

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta stavební



Bakalářská práce

Prohlídka a přepočítání zatížitelnosti silničního mostu ve Vodné

Inspection and load capacity assessment of the road bridge in Vodná


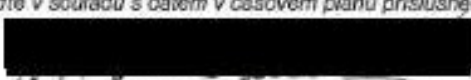
Autor:	Josef Hovorka
Studijní program:	Stavební inženýrství
Studijní obor:	Konstrukce a dopravní stavby
Vedoucí bakalářské práce:	Ing. Vojtěch Stančík, Ph.D.

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Hovorka</u>	Jméno: <u>Josef</u>	Osobní číslo: <u>494302</u>
Zadávací katedra: <u>Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí</u>		
Studijní program: <u>Stavební inženýrství</u>		
Studijní obor/specializace: <u>Konstrukce a dopravní stavby</u>		


II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: <u>Prohlídka a přepočítání zatížitelnosti silničního mostu ve Vodné</u>	
Název bakalářské práce anglicky: <u>Inspection and load capacity assessment of the road bridge in Vodná</u>	
Pokyny pro vypracování: Prohlídka, ověření základních rozměrů, tvorba výpočetního modelu a stanovení zatížitelnosti mostního objektu, klasifikovaného stupněm "havarijní". Návrh nutných opatření pro zajištění provozuschopnosti mostu.	
Seznam doporučené literatury: Návrh konstrukce bude proveden dle souvisejících českých a evropských norem: ČSN 73 6221, ČSN 73 6222, ČSN 73 6201, ČSN EN 1990, ČSN EN 1991-2	
Jméno vedoucího bakalářské práce: <u>Vojtěch Stančík</u>	
Datum zadání bakalářské práce: <u>21.2.2023</u>	Termín odevzdání BP v IS KOS: <u>22.5.2023</u> <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 bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

21.2.2023
Datum převzetí zadání


Podpis studenta(ry)

Prohlášení

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

Josef Hovorka

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Vojtěchu Stančíkovi, Ph.D. za ochotu, poskytnuté konzultace a odborné vedení bakalářské práce.

Anotace

Předmětem této bakalářské práce je prohlídka a stanovení zatížitelnosti mostu pozemní komunikace, který je v havarijním stavu. Most se nachází ve vesnici Vodná, části města Bečova nad Teplou, v okrese Karlovy Vary. Jedná se o příhradový ocelový most o jednom poli s dolní mostovkou a rozpětím 19,5 m.

Nejprve byly v rámci prohlídky ověřeny rozměry a zdokumentovány závady na mostě, na základě kterých byl vytvořen výpočetní model. Při výpočtu zatížitelnosti byl most uvažován jako lávka pro chodce a cyklisty. Byly posouzeny jednotlivé typy prutů v nejvíce namáhaných místech a byla vyhodnocena celková zatížitelnost. Následně byl most posouzen na mimořádné zatížení obslužným vozidlem. Na závěr byla navržena opatření pro zvýšení zatížitelnosti a obnovení provozuschopnosti.

Klíčová slova

prohlídka, zatížitelnost, most, ocelový, příhradový, lávka

Abstract

The subject of this bachelor thesis is the inspection and determination of the load capacity of a road bridge that is in a state of disrepair. The bridge is located in the village of Vodná, part of the town of Bečov nad Teplou, in the district of Karlovy Vary. It is a single span truss bridge with a lower bridge deck and a span of 19.5 m.

During the inspection, the dimensions were verified and the defects of the bridge were documented, on the basis of which a computer model was created. In the load capacity calculation, the bridge was considered as a footbridge for pedestrians and cyclists. The individual member types at the most stressed locations were assessed and the overall load capacity was evaluated. Subsequently, the bridge was assessed for exceptional service vehicle loads. Finally, measures were proposed to increase the load capacity and restore serviceability.

Key words

inspection, load capacity, bridge, steel, truss, footbridge

Obsah

1. ÚVOD	8
2. PROHLÍDKA MOSTNÍHO OBJEKTU	10
2.1. Identifikační údaje o mostě	10
2.2. Základní údaje	11
2.3. Popis částí mostu	12
2.3.1. Spodní stavba	12
2.3.2. Nosná konstrukce	12
2.3.3. Mostní svršek	14
2.3.4. Vybavení mostu	14
2.4. Stav a závady částí mostu	14
2.4.1. Spodní stavba	14
2.4.2. Nosná konstrukce	15
2.4.3. Mostní svršek	20
2.4.4. Vybavení mostu	20
2.4.5. Stav protikorozní ochrany	21
2.5. Závěr prohlídky	21
2.5.1. Stavební stav mostu	21
2.5.2. Použitelnost mostu	21
3. VÝPOČETNÍ MODEL	22
3.1. Materiálové charakteristiky	24
3.2. Průřezy konstrukčních prvků	27
3.2.1. Horní a dolní pásy	27
3.2.2. Svislice	29
3.2.3. Diagonály	29
3.2.4. Příčník	31
3.2.5. Podélníky	31
3.2.6. Dolní ztužení	32
3.2.7. Mostiny Zorés	32
3.2.8. Parapetní nosník	33
3.3. Přípoje	33
3.3.1. Hlavní nosníky	33
3.3.2. Příčníky	35
3.3.3. Dolní ztužení	35
3.3.4. Diagonály	35
3.4. Závady	36
4. ZATÍŽENÍ	37
4.1. Zatěžovací stavy	37
4.1.1. Stálé zatížení	37

4.1.2. Zatížení větrem	38
4.1.3. Zatížení teplotou	45.
4.1.4. Zatížení chodci	48
4.1.5. Mimořádné zatížení obslužným vozidlem	48
4.1.6. Počáteční imperfekce horního pásu	50
4.2. Kombinace zatížení	50
5. PŘEPOČET ZATÍŽITELNOSTI	52
5.1. Posouzení MSÚ	52
5.1.1. Svislice	53
5.1.2. Horní pásy	54
5.1.3. Dolní pásy	63
5.1.4. Tažené diagonály	67
5.1.5. Tlačené diagonály	71
5.1.6. Příčnický	78
5.1.7. Podélníky	84
5.1.8. Mostiny Zorés	87
5.2. Posouzení MSP	91
5.3. Shrnutí zatížitelnosti	92
6. POSOUZENÍ MOSTU NA MIMOŘÁDNÉ ZATÍŽENÍ	93
7. NÁVRH OPATŘENÍ	97
8. ZÁVĚR	98

1. Úvod

Tato bakalářská práce se věnuje přepočtu zatížitelnosti mostu pozemní komunikace, klasifikovaného stavebním stavem VII – havarijním, ve Vodné u Bečova nad Teplou v Karlovarském kraji.

Pro stanovení zatížitelnosti bylo třeba provést prohlídku stávajícího stavu mostního objektu, které se věnuje začátek práce. Kapitola o prohlídce nejprve popisuje části mostu z hlediska jejich uspořádání, rozměrů a použitých průřezů. Následně se práce věnuje dokumentaci rozsahu a charakteru závad na mostě. Na závěr byl ohodnocen stavební stav a použitelnost mostu.

Poznatky z prohlídky byly využity pro tvorbu prutového výpočetního modelu. V této kapitole je nejprve model stručně popsán a následně je uveden popis jednotlivých vstupů do výpočetního softwaru, jako jsou materiálové charakteristiky, jednotlivé průřezy, řešení styčníků a oslabování prvků. Samostatná kapitola se poté věnuje zatěžovacím stavům, jejich kombinacemi a způsobům, jakými byly vkládány do výpočetního modelu.

Předpokládá se, že bude změněn účel využití stavby na lávku pro chodce a cyklisty. Tomu odpovídají uvažované zatěžovací stavy, kombinace a přepočet zatížitelnosti.

Druhá polovina bakalářské práce se zabývá samotným stanovením zatížitelnosti formou statického výpočtu. Od každého typu nosného prvku byl posouzen ten nejvíce namáhaný. Výsledkem je maximální přípustné rovnoměrné zatížení od dopravy, resp. chodců. Po vyhodnocení zatížitelnosti je mostní objekt ještě posouzen na výskyt mimořádného zatížení od obslužného vozidla.

Závěr bakalářské práce je věnován shrnutí přepočtu zatížitelnosti a možným opatřením pro zamezení zhoršování stavu a zvýšení zatížitelnosti.



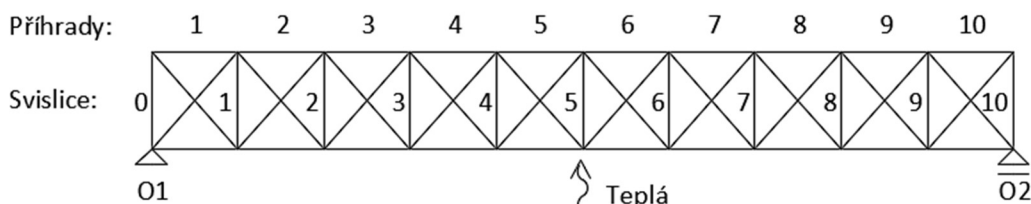
Obr. 1: Pohled na most ve směru toku



Obr. 2: Pohled na most od levého břehu

2. Prohlídka mostního objektu

Před samotnou prohlídkou byly prostudovány zprávy z minulých prohlídek v letech 2018 až 2021. [1] [2] Pro lepší přehlednost bylo zavedeno číslování opěr, jednotlivých příhrad a konstrukčních prvků vzestupně zleva doprava ve směru toku řeky. Podélníky jsou číslovány proti směru toku. Příhradový nosník na povodní straně je označen jako levý, nosník na návodní straně jako pravý.



Obr. 3: Schéma číslování příhrad a svislic

V rámci prohlídky proběhlo přeměření geometrie mostu, pomocí měřicího pásma a posuvného měřidla, a zdokumentování poruch a korozních úbytků na konstrukci.

Datum provedení prohlídky: 18. 3. 2023
Počasí v době provádění prohlídky: jasno
Teplota vzduchu: 13 °C

2.1 Identifikační údaje o mostě

SJTS-K: Y = 853 901, 664 X = 1 024 543, 875 [m]
Objekt: Most přes řeku Teplou ve Vodné
Kraj: Karlovarský
Katastrální území: 601284 Vodná u Bečova nad Teplou
Obec: Bečov nad Teplou

Délka přemostění: 18,500 m [1]
Délka mostu: 22,600 m
Délka nosné konstrukce: 19,700 m
Rozpětí polí: 19,500 m
Šikmost mostu: kolmý, 90°
Volná šířka mostu: 6,000 m
Šířka mostu: 6,400 m
Výška mostu nad terénem: 3,741 m [3]
Stavební výška: 0,896 m
Plocha nosné konstrukce mostu: 126 m²

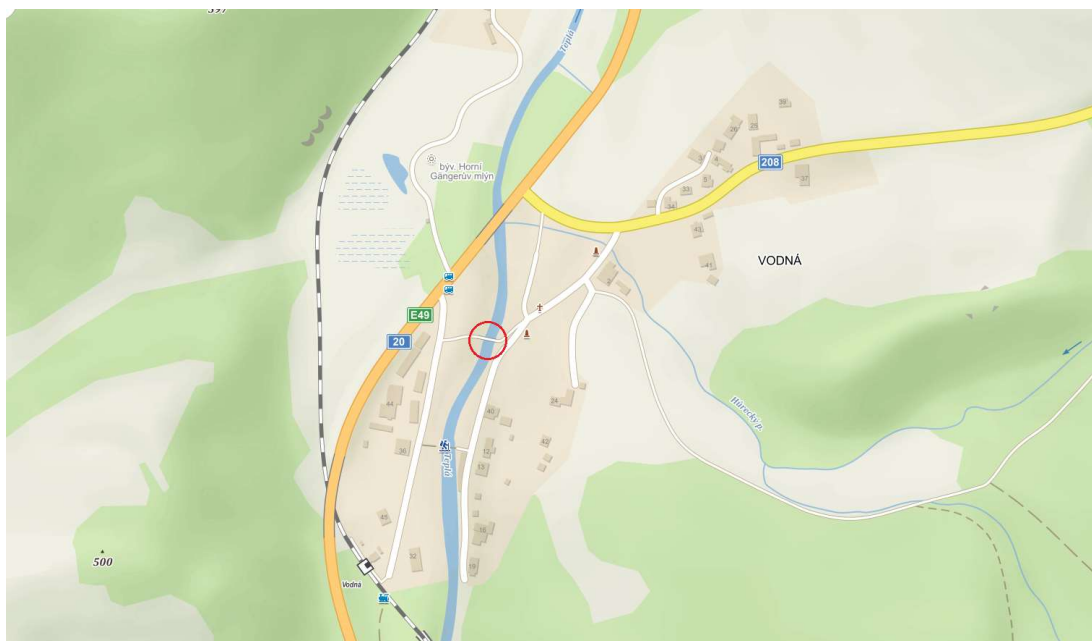
2.2 Základní údaje

Komunikace: Místní komunikace k pile

Ev. č. mostu: není

Název objektu: Most přes Teplou ve Vodné u pily

Stávající mostní objekt byl postaven roku 1891 firmou Prager Brückenbau Anstalt. Nachází se nedaleko pily ve vesnici Vodné, části města Bečova nad Teplou, kde převádí směrově nerozdělenou místní komunikaci k pile přes řeku Teplou. Jedná se o trvalý most o jednom poli o délce 19,5 m s hlavními nosníky složené soustavy a dolní prvkovou mostovkou tvořenou příčnicí, podélníky a mostinami Zorés. Ztužení je provedeno pouze ve vodorovné úrovni. Most je uložen na tangenciálních ložiscích.



Obr. 4: Mapa okolí mostu (převzato z [4])



Obr. 5: Satelitní snímek (převzato z [5])

2.3 Popis částí mostu

2.3.1 Spodní stavba

Spodní stavba je tvořena dvěma masivními opěrami o rozměrech 7,6 a 8 metrů. [2] Dřík i křídla opěr jsou ze žulového zdiva. Křídla jsou šikmá. Práh obou opěr je tvořen řádkovým zdívem pod ložisky, přičemž pod každým ložiskem je proveden masivní žulový blok. Délka úložného bloku je 100 cm, šířka 115 cm a výška 39 cm. Ložiska na obou opěrách jsou kluzná desková. Předpokládá se, že založení mostu je plošné.

2.3.2 Nosná konstrukce

Nosná konstrukce mostu je tvořena dvěma ocelovými nýtovanými příhradovými nosníky složené soustavy o deseti příhradách. Příhradové nosníky sestávají z horního pásu, dolního pásu, svislic a diagonál. V místě horního pásu nejsou nosníky uzavřeny a jedná se tak o otevřené konstrukční uspořádání. Vzdálenost vnějších líců nosníků je 6 400 mm.

2.3.2.1 Svislice

Svislice jsou tvořeny válcovanými krčními úhelníky. Krajiní svislice nad podporami sestávají ze čtyřech nerovnoramenných úhelníků L 100 x 80 x 10. Svislice uprostřed sestávají ze čtyřech rovnoramenných úhelníků L 80 x 10. Podélná vzdálenost svislic definující délku příhrady je 1 950 mm.

2.3.2.2 Diagonály

Diagonály jsou tvořeny válcovanými krčnými úhelníky. Každá příhrada je tvořena jednou taženou diagonálou na vnitřní straně a jednou tlačенou diagonálou na vnější straně. Profily a počty úhelníků jsou v jednotlivých prutech rozdílné. Pro větší přehlednost jsou profily jednotlivých prutů diagonál uvedeny v tabulce níže. Údaje platí pro levý i pravý nosník.

Příhrada č.	Tažená (vnitřní) diagonála		Tlačенá (vnější) diagonála	
	Profil	Počet profilů	Profil	Počet profilů
1 a 10	L 100 x 100 x 12	2	L 100 x 100 x 12	2
2 a 9	L 90 x 90 x 10	2	L 90 x 90 x 12	2
3 a 8	L 80 x 80 x 8	2	L 80 x 80 x 10	2
4 a 7	L 70 x 70 x 8	2	L 70 x 70 x 10	2
5 a 6	L 70 x 70 x 8	1	L 80 x 80 x 10	1

Tab. 1: Přehled profilů prutů diagonál

2.3.2.3 Horní a dolní pásy

Horní a dolní pásy jsou nýtované a jsou tvořené T-profily, které sestávají ze stěny o rozměrech 355 x 15 mm, dvou krčných úhelníků L 80 x 10 a různého počtu plechů s tloušťkou 10 mm a přesahem 12,5 mm za krčnými úhelníky na každé straně. Počet plechů v pásnicích směrem do středu pole narůstá v souladu s průběhem ohybového momentu. Vznikají tak odstupňované pásnice. Tloušťka dolní pásnice je u podpor 10 mm a postupně se zvětšuje až na 40 mm uprostřed pole. Tloušťka horní pásnice je u podpor 20 mm a postupně narůstá až na 50 mm uprostřed pole. Celková výška nosníku v první příhradě je 2150 mm.

2.3.2.4 Dolní ztužení

Vodorovné ztužení mostovky zdola je zajištěno v úrovni pásnic dolních pásů. Dolní ztužení je tvořeno příhradovou soustavou, jejíž pruty jsou ocelové válcované profily L 60 x 9. Pruty se uprostřed délky stýkají a vytvářejí nůžkový kloub.

2.3.2.5 Podélníky a příčníky

Dolní mostovka je tvořena ocelovými příčníky a podélníky. Příčníků je jedenáct, jsou nýtované a jsou tvořeny stěnou o rozměrech 475 x 10 mm, dvěma krčnými úhelníky L 75 x 10 na každé straně a dvěma plechy o celkové tloušťce 18 mm na každé pásnici. Celková výška příčníků je tedy 511 mm a šířka 180 mm.

Podélníků je devět a jsou tvořeny válcovanými profily IPN 210 x 105, s výjimkou podélníku č. 8, který je tvořen menším profilem IPN 200 x 95. Rozteč podélníků je 660 mm. Osová vzdálenost krajních podélníků ke kraji konstrukce je polovina rozteče, tedy 330 mm.

2.3.2.6 Mostiny

Mostovka je tvořena ocelovými plechy Zorés, které jsou usazeny na podélnících. Vzepětí jejich oblouku je 72 mm a šířka jedné mostiny je 200 mm.

2.3.3 Mostní svršek

Vozovka je tvořena vrstvou šterku o mocnosti 65 mm a vrstvou asfaltu o mocnosti přibližně 115 mm. Tloušťka vozovky směrem od osy mostu ke krajům klesá. Celková srovnávací výška vozovky je tedy 180 mm.

2.3.4 Vybavení mostu

Most je vybavený zábradlím, jež je tvořeno pásovinou z devíti plochých ocelí, o délce 970 mm a průřezu 50 x 8 mm, uložených kolmo na sebe, a ocelovými úhelníky L 55 x 8, které uchycují pásovinu shora a zdola. Vzhledem k jeho havarijnímu stavu, je most osazen zábranami bránícími vjezdu na most, a svislými dopravními značkami B1 „Zákaz vjezdu všech vozidel“ [6] a B30 „Zákaz vstupu chodců“. [6]

2.4 Stav a závady částí mostu

2.4.1 Spodní stavba

Dřík opěry O1 má rozvolněné zdivo a jsou zde lokální známky zatékání. Zdivo v místě uložení je rozvolněné a je zde patrný výskyt trhlin. Rozvolněné zdivo je porostlé vegetací. Dřík opěry O2 má opravené spárování a nevykazuje zjevné nedostatky. Křídla obou opěr mají rozvolněné zdivo, které je porostlé vegetací, včetně keřů a vzrostlých stromů. Založení mostu je obtížně přístupné a předpokládá se bez závad. [2] Ložiska na obou opěrách jsou kompletně zanesena nečistotami v takové míře, že o jejich funkčnosti lze pochybovat.



Obr. 6: Křídlo opěry O1 prorostlé vegetací



Obr. 7: Trhliny a rozvolněné zdivo opěry O1



Obr. 8: Ložisko zanesené nečistotami

2.4.2 Nosná konstrukce

2.4.2.1 Svislice

Svislice jsou běžně v místě úzké štěrbině při napojení na dolní pás napadeny štěrbinovou korozí a došlo zde k oslabení průřezu. V důsledku nárůstu korozních zplodin ve štěrbinách došlo také k lokálním deformacím prutu. Nejhorší stav je u svislice č. 10 vlevo, u které došlo k úplnému koroznímu oslabení do výšky 30 cm. Svislice č. 0 vpravo je korozně oslabena do výšky 20 cm, většina ostatních svislic do výšky 10 cm. Všechny svislice jsou z vnější strany zasaženy štěrbinovou korozí a v důsledku toho je jejich tloušťka oslabena o 30 %. Svislice vykazují ve více průřezích nadměrné deformace v důsledku nárazu vozidla. V nejhorším stavu je svislice č. 10

vpravo. Vlevo jsou pak nejvíce zdeformovány svislíce č. 5, 7 a 8, kde deformovaná část měří až 32 cm.



Obr. 9: Korozně oslabená svislíce č. 0 vpravo



Obr. 10: Korozně oslabená svislíce č. 10 vlevo



Obr. 11: Nárazem zdeformovaná svislíce č. 5 vlevo
2.4.2.2 Diagonály



Obr. 12: Nárazem zdeformovaná svislíce č. 7 vlevo

Na přibližně polovině tažených diagonál, přičemž nejhorší se v tomto ohledu jeví diagonály č. 1, 7, 8 a 10 vlevo a diagonály č. 2, 3, 8 a 10 vpravo, došlo ke koroznímu oslabení průřezu v místě připojení na dolní pás až do úrovně spodního líce zábradlí. Jedná se zpravidla o oslabení pásnic

povrchovou korozi o 3 mm, lokálně až o 4 mm, v horších případech se jedná o korozi úhelníku do ostra až úplné prorezavění profilu. Vlivem štěrbinové koroze jsou pruty tažených diagonál č. 3, 7 vpravo a č. 8 vlevo zdeformovány až o 15 mm. Tlačené diagonály nejsou štěrbinovou korozi výrazně zasaženy, nejvýše 5 mm. K deformaci tažených diagonál vlivem nárazu došlo na příhradách č. 2 a 5 vlevo.



Obr. 13: Štěrbínová koroze a úplné prorezavění diagonály



Obr. 14: Korozní oslabení úhelníku diagonály o 20 %

2.4.2.3 Horní pásy

Na horních pásech obou nosníků lze zaznamenat povrchovou korozi, avšak bez korozního oslabení průřezů. Horní pás levého nosníku vykazuje nadměrnou deformaci ve tvaru půlhlvy o amplitudě 61 mm na délce sedmi příhrad.



Obr. 15: Vybočení horního pásu levého nosníku

2.4.2.4 Dolní pásy

Dolní pásy obou nosníků jsou souvisle zaneseny nečistotami. Dolní pás levého nosníku v blízkosti obou opěr má zkorodovanou vnitřní i vnější pásnici do ostra. Lze předpokládat korozní oslabení pásnic o 2 mm, lokálně až o 3 mm.

U dolního pásu pravého nosníku došlo ke značnému koroznímu oslabení. Vnitřní pásnice u obou opěr zcela chybí, na jiných místech jsou vnější poloviny pásnic prorezivělé, nebo oslabené do ostra. Na méně zasažených místech, příhradách č. 3 až 8, došlo na obou dolních přírubách ke koroznímu oslabení o 1 mm.

2.4.2.5 Dolní ztužení

Dolní ztužení vlevo je v místě styčnicků u příhrad č. 7 a 9 zcela přerušeno korozí. Úhelník dolního ztužení č. 2 vpravo byl zcela zrezivělý a v minulosti odříznut pro diagnostické účely.

2.4.2.6 Podélníky a příčníky

Horní pásnice podélníků jsou vlivem povrchové koroze oslabeny o 15 % po celé délce. Stojina podélníku č.2 je korozně oslabena o 10 %. Stojina podélníku č. 8 je korozně oslabená o 50 %.

Příčníky mají v místě do 40 cm od přípojů do ostra zkorodovanou dolní pásnici. Mezi pásnicemi a mostinami Zorés došlo ke koroznímu oslabení horní pásnice o 3 mm.



Obr. 16: Zkorodovaný podélník č. 8



Obr. 17: Příčník se zkorodovanou dolní pásnicí

2.4.2.7 Mostiny Zorés

Mostiny Zorés jsou zespodu korozně oslabeny o 3 mm. Horní okraj mostin není přístupný. Vzhledem k tomu, že je lokálně zachována protikorozní ochrana mostin Zorés a v žádném průřezu nebylo nalezeno úplné zkorodování lze předpokládat průměrné oslabení přibližně 30 %.



Obr. 18: Mostiny Zorés

2.4.3 Mostní svršek

Povrch vozovky je rozpadlý a porostlý vegetací. Na mostním svršku jsou patrné trhliny. Na mnoha místech je vozovka u pravého nosníku propadlá skrz nosnou konstrukci.



Obr. 19: Propadlá vozovka u pravého nosníku

2.4.4 Vybavení mostu

Profily výplně zábradlí jsou zkorodovány. Na předpolích na opěrách zábradlí dokonce chybí.

2.4.5 Stav protikorozní ochrany

Nátěr je na velké části konstrukce silně zkorodovaný. Míra prorezavění odpovídá dle ČSN EN ISO 4628-3 [7] stupni prorezavění Ri 5.

2.5 Závěr prohlídky

2.5.1 Stavební stav mostu

Stavební stav nosné konstrukce mostu hodnotím dle normy ČSN 73 6221 [8] jako stavební stav VII – Havarijní. Důvodem je nefunkčnost ložisek a příliš rozsáhlé korozní oslabení prvků nosné konstrukce, zejména svislic, diagonál, dolního pásu a kompletní přerušení prutů dolního ztužení, a s tím spojená nespolehlivost přenášet zatížení od dopravy.

Stavební stav spodní stavby mostu hodnotím dle normy ČSN 73 6221 [8] jako stavební stav V – Špatný. Důvodem je špatný stav zejména levé opěry O1, která vykazuje značné trhliny ve zdivu, a porost vegetace oběma opěrami.

2.5.2 Použitelnost mostu

Použitelnost mostu hodnotím dle normy ČSN 73 6221 [8] stupněm použitelnosti 5 - Nepoužitelný. Důvodem je rozpadlý povrch vozovky, který znemožňuje bezpečný provoz na mostě.

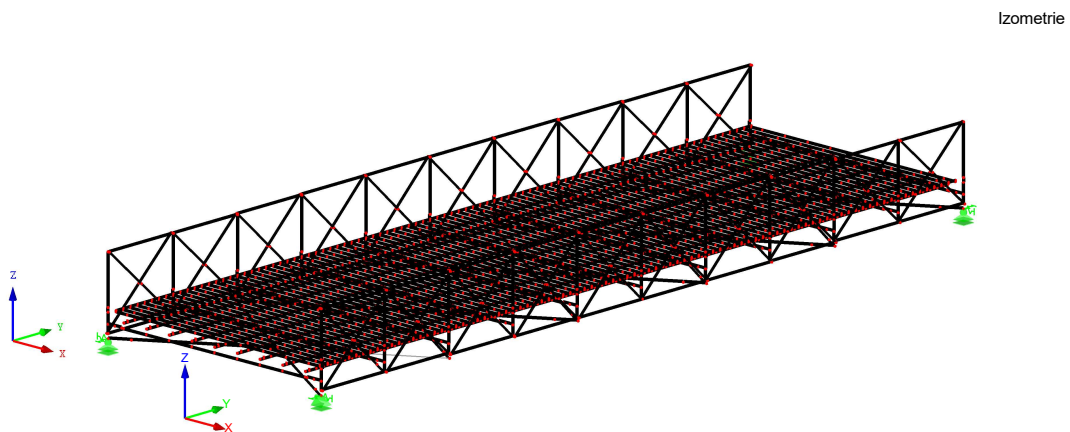
3. Výpočetní model

Na základě poznatků získaných z prohlídky byl vytvořen výpočetní model. Pro tvorbu modelu byl použit program Dlubal RFEM 5.31. Celý model je prostorový, je tvořen prutovými prvky a zahrnuje hlavní nosníky, dolní ztužení, příčníky, podélníky, mostiny Zorés a parapetní nosníky. Zábradlí a vozovka v samotném modelu nejsou a jsou později zahrnuty v rámci ostatního stálého zatížení. Globální souřadnicové osy jsou orientovány tak, že osa x odpovídá směru kolmém k rozpětí mostu, osa y je ve směru osy mostu a osa z odpovídá směru kolmém na mostovku.

Pruty byly umístěny na linie v místě jejich střednice a spolupůsobení mezi nimi bylo zajištěno tuhými pruty o délce vzdálenosti jejich střednic, pokud to bylo třeba. Prutům byl přiřazen odpovídající průřez vytvořený v programu Dlubal SHAPE-THIN 9.10.

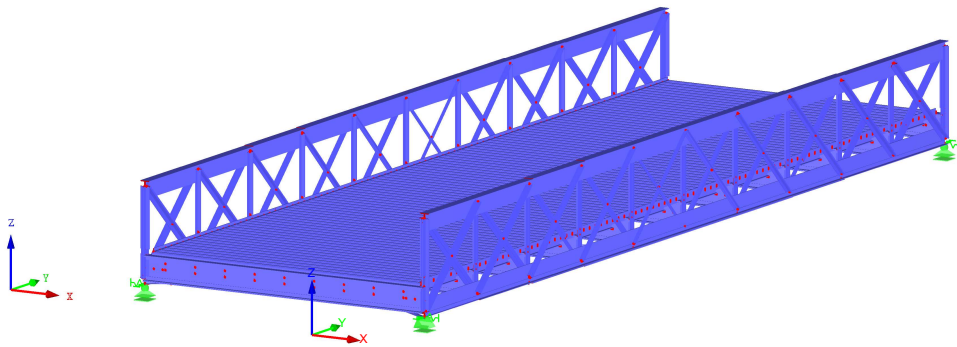
Celý prutový model je uložen na podporách s posuvnou tuhostí umožňující dilatační pohyby přibližně 3 mm ve směru osy mostu. Tomu odpovídá uvažovaná tuhost 300 kN/m. Před výpočtem byla uvažována i nulová posuvná tuhost podpory. Varianta s tužšími podporami se jevila jako méně příznivá a proto byla jako jediná pro analýzu konstrukce uvažována.

Výsledný model byl následně podroben výpočtu lineární analýzou I. řádu. Účinky II. řádu na konstrukci byly zahrnuty později při stanovení zatížitelnosti.



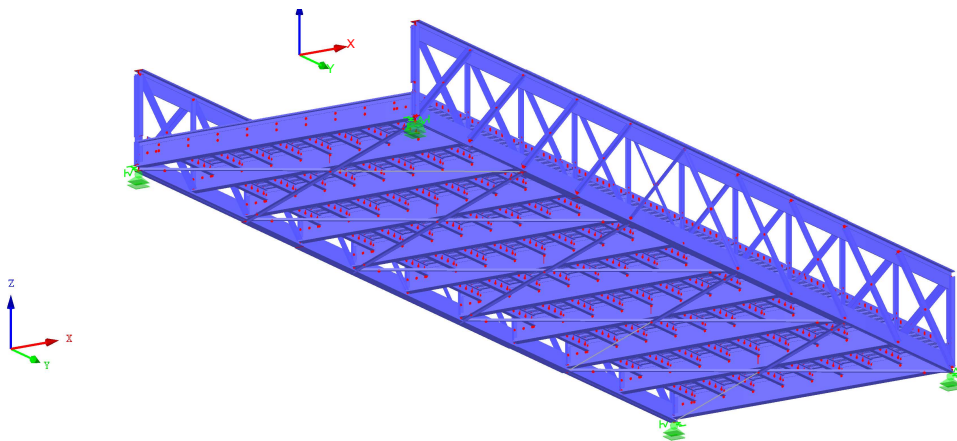
Obr. 20: Drátěný model

Izometrie



Obr. 21: Plnostěnný model

Izometrie



Obr. 22: Plnostěnný model – pohled zdola na mostovku

3.1 Materiálové charakteristiky

Pro stanovení materiálových vlastností oceli byly použity poznatky ze zprávy [9] z roku 2017, analyzující mechanické vlastnosti zkouškou tahem. Analyzovány byly tři vzorky. Výsledky jednotlivých měření jsou uvedeny v Tab. 2.: Charakteristické hodnoty materiálových vlastností byly stanoveny statistickými metodami uvedenými v kap. D.7 ČSN EN 1990 [10] a kap. 7.2 ČSN 73 0038 [11]. Charakteristická hodnota meze kluzu odpovídá 5% dolnímu kvantilu dolní hodnoty meze kluzu R_{eL} .

