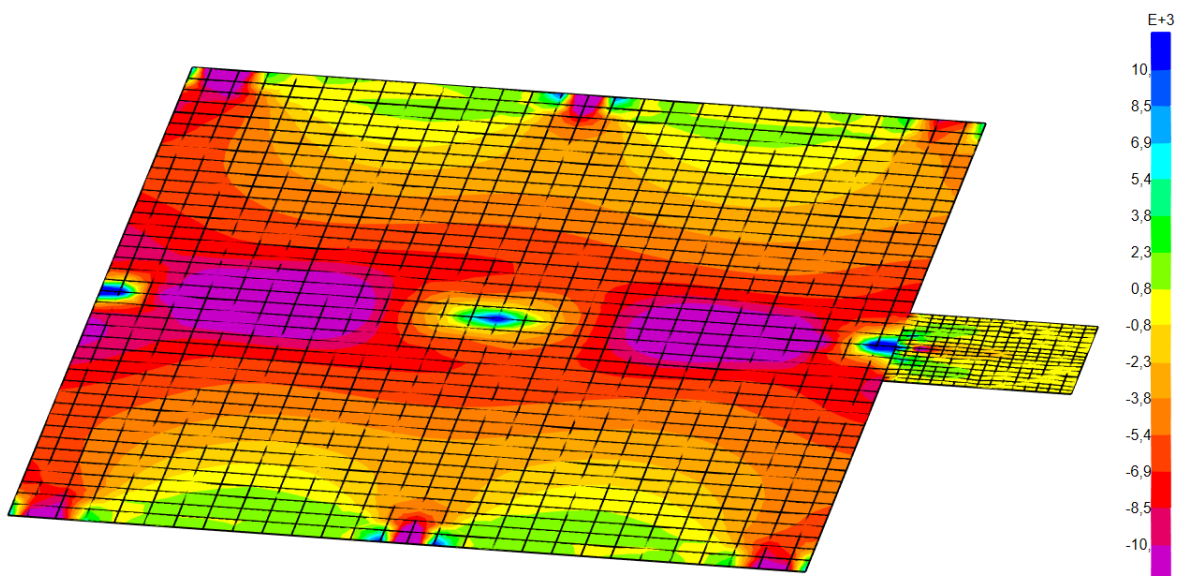
Obr. 144: Min. normálová napětí [kPa] na T6 (LM71-2)



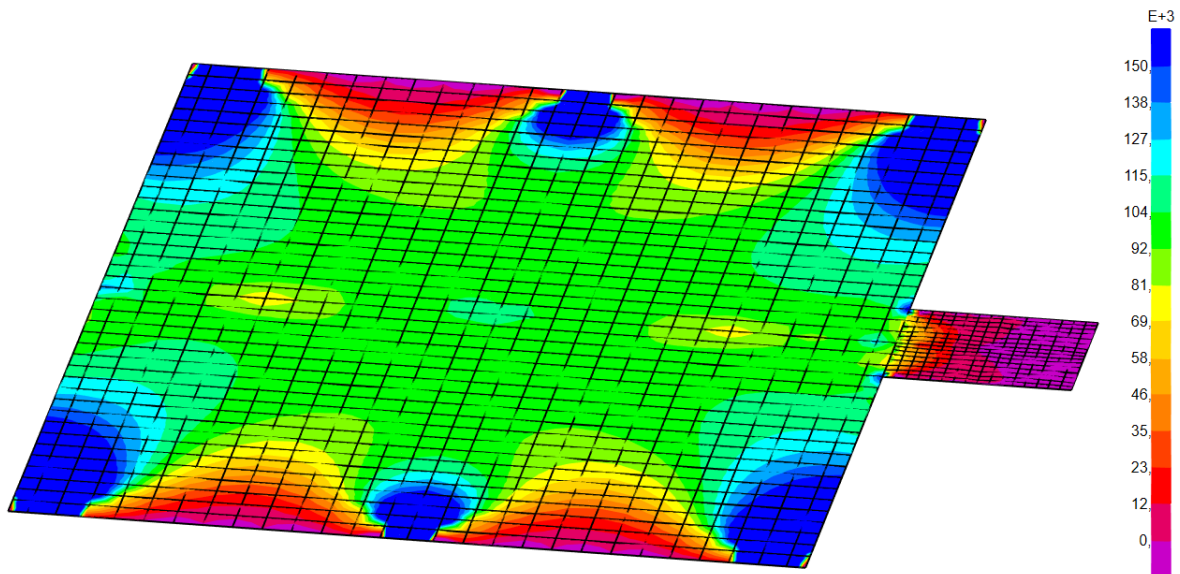
Obr. 145: Normálová napětí [kPa] na T9 (stálé zatížení)



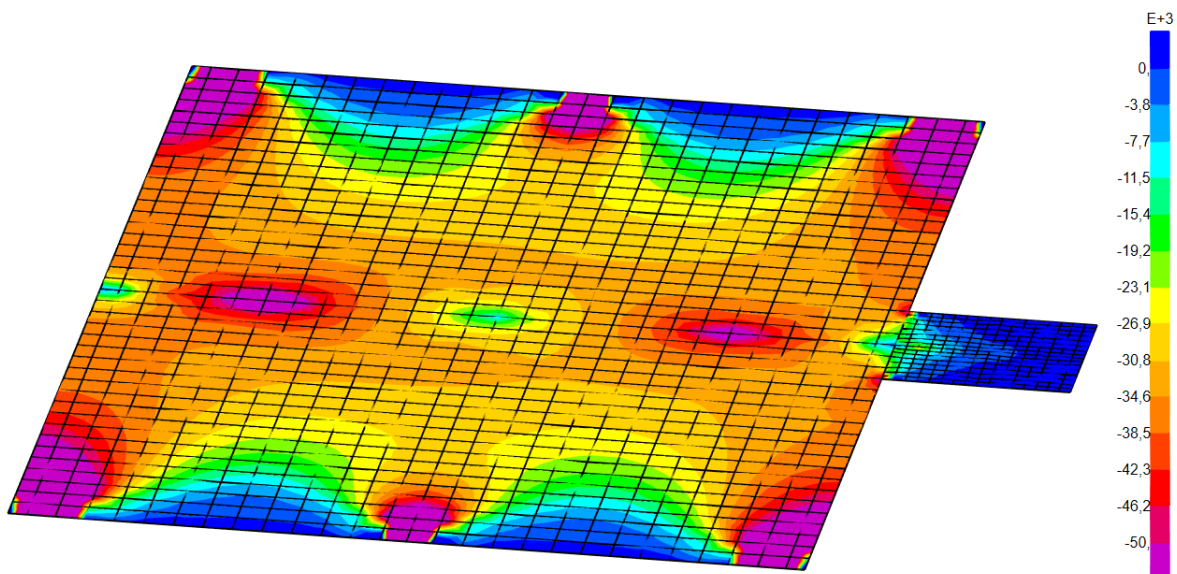
Obr. 146: Max. normálová napětí [kPa] na T9 (LM71-1)



Obr. 147: Min. normálová napětí [kPa] na T9 (LM71-1)



Obr. 148: Max. normálová napětí [kPa] na T9 (LM71-2)



Obr. 149: Min. normálová napětí [kPa] na T9 (LM71-2)



Místo		Normálové napětí [MPa]		
Závěs	Strana	Extrém	Zatížené koleje	
			jedna	obě
T6	Púchov svar 1	max	77,7	131,3
		min	-46,9	-88,8
		<b>rozkmit</b>	<b>124,6</b>	<b>220,1</b>
T6	Púchov svar 2	max	148,4	242,7
		min	-47,1	-109,2
		<b>rozkmit</b>	<b>195,5</b>	<b>351,9</b>
T9	Žilina svar 3	max	72,1	127,0
		min	-47,6	-89,8
		<b>rozkmit</b>	<b>119,7</b>	<b>216,8</b>

Tab. 46: Rozkmity modifikovaných jmenovitých napětí

- $\lambda_4$  – poměr rozkmitů pro závěs – svar 1

$$\Delta\sigma_1 = 124,6 \text{ MPa}$$

$$\Delta\sigma_{1+2} = 220,1 \text{ MPa}$$

$$\Delta\sigma_1/\Delta\sigma_{1+2} = 124,6/220,1 = 0,566$$

$$\lambda_4 = 0,717$$

- $\lambda_4$  – poměr rozkmitů pro závěs – svar 2

$$\Delta\sigma_1 = 195,5 \text{ MPa}$$

$$\Delta\sigma_{1+2} = 351,9 \text{ MPa}$$

$$\Delta\sigma_1/\Delta\sigma_{1+2} = 195,5/351,9 = 0,556$$

$$\lambda_4 = 0,716$$

- $\lambda_4$  – poměr rozkmitů pro trám – svar 3

$$\Delta\sigma_1 = 119,7 \text{ MPa}$$

$$\Delta\sigma_{1+2} = 216,8 \text{ MPa}$$

$$\Delta\sigma_1/\Delta\sigma_{1+2} = 119,7/216,8 = 0,552$$

$$\lambda_4 = 0,715$$

- $\lambda$  pro závěs – svar 1

$$\lambda = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4 = 0,6 \cdot 1,04 \cdot 1,0 \cdot 0,717 = 0,447$$

$$0,447 = \lambda \leq \lambda_{max} = 1,4$$



- $\lambda$  pro závěs – svar 2

$$\lambda = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4 = 0,6 \cdot 1,04 \cdot 1,0 \cdot 0,716 = 0,447$$

$$0,447 = \lambda \leq \lambda_{max} = 1,4$$

- $\lambda$  pro trám – svar 3

$$\lambda = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4 = 0,6 \cdot 1,04 \cdot 1,0 \cdot 0,715 = 0,446$$

$$0,446 = \lambda \leq \lambda_{max} = 1,4$$

### Kategorie detailů

- pro závěs  $\Delta\sigma_{c,zav,1} = 71$  MPa (pravá strana 63 MPa)
- pro závěs  $\Delta\sigma_{c,zav,2} = 80$  MPa
- pro trám  $\Delta\sigma_{c,tram} = 40$  MPa

### Modifikovaný ekvivalentní rozkmit napětí

- pro závěs – svar 1

$$\Delta\sigma_{E,2} = \lambda \cdot \Phi_2 \cdot \Delta\sigma_p = 0,447 \cdot 1,05 \cdot 220,1 = 103,3 \text{ MPa}$$

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2} \leq \frac{\Delta\sigma_C}{\gamma_{Mf}} \rightarrow \frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_C/\gamma_{Mf}} \leq 1,0$$

$$\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_C/\gamma_{Mf}} = \frac{1,0 \cdot 103,3}{71/1,15} = \frac{103,3}{61,7} = 1,67 > 1,0$$

#### **NEVYHOVÍ**

- pro závěs – svar 2

$$\Delta\sigma_{E,2} = \lambda \cdot \Phi_2 \cdot \Delta\sigma_p = 0,447 \cdot 1,05 \cdot 351,9 = 165,2 \text{ MPa}$$

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2} \leq \frac{\Delta\sigma_C}{\gamma_{Mf}} \rightarrow \frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_C/\gamma_{Mf}} \leq 1,0$$

$$\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_C/\gamma_{Mf}} = \frac{1,0 \cdot 143,0}{80/1,15} = \frac{165,2}{69,6} = 2,37 > 1,0$$

#### **NEVYHOVÍ**

- pro trám – svar 3

$$\Delta\sigma_{E,2} = \lambda \cdot \Phi_2 \cdot \Delta\sigma_p = 0,446 \cdot 1,0 \cdot 216,8 = 96,7 \text{ MPa}$$

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2} \leq \frac{\Delta\sigma_C}{\gamma_{Mf}} \rightarrow \frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_C/\gamma_{Mf}} \leq 1,0$$

$$\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_C/\gamma_{Mf}} = \frac{1,0 \cdot 96,7}{40/1,15} = \frac{96,7}{34,8} = 2,78 > 1,0$$

#### **NEVYHOVÍ**

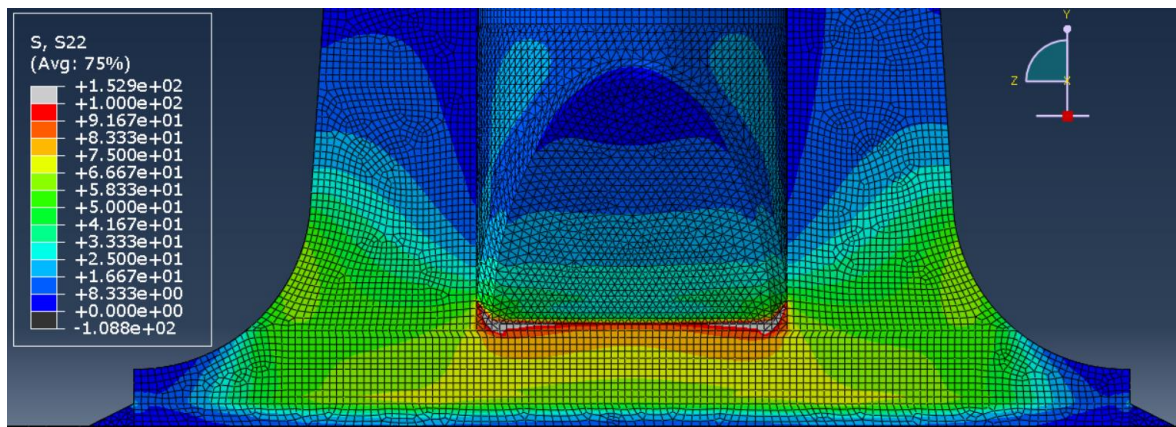




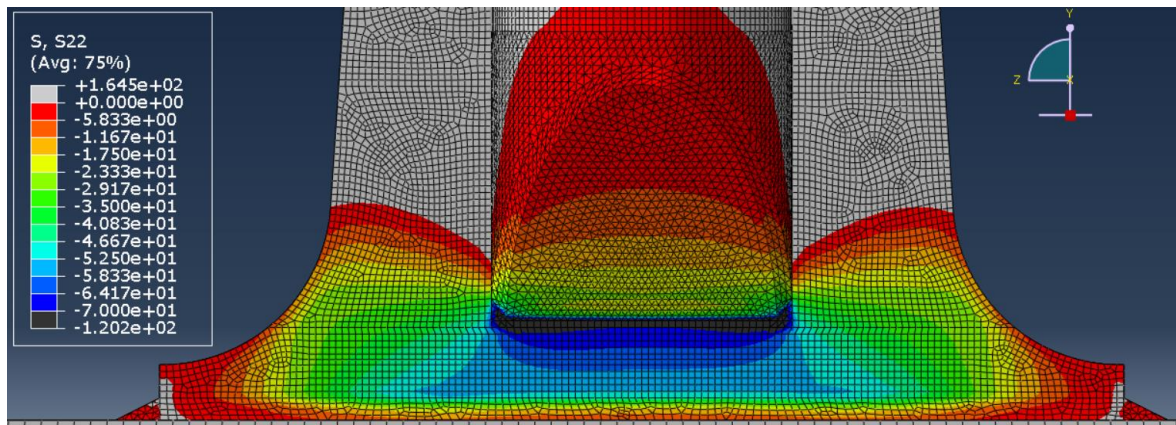
### 9.1.3. Metoda hot-spot

Pro stanovení napětí v místě hot-spot bylo postupováno stejně jako v předchozích kapitolách. Vnitřní síly byly dále použity jako okrajové podmínky pro výpočet detailních modelů v Abaqusu. Dle pravidel pro použití metody hot-spot bylo v širší oblasti zjištěno napětí v referenčních uzlech a dopočítána napětí v patách svarů.

