

# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHINCKÉ V PRAZE

Fakulta Stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí



## Mezní životnost mostu pod Vyšehradem

The ultimate life-time of the Vyšehrad bridge

**Jean Philippe Cam**

Studijní Program:

Stavební inženýrství

Studijní obor:

Konstrukce a dopravní stavby

Vedoucí práce

doc. Ing. Pavel Ryjáček





ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Cam	Jméno: Jean Philippe Cam	Osobní číslo: 437027
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: Mezní životnost mostu pod Vyšehradem	
Název diplomové práce anglicky: The ultimate life-time of the Vyšehrad bridge	
Pokyny pro vypracování: Numerická analýza ve 3D kritických detailů železničního mostu, analýza kumulace poškození vlivem únavy, analýza redistribuce namáhání až do dosažení kolapsu konstrukce. Zhodnocení 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: 24.9.2021	Termín odevzdání diplomové práce: 2.1.2022 <small>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</small>
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“.*

24. září 2021	
Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Pavla Ryjáčka, Ph.D. Veškeré literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal, jsou uvedeny v seznamu literatury dle ČSN ISO 690

V Praze dne 2.1.2021

.....  
Jean Philippe Cam

## Poděkování

Je remercie mon grand-père Jean et ma grand-mère Geneviève, pour m'avoir donné cette opportunité de faire mes études et de réaliser mon potentiel.

Děkuji mé babičce Evě, která tu pro mě byla v nejtěžších chvílkách mého života.

Děkuji doc. Ing. Pavlu Ryjáčkovi, Ph.D. za odborné vedení diplomové práce, trpělivý přístup a důležité rady při konzultacích této práce.

Děkuji Ing. Vojtěchovi Stančíkovi za rady pro modelování v programu Dlubal RFEM.

I thank my good friend Nina, who has always been here for me in the hardest of times, and always motivated me to work to my best abilities.

Děkuji mému kamarádu Jonášovi, který mě pomáhal svými znalosti češtiny při tvorbě této práce, která je psaná mém druhém jazyce.

## **Abstrakt**

Cílem této diplomové práce je stanovení zbytkové životnosti mostu pod Vyšehradem použitím nelineárního fázovaného výpočtu s postupnou eliminací únavově porušených prvků do kolapsu konstrukce, s cílem zjistit zbytkovou životnost konstrukce z hlediska únavy. Pro dosažení tohoto cíle je vypracován 3D výpočetní model konstrukce, a následně model použit pro výpočet rozkmitů napětí, které jsou použity pro stanovení času a místa porušení. Výpočet je opakován na postupně porušovaném modelu do kolapsu konstrukce, a tím je vypočítána mezní únavová životnost konstrukce.

## **Klíčová slova:**

železniční most, ocelový most, ocelový železniční most, příhradová konstrukce, příhradový most, Most pod Vyšehradem, únavy, využití únavy, kumulace využití únavy, nelineární kumulace únavy, nelineární výpočet únavy, fázovaný výpočet únavy, poškození, únavové poškození, numerický model, fázovaný numerický model, prostorový model

## **Abstract**

The goal of this master's thesis is to determine the residual fatigue durability of the bridge under Vyšehrad in Prague using non-linear phase analysis with elimination of fatigue damaged components until collapse of the structure. To reach this aim, a 3D calculation model is created and used to calculate stress spectra, which are used to calculate the point and time of fatigue failure. The calculation is then repeated with a progressively damaged model until collapse of the structure.

## **Keywords:**

railway bridge, steel bridge, steel railway bridge, truss structure, truss bridge, bridge under Vyšehrad, bridge below Vyšehrad, fatigue, usage of fatigue, cumulation of usage of fatigue, nonlinear cumulation of fatigue, nonlinear calculation of fatigue, phased calculation of fatigue, damage, fatigue damaged, numeric mode, phased numeric model, three dimensional model

---

# OBSAH

---

<b>1. Motivace</b> .....	<b>12</b>
<b>2. Historie mostu:</b> .....	<b>13</b>
2.1. Pražský dopravní uzel: .....	13
2.2. Druhý Železniční most pod Vyšehradem: .....	14
2.3. Údržba mostu a úpravy .....	15
<b>3. Popis konstrukce mostu:</b> .....	<b>16</b>
3.1. Úvodní popis: .....	16
3.2. Popis mostovky .....	18
3.2.a. Podélníky .....	18
3.2.b. Příčníky .....	18
3.2.c. Ztužení .....	18
3.3. Popis příhrady .....	19
3.3.a. Dolní pás: .....	19
3.3.b. Horní pás: .....	19
3.3.c. Svislice .....	20
3.3.d. Diagonály .....	21
3.4. Popis horního ztužení: .....	22
3.4.a. Původní horní ztužení .....	22
3.4.b. Horní ztužení po rekonstrukci .....	23
<b>4. Koroze nosné konstrukce</b> .....	<b>24</b>
<b>5. Problematika:</b> .....	<b>26</b>
<b>6. Cíl Práce</b> .....	<b>27</b>
<b>7. Rozbor zatížení</b> .....	<b>28</b>
7.1. Zdroje .....	28
7.2. Stálé zatížení .....	28
7.2.a. Stálé zatížený prvků modelu: .....	28
7.2.b. Ostatní stálé zatížení: .....	29
7.3. Proměnné zatížení .....	32
7.3.a. Dynamický součinitel .....	32
7.3.b. Soupravy zatížení .....	32
7.4. Intenzita dopravy .....	36
Počet průjezdů charakteristických skupin vlaků .....	37
<b>8. Výpočetní modely:</b> .....	<b>38</b>
8.1. Úvod: .....	38
8.2. Vstupní informace pro modely .....	39



8.3. Seznam modelů:	39
8.3.a. Pomocné modely	39
8.3.b. Lineární výpočetní modely:	39
8.4. Materiálové charakteristiky	40
8.4.a. Plávková ocel	40
8.4.b. Ocel S235	40
8.4.c. Ostatní materiály	40
8.5. Popis	42
8.5.a. Popis hlavního modelu:	42
8.5.b. Obrázky modelu	43
8.5.c. Příhradový nosník	48
8.5.d. Mostovka:	48
8.5.e. Originální horní ztužení	50
8.5.f. Nové horní ztužení	51
8.5.g. Boční lávky	51
8.6. tuhosti Přípojů:	52
8.6.a. Zdroje pro odhad tuhosti spojů:	52
8.6.b. Postup přiřazení tuhosti spojů.	52
8.6.c. Přípoje prvků mostovky	54
8.6.d. Přípoje prvků příhradového nosníku	55
8.6.e. Ostatní přípoje	58
8.7. Zohlednění členěných prutů	59
8.7.a. Postup zohlednění členěných prutů	59
8.7.b. Zohlednění členěných svislic	59
8.7.c. Zohlednění členěných diagonál	60
8.7.d. Zohlednění členěného dolního pásu	60
8.8. Podepření modelu	61
<b>9. Validace modelu</b>	<b>62</b>
9.1. Úvod	62
9.1.a. Metoda	62
9.1.b. Vytvořené modely	62
9.1. výběr varianty podepření	63
9.1.a. Porovnání vlastních frekvencí validačních modelů:	63
9.1.b. Porovnání napětí validačních modelů	64
9.1.c. Výběr varianty	64
9.1. Porovnání dynamického chování	65
9.1.a. Úvod:	65
9.1.b. Vlastní tvary	65
9.1.c. Závěr porovnání	65
9.1.d. Grafické porovnání vlastních tvarů	66

<b>10. Metodika výpočtu.....</b>	<b>71</b>
10.1. Struktura výpočtu.....	71
10.2. výpočet vnitřních sil programem dlubal rfem.....	72
10.2.a. Zatěžovací stavy a kombinace napětí .....	72
10.2.b. Nastavení výpočtu .....	72
10.2.c. Export do programu Microsoft Excel .....	72
10.3. výpočet napětí.....	73
10.3.a. Průřezové charakteristiky nekorodovaných průřezů.....	73
10.3.b. Průřezové charakteristiky zkorodovaných průřezů .....	73
10.3.c. Metoda výpočtu napětí .....	73
10.4. Zohlednění koroze .....	74
10.4.a. Součinitel koroze.....	74
10.4.a. Dopad koroze na kategorii detailu.....	75
10.4.b. Dopad koroze na napětí.....	76
10.4.c. Stanovení funkce $f_{Skoroz}$ pro interpolaci vlivu koroze.....	76
10.5. Výpočet počtu cyklů .....	77
10.5.a. Intenzita dopravy .....	77
10.5.b. Poměr charakteristických vlaků .....	77
10.5.c. Výpočet počtu cyklů .....	77
10.6. zpracování napětí a výpočet rozkmitů .....	78
10.6.a. Interpolace napětí.....	78
10.6.b. Výpočet rozkmitu napětí.....	78
10.7. výpočet mezního počtu cyklů napětí.....	78
10.8. Výpočet únavové životnosti.....	79
10.8.a. Metoda kumulace únavového poškození.....	79
10.8.b. Dílčí výpočet pro období .....	79
10.8.c. Finální výpočet.....	80
10.9. Vytvoření následujících fází.....	80
10.9.a. Opakování procesu.....	80
10.9.b. Podmínka zastavení práce .....	80
<b>11. Porovnání výsledků .....</b>	<b>81</b>
11.1. Motivace .....	81
11.1. Změněné vstupní údaje .....	81
11.1.a. Vytvořené výpočty .....	81
11.1.b. Výpočet pouze s dílčím součinitelem kategorie detailu .....	81
11.1.c. Výpočet s maximální korozí a dílčím součinitelem .....	81
11.2. Výsledek porovnávacího výpočtu .....	82
11.2.a. Výsledek výpočtu s návrhovým součinitelem .....	82
11.2.b. Výsledek výpočtu s konstantní korozí a součinitelem .....	83
11.2.c. Porovnání s přepočtem zatížitelnosti a přechodnosti.....	84

<b>12. Výsledky výpočtu</b> .....	<b>86</b>
12.1. POPIS fází porušení.....	86
12.1.a. Fáze 3 a 4 – porušení 2xD7.....	86
12.1.b. Fáze 5 a 6 – porušení 4xD7.....	86
12.1.c. Fáze 7+8 – Porušení 4xD7+2xD6.....	86
12.1.d. Fáze 9 – Porušení 4xD7+2xD6+U6.....	87
12.2. Tabulkové shrnutí výsledků.....	87
12.2.a. Čas porušení prvků.....	87
12.2.b. Maximální napětí ve fázích.....	87
12.2.c. Minimální napětí ve fázích.....	87
12.3. Využití prutů na konci fází.....	88
12.3.a. Fáze 1+2.....	88
12.3.b. Fáze 3.....	88
12.3.c. Fáze 4.....	89
12.3.d. Fáze 5.....	89
12.3.e. Fáze 6.....	90
12.3.f. Fáze 7.....	90
12.3.g. Fáze 8.....	91
12.4. Vybrané vnitřní síly fází.....	92
12.4.a. Fáze 1 – 1900-197 – Originální konstrukce – KV10 – NEX.....	92
12.4.b. Fáze 2 – Konstrukce pro rekonstrukci – KV10 – NEX.....	94
12.4.c. Fáze 4 – 2x Porušení D7 – KV10 – NEX.....	96
12.4.d. Fáze 6 – 4x porušení D7 – Kombinace KV10 – NEX.....	98
12.4.e. Fáze 8 – 4x porušení D7 + 2x porušení D6 – KV10 – NEX.....	100
<b>13. Závěr</b> .....	<b>102</b>
<b>14. Seznamy:</b> .....	<b>104</b>
14.1. Seznam obrázků.....	104
14.2. seznam tabulek.....	106
14.3. Seznam použitých norem.....	106
14.4. Seznam použitých zdrojů.....	107

---

## 1. MOTIVACE

---

Bezejmenný most pod Vyšehradem situovaný v km 3.706, a postaven v roce 1900, se během své stovacetileté existence stal jednou z pražských dominant. Most je oblíben mnoha Pražany a byl vyhlášen v roce 2004 kulturní nemovitou památkou (1).

Tato kulturní památka je ale ve špatném stavu. Kvůli dlouhodobě zanedbané údržbě je na mnoha místech most silně zkorodovaný. Dlouhodobě také přenáší dopravní intenzity mnohonásobně větší, než bylo uvažováno při návrhu. Důsledkem toho je vysoká míra únavového využití konstrukce (2).

Dle přepočtu zatížitelnosti a přechodnosti zpracovaného v roce 2020 společností SUDOP PRAHA a.s., je zbytková životnost konstrukce pouze 5 let. Je tedy nutné konstrukci opravit nebo vyměnit (2). Vzhledem k významu trati pro osobní dopravu je ale potenciální oprava mostu velice komplikovaná záležitost vzhledem k nutnosti zjednotnění provozu na provizorním mostě na dobu několika let.

Rozhodnutí Magistrátu hlavního města Prahy týkající se budoucnosti mostu není příliš konzistentní. Aktuální vedení města nepočítá s výměnou mostu, ale přeje si most opravit (3), což je v rozporu s požadavky vlastníka mostu SŽ. S.o.. S touto nejistou budoucností je potřeba se zamyslet, jaká bude budoucnost mostu v případě, kdy nebudou podniknuty žádné kroky pro jeho opravu.

Tato práce bude tedy počítat jaká je pravděpodobná budoucnost mostu za předpokladu, že nebude provedena oprava mostu. Vzhledem k tomu najít nejvíce pravděpodobnou budoucnost nebudou použity návrhové postupy zaručující odpovídající míru bezpečnosti a spolehlivosti, ale hodnoty průměrné. Současně záměrem práce je zaměřit se na fatální poškození hlavního nosníku, proto nejsou hodnoceny podélníky, kde se již nyní únavové poruchy nacházejí, předpokládá se, že dílčí opravy přímo na mostovce prováděny budou (stejně tak, jako nedávná výměna mostnic).

Bude také počítáno s nárůstem koroze na mostní konstrukci, s cílem simulovat neopravitelnou štěrbinovou korozi na nosné konstrukci.

---

## 2. HISTORIE MOSTU:

---

### 2.1. PRAŽSKÝ DOPRAVNÍ UZEL:

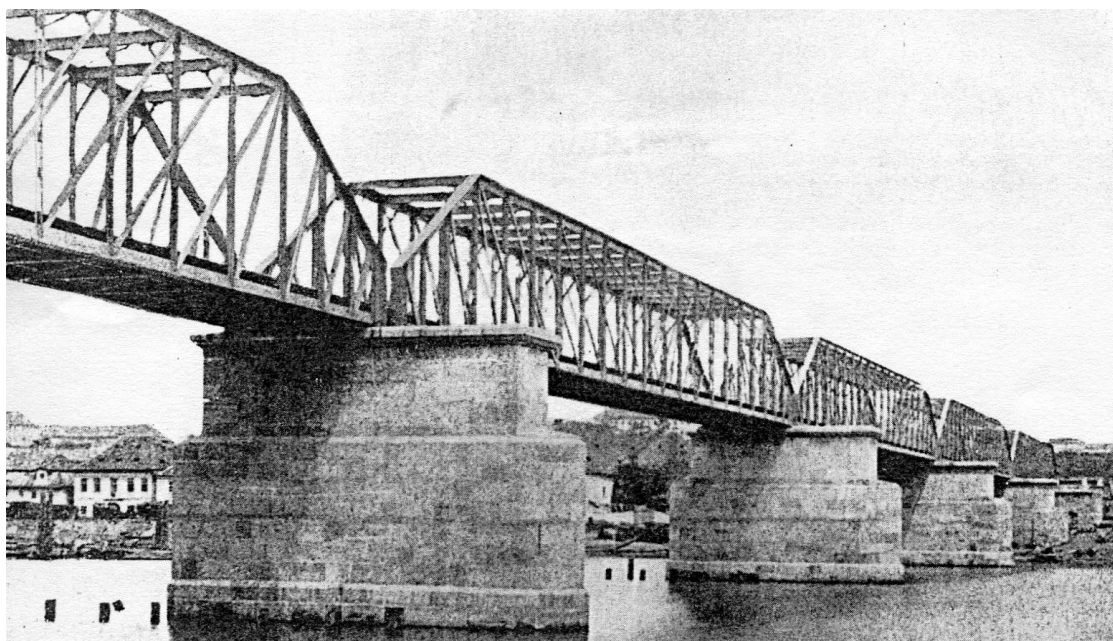
Kolem poloviny 19. století byl postaven velký počet železničních tratí spojující nejdůležitější města Rakousko-Uherské říše. Součástí těchto staveb byla trasa mezi *Praha Nádraží státní dráhy* (dnes Masarykovo nádraží) - Olomouc, která byla napojena na *Severní Dráhu císaře Františka*, vedoucí do hlavního města Vídeň. Trať byla vybudovaná společně s *Nádražím státní dráhy* v roce 1845 soukromou společností *Severní Státní Dráhy*.

Další trať vybudovaná v této době byla trať vedoucí z Bavorska přes Plzeň, a končící v nově vybudované železniční stanici s jednoduchým názvem Praha (dnes Praha-Smíchov). Trať společně se stanicí byly vybudovány v roce 1862 soukromou společností *Česká západní dráha*.

Veškeré tratě vedoucí do Prahy byly vybudovány soukromými firmami a končily v konečných stanicích bez možnosti projezdu přes město. Cestující jedoucí přes Prahu museli vystoupit z vlaku a dostavit se na další nádraží, kde teprve mohli nastoupit do navazujícího spoje. Situace byla ještě horší pro nákladní dopravu, kde se veškerý náklad musel vyložit, městem dopravit na druhé nádraží, a znovu naložit.

Pro vyřešení tohoto problému bylo rozhodnuto vybudovat *Pražskou Spojovací Dráhu*, vedoucí mezi tehdejšími nádražím *Praha* (dnes Praha-Smíchov) a tehdejšími *Nádraží císaře Josefa* (dnes Hlavní nádraží). Jako součást trati byl postaven první Vyšehradský tunel, a předchůdce mostu pod Vyšehradem (4).

Původní most byl jednokolejný příhradový most s dolní mostovkou a přímými pásy příhrady, s pěti poli délky 56.9m, a byl postaven ze svárkové oceli. Most byl zhotoven v roce 1872 Harkortovou mostovnou v Duisburgu.



Obrázek 1: fotografie předchůdce mostu, 19 století

## 2.2. DRUHÝ ŽELEZNIČNÍ MOST POD VYŠEHRADEM:

Ke konci 19. století bylo patrné, že původní most pod Vyšehradem nebyl vyhovující pro tehdejší dopravní situaci, bylo proto rozhodnuto nahradit most novým dvoukolejným mostem. Nový most byl navržen jako dvoukolejný příhradový most s parabolickým horním pásem a s třemi poli délky 72 m. Most byl postaven v letech 1900-1901.

V korytě řeky byly postaveny nové pilíře, a nosná konstrukce mostu byla postavena na dřevěné konstrukci vedle původního mostu. Během stavby nebyla zastavena říční doprava. Most byl vyměněn během dvoudenní výluky příčným posunem.



*Obrázek 2: Výměna Železničního mostu v roce 1901 (5)*



*Obrázek 3: Železniční most v roce 1925 (6)*

## 2.3. ÚDRŽBA MOSTU A ÚPRAVY.

Během doby provozu mostu byla údržba mostu zanedbána, došlo ale k úpravám, modernizacím, a rekonstrukcím. V roce 1928 byl most elektrifikován v rámci elektrizace pražských spojovacích tratí s napájecí soustavou 1500 Vss. V roce 1962 došlo k přepnutí na napětí 3 kVss.

Kolem roku 1969 došlo ke kompletní výměně horního pásu mostu. Původní pás, který obsahoval parabolický vjezdní portál a subtilní příhradové příčnický, byl odstraněn a vyměněn za svařenou konstrukci. Nová konstrukce byla tvořena z poměrně masivních svařovaných průřezů, které byly samonosné, bez potřeby příhrady. Vjezdní portál byl zvednut nad koncem svislice a byl spojen s konstrukcí použitím složitého svařence. Důsledkem výměny je zvětšení maximální průjezdné výšky vlaku a jednodušší podmínky pro návrh a instalaci trakčního vedení.



*Obrázek 4: Nová podoba vjezdového portálu (7)*

V roce 1987 došlo k úpravě mostovky, byly zesíleny podélníky, přidáno ztužení podélníku, a navrženo brzdné ztužidlo.

V roce 2004 byl most vyhlášen kulturní nemovitou památkou (1).

### 3. POPIS KONSTRUKCE MOSTU:

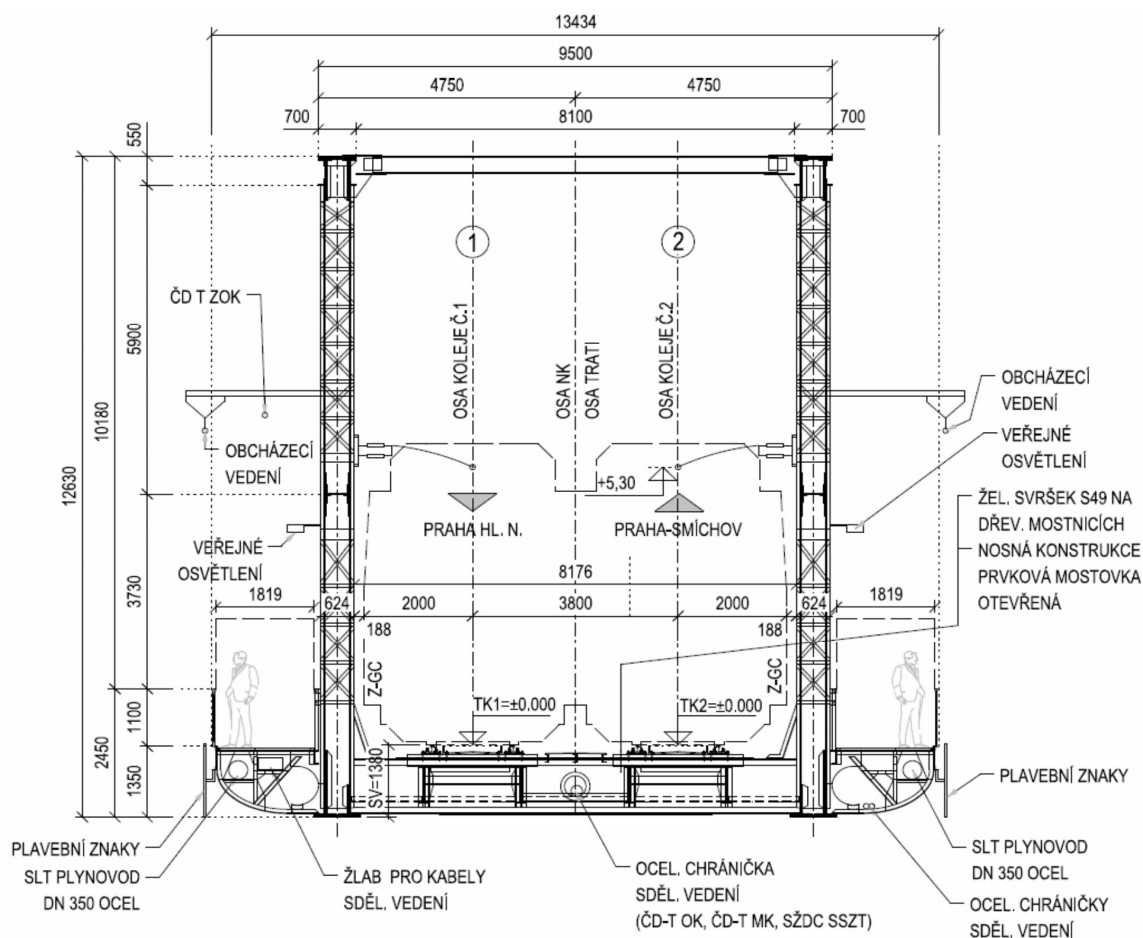
#### 3.1. ÚVODNÍ POPIS:

Most přemostňuje řeku Vltava pomocí tří jednopolových nosných konstrukcí uložených na kamenných pilířích. Most také obsahuje čtyři menší pole na výtoňské straně která nebudou předmětem této práce.

Nosné konstrukce mostu jsou navrženy jako příhradové s dolní mostovkou a s polygonálním horním pásem, s uzly tohoto polygonu ležící v parabolě. Rozpětí nosných konstrukcí činí 71,72 m a jejich celková délka s přesahy činí 72,480 m. Most byl navržen se snahou minimalizovat hmotnost ocele z ekonomických důvodů. Tato snaha použít co nejméně materiálu vysvětluje velký počet členěných prvků a ostatních subtilních detailů.

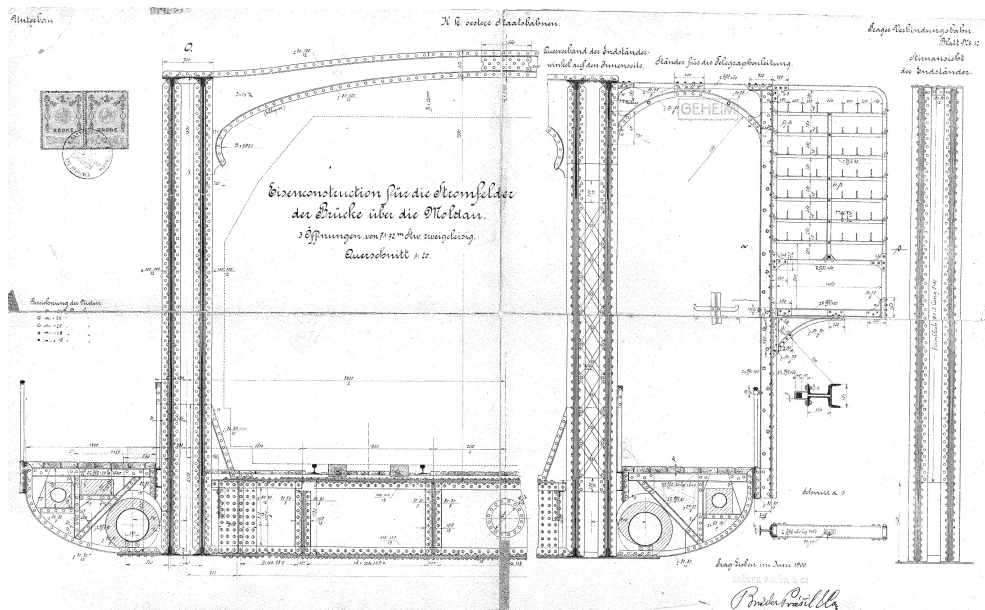
Most je dvoukolejový s dolní prvkovou mostovkou tvořenou příčnicí a podélníky, které jsou koncipovány jako pružně vetknutý nosník podepřen oboustranně příčnicí. Mostovka je oboustranně podepřena příhradovými konstrukcemi s osovou vzdáleností 8,80 m.

Příhradová konstrukce je symetrická s osou symetrie uprostřed pole. Každá strana obsahuje 8 sdužených polí délek 3,46+4,00+4,40+5x4,80 m. Diagonály příhrady s výjimkou diagonály D1 jsou vedeny přes dvě sdužená pole a procházejí svislicí, se kterou jsou spojeny pružným nýtovým spojem.

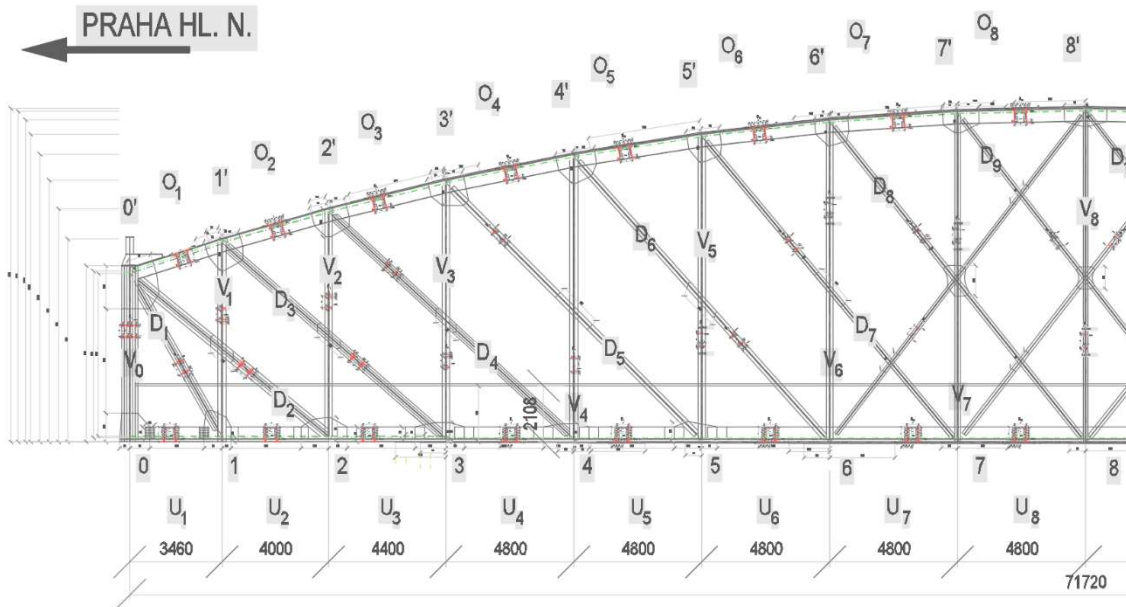


Obrázek 5: Příčný řez ve středu rozpětí v moderní podobě (2)

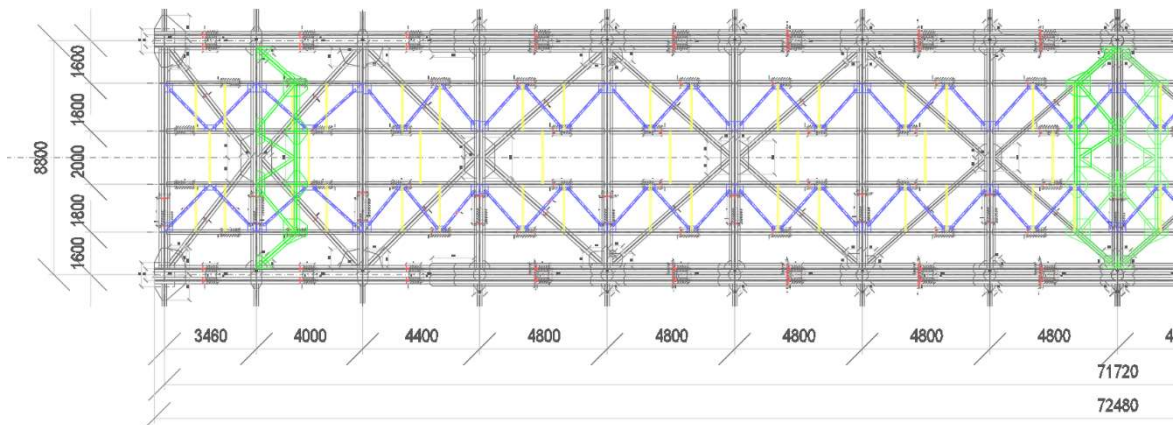




Obrázek 6: Příčný řez originálního vjezdového portálu (8)



Obrázek 7: Podélný řez (2)



Obrázek 8: Půdorys mostovky (2)

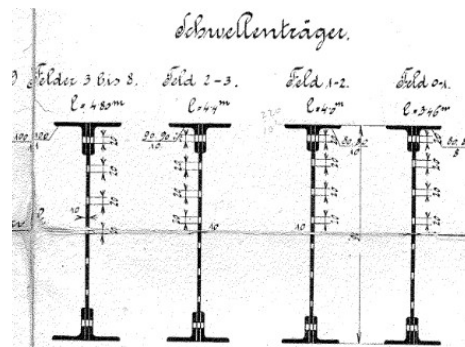
## 3.2. POPIS MOSTOVKY

### 3.2.a. Podélníky

Most obsahuje 4 různé průřezy podélníků. Podélníky mostovky jsou I profily tvořeny plechovou stojinou a pásnicí tvořenou úhelníky.

Během rekonstrukce v roce 1987 byly podélníky zesíleny a byly přidány přídatné pásnice.

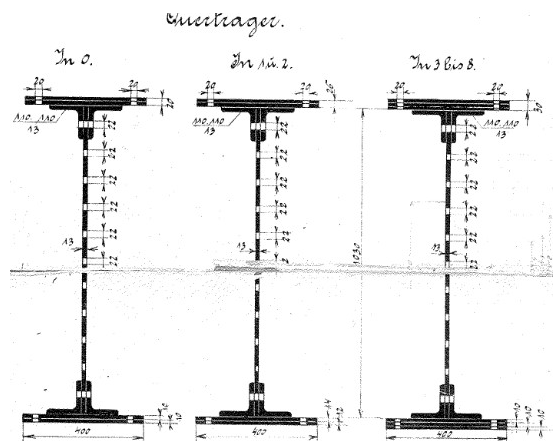
Podélníky jsou navrženy o délce jednoho sduženého pole a jsou oboustranně podepřeny příčníky použitím nýtového spoje.



Obrázek 9: Průřezy podélníků (8)

### 3.2.b. Příčníky

Most obsahuje 3 různé průřezy příčníků. Příčníky jsou I profily tvořeny plechovou stojinou připojenou k pásnici tvořené proměnným počtem plechů použitím krčného úhelníku. Počet plechů pásnice je proměnný po délce jednotného příčníku, s největším počtem plechů uprostřed mostovky.



Obrázek 10: Průřezy příčníků (8)

### 3.2.c. Ztužení

Mostovka obsahuje tři různé typy ztužení:

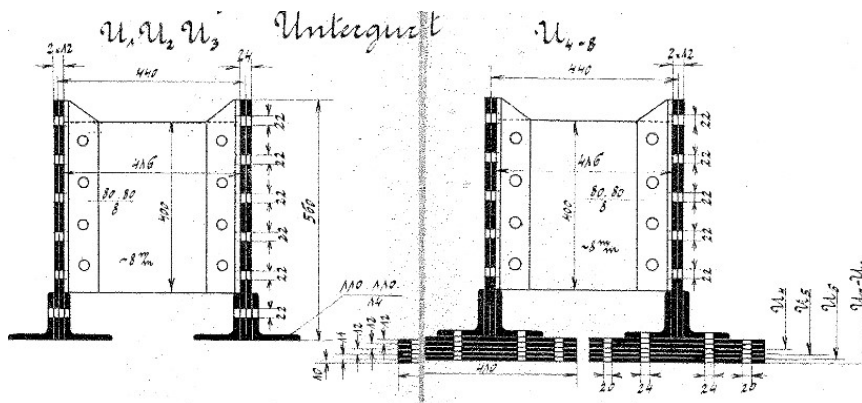
- Podélné mostovkové ztužení  
Toto ztužení je součástí mostu od jeho výstavby. Je tvořeno dvojicí úhelníků vedených příhradově tvarem  $\langle \rangle \langle \rangle \langle \rangle$
- Brzdné ztužení: toto ztužení bylo přidáno během rekonstrukce v roce 1987. Brzdné ztužení bylo přidáno uprostřed nosné konstrukce a také oboustranně v druhém sduženém poli.
- Podélníkové ztužení: toto ztužení bylo přidáno během rekonstrukce v roce 1987. Ztužení je tvořeno z úhelníků uložených diagonálně mezi podélníky podpírajícími jednu kolej, a U profilem uloženo příčně mezi podélníky.

### 3.3. POPIS PŘÍHRADY

#### 3.3.a. Dolní pás:

Dolní pás je spojitý členěný prut tvořen dvěma T-profilu. T-profil obsahuje stojinu výšky 560 mm tvořenou dvěma plechy tloušťky 12 mm spojeny nýty. Na dolním konci stojiny jsou nýtovým spojem připojeny 2 profily L110x100x14 tvořící pásnici. T průřezy jsou na sobě napojeny pomocí plechů a L profilů. Napojení je vždy v místě napojení svislice a v polovině sruženého pole.

Na pásnici T profilu je nýtově připojen proměnný počet plechů délky 410 a tloušťek 10, 11 a 12 mm pro zesílení pásnice. Počet přidávaných plechů závisí na vzdálenosti od podpor, s největším počtem plechů ve středu rozpětí.

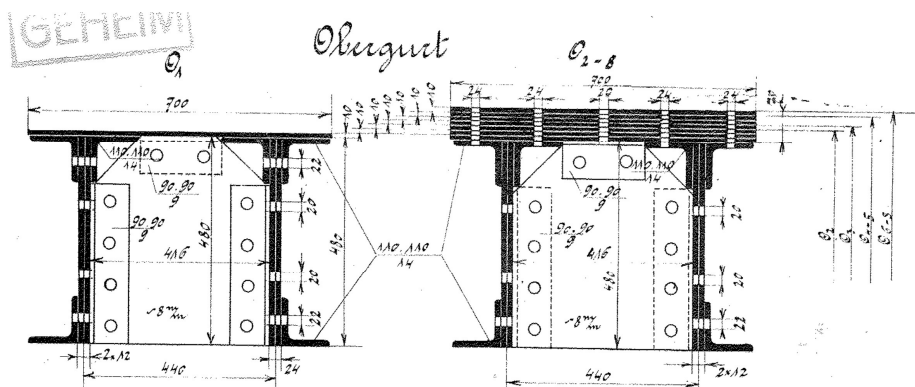


Obrázek 11: Průřez dolního pásu z originální dokumentace (8)

#### 3.3.b. Horní pás:

Horní pás je tvořen z prutů tvaru  $\Pi$ . Stojiny profilu jsou tvořeny dvěma plechy délky 480 mm a tloušťky 12 mm. Na dolním konci stojin je nýtovým spojem připojen jednotný L profil, a to na vnější straně průřezu. Na horním konci stojin jsou oboustranně připojeny Úhelníky. Veškeré L profily jsou průřezy L 110x110x14. Horní pás je v místě napojení se svislicí zesílen použitím plechu a Úhelníků.

Horní pánsnice profilu, napojena na horní Úhelníky, je tvořena proměnným počtem plechů tloušťky 10 mm. Počet přidávaných plechů závisí na vzdálenosti od podpor, s největším počtem plechů ve středu rozpětí.

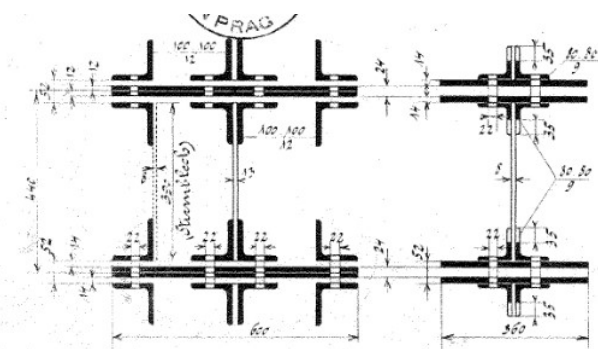


Obrázek 12: Průřez horního pásu z originální dokumentace (8)

### 3.3.c. Svislice

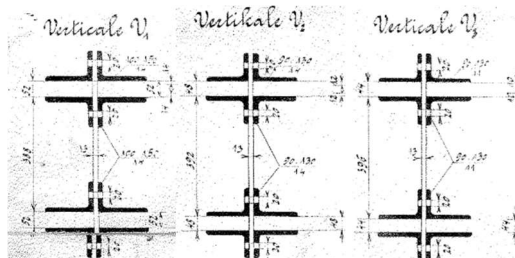
Příhrada obsahuje 9 různých průřezů svislic. Vzhledem k příčné a podélné symetrii nosné konstrukce odpovídá každý průřez čtyřem svislicím. Svislice s výjimkou diagonály V0 jsou koncipovány jako příhradový členěný průřez složený z dvou prutů propojeny plechy, s příhradou tvaru **xxx**. V místě napojení na dolní pás je příhrada nahrazena plnostěnným plechem a průřez je spojitý. Veškeré svislice jsou navrženy s volnými prostory pro průběžné diagonály a další přípoje.

Svislice V0 je složitý prvek tvořen z plechů a úhelníků. Průřez se dá popsat jako dvojice čtveřic úhelníků na sebe napojeny plechem s mezilehlou plechovou pásnicí oddělenou od úhelníků dvojicí volných prostorů sloužících k připojení ostatních prvků. Na obou koncích těchto pásnic se nachází další dvojice úhelníků. Celkem průřez obsahuje 4 plechy tloušťky 12 mm, jeden plech tloušťky 13 mm a 16 úhelníků L100x100x12



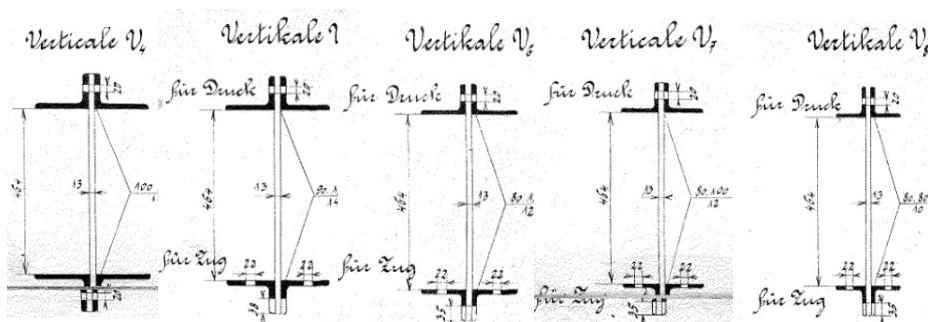
Obrázek 13: Průřez svislice V0 a diagonály D1 (8)

Svislice V1-V3 jsou navrženy jako dvojice čtveřic úhelníků. Mezi pásnicemi je vynechán volný prostor šířky 52 mm.



Obrázek 14: Průřezy svislic V1-V3 (8)

Svislice V4-V8 jsou navrženy jako členěný prut s dvěma dvojcemi úhelníků s pásnicí na vnitřní straně

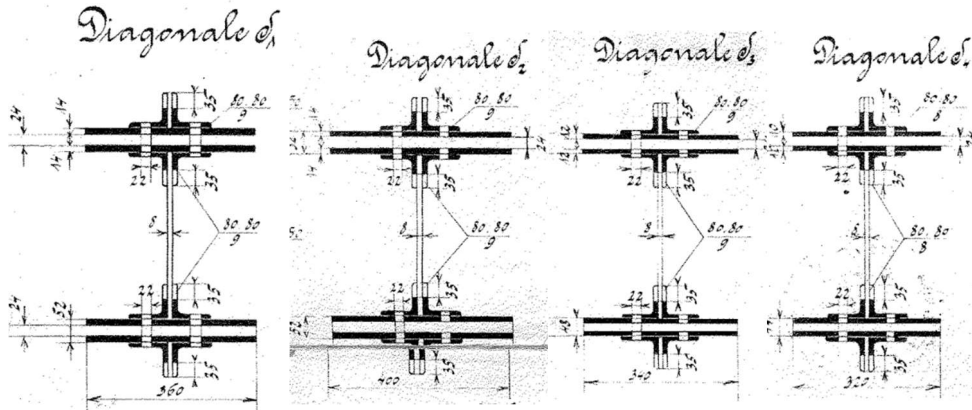


Obrázek 15: Průřezy svislic V4-V8 (8)

### 3.3.d. Diagonály

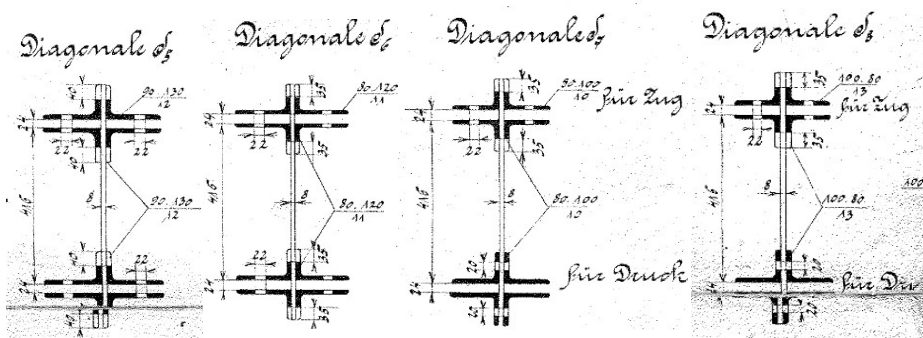
Příhrada obsahuje 10 různých průřezů diagonál. Vzhledem k příčné a podélné symetrii nosné konstrukce odpovídá každý průřez čtyřem diagonálám. Diagonály s výjimkou diagonály D1 jsou vedeny přes dvě pole a zhruba v polovině své délky procházejí svislicí, se kterou jsou spojeny pružným kloubem. Veškeré diagonály jsou navrženy jako příhradové členěné pruty s dvěma dílčími pruty, které jsou připojeny plechy v příhradě tvaru **v**v**v**.

Diagonály D1-D4 jsou navrženy jako členěný průřez tvořen dvojicí čtveřic úhelníků s pásnicí zesílenou dvěma plechy. Mezi plechy je vynechán volný prostor šířky 24 mm.



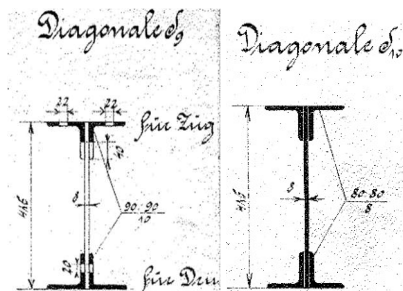
Obrázek 16: Průřezy diagonál D1-D3 (8)

Diagonály D5-D7 jsou navrženy jako dvojice čtveřic úhelníků. Mezi pásnicemi je vynechán volný prostor šířky 24 mm.