Označení vzorku	Počet měření	d [mm]	l [mm]	R_{eH} [MPa]	R_{eL} [MPa]	R_m [MPa]
46 u1	1	3,96	20,07	295	285	371
46 u1	2	3,97	20,03	293	290	407
46 u2	1	3,97	19,97	316	304	414

Tab. 2: Výsledky tahové zkoušky (převzato z [9])

Aritmetický průměr meze kluzu:

$$m_x = \frac{\sum R_{eL,i}}{n}$$

Počet vzorků: $n = 3$

$$m_x = \frac{285+290+304}{3} = \frac{879}{3} = 293 \text{ MPa}$$

Směrodatná odchylka:

$$s_x^2 = \frac{\sum (x_i - m_x)^2}{n - 1}$$

$$s_x = \sqrt{\frac{(285 - 293)^2 + (290 - 293)^2 + (304 - 293)^2}{3 - 1}} = \sqrt{97} = 9,849 \text{ MPa}$$

Variační koeficient:

$$V_x = \frac{s_x}{m_x}$$

$$V_x = \frac{9,849}{293} = 0,034$$

Charakteristická hodnota meze kluzu:

$$f_{yk} = m_x (1 - k_{n,x} \cdot V_x)$$

Součinitel pro stanovení 5% kvantilu dle tab. 4.2 ČSN 73 0038 [11]: $k_{n,x} = 3,37$

$$f_{yk} = 293 \cdot (1 - 3,37 \cdot 0,034) = 259,81 \text{ MPa}$$

Variační koeficienty pro konstrukční ocel dle tab. 7.3 ČSN 73 0038 [11]:

Variační koeficient vlastnosti materiálu: $V_x = 0,03$ až $0,05 = 0,034$

Variační koeficient geometrických vlastností pro tažené prvky: $V_{geo,t} = 0,01$

Variační koeficient geometrických vlastností pro tlačené prvky: $V_{\text{geo},c} = 0,05$

Variační koeficient nejistoty modelu odolnosti: $V_{\theta R} = 0,05$

Variační koeficient nejistoty modelu odolnosti pro stabilitu: $V_{\theta R, \text{st}} = 0,075$

Variační koeficient pro odolnost dle kap. 4.4.2 ČSN 73 0038 [11]:

$$V_R = \sqrt{V_x^2 + V_{\text{geo}}^2 + V_{\theta R}^2}$$

Dílčí součinitel dle kap. 4.4.2 ČSN 73 0038 [11]:

$$V_M = \frac{\exp(-1,645 V_x)}{\exp(-\alpha_R \beta V_R)}$$

Součinitel citlivosti pro odolnost: $\alpha_R = 0,8$

Požadovaná hodnota indexu spolehlivosti: $\beta = 3,8$

Dílčí součinitel pro tah:

$$V_{R,t} = \sqrt{0,034^2 + 0,01^2 + 0,05^2} = 0,061$$

$$V_{M,0,t} = \frac{\exp(-1,645 \cdot 0,034)}{\exp(-0,8 \cdot 3,8 \cdot 0,061)} = 1,14 < 1,15$$

Pro konstrukce vyrobené do roku 1966 a mezi kluzu menší než 300 MPa je dle kap. 7.2.7 ČSN 73 0038 [11] minimální hodnota dílčího součinitele rovna 1,15.

Dílčí součinitel pro tlak:

$$V_{R,c} = \sqrt{0,034^2 + 0,05^2 + 0,05^2} = 0,078$$

$$V_{M,0,c} = \frac{\exp(-1,645 \cdot 0,034)}{\exp(-0,8 \cdot 3,8 \cdot 0,078)} = 1,2$$

Dílčí součinitel pro stabilitu:

$$V_{R, \text{st}} = \sqrt{0,034^2 + 0,05^2 + 0,075^2} = 0,096$$

$$V_{M,1} = \frac{\exp(-1,645 \cdot 0,034)}{\exp(-0,8 \cdot 3,8 \cdot 0,075)} = 1,27$$

Návrhové hodnoty meze kluzu:

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{V_M}$$

Pro prvky složené z úhelníků:

Tah:

$$f_{yd,t} = \frac{259,81}{1,15} = 225,9 \text{ MPa}$$

Tlak:

$$f_{yd,c} = \frac{259,81}{1,2} = 216,5 \text{ MPa}$$

Stabilita:

$$f_{yd, \text{st}} = \frac{259,81}{1,27} = 204,6 \text{ MPa}$$

Pro ostatní prvky:

Tah:

$$f_{yd,t} = \frac{230}{1,15} = 200 \text{ MPa}$$

Tlak:

$$f_{yd,c} = \frac{230}{1,2} = 191,6 \text{ MPa}$$

Stabilita:

$$f_{yd,st} = \frac{230}{1,27} = 181,1 \text{ MPa}$$

Pro mez pevnosti byl proveden analogický výpočet, jehož výsledkem je $f_{uk} = 319,58 \text{ MPa}$

Spočtené hodnoty meze kluzu a pevnosti platí jen pro pruty složené z úhelníků. Ostatní pruty nebyly předmětem zkoušky [9] a proto byly pro ně uvažovány hodnoty z tab. 7.1 ČSN 73 0038 [11]. Jedná se o plávkovou ocel s charakteristickou mezí kluzu $f_y = 230 \text{ MPa}$ a charakteristickou mezí pevnosti $f_u = 360 \text{ MPa}$. Následně byly dle kap. 7.3 ČSN 73 0038 [11] vypočteny dílčí součinitelé a návrhové hodnoty meze kluzu.

Návrhové hodnoty meze pevnosti:

$$f_{ud} = \frac{f_{uk}}{\gamma_M}$$

Pro prvky složené z úhelníků:

Tah:

$$f_{yd,t} = \frac{319,58}{1,15} = 277,9 \text{ MPa}$$

Tlak:

$$f_{yd,c} = \frac{319,58}{1,2} = 266,3 \text{ MPa}$$

Stabilita:

$$f_{yd,st} = \frac{319,58}{1,27} = 251,6 \text{ MPa}$$

Pro ostatní prvky:

Tah:

$$f_{yd,t} = \frac{360}{1,15} = 313 \text{ MPa}$$

Tlak:

$$f_{yd,c} = \frac{360}{1,2} = 300 \text{ MPa}$$

Stabilita:

$$f_{yd,st} = \frac{360}{1,27} = 283,46 \text{ MPa}$$

Přehled materiálových vlastností

Materiál:

plávková ocel

Pro pruty složené z úhelníků:

Ostatní pruty:

Charakteristická mez kluzu:

$$f_{yk} = 230 \text{ MPa}$$

$$f_{yk} = 259,81 \text{ MPa}$$

Návrhová mez kluzu pro tah:

$$f_{yd,t} = 200 \text{ MPa}$$

$$f_{yk} = 230 \text{ MPa}$$

Návrhová mez kluzu pro tlak:

$$f_{yd,c} = 191,6 \text{ MPa}$$

$$f_{yk} = 230 \text{ MPa}$$

Návrhová mez kluzu pro stabilitu:

$$f_{yd,st} = 181,1 \text{ MPa}$$

$$f_{yk} = 230 \text{ MPa}$$

Charakteristická mez pevnosti:

$$f_{uk} = 360 \text{ MPa}$$

$$f_{yk} = 319,58 \text{ MPa}$$

Modul pružnosti:

$$E = 210 \text{ GPa}$$

$$E = 210 \text{ GPa}$$

Modul pružnosti ve smyku:

$$G = 81 \text{ GPa}$$

$$G = 81 \text{ GPa}$$

3.2 Průřezy konstrukčních prvků

Vzhledem k tomu, že mnoho prutů na mostě je tvořeno složenými průřezy, bylo nutné pro jejich vymodelování a výpočet průřezových charakteristik použít program Dlubal SHAPE-THIN 9.10 a odtud je do programu RFEM importovat. Následně byly od původních průřezů, v souladu se závadami na mostě, vytvořeny v programu SHAPE-THIN 9.10 průřezy oslabené. Oslabení průřezu bylo v drtivé většině provedeno pomocí bodových prvků.

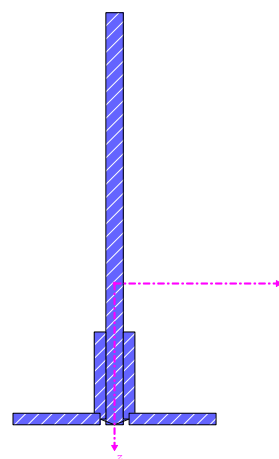
3.2.1 Horní a dolní pásy

Odstupňované pásnice horních a dolních pásů mají za následek změny průřezu po délce. Každý pás je tvořen třemi průřezy lišícími se v počtu plechů v pásnici. Změny průřezu nastávají v místě přípojů svislic č. 2, 3, 7 a 8.

Dolní pás příhrad č. 1, 2, 9 a 10

b =	175	mm
h =	355	mm
A =	8 346,5	mm ²
$I_y =$	$1,035 \cdot 10^8$	mm ⁴
$I_z =$	4 727 420	mm ⁴
$i_y =$	111,3	mm
$i_z =$	23,8	mm
$I_t =$	484 544	mm ⁴
$I_{\omega} =$	$4,919 \cdot 10^8$	mm ⁶
$W_y =$	443 522	mm ³
$W_z =$	54 027,7	mm ³

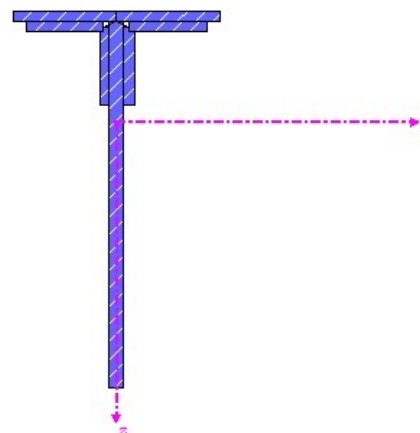
SHAPE-THIN DOLNÍ PÁS 1



Obr. 23: Renderovaný model průřezu – horní pás příhrad č. 1, 2, 9 a 10

Horní pás příhrad č. 1, 2, 9 a 10

b =	200	mm
h =	365	mm
A =	10346,5	mm ²
$I_y =$	$1,294 \cdot 10^8$	mm ⁴
$I_z =$	$1,139 \cdot 10^7$	mm ⁴
$i_y =$	111,8	mm
$i_z =$	33,2	mm
$I_t =$	565 712	mm ⁴
$I_{\omega} =$	$6,165 \cdot 10^8$	mm ⁶
$W_y =$	850 229	mm ³
$W_z =$	113 940	mm ³

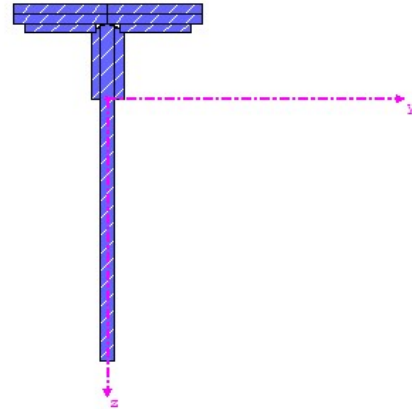


Obr. 24: Renderovaný model průřezu – horní pás příhrad č. 1, 2, 9 a 10

Průřez dolního pásu v příhradách č. 3 a 8 je pouze otočený o 180° a jeho průřezové charakteristiky jsou totožné.

Horní pás příhrad č. 3 a 8

b =	200	mm
h =	375	mm
A =	12346	mm ²
I _y =	1,505 · 10 ⁸	mm ⁴
I _z =	1,806 · 10 ⁷	mm ⁴
i _y =	110,4	mm
i _z =	38,2	mm
I _t =	696 945	mm ⁴
I _ω =	1,302 · 10 ⁹	mm ⁶
W _y =	545 387	mm ³
W _z =	180 608	mm ³

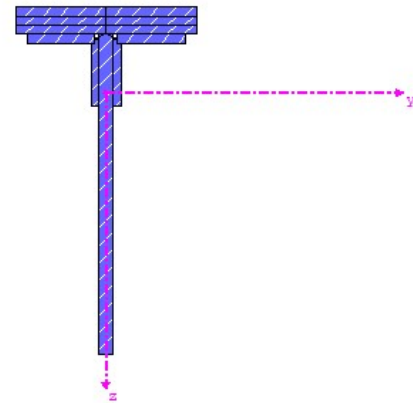


Obr. 25: Renderovaný model průřezu – horní pás příhrad č. 3 a 8

Průřez dolního pásu v příhradách č. 4 až 7 je pouze otočený o 180° a jeho průřezové charakteristiky jsou totožné.

Horní pás příhrad č. 4 až 7

b =	200	mm
h =	385	mm
A =	14346	mm ²
I _y =	1,692 · 10 ⁸	mm ⁴
I _z =	2,473 · 10 ⁷	mm ⁴
i _y =	108,6	mm
i _z =	41,5	mm
I _t =	778 047	mm ⁴
I _ω =	2,885 · 10 ⁹	mm ⁶
W _y =	582 344	mm ³
W _z =	247 274	mm ³



Obr. 26: Renderovaný model průřezu – horní pás příhrad č. 4 až 7

3.2.2 Svislice

Krajní svislice

$b =$	200	mm
$h =$	195	mm
$A =$	6 842,9	mm ²
$I_y =$	3 744 940	mm ⁴
$I_z =$	$1,323 \cdot 10^7$	mm ⁴
$i_y =$	23,4	mm
$i_z =$	44,0	mm
$I_t =$	351 600	mm ⁴
$I_\omega =$	$6,740 \cdot 10^9$	mm ⁶
$W_y =$	38 409,6	mm ³
$W_z =$	132 281,0	mm ³

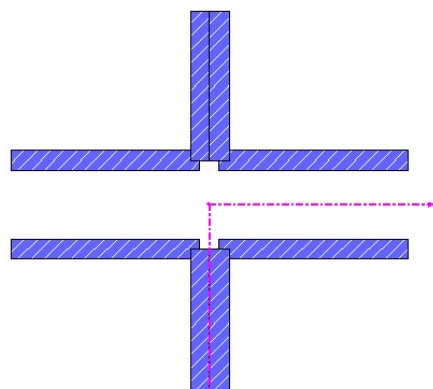
Prostřední svislice

$b =$	160	mm
$h =$	80	mm
$A =$	3 021,5	mm ²
$I_y =$	1 750 060	mm ⁴
$I_z =$	3 398 890	mm ⁴
$i_y =$	24,1	mm
$i_z =$	33,5	mm
$I_t =$	162 467	mm ⁴
$I_\omega =$	$6,860 \cdot 10^7$	mm ⁶
$W_y =$	30 898,1	mm ³
$W_z =$	42 486,1	mm ³

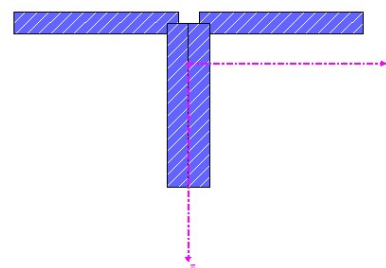
3.2.3 Diagonály

Diagonály 1. příhrady

$b =$	200	mm
$h =$	100	mm
$A =$	4542,9	mm ²
$I_y =$	4 133 750	mm ⁴
$I_z =$	7 962 700	mm ⁴
$i_y =$	30,2	mm
$i_z =$	41,9	mm
$I_t =$	207 867	mm ⁴
$I_\omega =$	$2,337 \cdot 10^8$	mm ⁶
$W_y =$	58 247,9	mm ³
$W_z =$	79 627	mm ³

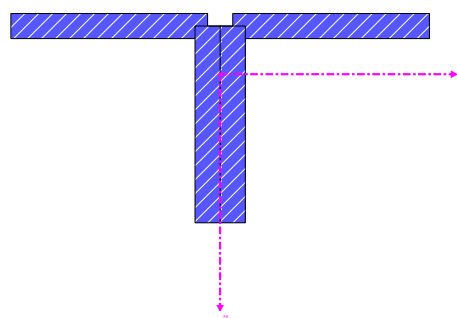


Obr. 27: Renderovaný model průřezu – krajní svislice



Obr. 28: Renderovaný model průřezu – prostřední svislice

SHAPE-THIN D1C+D1T



Obr. 29: Renderovaný model průřezu – diagonály 1. příhrady

Tlačená diagonála příhrad č. 2 a 9

b =	180	mm
h =	90	mm
A =	4 062,9	mm ²
I _y =	2 951 740	mm ⁴
I _z =	5 812 130	mm ⁴
i _y =	27,0	mm
i _z =	37,8	mm
I _t =	300 027	mm ⁴
I _ω =	1,661 · 10 ⁸	mm ⁶
W _y =	46 508,6	mm ³
W _z =	64 579,2	mm ³

Tažená diagonála příhrad č. 2 a 9

b =	180	mm
h =	90	mm
A =	3 426,0	mm ²
I _y =	2 538 290	mm ⁴
I _z =	4 818 190	mm ⁴
i _y =	27,2	mm
i _z =	37,5	mm
I _t =	109 133	mm ⁴
I _ω =	1,002 · 10 ⁸	mm ⁶
W _y =	39 535	mm ³
W _z =	53 535	mm ³

Tlačená diagonála příhrad č. 3 a 8

b =	160	mm
h =	80	mm
A =	3 021,5	mm ²
I _y =	1 750 060	mm ⁴
I _z =	3 398 890	mm ⁴
i _y =	24,1	mm
i _z =	33,5	mm
I _t =	95 800	mm ⁴
I _ω =	6,860 · 10 ⁷	mm ⁶
W _y =	30 898,1	mm ³
W _z =	42 486,1	mm ³

Tažená diagonála příhrad č. 3 a 8

b =	160	mm
h =	80	mm
A =	2 453,5	mm ²
I _y =	1 444 930	mm ⁴
I _z =	2 692 540	mm ⁴
i _y =	24,3	mm
i _z =	33,1	mm
I _t =	50 162,4	mm ⁴
I _ω =	3,68 · 10 ⁷	mm ⁶
W _y =	25 151,2	mm ³
W _z =	33 656,8	mm ³

Tlačená diagonála příhrad č. 4 a 7

b =	140	mm
h =	70	mm
A =	2 634,8	mm ²
I _y =	1 166 170	mm ⁴
I _z =	2 331 750	mm ⁴
i _y =	21,0	mm
i _z =	29,7	mm
I _t =	82 466,9	mm ⁴
I _ω =	4,533 · 10 ⁷	mm ⁶
W _y =	23 815	mm ³
W _z =	33 310	mm ³

Tažená diagonála příhrad č. 4 a 7

b =	140	mm
h =	70	mm
A =	2 154,9	mm ²
I _y =	972 699	mm ⁴
I _z =	1 855 110	mm ⁴
i _y =	21,2	mm
i _z =	29,3	mm
I _t =	43 335,7	mm ⁴
I _ω =	2,440 · 10 ⁷	mm ⁶
W _y =	19 546	mm ³
W _z =	26 501	mm ³

Tlačená diagonála příhrad č. 5 a 6

b =	80	mm
h =	80	mm
A =	1 510	mm ²
I _y =	875 000	mm ⁴
I _z =	875 000	mm ⁴
i _y =	24,1	mm
i _z =	24,1	mm
I _t =	47 900,1	mm ⁴
I _ω =	0	mm ⁶
W _y =	15 450	mm ³
W _z =	15 450	mm ³

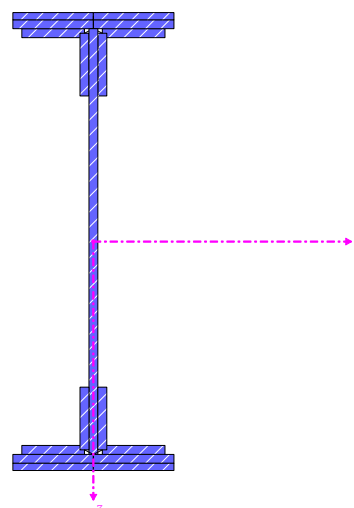
Tažená diagonála příhrad č. 5 a 6

b =	70	mm
h =	70	mm
A =	1 070,0	mm ²
I _y =	472 700	mm ⁴
I _z =	472 700	mm ⁴
i _y =	21,0	mm
i _z =	21,0	mm
I _t =	21 667,9	mm ⁴
I _ω =	0	mm ⁶
W _y =	9 460	mm ³
W _z =	9 460	mm ³

SHAPE-THIN PŘÍČNÍK

3.2.4 Příčník

b =	180	mm
h =	511	mm
A =	16 864,8	mm ²
I _y =	7,474 · 10 ⁸	mm ⁴
I _z =	2,455 · 10 ⁷	mm ⁴
i _y =	210,5	mm
i _z =	38,2	mm
I _t =	996 569	mm ⁴
I _ω =	1,459 · 10 ¹²	mm ⁶
W _y =	2 925 100	mm ³
W _z =	272 784	mm ³



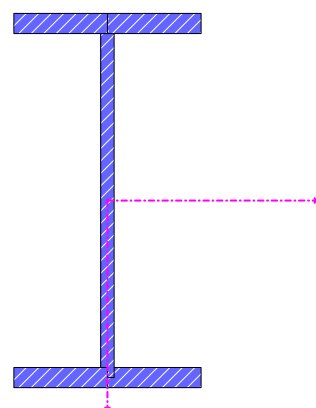
Obr. 30: Renderovaný model průřezu –
 příčník

SHAPE-THIN PŘÍČNÍK

3.2.5 Podélníky

Podélníky č. 1 – 7 a 9

b =	105	mm
h =	210	mm
A =	3 715,6	mm ²
I _y =	2,693 · 10 ⁷	mm ⁴
I _z =	1 828 310	mm ⁴
i _y =	85,1	mm
i _z =	22,2	mm
I _t =	122 098	mm ⁴
I _ω =	1,796 · 10 ¹⁰	mm ⁶
W _y =	256 433	mm ³
W _z =	34 824,9	mm ³



Obr. 31: Renderovaný model průřezu –
 podélník č. 1 – 7 a 9

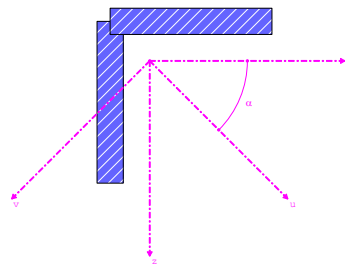
Podélník č. 8

b =	95	mm
h =	200	mm
A =	3 708,1	mm ²
I _y =	2,378 · 10 ⁷	mm ⁴
I _z =	1 469 650	mm ⁴
i _y =	80,1	mm
i _z =	19,9	mm
I _t =	138 971	mm ⁴
I _ω =	1,518 · 10 ¹⁰	mm ⁶
W _y =	237 814	mm ³
W _z =	30 940	mm ³

3.2.6 Dolní ztužení

b =	60	mm
h =	60	mm
A =	810	mm ²
I _y =	271 799	mm ⁴
I _z =	271 799	mm ⁴
i _y =	18,3	mm
i _z =	18,3	mm
I _t =	25 595	mm ⁴
I _ω =	0	mm ⁶
W _y =	7 659	mm ³
W _z =	7 659	mm ³

SHAPE-THIN DZTUZENI

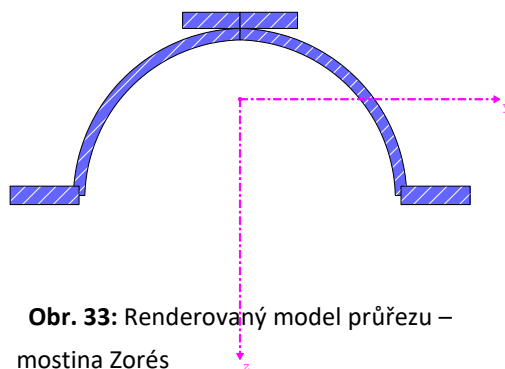


Obr. 32: Renderovaný model průřezu – dolní ztužení

3.2.7 Mostiny Zorés

b =	200	mm
h =	84	mm
A =	2 148,2	mm ²
I _y =	1 992 136,5	mm ⁴
I _z =	6 417 109,8	mm ⁴
i _y =	30,5	mm
i _z =	54,7	mm
I _t =	38 085,2	mm ⁴
I _ω =	6,06 · 10 ⁸	mm ⁶
W _y =	43 526,6	mm ³
W _z =	64 171,1	mm ³

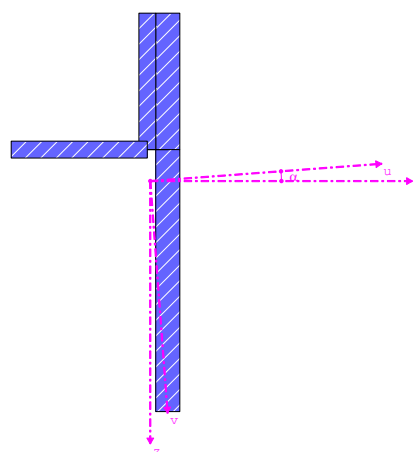
SHAPE-THIN ZORÉS



Obr. 33: Renderovaný model průřezu – mostiny Zorés

3.2.8 Parapetní nosník

b =	70	mm
h =	165	mm
A =	2 447,9	mm ²
I _y =	4 855 410	mm ⁴
I _z =	541 452	mm ⁴
i _y =	44,5	mm
i _z =	14,9	mm
I _t =	106 257	mm ⁴
I _w =	2,183 · 10 ⁷	mm ⁶
W _y =	50 858,4	mm ³
W _z =	9 378,3	mm ³



Obr. 34: Renderovaný model průřezu – parapetní nosník

3.3 Přípoje

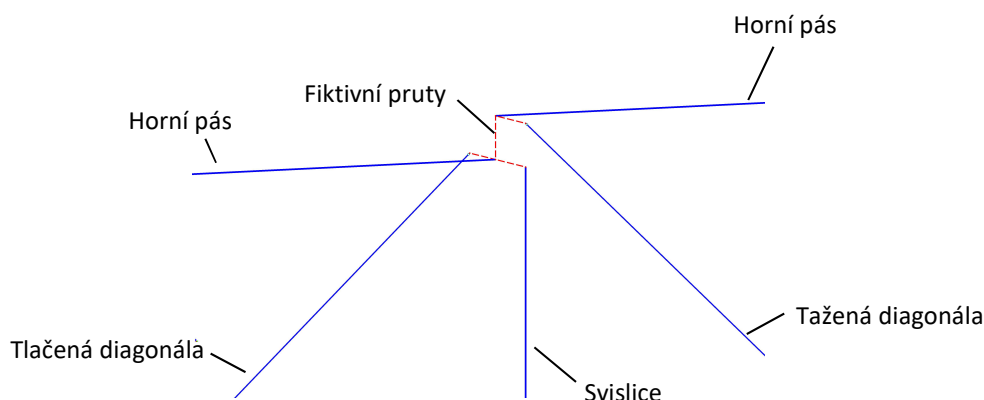
3.3.1 Hlavní nosníky

Horní a dolní pásy mají odstupňovanou pánsnici, v důsledku čehož se jejich průřez po délce mění. Se změnou průřezu se rovněž mění vzdálenost těžiště od krajních vláken. Styčníky prutů jsou v místě změny průřezu tuhé a aby dolní líce prutů byly umístěny ve stejné výškové úrovni, bylo třeba v těchto styčnicích pruty odsadit ve svislém směru pomocí tuhých fiktivních prutů, jejichž délka se rovná změně vzdálenosti těžiště od dolních vláken.

Pruty diagonál a svislic jsou ve styčnicu uchyceny v místě těžiště horního (respektive dolního) pásu a jsou vůči hornímu a dolnímu pásu odsazeny pomocí fiktivních tuhých prutů o excentricitu e tak, aby umístění prutů co nejvíce odpovídalo skutečnému stavu.

$$e = e_h + \frac{t}{2} = e_h + 7,5 \text{ mm},$$

kde t je tloušťka svislého plechu složeného průřezu horního nebo dolního pásu
 e_h je vzdálenost těžiště od horních vláken průřezu diagonály nebo svislice



Obr. 35: Drátěný model styčnicku horního pásu v místě svislice č. 2

Nýtované přípoje diagonál a svislic k pásům příhradového nosníku nevytvářejí dokonale tuhé, ani dokonale kloubové spojení. Z toho důvodu je do modelu zavedena ohybová počáteční tuhost styčnicku pomocí momentových kloubů na obou koncích prutů diagonál a svislic. Podle kap. A.2.1.4 předpisu SŽ S5/1 [12] lze pro profily o výšce menší než 550 mm ohybovou počáteční tuhost styčnicku odhadnout vztahem:

$$S_j = 2 \cdot 10^{-7} \cdot I + 2,7436,$$

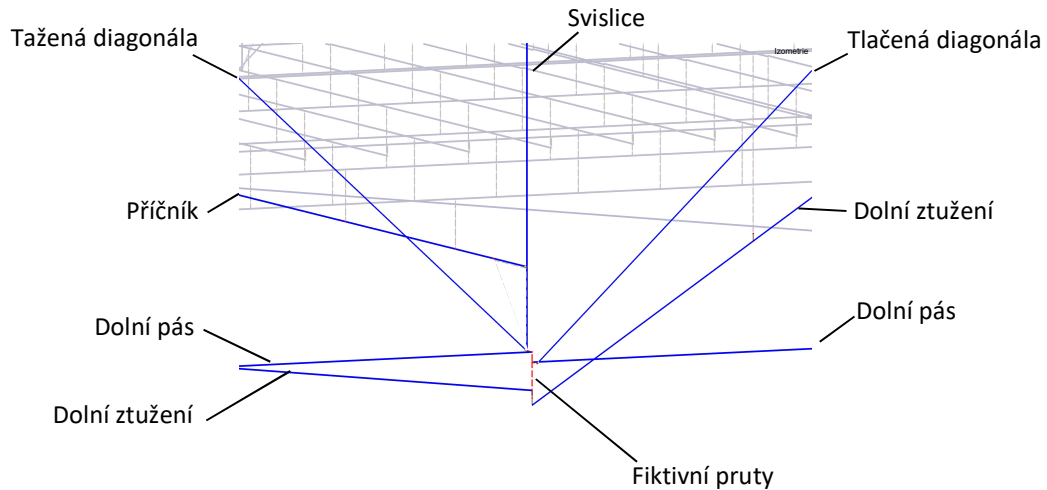
kde S_j je ohybová počáteční tuhost v MNm/rad
 I je moment setrvačnosti v mm⁴

TLAČENÉ DIAGONÁLY				
příhrady č.	I_y [$10^6 \cdot \text{mm}^4$]	$S_{j,y}$ [MNm/rad]	I_z [$10^6 \cdot \text{mm}^4$]	$S_{j,z}$ [MNm/rad]
1 a 10	4,134	3,570	7,963	4,336
2 a 9	2,952	3,334	5,812	3,906
3 a 8	1,750	3,094	3,399	3,423
4 a 7	1,166	2,977	2,332	3,210
5 a 6	0,875	2,919	0,875	2,919
TAŽENÉ DIAGONÁLY				
příhrady č.	I_y [$10^6 \cdot \text{mm}^4$]	$S_{j,y}$ [MNm/rad]	I_z [$10^6 \cdot \text{mm}^4$]	$S_{j,z}$ [MNm/rad]
1 a 10	4,134	3,570	7,963	4,336
2 a 9	2,538	3,251	4,818	3,707
3 a 8	1,445	3,033	2,692	3,282
4 a 7	0,973	2,938	1,855	3,115
5 a 6	0,473	2,838	0,472	2,838
SVISLICE				
příhrady č.	z roviny příhrady tuhé		I_z [$10^6 \cdot \text{mm}^4$]	$S_{j,z}$ [MNm/rad]
0 a 10			7,963	4,336
1 až 9			4,818	3,707

Tab. 3: Přehled počátečních ohybových tuhostí styčnicků diagonál a svislic

3.3.2 Příčnický

Přípoj příčnicku k dolnímu pásu je, podobně jako přípoje diagonál, řešen jako spojení s ohybovou počáteční tuhostí.



Obr. 36: Drátěný model styčnicku dolního pásu v místě svislice č.2

Ohybová počáteční tuhost styčnicku dle kap. A.2.1.4 předpisu SŽ S5/1 [12]:

$$S_j = 2 \cdot 10^{-7} \cdot I + 2,7436$$

$$S_{j,y} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot 7,47 \cdot 10^8 + 2,7436 = 152,1436 \text{ MNm/rad}$$

$$S_{j,z} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot 2,46 \cdot 10^7 + 2,7436 = 7,654 \text{ MNm/rad}$$

3.3.3 Dolní ztužení

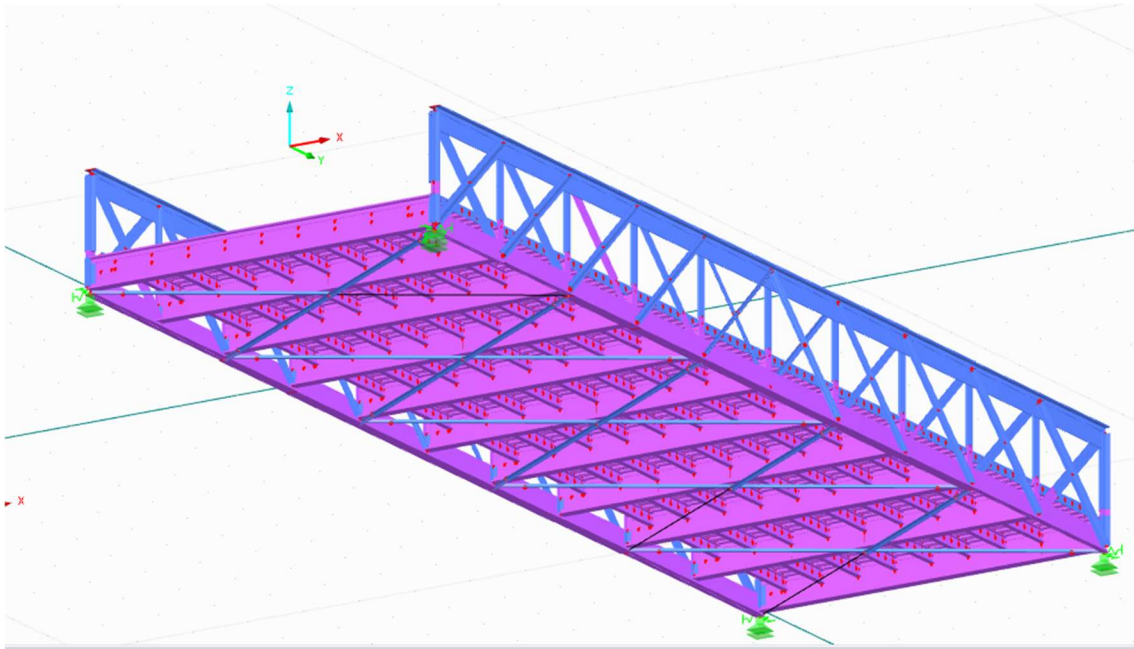
Pruty dolního ztužení byly přiřazeny liniím ve stejné výškové úrovni a aby se míjely, byly následně odsazeny o excentricitu o hodnotě rovné vzdálenosti těžiště od líce průřezu. Pruty každé příhrady jsou v místě jejich křížení spojeny nůžkovým kloubem. V místě spoje dolního ztužení s dolními pásy je uvažováno kloubové spojení.

