

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Prohlídka a přechodnost železničního mostu v km 15,037, TU0101

The inspection and load capacity assesment of the railway bridge
in km 15,037, TU0101

Pavla Fialová

Studijní program:

Stavební inženýrství

Studijní obor:

Konstrukce a dopravní stavby

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Pavel Ryjáček, Ph.D.

Praha 2019



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Fialová	Jméno: Pavla	Osobní číslo: 458697
Zadávací katedra: K134		
Studijní program: Stavební inženýrství		
Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby		

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Prohlídka a přechodnost železničního mostu v km 15,037, TU0101	
Název bakalářské práce anglicky: The inspection and load capacity assesment of the railway bridge in km 15,037, TU0101	
Pokyny pro vypracování: Prohlídka železničního mostu na – TU0101, km 15,037, studium archivní dokumentace a ověření základních rozměrů, vytvoření výpočetního modelu a stanovení zatížitelnosti a přechodnosti pro traťovou třídu jedné z konstrukcí, prokázat stávající přechodnost	
Seznam doporučené literatury: - ČSN EN 1991-2, ČSN EN 1993-2 - Metodický pokyn pro určování zatížitelnosti železničních mostních objektů, SŽDC, 2015	
Jméno vedoucího bakalářské práce: doc. Ing. Pavel Ryjáček, Ph.D.	
Datum zadání bakalářské práce: 21.2.2019	Termín odevzdání bakalářské práce: 19.5.2019
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

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



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

Prohlídka a přechodnost železničního mostu v km 15,037, TU0101

PROHLÁŠENÍ AUTORA

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

V Praze dne

.....

Pavla Fialová

Pavla Fialová

3



PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych ráda poděkovala především vedoucímu této bakalářské práce doc. Ing. Pavlu Ryjáčkovi, Ph.D. za trpělivé vedení, ochotu, průběžné konzultace, praktické rady a za zapůjčení vybavení nezbytného k prohlídce mostu.

V souvislosti s tím bych chtěla poděkovat i firmě VHSC za možnost využití jejich příslušenství na měření stávajících konstrukcí.

Další poděkování patří společnosti SŽDC, jmenovitě Ing. Janu Markovi, za poskytnutí archivní dokumentace a protokolu o prohlídce mostu.

V neposlední řadě děkuji své rodině a přátelům za podporu v průběhu tvorby bakalářské práce. Zvláštní poděkování si zaslouží také můj přítel za pomoc při prohlídkách a zaměřování mostu.



ANOTACE

Tato bakalářské práce se zabývá prohlídkou a stanovením zatížitelnosti a přechodnosti stávajícího ocelového mostu. Jedná se o železniční nadjezd nacházející se u stanice Hostivice, který je tvořen sedmi nýtovanými trémovými nosnými konstrukcemi. Tato práce pojednává pouze o jedné z nich.

Během prohlídek byl objekt změřen a vizuálně zkontrolován. Jsou zde popsány jednotlivé prvky konstrukce včetně nalezených vad, na jejichž základě byl zhodnocen stavební stav. Další část je věnována statickému modelu, významným zatěžovacím stavům a jejich kombinacím. Následně byly posouzeny klíčové prvky nosné konstrukce a stanovena výsledná zatížitelnost a přechodnost.

KLÍČOVÁ SLOVA

most, ocelový, železniční, trémový, prohlídka, zatížitelnost, přechodnost

ANNOTATION

This bachelor thesis deals with an inspection and an assessment of load-carrying capacity of an existing steel bridge. It is a railway overpass situated by the station Hostivice, which consists of seven riveted plate girder superstructures. Within the thesis only one of them is assessed.

The bridge dimensions and layout were thoroughly measured and the bridge was visually inspected as well. The thesis contains the detailed report from the inspection including found defects, on which basis the structural condition was determined. The next part focuses on a structural model, significant load cases and their combinations. Then key elements of the superstructure were assessed and resulting load-carrying capacity determined.

KEY WORDS

bridge, steel, railway, girder, inspection, load-carrying capacity, transience



OBSAH

1. ÚVOD	8
2. PROTOKOL O PODROBNÉ PROHLÍDCE.....	9
2.1. Identifikační údaje mostu	9
2.2. Celkový popis objektu	10
2.2.1. Základní údaje o mostu	10
2.2.2. Železniční svršek	11
2.2.3. Nosná konstrukce	12
2.2.4. Spodní stavba	14
2.2.5. Popis vybavení mostu	14
2.2.6. Popis prostorového uspořádání na objektu a pod ním	15
2.3. Popis poruch a závad	16
2.3.1. Mostní svršek.....	16
2.3.2. Nosná konstrukce	16
2.3.3. Spodní stavba	17
2.4. Návrh hodnocení stavebního stavu	17
3. STATICKÝ MODEL.....	18
3.1. Materiálové vlastnosti	20
3.2. Průřezy prvků konstrukce.....	21
3.3. Uložení a styčníky nosné konstrukce	24
3.4. Zatěžovací stavy.....	27
3.4.1. Zatížení stálá	27
3.4.2. Zatížení dopravou	30
3.4.3. Zatížení větrem.....	33
3.4.4. Zatížení teplotou	37
3.5. Součinitele zatížení	41
3.6. Sestavy zatížení.....	41
3.7. Kombinace	42
4. STANOVENÍ ZATÍŽITELNOSTI.....	43
4.1. Lineární výpočet	43
4.1.1. Hlavní nosník	44
4.1.2. Horní vodorovné ztužení	51
4.1.3. Dolní vodorovné ztužení.....	54



4.1.4. Příčné ztužení.....	57
4.1.5. Přípoj horního vodorovného ztužení.....	61
4.1.6. Přípoj dolního vodorovného ztužení	62
4.1.7. Přípoj příčného ztužení: pas – hlavní nosník.....	63
4.1.8. Přípoj příčného ztužení: pas – diagonály	64
4.2. Nelineární výpočet.....	66
4.2.1. Hlavní nosník	67
4.2.2. Horní vodorovné ztužení	69
4.2.3. Dolní vodorovné ztužení.....	70
4.2.4. Příčné ztužení.....	72
4.2.5. Přípoj horního vodorovného ztužení	74
4.2.6. Přípoj dolního vodorovného ztužení	75
4.2.7. Přípoj příčného ztužení: pas – hlavní nosník.....	76
4.2.8. Přípoj příčného ztužení: pas – diagonály	77
4.3. Přehled zatížitelností.....	78
5. OVĚŘENÍ PŘECHODNOSTI.....	79
5.1. Lineární výpočet	80
5.2. Nelineární výpočet.....	81
6. MEZNÍ STAVY POUŽITELNOSTI.....	82
6.1. Pružný stav konstrukce	82
6.2. Svislé deformace nosné konstrukce.....	82
6.3. Zkroucení koleje	82
6.4. Pootočení podporových průřezů	83
6.5. Štíhlosti prvků	83
6.6. První vlastní frekvence	84
6.7. Úroveň pohody cestujících	84
7. ZÁVĚR	85



1. ÚVOD

Začátek práce stručně představuje železniční most nacházející se v obci Hostivice v km 15,037, TU 0101, který je tvořen sedmi nýtovanými trámovými konstrukcemi. Poté je zpracován podrobný popis jedné z nich, zde značené zkratkou K4, jež je předmětem této práce. Na základě prohlídky jsou vylíčeny její jednotlivé části. Těmi jsou železniční svršek a jeho uložení, dále prvky tvořící hlavní nosnou konstrukci a krátce je zmíněna i spodní stavba. Na základě vizuální kontroly byly stanoveny poruchy a závady těchto částí, které byly podkladem pro zhodnocení stavebního stavu.

Zásadním krokem ke stanovení zatížitelnosti mostu byla idealizace reálné konstrukce zjednodušeným statickým modelem, o němž pojednává úvod třetí kapitoly. Základní geometrické parametry objektu nejsou znovu uváděny, protože jsou dostatečně patrné z předchozí části a z příloh 1-5. Jsou zde ale popsány materiálové vlastnosti a průřezy jednotlivých prvků, včetně jejich charakteristik. Dále jsou pak definovány významné zatěžovací stavy, součinitele ovlivňující jejich hodnoty a kombinace vyjadřující jejich současné působení. U nejvíce namáhaných prvků hlavní nosné konstrukce a přípojů je vypočtena zatížitelnost.

Následně je ověřena přechodnost mostní konstrukce pro danou traťovou třídu u prvků s nejnižší zatížitelností.

Závěrem je věnovaná kapitola mezním stavům použitelnosti. Zmíněno je pružné chování konstrukce, dále je zjištěna její svislá deformace, zkroucení koleje, natočení podporových průřezů, štíhlosti prvků, první vlastní frekvence a úroveň pohody cestujících.

Práce postupuje především v souladu s Metodickým pokynem pro určování zatížitelnosti železničních mostních objektů (dále jen „Metodický pokyn“) [1].



2. PROTOKOL O PODROBNÉ PROHLÍDCE

2.1. Identifikační údaje mostu¹

Traťový úsek:	TÚ 0101 Praha-Bubny (mimo) – Chomutov-záp.zhlaví (mimo)
Definiční úsek:	DÚ E1 žst. Hostivice
Evidenční km:	15,037
Objekt:	železniční most
Umístění mostu:	staniční obvod
Vžitý název:	žst. Hostivice
Délka mostu:	18,00 m
Počet otvorů:	1
Počet kolejí na mostě:	7
Elektrizace:	ne
Rychlost na mostě/rychlost traťová [km/h]:	70/80
Traťová třída zatížení s přidruženou rychlostí:	C2 – 80
Návrh hodnocení stavebního stavu objektu:	3/2
Rok prohlídky:	2019



Obr. 1: Celkový pohled na most

¹ Údaje jsou převzaty z Protokolu o podrobné prohlídce [2].



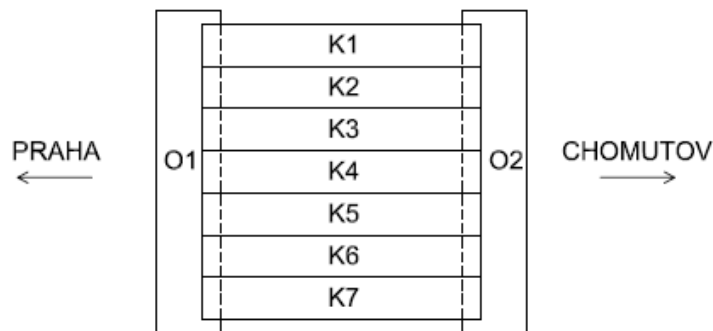
2.2. Celkový popis objektu

2.2.1. Základní údaje o mostu²

Most se nalézá v obci Hostivice u stejnojmenné železniční stanice na trati Praha-Bubny – Chomutov. Město leží nalevo od trati ve směru staničení a zpevněná komunikace procházející pod mostem vede do malé zalesněné oblasti.

Železniční most se skládá celkem ze 7 plnostěnných trémových konstrukcí. Výstavba původních železobetonových opěr proběhla v roce 1865. Starší část mostu (konstrukce K1-K4) pochází z roku 1872 a byla opravena v roce 1966. Zanedlouho poté došlo k rozšíření stávající spodní stavby a roku 1976 byly k tehdejšímu mostu přistavěny další 3 konstrukce (K5-K7).

Délka mostu:	18,00 m
Šířka mostu:	37,90 m
Výška objektu:	5,10 m
Délka přemostění:	7,60 m
Úhel křížení:	90°
Šikmost:	kolmý
Přemostěná překážka:	zpevněná účelová komunikace
Podmínky při podrobné prohlídce:	1 °C, slunečno



Obr. 2: Schéma mostu

Jednotlivé nosné konstrukce tvořící tento most se vzájemně liší. Předmětem této práce se stala konstrukce K4 a následující kapitoly již pojednávají výhradně o ní.

² Charakteristiky a historie mostu v této kapitole vychází z Protokolu o podrobné prohlídce [2]. Kromě tohoto zdroje byla pro získání dimenzí prvků okrajově využita i archivní dokumentace [3]. Většina rozměrů byla získána vlastním měřením.



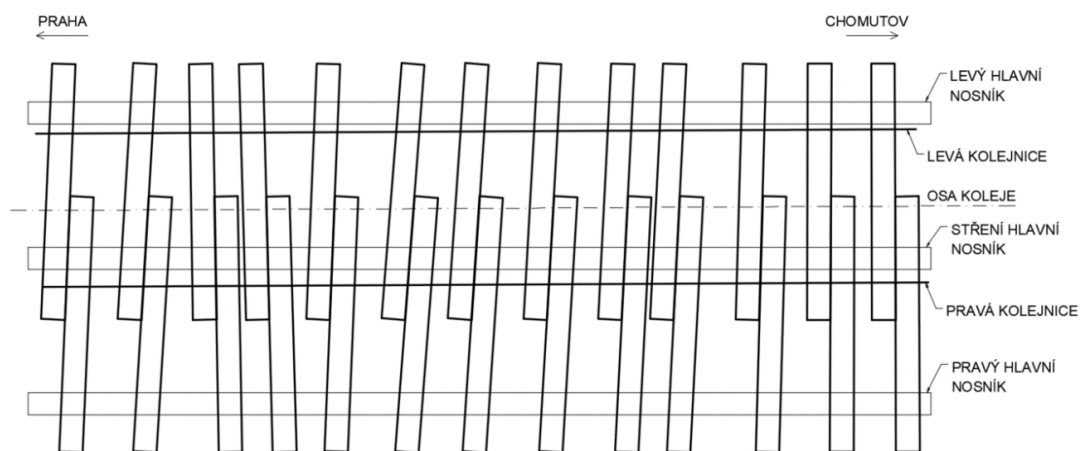
2.2.2. Železniční svršek

Trať na dané části úseku leží v přímé a přes posuzovanou konstrukci K4 je vedena jedna kolej (č. 2), která je tvořena bezстыkovými kolejnicemi S 49 (vlevo) a T (vpravo). Kolej je na hlavní nosné konstrukci uložena na mostnicích a u opěr na pozednicích. Na mostě je použito podkladnicové upevnění typu K s tuhou svěrkou ŽS 4. V přilehlé trati se naproti tomu nachází kolejové lože s dřevěnými pražci a kolej je upevněna pomocí rozponových podkladnic.



Obr. 3: Železniční svršek u opěry O2

Mostnice jsou zde uspořádány netypicky. Jedna polovina leží na levém a středním hlavním nosníku a druhá na středním a pravém. Po dvou jsou vzájemně propojeny vodorovnými šrouby a každá kolejnice je upevněna na jiné mostnici z uvedených dvojic. Toto upevnění je provedeno v podélném směru v různých vzdálenostech. Mostnice tudíž neleží vůči sobě rovnoběžně a nejsou uloženy kolmo ani na osu nosné konstrukce, ani na osu koleje.



Obr. 4: Schéma uspořádání mostnic

Mostnice

Uložení a upevnění:	plošné, svislý šroub
Počet mostnic:	2x13
Materiál:	dřevo
Rozměry:	240x230x2500 mm
Osová vzdálenost:	500–805 mm
Úprava mostnic:	čela jsou opáskována



Pozednice

Uložení:	plošné na závěrné zídce
Materiál:	dřevo
Rozměry:	240x240x2500 mm
Osová vzdálenost pražec – pozednice na O1:	870 mm
Osová vzdálenost mostnice – pozednice na O1:	500 mm
Osová vzdálenost pražec – pozednice na O2:	665 mm
Osová vzdálenost mostnice – pozednice na O2:	410 mm

2.2.3. Nosná konstrukce

Trámovou konstrukci K4 tvoří trojice plnostěnných nosníků průřezu I, na nichž jsou uloženy mostnice a nosníky podlahové. Podélné zavětrování se nachází ve dvou rovinách, a to při dolních i horních pásnicích hlavních nosníků. Tuhost konstrukce je dále zajištěna i ztužením příčným. Vzhledem k absenci systému podélníků a příčníků se jedná se o tzv. most bez mostovky.

Délka hlavních nosníků:	8,84 m
Rozpětí:	8,20 m
Šířka:	3,54 m
Stavební výška:	1,05 m



Obr. 5: Pohled zdola na nosnou konstrukci



Hlavní nosníky

Trojice hlavních nosných prvků mostní konstrukce je tvořena plnostěnnými nýtovanými nosníky tvaru I. Všechny dosahují stejné maximální výšky 755 mm a jsou rozmístěny v osové vzdálenosti po 1422 mm. Pásnice tvoří dva nýtované plechy tloušťky 10 mm připojené ke stěně nosníku krčními úhelníky L90x10 mm. Nad úložným prahem a ve střední části mostu jsou obě pásnice zesíleny dalším plechem stejné tloušťky. Stojina byla vyrobena z plechu 12x695 mm.

Vodorovné ztužení

V blízkosti horní pásnice hlavních nosníků je v podélném směru konstrukce ztužena úhelníky L90x10 mm, které jsou připojeny nýty přes styčnickové plechy k horní přírubě.

Zavětrování probíhající v podélném směru při dolní pásnici je tvořeno soustavou plechů o konstantní šířce 80 mm a tloušťce 11 mm. Přípoje ke krajním hlavním nosníkům jsou také provedeny pomocí nýtů a styčnickových plechů.

Příčné ztužení

Rovnoměrně po délce hlavních nosníků v osových vzdálenostech 2,05 m se nachází ztužení příčné. To představuje uzavřená obdélníková soustava dvojic úhelníků typů L85x10 mm a L75x10 mm vyplněných křížícími se plechy tloušťky 8 mm a šířky 60 mm. I zde byly na přípoje použity nýty.

Ložiska

Na opěrách je konec každého hlavního nosníku opatřen ložiskem. Stejná ocelová desková kluzná ložiska jsou použita na celé konstrukci. Nosníky jsou takto uloženy po délce 530 mm. Tolerance pohybu v příčném směru je v každém ložisku celkem 25 mm a v podélném směru není posunu nijak bráněno.



Obr. 6: Ložisko



Obr. 7: Opěra O2



2.2.4. Spodní stavba

Spodní stavbu tvoří dvě železobetonové opěry O1 a O2, jejichž dřík je vysoký 4,00–4,40 m a široký 38,50 m. Starší část podpěr přísluší konstrukcím K1–K4 tvoří částečně i cihelné zdivo, které na O1 dosahuje do výšky 2,40 m a na O2 do výšky 2,60 m. Na dříku leží úložný práh, jehož výška je 0,65 m. Závěrná zídka je vysoká 1,30 m a široká 38,50 m.

U opěry O1 jsou obě křídla rovnoběžná, zatímco opěra O2 má rovnoběžné pravé křídlo a levé křídlo je šikmé. Levé rohy opěr jsou vyskládány z kamene.

Podél úložného prahu opěry O1 jsou vedeny nechráněné kabely.

2.2.5. Popis vybavení mostu

V koleji se nachází rýhované plechy tloušťky 5 mm upevněné vrtulemi na průběžných korýtkových profilech. Podlahy na chodnících jsou tvořeny ocelovými plechy s oválnými výstupky tloušťky 6 mm a jsou připevněny šrouby vpravo na mostnicích a vlevo na podlahových nosnících, které leží na horních pásnicích krajních nosníků konstrukcí K3 a K4.

Na levé straně vedle podlahových plechů vede kabelový žlab.



Obr. 8: Podlahové plechy a kabelový žlab



Podlahové nosníky

Počet:	10
Materiál:	dřevo
Rozměr:	240x145x2500 mm
Osová vzdálenost:	640–1230 mm



Obr. 9: Podlahové nosníky mezi konstrukcemi (zleva) K4 a K3

2.2.6. Popis prostorového uspořádání na objektu a pod ním

Osa koleje je vůči ose nosné konstrukce vychýlena cca o 490 mm vlevo ve směru staničení. U první dvojice mostnic byl naměřen rozdíl mezi těmito osami 470 mm a u poslední dvojice 510 mm. Z toho vyplývá levá šikmost této mostní konstrukce o velikosti přibližně 89,7°.

Volná výška:	4,14 m
Kolmá světlost:	7,60 m
Osová vzdálenost kolejí na K3 – K4:	4,71 m
Osová vzdálenost kolejí na K4 – K5:	4,75 m



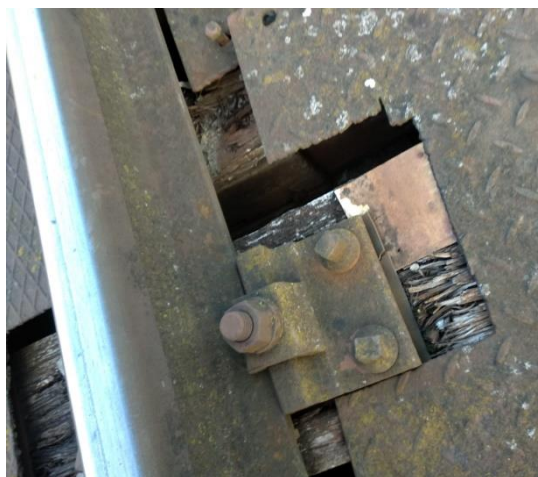
2.3. Popis poruch a závad

2.3.1. Mostní svršek

Ocelovou část svršku pokrývá korozní vrstva. Upevnění koleje je po celé délce mostu kompletní, jen část vrtulí je mírně uvolněna. Mnoho šroubů držící podlahové plechy je nedotažených a několik jich chybí. Některé mostnice jsou nahnílé a oslabené trhlinami. V nejhorším stavu je mostnice u opěry O2. Přílehlé kolejové lože je znečištěné a prorostlé vegetací.



Obr. 10: Uvolněná vrtule



Obr. 11: Poškozená mostnice u opěry O2

2.3.2. Nosná konstrukce

Na nosné konstrukci se již nenachází funkční vrstva protikorozní ochrany. Starý nátěr se odlupuje, a ocel tak koroduje na povrchu všech prvků včetně ložisek. Jedná se především o lokální poškození typu důlků, místy je konstrukce oslabena i o několik milimetrů, největší známky tohoto poškození vykazují styčnickové plechy. Na některých z nich je patrné zkroucení původního tvaru. V nejhorším stavu je plech připojující vodorovné ztužení na Obr. 12. Dolní ztužení je ve svislém směru viditelně prohnuté.



Obr. 12: Oslabený styčnickový plech u opěry O2



Obr. 13: Korodování nosné konstrukce (pohled z kraje opěry O1)



2.3.3. Spodní stavba

Závěrná zeď i dřík s úložným prahem jsou mírně zvětralé, na několika málo místech je dokonce viditelná výztuž. V cihelném zdivu se lokálně objevují kaverny. Betonem i zdivem vedou trhliny a povrch dříku je z velké části pokryt graffiti. V blízkosti K4 je spodní stavba v poměrně dobrém stavu s ohledem na celek. Výše popisované závady se nacházejí spíše pod jinými objekty tohoto mostu.



Obr. 14: Kaverny ve zdivu na opěře O2



Obr. 15: Zvětrání betonu na opěře O2

2.4. Návrh hodnocení stavebního stavu

Hodnocení nosné konstrukce K4:

stupeň 3

Důvody:

Koroze je rozšířená v celém rozsahu konstrukce. Důsledkem je lokální oslabení prvků. Některé mostnice jsou shnilé.

Hodnocení spodní stavby:

stupeň 2

Důvody:

Zdivo i beton jsou mírně zvětralé. Místy se objevují trhliny, vypadané cihly, někde je i obnažená výztuž.