Obrázek 17: Průřezy diagonál D5-D8 (8)

Diagonály D8-D9 jsou navrženy jako členěný prut s dvěma dvojicemi úhelníků s pásnicí na vnější straně



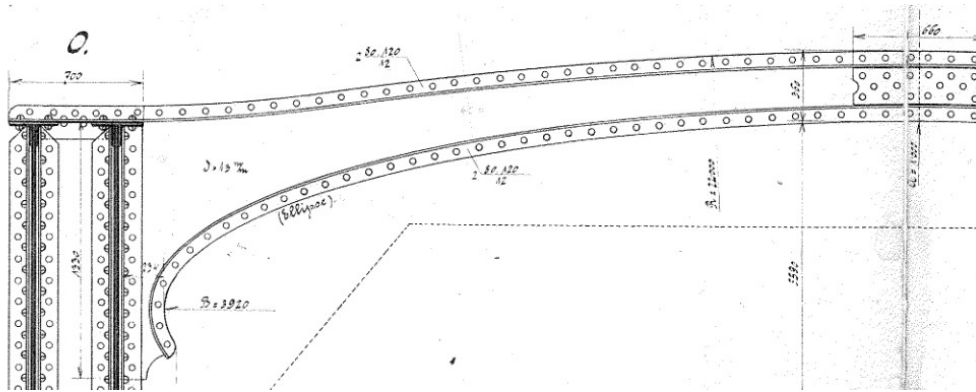
Obrázek 18: Průřezy diagonál D9-D10 (8)

### 3.4. POPIS HORNÍHO ZTUŽENÍ:

#### 3.4.a. Původní horní ztužení

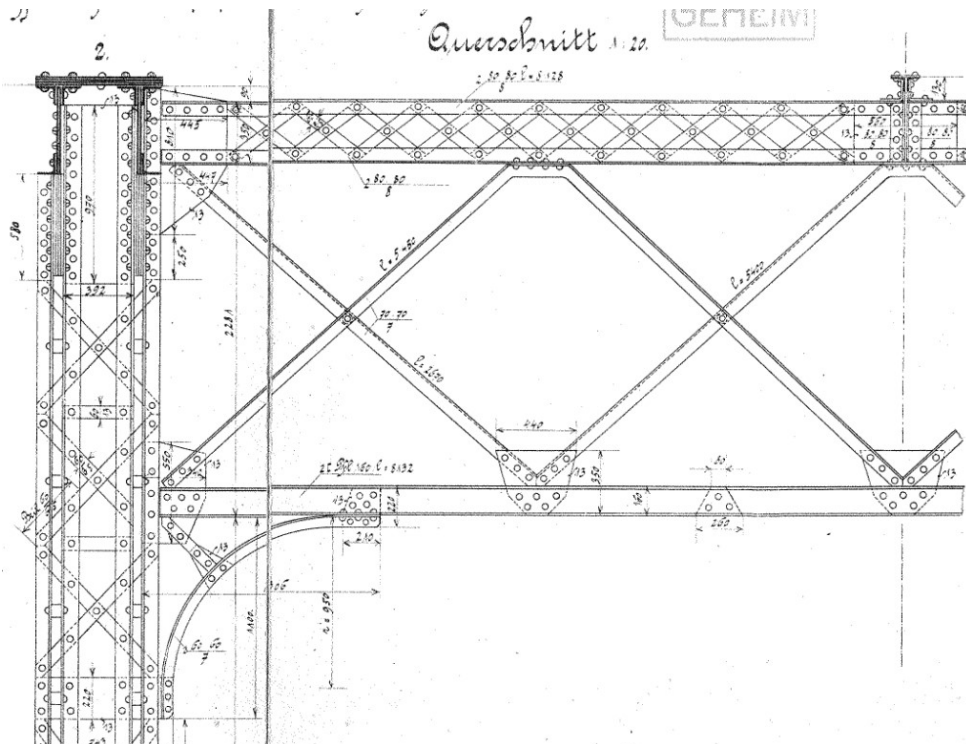
Původní horní ztužení je tvořeno příčníky které se nachází na všech svislicích, podélného nosníku uprostřed příčníků, a diagonálním ztužením.

Příčník vjezdového portálu je tvořen zakřiveným nosníkem s proměnnou tloušťkou. Tento nosník je tvořen ze svislého plechu na jehož koncích je nanýtovaná dvojice úhelníků.



Obrázek 19: Detail původního vjezdového portálu (8)

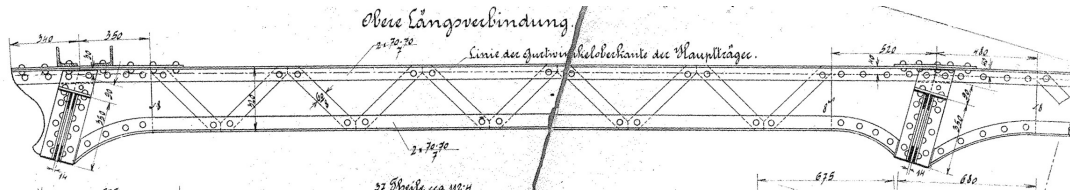
Původní horní příčník konstrukce s výjimkou vjezdového portálu je tvořen subtilní příhradovou konstrukcí. Horní pás je příhradový členěný prut s příhradou ve tvaru **xxx** tvořen z dvojic úhelníků. Dolní pás příhrady je tvořen dvojicí U profilů ve tvaru **II**. Diagonála příhrady tvaru **xxx** je tvořena úhelníky. Diagonály jsou v místě jejich protínání spojeny jednotlivým nýtem.



Obrázek 20: Detail původního horního příčníku č.2 (8)

Podélný nosník je příhradový členěný prut s příhradou ve tvaru **v** tvořen z dvojic úhelníků a veden od prvního příhradového příčnicku. Prut je polygonální, s uzly polygonu ležícími v parabolě.

Horní vodorovné ztužení je tvořeno dvojicí úhelníků ve tvaru **x**.



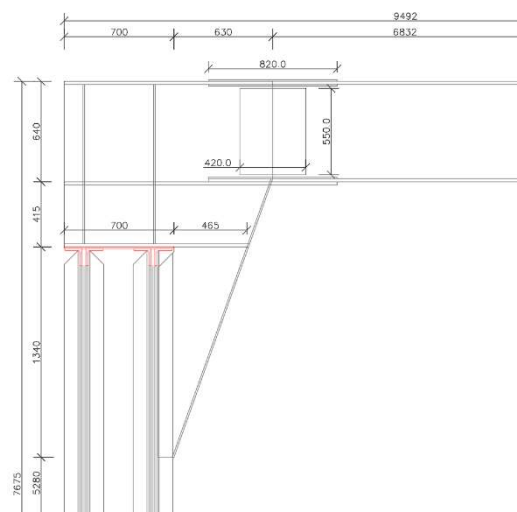
Obrázek 21: Detail podélného členěného prutu (2)

### 3.4.b. Horní ztužení po rekonstrukci

Během rekonstrukce byly vyměněny veškeré prvky horního ztužení. Důvod výměny bylo zvětšení volné výšky.

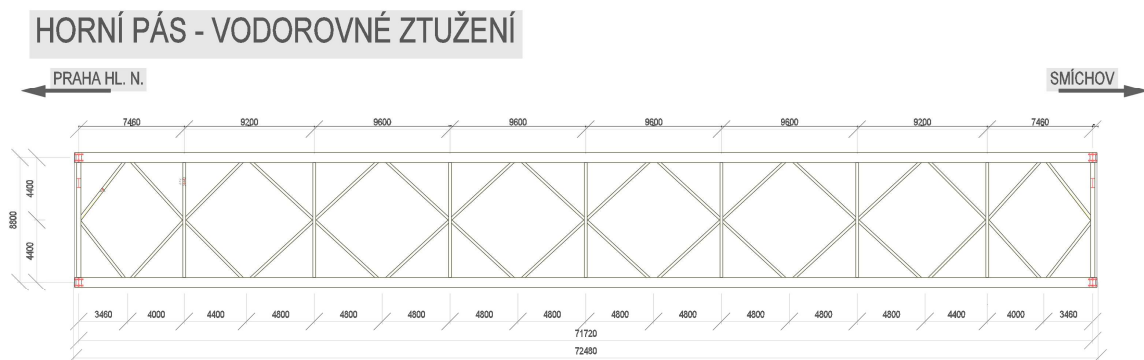
Nový portálový příčník je tvořen svařeným I profilem se stojinou rozměru 600x14 mm a pásnicemi rozměrů 300x20 mm. Příčník je umístěn 415 mm nad horním pásem. Příčník je připojen ke svislici a hornímu pásu použitím svařence přimontovaného ke konci svislice V0. Příčník je připojen ke svařenci použitím přeplátovaného šroubového spoje na stojině a pásnicích.

Ostatní horní příčníky, připojeny je svislicích 2,4 a 8 jsou svařené I profily se stojinami rozměrů 300x12 mm a pásnicemi rozměrů 200x14 mm. Horní pásnice je sklopena sklonem rovným průměru sklonů horního pásu na obou stranách příčnicků.



Obrázek 22: Detail nového vjezdového portálu (2)

Horní vodorovné ztužení je tvořeno dvojicí úhelníků L90x90x8 ve tvaru **x**.



Obrázek 23: Výkres nového horního ztužení (2)

## 4. KOROZE NOSNÉ KONSTRUKCE

Pro potřeby přepočtu zatížitelnosti a přechodnosti zpracovaného v roce 2020 společností SUDOP PRAHA a.s. byla provedena podrobná prohlídka mostu za účelem stanovit korozní oslabení prvků nosné konstrukce použitím tzv. karet prvků. Hodnoty koroze jsou uvedeny jako procentuální oslabení prvku (2).

PRVEK: **HORNÍ PÁS O1-O16**

STRANA: **L/P**

NK Č.: **1, 2, 3**

PŘÍHR.		0 - 1	NK	POZNÁMKY
O.1/O.16		1/0%	1/ 2/ 3	
O.2/O.15		1/0%	1/ 2/ 3	
O.3/O.14		1/0%	1/ 2/ 3	
O.4/O.13		1/0%	1/ 2/ 3	
O.5/O.12		1/0%	1/ 2/ 3	
O.6/O.11		1/0%	1/ 2/ 3	
O.7/O.10		1/0%	1/ 2/ 3	
O.8/O.9		1/0%	1/ 2/ 3	

Obrázek 24: Hodnoty koroze horního pásu (2)

PRVEK: **DOLNÍ PÁS U1-16**

STRANA: **L/P**

NK Č.: **1, 2, 3**

PŘÍHR.	0,5	0 - 1	NK	POZNÁMKY
U.1/U.16	1/20%, 2/5%		1_P	
U.2/U.15	1/25%, 2/6%		1_P	
U.3/U.14	1/45%, 2/34%, 3/12%		1_L	
U.4/U.13	1/50%, 2/33%, 3/7%		1_L	
U.5/U.12		1/36%, 2/27%, 3/5%	1_L	
U.6/U.11		1/43%, 2/22%, 3/4%	1_L	
U.7/U.10		1/36%, 2/29%, 3/4%	1_L	
U.8/U.9		1/29%, 2/17%, 3/3%	1_L	

Obrázek 25: Hodnoty koroze dolního pásu (2)



PRVEK: **DIAGONÁLY D1-D10 A Z6-Z15**

STRANA: **L/P**

NK Č.: **1, 2, 3**

PRŮHR.	0	NK	0.5	NK	1	NK	POZNÁMKY
D.1/Z.15	1/40%	1_L	1/20%	2_L			
D.2/Z.14	1/35%	1_L	1/25%	3_P			
D.3/Z.13	1/35%	2_P	1/25%	3_L			
D.4/Z.12	1/40%	2_L	1/30%	2_P			
D.5/Z.11	1/35%	3_P	1/20%	3_P			
D.6/Z.10	1/30%	3_P	1/15%	3_P			
D.7/Z.9	1/35%, 2/25%	3_P (1_P)	1/20%	3_P			
D.8/Z.8	1/20%	3_P	1/20%	1_P			
D.9/Z.7	1/20%	2_P	1/15%	3_P			
D.10/Z.6	1/20%	2_P	1/10%	1_P			

Obrázek 26: Hodnoty koroze diagonál (2)

PRVEK: **SVISLICE V0-V8 (V9 - V16)**

STRANA: **L/P**

NK Č.: **1, 2, 3**

PRŮHR.	0.1 - 0.5	NK	0,5 - 1	NK	POZNÁMKY
V.0/V.16	4/10%	1_P	1/0%	1/ 2/ 3	
V.1/V.15	1/10%	3_P	1/10%	3_P	
V.2/V.14	1/10%	2_P	1/10%, 2/5%	2_P	
V.3/V.13	1/10%	3_P	1/10%	3_P	
V.4/V.12	1/10%	1_P	1/15%	1_P	
V.5/V.11	1/10%	3_P	1/10%, 2/5%	3_P	
V.6/V.10	1/15%	1_P	1/20%	1_P	
V.7/V.9	1/15%	1_P	1/20%	1_P	
V.8	1/15%	1_P	1/20%	1_P	

Obrázek 27: Hodnoty koroze svislic (2)

---

## 5. PROBLEMATIKA:

---

Most je v dnešní době ve špatném technickém stavu. Zanedbané natírání ocelové konstrukce během doby minulého režimu, kombinované s tehdejší vysokou mírou siřičitanů v ovzduší v důsledku pálení uhlí bez použití filtrační technologie (9) způsobilo velkou míru koroze na mostní konstrukci. Koroze je obzvláště patrná na diagonálách a dolním pásu příhrady, což jsou kritická místa pro přenos zatížení.

Další problém je mnohem větší intenzita dopravy na mostě než bylo originálně předpokládáno. V roce 2009 projelo přes most 26.26 milionů tun železniční dopravy. Během doby minulého režimu projíždělo mostem obrovské množství nákladní dopravy, kulminující s 26.83 milionů tun v roce 1962, z toho 21.52 milionů tun nákladní dopravou. Pro porovnání, v roce 1915, tedy po obrovském skoku dopravy způsobeném první světovou válkou, projelo mostem 5.83 milionů tun dopravy (2).

Tato vysoká intenzita dopravy kombinovaná s korozí hlavních nosných prvků vzhledem k zanedbání údržby způsobila značné snížení životnosti konstrukce. Je tedy nutné konstrukci opravit nebo vyměnit. Obě varianty jsou ale problematické. Oprava mostu by znamenala zjednodušení významného dopravního uzlu na dobu několika let (2), a výměna by znamenala zničení populární pražské dominanty vyhlášenou kulturní nemovitou památkou.

Z otázky se také stalo politické téma. Již v roce 1999 bylo plánováno úsek upravit, s původním plánem most nahradit novým mostem se sdruženou tříkolejnou železniční a dvoupruhovou silniční dopravou. Tento plán byl díky popularitě mostu v roce 2004 zastaven vyhlášením mostu jako kulturní nemovitá památka (1).

V roce 2013 plánovala SŽDC ztrojkolejnit trať pomocí druhého mostu a postavit novou zastávku Praha Výtoň (10). Tento plán byl dále upraven a v roce 2015 se uvažovalo stávající most zbourat a místo něj postavit dva modernější mosty stejné geometrie, a na jednom postavit železniční zastávku (1). Po změně vedení magistrátu v 2018 byl ale plán odložen. V roce 2021 vyhlásila SŽDC soutěž pro architektonicko-konstrukční řešení železničního soumostí s požadavkem ztrojkolejnění tratě a postavení nové zastávky, ale bez požadavku výměny stávající konstrukce (3).

Je tedy zřejmé že most nebude v příštích letech zbourán, a přes jeho špatný technický stav bude muset dále čelit výraznému dopravnímu zatížení.

---

## 6. CÍL PRÁCE

---

Vzhledem k nejisté budoucnosti mostu a velké pravděpodobnosti jeho dalšího užívání je potřeba vědět, jak by taková budoucnost vypadala. Dle přepočtu zatížitelnosti a přechodnosti zpracovaného v roce 2020 společností SUDOP PRAHA a.s., je zbytková životnost konstrukce pouze 5 let. Tato hodnota zbytkové životnosti ale používá návrhové postupy, které dávají přednost bezpečnosti konstrukce, a tedy nepočítají se statisticky nejpravděpodobnějším vývojem.

Přepočet zatížitelnosti a přechodnosti také nepočítá s vícefázovou analýzou, ale pouze počítá životnost konstrukce do prvního porušení hlavního nosného prvku. Z konstrukce mostu je ale zřejmé, že v případě porušení některých prvků je pravděpodobně možná redistribuce sil, a tím pádem by bylo možné most používat dále.

Cílem této práce tedy bude zjistit kdy a v jakém pořadí budou nosníky konstrukce porušeny a jak se bude chovat nosná konstrukce mostu po únavovém porušení prvků. K dosažení tohoto cíle bude použit fázovaný výpočet únavové životnosti, ve kterém budou postupně porušeny prvky konstrukce v čase dosažení únavové životnosti.

K dosažení tohoto cíle bude počítána kumulace únavového poškození dle Palmgren-Minerovy hypotézy. Budou vypočteny vnitřní síly od vlastní tíhy konstrukce a od reálného dopravního zatížení vlakových souprav, a od nich vypočteny spektra rozkmitu napětí. Rozkmit napětí tvořen ostatním zatížením, jako například pěší doprava na lávkách, tepelné zatížení, nebo zatížení větrem, nebude brán v úvahu.

V této práci bude zohledněna časově proměnná složka koroze a její dopad na napětí, rozkmit napětí a kategorii detailu. Vzhledem k neopravitelné štěrbinové korozi na mostě bude předpoklad agresivnějšího nárustu koroze v budoucnosti. Tento předpoklad slouží k zajištění správnosti výpočtu v případě zrychlení vývoje koroze.

Tato práce je především brána jako analýza statisticky nejpravděpodobnějšího vývoje. Z tohoto důvodu nebudou používány návrhové postupy, ale bude výpočet proveden dle statisticky nejpravděpodobnějších čísel. Cílem toho je co nejpřesněji předpovědět budoucnost mostu. **Je potřeba ale brát v úvahu, že tato práce nezaručuje životnost konstrukce do vypočtené doby porušení.**

---

## 7. ROZBOR ZATÍŽENÍ

---

### 7.1. ZDROJE

Stálé zatížení mostu je dáno vlastní tíhou vymodelované konstrukce a ostatním stálém zatížení. Vlastní tíha vymodelovaných prvků je automaticky vypočítána programem Dlubal RFEM.

Pro ostatní stálé zatížení byly použity hodnoty zatížení uvažovány během statického přepočtu zatížitelnosti a přechodnosti od společnosti SUDOP PRAHA a.s. Pro některé zatížení byly změněny zatěžovací délky pro zohlednění přesahů nosné konstrukce za podpory. Některá zatížení byla vypočítána z výkresů použitých pro statický přepočet.

Veškeré informace o dopravním zatížení byly přebrány ze statického přepočtu zatížitelnosti a přechodnosti od společnosti SUDOP PRAHA a.s.. Intenzity dopravy byly stanoveny dle postupu popsaném v následující citaci technické zprávy:

*„Dopravní data byla dohledávána v historických dokumentech, což bylo velmi časově náročné. Historická data byla následně rozdělena na intenzity připadající Branickému mostu a intenzity připadající mostu Pod Vyšehradem. S pohledu celkové intenzity přeprav je nutné na obě trati pohlížet jako na jeden úsek. Historická data jsou dostupná za celou síť. Tato data je třeba tedy přepočítat k délce tratí v rámci Rakouska-Uherska, od roku 1918 v rámci Československa a poté od roku 1993 v rámci České republiky. Do vývoje intenzit se také promítají dvě světové války a krizová období po jejich konci. Základní zdrojem informací jsou ročenky, kde jsou uváděny dopravní údaje.“*

*Dělení podle tratí bylo dohledáno do roku 1986, což je jeden ze stěžejních milníků, protože zde docházelo ke kulminaci dopravních přeprav (vrchol grafu). Následně nastával pokles a to zejména po roce 1989, kdy docházelo vlivem vývoje hospodářství k zásadní změně potřeb přepravy. Od roku 2005 lze získat data rozdělená na nákladní dopravu a osobní dopravu. Výhledové zatížení bylo uvažováno dle předpokladů dopravní technologie.“*

*Citace 1: Postup stanovení dopravní intenzity – Zdroj: Statický přepočet nosné konstrukce mostu v KM3,706 – pod Vyšehradem – 2020, SUDOP PRAHA a.s.*

Ve statickém výpočtu zatížitelnosti bylo dále na základě grafikonu SŽDC vytvořeno 14 skupin vlaků s daným zatěžovacím modelem a počet přejezdů těchto vlaků denně.

### 7.2. STÁLÉ ZATÍŽENÍ

#### 7.2.a. Stálé zatížený prvků modelu:

Zatížení vlastní tíhy vymodelované konstrukce je automaticky vypočítáno modelem. Objemová tíha ocele činí  $\gamma = 78,5 \text{ kN/m}^3$ . Originální prvky mostu z plávkové oceli jsou vzhledem k velkému počtu přídavných plechů, nýtů, a ostatních detailů modelovány s hodnotou objemové hmotnosti 25% vyšší, tedy  $\gamma = 98,13 \text{ kN/m}^3$ .

Ostatní ocelové prvky jsou modelovány za použití běžné hodnoty objemové tíhy  $\gamma = 78,5 \text{ kN/m}^3$ . Některé malé prvky z důvodu minimalizace nerelevantních dynamických vlastních tvarů jsou modelovány bez vlastní tíhy.

Dřevěné mostnice jsou modelovány s vlastní tíhou  $\gamma = 7 \text{ kN/m}^3$ .

## 7.2.b. Ostatní stálé zatížení:

### Zatížení mostovky

- Plechy a úhelníky na mostnicích -  $0.272 \text{ kN/m} + 0.628/2 \text{ kN/m}^2$

ZATÍŽENÍ NA MOSTNICÍCH				
mostnice	zatěžovací délka	Úhelník L 160x100x14	Plech 1 m x 8 mm	
jednotková hodnota	1	0.272	0.628	
jednotka	[m]	[kN/m]	[kN/m <sup>2</sup> ]	
Z. KONZOLA	0.72	0.20	0.44	
PODÉLNÍK 1	začátek	0.60	0.17	0.37
	střed	0.56	0.15	0.35
	konec	0.61	0.17	0.38
PODÉLNÍK 2	začátek	0.61	0.17	0.38
	střed	0.56	0.15	0.34
	konec	0.61	0.17	0.38
PODÉLNÍK 3	začátek	0.64	0.18	0.40
	střed	0.62	0.17	0.39
	konec	0.65	0.18	0.41
PODÉLNÍK 4	začátek	0.63	0.17	0.40
	střed	0.59	0.16	0.37
	konec	0.63	0.17	0.40
PODÉLNÍK 5-8	začátek	0.63	0.17	0.40
	střed	0.59	0.16	0.37
K. KONZOLA	0.59	0.16	0.37	

Tabulka 1: Zatížení od plechů na mostnicích

- Připevnění mostnic na úhelníky - 0.070 kN
- Plechy uprostřed mostovky s nosníky -  $0.12 \text{ kN/m} + 0.628/2 \text{ kN/m}^2$

PLECH NA KRAJÍCH MOSTOVKY TL 8x1000 mm + 2xU120				
Příčník	zatěžovací délka	Plech 0.5m x 8 mm	U120	Celkem
1	2.43	0.76	0.29	1.06
2	3.73	1.17	0.45	1.62
3	4.20	1.32	0.51	1.83
4	4.60	1.44	0.56	2.00
5-8	4.80	1.51	0.58	2.09
8'	2.28	0.72	0.28	0.99

Tabulka 2: zatížení od plechů uprostřed mostovky

- Plechy na krajích mostovky s nosníky -  $0.12 \text{ kN/m} + 0.628/2 \text{ kN/m}^2$

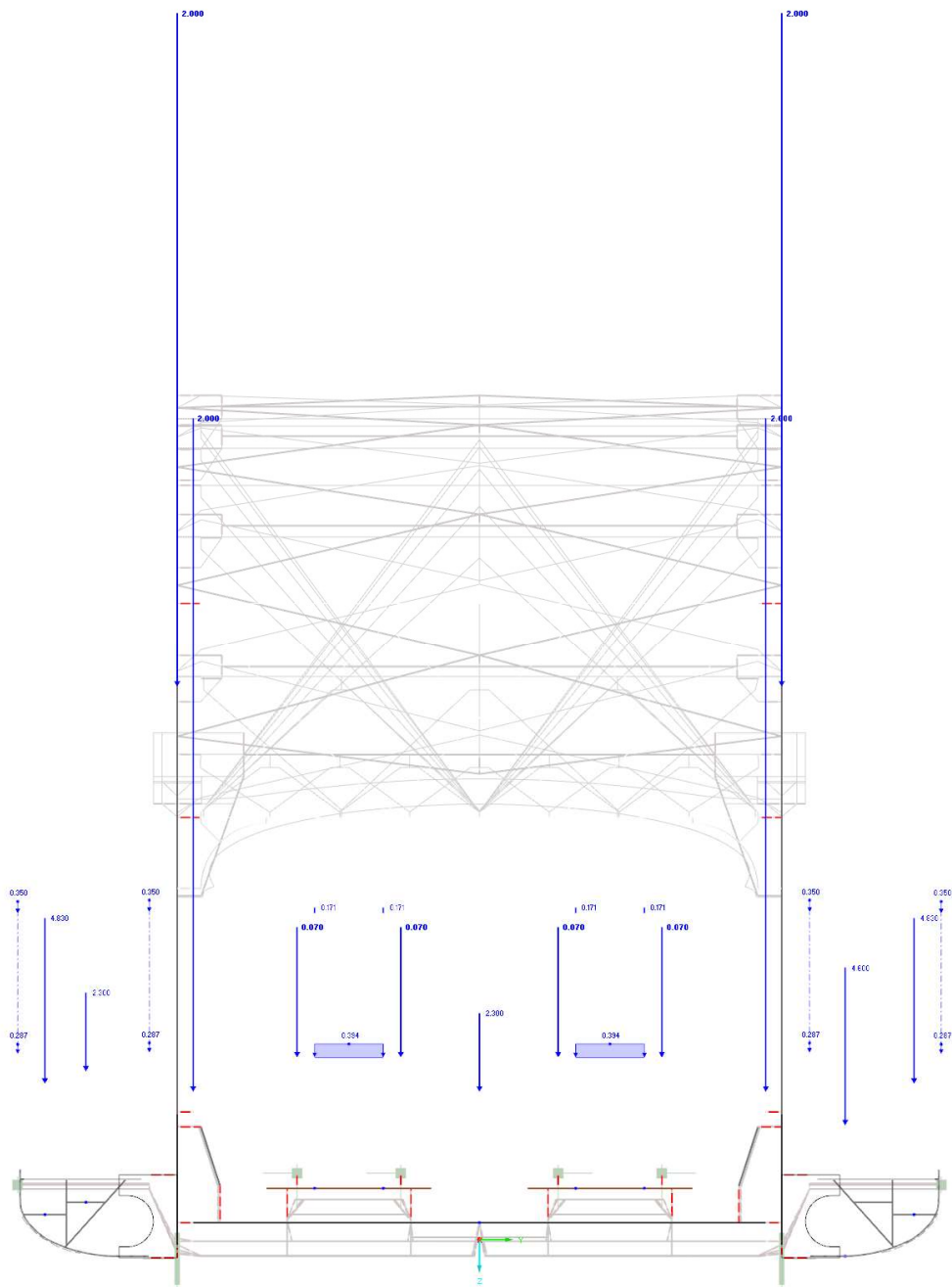
PLECH UPROSTŘED MOSTOVKY TL 8x1200 mm + 2xU120				
Příčník	zatěžovací délka	Plech 0.6m x 8 mm	U120	Celkem
1	2.43	0.92	0.29	1.21
2	3.73	1.41	0.45	1.86
3	4.2	1.58	0.51	2.09
4	4.6	1.73	0.56	2.29
5-8	4.8	1.81	0.58	2.39
8'	2.28	0.86	0.28	1.13

Tabulka 3: Zatížení od plechů na krajích mostovky

- Ocelové chráničky – 0.5kN/m

Ocelové chráničky kabelových tras			
Pole	zatěžovací délka [m]	liniové zatížení [kN/m]	bodové zatížení [kN]
0	2.38	0.50	1.19
1	3.73	0.50	1.87
2	4.20	0.50	2.10
3	4.60	0.50	2.30
4-8	4.80	0.50	2.40

Tabulka 4: Zatížení od ocelových chrániček uprostřed mostovky



Obrázek 28: Ostatní stálé zatížení v místě příčniku 3

## Zatížení příhrady

- Trakční vedení – 2kN

## Zatížení na obě boční konzoly

- Zábradlí – 0.35 kN/m
- Fošny lávky – 0.30 kN/m<sup>2</sup>

LÁVKA- FOŠNY 50mm		
plošné zatížení [kN/m <sup>2</sup> ]	zatěžovací šířka [m]	liniové zatížení [kN/m]
0.30	0.96	0.29

Tabulka 5: Zatížení lávek od dřevěných fošen

- STL Plynovod – 1.05 kN/m

STL plynovod – ocel TR 350/12			
Pole	zatěžovací délka [m]	liniové zatížení [kN/m]	bodové zatížení [kN]
0	2.38	1.05	2.50
1	3.73	1.05	3.92
2	4.20	1.05	4.41
3	4.60	1.05	4.83
4-8	4.80	1.05	5.04

Tabulka 6: Zatížení lávek plynovodem

## Ostatní stálé zatížení na levé konzoli

- Ocelové chráničky – 0.5kN/m

Ocelové chráničky kabelových tras			
Pole	zatěžovací délka [m]	liniové zatížení [kN/m]	bodové zatížení [kN]
0	2.38	0.50	1.19
1	3.73	0.50	1.87
2	4.20	0.50	2.10
3	4.60	0.50	2.30
4-8	4.80	0.50	2.40

Tabulka 7: Zatížení levé lávky kab. Trasy

## Ostatní stálé zatížení na pravé konzoli

- 2 x ocelové chráničky – 1 kN/m

Ocelové chráničky kabelových tras			
Pole	zatěžovací délka [m]	liniové zatížení [kN/m]	bodové zatížení [kN]
0	2.38	1.00	2.38
1	3.73	1.00	3.73
2	4.20	1.00	4.20
3	4.60	1.00	4.60
4-8	4.80	1.00	4.80

Tabulka 8: Zatížení pravé lávky kab. trasy

## 7.3. PROMĚNNÉ ZATÍŽENÍ

### 7.3.a. Dynamický součinitel

Dynamický součinitel byl stanoven dle postupu definován v metodickém pokynu S5/1, s předpokladem rychlosti  $v=60$  km/h, délku  $L_{\phi}=70$  m a standardně udržovanou kolej. Dynamický součinitel je použit pro veškeré dopravní zatížení.

$$\Phi_2=1.07 [-]$$

Vzhledem k tomu že cílem této práce je pouze fázovaný výpočet únavy na příhradové konstrukci, s předpokladem výměny porušených prvků mostovky, nejsou počítány dynamické součinitele pro ostatní prvky mostu.

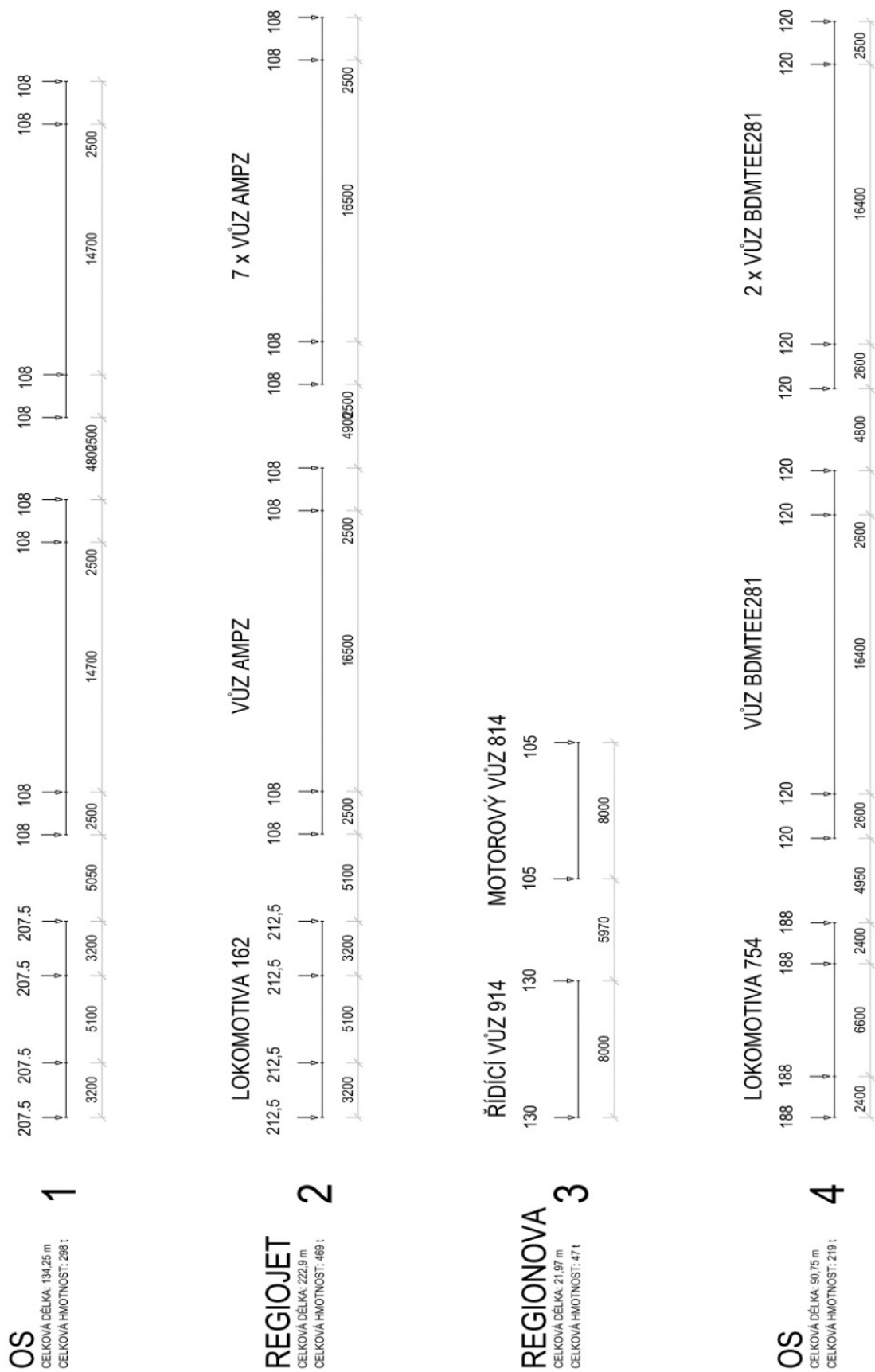
### 7.3.b. Soupravy zatížení

Přepočet zatížitelnosti a přechodnosti firmy SUDOP počítá se 14 charakteristickými vlaky stanovenými na základě grafikonu SŽDC (2). Z důvodu nedostatku programu Dlubal RFEM nebylo možné ve výpočetním modelu zadat vlak delší než trasa pojezdu, která je tvořena kolejnicemi délky 73.82 m. Z tohoto důvodu bylo nutné modelovat vlaky délky přesahující délku trasy pojezdu jenom částečně. V tomto případě byly vybrány nejtěžší části vlaků.

S výjimkou soupravy 14 (Pendolino) byly tedy modelovány lokomotivy a veškeré následující soupravy, které se vešly na průjezdnou dráhu. U vlaku 14 jsou modelovány poslední 3 vagóny, což je nejtěžší část vlaku se třemi vozy s nápravovým zatížením 155 kN. Vymodelovat začátek vlaku s lokomotivou by znamenalo použít 2 vozy s nápravovým zatížením 155 kN a jeden vůz s nápravovým zatížením 145 kN.

Pro veškeré průjezdy vlaku je vytvořeno 93 zatěžovacích stavů na každé koleji s krokem 0.8 m. Vlaky jsou orientovány ve směru jízdy koleje.





Obrázek 29: Zatížení od souprav 1-4 (2)





## 7.4. INTENZITA DOPRAVY

Hodnoty intenzity dopravy jsou přebrány ze statického přepočtu společnosti SUDOP PRAHA a.s.. Intenzity zatížení jsou dány mezi roky 1901–2021, s předpokladem zjednodušení mostu v letech 2022–2024, a následně konstantní hodnoty intenzity dopravy po roce 2026 (2).

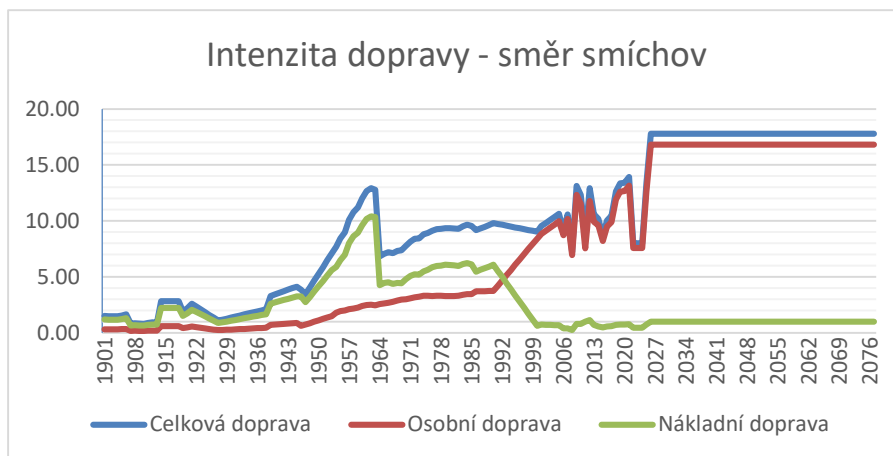
Intenzita dopravy [m.hr.tun/rok]							
Rok	Směr Smíchov			Rok	Směr Vyšehrad		
	Celk.	Osob.	Nákl.í		Celk.	Osob.	Nákl.í
1901	1.49	0.31	1.18	1901	0.00	0.00	0.00
1902	1.48	0.31	1.17	1902	0.00	0.00	0.00
1903	1.47	0.31	1.16	1903	0.00	0.00	0.00
1904	1.47	0.31	1.16	1904	0.00	0.00	0.00
1905	1.53	0.32	1.21	1905	0.00	0.00	0.00
1906	1.63	0.34	1.29	1906	0.00	0.00	0.00
1907	0.82	0.17	0.65	1907	0.87	0.18	0.69
1908	0.84	0.18	0.66	1908	0.89	0.19	0.70
1909	0.82	0.17	0.65	1909	0.89	0.19	0.70
1910	0.81	0.17	0.64	1910	0.86	0.18	0.68
1911	0.87	0.18	0.69	1911	0.94	0.20	0.74
1912	0.92	0.19	0.73	1912	0.98	0.21	0.77
1913	0.91	0.19	0.72	1913	0.97	0.20	0.77
1914	2.82	0.59	2.23	1914	3.00	0.63	2.37
1915	2.82	0.59	2.23	1915	3.01	0.63	2.38
1916	2.82	0.59	2.23	1916	3.01	0.63	2.38
1917	2.82	0.59	2.23	1917	3.01	0.63	2.38
1918	2.82	0.59	2.23	1918	3.01	0.63	2.38
1919	1.89	0.40	1.49	1919	2.01	0.42	1.59
1920	2.19	0.46	1.73	1920	2.33	0.49	1.84
1921	2.60	0.55	2.05	1921	2.77	0.58	2.19
1922	2.35	0.49	1.86	1922	2.51	0.53	1.98
1923	2.10	0.44	1.66	1923	2.24	0.47	1.77
1924	1.85	0.39	1.46	1924	1.97	0.41	1.56
1925	1.60	0.34	1.26	1925	1.71	0.36	1.35
1926	1.35	0.28	1.07	1926	1.44	0.30	1.14
1927	1.10	0.23	0.87	1927	1.18	0.25	0.93
1928	1.16	0.24	0.92	1928	1.24	0.26	0.98
1929	1.25	0.26	0.99	1929	1.34	0.28	1.06
1930	1.35	0.28	1.07	1930	1.44	0.30	1.14
1931	1.44	0.30	1.14	1931	1.53	0.32	1.21
1932	1.53	0.32	1.21	1932	1.63	0.34	1.29
1933	1.63	0.34	1.29	1933	1.73	0.36	1.37
1934	1.72	0.36	1.36	1934	1.83	0.38	1.45
1935	1.81	0.38	1.43	1935	1.94	0.41	1.53
1936	1.91	0.40	1.51	1936	2.03	0.43	1.60
1937	2.00	0.42	1.58	1937	2.13	0.45	1.68
1938	2.09	0.44	1.65	1938	2.23	0.47	1.76
1939	3.28	0.69	2.59	1939	3.49	0.73	2.76
1940	3.42	0.72	2.70	1940	3.64	0.76	2.88
1941	3.56	0.75	2.81	1941	3.79	0.80	2.99
1942	3.70	0.78	2.92	1942	3.94	0.83	3.11
1943	3.84	0.81	3.03	1943	4.09	0.86	3.23
1944	3.98	0.84	3.14	1944	4.23	0.89	3.34
1945	4.11	0.86	3.25	1945	4.38	0.92	3.46
1946	3.84	0.80	3.24	1946	3.02	0.63	2.39
1947	3.44	0.72	2.72	1947	3.67	0.77	2.90
1948	4.05	0.85	3.20	1948	4.30	0.90	3.40
1949	4.66	0.98	3.68	1949	4.95	1.04	3.91
1950	5.25	1.10	4.15	1950	5.60	1.18	4.42
1951	5.86	1.23	4.63	1951	6.24	1.31	4.93
1952	6.47	1.36	5.11	1952	6.89	1.45	5.44
1953	7.07	1.48	5.59	1953	7.53	1.58	5.95
1954	7.68	1.60	6.07	1954	8.18	1.72	6.46
1955	8.43	1.74	6.49	1955	8.97	1.86	6.97
1956	8.97	1.88	6.98	1956	9.54	2.00	7.48
1957	10.09	2.10	7.99	1957	10.74	2.23	8.51
1958	10.78	2.16	8.62	1958	11.47	2.30	9.17
1959	11.19	2.24	8.95	1959	11.92	2.39	9.53
1960	11.99	2.40	9.59	1960	12.77	2.56	10.21
1961	12.65	2.47	10.18	1961	13.46	2.62	10.8004
1962	12.93	2.51	10.42	1962	13.77	2.67	11.10
1963	12.77	2.44	10.33	1963	13.59	2.60	10.99
1964	6.81	2.57	4.24	1964	7.26	2.74	4.52
1965	7.05	2.61	4.44	1965	7.51	2.78	4.73

Tabulka 9: intenzita dopravy mezi roky 1901–1966

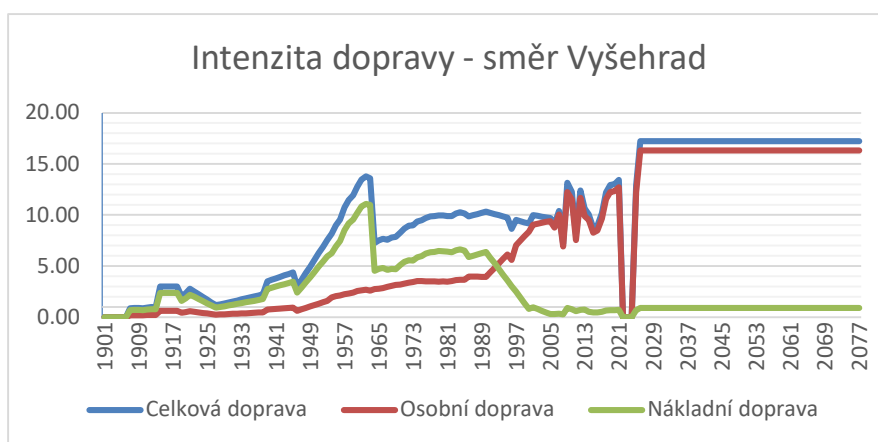
Intenzita dopravy [m.hr.tun/rok]							
Rok	Směr Smíchov			Rok	Směr Vyšehrad		
	Celk.	Osob.	Nákl.í		Celk.	Osob.	Nákl.í
1966	7.19	2.68	4.51	1966	7.66	2.85	4.81
1967	7.12	2.77	4.35	1967	7.58	2.95	4.63
1968	7.31	2.87	4.44	1968	7.78	3.05	4.73
1969	7.38	2.97	4.41	1969	7.85	3.16	4.69
1970	7.78	3.00	4.78	1970	8.27	3.19	5.08
1971	8.14	3.07	5.07	1971	8.67	3.27	5.40
1972	8.39	3.16	5.23	1972	8.94	3.37	5.57
1973	8.43	3.23	5.20	1973	8.97	3.43	5.54
1974	8.80	3.31	5.49	1974	9.36	3.52	5.84
1975	8.92	3.31	5.61	1975	9.49	3.52	5.97
1976	9.12	3.28	5.84	1976	9.71	3.49	6.22
1977	9.25	3.29	5.96	1977	9.85	3.50	6.35
1978	9.28	3.29	5.99	1978	9.88	3.51	6.37
1979	9.34	3.27	6.07	1979	9.95	3.48	6.47
1980	9.33	3.28	6.05	1980	9.94	3.49	6.45
1981	9.30	3.27	6.03	1981	9.90	3.48	6.42
1982	9.28	3.31	5.97	1982	9.89	3.53	6.36
1983	9.52	3.39	6.13	1983	10.14	3.61	6.53
1984	9.66	3.44	6.22	1984	10.28	3.66	6.62
1985	9.54	3.44	6.10	1985	10.15	3.66	6.49
1986	9.16	3.70	5.46	1986	9.86	3.98	5.88
1987	9.31	3.70	5.61	1987	9.98	3.97	6.01
1988	9.47	3.71	5.76	1988	10.09	3.96	6.13
1989	9.64	3.72	5.92	1989	10.20	3.94	6.26
1990	9.80	3.73	6.07	1990	10.32	3.93	6.39
1991	9.72	4.20	5.52	1991	10.20	4.37	5.83
1992	9.65	4.67	4.98	1992	10.09	4.82	5.27
1993	9.57	5.14	4.43	1993	9.97	5.26	4.71
1994	9.49	5.60	3.89	1994	9.85	5.70	4.15
1995	9.41	6.07	3.34	1995	9.74	6.14	3.60
1996	9.34	6.54	2.80	1996	9.63	6.59	3.04
1997	9.26	7.01	2.25	1997	9.51	7.03	2.48
1998	9.18	7.47	1.71	1998	9.39	7.47	1.92
1999	9.10	7.94	1.16	1999	9.27	7.91	1.36
2000	9.03	8.41	0.62	2000	9.16	8.36	0.80
2001	9.54	8.82	0.72	2001	9.99	9.04	0.95
2002	9.80	9.10	0.70	2002	9.92	9.13	0.79
2003	10.08	9.39	0.69	2003	9.84	9.22	0.62
2004	10.35	9.67	0.68	2004	9.77	9.31	0.46
2005	10.62	9.96	0.66	2005	9.70	9.40	0.30
2006	9.09	8.70	0.39	2006	9.08	8.77	0.31
2007	10.57	10.18	0.39	2007	10.38	10.06	0.32
2008	7.19	6.93	0.26	2008	7.17	6.90	0.27
2009	13.11	12.32	0.79	2009	13.15	12.25	0.90
2010	12.31	11.51	0.80	2010	12.28	11.51	0.77
2011	8.55	7.55	1.00	2011	8.11	7.53	0.58
2012	12.91	11.78	1.13	2012	12.40	11.68	0.72
2013	10.61	9.92	0.69	2013	10.44	9.89	0.75
2014	10.16	9.60	0.56	2014	10.04	9.51	0.53
2015	8.66	8.18	0.48	2015	8.72	8.26	0.46
2016	10.04	9.49	0.55	2016	8.96	8.49	0.47
2017	10.46	9.88	0.58	2017	10.16	9.62	0.54
2018	12.62	11.92	0.70	2018	12.20	11.56	0.64
2019	13.34	12.60	0.74	2019	12.92	12.24	0.68
2020	13.41	12.67	0.74	2020	13.01	12.32	0.69
2021	13.91	13.14	0.77	2021	13.43	12.72	0.71
2022	8.00	7.56	0.44	2022	0.00	0.00	0.00
2023	8.00	7.56	0.44	2023	0.00	0.00	0.00
2024	8.00	7.56	0.44	2024	0.00	0.00	0.00
2025	13.32	12.59	0.73	2025	12.89	12.21	0.68
2026	17.81	16.83	0.98	2026	17.23	16.32	0.91
2027	17.81	16.83	0.98	2027	17.23	16.32	0.91
2028	17.81	16.83	0.98	2028	17.23	16.32	0.91
2029	17.81	16.83	0.98	2029	17.23	16.32	0.91

Předpoklad stejné hodnoty dopravního zatížení v dalších letech

Tabulka 10: intenzita dopravy mezi roky 1901–1966



Obrázek 32: Graf Intenzity dopravy – směr Smíchov



Obrázek 33: Graf intenzity dopravy – směr Vyšehrad

## POČET PRŮJEZDŮ CHARAKTERISTICKÝCH SKUPIN VLAKŮ

Poměr počtu pojezdů charakteristických skupin byl přebrán ze statického výpočtu zatížitelnosti a přechodnosti provedeným společností SUDOP, který obsahuje denní počet vlaků v období 2017 a předpokládaný denní počet vlaků v období 2018–2022 a 2025+ (2).