3.3.4 Diagonály

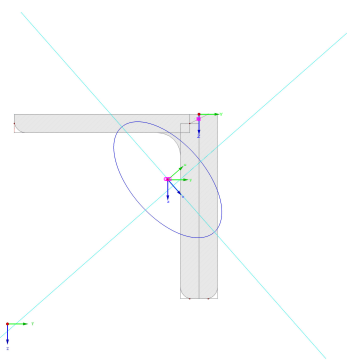
Diagonály byly v místě křížení spojeny tuhým prutem s kloubem na jednom konci prutu umožňujícím otáčení okolo osy x, vznikl tak nůžkový kloub.

3.4 Závady

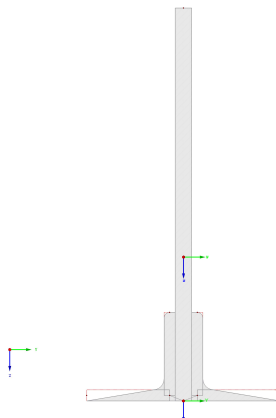
Poruchy byly do modelu implementovány prostřednictvím oslabených průřezů vytvořených v programu Dlubal SHAPE-THIN 9.10. Průřezy byly oslabeny v místech v souladu s poznatkami z prohlídky. Níže jsou uvedeny příklady oslabených průřezů. Oslabené průřezy rozhodující při stanovení zatížitelnosti jsou uvedeny u příslušných posudků. Porušené pruty dolního ztužení byly z modelu odstraněny.



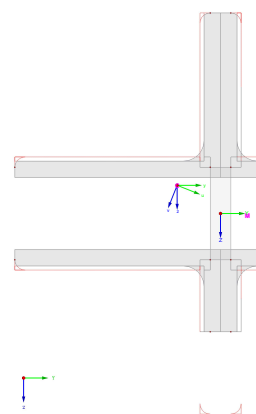
Obr. 37: Výpočetní model s oslabenými (fialově označenými) pruty



Obr. 38: Tlačená diagonála
č. 8 vpravo



Obr. 39: Dolní levý pás
oslabený do ostra



Obr. 40: Svislice č. 0
vpravo

4. Zatížení

Po dohodě s vedením města Bečova nad Teplou se předpokládá, že dojde ke změně účelu užívání stavby a současný most pozemní komunikace byl z hlediska zatížení uvažován jako lávka pro chodce a cyklisty s možným mimořádným výskytem obslužného vozidla.

4.1 Zatěžovací stavy

4.1.1 Stálá zatížení

4.1.1.1 Vlastní tíha

Vlastní tíha konstrukce je zahrnuta ve výpočtu programem Dlubal RFEM 5.31. V modelu však nejsou obsaženy styčnickové plechy, a tak je vlastní tíha konstrukce uvažována s navýšením o 15 %.

4.1.1.2 Ostatní stálé zatížení

Zábradlí

Tíha zábradlí na jednu příhradu o délce $L = 1,95$ m je spočtena součtem tíhy 9 plochých ocelí a 2 úhelníků na metr délky. Objemová tíha oceli γ je dle ČSN EN 1991-1 [13] rovna $78,5$ kN/m³. Hmotnost jednoho úhelníku L 55 x 8 je $4,2$ kg/m [14]. Výsledné charakteristické liniové zatížení od každé příhrady je do modelu aplikováno jako dvě bodové síly $G_{\text{zábradlí}}$ v místě sousedních svislic.

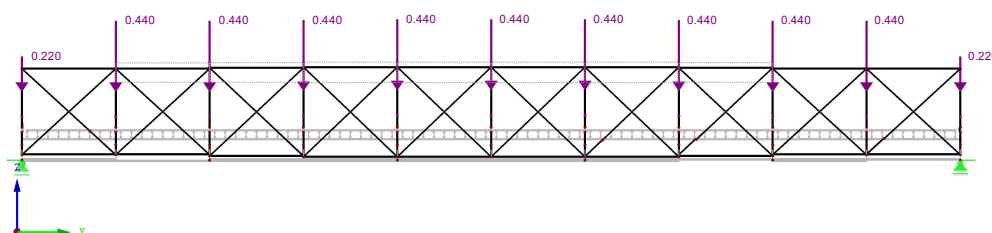
$$g_{\text{zábradlí}} = 9 \cdot \frac{G_{\text{plech}}}{L} + 2 \cdot g_{L55 \times 8}$$

$$g_{\text{zábradlí}} = 9 \cdot \frac{970 \cdot 50 \cdot 8 \cdot 10^{-9}}{1,95} \cdot 78,5 + 2 \cdot \frac{4,2}{100} = 0,141 + 0,084 = 0,225 \text{ kN/m}$$

$$G_{\text{zábradlí}} = 0,225 \cdot \frac{1,95}{2} = 0,22 \text{ kN}$$

ZS4 : Ostatní stálé
Zatížení [kN]

Proti směru osy X



Obr. 39: Stálé zatížení od zábradlí aplikované do modelu

Mostní svršek

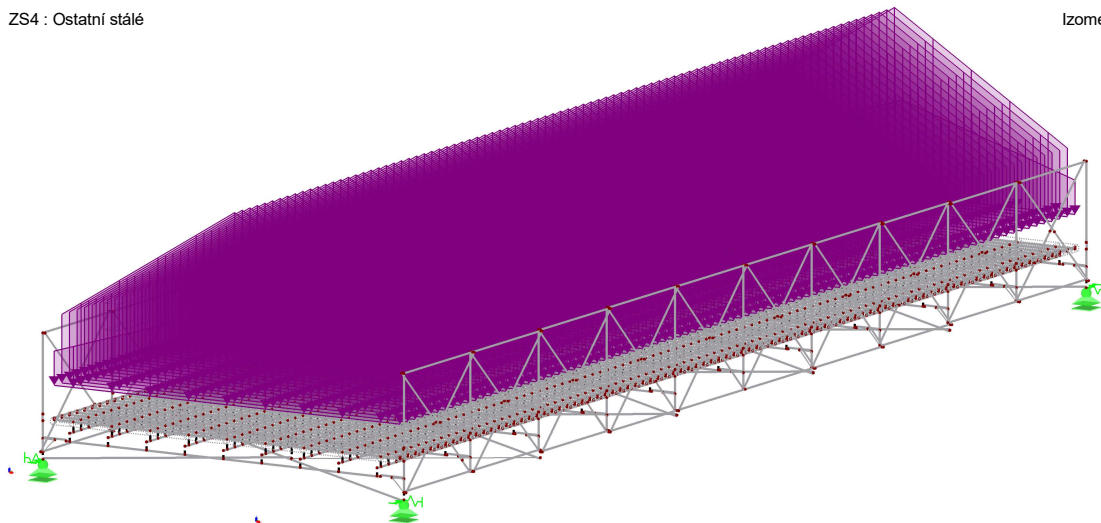
Zatížení od mostního svršku, tvořeného vrstvou štěrku a asfaltu, je součet zatížení od jednotlivých vrstev. Jako objemové tíhy materiálů byly uvažovány horní hodnoty uvedené v ČSN EN 1991-1-1. [13] Tloušťka vozovky je ve směru kolmém na rozpětí mostu proměnlivá, a tak se jedná o plošné zatížení s lineárním průběhem ve směru x. Toto plošné zatížení je do modelu aplikováno jako liniové lichoběžníkové zatížení na jednotlivé mostiny.

DOLNÍ HODNOTA					
	Obj. tíha ^[13] [kN/m ³]	Mocnost vrstvy [m]	Plošné zatížení [kN/m ²]	Rozteč mostin [m]	Liniové zatížení [kN/m]
Štěrka	16,0	0,065	1,040	0,217	0,225
Asfalt	25,0	0,015	0,375	0,217	0,081
CELKEM			1,415		0,307
HORNÍ HODNOTA					
Štěrka	16,0	0,065	1,040	0,217	0,225
Asfalt	25,0	0,115	2,875	0,217	0,623
CELKEM			3,915		0,848

Tab. 4: Výpočet zatížení od mostního svršku

ZS4 : Ostatní stálé

Izometrie



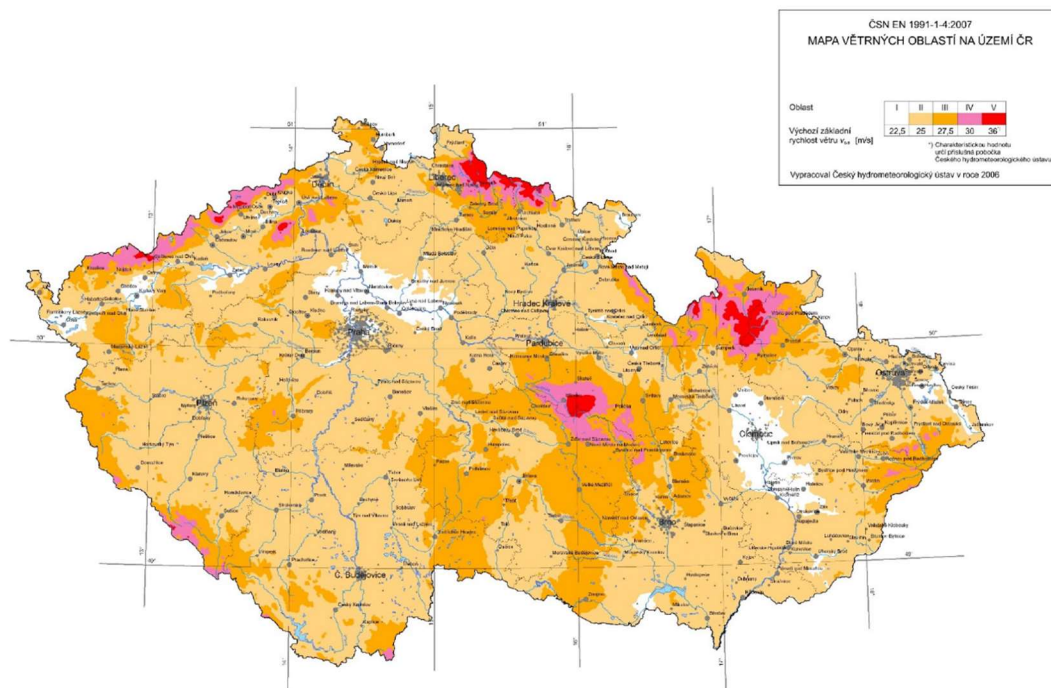
Obr. 42: Stálé zatížení od mostního svršku aplikované do modelu

4.1.2 Zatížení větrem

Zatížení větrem bylo stanoveno podle normy ČSN EN 1991-1-4 [15] a bylo uvažováno ve směru kolmém na rozpětí mostu – směru x a ve směru kolmém na nosnou konstrukci – směru z.

4.1.2.1 Stanovení rychlosti větru a dynamického tlaku

Výchozí základní rychlost větru $v_{b,0}$ byla určena na základě zařazení lokality do mapy větrných oblastí ČR v ČSN EN 1991-1-4 [15]. Pro lokalitu Vodná u Bečova nad Teplou byla stanovena větrná oblast II, které odpovídá výchozí základní rychlost větru: $v_{b,0} = 25 \text{ m/s}$



Obr. 43: Mapa větrných oblastí ČR (převzato z [15])

Základní rychlost větru dle kap. 4.2 ČSN EN 1991-1-4 [15]:

$$V_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot V_{b,0}$$

Doporučené hodnoty součinitelů směru větru a ročního období jsou:

$$c_{dir} = 1,0$$

$$c_{season} = 1,0$$

$$V_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot V_{b,0} = 1,0 \cdot 1,0 \cdot 25 = 25 \text{ m/s}$$

Drsnost terénu byla stanovena na základě kategorie terénu dle tab. 4.1 ČSN EN 1991-1-4 [15].

Terén v okolí mostu odpovídá kategorii terénu II, z níž vyplývají následující parametry:

Parametr drsnosti terénu: $z_0 = 0,05 \text{ m}$

Minimální výška: $z_{min} = 2 \text{ m}$

Součinitel terénu dle kap. 4.3.2 ČSN EN 1991-1-4 [15]:

$$k_r = 0,19 \left(\frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07}$$

Parametr drsnosti terénu pro kategorii II je:^[15] $z_{0,II} = 0,05 \text{ m}$

$$k_r = 0,19 \left(\frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07} = 0,19 \left(\frac{0,05}{0,05} \right)^{0,07} = 0,19$$

Součinitel drsnosti terénu dle kap. 4.3.2 ČSN EN 1991-1-4 [15]:

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln \left(\frac{z}{z_0} \right)$$

Výška mostu nad terénem je: $z = 3,741 \text{ m}$

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) = 0,19 \cdot \ln\left(\frac{3,741}{0,05}\right) = 0,82 \text{ m}$$

Střední rychlost větru dle kap. 4.3.1 ČSN EN 1991-1-4 [15]:

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot v_b$$

Účinky orografie lze při průměrném sklonu návětrného terénu menším než 3° zanedbat.

Součinitel orografie $c_o(z)$ je tedy: $c_o(z) = 1,0$

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot v_b = 0,82 \cdot 1,0 \cdot 25 = 20,51 \text{ m/s}$$

Turbulence větru dle kap. 4.4 ČSN EN 1991-1-4 [15]:

$$I_v(z) = \frac{k_t}{c_o(z) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}$$

Doporučená hodnota součinitele turbulence je: $k_t = 1,0$

$$I_v(z) = \frac{k_t}{c_o(z) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} = \frac{1,0}{1,0 \cdot \ln\left(\frac{3,741}{0,05}\right)} = 0,23$$

Maximální dynamický tlak dle kap. 4.5 ČSN EN 1991-1-4 [15]:

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z) = c_e(z) \cdot q_b$$

Doporučená hodnota měrné hmotnosti vzduchu je: $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot 0,23] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot 20,51^2 = 689 \text{ N/m}^2$$

Základní dynamický tlak větru dle kap. 4.5 ČSN EN 1991-1-4 [15]:

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2$$

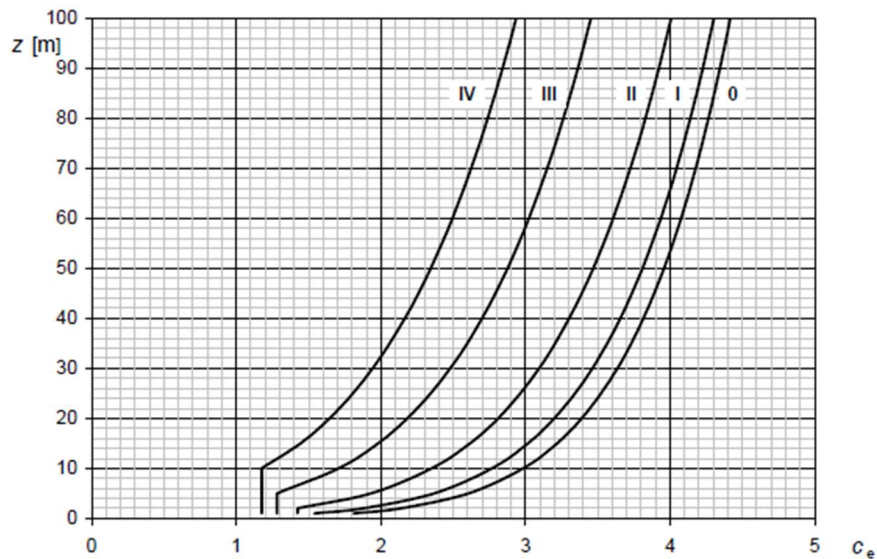
$$q_b = \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 25^2 = 390,63 \text{ N/m}^2$$

Součinitel expozice dle kap. 4.5 ČSN EN 1991-1-4 [15]:

$$c_e(z) = \frac{q_p(z)}{q_b}$$

$$c_e(z) = \frac{689}{390,63} = 1,76$$

Protože jsou součinitelé orografie c_o a turbulence k_t rovny 1,0, lze pro kontrolu správnosti součinitele expozice použít nomogram z obr. 4.2 ČSN EN 1991-1-4 [15]. Nomogram znázorňuje závislost součinitele expozice $c_e(z)$ na výšce mostu nad terénem z a kategorii terénu. Součinitel expozice získaný výpočtem souhlasí se součinitelem získaným z nomogramu.



Obr. 44: Součinitel expozice $c_e(z)$ pro $c_0 = 1$ a $k_1 = 1$ (převzato z [15])

4.1.2.2 Zatížení větrem ve směru x

Zatížení v příčném směru bylo vypočteno zvlášť pro konstrukci bez zatížení chodci (označeno indexem 1) a se zatížením chodci (označeno indexem 2).

Součinitel síly dle kap. 8.3.1 ČSN EN 1991-1-4 [15]:

Součinitel $c_{f_x,0}$ je určený pomocí grafu z obr 8.3 ČSN EN 1991-1-4 [15]) znázorňujícího závislost $c_{f_x,0}$ na poměru b/d_{tot} . Šířka mostu dle prohlídky je: $b = 6,4$ m

Výška d_{tot} se liší v závislosti na přítomnosti zatížení chodci. V kombinacích bez zatížení chodci se pro výpočet výšky $d_{tot,1}$ uvažuje vztah:

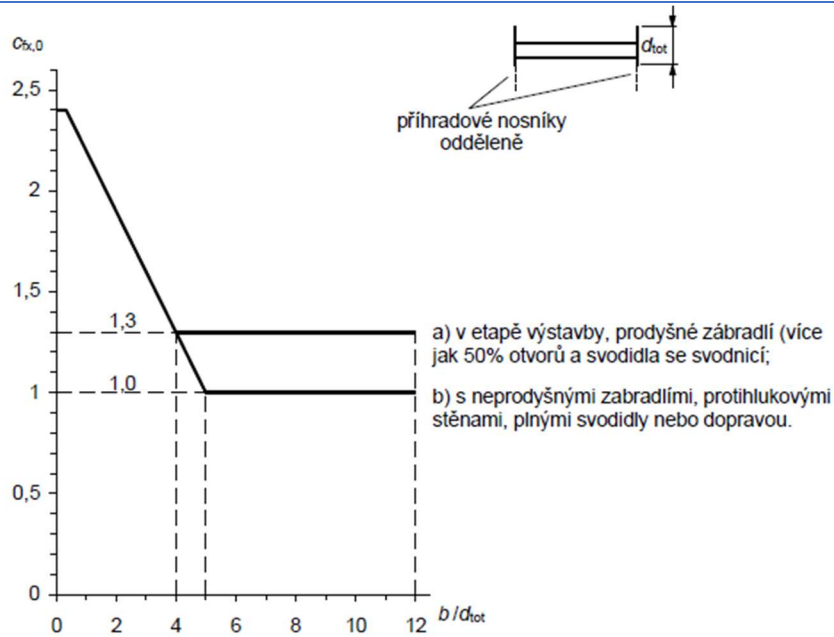
$$d_{tot,1} = \frac{A_{ref}}{L}$$

Délka nosné konstrukce dle prohlídky je: $L = 19,7$ m

Obsah referenční plochy A_{ref} byl spočten jako součet obsahu čelní plochy římsy, v našem případě parapetního nosníku, a obsahu neprodyšných částí příhradového nosníku.

Účinky zatížení větrem byly rovněž uvažovány na prvkovou mostovku. Narozdíl od mostů zatížených silniční nebo železniční dopravou, norma nestanovuje výšku lidí stojících na mostě při výpočtu účinků zatížení větrem na mostovku. V kombinacích se zatížením chodci dosahuje výška $d_{tot,2}$ do úrovně 1,8 m nad úrovní vozovky. Uvažovaná celková výška $d_{tot,2}$ je pak 2,7 m.

$$d_{tot,1} = \frac{A_{ref}}{L} = \frac{3,218 + 24,428}{19,7} = 1,403 \text{ m} \qquad d_{tot,2} = 2,7 \text{ m}$$



Obr. 45: Součinitel síly pro mosty $c_{fx,0}$ (převzato z [15])

$$\frac{b}{d_{tot,1}} = \frac{6,4}{1,403} = 4,56$$

$$c_{fx,0,1} = 1,3$$

$$\frac{b}{d_{tot,2}} = \frac{6,4}{2,7} = 2,37$$

$$c_{fx,0,2} = 1,79$$

Součinitel zatížení větrem dle kap. 8.3.1 ČSN EN 1991-1-4 [15]:

$$C = c_e(z) \cdot c_{fx,0}$$

$$C_1 = 1,76 \cdot 1,3 = 2,29$$

$$C_2 = 1,76 \cdot 1,79 = 3,16$$

Tlak větru na nosnou konstrukci dle kap. 8.3.2 ČSN EN 1991-1-4 [15]:

$$f_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 \cdot C$$

$$f_{w,1} = \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 25^2 \cdot 2,29 = 0,896 \text{ kN/m}^2$$

$$f_{w,2} = \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 25^2 \cdot 3,16 = 1,233 \text{ kN/m}^2$$

Zatížení větrem na jednotlivé prvky nosné konstrukce:

Zatížení větrem bylo uvažováno na prvky obou příhradových nosníků – svislice, diagonály, horní a dolní pás. Tlaky větru na nosnou konstrukci $f_{w,1} = 0,896 \text{ kN/m}^2$, $f_{w,2} = 1,233 \text{ kN/m}^2$ byly vynásobeny rozměrem prutu ve směru kolmém na zatížení větrem. Výsledkem je liniové zatížení na jednotlivé prvky.

TAŽENÉ DIAGONÁLY				TLAČENÉ DIAGONÁLY			
Příhrada č.	b [mm]	$f_{lin,1}$ [kN/m]	$f_{lin,2}$ [kN/m]	Příhrada č.	b [mm]	$f_{lin,1}$ [kN/m]	$f_{lin,2}$ [kN/m]
1 + 10	200	0,179	0,247	1 + 10	200	0,179	0,247
2 + 9	180	0,161	0,222	2 + 9	180	0,161	0,222
3 + 8	160	0,143	0,197	3 + 8	160	0,143	0,197
4 + 7	140	0,125	0,173	4 + 7	140	0,125	0,173
5 + 6	70	0,063	0,086	5 + 6	80	0,072	0,099
DOLNÍ PÁS				HORNÍ PÁS			
Příhrada č.	h [mm]	$f_{lin,1}$ [kN/m]	$f_{lin,2}$ [kN/m]	Příhrada č.	h [mm]	$f_{lin,1}$ [kN/m]	$f_{lin,2}$ [kN/m]
1 - 2, 9 - 10	355	0,318	0,438	1 - 2, 9 - 10	365	0,327	0,45
3 + 8	365	0,327	0,45	3 + 8	375	0,336	0,462
4 - 7	375	0,336	0,462	4 - 7	385	0,345	0,475
SVISLICE				PARAPETNÍ NOSNÍK			
Svislice č.	b [mm]	$f_{lin,1}$ [kN/m]	$f_{lin,2}$ [kN/m]		h [mm]	$f_{lin,1}$ [kN/m]	$f_{lin,2}$ [kN/m]
1 - 2, 9 - 10	200	0,179			165	0,148	0,203
3 + 8	160	0,143					

Tab. 5: Liniová zatížení od větru na jednotlivé pruty

Účinky zatížení větrem na mostovku byly vyjádřeny jako liniové zatížení v úrovni vozovky a plošné zatížení s ekvivalentním momentovým účinkem jako plošné zatížení ve směru x.

Liniové zatížení větrem:

$$f_{w,lin} = 1,233 \cdot 1,8 = 2,22 \text{ kN/m}$$

Momentový účinek:

$$M_w = 2,22 \cdot 0,9 = 1,997 \text{ kNm/m}$$

Svislé zatížení na mostovku se stejným momentovým účinkem:

$$2 \cdot \frac{1}{2} \cdot f_z \cdot 2,97 \cdot 1,98 = 1,997$$

$$f_z = 0,3396 \text{ kN/m}^2$$

Zatížení na jednotlivé mostiny:

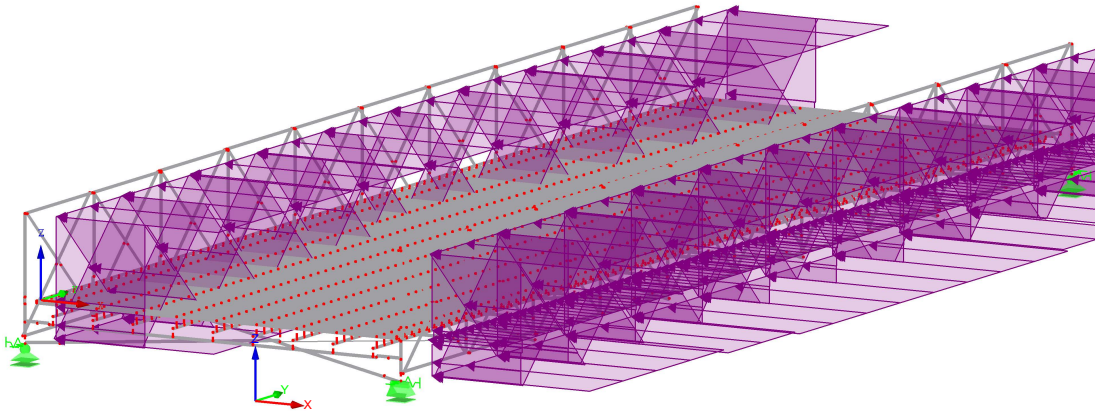
$$F_x = 2,2 \cdot 0,217 = 0,477 \text{ kN}$$

$$f_{lin,z} = 0,3396 \cdot 0,217 = 0,074 \text{ kN/m}$$

Pro dosažení maximálního účinku bylo zatížení do modelu aplikováno ve 4 zatěžovacích stavech pro zatížený i nezatížený most zleva i zprava.

ZS5 : Vitr zprava nezatížený

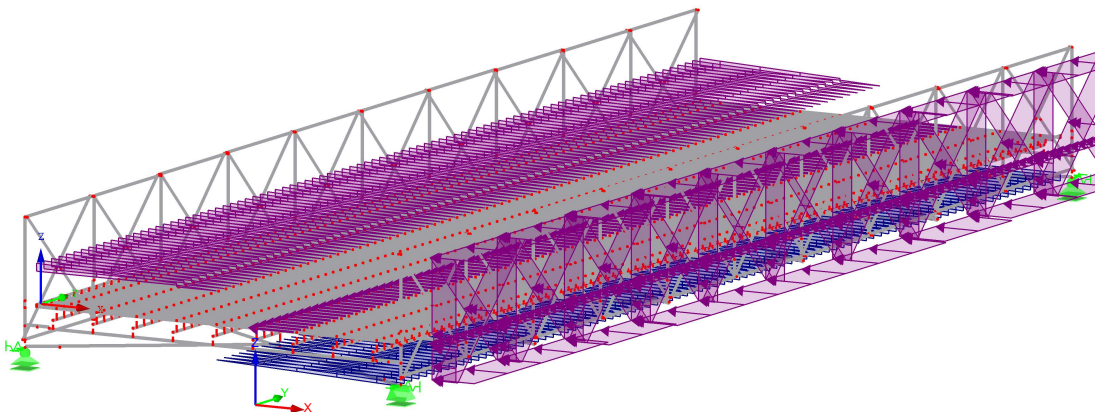
Izometrie



Obr. 46: Zatížení větrem zprava aplikované do modelu – most nezatížený chodci

ZS7 : Vitr zprava zatížený

Izometrie



Obr. 47: Zatížení větrem zprava aplikované do modelu – most zatížený chodci

4.1.2.3 Zatížení větrem ve směru z

Součinitel sil dle kap. 4.3.3 ČSN EN 1991-1-4 [15]:

Jako hodnotu součinitele $c_{f,z}$ lze uvažovat doporučenou hodnotu: $c_{f,z} = 0,9$

Součinitel zatížení větrem:

$$C = c_e(z) \cdot c_{f,z}$$

$$C = 1,76 \cdot 0,9 = 1,59$$

Zatížení větrem ve směru z:

$$f_z = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 \cdot C \cdot b$$

$$f_z = \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 25^2 \cdot 1,59 \cdot 6,4 = 3,969 \text{ kN/m}$$

Excentricita zatížení ve směru x:

$$e = b/4 = 1,6 \text{ m}$$

Toto liniové zatížení bylo nahrazeno plošným zatížením s lineárním průběhem ve směru x o ekvivalentním svislém silovém účinku (konstantní složka) a momentovém účinku okolo středu vozovky (lineární složka). Vznikají celkem 4 zatěžovací stavy pro zatížení větrem zdola i shora, zleva i zprava.

Konstantní složka:

$$f_{pl,1} = \frac{f_z}{5,94} = \frac{3,969}{5,94} = 0,668 \text{ kN/m}^2$$

Lineární složka:

$$M = f_z \cdot e = 3,969 \cdot 1,6 = 6,35 \text{ kNm/m}$$

$$2 \cdot \frac{1}{2} \cdot 2,97^2 \cdot \frac{2}{3} \cdot f_{pl,2} = M$$

$$f_{pl,2} = \frac{6,35}{5,88} = 1,08 \text{ kN/m}^2$$

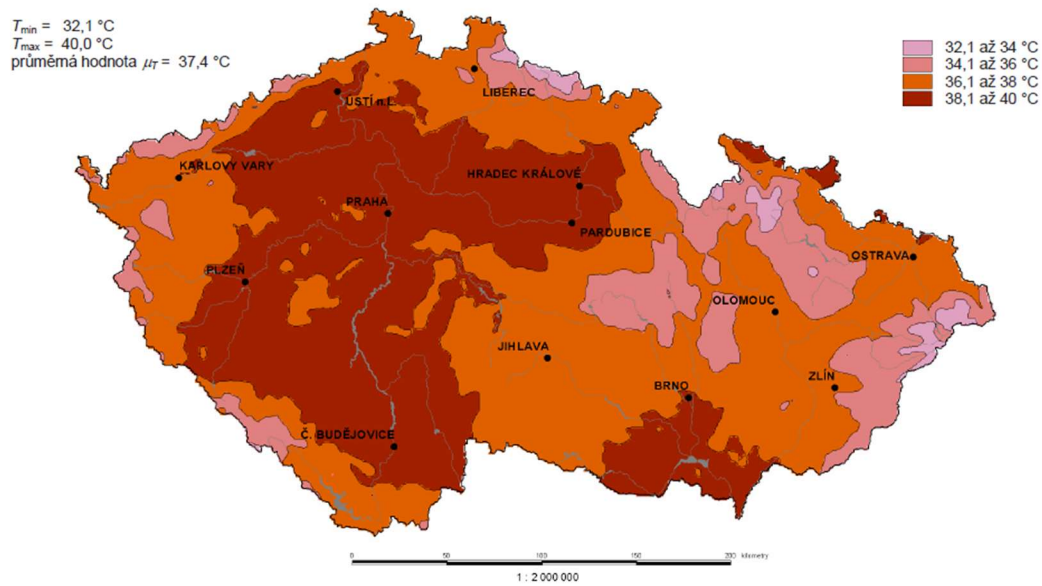
Obr. 48: Zatížení větrem zdola aplikované do modelu

4.1.3 Zatížení teplotou

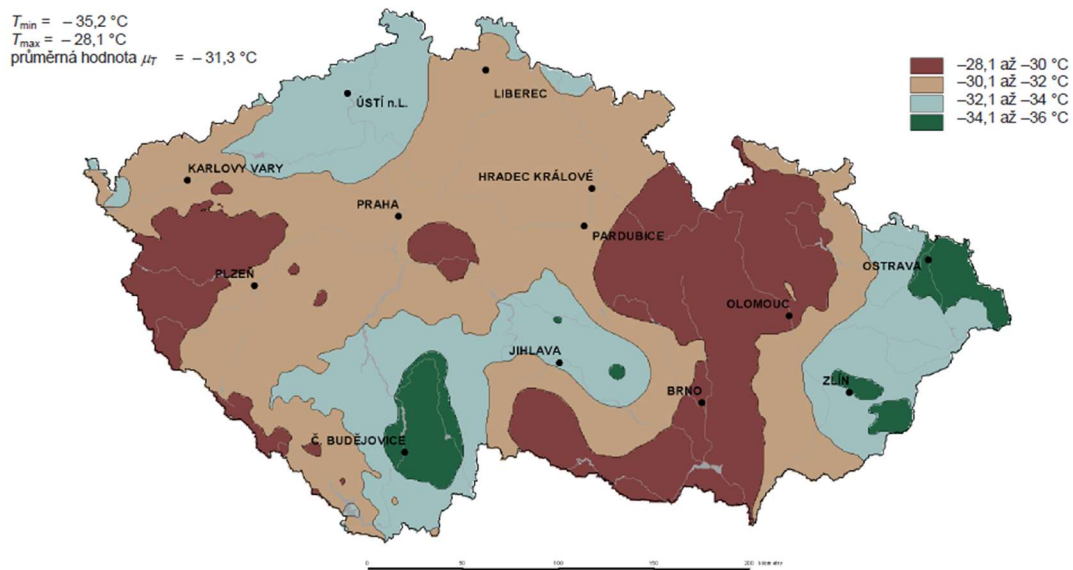
Zatížení teplotou bylo stanoveno podle normy ČSN EN 1991-1-5 [16] a konstrukce byla uvažována jako nosná konstrukce 1. typu: ocelová nosná konstrukce – ocelový příhradový nosník. Pro stanovení účinků teploty bylo třeba pomocí mapy maximálních, resp. minimálních, teplot vzduchu ve stínu z ČSN EN 1991-1-5 [16] určit hodnotu maximální, resp. minimální, teploty.