Konkrétní vnitřní síly jsou uvedeny v Příloze C. V Příloze E jsou vypisána napětí ze zkoumané oblasti s dopočtenými napětími hot-spot.

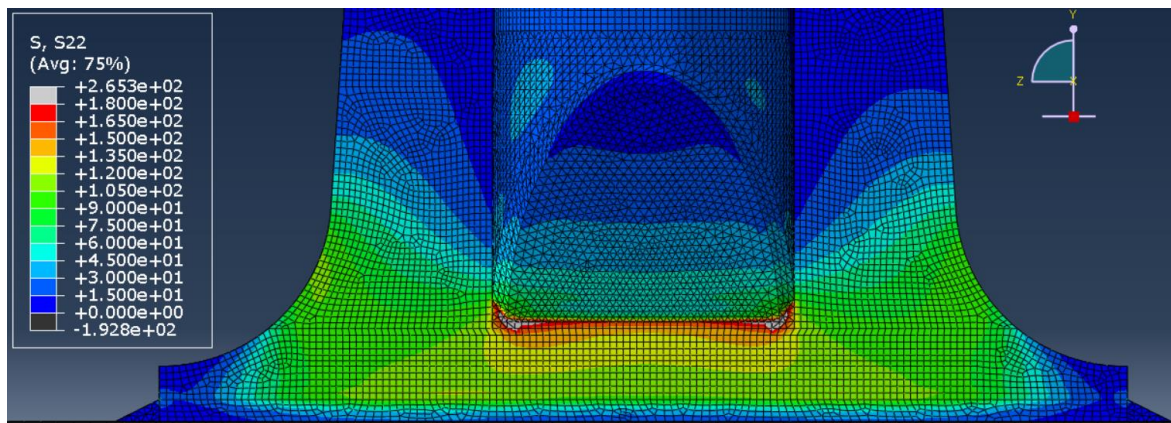


Obr. 150: Normálové napětí ve směru Y – maximum na T6 (LM71-1)

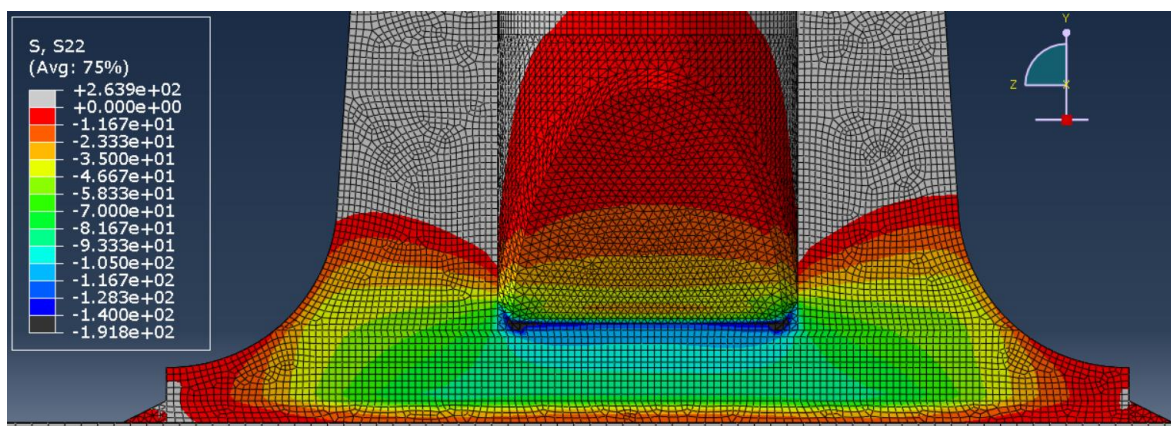


Obr. 151: Normálové napětí ve směru Y – minimum na T6 (LM71-1)

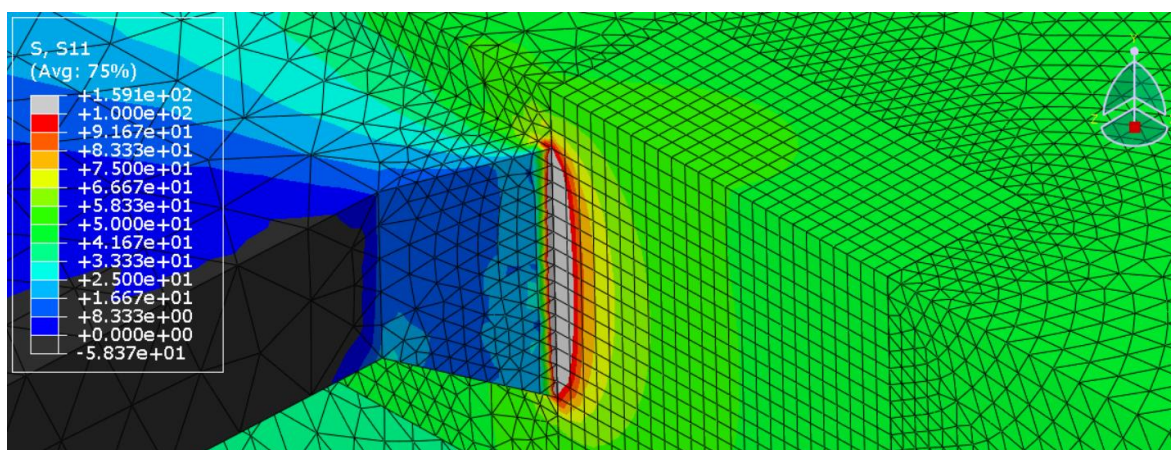




Obr. 152: Normálové napětí ve směru Y – maximum na T6 (LM71-2)

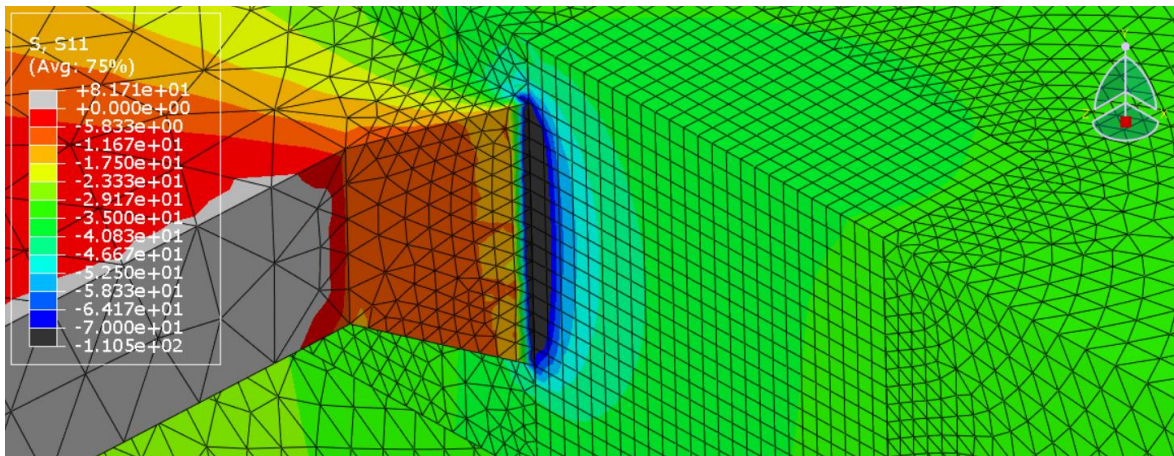


Obr. 153: Normálové napětí ve směru Y – minimum na T6 (LM71-2)

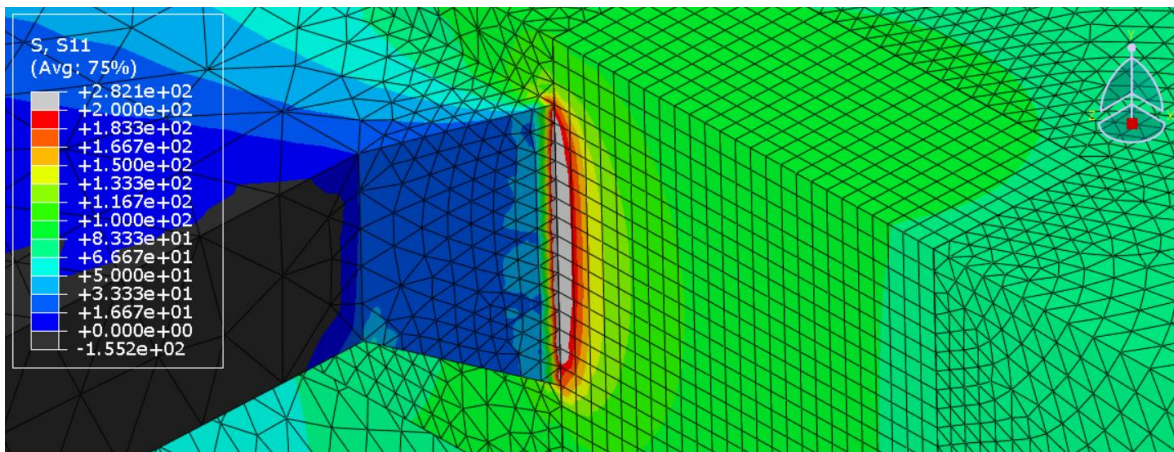


Obr. 154: Normálové napětí ve směru X – maximum na T9 (LM71-1)

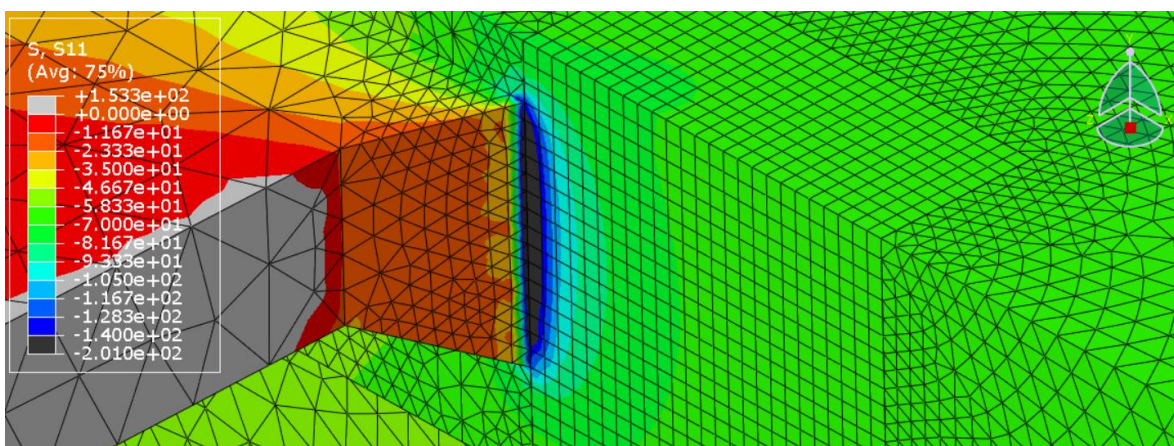




Obr. 155: Normálové napětí ve směru X – minimum na T9 (LM71-1)



Obr. 156: Normálové napětí ve směru X – maximum na T9 (LM71-2)



Obr. 157: Normálové napětí ve směru X – minimum na T9 (LM71-2)



Místo		Normálové napětí [MPa]		
Závěs	Strana	Extrém	Zatížené koleje	
			jedna	obě
T6	Púchov svar 1	max	68,9	171,1
		min	-53,5	-87,5
		<b>rozkmit</b>	<b>122,4</b>	<b>204,6</b>
T6	Púchov svar 2	max	89,8	156,0
		min	-73,8	-117,1
		<b>rozkmit</b>	<b>163,6</b>	<b>273,0</b>
T9	Žilina svar 3	max	110,5	197,1
		min	-76,9	-140,2
		<b>rozkmit</b>	<b>187,4</b>	<b>337,3</b>

Tab. 47: Rozkmit napětí hot-spot

### Součinitel $\lambda$

- $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  dle metody jmenovitých napětí

- $\lambda_4$  – poměr rozkmitů pro závěs – svar 1

$$\Delta\sigma_1 = 122,4 \text{ MPa}$$

$$\Delta\sigma_{1+2} = 204,6 \text{ MPa}$$

$$\Delta\sigma_1/\Delta\sigma_{1+2} = 122,4/204,6 = 0,598$$

$$\lambda_4 = 0,720$$

- $\lambda_4$  – poměr rozkmitů pro závěs – svar 2

$$\Delta\sigma_1 = 163,6 \text{ MPa}$$

$$\Delta\sigma_{1+2} = 273,0 \text{ MPa}$$

$$\Delta\sigma_1/\Delta\sigma_{1+2} = 163,6/273,0 = 0,599$$

$$\lambda_4 = 0,720$$

- $\lambda_4$  – poměr rozkmitů pro trám

$$\Delta\sigma_1 = 187,4 \text{ MPa}$$

$$\Delta\sigma_{1+2} = 337,3 \text{ MPa}$$

$$\Delta\sigma_1/\Delta\sigma_{1+2} = 187,4/337,3 = 0,556$$

$$\lambda_4 = 0,716$$



- $\lambda$  pro závěs

$$\lambda = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4 = 0,6 \cdot 1,04 \cdot 1,0 \cdot 0,720 = 0,449$$

$$0,449 = \lambda \leq \lambda_{max} = 1,4$$

- $\lambda$  pro trám

$$\lambda = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4 = 0,6 \cdot 1,04 \cdot 1,0 \cdot 0,716 = 0,447$$

$$0,447 = \lambda \leq \lambda_{max} = 1,4$$

### Kategorie detailů<sup>11</sup>

- pro závěs  $\Delta\sigma_{C,h-s,zav} = 100$  MPa (konstrukční detail 3)
- pro trám  $\Delta\sigma_{C,h-s,tram} = 100$  MPa (konstrukční detail 5)