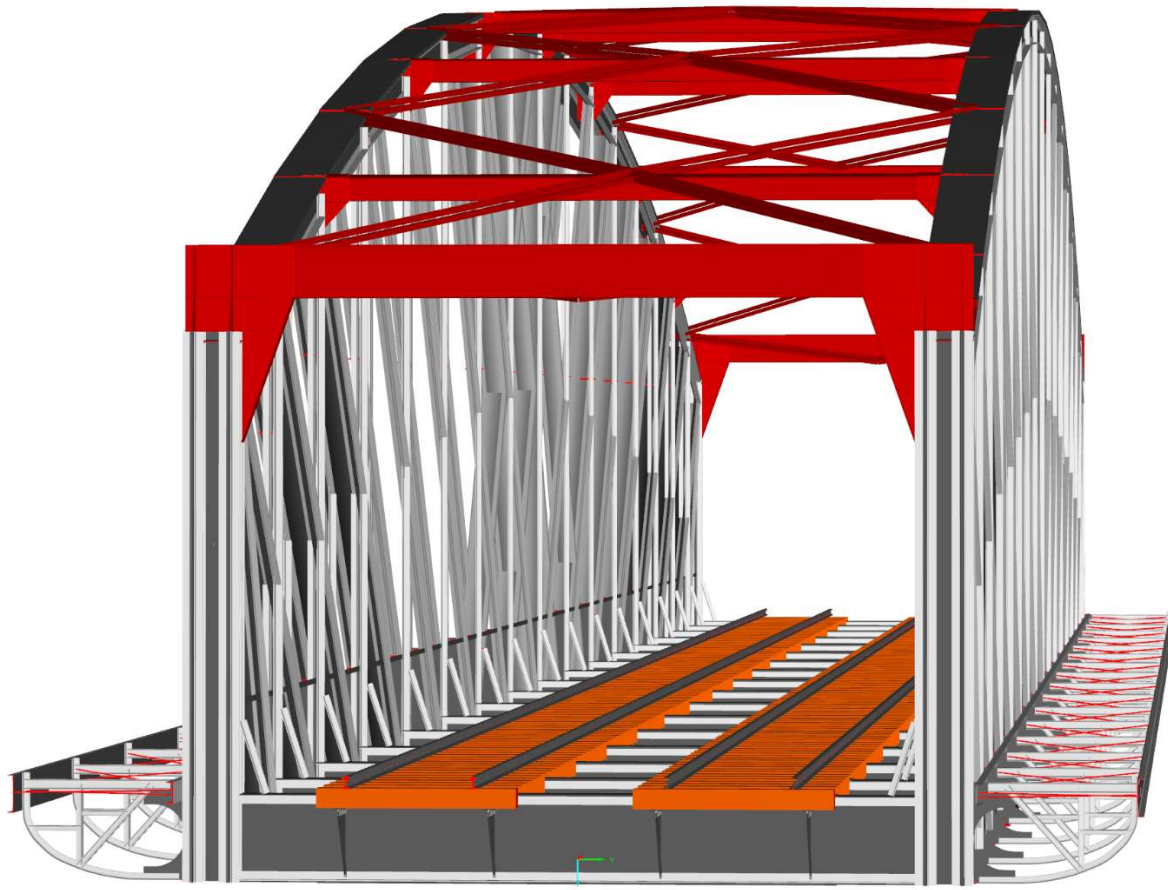
denní počet přejezdů osobních vlaků					
skupiny vlaků			denní počet přejezdů		
číslo	typ	hmotnost [t]	období		
			2017	2018-2022	2025-2055
1	osobní	298	3	3	6
2	osobní	550	25	28	14
3	osobní	47	22	22	41
4	osobní	219	2	2	4
5	osobní	146	11	11	25
6	osobní	529	29	64	32
7	osobní	484	18	18	41
8	osobní	64	6	6	6
12	osobní	180	128	128	238
14	osobní	417	4	4	4

Tabulka 11: Denní počet přejezdů pro daný vlak

---

## 8. VÝPOČETNÍ MODELKY:

---



Obrázek 34: Perspektivní 3D rendering modelu stavu po rekonstrukci

### 8.1. ÚVOD:

Most byl modelován ve výpočetním programu Dlubal RFEM 5.26.0 pomocí historické dokumentace mostu a podle výkresů použity během přepočtu zatížitelnosti a přechodnosti zpracované společností SUDOP PRAHA a.s.. Prohlídky veřejně přístupných částí mostu byly potřebné pro zjištění některých informací potřebných pro modelování (například počet železničních mostnic na každém podélníku).

Vzhledem k rekonstrukci mostovky a horního pásu byl most modelován ve dvou fázích. První fáze je originální stav mostu s originálním horním pásem a bez brzdného ztužení ani ztužení podélníků. Druhá fáze je aktuální stav mostu, s aktuální podobou horního pásu a s přidanými prvky na mostovce. Každá fáze mostu je vymodelovaná do samostatného modelu. Pro modelování konstrukce v obou fázích byl použit pomocný model „MODEL V3\_8 PRE-SPLIT“, který obsahuje veškeré prvky obou fází.

Průřezy mostní konstrukce byly vytvořeny v programu Dlubal SHAPE-THIN 9.05, a dále exportovány do RFEM. Pro hlavní model jsou průřezy modelovány bez korozního oslabení ani vrty pro nýty.

## 8.2. VSTUPNÍ INFORMACE PRO MODELY

Pro modelování byly převážně použité digitální výkresy použity firmou SUDOP pro posudek konstrukce. Tyto výkresy byly dostačující pro převážnou část modelování aktuálního stavu mostu. Chybějící informace o aktuálním stavu mostu, jako třeba počet a rozteč mostnic, byly zjištěny prohlídkou mostu z veřejně přístupných míst.

Pro originální stav mostu byla použita originální dokumentace výstavby mostu z roku 1900. Tyto výkresy byly použity pro modelování originálního horního pásu a pro modelování lávek. Pro přesnější modelování některých detailů byly některé PDF výkresy importovány do programu AutoCAD a jejich detaily změřeny.

V případě některých detailů, kde nebylo možno zjistit přesné rozměry bylo nutné detail modelovat bez přesných dat. To je příklad pro některé části svařence tvořící horní pás na konci nosné konstrukce. Pro modelování těchto detailů byly použity veřejně přístupné zdroje jako například fotografické snímky. Tyto detaily nejsou kritické pro konečný výsledek práce a jejich dopad na celkové chování konstrukce je nepatrné.

## 8.3. SEZNAM MODELŮ:

### 8.3.a. Pomocné modely

- |                                    |                                |
|------------------------------------|--------------------------------|
| • MODEL V3_8 PRE-SPLIT             | Model obsahující veškeré prvky |
| • EKVIVALENTNI NOSNIKY – Diagonaly | Model pro zohlednění čl. prutů |
| • EKVIVALENTNI NOSNIKY – Dolní pas | Model pro zohlednění čl. prutů |
| • EKVIVALENTNI NOSNIKY – Vertikaly | Model pro zohlednění čl. prutů |
| • VALIDACE_*****                   | Modely pro validaci            |

### 8.3.b. Lineární výpočetní modely:

- |                            |                               |
|----------------------------|-------------------------------|
| • MODEL V3_8 FAZ1 ORIGINAL | Model mostu před rekonstrukcí |
| • MODEL V3-8 FAZ2 MODERN   | Model mostu po rekonstrukci   |
| • MODEL V3-8 FAZ3 FAIL 1   | Model po porušení D7/1        |
| • MODEL V3-8 FAZ4 FAIL 2   | Model po porušení D7/2        |
| • MODEL V3-8 FAZ5 FAIL 3   | Model po porušení D7/3        |
| • MODEL V3-8 FAZ6 FAIL 4   | Model po porušení D7/4        |
| • MODEL V3-8 FAZ7 FAIL 5   | Model po porušení D6/1        |
| • MODEL V3-8 FAZ8 FAIL 6   | Model po porušení D6/2        |
| • MODEL V3-8 FAZ9 FAIL 7   | Model po porušení U6          |

## 8.4. MATERIÁLOVÉ CHARAKTERISTIKY

Číslo materiálu	Označení materiálu	Modul pružnosti	Smykový modul	Poissonův součinitel	Objemová tíha	Souč. tepelné roztaž.	mez kluzu
		E [Mpa]	G [Mpa]	$\nu$ [-]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\alpha$ [1/K]	$f_y$ [Mpa]
1	Ocel – Plechy – 1D	197000	75769	0.3	98.13	1.20E-05	203
2	Ocel – Úhelníky – 1D	197000	75769	0.3	98.13	1.20E-05	229
3	Ocel – Plechy – 2D	197000	75769	0.3	98.13	1.20E-05	203
4	Ocel – plechy – 1D – bez tíhy	197000	75769	0.3	0	1.20E-05	203
5	Ocel S 235 - 1D	210000	80769	0.3	78.5	1.20E-05	235
6	Ocel S 235 – 2D	210000	80769	0.3	78.5	1.20E-05	235
7	Ocel S 235 – kolejnice	210000	80769	0.3	78.5	1.20E-05	235
8	Ocel S 235 – 2D – bez tíhy	210000	80769	0.3	0	1.20E-05	235
9	Jehličnaté dřevo C30	12000	750	7	7	5.00E-06	-

Tabulka 12: Materiály použity ve výpočetních modelech.

### 8.4.a. Plávková ocel

Nosné konstrukce mostu byly postaveny v roce 1900 s použitím plávkové oceli. Dle metodického pokynu S5/1 od SŽDC má tato ocel zaručenou pevnost 230 Mpa. Během zpracování přepočtu zatížitelnosti a přechodnosti zpracovaného v roce 2020 společností SUDOP PRAHA a.s. byly provedeny materiálové zkoušky vzorků ocele mostu firmou CZ FERMET s.r.o., Kladno (2).

Ze zkoušky vyplívá, že plechy a úhelníky z plávkové oceli mají odlišné materiálové charakteristiky. Průměrná mez kluzu plechů je 226,44 Mpa, u úhelníků tato hodnota činí 255,93 Mpa.

Vzhledem ke stáří konstrukce a nepříznivosti vysokocyklového zatížení v plastickém stavu byla použita charakteristická hodnota meze kluzu. Tato hodnota byla vypočítána zvláště pro plechy a úhelníky dle postupu popsáném v příloze D normy ČSN EN 1990. Tato hodnota bude použita jako mez kluzu pro ověření pružného chování konstrukce.

Charakteristická hodnota meze kluzu činí 203.72 Mpa pro plávkovou ocel tvořící plechy a 229.53 Mpa pro plávkovou ocel tvořící úhelníky.

### 8.4.b. Ocel S235

Pro modelování ocele přidané během rekonstrukcí mostů a ostatních ocelových prvků je použita ocel S235 s mezí kluzu 235Mpa.

### 8.4.c. Ostatní materiály

Pro modelování mostnic bylo použité jehličnaté dřevo C30.



Výpočet charakteristických hodnot materiálových charakteristik dle EN 1990							
		ReH [Mpa]	Rp0.2 [Mpa]	Rm [Mpa]	A* [%]	Z*[%]	E [Gpa]
1P	L1	264	207	410	37.8	62.7	207.62
	L2	260	214	408	37.5	63.0	200.25
	L3	240	207	410	37.3	61.8	192.00
2P	L1	256	208	392	39.3	65.5	193.31
	L2	282	206	392	37.8	63.7	194.81
	L3	283	212	392	39.3	64.2	194.47
3P	L1	270	242	415	38.3	64.2	196.08
	L2	285	249	413	37.5	62.6	195.78
	L3	260	236	414	39.5	64.1	196.64
4P	L1	275	221	386	37.0	66.8	196.23
	L2	274	228	379	37.5	66.7	197.27
	L3	262	232	386	37.3	66.5	196.46
5P	L1	271	237	402	35.5	65.4	196.76
	L2	258	236	404	38.8	63.1	196.98
	L3	297	239	402	37.8	64.6	196.57
6P	L1	263	232	364	40.5	71.4	196.88
	L2	246	221	360	40.3	71.0	197.13
	L3	255	208	361	42.0	72.0	196.67
7P	L1	262	238	391	37.8	61.3	197.68
	L2	268	230	391	35.5	63.6	197.62
	L3	264	239	392	37.5	61.1	196.02
8P	L1	245	229	413	37.0	63.5	196.25
	L2	252	235	413	37.8	64.5	196.72
	L3	271	243	412	35.8	63.8	196.47
9P	L1	257	218	378	39.0	67.7	197.10
	L2	270	219	379	40.8	69.0	196.43
	L3	257	228	380	40.5	68.2	197.78
		ReH [Mpa]	Rp0.2 [Mpa]	Rm [Mpa]	A* [%]	Z*[%]	E [Gpa]
Průměr	L	264.70	226.44	394.04	38.25	65.26	196.81
Sx	L	12.91	12.91	16.86	-	-	-
Vx	L	0.05	0.06	0.04	-	-	-
Xd	L	241.9814	203.7299	364.359	-	-	-

Tabulka 13: výpočet charakteristických hodnot pro plávkovou ocel plechů

Výpočet charakteristických hodnot materiálových charakteristik dle EN 1990							
		ReH [Mpa]	Rp0.2 [Mpa]	Rm [Mpa]	A* [%]	Z*[%]	E [Gpa]
1U	L1	298	250	437	37.3	36.6	196.282
	L2	312	247	432	38.3	63.8	197.438
	L3	279	241	426	37.7	64.4	196.708
3U	L1	308	293	406	32	71.9	197.229
	L2	287	252	403	40	71.6	200.46
	L3	296	265	414	40	70	198.792
3U	L1	308	293	406	32	71.9	197.229
	L2	287	252	403	40	71.6	200.46
	L3	296	265	414	40	70	198.792
4U	L1	309	247	405	40	69.8	201.453
	L2	289	256	391	38.7	71.7	197.082
	L3	342	257	390	40	72.6	200.745
5U	L1	317	264	406	39.3	69.8	197.211
	L2	298	274	404	36	72.5	196.914
	L3	322	260	403	40	71.4	198.258
6U	L1	274	231	370	43	75.2	207.839
	L2	309	253	391	39.3	72.1	207.732
	L3	312	242	376	40	73.4	194.814
7U	L1	287	248	362	37	72.9	189.623
	L2	285	241	389	40.7	68.5	190.183
	L3	296	260	391	38	68.3	190.405
8U	L1	290	234	420	38.3	63	198.706
	L2	291	242	418	39.3	63.5	192.289
	L3	302	251	423	37	62	192.531
9U	L1	250	270	409	40.3	64.2	207.239
	L2	306	260	394	36.7	69	190.469
	L3	265	262	401	40.3	66.9	194.361
		ReH [Mpa]	Rp0.2 [Mpa]	Rm [Mpa]	A* [%]	Z*[%]	E [Gpa]
Průměr	L	296.85	255.93	403.11	38.56	68.10	197.45
Sx	L	18.42	15.00	17.68	-	-	-
Vx	L	0.06	0.06	0.04	-	-	-
Xd	L	264.4369	229.5308	371.9876	-	-	-

Tabulka 14: výpočet charakteristických hodnot pro plávkovou ocel úhelníků

## 8.5. POPIS

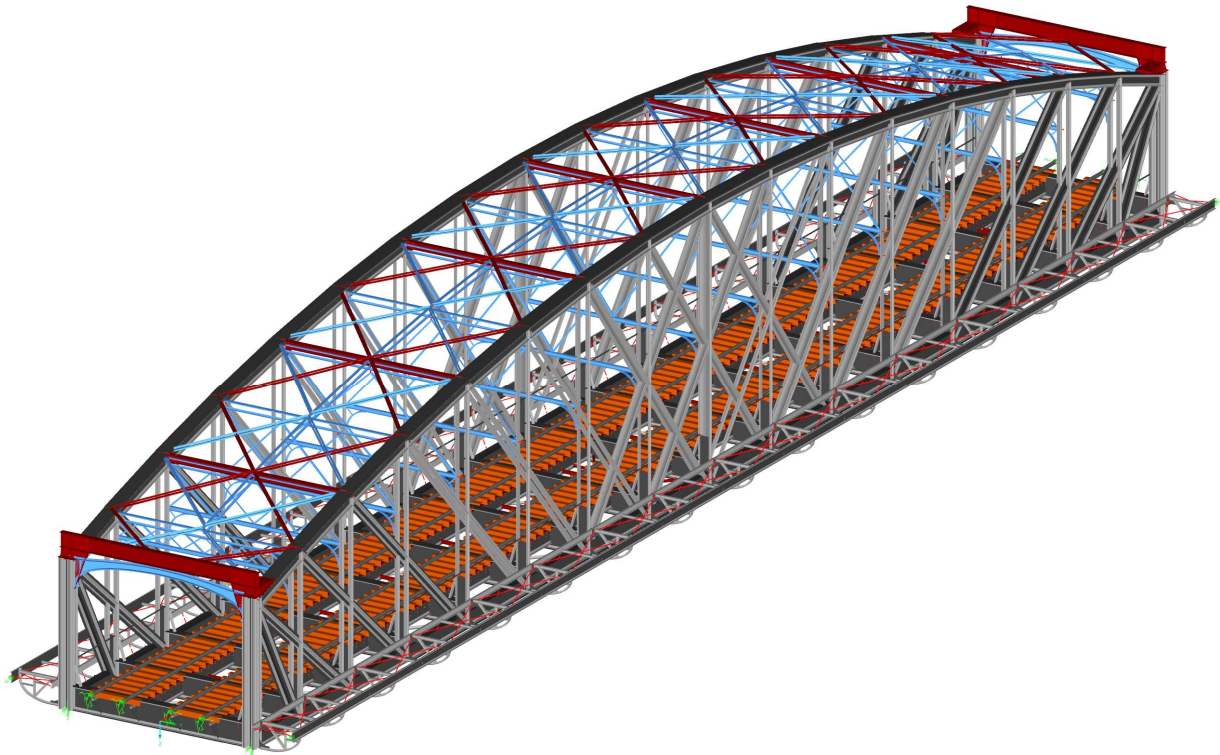
### 8.5.a. Popis hlavního modelu:

Modelování různých konstrukčních stavů mostu bylo řešeno vymodelováním jednoho hlavního prostorového modelu obsahujícího veškeré prvky všech fází mostu. Tento model tedy obsahuje obě varianty horního pásu a veškeré přidané ztužení mostovky. Tato metoda také zajišťuje kompatibilitu číslování prvků mezi modely. Pro jednoduché rozeznání prvků byly použity dočasné materiály. Model byl následně rozdělen do modelů jednotlivých fází a přebytečné prvky odstraněny.

V modelu je vymodelována jedna nosná konstrukce mostu. Pro přesnější výpočet vlastních tvarů kmitání byly vymodelovány boční lávky. Součástí modelu je také železniční kolej s modelovanými mostnicemi a kolejnicemi, což umožní umístění dopravního zatížení přímo na kolej a tím pádem přesné rozmístění sil na podélníky. Kolej je modelovaná bez styků jako jeden dlouhý nosník periodicky pružně podepřen mostnicemi.

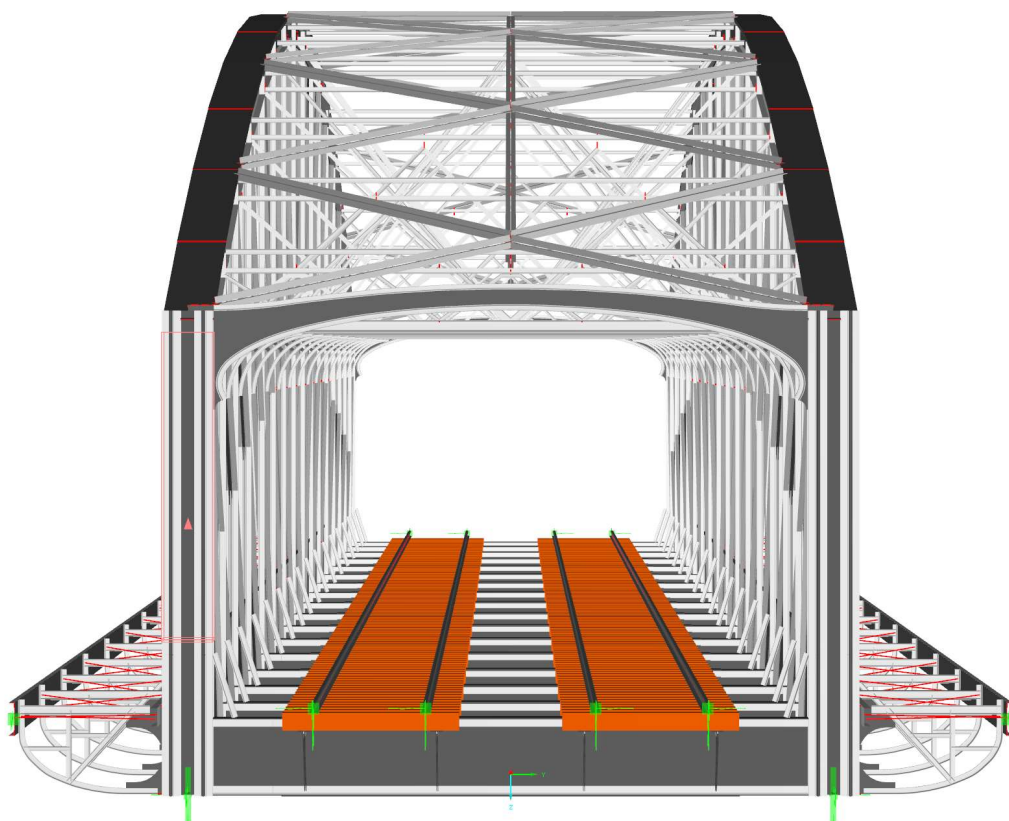
Model je převážně prutový s pruty modelovanými v jejich těžišťové ose. Výjimka jsou některé pruty, které nebylo možné modelovat v těžišťové ose, jako třeba některá žebra zesilující plochy nebo pruty s jinou těžišťovou osou po jejich zesílení. Tyto pruty byly modelovány za použití jiné osy pomocí excentricity prutu.

Model také obsahuje plochy, které slouží převážně k modelování spojů a detailů. Většina vymodelovaných ploch slouží k modelování svařence spojujícího nový horní příčník portálového rámu ke svislici V0. Další plochy slouží k modelování přesahů, připojují bočních lávek k dolnímu pásu a připoje ostatních příčníků nového horního ztužení.

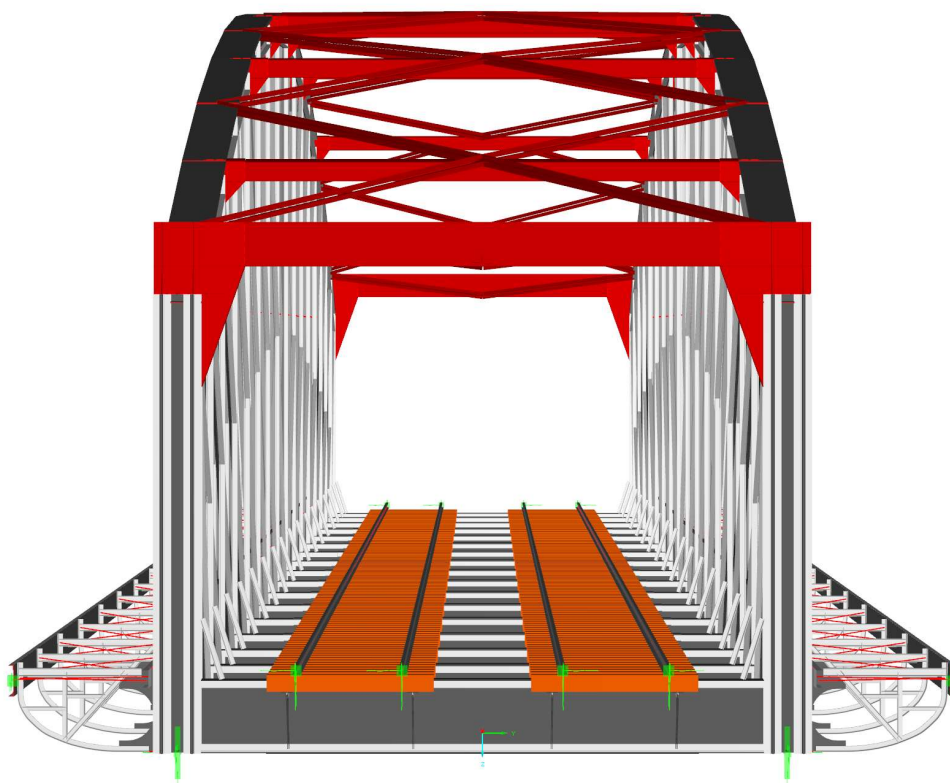


Obrázek 35: 3D rendering hlavního modelu

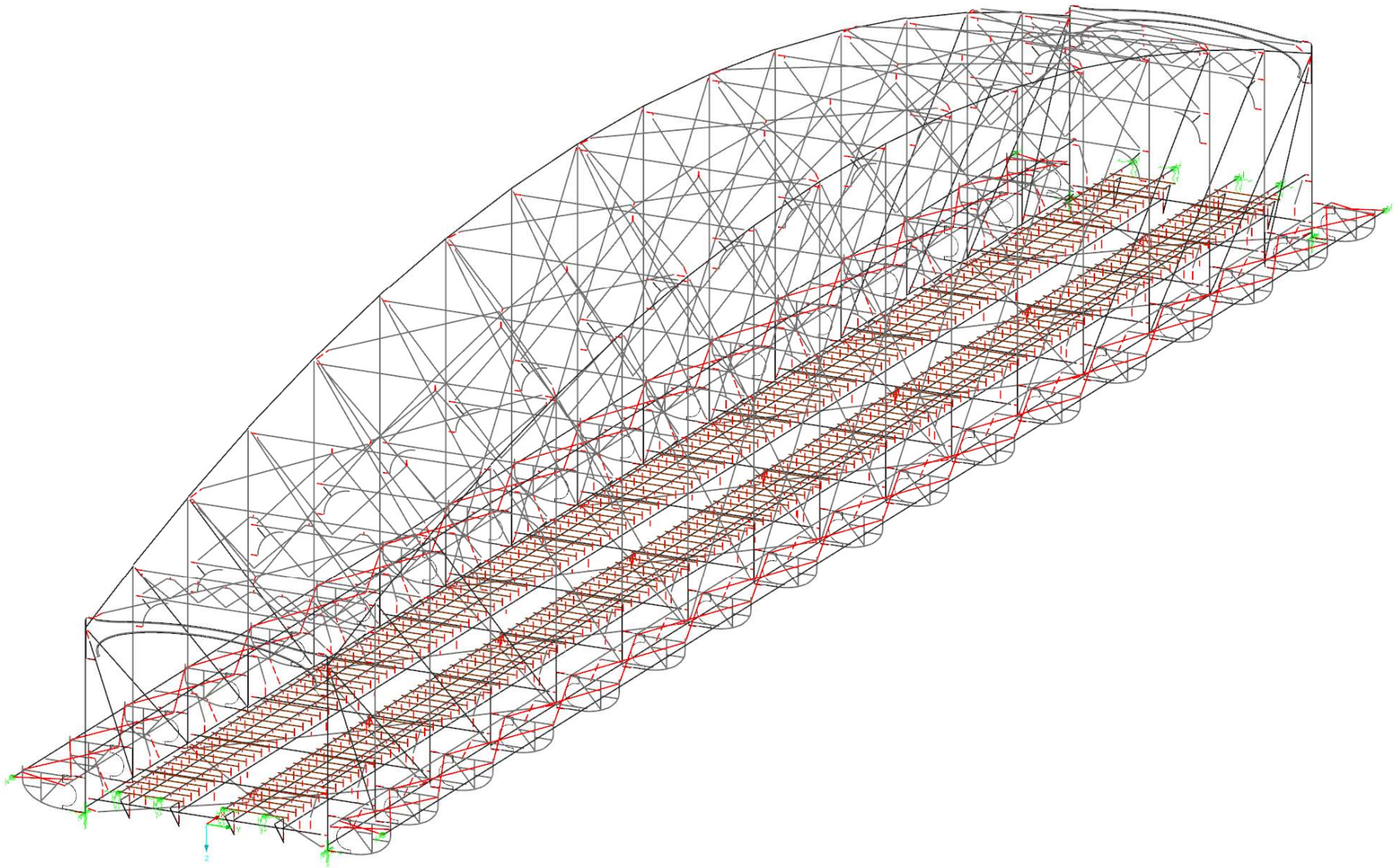
## 8.5.b. Obrázky modelu



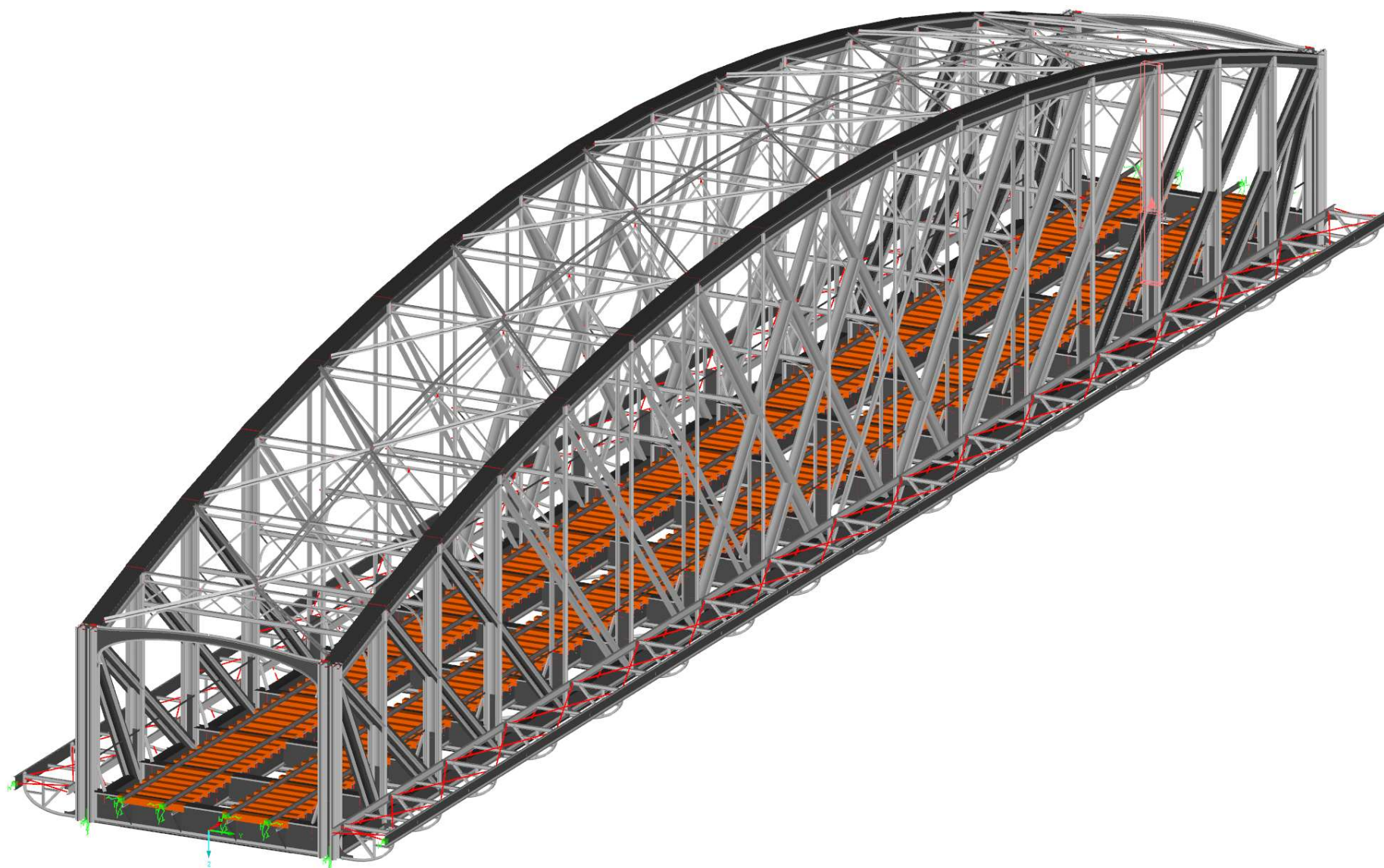
Obrázek 36: Perspektivní 3D rendering modelu originálního stavu



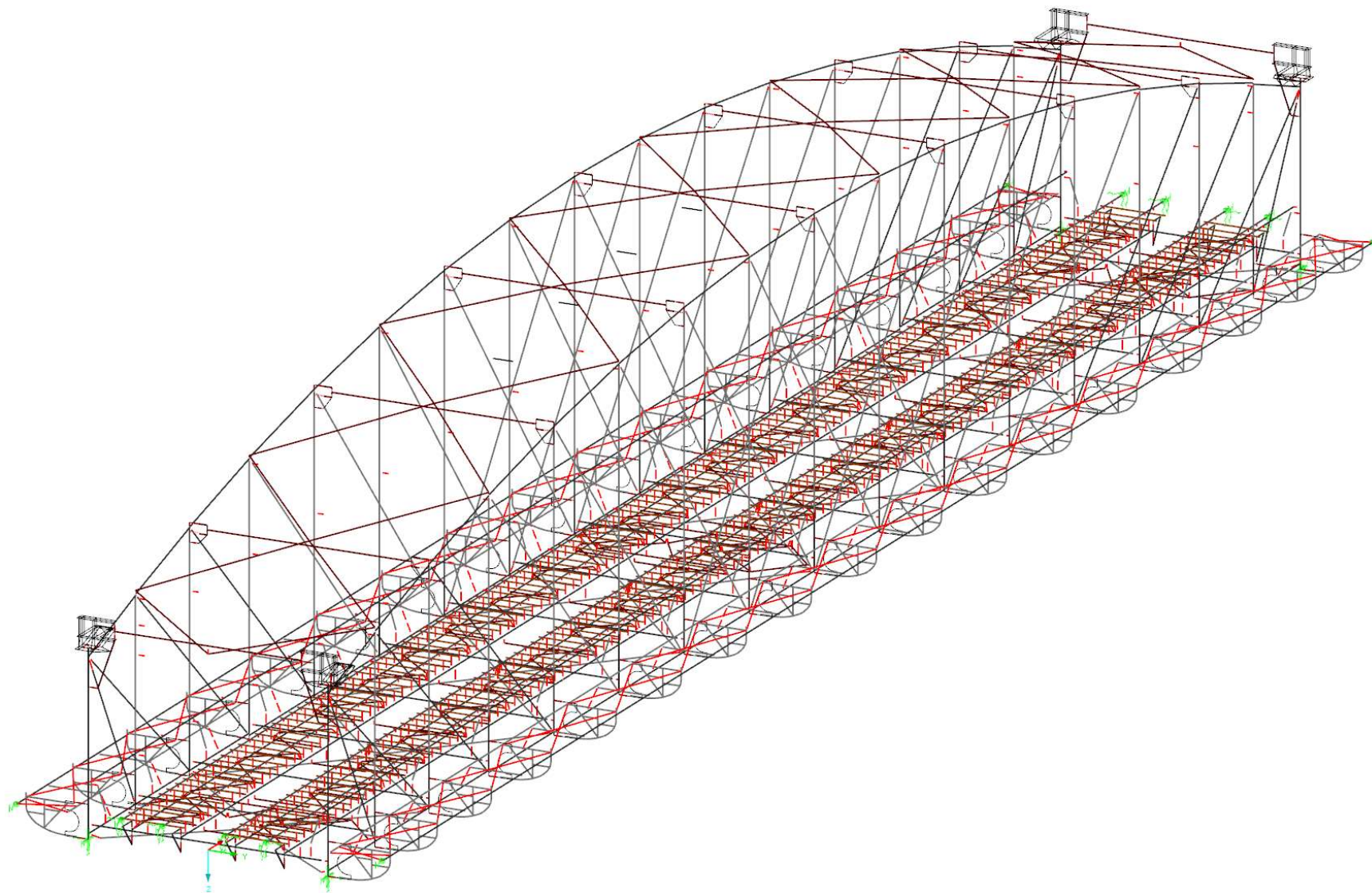
Obrázek 37: Perspektivní 3D rendering modelu originálního stavu



Obrázek 38: Osově schéma modelu originálního stavu



Obrázek 39: 3D rendering modelu originálního stavu



Obrázek 40: Osově schéma modelu stavu po rekonstrukci



Obrázek 41: 3D rendering modelu stavu po rekonstrukci

### 8.5.c. Příhradový nosník

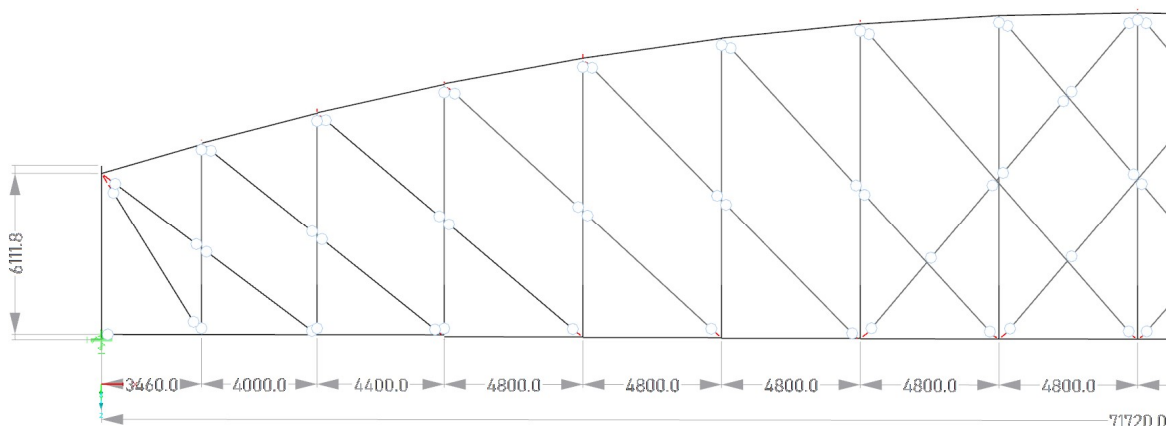
Hlavní nosník tvořen přímým dolním pásem, polygonálním horním pásem, 17 svislicemi a 20 diagonály byl vymodelován z prutových prvků propojených tuhými pruty. Veškeré pruty jsou modelovány v jejich těžišťové ose.

Horní a dolní pás příhrady je tvořen 16 nosíky modelovanými v těžišťové ose. Pro zohlednění proměnného počtu plechů na pásnici horního i dolního pásu bylo vymodelováno 5 průřezů s různým počtem přidaných plechů. Osy průřezů s odlišnou polohou těžiště jsou propojeny tuhými pruty. Přípoje nosníků mezi sebou jsou vždy bez kloubů.

Svislice V0 je modelovaná ze čtyř plnostěnných prutů. první prut je veden od podpory nosné konstrukce do výšky, kde končí plnostěnné pruty ostatních svislic, třetí následuje do místa připojení horního pásu a čtvrtý pokračuje až do přípoje s horním příčnickem.

Svislice s výjimkou svislice V0 jsou modelovány ze dvou prutů, první prut, napojený na dolní pás (přesněji řečeno na horní pás s vyšší osou) je modelován s plnostěnnou stojinou, stejně jak tomu je v realitě. Druhý prut je modelován jako jednotný prut bez stojiny, rozdíl chování od členěného prutu je zohledněno změnou tuhostí.

Diagonály jsou modelovány z různého počtu prutů, s pruty končící v každém křížení. Členěné pruty jsou modelovány jako jednotné pruty bez stojiny, rozdíl chování od členěného prutu je zohledněno změnou tuhostí.



Obrázek 42: Podélný pohled na příhradu mezi svislicemi 0-8

### 8.5.d. Mostovka:

Mostovka tvořena podélníky, příčnický, podélným ztužením, podélníkovým ztužením a brzdným ztužením byla vymodelována z prutových prvků propojených tuhými pruty. Pruty jsou modelovány v jejich těžišťové ose s výjimkou zesílených podélníků, které jsou modelovány v těžišťové ose originálního podélníku. Jsou také vymodelovány koleje, s mostnicemi a kolejnicemi připojenými k podélníkům tuhými pruty s pružnými přípoji. Kolejnice jsou modelovány až do následujícího pražce za koncem N.K, kde jsou pružně podepřeny. Celková délka kolejnic činí 73,82 m.

Podélníky byly modelovány pomocí 64 prutů s 8 různými průřezy, z toho 4 jsou pro originální stav a 4 pro stav po zesílení. Podélníky jsou oboustranně podepřeny příčnický použitím pružných kloubů. Zesílení podélníků bylo řešeno použitím originálního a zesíleného



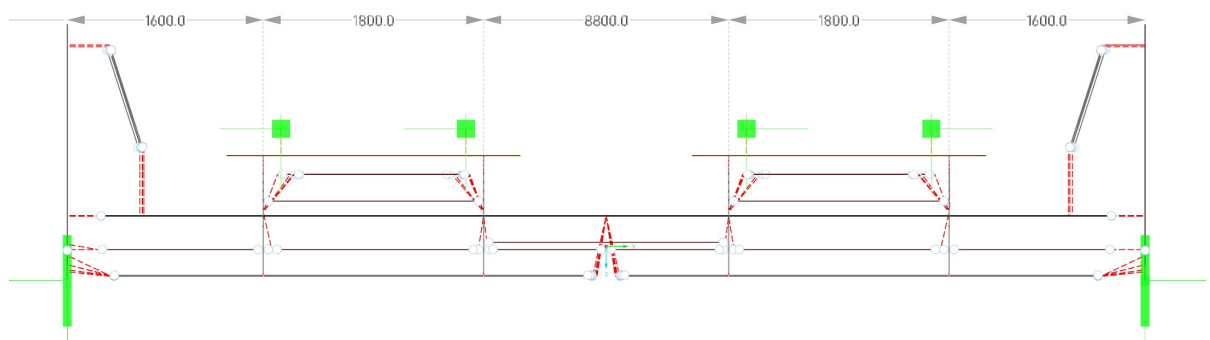
průřezu. Pruty jsou modelovány v ose originálního průřezu, v případě zesíleného prutu je použita excentricita prutu pro posun do správné pozice.

Příčnice byly modelovány pomocí 73 prutů se 7 různými průřezy. Pro zohlednění proměnného počtu plechů na pásnici byly vymodelovány 4 přidavné průřezy. Příčnice jsou oboustranně podepřeny svislicí použitím pružných kloubů. Bylo také vymodelováno koutové ztužení přípoje mostovky ke svislici použitím dvojice úhelníků. Ztužení bylo modelováno bez plechů.

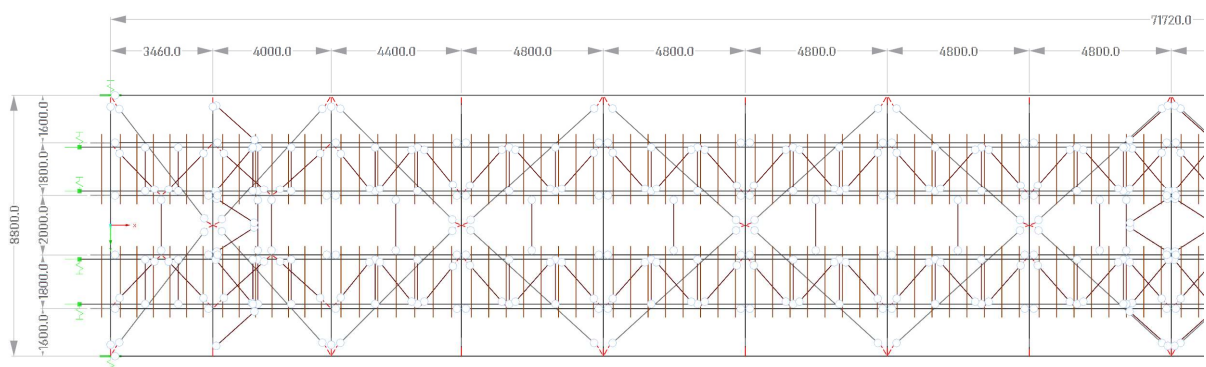
Podélné mostovkové ztužení bylo modelováno pomocí 32 prutů s 5 různými průřezy. Přípoj na dolní pás je modelován jako pružný kloub a přípoj na příčník jako jednoduchý kloub. Prut je připojen v podélníku v místě jejich křížení prostřednictvím tuhého prutu.