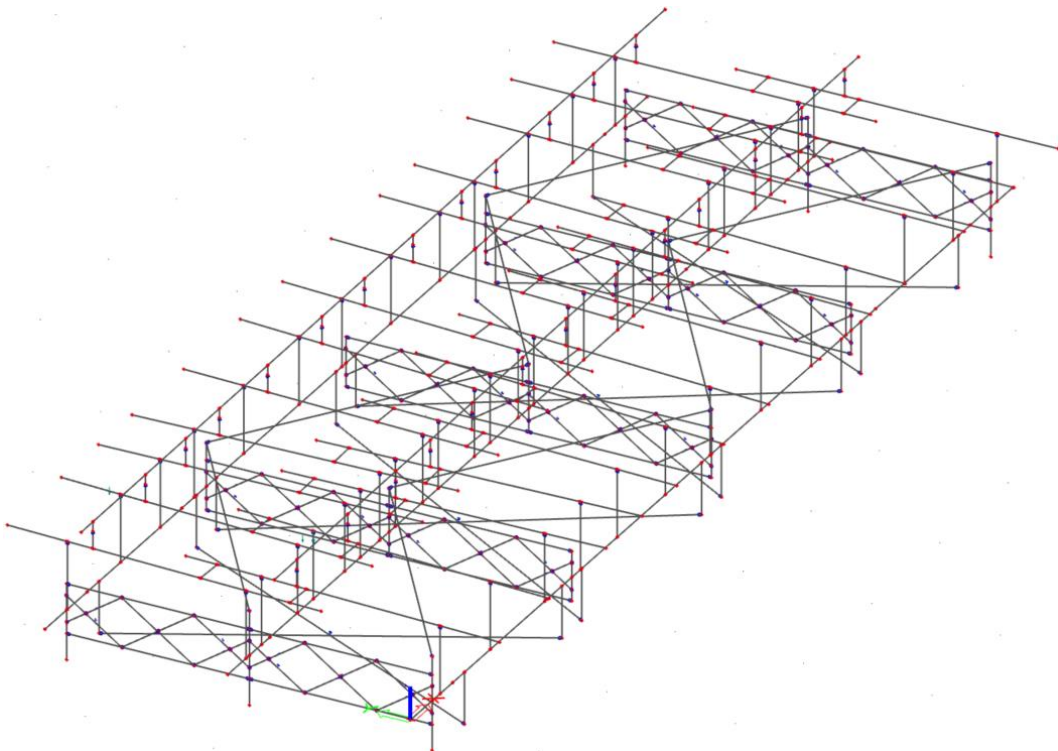


3. STATICKÝ MODEL

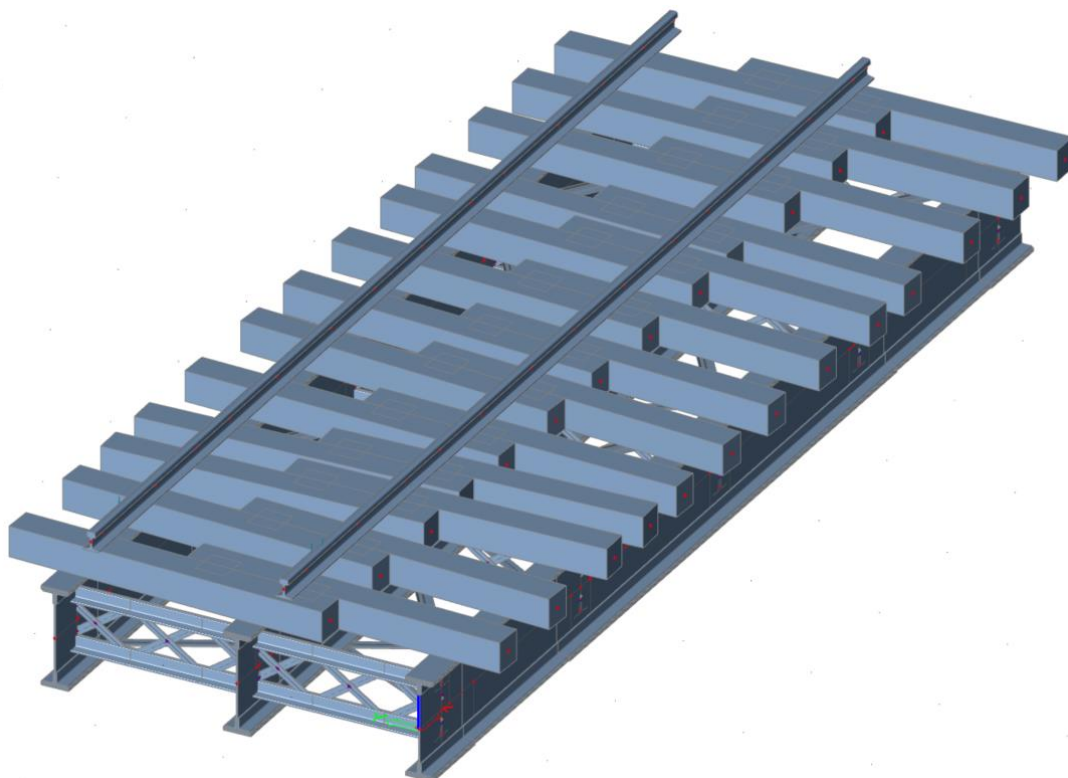
Pro tvorbu statického modelu byl zvolen výpočetní software Scia Engineer 18.1 a daná konstrukce byla idealizována prutovými prvky.

Model je tvořen hlavními nosníky, příčným i vodorovným ztužením, mostnicemi a kolejnicemi. Globální souřadný systém je volen rovnoběžně s hlavními nosnými prvky, přičemž osa x je orientována podle směru staničení. Podlahové nosníky a plechy jsou do výpočtu zahrnuty ostatním stálým zatížením. Reálné přípoje jsou nahrazeny zjednodušenými styky a s jejich hmotností se uvažuje v rezervě zatížení od vlastní tíhy. Ložiska jsou definována uzlem s odpovídajícím typem uložení. Excentricity styků vůči těžištvým osám jsou zavedeny fiktivními pruty, které jsou charakterizovány extrémní tuhostí průřezu a nulovou hmotností.

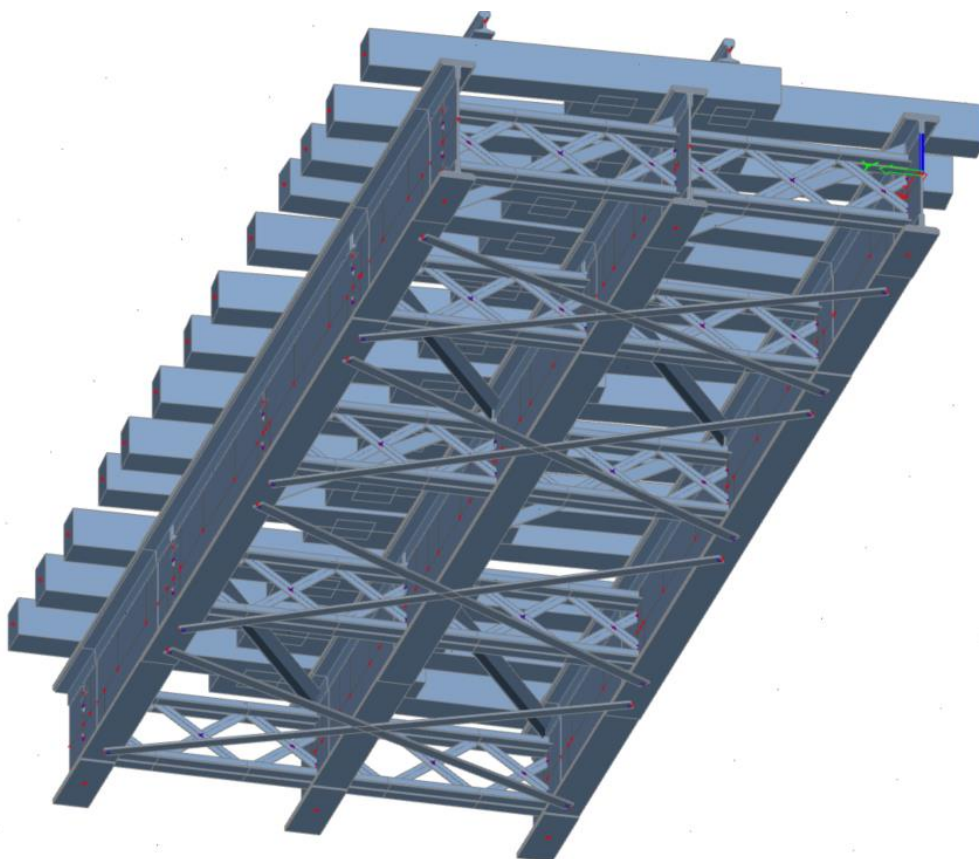
Jako podklad pro určení rozměrů prvků a stanovení jejich polohy nejprve sloužila archivní dokumentace související s daným mostem [3] a Protokol o podrobné prohlídce [2]. Tyto materiály však obsahovaly jen velmi málo informací, které by mohly sloužit k sestavení modelu, a byly tudíž brány spíše orientačně. Naprostá většina geometrie konstrukce vychází z vlastního měření. Z tohoto důvodu není možné vyloučit jisté nepřesnosti. Hlavní rozměry objektu jsou patrné z kapitoly 2.2. a příloh 1-5.



Obr. 16: Drátový 3D model



Obr. 17: 3D model s vykreslenými průřezy (pohled shora)



Obr. 18: 3D model s vykreslenými průřezy (pohled zdola)



3.1. Materiálové vlastnosti

Nosná konstrukce

Během prohlídky mostu byly provedeny tvrdoměrné zkoušky, které udávají mez pevnosti materiálu v rozmezí 420–450 MPa. Na základě těchto hodnot se lze domnívat, že konstrukce byla vyrobena ze svářkového železa, plávkové oceli, nebo z oceli S235. Zmíněné materiály mají podobné pevnostní vlastnosti, a není tedy možné je podle této zkoušky jednoznačně rozlišit.

Hlavním faktorem pro určení materiálu se tedy stalo stáří konstrukce. V Protokolu o podrobné prohlídce [2] byla sice zmíněna blíže nespecifikovaná oprava v roce 1966, ale protože o pouhých 10 let později vznikla projektová dokumentace na kompletní výměnu nosných konstrukcí [3], není pravděpodobný větší rozsah uvedené opravy. Projekt z této dokumentace [3] se však nikdy nerealizoval. Stávající konstrukce odpovídá výkresu starého stavu, který se výrazně liší od nově navrhovaných. Na základě těchto skutečností lze předpokládat, že most stále pochází z 2. poloviny 19. století, a tudíž bylo stanoveno materiálem hlavní nosné konstrukce svářkové železo, jehož parametry upravuje Metodický pokyn [1]. Modul pružnosti v tahu byl uvažován nižší než pro současné konstrukční oceli, u nichž odpovídá 210 GPa [4]. Z modulu pružnosti v tahu byla odvozena hodnota pro modul pružnosti ve smyku při užití Poissonova čísla $\nu = 0,3$ [4].

Dovolené namáhání σ_{adm} :	130 MPa
Zaručená mez kluzu f_y :	210 MPa
Mez pevnosti f_u :	340 MPa
Materiálový součinitel γ_{M0} :	1,10
Materiálový součinitel γ_{M1} :	1,20
Materiálový součinitel γ_{M2} :	1,30
Modul pružnosti v tahu E:	200 GPa
Modul pružnosti ve smyku G:	76,923 GPa

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} = \frac{200}{2 \cdot (1 + 0,3)} = 76,923 \text{ GPa} \quad [5]$$

Mostnice

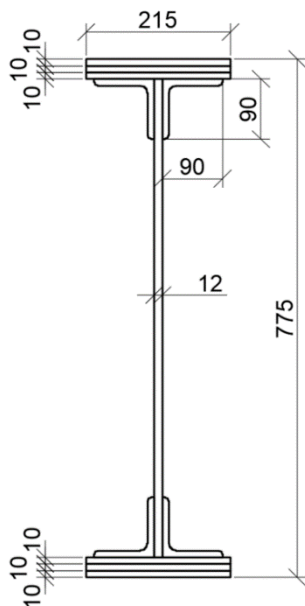
Není známo, jaký konkrétní druh dřeva byl použit na výrobu mostnic. Lze tedy očekávat využití bukového nebo dubového dřeva, které je pro tyto prvky obvyklé. Ve výpočtu je materiál mostnic reprezentován třídou pevnosti D40. Jeho vlastnosti jsou popsány v ČSN EN 338 [6].



3.2. Průřezy prvků konstrukce

Hlavní nosník

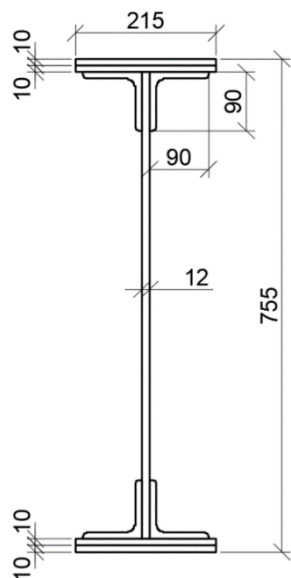
Pro hlavní nosník jsou definovány dva typy průřezů lišící se v tloušťce pásnic, přičemž ten zesílený se nachází v nadpodporových oblastech a ve střední části rozpětí. Součástmi průřezu jsou horní a dolní pásnice, stojina a krční úhelníky.



Obr. 19: Hlavní nosník (průřez 1)

Hlavní nosník (průřez 1)		
A	2,833E-02	m ²
I_y	2,916E-03	m ⁴
I_z	6,180E-05	m ⁴
i_y	320,8	mm
i_z	46,7	mm
W_{ely}	7,524E-03	m ³
W_{elz}	5,748E-04	m ³
I_t	1,066E-05	m ⁴
I_w	8,131E-06	m ⁶

Tabulka 1: Průřezové charakteristiky hlavního nosníku (průřezu 1)



Obr. 20: Hlavní nosník (průřez 2)

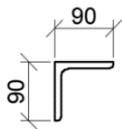
Hlavní nosník (průřez 2)		
A	2,403E-02	m ²
I_y	2,286E-03	m ⁴
I_z	4,523E-05	m ⁴
i_y	308,4	mm
i_z	43,4	mm
W_{ely}	6,057E-03	m ³
W_{elz}	4,208E-04	m ³
I_t	5,765E-06	m ⁴
I_w	5,773E-06	m ⁶

Tabulka 2: Průřezové charakteristiky hlavního nosníku (průřezu 2)



Horní vodorovné ztužení

Ztužení probíhající v blízkosti horní pásnice je tvořeno rovnoramennými úhelníky L90x10 mm.



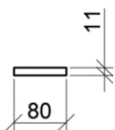
Obr. 21: Průřez horního ztužení

Horní ztužení		
A	1,713E-03	m ²
I _y	1,269E-06	m ⁴
I _z	1,269E-06	m ⁴
i _y	27,2	mm
i _z	27,2	mm
W _{ely}	1,441E-05	m ³
W _{elz}	3,162E-05	m ³
I _t	6,015E-08	m ⁴
I _w	2,951E-11	m ⁶

Tabulka 3: Průřezové charakteristiky horního vodorovného ztužení

Dolní vodorovné ztužení

Na vodorovné zavětrování nacházející se pod dolní pásnicí byly využity plechy 11x80 mm.



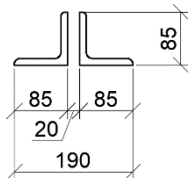
Obr. 22: Průřez dolní ztužení

Dolní ztužení		
A	8,800E-04	m ²
I _y	8,873E-09	m ⁴
I _z	4,693E-07	m ⁴
i _y	3,2	mm
i _z	23,1	mm
W _{ely}	1,613E-06	m ³
W _{elz}	1,173E-05	m ³
I _t	3,226E-08	m ⁴
I _w	4,233E-12	m ⁶

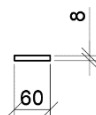
Tabulka 4: Průřezové charakteristiky dolního vodorovného ztužení

Příčné ztužení

Příčné ztužení tvoří dva průřezy. Horní a dolní pas se skládá ze dvou úhelníků L85x10 mm. Diagonály probíhající mezi těmito pasy jsou vyrobeny z plechů 60x8 mm.



Obr. 23: Průřez pasů příčného ztužení



Obr. 24: Průřez diagonál příčného ztužení



Příčné ztužení - pasy		
A	3,222E-03	m ²
I_y	2,123E-06	m ⁴
I_z	5,981E-06	m ⁴
i_y	25,7	mm
i_z	43,1	mm
W_{ely}	3,515E-05	m ³
W_{elz}	6,296E-05	m ³
I_t	1,109E-07	m ⁴
I_w	6,904E-10	m ⁶

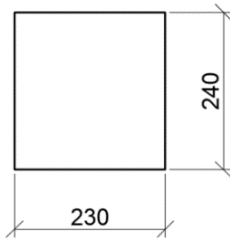
Tabulka 5: Průřezové charakteristiky pasu příčného ztužení

Příčné ztužení - diagonály		
A	4,800E-04	m ²
I_y	2,560E-09	m ⁴
I_z	1,440E-07	m ⁴
i_y	2,3	mm
i_z	17,3	mm
W_{ely}	6,400E-07	m ³
W_{elz}	4,800E-06	m ³
I_t	9,322E-09	m ⁴
I_w	6,819E-13	m ⁶

Tabulka 6: Průřezové charakteristiky diagonály příčného ztužení

Mostnice

Mostnice byly vytvořeny z obdélníkového průřezu příslušných rozměrů.



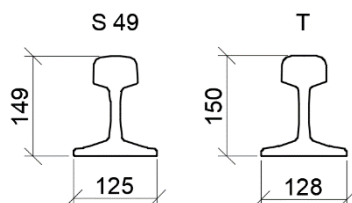
Obr. 25: Průřez mostnic

Mostnice		
A	5,520E-02	m ²
I_y	2,650E-04	m ⁴
I_z	2,433E-04	m ⁴
i_y	69,3	mm
i_z	66,4	mm
W_{ely}	2,208E-03	m ³
W_{elz}	2,116E-03	m ³
I_t	4,274E-04	m ⁴
I_w	2,315E-08	m ⁶

Tabulka 7: Průřezové charakteristiky mostnice

Kolejnice

Průřezy kolejnic odpovídají jejich skutečným tvarům.



Obr. 26: Průřez kolejnic S 49 a T

Kolejnice S 49 a T			
A	6,184E-03	6,360E-03	m ²
I_y	1,784E-05	1,870E-05	m ⁴
I_z	3,075E-06	3,304E-06	m ⁴
i_y	53,7	54,2	mm
i_z	22,3	22,8	mm
W_{ely}	2,331E-04	2,426E-04	m ³
W_{elz}	4,920E-05	5,163E-05	m ³
I_t	1,689E-06	1,706E-06	m ⁴
I_w	7,812E-09	8,529E-09	m ⁶

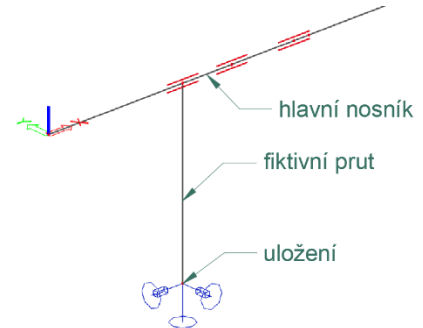
Tabulka 8: Průřezové charakteristiky kolejnic



3.3. Uložení a styčníky nosné konstrukce

Hlavní nosníky

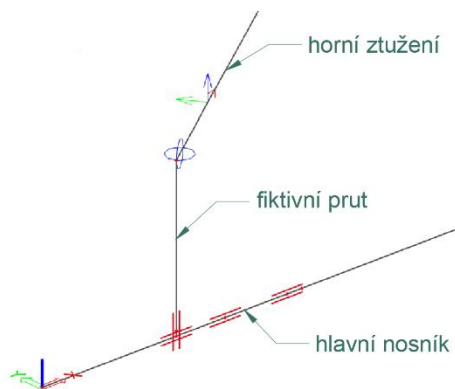
Styky hlavních nosníků v oblastech měnících se průřezů jsou dokonale tuhé. Jejich uložení na ložiska je modelováno kloubem tuhým ve svislém směru a pružným ve vodorovných směrech. Iteračním postupem byla na základě posunů od zatížení odhadnuta náhradní tuhost v podélném směru $k_x = 30 \text{ MN/m}$ a v příčném $k_y = 20 \text{ MN/m}$. Uložení se nachází na úrovni dolní hrany pásnice, tudíž je pomocí fiktivního prutu odsazeno o $e = -387,5 \text{ mm}$ od těžišťových os hlavních nosníků. Pro všechny nosníky na obou opěrách je toto uložení stejné.



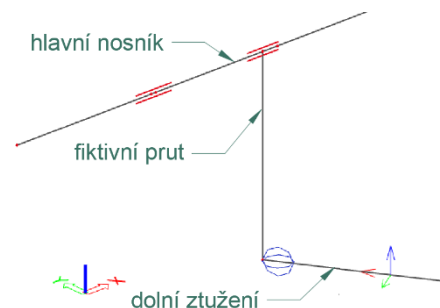
Obr. 27: Uložení hlavních nosníků

Horní ztužení

Horní vodorovné zavětrování je ve skutečnosti vedeno pod horní pásnicí. Pod krčným úhelníkem se nachází ještě styčníkový plech a pod ním teprve probíhají ztužující úhelníky. Styky jsou proto vytvořeny s odpovídající svislou excentricitou $e = 342,5 \text{ mm}$ provedenou fiktivním prutem. Těžišťová osa úhelníků leží ještě $30,8 \text{ mm}$ pod tímto přípojem, který umožňuje natočení ve směru lokálních os y a z .



Obr. 28: Styk horního ztužení



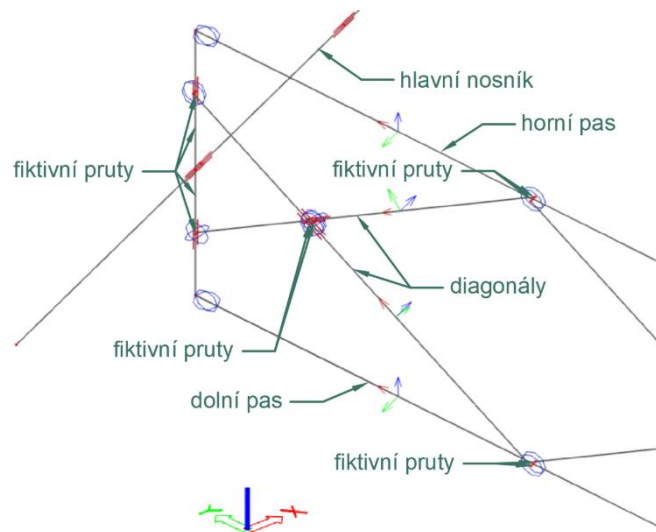
Obr. 29: Přípoj dolního ztužení

Dolní ztužení

Ztužení při dolní přírubě využívá také fiktivních prutů pro dosažení svislé excentricity $e = -404,0 \text{ mm}$. Ta udává vzdálenost mezi těžišťovými osami hlavních nosníků a plechů tvořící dolní ztužení, jež vedou pod styčníkovými plechy umístěnými pod dolní pásnicí. Zavětrování, křížící se ve střední části konstrukce, není propojeno vzájemně ani se středním hlavním nosníkem. Přípoj ke krajním nosníkům je definovaný stejně jako pro horní ztužení.

**Příčné ztužení**

Pasy ztužení i diagonály jsou k hlavnímu nosníku připojeny pomocí fiktivních prutů, které jim umožňují natočení kolem jejich lokálních os y a z . Těžiště horního pasu leží ve vzdálenosti $e = 202,9$ mm od těžiště hlavních nosníků a těžiště dolního pasu ztužení je od těžiště hlavních nosníků odsazeno o $e = -182,9$ mm. Připoje diagonál v místě křížení jejich středů umožňují také pootočení kolem jejich lokálních os y a z . Nejvíce sporný styk je přípoj mezi diagonálami a pasy.



Obr. 30: Styky příčného ztužení

V rovině ztužení je pootočení umožněno, ale ve směru z roviny diagonál není styk ani jednoznačný kloub, ani vetknutí. Pasy jsou vůči diagonálám tužším prvkem, nicméně nedosahují tak výrazné tuhosti, aby bylo možné je považovat za dokonalé vetknutí. Navíc tvoří tento přípoj pouze jeden nýt a diagonály, které se nepřekrývají po celé výšce pasu, se mohou pootočit i lokálně v prostoru mezi úhelníky. Byly proto vytvořeny dva modely s těmito extrémními typy uložení. Výpočet ověřil, že se nejedná o tak klíčový styk, aby došlo k významnému přerozdělení vnitřních sil. Jejich rozptyl je uveden v Tabulce 9, kde značení průřezů odpovídá průřezům vybraným pro výpočet zatížitelnosti. V konečném modelu bylo v tomto místě a směru zvolené vetknutí, protože vyvolává o něco větší síly v hlavních nosných prvcích.