### Ekvivalentní rozkmit – hot-spot napětí

- pro závěs – svar 1 (k pásnici trámu)

$$\Delta\sigma_{E,2} = \lambda \cdot \Phi_2 \cdot \Delta\sigma_p = 0,449 \cdot 1,05 \cdot 204,6 = 96,5 \text{ MPa}$$

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2} \leq \frac{\Delta\sigma_C}{\gamma_{Mf}} \rightarrow \frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_C / \gamma_{Mf}} \leq 1,0$$

$$\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_C / \gamma_{Mf}} = \frac{1,0 \cdot 96,5}{100 / 1,15} = \frac{96,5}{87,0} = 1,11 > 1,0$$

#### **NEVYHOVÍ**

- pro závěs – svar 2 (ke konci trubky)

$$\Delta\sigma_{E,2} = \lambda \cdot \Phi_2 \cdot \Delta\sigma_p = 0,449 \cdot 1,05 \cdot 273,0 = 128,7 \text{ MPa}$$

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2} \leq \frac{\Delta\sigma_C}{\gamma_{Mf}} \rightarrow \frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_C / \gamma_{Mf}} \leq 1,0$$

$$\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_C / \gamma_{Mf}} = \frac{1,0 \cdot 128,7}{100 / 1,15} = \frac{128,7}{87,0} = 1,48 > 1,0$$

#### **NEVYHOVÍ**

- pro trám – svar 3

$$\Delta\sigma_{E,2} = \lambda \cdot \Phi_2 \cdot \Delta\sigma_p = 0,447 \cdot 1,00 \cdot 337,3 = 150,8 \text{ MPa}$$

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2} \leq \frac{\Delta\sigma_C}{\gamma_{Mf}} \rightarrow \frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_C / \gamma_{Mf}} \leq 1,0$$

$$\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_C / \gamma_{Mf}} = \frac{1,0 \cdot 150,8}{100 / 1,15} = \frac{150,8}{87,0} = 1,73 > 1,0$$

#### **NEVYHOVÍ**

<sup>11</sup> dle Obr. 10, str. 21



## 9.2. Posouzení únavy kumulací poškození

Standardní posouzení ekvivalentními rozkmity napětí od modelu LM71 nevyhověly, proto je dále využita ještě podrobnější metoda – kumulace poškození od skutečných vlaků. Tato analýza je provedena jen pro posouzení hot-spot napětí, která jsou oproti napětím jmenovitým přesnější.

### 9.2.1. Výpočty přejezdů normových vlaků

Norma ČSN EN 1991-2, příloha D [15] uvádí modely reálných vlakových souprav, jež lze použít pro posouzení na únavu. Nejprve je však třeba zjistit odezvu konstrukce na namáhání těmito modely při různých rychlostech a najít ty nejnepríznivější.

Bylo použito spektrum vlaků standardních, lehké smíšené a těžké dopravy. Pro nákladní vlaky byla zavedena maximální rychlost do 120 km/h a pro osobní do 160 km/h – traťové rychlosti. Zatížení bylo umístěno na jednu kolej s excentricitou 83 mm ve směru pro vyvolání větších účinků. Pro detail T6 byla zatížena levá kolej a pro T9 pravá.

Typ vlaku		Rychlost [m/s]			
1	Osobní	20	30	40	44,4
2	Osobní	20	30	40	44,4
5	Nákladní – lehká smíšená dopr.	16,6	25	30	33,3
6	Nákladní – lehká smíšená dopr.	16,6	25	30	33,3
7	Nákladní – lehká smíšená dopr.	16,6	25	30	33,3
8	Nákladní – lehká smíšená dopr.	16,6	25	30	33,3
11	Nákladní – těžká doprava	16,6	25	30	33,3
12	Nákladní – těžká doprava	16,6	25	30	33,3

Tab. 48: Uvažované typy vlaků a rychlosti pojezdění



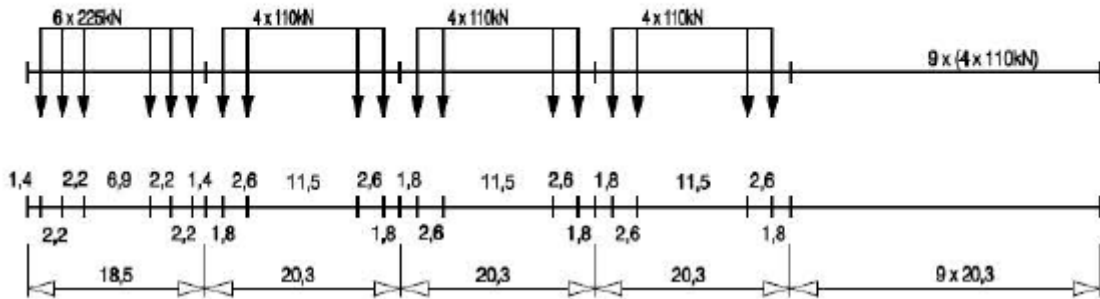
# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

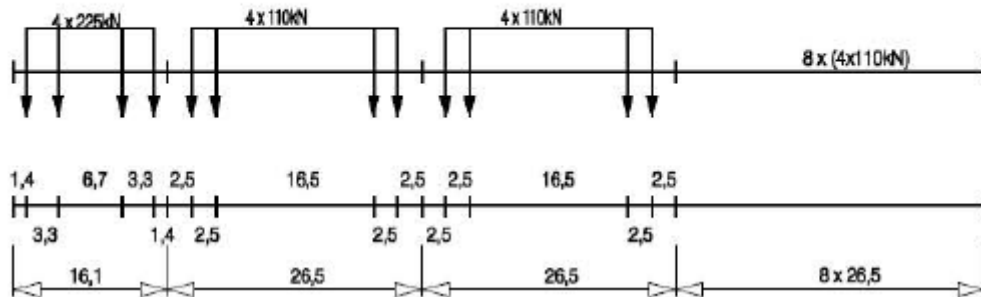
## Únavová životnost železničního mostu v Púchově

$$\Sigma Q = 6630 \text{ kN} \quad V = 200 \text{ km/h} \quad L = 262,10 \text{ m} \quad q = 25,3 \text{ kN/m'}$$



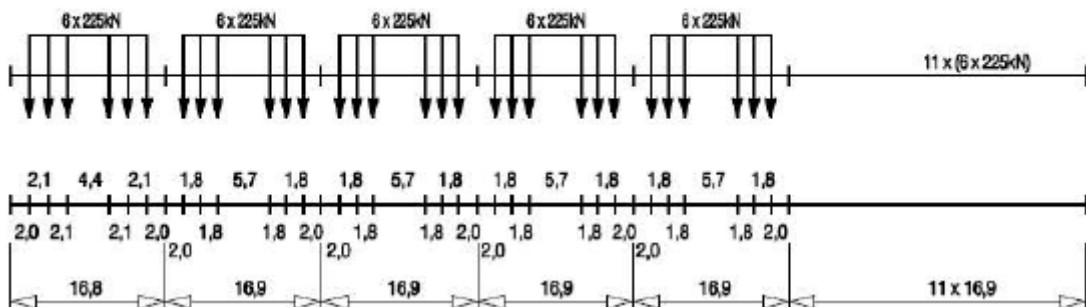
Obr. 158: Typ 1 – osobní vlak tažený lokomotivou [15]

$$\Sigma Q = 5300 \text{ kN} \quad V = 160 \text{ km/h} \quad L = 281,10 \text{ m} \quad q = 18,9 \text{ kN/m'}$$



Obr. 159: Typ 2 – osobní vlak tažený lokomotivou [15]

$$\Sigma Q = 21600 \text{ kN} \quad V = 80 \text{ km/h} \quad L = 270,30 \text{ m} \quad q = 80,0 \text{ kN/m'}$$



Obr. 160: Typ 5 – nákladní vlak tažený lokomotivou [15]





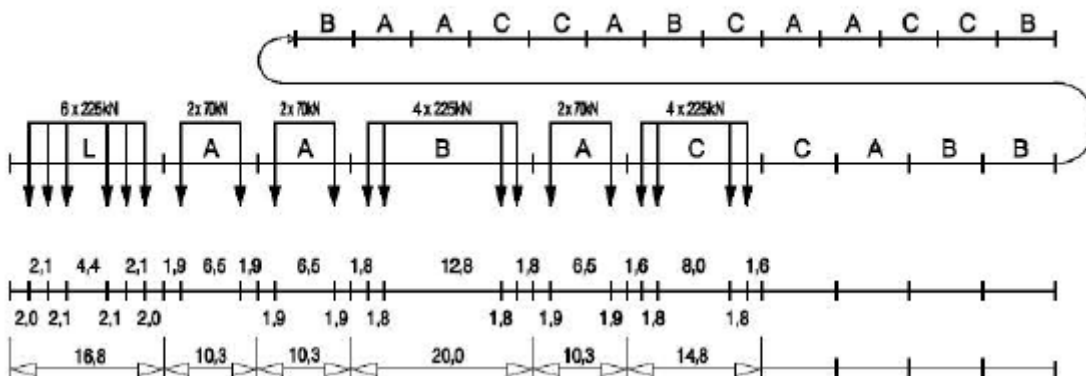
# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

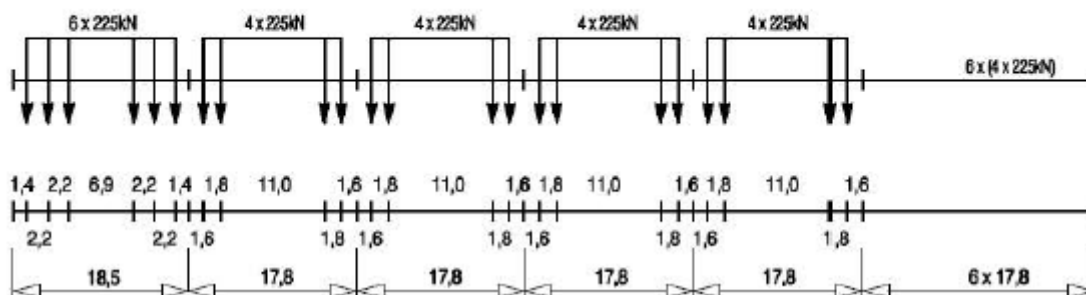
## Únavová životnost železničního mostu v Púchově

$$\Sigma Q = 14310\text{kN} \quad V = 100\text{km/h} \quad L = 333,10\text{m} \quad q = 43,0\text{kN/m}'$$



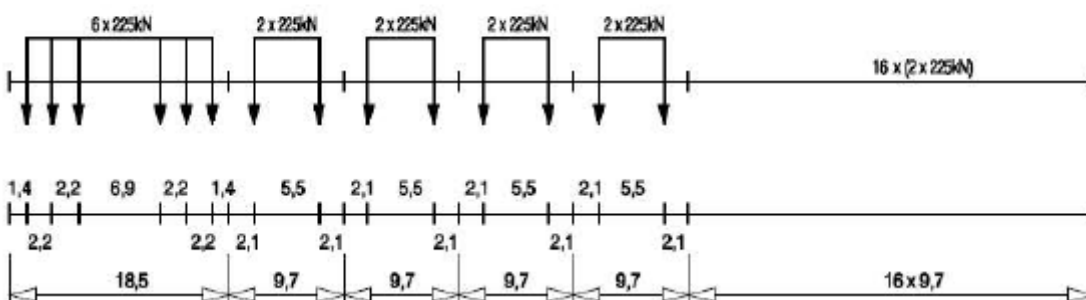
Obr. 161: Typ 6 - nákladní vlak tažený lokomotivou [15]

$$\Sigma Q = 10350\text{kN} \quad V = 120\text{km/h} \quad L = 196,50\text{m} \quad q = 52,7\text{kN/m}'$$



Obr. 162: Typ 7 - nákladní vlak tažený lokomotivou [15]

$$\Sigma Q = 10350\text{kN} \quad V = 100\text{km/h} \quad L = 212,50\text{m} \quad q = 48,7\text{kN/m}'$$



Obr. 163: Typ 8 - nákladní vlak tažený lokomotivou [15]



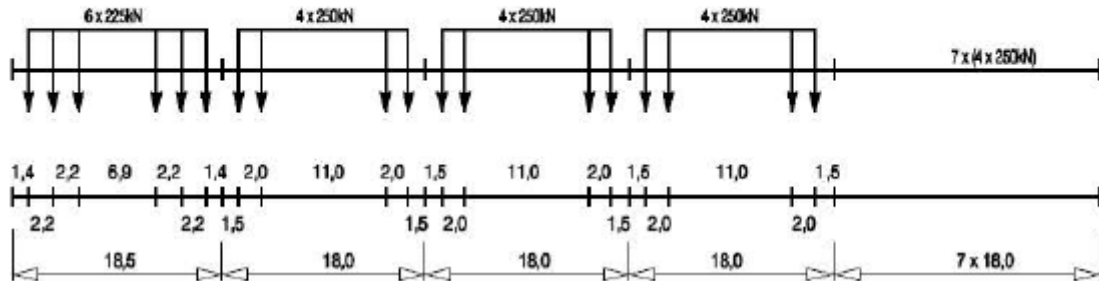
# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

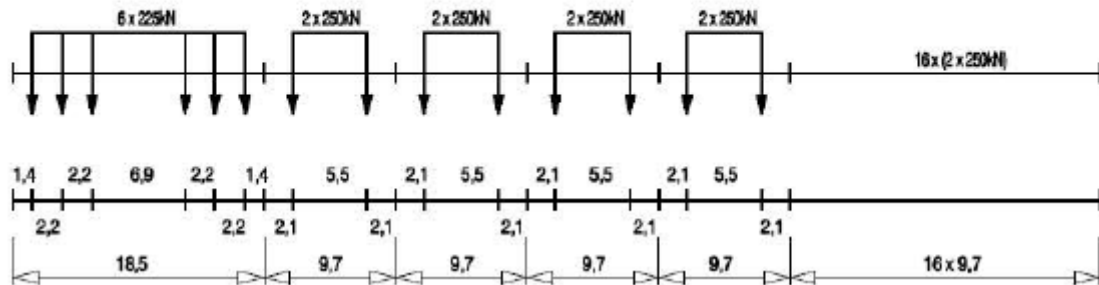
## Únavová životnost železničního mostu v Púchově

$\Sigma Q = 11350\text{kN}$   $V = 120\text{km/h}$   $L = 198,50\text{m}$   $q = 57,2\text{kN/m}'$



Obr. 164: Typ 11 - nákladní vlak tažený lokomotivou [15]

$\Sigma Q = 11350\text{kN}$   $V = 100\text{km/h}$   $L = 212,50\text{m}$   $q = 53,4\text{kN/m}'$



Obr. 165: Typ 12 - nákladní vlak tažený lokomotivou [15]

**9.2.2. Analýza namáhání konstrukce normovými vlaky**

V Tab. 49 jsou srovnány rozkmity ohybových momentů na levém závěsu T6 a na trámu u pravého závěsu T9 s vyznačením maxim.