Podélníkové ztužení je modelováno pomocí 88 diagonálních prutů s průřezem L80x80x8 a 80 příčných prutů s průřezem U160. Diagonální pruty jsou oboustranně kloubově podepřeny, a příčné pruty jsou oboustranně podepřeny pomocí pružných kloubů.

Brzdné ztužení je modelováno pomocí 20 prutů s průřezem tvořeným dvojicí úhelníků L100x100x10 a z 16 prutů průřezu L100x100x10. Mostovka obsahuje celkem tři brzdná ztužidla, se zdvojeným ztužidlem uprostřed pole nosné konstrukce. Veškeré pruty brzdného ztužidla jsou modelovány jako oboustranně podepřeny pružnými klouby.



Obrázek 43: Příčný pohled na prutový model mostovky



Obrázek 44: Svislý pohled na prutový model mostovky mezi svislice 0-8

### 8.5.e. Originální horní ztužení

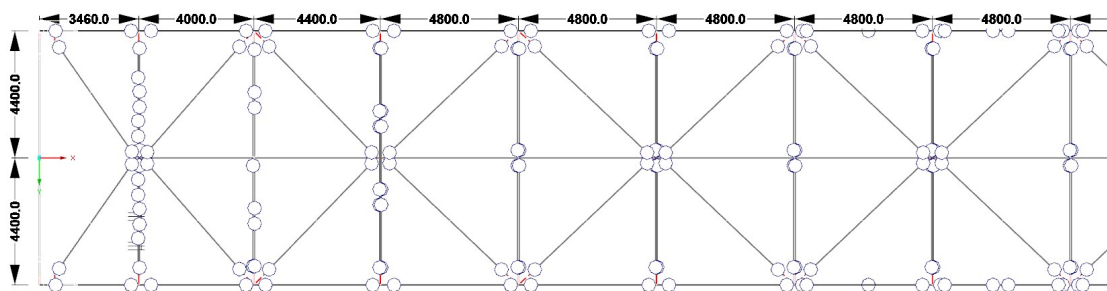
Originální horní ztužení, tvořeno příčným příhradovým nosníkem, podélným členěným prutem a diagonálním ztužením, bylo vymodelováno z prutových prvků s výjimkou portálového horního příčnicku, který obsahuje plošné prvky. Pruty, s výjimkou žebér plochy portálového horního příčnicku, jsou modelovány v jejich těžišťové ose.

Portálový horní příčník je modelován z jedné plochy a čtyř dvojic úhelníku L120x80x12 modelovaných od svislice do poloviny rozpětí příčnicku. Pruty jsou modelovány v okraji plochy a posunuty na správnou pozici pomocí excentricity prutu.

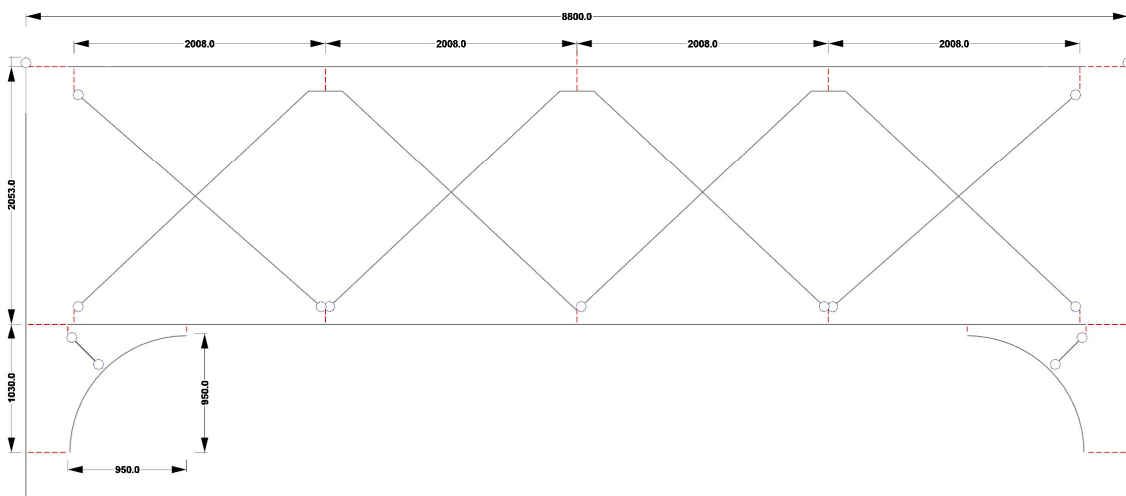
Příhradové horní příčníky jsou modelovány z jednoho dolního pásu s průřezem složených z dvojice U-profilů průřezu U160, proměnným počtem diagonál úhelníkového profilu a členěným horním pásem tvořeným dvěma dvojicemi úhelníku ve tvaru I. Členěný horní pás je zohledněn použitím jednoho prutu bez stojiny s modifikovanou tuhostí. Veškeré průřezy jsou podepřeny oboustranně kloubově, a diagonály jsou mezi sebou připojeny kloubově v místě jejich křížení. Připojení dolního pásu ke svislici je ztuženo pomocí zakřiveného nosníku jehož průřez je tvořen dvojicí úhelníků.

Podélný nosník horního pásu je modelován jako členěný prut složen ze dvou dvojic úhelníků ve tvaru I. Členěný prut je zohledněn použitím jednoho prutu a modifikace tuhosti. Pruty jsou modelovány jako oboustranně vetknuté.

Diagonály jsou modelovány jako dvojice úhelníků ve tvaru X. Pruty jsou modelovány jako oboustranně kloubově podepřené.



Obrázek 45: Svislý pohled na horní ztužení mezi svislicemi 0-8



Obrázek 46: Příčný pohled na příhradový horní příčník 2

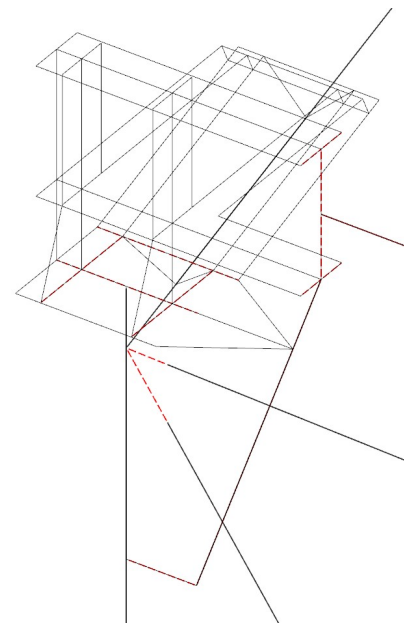
### 8.5.f. Nové horní ztužení

Nové horní ztužení je tvořeno příčnickem se sklopenou stojinou a diagonálním ztužením. Přípoj ke svislici je řešen použitím zesíleného koutového plechového svařence. Portálový příčník má podstatně větší průřez a je připojen k hornímu pásu použitím složitějšího svařence.

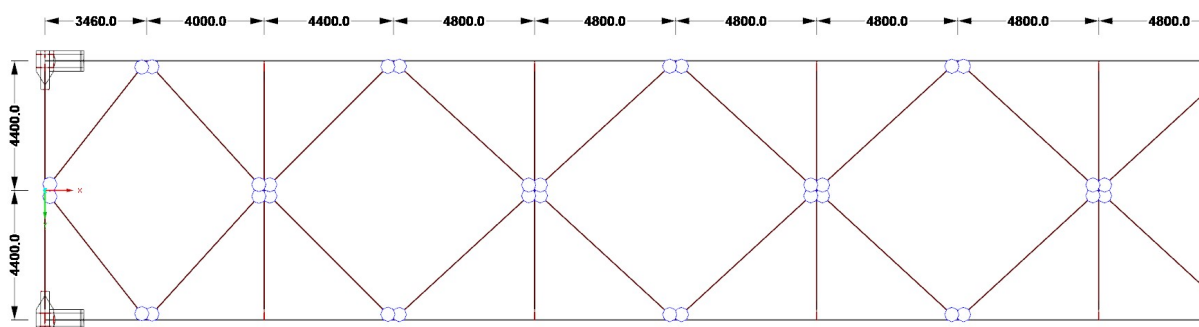
Portálový horní příčník je modelován jako jeden prut ze svařeného I profilu průřezu I640/300/14/20. Prut je oboustranně vetknutý do portálového svařence. Portálový svařenec je modelován z ploch s použitím žebrového ztužení pro zesílení koutového plechu.

Ostatní horní příčníky jsou modelovány jako jeden prut ze svařeného I profilu se sklopenou horní pásnicí. Pásnice průřezu jsou rozměru 180x14 mm a stojina je rozměru 300x12 mm. Příčníky jsou oboustranně vetknuty do plechového svařence. Svařenec je modelován použitím plochy zesílené žebry.

Diagonální ztužení je modelováno pomocí prutových prvků. Průřez diagonálního ztužení je dvojice úhelníků ve tvaru X. Pruty jsou oboustranně kloubově podepřeny.



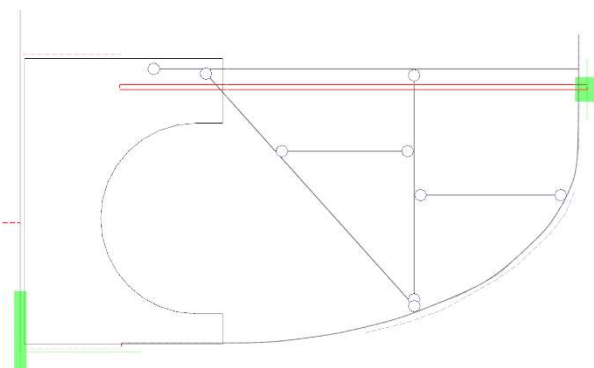
Obrázek 47: Model portálového svařence



Obrázek 48: Svislý pohled na horní ztužení mezi svislice 0-8

### 8.5.g. Boční lávky

Boční lávky jsou modelovány jako prutová konstrukce připojená ke svislici použitím plochy a zakřiveného prutu. Ostatní pruty lávky jsou modelovány jako kloubové. Lávka je modelována s fiktivním podélným ztužením tvořeným pružnými pruty, s motivací eliminovat nerelevantní stavy vlastního kmitání. Lávka je na koncích nosné konstrukce podepřena pružným podepřením ve směru X z důvodu minimalizace nerelevantních stavů vlastního kmitání.



Obrázek 49: Příčný pohled na lávku

## 8.6. TUHOSTI PŘÍPOJŮ:

### 8.6.a. Zdroje pro odhad tuhosti spojů:

Je důležité zajistit, aby tuhost spojů mostu odpovídala reálné situaci. Pro definování tuhosti spojů budou tedy použité dvě předchozí diplomové práce:

- *The impact of the connection stiffness on the behaviour of a Historical Steel Railway Bridge* od Ing. Minor García.  
Cíl této práce je stanovit souvislost mezi tuhostí spojů konstrukce na mostě pod Vyšehradem a chováním výpočetního modelu. Během práce byly vypočítány tuhosti vybraných spojů mostu použitím programu IDEA Statica
- *The prediction of the joint stiffness in riveted Steel Bridges* od Ing. Marcos Bryan Flores Pazmiño  
Cíl této práce je stanovit metodiku odhadu nýtovaných spojů pro historické ocelové mosty. Práce používá mezi svými zdroji výpočty tuhosti spojů na mostě pod Vyšehradem provedené v diplomové práci od Ing. García

### 8.6.b. Postup přiřazení tuhosti spojů.

Pro přiřazení tuhosti spojů bude použit následující postup:

**Postup A:** U Spojů, které jsou studovány v diplomové práci od Ing. García, bude použita vypočítaná tuhost. U spojů totožných nebo dostatečně podobných studovaných spojů bude také použita vypočítaná tuhost.

**Postup B:** U spojů stejného typu jako studované spoje, ale které jsou příliš rozlišné pro použití metody A, budou použity vzorce pro odhadnutí tuhosti spoje, které byly vypočítané v diplomové práci od Ing. Pazmiño. Výsledek těchto vzorců bude násoben opravným součinitelem  $k$ . Součinitel  $k$  slouží ke korekci odhadnuté hodnoty tuhosti použitím vzorce na hodnotu odpovídající výpočtu programem IDEA Statica. V některých případech lze součinitel dále napravit nebo odhadnout.

$$k \cdot S_j \text{ approx} \cong S_j \text{ exact} \quad (1)$$

Kde:

$k$ : součinitel korekce

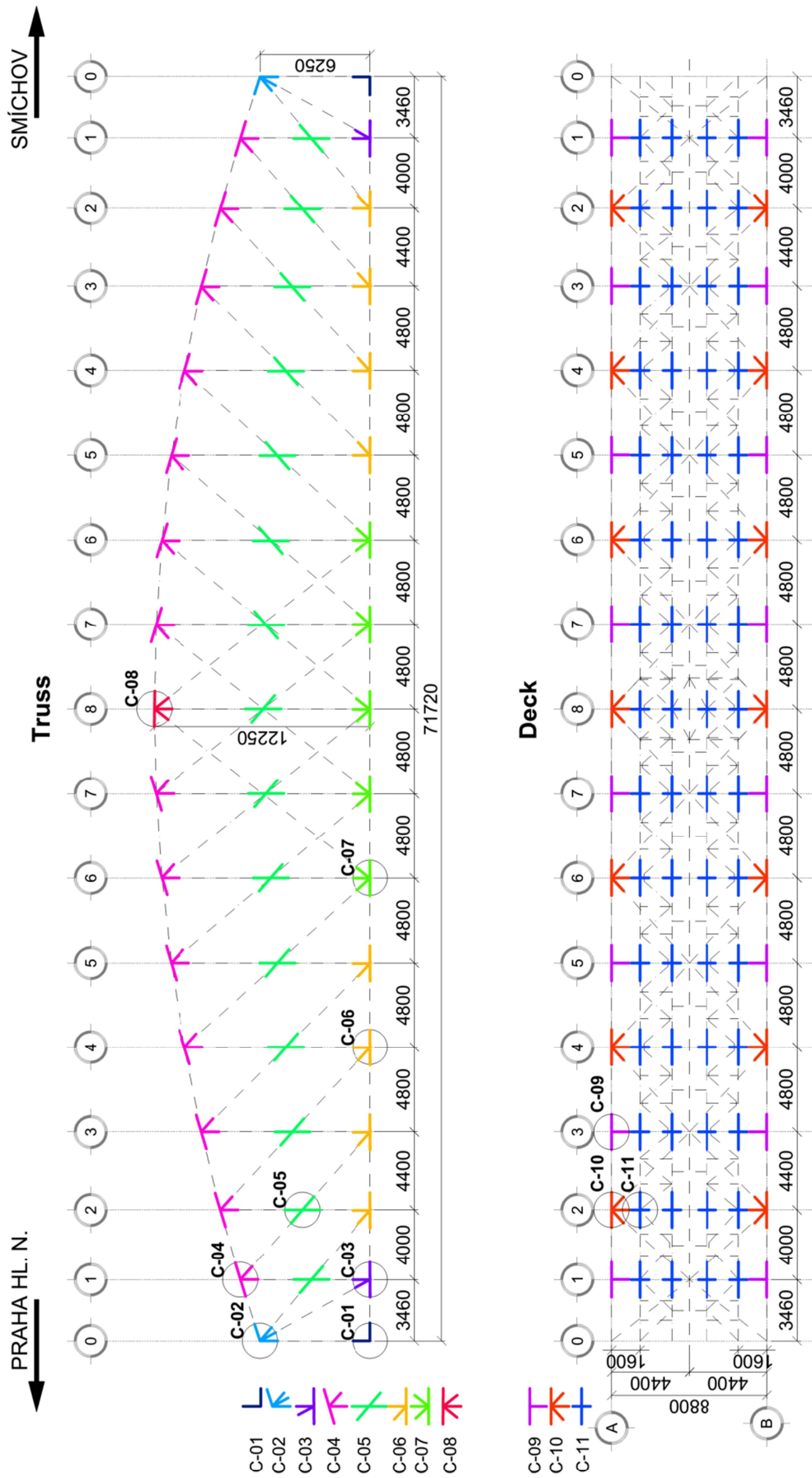
$S_j \text{ approx}$ : Tuhost odhadnutá použitím vzorce od Ing. Pazmiño

$S_j \text{ exact}$ : Hodnota tuhosti z práce Ing. Minor García

**Postup C:** U nýtovaných spojů, které nejsou stejného typu jako studovaný spoj, bude použita hodnota tuhosti ze vzorce pro odhad tuhosti bez součinitele korekce  $k$ .

**Postup D:** Pro ostatní spoje bude použita hodnota tuhosti z přepočtu zatížitelnosti a přechodnosti zpracovaného v roce 2020 společností SUDOP PRAHA a.s.

**Postup E:** V případě, že hodnota v přepočtu zatížitelnosti a přechodnosti není, bude použit dle situace přípoj vetknutý nebo kloubový, popřípadě pružný (například přípoj mezi kolejnicemi a mostnicemi).



Obrázek 50: Přípoje vypočítané v diplomové práci Oscara Minora García

## 8.6.c. Připoje prvků mostovky

### Připoj podélníku k příčnicku

Tuhost připoje podélníků k příčnicku je vypočítána v diplomové práci Oscara Minora Garcíia pod názvem C11, s rotačními tuhostmi  $S_{jy}=75.55 \text{ MN}\cdot\text{m}$  a  $S_{jz}=1.53 \text{ MN}\cdot\text{m}$ . Připoj byl modelován s těmito hodnotami.

### Připoj příčnicku na dolní pás

Tuhost připoje příčnicků na dolní pás je také vypočítána Ing. Garcíiou pod názvem C-09 a C-10. Připoj C-09 označuje připojení příčnicku na dolní pás bez napojení podélného ztužení mostovky, a tím pádem bez přidavného plechu sloužícího k připojení ztužení. Rotační tuhosti spoje C-09 jsou  $S_{jy}=356.09 \text{ MN}\cdot\text{m}$  a  $S_{jz}=72.19 \text{ MN}\cdot\text{m}$ .

Připoj C-10 označuje připoj příčnicku na dolní pás s napojením podélného ztužení mostovky. Připoj obsahuje přidání plechu sloužící k připojení ztužení a zvyšující tuhost. Rotační tuhosti C10 jsou  $S_{jy}=356.09 \text{ MN}\cdot\text{m}$  a  $S_{jz}=81.63 \text{ MN}\cdot\text{m}$ . Také je vypočítána tuhost připoje ztužení okolo globální osy Z, hodnoty  $S_{jz}=4.63 \text{ MN}\cdot\text{m}$

Připoje C-09 a C-10 jsou v diplomové práci Oscara Minora Garcíia počítány se zohledněním koutového ztužení tvořeného dvojicí úhelníku ve tvaru T a plechu. Ve výpočetním modelu je již modelována dvojice úhelníků. Pro použití vypočítané hodnoty rotační tuhosti je tedy potřeba rotační tuhost okolo lokální osy Y (globální osa X) redukovat.

$$\begin{aligned} E &:= 210 \text{ GPa} \\ A &:= 3020 \text{ mm}^2 \\ L &:= 902.1 \text{ mm} \\ \alpha &:= 18.10^\circ \\ e_x &:= 394.2 \text{ mm} \\ e_z &:= 533.0 \text{ mm} \\ k_p &:= \frac{E \cdot A}{L} = 7.0303 \cdot 10^5 \text{ kN m}^{-1} \\ \Sigma K &:= 356.09 \text{ MN m rad}^{-1} \\ k_\varphi &:= \Sigma K - \left( e_x^2 \cdot \sin(\alpha) + e_z^2 \cdot \cos(\alpha) \right) \cdot k_p = 132.311 \text{ MN m} \end{aligned}$$

Obrázek 51: Výpočet redukce rotační tuhosti připoje příčnicku

Hodnota rotační tuhosti příčnicku okolo lokální osy Y po redukci činí  $S_{jz}=132.311 \text{ MN}\cdot\text{m}$ .

### Připoje ztužení:

Připoj vodorovného ztužení na dolní pás je modelován jako kloubový v ose Y, a pružný s tuhostí  $S_{jz}=4.63 \text{ MN}\cdot\text{m}$  v ose Z. Připoj vodorovného ztužení doprostřed příčnicku je modelován jako kloubový.

Tuhosti připojů ostatního ztužení mostovky jsou počítány dle postupu D. Připoj diagonálního podélníkového ztužení k podélníků je oboustranně kloubový. Připoj příčného podélníkového ztužení k podélníků je pružný kloub s relativní rotační tuhostí 0.5 okolo osy Y a nulovou tuhostí okolo osy Z.

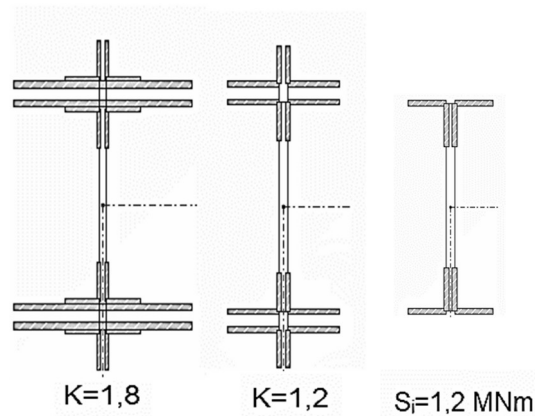
Koutové ztužení připoje příčnicku ke svislici je dle postupu E oboustranně kloubové.

## 8.6.d. Přípoje prvků příhradového nosníku

### Přípoj diagonály s horním a dolním pásem

V diplomové práci Oscara Minora García byly vypočteny rotační tuhosti spojů C-02 až C-08 kolem jejich lokální osy Z (globální osa Y). Pro tyto spoje je možné použít postup A. Počet vypočtených spojů je dostačující na stanovení koeficientu pro postup B pro rotační tuhosti okolo lokální osy Z všech ostatních spojů diagonály s horním a dolním pásem.

Pro rotační tuhost v ose Y (globální osa Z) je použit postup C.



Obrázek 52: Součinitel k dle typu prvku

Spoj diagonála – horní a dolní pás								
Diagonála	Lokální Osa Z (globální Osa Y)					Diagonála	Lokální Osa Y	
	$I_z$ [mm <sup>4</sup> ]	$S_j$ VZOREC [MN·m]	$S_j$ IDEA [MN·m]	K [-]	$S_j$ [MN·m]		$I_y$ [mm <sup>4</sup> ]	$S_j$ VZOREC [MN·m]
1	2.32E+08	43.68	75.3 81.03	1.8	75.30 81.03	1	1.55E+09	306.53
2	3.13E+08	59.86	111.8 -	1.8	111.80 107.75	2	1.66E+09	328.38
3	1.72E+08	31.57	71.46 -	1.8	71.46 56.83	3	1.38E+09	274.01
4	1.22E+08	21.64	- 47.11	1.8	38.95 47.11	4	1.12E+09	221.97
5	7.36E+07	11.97		1.2	14.37	5	1.09E+09	216.18
6	5.28E+07	7.82	- 9.73	1.2	9.39 9.73	6	8.15E+08	160.16
7	2.87E+07	3.01	-	1.2	3.61	7	6.73E+08	131.90
8	4.07E+07	5.40	-	1.2	6.49	8	8.89E+08	174.97
9	1.12E+07	0.00	-	-	1.20	9	2.32E+08	43.67
10	6.35E+06	0.00	1.49 1.19	-	1.49 1.19	10	1.72E+08	31.59

Tabulka 15: Tuhosti spojů diagonál k hornímu a dolnímu pásu

## Přípoj diagonály ke svislici

Tuhost v lokální ose Z jednoho přípoje diagonály ke svislici byla vypočítána v diplomové práci Oscara Minora García pod názvem C-05. Je tedy možné vypočítat koeficient pro metodu B. Pro tyto přípoje byla použita modifikovaná metoda B, a to z důvodu různorodosti průřezů diagonály.

Modifikovaný postup spočívá v přepočtu hodnoty spočítanou dle vzorečku diplomové práce Ing. Pazmiña, a násobením tohoto výsledku součinitelem  $k$  použit při výpočtu tuhostí spojů diagonál k hornímu a dolnímu pásu a dále tuto hodnotu násobit součinitelem  $k_2$ .

$$k \cdot k_2 \cdot S_j \text{ approx} \cong S_j \text{ exact} \quad (2)$$

Součinitel  $k$  tedy slouží jako korekce různorodosti průřezů, a součinitel  $k_2$  slouží jako korekce typu spoje. Pro výpočet součinitele  $k_2$  je použita hodnota tuhosti spoje C-05 násobena součinitelem  $k$ . Pro diagonály 9 a 10, které nemají součinitel  $k$ , ale místo toho mají konstantní hodnotu tuhosti, je definován spoj jako kloubový.

Přípoj v lokální ose Y je počítán dle postupu B se součinitelem korekce 0.8.

Modelování přípoje je řešeno průběžnou svislicí a přerušenu diagonálou připojenou ke svislici oboustranně pružně. Oba pruty diagonály jsou na sebe napojeny 5 mm od spoje se svislicí použitím tuhého prutu. Tuhý prut je připojen použitím přípoje poddajného na posuny, ale tuhého na pootočení. Toto řešení umožňuje vzájemné pootočení diagonály a svislice bez vzájemného pootočení prvků diagonály mezi sebou. Vzhledem k tomuto řešení jsou veškeré hodnoty násobeny hodnotou  $\frac{1}{2}$ .

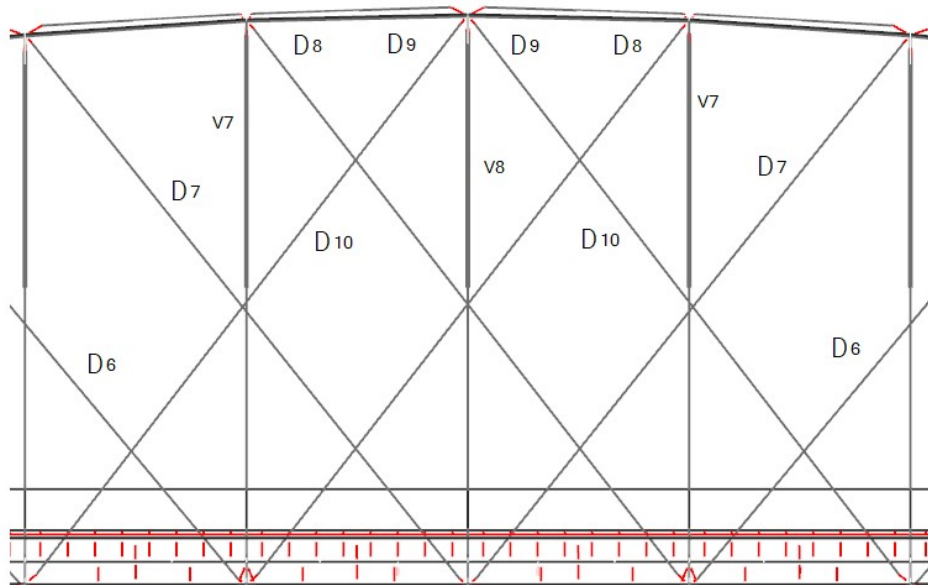
Průběžné diagonály								
Vertikála	Lokální osa Z (globální osa Y)						Lokální osa Y	
	$S_{j \text{ VZOREC}}$ [MN·m]	$S_{j \text{ IDEA}}$ [MN·m]	$S_{j \text{ VZOREC}} \cdot k$ [MN·m]	$k_2$ [-]	$S_{j \text{ res}}$ [MN·m]	$S_{j \frac{1}{2}}$ [MN·m]	$S_{j \text{ VZOREC}}$ [MN·m]	$0.8 \cdot S_{j \frac{1}{2}}$ [MN·m]
1	59.86	-	107.75	0.48	51.72	25.86	328.38	131.35
2	31.57	27.47	56.83	0.48	27.47	13.74	274.01	109.60
3	21.64	-	38.95	0.48	18.70	9.35	221.97	88.79
4	11.97	-	14.37	0.48	6.90	3.45	216.18	86.47
5	7.82	-	9.39	0.48	4.51	2.25	160.16	64.06
6	3.01	-	3.61	0.48	1.73	0.87	131.90	52.76
7	5.40	-	6.49	0.48	3.11	1.56	174.97	69.99

Tabulka 16: Tuhosti spojů v místě křížení diagonál a svislic.



## Přípoj diagonál mezi sebou

Most obsahuje 5 odlišných přípojí diagonál mezi sebou (celkem 16 přípojí).



Obrázek 53: Detail příhrady: křížení diagonál

- Přípoj mezi klesající diagonálou D7 a stoupající diagonálou D10 uprostřed sdruženého pole příhrady je vyřešen přerušením diagonály D10 a kloubovým napojením obou částí D10 na diagonálu D7.
- Přípoj mezi klesající diagonálou D8 a stoupající diagonálou D10 na svislíci V8 je řešen přerušením diagonály D10 a kloubovým napojením obou částí D10. Vzhledem k tomu, že se diagonála kříží se svislicí V8 a diagonálou D8 ve dvou uzlech v těsné blízkosti je vynechán krátký prvek diagonály D10 mezi těmito prvky, připojen bez kloubu, tedy připojen tuze.
- Přípoj mezi klesající diagonálou D9 a stoupající diagonálou D10 uprostřed sdruženého pole příhrady
- Přípoj mezi klesající diagonálou D8 a stoupající diagonálou D9 uprostřed sdruženého pole příhrady je řešen přerušením diagonály D9 a kloubovým napojením obou částí na diagonálu D8.
- Přípoj mezi diagonály D10 na svislíci V8 je řešen přerušením klesající diagonály (klesající ve směru X, tedy směr od Výtoně na Smíchov) a kloubovým připojením obou částí.

## Přípoj svislice s horním a dolním pásem

V diplomové práci Oscara Minora García nejsou vypočteny tuhosti spojů svislice na dolní pás, vzhledem k podobnému typu spoje ke spoji diagonál, a vzhledem k podobnosti průřezu některých svislic k diagonálám D5 až D8 je možno použít postup B, a to se stejným součinitelem korekce jako u diagonál D5 až D8, tedy 1,2.

Postup B se součinitelem korekce 1,2 je tedy použit pro výpočet ohybové tuhosti v lokální ose Z svislice V0 až V2. Pro ostatní hodnoty je použita metoda C, tedy výpočet bez korekce.

Svislice	Osa [-]	I [mm <sup>4</sup> ]	Sj VZOREC [MN·m]	K [-]	Sj [MN·m]
0	y	3.36E+09	669.40	1.00	669.40
	z	1.87E+09	371.91	1.20	446.30
1	y	1.37E+09	272.04	1.00	272.04
	z	1.44E+08	26.06	1.20	31.28
2	y	1.19E+09	235.22	1.00	235.22
	z	9.59E+07	16.44	1.20	19.73
3	y	9.46E+08	186.36	1.00	186.36
	z	7.44E+07	12.15	1.00	12.15
4	y	8.87E+08	174.62	1.00	174.62
	z	7.20E+07	11.66	1.00	11.66
5	y	7.63E+08	149.87	1.00	149.87
	z	4.80E+07	6.85	1.00	6.85
6	y	5.67E+08	110.68	1.00	110.68
	z	3.11E+07	3.47	1.00	3.47
7	y	5.13E+08	99.80	1.00	99.80
	z	1.86E+07	0.97	1.00	0.97
8	y	3.98E+08	76.77	1.00	76.77
	z	8.89E+06	0.00	1.00	0.00

Tabulka 17: Tuhosti spojů svislic k hornímu a dolnímu pásu

### 8.6.e. Ostatní přípoje

#### Přípoje na originálním horním ztužení

Pro přípoje na originálním horním ztužení nejsou žádné informace. Byl proto použit postup E. Přípoje prvků jsou kloubové.

#### Přípoje na novém horní ztužení

Tuhost kloubu diagonálního ztužení nového horního ztužení je stanovena použitím postupu D, a to s relativní tuhostí 0.1 ve směru Y a 0.15 ve směru X. Ostatní spoje jsou zohledněny použitím deskostěnových prvků.

#### Přípoje kolejnic

Kolejnice jsou připojeny na pražce použitím pružného přípoje s volným otáčením. Tuhosti přípoje jsou 460 MN/m ve směru Z. Vzhledem k tomu, že zatížení na kolejích jsou pouze svislá, není příliš důležitá podélná ani příčná tuhost spoje, z toho důvodu je tuhost spoje ve směrech X a Y pouze 0.5 MN/m.

#### Přípoje na lávkách

Na lávkách je použit postup E. přípoje jsou uvažovány jako kloubové.

## 8.7. ZOHLEDNĚNÍ ČLENĚNÝCH PRUTŮ

### 8.7.a. Postup zohlednění členěných prutů

Členěné pruty byly modelovány použitím celistvého prutu. Tento prut má vyšší tuhost než reálný prut, proto je potřeba zohlednit tuhost členěných prutů použitím součinitele tuhosti. Pro zohlednění tohoto součinitele byly v pomocném modelu RFEM vymodelovány členěné pruty a následně byly zatíženy. Výsledná deformace byla porovnána k deformaci celistvého prutu stejné délky. Tuhosti celistvých prutů byly následně iteračně modifikovány, dokud nebyly deformace stejné.

### 8.7.b. Zohlednění členěných svislic

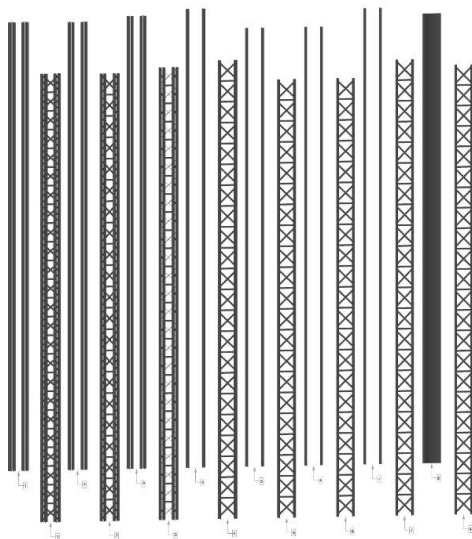
Členěné svislice jsou modelovány z prutových prvků a mají proměnnou délku podle členění prutu, s minimální délkou 10 m. Rozměry členěného prutu odpovídají nejdělsímu úseku na dané svislici. Jsou modelovány celistvé pruty svislic stejné délky za použití průřezů hlavního modelu.

Model obsahuje 8 párů konzol délky přibližně 10 m. s každým párem obsahujícím prutový model svislice a korespondující prut s redukovánými průřezovými charakteristikami.

První zatěžovací stav je moment na konci konzoly. V případě konzoly momentové zatížení nezpůsobuje posouvající sílu, což umožňuje kontrolu ohybových tuhostí. Z deformací prutů vyplývá, že modelové tuhosti jsou stejné, proto nejsou na celistvému prutu měněny.

Druhý zatěžovací stav je síla na konci prutu. Tento stav slouží ke kontrole deformací způsobených smykovou pevností (ohybová pevnost je již zohledněna prvním zatěžovacím stavem). Z výsledné deformace lze poznat, že smyková tuhost členěných prutů je mnohonásobně menší než smyková tuhost celistvých. Byly proto iteračně vyhledány koeficienty násobení smykové tuhosti, které by zajišťovaly stejné hodnoty deformace.

Třetí zatěžovací stav je kroucení a slouží pro vyhledání kroučící tuhosti. Členěné prvky naopak mají vyšší tuhost v kroucení než celistvé.



Obrázek 54: 3D renderování modelu členěných prutů svislic

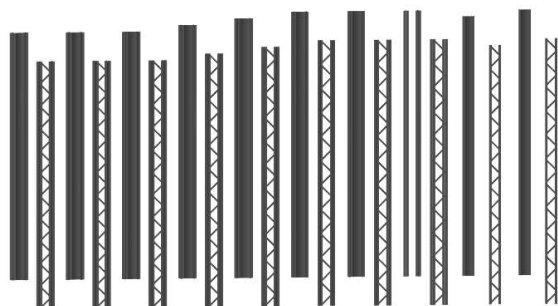
Součinitele průřezových charakteristik svislic						
Svislice	$I_T$ [mm <sup>4</sup> ]	$I_y$ [mm <sup>4</sup> ]	$I_z$ [mm <sup>4</sup> ]	A [mm <sup>2</sup> ]	$A_{vy}$ [mm <sup>2</sup> ]	$A_{vz}$ [mm <sup>2</sup> ]
V1	2.28	1.00	1.00	1.00	1.00	0.049
V2	2.25	1.00	1.00	1.00	1.00	0.048
V3	3.96	1.00	1.00	1.00	1.00	0.063
V4	1.46	1.00	1.00	1.00	1.00	0.0395
V5	1.91	1.00	1.00	1.00	1.00	0.0397
V6	1.47	1.00	1.00	1.00	1.00	0.0365
V7	1.24	1.00	1.00	1.00	1.00	0.039
V8	1.05	1.00	1.00	1.00	1.00	0.039

Tabulka 18: Součinitele průřezových charakteristik svislic

### 8.7.c. Zohlednění členěných diagonál

Modelování členěných diagonál je řešeno stejným způsobem jako modelování svislic, s modelem obsahujícím 10 párů diagonál délky přibližně 8 m.

Model je zatížen stejně jak model svislic a součinitele násobení tuhostí průřezů jsou stanoveny stejným způsobem.



Obrázek 55: renderování modelu členěných prutů diagonál

Součinitele průřezových charakteristik diagonál						
Diagonála	$I_T$ [mm <sup>4</sup> ]	$I_y$ [mm <sup>4</sup> ]	$I_z$ [mm <sup>4</sup> ]	A [mm <sup>2</sup> ]	$A_{vy}$ [mm <sup>2</sup> ]	$A_{vz}$ [mm <sup>2</sup> ]
D1	1.47	1.00	1.00	1.00	1.00	0.06
D2	1.81	1.00	1.00	1.00	1.00	0.065
D3	1.21	1.00	1.00	1.00	1.00	0.063
D4	1.02	1.00	1.00	1.00	1.00	0.065
D5	0.54	1.00	1.00	1.00	1.00	0.051
D6	0.46	1.00	1.00	1.00	1.00	0.05
D7	0.35	1.00	1.00	1.00	1.00	0.05
D8	0.52	1.00	1.00	1.00	1.00	0.049
D9	0.14	1.00	1.00	1.00	1.00	0.04
D10	0.14	1.00	1.00	1.00	1.00	0.045

Tabulka 19: Součinitele průřezových charakteristik diagonál

### 8.7.d. Zohlednění členěného dolního pásu

Dolní pás je tvořen dvojití T prutů periodicky spojených plechy. Členěné pruty byly modelovány použitím deskostěnnového modelu. Pruty jsou modelovány jako konzoly. Stojiny prutů jsou modelovány použitím plošných prvků, a pásnice s úhelníky jsou modelovány jako žebra. Přípoj je modelován jako plocha.

Součinitele průřezových charakteristik dolního pásu						
Průřez	$I_T$ [mm <sup>4</sup> ]	$I_y$ [mm <sup>4</sup> ]	$I_z$ [mm <sup>4</sup> ]	A [mm <sup>2</sup> ]	$A_{vy}$ [mm <sup>2</sup> ]	$A_{vz}$ [mm <sup>2</sup> ]
U1-U3	0.021	1.00	1.00	1.00	0.0015	1.00
U4	0.037	1.00	1.00	1.00	0.003	1.00
U5	0.041	1.00	1.00	1.00	0.004	1.00
U6	0.048	1.00	1.00	1.00	0.005	1.00
U7-U8	0.053	1.00	1.00	1.00	0.007	1.00

Tabulka 20: Součinitele průřezových charakteristik dolního pásu

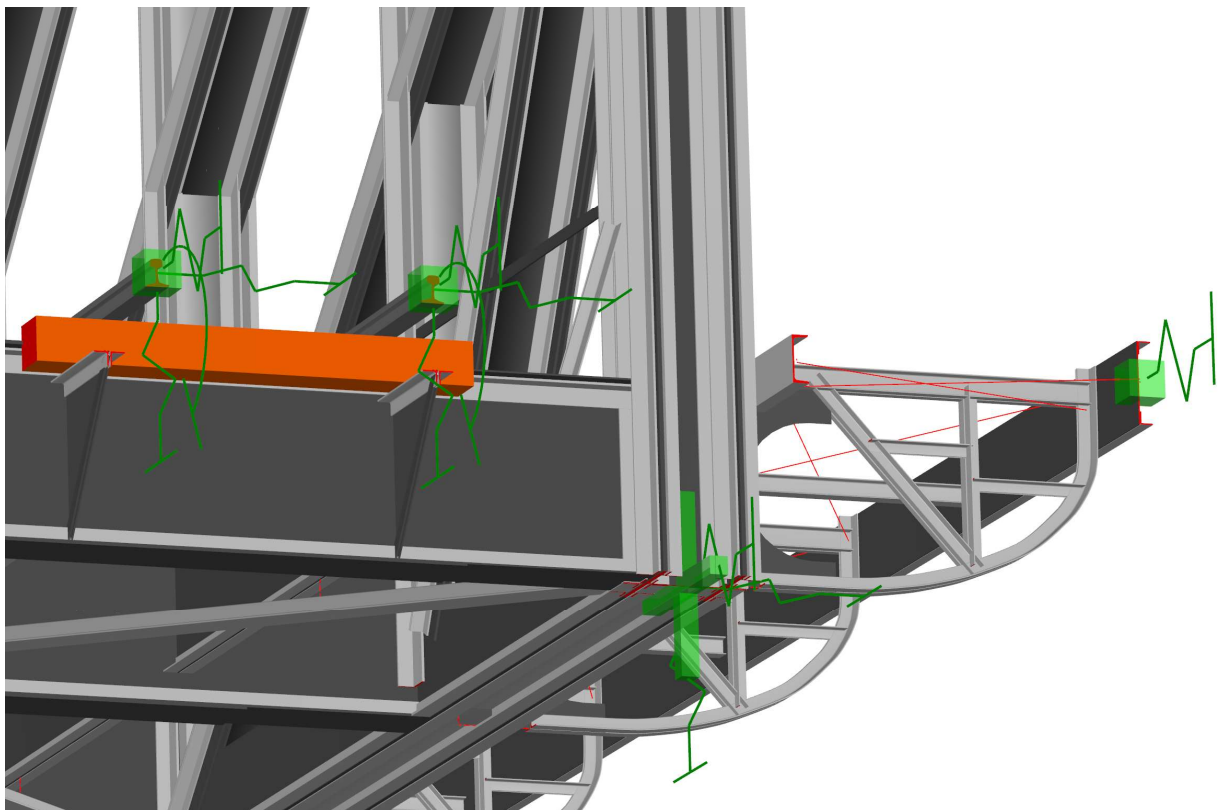
## 8.8. PODEPŘENÍ MODELU

Model je podepřen použitím 16 uzlových podpor.

Hlavní podepření modelu je zajištěno 4 podporami podepírajícími svislici V0. Tyto uzlové podpory jsou uvažované jako pružné. Tuhosti těchto podpor budou vybrány na základě porovnání chování modelu se zatěžovací zkouškou, která bude provedena v následující kapitole.

Kolejnicové podepření modelu slouží k prodloužení kolejnic za poslední modelovaný pražec a tím prodloužení jízdné dráhy. Kolejnice jsou prodlouženy na následující pražec za koncem nosné konstrukce, kde jsou podepřeny pružnou uzlovou podporou. Celkem je tedy 8 podpor kolejnic. Podpory jsou osově tuhosti 300 MN/m ve směru Z, tuhosti 0.5 MN/m v osách X a Y a rotační tuhosti 50 000 MN·m okolo globální osy Y.

Podepření lávek slouží k minimalizaci nerelevantních tvarů volného kmitání. Lávky jsou podepřeny na obou koncích pružinou s tuhostí 25 MN/m ve směru X.



Obrázek 56: Perspektivní 3D pohled na podepření

---

## 9. VALIDACE MODELU

---

### 9.1. ÚVOD

#### 9.1.a. Metoda

Pro zajištění správnosti modelu je potřeba model validovat. Validace bude provedena porovnáním chování nosné konstrukce oproti Statické a dynamické zkoušce mostu provedené v roce 2017 a přepočtu zatížitelnosti a přechodnosti zpracovaného v roce 2020 společností SUDOP PRAHA a.s..

Během validace modelu bude také stanovena tuhost ložisek podpírající nosnou konstrukci. Ložiska jsou navržena jako pevný kloub na jedné straně a posuvný kloub na druhé straně, vzhledem ke stáří ložisek a jejich korozi je ale potřeba počítat s tím, že chování ložisek v dnešní době nebude odpovídat tomuto návrhu.

Stanovení tuhosti ložisek bude provedeno vytvořením více kopií modelu mostu, s různými variantami podepření. Bude zaprvé porovnáno dynamické chování konstrukce a následně statické chování. Cíl je najít variantu podepření nejvíce napodobující statické a dynamické chování reálné konstrukce.

#### 9.1.b. Vytvořené modely

Pro stanovení tuhosti podpor bylo vytvořeno 13 modelů s různými hodnoty tuhosti. Model VALIDACE\_PRUZHNE\_STAT používá hodnoty tuhosti uvažované v přepočtu zatížitelnosti a přechodnosti pro statickou analýzu. Model VALIDACE\_PRUZHNE\_STAT\_INV používá tyto stejné hodnoty, ale na opačné straně nosné konstrukce. Model VALIDACE\_PRUZHNE\_DYN používá hodnoty uvažované přepočtem zatížitelnosti a přechodnosti.