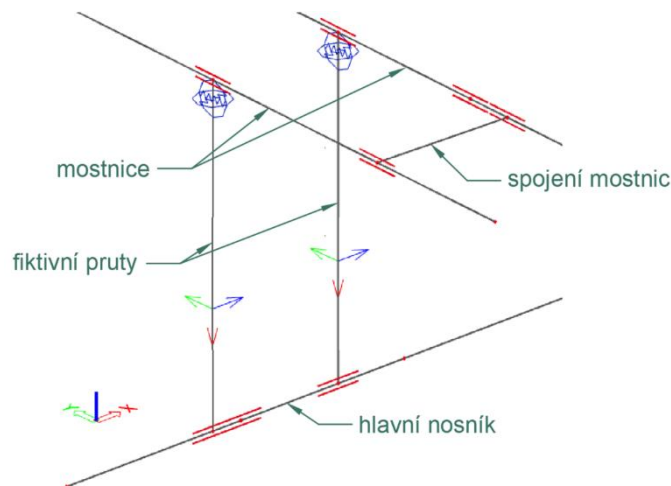
Průřez	Vetknutí		Kloub	
	N_{Ed}		N_{Ed}	
1	N_{Ed}	128,581 kN	N_{Ed}	128,558 kN
	V_{Ed}	-35,725 kN	V_{Ed}	-35,748 kN
	$M_{y,Ed}$	1291,748 kNm	$M_{y,Ed}$	1291,696 kNm
	$M_{z,Ed}$	12,333 kNm	$M_{z,Ed}$	12,329 kNm
2	V_{Ed}	-805,262 kN	V_{Ed}	-805,237 kN
3	N_{Ed}	125,193 kN	N_{Ed}	125,206 kN
4	N_{Ed}	-118,968 kN	N_{Ed}	-118,938 kN
5	N_{Ed}	42,081 kN	N_{Ed}	42,039 kN
6	N_{Ed}	-34,686 kN	N_{Ed}	-34,543 kN
7	N_{Ed}	-171,798 kN	N_{Ed}	-171,729 kN
8	N_{Ed}	-69,433 kN	N_{Ed}	-69,223 kN

Tabulka 9: Vnitřní síly při různých stycích příčného ztužení



Mostnice

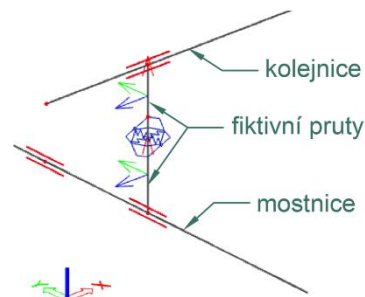
Mostnice jsou uloženy na horních pásnicích hlavních nosníků a je jim umožněno natočení kolem lokálních os fiktivního prutu x a z . Ve svislém směru jsou podepřeny tuze a ve vodorovných směrech pružně s odhadnutou náhradní tuhostí dle posunů od zatížení $k_y = k_z = 5 \text{ MN/m}$. Hodnota excentricity přípoje je zde $e = 527,5 \text{ mm}$. Vzájemné propojení dvojic mostnic vodorovným šroubem je modelováno jako tuhé prutem, jehož parametry odpovídají průřezovým i materiálovým charakteristikám ostatních mostnic.



Obr. 31: Řešení přípoje mostnic

Kolejnice

Mezi mostnicemi a kolejnicemi jsou umístěny dva svislé fiktivní pruty spojující jejich těžiště, jež se stýkají v místě paty kolejnice, kde se nachází i její skutečný přípoj. Vzdálenost mezi těžištěm mostnice a patou kolejnice odpovídá $e = 135 \text{ mm}$ a těžiště kolejnice je umístěno ještě o $e = 73,3 \text{ mm}$ výše. V místě styku je uvažováno s možným natočením kolem os x a y lokálního souřadného systému fiktivních prutů a s pružným podepřením ve vodorovných směrech o zvolených tuhostech $k_x = k_y = 15 \text{ MN/m}$. Stanovení těchto tuhostí probíhalo opět na základě posunů ve styku od zatížení definovaného pro tento model.



Obr. 32: Uložení kolejnic



3.4. Zatěžovací stavy

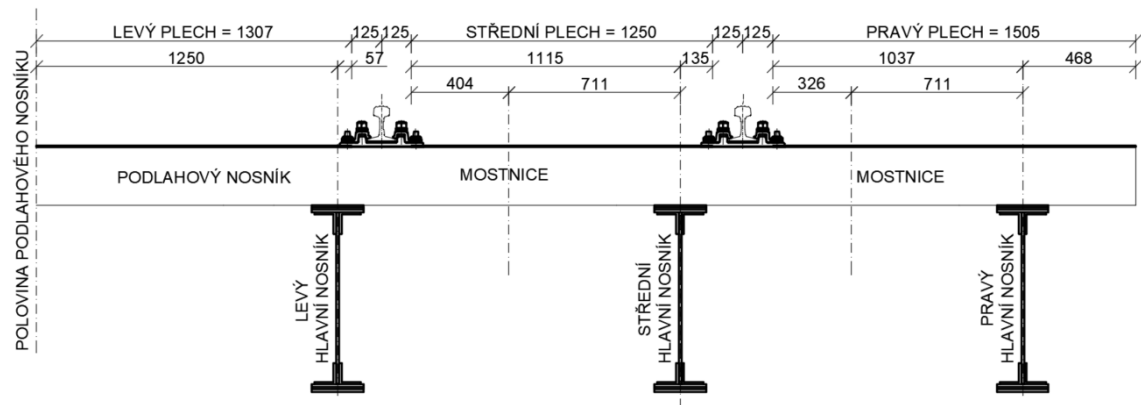
3.4.1. Zatížení stálá

Vlastní tíha

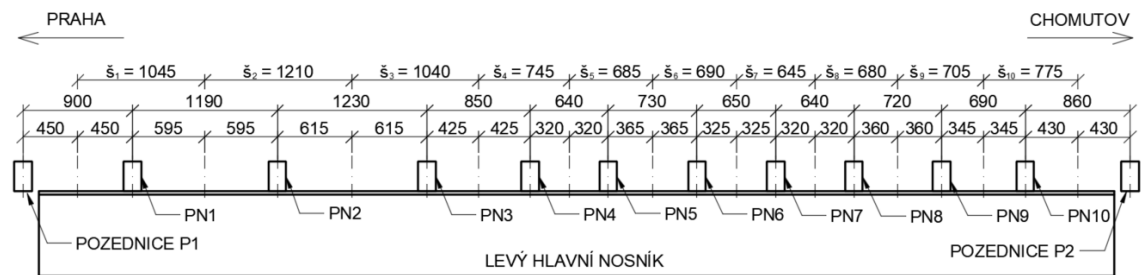
Tíha hlavních nosníků, vodorovného i příčného ztužení, mostnic a kolejnic je započítána softwarem Scia Engineer 18.1. Přípoje jsou zahrnuty ve 20% rezervě tíhy výše uvedených prvků, jež je vyjádřena součinitelem zatížení γ_G .

Ostatní stálé zatížení

Zatížení od podlahových nosníků a plechů bylo převedeno na osamělé síly, spojité zatížení a momenty, které působí na jednotlivé hlavní nosníky.



Obr. 33: Schéma rozmístění podlahových plechů v příčném řezu



Obr. 34: Schéma rozložení podlahových nosníků na levém nosníku

Levý hlavní nosník

$$F_{In, pn} = \gamma_d \cdot b \cdot h \cdot L$$

$$F_{In, pn} = 6,6 \cdot 0,24 \cdot 0,145 \cdot 1,25$$

$$F_{In, pn} = 0,287 \text{ kN}$$

$$M_{In, pn} = F_{In, pn} \cdot r_{In, pn}$$

$$M_{In, pn} = 0,287 \cdot 0,625$$

$$M_{In, pn} = 0,179 \text{ kNm}$$



$$F_{In,p} = \gamma_a \cdot d_1 \cdot t_1 \cdot \check{s}$$

$$F_{In,p,1} = 78,5 \cdot 1,307 \cdot 0,006 \cdot 1,045$$

$$F_{In,p,1} = 0,643 \text{ kN}$$

$$F_{In,p,2} = 78,5 \cdot 1,307 \cdot 0,006 \cdot 1,210$$

$$F_{In,p,2} = 0,745 \text{ kN}$$

$$F_{In,p,3} = 78,5 \cdot 1,307 \cdot 0,006 \cdot 1,04$$

$$F_{In,p,3} = 0,640 \text{ kN}$$

$$F_{In,p,4} = 78,5 \cdot 1,307 \cdot 0,006 \cdot 0,745$$

$$F_{In,p,4} = 0,459 \text{ kN}$$

$$F_{In,p,5} = 78,5 \cdot 1,307 \cdot 0,006 \cdot 0,685$$

$$F_{In,p,5} = 0,422 \text{ kN}$$

$$F_{In,p,6} = 78,5 \cdot 1,307 \cdot 0,006 \cdot 0,690$$

$$F_{In,p,6} = 0,425 \text{ kN}$$

$$F_{In,p,7} = 78,5 \cdot 1,307 \cdot 0,006 \cdot 0,645$$

$$F_{In,p,7} = 0,397 \text{ kN}$$

$$F_{In,p,8} = 78,5 \cdot 1,307 \cdot 0,006 \cdot 0,680$$

$$F_{In,p,8} = 0,419 \text{ kN}$$

$$F_{In,p,9} = 78,5 \cdot 1,307 \cdot 0,006 \cdot 0,705$$

$$F_{In,p,9} = 0,434 \text{ kN}$$

$$F_{In,p,10} = 78,5 \cdot 1,307 \cdot 0,006 \cdot 0,775$$

$$F_{In,p,10} = 0,477 \text{ kN}$$

$$M_{In} = F_{In,pn} \cdot r_{In,pp}$$

$$M_{In,p,1} = 0,643 \cdot 0,597$$

$$M_{In,p,1} = 0,384 \text{ kNm}$$

$$M_{In,p,2} = 0,745 \cdot 0,597$$

$$M_{In,p,2} = 0,445 \text{ kNm}$$

$$M_{In,p,3} = 0,640 \cdot 0,597$$

$$M_{In,p,3} = 0,382 \text{ kNm}$$

$$M_{In,p,4} = 0,459 \cdot 0,597$$

$$M_{In,p,4} = 0,274 \text{ kNm}$$

$$M_{In,p,5} = 0,422 \cdot 0,597$$

$$M_{In,p,5} = 0,252 \text{ kNm}$$

$$M_{In,p,6} = 0,425 \cdot 0,597$$

$$M_{In,p,6} = 0,254 \text{ kNm}$$

$$M_{In,p,7} = 0,397 \cdot 0,597$$

$$M_{In,p,7} = 0,237 \text{ kNm}$$

$$M_{In,p,8} = 0,419 \cdot 0,597$$

$$M_{In,p,8} = 0,250 \text{ kNm}$$

$$M_{In,p,9} = 0,434 \cdot 0,597$$

$$M_{In,p,9} = 0,259 \text{ kNm}$$

$$M_{In,p,10} = 0,477 \cdot 0,597$$

$$M_{In,p,10} = 0,285 \text{ kNm}$$

$$F_{In,1} = 0,643 + 0,287 = \mathbf{0,930 \text{ kN}}$$

$$F_{In,2} = 0,745 + 0,287 = \mathbf{1,032 \text{ kN}}$$

$$F_{In,3} = 0,640 + 0,287 = \mathbf{0,927 \text{ kN}}$$

$$F_{In,4} = 0,459 + 0,287 = \mathbf{0,746 \text{ kN}}$$

$$F_{In,5} = 0,422 + 0,287 = \mathbf{0,709 \text{ kN}}$$

$$F_{In,6} = 0,425 + 0,287 = \mathbf{0,712 \text{ kN}}$$

$$F_{In,7} = 0,397 + 0,287 = \mathbf{0,684 \text{ kN}}$$

$$M_{In,1} = 0,384 + 0,179 = \mathbf{0,563 \text{ kNm}}$$

$$M_{In,2} = 0,445 + 0,179 = \mathbf{0,624 \text{ kNm}}$$

$$M_{In,3} = 0,382 + 0,179 = \mathbf{0,561 \text{ kNm}}$$

$$M_{In,4} = 0,274 + 0,179 = \mathbf{0,453 \text{ kNm}}$$

$$M_{In,5} = 0,252 + 0,179 = \mathbf{0,431 \text{ kNm}}$$

$$M_{In,6} = 0,254 + 0,179 = \mathbf{0,433 \text{ kNm}}$$

$$M_{In,7} = 0,237 + 0,179 = \mathbf{0,416 \text{ kNm}}$$



$$F_{In,8} = 0,419 + 0,287 = \mathbf{0,706 \text{ kN}}$$

$$M_{In,8} = 0,250 + 0,179 = \mathbf{0,429 \text{ kNm}}$$

$$F_{In,9} = 0,434 + 0,287 = \mathbf{0,721 \text{ kN}}$$

$$M_{In,9} = 0,259 + 0,179 = \mathbf{0,438 \text{ kNm}}$$

$$F_{In,10} = 0,477 + 0,287 = \mathbf{0,764 \text{ kN}}$$

$$M_{In,10} = 0,285 + 0,179 = \mathbf{0,464 \text{ kNm}}$$

$$f_{In} = \gamma_a \cdot d_2 \cdot t_2$$

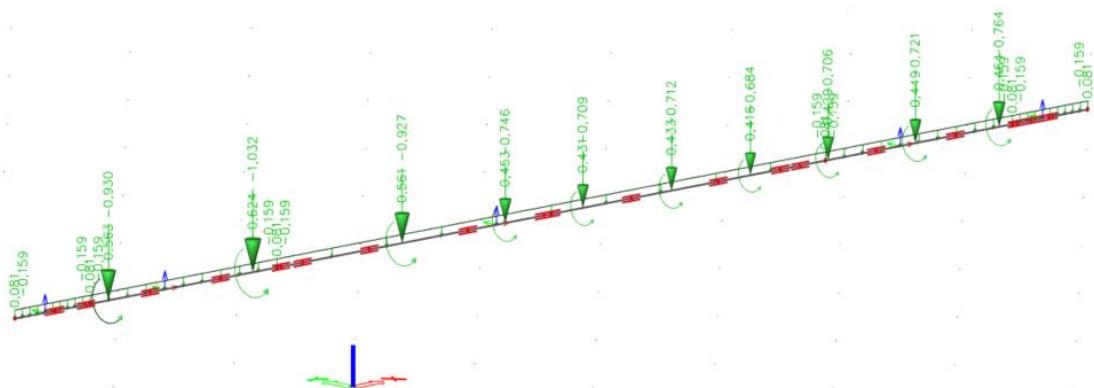
$$m_{In} = f_{In} \cdot r_{In,2}$$

$$f_{In} = 78,5 \cdot 0,404 \cdot 0,005$$

$$m_{In} = 0,159 \cdot 0,509$$

$$f_{In} = \mathbf{0,159 \text{ kN/m}}$$

$$m_{In} = \mathbf{0,081 \text{ kNm/m}}$$



Obr. 35: Zatížení levého nosníku podlahovými nosníky a plechy

Střední hlavní nosník

$$f_{sn,1} = \gamma_a \cdot d_3 \cdot t_2$$

$$m_{sn,1} = f_{sn,1} \cdot r_{sn,1}$$

$$f_{sn,1} = 78,5 \cdot (0,711 + 0,135) \cdot 0,005$$

$$m_{sn,1} = 0,332 \cdot 0,288$$

$$f_{sn,1} = 0,332 \text{ kN/m}$$

$$m_{sn,1} = 0,096 \text{ kNm/m}$$

$$f_{sn,2} = \gamma_a \cdot d_4 \cdot t_1$$

$$m_{sn,2} = f_{sn,2} \cdot r_{sn,2}$$

$$f_{sn,2} = 78,5 \cdot 0,326 \cdot 0,006$$

$$m_{sn,2} = 0,154 \cdot 0,548$$

$$f_{sn,2} = 0,154 \text{ kN/m}$$

$$m_{sn,2} = 0,084 \text{ kNm/m}$$

$$f_{sn} = f_{sn,1} + f_{sn,2}$$

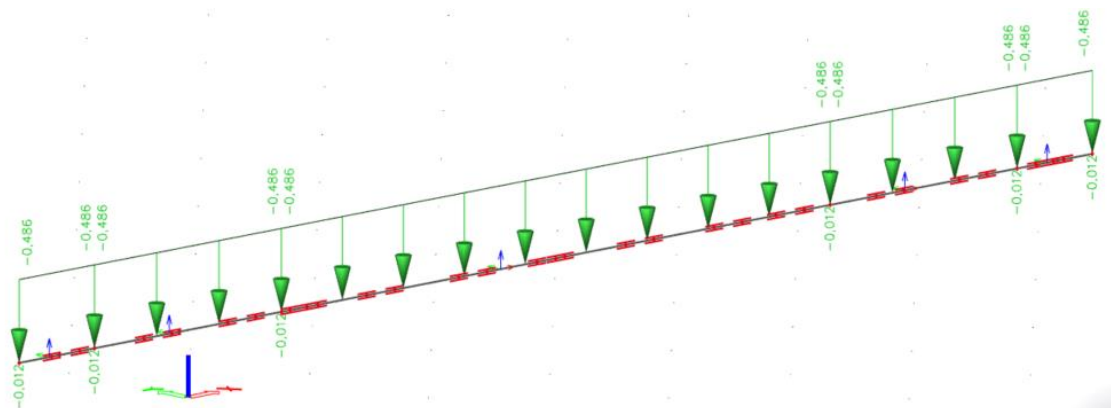
$$m_{sn} = m_{sn,1} - m_{sn,2}$$

$$f_{sn} = 0,332 + 0,154$$

$$m_{sn} = 0,096 - 0,084$$

$$f_{sn} = \mathbf{0,486 \text{ kN/m}}$$

$$m_{sn} = \mathbf{0,012 \text{ kN/m}}$$



Obr. 36: Ostatní stálé zatížení působící na střední nosník

Pravý nosník

$$f_{pn} = \gamma_a \cdot d_5 \cdot t_1$$

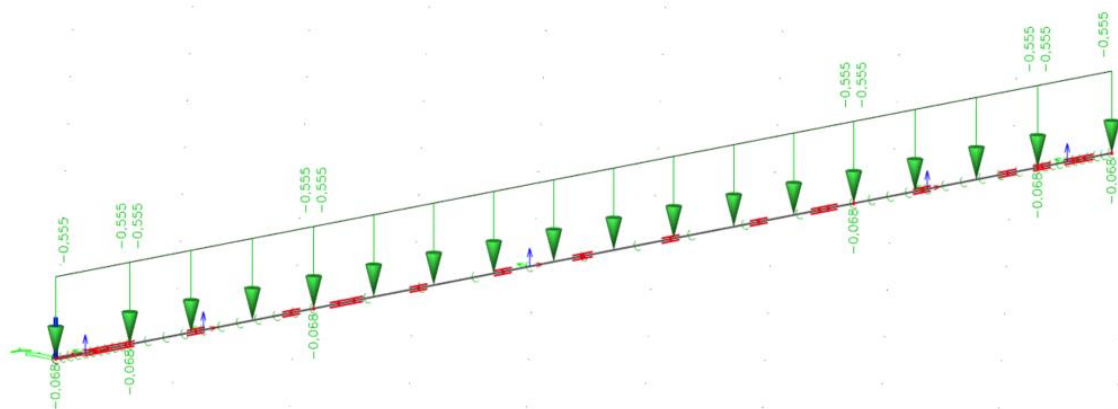
$$f_{pn} = 78,5 \cdot (0,711 + 0,468) \cdot 0,006$$

$$f_{pn} = \mathbf{0,555 \text{ kN/m}}$$

$$m_{pn} = f_{pn} \cdot r_{pn}$$

$$m_{pn} = 0,555 \cdot 0,122$$

$$m_{pn} = \mathbf{0,068 \text{ kNm/m}}$$



Obr. 37: Zatížení pravého nosníku od podlahových plechů

3.4.2. Zatížení dopravou³

Excentricita

Protože proměnná svislá zatížení nemusí v důsledku nerovnoměrně rozloženého nákladu působit v příčném směru v ideální poloze, zavádí se do výpočtu s následující excentricitou.

³ Tato kapitola vychází z normy ČSN EN 1991-2 [7]



$q_{v1}, q_{v2}, Q_{v1}, Q_{v2}$ = rovnoměrné zatížení a osamělé síly

$q_{v1} + q_{v2}, Q_{v1} + Q_{v2}$ = zatížení LM71

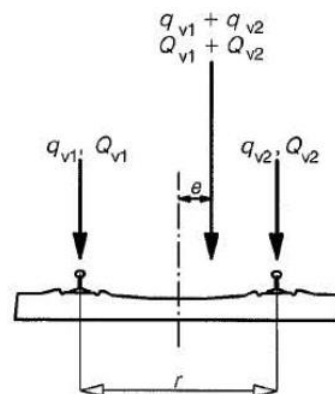
$$\frac{q_{v2}}{q_{v1}}, \frac{Q_{v2}}{Q_{v1}} \leq 1,25$$

$$e \leq \frac{r}{18}$$

r = příčná vzdálenost mezi kolejovými zatíženími

$$r = 1500 \text{ mm}$$

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



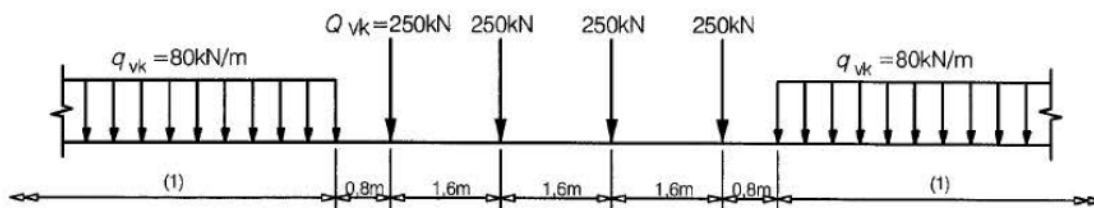
Obr. 38: Excentricita svislých proměnných zatížení [7]

Z důvodu, že kolej v tomto případě neleží nad těžišťovou osou nosné konstrukce, se předpokládá, že větší účinky vyvolá excentricita uvažovaná ve stejném směru jako vychýlení koleje.

LM71

Zatížení od vlaku je zde reprezentováno modelem LM71. Jedná se o sestavu spojitých zatížení a osamělých nápravových sil.

Aby bylo možné určit nejnepříznivější polohy zatížení, které vyvolají největší účinky na konstrukci, je ve statickém softwaru využita funkce pohyblivého zatížení. Poloviční hodnoty zatížení definovaného na Obr. 39 tak působí na jednotlivé kolejnice s danou excentricitou $e = 83 \text{ mm}$.



Obr. 39: Zatěžovací schéma modelu LM71 [7]

Rozjezdové síly

Rozjezdové i brzdné síly jsou modelovány rovnoměrným zatížením, které je vedeno v podélném směru v úrovni temene kolejnic. Velikost rozjezdových sil se zavádí 33 kN/m. Výsledná síla je však shora omezena hodnotou 1000 kN.

$$Q_{lak} = 33 \cdot L_{a,b} \leq 1000 \text{ kN}$$

$$Q_{lak} = 33 \cdot 8,2 = 270,6 \text{ kN} \leq 1000 \text{ kN}$$

$$Q_{lak} = 33 \text{ kN/m}$$



Brzdné síly

Výchozí hodnota brzdných sil pro model LM71 je 20 kN/m. Maximální vyvolaná síla smí být nejvýše 6000 kN.