Vlak	Rychlost [m/s]	Rozkmit momentu [kNm]	
		Závěs	Trám
Typ 1 (663 t)	20	4,2	6519,7
	30	4,1	6869,1
	40	4,3	6445,6
	44,4	<b>4,3</b>	<b>7323,0</b>
Typ 2 (530 t)	20	2,9	4562,0
	30	<b>3,9</b>	<b>5979,2</b>
	40	3,3	5050,2
	44,4	3,2	5168,8
Typ 5 (2160 t)	16,6	10,1	15923,4
	25	<b>10,6</b>	16047,3
	30	10,1	16041,1
	33,3	10,4	<b>16160,6</b>
Typ 6 (1431 t)	16,6	6,0	9671,8
	25	6,2	10078,1
	30	<b>6,7</b>	<b>10645,9</b>
	33,3	6,5	10396,5
Typ 7 (1035 t)	16,6	<b>7,1</b>	10848,9
	25	6,8	10858,1
	30	7,0	10735,9
	33,3	6,9	<b>10994,8</b>
Typ 8 (1035 t)	16,6	6,4	9779,5
	25	6,4	10140,1
	30	6,5	9967,2
	33,3	<b>6,9</b>	<b>10283,0</b>
Typ 11 (1135 t)	16,6	<b>7,7</b>	11793,9
	25	7,3	11752,5
	30	7,5	11545,3
	33,3	7,5	<b>11807,4</b>
Typ 12 (1135 t)	16,6	7,0	10648,1
	25	6,9	11047,5
	30	7,0	10839,6
	33,3	<b>7,4</b>	<b>11145,1</b>

Tab. 49: Účinky normových vlaků na konstrukci



## Únavová životnost železničního mostu v Púchově

Pro další výpočty byly vyloučeny soupravy 8 a 12, protože mají stejnou hmotnost jako 7 a 11, ale vyvolávají nižší rozkmity momentů. Tedy při výpočtu kumulace poškození by bylo nižší i dílčí poškození od těchto vlaků při stejném množství přepraveného nákladu. Pro další výpočty se nezaváděla ani souprava 6, jež je těžší než 11, ale opět vyvolá nižší rozkmity momentů.

U osobních vlaků nezáleží na hmotnosti, protože v následných výpočtech byl uvažován jen počet přejezdů za den. Proto stačí do dalšího postupu pouze jeden, jež vyvolá větší rozkmity momentů – Typ 1.

Zbývající čtyři normové vlaky byly zkoumány ještě podrobněji, aby byla pro každý nalezena nejnepříznivější rychlost. Analýza byla provedena s přesností na celé m/s. Rozkmity pro šedě vyznačené rychlosti byly v předchozích výpočtech největší.

Vlak	Rychlost [m/s]	Rozkmit momentu [kNm]	
		Závěs	Trám
Typ 1 (663 t)	42	4,4	-
	43	<b>4,4</b>	-
	44	4,3	7221,5
	44,4	4,3	<b>7323,0</b>
Typ 5 (2160 t)	20	10,0	-
	24	10,3	-
	25	<b>10,6</b>	16047,3
	26	10,1	<b>16309,7</b>
	27	10,0	16221,5
	32	-	15913,8
	33	10,4	16160,6
Typ 7 (1035 t)	16,6	7,1	10848,9
	18	<b>7,4</b>	11454,0
	19	7,3	<b>11745,1</b>
	20	7,2	11125,8
	32	-	10907,5
	33	6,9	10994,8
Typ 11 (1135 t)	15	7,4	11720,5
	16,6	7,7	11793,9
	18	7,9	12146,6
	20	7,9	12176,1
	21	<b>7,9</b>	<b>12733,9</b>
	22	7,3	12168,7
	32	-	11722,9
	33	7,5	11807,4

Tab. 50: Účinky normových vlaků na konstrukci – zpřesnění rychlostí



### 9.2.3. Dílčí výsledky pro vybrané vlaky

Pro oba detaily byly vybrány čtyři typy vlaků s rychlostmi, které vyvolávají největší rozkmit ohybového momentu. Dále byly dopočteny rozkmit hot-spot napětí.

Průběhy ohybových momentů jsou součástí Přílohy B a konkrétní hodnoty všech koncových sil pro výpočet v Abaqusu lze najít v Příloze C. Rozložení napětí a konkrétní hodnoty v referenčních bodech jsou uvedeny v Přílohách D a E.

#### Detail T6 – zatěžovací stavy

- T6-ZS1 – Typ 1, levá kolej, rychlost 154,8 km/h (43 m/s)
- T6-ZS2 – Typ 5, levá kolej, rychlost 90 km/h (25 m/s)
- T6-ZS3 – Typ 7, levá kolej, rychlost 64,8 km/h (18 m/s)
- T6-ZS4 – Typ 11, levá kolej, rychlost 75,6 km/h (21 m/s)

#### Detail T9 – zatěžovací stavy

- T9-ZS1 – Typ 1, pravá kolej, rychlost 160 km/h (44,4 m/s)
- T9-ZS2 – Typ 5, pravá kolej, rychlost 93,6 km/h (26 m/s)
- T9-ZS3 – Typ 7, pravá kolej, rychlost 68,4 km/h (19 m/s)
- T9-ZS4 – Typ 11, pravá kolej, rychlost 75,6 km/h (21 m/s)

Zatěž. stav	Svar 1				Svar 2			
	hot-spot Z [mm]	$\sigma_{h-s,max}$ [MPa]	$\sigma_{h-s,min}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{hot-spot}$ [MPa]	hot-spot Z [mm]	$\sigma_{h-s,max}$ [MPa]	$\sigma_{h-s,min}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{hot-spot}$ [MPa]
<b>T6-ZS1</b>	-168	36,386	-20,427	<b>56,812</b>	-102	48,261	-27,412	<b>75,673</b>
<b>T6-ZS2</b>	168	67,037	-62,701	<b>129,738</b>	-108	89,120	-82,487	<b>171,607</b>
<b>T6-ZS3</b>	174	49,890	-34,475	<b>84,366</b>	-108	66,281	-45,964	<b>112,245</b>
<b>T6-ZS4</b>	174	51,247	-41,814	<b>93,061</b>	-114	68,535	-55,211	<b>123,746</b>

Tab. 51: Maximální rozkmit hot-spot napětí na T6

Zatěž. stav	hot-spot Y [mm]	$\sigma_{h-s,max}$ [MPa]	$\sigma_{h-s,min}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{hot-spot}$ [MPa]
<b>T9-ZS1</b>	-21	44,507	-22,138	<b>66,646</b>
<b>T9-ZS2</b>	-21	100,732	-69,265	<b>169,998</b>
<b>T9-ZS3</b>	-21	73,192	-48,083	<b>121,275</b>
<b>T9-ZS4</b>	-21	77,884	-54,377	<b>132,261</b>

Tab. 52: Maximální rozkmit hot-spot napětí na T9



### 9.2.4. Kumulace poškození za použití napětí hot-spot

Výpočet metodou kumulace poškození se provádí na základě reálně skladby dopravy. V tomto případě není přesně známo, jaké typy vlaků budou přes most v průběhu jeho životnosti jezdit. Proto bylo dále postupováno na základě úvahy z Expertního posouzení [1], že za jeden den by zde mělo projet 52 osobních vlaků a za rok se očekává přeprava 30 mil. tun nákladu.

Rozložení dopravy je předpokládáno rovnoměrné, takže po každé koleji přejede polovina vlaků. Dále je zavedeno, že v 1 případě za den dojde na mostě k setkání protijedoucích osobních vlaků v nejnepříznivějším místě pro každý detail. U nákladních je takovéto míjení předpokládáno jen jednou týdně.

Nejprve byla zjištěna dílčí poškození pro přejezdy vlaků po jedné koleji, pro něž byly spočítány rozkmit napětí hot-spot.

#### Kategorie detailů

- pro závěs  $\Delta\sigma_{C,h-s,zav} = 100 \text{ MPa}$  (konstrukční detail 3)
- pro trám  $\Delta\sigma_{C,h-s,tram} = 100 \text{ MPa}$  (konstrukční detail 5)
- Kategorie detailů se zahrnutím součinitele  $\gamma_{Mf}$

$$\frac{\Delta\sigma_C}{\gamma_{Mf}} = \frac{100}{1,15} = \mathbf{87,0 \text{ MPa}}$$

- Mez únavy při konstantní amplitudě (včetně součinitele  $\gamma_{Mf}$ )

$$\Delta\sigma_D = \left(\frac{2}{5}\right)^{1/3} \cdot \frac{\Delta\sigma_C}{\gamma_{Mf}} = \left(\frac{2}{5}\right)^{1/3} \cdot \frac{100}{1,15} = \mathbf{64,1 \text{ MPa}}$$

- Prahový rozkmit napětí (včetně součinitele  $\gamma_{Mf}$ )

$$\Delta\sigma_L = \left(\frac{5}{100}\right)^{1/5} \cdot \Delta\sigma_D = \left(\frac{5}{100}\right)^{1/5} \cdot 64,1 = \mathbf{35,2 \text{ MPa}}$$

#### Srovnání dílčích poškození Typů 1, 5, 7 a 11 – pro 1/2 vlaků na 1 koleji

Zatížení		$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma$ [MPa]	$n_{i,den}$	$n_i$	$N_i$	$d_i$
			Počet přejezdů za den	Počet přejezdů za 100 let	Počet cyklů - 1 rozkmit	Dílčí poškození
<b>Typ 1</b>	levá kolej	56,8	25	9,13E+05	1,68E+07	0,054
<b>Typ 5</b>	levá kolej	129,7	18	6,58E+05	6,03E+05	1,092
<b>Typ 7</b>	levá kolej	84,4	39	1,41E+06	2,19E+06	0,646
<b>Typ 11</b>	levá kolej	93,1	35	1,29E+06	1,63E+06	0,789

Tab. 53: Poškození na T6 u svaru 1 od souprav typu 1,5,7 a 11





Zatížení		$\gamma_{FF} \cdot \Delta\sigma$ [MPa]	$n_{i,den}$	$n_i$	$N_i$	$d_i$
			Počet přejezdů za den	Počet přejezdů za 100 let	Počet cyklů - 1 rozkmit	Dílčí poškození
Typ 1	levá kolej	75,7	25	9,13E+05	3,03E+06	0,301
Typ 5	levá kolej	171,6	18	6,58E+05	2,60E+05	2,528
Typ 7	levá kolej	112,2	39	1,41E+06	9,31E+05	1,517
Typ 11	levá kolej	123,7	35	1,29E+06	6,95E+05	1,850

Tab. 54: Poškození na T6 u svaru 2 od souprav typu 1,5,7 a 11

Zatížení		$\gamma_{FF} \cdot \Delta\sigma$ [MPa]	$n_{i,den}$	$n_i$	$N_i$	$d_i$
			Počet přejezdů za den	Počet přejezdů za 100 let	Počet cyklů - 1 rozkmit	Dílčí poškození
Typ 1	pravá kolej	66,6	25	9,13E+05	4,45E+06	0,205
Typ 5	pravá kolej	170,0	18	6,58E+05	2,68E+05	2,458
Typ 7	pravá kolej	121,3	39	1,41E+06	7,37E+05	1,917
Typ 11	pravá kolej	132,3	35	1,29E+06	5,68E+05	2,263

Tab. 55: Poškození na T9 od souprav typu 1,5,7 a 11

Největší účinky z normových nákladních vlaků vyvolal u všech zkoumaných svarů Typ 5, pro nějž bude společně s osobním vlakem Typu 1 dopočítána kumulace poškození pro návrhovou životnost 100 let.

K tomu je třeba dopočítat rozkmit napětí při přejezdech na druhé koleji a při míjení vlaků. Aby bylo možné využít tyto rozkmity pro kumulaci poškození, musí se nacházet u každé paty svaru v jednom bodě. Vždy bylo vybráno nejkritičtější místo přejezdu Typu 5 po jedné (nepříznivé) koleji, jež vyvolává největší dílčí poškození.

Vzhledem délkám vlaků, charakteru zatížení a rozpětí mostu lze konkrétní soupravy vnímat (v souvislosti se zjištěnými rozkmity) jako náhradní rovnoměrné hmotnosti, příp. zatížení.

Souprava Typu 5 je nejtěžší normový vlak (náhradní rovnoměrná hmotnost 8 t/m) a pravděpodobně budou po trati jezdit vlaky lehčí. Bude proto spočtena ještě alternativní kumulace poškození, kde budou přepravené tuny napůl rozděleny mezi Typ 7 a vlak vycházející ze soupravy ze statické zatěžovací zkoušky. Druhé zatížení bude představovat vagony naložené šterkem s celkovou délkou 250 m a hmotností 1500 t. Tato varianta kumulace bude reprezentovat obvyklejší dopravní zatížení 5,3 t/m (Typ 7) a 6 t/m (SZZ).<sup>12</sup>

<sup>12</sup> lokomotiva 770 tzv. Čmelák – 6,7 t/m [28], lokomotiva 380 tzv. Emil Zátopek 4,9 t/m [29], vůz Faccpp – max 7,15 t/m, vůz Falls – max 5,93 t/m



### Detail T6 – zatěžovací stavy

- T6-ZS1 – Typ 1, levá kolej, rychlost 154,8 km/h (43 m/s)
- T6-ZS2 – Typ 5, levá kolej, rychlost 90 km/h (25 m/s)
- T6-ZS3 – Typ 7, levá kolej, rychlost 64,8 km/h (18 m/s)
- T6-ZS5 – Typ 1, pravá kolej, rychlost 154,8 km/h (43 m/s)
- T6-ZS6 – Typ 5, pravá kolej, rychlost 90 km/h (25 m/s)
- T6-ZS7 – Typ 7, pravá kolej, rychlost 64,8 km/h (18 m/s)
- T6-ZS8 – Typ 1, obě koleje, rychlost 154,8 km/h (43 m/s)
- T6-ZS9 – Typ 5, obě koleje, rychlost 90 km/h (25 m/s)
- T6-ZS10 – Typ 7, obě koleje, rychlost 64,8 km/h (18 m/s)

### Detail T9 – zatěžovací stavy

- T9-ZS1 – Typ 1, pravá kolej, rychlost 160 km/h (44,4 m/s)
- T9-ZS2 – Typ 5, pravá kolej, rychlost 93,6 km/h (26 m/s)
- T9-ZS3 – Typ 7, pravá kolej, rychlost 68,4 km/h (19 m/s)
- T9-ZS5 – Typ 1, levá kolej, rychlost 160 km/h (44,4 m/s)
- T9-ZS6 – Typ 5, levá kolej, rychlost 93,6 km/h (26 m/s)
- T9-ZS7 – Typ 7, levá kolej, rychlost 68,4 km/h (19 m/s)
- T9-ZS8 – Typ 1, obě koleje, rychlost 160 km/h (44,4 m/s)
- T9-ZS9 – Typ 5, obě koleje, rychlost 93,6 km/h (26 m/s)
- T9-ZS10 – Typ 7, obě koleje, rychlost 68,4 km/h (19 m/s)

Průběhy momentů, jednotlivé vnitřní síly, rozložení napětí a rozkmity v širší oblasti jsou opět uvedeny v Přílohách B-E.