Tuhosti podpor ve validačních modelech [MN/m]												
Jméno modelu:	Tuhosti podpor na začátku konstrukce						Tuhosti podpor na konci konstrukce					
	K <sub>x</sub>	K <sub>y</sub>	K <sub>z</sub>	K <sub>φx</sub>	K <sub>φy</sub>	K <sub>φz</sub>	K <sub>x</sub>	K <sub>y</sub>	K <sub>z</sub>	K <sub>φx</sub>	K <sub>φy</sub>	K <sub>φz</sub>
VALIDACE_VETKNUTE	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞
VALIDACE_PRUZHNE_STAT	250	500	5000	∞	0	∞	0	500	5000	∞	0	∞
VALIDACE_PRUZHNE_STAT_INV	0	500	5000	∞	0	∞	250	500	5000	∞	0	∞
VALIDACE_PRUZHNE_DYN	500	500	5000	∞	0	∞	500	500	5000	∞	0	∞
VALIDACE_KLOUBY	∞	∞	∞	0	0	0	∞	∞	∞	0	0	0
VALIDACE_(750,5000,T,T,K,T)(750,5000,T,T,K,T)	750	5000	∞	∞	0	∞	750	5000	∞	∞	0	∞
VALIDACE_(750,5000,5000,T,K,T)(750,5000,5000,T,K,T)	750	5000	5000	∞	0	∞	750	5000	5000	∞	0	∞
VALIDACE_(600,5000,T,T,K,T)(600,5000,T,T,K,T)	600	5000	∞	∞	0	∞	600	5000	∞	∞	0	∞
VALIDACE_(600,5000,5000,T,K,T)(600,5000,5000,T,K,T)	600	5000	5000	∞	0	∞	600	5000	5000	∞	0	∞
VALIDACE_(300,5000,T,T,K,T)(5000,5000,T,T,K,T)	300	5000	∞	∞	0	∞	5000	5000	∞	∞	0	∞
VALIDACE_(300,5000,5000,T,K,T)(5000,5000,5000,T,K,T)	300	5000	5000	∞	0	∞	5000	5000	5000	∞	0	∞
VALIDACE_(250,5000,T,T,K,T)(5000,5000,T,T,K,T)	250	5000	∞	∞	0	∞	5000	5000	∞	∞	0	∞
VALIDACE_(250,5000,5000,T,K,T)(5000,5000,5000,T,K,T)	250	5000	5000	∞	0	∞	5000	5000	5000	∞	0	∞

Tabulka 21: Zkoušené hodnoty tuhostí podpor pro validaci

## 9.1. VÝBĚR VARIANTY PODEPŘENÍ

### 9.1.a. Porovnání vlastních frekvencí validačních modelů:

Pro volbu jednoho ze 13 modelů budou porovnány vlastní frekvence modelů vůči vlastním frekvencím měřeným během zatěžovací zkoušky a vlastním frekvencím přepočtu zatížitelnosti a přechodnosti.

Pro veškeré validační modely bylo vypočteno prvních 16 vlastních čísel. Pro každé vlastní číslo měřeno v terénu je vyhledáno nejbližší vlastní číslo daného validačního modelu, tento krok je také proveden pro vlastní čísla stanovených výpočtem zatížitelnosti a přechodnosti.

Pro každé vlastní číslo daného zdroje tedy bylo přiřazeno jedno vlastní číslo, následný krok výpočtu spočívá v porovnání těchto dvou hodnot použitím procentuální hodnoty rozdílu. Následně byly pro oba zdroje vypočteny průměrné hodnoty, a mediány absolutních hodnot těchto rozdílů. Byly pak porovnány průměrné hodnoty a mediány rozdílů veškerých validačních modelů.

VALIDACE_(750,5000,T,T,K,T)(750,5000,T,T,K,T)					VALIDACE_(750,5000,5000,T,K,T)(750,5000,5000,T,K,T)				
f [Hz]	Porovnání: měření		Porovnání: přepoččet		f [Hz]	Porovnání: měření		Porovnání: přepoččet	
	Nejbližší tv.	rozdíl [%]	Nejbližší tv.	rozdíl [%]		Nejbližší tv.	rozdíl [%]	Nejbližší tv.	rozdíl [%]
2.103	1	0.622	1	3.596	2.098	1	0.383	1	3.350
3.167	2	-5.180	2	11.123	3.153	2	-5.599	2	10.632
4.247	3	-3.696	3	2.337	4.211	3	-4.512	3	1.470
4.433	3	0.522	4	1.908	4.427	3	0.385	4	1.770
5.485	4	-5.104	6	3.883	5.459	4	-5.554	6	3.390
5.641	4	-2.405	6	6.837	5.632	4	-2.561	6	6.667
6.324	5	-7.544	7	-1.342	6.323	5	-7.558	7	-1.357
6.753	5	-1.272	7	5.351	6.752	5	-1.287	7	5.335
6.828	5	-0.175	7	6.521	6.83	5	-0.146	7	6.552
7.26	5	6.140	8	-4.222	7.258	5	6.111	8	-4.248
7.286	5	6.520	8	-3.879	7.286	5	6.520	8	-3.879
7.288	5	6.550	8	-3.852	7.287	5	6.535	8	-3.865
7.355	5	7.529	8	-2.968	7.355	5	7.529	8	-2.968
7.356	5	7.544	8	-2.955	7.356	5	7.544	8	-2.955
7.356	5	7.544	8	-2.955	7.356	5	7.544	8	-2.955
7.356	5	7.544	8	-2.955	7.356	5	7.544	8	-2.955
průměr	4.743160061		4.167747919		průměr	4.832027313		4.021808288	
medián	5.659995798		3.724150929		medián	5.854956753		3.369952605	
VALIDACE_(750,5000,T,T,K,T)(750,5000,T,T,K,T)	Porovnání: měření		Porovnání: přepoččet		VALIDACE_(750,5000,5000,T,K,T)(750,5000,5000,T,K,T)	Porovnání: měření		Porovnání: přepoččet	
	Vlastní tvar	rozdíl [%]	Vlastní tvar	rozdíl [%]		Vlastní tvar	rozdíl [%]	Vlastní tvar	rozdíl [%]
	1	0.622	1	3.596		1	0.383	1	3.350
	2	-5.180	2	11.123		2	-5.599	2	10.632
	3	-3.696	3	2.337		3	-4.512	3	1.470
	4	-2.405	4	1.908		4	-2.561	4	1.770
	5	-0.175	5	-		5	-0.146	5	-
			6	3.883				6	3.390
			7	-1.342				7	-1.357
			8	-2.955				8	-2.955
			9	-				9	-
		10	-			10	-		
průměr	2.416		3.878		průměr	2.640		3.561	
medián	2.405		2.955		medián	2.561		2.955	

Tabulka 22: Příklad porovnání vlastních tvarů pro dva validační modely

Porovnání vlastních tvarů validačních modelů				
Model	Porovnání s měřením v terénu		Porovnání se přepočtem SUDOP	
	průměr	medián	průměr	medián
VALIDACE_VETKNUTE	2.884 %	<b>1.228 %</b>	2.884 %	4.716 %
VALIDACE_PRUZHNE_STAT	4.566 %	3.651 %	4.105 %	2.955 %
VALIDACE_PRUZHNE_STAT_INV	4.605 %	3.633 %	4.052 %	2.955 %
VALIDACE_PRUZHNE_DYN	3.154 %	2.855 %	3.428 %	2.955 %
VALIDACE_KLOUBY	2.840 %	1.972 %	5.085 %	3.911 %
VALIDACE_(750,5000,T,T,K,T)(750,5000,T,T,K,T)	<b>2.416 %</b>	2.405 %	3.878 %	2.955 %
VALIDACE_(750,5000,5000,T,K,T)(750,5000,5000,T,K,T)	2.640 %	3.561 %	2.561 %	2.955 %
VALIDACE_(600,5000,T,T,K,T)(600,5000,T,T,K,T)	2.472 %	2.612 %	3.969 %	2.955 %
VALIDACE_(600,5000,5000,T,K,T)(600,5000,5000,T,K,T)	2.698 %	2.561 %	3.672 %	2.955 %
VALIDACE_(300,5000,T,T,K,T)(5000,5000,T,T,K,T)	2.595 %	3.654 %	<b>2.180 %</b>	2.955 %
VALIDACE_(300,5000,5000,T,K,T)(5000,5000,5000,T,K,T)	2.826 %	3.349 %	2.215 %	<b>2.942 %</b>
VALIDACE_(250,5000,T,T,K,T)(5000,5000,T,T,K,T)	2.644 %	3.603 %	2.232 %	<b>2.942 %</b>
VALIDACE_(250,5000,5000,T,K,T)(5000,5000,5000,T,K,T)	2.882 %	3.301 %	2.336 %	2.955 %

Tabulka 23: Výsledek porovnání vlastních tvarů všech validačních modelů

### 9.1.b. Porovnání napětí validačních modelů

Během zatěžovací zkoušky byl staticky zatížen most lokomotivy, a to ve třech zatěžovacích stavech. Byly měřeny hodnoty napětí na příčnících, podélnících, diagonálách a na dolním pásu s použitím tenzometrů.

Ve validačních modelech byly tedy tyto zatěžovací stavy modelovány, vypočteny, a jejich vnitřní síly exportovány do programu Microsoft Excel. Následně byla vypočítána napětí v bodech, kde byly na reálné konstrukci uloženy tenzometry.

Porovnání spočteného napětí a napětí zatěžovací zkoušky – průměr ze všech ZS								
Model	Stat - Totální deformace				Se - Rozdíl deformace po odtížení			
	Všechny senzory		Diagonály a d. pás		Všechny senzory		Diagonály a d. pás	
	Průměr rozdílu	Medián rozdílu	Průměr rozdílu	Medián rozdílu	Průměr rozdílu	Medián rozdílu	Průměr rozdílu	Medián rozdílu
VALIDACE_VETKNUTE	68.6%	65.9%	74.9%	64.6%	27.8%	19.7%	30.2%	21.6%
VALIDACE_PRUZHNE_STAT	114.2%	43.3%	84.9%	37.1%	26.3%	22.0%	21.9%	18.9%
VALIDACE_PRUZHNE_STAT_INV	110.4%	45.0%	83.9%	37.2%	26.2%	21.6%	<b>21.9%</b>	18.8%
VALIDACE_PRUZHNE_DYN	53.5%	27.7%	44.5%	<b>24.8%</b>	25.7%	19.7%	22.4%	19.1%
VALIDACE_KLOUBY	66.8%	63.7%	72.6%	61.9%	27.6%	<b>19.5%</b>	29.9%	21.2%
VALIDACE_(750,5000,T,T,K,T)(750,5000,T,T,K,T)	51.7%	28.3%	45.8%	29.3%	25.9%	19.6%	23.7%	19.4%
VALIDACE_(750,5000,5000,T,K,T)(750,5000,5000,T,K,T)	<b>51.5%</b>	28.3%	45.6%	29.3%	25.9%	19.6%	23.7%	19.4%
VALIDACE_(600,5000,T,T,K,T)(600,5000,T,T,K,T)	52.1%	<b>26.5%</b>	44.3%	25.0%	25.8%	19.5%	22.9%	19.1%
VALIDACE_(600,5000,5000,T,K,T)(600,5000,5000,T,K,T)	52.1%	26.8%	<b>44.2%</b>	25.0%	25.8%	19.5%	22.9%	19.1%
VALIDACE_(300,5000,T,T,K,T)(5000,5000,T,T,K,T)	51.6%	27.7%	44.5%	25.3%	25.7%	19.8%	22.7%	<b>18.7%</b>
VALIDACE_(300,5000,5000,T,K,T)(5000,5000,5000,T,K,T)	51.5%	27.6%	44.4%	25.4%	25.7%	19.8%	22.6%	18.7%
VALIDACE_(250,5000,T,T,K,T)(5000,5000,T,T,K,T)	53.2%	28.8%	44.4%	25.4%	<b>25.6%</b>	19.9%	22.1%	18.8%
VALIDACE_(250,5000,5000,T,K,T)(5000,5000,5000,T,K,T)	53.2%	29.0%	44.4%	25.5%	25.6%	19.9%	22.1%	18.8%

Tabulka 24: Porovnání spočteného napětí validačních modelů vůči napětí změřeno během zatěžovací zkoušky

### 9.1.c. Výběr varianty

Na základě porovnání byla vybrána varianta VALIDACE\_(300,5000,5000,T,K,T)(5000,5000,5000,T,K,T). Důvodem byla snaha emulovat degradovaný posuvný kloub na jednom konci nosné konstrukce. Bylo tedy rozhodnuto vybrat variantu s různými hodnoty ve směru X.

Z těchto variant měla vybraná varianta nejpodobnější vlastní tvary a frekvence kmitání.



## 9.1. POROVNÁNÍ DYNAMICKÉHO CHOVÁNÍ

### 9.1.a. Úvod:

Pro validaci modelu je potřeba porovnat nejen vlastní frekvence modelu, ale i vlastní tvary. Z tohoto důvodu budou vizuálně porovnány vlastní tvary volného kmitání modelu s kmitáním modelu přepočtu zatížitelnosti a přechodnosti SUDOP a.s. a také vůči tvarům zjištěny během zatěžovací zkoušky mostu.

Je potřebné brát v úvahu, že během dynamické zatěžovací zkoušky bylo použito omezený počet snímačů, a že most byly pouze měřeny kmitání konstrukce způsobeny přejezdy a také lokální seizmicitou (například průjezdy tramvají způsobily velké skoky měřených hodnot).

### 9.1.b. Vlastní tvary

Pro první Vlastní tvar je tvar kmitání modelu totožný s tvarem z přepočtu zatížitelnosti, a s tvarem měřený během zatěžovací zkoušky. Rozdíl mezi hodnotou vlastní frekvence modelu a přepočtu činí  $-1.09\%$ . Při porovnání s hodnotou ze zatěžovací zkoušky je tento rozdíl  $-0.14\%$ . 1. Vlastní frekvence modelu je tím pádem velmi realistická.

Pro druhý vlastní tvar má model totožný tvar k modelu přepočtu. Vlastní tvar ze zkoušky je obtížně čitelný, ale naznačuje podobnost vlastních tvarů, s možnou výjimkou většího sklonu mostovky. Rozdíl mezi hodnotou vlastní frekvence modelu a přepočtu činí  $-1.98\%$ . Při porovnání s hodnotou ze zatěžovací zkoušky je tento rozdíl  $1.182\%$ . Hodnota vlastní frekvence je tedy mezi těmito hodnoty.

Třetí vlastní tvary jsou totožné, s rozdílem mezi modelem a modelem z přepočtu zatížitelnosti hodnoty  $-0.14\%$ , pro měření je tento rozdíl  $1.14\%$ .

Čtvrtý vlastní tvar kmitání modelu částečně odpovídá pátému vlastnímu tvaru modelu přepočtu zatížení, s rozdílem vlastního čísla  $3.02\%$ . Vlastní tvary se liší v chování horního pásu.

Pátý vlastní tvar je stejný tvaru modelu přepočtu zatížitelnosti a výsledku zkoušky, s rozdílem mezi modelem a modelem z přepočtu zatížitelnosti hodnoty  $-0.69\%$ , pro měření ze zkoušky je tento rozdíl  $1.18\%$ .

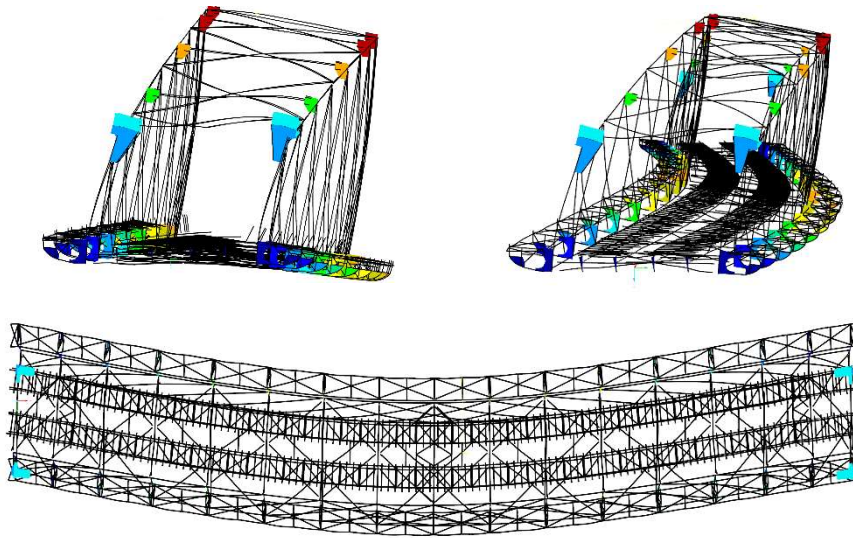
### 9.1.c. Závěr porovnání

Model má velice podobné dynamické chování oproti reálné konstrukce, a také vůči modelu přepočtu zatížitelnosti a přechodnosti. První vlastní frekvence jsou téměř totožné, s rozdílem  $0.14\%$  oproti reálné konstrukce. Kromě vlastního tvaru 4 jsou vlastní tvary 1-5 totožné s vlastními tvary modelu přepočtu a vlastními tvary měřené v terénu.

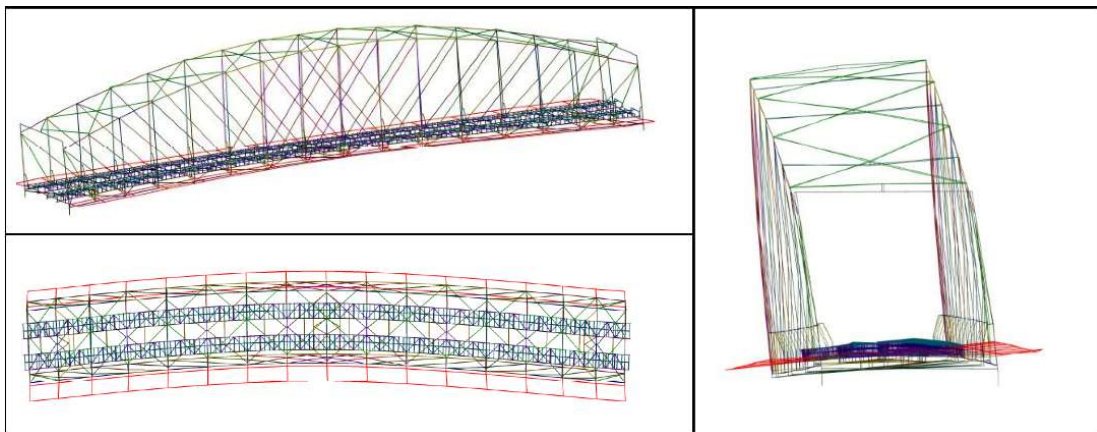
Model odpovídá reálné konstrukci, dá se tedy používat pro další výpočty.

## 9.1.d. Grafické porovnání vlastních tvarů

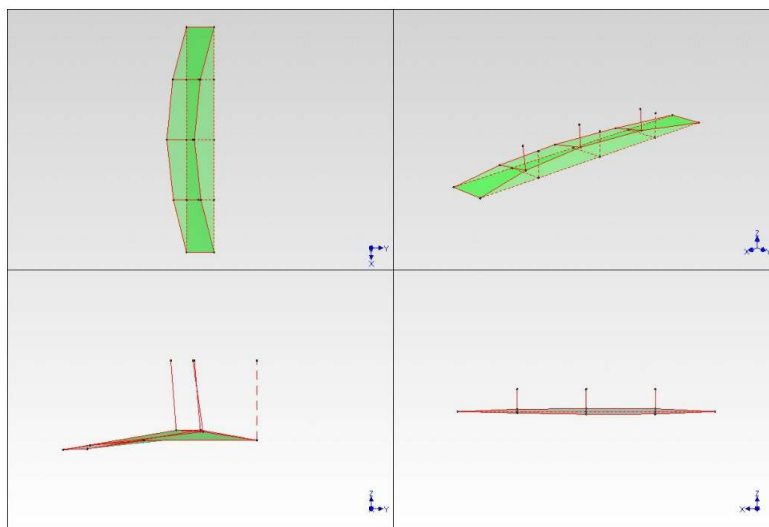
### 1. Vlastní tvar



Obrázek 57: 1. vlastní tvar modelu  $f_1=2.105$  Hz

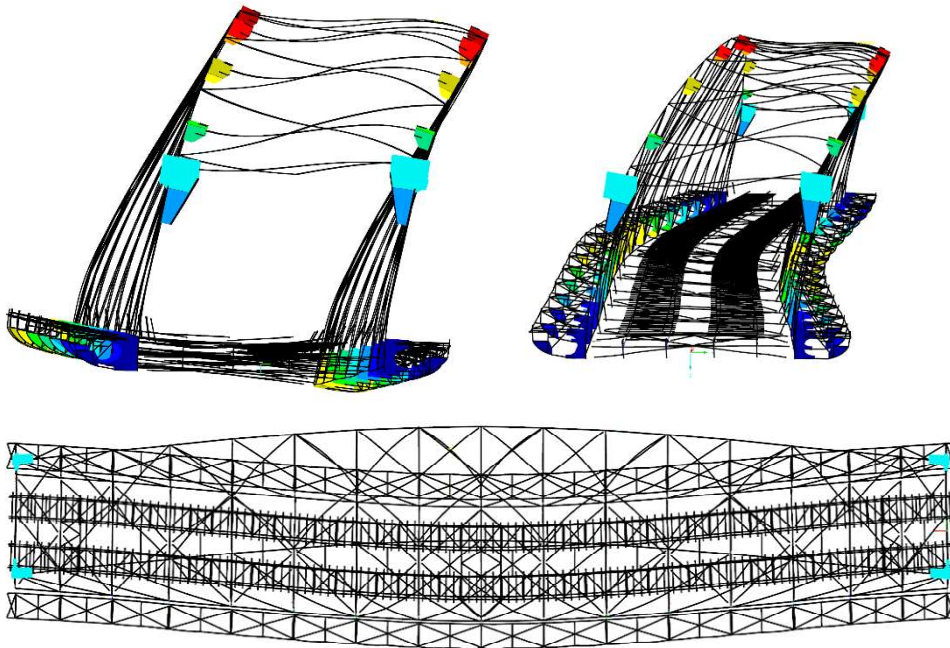


Obrázek 58: 1. vlastní tvar z přepočtu zatížitelnosti a přechodnosti  $f_1=1.99$  Hz (2)

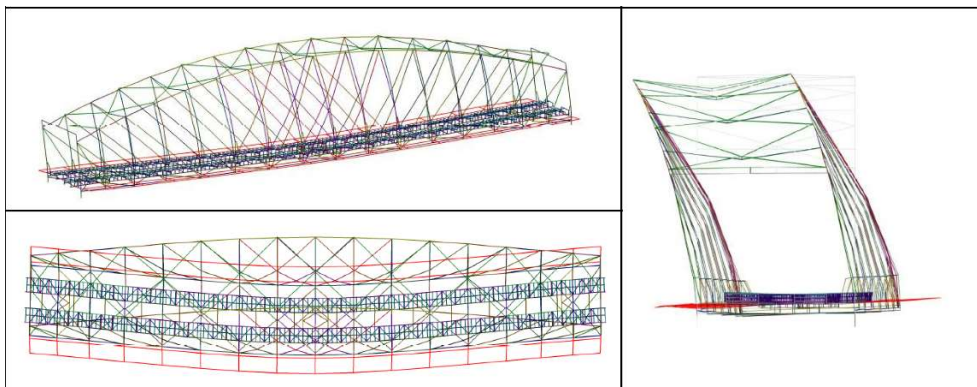


Obrázek 59: 1. vlastní tvar kmitání z měření v terénu  $f_1=2.09$  Hz (11)

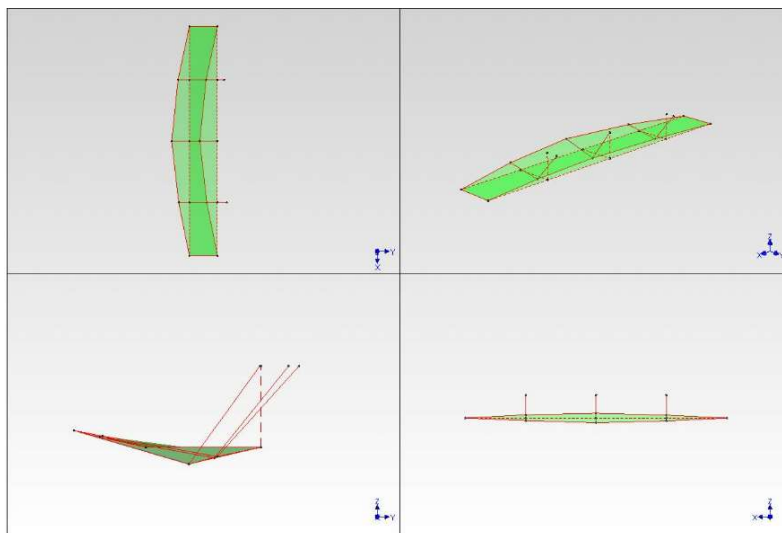
## 2. Vlastní tvar



Obrázek 60: 2. vlastní tvar modelu  $f_2=3.153$  Hz

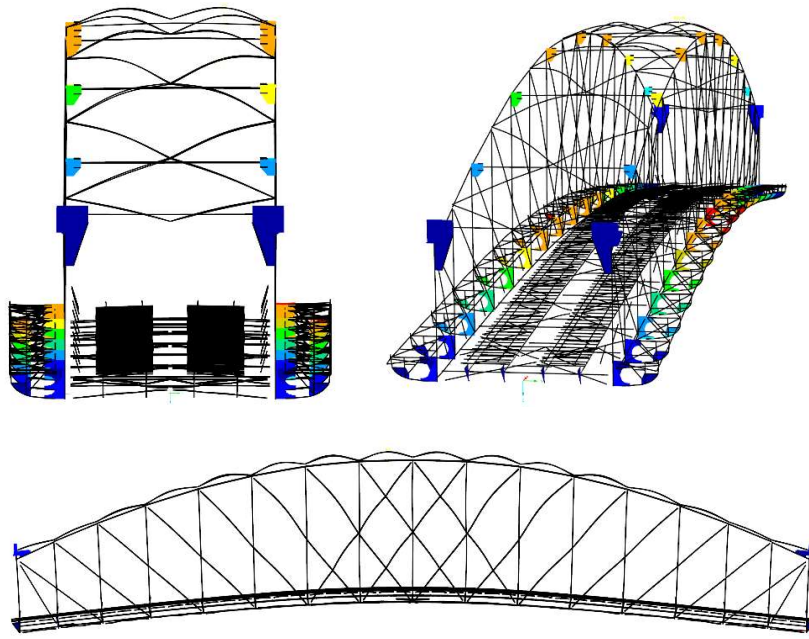


Obrázek 61: 2. vlastní tvar kmitání z přepočtu zatížitelnosti a přechodnosti  $f_2=2.84$  Hz (2)

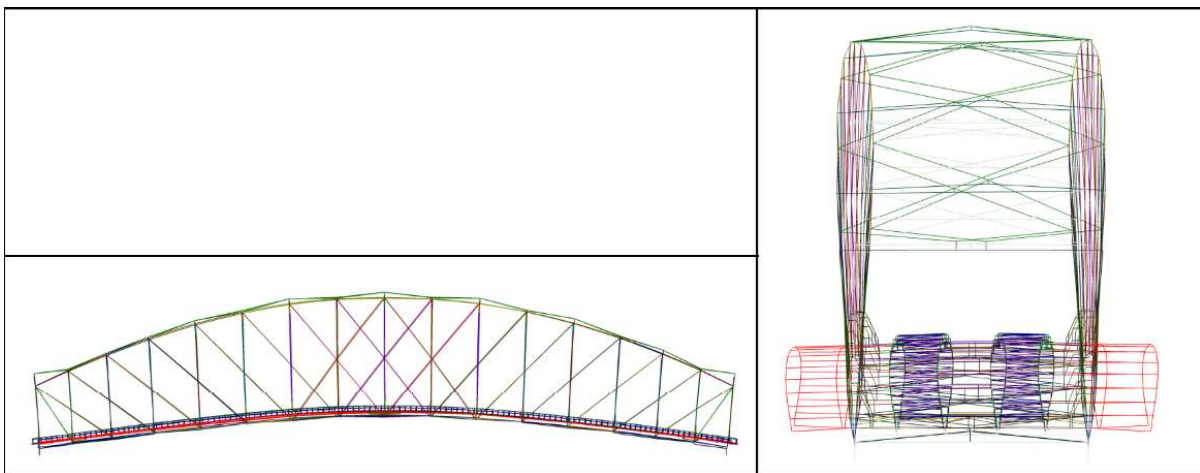


Obrázek 62: 1. vlastní tvar kmitání z měření v terénu  $f_2=3.34$  Hz (11)

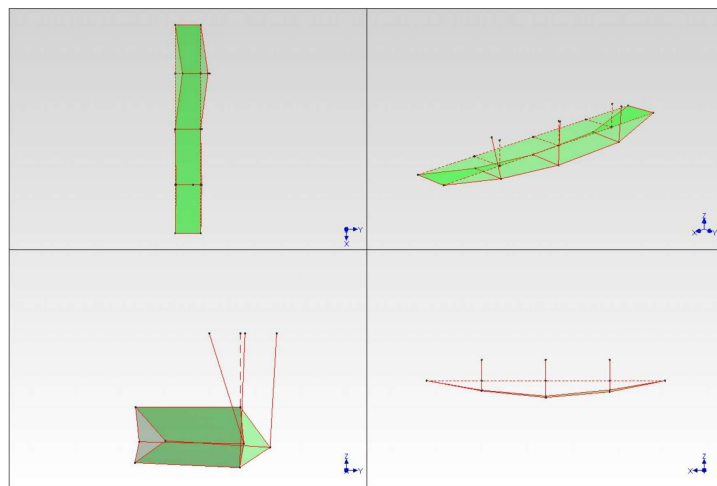
### 3. Vlastní tvar



Obrázek 63: 3. vlastní tvar modelu  $f_3=4.171$  Hz

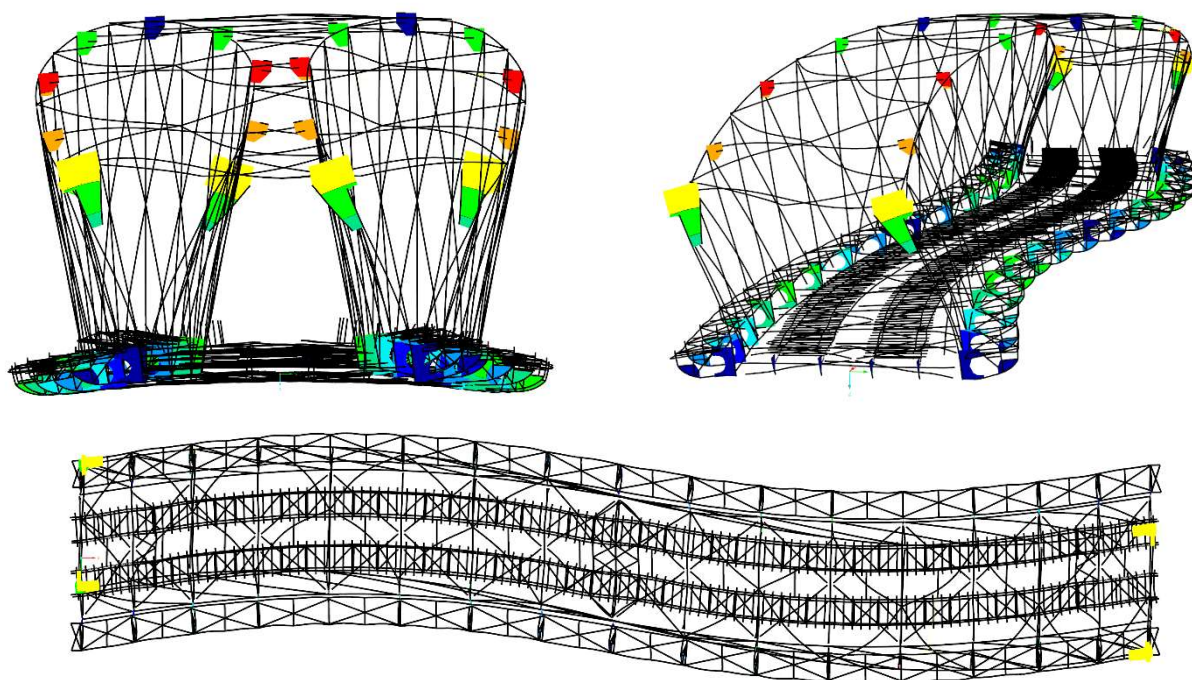


Obrázek 64: 3. vlastní tvar kmitání z přepočtu zatížitelnosti a přechodnosti  $f_3=4.14$  Hz (2)

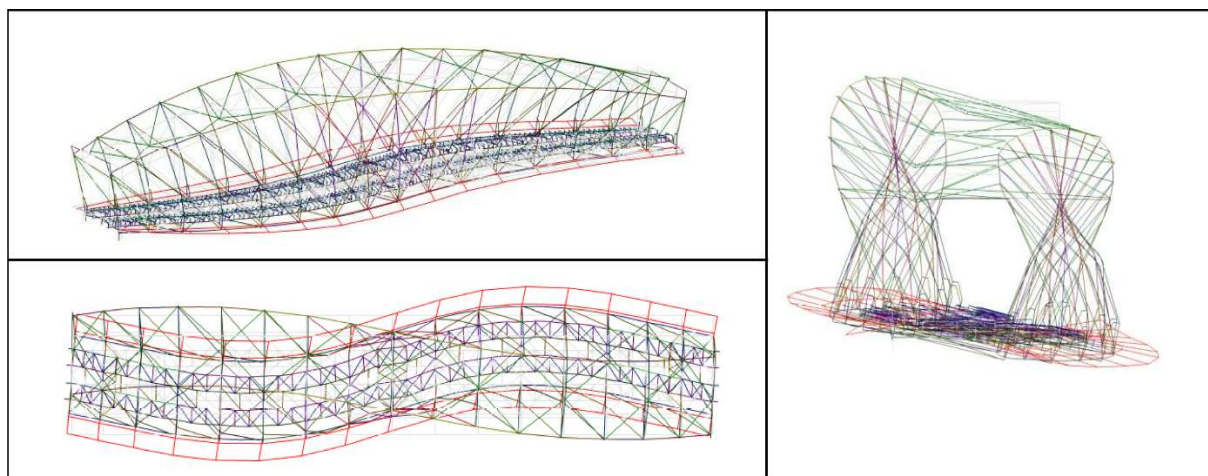


Obrázek 65: 3. vlastní tvar kmitání z přepočtu zatížitelnosti a přechodnosti  $f_3=4.41$  Hz (11)

#### 4. Vlastní tvar

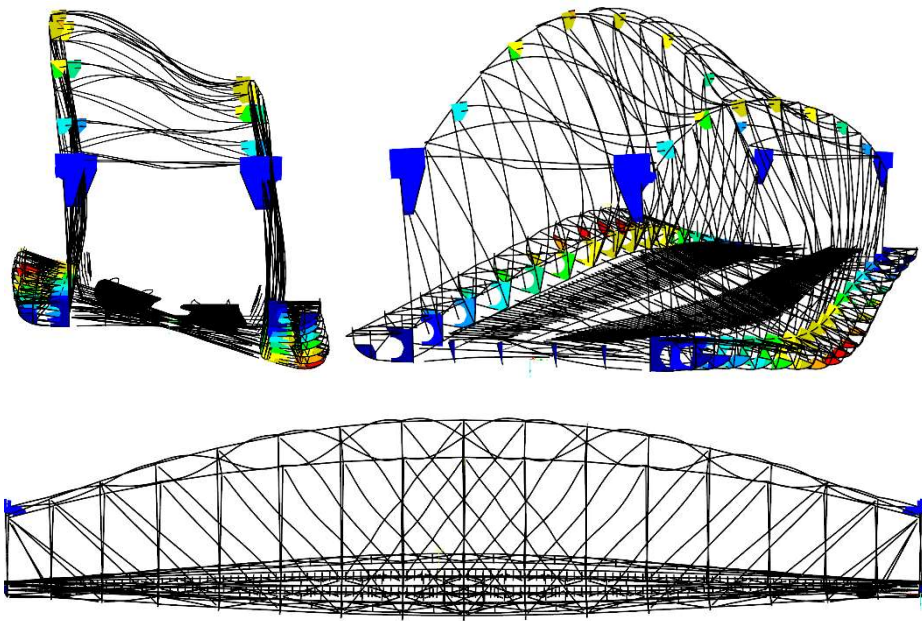


Obrázek 66: 4. vlastní tvar modelu  $f_4=4.430$  Hz

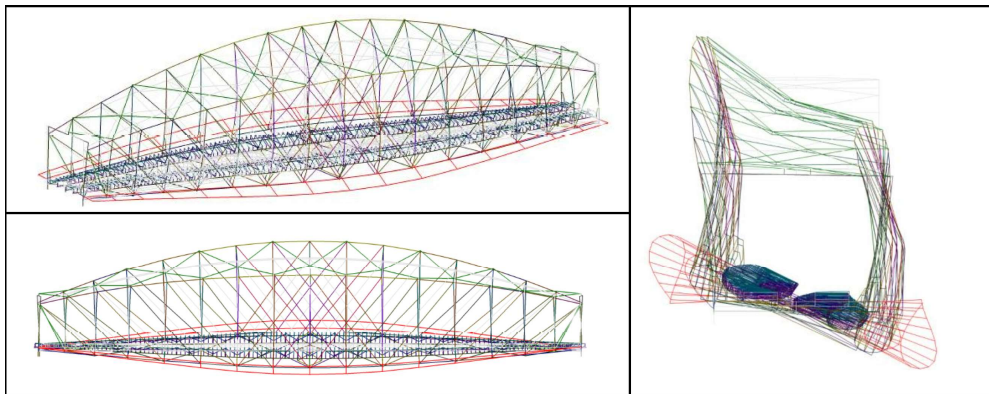


Obrázek 67: 5. vlastní tvar kmitání z přepočtu zatížitelnosti a přechodnosti  $f_5=5.10$  Hz (2)

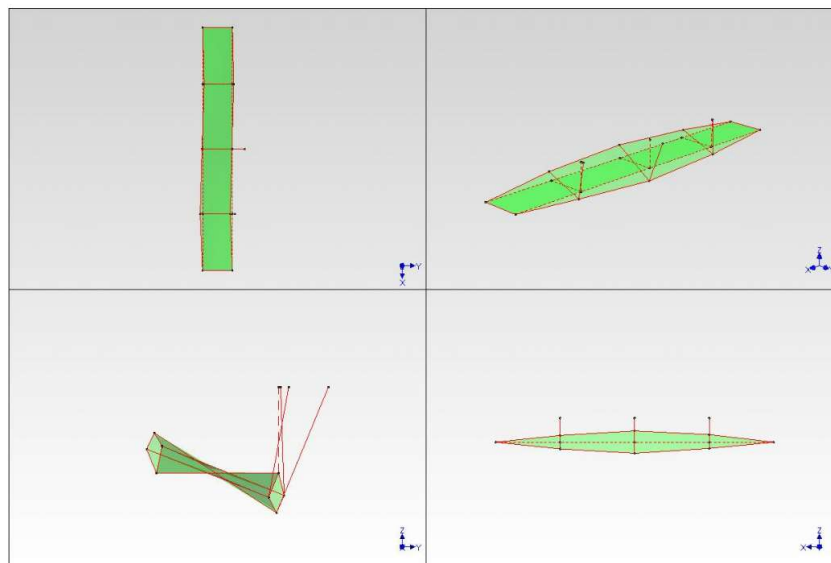
## 5. Vlastní tvar



Obrázek 68: 5. vlastní tvar modelu  $f_5=5.459$  Hz



Obrázek 69: 6. vlastní tvar kmitání z přepočtu zatížitelnosti a přechodnosti  $f_6=5.27$  Hz (2)



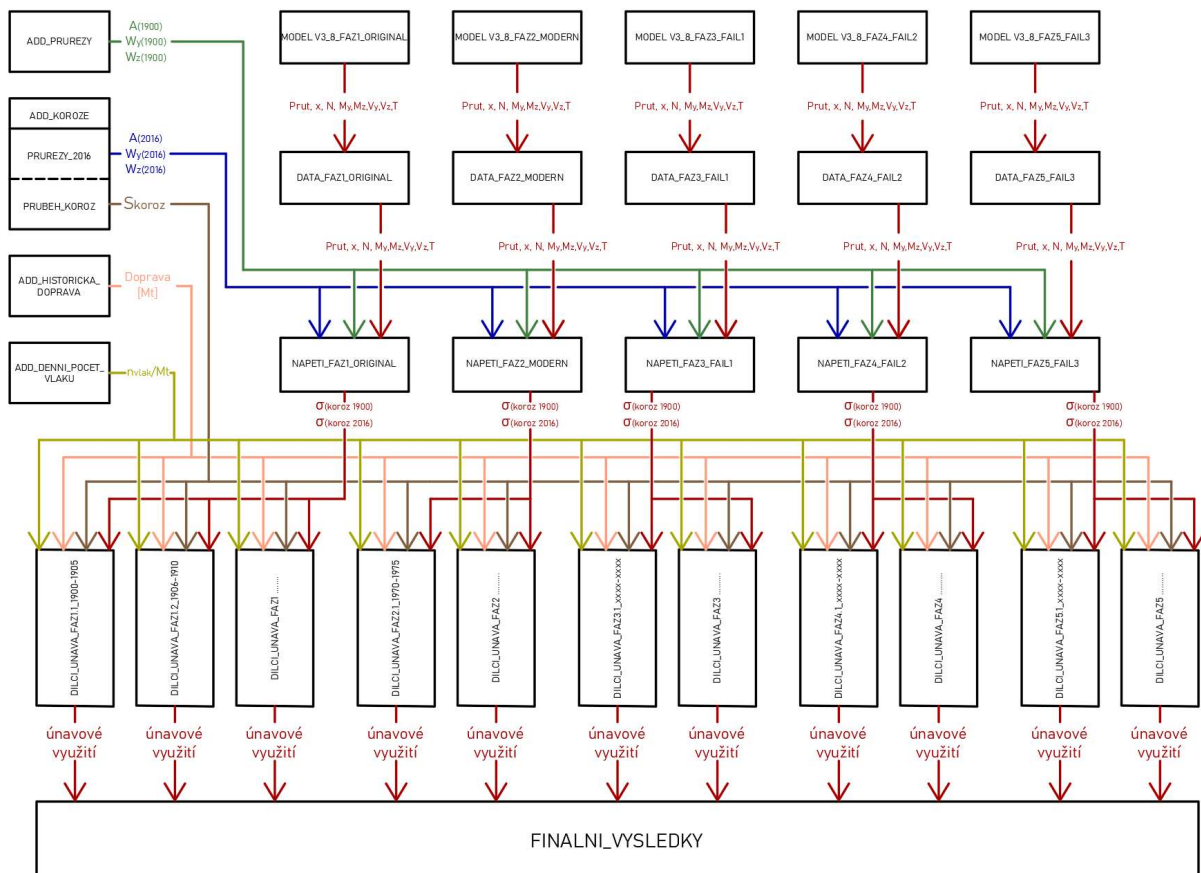
Obrázek 70: 4. vlastní tvar kmitání z přepočtu zatížitelnosti a přechodnosti  $f_4=5.78$  Hz (11)

# 10. METODIKA VÝPOČTU

## 10.1. STRUKTURA VÝPOČTU

Výpočet vnitřních sil je proveden v programu Dlubal RFEM 5.26. Vnitřní síly prutů jsou následně exportovány do programu Microsoft Excel, kde jsou zpracovány. Výpočet v programu Microsoft Excel je proveden v pěti fázích.

- Krok 1: Kombinace zatížení jsou vypočteny v programu Dlubal RFEM.
- Krok 2: Přídavná vstupní data jsou definována v souborech ADD, které jsou použity dalšími soubory během výpočtu
- Krok 3: Vnitřní síly kombinací s maximem a minimem vnitřních sil  $N$ ,  $M_y$  a  $M_z$ , jsou exportovány do excel souborů DATA
- Krok 4: Soubory NAPĚTÍ slouží k výpočtu maximálního a minimálního napětí v každém bodě, a to pro případ bez koroze a pro případ s korozi
- Krok 5: Soubory DÍLČÍ\_ÚNAVA slouží ke zpracování hodnot napětí, zohlednění koroze a intenzity dopravy a výpočtu únavového využití každého bodu pro daný časový interval
- Krok 6: Je provedena verifikace napětí, a zjištěno, zdali napětí přesahuje mez kluzu
- Krok 7: Soubor FINÁLNÍ\_VÝSLEDKY slouží k agregaci výsledků souborů DÍLČÍ\_ÚNAVA, a výpočet bodu a času únavových poškození.



Obrázek 71: Struktura výpočtu

## 10.2. VÝPOČET VNITŘNÍCH SIL PROGRAMEM DLUBAL RFEM

### 10.2.a. Zatěžovací stavy a kombinace napětí

Vlastní tíha konstrukce je modelována pomocí dvou zatěžovacích stavů. Zatěžovací stav 1 slouží pro vlastní tíhu vymodelovaných prvků konstrukce. Zatěžovací stav 2 slouží pro veškeré ostatní stálé zatížení.

Charakteristické vlaky jsou modelovány pomocí modulu programu RF\_MOVE, který slouží ke generaci pojezdů. Tímto modulem je vytvořeno pro každý z 12 vlaků 93 zatěžovacích stavů pro obě koleje. Je tedy vytvořeno 2232 zatěžovacích stavů.

Pro každý vlak jsou vytvořeny tři kombinace výsledků a to pro průjezd směrem na Smíchov, průjezd směrem na Vyšehrad a průjezd dvou vlaků najednou. Je tedy vytvořeno 36 kombinací výsledků.

Kombinace výsledků 1-24 obsahuje vlastní tíhu, ostatní stálé zatížení, a maximální/minimální hodnotu vnitřních sil z 93 zatěžovacích stavů průjezdu vlakem, násobena dynamickým součinitelem 1,07, bez součinitelů zatížení.

Kombinace výsledků 25-36 obsahují vlastní tíhu, ostatní stálé zatížení, min/max hodnotu vnitřních sil z 93 zatěžovacích stavů na levé koleji, a min/max hodnotu vnitřních sil z 93 zatěžovacích stavů na pravé koleji. Zatížení dopravou jsou násobena dynamickým součinitelem 1,07

### 10.2.b. Nastavení výpočtu

Výpočet je nastaven jako lineární výpočet prvního řádu. Pro zrychlení výpočtu jsou v lineárních modelech materiály modifikovány na plně elastické, s vymazáním hodnot meze kluzu.