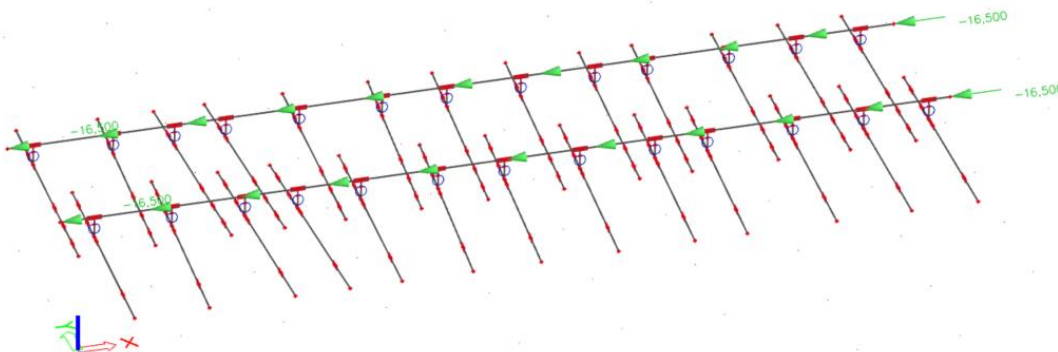
$$Q_{l_{bk}} = 20 \cdot L_{a,b} \leq 6000 \text{ kN}$$

$$Q_{l_{bk}} = 20 \cdot 8,2 = 164,0 \text{ kN} \leq 6000 \text{ kN}$$

$$Q_{l_{bk}} = 20 \text{ kN/m}$$

Z důvodu, že je vyloučené společné působení obou zatížení najednou, jsou ve statickém modelu uvažovány jen rozjezdové síly, které vyvolávají větší účinky.

Celková hodnota zatížení 33 kN/m se rozdělí rovnoměrně mezi obě kolejnice.

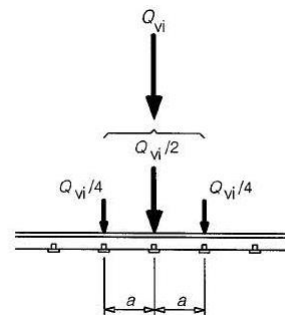


Obr. 40: Zatížení rozjezdovými silami

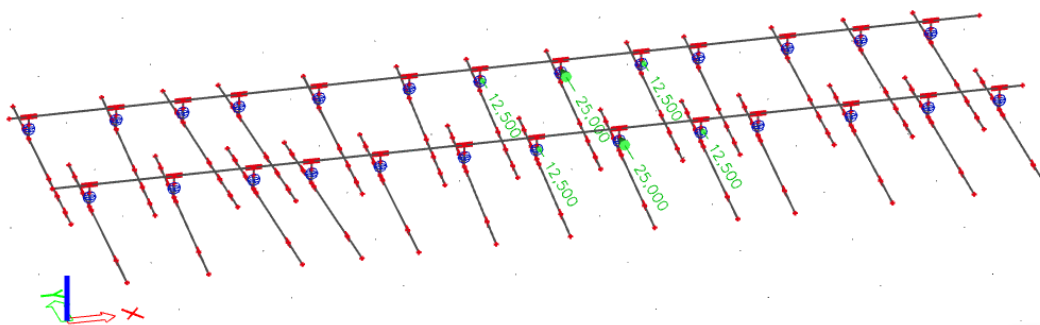
Boční ráz

Boční ráz představuje zatížení osamělou silou o velikosti 100 kN působící v úrovni temene kolejnic kolmo na jejich osu.

V tomto případě byl pro umístění zatížení zvolen postup, který upravuje Metodický pokyn [1]. Zatížení je možné rozložit do tří sousedících kolejnicových podpor v poměru dle Obr. 41. Bylo tak vytvořeno celkem 22 zatěžovacích stavů rozmístěných po celém mostě působících v obou směrech.



Obr. 41: Podélný roznos zatížení [7]



Obr. 42: Boční ráz (příklad jednoho zatěžovacího stavu)



3.4.3. Zatížení větrem⁴

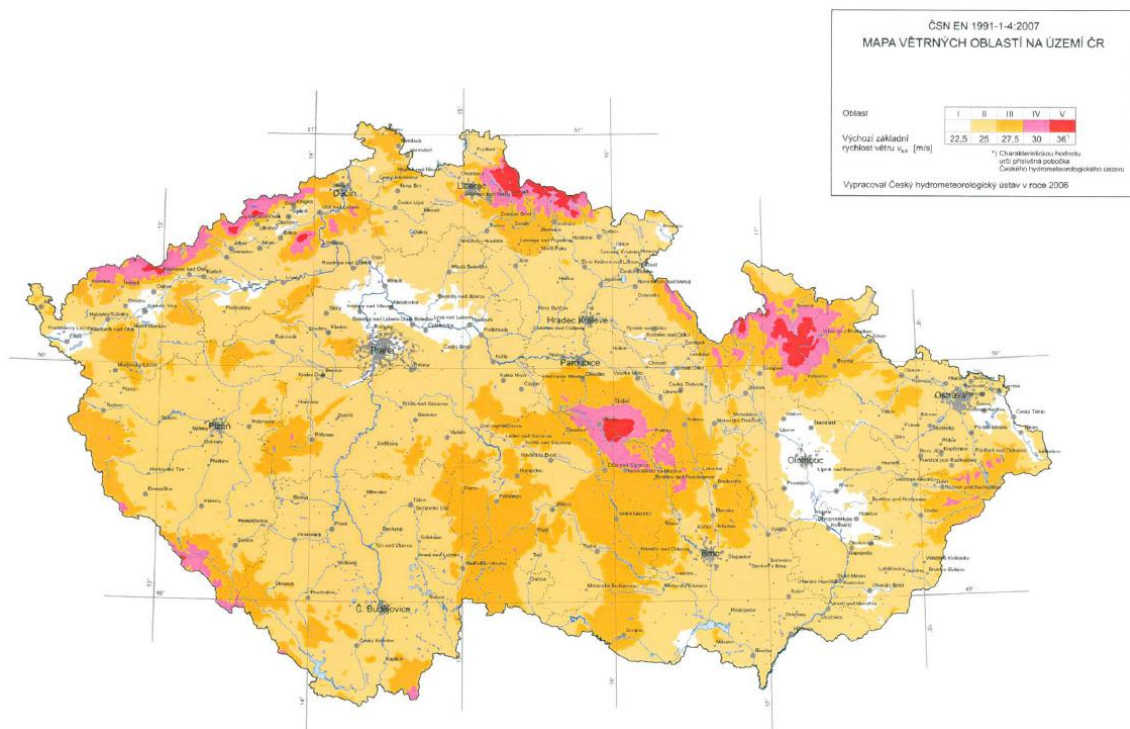
Dalším významným proměnným zatížením jsou pro tento most účinky větru. Z důvodu obklopení konstrukce K4 dalšími objekty z obou stran, se předpokládá, že horizontálně toto zatížení působí ve směrech rovnoběžných a kolmých na osu koleje pouze nad nosnou konstrukcí.

Kategorie terénu	z ₀ [m]	Z _{min} [m]
0 Moře nebo pobřežní oblasti vystavené otevřenému moři	0,003	1
I Jezera nebo vodorovné oblasti se zanedbatelnou vegetací a bez překážek	0,01	1
II Oblasti s nízkou vegetací jako je tráva a s izolovanými překážkami (stromy, budovy), jejichž vzdálenost je větší než 20násobek výšky překážek	0,05	2
III Oblasti rovnoměrně pokryté vegetací nebo budovami nebo s izolovanými překážkami, jejichž vzdálenost je maximálně 20násobek výšky překážek (jako jsou vesnice, předměstský terén, souvislý les)	0,3	5
IV Oblasti, ve kterých je nejméně 15 % povrchu pokryto pozemními stavbami, jejichž průměrná výška je větší než 15 m	1,0	10

POZNÁMKA Kategorie terénu jsou zobrazeny v A.1.

Obr. 43: Kategorie terénů a jejich parametry [8]

Kategorie terénu: III



Obr. 44: Mapa větrných oblastí na území ČR [8]

⁴ Účinky zatížení větrem jsou v souladu s normou ČSN EN 1991-1-4 [8].



Větrná oblast: III

Výchozí základní rychlost větru: $v_{b,0} = 27,5$ m/s

Součinitel směru větru: $c_{dir} = 1,0$

Součinitel ročního období: $c_{season} = 1,0$

Měrná hmotnost vzduchu: $\rho = 1,25$ kg/m³

Základní rychlost větru:

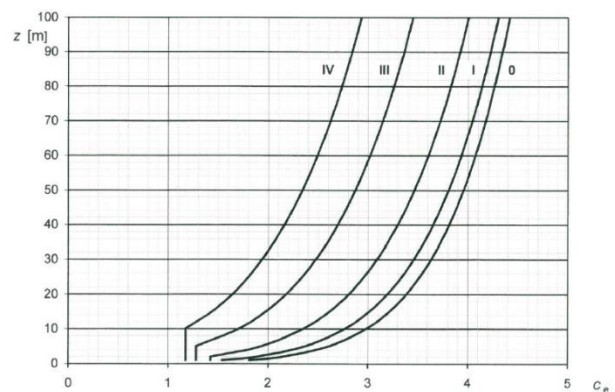
$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0}$$

$$v_b = 1,0 \cdot 1,0 \cdot 27,5$$

$$v_b = 27,5 \text{ m/s}$$

Součinitel expozice:

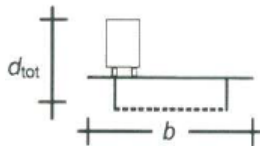
$$c_e = 1,6$$



Obr. 45: Graf pro stanovení součinitele expozice [8]

Zatížení od větru v příčném směru:

Součinitel síly:

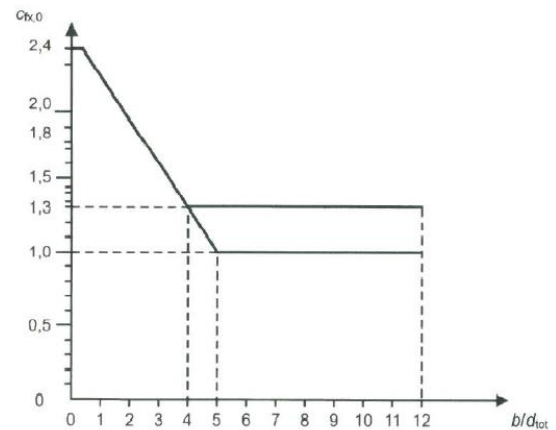


Obr. 46: Parametry b a d_{tot} [8]

$$d_{tot} = 1,05 + 4,00 = 5,05 \text{ m}$$

$$b/d_{tot} = 37,90/5,05 = 7,50$$

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



Obr. 47: Graf pro stanovení součinitele síly [8]

Součinitel C:

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

$$C = 1,6 \cdot 1,0 = 1,6$$



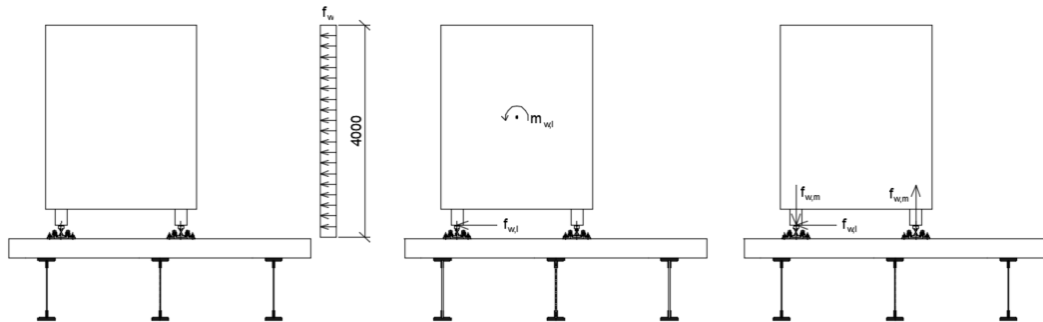
$$f_w = 0,5 \cdot \rho \cdot v_b^2 \cdot C$$

$$f_w = 0,5 \cdot 1,25 \cdot 27,5^2 \cdot 1,6 = 756 \text{ N/m}^2 = 0,756 \text{ kN/m}^2$$

$$f_{w,l} = 0,756 \cdot 4,00 = 3,024 \text{ kN/m}$$

$$m_{w,l} = 3,024 \cdot 2,00 = 6,048 \text{ kNm/m}$$

$$f_{w,m} = 6,048/1,5 = 4,032 \text{ kN}$$



Obr. 48: Schéma působení větru

Omezení velikosti zatížení větrem hodnotou f_w^{**} stanovenou z rychlosti $v_{b,0}^{**} = 25 \text{ m/s}$:

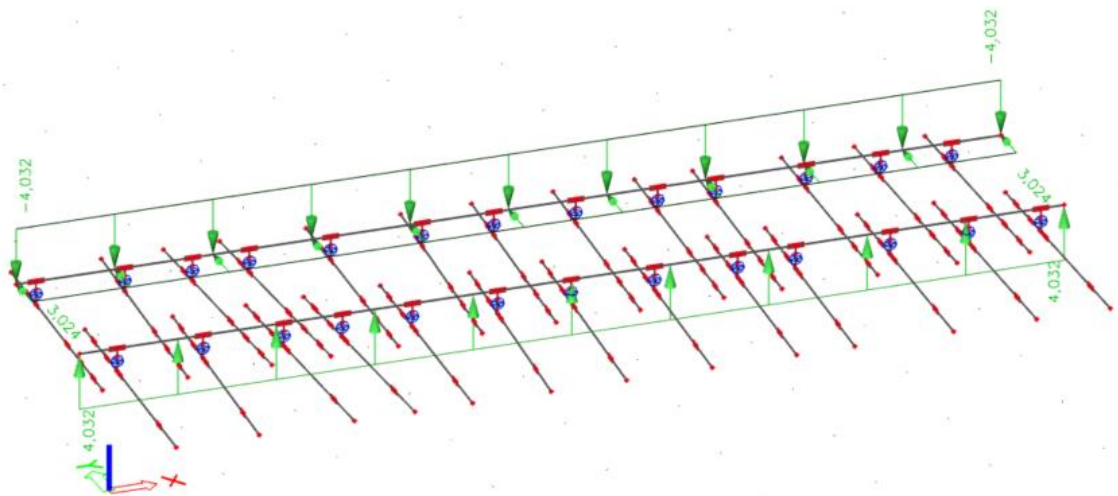
$$\psi_0 \cdot f_w \leq f_w^{**}$$

$$f_w^{**} = 0,5 \cdot \rho \cdot v_b^{**2} \cdot C$$

$$f_w^{**} = 0,5 \cdot 1,25 \cdot 25^2 \cdot 1,6 = 625 \text{ N/m}^2$$

$$\psi_0 \cdot f_w = 0,8 \cdot 756 = 605 \text{ N/m}^2$$

$$605 \text{ N/m}^2 \leq 625 \text{ N/m}^2 \rightarrow \text{VYHOVÍ}$$



Obr. 49: Zatížení větrem v příčném směru



Zatížení od větru v podélném směru:

Zatížení od větru v podélném směru se pro plnostěnné mosty uvažuje jako 25 % sil od větru v příčném směru, což není v tomto případě nějak významné.

Zatížení od větru ve svislém směru:

$$c_{f,z} = 0,9$$

$$C = c_e \cdot c_{fz,0} = 1,6 \cdot 0,9 = 1,44$$

$$f_{w,z} = 0,5 \cdot \rho \cdot v_b^2 \cdot C = 0,5 \cdot 1,25 \cdot 27,5^2 \cdot 1,44 = 681 \text{ N/m}^2 = 0,681 \text{ kN/m}^2$$

$$f_{w,z,l} = 0,681 \cdot 3,54 = 2,411 \text{ kN/m}$$

$$e_w = b/4 = 3540/4 = 885 \text{ mm}$$

$$m_{w,z,l} = 2,411 \cdot 0,885 = 2,134 \text{ kNm/m}$$

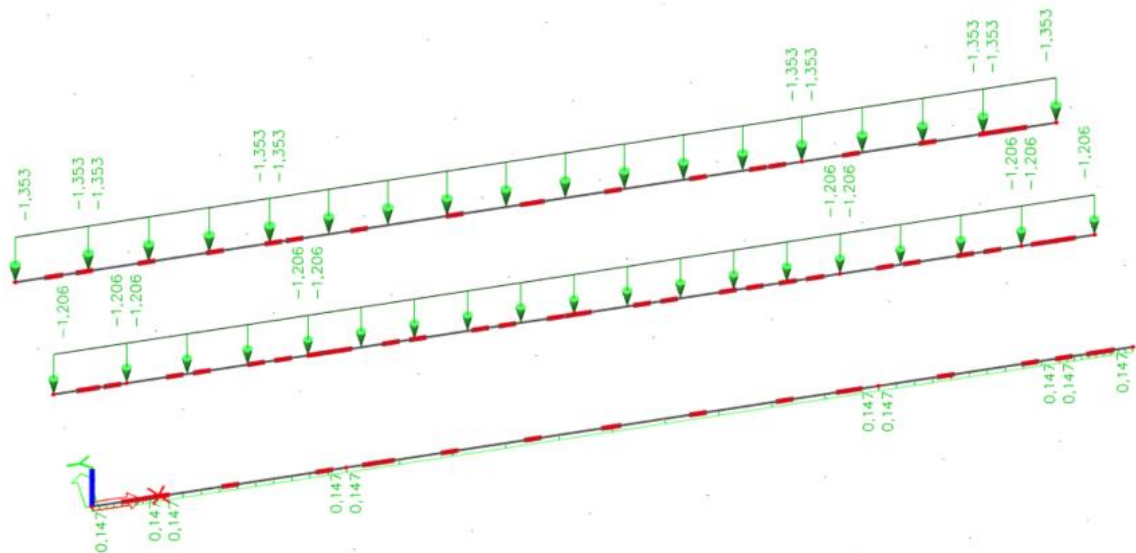
$$f_{w,z,m} = 2,134/2,844 = 0,750 \text{ kN}$$

Skutečné působení zatížení bylo rozděleno na hlavní nosníky v poměru 1:2:1 a moment je rozložen do dvojice sil působící na krajní nosníky.

$$f_{w,z,l,L} = 2,411/4 + 0,750 = 1,353 \text{ kN/m}$$

$$f_{w,z,l,S} = 2,411/2 = 1,206 \text{ kN/m}$$

$$f_{w,z,l,P} = 2,411/4 - 0,750 = -0,147 \text{ kN/m}$$



Obr. 50: Zatížení větrem ve svislém směru

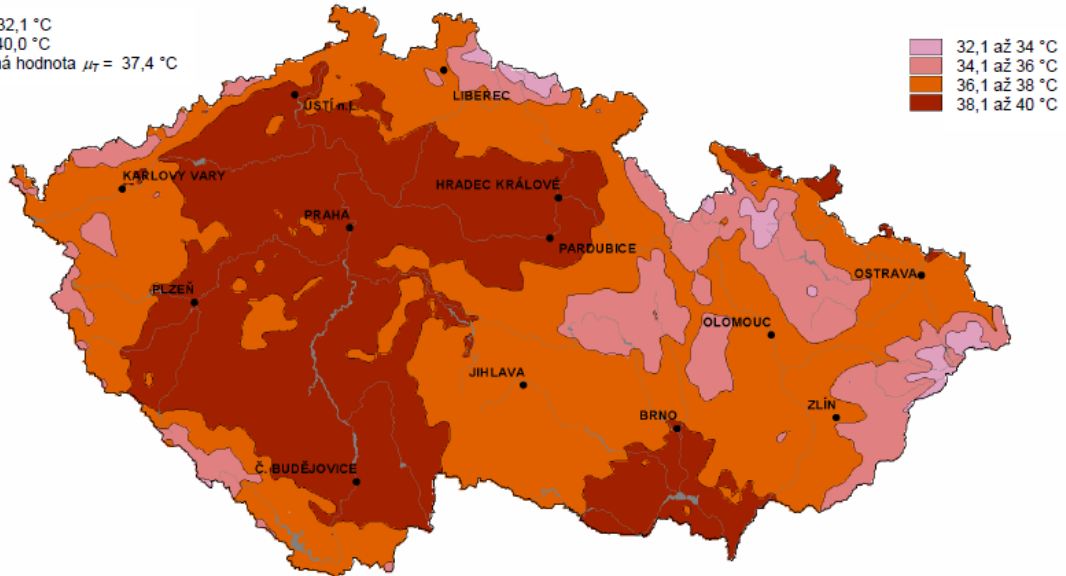
Podle normy je přípustné uvažovat působení větru ve svislém směru současně s jedním z vodorovných směrů.



3.4.4. Zatížení teplotou⁵

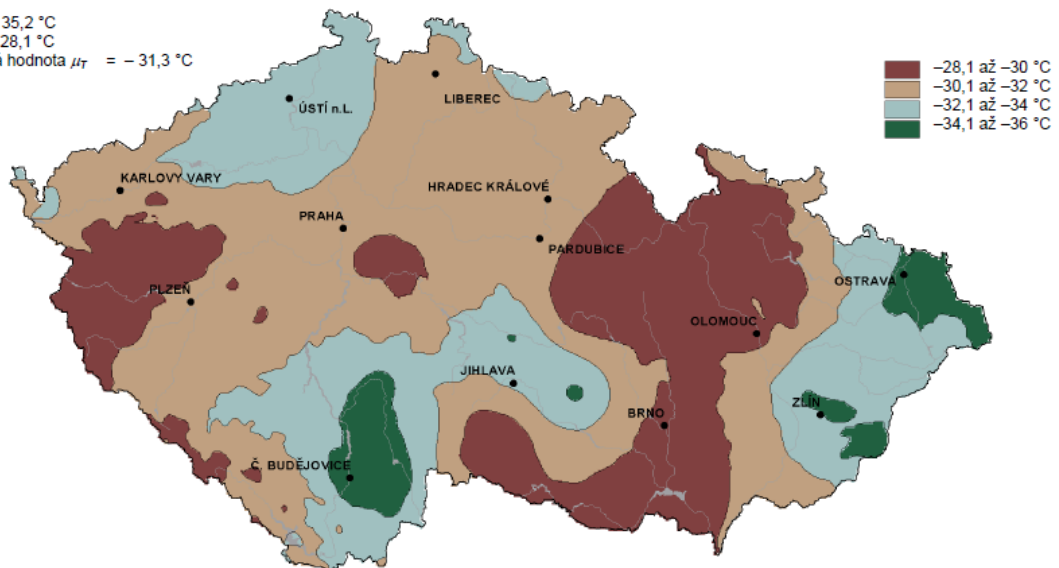
Rovnoměrná složka teploty

$T_{\min} = 32,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$
 $T_{\max} = 40,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$
průměrná hodnota $\mu_T = 37,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$



Obr. 51: Maximální teplota vzduchu ve stínu [9]

$T_{\min} = -35,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$
 $T_{\max} = -28,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$
průměrná hodnota $\mu_T = -31,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$



Obr. 52: Minimální teplota vzduchu ve stínu [9]

Most je situován v lokalitě, pro kterou je definována následující minimální a maximální teplota vzduchu ve stínu.

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

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

⁵ Pravidla pro zatížení mostní konstrukce teplotou definuje norma ČSN EN 1991-1-5 [9].



Na základě těchto hodnot byly stanoveny extrémní teploty, kterých může tato konstrukce typu 1 dosahovat.

$$T_{e,\min} = -35 \text{ °C}$$

$$T_{e,\max} = 56 \text{ °C}$$

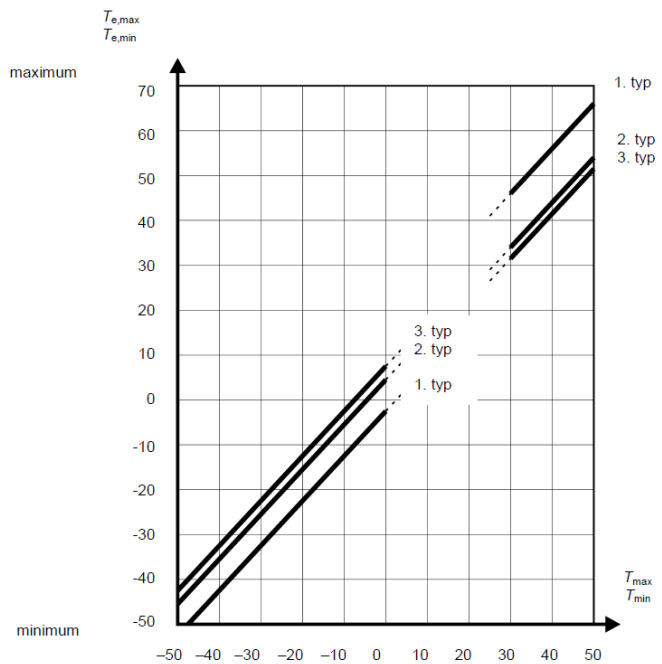
Jelikož není známá výchozí teplota T_0 , při které byla konstrukce postavena, je uvažována hodnotou 10 °C. Vzhledem k této teplotě bylo určeno maximální ochlazení a ohřátí mostu.