Maximální teplota vzduchu ve stínu: $T_{\max} = 38^\circ\text{C}$

Minimální teplota vzduchu ve stínu: $T_{\min} = -32^\circ\text{C}$



Obr. 49: Mapa maximálních teplot vzduchu ve stínu (převzato z [16])



Obr. 50: Mapa minimálních teplot vzduchu ve stínu (převzato z [16])

4.1.3.1 Rovnoměrná složka teploty

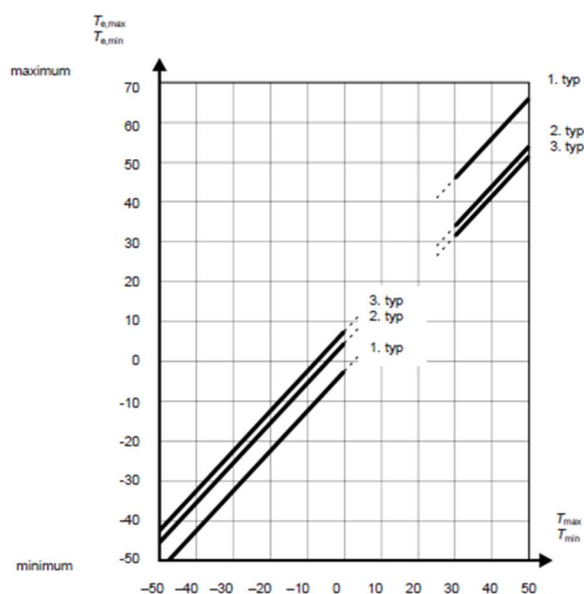
Z hodnot T_{\max} a T_{\min} lze pomocí obr. 6.1 ČSN EN 1991-1-5 [16] určit doporučené maximální hodnoty rovnoměrných složek teploty konstrukce.

Maximální teplota konstrukce:

$$T_{e,\max} = 54^{\circ}\text{C}$$

Minimální teplota konstrukce:

$$T_{e,\min} = -34^{\circ}\text{C}$$



Obr. 51: Vztah mezi rozsahem teploty vzduchu ve stínu a rovnoměrné složky teploty mostu (převzato z [16])

Charakteristické hodnoty maximálního rozsahu rovnoměrné složky teploty lze určit z výchozí teploty mostu T_0 v čase zabudování konstrukce. V případě, že výchozí teplota T_0 není známá, lze dle kap. A.1 ČSN EN 1991-1-5 [16] uvažovat $T_0 = 10^{\circ}\text{C}$.

$$\Delta T_{N,\text{con}} = T_0 - T_{e,\min}$$

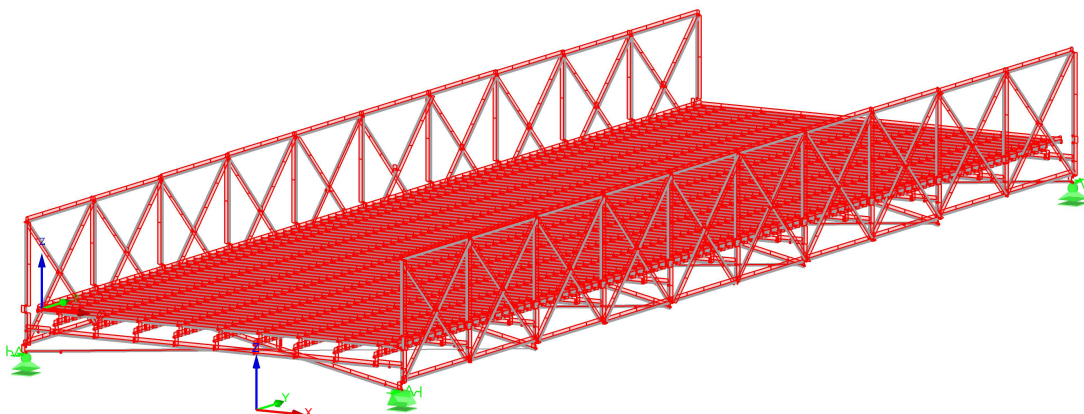
$$\Delta T_{N,\text{con}} = 10 - (-34) = 44^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T_{N,\text{exp}} = T_{e,\max} - T_0$$

$$\Delta T_{N,\text{exp}} = 54 - 10 = 44^{\circ}\text{C}$$

ZS9 : OTEPLENÍ rovnoměrné

Izometrie



Obr. 52: Zatížení rovnoměrnou složkou teploty aplikované do modelu

4.1.3.2 Rozdíly v rovnoměrné složce teploty mezi nosnými prvky

Podle kap. 6.1.6 ČSN EN 1991-1-5 [16] byly uvažovány rozdíly v rovnoměrné složce teploty mezi hlavními nosníky a mostovkou. V případě oteplení je hodnota zatížení teplotou na mostovce o 15 °C nižší. V případě ochlazení je hodnota zatížení teplotou o 15 °C nižší na prutech příhradových nosníků s výjimkou dolního pásu.

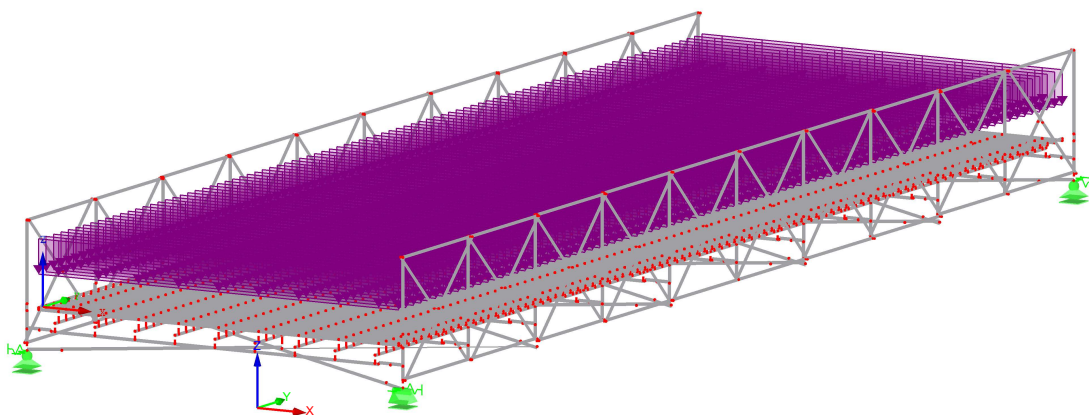
4.1.4 Rovnoměrné zatížení dopravou

Rovnoměrné zatížení dopravou gr1 bylo definováno podle kap. 5.3 ČSN EN 1991-2 [17]. Uvažován byl model LM4 – zatížení davem lidí uvedený v kap. 4.3.5 ČSN EN 1991-2 [17]. Pro účel stanovení normální zatížitelnosti byla výchozí hodnota rovnoměrného zatížení uvažována $q_{fk} = 1 \text{ kN/m}^2$. Výsledkem je potom největší přípustná hodnota tohoto zatížení v kN/m^2 podle kap. 5.1.11 ČSN 73 6222 [18].

Dynamické účinky byly zahrnuty vynásobením tohoto zatížení dynamickým součinitelem $\delta = 1,1$ podle kap. 8.5 ČSN 73 6222 [18].

ZS2 : Užité zatížení gr1

Izometrie

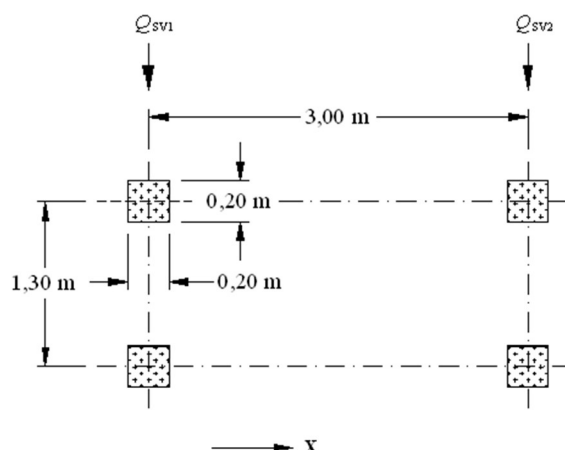


Obr. 53: Zatížení chodci aplikované do modelu

Součástí je také vodorovná složka rovnoměrného zatížení. Charakteristická hodnota tohoto zatížení je 10 % svislé složky zatížení dopravou. Do modelu je aplikováno jako liniové zatížení ve směru y na mostiny Zorés.

4.1.5 Mimořádné zatížení obslužným vozidlem

Na lávce je uvažován pojezd jedním obslužným vozidlem Q_{serv} jako mimořádné zatížení. Pro tento typ zatížení dopravou gr2 je použit model pro mimořádný výskyt vozidla na mostě, dostupný z obrázku 5.2 ČSN EN 1991-2 [17]. Model sestává ze soustavy dvounáprav od sebe vzdálených 3 m. Rozchod kol je 1,3 m. Při zatížení tímto modelem není uvažováno žádné proměnné zatížení. Z toho důvodu není předmětem stanovení zatížitelnosti a je posouzeno zvlášť v kapitole 6.



Obr. 54: Model zatížení pro mimořádný výskyt vozidla na mostě (převzato z [17])

kde je x osa mostu
 Q_{sv1}, Q_{sv2} zatížení od dvounáprav

$$Q_{sv1} = 80 \text{ kN}$$

$$Q_{sv2} = 40 \text{ kN}$$

Tato bodová zatížení Q_{sv1} a Q_{sv2} jsou do výpočetního modelu aplikována jako plošná zatížení q_{sv1} a q_{sv2} na dotykových plochách kol a vozovky. Dotykovými plochami jsou čtverce o délce strany 0,2 m.

$$q_{sv1} = \frac{80}{2 \cdot 0,2^2} = 1000 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{sv2} = \frac{40}{2 \cdot 0,2^2} = 500 \text{ kN/m}^2$$

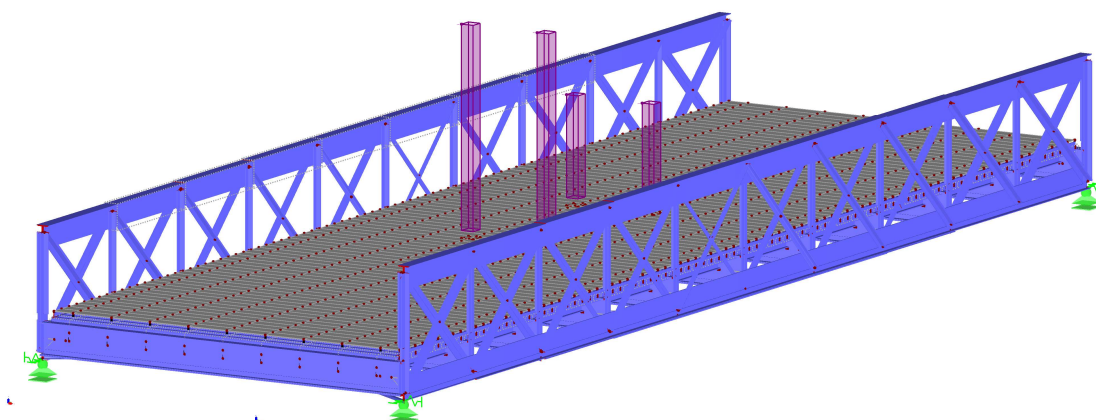
Brzdné síly od obslužného vozidla jsou uvažovány jako 60 % svislého zatížení a byly do modelu aplikovány pomocí bodových zatížení v úrovni dotykové plochy kola a vozovky..

$$Q_{sv1,x} = \frac{0,6 \cdot 80}{2} = 24 \text{ kN}$$

$$Q_{sv2,x} = \frac{0,6 \cdot 40}{2} = 12 \text{ kN}$$

ZS28 : Krok 12/21 sada pohybů 1 z RF-MOVE-Surfaces
 Zatížení [kN/m²]

Izometrie



Obr. 55: Zatížení obslužným vozidlem aplikované do modelu

4.1.6 Počáteční imperfekce horního pásu

Během prohlídky byla zjištěna imperfekce horního levého pásu o 61 mm, která byla do modelu aplikována pomocí liniového spojitého zatížení na zasažené pruty podle obr. 5.4 normy ČSN EN 1993-1-1 [19]. Velikost liniového zatížení při zatížení dopravou 1 kN/m² byla vypočtena podle vztahu:

$$f_{\text{imp}} = \frac{8 N_{\text{Ed}} e_0}{L^2} = \frac{8 \cdot 401,375 \cdot 0,061}{(7 \cdot 1,95)^2} = 1,051 \text{ kN/m}^2$$

Hodnota normálové síly se rovná vyšší z hodnot normálové síly v obálce zatížení v místě začátku vybočení. Tato hodnota se při posuzování zatížitelnosti mění dle odpovídajícího přímo úměrně.

4.2 Kombinace zatížení

Kombinace účinků zatížení vycházejí z návrhových hodnot zatížení. Pro vyhodnocení zatížitelnosti pro mezní stav únosnosti byly podle ČSN EN 1990 [10] uvažovány kombinace 6.10a a 6.10b.

$$6.10a: \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

$$6.10b: \sum_{j \geq 1} \xi_j \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

Pro mezní stav použitelnosti byla uvažována charakteristická kombinace 6.14.

$$6.14: \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

Pro mimořádné návrhové situace byla uvažována kombinace 6.11.

$$6.11: \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_d + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

Doporučené hodnoty součinitelů ψ_0 , ψ_1 , ψ_2 pro lávky pro chodce dle tab. A2.2 ČSN EN 1990 [10]:

Zatížení dopravou gr1:	$\psi_0 = 0,40$	$\psi_1 = 0,40$	$\psi_2 = 0$
Zatížení větrem F_{wk} :	$\psi_0 = 0,30$	$\psi_1 = 0,20$	$\psi_2 = 0$
Zatížení teplotou T_k :	$\psi_0 = 0,60$	$\psi_1 = 0,60$	$\psi_2 = 0,50$

Doporučené hodnoty součinitelů γ a ξ dle tab. A2.4(B) ČSN EN 1990 [10]:

Nepříznivá stálá zatížení:	$\gamma_G = 1,35$	$\xi = 0,85$
Příznivá stálá zatížení:	$\gamma_G = 1,00$	
Příznivá proměnná zatížení:	$\gamma_Q = 1,50$	
Nepříznivá proměnná zatížení:	$\gamma_Q = 0$	

Následně byly sestaveny kombinace zatížení, ze kterých byl vyvozen maximální silový účinek na konstrukci. Pro stanovení zatížitelnosti v mezních stavech únosnosti a použitelnosti byly uvažovány kombinace s dominantním zatížením od dopravy.

MSÚ : Dominantní zatížení dopravou (6.10b)

$$0,85 \cdot 1,35 \cdot (G_{0,k} + G_{ost,k}) + 1,35 \cdot Q_{gr1,k} + 1,5 \cdot 0,3 \cdot F_{w,k} + 1,5 \cdot 0,6 \cdot T_k$$

$$1,15 \cdot (G_{0,k} + G_{ost,k}) + 1,35 \cdot Q_{gr1,k} + 0,45 \cdot F_{w,k} + 0,9 \cdot T_k$$

MSP: Dominantní zatížení dopravou (6.14)

$$1,0 \cdot (G_{0,k} + G_{ost,k}) + 1,0 \cdot Q_{gr1,k} + 0,3 \cdot F_{w,k} + 0,6 \cdot T_k$$

Mimořádná návrhová situace: Dominantní zatížení od teploty (6.11)

$$1,0 \cdot (G_{0,k} + G_{ost,k}) + A_d + 0,6 \cdot T_k$$

Mimořádná návrhová situace: Dominantní zatížení větrem (6.11)

$$1,0 \cdot (G_{0,k} + G_{ost,k}) + A_d + 0,2 \cdot F_{w,k} + 0,5 \cdot T_k$$

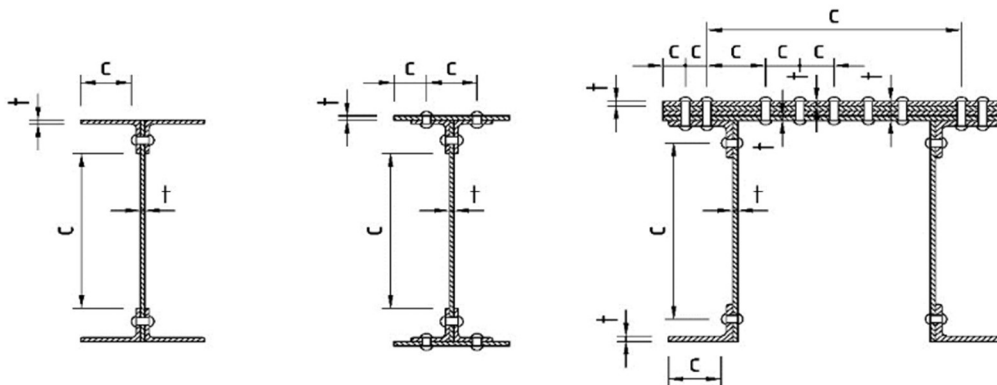
5. Přepočet zatížitelnosti

Na základě výsledků statického softwaru byla pomocí výpočtů dle ČSN EN 1993-1-1 [19] stanovena normální zatížitelnost lávek, která je dle kap. 5.1.11 ČSN 73 6222 [18] definována jako největší přípustná hodnota proměnného rovnoměrného zatížení v kN/m^2 .

5.1 Posouzení MSÚ

Na základě velikosti normálové síly, ohybového momentu a napětí průřezu byly od každého typu prutu vybrány pruty potenciálně rozhodující o zatížitelnosti a posudek nejméně příznivého prutu byl uveden v následujících výpočtech. Výsledná zatížitelnost mostu se rovná nejnižší spočítané hodnotě zatížitelnosti.

Zatížitelnost prvků s nýtovými spoji byla na straně bezpečné určena pružným posudkem a při klasifikaci průřezů dle 5.5.2 ČSN EN 1993-1-1 [19] byla před samotným výpočtem zatížitelnosti potvrzena alespoň 3. třída průřezu. Rozměry potřebné pro zařazení byly převzaty z obr. A.1 předpisu S5 [12].



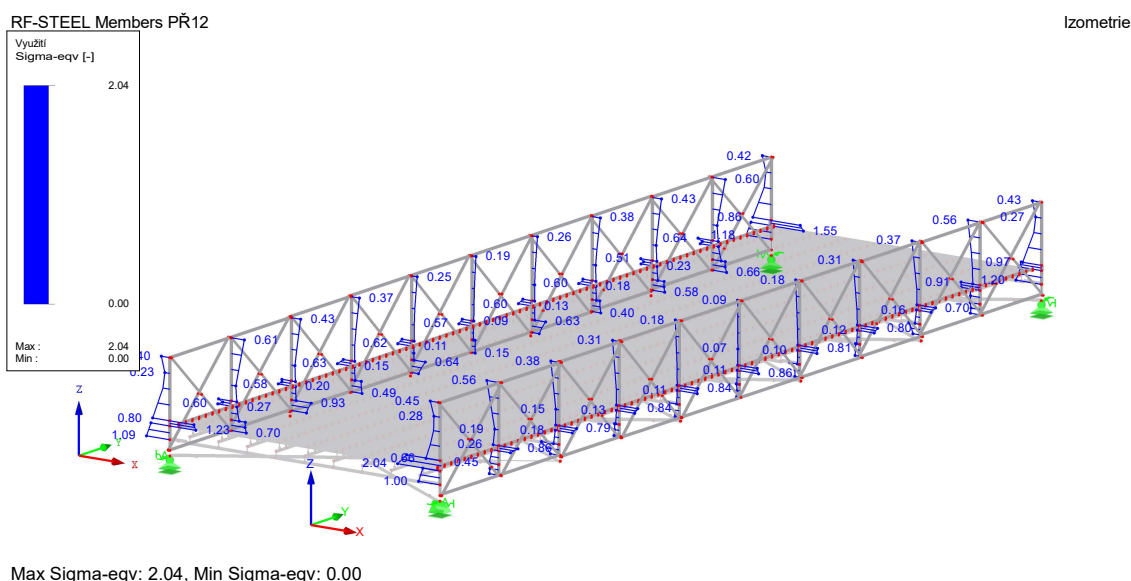
Obr. 56: Uvažované rozměry pro zařazení nýtovaných průřezů (převzato z [12])

Následně byl průřez posouzen ve smyku dle kap. 6.2.6 ČSN EN 1993-1-1 [19] a v případě potvrzení malého smyku byly zanedbány účinky smyku na ohybovou únosnost dle kap. 6.2.8 ČSN EN 1993-1-1 [19]. Poté byl průřez posouzen na interakci normálové síly a ohybu. Pro posouzení využití průřezů namáhaných tahem a ohybem byl použit vztah pro lineární sumaci složek využití průřezu dle kap. 6.2.1 ČSN EN 1993-1-1 [19]. U průřezů namáhaných tahem a ohybem byla posouzena podmínka nutnosti oslabení průřezu o otvory pro nýty v tažené pásnici dle kap. 6.2.5 ČSN EN 1993-1-1 [19]. Velikost rovnoměrného zatížení od dopravy je v tomto případě přímo úměrná využití únosnosti průřezu a tak lze zatížitelnost těchto prvků stanovit lineárně.

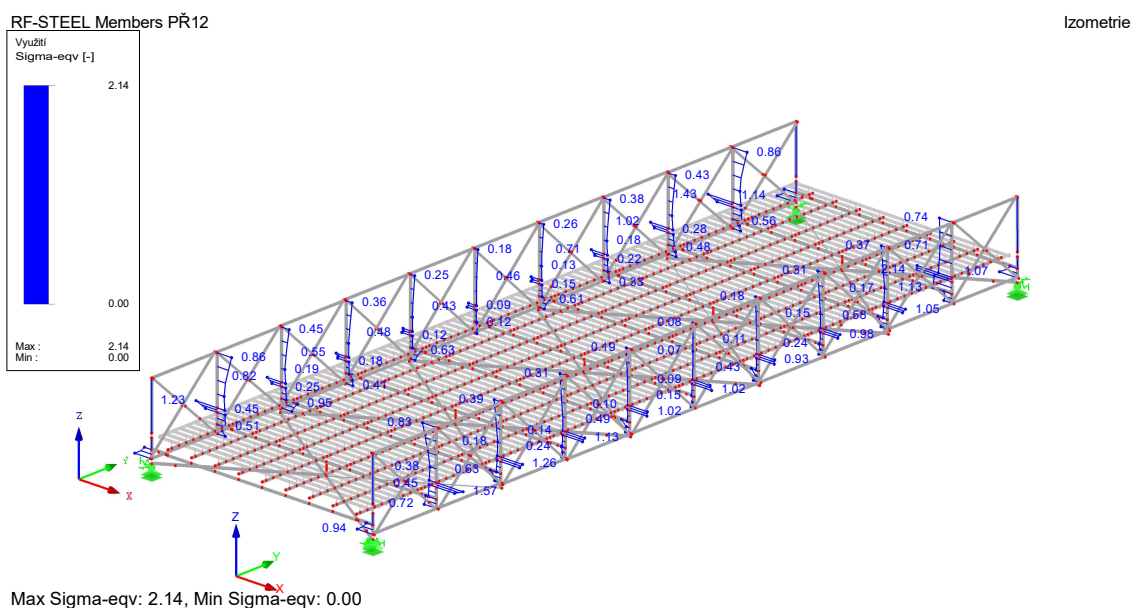
Průřezy namáhané tlakem a ohybem byly posouzeny dle kap. 6.3.3 ČSN EN 1993-1-1 [19]. Bylo třeba zahrnout účinky II. řádu pomocí vzpěrných délek a účinky klopení. Velikost rovnoměrného zatížení od dopravy tak není přímo úměrná využití únosnosti a zatížitelnost musela být vypočtena iteračně.

5.1.1 Svislice

Na základě analýzy pomocí modulu RF-STEEL Members lze říct, že mnoho svislic v místě jejich oslabení nevyhoví ani při výchozím zatížení dopravou 1 kN/m^2 . Vzhledem k tomu, že posuzovaná konstrukce je staticky neurčitá a její svislice jsou podružnými prvky, byly jednotlivé nevyhovující části svislic při posuzování ostatních prvků na vyšší zatížitelnost z modelu odstraněny a byla uvažována redistribuce zatížení do jiných konstrukčních prvků.



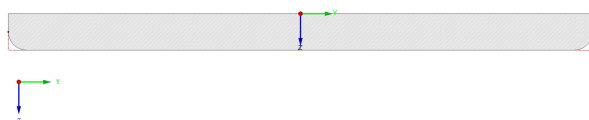
Obr. 57: Využití průřezů svislic



Obr. 58: Využití průřezů svislic po vyřazení krajních svislic

Po vyřazení všech krajních svislíc a redistribuci zatížení je patrné, že při výchozím zatížení dopravou 1 kN/m² nevyhoví všechny svislíce na pravé straně a svislíce č. 0, 1, 8, 9 a 10 na levé straně. Oslabené části těchto svislíc byly rovněž z modulu odstraněny. U zbývajících svislíc byla posouzena zatížitelnost. Jako nejvíce namáhaná ve své oslabené části se jeví svislíce č. 2 vlevo. Prut je v místě oslabení namáhán tahem a velkým ohybem. V místě oslabení se nevyskytují žádné nýty.

SVISLICE Č. 2 – levý nosník



Obr. 59: Model oslabeného průřezu posuzované svislíce

A	1 589,3	mm ²
A _f	1 589,3	mm ²
A _y	1 324	mm ²
A _z	1 589,3	mm ²
W _{el,y}	2 618,5	mm ³
W _{el,z}	41 831,7	mm ³
I _y		mm ⁴
I _z		mm ⁴

Rozhodující kombinace:

ZATÍŽENÍ	ξ	ψ	δ	γ
Vlastní tíha + ostatní stálé zatížení	0,85	–	–	1,35
Svislé zatížení od dopravy	–	–	1,1	1,35
Vodorovné zatížení od dopravy	–	–	–	1,35
Vítr zleva na zatížený most	–	0,3	–	1,5
Ochlazení	–	0,6	–	1,5
Počáteční imperfekce	–	–	–	–

CELKEM			DOPRAVA			STÁLÉ + PROM. ZATÍŽENÍ		
N	13,715	kN	N	0,174	kN	N	56,281	kN
V _y	2,501	kN	V _y	1,073	kN	V _y	1,428	kN
V _z	1,686	kN	V _z	0,092	kN	V _z	0,743	kN
M _y	0,322	kNm	M _y	0,158	kNm	M _y	0,517	kNm
M _z	1,389	kNm	M _z	0,174	kNm	M _z	0,239	kNm

Klasifikace průřezu dle tab. 5.2 ČSN EN 1993-1-1 [19]

Pásnice – přečnávající tlačená část

$$\frac{c}{t} = \frac{90}{10} = 9 \leq 14\epsilon = 14 \sqrt{\frac{235}{259,81}} = 13,31$$

Pásnice vyhovuje pro 3. třídu

Únosnost v tahu dle kap. 6.2.3 ČSN EN 1993-1-1 [19]

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1,0$$

$$N_{t,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1\,589,3 \cdot 259,81 \cdot 10^{-3}}{1,15} = 359,057 \text{ kN}$$

Posouzení smyku dle kap. 6.2.6 ČSN EN 1993-1-1 [19]

$$\tau_{z,Ed} = \frac{V_z \cdot S_y}{I_y \cdot t} = \frac{1,686 \cdot 10^3 \cdot 6\,553,4}{394\,616,8 \cdot 16} = 1,908 \text{ MPa}$$

$$\frac{\tau_{z,Ed}}{\sqrt{3} \cdot f_y} = \frac{1,908}{\sqrt{3} \cdot 230} = 0,006 < 0,5 \quad \text{Malý smyk.}$$

$$\frac{\tau_{z,Ed}}{\gamma_{M0}} = \frac{1,908}{1,2}$$

Únosnost v ohybu dle kap. 6.2.6 ČSN EN 1993-1-1 [19]

$$M_{y,Rd} = \frac{W_{el,y} f_y}{\gamma_0} = \frac{2\,618,5 \cdot 259,81 \cdot 10^{-6}}{1,2} = 0,567 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Rd} = \frac{W_{el,z} f_y}{\gamma_0} = \frac{41\,831,7 \cdot 259,81 \cdot 10^{-6}}{1,2} = 9,057 \text{ kNm}$$

Stanovení zatížitelnosti

$$Z = \frac{R_d - E_{s,Ed}}{E_{ch,Ed}} = \frac{1 - E_{s,Ed}}{E_{ch,Ed}}$$

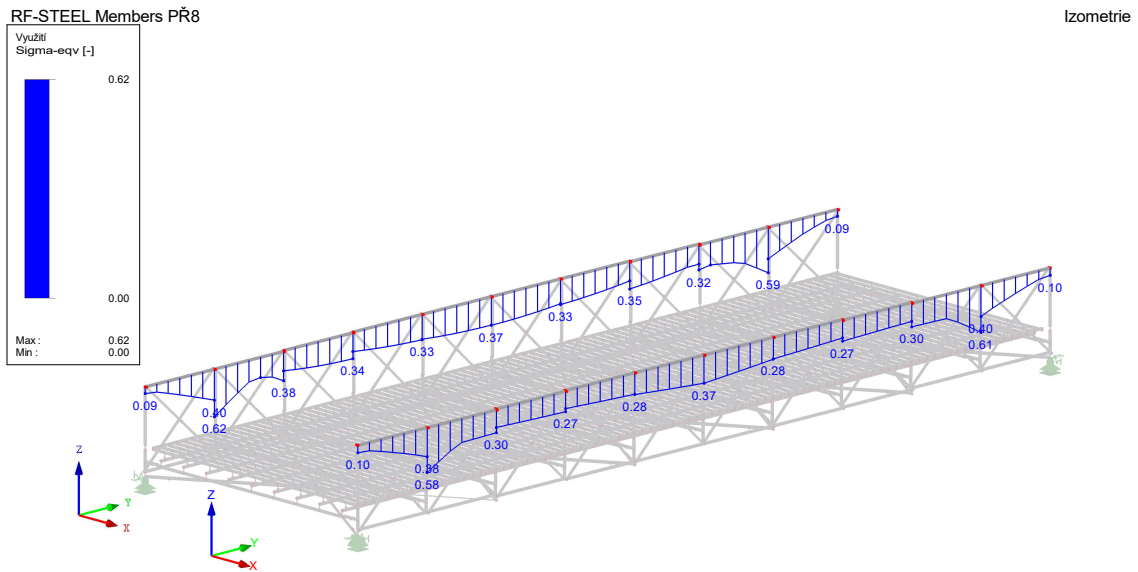
$$E_{s,Ed} = \frac{N_{s,Ed}}{N_{t,Rd}} + \frac{M_{y,s,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,s,Ed}}{M_{z,Rd}} = \frac{12,494}{359,057} + \frac{0,224}{0,567} + \frac{0,174}{9,057} = 0,564$$

$$E_{ch,Ed} = \frac{N_{ch,Ed}}{N_{t,Rd}} + \frac{M_{y,ch,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,ch,Ed}}{M_{z,Rd}} = \frac{1,221}{261,776} + \frac{0,098}{1,384} + \frac{0,174}{2,592} = 0,195$$

$$Z = \frac{1 - E_{s,Ed}}{E_{ch,Ed}} = \frac{1 - 0,564}{0,195} = \mathbf{2,230 \text{ kN/m}^2}$$

Při zatížení od dopravy 2,230 kN/m² rovněž platí malý smyk.