### 10.2.c. Export do programu Microsoft Excel

Výsledky výpočtu jsou exportovány do programu Microsoft Excel. Jsou exportovány hodnoty vnitřních sil na všech uzlech obou příhradových nosníků, a to pro kombinace sil max N, min N, max M<sub>y</sub>, min M<sub>y</sub>, max M<sub>z</sub> a min M<sub>z</sub>. Výsledky na ostatních částí konstrukce nejsou potřebné pro tuto práci a tím pádem nejsou exportovány. Tímto způsobem je tedy exportováno všech 36 kombinací výsledků. Pro každou kombinaci je exportováno 43236 řádků do Microsoft Excel. Exportované výsledky modelu jsou uloženy do souboru DATA. Každý soubor DATA obsahuje výsledky jednoho modelu, tedy jedné fáze.



## 10.3. VÝPOČET NAPĚTÍ

### 10.3.a. Průřezové charakteristiky nekorodovaných průřezů

Pro stanovení průřezových charakteristik byly veškeré průřezy modelovány v programu Dlubal SHAPE-THIN 9.03. Pro účely této práce je použit předpoklad, že nýty nebudou spolupracovat s přenosem normálových napětí. Pruty byly tedy modelovány s díry pro nýty. Průřezové charakteristiky  $A$ ,  $W_y$  a  $W_z$  byly vypočteny pro každý studované vlákno a uloženy v souboru ADD\_PRUREZY.xlsx

### 10.3.b. Průřezové charakteristiky zkorodovaných průřezů

Pro zohlednění korozního oslabení jsou vypočteny průřezové charakteristiky korozně oslabených prutů. Pruty jsou modelovány s korozním oslabením odpovídající výsledkům prohlídky mostu. Modelování je provedeno snížení tloušťky prvků o procentuální hodnotu zjištěnou během prohlídky.

Průřezy jsou stejně jako nekorodované průřezy počítány s vrty pro nýty. Jsou vypočítány Průřezové charakteristiky  $A$ ,  $W_y$  a  $W_z$  pro všechny korodované průřezy a tyto údaje jsou uloženy v souboru ADD\_KOROZE.xlsx

### 10.3.c. Metoda výpočtu napětí

Výpočet napětí průřezu je proveden zjednodušenou metodou. Pro každý průřez je vybráno 4 nebo 8 vláken, kde může dojít k maximální nebo minimální hodnoty napětí. Pro každé vlákno jsou vypočítány průřezové charakteristiky  $A$ ,  $W_y$  a  $W_z$ . Výpočet napětí je následně proveden jednoduchým vzorcem:

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M_y}{W_y} - \frac{M_z}{W_z} \quad (3)$$

Vzhledem k tomu, že sledovány jsou primárně tažené a ohýbané prvky, lze toto zjednodušení a abstrahování stabilitních výpočtů připustit.

Napětí je touto metodou vypočteno v souboru NAPĚTÍ.xlsx. Každý soubor napětí odpovídá jednomu souboru DATA. Jsou vypočítána napětí ve všech vláknech všech bodů. Jsou vypočteny hodnoty napětí použití nekorodovaných i korodovaných průřezů. Napětí jsou následně vytříděna na maximální napětí v daném vlákne na daném bodu a minimálním napětí v daném vlákne na daném bodu. Pro průřezy bez koroze je vypočteno napětí s korozií použitím průřezových charakteristik nekorodovaného průřezu.

Pro každý bod je tedy vypočteno 32 hodnot napětí, tedy min/max hodnoty v 8 vláknech, ve 2 stavech koroze. Tyto hodnoty napětí v obou stavech budou sloužit k interpolaci napětí s vlivem koroze v souboru DILCI\_KOROZE.

## 10.4. ZOHLEDNĚNÍ KOROZE

### 10.4.a. Součinitel koroze

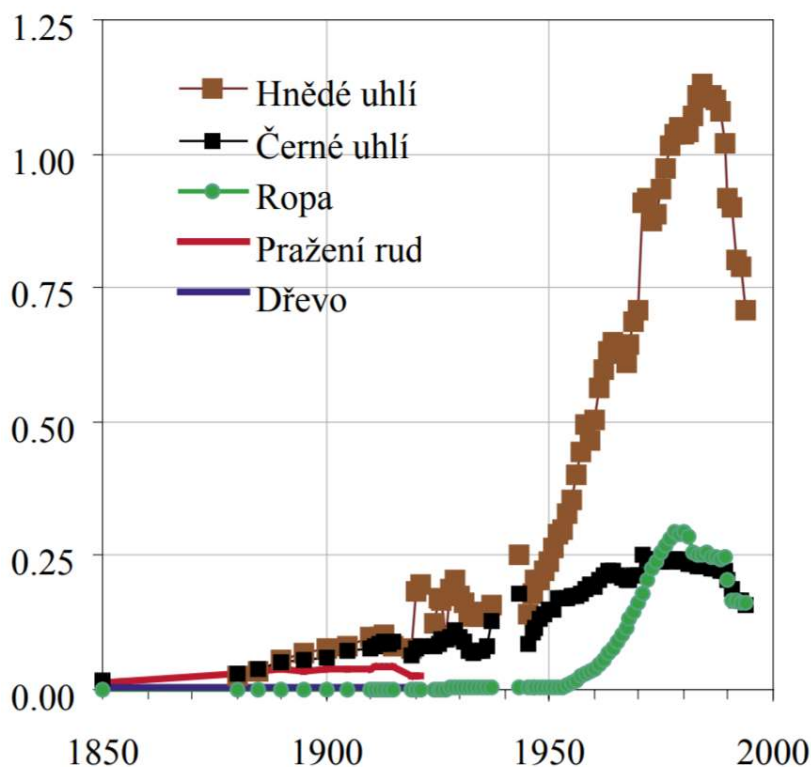
Pro zohlednění časového průběhu koroze je zaveden součinitel koroze, tento součinitel určuje poměr korozního oslabení v daném čase oproti hodnotám koroze zjištěných během prohlídky. Hodnota součinitele 0 % odpovídá tedy prutu bez žádné koroze, 100 % odpovídá hodnotám korozního oslabení zjištěných během prohlídky a 200 % odpovídá dvounásobně většímu koroznímu oslabení. Například, pokud součinitel koroze činí 150 %, prut s korozním oslabením zjištěným během prohlídky hodnoty 30 % bude mít korozní oslabení 45 %.

Tomuto součiniteli je dán časový průběh. Předpoklady pro stanovení časového průběhu součinitele koroze jsou následující:

Most je postaven v roce 1900, z nekorodované ocele. Hodnota součinitele koroze je tedy 0%

Do druhé světové války je most řádně udržován, s použitím protikorozní ochrany, avšak používání uhlí pro pohon lokomotiv, topení a výrobu elektřiny způsobuje zvýšenou koncentraci siřičitanů v atmosféře, pomalu způsobující korozi mostu, a to i při údržbě mostu. Je tedy počítáno mezi lety 1900–1938 s ročním nárůstem součinitele hodnoty 0.14%.

Po počátku druhé světové války je předpokládáno totální zanedbání údržby mostu, zanedbávání údržby je uvažováno i během doby komunistického režimu. Během doby komunistického režimu došlo také k obrovskému navýšení spotřeby uhlí zvyšující hladinu siřičitanů v atmosféře, a tím kyselé deště způsobující korozi (9). Situace je zhoršená velkou dopravní intenzitou na mostě, především nákladní dopravou. Je tedy uvažováno s velkým ročním nárůstem součinitele koroze, a to hodnoty 2.24 % mezi roky 1939–75.



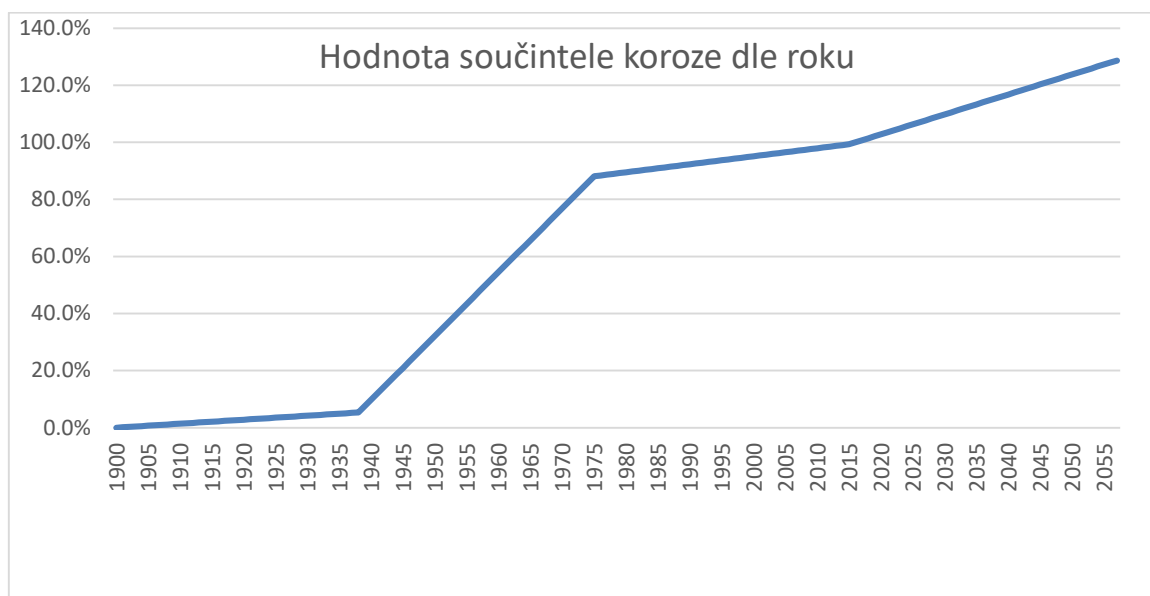
Obrázek 72: Historický vývoj hlavních emisních zdrojů SO<sub>2</sub> na území bývalého Československa (9)

Kolem 70–80. let se začala snižovat hladina siřičitanů v atmosféře v důsledku přechodu z uhlí na zemní plyn (9). Snížení dopravní intenzity a přechod z parní dopravy na elektrickou je také příznivý pro životnost konstrukce. Je tedy uvažováno snížení přírůstku součinitele koroze na 0.28 % mezi roky 1976–2015.

Vzhledem k tomu, že v technické zprávě statického přepočtu mostu od firmy SUDOP a.s. není stanoveno přesné datum prohlídky mostu, je vybrán datum na straně bezpečnosti, a to v roce 2016.

Pro účely práce se počítá s budoucím nárůstem koroze, převážně z motivace zůstat na straně bezpečnosti. Vzhledem k předchozí korozi štěrbin je velice pravděpodobný další nárůst štěrbinové koroze. Je tedy počítáno s nárůstem součinitele koroze od roku 2015, a to hodnotou 0.70 % ročně.

Hodnoty součinitele koroze byly vypočteny pro každý rok a uloženy v souboru ADD\_KOROZE.xlsx



Obrázek 73: Graf součinitele koroze

#### 10.4.a. Dopad koroze na kategorii detailu

Kategorie detailu je redukována dle stupně koroze (v %). Vzhledem k proměnnému časovému vývoje koroze je kategorie detailu časově proměnná. Redukce je provedena dle metodického pokynu S5/1 SŽDC, a to následujícím vzorečkem:

$$\Delta\sigma_{c,R} = \Delta\sigma_c \cdot C_R \quad (4)$$

$$C_R = (1 - 0.484 \cdot d_A) \quad (5)$$

Kde:

- $d_A$  je úroveň korozního oslabení
- $\Delta\sigma_c$  je kategorie detailu

Vzhledem k časově proměnné hodnotě je tento výpočet proveden později ve výpočtu, a to v souboru DÍLČÍ\_ÚNAVA, ve kterém jsou zohledněny časově proměnné jevy.

## 10.4.b. Dopad koroze na napětí

Pro zjednodušení výpočtu jsou pouze vypočteny průřezové charakteristiky nekorodovaných průřezů oslabený nýty a průřezů s korozním oslabením stanoveným během prohlídky mostu. Je tedy potřeba interpolovat hodnoty napětí pro daný čas, použitím součinitele koroze.

Je potřeba zaprvé stanovit způsob interpolace tak, aby hodnoty napětí odpovídaly reálné situaci. Je zřejmé, že pro hodnotu součinitele koroze 0% je napětí rovno napětí s použitím průřezových charakteristik nekorodovaných průřezů, a pro hodnotu součinitele koroze 100% odpovídají napětí vypočteny za použití průřezových charakteristik průřezů s korozním oslabením stanoveného během prohlídky. Z tohoto důvodu byla vybrána interpolace následujícího tvaru:

$$\sigma_{int}(S_{koroz}) = \sigma_{orig} + (\sigma_{koroz} - \sigma_{orig}) \cdot S_{koroz}^{f(S_{koroz})} \quad (6)$$

Kde:

- $\sigma_{int}(S_{koroz})$  je hodnota napětí pro daný součinitel koroze
- $\sigma_{orig}$  je napětí vypočteno použitím průřezových charakteristik nekorodovaného průřezu
- $\sigma_{koroz}$  je napětí vypočteno použitím průřezových charakteristik průřezu s korozním oslabením stanoven během prohlídky mostu
- $S_{koroz}$  je součinitel koroze
- $f(S_{koroz})$  je libovolná funkce, která bude stanovena na základě porovnání s reálným napětím použitím průřezových charakteristik vybraných průřezů s korozním oslabením daným různými hodnoty koeficientu koroze.

## 10.4.c. Stanovení funkce $f(S_{koroz})$ pro interpolaci vlivu koroze

Pro interpolaci funkce  $f(S_{koroz})$  byl použit modifikovaný soubor NAPĚTÍ, ve kterém je vypočítáno napětí pouze pro průřezy D6, D7, a V8. Tyto průřezy byly vymodelovány v programu Dlubal SHAPE-THIN 9.05 a byly vypočteny jejich průřezové charakteristiky pro hodnoty součinitele koroze 0 %, 50 %, 100 %, 130 % a 160 %.

Použitím těchto vypočtených průřezových charakteristik byly vypočteny reálné hodnoty napětí těchto průřezů pro tyto hodnoty součinitele koroze. Byly také pro tyto hodnoty součinitele vypočteny interpolované hodnoty napětí, a tím pádem bylo možné iteračně modifikovat funkci  $f(S_{koroz})$ , a porovnat hodnoty napětí.

Pro porovnání byly vypočteny rozdíly v procentech mezi reálným napětím a interpolovaným napětím. Následně byl vypočten průměr těchto rozdílů pro veškeré hodnoty napětí. Funkce byla následně měněna s cílem minimalizovat tento rozdíl. Výsledná funkce má vzorec:

$$f(S_{koroz}) = 1.075 + 0.32 \cdot S_{koroz} - 0.055 \cdot S_{koroz}^2 \quad (7)$$

Funkce pro interpolace napětí vlivem koroze je tedy:

$$\sigma_{int}(S_{koroz}) = \sigma_{orig} + (\sigma_{koroz} - \sigma_{orig}) \cdot S_{koroz}^{(1.075+0.32 \cdot S_{koroz}-0.055 \cdot S_{koroz}^2)} \quad (8)$$

Výsledek porovnání interpolace s reálným napětím na studovaných průřezech je v následující tabulce:

Hodnota součinitele koroze	Průměrný rozdíl mezi interpolovanou hodnotou a reálnou hodnotou napětí	Průměrná deviace rozdílu mezi interpolovanou hodnotou a reálnou hodnotou napětí
50 %	-0.09%	0.31%
130 %	-0.06%	1.03%
160 %	0.01%	2.26%

Tabulka 25: Porovnání výsledků interpolační funkce k reálnému napětí na vybraných průřezech

## 10.5. VÝPOČET POČTU CYKLŮ

### 10.5.a. Intenzita dopravy

Intenzita dopravy byla přebrána z přepočtu zatížitelnosti a přechodnosti zpracovaného v roce 2020 společností SUDOP PRAHA a.s. a uložena v souboru ADD\_HISTORICKA\_DOPRAVA.xlsx

### 10.5.b. Poměr charakteristických vlaků

Denní počet vlaků je přebrán z přepočtu zatížitelnosti a přechodnosti zpracovaného v roce 2020 společností SUDOP PRAHA a.s. Hodnoty jsou dány pro časové období 2017, 2018–2022 a 2025–2055. Z denního počtu vlaků byl přepočítán počet průjezdů pro jeden milion tun železniční dopravy. Výpočet byl proveden individuálně pro osobní a nákladní dopravu.

Vypočítané hodnoty budou sloužit k výpočtu cyklů zatížení pro dané období. Pro období 1900–2016 je předpoklad použití stejných poměrů průjezdů pro vlaky daného typu (osobní či nákladní). Pro období 2023–2024 jsou použity hodnoty období 2025–2055, tyto hodnoty jsou také použity pro období 2056+

Data jsou uložena v souboru ADD\_DENNI\_POCET\_VLAKU.xlsx

### 10.5.c. Výpočet počtu cyklů

Počet projezdů je stanoven násobením počtu průjezdů pro jeden milion tun železniční dopravy, a to pro každý vlak. Vlaky směrem Smíchov jezdí na pravé koleji, vlaky směrem Vyšehrad jezdí na levé koleji. Možnost průjezdu protisměrnou kolejí, například z důvodu zjednodušení, není brán v úvahu.

Pravděpodobnost průjezdu dvou vlaků najednou je brána z přepočtu zatížitelnosti a přechodnosti. Výpočet počtu cyklů se zohledněním setkání vlaků na mostě je použit následující vzorec:

$$N_{L,X} = N_L \cdot (1 - p) \quad (9)$$

$$N_{R,X} = N_R \cdot (1 - p) \quad (10)$$

$$N_{L+R} = p \cdot \frac{N_L + N_R}{2} \quad (11)$$

Kde:

- $N_{L,X}$  a  $N_{R,X}$  je počet projezdů pouze v v dané koleji (L - Levá, R - pravá)
- $N_{L+R}$  je počet projezdů v obou kolejích najednou
- $N_L$  a  $N_R$  je celkový počet projezdů v dané koleji
- $p$  je pravděpodobnost projezdu na obou kolejích najednou

Hodnota  $p$  je uvažována následně:

- |                    |          |
|--------------------|----------|
| - Období 1900–1999 | $p=10\%$ |
| - Období 2000–2017 | $p=3\%$  |
| - Období 2018–2022 | $p=5\%$  |
| - Období 2025+     | $p=10\%$ |

## 10.6. ZPRACOVÁNÍ NAPĚTÍ A VÝPOČET ROZKMITŮ

### 10.6.a. Interpolace napětí

Zpracování napětí je vždy provedeno po intervalech délky max 5 let. Toto umožňuje aproximovat měnící se časový vývoj napětí vzhledem ke korozi, a časový vývoj kategorie detailu. Pro každé časové období je vytvořen příslušný soubor DILCI\_UNAVA.xlsb, ve kterém jsou provedeny následující kroky.

První krok tohoto postupu je stanovení součinitele koroze. Je tedy zadán rok počátku a rok konce studovaného období. Je následně přebrán součinitel koroze ze souboru ADD\_KOROZE.xlsx, a to pro počáteční a konečný rok. Pro výpočet je použit průměr těchto dvou hodnot.

Hodnoty maximálního a minimálního napětí pro stav bez koroze a stav koroze definován v prohlídce jsou následně zpracovány interpolační funkcí. Je tedy vypočítána hodnota napětí pro daný součinitel koroze.

### 10.6.b. Výpočet rozkmitu napětí

Z maximálních a minimálního napětí je následně vypočten rozkmit napětí. Rozkmit napětí byl stanoven s redukcí tlaku násobením hodnotou 0.6 v souladu s metodickým pokynem S5/1 SŽDC. Rozkmit napětí, u kterých se neobjevuje tahové napětí nejsou počítány. Vzorce pro výpočet rozkmitu je tedy:

$$\begin{aligned} \Delta_{\sigma} &= |\sigma_{max}| + |\sigma_{min}| \\ \Delta_{\sigma} &= |\sigma_{max}| + 0.6 \cdot |\sigma_{min}| \quad \text{pro} \quad \begin{cases} \sigma_{min} \geq 0 \\ (\sigma_{max} \geq 0) \cap (0 > \sigma_{min}) \\ 0 > \sigma_{max} \end{cases} \\ \Delta_{\sigma} &= 0 \end{aligned} \quad (12)$$

## 10.7. VÝPOČET MEZNÍHO POČTU CYKLŮ NAPĚTÍ

Po výpočtu rozkmitů je potřeba vypočítat mezní počet cyklů pro každé vlákno, a to zvlášť pro každou kombinaci. Pro výpočet je použita Wöhlerova křivka, také známá mezinárodně jako S/N křivka.

Kategorie nekorodovaného průřezu je 71 Mpa v souladu s metodickým pokynem S5/1 SŽDC. Kategorie detailu je redukována v souladu s metodickým pokynem. Procento koroze pro výpočet je vypočteno násobením maximální hodnoty koroze v procentech a součinitele koroze.

$$\Delta\sigma_{c,R} = \Delta\sigma_c \cdot C_R \quad (13)$$

$$C_R = (1 - 0.484 \cdot d_A) \quad (14)$$

$$d_A = S_{koroz} \cdot d_{A,2016} \quad (15)$$

Pro umožnění stanovení hodnot v MS excel je funkce definující křivku převedena na formát  $N(\sigma)$ . Pro výpočet mezního počtu cyklů je tedy použita tato funkce.

$$N = \infty \quad \text{pro} \quad \frac{\left(\left(\frac{2}{5}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot \Delta\sigma_{c,R}\right)^5}{\Delta\sigma^5} \cdot 5 \cdot 10^6 > 10^8$$

$$N = \frac{\left(\left(\frac{2}{5}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot \Delta\sigma_{c,R}\right)^5}{\Delta\sigma^5} \cdot 5 \cdot 10^6 \quad \text{pro} \quad 5 \cdot 10^6 < \frac{\left(\left(\frac{2}{5}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot \Delta\sigma_{c,R}\right)^5}{\Delta\sigma^5} \cdot 5 \cdot 10^6 \cap \frac{\left(\left(\frac{2}{5}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot \Delta\sigma_{c,R}\right)^5}{\Delta\sigma^5} \cdot 5 \cdot 10^6 \leq 10^8 \quad (16)$$

$$N = \frac{\Delta\sigma_{c,R}^3}{\Delta\sigma^3} \cdot 2 \cdot 10^6 \quad \text{pro} \quad \frac{\Delta\sigma_{c,R}^3}{\Delta\sigma^3} \cdot 2 \cdot 10^6 < 5 \cdot 10^6$$

Výsledek výpočtu je počet projezdů cyklů potřebný pro únavové porušení vlákna. Výsledek je vypočten pro veškeré průjezdy, a to ve veškerých bodech. Hodnoty jsou vypočteny pro veškerá vlákna průřezu.

## 10.8. VÝPOČET ÚNAVOVÉ ŽIVOTNOSTI

### 10.8.a. Metoda kumulace únavového poškození

Po výpočtu mezního počtu cyklů pro každou kombinaci napětí je potřeba zkombinovat vypočtené hodnoty do užitečné podoby. K tomuto účelu je použita Palmgren-Minerova hypotéza, která je vyjádřena následující rovnicí:

$$\sum \frac{n_i}{N_i} \leq 1 \quad (17)$$

Kde:

- $n_i$  je počet cyklů daného rozkmitu
- $N_i$  je mezní počet cyklů daného rozkmitu

### 10.8.b. Dílčí výpočet pro období

Tento výpočet je proveden po více etapách. První iterace tohoto výpočtu je provedena v souboru DILCI\_UNAVA.xlsm, kde je takto vypočteno únavové využití konstrukce ze všech 36 kombinací. Počet cyklů pro každou kombinaci je dáný počtem vlaků. Postup výpočtu cyklů je popsán v kapitole 10.5.c. Výsledek této první etapy slouží jako dílčí součet únavového využití pro období počítaného v daném souboru DILCI\_UNAVA.xlsm.

## 10.8.c. Finální výpočet

Tento výsledek je následně exportován do souboru FINALNI\_VYSLEDKY.xlsb. Soubor je organizován dle fází mostu, každá fáze má příslušný list pro importaci výsledků všech souborů DILCI\_UNAVA příslušné fáze. Hodnoty dílčího využití únavy jsou následně sečteny. Výsledek tohoto součtu je využití únavové životnosti pro danou fázi.

Vzhledem k tomu, že pro fáze 1, tedy originální stav mostu s originálním horním ztužením a mostovkou, je známý konečný rok, je výpočet jednoduchý. Jsou jednoduše sečteny dílčí využití únavové pevnosti všech souborů DILCI\_UNAVA\_FAZ1. Každý tento soubor slouží k výpočtu dílčího využití únavové životnosti pro jedno období maximálně pěti let.

Pro další fáze jsou tvořeny další tyto soubory pro přidání pěti let, dokud nedojde k překročení únavové životnosti prvku. Po stanovení roku očekávaného únavového poškození je ukončeno období na konec předchozího roku, a přidán soubor DÍLČÍ\_ÚNAVA pouze pro rok očekávaného poškození, v tomto výpočtu je stanoveno, jaký den (z 365) je den očekávaného poškození.

## 10.9. VYTVOŘENÍ NÁSLEDUJÍCÍCH FÁZÍ

### 10.9.a. Opakování procesu

Po stanovení poškozeného prutu je následně vytvořen nový model v programu Dlubal RFEM 5.26, ve kterém je vymodelováno poškození. Poškození je modelováno použitím volného přípoje na konci prutu (tedy přípoj s nulovou tuhostí pro veškeré složky síly a momentů, což má stejný efekt jako přerušování konstrukce), a to v konci prutu nejbližší k poškozenému bodu. Důvod toho je snaha zachovat celistvost prutů z důvodu kompatibility výsledků všech fází.

Po výpočtu tohoto modelu se celý proces opakuje: data jsou exportovány do souboru DATA, napětí jsou vypočteny v souboru NAPETI, časově závislé hodnoty napětí a mezní počet cyklů jsou vypočteny v DÍLČÍ\_ÚNAVA, a exportovány do souboru FINALNI\_VYSLEDKY, kde je následně stanovena následující místo a čas poškození.

### 10.9.b. Podmínka zastavení práce

Tento proces se opakuje, dokud se v konstrukci nezačnou vyskytovat plastické napětí. Plastická napětí jsou velmi nepříznivá z hlediska únavy, obzvláště pokud se časem zvyšuje napětí z důvodu koroze průřezu, což by způsobovalo malé cyklické plastické deformace při projezdech dvou těžkých vlaků najednou a vedlo k nízkocyklové únavě.

Je tedy rozhodnuto zastavit výpočet v momentu, kdy začne docházet k plastickému napětí. Možnost zakázat průjezd dvou vlaků najednou nebude brána v úvahu. Pro zjištění maximálních a minimálních hodnot napětí je vytvořen soubor VERIF\_NAPETI, který přebírá hodnoty napětí ze souboru DILCI\_UNAVA, a slouží k vyhledání maximálních napětí.



---

## 11. POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ

---

### 11.1. MOTIVACE

Pro ujištění, že výsledek výpočtu je realistický je potřeba porovnat výsledek oproti výsledku přepočtu zatížitelnosti a přechodnosti. Nastává ale problém, že tato práce používá jiná vstupní data. Zaprvé používá časově proměnnou hodnotu zatížení dle koroze a kategorie detailu, zadruhé nepočítá s návrhovým dílčím součinitelem kategorie detailu  $\gamma = 1,15$ .

Pro porovnání výsledků je tedy potřeba udělat vedlejší vpočet s upravenými vstupními hodnoty, a to se snahou emulovat vstupní parametry vpočtu zatížitelnosti a přechodnosti firmy SUDOP. Bude tedy potřeba provést vedlejší vpočet, se změnami vstupními údaji.

### 11.1. ZMĚNĚNÉ VSTUPNÍ ÚDAJE

#### 11.1.a. Vytvořené výpočty

Pro výpočet budou vytvořeny dvě výpočty. Vpočet je tvořen kopírování hlavních souborů z hlavního vpočtu a změnění vstupních dat, a to pro zajištění že nedošlo k změnění vzorců či jiných hodnot vpočtu.

Byly vytvořeny následující výpočty:

- Výpočet VERIF\_SUDOP\_GAMMA\_1.15
- Výpočet VERIF\_SUDOP\_GAMMA\_1.15+KOROZ\_100

#### 11.1.b. Výpočet pouze s dílčím součinitelem kategorie detailu

První porovnávací výpočet používá stejné hodnoty jako hlavní výpočet, s výjimkou změny kategorie detailu v souboru ADD\_PRUREZY. Hodnota dílčího součinitele kategorie detailu je 1.15. Kategorie detailu 71 Mpa je tím pádem redukována na 61.74 Mpa.

#### 11.1.c. Výpočet s maximální korozi a dílčím součinitelem

Pro druhý porovnávací výpočet je nejen změněna kategorie detailu použitím návrhového součinitele, ale je navíc změněna koroze. Napětí je vypočteno za předpokladu zkorodovaných průřezů od začátku provozu konstrukce. Toto je dosaženo změnou souboru ADD\_KOROZE, kde je změněn součinitel koroze  $S_{koroz}$  na konstantní hodnotu 100 %.

## 11.2. VÝSLEDEK POROVNÁVACÍHO VÝPOČTU

### 11.2.a. Výsledek výpočtu s návrhovým součinitelem

Výsledek verifikačního výpočtu s použitím dílčího součinitele je porušení severovýchodní diagonály D7 v den 74 roku 2032.

VERIF_SUDOP_GAMMA_1.15 únarové využití 15 nejvíce využitých prvků FÁZE 1+2 – rok 2032 – den 74				
pořadí	využití	prut	X [mm]	průřez
1	100.00%	0732	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
2	98.07%	0692	3588.2	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
3	96.18%	0731	7216.2	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
4	95.02%	0693	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
5	81.50%	0770	3588.2	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
6	81.18%	0654	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
7	78.40%	0771	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
8	78.08%	0653	7216.2	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
9	34.93%	0729	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D6
10	34.07%	0695	4279.8	SHAPE-THIN DIAGONALA D6
11	33.52%	0734	2553.1	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
12	32.57%	0690	0	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
13	32.38%	0576	0	SHAPE-THIN VERTIKALA V7
14	32.14%	0541	0	SHAPE-THIN VERTIKALA V7
15	32.05%	0728	6940.6	SHAPE-THIN DIAGONALA D6

Tabulka 26: Nejvíce využitě pruty výpočtu VERIF\_SUDOP\_GAMMA\_1.15 v čase porušení

VERIF_SUDOP_GAMMA_1.15 únarové využití 15 nejvíce využitých prvků FÁZE 1+2 – rok 2022 – konec roku				
pořadí	využití	prut	X [mm]	průřez
1	71.93%	0732	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
2	71.64%	0692	3588.2	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
3	69.38%	0693	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
4	69.10%	0731	7216.2	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
5	57.81%	0654	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
6	57.42%	0770	3588.2	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
7	55.46%	0653	7216.2	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
8	55.07%	0771	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
9	26.52%	0729	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D6
10	26.33%	0695	4279.8	SHAPE-THIN DIAGONALA D6
11	26.03%	0541	0	SHAPE-THIN VERTIKALA V7
12	25.80%	0576	0	SHAPE-THIN VERTIKALA V7
13	24.74%	0734	2553.1	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
14	24.64%	0690	0	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
15	24.27%	0728	6940.6	SHAPE-THIN DIAGONALA D6

Tabulka 27: Nejvíce využitě pruty výpočtu VERIF\_SUDOP\_GAMMA\_1.15 v roce 2022

## 11.2.b. Výsledek výpočtu s konstantní korozí a součinitelem

Výsledek verifikačního výpočtu s použitím dílčího součinitele a s konstantní hodnotou součinitele koroze 100% po celém období je porušení severovýchodní diagonály D7 v den 103 roku 2027.

VERIF_SUDOP_GAMMA_1.15+KOROZ_100				
únarové využití 15 nejvíce využitých prvků				
FÁZE 1+2 – rok 2027 – den 103				
pořadí	využití	prut	X [mm]	průřez
1	100.00%	0732	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
2	98.70%	0692	3588.2	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
3	96.14%	0731	7216.2	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
4	95.65%	0693	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
5	81.16%	0770	3588.2	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
6	81.12%	0654	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
7	77.88%	0771	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
8	77.86%	0653	7216.2	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
9	36.49%	0734	2553.1	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
10	36.02%	0690	0	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
11	34.37%	0768	0	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
12	34.02%	0729	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D6
13	33.73%	0656	2553.1	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
14	33.27%	0695	4279.8	SHAPE-THIN DIAGONALA D6
15	31.92%	0576	0	SHAPE-THIN VERTIKALA V7

Tabulka 28: Nejvíce využité průřezy výpočty VERIF\_SUDOP\_GAMMA\_1.15+KOROZ\_100 v čase porušení

VERIF_SUDOP_GAMMA_1.15+KOROZ_100				
únarové využití 15 nejvíce využitých prvků				
FÁZE 1+2 – rok 2022 – konec roku				
pořadí	využití	prut	X [mm]	průřez
1	0.9170	0692	3588.2	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
2	0.9149	0732	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
3	0.8886	0693	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
4	0.8793	0731	7216.2	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
5	0.7485	0654	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
6	0.7409	0770	3588.2	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
7	0.7184	0653	7216.2	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
8	0.7109	0771	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
9	0.3398	0690	0	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
10	0.3379	0734	2553.1	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
11	0.3182	0768	0	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
12	0.3180	0656	2553.1	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
13	0.3124	0729	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D6
14	0.3109	0695	4279.8	SHAPE-THIN DIAGONALA D6
15	0.3008	0541	0	SHAPE-THIN VERTIKALA V7

Tabulka 29: Nejvíce využité pruty výpočtu VERIF\_SUDOP\_GAMMA\_1.15+ KOROZ\_100 v roce 2022

## 11.2.c. Porovnání s přepočtem zatížitelnosti a přechodnosti

### Výsledek přepočtu zatížitelnosti a přechodnosti

Dle přepočtu zatížitelnosti a přechodnosti firmy SUDOP Praha a.s. je kritický prvek nosné konstrukce z hlediska únavy diagonála D7. Dle přepočtu bude hodnota únavového využití v roce 2055 činit 95%. Dle přepočtu bude v roce 2022 tato hodnota 65.8 %.

### Porovnání s výsledkem verifikačního výpočtu s dílčím součinitelem

Dle verifikačního výpočtu s použitím dílčího součinitele je také limitní prvek diagonála D7. Dle výpočtu činí únavové využití v roce 2022 hodnotu 71.93 %, což je porovnatelné s výsledkem přepočtu zatížitelnosti a přechodnosti.

Výsledky těchto výpočtů se ale liší v celkové životnosti prvku, dle přepočtu zatížitelnosti a přechodnosti bude v roce 2055 únavové využití prvku činit hodnotu 95 %, zatímco verifikační výpočet naznačuje porušení prvku v roce 2032. Důvodem tohoto rozdílu je časový nárůst součinitele koroze po roce 2015. Důvod nastavení součinitele koroze tímto způsobem byla snaha mít konzervativní výsledek v případě šterbinové koroze, vzhledem k tomu že je téměř nemožné jejímu nárůstu zabránit (2).

### Porovnání s výsledkem verifikačního výpočtu s maximální korozí a dílčím součinitelem

Dle verifikačního výpočtu s maximální hodnotou koroze a dílčím součinitelem je únavové využití diagonály D7 v roce 2022 hodnoty 91.7 %. Toto je mnohem vyšší hodnota než hodnota stanovena v přepočtu zatížitelnosti a přechodnosti. Je také velký rozdíl životnosti ve verifikačním výpočtu je vypočteno, že nastane konec únavové životnosti diagonály D7 v roce 2027, zatímco přepočet zatížitelnosti a přechodnosti počítá únavovým využitím 95 % v 2055.

### Odůvodnění rozdílu

Je tedy třeba se zamyslet nad rozdíly metodiky mezi touto prací a výpočtem zatížitelnosti a přechodnosti.

První rozdíl je stanovení rozkmitů. Tato práce vypočítává veškeré vnitřní síly na veškerých bodech konstrukce pro veškerý průjezd všech 12 vlaků, které jsou každé modelovány ve výpočetním modelu. Napětí jsou dále vypočítána, interpolována pro zohlednění koroze a je vypočten rozkmit napětí. Přepočet zatížitelnosti a přechodnosti počítá spektra rozkmitu napětí ze zatížení LM71, která jsou součinitelem transformována na spektra rozkmitu napětí TTZ-C3, která jsou dále transformována do relativních spekter rozkmitů napětí dle vlaku (2).

Druhý rozdíl je metodika výpočtu cyklů. Tato práce používá 12 charakteristických vlaků po celou dobu provozu konstrukce a počet cyklů je dán aktuálním poměrem projezdů každého na mostě, tento postup počítá se stejnými vlaky po celé životnosti mostu, což není realistické. Přepočet zatížitelnosti a přechodnosti používá empirický vzorec pro převedení intenzity dopravy na počet cyklů (2).

Třetí rozdíl je použití větší hodnoty pravděpodobnosti setkání vlaků na mostě v tomto výpočtu oproti přepočtu zatížitelnosti. Dopad tohoto rozdílu byl ověřen změněním verifikačního výpočtu s maximální korozí a dílčím součinitelem, a bylo nalezeno že rozdíl pro tento výpočet je zanedbatelný. Tento rozdíl pravděpodobnosti je pouze pro období 2000-2055.

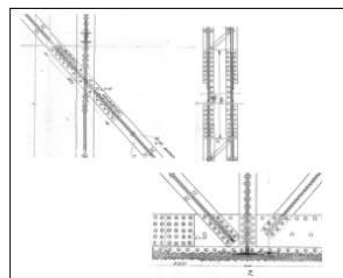
### TAB. D7.2.4 POSOUZENÍ - MEZNÍ STAV ÚNAVY

POSUDEK	D7.2
PRŮŘEZ	TR_D7.2
POPIS	DIAGONÁLA D7
PRUT / POLOHA BODU	235 / J[2703]

#### Vstupní hodnoty

Základní hodnota únavové pevnosti:  $\Delta\sigma_c = 71$  MPa viz tab A.6, MP 2015.  
 Popis únavového detailu: **jednotřížný nýtový přípoj s průběžnou částí/nápojení ve styčniku**  
 Redukce vlivem koroze detailu:  $C_R = 0.90$  viz COST CZ, projekt LD 15127  
 Oslabení průřezu vlivem koroze:  $d_A = 0.20$  viz COST CZ, projekt LD 15127  
 Hodnota únavové pevnosti detailu:  $\Delta\sigma_c = 64.1$  MPa

#### Schéma detailu



Tloušťka materiálu:  $t = 1$  mm  
 redukce únavové pevnosti:  $\phi_w = 1.00$   
 Detail bez vlastního prnutí (šroubovaný, nýtovaný)  ano je-li "ano"  $\sigma < 0$  MPa pak se násobí 0.6

Rozkmit od pohyblivého zatížení, vč. dynam. účinků: kole 1 kole 2  
 traťová třída zatížení C3/60:  $\sigma_{e,mzst1} = -7.5$  /  $-30.0$  MPa ČSN EN 1993-1-9 čl. 7.2.1(2)  
 traťová třída zatížení C3/60:  $\sigma_{e,mzst2} = 35.1$  /  $44.8$  MPa ČSN EN 1993-1-9 čl. 7.2.1(2)  
 $\Sigma\sigma_a = 42.6$  /  $74.8$

Poměr k zatížení  $\phi 2.1.1.LM71$  k C3:  $p_{C3} = 1.342$  převod mezi ČSN 73 6203 a traťovou třídou zatížení C3  
 Korekce skutečného zatížení k C3:  $k_{C3} = 0.8$  odvozeno z analýzy spekter napětí na dané trati (viz diagnostika mostní konstrukce)  
 Dynamický součinitel:  $\Phi_2 = 1.00$  MP 2015 pro pečlivě udržovanou kolej  
 Náhradní délka prutu:  $L_{-1,stat} = 72$  m odvozeno z příčinkové čáry  
 Spolehlivosti materiálu:  $\gamma_M = 1.15$  MP 2015 pro vážný důsledek porušení  
 rozkmit  $\Delta\sigma_0.5 \cdot 10^6 = 47.1$  MPa rozkmit napětí na mezi únavy  
 rozkmit  $\Delta\sigma_1 \cdot 10^6 = 25.8$  MPa prahový rozkmit - mez únavy  
 $N_C = 5000000$  cyklů

#### Dopravní zatížení do roku 2000

Relativní poměr rozkmitu	Počet cyklů zatížení v tis. v jedné koleji dle období [prof. Frýba]								Celkem do 2000	Přepočet rozkmitu k reálnému zatížení	Poznámka
	období do 1921	1927	1937	1941	1953	1969	2000				
	zatížení	1.533	1.781	1.633	3.188	4.754	9.757	9.637			
	počet roků	20	6	10	4	12	16	31	99		
0.10	0.13	27193	9061	14212	9080	36031	79468	152639	327683	327683	
0.20	0.27	1232	411	644	411	1633	3601	6916	14848	14848	
0.30	0.40	202	67	105	67	267	589	1132	2430	2430	
0.40	0.54	1.533	1.781	1.633	3.188	4.754	9.757	0	23	23	0
0.50	0.67	21	7	11	7	27	60	116	248	328	poměrově zvětšení počet
0.60	0.81	9	3	5	3	12	27	51	110	145	poměrově zvětšení počet
0.70	0.94	5	2	2	2	6	13	26	55		
0.80	1.07	3	1	1	1	3	7	14	30		
0.90	1.21	1	0	1	0	2	4	8	18		
1.00	1.34	1	0	0	0	1	3	5	11		
									$\Sigma$ 345457	345457	kontrola součtu cyklů

#### Únavové poškození za období 1901 - 2000

99 let koleje č.1 koleje č.2 koleje č.1 + č.2 Setkání: 10%

poměr napětí	rozkmit napětí $\Delta\sigma_{rel}$ [MPa]	sklon křivky [-]	počet cyklů od zatížení do porušení			Únavové poškození ni/Ni	rozkmit napětí $\Delta\sigma_{rel}$ [MPa]	sklon křivky [-]	počet cyklů od zatížení do porušení			Únavové poškození ni/Ni	rozkmit napětí $\Delta\sigma_{rel}$ [MPa]	sklon křivky [-]	počet cyklů od zatížení do porušení			Únavové poškození ni/Ni
			ni	Ni	ni/Ni				ni	Ni	ni/Ni				ni	Ni	ni/Ni	
			[v tisících]	[v tisících]	[v tisících]				[v tisících]	[v tisících]	[v tisících]				[v tisících]	[v tisících]	[v tisících]	
0.13	5.7	nekon	294915	>10e+8	0.000	10.0	nekon	294915	>10e+8	0.000	15.8	nekon	29491	>10e+8	0.000			
0.27	11.4	nekon	13363	>10e+8	0.000	20.1	nekon	13363	>10e+8	0.000	31.5	5.0	1336	18516	0.072			
0.40	17.2	nekon	2187	>10e+8	0.000	30.1	5.0	2187	23287	0.094	47.3	3.0	219	3250	0.067			
0.54	22.9	5.0	20	91533	0.000	40.1	5.0	20	5526	0.004	63.0	3.0	2	1371	0.001			
0.67	28.6	5.0	295	29994	0.010	50.2	3.0	295	2718	0.109	78.8	3.0	30	702	0.042			
0.81	34.3	5.0	131	12054	0.011	60.2	3.0	131	1573	0.083	94.5	3.0	13	406	0.032			
0.94	40.1	5.0	0	5577	0.000	70.2	3.0	0	991	0.000	110.3	3.0	0	256	0.000			
1.07	45.8	3.0	0	3576	0.000	80.3	3.0	0	664	0.000	126.0	3.0	0	171	0.000			
			$D_1 = \Sigma n_i/N_i$	0.021				$D_2 = \Sigma n_i/N_i$	0.289				$D_3 = \Sigma n_i/N_i$	0.215				
			<b>Celkem do roku 2000 <math>\Sigma D_3</math> 0.526</b>															

#### Únavové poškození za období 2000 - 2017

17 let koleje č.1 koleje č.2 koleje č.1 + č.2 Setkání: 1%

poměr napětí	rozkmit napětí $\Delta\sigma_{rel}$ [MPa]	sklon křivky [-]	počet cyklů od zatížení do porušení			Únavové poškození ni/Ni	rozkmit napětí $\Delta\sigma_{rel}$ [MPa]	sklon křivky [-]	počet cyklů od zatížení do porušení			Únavové poškození ni/Ni	rozkmit napětí $\Delta\sigma_{rel}$ [MPa]	sklon křivky [-]	počet cyklů od zatížení do porušení			Únavové poškození ni/Ni
			ni	Ni	ni/Ni				ni	Ni	ni/Ni				ni	Ni	ni/Ni	
			[v tisících]	[v tisících]	[v tisících]				[v tisících]	[v tisících]	[v tisících]				[v tisících]	[v tisících]	[v tisících]	
0.10	4.3	nekon	209434	>10e+8	0.000	7.5	nekon	229599	>10e+8	0.000	11.7	nekon	2210	>10e+8	0.000			
0.20	8.5	nekon	3461	>10e+8	0.000	15.0	nekon	1007	>10e+8	0.000	23.5	5.0	38	80594	0.000			
0.30	12.8	nekon	1234	>10e+8	0.000	22.4	nekon	3316	>10e+8	0.000	35.2	5.0	10	10613	0.001			
0.40	17.1	nekon	292	>10e+8	0.000	29.9	5.0	766	24054	0.032	47.0	3.0	0	3313	0.000			
0.50	21.3	nekon	9	>10e+8	0.000	37.4	5.0	212	7882	0.027	58.7	3.0	2	1696	0.001			
0.60	25.6	5.0	119	52467	0.002	44.9	3.0	118	3802	0.031	70.4	3.0	1	982	0.001			
0.70	29.8	5.0	0	24275	0.000	52.3	3.0	0	2394	0.000	82.2	3.0	0	618	0.000			
0.80	34.1	5.0	0	12451	0.000	59.8	3.0	0	1604	0.000	93.9	3.0	0	414	0.000			
0.90	38.4	5.0	0	6909	0.000	67.3	3.0	0	1127	0.000	105.6	3.0	0	291	0.000			
1.00	42.6	3.0	0	4426	0.000	74.8	3.0	0	821	0.000	117.4	3.0	0	212	0.000			
			$D_1 = \Sigma n_i/N_i$	0.002				$D_2 = \Sigma n_i/N_i$	0.090				$D_3 = \Sigma n_i/N_i$	0.004				
			<b>Celkem za období 2000 - 2016 <math>\Sigma D_3</math> 0.096</b>															

Obrázek 74: Výpočet využití únavy z přepočtu zatížitelnosti a přechodnosti, období 1900-1999 a 2000-2017 (2)

---

## 12. VÝSLEDKY VÝPOČTU

---

### 12.1. POPIS FÁZÍ PORUŠENÍ

#### 12.1.a. Fáze 3 a 4 – porušení 2xD7

První porušení konstrukce nastane dle výpočtu v den 155 roku 2048, a to porušením severovýchodní diagonály D7, stejně jako ve verifikačních výpočtech. Poté rychle nastane porušení jihozápadní diagonály D7, a to v den 319 roku 2048.