Zatěž. stav	Svar 1				Svar 2			
	hot-spot Z [mm]	$\sigma_{h-s,max}$ [MPa]	$\sigma_{h-s,min}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{hot-spot}$ [MPa]	hot-spot Z [mm]	$\sigma_{h-s,max}$ [MPa]	$\sigma_{h-s,min}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{hot-spot}$ [MPa]
<b>T6-ZS1</b>	168	36,207	-20,570	<b>56,777</b>	-108	48,391	-27,279	<b>75,670</b>
<b>T6-ZS2</b>	168	67,037	-62,701	<b>129,738</b>	-108	89,120	-82,487	<b>171,607</b>
<b>T6-ZS5</b>	168	28,218	-17,132	<b>45,350</b>	-108	37,463	-23,492	<b>60,956</b>
<b>T6-ZS6</b>	168	53,072	-42,669	<b>95,742</b>	-108	67,539	-59,731	<b>127,270</b>
<b>T6-ZS8</b>	168	63,598	-36,737	<b>100,335</b>	-108	83,786	-49,443	<b>133,229</b>
<b>T6-ZS9</b>	168	118,927	-93,780	<b>212,707</b>	-108	154,900	-127,060	<b>281,959</b>

Tab. 56: Maximální rozkmit hot-spot napětí na T6 v jednom bodě



Zatěž. stav	Svar 1				Svar 2			
	hot-spot Z [mm]	$\sigma_{h-s,max}$ [MPa]	$\sigma_{h-s,min}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{hot-spot}$ [MPa]	hot-spot Z [mm]	$\sigma_{h-s,max}$ [MPa]	$\sigma_{h-s,min}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{hot-spot}$ [MPa]
<b>T6-ZS1</b>	174	36,235	-20,559	<b>56,794</b>	-102	48,261	-27,412	<b>75,673</b>
<b>T6-ZS3</b>	174	49,890	-34,475	<b>84,366</b>	-102	65,842	-46,338	<b>112,179</b>
<b>T6-ZS5</b>	174	28,230	-17,119	<b>45,349</b>	-102	37,458	-23,555	<b>61,013</b>
<b>T6-ZS7</b>	174	40,173	-31,564	<b>71,737</b>	-102	50,814	-44,063	<b>94,877</b>
<b>T6-ZS8</b>	174	63,639	-36,710	<b>100,335</b>	-102	83,634	-49,656	<b>133,290</b>
<b>T6-ZS10</b>	174	88,412	-69,916	<b>158,327</b>	-102	114,384	-95,167	<b>209,552</b>

Tab. 57: Maximální rozkmit hot-spot napětí na T6 v jednom bodě

Zatěž. stav	hot-spot Y [mm]	$\sigma_{h-s,max}$ [MPa]	$\sigma_{h-s,min}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{hot-spot}$ [MPa]
<b>T9-ZS1</b>	-21	44,507	-22,138	<b>66,646</b>
<b>T9-ZS2</b>	-21	100,732	-69,265	<b>169,998</b>
<b>T9-ZS5</b>	-21	37,817	-19,173	<b>56,989</b>
<b>T9-ZS6</b>	-21	78,948	-58,791	<b>137,739</b>
<b>T9-ZS8</b>	-21	82,266	-41,370	<b>123,636</b>
<b>T9-ZS9</b>	-21	181,205	-128,275	<b>309,480</b>

Tab. 58: Maximální rozkmit hot-spot napětí na T9 v jednom bodě

Zatěž. stav	hot-spot Y [mm]	$\sigma_{h-s,max}$ [MPa]	$\sigma_{h-s,min}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{hot-spot}$ [MPa]
<b>T9-ZS1</b>	-21	44,507	-22,138	<b>66,646</b>
<b>T9-ZS3</b>	-21	73,192	-48,083	<b>121,275</b>
<b>T9-ZS5</b>	-21	37,817	-19,173	<b>56,989</b>
<b>T9-ZS7</b>	-21	58,024	-41,422	<b>99,445</b>
<b>T9-ZS8</b>	-21	82,266	-41,370	<b>123,636</b>
<b>T9-ZS10</b>	-21	131,649	-90,884	<b>222,534</b>

Tab. 59: Maximální rozkmit hot-spot napětí na T9 v jednom bodě

Pro nově definovaný vlak (6 t/m), který je založen na soupravě ze SZZ, byly rozkmit napětí zjištěny lineární interpolací mezi rozkmit od Typu 5 (8 t/m) a Typu 7 (5,27 t/m).



# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

## Únavová životnost železničního mostu v Púchově

Zatížená kolej	T6 - Svar 1			T6 - Svar 2			T9 - Svar 3		
	Typ 5	Typ 7	SZZ	Typ 5	Typ 7	SZZ	Typ 5	Typ 7	SZZ
levá	129,7	84,4	96,5	171,6	112,2	128,1	137,7	99,2	109,5
pravá	95,7	71,7	78,1	127,3	94,9	103,6	170	121,3	134,3
obě	212,7	158,3	172,8	282,0	209,6	229,0	309,5	222,5	245,8

Tab. 60: Lineární interpolace pro zjištění rozkmitů normálových napětí [MPa]

### Kumulace poškození pro Typ 1 a 5

Zatížení		$\gamma_{FF} \cdot \Delta\sigma$ [MPa]	$n_{i,den}$	$n_i$	$N_i$	$d_i$
			Počet přejezdů za den	Počet přejezdů za 100 let	Počet cyklů - 1 rozkmit	Dílčí poškození
Typ 1	levá kolej	56,8	25	9,13E+05	1,68E+07	0,054
	pravá kolej	45,4	25	9,13E+05	5,16E+07	0,018
	obě koleje	100,3	1	3,65E+04	1,30E+06	0,028
Typ 5	levá kolej	129,7	19	6,89E+05	6,03E+05	1,144
	pravá kolej	95,7	19	6,89E+05	1,50E+06	0,459
	obě koleje	212,7	1/7	5,21E+03	1,37E+05	0,038
Celkové poškození $D = \sum d_i < 1,0$ NEVYHOVÍ						1,741

Tab. 61: Kumulace poškození na T6 u svaru 1

Zatížení		$\gamma_{FF} \cdot \Delta\sigma$ [MPa]	$n_{i,den}$	$n_i$	$N_i$	$d_i$
			Počet přejezdů za den	Počet přejezdů za 100 let	Počet cyklů - 1 rozkmit	Dílčí poškození
Typ 1	levá kolej	75,7	25	9,13E+05	3,03E+06	0,301
	pravá kolej	61,0	25	9,13E+05	1,18E+07	0,078
	obě koleje	133,2	1	3,65E+04	5,56E+05	0,066
Typ 5	levá kolej	171,6	19	6,89E+05	2,60E+05	2,648
	pravá kolej	127,3	19	6,89E+05	6,37E+05	1,081
	obě koleje	282,0	1/7	5,21E+03	5,86E+04	0,089
Celkové poškození $D = \sum d_i < 1,0$ NEVYHOVÍ						4,263

Tab. 62: Kumulace poškození na T6 u svaru 2



Zatížení		$\gamma_{FF} \Delta \sigma$ [MPa]	$n_{i,den}$	$n_i$	$N_i$	$d_i$	
			Počet přejezdů za den	Počet přejezdů za 100 let	Počet cyklů - 1 rozkmit	Dílčí poškození	
Typ 1	levá kolej	57,0	25	9,13E+05	1,65E+07	0,055	
	pravá kolej	66,6	25	9,13E+05	4,45E+06	0,205	
	obě koleje	123,6	1	3,65E+04	6,96E+05	0,052	
Typ 5	levá kolej	137,7	19	6,89E+05	5,04E+05	1,368	
	pravá kolej	170,0	19	6,89E+05	2,68E+05	2,575	
	obě koleje	309,5	1/7	5,21E+03	4,44E+04	0,118	
<b>Celkové poškození <math>D = \sum d_i &lt; 1,0</math></b>						<b>NEVYHOVÍ</b>	<b>4,374</b>

Tab. 63: Kumulace poškození na T9 u svaru 3

**Kumulace poškození pro Typ 1, 7 a SZZ**

Zatížení		$\gamma_{FF} \Delta \sigma$ [MPa]	$n_{i,den}$	$n_i$	$N_i$	$d_i$	
			Počet přejezdů za den	Počet přejezdů za 100 let	Počet cyklů - 1 rozkmit	Dílčí poškození	
Typ 1	levá kolej	56,8	25	9,13E+05	1,68E+07	0,054	
	pravá kolej	45,3	25	9,13E+05	5,21E+07	0,018	
	obě koleje	100,3	1	3,65E+04	1,30E+06	0,028	
Typ 7	levá kolej	84,4	20	7,19E+05	2,19E+06	0,329	
	pravá kolej	71,7	20	7,19E+05	3,57E+06	0,202	
	obě koleje	158,3	1/7	5,21E+03	3,32E+05	0,016	
SZZ	levá kolej	96,5	14	4,95E+05	1,46E+06	0,338	
	pravá kolej	78,1	14	4,95E+05	2,76E+06	0,179	
	obě koleje	172,8	1/7	5,21E+03	2,55E+05	0,020	
<b>Celkové poškození <math>D = \sum d_i &lt; 1,0</math></b>						<b>NEVYHOVÍ</b>	<b>1,184</b>

Tab. 64: Alternativní kumulace poškození na T6 u svaru 1



Zatížení		$\gamma_{FF} \Delta \sigma$ [MPa]	$n_{i,den}$	$n_i$	$N_i$	$d_i$
			Počet přejezdů za den	Počet přejezdů za 100 let	Počet cyklů - 1 rozkmit	Dílčí poškození
Typ 1	levá kolej	75,7	25	9,13E+05	3,03E+06	0,301
	pravá kolej	61,0	25	9,13E+05	1,18E+07	0,078
	obě koleje	133,3	1	3,65E+04	5,55E+05	0,066
Typ 7	levá kolej	112,2	20	7,19E+05	9,31E+05	0,773
	pravá kolej	94,9	20	7,19E+05	1,54E+06	0,468
	obě koleje	209,6	1/7	5,21E+03	1,43E+05	0,037
SZZ	levá kolej	128,1	14	4,95E+05	6,26E+05	0,791
	pravá kolej	103,6	14	4,95E+05	1,18E+06	0,418
	obě koleje	229,0	1/7	5,21E+03	1,10E+05	0,048
<b>Celkové poškození <math>D = \sum d_i &lt; 1,0</math></b>						<b>NEVYHOVÍ</b>
						<b>2,977</b>

Tab. 65: Alternativní kumulace poškození na T6 u svaru 2

Zatížení		$\gamma_{FF} \Delta \sigma$ [MPa]	$n_{i,den}$	$n_i$	$N_i$	$d_i$
			Počet přejezdů za den	Počet přejezdů za 100 let	Počet cyklů - 1 rozkmit	Dílčí poškození
Typ 1	levá kolej	57	25	9,13E+05	1,65E+07	0,055
	pravá kolej	66,6	25	9,13E+05	4,45E+06	0,205
	obě koleje	123,6	1	3,65E+04	6,96E+05	0,052
Typ 7	levá kolej	99,2	20	7,19E+05	1,35E+06	0,534
	pravá kolej	121,3	20	7,19E+05	7,37E+05	0,976
	obě koleje	222,5	1/7	5,21E+03	1,19E+05	0,044
SZZ	levá kolej	109,5	14	4,95E+05	1,00E+06	0,494
	pravá kolej	134,3	14	4,95E+05	5,43E+05	0,912
	obě koleje	245,8	1/7	5,21E+03	8,86E+04	0,059
<b>Celkové poškození <math>D = \sum d_i &lt; 1,0</math></b>						<b>NEVYHOVÍ</b>
						<b>3,331</b>

Tab. 66: Alternativní kumulace poškození na T9 u svaru 3





### 9.3. Srovnání posudků

Posudek/ svar	LM71 – ekvivalentní rozkmit napětí			Kumulace poškození	
	Jmenovitá	Modifik. jmenovitá	Hot-spot	Hot-spot	
				Typ 1, 5	Typ 1, 7, SZZ
T6 – svar 1	1,44	1,67	1,11	1,74	1,18
T6 – svar 2	1,28	2,37	1,48	4,26	2,98
T9 – svar 3	1,81	2,78	1,73	4,37	3,33

Tab. 67: Srovnání posudků na únavu pro vybrané detaily

Všechny posudky by pro vyhovující výsledek měly být menší než 1,0, což nesplňuje ani jeden. Jsou však mezi nimi patrné značné rozdíly.

Teoreticky by měla být nejvyšší hodnota u modifikovaného jmenovitého rozkmitu napětí, dále u jmenovitého a pak u hot-spot. Nejmenší by mělo vyjít posouzení metodou kumulace poškození. Toto pořadí zohledňuje přesnost a bezpečnost výpočtů.

Srovnání výsledků pro model LM71 vychází podle očekávání. Pouze svar 2 u T6 je poměrně specifický a není ideálním případem kategorií detailů definovaných normou [10]. Proto vychází oproti hot-spot vyšší hodnota až při zavedení geometrie a využití modifikovaného jmenovitého napětí. U ostatních svarů odpovídá poměrně slušně realita kategoriím detailů a tím pádem i standardní jmenovité napětí je vyšší než hot-spot.

Logicky vychází ve všech případech méně příznivé výsledky při využití modifikovaného jmenovitého napětí oproti standardnímu. Výchozí rozkmit napětí je z důvodu zpřesnění geometrie vyšší a při posouzení se porovnává se stejnou hodnotou kategorie detailu.