5.1.2 Horní pásy

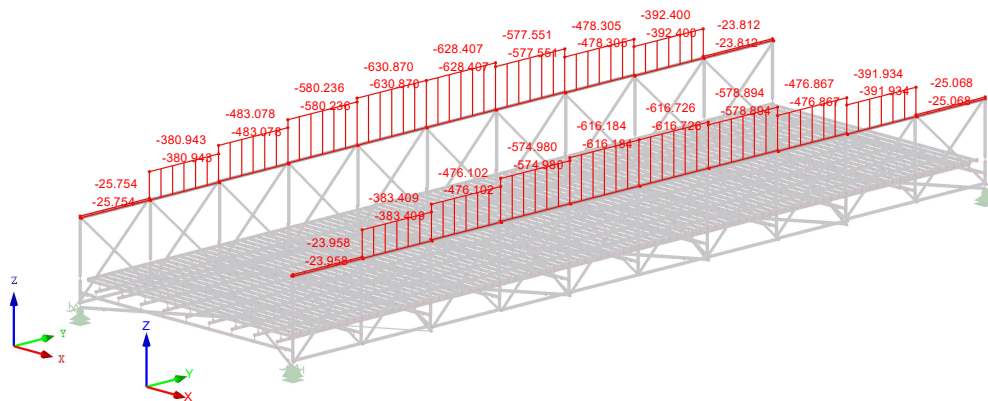


Max Sigma-eqv: 0.62, Min Sigma-eqv: 0.00

Obr. 60: Průběh využití průřezů horního pásu

KV7 : MSÚ (STR/GEO) - trvalá/dočasná - rovn. 6.10a a 6.10b
 Vnitřní síly N
 Kombinace výsledků: Max. a min. hodnoty

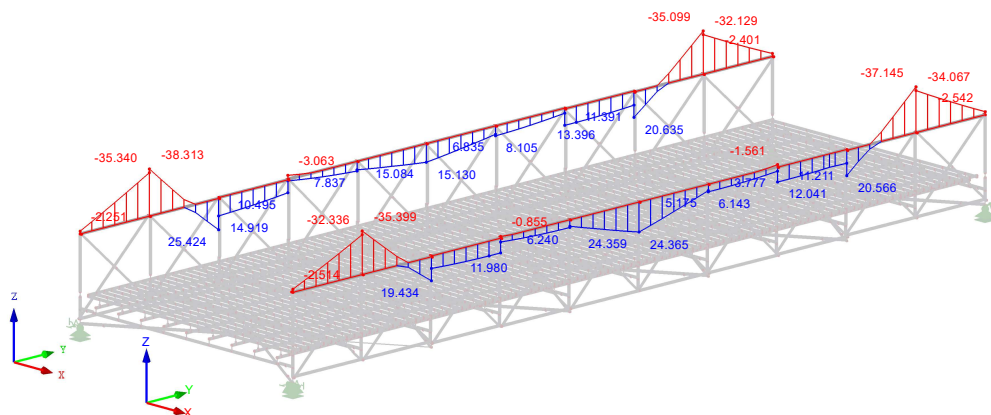
Izometrie



Obr. 61: Obálka normálových sil horního pásu

KV7 : MSÚ (STR/GEO) - trvalá/dočasná - rovn. 6.10a a 6.10b
 Vnitřní síly M-y
 Kombinace výsledků: Max. a min. hodnoty

Izometrie

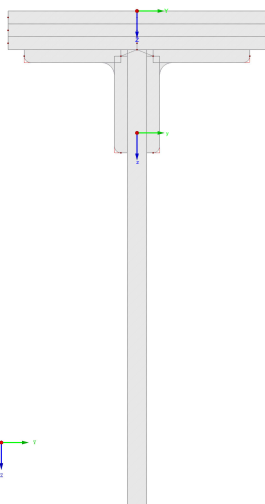


Max M-y: 25.424, Min M-y: -38.313 [kNm]

Obr. 62: Obálka ohybového momentu M_y horního pásu

Na základě vyhodnocení velikosti napětí, součinitele kritického zatížení, normálové síly a ohybového momentu M_y se jako rozhodující prut na horním pásu jeví v místě příhrady č.6 pravého nosníku.

HORNÍ PÁS – pravý nosník, příhrada č. 6



Obr. 63: Model průřezu posuzovaného horního pásu

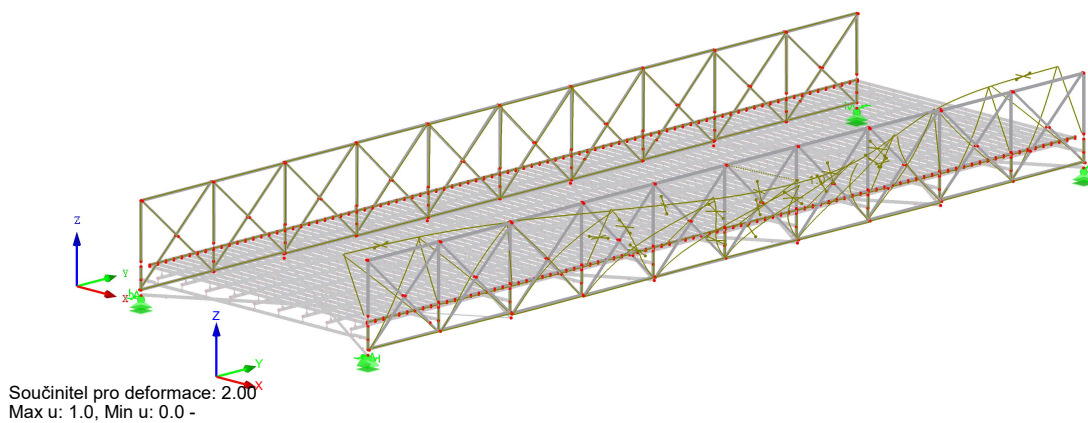
A	14 346,5	mm ²
A _y	6 365,6	mm
A _z	4 799,1	mm ²
W _{el,y}	582 344,2	mm ³
W _{el,z}	247 274,2	mm ³
I _y	1,69 · 10 ⁸	mm ⁴
I _z	2,47 · 10 ⁷	mm ⁴
I _w	2,88 · 10 ⁹	mm ⁶
I _t	778 047,1	mm ⁴
N _{Ed}	616,726	kN
V _{y,Ed}	0,692	kN
V _{z,Ed}	7,415	kN
M _{y,Ed}	20,878	kNm
M _{z,Ed}	3,505	kNm

Rozhodující kombinace zatížení

ZATÍŽENÍ	ξ	ψ	δ	γ
Vlastní tíha + ostatní stálé zatížení	0,85	–	–	1,35
Svislé zatížení od dopravy	–	–	1,1	1,35
Vodorovné zatížení od dopravy	–	–	–	1,35
Vítr ve směru z – shora, zprava	–	0,3	–	1,5
Oteplení	–	0,6	–	1,5
Počáteční imperfekce	–	–	–	–

RF-STABILITY PŘ10
 Vlastní tvar č. 6 - 2.25056
 Vlastní tvar - u [-]

Izometrie



Obr. 64: Rozhodující vlastní tvar pro stabilitní posouzení horního pásu

Klasifikace průřezu dle tab. 5.2 ČSN EN 1993-1-1 [19]

Stojina – pouze tlak

$$\frac{c}{t} = \frac{275}{15} = 18,33 \leq 14\varepsilon = 14 \sqrt{\frac{235}{230}} = 14,151$$

Stojina vyhovuje pro 4. třídu, ale je možné dle kap. 5.5.2 ČSN EN 1993-1-1 [19] průřez považovat za průřez 3. třídy, protože platí následující vztah:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \cdot \sqrt{\frac{f_y/\gamma_{M0}}{\sigma_{com,Ed}}} = \sqrt{\frac{235}{230}} \cdot \sqrt{\frac{230/1,2}{68,75}} = 1,69$$

$$\frac{c}{t} = \frac{275}{15} = 18,33 \leq 14\varepsilon = 14 \cdot 1,69 = 23,62$$

Pásnice – přečnívající tlačená část

$$\frac{c}{t} = \frac{47,5}{30} = 1,583 \leq 14\epsilon = 14 \sqrt{\frac{235}{230}} = 14,151$$

Pásnice vyhovuje pro 3. třídu

Posouzení smyku dle kap. 6.2.6 ČSN EN 1993-1-1 [19]

Vzhledem k řádově odlišným hodnotám posouvající síly, statického momentu a momentu setrvačnosti je posudek relevantní pouze ve svislém směru.

$$\tau_{z,Ed} = \frac{V_{z,Ed} \cdot S_y}{I_y \cdot t} = \frac{7,415 \cdot 10^3 \cdot 632\,798,4}{1,69 \cdot 10^8 \cdot 15} = 1,851 \text{ MPa}$$

$$\frac{\tau_{z,Ed}}{\sqrt{3} \cdot f_y} = \frac{1,851}{\sqrt{3} \cdot 230} = 0,006 < 0,5 \quad \text{Malý smyk.}$$

$$\frac{V_{M0}}{1,2}$$

Posouzení zatížitelnosti

$$\alpha_{cr} = 2,25$$

$$N_{Rk} = A \cdot f_y = 14\,346,5 \cdot 230 = 3\,299,695 \text{ kN}$$

$$L_{vz,y} = 1\,950 \text{ m}$$

$$\bar{\lambda}_y = \frac{L_{vz,y}}{i_y \cdot \lambda_1} = \frac{1\,950}{108,6 \cdot 93,9 \sqrt{\frac{235}{230}}} = 0,189 < 0,2 \rightarrow \chi_y = 1$$

$$L_{vz} = \sqrt{\frac{\pi^2 E I_z}{\alpha_{cr} \cdot N_{Ed}}} = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot 210 \cdot 10^6 \cdot 2,88 \cdot 10^{-5}}{2,25 \cdot 628,448}} = 6\,074 \text{ mm}$$

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_{vz}}{i_z \cdot \lambda_1} = \frac{6\,074}{41,5 \cdot 93,9 \sqrt{\frac{235}{230}}} = 1,542$$

$\alpha = 0,76$ – vzpěrnostní křivka c

$$\Phi = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right] = 0,5 \cdot \left[1 + 0,49 \cdot (1,542 - 0,2) + 1,542^2 \right] = 2,018$$

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{2,018 + \sqrt{2,018^2 - 1,542^2}} = 0,301$$

Charakteristická ohybová únosnost:

$$M_{y,Rk} = W_{el,y} \cdot f_y = 582\,344,2 \cdot 230 = 133,939 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Rk} = W_{el,z} \cdot f_y = 247\,274,2 \cdot 230 = 56,873 \text{ kNm}$$

Moment setrvačnosti v ose y je větší než v ose z, průřez byl tedy posouzen na klopení při ohybu kolem osy y.

Délka mezi body zajištěnými proti posunu kolmo z roviny:

$$L = 1\,950 \text{ mm}$$

Součinitelé vzpěrné délky:

$$k_w=1$$

$$k_z=1$$

Bezrozměrný parametr kroucení:

$$k_{wt} = \frac{\pi}{k_w L} \sqrt{\frac{E I_w}{G I_t}} = \frac{\pi}{1 \cdot 1950} \sqrt{\frac{210 \cdot 2,88 \cdot 10^9}{81 \cdot 7,78 \cdot 10^5}} = 0,158$$

$$z_a = 94,5 \text{ mm}$$

$$z_s = 76,2 \text{ mm}$$

$$z_g = z_a - z_s = 94,5 - 76,2 = 18,3 \text{ mm}$$

Vzdálenost mezi středem pásnice a volným koncem průřezu:

$$h_f = 365 \text{ mm}$$

$$\psi_f = 1 \text{ (tlačená pásnice)}$$

$$z_j = 0,45 \psi_f h_f = 0,45 \cdot 1 \cdot 365 = 164,25 \text{ mm}$$

Bezrozměrný parametr nesymetrie průřezu:

$$\zeta_j = \frac{\pi z_j}{k_z L} \sqrt{\frac{E I_z}{G I_t}} = \frac{\pi \cdot 164,25}{1 \cdot 1950} \sqrt{\frac{210 \cdot 2,47 \cdot 10^7}{81 \cdot 7,78 \cdot 10^5}} = 2,401$$

Poměr koncových momentů:

$$\psi = \frac{3,586}{20,878} = 0,172$$

Součinitelé závislé na zatížení a uložení konců dle tab.NB.3.1 ČSN EN 1993-1-1 [19]:

$$C_{1,0} = 1,598$$

$$C_{1,1} = 1,644$$

$$C_1 = C_{1,0} + (C_{1,1} - C_{1,0}) k_{wt} = 1,598 + (1,644 - 1,598) \cdot 0,158 = 1,605$$

$$C_2 = 0 \rightarrow C_2 \zeta_g = 0$$

$$C_3 = 1$$

Bezrozměrný kritický moment:

$$\mu_{cr} = \frac{C_1}{k_z} \left[\sqrt{1 + k_{wt}^2 + (C_2 \zeta_g - C_3 \zeta_j)^2} - (C_2 \zeta_g - C_3 \zeta_j) \right]$$

$$\mu_{cr} = \frac{1,605}{1} \cdot \left[\sqrt{1 + 0,158^2 + (-1 \cdot 2,401)^2} - 1 \cdot 2,401 \right] = 8,037$$

Kritický moment:

$$M_{cr} = \mu_{cr} \frac{\pi \sqrt{E I_z G I_t}}{L}$$

$$M_{cr} = 8,037 \cdot \frac{\pi \sqrt{210 \cdot 2,47 \cdot 10^7 \cdot 81 \cdot 7,78 \cdot 10^5}}{1950} \cdot 10^{-3} = 7\,403,075 \text{ kNm}$$

Součinitel klopení:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{M_{y,Rk}}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{133,939}{7\,403,075}} = 0,135 < 0,2$$

$$\chi_{LT} = 1$$

Součinitele ekvivalentního konstantního momentu dle tab. B.3 ČSN EN 1993-1-1 [19]:

$$\psi_y = \frac{3,586}{20,878} = 0,172$$

$$C_{my} = 0,6 + 0,4 \psi_y = 0,6 + 0,4 \cdot 0,172 = 0,669$$

$$C_{mz} = 0,9 \text{ (Dochází k vybočení s posunem styčniců)}$$

$$C_{mLT} = C_{my} = 0,669$$

Interakční součinitelé dle tab. B.1 ČSN EN 1993-1-1 [19]:

$$k_{yy} = \min \left\{ \begin{array}{l} C_{my} \left(1 + 0,6 \lambda_y \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{Y_{M1}}} \right) \\ C_{my} \left(1 + 0,6 \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{Y_{M1}}} \right) \end{array} \right\} = 0,669 \cdot \left(1 + 0,6 \cdot 0,189 \frac{616,726}{1,0 \cdot \frac{3\,299,695}{1,27}} \right) = 0,687$$

$$k_{yz} = k_{zz} = \min \left\{ \begin{array}{l} C_{mz} \left(1 + 0,6 \lambda_z \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{Y_{M1}}} \right) \\ C_{mz} \left(1 + 0,6 \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{Y_{M1}}} \right) \end{array} \right\} = 0,844 \cdot \left(1 + 0,6 \cdot \frac{616,726}{0,301 \cdot \frac{3\,299,695}{1,27}} \right) = 0,980$$

$$k_{zy} = \max \left\{ \begin{array}{l} 1 - \frac{0,05 \lambda_z}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{Y_{M1}}} \\ 1 - \frac{0,05}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{Y_{M1}}} \end{array} \right\} = 1 - \frac{0,05}{(0,669 - 0,25)} \frac{616,726}{0,301 \cdot \frac{3\,299,695}{1,27}} = 0,906$$

Posouzení interakce ohybu a tlaku dle kap. 6.3.3 ČSN EN 1993-1-1 [19]:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \frac{N_{Rk}}{Y_{M1}}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{Y_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{Y_{M1}}} \leq 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \frac{N_{Rk}}{Y_{M1}}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{Y_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{Y_{M1}}} \leq 1$$

$$\frac{616,726}{1,0 \cdot 3 \cdot 299,695} + 0,687 \cdot \frac{20,878}{1,0 \cdot 133,939} + 0,980 \cdot \frac{3,505}{56,873} = 0,45 \leq 1$$

$$\frac{616,726}{0,301 \cdot 3 \cdot 299,695} + 0,906 \cdot \frac{20,878}{1,0 \cdot 133,939} + 0,980 \cdot \frac{3,505}{56,873} = 1,044 > 1$$

Využití průřezů prvků namáhaných současně vzpěrem a zatížením od počáteční imperfekce není přímo úměrné zatížení od dopravy, proto byla zatížitelnost pro horní pás vypočtena iteračně. Výpočty byly provedeny analogicky s výše uvedeným postupem, a tak byly pouze shrnuty v následujících tabulkách.

1. ITERACE

$$q_k = 0,9 \text{ kN/m}^2$$

N_{Ed}	605,983	kN	λ_y	0,189	C_{my}	0,667
$V_{y,Ed}$	0,68	kN	χ_y	1	C_{mz}	0,9
$V_{z,Ed}$	7,263	kN	λ_z	1,542	C_{mLT}	0,667
$M_{y,Ed}$	20,444	kNm	χ_z	0,301	k_{yy}	0,685
$M_{z,Ed}$	3,443	kNm	λ_{LT}	0,134	k_{zy}	0,907
			χ_{LT}	1	$k_{yz} =$ k_{zz}	0,979

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}} \leq 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}} \leq 1$$

$$\frac{605,983}{1,0 \cdot 3 \cdot 299,695} + 0,685 \cdot \frac{20,444}{1,0 \cdot 133,939} + 0,979 \cdot \frac{3,443}{56,873} = 0,441 \leq 1$$

$$\frac{605,983}{0,301 \cdot 3 \cdot 299,695} + 0,907 \cdot \frac{20,444}{1,0 \cdot 133,939} + 0,979 \cdot \frac{3,443}{56,873} = 1,025 > 1$$

2. ITERACE

$$q_k = 0,76 \text{ kN/m}^2$$

N_{Ed}	590,6	kN	λ_y	0,189	C_{my}	0,666
$V_{y,Ed}$	0,662	kN	χ_y	1	C_{mz}	0,9
$V_{z,Ed}$	7,043	kN	λ_z	1,542	C_{mLT}	0,666
$M_{y,Ed}$	19,817	kNm	χ_z	0,301	k_{yy}	0,683
$M_{z,Ed}$	3,351	kNm	λ_{LT}	0,134	k_{zy}	0,909
			χ_{LT}	1	$k_{yz} = k_{zz}$	0,977

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}} \leq 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}} \leq 1$$

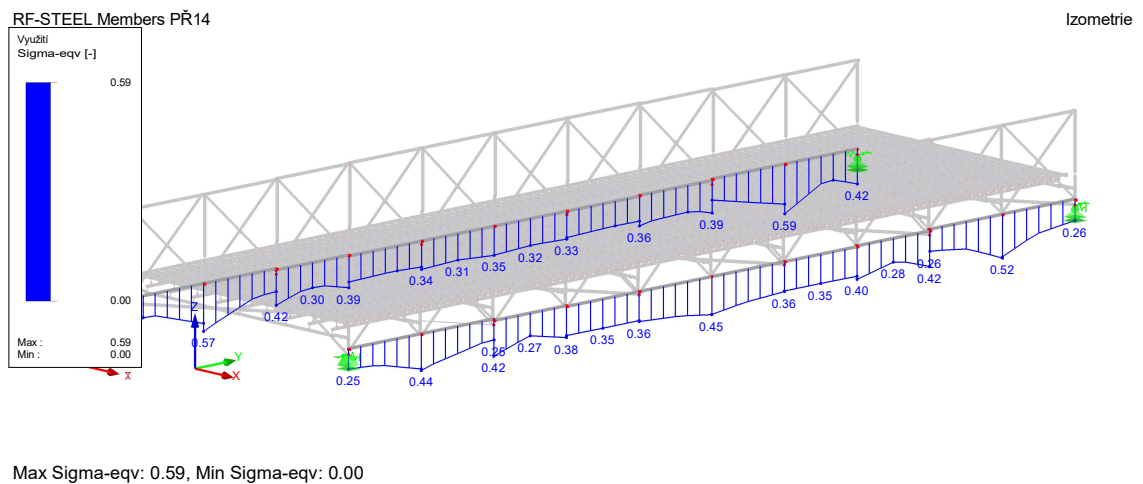
$$\frac{590,6}{1,0 \cdot 3 \cdot 299,695} + 0,683 \cdot \frac{19,817}{1,0 \cdot 133,939} + 0,977 \cdot \frac{3,351}{56,873} = 0,429 \leq 1$$

$$\frac{590,6}{0,301 \cdot 3 \cdot 299,695} + 0,909 \cdot \frac{19,817}{1,0 \cdot 133,939} + 0,977 \cdot \frac{3,351}{56,873} = 0,998 \leq 1$$

$$Z = 0,76 \text{ kN/m}^2$$

Pro zatížení od dopravy 0,76 kN/m² rovněž platí malý smyk.

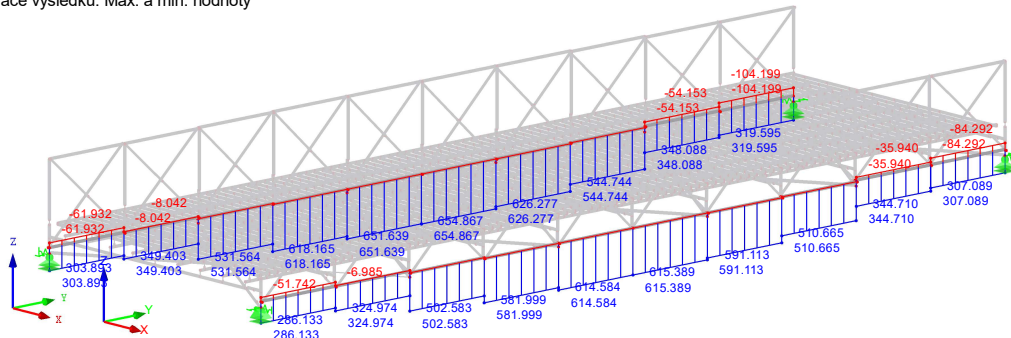
5.1.3 Dolní pásy



Obr. 65: Průběh využití napětí na dolním pásu

KV7 : MSÚ (STR/GEO) - trvalá/dočasná - rovn. 6.10a a 6.10b
 Vnitřní síly N
 Kombinace výsledků: Max. a min. hodnoty

Izometrie

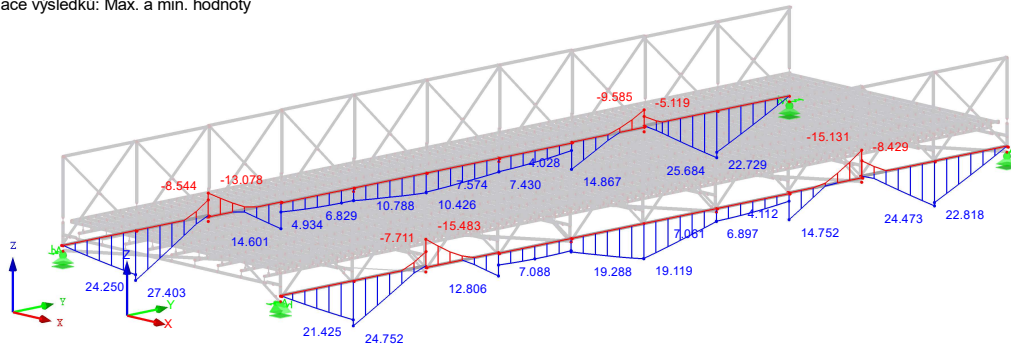


Max N: 654.867, Min N: -104.199 [kN]

Obr. 66: Obálka normálových sil dolního pásu

KV7 : MSÚ (STR/GEO) - trvalá/dočasná - rovn. 6.10a a 6.10b
 Vnitřní síly M-y
 Kombinace výsledků: Max. a min. hodnoty

Izometrie

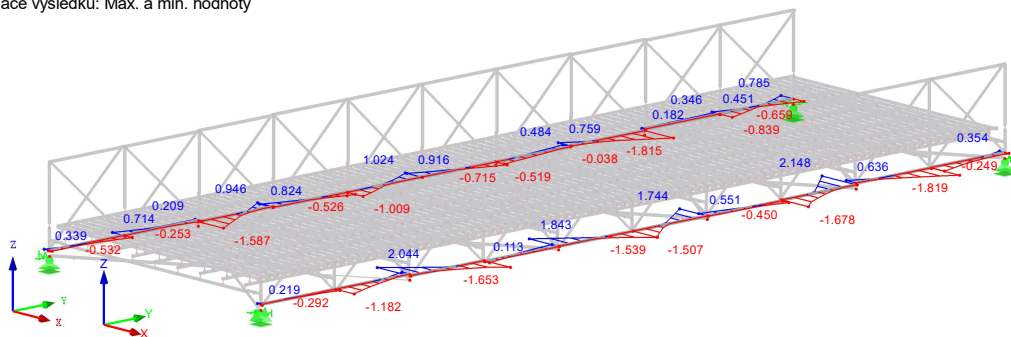


Max M-y: 27.403, Min M-y: -15.483 [kNm]

Obr. 67: Obálka ohybového momenty M_y dolního pásu

KV7 : MSÚ (STR/GEO) - trvalá/dočasná - rovn. 6.10a a 6.10b
 Vnitřní síly M-z
 Kombinace výsledků: Max. a min. hodnoty

Izometrie

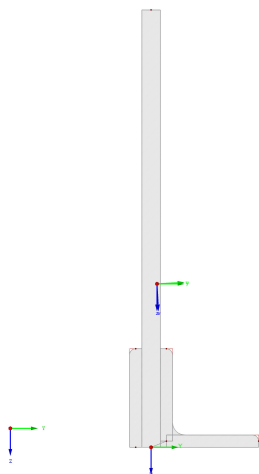


Max M-z: 2.148, Min M-z: -1.819 [kNm]

Obr. 69: Obálka ohybového momentu M_z dolního pásu

Na základě analýzy pomocí modulu RF-STEEL Members a posudku nejvíce namáhaných míst se jako nejvíce namáhané místo dolních pásů jeví na prutu v příhradě č. 9 pravého nosníku. Tento prut je namáhán tlakem a velkým ohybem. Jelikož se v pásnici tohoto průřezu nevyskytují nýty, není třeba průřez o otvory oslabovat.

DOLNÍ PÁS – pravý nosník, příhrada č. 9



A	7 630,4	mm ²
A _y	561,9	mm
A _z	4138,5	mm ²
W _{el,y}	417 480,2	mm ³
W _{el,z}	28 628,3	mm ³
I _y	9,28 · 10 ⁷	mm ⁴
I _z	2,37 · 10 ⁶	mm ⁴
S _y	370 845,6	mm ³
S _z	25 488,8	mm ³

Ob. 69: Model oslabeného průřezu posuzovaného dolního pásu

Rozhodující kombinace zatížení

ZATÍŽENÍ	ξ	ψ	δ	γ
Vlastní tíha + ostatní stálé zatížení	0,85	–	–	1,35
Svislé zatížení od dopravy	–	–	1,1	1,35
Vodorovné zatížení od dopravy	–	–	–	1,35
Vítr zprava – zatížený most	–	0,3	–	1,5
Ochlazení	–	0,6	–	1,5
Počáteční imperfekce	–	–	–	–

CELKEM			DOPRAVA			STÁLÉ + PROM. ZATÍŽENÍ		
N _{Ed}	334,181	kN	N _{Ed}	21,955	kN	N _{Ed}	312,226	kN
V _{y,Ed}	1,45	kN	V _{y,Ed}	0,102	kN	V _{y,Ed}	1,348	kN
V _{z,Ed}	11,889	kN	V _{z,Ed}	2,382	kN	V _{z,Ed}	9,507	kN
M _{y,Ed}	22,865	kNm	M _{y,Ed}	4,014	kNm	M _{y,Ed}	18,851	kNm
M _{z,Ed}	1,819	kNm	M _{z,Ed}	0,174	kNm	M _{z,Ed}	1,645	kNm

Klasifikace průřezu dle tab. 5.2 ČSN EN 1993-1-1 [19] dle tab. 4.2 ČSN EN 1993-1-5

Stojina – tlačení konec

Poměr koncových napětí:

$$\psi = \frac{56,77}{-47,66} = -1,19$$

$$k_{\sigma} = 0,57 - 0,21 \psi + 0,07 \psi^2 = 0,57 - 0,21 \cdot (-1,19) + 0,07 \cdot (-1,19)^2 = 0,919$$

$$\frac{c}{t} = \frac{275}{15} = 18,33 \leq 21 \varepsilon \sqrt{k_{\sigma}} = 21 \sqrt{\frac{235}{230}} \cdot \sqrt{0,919} = 20,35$$

Průřez vyhovuje pro 3. třídu

Únosnost v tahu dle kap. 6.2.3 ČSN EN 1993-1-1 [19]

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1,0$$

$$N_{pl,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{7\,630,4 \cdot 230 \cdot 10^{-3}}{1,15} = 1\,526,08 \text{ kN}$$

$$N_{t,Rd} = 1\,526,08 \text{ kN}$$

Posouzení smyku dle kap. 6.2.6 ČSN EN 1993-1-1 [19]

$$\tau_{z,Ed} = \frac{V_{z,Ed} \cdot S_y}{I_y \cdot t} = \frac{11,889 \cdot 10^3 \cdot 370\,845,6}{9,28 \cdot 10^7 \cdot 15} = 3,167 \text{ MPa}$$

$$\frac{\tau_{z,Ed}}{\frac{\sqrt{3} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}} = \frac{3,167}{\frac{\sqrt{3} \cdot 230}{1,2}} = 0,029 < 0,5 \quad \text{Malý smyk.}$$

Únosnost v ohybu dle kap. 6.2.6 ČSN EN 1993-1-1 [19]

$$M_{y,Rd} = \frac{W_{el,y} f_y}{\gamma_0} = \frac{417\,480,2 \cdot 230 \cdot 10^{-6}}{1,2} = 80,017 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Rd} = \frac{W_{el,z} f_y}{\gamma_0} = \frac{28\,628,3 \cdot 230 \cdot 10^{-6}}{1,2} = 5,487 \text{ kNm}$$

Stanovení zatížitelnosti

$$Z = \frac{R_d - E_{s,Ed}}{E_{ch,Ed}} = \frac{1 - E_{s,Ed}}{E_{ch,Ed}}$$

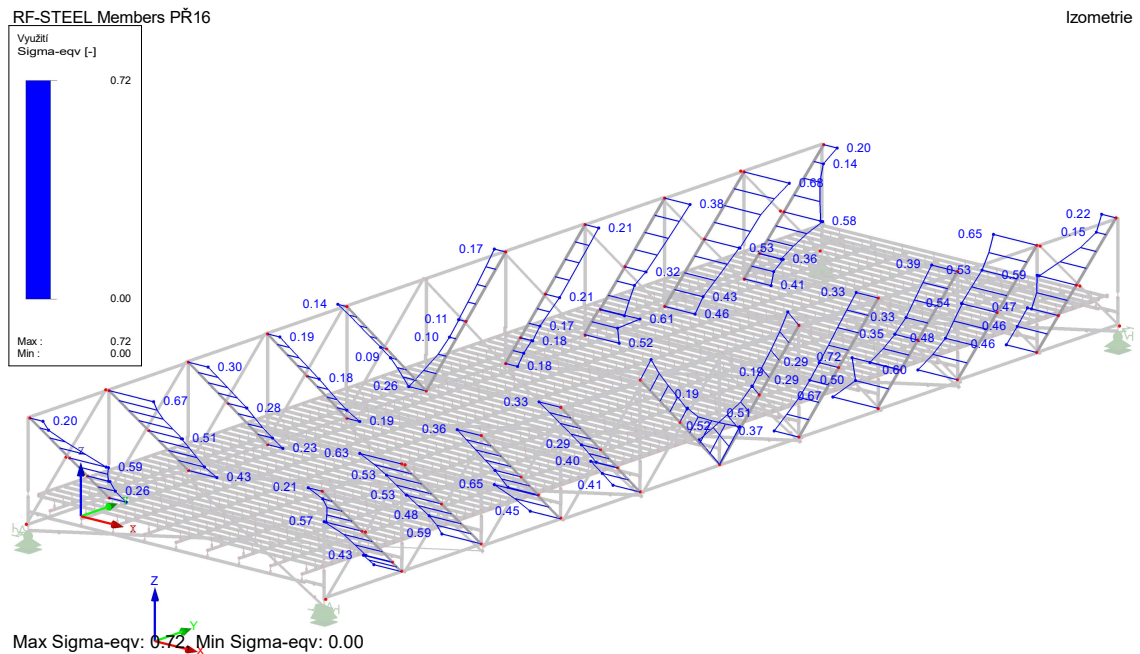
$$E_{s,Ed} = \frac{N_{s,Ed}}{N_{t,Rd}} + \frac{M_{y,s,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,s,Ed}}{M_{z,Rd}} = \frac{312,226}{1\,526,08} + \frac{18,851}{80,017} + \frac{1,645}{5,487} = 0,74$$

$$E_{ch,Ed} = \frac{N_{ch,Ed}}{N_{t,Rd}} + \frac{M_{y,ch,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,ch,Ed}}{M_{z,Rd}} = \frac{21,955}{1\,526,08} + \frac{4,014}{134,15} + \frac{0,174}{5,487} = 0,096$$

$$Z = \frac{1 - E_{s,Ed}}{E_{ch,Ed}} = \frac{1 - 0,74}{0,096} = 2,701 \text{ kN/m}^2$$

Pro zatížení od dopravy 2,701 kN/m² platí rovněž malý smyk.