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

$$\Delta T_{N,\text{con}} = 10 - (-35) = 45 \text{ °C}$$

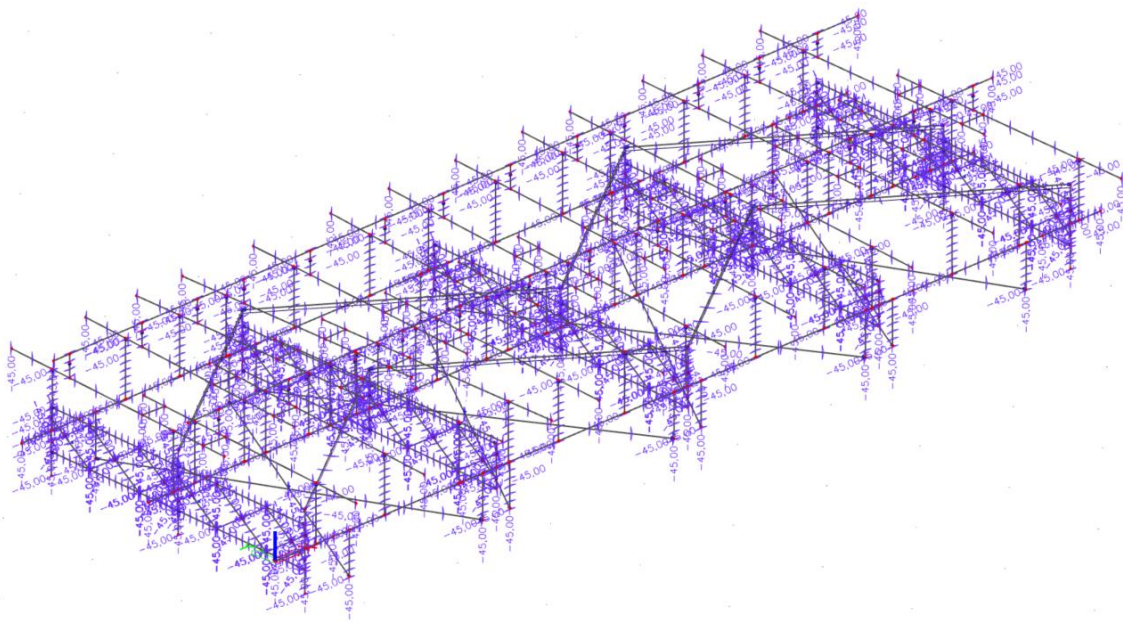
$$\Delta T_{N,\text{exp}} = T_{e,\max} - T_0$$

$$\Delta T_{N,\text{exp}} = 56 - 10 = 46 \text{ °C}$$

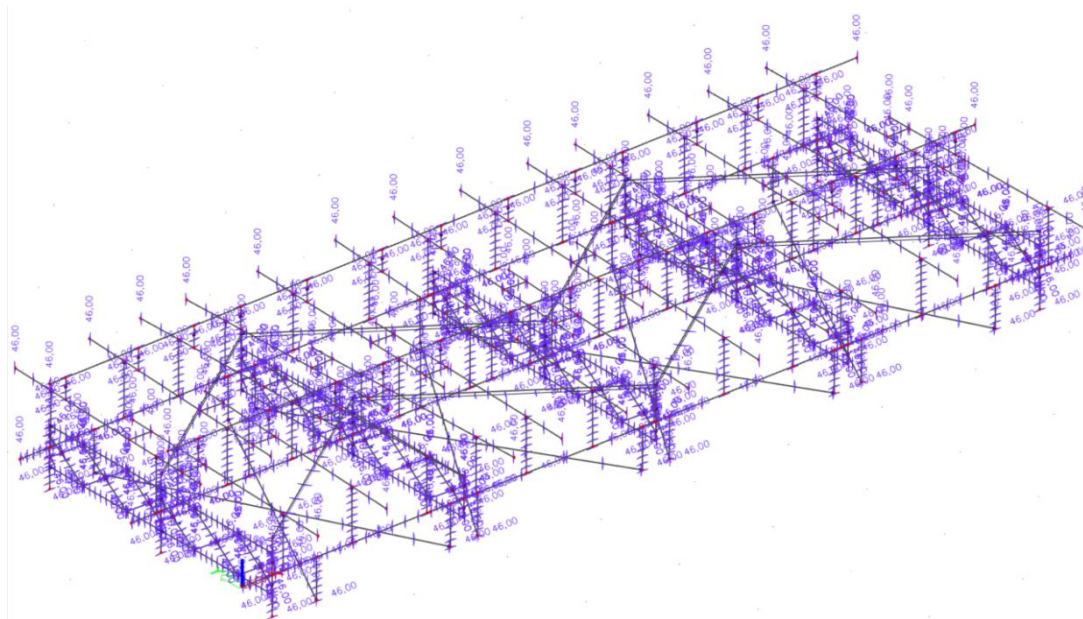


Obr. 53: Teplota vzduchu a rovnoměrná teplota na konstrukci [9]

Tímto jsou určeny dva zatěžovací stavy, z nichž je v každé kombinaci uvažován právě ten, který působí nepříznivě na posuzovaný průřez.



Obr. 54: Zatížení ochlazením



Obr. 55: Zatížení ohřátím

Nerovnoměrná složka teploty

Nerovnoměrná složka teploty vychází z předpokladu, že jeden povrch konstrukce je teplejší než ten druhý. Ve vodorovném směru nedochází k nerovnoměrnému rozložení teplot ani mezi opěrami, ani v příčném směru, kde je konstrukce K4 z obou stran obklopena dalšími objekty.

Ve svislém směru lze uvažovat, že mostní svršek bude mít jinou teplotu než nosná konstrukce. Výchozí teplota je pro ocelové nosné konstrukce 18 °C pro teplejší horní povrch a 13 °C pro teplejší dolní povrch. Tyto hodnoty jsou pro mosty bez svršku redukovány součiniteli k_{sur} .

$$k_{sur,cool} = 0,9$$

$$\Delta T_{M,cool} = 0,9 \cdot 13 = 11,7 \text{ °C}$$

$$k_{sur,heat} = 0,7$$

$$\Delta T_{M,heat} = 0,7 \cdot 18 = 12,6 \text{ °C}$$

Vzhledem k oddělení ocelového svršku od ocelové nosné konstrukce dřevěnými mostnicemi lze zanedbat nerovnoměrné rozložení teploty v nosné konstrukci mostu. Tento předpoklad byl ověřen následujícím zjednodušeným výpočtem vedení tepla.⁶ Maximálním ohřátím horního povrchu mostnic o 12,6 °C by se u jejich dolního povrchu zvýšila teplota pouze o 0,2 °C.

⁶ Vzorce pro výpočet vedení tepla pochází ze skript [10] a hodnoty součinitele tepelné vodivosti jsou stanoveny v normě ČSN EN 73 0540-3 [11]



$$\Delta T_{13} = \theta_1 - \theta_3 = 12,6 \text{ °C}$$

$$\Delta T_{12} = \theta_1 - \theta_2$$

$$\Delta T_{23} = \theta_2 - \theta_3$$

$$\lambda_{\text{dřevo}} = 0,22 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$$

$$\lambda_{\text{ocel}} = 50 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$$

$$d_{\text{dřevo}} = 240 \text{ mm}$$

$$d_{\text{ocel}} = 775 \text{ mm}$$

$$q_1 = q_2$$

$$q = h \cdot (\theta_1 - \theta_2) = \frac{\lambda}{d} \cdot (\theta_1 - \theta_2)$$

$$\frac{\lambda_{\text{dřevo}}}{d_{\text{dřevo}}} \cdot (\theta_1 - \theta_2) = \frac{\lambda_{\text{ocel}}}{d_{\text{ocel}}} \cdot (\theta_2 - \theta_3)$$

$$\frac{\lambda_{\text{dřevo}}}{d_{\text{dřevo}}} \cdot (\theta_1 - \theta_2) = \frac{\lambda_{\text{ocel}}}{d_{\text{ocel}}} \cdot (\theta_2 - \theta_1 + \Delta T_{13})$$

$$\frac{\lambda_{\text{dřevo}}}{d_{\text{dřevo}}} \cdot \theta_1 - \frac{\lambda_{\text{dřevo}}}{d_{\text{dřevo}}} \cdot \theta_2 = \frac{\lambda_{\text{ocel}}}{d_{\text{ocel}}} \cdot \theta_2 - \frac{\lambda_{\text{ocel}}}{d_{\text{ocel}}} \cdot \theta_1 + \frac{\lambda_{\text{ocel}}}{d_{\text{ocel}}} \cdot \Delta T_{13}$$

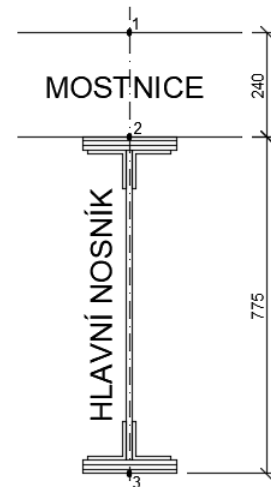
$$\frac{\lambda_{\text{dřevo}}}{d_{\text{dřevo}}} \cdot \theta_1 + \frac{\lambda_{\text{ocel}}}{d_{\text{ocel}}} \cdot \theta_1 = \frac{\lambda_{\text{dřevo}}}{d_{\text{dřevo}}} \cdot \theta_2 + \frac{\lambda_{\text{ocel}}}{d_{\text{ocel}}} \cdot \theta_2 + \frac{\lambda_{\text{ocel}}}{d_{\text{ocel}}} \cdot \Delta T_{13}$$

$$\theta_1 \cdot \left(\frac{\lambda_{\text{dřevo}}}{d_{\text{dřevo}}} + \frac{\lambda_{\text{ocel}}}{d_{\text{ocel}}} \right) = \theta_2 \cdot \left(\frac{\lambda_{\text{dřevo}}}{d_{\text{dřevo}}} + \frac{\lambda_{\text{ocel}}}{d_{\text{ocel}}} \right) + \Delta T_{13} \cdot \left(\frac{\lambda_{\text{ocel}}}{d_{\text{ocel}}} \right)$$

$$\Delta T_{12} = \theta_1 - \theta_2 = \Delta T_{13} \cdot \frac{\frac{\lambda_{\text{ocel}}}{d_{\text{ocel}}}}{\frac{\lambda_{\text{dřevo}}}{d_{\text{dřevo}}} + \frac{\lambda_{\text{ocel}}}{d_{\text{ocel}}}}$$

$$\Delta T_{12} = 12,6 \cdot \frac{50}{\frac{0,22}{0,24} + \frac{50}{0,775}} = 12,4 \text{ °C}$$

$$\Delta T_{23} = \Delta T_{13} - \Delta T_{12} = 12,6 - 12,4 = \mathbf{0,2 \text{ °C}}$$



Obr. 56: Schéma pro výpočet vedení tepla



3.5. Součinitele zatížení

Dílčí součinitele zatížení stálého γ_G a proměnného γ_Q jsou stanoveny s ohledem na to, že konstrukce je starší než 30 let. [1]

Klasifikační součinitele α zohledňující traťovou třídu se v přepočtech uvažují hodnotou 1,0. [1]

Kombinační součinitele zatížení ψ_0 vycházejí z ČSN EN 1990 [12], jen pro vítr působící současně se železniční dopravou je koeficient ψ_0 určen v Metodickém pokynu [1], který upravuje i redukční součinitel stálého zatížení ξ .

Dynamický součinitel

Norma ČSN EN 1991-2 [7] udává vztah pro výpočet dynamického součinitele. Byl použit zjednodušený vzorec pro prostý nosník a standardně udržovanou kolej. Náhradní délka L_Φ je pro hlavní nosné prvky dána rozpětím.

$$\Phi = \frac{2,16}{\sqrt{L_\Phi - 0,2}} + 0,73 = \frac{2,16}{\sqrt{8,2 - 0,2}} + 0,73 = 1,541$$

<i>Součinitele zatížení</i>						
	<i>Vlastní tíha</i>	<i>LM71</i>	<i>Rozjezdové síly</i>	<i>Boční ráz</i>	<i>Vítr</i>	<i>Teplota</i>
γ_G/γ_Q	1,2	1,3	1,3	1,3	1,35	1,35
α	-	1,0	1,0	1,0	-	-
Φ	-	1,541	-	-	-	-
ψ_0	-	0,8	0,8	0,8	0,5	0,6
ξ	0,95	-	-	-	-	-

Tabulka 10: Součinitele zatížení

3.6. Sestavy zatížení

Zatížení dopravou se spojuje do tzv. sestav zatížení, které jsou popsány v ČSN EN 1991-2 [7]. V těchto skupinách je zohledněna intenzita současného působení zatěžovacích stavů představující účinky železniční dopravy a jsou přesně stanovená pravidla redukce příznivých účinků.

Pro jednu kolej je definováno celkem 7 těchto sestav, ale zde jsou zavedeny pouze gr11 a gr12. Skupiny gr13 a gr14 se liší od gr11 a gr12 tím, že mají jiná pravidla pro redukci odlehčujících účinků. Konkrétně snižují hodnoty modelu LM71 a v tomto případě se neuplatní. Sestava gr15 řeší stabilitní problém konstrukce a pro výpočet zatížitelnosti se nezavádí. Skupiny gr16 a gr17 uvažují místo modelu LM71 soustavu zatížení SW/2, a nelze je tedy použít.



Sestavy zatížení				
Název	Násobitel zatížení			
	LM71	Nezatížený vlak	Rozjezdové síly	Boční ráz
gr11	1	0	1	0,5
gr12	1	0	0,5	1

Tabulka 11: Sestavy zatížení

3.7. Kombinace

Pro mezní stavy únosnosti vymezuje norma ČSN EN 1990 [12] 3 druhy kombinací, a to 6.10, 6.10a a 6.10b. Z důvodu malého namáhání konstrukce od vlastní tíhy vzhledem k účinkům proměnných zatížení byl zvolen přístup 6.10b definovaný následující rovnicí.

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

V tomto případě máme proměnná zatížení zastoupená sestavami gr11, nebo gr12, zatížením větrem, které v sobě zahrnuje boční i svislé účinky, a zatížením teplotou. Níže definované kombinace udávají všechny možnosti vystředání dominantního proměnného zatížení Q_1 s ohledem na možné zavedení pouze jedné ze sestav gr11, nebo gr12.

Kombinace				
Název	Zatížení			
	G	Q_1	Q_2	Q_3
C1	vlastní tíha + ostatní stálé	gr11	vítr	teplota
C2	vlastní tíha + ostatní stálé	gr12	vítr	teplota
C3	vlastní tíha + ostatní stálé	vítr	gr11	teplota
C4	vlastní tíha + ostatní stálé	vítr	gr12	teplota
C5	vlastní tíha + ostatní stálé	teplota	gr11	vítr
C6	vlastní tíha + ostatní stálé	teplota	gr12	vítr

Tabulka 12: Kombinace



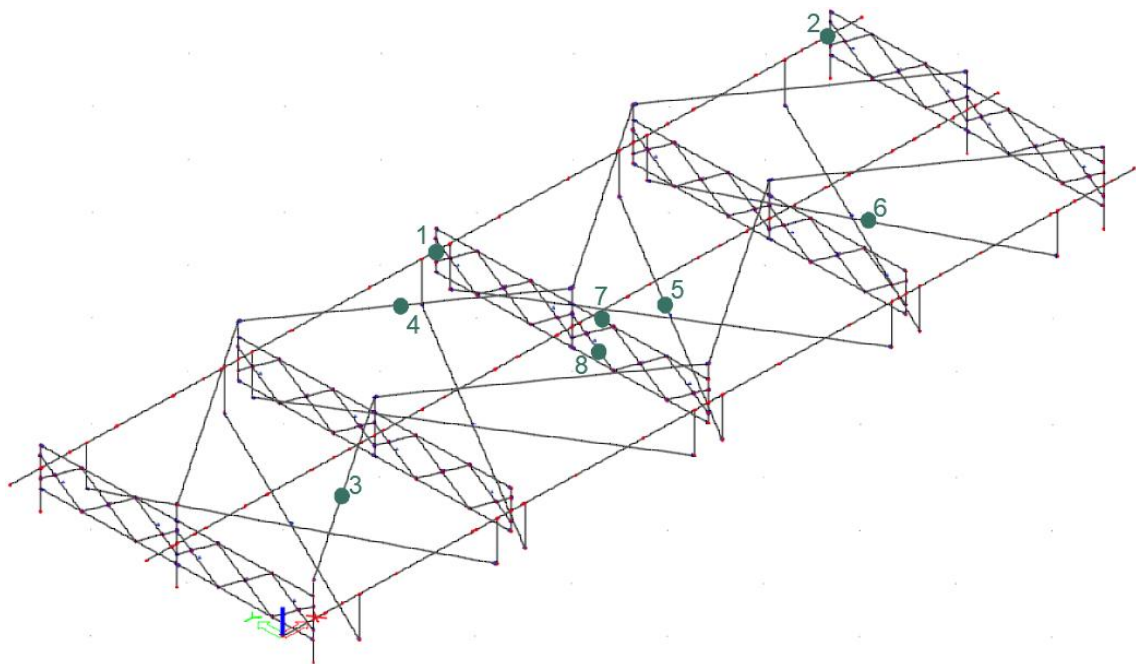
4. STANOVENÍ ZATÍŽITELNOSTI⁷

4.1. Lineární výpočet

Zatížitelnost vyjadřuje nejvyšší možnou hodnotu násobku účinků zatížení LM71, pro kterou nejvíce namáhaný průřez v nejnepříznivější kombinaci v mezním stavu vyhoví. Celková zatížitelnost konstrukce je dána prvkem, jehož zatížitelnost je nejnižší. Kapitola 4 se zabývá výhradně zatížitelností získanou z mezního stavu únosnosti, zatímco ověření druhého mezního stavu se věnuje kapitola 6.

Dle použité metodiky se zde jedná o zatížitelnost kategorie C. Výpočet vychází z následující rovnice definované Metodickým pokynem [1].

$$Z_{LM71} = \left(R_d - \sum_{i=1}^{n-1} E_{rs,Ed,i} \right) / E_{LM71,Ed}$$



Obr. 57: Přehled posuzovaných prvků a průřezů

Největší namáhání vyvolaly kombinace C2 s dominantním proměnným zatížením od dopravy, které byly rozděleny na účinky modelu LM71 a ostatního zatížení. Dle způsobu namáhání byly pro jednotlivé prvky uvedeny příslušné posudky, jejichž využitelnost je rovna 1,0. Pokud jsou od této hodnoty odečteny účinky ostatního zatížení a tento rozdíl je podělen účinky modelu LM71, výsledkem je získána zatížitelnost.

⁷ Postupy v této kapitole upravuje především Metodický pokyn [1]. Mnoho dílčích výpočtů však vychází z normy ČSN EN 1993-1-1 [13].



4.1.1. Hlavní nosník

Největší vnitřní síly se objevily na levém nosníku, kde byly posouzeny dva kritické průřezy. První z nich se nachází uprostřed rozpětí a je potřeba ho posoudit na interakci namáhání tahu a dvojosého ohybu. Druhý významný průřez se vyskytuje na témže nosníku v místě uložení na opěře O2, kde vzniká největší posouvající síla, a musí být tedy posouzen na smyk.

Rozhodující kombinace C2 – Průřez 1

$$\xi \cdot Y_G \cdot G + Z_{LM71} \cdot Y_{Q,LM71} \cdot gr_{LM71} \cdot \alpha \cdot \Phi \cdot Q_{LM71} + Y_{Q,BR} \cdot gr_{BR} \cdot \alpha \cdot Q_{BR(7,\leftarrow)} + Y_{Q,ROZ} \cdot gr_{ROZ} \cdot \alpha \cdot Q_{ROZ(+)} + Y_{Q,V} \cdot \psi_{0,V} \cdot Q_{V(\leftarrow+\downarrow)} + Y_{Q,T} \cdot \psi_{0,T} \cdot Q_{T(OCH)}$$

$$0,95 \cdot 1,2 \cdot G + Z_{LM71} \cdot 1,3 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,541 \cdot Q_{LM71} + 1,3 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot Q_{BR(7,\leftarrow)} + 1,3 \cdot 0,5 \cdot 1,0 \cdot Q_{ROZ(+)} + 1,35 \cdot 0,5 \cdot Q_{V(\leftarrow+\downarrow)} + 1,35 \cdot 0,6 \cdot Q_{T(OCH)}$$

$$1,14 \cdot G + Z_{LM71} \cdot 2,003 \cdot Q_{LM71} + 1,3 \cdot Q_{BR(7,\leftarrow)} + 0,65 \cdot Q_{ROZ(+)} + 0,675 \cdot Q_{V(\leftarrow+\downarrow)} + 0,81 \cdot Q_{T(OCH)}$$

Rozhodující kombinace C2 – Průřez 2

$$\xi \cdot Y_G \cdot G + Z_{LM71} \cdot Y_{Q,LM71} \cdot gr_{LM71} \cdot \alpha \cdot \Phi \cdot Q_{LM71} + Y_{Q,BR} \cdot gr_{BR} \cdot \alpha \cdot Q_{BR(9,\leftarrow)} + Y_{Q,ROZ} \cdot gr_{ROZ} \cdot \alpha \cdot Q_{ROZ(+)} + Y_{Q,V} \cdot \psi_{0,V} \cdot Q_{V(\leftarrow+\downarrow)} + Y_{Q,T} \cdot \psi_{0,T} \cdot Q_{T(OCH)}$$

$$0,95 \cdot 1,2 \cdot G + Z_{LM71} \cdot 1,3 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,541 \cdot Q_{LM71} + 1,3 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot Q_{BR(9,\leftarrow)} + 1,3 \cdot 0,5 \cdot 1,0 \cdot Q_{ROZ(+)} + 1,35 \cdot 0,5 \cdot Q_{V(\leftarrow+\downarrow)} + 1,35 \cdot 0,6 \cdot Q_{T(OCH)}$$

$$1,14 \cdot G + Z_{LM71} \cdot 2,003 \cdot Q_{LM71} + 1,3 \cdot Q_{BR(9,\leftarrow)} + 0,65 \cdot Q_{ROZ(+)} + 0,675 \cdot Q_{V(\leftarrow+\downarrow)} + 0,81 \cdot Q_{T(OCH)}$$