U výpočtů s modelem LM71 je zavedena poměrně velká bezpečnost. Skutečná obvyklá únavová životnost ze zkušeností ze zkoušení detailů bývá přibližně dvojnásobná, uvažujeme-li průměrnou únavovou pevnost oproti 95% kvantilu. Tento rozdíl je dán poměrně nepřesným výpočtem, kdy zatížení LM71, které se pravděpodobně ani na mostě po dobu jeho životnosti nevyskytne, má za pomoci součinitelů simulovat spektrum reálných vlaků a rychlostí. Překročení kritérií normy je ovšem i v tomto případě značné.

Přesnější je posouzení formou kumulace poškození, které vychází mnohem hůře než při využití modelu LM71. Podle teorie by tomu tak být nemělo, ale zatížení od nichž se tyto metody odvíjí, jsou velmi rozdílná. Pro kumulaci poškození je ideální znát přesnou skladbu dopravy, což se bohužel nepodařilo zjistit. Proto byl tento výpočet proveden pro dvě varianty. První varianta zahrnovala pouze nejtěžší vlak, který vyvolává největší účinky, a měla by být poměrně bezpečná. Druhá alternativa rozdělila přepravený náklad mezi dvě soupravy se zatížením, jež by mělo být na železnici běžnější. Zde posudky vyšly lépe, ale stále byly výrazně překročeny limity normy [10].



# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

## Únavová životnost železničního mostu v Púchově

Posudek/svar	LM71	Kumulace poškození
T6 – svar 1	1,73	9,33

Tab. 68: Výsledky posudků Expertního posouzení [1]

Výsledky z Expertního posouzení [1] byly zpracovány z modifikovaných jmenovitých napětí. Nižší výsledek v diplomové práci může být částečně důsledkem úprav během validace modelu, jež vedly ke snížení ohybových momentů, a tedy i ke snížení normálových napětí. Navíc byly do finální realizace provedeny úpravy přípoje – zvětšila se vzdálenost mezi horní pásnicí trámu a začátkem trubky. Také zaoblení na styčnickovém plechu měla být původně opatřena dalšími přivařenými plechy (výztuhami), které by snižovaly zdejší koncentraci napětí. Zvláštní ale je, že nebyl objeven větší problém u svaru 2.

Rozdíl byl ještě u výpočtu kumulace poškození, jenž zjednodušeně přepočítal jen přejezd po jedné koleji a jedenkrát denně míjení osobních i nákladních vlaků. Zavedeny byly stejné soupravy – pouze Typ 1 a Typ 5.



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

**Únavová životnost železničního mostu v Púchově**



## **10. ZÁVĚR**

Tato práce navazuje na Expertní statické [1] a dynamické [2] posouzení. Autoři doc. Ing. Pavel Ryjáček, Ph.D. a Ing. Martin Macho se zde zabývali mimo ověření globálního chování konstrukce i analýzou detailů u přípojů závěsů z hlediska únavy. Posouzení provedli modifikovanými ekvivalentními rozkmity napětí a kumulací poškození (viz Tab. 68, str. 187). U obou došli k nevyhovujícím závěrům a navrhli možná řešení. Stanovili také, že horší únavové životnosti dosahuje přípoj závěsu k trámu než k oblouku, a upozornili na nevhodný detail konzol pro sloupky protihlukové stěny. Tyto zmíněné detaily se staly předmětem možného podrobnějšího zkoumání.

Hlavním cílem této diplomové práce byla predikce zbytkové životnosti konstrukce s využitím přesnější metody hot-spot. K tomu bylo nutné nejprve zpracovat numerickou analýzu vybraných kritických detailů na konstrukci, k čemuž byly vytvořeny objemové konečně-prvkové modely. V průběhu tvorby práce byly na mostě provedeny zatěžovací zkoušky, které pak sloužily jako hlavní zdroj pro validaci modelů.

Vyhodnocení zatěžovacích zkoušek potvrdilo, že ve zkoumaných místech skutečně dochází ke zvýšené koncentraci napětí. Ovšem rozdíly mezi naměřenými hodnotami a výpočtem byly významné. Během validace se zjistilo, že konstrukce nezanedbatelně spolupůsobí s kolejí, se spodní stavbou a dalšími nenosnými prvky na ní. Dále bylo také nutné snížit tuhost v připojení závěsů. Nakonec se ale podařilo upravit modely tak, aby vystihovaly reálné globální i lokální chování konstrukce.

Následně bylo zjištěno, že únavové posouzení detailů na stoletou životnost nevyhovuje kritériím normy ČSN EN 1993-1-9 [10] ani v jednom případě, ani v jednom způsobu výpočtu (viz Tab. 67, str. 186). Zkoumané detaily jsou proto jednoznačně nevhodné pro využití na železničních mostech. Horšího výsledku bylo dosaženo u svaru konzoly.

Pro model LM71 vyšly posudky příznivěji, avšak pro přesnější výpočet kumulací poškození od skutečných vlaků je překročení kritérií značné. U této metody ale nebyla známá přesná skladba dopravy, proto byla nejprve využita nejnepříznivější kombinace souprav s rychlostmi vyvolávajícími největší rozkmity normálových napětí. Tímto je výsledek o něco bezpečnější. Pak byla provedena ještě kumulace pro běžnější soupravy (6 t/m a 5,3 t/m), která je pravděpodobnější.

I z jednotlivých přejezdů různých typů souprav, jež byly v této práci spočteny, jsou patrné velmi vysoké hodnoty rozkmitů normálových napětí bez ohledu na normou ČSN EN 1993-1-9 [10] definovaný způsob posouzení únavy. Na druhou stranu je třeba i dodat, že norma ČSN EN 1991-2 [15] nedefinuje všechny reálné vlaky, jež se mohou na trati objevit. Je proto možné, že přes most v průběhu životnosti přejedou soupravy, které naopak vyvolají účinky ještě vyšší. Značný vliv má i délka nákladního vlaku. Pokud by bylo využíváno více kratších souprav k přepravě stejného množství nákladu, pak se bude únavová životnost snižovat.

Z výsledků kumulace poškození jsou očekávány problémy zkoumaných detailů již okolo 25.-35. roku provozování konstrukce. Zbytková únavová životnost konstrukce je na základě této práce předpokládána pouhých 30 let. Tato hodnota může být ovlivněna pozitivně i negativně skutečným provozem na trati, který je nutné zmapovat, čímž je možné vylepšit přesnost výpočtu. Určitý vliv může mít i skutečná lomová houževnatost materiálu.



## ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

### Únavová životnost železničního mostu v Púchově

Proto se přikláním ke dříve navrhovaným opatřením z vyhodnocení prvotního posouzení doc. Ing. Pavla Ryjáčka, Ph.D. a Ing. Martina Macha [1].

Konstrukce by měla být dlouhodobě monitorována, ideálně po celou dobu životnosti, a to i v případě konstrukčních změn. [1]

Vrchní plechy konzoly lze poměrně snadno nahradit jinými se zaoblením pro dosažení plynulé změny průřezu. [1]

Úprava přípojů táhel je po realizaci náročnější. V Expertním posouzení [1] byly zkoumány varianty zkrácení táhel a zvětšení tloušťky styčnickových plechů, jež se ukázaly jako nedostatečně efektivní. Doporučeným řešením tohoto problému bez většího zásahu do konstrukce tedy zůstává ošetření svarů kritických detailů metodou **HFMI** (High Frequency Mechanical Impact). Tím lze dosáhnout vylepšení geometrie svarů, a tedy zvýšení kategorií detailů a prodloužení zbytkové únavové životnosti. [1]



## SEZNAM LITERATURY

- [1] RYJÁČEK, Pavel a Martin MACHO. *Expertní posouzení statického a dynamického chování mostu stavby „ŽSR, Modernizácia trate Púchov - Žilina pre rýchlosť do 160 km/h, I. etapa“ „SO 44.33.11 Púchov - Považská Bystrica, nový železničný most nad Nosickým kanálom“: 2. Etapa řešení - statické posouzení*. Praha, 2019.
- [2] RYJÁČEK, Pavel a Martin MACHO. *Expertní posouzení statického a dynamického chování mostu stavby „ŽSR, Modernizácia trate Púchov - Žilina pre rýchlosť do 160 km/h, I. etapa“ „SO 44.33.11 Púchov - Považská Bystrica, nový železničný most nad Nosickým kanálom“: 1. Etapa řešení - dynamické posouzení*. Praha, 2019.
- [3] RIBERIO, Alfredo S., José A.F.O. CORREIA, António L.L. SILVA a Abilio M.P. DE JESUS. *Evolution of fatigue history*. In: *21st Brazilian Congress of Mechanical Engineering*. Brazílie, 2011 [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/299397997\\_EVOLUTION\\_OF\\_FATIGUE\\_HISTORY](https://www.researchgate.net/publication/299397997_EVOLUTION_OF_FATIGUE_HISTORY)
- [4] WALTON, Geri. *Versailles Railway Accident of 1842: A Horrible Tragedy* [online]. 2016 [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://www.geriwalton.com/versailles-railway-accident-of-1842/>
- [5] LASEK, S. *Základy degračních procesů*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2014 [cit. 2020-04-27]. ISBN 978-80-248-3591-4. Dostupné z: [http://katedry.fmmi.vsb.cz/Modin\\_Animace/Opory/03\\_Materialové\\_inženýrství/01\\_Zaklady\\_degradacnich\\_procesu/Lasek\\_Zaklady\\_degradacnich\\_procesu.pdf](http://katedry.fmmi.vsb.cz/Modin_Animace/Opory/03_Materialové_inženýrství/01_Zaklady_degradacnich_procesu/Lasek_Zaklady_degradacnich_procesu.pdf)
- [6] FUSEK, Martin a Ludmila ADÁMKOVÁ. *Únava materiálu: Inicace a šíření únavových trhlin* [online]. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2013 [cit. 2020-05-04]. ISBN 978-80-248-3024-7. Dostupné z: [http://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY\\_01\\_011/%C3%9Anava%20materi%C3%A1lu/02%20Text%20pro%20e-learning/%C3%9Anava%20materi%C3%A1lu%2013.pdf](http://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_011/%C3%9Anava%20materi%C3%A1lu/02%20Text%20pro%20e-learning/%C3%9Anava%20materi%C3%A1lu%2013.pdf)
- [7] TKÁČ, Tomáš. *Únavové charakteristiky ocelí pro kolejová vozidla v závislosti na tepelném zpracování* [online]. Havířov, 2016 [cit. 2020-04-27]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/116532>. Disertační práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [8] MAKHLOUF, Abdel Salam Hamdy a Mahmood ALIOFKHAZRAEI. *Handbook of Materials Failure Analysis with Case Studies from the Aerospace and Automotive Industries*. Butterworth-Heinemann, 2016. ISBN 978-0-12-800950-5. [cit. 2020-05-06].
- [9] VANĚK, David. *Analýzy damage tolerance s uvážením interakce zatěžovacích kmitů* [online]. Brno, 2016 [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=128732](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=128732). Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [10] ČSN EN 1993-1-9 ed. 2 (731401) Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-9: Únava. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013. Česká technická norma.





- [11] IMAM, Boulent. *Advanced Finite Element Analysis for Fatigue Design and Assessment* [online]. 2020.
- [12] KLESNIL, M.; LUKÁŠ, P. *Únava kovových materiálů při mechanickém namáhání*. 1. vydání, Academia Praha, 1975.
- [13] SHIGLEY, J. *Mechanical engineering design*. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 1989. McGraw-Hill series in mechanical engineering. ISBN 0070568995.
- [14] ČSN EN 1990 ed. 2 (730002) *Eurokód: Zásady navrhování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015. Česká technická norma.
- [15] ČSN EN 1991-2 ed. 2 (736203) *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 2: Zatížení mostů dopravou*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015. Česká technická norma.
- [16] ČSN EN 1993-2 (736205) *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 2: Ocelové mosty*. Praha: Český normalizační institut, 2008. Česká technická norma.
- [17] TECHNICAL COMMITTEE CEN/TC 250 "STRUCTURAL EUROCODES". *prEN 1993-1-14:XXXX*. 2017.
- [18] NOSKOVÁ, Denisa, Jiří NOVÁČEK, Antonín SMĚTÁK a Petr ŠŤASTA. Dvoukolejný železniční most přes Váh pro rychlost 160 km za hodinu. *SILNICE ŽELEZNICE* [online]. červen 2020 [cit. 2020-04-27]. Dostupné z: <https://silnice-zeleznice.cz/zeleznicni-infrastruktura/dvoukolejny-zeleznicni-most-pres-vah-pro-rychlost-160-km-za-hodinu-248>
- [19] ŽSR, *Modernizácia trate Púchov – Žilina pre rýchlosť do 160 km/h, I. etapa, optimalizácia, SO 44.33.11 Púchov – Považská Bystrica, nový železničný most nad Nosickým kanálom, Výkresová dokumentace (stupeň PD: DSPRS)*, 12/2014
- [20] *Modernizácia trate Púchov – Žilina pre rýchlosť do 160 km/h, I. etapa, optimalizácia, SO 44.33.11 Púchov – Považská Bystrica, nový železničný most nad Nosickým kanálom. Výkresová dokumentace (stupeň VV-OK)*, FIRESTA-Fišer, rekonstrukce, stavby a.s., 5/2017.
- [21] RYJÁČEK, Pavel. *Program statické zatěžovací zkoušky „ŽSR, Modernizácia trate Púchov – Žilina pre rýchlosť do 160 km/h, I. etapa“ „SO 44.33.11 Púchov – Považská Bystrica, nový železničný most nad Nosickým kanálom“*. Praha, 2020.
- [22] RYJÁČEK, Pavel. *Program dynamické zatěžovací zkoušky „ŽSR, Modernizácia trate Púchov – Žilina pre rýchlosť do 160 km/h, I. etapa“ „SO 44.33.11 Púchov – Považská Bystrica, nový železničný most nad Nosickým kanálom“*. Praha, 2020.
- [23] NEDOMA, Martin a T. KUKLÍK. *Geodetické měření při statické zátěžové zkoušce železničního mostu „SO 44.33.11 Púchov – Považská Bystrica“ přes Nosický kanál*. Praha, 2020.
- [24] WERUNSKÝ, Martin. *Chování šikmého mostu s řídicí tyčí MW při brzdných sílách*. Praha, 2017. Diplomová práce. ČVUT.