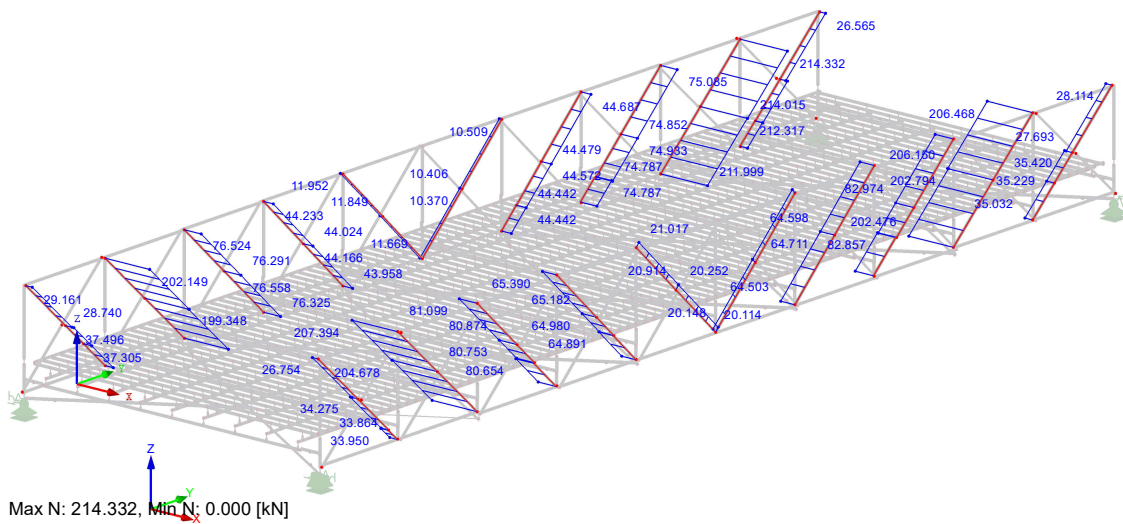
5.1.4 Tažené diagonály



Obr. 70: Průběh využití napětí na tažených diagonálách

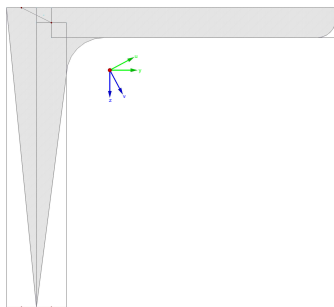
KV7 : MSÚ (STR/GEO) - trvalá/dočasná - rovn. 6.10a a 6.10b
 Vnitřní síly N
 Kombinace výsledků: Max. a min. hodnoty

Izometrie



Obr. 71: Obálka normálových sil tažených diagonál

Tažená diagonála – levý nosník – příhrada č. 8



A	1 302,7	mm ²
A _f	704	mm ²
A _y	518,1	mm ²
A _z	491,3	mm ²
W _{el,y}	6 654,7	mm ³
W _{el,z}	13 932	mm ³

Obr. 72: Model oslabeného průřezu posuzované diagonály

Rozhodující kombinace:

ZATÍŽENÍ	ξ	ψ	δ	γ
Vlastní tíha + ostatní stálé zatížení	0,85	–	–	1,35
Svislé zatížení od dopravy	–	–	1,1	1,35
Vodorovné zatížení od dopravy	–	–	–	1,35
Vítr zleva - zatížený most	–	0,3	–	1,5
Ochlazení	–	0,6	–	1,5
Počáteční imperfekce	–	–	–	–

CELKEM			DOPRAVA			STÁLÉ + PROM. ZATÍŽENÍ		
N _{Ed}	71,114	kN	N _{Ed}	14,833	kN	N _{Ed}	56,281	kN
V _{y,Ed}	1,838	kN	V _{y,Ed}	0,41	kN	V _{y,Ed}	1,428	kN
V _{z,Ed}	0,835	kN	V _{z,Ed}	0,092	kN	V _{z,Ed}	0,743	kN
M _{y,Ed}	0,675	kNm	M _{y,Ed}	0,158	kNm	M _{y,Ed}	0,517	kNm
M _{z,Ed}	0,272	kNm	M _{z,Ed}	0,033	kNm	M _{z,Ed}	0,239	kNm

Klasifikace průřezu dle tab. 5.2 ČSN EN 1993-1-1 [19]

Přečnickájkící konec – tlačený

$$\frac{c}{t} = \frac{40}{16} = 2,5 \leq 14 \varepsilon = 14 \sqrt{\frac{235}{230}} = 14,15$$

Průřez vyhovuje pro 3. třídu

Posouzení možnosti zanedbání otvorů pro spojovací prvky dle kap. 6.2.5 ČSN EN 1993-1-1 [19]

$$\frac{0,9 A_{f,net} f_u}{\gamma_{M2}} \geq \frac{A_f f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$A_{f,net} = A_f - 18 \cdot 8 = 704 - 18 \cdot 8 = 560 \text{ mm}^2$$

$$\frac{0,9 A_{f,net} f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 560 \cdot 319,58 \cdot 10^{-3}}{1,3} = 123,9 \text{ kN}$$

$$\frac{A_f f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{704 \cdot 259,81 \cdot 10^{-3}}{1,15} = 159,049 \text{ kN}$$

Podmínka neplatí. Posuzovaný průřez byl oslaben o otvory pro nýty v pásnici. Nové hodnoty plochy a průřezových modulů jsou:

$$A_{net} = 1\,158,7 \text{ mm}^2$$

$$W_{net,y} = 6\,390,7 \text{ mm}^3$$

$$W_{net,z} = 11\,972,5 \text{ mm}^3$$

Únosnost v tahu dle kap. 6.2.3 ČSN EN 1993-1-1 [19]

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1,0$$

$$N_{t,Rd} = \frac{A_{net} f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1\,158,7 \cdot 259,81 \cdot 10^{-3}}{1,15} = 261,776 \text{ kN}$$

Posouzení smyku dle kap. 6.2.6 ČSN EN 1993-1-1 [19]

$$\tau_{z,Ed} = \frac{V_{z,Ed} \cdot S_{y,net}}{I_{y,net} \cdot t} = \frac{1,838 \cdot 10^3 \cdot 6\,553,4}{394\,616,8 \cdot 16} = 1,908 \text{ MPa}$$

$$\frac{\tau_{z,Ed}}{\sqrt{3} \cdot f_y} = \frac{1,908}{\sqrt{3} \cdot 230} = 0,006 < 0,5 \quad \text{Malý smyk.}$$

$$\frac{V_{M0}}{1,2}$$

Únosnost v ohybu dle kap. 6.2.6 ČSN EN 1993-1-1 [19]

$$M_{y,Rd} = \frac{W_{net,y} \cdot f_y}{\gamma_0} = \frac{6\,390,7 \cdot 259,81 \cdot 10^{-6}}{1,2} = 1,384 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Rd} = \frac{W_{net,z} \cdot f_y}{\gamma_0} = \frac{11\,972,5 \cdot 259,81 \cdot 10^{-6}}{1,2} = 2,592 \text{ kNm}$$

Stanovení zatížitelnosti

$$Z = \frac{R_d - E_{s,Ed}}{E_{ch,Ed}} = \frac{1 - E_{s,Ed}}{E_{ch,Ed}}$$

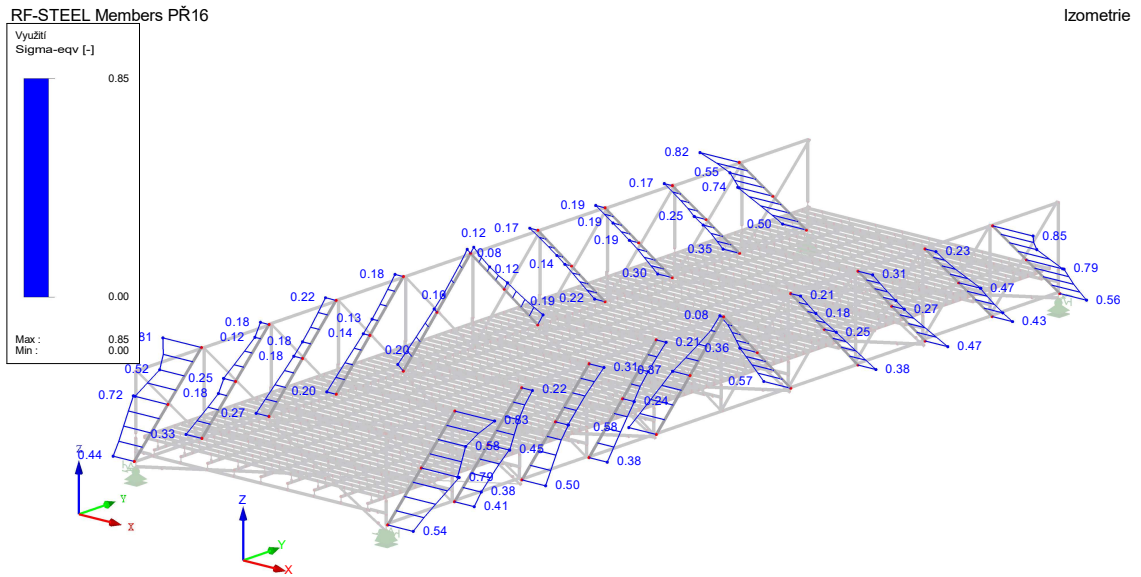
$$E_{s,Ed} = \frac{N_{s,Ed}}{N_{t,Rd}} + \frac{M_{y,s,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,s,Ed}}{M_{z,Rd}} = \frac{56,281}{261,776} + \frac{0,517}{1,384} + \frac{0,239}{2,592} = 0,681$$

$$E_{ch,Ed} = \frac{N_{ch,Ed}}{N_{t,Rd}} + \frac{M_{y,ch,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,ch,Ed}}{M_{z,Rd}} = \frac{14,833}{261,776} + \frac{0,158}{1,384} + \frac{0,033}{2,592} = 0,184$$

$$Z = \frac{1 - E_{s,Ed}}{E_{ch,Ed}} = \frac{1 - 0,681}{0,184} = 1,738 \text{ kN/m}^2$$

Při zatížení od dopravy 1,738 kN/m² rovněž platí malý smyk.

5.1.5 Tlačené diagonály

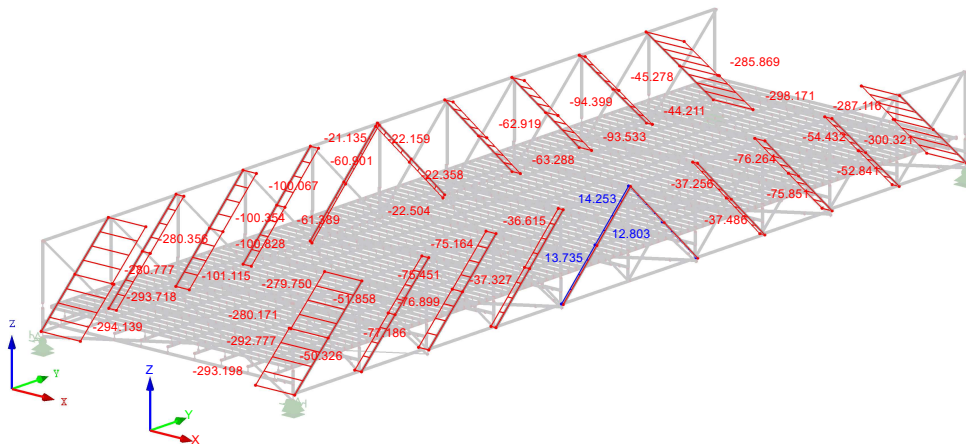


Max Sigma-eqv: 0.85, Min Sigma-eqv: 0.00

Obr. 73: Průběh využití napětí na tlačných diagonálách

KV7 : MSÚ (STR/GEO) - trvalá/dočasná - rovn. 6.10a a 6.10b
 Vnitřní síly N
 Kombinace výsledků: Max. a min. hodnoty

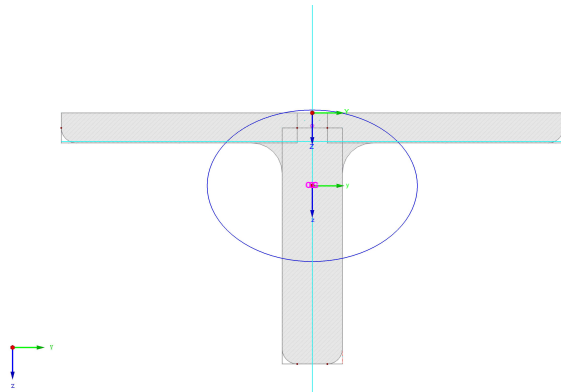
Izometrie



Max N: 14.253, Min N: -300.321 [kN]

Obr. 74: Obálka normálových sil tlačných diagonál

PRAVÝ NOSNÍK – příhrada č. 1



Obr. 75: Model průřezu posuzované diagonály

A	4 542,9	mm ²
A _y	1 972,3	mm
A _z	1 407,7	mm ²
W _{el,y}	58 247,9	mm ³
W _{el,z}	-79 627	mm ³
I _y	4,13 · 10 ⁶	mm ⁴
I _z	7,96 · 10 ⁶	mm ⁴
I _w	2,34 · 10 ⁸	mm ⁶
I _t	207 867,1	mm ⁴
N _{Ed}	285,605	kN
V _{y,Ed}	3,769	kN
V _{z,Ed}	0,241	kN
M _{y,Ed}	5,972	kNm
M _{z,Ed}	5,288	kNm

Rozhodující kombinace zatížení

ZATÍŽENÍ	ξ	ψ	δ	γ
Vlastní tíha + ostatní stálé zatížení	0,85	–	–	1,35
Svislé zatížení od dopravy	–	–	1,1	1,35
Vodorovné zatížení od dopravy	–	–	–	1,35
Vítr ve směru z – shora, zprava	–	0,3	–	1,5
Ochlazení	–	0,6	–	1,5
Počáteční imperfekce	–	–	–	–

Klasifikace průřezu dle tab. 5.2 ČSN EN 1993-1-1 [19] dle tab. 4.2 ČSN EN 1993-1-5 [20]

Přečnávající konec – tlačný

$$\frac{c}{t} = \frac{60}{12} = 5 \leq 14 \quad \varepsilon = 14 \sqrt{\frac{235}{230}} = 14,15$$

Přečnávající konec – tlak a ohyb

Poměr koncových napětí:

$$\psi = \frac{-88,17}{47,62} = -1,85$$

$$k_{\sigma} = 1,7 - 5 \psi + 17,1 \psi^2 = 1,7 - 5 \cdot (-1,85) + 0,07 \cdot (-1,85)^2 = 11,18$$

$$\frac{c}{t} = \frac{60}{24} = 2,5 \leq 21 \varepsilon \sqrt{k_{\sigma}} = 21 \sqrt{\frac{235}{230}} \cdot \sqrt{11,18} = 72,9$$

Průřez vyhovuje pro 3. třídu

Posouzení smyku dle kap. 6.2.6 ČSN EN 1993-1-1 [19]

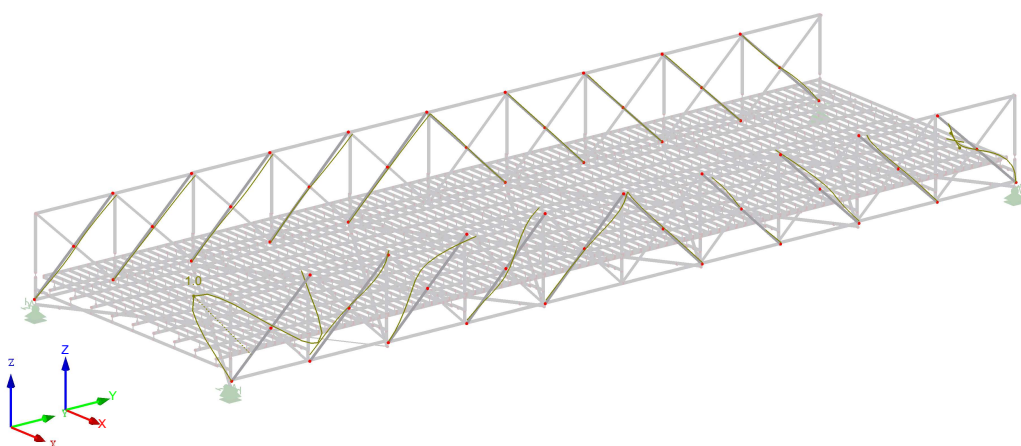
$$\tau_{y,Ed} = \frac{V_y \cdot S_z}{I_z \cdot t} = \frac{3,769 \cdot 10^3 \cdot 65\,944,2}{7,96 \cdot 10^6 \cdot 12} = 2,602 \text{ MPa}$$

$$\frac{\tau_{z,Ed}}{\sqrt{3} \cdot f_y} = \frac{2,602}{\sqrt{3} \cdot 230} = 0,008 < 0,5 \quad \text{Malý smyk.}$$

$$\frac{1}{\gamma_{M0}} = \frac{1}{1,2}$$

RF-STABILITY PŘ2
 Vlastní tvar č. 35 - 48.49540
 Vlastní tvar - u [-]

Izometrie



Součinitel pro deformace: 2.00
 Max u: 1.0, Min u: 0.0 -

Obr. 76: Rozhodující vlastní tvar pro stabilitní posouzení tlačných diagonál

$$\alpha_{cr,z} = 48,5$$

$$N_{Rk} = A f_y = 4\,542,9 \cdot 259,81 = 1\,180,29 \text{ kN}$$

$\alpha = 0,34$ – vzpěrnostní křivka b

$$\Phi = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right] = 0,5 \cdot \left[1 + 0,34 \cdot (0,49 - 0,2) + 0,49^2 \right] = 0,669$$

$$\chi_y = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{0,669 + \sqrt{0,669^2 - 0,49^2}} = 0,889$$

$$L_{vz} = \sqrt{\frac{\pi^2 E I_z}{\alpha_{cr} \cdot N_{Ed}}} = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot 210 \cdot 10^6 \cdot 7,96 \cdot 10^{-6}}{48,5 \cdot 285,605}} = 1\,092 \text{ mm}$$

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_{vz}}{i_z \cdot \lambda_1} = \frac{1\,092}{41,9 \cdot 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{259,81}}} = 0,292$$

$\alpha = 0,34$ – vzpěrnostní křivka b

$$\Phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] = 0,5 \cdot [1 + 0,34 \cdot (0,292 - 0,2) + 0,292^2] = 0,558$$

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{0,558 + \sqrt{0,558^2 - 0,292^2}} = 0,967$$

$$\alpha_{cr,y} = 40,26$$

$$L_{vz,y} = \sqrt{\frac{\pi^2 E I_y}{\alpha_{cr,y} \cdot N_{Ed}}} = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot 210 \cdot 10^6 \cdot 4,13 \cdot 10^{-6}}{40,26 \cdot 285,605}} = 863 \text{ mm}$$

$$\bar{\lambda}_y = \frac{L_{vz,y}}{i_y \cdot \lambda_1} = \frac{863}{30,2 \cdot 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{259,81}}} = 0,32$$

$\alpha = 0,34$ – vzpěrnostní křivka b

$$\Phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] = 0,5 \cdot [1 + 0,34 \cdot (0,32 - 0,2) + 0,32^2] = 0,572$$

$$\chi_y = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{0,572 + \sqrt{0,572^2 - 0,32^2}} = 0,957$$

Charakteristická ohybová únosnost:

$$M_{y,Rk} = W_{el,y} \cdot f_y = 58\,247,9 \cdot 259,8 = 15,133 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Rk} = W_{el,z} \cdot f_y = 79\,627 \cdot 259,8 = 20,688 \text{ kNm}$$

Moment setrvačnosti v ose z je větší než v ose y, průřez byl tedy posouzen na klopení při ohybu kolem osy z.

Délka posunu kolmo z roviny:

$$L = 1\,322 \text{ mm}$$

Součinitelé vzpěrné délky:

$$k_w = 1$$

$$k_z = 1$$

Bezrozměrný parametr kroucení:

$$K_{wt} = \frac{\pi}{k_w L} \sqrt{\frac{E I_w}{G I_t}} = \frac{\pi}{1 \cdot 1322} \sqrt{\frac{210 \cdot 2,34 \cdot 10^8}{81 \cdot 207867,1}} = 0,128$$

$$z_a = 29 \text{ mm}$$

$$z_s = 23,9 \text{ mm}$$

$$z_g = z_a - z_s = 29 - 23,9 = 5,1 \text{ mm}$$

Vzdálenost mezi středem pásnice a volným koncem průřezu:

$$h_f = 94 \text{ mm}$$

$$\psi_f = 1 \text{ (tlačená pásnice)}$$

$$z_j = 0,45 \psi_f h_f = 0,45 \cdot 1 \cdot 94 = 42,3 \text{ mm}$$

Bezrozměrný parametr nesymetrie průřezu:

$$\zeta_j = \frac{\pi z_j}{k_z L} \sqrt{\frac{E I_z}{G I_t}} = \frac{\pi \cdot 42,3}{1 \cdot 1322} \sqrt{\frac{210 \cdot 7,96 \cdot 10^6}{81 \cdot 207867}} = 1,002$$

Poměr koncových momentů:

$$\psi = \frac{0}{5,288} = 0$$

Součinitelé závislé na zatížení a uložení konců dle tab.NB.3.1 ČSN EN 1993-1-1 [19]:

$$C_{1,0} = 1,77$$

$$C_{1,1} = 1,85$$

$$C_1 = C_{1,0} + (C_{1,1} - C_{1,0}) K_{wt} = 1,77 + (1,85 - 1,77) \cdot 0,128 = 1,780$$

$$C_2 = 0 \rightarrow C_2 \zeta_g = 0$$

$$C_3 = 1$$

Bezrozměrný kritický moment:

$$\mu_{cr} = \frac{C_1}{k_z} \left[\sqrt{1 + K_{wt}^2 + (C_2 \zeta_g - C_3 \zeta_j)^2} - (C_2 \zeta_g - C_3 \zeta_j) \right]$$

$$\mu_{cr} = \frac{1,77}{1} \cdot \left[\sqrt{1 + 0,128^2 + (-1 \cdot 1,002)^2} + 1 \cdot 1,002 \right] = 4,314$$

Kritický moment:

$$M_{cr} = \mu_{cr} \frac{\pi \sqrt{E I_z G I_t}}{L}$$

$$M_{cr} = 4,314 \cdot \frac{\pi \sqrt{210 \cdot 10^3 \cdot 7,96 \cdot 10^6 \cdot 81 \cdot 10^3 \cdot 207867,1}}{1322} = 1720,038 \text{ kNm}$$

Součinitel klopení:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{M_{z,Rk}}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{20,688}{1\,720,038}} = 0,11$$

$$\alpha = 0,76$$

$$\Phi_{LT} = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha (\lambda_{LT} - 0,2) + \lambda_{LT}^2 \right] = 0,5 \cdot \left[1 + 0,76 (0,11 - 0,2) + 0,11^2 \right] = 0,472$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \lambda_{LT}^2}} = \frac{1}{0,472 \cdot \sqrt{0,472^2 - 0,11^2}} = 1,466 > 1 \rightarrow \chi_{LT} = 1$$

Součinitele ekvivalentního konstantního momentu dle tab. B.3 ČSN EN 1993-1-1 [19]:

$$\psi_y = \frac{5,972}{6,29} = 0,949$$

$$\psi_z = \frac{0}{5,288} = 0$$

$$C_{my} = 0,6 + 0,4 \psi_y = 0,6 + 0,4 \cdot 0,949 = 0,98 \geq 0,4$$

$$C_{mz} = 0,6 + 0,4 \psi_z = 0,6 + 0,4 \cdot 0 = 0,6 \geq 0,4$$

$$C_{mLT} = C_{my} = 0,98$$

Interakční součinitelé dle tab. B.1 ČSN EN 1993-1-1 [19]:

$$k_{yy} = \min \left\{ \begin{array}{l} C_{my} \left(1 + 0,6 \lambda_y \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{Y_{M1}}} \right) \\ C_{my} \left(1 + 0,6 \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{Y_{M1}}} \right) \end{array} \right\} = 0,98 \cdot \left(1 + 0,6 \cdot 0,32 \cdot \frac{285,605}{0,957 \cdot \frac{1\,180,25}{1,27}} \right) = 1,04$$

$$k_{yz} = \min \left\{ \begin{array}{l} C_{mz} \left(1 + 0,6 \lambda_z \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{Y_{M1}}} \right) \\ C_{mz} \left(1 + 0,6 \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{Y_{M1}}} \right) \end{array} \right\} = 0,6 \cdot \left(1 + 0,6 \cdot 0,292 \cdot \frac{285,605}{0,967 \cdot \frac{1\,180,25}{1,27}} \right) = 0,633$$

$$k_{zy} = \max \left\{ \begin{array}{l} 1 - \frac{0,05 \lambda_z}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{Y_{M1}}} \\ 1 - \frac{0,05}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{Y_{M1}}} \end{array} \right\} = 1 - \frac{0,05 \cdot 0,292}{(0,98 - 0,25)} \frac{285,605}{0,967 \cdot \frac{1\,180,25}{1,27}} = 0,994$$

$$k_{yz} = k_{zz} = 0,633$$

Posouzení interakce ohybu a tlaku dle kap. 6.3.3 ČSN EN 1993-1-1 [19]:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rk}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{\chi_{LT} M_{z,Rk}} \leq 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{Y_{M1}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{Y_{M1}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{Y_{M1}} \leq 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rk}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed}}{\chi_{LT} M_{z,Rk}} \leq 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{Y_{M1}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{Y_{M1}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed}}{Y_{M1}} \leq 1$$

$$\frac{285,605}{0,957 \cdot 1\,180,25} + 1,04 \cdot \frac{5,972}{15,133} + 0,633 \cdot \frac{5,288}{1,0 \cdot 20,688} = 1,049 > 1$$

$$\frac{285,605}{1,27} + 1,04 \cdot \frac{5,972}{1,27} + 0,633 \cdot \frac{5,288}{1,27} = 1,049 > 1$$

$$\frac{285,605}{0,967 \cdot 1\,180,25} + 0,994 \cdot \frac{5,972}{15,133} + 0,633 \cdot \frac{5,288}{1,0 \cdot 20,688} = 1,022 > 1$$

$$\frac{285,605}{1,27} + 0,994 \cdot \frac{5,972}{1,27} + 0,633 \cdot \frac{5,288}{1,27} = 1,022 > 1$$

Využití průřezů u prvků namáhaných současně vzpěrem a klopením není přímo úměrné zatížení od dopravy, proto byla zatížitelnost pro tlačené diagonály vypočtena iteračně. Výpočty byly provedeny analogicky s výše uvedeným postupem, a tak byly pouze shrnuty v následujících tabulkách.

ITERACE

$$q_k = 0,74 \text{ kN/m}^2$$

N_{Ed}	272,513	kN	λ_y	0,32	C_{my}	0,98
$V_{y,Ed}$	-3,769	kN	χ_y	0,957	C_{mz}	0,6
$V_{z,Ed}$	-0,241	kN	λ_z	0,292	C_{mLT}	0,98
$M_{y,Ed}$	5,695	kNm	χ_z	0,967	k_{yy}	1,038
$M_{z,Ed}$	5,05	kNm	λ_{LT}	0,11	k_{zy}	0,994
			χ_{LT}	1	$k_{yz} =$	0,635
					k_{zz}	

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rk}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{\chi_{LT} M_{z,Rk}} \leq 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{Y_{M1}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{Y_{M1}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{Y_{M1}} \leq 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rk}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed}}{\chi_{LT} M_{z,Rk}} \leq 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{Y_{M1}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{Y_{M1}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed}}{Y_{M1}} \leq 1$$

$$\frac{272,513}{0,957 \cdot 1\,180,25} + 1,038 \cdot \frac{5,695}{15,133} + 0,635 \cdot \frac{5,05}{1,0 \cdot 20,688} = 0,999 \leq 1$$

$$\frac{272,513}{1,27} + 1,038 \cdot \frac{5,695}{1,27} + 0,635 \cdot \frac{5,05}{1,27} = 0,999 \leq 1$$

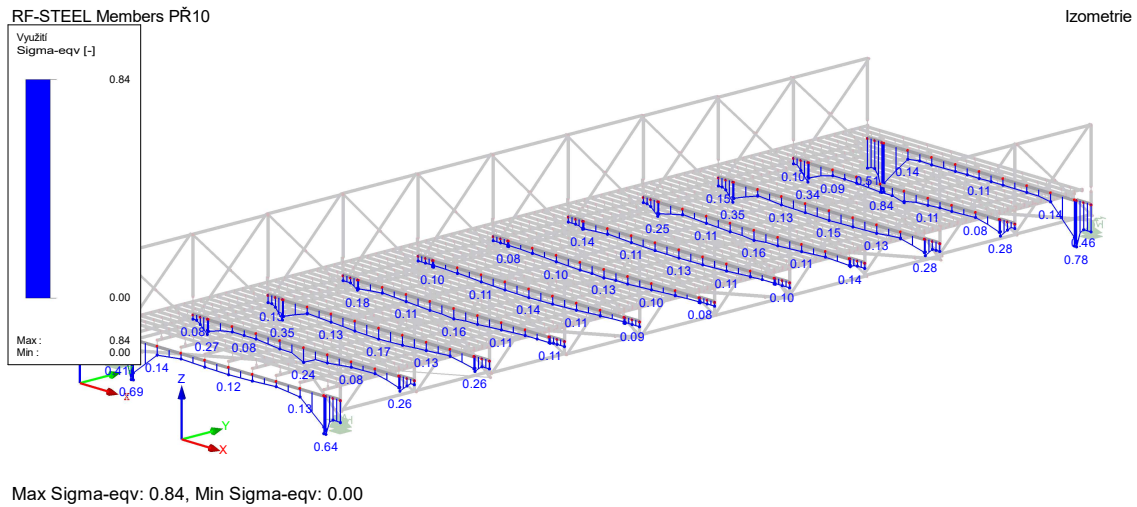
$$\frac{272,513}{0,967 \cdot 1\,180,25} + 0,994 \cdot \frac{5,695}{15,133} + 0,635 \cdot \frac{5,05}{1,0 \cdot 20,688} = 0,975 \leq 1$$

$$\frac{272,513}{1,27} + 0,994 \cdot \frac{5,695}{1,27} + 0,635 \cdot \frac{5,05}{1,27} = 0,975 \leq 1$$

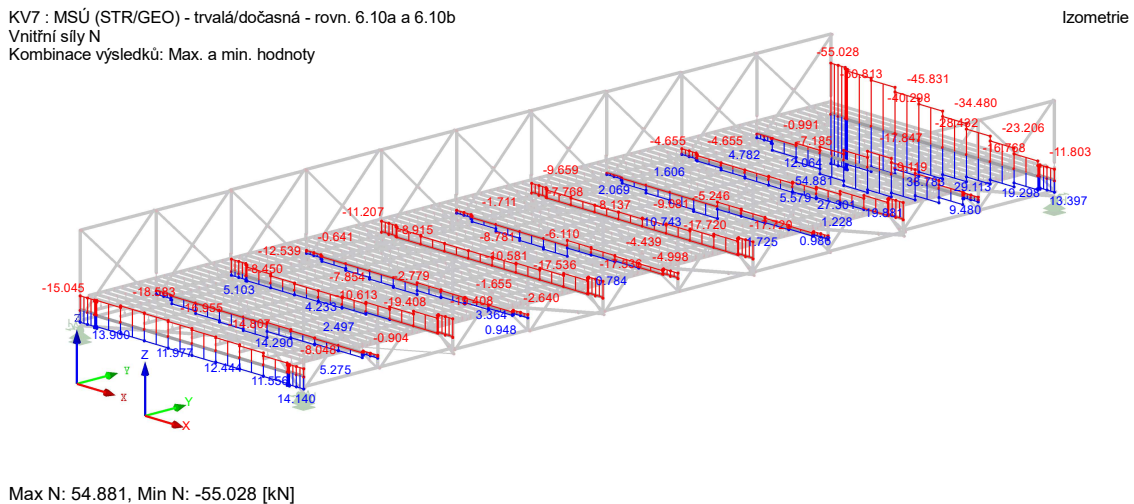
$$Z = 0,74 \text{ kN/m}^2$$

Pro zatížení od dopravy 0,74 kN/m² rovněž platí malý smyk.