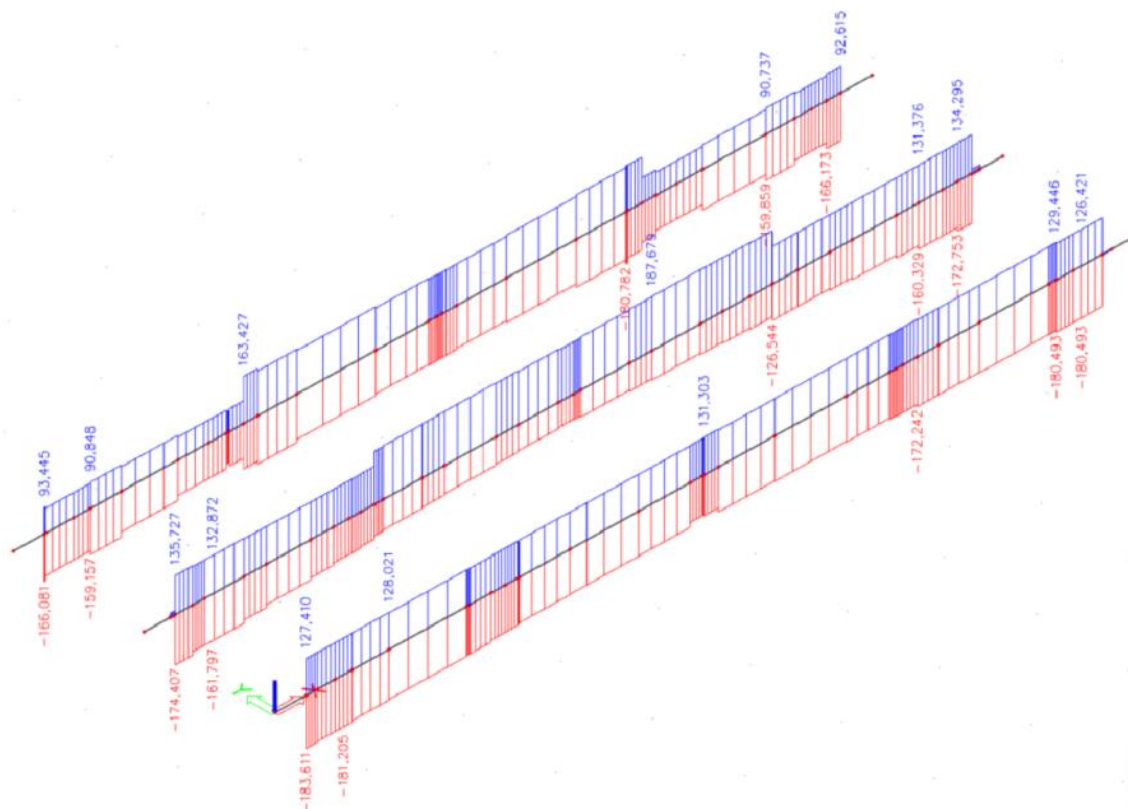
Vnitřní síly

Průřez 1								
N_{Ed}	128,581	kN	$N_{LM71,Ed}$	-4,956	kN	$N_{rs,Ed}$	133,538	kN
V_{Ed}	-35,725	kN	$V_{LM71,Ed}$	-30,427	kN	$V_{rs,Ed}$	-5,298	kN
$M_{y,Ed}$	1291,748	kNm	$M_{y,LM71,Ed}$	1190,710	kNm	$M_{y,rs,Ed}$	101,038	kNm
$M_{z,Ed}$	12,333	kNm	$M_{z,LM71,Ed}$	11,516	kNm	$M_{z,rs,Ed}$	0,817	kNm

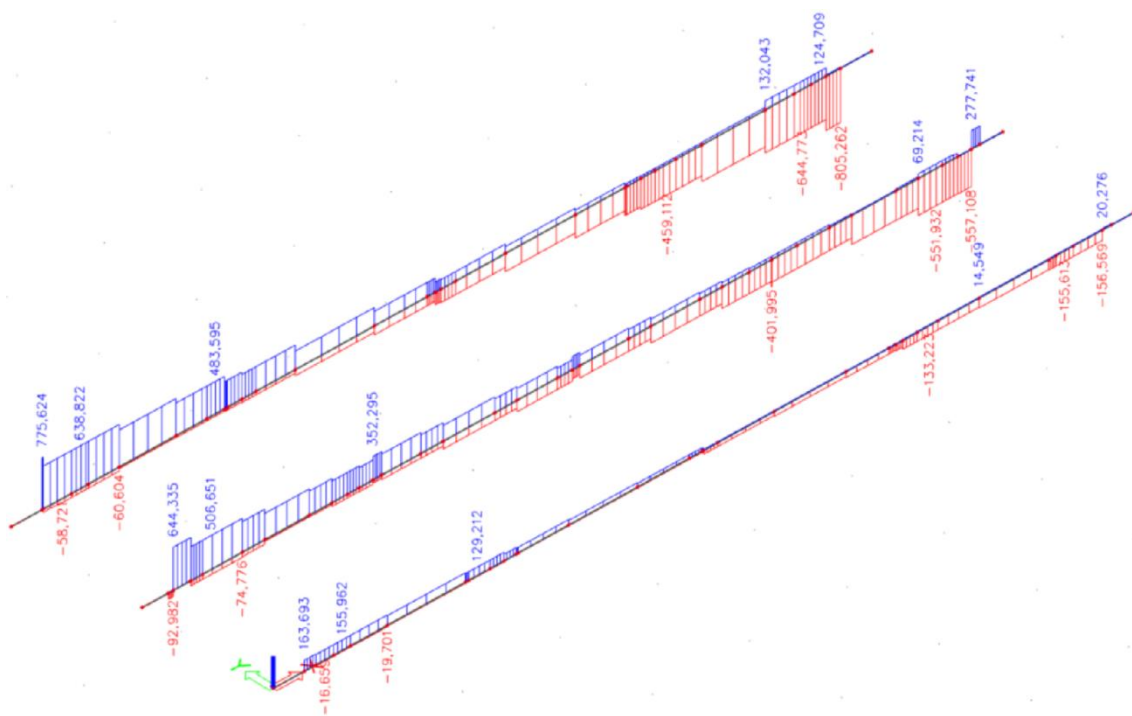
Tabulka 13: Vnitřní síly v průřezu 1

Průřez 2								
V_{Ed}	-805,262	kN	$V_{LM71,Ed}$	-745,512	kN	$V_{rs,Ed}$	-59,749	kN

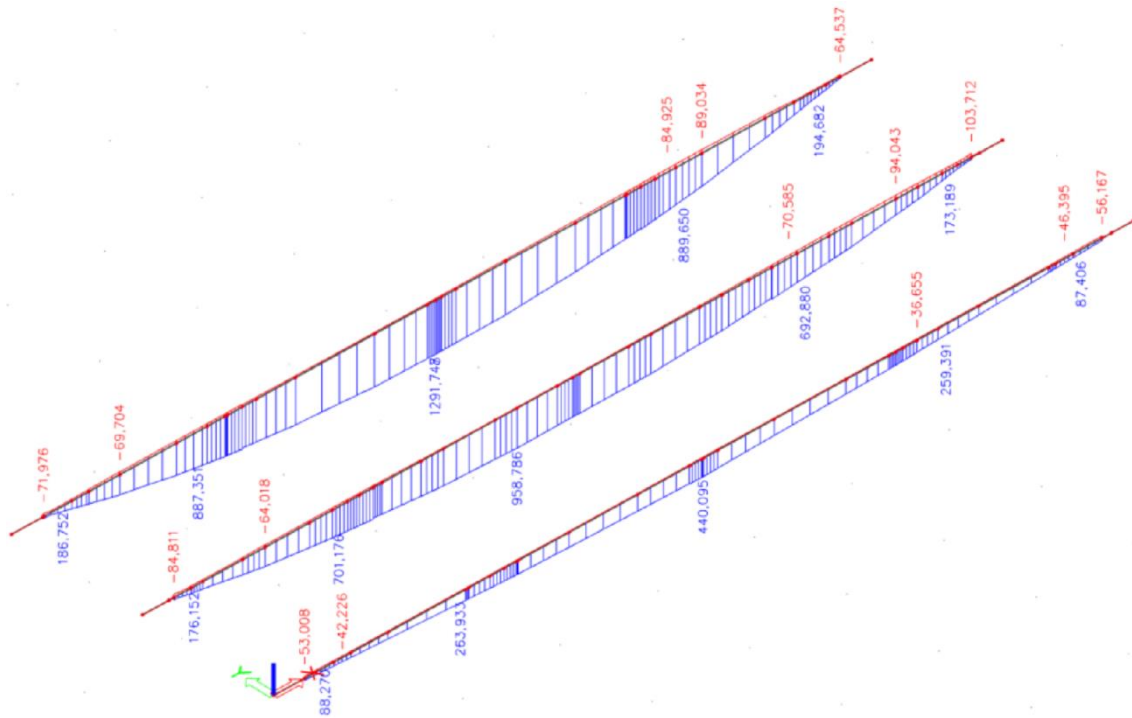
Tabulka 14: Vnitřní síly v průřezu 2



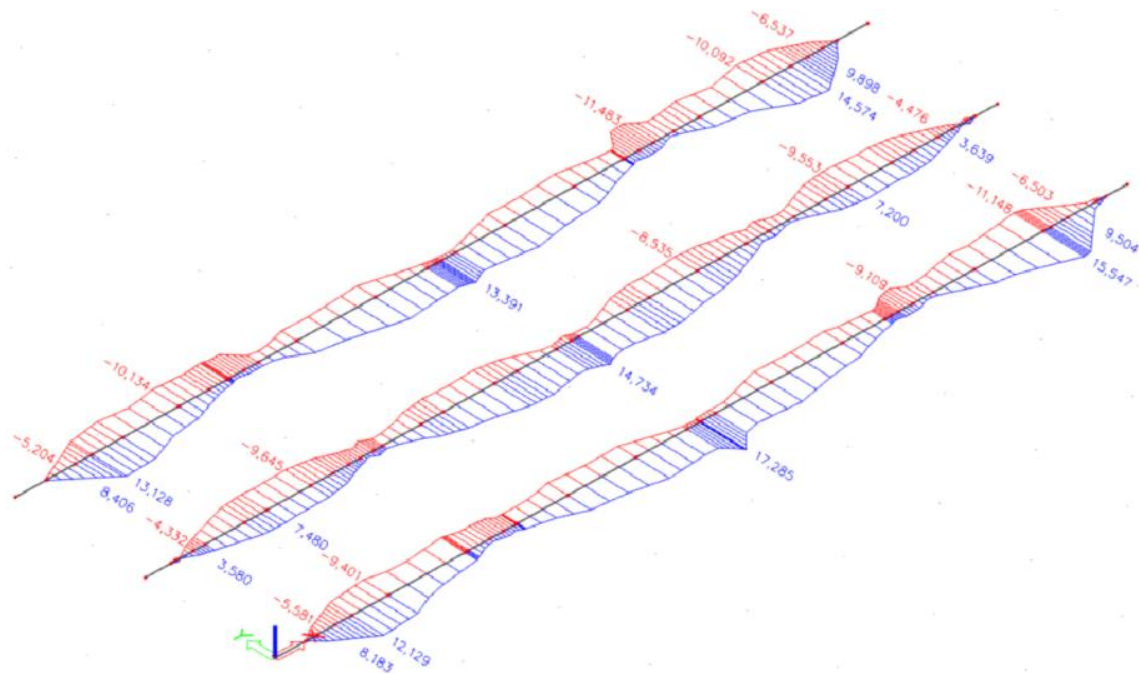
Obr. 58: Obálka normálových sil na hlavních nosnících



Obr. 59: Obálka posouvajících sil na hlavních nosnících



Obr. 60: Obálka momentů M_y na hlavních nosnících



Obr. 61: Obálka momentů M_z na hlavních nosnících



Zatřídění průřezu

Třída průřezu se stanoví z ČSN EN 1993-1-1 [13], přičemž stojina je dominantně namáhána ohybem a horní pásnice je tlačena.

Podmínka pro třídu průřezu 1:

$$\text{tlak: } c/t \leq 33 \cdot \epsilon = 33 \cdot 1,058 = 34,914$$

$$\text{ohyb: } c/t \leq 72 \cdot \epsilon = 72 \cdot 1,058 = 76,176$$

$$\epsilon = \sqrt{235/f_y} = \sqrt{235/210} = 1,058$$

Pásnice:

$$c = 95 \text{ mm}; t = 10 \text{ mm}$$

$$c/t = 95/10 = 9,500 < 34,914 \rightarrow \text{VYHOVÍ}$$

Stojina:

$$c = 535 \text{ mm}; t = 12 \text{ mm}$$

$$c/t = 535/12 = 44,583 < 76,176 \rightarrow \text{VYHOVÍ}$$

Průřez hlavního nosníku odpovídá třídě 1. Přesto však na základě doporučení Metodického pokynu [1] se bude posuzovat bez ohledu na toto zatřídění pružně.

Tahová únosnost

Dle normy ČSN EN 1993-1-1 [13] je únosnost v tahu menší z hodnot návrhové plastické únosnosti neoslabeného průřezu a návrhové únosnosti průřezu oslabeného dírami pro spojovací prostředky.

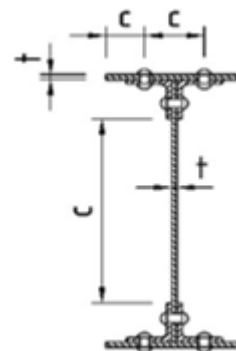
$$N_{t,Rd} = \min(N_{pl,Rd}; N_{u,Rd})$$

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{2,833 \cdot 10^{-2} \cdot 210 \cdot 10^3}{1,10} = 5408,455 \text{ kN}$$

$$A_{net} = 2,265 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$$

$$N_{u,Rd} = \frac{0,9 \cdot A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 2,265 \cdot 10^{-2} \cdot 340 \cdot 10^3}{1,30} = 5331,462 \text{ kN}$$

$$N_{t,Rd} = 5331,462 \text{ kN}$$



Obr. 62: Definice šířek pro zatřídění nýťovaného průřezu [1]



Únosnost na klopení kolmo k ose y

U hlavního nosníku dochází vlivem zatížení k ohybu se ztrátou stability ve směru svislé osy průřezu. Zajištění proti posunu kolmo z roviny se nachází u připojení příčného ztužení v roztečích $L = 2,05$ m. Působíště zatížení je uvažováno na vrcholu horní pásnice, tedy ve vzdálenosti $z_a = 387,5$ mm od těžiště, které je totožné se středem smyku. Z důvodu symetrie průřezu platí $\psi_f = 0$ a $z_j = 0$ mm. Nosník je kloubově uložen, a tak součinitele $k_y = k_z = 1,0$ a není bráněno koncové deplanaci průřezu, proto součinitel $k_w = 1,0$. Součinitel imperfekce při klopení $\alpha_{LT} = 0,76$ je určen pro křivku d.

$$L = 2,05 \text{ m}$$

$$z_a = 387,5 \text{ mm}$$

$$z_s = 0 \text{ mm}$$

$$z_j = 0 \text{ mm}$$

$$z_g = z_a - z_s = 387,5 - 0 = 387,5 \text{ mm}$$

$$\psi_f = 0$$

$$k_y = k_z = k_w = 1,0$$

$$k_{wt} = \frac{\pi}{k_w \cdot L} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I_w}{G \cdot I_t}} = \frac{\pi}{1,0 \cdot 2,05} \cdot \sqrt{\frac{200 \cdot 10^6 \cdot 8,131 \cdot 10^{-6}}{76,923 \cdot 10^6 \cdot 1,066 \cdot 10^{-5}}} = 2,158$$

$$\zeta_g = \frac{\pi \cdot z_g}{k_z \cdot L} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I_z}{G \cdot I_t}} = \frac{\pi \cdot 0,3875}{1,0 \cdot 2,05} \cdot \sqrt{\frac{200 \cdot 10^6 \cdot 6,180 \cdot 10^{-5}}{76,923 \cdot 10^6 \cdot 1,066 \cdot 10^{-5}}} = 2,306$$

$$\zeta_j = \frac{\pi \cdot z_j}{k_z \cdot L} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I_z}{G \cdot I_t}} = \frac{\pi \cdot 0}{1,0 \cdot 2,05} \cdot \sqrt{\frac{200 \cdot 10^6 \cdot 6,180 \cdot 10^{-5}}{76,923 \cdot 10^6 \cdot 1,066 \cdot 10^{-5}}} = 0$$

Zatížení a podmínky podepření	Součinitele vzpěrné délky			Hodnoty součinitelů							
	k_y	k_z	k_w	C_1 ¹⁾		C_2			C_3		
				$C_{1,0}$	$C_{1,1}$	\perp $\psi_f = -1$	I I I $-0,9 \leq \psi_f \leq 0$	T $\psi_f = 1$	\perp $\psi_f = -1$	I I I $-0,9 \leq \psi_f \leq 0$	T $\psi_f = 1$
	1	1	1	1,13	1,13	0,33	0,46	0,50	0,93	0,53	0,38
	1	1	0,5	1,13	1,23	0,33	0,39	0,50	0,93	0,81	0,38
	1	0,5	1	0,95	1,00	0,25	0,41	0,40	0,84	0,48	0,44
	1	0,5	0,5	0,95	0,97	0,25	0,31	0,40	0,84	0,67	0,44

Obr. 63: Hodnoty součinitelů C_1 , C_2 a C_3 [13]



$$C_{1,0} = C_{1,1} = 1,13$$

$$C_1 = C_{1,0} + (C_{1,1} - C_{1,0}) \cdot \kappa_{wt} \leq C_{1,1}$$

$$C_1 = 1,13 + (1,13 - 1,13) \cdot 2,158 = 1,13 \leq 1,13$$

$$C_2 = 0,46$$

$$C_3 = 0,53$$

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

$$\mu_{cr} = \frac{1,13}{1,0} \cdot \left[\sqrt{1 + 2,158^2 + (0,46 \cdot 2,306 - 0,53 \cdot 0)^2} - (0,46 \cdot 2,306 - 0,53 \cdot 0) \right] = 1,744$$

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

$$M_{cr} = 1,744 \cdot \frac{\pi \cdot \sqrt{200 \cdot 10^6 \cdot 6,180 \cdot 10^{-5} \cdot 76,923 \cdot 10^6 \cdot 1,066 \cdot 10^{-5}}}{2,05} = 8508,606 \text{ kNm}$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{el,y} \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{7,524 \cdot 10^{-3} \cdot 210 \cdot 10^3}{8508,606}} = 0,431$$

$$\Phi_{LT} = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] = 0,5 \cdot \left[1 + 0,76 \cdot (0,431 - 0,2) + 0,431^2 \right] = 0,681$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} = \frac{1}{0,681 + \sqrt{0,681^2 - 0,431^2}} = 0,828$$

$$M_{y,b,Rd} = \chi_{LT} \cdot W_{el,y} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 0,828 \cdot 7,524 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{210 \cdot 10^3}{1,2} = 1090,228 \text{ kNm}$$

Únosnost v prostém ohybu kolmo k ose z

$$M_{z,c,Rd} = \frac{W_{el,z} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{5,748 \cdot 10^{-4} \cdot 210 \cdot 10^3}{1,10} = 109,735 \text{ kNm}$$

Boulení ve smyku

Při splnění následující podmínky vycházející z ČSN EN 1993-1-5 [14] není třeba posoudit průřez na únosnost při boulení ve smyku. Stojina hlavního nosníku je vyztužena ve vzdálenostech příčného ztužení $a = 2,05 \text{ m}$.

$$h_w / t_w \leq \frac{31}{\eta} \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_t}$$

$$h_w / t_w \leq 0,715 / 0,012 = 59,583$$



$$\frac{a}{h_w} = \frac{2,05}{0,715} = 2,867 > 1$$

$$k_t = 5,34 + 4,00 \cdot (h_w/a)^2 = 5,34 + 4,00 \cdot (0,715/2,05)^2 = 5,827$$

$$\frac{31}{\eta} \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_t} = \frac{31}{1,2} \cdot 1,058 \cdot \sqrt{5,827} = 65,976$$

$$59,583 < 65,976 \rightarrow \text{VYHOVÍ}$$

Únosnost ve smyku

$$V_{pl,Rd} = \frac{h_w \cdot t_w \cdot f_{yw}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = \frac{0,715 \cdot 0,012 \cdot 210 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 1,10} = 945,700 \text{ kN}$$

Zatížitelnost v průřezu 1

Nejprve je nutné ověřit podmínku malého smyku. Posouvající síla, ze které tato podmínka vychází, však závisí na hledané zatížitelnosti. V tomto kroku je zatížitelnost uvažována hodnotou $Z_{LM71} = 1,0$.

$$\frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} \leq 0,5$$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} = \frac{35,725}{945,700} = 0,038 \leq 0,5 \rightarrow \text{VYHOVÍ}$$

Předpoklad byl ověřen a zároveň z něj plyne, že zatížitelnost ve smyku je v tomto průřezu větší než 1,0.

$$Z_{LM71} = \frac{1 - \eta_{1,rs}}{\eta_{1,LM71}}$$

$$\eta_{1,rs} = \frac{N_{rs,Ed}}{A \cdot f_y / \gamma_{M0}} + \frac{M_{y,rs,Ed}}{W_{el,y} \cdot f_y / \gamma_{M0}} + \frac{M_{z,rs,Ed}}{W_{el,z} \cdot f_y / \gamma_{M0}}$$

$$\eta_{1,rs} = \frac{133,538}{5331,462} + \frac{101,038}{1090,228} + \frac{0,817}{109,735} = 0,125$$

$$\eta_{1,LM71} = \frac{N_{LM71,Ed}}{A \cdot f_y / \gamma_{M0}} + \frac{M_{y,LM71,Ed}}{W_{el,y} \cdot f_y / \gamma_{M0}} + \frac{M_{z,LM71,Ed}}{W_{el,z} \cdot f_y / \gamma_{M0}}$$

$$\eta_{1,LM71} = \frac{-4,956}{5331,462} + \frac{1190,710}{1090,228} + \frac{11,516}{109,735} = 1,196$$

$$Z_{LM71} = \frac{1 - 0,125}{1,196} = 0,73$$

Z důvodu, že zatížitelnost vyšla menší než 1,0, předpoklad malého smyku při úpravě posouvající síly dle vypočtené zatížitelnosti opět vyhoví.

**Zatížitelnost v průřezu 2**

Normálové síly a momenty jsou v tomto místě oproti průřezu 1 zanedbatelně malé a klíčové posouzení je zde na smyk.

$$Z_{LM71} = \frac{1 - \eta_{3,rs}}{\eta_{3,LM71}}$$

$$\eta_{3,rs} = \frac{V_{rs,Ed}}{h_w \cdot t_w \cdot f_{yw} / (\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0})} = \frac{59,749}{945,700} = 0,063$$

$$\eta_{3,LM71} = \frac{V_{LM71,Ed}}{h_w \cdot t_w \cdot f_{yw} / (\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0})} = \frac{745,512}{945,700} = 0,788$$

$$Z_{LM71} = \frac{1 - 0,063}{0,788} = 1,19$$

4.1.2. Horní vodorovné ztužení

Zavětrování pod horní pásnicí je namáháno pouze osovou silou, přičemž vyšší hodnoty dosahuje tahová síla, jejíž extrém byl nalezen v první pravé diagonále (průřez 3). Vzhledem k významné tlakové síle vznikající ve druhé levé diagonále (průřez 4) byl prvek posouzen kromě tahu i na vzpěr.