- [25] STEJSKAL, Jakub. *Možnosti uplatnění systému DFF300 pro mosty s bezстыkovou kolejí*. Praha, 2018. Bakalářská práce. ČVUT.
- [26] ŽSR, *Modernizácia trate Púchov – Žilina pre rýchlosť do 160 km/h, I. etapa, optimalizácia, SO 44.33.11 Púchov - Považská Bystrica, nový železničný most nad Nosickým kanálom, Statický výpočet (stupeň PD: DSPRS), 5/2016*
- [27] ČSN 73 6209 (736209) *Zatěžovací zkoušky mostních objektů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019. Česká technická norma.
- [28] "ČMELÁK" Muzejní motorová lokomotiva z roku 1963. *Plzeňská dráha* [online]. [cit. 2020-12-31]. Dostupné z: <http://www.plzenskadraha.cz/cmelak.html>
- [29] Lokomotiva Emil Zátoupek Německo. *Škoda* [online]. [cit. 2020-12-31]. Dostupné z: <https://www.skoda.cz/reference/lokomotiva-emil-zatoupek-nemecko/?from=prod>

## POUŽITÉ PROGRAMY

Microsoft Word 2016

Microsoft Excel 2016

Autocad 2018

CSI Bridge v21 2019

CSI Bridge v22 2020

Abaqus Standard 2016

Monitor 5.7.5

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A: Geometrie detailů

Příloha B: Funkce vnitřních sil při přejezdu v čase

Příloha C: Vstupní síly do Abaqusu

Příloha D: Rozložení napětí na detailech

Příloha E: Hodnoty napětí na detailech a použití metody hot-spot



## **SEZNAM OBRÁZKŮ**

<i>Obr. 1: Stadium nukleace únavové trhliny [7] .....</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 2: Šíření trhliny [8] .....</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 3: Graf rychlosti šíření únavové trhliny [9] .....</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 4: Jmenovité, hot-spot a efektivní vrubové napětí [11] .....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 5: Křivky únavové pevnosti pro rozkmity normálových napětí [12].....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 6: Příklad průběhu napětí při harmonickém zatěžování [13].....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 7: Redukce napětí v tlaku [10] .....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 8: Křivky únavové pevnosti pro rozkmity normálových napětí [10] .....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 9: Únavové životnosti ve vztahu k velikosti rozkmitů napětí [10].....</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 10: Kategorie detailů pro metodu hot-spot [10] .....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 11: Linearizace napětí po tloušťce plechu [17] .....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 12: Typy hot-spot [17].....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 13: Lineární extrapolace s jemnou (vlevo) a hrubou sítí (vpravo) [17] .....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 14: Kvadratická extrapolace s jemnou (vlevo) a hrubou sítí (vpravo) [17] .....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 15: Dvouosá napjatost ve vztahu k metodě hot-spot [17] .....</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 16: Příklad místa s referenčními poloměry [11] .....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 17: Idealizace svarů s referenčními poloměry [17].....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 18: Doporučení pro tvorbu sítě prvků [11].....</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 19: Celkový pohled na most.....</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 20: Schéma uspořádání mostu .....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 21: Příčný řez NK 3 uprostřed rozpětí [19] .....</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 22: Podélný řez NK 3 [19] .....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 23: Půdorys NK 3 [19] .....</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 24: Připojení styčnickového plechu táhla na hlavní nosník .....</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 25: Připojení styčnickového plechu táhla na oblouk.....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 26: Svar k trámu (vlevo) a k oblouku (uprostřed a vpravo) [20] .....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 27: Skutečné výšky svarů na hlavním nosníku [1] .....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 28: Konzola na sloupek protihlukové stěny .....</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 29: Model mostu v CSI Bridge.....</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 30: Uložení mostu.....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 31: Model s vykreslenými průřezy.....</i>	<i>48</i>



Obr. 32: Průřezy trámů (zleva) T1, T2, T3, T4 .....	49
Obr. 33: Průřezy oblouků (zleva) O1, O2, O3 .....	49
Obr. 34: Průřez rámového ztužení oblouku .....	50
Obr. 35: Průřez diagonál .....	50
Obr. 36: Průřez závěsů.....	50
Obr. 37: Průřez styčnickového plechu u závěsů .....	51
Obr. 38: Detail připojení závěsu na trám (vlevo) a na oblouk (vpravo) .....	51
Obr. 39: Průřez příčnicku pod kolejovým ložem .....	52
Obr. 40: Průřez krajního příčnicku pod kolejovým ložem .....	52
Obr. 41: Průřez příčnicku u trámu .....	52
Obr. 42: Průřez krajního příčnicku u trámu .....	53
Obr. 43: Průřez podélné výztuhy.....	53
Obr. 44: Průřez krajní podélné výztuhy.....	53
Obr. 45: Detail mostovky s připojením na trám.....	54
Obr. 46: Lokomotiva 742 [21].....	55
Obr. 47: Vůz Faccp [21].....	56
Obr. 48: Zatížení pro SZZ na jedné koleji (na druhé totožné).....	56
Obr. 49: Umístění zatížení pro ZS1 – SZZ – max. průhyb ve čtvrtině rozpětí ...	56
Obr. 50: Umístění zatížení pro ZS2 – SZZ – max. průhyb v polovině rozpětí ....	56
Obr. 51: Lokomotiva 756 [22].....	57
Obr. 52: Vůz Falls, ČD Cargo [22].....	57
Obr. 53: Zatížení pro DZZ.....	58
Obr. 54: 1. vlastní tvar.....	59
Obr. 55: 2. vlastní tvar.....	60
Obr. 56: 3. vlastní tvar.....	61
Obr. 57: 4. vlastní tvar.....	62
Obr. 58: 5. vlastní tvar.....	63
Obr. 59: Deformace konstrukce v ZS1 .....	64
Obr. 60: Deformace konstrukce v ZS2 .....	64
Obr. 61: Obálka maximálních deformací od ZS14.....	65
Obr. 62: Označení jednotlivých táhel T1-T11 .....	65
Obr. 63: Detail u připojení táhla T6 (vlevo) a T9 (vpravo) .....	66
Obr. 64: Detail v CSI Bridge .....	66



<i>Obr. 65: Vnitřní síly [kN] (zleva - N, V2, V3) na T9 pro ZS1.....</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 66: Vnitřní síly [kNm] (zleva - T, M2, M3) na T9 pro ZS1 .....</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 67: Koncové síly na T9 pro ZS1 [kN, kNm].....</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 68: Modely detailů T9 (vlevo) a T6 (vpravo).....</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 69: Svary na styčnickovém plechu .....</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 70: Volba prvků na modelu T6 (vlevo) a T9 (vpravo), zelená a žlutá – hexagonální, růžová – tetraedrické.....</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 71: Síť na T6 (vlevo) a T9 (vpravo).....</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 72: Detail A (vlevo), detail B(vpravo).....</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 73: Detail C.....</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 74: Detail D .....</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 75: Podepření, referenční body a příklad zatížení na modelu .....</i>	<i>79</i>
<i>Obr. 76: Normálové napětí ve směru Y – na T6 (ZS2).....</i>	<i>80</i>
<i>Obr. 77: Maximální normálové napětí ve směru Y – na T6 (ZS12 v t = 2,8 s)...</i>	<i>80</i>
<i>Obr. 78: Minimální normálové napětí ve směru Y – na T6 (ZS12 v t = 5,525 s)</i>	<i>81</i>
<i>Obr. 79: Maximální normálové napětí ve směru X – na T9 (ZS14 v t = 2,2 s) ..</i>	<i>82</i>
<i>Obr. 80: Minimální normálové napětí ve směru X – na T9 (ZS14 v t = 4,45 s) .</i>	<i>82</i>
<i>Obr. 81: Rozmístění geodeticky sledovaných bodů [23].....</i>	<i>85</i>
<i>Obr. 82: Rozmístění terčů pro DIC v podélném směru.....</i>	<i>85</i>
<i>Obr. 83: Rozmístění terčů pro DIC v příčném směru.....</i>	<i>85</i>
<i>Obr. 84: Rozmístění snímačů zrychlení pro přejezdy v podélném směru .....</i>	<i>86</i>
<i>Obr. 85: Rozmístění snímačů zrychlení pro přejezdy v příčném směru.....</i>	<i>87</i>
<i>Obr. 86: Rozmístění snímačů zrychlení v podélném směru pro modální analýzu</i>	<i>87</i>
<i>Obr. 87: Rozmístění snímačů v příčném směru pro modální analýzu.....</i>	<i>87</i>
<i>Obr. 88: Tenzometry u připojení levého středního táhla T6 (1/2).....</i>	<i>88</i>
<i>Obr. 89: Tenzometry u připojení levého středního táhla T6 (2/2).....</i>	<i>88</i>
<i>Obr. 90: Tenzometry u konzoly u pravého táhla T9 .....</i>	<i>88</i>
<i>Obr. 91: Rozmístění dvojic tenzometrů 1-5 na púchovské straně styčnickového plechu.....</i>	<i>89</i>
<i>Obr. 92: Rozmístění dvojic tenzometrů 6-10 na žilinské straně styčnickového plechu.....</i>	<i>89</i>
<i>Obr. 93: Rozmístění tenzometrů 11-20 na horní pásnici trámu .....</i>	<i>90</i>
<i>Obr. 94: Rozmístění tenzometrů 21-24 u konzoly .....</i>	<i>90</i>
<i>Obr. 95: Tenzometry u připojení levého středního táhla T6.....</i>	<i>91</i>



Obr. 96: Tenzometry u konzoly u pravého táhla (T9) .....	91
Obr. 97: Soupravy před zahájením statické zatěžovací zkoušky .....	94
Obr. 98: Přejezd soupravy během dynamické zatěžovací zkoušky .....	105
Obr. 99: Model v CSI Bridge po validaci.....	128
Obr. 100: Model v CSI Bridge po validaci s vykreslením průřezů .....	128
Obr. 101: Nové průřezy trámů (zleva) T1, T2, T3, T4.....	129
Obr. 102: Nové průřezy oblouků (zleva) O1, O2, O3.....	129
Obr. 103: Přípoj závěsu .....	130
Obr. 104: Trubka s procházejícím styčnickovým plechem .....	130
Obr. 105: Zúžení trubky – průřez 1 .....	131
Obr. 106: Zúžení trubky – průřez 2 .....	131
Obr. 107: Zúžení trubky – průřez 3 .....	131
Obr. 108: Dodatečně přidaná lana.....	132
Obr. 109: Koleje a jejich uložení .....	134
Obr. 110: Pohled na umístění kolejí .....	134
Obr. 111: Zábradlí .....	135
Obr. 112: Protihluková stěna .....	135
Obr. 113: Revizní dráha .....	136
Obr. 114: Průřez dřívku pilíře .....	137
Obr. 115: Průřez stativa .....	137
Obr. 116: Pilíř .....	137
Obr. 117: Skutečné zatížení při SZZ na levé koleji .....	139
Obr. 118: Skutečné zatížení při SZZ na pravé koleji .....	139
Obr. 119: Lokomotiva 751 .....	139
Obr. 121: Skutečné zatížení při DZZ .....	140
Obr. 120: Vůz Falns .....	140
Obr. 122: Model T9 s upravenými svary .....	140
Obr. 123: Model T9 (vlevo) a T6 (vpravo).....	141
Obr. 124: Zobrazení sítě u připojení styčnickového plechu .....	142
Obr. 125: Zobrazení sítě u připojení konzoly .....	142
Obr. 126: Normálové napětí ve směru Y – maximum na T6 (ZS1) .....	145
Obr. 127: Normálové napětí ve směru Y – maximum na T6 (ZS14 v t = 4,075 s) .....	145





<i>Obr. 128: Normálové napětí ve směru Y – minimum na T6 (ZS14 v t = 2,025 s)</i>	145
<i>Obr. 129: Normálové napětí ve směru X – maximum na T9 (ZS1)</i>	146
<i>Obr. 130: Normálové napětí ve směru X – maximum na T9 (ZS14 v t = 2,2 s)</i>	146
<i>Obr. 131: Normálové napětí ve směru X – minimum na T9 (ZS14 v t = 4,45 s)</i>	146
<i>Obr. 132: Místa pravděpodobného vzniku únavových trhlin u přípoje závěsu</i>	152
<i>Obr. 133: Místo pravděpodobného únavové vzniku trhliny u přípoje konzoly</i>	152
<i>Obr. 134: Model zatížení LM71 [15]</i>	153
<i>Obr. 135: Body na styčnickovém plechu, kde bylo odečteno normálové napětí</i>	155
<i>Obr. 136: Bod na trámu, z něž bylo odečteno normálové napětí</i>	155
<i>Obr. 137: Parametr „l“ pro stanovení kategorie detailu (křížové a T spoje)</i>	157
<i>Obr. 138: Zpřesnění detailu u T6 skořepinovými prvky</i>	159
<i>Obr. 139: Zpřesnění detailu u T9 skořepinovými prvky</i>	159
<i>Obr. 140: Normálová napětí [kPa] na T6 (stálé zatížení)</i>	160
<i>Obr. 141: Max. normálová napětí [kPa] na T6 (LM71-1)</i>	160
<i>Obr. 142: Min. normálová napětí [kPa] na T6 (LM71-1)</i>	161
<i>Obr. 143: Max. normálová napětí [kPa] na T6 (LM71-2)</i>	161
<i>Obr. 144: Min. normálová napětí [kPa] na T6 (LM71-2)</i>	162
<i>Obr. 145: Normálová napětí [kPa] na T9 (stálé zatížení)</i>	162
<i>Obr. 146: Max. normálová napětí [kPa] na T9 (LM71-1)</i>	163
<i>Obr. 147: Min. normálová napětí [kPa] na T9 (LM71-1)</i>	163
<i>Obr. 148: Max. normálová napětí [kPa] na T9 (LM71-2)</i>	164
<i>Obr. 149: Min. normálová napětí [kPa] na T9 (LM71-2)</i>	164
<i>Obr. 150: Normálové napětí ve směru Y – maximum na T6 (LM71-1)</i>	167
<i>Obr. 151: Normálové napětí ve směru Y – minimum na T6 (LM71-1)</i>	167
<i>Obr. 152: Normálové napětí ve směru Y – maximum na T6 (LM71-2)</i>	168
<i>Obr. 153: Normálové napětí ve směru Y – minimum na T6 (LM71-2)</i>	168
<i>Obr. 154: Normálové napětí ve směru X – maximum na T9 (LM71-1)</i>	168
<i>Obr. 155: Normálové napětí ve směru X – minimum na T9 (LM71-1)</i>	169
<i>Obr. 156: Normálové napětí ve směru X – maximum na T9 (LM71-2)</i>	169
<i>Obr. 157: Normálové napětí ve směru X – minimum na T9 (LM71-2)</i>	169
<i>Obr. 158: Typ 1 – osobní vlak tažený lokomotivou [15]</i>	173