Porušení ostatních dvou diagonál D7 nastane až v roce 2055. Jihovýchodní diagonála bude porušena v den 295 roku 2055 a nakonec severozápadní bude porušena v den 333 roku 2055. Důvod pro tento sedmiletý interval porušení diagonál D7 je podélně excentrické zatížení na mostu způsobeno tíhou lokomotivy. Po porušení těchto dvou diagonál je extrém tahového napětí v jihovýchodní diagonále D6 s hodnotou 94.71 Mpa. Extrém tlakového napětí je v jihozápadní svislici V0 s hodnotou -100.67 Mpa

#### 12.1.b. Fáze 5 a 6 – porušení 4xD7

Po porušení diagonál D7 jsou síly originálně procházející touto diagonálou redistribuované, a to přes diagonály D6 a D9. Diagonála D9 drží dolní pás v místě připojení D7 na dolní pás, což snižuje dopad na dolní pás. Horní pás je momentově zatížen po přerušení D7, avšak vzhledem k převážně tlakovému napětí je celkem nízké únavové využití. (viz kap. 12.4.c a 12.4.d).

Po porušení všech diagonál D7 je extrém tahového napětí v severovýchodní diagonále D6 s hodnotou 105.4 Mpa. Extrém tlakového napětí je v severozápadní svislici V0 s hodnotou -106.34 Mpa

#### 12.1.c. Fáze 7+8 – Porušení 4xD7+2xD6

Následuje porušení diagonál D6. Podle výpočtu nastane v den 355 rok 2072 únavové porušení dolní části severovýchodní diagonály D6. V den 325 roku 2073 bude následovat únavové porušení dolní části jihozápadní diagonály D6.

Po porušení diagonál D6 nastane velké momentové zatížení horního a dolního pásu. Horní pás vzhledem k tlakovému napětí nebude využit únavově, Dolní pás má ale vysoké hodnoty napětí.

Po porušení první diagonály D6 je extrém tahového napětí v severozápadním dolním pásu U6 (od Vyšehradu 6. sdružené pole vpravo) s hodnotou 199.4 Mpa. Extrém tlakového napětí je v plnostěnné části severovýchodní svislice V5, s hodnotou -168.91 Mpa.

Po porušení druhé diagonály D6 je extrém tahového napětí v jihozápadním dolním pásu U6 (od Vyšehradu 11. sdružené pole vlevo) s hodnotou 199.79 Mpa. Extrém tlakového napětí je v plnostěnné části jihozápadní svislice V5, s hodnotou -169.84 Mpa.

Hodnota tlakového napětí 199.8 Mpa je velmi blízko k charakteristické mezi kluzu plechů hodnoty 203 Mpa. Vzhledem k nejistotě výpočtu, a nepřesnosti interpolace je tedy nutno monitorovat Dolní pásy U6 a ujistit se že nedojde k jejich plastickému namáhání.

## 12.1.d. Fáze 9 – Porušení 4xD7+2xD6+U6

Konečné počítané porušení je porušení jihovýchodního dolního pásu U6. Fáze byla vymodelována a vypočteny napětí. Při verifikaci napětí byly zjištěny tlakové napětí hodnoty 208 Mpa, což je vyšší než charakteristická mez kluzu ve svislici, hodnoty 203.

Výpočet je tedy zastaven.

## 12.2. TABULKOVÉ SHRUTÍ VÝSLEDKŮ

### 12.2.a. Čas porušení prvků

rok	den	prut	označení	popis prvku
2048	155	732	D7	Dolní část diagonály D7 - severovýchodní (od Vyšehradu první D7 vpravo)
2048	319	692	D7	Dolní část diagonály D7 - jihozápadní (od Vyšehradu druhá D7 vlevo)
2055	295	654	D7	Dolní část diagonály D7 - jihovýchodní (od Vyšehradu první D7 vlevo)
2055	333	770	D7	Dolní část diagonály D7 - severozápadní (od Vyšehradu druhá D7 vpravo)
2072	355	729	D6	Dolní část diagonály D6 - severovýchodní (od Vyšehradu první D6 vpravo)
2073	325	695	D6	Dolní část diagonály D6 - jihozápadní (od Vyšehradu druhá D6 vlevo)
2077	288	11	U6	Napojení dolního pásu U6 na V5 - jihozápadní (od Vyšehradu 11. sdružené pole vlevo)

Tabulka 30: Shrnutí výsledků hlavního výpočtu

### 12.2.b. Maximální napětí ve fázích

rok	fáze	$\sigma_{max}$	prut	ozn.	popis prvku
2048	2	89.75	771	D7	Horní část diagonály D7 - severozápadní (od Vyšehradu druhá D7 vpravo)
2048	3	94.5	729	D6	Dolní část diagonály D6 - severovýchodní (od Vyšehradu první D6 vpravo)
2055	4	94.7	729	D6	Dolní část diagonály D6 - severovýchodní (od Vyšehradu první D6 vpravo)
2055	5	104.11	651	D6	Dolní část diagonály D6 - jihozápadní (od Vyšehradu druhá D6 vlevo)
2072	6	105.4	651	D6	Dolní část diagonály D6 - jihozápadní (od Vyšehradu druhá D6 vlevo)
2073	7	199.4	23	U6	Napojení dolního pásu U6 na V5 - severozápadní (od Vyšehradu 6. sdružené pole vpravo)
2077	8	199.8	11	U6	Napojení dolního pásu U6 na V5 - jihozápadní (od Vyšehradu 11. sdružené pole vlevo)
2077	9	191.14	532	V5	Plnostěnná část svislice V5 - jihovýchodní (od Vyšehradu první V5 vlevo)

Tabulka 31: maximální napětí v každé fázi

### 12.2.c. Minimální napětí ve fázích

rok	fáze	$\sigma_{min}$	prut	ozn.	popis prvku
2048	2	-106.2	592	V0	Svislice V0 u podpory - severozápadní (od Vyšehradu druhá V0 vpravo)
2048	3	-106.7	554	V0	Svislice V0 u podpory - jihozápadní (od Vyšehradu druhá V0 vlevo)
2055	4	-106.7	554	V0	Svislice V0 u podpory - jihozápadní (od Vyšehradu druhá V0 vlevo)
2055	5	-106.6	554	V0	Svislice V0 u podpory - jihozápadní (od Vyšehradu druhá V0 vlevo)
2072	6	-106.3	592	V0	Svislice V0 u podpory - severozápadní (od Vyšehradu druhá V0 vpravo)
2073	7	-168.9	571	V5	Plnostěnná část svislice V5 - severovýchodní (od Vyšehradu první V5 vpravo)
2077	8	-169.8	544	V5	Plnostěnná část svislice V5 - jihozápadní (od Vyšehradu druhá V5 vlevo)
2077	9	-208.1	532	V5	Plnostěnná část svislice V5 - jihovýchodní (od Vyšehradu první V5 vlevo)

Tabulka 32: minimální napětí v každé fázi

## 12.3. VYUŽITÍ PRUTŮ NA KONCI FÁZÍ

### 12.3.a. Fáze 1+2

HLAVNI_VYPOCET				
únavové využití 10 nejvíce využitých prvků				
FÁZE 1+2 – rok 2048 – den 155				
pořadí	využití	prut	x	průřez
1	1.0000	0732	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
2	0.9854	0692	3588.2	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
3	0.9595	0731	7216.2	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
4	0.9525	0693	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
5	0.7889	0654	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
6	0.7888	0770	3588.2	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
7	0.7592	0771	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
8	0.7583	0653	7216.2	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
9	0.2989	0734	2553.1	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
10	0.2901	0690	0	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
11	0.2743	0768	0	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
12	0.2703	0729	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D6
13	0.2688	0656	2553.1	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
14	0.2645	0695	4279.8	SHAPE-THIN DIAGONALA D6
15	0.2539	0576	0	SHAPE-THIN VERTIKALA V7
16	0.2519	0541	0	SHAPE-THIN VERTIKALA V7
17	0.2433	0728	6940.6	SHAPE-THIN DIAGONALA D6
18	0.2395	0696	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D6
19	0.2082	0733	0	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
20	0.2021	0691	1073.2	SHAPE-THIN DIAGONALA D7

Tabulka 33: Nejvíce využitě pruty fáze 1+2 hlavního výpočtu

### 12.3.b. Fáze 3

HLAVNI_VYPOCET				
únavové využití 10 nejvíce využitých prvků				
FÁZE 3 – rok 2048 – den 319				
pořadí	využití	prut	x	průřez
1	1.0000	0732	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
2	1.0000	0692	3588.2	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
3	0.9668	0693	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
4	0.9595	0731	7216.2	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
5	0.8012	0654	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
6	0.8003	0770	3588.2	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
7	0.7705	0771	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
8	0.7704	0653	7216.2	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
9	0.2989	0734	2553.1	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
10	0.2938	0690	0	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
11	0.2829	0729	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D6
12	0.2779	0768	0	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
13	0.2728	0656	2553.1	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
14	0.2675	0695	4279.8	SHAPE-THIN DIAGONALA D6
15	0.2582	0576	0	SHAPE-THIN VERTIKALA V7
16	0.2559	0541	0	SHAPE-THIN VERTIKALA V7
17	0.2548	0728	6940.6	SHAPE-THIN DIAGONALA D6
18	0.2423	0696	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D6
19	0.2082	0733	0	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
20	0.2049	0691	1073.2	SHAPE-THIN DIAGONALA D7

Tabulka 34: Nejvíce využitě pruty fáze 3 hlavního výpočtu



### 12.3.c. Fáze 4

HLAVNI_VYPOCET				
únavové využití 10 nejvíce využitých prvků				
FÁZE 4 – rok 2055 – den 295				
pořadí	využití	prut	x	průřez
1	1.0000	0732	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
2	1.0000	0692	3588.2	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
3	1.0000	0654	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
4	0.9969	0770	3588.2	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
5	0.9668	0693	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
6	0.9653	0653	7216.2	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
7	0.9635	0771	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
8	0.9595	0731	7216.2	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
9	0.4814	0729	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D6
10	0.4623	0695	4279.8	SHAPE-THIN DIAGONALA D6
11	0.4376	0728	6940.6	SHAPE-THIN DIAGONALA D6
12	0.4222	0696	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D6
13	0.3442	0768	0	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
14	0.3384	0656	2553.1	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
15	0.3295	0576	0	SHAPE-THIN VERTIKALA V7
16	0.3276	0541	0	SHAPE-THIN VERTIKALA V7
17	0.2989	0734	2553.1	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
18	0.2938	0690	0	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
19	0.2275	0651	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D6
20	0.2260	0539	0	SHAPE-THIN VERTIKALA V8

Tabulka 35: Nejvíce využité pruty fáze 4 hlavního výpočtu

### 12.3.d. Fáze 5

HLAVNI_VYPOCET				
únavové využití 10 nejvíce využitých prvků				
FÁZE 5 – rok 2055 – den 333				
pořadí	využití	prut	x	průřez
1	1.0000	0732	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
2	1.0000	0692	3588.2	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
3	1.0000	0654	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
4	1.0000	0770	3588.2	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
5	0.9668	0693	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
6	0.9666	0771	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
7	0.9653	0653	7216.2	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
8	0.9595	0731	7216.2	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
9	0.4843	0729	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D6
10	0.4653	0695	4279.8	SHAPE-THIN DIAGONALA D6
11	0.4403	0728	6940.6	SHAPE-THIN DIAGONALA D6
12	0.4250	0696	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D6
13	0.3452	0768	0	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
14	0.3384	0656	2553.1	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
15	0.3307	0576	0	SHAPE-THIN VERTIKALA V7
16	0.3287	0541	0	SHAPE-THIN VERTIKALA V7
17	0.2989	0734	2553.1	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
18	0.2938	0690	0	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
19	0.2299	0651	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D6
20	0.2264	0539	0	SHAPE-THIN VERTIKALA V8

Tabulka 36: Nejvíce využité pruty fáze 5 hlavního výpočtu

### 12.3.e. Fáze 6

HLAVNI_VYPOCET				
únavové využití 10 nejvíce využitých prvků				
FÁZE 6 – rok 2072 – den 355				
pořadí	využití	prut	x	průřez
1	1.0000	0732	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
2	1.0000	0692	3588.2	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
3	1.0000	0654	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
4	1.0000	0770	3588.2	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
5	1.0000	0729	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D6
6	0.9723	0695	4279.8	SHAPE-THIN DIAGONALA D6
7	0.9668	0693	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
8	0.9666	0771	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
9	0.9653	0653	7216.2	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
10	0.9595	0731	7216.2	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
11	0.9142	0728	6940.6	SHAPE-THIN DIAGONALA D6
12	0.8927	0696	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D6
13	0.6493	0651	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D6
14	0.6318	0773	4279.8	SHAPE-THIN DIAGONALA D6
15	0.5908	0650	6940.6	SHAPE-THIN DIAGONALA D6
16	0.5766	0774	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D6
17	0.5342	0576	0	SHAPE-THIN VERTIKALA V7
18	0.5281	0541	0	SHAPE-THIN VERTIKALA V7
19	0.4202	0537	0	SHAPE-THIN VERTIKALA V7
20	0.4158	0580	0	SHAPE-THIN VERTIKALA V7

Tabulka 37: Nejvíce využité pruty fáze 6 hlavního výpočtu

### 12.3.f. Fáze 7

HLAVNI_VYPOCET				
únavové využití 10 nejvíce využitých prvků				
FÁZE 7 – rok 2073 – den 325				
pořadí	využití	prut	x	průřez
1	1.0000	0732	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
2	1.0000	0692	3588.2	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
3	1.0000	0654	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
4	1.0000	0770	3588.2	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
5	1.0000	0729	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D6
6	1.0000	0695	4279.8	SHAPE-THIN DIAGONALA D6
7	0.9668	0693	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
8	0.9666	0771	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
9	0.9653	0653	7216.2	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
10	0.9595	0731	7216.2	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
11	0.9182	0696	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D6
12	0.9142	0728	6940.6	SHAPE-THIN DIAGONALA D6
13	0.6736	0651	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D6
14	0.6547	0773	4279.8	SHAPE-THIN DIAGONALA D6
15	0.6129	0650	6940.6	SHAPE-THIN DIAGONALA D6
16	0.5976	0774	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D6
17	0.5445	0576	0	SHAPE-THIN VERTIKALA V7
18	0.5402	0541	0	SHAPE-THIN VERTIKALA V7
19	0.4443	0537	0	SHAPE-THIN VERTIKALA V7
20	0.4292	0580	0	SHAPE-THIN VERTIKALA V7

Tabulka 38: Nejvíce využité pruty fáze 7 hlavního výpočtu

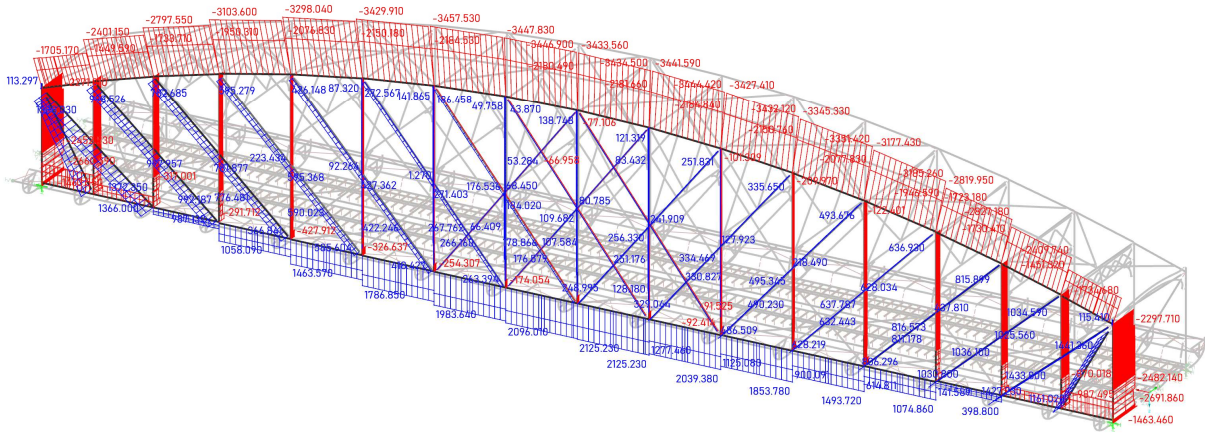
### 12.3.g. Fáze 8

HLAVNI_VYPOCET				
únavové využití 10 nejvíce využitých prvků				
FÁZE 8 – rok 2077 – den 288				
pořadí	využití	prut	x	průřez
1	1.0000	0732	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
2	1.0000	0692	3588.2	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
3	1.0000	0654	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
4	1.0000	0770	3588.2	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
5	1.0000	0729	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D6
6	1.0000	0695	4279.8	SHAPE-THIN DIAGONALA D6
7	1.0000	0011	4800	SHAPE-THIN DOLNI PAS U6
8	0.9670	0693	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
9	0.9666	0771	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
10	0.9653	0653	7216.2	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
11	0.9597	0731	7216.2	SHAPE-THIN DIAGONALA D7
12	0.9182	0696	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D6
13	0.9142	0728	6940.6	SHAPE-THIN DIAGONALA D6
14	0.7809	0651	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D6
15	0.7622	0773	4279.8	SHAPE-THIN DIAGONALA D6
16	0.7103	0650	6940.6	SHAPE-THIN DIAGONALA D6
17	0.6954	0774	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D6
18	0.6366	0726	5	SHAPE-THIN DIAGONALA D5
19	0.6126	0012	0	SHAPE-THIN DOLNI PAS U5
20	0.5959	0576	0	SHAPE-THIN VERTIKALA V7

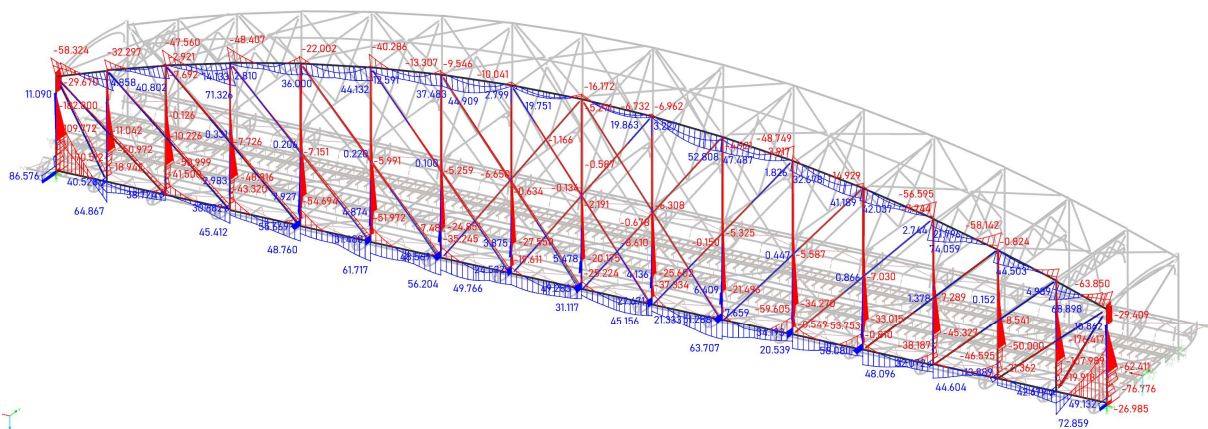
Tabulka 39: Nejvíce využité pruty fáze 8 hlavního výpočtu

## 12.4. VYBRANÉ VNITŘNÍ SÍLY FÁZÍ

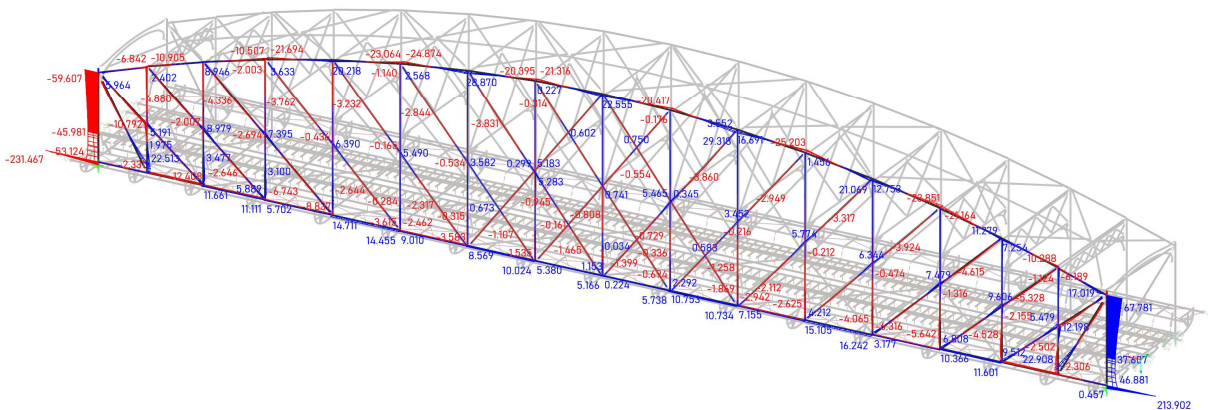
### 12.4.a. Fáze 1 – 1900-197 – Originální konstrukce – KV10 – NEX



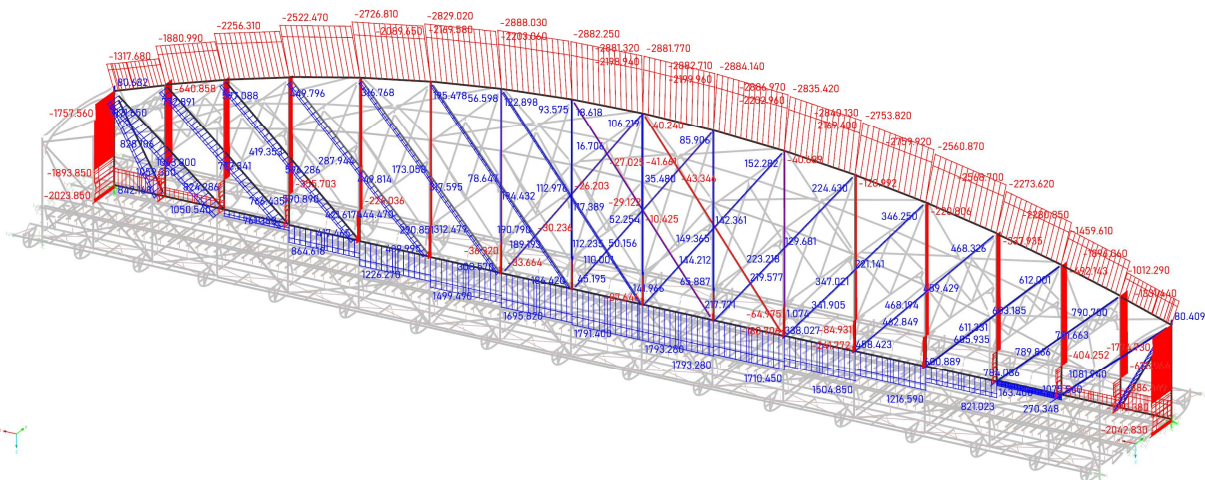
Obrázek 75: Vnitřní síly - N - FAZ 1 - Kombinace 10- G+1.07 x NEX - bližší příhrada



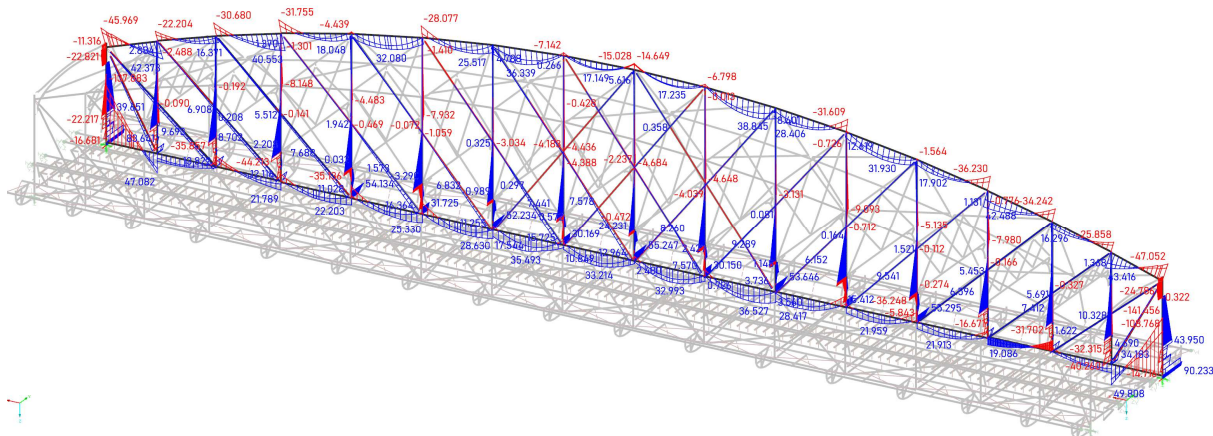
Obrázek 76: Vnitřní síly - My - FAZ 1 - Kombinace 10- G+1.07 x NEX - bližší příhrada



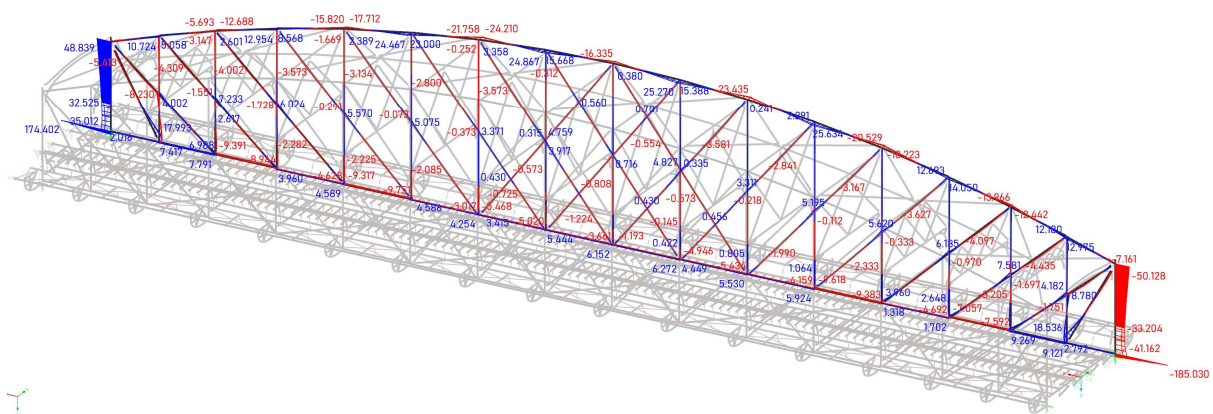
Obrázek 77: Vnitřní síly - Mz - FAZ 1 - Kombinace 10- G+1.07 x NEX - bližší příhrada



Obrázek 78: Vnitřní síly - N - FAZ 1 - Kombinace 10- G+1.07 x NEX - vzdálenější příhrada

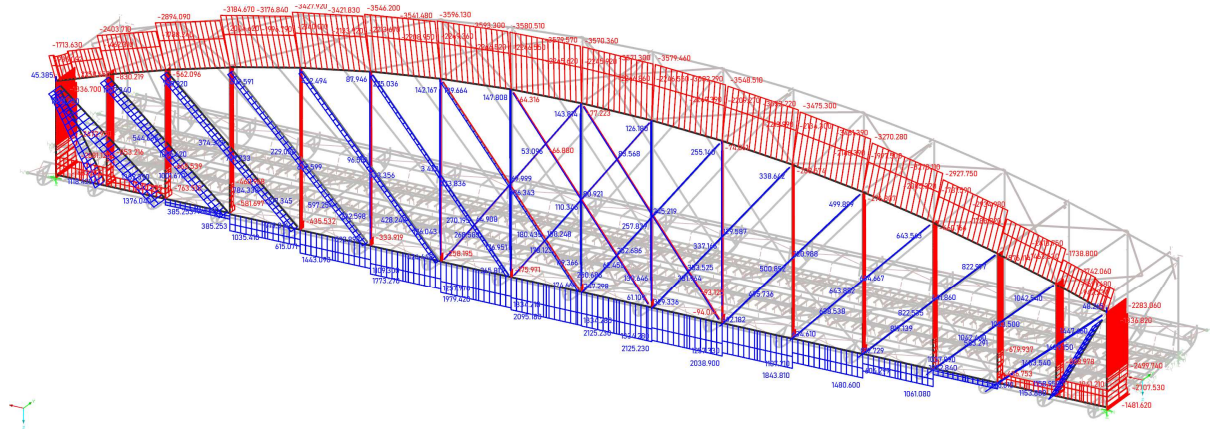


Obrázek 79: Vnitřní síly -  $M_y$  - FAZ 1 - Kombinace 10- G+1.07 x NEX - vzdálenější příhrada

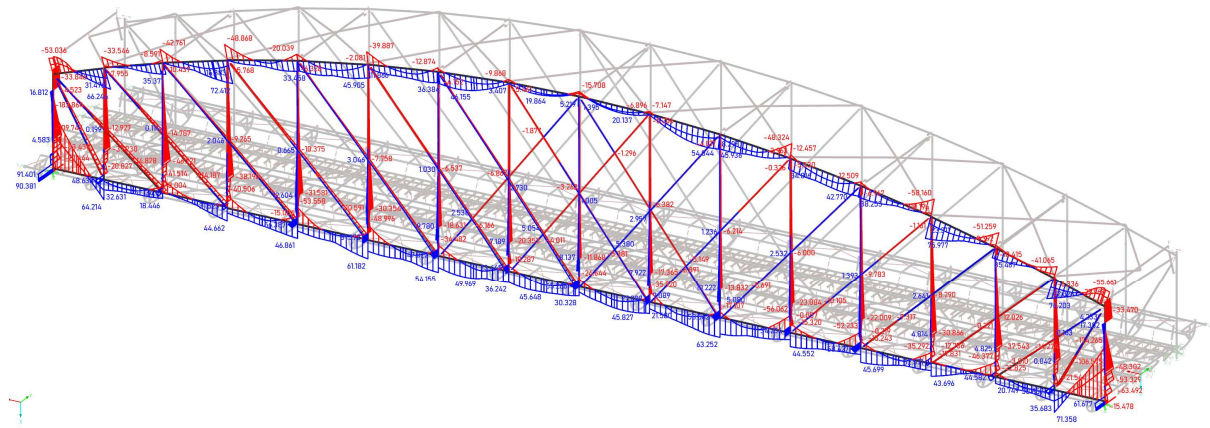


Obrázek 80: Vnitřní síly -  $M_z$  - FAZ 1 - Kombinace 10- G+1.07 x NEX - vzdálenější příhrada

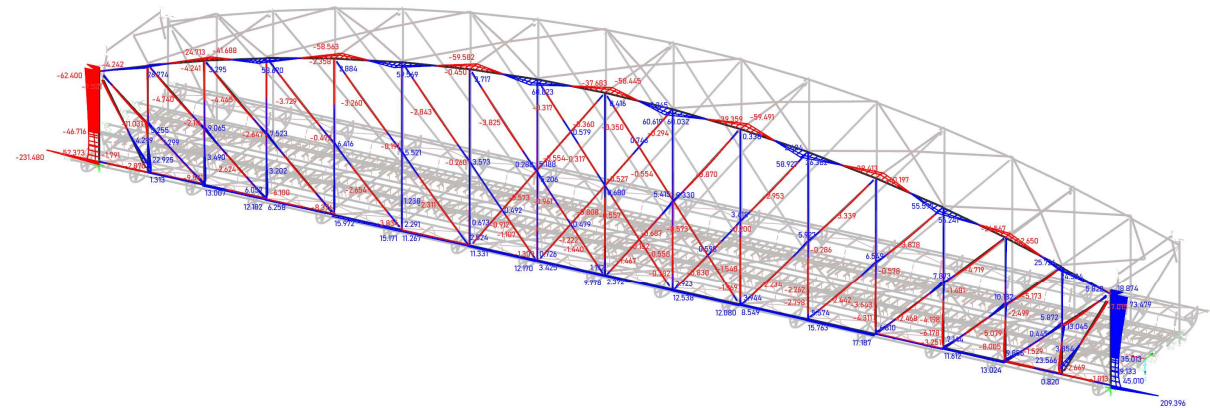
## 12.4.b. Fáze 2 – Konstrukce pro rekonstrukci – KV10 – NEX



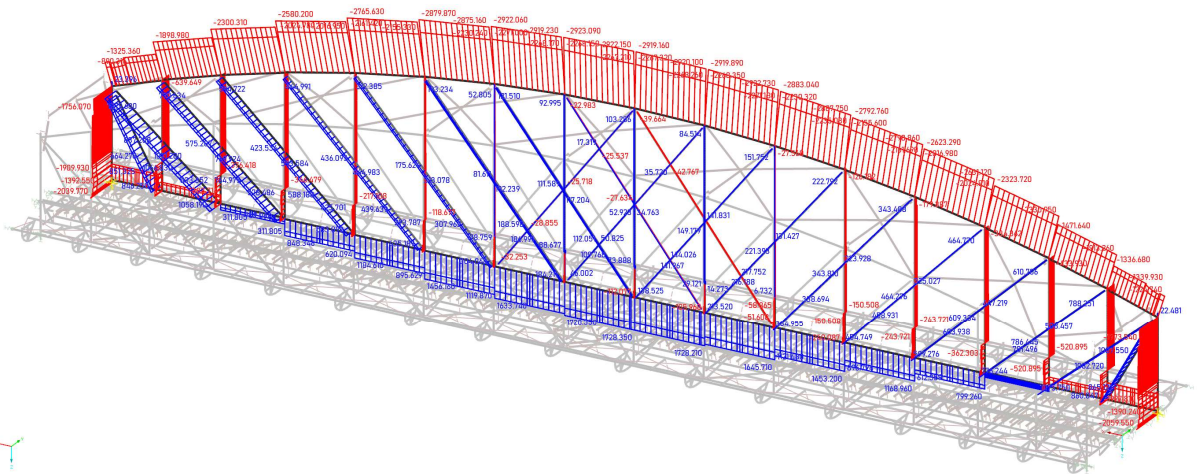
Obrázek 81: Vnitřní síly - N - FAZ 2 - Kombinace 10- G+1.07 x NEX - bližší příhrada



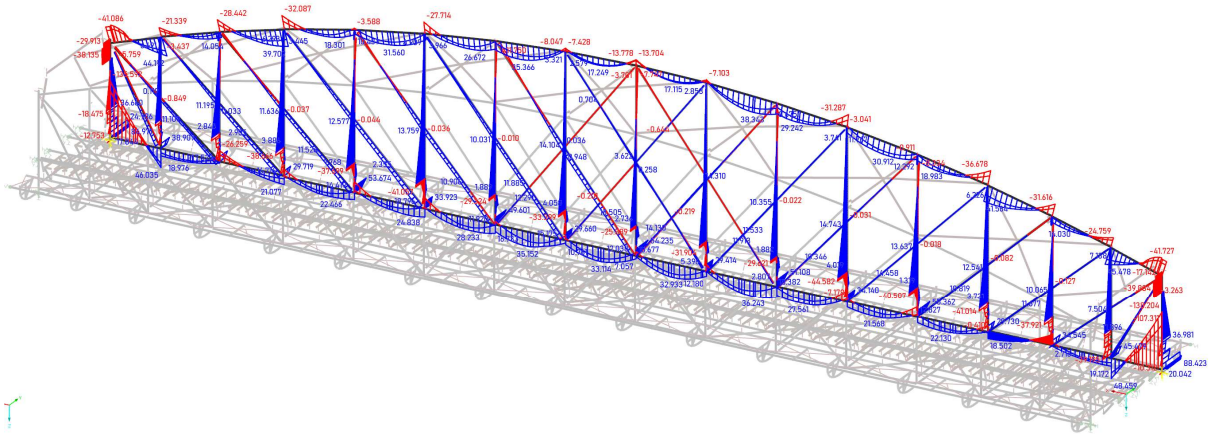
Obrázek 82: Vnitřní síly -  $M_y$  - FAZ 2 - Kombinace 10- G+1.07 x NEX - bližší příhrada



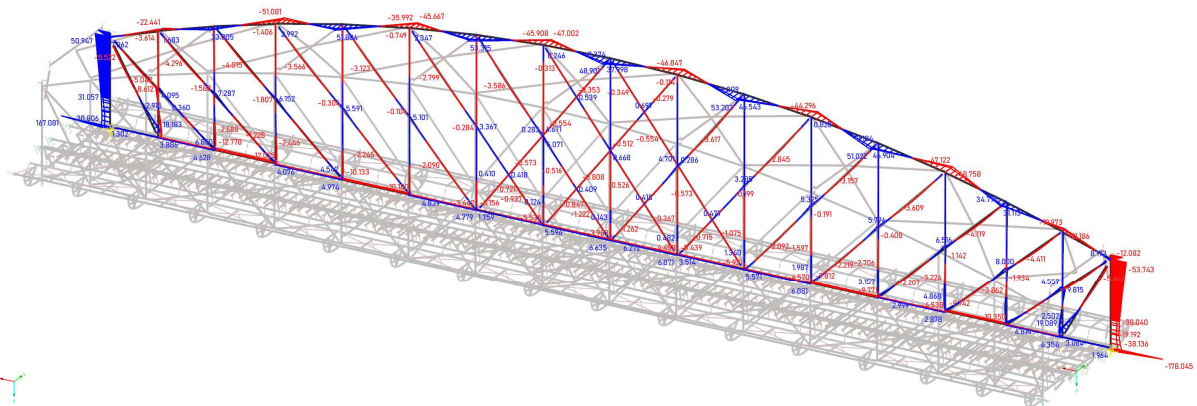
Obrázek 83: Vnitřní síly -  $M_z$  - FAZ 1 - Kombinace 10- G+1.07 x NEX - bližší příhrada



Obrázek 84: Vnitřní síly - N - FAZ 2 - Kombinace 10- G+1.07 x NEX - vzdálenější příhrada

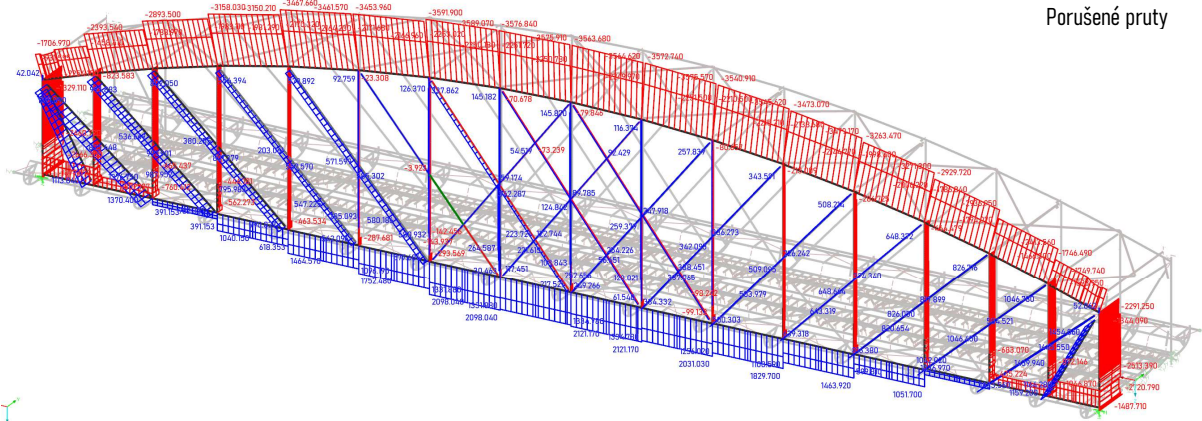


Obrázek 85: Vnitřní síly -  $M_y$  - FAZ 2 - Kombinace 10- G+1.07 x NEX - vzdálenější příhrada

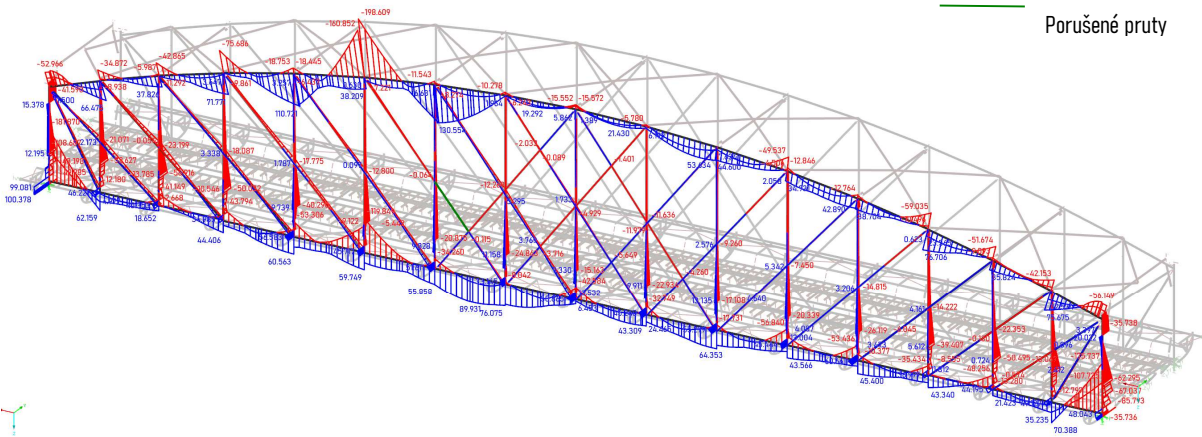


Obrázek 86: Vnitřní síly -  $M_z$  - FAZ 2 - Kombinace 10- G+1.07 x NEX - vzdálenější příhrada

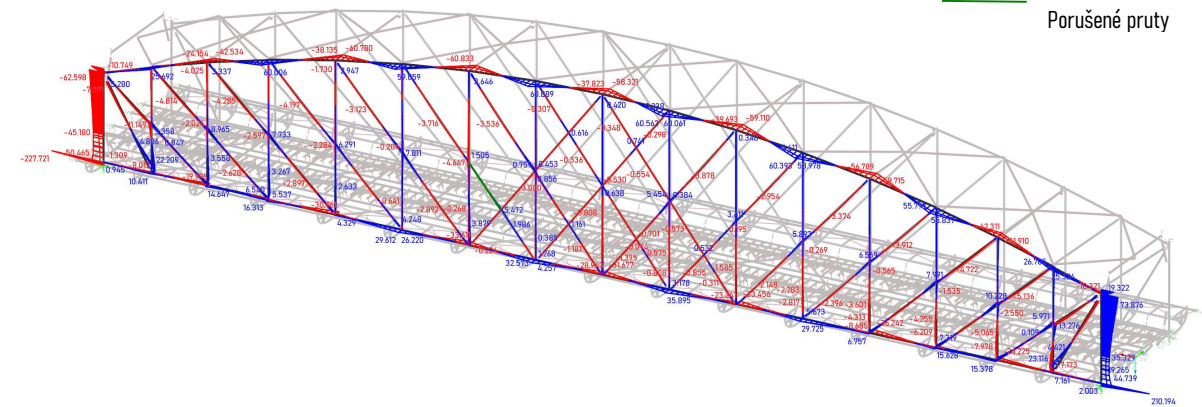
## 12.4.c. Fáze 4 – 2x Porušení D7 – KV10 – NEX



Obrázek 87: Vnitřní síly - N - FAZ 4 - Kombinace 10- G+1.07 x NEX - bližší příhrada

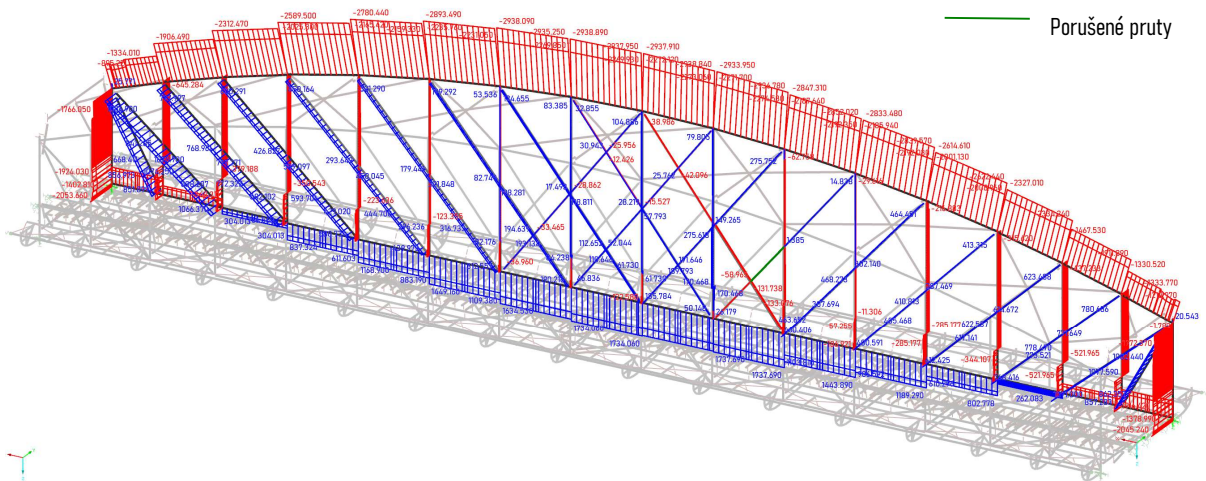


Obrázek 88: Vnitřní síly -  $M_y$  - FAZ 4 - Kombinace 10- G+1.07 x NEX - bližší příhrada