Rozhodující kombinace C2 – Průřez 3

$$\xi \cdot \gamma_G \cdot G + Z_{LM71} \cdot \gamma_{Q,LM71} \cdot gr12_{LM71} \cdot \alpha \cdot \Phi \cdot Q_{LM71} + \gamma_{Q,BR} \cdot gr12_{BR} \cdot \alpha \cdot Q_{BR(4,\leftarrow)} + \gamma_{Q,ROZ} \cdot gr12_{ROZ} \cdot \alpha \cdot Q_{ROZ(+)} + \gamma_{Q,V} \cdot \psi_{0,V} \cdot Q_{V(\leftarrow+\downarrow)} + \gamma_{Q,T} \cdot \psi_{0,T} \cdot Q_{T(OHŘ)}$$

$$0,95 \cdot 1,2 \cdot G + Z_{LM71} \cdot 1,3 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,541 \cdot Q_{LM71} + 1,3 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot Q_{BR(4,\leftarrow)} + 1,3 \cdot 0,5 \cdot 1,0 \cdot Q_{ROZ(+)} + 1,35 \cdot 0,5 \cdot Q_{V(\leftarrow+\downarrow)} + 1,35 \cdot 0,6 \cdot Q_{T(OHŘ)}$$

$$1,14 \cdot G + Z_{LM71} \cdot 2,003 \cdot Q_{LM71} + 1,3 \cdot Q_{BR(4,\leftarrow)} + 0,65 \cdot Q_{ROZ(+)} + 0,675 \cdot Q_{V(\leftarrow+\downarrow)} + 0,81 \cdot Q_{T(OHŘ)}$$

Rozhodující kombinace C2 – Průřez 4

$$\xi \cdot \gamma_G \cdot G + Z_{LM71} \cdot \gamma_{Q,LM71} \cdot gr12_{LM71} \cdot \alpha \cdot \Phi \cdot Q_{LM71} + \gamma_{Q,BR} \cdot gr12_{BR} \cdot \alpha \cdot Q_{BR(7,\leftarrow)} + \gamma_{Q,ROZ} \cdot gr12_{ROZ} \cdot \alpha \cdot Q_{ROZ(+)} + \gamma_{Q,V} \cdot \psi_{0,V} \cdot Q_{V(\leftarrow+\downarrow)} + \gamma_{Q,T} \cdot \psi_{0,T} \cdot Q_{T(OCH)}$$

$$0,95 \cdot 1,2 \cdot G + Z_{LM71} \cdot 1,3 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,541 \cdot Q_{LM71} + 1,3 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot Q_{BR(7,\leftarrow)} + 1,3 \cdot 0,5 \cdot 1,0 \cdot Q_{ROZ(+)} + 1,35 \cdot 0,5 \cdot Q_{V(\leftarrow+\downarrow)} + 1,35 \cdot 0,6 \cdot Q_{T(OCH)}$$

$$1,14 \cdot G + Z_{LM71} \cdot 2,003 \cdot Q_{LM71} + 1,3 \cdot Q_{BR(7,\leftarrow)} + 0,65 \cdot Q_{ROZ(+)} + 0,675 \cdot Q_{V(\leftarrow+\downarrow)} + 0,81 \cdot Q_{T(OCH)}$$



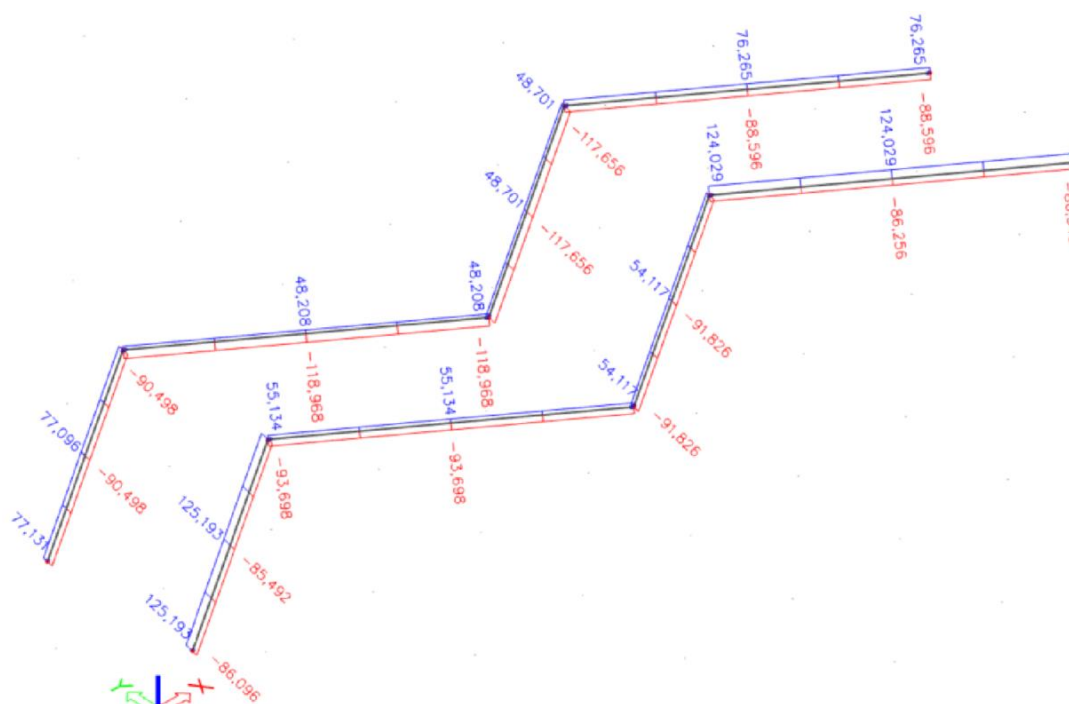
Vnitřní síly

Průřez 3					
N_{Ed}	125,193	kN	$N_{LM71,Ed}$	41,072	kN
			$N_{rs,Ed}$	84,121	kN

Tabulka 15: Vnitřní síly v průřezu 3

Průřez 4					
N_{Ed}	-118,968	kN	$N_{LM71,Ed}$	-68,050	kN
			$N_{rs,Ed}$	-50,918	kN

Tabulka 16: Vnitřní síly v průřezu 4



Obr. 64: Obálka normálových sil na horním vodorovném ztužení

Zatřídění průřezu

Podmínka pro třídu průřezu 3:

$$\text{tlak: } h/t \leq 15 \cdot \epsilon \quad \wedge \quad \frac{b+h}{2 \cdot t} \leq 11,5 \cdot \epsilon$$

$$\epsilon = \sqrt{235/f_y} = \sqrt{235/210} = 1,058$$

$$15 \cdot \epsilon = 15 \cdot 1,058 = 15,870$$

$$11,5 \cdot \epsilon = 11,5 \cdot 1,058 = 12,167$$

$$b = 90 \text{ mm}; h = 90 \text{ mm}; t = 10 \text{ mm}$$

$$h/t = 90/10 = 9 < 15,870 \rightarrow \text{VYHOVÍ}$$

$$\frac{b+h}{2 \cdot t} = \frac{90+90}{2 \cdot 10} = 9 < 12,167 \rightarrow \text{VYHOVÍ}$$



Tahová únosnost

$$N_{t,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1,713 \cdot 210}{1,10} = 327,027 \text{ kN}$$

Vzpěrná únosnost

Jelikož se jedná o symetrický průřez se stejnými momenty setrvačnosti $I_y = I_z$, rozhoduje vzpěrná délka, která je delší pro vybočení z roviny odpovídající teoretické délce diagonály $L_{cr,z} = 2,495 \text{ m}$. Pro vybočení v rovině, jemuž brání částečně i příslušné styčnickové plechy, je tato délka redukována $L_{cr,y} = 0,85 \cdot 2,495 = 2,121 \text{ m}$. [15] Součinitel imperfekce $\alpha = 0,34$ odpovídá křivce vzpěrné pevnosti b.

$$\lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = \pi \cdot \sqrt{\frac{200000}{210}} = 96,952$$

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr,z}}{i_z} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{2,495}{0,0272} \cdot \frac{1}{96,952} = 0,946$$

$$\Phi_z = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2] = 0,5 \cdot [1 + 0,34 \cdot (0,946 - 0,2) + 0,946^2] = 1,074$$

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi_z + \sqrt{\Phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{1,074 + \sqrt{1,074^2 - 0,946^2}} = 0,632$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,632 \cdot 1,713 \cdot 210}{1,20} = 189,458 \text{ kN}$$

Zatížitelnost v tahu

$$Z_{LM71} = \frac{1 - \eta_{1,rs}}{\eta_{1,LM71}}$$

$$\eta_{1,rs} = \frac{N_{rs,Ed}}{A \cdot f_y / \gamma_{M0}} = \frac{84,121}{327,027} = 0,257$$

$$\eta_{1,LM71} = \frac{N_{LM71,Ed}}{A \cdot f_y / \gamma_{M0}} = \frac{41,072}{327,027} = 0,126$$

$$Z_{LM71} = \frac{1 - 0,257}{0,126} = 5,90$$



Zatížitelnost v tlaku

$$Z_{LM71} = \frac{1 - \eta_{1,rs}}{\eta_{1,LM71}}$$

$$\eta_{1,rs} = \frac{N_{rs,Ed}}{\chi \cdot A \cdot f_y / \gamma_{M1}} = \frac{50,918}{189,458} = 0,269$$

$$\eta_{1,LM71} = \frac{N_{LM71,Ed}}{\chi \cdot A \cdot f_y / \gamma_{M1}} = \frac{68,050}{189,458} = 0,359$$

$$Z_{LM71} = \frac{1 - 0,269}{0,359} = 2,04$$

4.1.3. Dolní vodorovné ztužení

Z konstrukčního hlediska by mělo v dolním ztužení vznikat především tahové namáhání prvků. V důsledku umístění osy koleje mimo osu nosné konstrukce tam však při zatěžování vznikají i síly tlakové. Nejvíce tahem namáhaná diagonála se nachází ve třetím kříži a vede zprava doleva (průřez 5). Největší tlaková síla vznikla v poslední diagonále směřující zleva doprava (průřez 6).

Rozhodující kombinace C2 – Průřez 5

$$\xi \cdot \gamma_G \cdot G + Z_{LM71} \cdot \gamma_{Q,LM71} \cdot gr12_{LM71} \cdot \alpha \cdot \Phi \cdot Q_{LM71} + \gamma_{Q,BR} \cdot gr12_{BR} \cdot \alpha \cdot Q_{BR(5,\rightarrow)} + \gamma_{Q,ROZ} \cdot gr12_{ROZ} \cdot \alpha \cdot Q_{ROZ(+)} + \gamma_{Q,V} \cdot \psi_{0,V} \cdot Q_{V(\rightarrow+\downarrow)} + \gamma_{Q,T} \cdot \psi_{0,T} \cdot Q_{T(OHŘ)}$$

$$0,95 \cdot 1,2 \cdot G + Z_{LM71} \cdot 1,3 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,541 \cdot Q_{LM71} + 1,3 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot Q_{BR(5,\rightarrow)} + 1,3 \cdot 0,5 \cdot 1,0 \cdot Q_{ROZ(+)} + 1,35 \cdot 0,5 \cdot Q_{V(\rightarrow+\downarrow)} + 1,35 \cdot 0,6 \cdot Q_{T(OHŘ)}$$

$$1,14 \cdot G + Z_{LM71} \cdot 2,003 \cdot Q_{LM71} + 1,3 \cdot Q_{BR(5,\rightarrow)} + 0,65 \cdot Q_{ROZ(+)} + 0,675 \cdot Q_{V(\rightarrow+\downarrow)} + 0,81 \cdot Q_{T(OHŘ)}$$

Rozhodující kombinace C2 – Průřez 6

$$\xi \cdot \gamma_G \cdot G + Z_{LM71} \cdot \gamma_{Q,LM71} \cdot gr12_{LM71} \cdot \alpha \cdot \Phi \cdot Q_{LM71} + \gamma_{Q,BR} \cdot gr12_{BR} \cdot \alpha \cdot Q_{BR(11,\rightarrow)} + \gamma_{Q,ROZ} \cdot gr12_{ROZ} \cdot \alpha \cdot Q_{ROZ(+)} + \gamma_{Q,V} \cdot \psi_{0,V} \cdot Q_{V(\rightarrow+\downarrow)} + \gamma_{Q,T} \cdot \psi_{0,T} \cdot Q_{T(OHŘ)}$$

$$0,95 \cdot 1,2 \cdot G + Z_{LM71} \cdot 1,3 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,541 \cdot Q_{LM71} + 1,3 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot Q_{BR(11,\rightarrow)} + 1,3 \cdot 0,5 \cdot 1,0 \cdot Q_{ROZ(+)} + 1,35 \cdot 0,5 \cdot Q_{V(\rightarrow+\downarrow)} + 1,35 \cdot 0,6 \cdot Q_{T(OHŘ)}$$

$$1,14 \cdot G + Z_{LM71} \cdot 2,003 \cdot Q_{LM71} + 1,3 \cdot Q_{BR(11,\rightarrow)} + 0,65 \cdot Q_{ROZ(+)} + 0,675 \cdot Q_{V(\rightarrow+\downarrow)} + 0,81 \cdot Q_{T(OHŘ)}$$



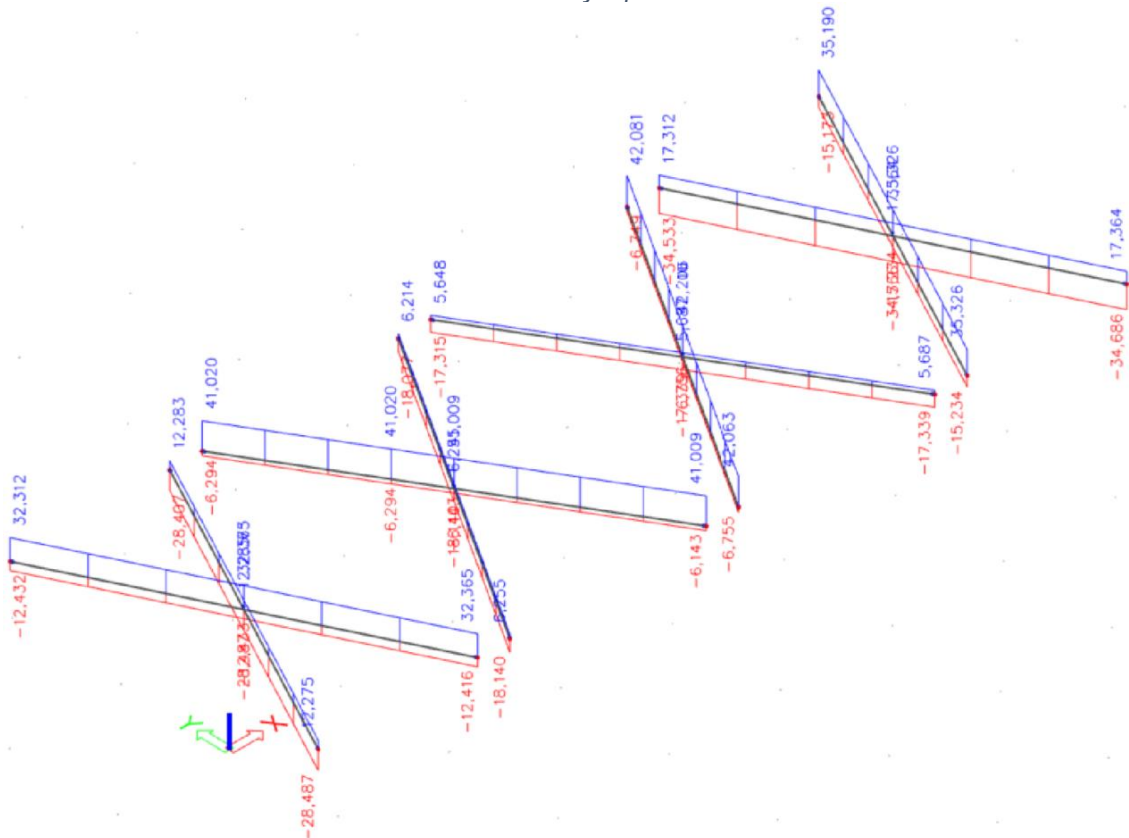
Vnitřní síly

Průřez 5					
N_{Ed}	42,081	kN	$N_{LM71,Ed}$	35,187	kN
			$N_{rs,Ed}$	6,897	kN

Tabulka 17: Vnitřní síly v průřezu 5

Průřez 6					
N_{Ed}	-34,686	kN	$N_{LM71,Ed}$	-16,972	kN
			$N_{rs,Ed}$	-17,714	kN

Tabulka 18: Vnitřní síly v průřezu 6



Obr. 65: Obálka normálových sil na dolním vodorovném ztužení

Zatřídění průřezu⁸

Podmínka pro třídu průřezu 1:

$$\text{tlak: } c/t \leq 9 \cdot \varepsilon$$

$$\varepsilon = \sqrt{235/f_y} = \sqrt{235/210} = 1,058$$

$$9 \cdot \varepsilon = 9 \cdot 1,058 = 9,522$$

$$c = 80 \text{ mm; } t = 11 \text{ mm}$$

$$c/t = 80/11 = 7,273 < 9,522 \rightarrow \text{VYHOVÍ}$$

⁸ Pro zatřídění průřezu plechu byl využit z ČSN EN 1993-1-1 [13] vztah pro přečnívající části pásnic.



Tahová únosnost

$$N_{t,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{8,800 \cdot 10^{-4} \cdot 210 \cdot 10^3}{1,10} = 168,000 \text{ kN}$$

Vzpěrná únosnost

Vzpěrná délka v rovině je stejně jako u horního ztužení v důsledku příspěvku styčnickových plechů snížena $L_{cr,y} = 0,85 \cdot 3,345 = 2,843$ m. Na základě přiřazení průřezu ke křivce vzpěrné pevnosti c je součinitel imperfekce $\alpha = 0,49$.

$$\lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = \pi \cdot \sqrt{\frac{200000}{210}} = 96,952$$

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr,y}}{i_y} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{0,85 \cdot 3,345}{0,0032} \cdot \frac{1}{96,952} = 9,164$$

$$\Phi_y = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2] = 0,5 \cdot [1 + 0,49 \cdot (9,164 - 0,2) + 9,164^2] = 44,686$$

$$\chi_y = \frac{1}{\Phi_y + \sqrt{\Phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{44,686 + \sqrt{44,686^2 - 9,164^2}} = 0,011$$

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr,z}}{i_z} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{3,345}{0,0231} \cdot \frac{1}{96,952} = 1,494$$

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

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi_z + \sqrt{\Phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{1,933 + \sqrt{1,933^2 - 1,494^2}} = 0,316$$

$$\chi = \min(\chi_y; \chi_z) = \min(0,011; 0,316) = 0,011$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,011 \cdot 8,800 \cdot 10^{-4} \cdot 210 \cdot 10^3}{1,20} = 1,694 \text{ kN}$$

Zatížitelnost v tahu

$$\eta_{1,rs} = \frac{N_{rs,Ed}}{A \cdot f_y / \gamma_{M0}} = \frac{6,897}{168,000} = 0,041$$

$$\eta_{1,LM71} = \frac{N_{LM71,Ed}}{A \cdot f_y / \gamma_{M0}} = \frac{35,187}{168,000} = 0,209$$

$$Z_{LM71} = \frac{1 - \eta_{1,rs}}{\eta_{1,LM71}} = \frac{1 - 0,041}{0,209} = 4,59$$



Zatížitelnost v tlaku

$$\eta_{1,rs} = \frac{N_{rs,Ed}}{\chi \cdot A \cdot f_y / \gamma_{M1}} = \frac{17,714}{1,694} = 10,457$$

$$\eta_{1,LM71} = \frac{N_{LM71,Ed}}{\chi \cdot A \cdot f_y / \gamma_{M1}} = \frac{16,972}{1,694} = 10,019$$

$$Z_{LM71} = \frac{1 - \eta_{1,rs}}{\eta_{1,LM71}} = \frac{1 - 10,457}{10,019} = -0,94$$

Ze záporného výsledku zatížitelnosti je patrné, že prvek nepřenesl ani všechna ostatní zatížení kromě modelu LM71 z nejnepříznivější kombinace.

4.1.4. Příčné ztužení

Příčné ztužení tvoří dva různé průřezy, které je nutné posoudit. Horní a dolní pas je tvořen dvojicí úhelníků a křížová výplň je z plechů. Toto ztužení roznáší síly mezi hlavními nosníky, ke kterým je připojeno kloubově, a proto zde vznikají dominantně osově síly, z nichž jsou významnější ty tlakové. Oba průřezy budou z tohoto důvodu posuzovány na vzpěr. Nejvíce jsou namáhány prvky třetího příčného ztužení v pravé části mostu v těsné blízkosti středního hlavního nosníku v horním pase (průřez 7) a v sestupné diagonále (průřez 8).

Rozhodující kombinace C2 – Průřez 7

$$\xi \cdot Y_G \cdot G + Z_{LM71} \cdot Y_{Q,LM71} \cdot gr12_{LM71} \cdot \alpha \cdot \Phi \cdot Q_{LM71} + Y_{Q,BR} \cdot gr12_{BR} \cdot \alpha \cdot Q_{BR(6,\rightarrow)} + Y_{Q,ROZ} \cdot gr12_{ROZ} \cdot \alpha \cdot Q_{ROZ(-)} + Y_{Q,V} \cdot \psi_{0,V} \cdot Q_{V(\rightarrow+\downarrow)} + Y_{Q,T} \cdot \psi_{0,T} \cdot Q_{T(OHŘ)}$$

$$0,95 \cdot 1,2 \cdot G + Z_{LM71} \cdot 1,3 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,541 \cdot Q_{LM71} + 1,3 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot Q_{BR(6,\rightarrow)} + 1,3 \cdot 0,5 \cdot 1,0 \cdot Q_{ROZ(-)} + 1,35 \cdot 0,5 \cdot Q_{V(\rightarrow+\downarrow)} + 1,35 \cdot 0,6 \cdot Q_{T(OHŘ)}$$

$$1,14 \cdot G + Z_{LM71} \cdot 2,003 \cdot Q_{LM71} + 1,3 \cdot Q_{BR(6,\rightarrow)} + 0,65 \cdot Q_{ROZ(-)} + 0,675 \cdot Q_{V(\rightarrow+\downarrow)} + 0,81 \cdot Q_{T(OHŘ)}$$

Rozhodující kombinace C2 – Průřez 8

$$\xi \cdot Y_G \cdot G + Z_{LM71} \cdot Y_{Q,LM71} \cdot gr12_{LM71} \cdot \alpha \cdot \Phi \cdot Q_{LM71} + Y_{Q,BR} \cdot gr12_{BR} \cdot \alpha \cdot Q_{BR(6,\rightarrow)} + Y_{Q,ROZ(-)} \cdot gr12_{ROZ} \cdot \alpha \cdot Q_{ROZ} + Y_{Q,V} \cdot \psi_{0,V} \cdot Q_{V(\rightarrow+\downarrow)} + Y_{Q,T} \cdot \psi_{0,T} \cdot Q_{T(OCH)}$$

$$0,95 \cdot 1,2 \cdot G + Z_{LM71} \cdot 1,3 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,541 \cdot Q_{LM71} + 1,3 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot Q_{BR(6,\rightarrow)} + 0,65 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot Q_{ROZ(-)} + 1,35 \cdot 0,5 \cdot Q_{V(\rightarrow+\downarrow)} + 1,35 \cdot 0,6 \cdot Q_{T(OCH)}$$

$$1,14 \cdot G + Z_{LM71} \cdot 2,003 \cdot Q_{LM71} + 1,3 \cdot Q_{BR(6,\rightarrow)} + 0,65 \cdot Q_{ROZ(-)} + 0,675 \cdot Q_{V(\rightarrow+\downarrow)} + 0,81 \cdot Q_{T(OCH)}$$



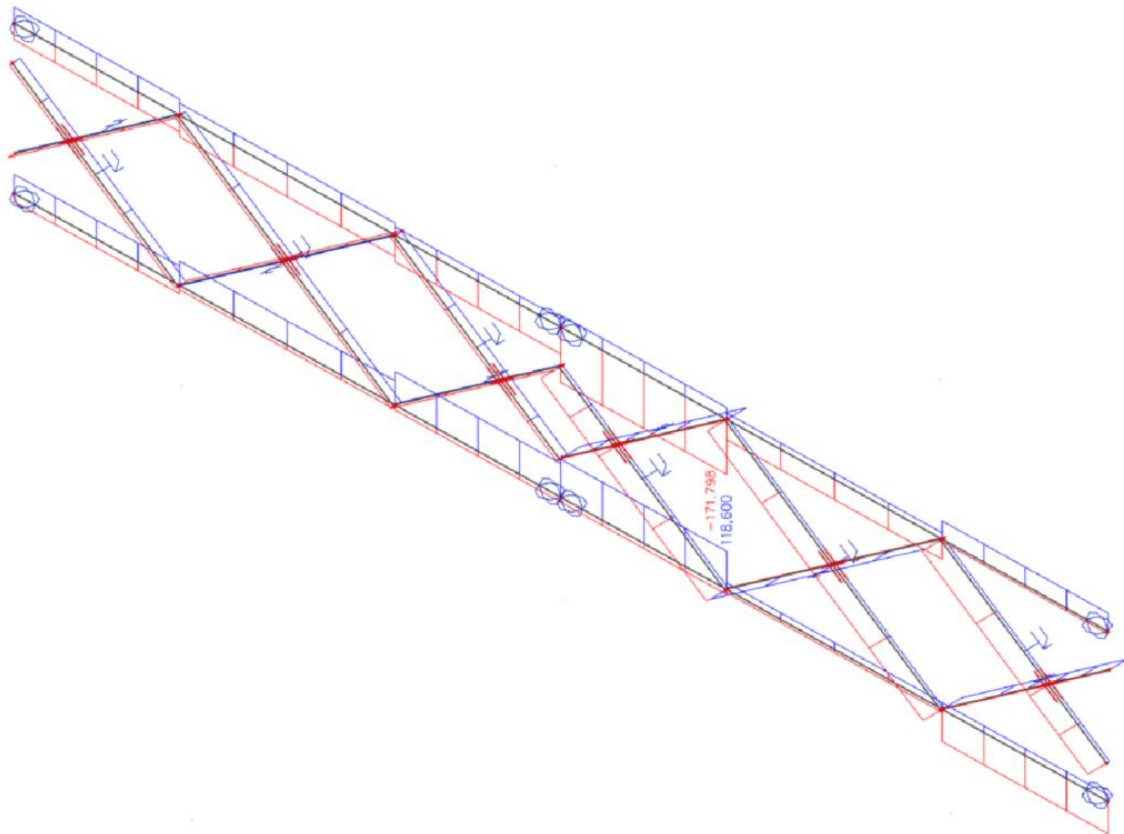
Vnitřní síly

Průřez 7					
N_{Ed}	-171,798	kN	$N_{LM71,Ed}$	-138,366	kN
			$N_{rs,Ed}$	-33,432	kN