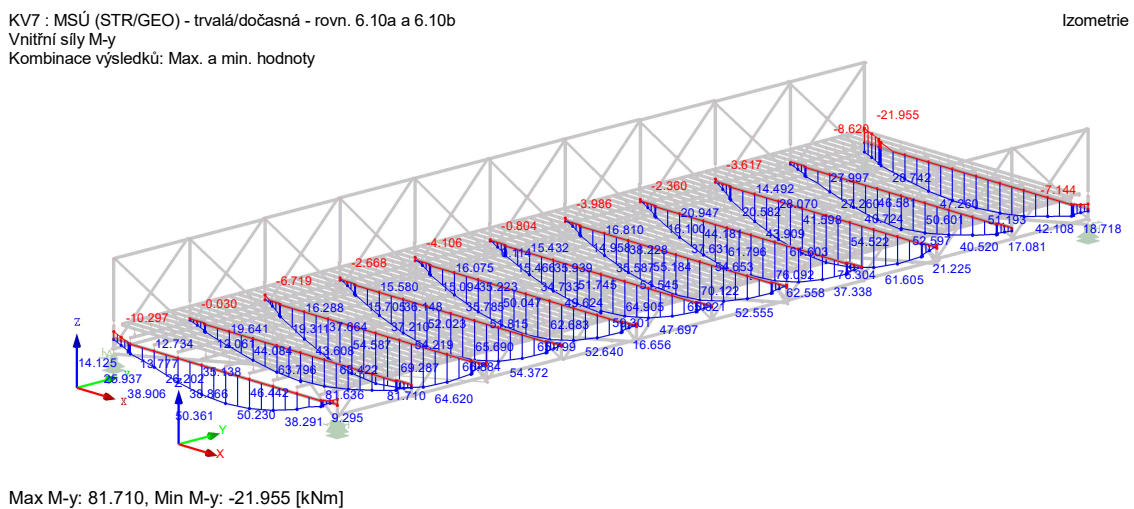
5.1.6 Příčnický



Obr. 77: Průběh využití napětí na příčnicích



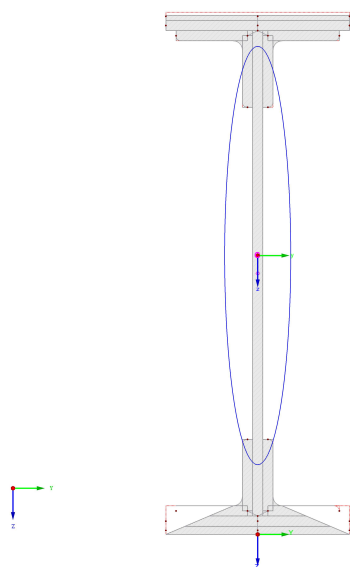
Obr. 78: Obálka normálových sil příčnicků



Obr. 79: Obálka ohybových momentů M_y příčnicků

Ze všech příčníků se jako nejvíce namáhány jeví příčník č. 10. Nosník je namáhán dvouosým ohybem a tlakem.

Příčník č. 10



A	14 670,3	mm ²
A _y	6 204,2	mm
A _z	4 517,5	mm ²
W _{el,y}	2,25 · 10 ⁶	mm ³
W _{el,z}	171 195	mm ³
I _y	6,15 · 10 ⁸	mm ⁴
I _z	1,54 · 10 ⁷	mm ⁴
I _w	1,11 · 10 ¹²	mm ⁶
I _t	996 569,3	mm ⁴
N _{Ed}	47,493	kN
V _{y,Ed}	94,393	kN
V _{z,Ed}	29,239	kN
M _{y,Ed}	-7,704	kNm
M _{z,Ed}	25,223	kNm

Obr. 80: Model oslabeného průřezu posuzovaného příčníku

Rozhodující kombinace zatížení

ZATÍŽENÍ	ξ	ψ	δ	γ
Vlastní tíha + ostatní stálé zatížení	0,85	–	–	1,35
Svislé zatížení od dopravy	–	–	1,1	1,35
Vodorovné zatížení od dopravy	–	–	–	1,35
Vítr ve směru z – shora, zleva	–	0,3	–	1,5
Oteplení	–	0,6	–	1,5
Počáteční imperfekce	–	–	–	–

Klasifikace průřezu

Stojina:

$$\frac{c}{t} = \frac{325}{10} = 32,5 \leq 124\epsilon = 124 \sqrt{\frac{235}{230}} = 125,34$$

Stojina vyhovuje pro 3. třídu.

Pásnice – přečnívající tlačenná část:

$$\frac{c}{t} = \frac{47,5}{15} = 3,17 \leq 14\epsilon = 14 \sqrt{\frac{235}{230}} = 14,15$$

Pásnice – vnitřní ohýbaná část

$$\frac{c}{t} = \frac{85}{15} = 5,67 \leq 124 \quad \varepsilon = 14 \sqrt{\frac{235}{230}} = 125,34$$

Pásnice vyhovuje pro 3. třídu

Posouzení smyku dle kap. 6.2.6 ČSN EN 1993-1-1 [19]

$$\tau_{z,Ed} = \frac{V_{z,Ed} \cdot S_y}{I_y \cdot t} = \frac{29,239 \cdot 10^3 \cdot 1\,414\,349,6}{6,15 \cdot 10^8 \cdot 10} = 6,724 \text{ MPa}$$

$$\frac{\tau_{z,Ed}}{\sqrt{3} \cdot f_y} = \frac{6,724}{\sqrt{3} \cdot 230} = 0,02 < 0,5 \quad \text{Malý smyk.}$$

$$\frac{V_{M0}}{1,2}$$

Posouzení zatížitelnosti

$$\alpha_{cr} = 2368,82$$

$$N_{Rk} = A f_y = 14\,670,3 \cdot 230 = 3\,374,17 \text{ kN}$$

$$L_{vz,y} = 660 \text{ m}$$

$$\bar{\lambda}_y = \frac{L_{vz,y}}{i_y \cdot \lambda_1} = \frac{660}{204,7 \cdot 93,9 \sqrt{\frac{235}{230}}} = 0,034 < 0,2 \rightarrow \chi_y = 1$$

$$L_{vz,z} = \sqrt{\frac{\pi^2 E I_z}{\alpha_{cr} \cdot N_{Ed}}} = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot 210 \cdot 10^6 \cdot 1,54 \cdot 10^{-5}}{2368,82 \cdot 47,493}} = 533 \text{ mm}$$

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_{vz,z}}{i_z \cdot \lambda_1} = \frac{533}{32,4 \cdot 93,9 \sqrt{\frac{235}{230}}} = 0,173 < 0,2 \rightarrow \chi_z = 1$$

Charakteristická ohybová únosnost:

$$M_{y,Rk} = W_{el,y} \cdot f_y = 2,25 \cdot 10^6 \cdot 230 = 518,213 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Rk} = W_{el,z} \cdot f_y = 171\,195 \cdot 230 = 39,375 \text{ kNm}$$

Moment setrvačnosti v ose y je větší než v ose z, průřez byl tedy posouzen na klopení při ohybu kolem osy y.

Délka mezi body zajištěnými proti posunu kolmo z roviny:

$$L = 660 \text{ mm}$$

Součinitelé vzpěrné délky:

$$k_w = 1$$

$$k_z = 0,7$$

Bezrozměrný parametr kroucení:

$$K_{wt} = \frac{\pi}{k_w L} \sqrt{\frac{E I_w}{G I_t}} = \frac{\pi}{1 \cdot 660} \sqrt{\frac{210 \cdot 1,11 \cdot 10^{12}}{81 \cdot 996 \, 569,3}} = 8,089$$

$$z_a = 272,9 \text{ mm}$$

$$z_s = 17,4 \text{ mm}$$

$$z_g = z_a - z_s = 272,9 - 17,4 = 255,5 \text{ mm}$$

Vzdálenost mezi středem pásnice a volným koncem průřezu:

$$h_f = 483 \text{ mm}$$

$$\psi_f = \frac{l_{fc} - l_{ft}}{l_{fc} + l_{ft}} = \frac{184 \, 273 - 219 \, 343}{184 \, 273 + 219 \, 343} = -0,087$$

$$z_j = 0,45 \psi_f h_f = 0,45 \cdot (-0,087) \cdot 483 = -18,89 \text{ mm}$$

Bezrozměrný parametr nesymetrie průřezu:

$$\zeta_j = \frac{\pi z_j}{k_z L} \sqrt{\frac{E I_z}{G I_t}} = \frac{\pi \cdot (-18,89)}{0,7 \cdot 660} \sqrt{\frac{210 \cdot 1,54 \cdot 10^7}{81 \cdot 996 \, 569,3}} = -0,813$$

Poměr koncových momentů:

$$\psi = \frac{-7,704}{-19,522} = 0,395$$

Součinitelé závisící na zatížení a uložení konců dle tab.NB.3.1 ČSN EN 1993-1-1 [19]:

$$C_{1,0} = 1,636$$

$$C_{1,1} = 1,805$$

$$C_1 = C_{1,1} = 1,805$$

$$C_2 = 0 \rightarrow C_2 \zeta_g = 0$$

$$C_3 = 1,202$$

Bezrozměrný kritický moment:

$$\mu_{cr} = \frac{C_1}{k_z} \left[\sqrt{1 + K_{wt}^2 + (C_2 \zeta_g - C_3 \zeta_j)^2} - (C_2 \zeta_g - C_3 \zeta_j) \right]$$

$$\mu_{cr} = \frac{1,805}{1} \cdot \left[\sqrt{1 + 8,089^2 + [(-1,202) \cdot (-0,813)]^2} - 1,202 \cdot (-0,813) \right] = 18,652$$

Kritický moment:

$$M_{cr} = \mu_{cr} \frac{\pi \sqrt{E I_z G I_t}}{L}$$

$$M_{cr} = 18,652 \cdot \frac{\pi \sqrt{210 \cdot 1,54 \cdot 10^7 \cdot 81 \cdot 996 \, 569,3}}{660} \cdot 10^{-3} = 45 \, 361,655 \text{ kNm}$$

Součinitel klopení:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{M_{y,Rk}}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{518,213}{45\,361,655}} = 0,107 < 0,2$$

$$\chi_{LT} = 1$$

Součinitel ekvivalentního konstantního momentu dle tab. B.3 ČSN EN 1993-1-1 [19]:

$$\psi_y = \frac{-7,704}{-19,522} = 0,345$$

$$\psi_z = \frac{12,535}{-30,886} = -0,406$$

$$C_{my} = 0,6 + 0,4 \psi_y = 0,6 + 0,4 \cdot 0,345 = 0,758$$

$$C_{mz} = 0,6 + 0,4 \psi_z = 0,6 + 0,4 \cdot (-0,406) = 0,438$$

Interakční součinitel dle tab. B.1 ČSN EN 1993-1-1 [19]:

$$k_{yy} = \min \left\{ \begin{array}{l} C_{my} \left(1 + 0,6 \lambda_y \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{Y_{M1}}} \right) \\ C_{my} \left(1 + 0,6 \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{Y_{M1}}} \right) \end{array} \right\} = 0,758 \cdot \left(1 + 0,6 \cdot 0,034 \frac{47,493}{1,0 \cdot \frac{3\,374,17}{1,27}} \right) = 0,758$$

$$k_{zz} = \min \left\{ \begin{array}{l} C_{mz} \left(1 + 0,6 \lambda_z \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{Y_{M1}}} \right) \\ C_{mz} \left(1 + 0,6 \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{Y_{M1}}} \right) \end{array} \right\} = 0,438 \cdot \left(1 + 0,6 \cdot 0,173 \cdot \frac{47,493}{1,0 \cdot \frac{3\,374,17}{1,27}} \right) = 0,438$$

$$k_{zy} = 0,8 k_{yy} = 0,8 \cdot 0,758 = 0,607$$

Posouzení interakce ohybu a tlaku dle kap. 6.3.3 ČSN EN 1993-1-1 [19]:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \frac{N_{Rk}}{Y_{M1}}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{Y_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{Y_{M1}}} \leq 1$$

$$\frac{47,493}{1,0 \cdot \frac{3\,299,695}{1,27}} + 0,607 \cdot \frac{7,704}{1,0 \cdot \frac{518,213}{1,27}} + 0,438 \cdot \frac{25,223}{\frac{39,375}{1,27}} = 0,386 \leq 1$$

Zatížitelnost pro příčník byla vypočtena iteračně. Výpočty byly provedeny analogicky s výše uvedeným postupem, a tak byly pouze shrnuty v následujících tabulkách.

1. ITERACE

$q_k = 20 \text{ kN/m}^2$

N_{Ed}	74,541	kN	λ_z	0,173		M_{cr}	66 557,257	kNm
$V_{y,Ed}$	247,415	kN	χ_z	1		λ_{LT}	0,088	
$V_{z,Ed}$	143,722	kN	L	660	mm	χ_{LT}	1	
$M_{y,Ed}$	22,115	kNm	ψ	22,115/-37,36 = -0,592		C_{my}	0,4	
$M_{z,Ed}$	65,624	kNm	C1	2,656		C_{mz}	0,4	
α_{cr}	1509		C3	1,229		k_{zy}	0,32	
$L_{vz,z}$	533	mm	μ_{cr}	27,367		k_{zz}	0,4	

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \frac{N_{Rk}}{Y_{M1}}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{Y_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{Y_{M1}}} \leq 1$$

$$\frac{74,541}{1,0 \cdot \frac{3\,299,695}{1,27}} + 0,32 \cdot \frac{22,115}{1,0 \cdot \frac{518,213}{1,27}} + 0,4 \cdot \frac{65,624}{\frac{39,375}{1,27}} = 0,893 \leq 1$$

2. ITERACE

$q_k = 23,3 \text{ kN/m}^2$

N_{Ed}	89,09	kN	λ_z	0,173		λ_{LT}	0,088	
$V_{y,Ed}$	277,357	kN	χ_z	1		M_{cr}	66 708,268	kNm
$V_{z,Ed}$	164,652	kN	L	660	mm	χ_{LT}	1	
$M_{y,Ed}$	21,204	kNm	ψ	21,204/-46,762 = -0,453		C_{my}	0,419	
$M_{z,Ed}$	73,473	kNm	C1	2,726		C_{mz}	0,4	
α_{cr}	1265		C3	1,469		k_{zy}	0,334	
$L_{vz,z}$	533	mm	μ_{cr}	27,429		k_{zz}	0,4	

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \frac{N_{Rk}}{Y_{M1}}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{Y_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{Y_{M1}}} \leq 1$$

$$\frac{89,09}{1,0 \cdot \frac{3\,299,695}{1,27}} + 0,335 \cdot \frac{21,204}{1,0 \cdot \frac{518,213}{1,27}} + 0,4 \cdot \frac{73,473}{\frac{39,375}{1,27}} = 1,00$$

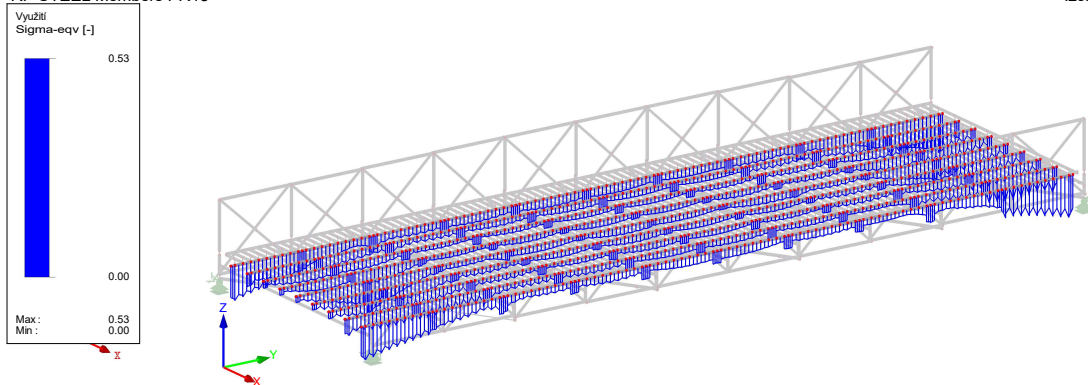
Z = 23,3 kN/m²

Pro zatížení od dopravy 23,3 kN/m² rovněž platí malý smyk.

5.1.7 Podélníky

RF-STEEL Members PR18

Izometrie



Max Sigma-eqv: 0.53, Min Sigma-eqv: 0.00

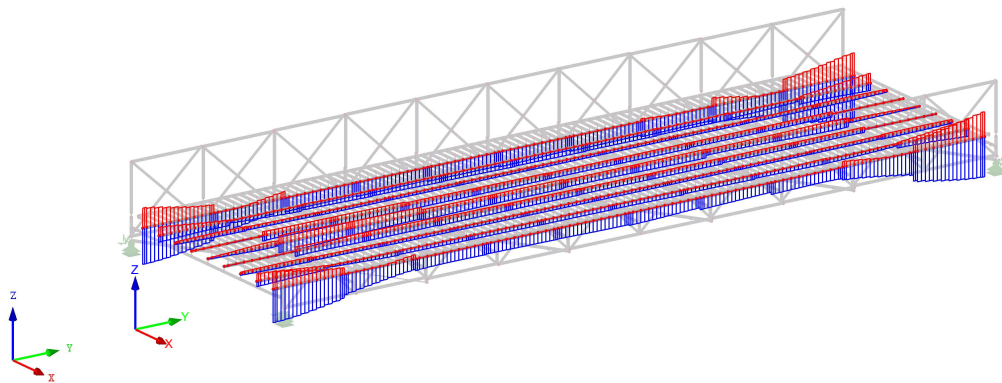
Obr. 81: Průběh napětí Sigma-eqv na podélnících

KV7 : MSÚ (STR/GEO) - trvalá/dočasná - rovn. 6.10a a 6.10b

Izometrie

Vnitřní síly N

Kombinace výsledků: Max. a min. hodnoty



Max N: 134.179, Min N: -80.761 [kN]

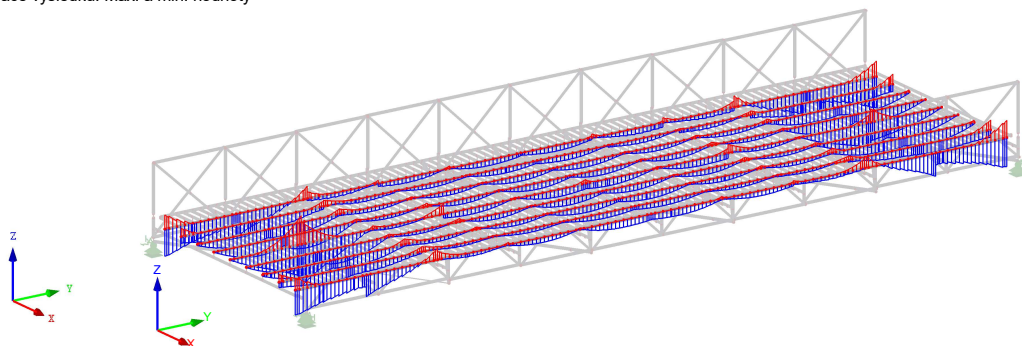
Obr. 82: Obálka normálových sil podélníků

KV7 : MSÚ (STR/GEO) - trvalá/dočasná - rovn. 6.10a a 6.10b

Izometrie

Vnitřní síly M-y

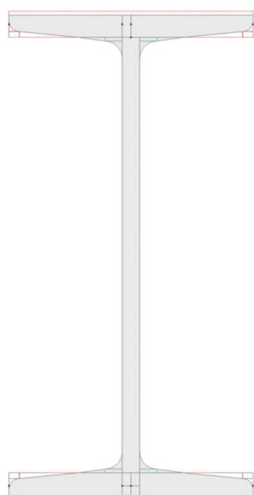
Kombinace výsledků: Max. a min. hodnoty



Max M-y: 15.599, Min M-y: -10.811 [kNm]

Obr. 83: Obálka ohybového momentu M_y podélníků

Podélník č. 9



A	3 539,2	mm ²
A _y	1 948,3	mm ²
A _z	1 429,7	mm ²
W _{el,y}	226 117	mm ³
W _{el,z}	31 738	mm ³
I _y	2,49 · 10 ⁷	mm ⁴
I _z	1,67 · 10 ⁶	mm ⁴

Obr. 84: Model oslabeného průřezu posuzovaného podélníku

Rozhodující kombinace:

ZATÍŽENÍ	ξ	ψ	δ	γ
Vlastní tíha + ostatní stálé zatížení	0,85	–	–	1,35
Svislé zatížení od dopravy	–	–	1,1	1,35
Vodorovné zatížení od dopravy	–	–	–	1,35
Vítr ve směru z – shora, zprava	–	0,3	–	1,5
Oteplení	–	0,6	–	1,5
Počáteční imperfekce	–	–	–	–

CELKEM			DOPRAVA			STÁLÉ + PROM. ZATÍŽENÍ		
N _{Ed}	125,974	kN	N	10,864	kN	N	115,11	kN
V _{y,Ed}	5,858	kN	V _y	0,644	kN	V _y	0,644	kN
V _{z,Ed}	6,744	kN	V _z	-0,559	kN	V _z	-0,559	kN
M _{y,Ed}	10,69	kNm	M _y	0,922	kNm	M _y	0,922	kNm
M _{z,Ed}	-0,672	kNm	M _z	-0,078	kNm	M _z	-0,078	kNm

Podélníky jsou tvořeny válcovanými profily bez nýtu, proto není třeba oslabovat průřez o otvory pro nýty.

Klasifikace průřezu dle tab. 5.2 ČSN EN 1993-1-1 [19]

Stojina - Ohyb

$$\frac{c}{t} = \frac{173,4}{7,5} = 23,12 \leq 124 \varepsilon = 125,34$$

Pásnice – tlak

$$\frac{c}{t} = \frac{94,25}{11,3} = 8,34 \leq 14 \varepsilon = 14,15$$

Průřez vyhovuje pro 3. třídu.

Únosnost v tahu dle kap. 6.2.3 ČSN EN 1993-1-1 [19]

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1,0$$

$$N_{t,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{3\,539,2 \cdot 230 \cdot 10^{-3}}{1,15} = 707,84 \text{ kN}$$

Posouzení smyku dle kap. 6.2.6 ČSN EN 1993-1-1 [19]

$$\tau_{z,Ed} = \frac{V_{z,Ed} \cdot S_y}{I_y \cdot t} = \frac{6,744 \cdot 10^3 \cdot 138\,090}{2,49 \cdot 10^8 \cdot 7,5} = 0,498 \text{ MPa}$$

$$\frac{\tau_{z,Ed}}{\sqrt{3} \cdot f_y} = \frac{0,498}{\sqrt{3} \cdot 230} = 0,002 < 0,5 \quad \text{Malý smyk.}$$
$$\frac{\tau_{z,Ed}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,498}{1,2}$$

Únosnost v ohybu dle kap. 6.2.6 ČSN EN 1993-1-1 [19]

$$M_{y,Rd} = \frac{W_{el,y} f_y}{\gamma_0} = \frac{226\,117 \cdot 230 \cdot 10^{-6}}{1,2} = 4\,339 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Rd} = \frac{W_{el,z} f_y}{\gamma_0} = \frac{31\,738 \cdot 230 \cdot 10^{-6}}{1,2} = 6,083 \text{ kNm}$$

Stanovení zatížitelnosti

$$Z = \frac{R_d - E_{s,Ed}}{E_{ch,Ed}} = \frac{1 - E_{s,Ed}}{E_{ch,Ed}}$$

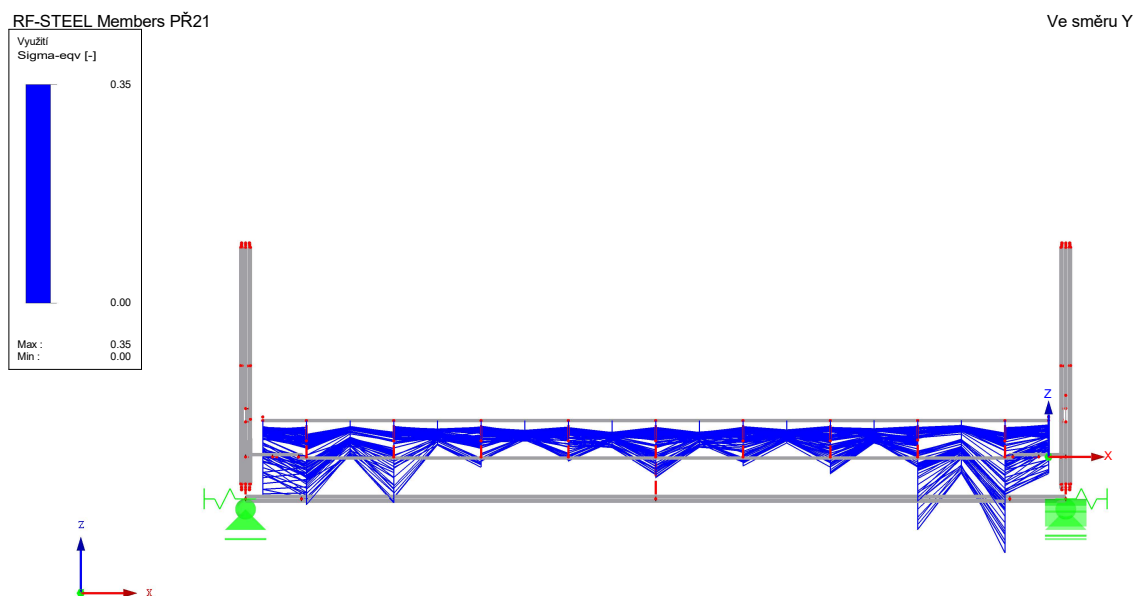
$$E_{s,Ed} = \frac{N_{s,Ed}}{N_{t,Rd}} + \frac{M_{y,s,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,s,Ed}}{M_{z,Rd}} = \frac{115,110}{707,84} + \frac{9,768}{43,339} + \frac{0,594}{6,083} = 0,486$$

$$E_{ch,Ed} = \frac{N_{ch,Ed}}{N_{t,Rd}} + \frac{M_{y,ch,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,ch,Ed}}{M_{z,Rd}} = \frac{10,864}{707,84} + \frac{0,922}{43,339} + \frac{0,078}{6,083} = 0,049$$

$$Z = \frac{1 - E_{s,Ed}}{E_{ch,Ed}} = \frac{1 - 0,486}{0,049} = 10,402 \text{ kN/m}^2$$

Při zatížení od dopravy 10,402 kN/m² rovněž platí malý smyk.

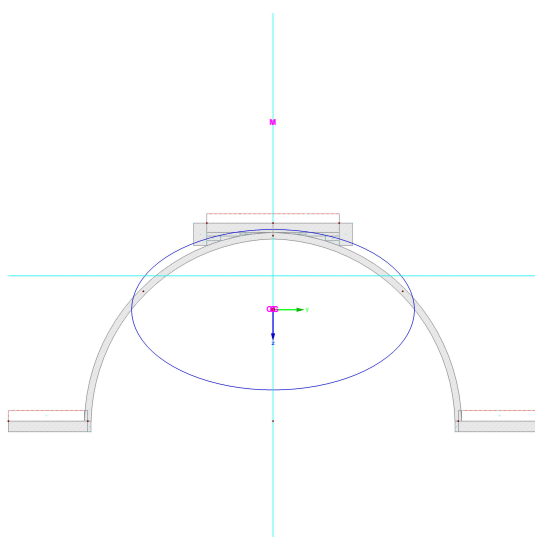
5.1.8 Mostiny Zorés



Max Sigma-eqv: 0.35, Min Sigma-eqv: 0.00

Obr. 85: Průběh vyuzití napětí na mostinách Zorés

Podle analýzy napětí pomocí modulu RF-STEEL Members se jako nejvíce namáhaná jeví poslední mostina blízko pravého nosníku. Nejvíce namáhaný prut je zatížen tlakem a ohybem, byl tedy do posudku zahrnut vzpěr. Klopení mostiny se nepředpokládá, jelikož moment setrvačnosti I_z je větší a v tomto směru je mostina podepřena.



Obr. 86: Model oslabeného průřezu mostiny Zorés

A	1 154,2	mm ²
A _y	262,1	mm
A _z	332,3	mm ²
W _{el,y}	22 991	mm ³
W _{el,z}	32 958	mm ³
I _y	1,06 · 10 ⁶	mm ⁴
I _z	3,3 · 10 ⁶	mm ⁴
N _{Ed}	4,109	kN
V _{y,Ed}	3,876	kN
V _{z,Ed}	1,156	kN
M _{y,Ed}	0,552	kNm
M _{z,Ed}	1,306	kNm

Rozhodující kombinace:

ZATÍŽENÍ	ξ	ψ	δ	γ
Vlastní tíha + ostatní stálé zatížení	0,85	–	–	1,35
Svislé zatížení od dopravy	–	–	1,1	1,35
Vodorovné zatížení od dopravy	–	–	–	1,35
Vítr zprava – zatížený most	–	0,3	–	1,5
Oteplení	–	0,6	–	1,5
Počáteční imperfekce	–	–	–	–

Posouzení smyku dle kap. 6.2.6 ČSN EN 1993-1-1 [19]

$$\tau_{v,Ed} = \frac{V_y \cdot S_z}{I_z \cdot t} = \frac{3,876 \cdot 10^3 \cdot 23916,4}{3,3 \cdot 10^6 \cdot 3,5} = 8,03 \text{ MPa}$$

$$\frac{\tau_{v,Ed}}{\sqrt{3} \cdot f_y} = \frac{8,03}{\sqrt{3} \cdot 230} = 0,02 < 0,5 \quad \text{Malý smyk.}$$

$$\frac{V_{M0}}{1,2}$$

$$N_{Rk} = A \cdot f_y = 1 \cdot 154,2 \cdot 230 = 265,466 \text{ kN}$$

$$L_{vz,y} = 660 \text{ mm}$$

$$\bar{\lambda}_y = \frac{L_{vz,y}}{i_y \cdot \lambda_1} = \frac{660}{30,3 \cdot 93,9 \sqrt{\frac{235}{230}}} = 0,229$$

 $\alpha = 0,49$ – vzpěrnostní křivka c

$$\Phi = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right] = 0,5 \cdot \left[1 + 0,49 \cdot (0,229 - 0,2) + 0,229^2 \right] = 0,533$$

$$\chi_y = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{0,533 + \sqrt{0,533^2 - 0,229^2}} = 0,985$$

$$L_{vz,z} = 660 \text{ mm}$$

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_{vz,y}}{i_z \cdot \lambda_1} = \frac{660}{53,4 \cdot 93,9 \sqrt{\frac{235}{230}}} = 0,13 < 0,2 \rightarrow \chi_z = 1$$

Charakteristická ohybová únosnost:

$$M_{y,Rk} = W_{el,y} \cdot f_y = 22 \, 991 \cdot 230 = 5,288 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Rk} = W_{el,z} \cdot f_y = 32 \, 958 \cdot 230 = 7,580 \text{ kNm}$$

$$\chi_{LT} = 1$$

Součinitele ekvivalentního konstantního momentu dle tab. B.3 ČSN EN 1993-1-1 [19]:

$$\psi_y = \frac{0,018}{-0,552} = -0,033$$

$$\psi_z = \frac{-1,259}{1,306} = -0,964$$

$$C_{my} = 0,6 + 0,4 \psi_y = 0,6 + 0,4 \cdot (-0,033) = 0,587 \geq 0,4$$

$$C_{mz} = 0,6 + 0,4 \psi_z = 0,6 + 0,4 \cdot (-0,964) = 0,214 < 0,4 \rightarrow C_{mz} = 0,4$$

$$C_{mLT} = C_{my} = 0,587$$

Interakční součinitele dle tab. B.1 ČSN EN 1993-1-1 [19]:

$$k_{yy} = \min \left\{ \begin{array}{l} C_{my} \left(1 + 0,6 \lambda_y \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{RK}}{Y_{M1}}} \right) \\ C_{my} \left(1 + 0,6 \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{RK}}{Y_{M1}}} \right) \end{array} \right\} = 0,587 \cdot \left(1 + 0,6 \cdot 0,229 \cdot \frac{4,109}{0,985 \cdot \frac{265,466}{1,27}} \right) = 0,588$$

$$k_{yz} = \min \left\{ \begin{array}{l} C_{mz} \left(1 + 0,6 \lambda_z \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{RK}}{Y_{M1}}} \right) \\ C_{mz} \left(1 + 0,6 \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{RK}}{Y_{M1}}} \right) \end{array} \right\} = 0,4 \cdot \left(1 + 0,6 \cdot 0,13 \cdot \frac{4,109}{1 \cdot \frac{265,466}{1,27}} \right) = 0,401$$

$$k_{zy} = \max \left\{ \begin{array}{l} 1 - \frac{0,05 \lambda_z}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{RK}}{Y_{M1}}} \\ 1 - \frac{0,05}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{RK}}{Y_{M1}}} \end{array} \right\} = 1 - \frac{0,05 \cdot 0,13}{(0,587 - 0,25)} \frac{4,109}{1 \cdot \frac{265,466}{1,27}} = 0,999$$

$$k_{zz} = k_{zz} = 0,401$$

Posouzení interakce ohybu a tlaku dle kap. 6.3.3 ČSN EN 1993-1-1 [19]:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \frac{N_{RK}}{Y_{M1}}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rk}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{z,Rk}}{Y_{M1}}} \leq 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \frac{N_{RK}}{Y_{M1}}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rk}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{z,Rk}}{Y_{M1}}} \leq 1$$

$$\frac{4,109}{\frac{0,985 \cdot 265,466}{1,27}} + 0,588 \cdot \frac{0,552}{1,27} + 0,401 \cdot \frac{1,306}{\frac{1,0 \cdot 7,580}{1,27}} = 0,185 \leq 1$$

$$\frac{4,109}{\frac{1,0 \cdot 265,466}{1,27}} + 0,999 \cdot \frac{0,552}{1,27} + 0,401 \cdot \frac{1,306}{\frac{1,0 \cdot 7,580}{1,27}} = 0,24 \leq 1$$

ITERACE

$$q_k = 28,3 \text{ kN/m}^2$$

N	22,578	kN	λ_y	0,49		C_{my}	0,572	
V_y	10,152	kN	χ_y	0,985		C_{mz}	0,4	
V_z	7,989	kN	λ_z	0,13		C_{mLT}	0,572	
M_y	2,962	kNm	χ_z	1		k_{yy}	0,581	
M_z	2,669	kNm	λ_{LT}	0,11		k_{zy}	0,998	
			χ_{LT}	1		$k_{yz} = k_{zz}$	0,406	

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rk}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{\chi_{LT} M_{z,Rk}} \leq 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rk}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed}}{\chi_{LT} M_{z,Rk}} \leq 1$$

$$\frac{22,578}{\frac{0,985 \cdot 265,466}{1,27}} + 0,581 \cdot \frac{2,962}{1,27} + 0,406 \cdot \frac{2,669}{\frac{1,0 \cdot 7,580}{1,27}} = 0,704 \leq 1$$

$$\frac{22,578}{\frac{1,0 \cdot 265,466}{1,27}} + 0,998 \cdot \frac{2,962}{1,27} + 0,406 \cdot \frac{2,669}{\frac{1,0 \cdot 7,580}{1,27}} = 0,999 \leq 1$$

$$Z = 28,3 \text{ kN/m}^2$$

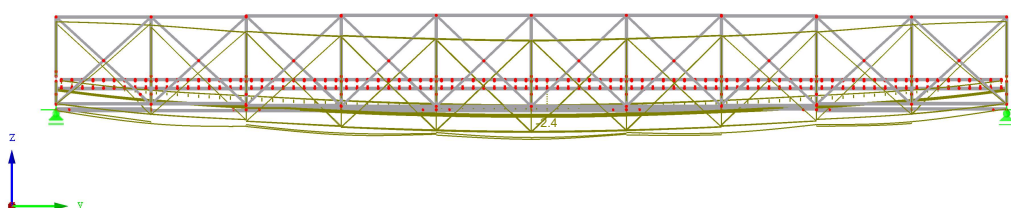
Pro zatížení od dopravy 28,3 kN/m² rovněž platí malý smyk.