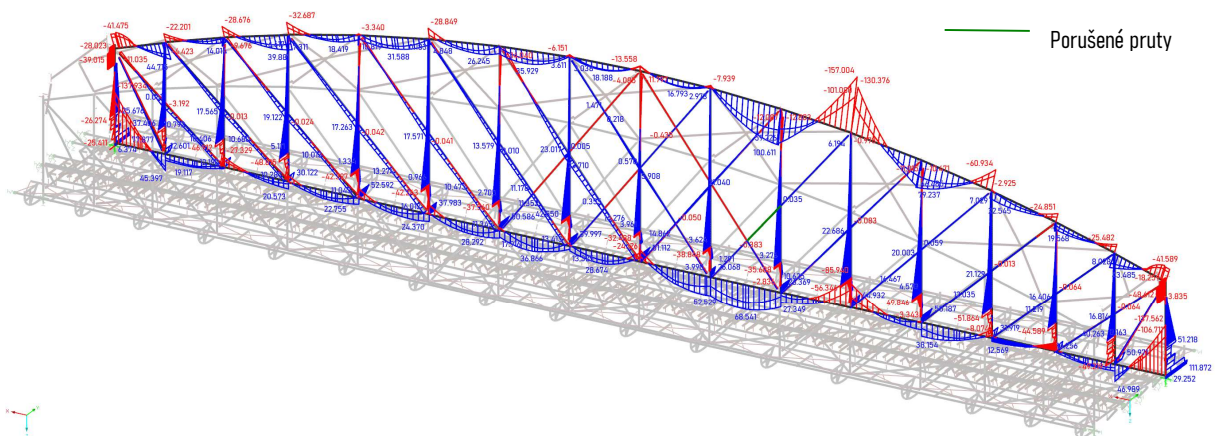


Obrázek 89: Vnitřní síly -  $M_z$  - FAZ 4 - Kombinace 10- G+1.07 x NEX - bližší příhrada

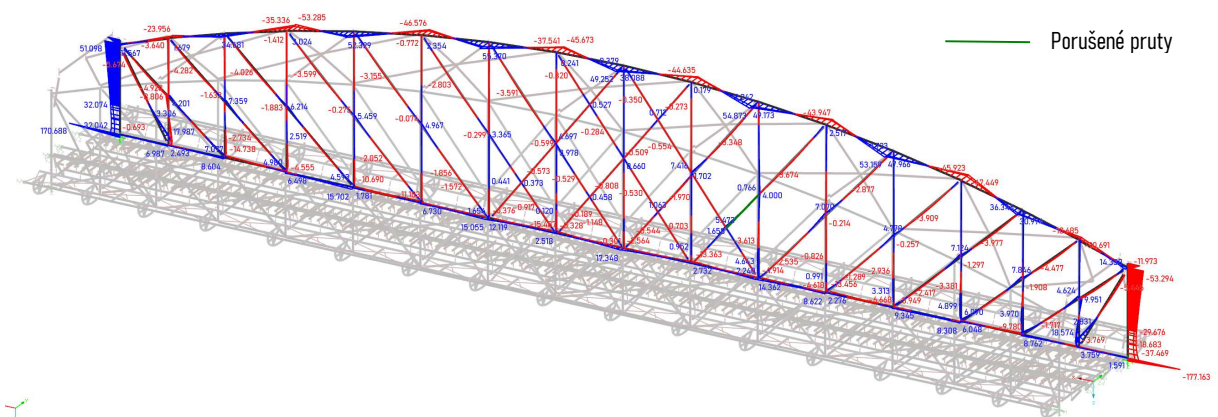




Obrázek 90: Vnitřní síly - N - FAZ 4 - Kombinace 10- G+1.07 x NEX - vzdálenější příhrada

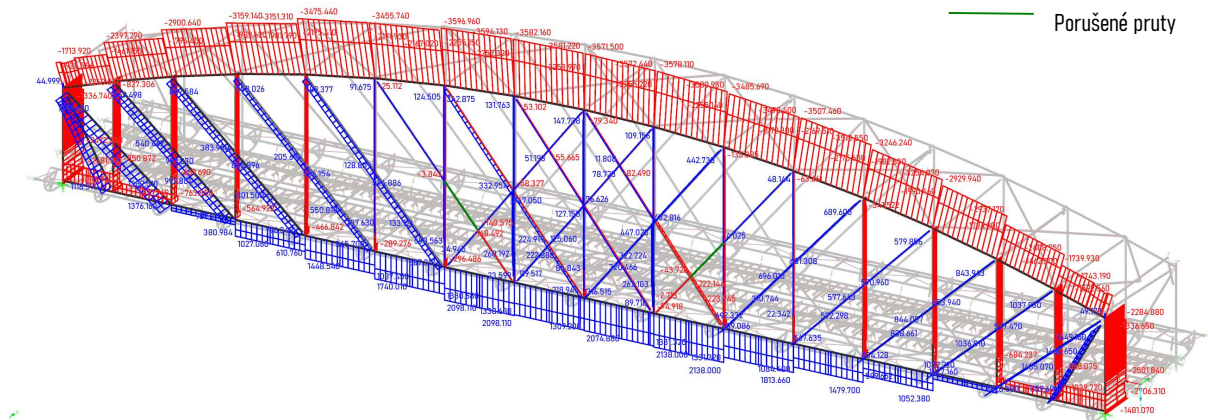


Obrázek 91: Vnitřní síly -  $M_y$  - FAZ 4 - Kombinace 10- G+1.07 x NEX - vzdálenější příhrada

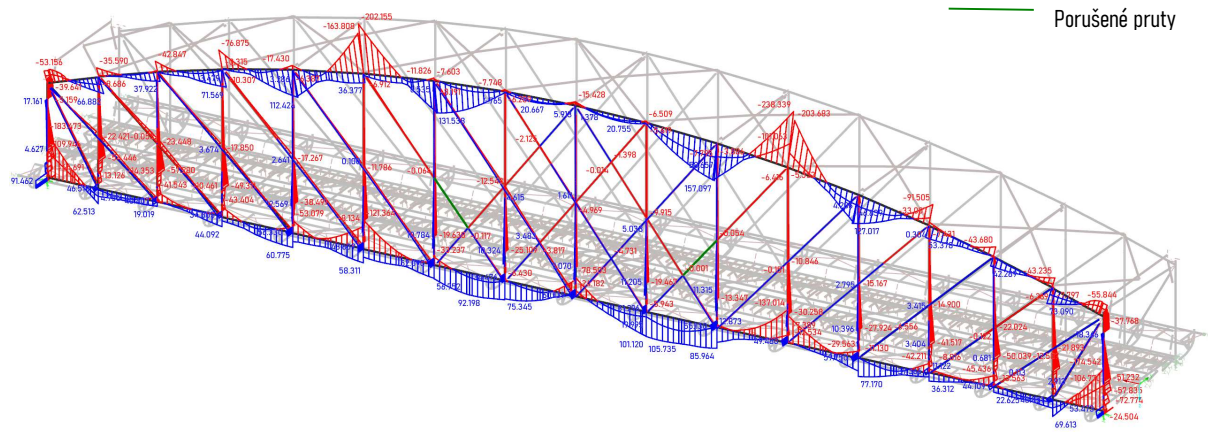


Obrázek 92: Vnitřní síly -  $M_z$  - FAZ 4 - Kombinace 10- G+1.07 x NEX - vzdálenější příhrada

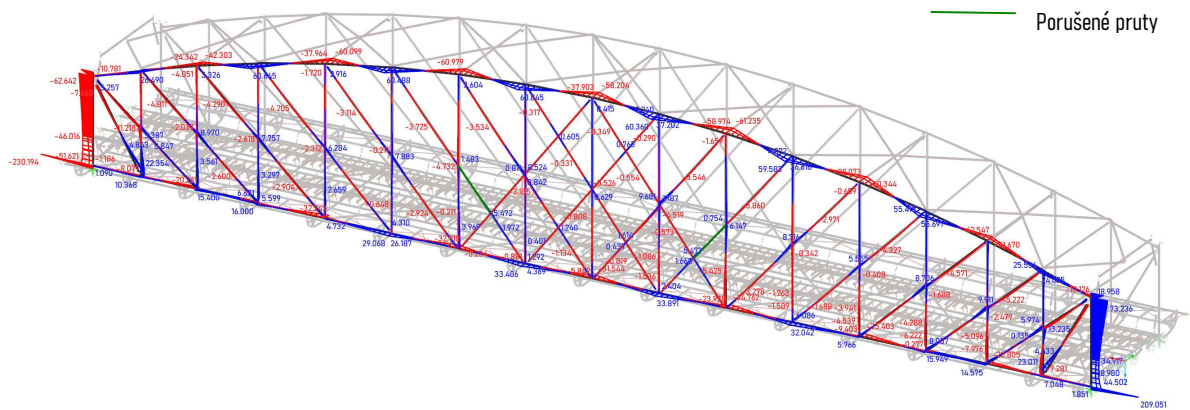
## 12.4.d. Fáze 6 – 4x porušení D7 – Kombinace KV10 – NEX



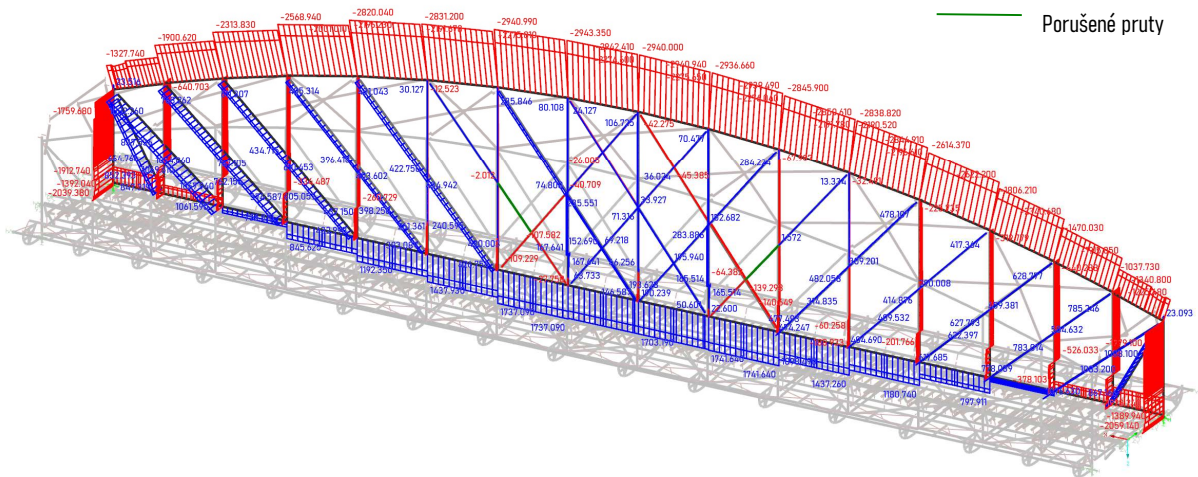
Obrázek 93: Vnitřní síly - N - FAZ 6 – Kombinace 10- G+1.07 x NEX - bližší příhrada



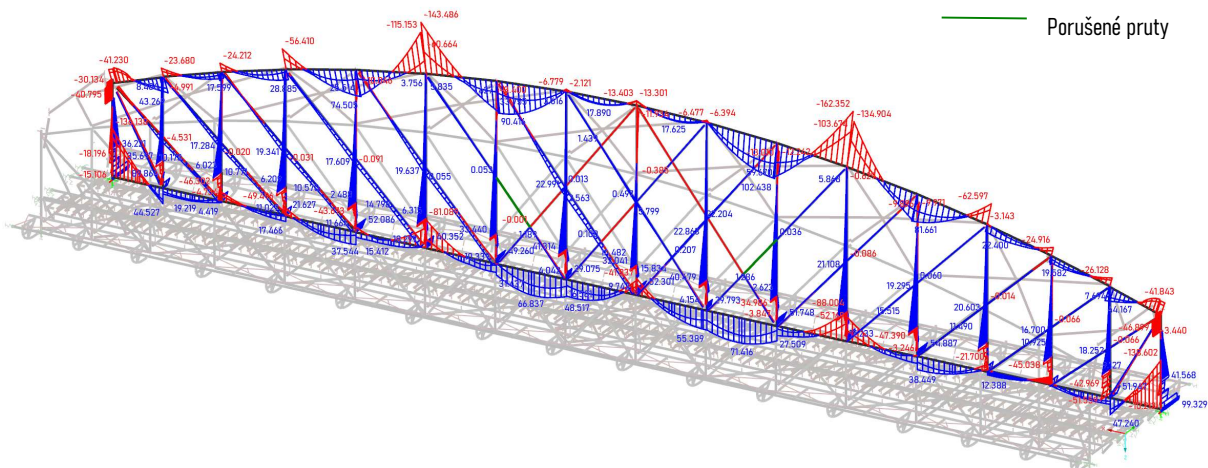
Obrázek 94: Vnitřní síly -  $M_y$  - FAZ 6 – Kombinace 10- G+1.07 x NEX - bližší příhrada



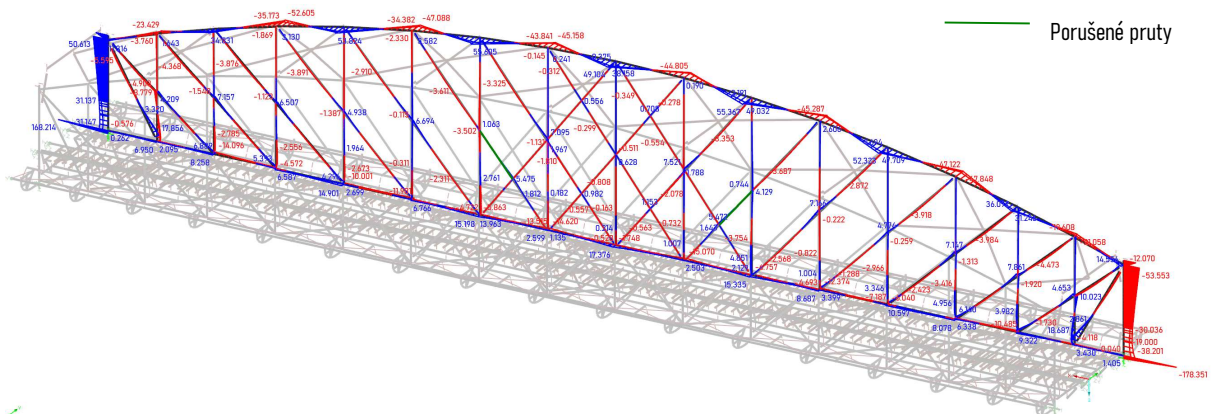
Obrázek 95: Vnitřní síly -  $M_z$  - FAZ 6 – Kombinace 10- G+1.07 x NEX - bližší příhrada



Obrázek 96: Vnitřní síly - N - FAZ 6 - Kombinace 10- G+1.07 x NEX - vzdálenější příhrada

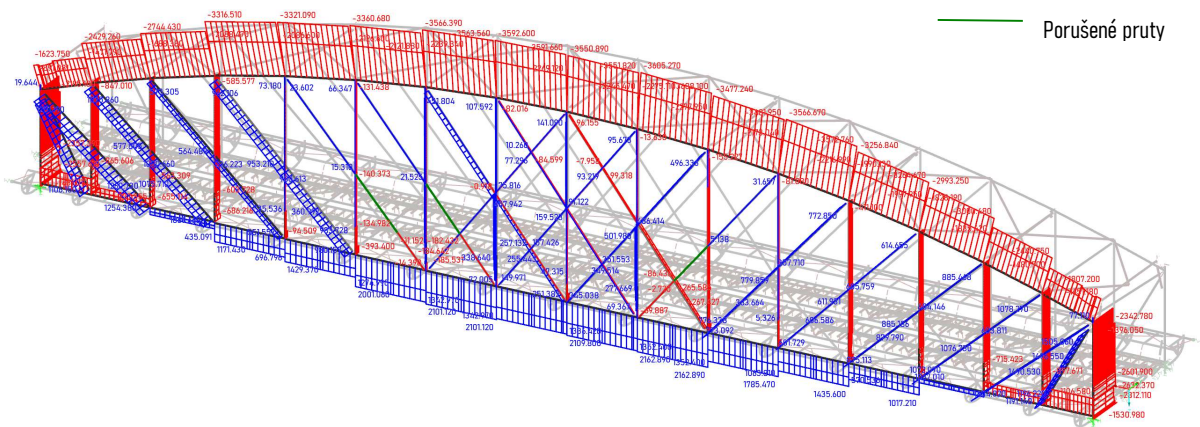


Obrázek 97: Vnitřní síly -  $M_y$  - FAZ 6 - Kombinace 10- G+1.07 x NEX - vzdálenější příhrada

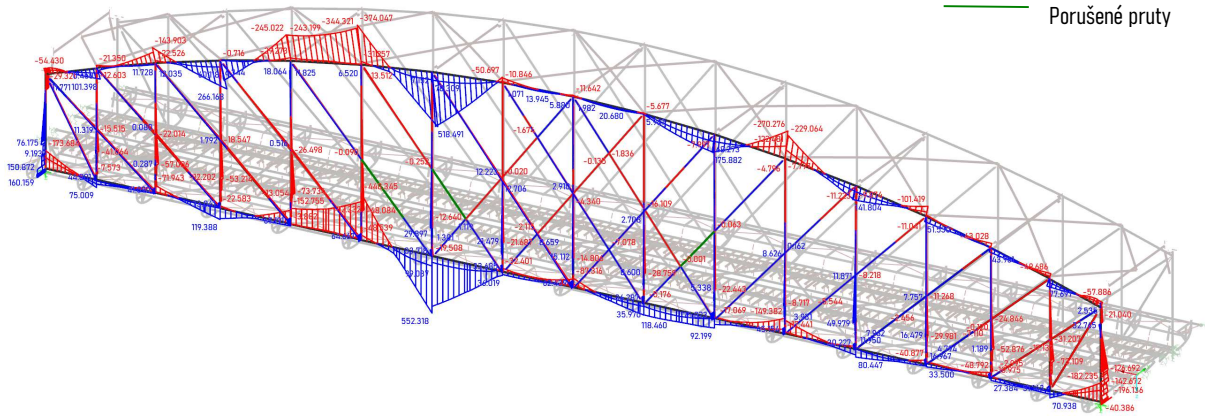


Obrázek 98: Vnitřní síly -  $M_z$  - FAZ 6 - Kombinace 10- G+1.07 x NEX - vzdálenější příhrada

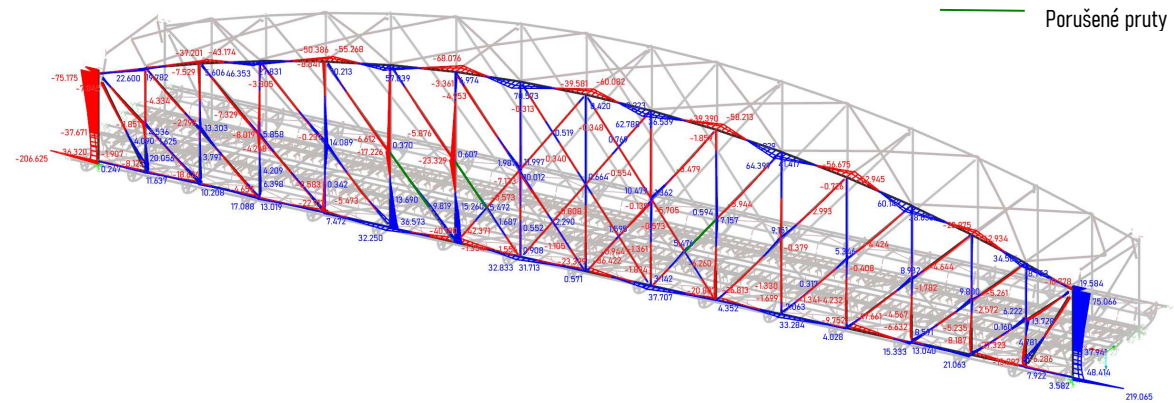
## 12.4.e. Fáze 8 – 4x porušení D7 + 2x porušení D6 – KV10 – NEX



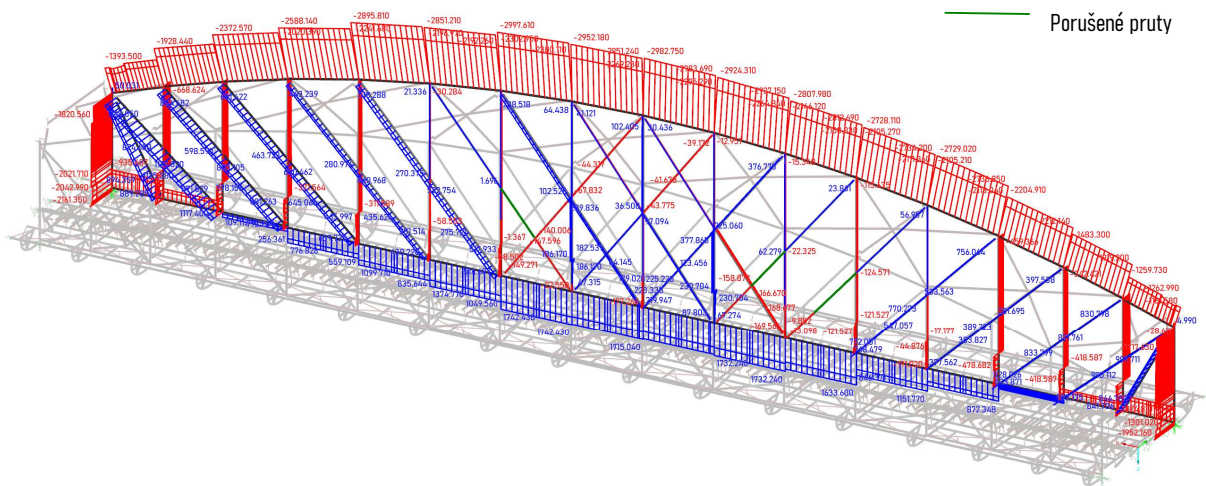
Obrázek 99: Vnitřní síly - N - FAZ 6 - Kombinace 10- G+1.07 x NEX - bližší příhrada



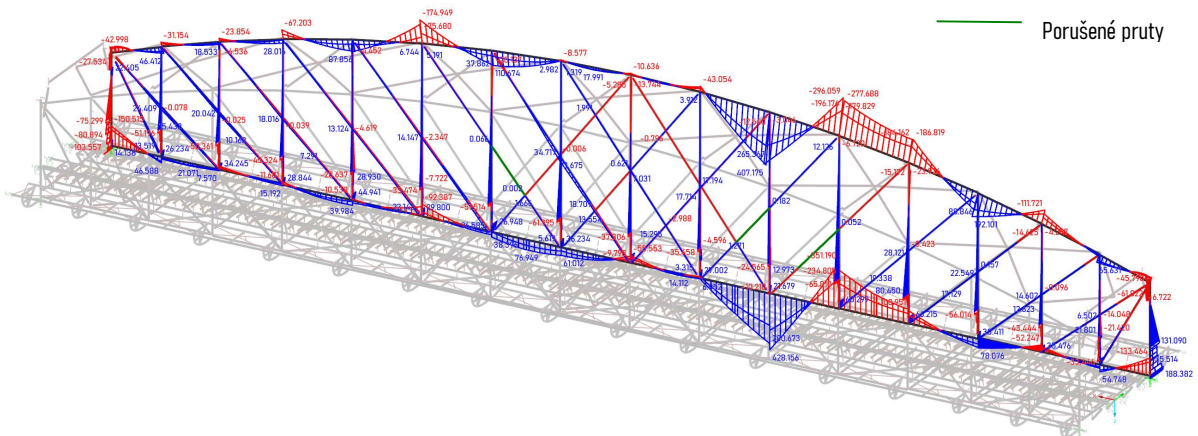
Obrázek 100: Vnitřní síly -  $M_y$  - FAZ 6 - KV10 - NEX - bližší příhrada



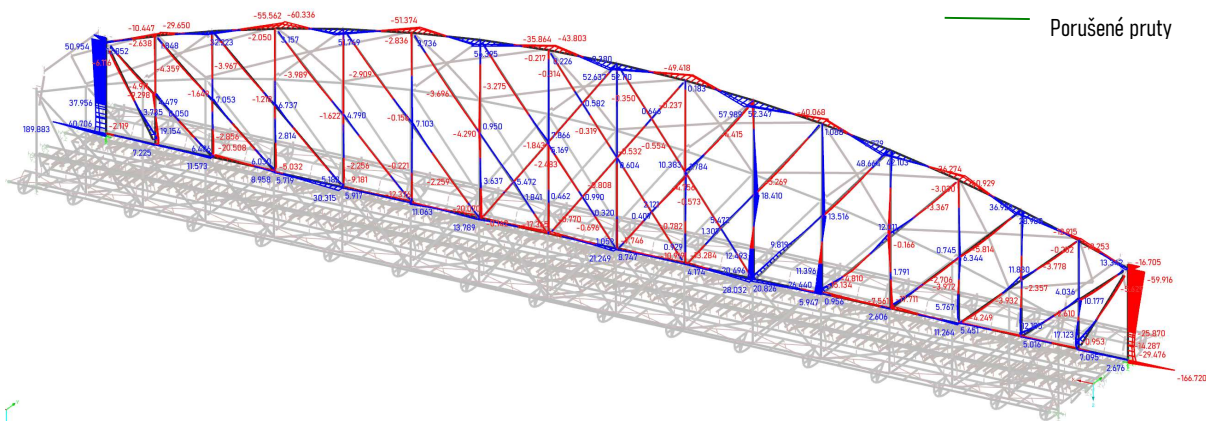
Obrázek 101: Vnitřní síly -  $M_z$  - FAZ 6 - KV10 - NEX - bližší příhrada



Obrázek 102: Vnitřní síly -  $N$  - FAZ 6 - Kombinace 10- G+1.07 x NEX - vzdálenější příhrada



Obrázek 103: Vnitřní síly -  $M_y$  - FAZ 6 - Kombinace 10- G+1.07 x NEX - vzdálenější příhrada



Obrázek 104: Vnitřní síly -  $M_z$  - FAZ 6 - Kombinace 10- G+1.07 x NEX - vzdálenější příhrada

---

## 13. ZÁVĚR

---

Z této práce vyplývá, že most bude pravděpodobně z hlediska únavy schopen funkce pro skutečnou dopravu více než tři desetiletí po jeho prvním porušení. První dvě porušení se dají očekávat v roce 2048, následující dvě v 2055, následující dvě v 2072-73, a poslední porušení v 2077. Konstrukce po tomto porušení nebude schopna fungovat a provádět dopravu dále a vzniklý kolaps dolního pásu povede k rozsáhlejšímu kolapsu konstrukce.

Je potřeba zdůraznit, že tento výpočet byl proveden bez použití návrhových postupů. Z toho důvodu mají výsledky být brány **jako pravděpodobné, nikoliv návrhové**. Což laicky řečeno je spíše popis „*jak a kdy to asi spadne*“ než záruka, že do dané doby bude konstrukce schopná provozu. Současně zde není obsažena **žádná bezpečnost** daná součiniteli zatížení a materiálu, jde o hodnocení skutečného zatížení. S ohledem na postupující korozi, či predikované přerušování prvků je pravděpodobné, že most nebude splňovat požadavky norem na spolehlivost i dříve, než 2048. Toto však není úkonem předpokládané práce.

Tento výpočet se projevil jako pesimističtější než přepočtení Dle zatížitelnosti a přechodnosti zpracovaného v roce 2020 společností SUDOP PRAHA a.s., který počítá s prvním porušením hlavní nosné konstrukce až v roce 2055 (2). Důvod tohoto rozdílu je odlišný postup stanovení počtu cyklů a rozkmitů napětí.

Tento výpočet také počítá s konzervativní s křivkou postupu koroze s ročním nárůstem 0.70 % oproti hodnotě v době průzkumu, a to počínající v roce 2015. Tento předpoklad slouží k zajištění správnosti výpočtu v případě zrychlení vývoje koroze.

Tento výpočet má ale omezení a je nutné s nimi počítat.

**Výpočet pouze počítá napětí v hlavních nosných prvcích konstrukce.** Nejsou brány v úvahu pevnosti spojů, nelineární jevy typu plasticita nebo vzpěr, ani porušení ostatních prvků mostovky. Předpokládá se tedy, že veškeré porušené prvky mostovky (či jakékoliv ostatní prvky) budou **okamžitě vyměněny** a že přípoje nebudou přetíženy po redistribuci sil.

Pro výpočet je zásadní předpoklad že vlaky na mostě po celou dobu životnosti jsou z hlediska hmotnosti a konfigurace vagonů podobné dnešní dopravě. Je předpokládáno, že vlaky jezdí vždy po správném směru koleje, poměr vlaků v osobní dopravě a v nákladní dopravě je podobný během celého období a poměr současných průjezdů dvou vlaků odpovídá počítaným hodnotám. V případě predikovaného nárůstu dopravy by k poškození došlo výrazně dříve.

Další předpoklad je správnost interpolované hodnoty napětí, a tím pádem pružný stav dolního pásu ve fázi 8. Vzhledem k tomu, že je maximální hodnota napětí (vypočítána interpolací) ve fázi 8 velmi blízko charakteristické mezi kluzu, bude potřeba se ujistit, že dolní pás nebude zatížen plastickým napětím, což by vedlo k nízkocyklové únavě a tím pádem k významnému snížení únavové životnosti konstrukce v poslední fázi.



---

## 14. SEZNAMY:

---

### 14.1. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: fotografie předchůdce mostu, 19 století .....	13
Obrázek 2: Výměna Železničního mostu v roce 1901 (5) .....	14
Obrázek 3: Železniční most v roce 1925 (6) .....	14
Obrázek 4: Nová podoba vjezdového portálu (7) .....	15
Obrázek 5: Příčný řez ve středu rozpětí v moderní podobě (2) .....	16
Obrázek 6: Příčný řez originálního vjezdového portálu (8) .....	17
Obrázek 7: Podélný řez (2) .....	17
Obrázek 8: Půdorys mostovky (2) .....	17
Obrázek 9: Průřezy podélníků (8) .....	18
Obrázek 10: Průřezy příčniců (8) .....	18
Obrázek 11: Průřez dolního pásu z originální dokumentace (8) .....	19
Obrázek 12: Průřez horního pásu z originální dokumentace (8) .....	19
Obrázek 13: Průřez svislice V0 a diagonály D1 (8) .....	20
Obrázek 14: Průřezy svislic V1-V3 (8) .....	20
Obrázek 15: Průřezy svislic V4-V8 (8) .....	20
Obrázek 16: Průřezy diagonál D1-D3 (8) .....	21
Obrázek 17: Průřezy diagonál D5-D8 (8) .....	21
Obrázek 18: Průřezy diagonál D9-D10 (8) .....	21
Obrázek 19: Detail původního vjezdového portálu (8) .....	22
Obrázek 20: Detail původního horního příčnicku č.2 (8) .....	22
Obrázek 21: Detail podélného členěného prutu (2) .....	23
Obrázek 22: Detail nového vjezdového portálu (2) .....	23
Obrázek 23: Výkres nového horního ztužení (2) .....	23
Obrázek 24: Hodnoty koroze horního pásu (2) .....	24
Obrázek 25: Hodnoty koroze dolního pásu (2) .....	24
Obrázek 26: Hodnoty koroze diagonál (2) .....	25
Obrázek 27: Hodnoty koroze svislic (2) .....	25
Obrázek 28: Ostatní stálé zatížení v místě příčnicku 3 .....	30
Obrázek 29: Zatížení od souprav 1-4 (2) .....	33
Obrázek 30: Zatížení od souprav 5-8 (2) .....	34
Obrázek 31: Zatížení od souprav 9,10,12,14 (2) .....	35
Obrázek 32: Graf Intenzity dopravy – směr Smíchov .....	37
Obrázek 33: Graf intenzity dopravy – směr Vyšehrad .....	37
Obrázek 34: Perspektivní 3D rendering modelu stavu po rekonstrukci .....	38
Obrázek 35: 3D rendering hlavního modelu .....	42
Obrázek 36: Perspektivní 3D rendering modelu originálního stavu .....	43
Obrázek 37: Perspektivní 3D rendering modelu originálního stavu .....	43
Obrázek 38: Osově schéma modelu originálního stavu .....	44
Obrázek 39: 3D rendering modelu originálního stavu .....	45
Obrázek 40: Osově schéma modelu stavu po rekonstrukci .....	46
Obrázek 41: 3D rendering modelu stavu po rekonstrukci .....	47
Obrázek 42: Podélný pohled na příhradu mezi svislicemi 0-8 .....	48
Obrázek 43: Příčný pohled na prutový model mostovky .....	49
Obrázek 44: Svislý pohled na prutový model mostovky mezi svislice 0-8 .....	49
Obrázek 45: Svislý pohled na horní ztužení mezi svislice 0-8 .....	50
Obrázek 46: Příčný pohled na příhradový horní příčnick 2 .....	50
Obrázek 47: Model portálového svařence .....	51
Obrázek 48: Svislý pohled na horní ztužení mezi svislice 0-8 .....	51
Obrázek 49: Příčný pohled na lávku .....	51
Obrázek 50: Přípoje vypočítané v diplomové práci Oscara Minora García .....	53
Obrázek 51: Výpočet redukce rotační tuhosti přípoje příčnicku .....	54
Obrázek 52: Součinitel k dle typu prvku .....	55
Obrázek 53: Detail příhrady: křížení diagonál .....	57



Obrázek 54: 3D renderování modelu členěných prutů svislic .....	59
Obrázek 55: renderování modelu členěných prutů diagonál.....	60
Obrázek 56: Perspektivní 3D pohled na podepření.....	61
Obrázek 57: 1. vlastní tvar modelu $f_1=2.105$ Hz.....	66
Obrázek 58: 1. vlastní tvar z přepočtu zatížitelnosti a přechodnosti $f_1=1.99$ Hz (2) .....	66
Obrázek 59: 1. vlastní tvar kmitání z měření v terénu $f_1=2.09$ Hz (11) .....	66
Obrázek 60: 2. vlastní tvar modelu $f_2=3.153$ Hz .....	67
Obrázek 61: 2. vlastní tvar kmitání z přepočtu zatížitelnosti a přechodnosti $f_2=2.84$ Hz (2) .....	67
Obrázek 62: 1. vlastní tvar kmitání z měření v terénu $f_2=3.34$ Hz (11) .....	67
Obrázek 63: 3. vlastní tvar modelu $f_3=4.171$ Hz.....	68
Obrázek 64: 3. vlastní tvar kmitání z přepočtu zatížitelnosti a přechodnosti $f_3=4.14$ Hz (2).....	68
Obrázek 65: 3. vlastní tvar kmitání z přepočtu zatížitelnosti a přechodnosti $f_3=4.41$ Hz (11).....	68
Obrázek 66: 4. vlastní tvar modelu $f_4=4.430$ Hz.....	69
Obrázek 67: 5. vlastní tvar kmitání z přepočtu zatížitelnosti a přechodnosti $f_5=5.10$ Hz (2).....	69
Obrázek 68: 5. vlastní tvar modelu $f_5=5.459$ Hz.....	70
Obrázek 69: 6. vlastní tvar kmitání z přepočtu zatížitelnosti a přechodnosti $f_6=5.27$ Hz (2).....	70
Obrázek 70: 4. vlastní tvar kmitání z přepočtu zatížitelnosti a přechodnosti $f_4=5.78$ Hz (11).....	70
Obrázek 71: Struktura výpočtu .....	71
Obrázek 72: Historický vývoj hlavních emisních zdrojů SO <sub>2</sub> na území bývalého Československa (9) .....	74
Obrázek 73: Graf součinitele koroze.....	75
Obrázek 74: Výpočet využití únavy z přepočtu zatížitelnosti a přechodnosti, období 1900-1999 a 2000-2017 (2)....	85
Obrázek 75: Vnitřní síly - N - FAZ 1 - Kombinace 10- G+1.07 x NEX - bližší příhrada .....	92
Obrázek 76: Vnitřní síly - My - FAZ 1 - Kombinace 10- G+1.07 x NEX - bližší příhrada.....	92
Obrázek 77: Vnitřní síly - Mz - FAZ 1 - Kombinace 10- G+1.07 x NEX - bližší příhrada.....	92
Obrázek 78: Vnitřní síly - N - FAZ 1 - Kombinace 10- G+1.07 x NEX - vzdálenější příhrada .....	93
Obrázek 79: Vnitřní síly - My - FAZ 1 - Kombinace 10- G+1.07 x NEX - vzdálenější příhrada.....	93
Obrázek 80: Vnitřní síly - Mz - FAZ 1 - Kombinace 10- G+1.07 x NEX - vzdálenější příhrada.....	93
Obrázek 81: Vnitřní síly - N - FAZ 2 - Kombinace 10- G+1.07 x NEX - bližší příhrada .....	94
Obrázek 82: Vnitřní síly - My - FAZ 2 - Kombinace 10- G+1.07 x NEX - bližší příhrada.....	94
Obrázek 83: Vnitřní síly - Mz - FAZ 1 - Kombinace 10- G+1.07 x NEX - bližší příhrada .....	94
Obrázek 84: Vnitřní síly - N - FAZ 2 - Kombinace 10- G+1.07 x NEX - vzdálenější příhrada .....	95
Obrázek 85: Vnitřní síly - My - FAZ 2 - Kombinace 10- G+1.07 x NEX - vzdálenější příhrada.....	95
Obrázek 86: Vnitřní síly - Mz - FAZ 2 - Kombinace 10- G+1.07 x NEX - vzdálenější příhrada.....	95
Obrázek 87: Vnitřní síly - N - FAZ 4 - Kombinace 10- G+1.07 x NEX - bližší příhrada .....	96
Obrázek 88: Vnitřní síly - My - FAZ 4 - Kombinace 10- G+1.07 x NEX - bližší příhrada .....	96
Obrázek 89: Vnitřní síly - Mz - FAZ 4 - Kombinace 10- G+1.07 x NEX - bližší příhrada .....	96
Obrázek 90: Vnitřní síly - N - FAZ 4 - Kombinace 10- G+1.07 x NEX - vzdálenější příhrada .....	97
Obrázek 91: Vnitřní síly - My - FAZ 4 - Kombinace 10- G+1.07 x NEX - vzdálenější příhrada.....	97
Obrázek 92: Vnitřní síly - Mz - FAZ 4 - Kombinace 10- G+1.07 x NEX - vzdálenější příhrada.....	97
Obrázek 93: Vnitřní síly - N - FAZ 6 - Kombinace 10- G+1.07 x NEX - bližší příhrada.....	98
Obrázek 94: Vnitřní síly - My - FAZ 6 - Kombinace 10- G+1.07 x NEX - bližší příhrada.....	98
Obrázek 95: Vnitřní síly - Mz - FAZ 6 - Kombinace 10- G+1.07 x NEX - bližší příhrada.....	98
Obrázek 96: Vnitřní síly - N - FAZ 6 - Kombinace 10- G+1.07 x NEX - vzdálenější příhrada.....	99
Obrázek 97: Vnitřní síly - My - FAZ 6 - Kombinace 10- G+1.07 x NEX - vzdálenější příhrada .....	99
Obrázek 98: Vnitřní síly - Mz - FAZ 6 - Kombinace 10- G+1.07 x NEX - vzdálenější příhrada.....	99
Obrázek 99: Vnitřní síly - N - FAZ 6 - Kombinace 10- G+1.07 x NEX - bližší příhrada.....	100
Obrázek 100: Vnitřní síly - My - FAZ 6 - KV10 - NEX - bližší příhrada.....	100
Obrázek 101: Vnitřní síly - Mz - FAZ 6 - KV10 - NEX - bližší příhrada.....	100
Obrázek 102: Vnitřní síly - N - FAZ 6 - Kombinace 10- G+1.07 x NEX - vzdálenější příhrada.....	101
Obrázek 103: Vnitřní síly - My - FAZ 6 - Kombinace 10- G+1.07 x NEX - vzdálenější příhrada .....	101
Obrázek 104: Vnitřní síly - Mz - FAZ 6 - Kombinace 10- G+1.07 x NEX - vzdálenější příhrada .....	101

## 14.2. SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Zatížení od plechů na mostnicích .....	29
Tabulka 2: zatížení od plechů uprostřed mostovky.....	29
Tabulka 3: Zatížení od plechů na krajích mostovky.....	29
Tabulka 4: Zatížení od ocelových chrániček uprostřed mostovky.....	30
Tabulka 5: Zatížení lávek od dřevěných fošen.....	31
Tabulka 6: Zatížení lávek plynovodem.....	31
Tabulka 7: Zatížení levé lávky kab. trasy.....	31
Tabulka 8: Zatížení pravé lávky kab. trasy.....	31
Tabulka 9: intenzita dopravy mezi roky 1901-1966 .....	36
Tabulka 10: intenzita dopravy mezi roky 1901-1966.....	36
Tabulka 11: Denní počet průjezdů pro daný vlak.....	37
Tabulka 12: Materiály použity ve výpočetních modelech.....	40
Tabulka 13: výpočet charakteristických hodnot pro plávkovou ocel plechů.....	41
Tabulka 14: výpočet charakteristických hodnot pro plávkovou ocel úhelníků.....	41
Tabulka 15: Tuhosti spojů diagonál k hornímu a dolnímu pásu.....	55
Tabulka 16: Tuhosti spojů v místě křížení diagonál a svislic.....	56
Tabulka 17: Tuhosti spojů svislic k hornímu a dolnímu pásu.....	58
Tabulka 18: Součinitele průřezových charakteristik svislic.....	59
Tabulka 19: Součinitele průřezových charakteristik diagonál.....	60
Tabulka 20: Součinitele průřezových charakteristik dolního pásu.....	60
Tabulka 21: Zkoušené hodnoty tuhostí podpor pro validaci.....	62
Tabulka 22: Příklad porovnání vlastních tvarů pro dva validační modely.....	63
Tabulka 23: Výsledek porovnání vlastních tvarů všech validačních modelů.....	64
Tabulka 24: Porovnání spočteného napětí validačních modelů vůči napětí změřeno během zatěžovací zkoušky.....	64
Tabulka 25: Porovnání výsledků interpolační funkce k reálnému napětí na vybraných průřezech.....	76
Tabulka 26: Nejvíce využití pruty výpočtu VERIF_SUDOP_GAMMA_1.15 v čase porušení.....	82
Tabulka 27: Nejvíce využití pruty výpočtu VERIF_SUDOP_GAMMA_1.15 v roce 2022.....	82
Tabulka 28: Nejvíce využití průřezy výpočty VERIF_SUDOP_GAMMA_1.15+KOROZ_100 v čase porušení.....	83
Tabulka 29: Nejvíce využití pruty výpočtu VERIF_SUDOP_GAMMA_1.15+ KOROZ_100 v roce 2022.....	83
Tabulka 30: Shrnutí výsledků hlavního výpočtu.....	87
Tabulka 31: maximální napětí v každé fázi.....	87
Tabulka 32: minimální napětí v každé fázi.....	87
Tabulka 33: Nejvíce využití pruty fáze 1+2 hlavního výpočtu.....	88
Tabulka 34: Nejvíce využití pruty fáze 3 hlavního výpočtu.....	88
Tabulka 35: Nejvíce využití pruty fáze 4 hlavního výpočtu.....	89
Tabulka 36: Nejvíce využití pruty fáze 5 hlavního výpočtu.....	89
Tabulka 37: Nejvíce využití pruty fáze 6 hlavního výpočtu.....	90
Tabulka 38: Nejvíce využití pruty fáze 7 hlavního výpočtu.....	90
Tabulka 39: Nejvíce využití pruty fáze 8 hlavního výpočtu.....	91

## 14.3. SEZNAM POUŽITÝCH NOREM

Metodický pokyn SŽDC S5/1  
ČSN EN 1990  
ČSN EN 15 528  
ČSN EN 1993-1-9  
ČSN EN 1993-2

## 14.4. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. **Smutná, Martina.** Ocelový most pod Vyšehradem dostane dvojče. Zastávku památkáři neskousnou. [Online] idnes, 2015. [https://www.idnes.cz/zpravy/domaci/rozsirovani-zeleznice-ze-smichova-na-hlavni-nadrazi.A150819\\_121829\\_praha-zpravy\\_mav](https://www.idnes.cz/zpravy/domaci/rozsirovani-zeleznice-ze-smichova-na-hlavni-nadrazi.A150819_121829_praha-zpravy_mav) .
2. **SUDOP Praha a.s.** *Statický přepočít nosné konstrukce mostu v km 3,706 - pod Vyšehradem.* 2018.
3. **ČTK.** Správa železnic vyhlásí architektonickou soutěž kvůli nové podobě železničních mostů pod Vyšehradem. *irozhlas.cz.* [Online] 2021. [https://www.irozhlas.cz/zpravy-domov/sprava-zeleznic-vytonsky-most-soutez\\_2104301303\\_ada](https://www.irozhlas.cz/zpravy-domov/sprava-zeleznic-vytonsky-most-soutez_2104301303_ada).
4. *Národní Listy.* 47, 1872.
5. *Soukup, Jiří. Pražské mosty. 1904.*
6. *Muzeum hl. města prahy.*
7. *Fotobanka Pixabay.*
8. *Brüder Prášil & C°. Archivní dokumentace mostu. 1900.*
9. **Jakub Hruška & Jiří Kopáček.** *Kyselý déšť stále s námi - zdroje, mechanizmy, účinky, minulost a budoucnost.* [Online] 2005. [https://www.mzp.cz/web/edice.nsf/DC21A4C7F0AFAD0AC1257081001AA6B7/\\$file/planeta\\_w eb.pdf](https://www.mzp.cz/web/edice.nsf/DC21A4C7F0AFAD0AC1257081001AA6B7/$file/planeta_w eb.pdf).
10. **ČTK.** *Vlak pokračuje ve směru Praha-Výtoň. Nová zastávka je v územním plánu.* [Online] idnes, 2013. [https://www.idnes.cz/praha/zpravy/zeleznice-ze-smichova-na-hlavni-nadrazi.A130430\\_154123\\_praha-zpravy\\_eb](https://www.idnes.cz/praha/zpravy/zeleznice-ze-smichova-na-hlavni-nadrazi.A130430_154123_praha-zpravy_eb).
11. **České vysoké učení technické v Praze - Fakulta stavební.** *Statická a dynamická ověřovací zatěžovací zkouška mostu.* 2017.
12. **Pazmiño, Marcos Bryan Flores.** *The Prediction of the joint Stiffness in Riveted Steel Bridges.* s.l. : České vysoké učení technické v Praze - Fakulta stavební, 2018.
13. **García, Oscar Minor.** *The Impact of the Connection Stiffness on the Behaviour of a Historical Steel Railway Bridge.* s.l. : České vysoké učení technické v Praze - Fakulta stavební, 2017.
14. **Kramoliš, Filip.** *Únavová životnost železničního mostu na Výtoni.* 2017.