<i>Obr. 159: Typ 2 – osobní vlak tažený lokomotivou [15] .....</i>	<i>173</i>
<i>Obr. 160: Typ 5 – nákladní vlak tažený lokomotivou [15].....</i>	<i>173</i>
<i>Obr. 161: Typ 6 – nákladní vlak tažený lokomotivou [15].....</i>	<i>174</i>
<i>Obr. 162: Typ 7 – nákladní vlak tažený lokomotivou [15].....</i>	<i>174</i>
<i>Obr. 163: Typ 8 – nákladní vlak tažený lokomotivou [15].....</i>	<i>174</i>
<i>Obr. 164: Typ 11 – nákladní vlak tažený lokomotivou [15] .....</i>	<i>175</i>
<i>Obr. 165: Typ 12 – nákladní vlak tažený lokomotivou [15] .....</i>	<i>175</i>



## SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1: Doporučené hodnoty dílčích součinitelů únavové pevnosti <math>\gamma_{MF}</math> [10].....</i>	<i>25</i>
<i>Tab. 2: Součinitel <math>\lambda_1</math> pro standardní kolejovou dopravu [16] .....</i>	<i>26</i>
<i>Tab. 3: Součinitel <math>\lambda_2</math> [16].....</i>	<i>26</i>
<i>Tab. 4: Součinitel <math>\lambda_3</math> [16] .....</i>	<i>26</i>
<i>Tab. 5: Součinitel <math>\lambda_4</math> [16].....</i>	<i>27</i>
<i>Tab. 6: Pravidla pro lineární a kvadratickou extrapolaci pro různé typy hot-spot a hustoty sítě [17] .....</i>	<i>31</i>
<i>Tab. 7: Kategorie detailů pro efektivní vrubové napětí [11].....</i>	<i>33</i>
<i>Tab. 8: Kategorie detailů pro křížové a T spoje [10] .....</i>	<i>44</i>
<i>Tab. 9: Stanovení kategorií detailů pro levý trám [1].....</i>	<i>44</i>
<i>Tab. 10: Stanovení kategorií detailů pro pravý trám [1] .....</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 11: Kategorie detailů pro podélně připojené prvky [10] .....</i>	<i>46</i>
<i>Tab. 12: Nejmenší vlastní frekvence a největší vlastní periody konstrukce .....</i>	<i>58</i>
<i>Tab. 13: Maximální svislé deformace na trámech .....</i>	<i>64</i>
<i>Tab. 14: Koncové síly na T9 pro ZS1 .....</i>	<i>68</i>
<i>Tab. 15: Maximální odhadované rozkmity napětí pro všechny zatěžovací stavy na styčnickovém plechu levého táhla T6 na straně k Púchovu .....</i>	<i>71</i>
<i>Tab. 16: Maximální odhadované rozkmity napětí pro všechny zatěžovací stavy na styčnickovém plechu levého táhla T6 na straně k Žilině .....</i>	<i>72</i>
<i>Tab. 17: Maximální odhadované rozkmity napětí pro všechny zatěžovací stavy na horní pásnici pravého trámu u připojení konzoly u táhla T9 .....</i>	<i>72</i>
<i>Tab. 18: Maximální rozkmit napětí hot-spot v patě svaru na modelu T6.....</i>	<i>81</i>
<i>Tab. 19: Maximální rozkmit napětí hot-spot v patě svaru na modelu T9.....</i>	<i>83</i>
<i>Tab. 20: Seřazení velikostí odhadovaných a vypočtených napětí přejezdů.....</i>	<i>83</i>
<i>Tab. 21: Očekávaná napětí při zkouškách (1/2).....</i>	<i>92</i>
<i>Tab. 22: Očekávaná napětí při zkouškách T6 (2/2) .....</i>	<i>93</i>
<i>Tab. 23: Skutečné hmotnosti břemen pro SZZ .....</i>	<i>95</i>
<i>Tab. 24: Porovnání napětí při SZZ s výpočtem.....</i>	<i>103</i>
<i>Tab. 25: Porovnání průhybů při SZZ s výpočtem .....</i>	<i>104</i>
<i>Tab. 26: Skutečné hmotnosti břemen pro DZZ.....</i>	<i>105</i>
<i>Tab. 27: Rozkmity napětí [MPa] na tenzometrech 1A-5B pro všechny ZS .....</i>	<i>107</i>
<i>Tab. 28: Průměrné rozkmity napětí [MPa] na tenzometrech 1A-5B pro stejné rychlosti .....</i>	<i>107</i>



Tab. 29: Rozkmity napětí [MPa] na tenzometrech 6A-10B pro všechny ZS.....	108
Tab. 30: Průměrné rozkmity napětí [MPa] na tenzometrech 6A-10B pro stejné rychlosti .....	108
Tab. 31: Rozkmity napětí [MPa] na tenzometrech 21-24 pro všechny DZS .....	119
Tab. 32: Porovnání DZZ s výpočtem na T6 (70, 80 km/h) .....	121
Tab. 33: Porovnání DZZ s výpočtem na T6 (90, 100 km/h).....	122
Tab. 34: Porovnání DZZ s výpočtem na T9 (70, 80 km/h) .....	122
Tab. 35: Porovnání DZZ s výpočtem na T9 (90, 100 km/h).....	122
Tab. 36: Porovnání vypočtených a naměřených průhybů z DZZ .....	123
Tab. 37: Porovnání vypočtených a vyhodnocených vlastních frekvencí a tvarů	124
Tab. 38: Porovnání vlastních frekvencí a tvarů .....	143
Tab. 39: Porovnání průhybů pro SZZ .....	143
Tab. 40: Porovnání průhybů pro DZZ.....	144
Tab. 41: Porovnání naměřených napětí s vypočtenými po validaci – SZZ.....	148
Tab. 42: Porovnání hotspot naměřených napětí s vypočtenými po validaci – SZZ .....	149
Tab. 43: Porovnání naměřených napětí s vypočtenými po validaci – DZZ .....	150
Tab. 44: Porovnání hotspot naměřených napětí s vypočtenými po validaci – DZZ .....	151
Tab. 45: Rozkmity jmenovitých napětí.....	156
Tab. 46: Rozkmity modifikovaných jmenovitých napětí.....	165
Tab. 47: Rozkmity napětí hot-spot .....	170
Tab. 48: Uvažované typy vlaků a rychlosti pojíždění .....	172
Tab. 49: Účinky normových vlaků na konstrukci .....	176
Tab. 50: Účinky normových vlaků na konstrukci – zpřesnění rychlostí .....	177
Tab. 51: Maximální rozkmit hot-spot napětí na T6 .....	178
Tab. 52: Maximální rozkmit hot-spot napětí na T9 .....	178
Tab. 53: Poškození na T6 u svaru 1 od souprav typu 1,5,7 a 11 .....	179
Tab. 54: Poškození na T6 u svaru 2 od souprav typu 1,5,7 a 11.....	180
Tab. 55: Poškození na T9 od souprav typu 1,5,7 a 11.....	180
Tab. 56: Maximální rozkmit hot-spot napětí na T6 v jednom bodě.....	181
Tab. 57: Maximální rozkmit hot-spot napětí na T6 v jednom bodě .....	182
Tab. 58: Maximální rozkmit hot-spot napětí na T9 v jednom bodě.....	182
Tab. 59: Maximální rozkmit hot-spot napětí na T9 v jednom bodě.....	182



<i>Tab. 60: Lineární interpolace pro zjištění rozkmitů normálových napětí [MPa]</i>	<i>183</i>
<i>Tab. 61: Kumulace poškození na T6 u svaru 1 .....</i>	<i>183</i>
<i>Tab. 62: Kumulace poškození na T6 u svaru 2 .....</i>	<i>183</i>
<i>Tab. 63: Kumulace poškození na T9 u svaru 3 .....</i>	<i>184</i>
<i>Tab. 64: Alternativní kumulace poškození na T6 u svaru 1.....</i>	<i>184</i>
<i>Tab. 65: Alternativní kumulace poškození na T6 u svaru 2.....</i>	<i>185</i>
<i>Tab. 66: Alternativní kumulace poškození na T9 u svaru 3 .....</i>	<i>185</i>
<i>Tab. 67: Srovnání posudků na únavu pro vybrané detaily.....</i>	<i>186</i>
<i>Tab. 68: Výsledky posudků Expertního posouzení [1] .....</i>	<i>187</i>



## **SEZNAM GRAFŮ**

<i>Graf 1: Normálová síla a moment v čase na táhle T6 levého trámu v místě kraje myšleného řezu (ZS14) .....</i>	<i>70</i>
<i>Graf 2: Normálová síla a moment v čase na pravém trámu u závěsu T9 v místě kraje myšleného řezu (ZS14) .....</i>	<i>70</i>
<i>Graf 3: Normálové napětí při SZS1+SZS4 na 1A-5B .....</i>	<i>96</i>
<i>Graf 4: Normálové napětí při SZS1+SZS4 na 6A-10B .....</i>	<i>96</i>
<i>Graf 5: Normálové napětí při SZS1+SZS4 na 11-20.....</i>	<i>97</i>
<i>Graf 6: Normálové napětí při SZS1+SZS4 na 21-24.....</i>	<i>97</i>
<i>Graf 7: Normálové napětí při SZS3 na 1A-5B.....</i>	<i>98</i>
<i>Graf 8: Normálové napětí při SZS3 na 6A-10B.....</i>	<i>98</i>
<i>Graf 9: Normálové napětí při SZS3 na 11-20.....</i>	<i>99</i>
<i>Graf 10: Normálové napětí při SZS3 na 21-24 .....</i>	<i>99</i>
<i>Graf 11: Normálové napětí při SZS6 na 1A-5B .....</i>	<i>100</i>
<i>Graf 12: Normálové napětí při SZS6 na 6A-10B .....</i>	<i>100</i>
<i>Graf 13: Normálové napětí při SZS6 na 11-20 .....</i>	<i>101</i>
<i>Graf 14: Normálové napětí při SZS6 na 21-24 .....</i>	<i>101</i>
<i>Graf 15: Průměrný rozkmit napětí na 1A-5B .....</i>	<i>109</i>
<i>Graf 16: Průměrný rozkmit napětí na 6A-10B.....</i>	<i>109</i>
<i>Graf 17: Normálové napětí při DZS21 na 1A-5B .....</i>	<i>110</i>
<i>Graf 18: Normálové napětí při DZS21 na 6A-10B .....</i>	<i>110</i>
<i>Graf 19: Normálové napětí při DZS14 na 1A-5B .....</i>	<i>111</i>
<i>Graf 20: Normálové napětí při DZS14 na 6A-10B .....</i>	<i>111</i>
<i>Graf 21: Normálové napětí při DZS23 na 1A-5B .....</i>	<i>112</i>
<i>Graf 22: Normálové napětí při DZS23 na 6A-10B .....</i>	<i>112</i>
<i>Graf 23: Normálové napětí při DZS15 na 1A-5B .....</i>	<i>113</i>
<i>Graf 24: Normálové napětí při DZS15 na 6A-10B .....</i>	<i>113</i>
<i>Graf 25: Normálové napětí při DZS20 na 1A-5B.....</i>	<i>114</i>
<i>Graf 26: Normálové napětí při DZS20 na 6A-10B.....</i>	<i>114</i>
<i>Graf 27: Normálové napětí při DZS19 na 1A-5B .....</i>	<i>115</i>
<i>Graf 28: Normálové napětí při DZS19 na 6A-10B .....</i>	<i>115</i>
<i>Graf 29: Normálové napětí při DZS16 na 1A-5B.....</i>	<i>116</i>
<i>Graf 30: Normálové napětí při DZS16 na 6A-10B .....</i>	<i>116</i>



<i>Graf 31: Normálové napětí při DZS17 na 1A-5B .....</i>	<i>117</i>
<i>Graf 32: Normálové napětí při DZS17 na 6A-10B .....</i>	<i>117</i>
<i>Graf 33: Normálové napětí při DZS18 na 1A-5B.....</i>	<i>118</i>
<i>Graf 34: Normálové napětí při DZS18 na 6A-10B.....</i>	<i>118</i>
<i>Graf 35: Průměrný rozkmit napětí na 21-24.....</i>	<i>120</i>
<i>Graf 36: Normálové napětí při DZS17 na 21-24 .....</i>	<i>120</i>
<i>Graf 37: SZS3 – napětí na tenzometrech 1A-10B.....</i>	<i>125</i>
<i>Graf 38: SZS1+SZS4 – napětí na tenzometrech 1A-10B.....</i>	<i>126</i>
<i>Graf 39: SZS6 – rozkmit napětí na tenzometrech 1A-10B .....</i>	<i>126</i>
<i>Graf 40: DZZ – 70 km/h – rozkmit napětí na tenzometrech 1A-10B.....</i>	<i>126</i>
<i>Graf 41: DZZ – 100 km/h – rozkmit napětí na tenzometrech 1A-10B .....</i>	<i>127</i>
<i>Graf 42: DZZ – 100 km/h – napětí na tenzometrech 1A-10B v čase <math>t_1</math>.....</i>	<i>127</i>
<i>Graf 43: DZZ – 100 km/h – napětí na tenzometrech 1A-10B v čase <math>t_2</math>.....</i>	<i>127</i>
<i>Graf 44: Závislost síly a deformace ve vodorovných směrech.....</i>	<i>133</i>
<i>Graf 45: Závislost síly a deformace ve svislém směru .....</i>	<i>133</i>
<i>Graf 46: ZS1 – Porovnání rozložení napětí – tenzometry 1a-10a .....</i>	<i>147</i>
<i>Graf 47: ZS1 – Porovnání rozložení napětí – tenzometry 1b-10b .....</i>	<i>147</i>
<i>Graf 48: ZS1 – Porovnání rozložení hot-spot napětí – tenzometry 1-10 .....</i>	<i>148</i>
<i>Graf 49: ZS6 (DZZ 20 km/h) - Porovnání rozložení napětí – tenzometry 1a-10a .....</i>	<i>149</i>
<i>Graf 50: ZS6 (DZZ 20 km/h) - Porovnání rozložení napětí – tenzometry 1b-10b .....</i>	<i>149</i>
<i>Graf 51: ZS14 (DZZ 100 km/h) - Porovnání rozložení napětí – tenzometry 1a-10a .....</i>	<i>149</i>
<i>Graf 52: ZS14 (DZZ 100 km/h) - Porovnání rozložení napětí – tenzometry 1b-10b .....</i>	<i>150</i>
<i>Graf 53: ZS6 – Porovnání rozložení hot-spot napětí – tenzometry 1-10.....</i>	<i>151</i>
<i>Graf 54: ZS14 – Porovnání rozložení hot-spot napětí – tenzometry 1-10 .....</i>	<i>151</i>
<i>Graf 55: Příčinková čára momentu na závěsu T6 s vyznačením poloh zatížení.</i>	<i>153</i>
<i>Graf 56: Příčinková čára momentu na trámu u T9 s vyznačením poloh zatížení .....</i>	<i>154</i>