5.2 Posouzení MSP

Pro posouzení zatížitelnosti pro mezní stav použitelnosti byl z výpočetního softwaru stanoven průhyb od charakteristické kombinace proměnných zatížení a následně byla vypočtena největší přípustná hodnota zatížení od dopravy pro splnění limitního průhybu.

KZ401 : MSP
Globální deformace u-Z [mm]

Proti směru osy X



Součinitel pro deformace: 240.00
Max u-Z: 0.0, Min u-Z: -2.4 mm

Obr. 87: Průhyb od charakteristického zatížení od dopravy

Limitní průhyb dle NA.2.23 ČSN EN 1993-2 [21] pro trvalé mosty – lávky pro chodce:

$$w_{\text{lim}} = \frac{L}{250} = \frac{19\,500}{250} = 78 \text{ mm}$$

Průhyb od ostatních proměnných zatížení:

$$w_{Q,\text{ost}} = 0,7 \text{ mm}$$

Průhyb od výchozího charakteristického zatížení od dopravy:

$$w_{Q,\text{ch}} = 2,4 \text{ mm}$$

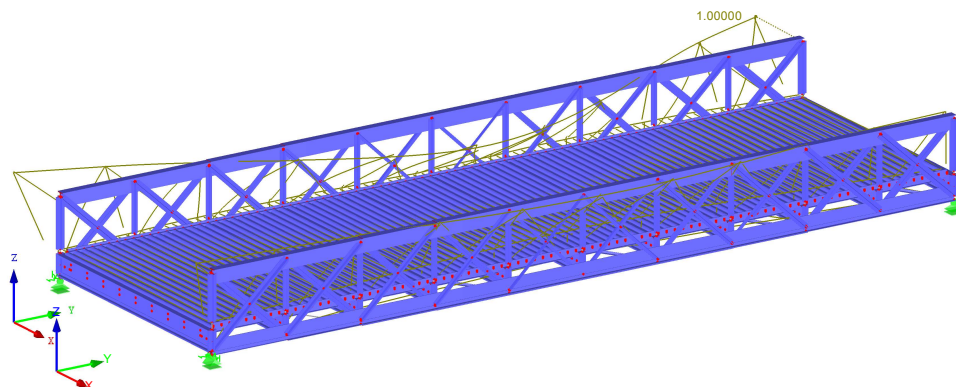
Stanovení zatížitelnosti

$$z = \frac{w_{\text{lim}} - w_{Q,\text{ost}}}{w_{Q,\text{ch}}} = \frac{78 - 0,7}{2,4} = 77,7 \text{ kN/m}^2$$

Pomocí modulu RF – DYNAM Pro byla zjištěna první vlastní frekvence od stálého zatížení, která je rovna $f = 5,018$ Hz. Ta byla následně porovnána s přípustnými hodnotami.

RF-DYNAM Pro
Vlastní kmitání u [-]
Vlastní tvar č. 7 - 5.018 Hz

Izometrie



Součinitel pro deformace: 2.00
Max u: 1.00000, Min u: 0.02902 -

Obr. 88: První vlastní frekvence konstrukce

Frekvence převyšuje hodnotu 4,6 Hz a tedy dle kap. NA.2.49 ČSN EN 1991-2 [17] není třeba ověření lávky z hlediska dynamického zatížení.

5.3 Shrnutí zatížitelnosti

Po přepočtu zatížitelnosti jednotlivých prvků se jako rozhodující prvek jeví tlačaná diagonála v první příhradě pravého nosníku. Jednotlivé výsledky jsou shrnuty v následující tabulce.

POSUZOVANÝ PRVEK	MÍSTO	STANOVENÁ ZATÍŽITELNOST [kN/m ²]
neporušená svislice	příhrada č. 2 vlevo	2,23
horní pás	příhrada č. 6 vpravo	0,76
dolní pás	příhrada č. 9 vpravo	2,701
tažená diagonála	příhrada č. 8 vlevo	1,738
tlačaná diagonála	příhrada č. 1 vpravo	0,74
příčník	příčník č. 10 nalevo	23,3
podélník	příčník č. 9 u opěry O2	10,402
mostina	u opěry O2	28,3
MSP – průhyb	uprostřed rozpětí	77,7
CELKOVÁ ZATÍŽITELNOST		0,74 kN/m²

Tab. 6: Shrnutí zatížitelnosti jednotlivých prvků

6. Posouzení mostu na mimořádné zatížení

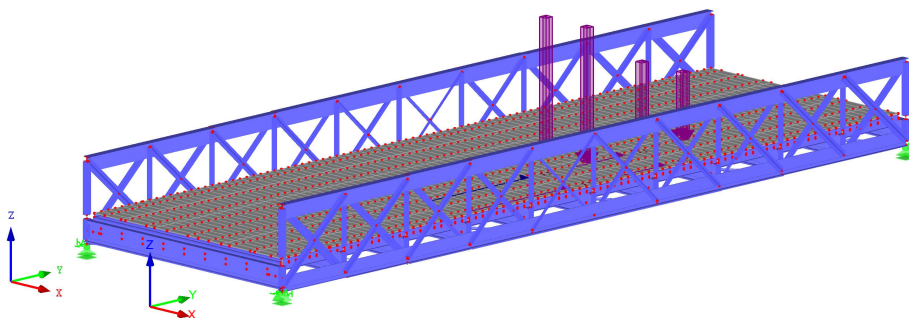
Na mostě byl uvažován mimořádný výskyt obslužného vozidla dle kap. 5.3.2.3 ČSN EN 1991-2. [17] Zatížení bylo do modelu aplikováno jako pohyblivé zatížení a bylo na most umístěno v takových místech, aby vyvolalo maximální možný účinek. Pro popis účinků zatížení na konstrukci byla použita kombinace zatížení 6.11b ČSN EN 1990 [10] bez uvažování chodců dle

Posouzen byl nejprve pravý horní pás v místě příhrady č. 6, který již byl posuzován při stanovování zatížitelnosti.

Rozhodující poloha zatížení:

ZS91 : Krok 1/6 sada pohybů 1 z RF-MOVE-Surfaces

Izometrie



Obr. 89: Rozhodující poloha pohyblivého zatížení pro posouzení horního pásu

Rozhodující kombinace:

ZATÍŽENÍ	ψ_1	ψ_2	γ
Vlastní tíha + ostatní stálé zatížení	–	–	1,00
Mimořádné zatížení	–	–	1,00
Vítr ve směru z – shora, zprava	–	0,2	1,00
Oteplení	–	0,5	1,00
Počáteční imperfekce	–	–	–

Posouzení zatížitelnosti

$$\alpha_{cr} = 2,25$$

$$N_{Rk} = A \cdot f_y = 14\,346,5 \cdot 230 = 3\,299,695 \text{ kN}$$

$$L_{vz,y} = 1\,950 \text{ m}$$

$$\bar{\lambda}_y = \frac{L_{vz,y}}{i_y \cdot \lambda_1} = \frac{1\,950}{108,6 \cdot 93,9 \sqrt{\frac{235}{230}}} = 0,189 < 0,2$$

$$\chi_y = 1$$

$$L_{vz} = \sqrt{\frac{\pi^2 E I_z}{\alpha_{cr} \cdot N_{Ed}}} = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot 210 \cdot 10^6 \cdot 2,47 \cdot 10^{-5}}{2,28 \cdot 648,524}} = 5\,884 \text{ mm}$$

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_{vz}}{i_z \cdot \lambda_1} = \frac{5\,884}{41,5 \cdot 93,9 \sqrt{\frac{235}{230}}} = 1,494$$

$\alpha = 0,49$ – vzpěrnostní křivka c

$$\Phi = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right] = 0,5 \cdot \left[1 + 0,49 \cdot (1,494 - 0,2) + 1,494^2 \right] = 1,933$$

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{1,933 + \sqrt{1,933^2 - 1,494^2}} = 0,317$$

Charakteristická ohybová únosnost:

$$M_{y,Rk} = W_{el,y} \cdot f_y = 582\,344,2 \cdot 230 = 133,939 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Rk} = W_{el,z} \cdot f_y = 247\,274,2 \cdot 230 = 56,873 \text{ kNm}$$

Moment setrvačnosti v ose y je větší než v ose z, průřez byl tedy posouzen na klopení při ohybu kolem osy y.

Délka mezi body zajištěnými proti posunu kolmo z roviny:

$$L = 1\,950 \text{ mm}$$

Součinitelé vzpěrné délky:

$$k_w = 1$$

$$k_z = 1$$

Bezrozměrný parametr kroucení:

$$k_{wt} = \frac{\pi}{k_w L} \sqrt{\frac{E I_w}{G I_t}} = \frac{\pi}{1 \cdot 1\,950} \sqrt{\frac{210 \cdot 2,88 \cdot 10^9}{81 \cdot 7,78 \cdot 10^5}} = 0,158$$

$$z_a = 94,5 \text{ mm}$$

$$z_s = 76,2 \text{ mm}$$

$$z_g = z_a - z_s = 94,5 - 76,2 = 18,3 \text{ mm}$$

VNITŘNÍ SÍLY		
N	648,524	kN
V _y	-0,645	kN
V _z	-7,49	kN
M _y	24,852	kNm
M _z	-2,857	kNm

Vzdálenost mezi středem pásnice a volným koncem průřezu:

$$h_f = 365 \text{ mm}$$

$$\psi_f = 1 \text{ (tlačená pásnice)}$$

$$z_j = 0,45 \psi_f h_f = 0,45 \cdot 1 \cdot 365 = 164,25 \text{ mm}$$

Bezrozměrný parametr nesymetrie průřezu:

$$\zeta_j = \frac{\pi z_j}{k_z L} \sqrt{\frac{E I_z}{G I_t}} = \frac{\pi \cdot 164,25}{1 \cdot 1950} \sqrt{\frac{210 \cdot 2,47 \cdot 10^7}{81 \cdot 7,78 \cdot 10^5}} = 2,401$$

Poměr koncových momentů:

$$\psi = \frac{8,324}{26,327} = 0,316$$

Součinitelé závisící na zatížení a uložení konců dle tab. NB.3.1 ČSN EN 1993-1-1 [19]:

$$C_{1,0} = 1,467$$

$$C_{1,1} = 1,492$$

$$C_1 = C_{1,0} + (C_{1,1} - C_{1,0}) \kappa_{wt} = 1,467 + (1,492 - 1,467) \cdot 0,158 = 1,471$$

$$C_2 = 0 \rightarrow C_2 \zeta_g = 0$$

$$C_3 = 1$$

Bezrozměrný kritický moment:

$$\mu_{cr} = \frac{C_1}{k_z} \left[\sqrt{1 + \kappa_{wt}^2 + (C_2 \zeta_g - C_3 \zeta_j)^2} - (C_2 \zeta_g - C_3 \zeta_j) \right]$$

$$\mu_{cr} = \frac{1,467}{1} \cdot \left[\sqrt{1 + 0,158^2 + (-1 \cdot 2,401)^2} + 1 \cdot 2,401 \right] = 7,363$$

Kritický moment:

$$M_{cr} = \mu_{cr} \frac{\pi \sqrt{E I_z G I_t}}{L}$$

$$M_{cr} = 7,363 \cdot \frac{\pi \sqrt{210 \cdot 2,47 \cdot 10^7 \cdot 81 \cdot 7,78 \cdot 10^5}}{1950} \cdot 10^{-3} = 6\,782,683 \text{ kNm}$$

Součinitel klopení:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{M_{y,Rk}}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{133,939}{6\,782,683}} = 0,189 < 0,2$$

$$\chi_{LT} = 1$$

Součinitele ekvivalentního konstantního momentu dle tab. B.3 ČSN EN 1993-1-1 [19]:

$$\psi_y = \frac{7,782}{24,852} = 0,313$$

$$C_{my} = 0,6 + 0,4 \psi_y = 0,6 + 0,4 \cdot 0,313 = 0,725$$

$$C_{mz} = 0,9 \text{ (Dochází k vybočení s posunem styčniců)}$$

$$C_{mLT} = C_{my} = 0,725$$

Interakční součinitelé dle tab. B.1 ČSN EN 1993-1-1 [19]:

$$k_{yy} = \min \left\{ \begin{array}{l} C_{my} \left(1 + 0,6 \lambda_y \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{Y_{M1}}} \right) \\ C_{my} \left(1 + 0,6 \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{Y_{M1}}} \right) \end{array} \right\} = 0,725 \cdot \left(1 + 0,6 \cdot 0,189 \cdot \frac{648,524}{1,0 \cdot \frac{3\,299,695}{1,27}} \right) = 0,746$$

$$k_{yz} = k_{zz} = \min \left\{ \begin{array}{l} C_{mz} \left(1 + 0,6 \lambda_z \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{Y_{M1}}} \right) \\ C_{mz} \left(1 + 0,6 \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{Y_{M1}}} \right) \end{array} \right\} = 0,9 \cdot \left(1 + 0,6 \cdot \frac{648,524}{0,317 \cdot \frac{3\,299,695}{1,27}} \right) = 0,981$$

$$k_{zy} = \max \left\{ \begin{array}{l} 1 - \frac{0,05 \lambda_z}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{Y_{M1}}} \\ 1 - \frac{0,05}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{Y_{M1}}} \end{array} \right\} = 1 - \frac{0,05}{(0,725 - 0,25)} \frac{648,524}{0,317 \cdot \frac{3\,299,695}{1,27}} = 0,917$$

Posouzení interakce ohybu a tlaku dle kap. 6.3.3 ČSN EN 1993-1-1 [19]:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \frac{N_{Rk}}{Y_{M1}}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{Y_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{Y_{M1}}} \leq 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \frac{N_{Rk}}{Y_{M1}}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{Y_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{Y_{M1}}} \leq 1$$

$$\frac{648,524}{1,0 \cdot \frac{3\,299,695}{1,27}} + 0,746 \cdot \frac{24,852}{1,0 \cdot \frac{133,939}{1,27}} + 0,981 \cdot \frac{2,827}{\frac{56,873}{1,27}} = 0,487 \leq 1$$

$$\frac{648,524}{0,317 \cdot \frac{3\,299,695}{1,27}} + 0,917 \cdot \frac{24,852}{1,0 \cdot \frac{133,939}{1,27}} + 0,981 \cdot \frac{2,827}{\frac{56,873}{1,27}} = 1,067 > 1$$

Po posouzení horního pásu je zřejmé, že most na mimořádné zatížení obslužným vozidlem **nevyhovuje**.

7. Návrh opatření

Zatížitelnost mostu byla stanovena na $0,74 \text{ kN/m}^2$ a most nevyhověl na přejezd obslužným vozidlem. Navrhuji proto ponechat zábrany bránící vjezdu vozidla na most a značku „Zákaz vjezdu všech vozidel“ po obou stranách mostu. Navrhuji osadit most po obou stranách informativní tabulkou dle kap. 14.3 ČSN 73 6222 [18] uvádějící maximální zatížení mostu rovnoměrným zatížením 74 kg/m^2 .

Aby se stav ještě nezhoršoval, je třeba provést nutné minimální opravy. Je nutné důkladně zbavit celou konstrukci nečistot ve štěrbinách a ložiscích, opravit levou opěru a odstranit vegetaci rostoucí skrz opěry. Dále je třeba obnovit protikorozní ochranu na celém mostě a opravit propadlý mostní svršek opravou parapetních nosníků, odstraněním vozovky, opravou zkorodovaných mostin a osazením nového lehčího mostního svršku vhodným pro lávky pro chodce a cyklisty. Konkrétní změnu mostního svršku je třeba konzultovat se statikem.

Pro zvýšení zatížitelnosti mostu je kromě výše uvedených oprav třeba omezit provoz chodců na části šířky mostu. Konkrétní omezení je třeba konzultovat se statikem.

Pro zvýšení zatížitelnosti prostřednictvím zesílení konstrukčních prvků je třeba především opravit oslabené svislice a diagonály v místě jejich oslabení u jejich přípoje k mostovce, nejlépe výměnou celého průřezu, zesílit dolní pás a opravit přerušené pruty dolního ztužení. Vybočený horní pás, ačkoliv je jednou z rozhodujících poruch, vyrovnat nelze. Pro rekonstrukci je nutno navrhnout konkrétní projekt a aktualizovat přepočet zatížitelnosti.

Všechny opravy je nutno provádět bez těžké mechanizace a během oprav je nutno most podepřít.

8. Závěr

Byla provedena prohlídka mostního objektu, na které byly ověřeny základní dimenze a zdokumentovány poruchy. Na základě prohlídky byl most, který vykazoval četné závady, ohodnocen stavebním stavem nosné konstrukce VII – havarijní, stavebním stavem spodní stavby V – špatný a stavem použitelnosti 5 – nepoužitelný.

V souladu s poznatky získanými z prohlídky byl vytvořen prutový výpočetní model, do kterého byly vloženy zjištěné závady pomocí oslabených průřezů, případně zatížení nebo smazání porušených částí prutů. Podle platných norem bylo do výpočetního modelu aplikováno zatížení, odpovídající zatížení lávek pro chodce a cyklisty, a byly sestaveny kombinace zatížení 6.10b, 6.14 a 6.11.

Model byl podroben výpočtu dle lineární analýzy I. řádu, na základě něhož bylo vyhodnoceno, v jakých místech jsou jednotlivé typy prutů nejvíce namáhány. Většina svislic v místě oslabení po analýze využití průřezů nevyhověla a bylo uvažováno jejich porušení a redistribuce zatížení do okolních prutů. Pro nejvíce namáhaná místa byly zjištěny kombinace s největším účinkem zatížení a výsledné vnitřní síly od těchto kombinací byly použity pro posouzení zatížitelnosti, kde již byly zahrnuty účinky II. řádu. Výsledná zatížitelnost mostu v mezním stavu únosnosti je rovna **0,74 kN/m²**. O výsledné zatížitelnosti rozhodla tlačaná diagonála v pravé příhradě č. 1. Výsledná zatížitelnost mostu od průhybu v mezním stavu použitelnosti je rovna 77,7 kN/m². První vlastní frekvence konstrukce od stálého zatížení je rovna 5,018 Hz a konstrukce tak nevyžaduje podrobné dynamické posouzení. Most při posouzení na mimořádné zatížení obslužným vozidlem nevyhověl.

V rámci opatření bylo doporučeno ponechat na mostě zábrany a zákazové značky. Byla navrhována jednak minimální opatření pro zabránění zhoršování stavu, tak i opatření pro zvýšení zatížitelnosti mostu.

Seznam použitých zdrojů

- [1] RUDOLSKÝ, Jakub. *Most přes řeku Teplou ve Vodné: Technická zpráva*. 2021, 8.
- [2] TOMAN, Radek. *Most Místní komunikace-Most přes Teplou: HLAVNÍ PROHLÍDKA*. 2021, 17.
- [3] RUDOLSKÝ, Jakub. *Most přes řeku Teplá ve Vodné: Podélný řez*. 2021.
- [4] *Mapy.cz* [online]. [cit. 2023-03-16]. Dostupné z:
<https://en.mapy.cz/zakladni?l=0&x=12.8484329&y=50.1050182&z=17>
- [5] *Mapy.cz* [online]. [cit. 2023-03-16]. Dostupné z:
<https://en.mapy.cz/letecka?l=0&x=12.8484329&y=50.1050182&z=17>
- [6] *Vyhláška č. 294/2015 Sb., kterou se provádějí pravidla provozu na pozemních komunikacích*. In: . 2015.
- [7] ČSN EN ISO 4628-3 *Nátěrové hmoty - Hodnocení degradace nátěrů - Klasifikace množství a velikosti defektů a intenzity jednotných změn vzhledu - Část 3: Hodnocení stupně prorezavění*. 500782. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- [8] ČSN 73 6221 *Prohlídky mostů pozemních komunikací*. 503942. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
- [9] KRAMÁR, Tomáš; KOLAŘÍKOVÁ, Marie. *ZPRÁVA O HODNOCENÍ č. : 42012504-01*. LL-C (Certification) Czech Republic a.s., Pobřežní 620/3, 186 00 Praha 8.
- [10] ČSN EN 1990 *ed. 2 Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí*. 511820. Česká agentura pro standardizaci, 2021.
- [11] ČSN 73 0038 *Hodnocení a ověřování existujících konstrukcí - doplňující ustanovení*. 508851. Česká agentura pro standardizaci, 2019.
- [12] *SŽ S5/1 Diagnostika, zatížitelnost a přechodnost železničních mostních objektů*. Správa železnic, 2021.
- [13] ČSN EN 1991-1-1 *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-1: Obecná zatížení - Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb*. 69328. Praha: Český normalizační institut, 2004.
- [14] SOKOL, Zdeněk; WALD, František. *OCELOVÉ KONSTRUKCE Tabulky*. České vysoké učení technické v Praze, 2016.
- [15] ČSN EN 1991-1-4 *ed. 2 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-4: Obecná zatížení - Zatížení větrem*. 511034. Česká agentura pro standardizaci, 2020.
- [16] ČSN EN 1991-1-5 *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-5: Obecná zatížení - Zatížení teplotou*. 72774. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [17] ČSN EN 1991-2 *ed.2 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 2: Zatížení mostu dopravou*. 506453. Česká agentura pro standardizaci, 2018.
- [18] ČSN 73 6222 *Zatížitelnost mostů pozemních komunikací*. 92023. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [19] ČSN EN 1993-1-1 *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. 88259. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [20] ČSN EN 1993-1-5 *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-5: Boulení stěn*. 509928. 2020.

- [21] ČSN EN 1993-2 Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 2: Ocelové mosty.
79983. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2008.

Seznam obrázků

Obr. 1:	Pohled na most ve směru toku	9
Obr. 2:	Pohled na most od levého břehu	9
Obr. 3:	Schéma číslování příhrad a svislic	10
Obr. 4:	Mapa okolí mostu	11
Obr. 5:	Satelitní snímek	12
Obr. 6:	Křídlo opěry O1	15
Obr. 7:	Trhliny a rozvolněné zdivo v opěře O1	15
Obr. 8:	Ložisko zanesené nečistotami	15
Obr. 9:	Korozně oslabená svislice č. 0 vpravo	16
Obr. 10:	Korozně oslabená svislice č. 10 vlevo	16
Obr. 11:	Nárazem zdeformovaná svislice č. 5 vpravo	16
Obr. 12:	Nárazem zdeformovaná svislice č. 7 vpravo	16
Obr. 13:	Štěrbinová koroze a úplně prorezavění diagonály	17
Obr. 14:	Korozní oslabení krčního úhelníku o 20 %	17
Obr. 15:	Vybočení horního pásu levého nosníku	18
Obr. 16:	Zkorodovaný podélník č. 8	19
Obr. 17:	Příčnický se zkorodovanou dolní pásnicí	19
Obr. 18:	Mostiny Zorés	20
Obr. 19:	Propadá vozovka u pravého nosníku	20
Obr. 20:	Drátěný model	22
Obr. 21:	Plnostěnný model	23
Obr. 22:	Plnostěnný model – pohled zdola na mostovku.....	23
Obr. 23:	Renderovaný model průřezu – dolní pás příhrad č. 1, 2, 9 a 10	27
Obr. 24:	Renderovaný model průřezu – horní pás příhrad č. 1, 2, 9 a 10	27
Obr. 25:	Renderovaný model průřezu – horní pás příhrad č. 3 a 8	28
Obr. 26:	Renderovaný model průřezu – horní pás příhrad č. 4 - 7	28
Obr. 27:	Renderovaný model průřezu – krajní svislice	29
Obr. 28:	Renderovaný model průřezu – prostřední svislice	29
Obr. 29:	Renderovaný model průřezu – diagonály 1. příhrady	29
Obr. 30:	Renderovaný model průřezu – příčník	31
Obr. 31:	Renderovaný model průřezu – podélníky č. 1-7 a 9	31
Obr. 32:	Renderovaný model průřezu – dolní ztužení	32
Obr. 33:	Renderovaný model průřezu – mostina Zorés	32
Obr. 34:	Renderovaný model průřezu – parapetní nosník	33
Obr. 35:	Drátkový model styčnicku horního pásu v místě svislice č. 2	34
Obr. 36:	Drátkový model styčnicku dolního pásu v místě svislice č. 2	35
Obr. 37:	Výpočetní model s oslabenými (fialově označenými) pruty	36
Obr. 38:	Tlačená diagonála č. 8 vpravo	36

Obr. 39:	Dolní levý pás oslabený do ostra	36
Obr. 40:	Pravá svislice č. 0	36
Obr. 41:	Stálé zatížení od zábradlí aplikované do modelu	37
Obr. 42:	Stálé zatížení od mostního svršku aplikované do modelu	38
Obr. 43:	Mapa větrných oblastí na území ČR	39
Obr. 44:	Součinitel expozice $c_e(z)$ pro $c_o = 1$ a $k_1 = 1$	41
Obr. 45:	Součinitel síly pro mosty $c_{fx,0}$	42
Obr. 46:	Zatížení větrem zprava aplikované do modelu – most nezatížený chodci...	44
Obr. 47:	Zatížení větrem zprava aplikované do modelu – most zatížený chodci ...	44
Obr. 48:	Zatížení větrem zdola	45
Obr. 49:	Mapa maximálních teplot vzduchu ve stínu	46
Obr. 50:	Mapa minimálních teplot vzduchu ve stínu	46
Obr. 51:	Vztah mezi rozsahem teploty vzduchu ve stínu a rovnoměrné složky teploty mostu	47
Obr. 52:	Zatížení rovnoměrnou složkou teploty aplikované do modelu	47
Obr. 53:	Zatížení chodci	48
Obr. 54:	Model zatížení pro mimořádný výskyt vozidla na mostě	49
Obr. 55:	Zatížení obslužným vozidlem aplikované do modelu	49
Obr. 56:	Uvažované rozměry pro zatřídění nýtovaných průřezů	52
Obr. 57:	Průběh využití napětí svislic	53
Obr. 58:	Průběh využití napětí prostředních svislic po porušení krajních svislic ..	53
Obr. 59:	Model oslabeného průřezu posuzované svislice	54
Obr. 60:	Průběh využití napětí na horním pásu	56
Obr. 61:	Obálka normálových sil horního pásu	56
Obr. 62:	Obálka ohybového momentu M_y horního pásu	57
Obr. 63:	Model průřezu posuzovaného horního pásu	57
Obr. 64:	Rozhodující vlastní tvar pro stabilitní posouzení horního pásu	58
Obr. 65:	Průběh využití napětí na dolním pásu	63
Obr. 66:	Obálka normálových sil dolního pásu	64
Obr. 67:	Obálka ohybového momentu M_y dolního pásu	64
Obr. 68:	Obálka ohybového momentu M_z dolního pásu	64
Obr. 69:	Model oslabeného průřezu posuzovaného dolního pásu	64
Obr. 70:	Průběh využití napětí na tažených diagonálách	67
Obr. 71:	Obálka normálových sil tažených diagonál	68
Obr. 72:	Model oslabeného průřezu posuzované diagonály	69
Obr. 73:	Průběh využití napětí na tlačných diagonálách	71
Obr. 74:	Obálka normálových sil tlačných diagonál	71
Obr. 75:	Model průřezu posuzované diagonály	72
Obr. 76:	Rozhodující vlastní tvar pro stabilitní posouzení tlačných diagonál	73
Obr. 77:	Průběh využití napětí na příčných	78

Obr. 78:	Obálka normálových sil příčníků	78
Obr. 79:	Obálka ohybového momentu M_y příčníků	78
Obr. 80:	Model oslabeného průřezu posuzovaného příčníku	79
Obr. 81:	Průběh využití napětí na podélnících	84
Obr. 82:	Obálka normálových sil podélníků	84
Obr. 83:	Obálka ohybového momentu M_y podélníků	84
Obr. 84:	Model oslabeného průřezu posuzovaného podélníku	85
Obr. 85:	Průběh využití napětí na mostinách Zorés	87
Obr. 86:	Model oslabeného průřezu mostiny Zorés	87
Obr. 87:	Průhyb od charakteristického zatížení od dopravy	91
Obr. 88:	První vlastní frekvence konstrukce	92
Obr. 89:	Rozhodující poloha pohyblivého zatížení pro posouzení pásu	93

Seznam tabulek

Tab. 1:	Přehled profilů prutů diagonál	13
Tab. 2:	Výsledky tahové zkoušky	24
Tab. 3:	Přehled počátečních ohybových tuhostí diagonál	34
Tab. 4:	Výpočet zatížení od mostního svršku	38
Tab. 5:	Liniová zatížení od větru na jednotlivé pruty	43
Tab. 6:	Shrnutí zatížitelnosti jednotlivých prvků	92

Seznam použitých symbolů

Symbole neuvedené v tomto seznamu byly použity v souladu s normami uvedenými v seznamu použitých zdrojů.

Kapitola 3

e	excentricita prutu vůči těžišti horního pásu
e_h	vzdálenost těžiště horních vláken průřezu diagonály od svislice
$f_{yk,t}$	mez kluzu pro tah
$f_{yk,c}$	mez kluzu pro tlak
$f_{yk,st}$	mez kluzu pro stabilitu
$f_{yd,t}$	návrhová mez kluzu pro tah
$f_{yd,c}$	návrhová mez kluzu pro tlak
$f_{yd,st}$	návrhová mez kluzu pro stabilitu
$S_{j,y}$	ohybová počáteční tuhost styčnicku kolem osy y
$S_{j,z}$	ohybová počáteční tuhost styčnicku kolem osy z
t	tloušťka svislého plechu složeného průřezu horního nebo dolního pásu

Kapitola 4

C_1	součinitel zatížení větrem na nezatížený most
C_2	součinitel zatížení větrem na zatížený most
$d_{tot,1}$	výška d_{tot} uvažována pro zatížení větrem na nezatížený most
$d_{tot,2}$	výška d_{tot} uvažována pro zatížení větrem na zatížený most
f_{imp}	ekvivalentní liniové zatížení od počáteční imperfekce horního pásu
$f_{pl,1}$	konstantní složka plošného zatížení větrem ve směru z
$f_{pl,2}$	lineární složka plošného zatížení větrem ve směru z
$f_{w,1}$	tlak větru na nosnou konstrukci – nezatížený most
$f_{w,2}$	tlak větru na nosnou konstrukci – zatížený most
$f_{w,lin}$	liniové zatížení větrem
F_x	bodová síla
g_{L55x8}	vlastní tíha úhelníku L55x8
G_{plech}	tíhová síla plechu zábradlí
$g_{zábradlí}$	vlastní tíha zábradlí
M_w	momentový účinek větru
q_{fk}	charakteristická hodnota rovnoměrného zatížení dopravou
q_{sv1}	ekvivalentní plošné zatížení od síly Q_{sv1}
q_{sv2}	ekvivalentní plošné zatížení od síly Q_{sv2}

$Q_{sv1,x}$ vodorovné síly od zatížení obslužným vozidlem Q_{sv1}

$Q_{sv2,x}$ vodorovné síly od zatížení obslužným vozidlem Q_{sv2}

Kapitola 5

$E_{ch,Ed}$ využití únosnosti průřezu od zatížení dopravou

$E_{s,Ed}$ využití únosnosti průřezu od stálého a proměnného zatížení kromě zatížení dopravou

R_d únosnost průřezu

$w_{Q,ch}$ průhyb od zatížení dopravou

$w_{Q,ost}$ průhyb od proměnného zatížení kromě zatížení dopravou

Z zatížitelnost

Použité Programy

Microsoft Word 365

Microsoft Excel 365

Dlubal RFEM 5.31

Dlubal SHAPE-THIN 9.10