Tabulka 19: Vnitřní síly v průřezu 7

Průřez 8					
N_{Ed}	-69,433	kN	$N_{LM71,Ed}$	-59,287	kN
			$N_{rs,Ed}$	-10,146	kN

Tabulka 20: Vnitřní síly v průřezu 8



Obr. 66: Obálka normálových sil na příčném ztužení

Zatřídění průřezu

Podmínka pro třídu průřezu 3 pro pasy z úhelníků:

$$\text{tlak: } h/t \leq 15 \cdot \varepsilon \quad \wedge \quad \frac{b+h}{2 \cdot t} \leq 11,5 \cdot \varepsilon$$

$$\varepsilon = \sqrt{235/f_y} = \sqrt{235/210} = 1,058$$

$$15 \cdot \varepsilon = 15 \cdot 1,058 = 15,870$$

$$11,5 \cdot \varepsilon = 11,5 \cdot 1,058 = 12,167$$

$$b = 85 \text{ mm}; h = 85 \text{ mm}; t = 10 \text{ mm}$$



$$h/t = 85/10 = 8,5 < 15,870 \rightarrow \text{VYHOVÍ}$$

$$\frac{b+h}{2 \cdot t} = \frac{85+85}{2 \cdot 10} = 8,5 < 12,167 \rightarrow \text{VYHOVÍ}$$

Podmínka pro třídu průřezu 1 pro diagonály z plechů:

$$\text{tlak: } c/t \leq 9 \cdot \varepsilon$$

$$\varepsilon = \sqrt{235/f_y} = \sqrt{235/210} = 1,058$$

$$9 \cdot \varepsilon = 9 \cdot 1,058 = 9,522$$

$$c = 60 \text{ mm}; t = 8 \text{ mm}$$

$$c/t = 60/8 = 7,500 < 9,522 \rightarrow \text{VYHOVÍ}$$

Vzpěrná únosnost pasů

Průřez je charakterizovaný křivkou vzpěrné pevnosti b, pro kterou je stanoven součinitel imperfekce $\alpha = 0,34$.

$$\lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = \pi \cdot \sqrt{\frac{200000}{210}} = 96,952$$

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr,y}}{i_y} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{1,422}{0,0257} \cdot \frac{1}{96,952} = 0,571$$

$$\Phi_y = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2] = 0,5 \cdot [1 + 0,34 \cdot (0,571 - 0,2) + 0,571^2] = 0,726$$

$$\chi_y = \frac{1}{\Phi_y + \sqrt{\Phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{0,726 + \sqrt{0,726^2 - 0,571^2}} = 0,852$$

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr,z}}{i_z} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{1,422}{0,0431} \cdot \frac{1}{96,952} = 0,340$$

$$\Phi_z = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2] = 0,5 \cdot [1 + 0,34 \cdot (0,340 - 0,2) + 0,340^2] = 0,582$$

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi_z + \sqrt{\Phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{0,582 + \sqrt{0,582^2 - 0,340^2}} = 0,948$$

$$\chi = \min(\chi_y; \chi_z) = \min(0,852; 0,948) = 0,852$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,852 \cdot 3,222 \cdot 210}{1,20} = 480,400 \text{ kN}$$



Vzpěrná únosnost diagonál

Průřezu diagonál příčného ztužení byla přiřazena stejná křivka vzpěrné pevnosti jako dolnímu ztužení. Pro křivku c je součinitel imperfekce $\alpha = 0,49$. Při vybočení z roviny má prut okrajové podmínky odpovídající na jedné straně kloubu, na druhé straně vetknutí. Proto vzpěrná délka je teoretická délka redukována součinitelem 0,7. [15]

$$\lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = \pi \cdot \sqrt{\frac{200000}{210}} = 96,952$$

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr,y}}{i_y} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{0,34}{0,0023} \cdot \frac{1}{96,952} = 1,525$$

$$\Phi_y = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2] = 0,5 \cdot [1 + 0,49 \cdot (1,525 - 0,2) + 1,525^2] = 1,987$$

$$\chi_y = \frac{1}{\Phi_y + \sqrt{\Phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{1,987 + \sqrt{1,987^2 - 1,525^2}} = 0,307$$

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr,z}}{i_z} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{0,7 \cdot 0,34}{0,0173} \cdot \frac{1}{96,952} = 0,142$$

$$\Phi_z = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2] = 0,5 \cdot [1 + 0,49 \cdot (0,142 - 0,2) + 0,142^2] = 0,496$$

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi_z + \sqrt{\Phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{0,496 + \sqrt{0,496^2 - 0,142^2}} = 1,030 \quad \chi \leq 1,0 \rightarrow \chi_z = 1,0$$

$$\chi = \min(\chi_y; \chi_z) = \min(0,307; 1,0) = 0,307$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,307 \cdot 4,800 \cdot 10^{-4} \cdot 210 \cdot 10^3}{1,20} = 25,788 \text{ kN}$$

Zatížitelnost pasů

$$\eta_{1,rs} = \frac{N_{rs,Ed}}{\chi \cdot A \cdot f_y / \gamma_{M1}} = \frac{33,432}{480,400} = 0,070$$

$$\eta_{1,LM71} = \frac{N_{LM71,Ed}}{\chi \cdot A \cdot f_y / \gamma_{M1}} = \frac{138,366}{480,400} = 0,288$$

$$Z_{LM71} = \frac{1 - \eta_{1,rs}}{\eta_{1,LM71}} = \frac{1 - 0,070}{0,288} = 3,23$$

**Zatížitelnost diagonál**

$$\eta_{1,rs} = \frac{N_{rs,Ed}}{\chi \cdot A \cdot f_y / \gamma_{M1}} = \frac{10,146}{25,788} = 0,393$$

$$\eta_{1,LM71} = \frac{N_{LM71,Ed}}{\chi \cdot A \cdot f_y / \gamma_{M1}} = \frac{59,287}{25,788} = 2,299$$

$$Z_{LM71} = \frac{1 - \eta_{1,rs}}{\eta_{1,LM71}} = \frac{1 - 0,393}{2,299} = 0,26$$

4.1.5. Přípoj horního vodorovného ztužení

Následující posudky pro stanovení zatížitelnosti se týkají čtyř přípojů. Všechny jsou namáhány smykem, a rozhoduje tedy nižší z únosností ve stříhu a v otláčení. [16]

$$d = d_0 = 20 \text{ mm}$$

$$A_0 = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 20^2}{4} = 314,159 \text{ mm}^2$$

$$f_u = 340 \text{ MPa}$$

$$f_{ur} = 310 \text{ MPa}$$

U horního ztužení se bude posuzovat přípoj první pravé diagonály (průřez 3), ve které vzniká největší síla.

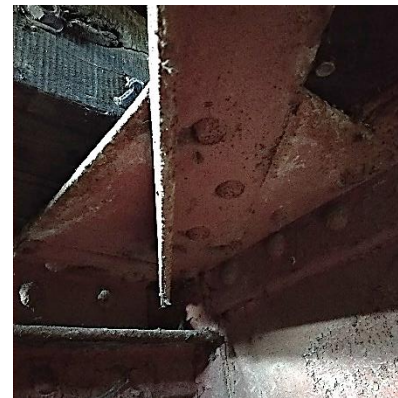
$$m = 3 \text{ nýty}$$

$$n = 1 \text{ stříh}$$

$$t = 10 \text{ mm}$$

$$e_1 = 40 \text{ mm}; e_2 = 30 \text{ mm}$$

$$p_1 = 90 \text{ mm}; p_2 = 100 \text{ mm}$$



Obr. 67: Přípoj horního ztužení

Stříh

$$F_{v,Rd} = \frac{n \cdot 0,6 \cdot f_{ur} \cdot A_0}{\gamma_{M2}} = \frac{1 \cdot 0,6 \cdot 310 \cdot 10^3 \cdot 314,159 \cdot 10^{-6}}{1,30} = 44,949 \text{ kN}$$



Otlačení

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}}$$

$$\alpha_b = \min(\alpha_d; f_{ur}/f_u; 1,0) = \min(0,667; 0,912; 1,0) = 0,667$$

$$f_{ur}/f_u = 310/340 = 0,912$$

$$\alpha_d = \min\left(\frac{e_1}{3 \cdot d_0}; \frac{p_1}{3 \cdot d_0} - \frac{1}{4}\right) = \min\left(\frac{40}{3 \cdot 20}; \frac{90}{3 \cdot 20} - \frac{1}{4}\right) = \min(0,667; 1,25) = 0,667$$

$$k_1 = \min\left(2,8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1,7; 1,4 \cdot \frac{p_2}{d_0} - 1,7; 2,5\right)$$

$$k_1 = \min\left(2,8 \cdot \frac{30}{20} - 1,7; 1,4 \cdot \frac{100}{20} - 1,7; 2,5\right) = \min(2,5; 68,3; 2,5) = 2,5$$

$$F_{b,Rd} = \frac{2,5 \cdot 0,667 \cdot 340 \cdot 10^3 \cdot 0,020 \cdot 0,010}{1,30} = 87,223 \text{ kN}$$

Únosnost přípoje

$$F_{Rd} = m \cdot \min(F_{v,Rd}; F_{b,Rd}) = 3 \cdot \min(44,949; 87,223) = 3 \cdot 44,949 = 134,847 \text{ kN}$$

Zatížitelnost

$$\eta_{1,rs} = \frac{N_{rs,Ed}}{F_{Rd}} = \frac{84,121}{134,847} = 0,624$$

$$\eta_{1,LM71} = \frac{N_{LM71,Ed}}{F_{Rd}} = \frac{41,072}{134,847} = 0,305$$

$$Z_{LM71} = \frac{1 - \eta_{1,rs}}{\eta_{1,LM71}} = \frac{1 - 0,624}{0,305} = 1,23$$

4.1.6. Přípoj dolního vodorovného ztužení

Největší síla v dolním vodorovném ztužení se nachází v průřezu 5.

$$m = 3 \text{ nýty}$$

$$n = 1 \text{ stříh}$$

$$t = 11 \text{ mm}$$

$$e_1 = 40 \text{ mm}, e_2 = 40 \text{ mm}$$

$$p_1 = 80 \text{ mm}$$



Obr. 68: Přípoj dolního ztužení



Střih

$$F_{v,Rd} = \frac{n \cdot 0,6 \cdot f_{ur} \cdot A_0}{\gamma_{M2}} = \frac{1 \cdot 0,6 \cdot 310 \cdot 10^3 \cdot 314,159 \cdot 10^{-6}}{1,30} = 44,949 \text{ kN}$$

Otlačení

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}}$$

$$\alpha_b = \min(\alpha_d; f_{ur}/f_u; 1,0) = \min(0,667; 0,912; 1,0) = 0,667$$

$$\alpha_d = \min\left(\frac{e_1}{3 \cdot d_0}; \frac{p_1}{3 \cdot d_0} - \frac{1}{4}\right) = \min\left(\frac{40}{3 \cdot 20}; \frac{80}{3 \cdot 20} - \frac{1}{4}\right) = \min(0,667; 1,083) = 0,667$$

$$k_1 = \min\left(2,8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1,7; 1,4 \cdot \frac{p_2}{d_0} - 1,7; 2,5\right)$$

$$k_1 = \min\left(2,8 \cdot \frac{40}{20} - 1,7; 2,5\right) = \min(3,9; 2,5) = 2,5$$

$$F_{b,Rd} = \frac{2,5 \cdot 0,667 \cdot 340 \cdot 10^3 \cdot 0,020 \cdot 0,011}{1,30} = 95,945 \text{ kN}$$

Únosnost přípoje

$$F_{Rd} = m \cdot \min(F_{v,Rd}; F_{b,Rd}) = 3 \cdot \min(44,949; 95,945) = 3 \cdot 44,949 = 134,847 \text{ kN}$$

Zatížitelnost

$$\eta_{1,rs} = \frac{N_{rs,Ed}}{F_{Rd}} = \frac{6,897}{134,847} = 0,051$$

$$\eta_{1,LM71} = \frac{N_{LM71,Ed}}{F_{Rd}} = \frac{35,187}{134,847} = 0,261$$

$$Z_{LM71} = \frac{1 - \eta_{1,rs}}{\eta_{1,LM71}} = \frac{1 - 0,051}{0,261} = 3,64$$

4.1.7. Přípoj příčného ztužení: pas – hlavní nosník

Zde bude posouzen přípoj průřezu 7.

$$m = 1 \text{ nýt}$$

$$n = 2 \text{ stříhy}$$

$$t = 20 \text{ mm}$$

$$e_1 = 30 \text{ mm}, e_2 = 40 \text{ mm}$$



Obr. 69: Přípoj pasu příčného ztužení k hlavnímu nosníku



Střih

$$F_{v,Rd} = \frac{n \cdot 0,6 \cdot f_{ur} \cdot A_0}{\gamma_{M2}} = \frac{2 \cdot 0,6 \cdot 310 \cdot 10^3 \cdot 314,159 \cdot 10^{-6}}{1,30} = 89,898 \text{ kN}$$

Otlačení

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}}$$

$$\alpha_b = \min(\alpha_d; f_{ur}/f_u; 1,0) = \min(0,500; 0,912; 1,0) = 0,500$$

$$\alpha_d = \frac{e_1}{3 \cdot d_0} = \frac{30}{3 \cdot 20} = 0,500$$

$$k_1 = \min\left(2,8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1,7; 2,5\right) = \min\left(2,8 \cdot \frac{40}{20} - 1,7; 2,5\right) = \min(3,9; 2,5) = 2,5$$

$$F_{b,Rd} = \frac{2,5 \cdot 0,500 \cdot 340 \cdot 10^3 \cdot 0,020 \cdot 0,020}{1,30} = 130,769 \text{ kN}$$

Únosnost přípoje

$$F_{Rd} = m \cdot \min(F_{v,Rd}; F_{b,Rd}) = 1 \cdot \min(89,898; 130,769) = 1 \cdot 89,898 = 89,898 \text{ kN}$$

Zatžitelnost

$$\eta_{1,rs} = \frac{N_{rs,Ed}}{F_{Rd}} = \frac{33,432}{89,898} = 0,372$$

$$\eta_{1,LM71} = \frac{N_{LM71,Ed}}{F_{Rd}} = \frac{138,366}{89,898} = 1,539$$

$$Z_{LM71} = \frac{1 - \eta_{1,rs}}{\eta_{1,LM71}} = \frac{1 - 0,372}{1,539} = 0,41$$

4.1.8. Přípoj příčného ztužení: pas – diagonály

Nejvíce namáhaná diagonála je v průřezu 8. Na přípoj však působí dvě síly, z nichž byla stanovena výslednice (viz Obr. 71), která byla také použita pro posudek.

$$m = 1 \text{ nýt}$$

$$n = 2 \text{ střihy}$$

$$t_1 = 8 \text{ mm}; t_2 = 20 \text{ mm}$$

$$e_1 = 30 \text{ mm}, e_2 = 30 \text{ mm}$$



Obr. 70: Přípoj diagonál příčného ztužení k pasu



Střih

$$F_{v,Rd} = \frac{n \cdot 0,6 \cdot f_{ur} \cdot A_0}{\gamma_{M2}} = \frac{2 \cdot 0,6 \cdot 310 \cdot 10^3 \cdot 314,159 \cdot 10^{-6}}{1,30} = 89,898 \text{ kN}$$

Otlačení

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}}$$

$$\alpha_b = \min(\alpha_d; f_{ur}/f_u; 1,0) = \min(0,500; 0,912; 1,0) = 0,500$$

$$\alpha_d = \frac{e_1}{3 \cdot d_0} = \frac{30}{3 \cdot 20} = 0,500$$

$$k_1 = \min\left(2,8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1,7; 2,5\right) = \min\left(2,8 \cdot \frac{30}{20} - 1,7; 2,5\right) = \min(2,5; 2,5) = 2,5$$

$$F_{b,Rd,1} = \frac{2,5 \cdot 0,500 \cdot 340 \cdot 10^3 \cdot 0,020 \cdot 0,008}{1,30} = 52,308 \text{ kN}$$

$$F_{b,Rd,2} = \frac{2,5 \cdot 0,500 \cdot 340 \cdot 10^3 \cdot 0,020 \cdot 0,020}{1,30} = 130,769 \text{ kN}$$

Otlačení u tohoto přípoje může nastat v jedné diagonále od příslušné síly nebo v pase od působení jejich výslednice.

Únosnost přípoje

$$F_{Rd,1} = m \cdot \min(F_{v,Rd}; F_{b,Rd,1}) = 1 \cdot \min(89,898; 52,308) = 1 \cdot 52,308 = \mathbf{52,308 \text{ kN}}$$

$$F_{Rd,2} = m \cdot \min(F_{v,Rd}; F_{b,Rd,2}) = 1 \cdot \min(89,898; 130,769) = 1 \cdot 89,898 = \mathbf{89,898 \text{ kN}}$$

Zatížitelnost

$$\eta_{1,rs} = \frac{N_{rs,Ed,1}}{F_{Rd,1}} = \frac{10,146}{52,308} = 0,194$$

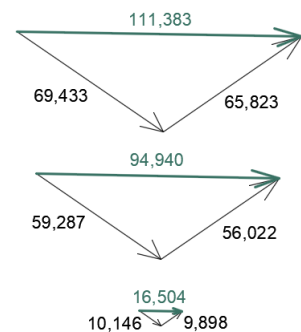
$$\eta_{1,LM71} = \frac{N_{LM71,Ed,1}}{F_{Rd,1}} = \frac{59,287}{52,308} = 1,133$$

$$Z_{LM71} = \frac{1 - \eta_{1,rs}}{\eta_{1,LM71}} = \frac{1 - 0,194}{1,133} = \mathbf{0,71}$$

$$\eta_{1,rs} = \frac{N_{rs,Ed,2}}{F_{Rd,2}} = \frac{16,504}{89,898} = 0,184$$

$$\eta_{1,LM71} = \frac{N_{LM71,Ed,2}}{F_{Rd,2}} = \frac{94,940}{89,898} = 1,056$$

$$Z_{LM71} = \frac{1 - \eta_{1,rs}}{\eta_{1,LM71}} = \frac{1 - 0,184}{1,056} = \mathbf{0,77}$$



Obr. 71: Výslednice sil pro přípoj pas – diagonály

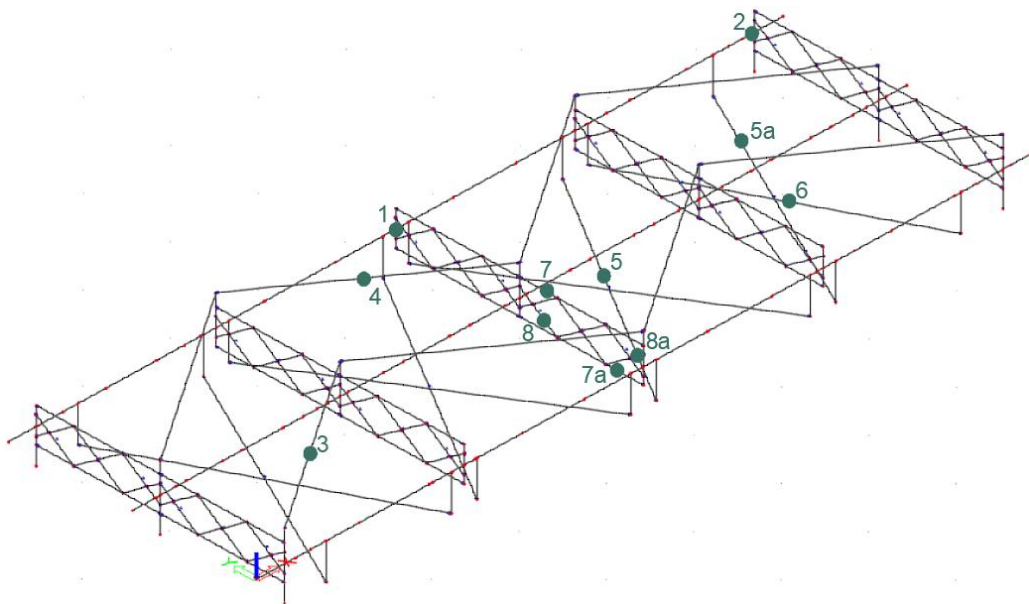


4.2. Nelineární výpočet

Dosud byly vnitřní síly počítány lineárně. Z důvodu výsledné nízké zatížitelnosti vzniklé nedostatečnou vzpěrnou únosností diagonál příčného a zejména dolního ztužení je možné výslednou zatížitelnost zvýšit výpočtem nelineárním.

V následující části práce bylo umožněno vybočení těchto vedlejších nosných prvků výrazně snižujících výslednou zatížitelnost mostu. Základními funkcemi ztužení jsou přenos vodorovných sil a zachování geometrie konstrukce. I při ztrátě stability vybraných tlačných prvků by však tyto funkce měly plnit únosné horní vodorovné ztužení, pasy příčného zavětrování a tažené diagonály příčného i dolního ztužení. Tato úvaha vyústila v nelineární výpočet, ve kterém byla diagonálám příčného a dolního ztužení přisouzena mezní síla odpovídající jejich vzpěrné únosnosti, při jejímž dosažení prvky vybočí, a nepřenášejí tedy žádnou sílu. Ta je přerozdělena mezi jiné prvky konstrukce.

Pro stanovení zatížitelnosti již nebylo možné rozdělit rozhodující kombinaci na dvě části jako u lineárního výpočtu. Bylo tedy postupováno iteračně. Odhadem hodnoty zatížitelnosti byly vynásobeny účinky modelu LM71 a vnitřní síly získané z celé kombinace byly použity do posudků. V případě, že využitelnost byla rovna 1,0, byl odhad zatížitelnosti správný. Ačkoli výpočet vycházel ze stejných průřezů a kombinací jako v předchozí kapitole, tak v důsledku přerozdělení vnitřních sil musely být posouzeny i jiné prvky, jež nyní dosahovaly většího namáhání.



Obr. 72: Doplněný přehled posuzovaných prvků a průřezů



4.2.1. Hlavní nosník

Průřez 1

Z _{LM71}	1,00	
N _{Ed}	109,464	kN
V _{Ed}	-40,880	kN
M _{y,Ed}	1301,325	kNm
M _{z,Ed}	7,119	kNm

Posudek 1,279

Iterace 1

Z _{LM71}	0,75	
N _{Ed}	115,414	kN
V _{Ed}	-32,162	kN
M _{y,Ed}	989,405	kNm
M _{z,Ed}	5,712	kNm

Posudek 0,981

Iterace 2

Z _{LM71}	0,76	
N _{Ed}	115,467	kN
V _{Ed}	-33,102	kN
M _{y,Ed}	1001,156	kNm
M _{z,Ed}	5,841	kNm

Posudek 0,993

Iterace 3

Z _{LM71}	0,77	
N _{Ed}	115,221	kN
V _{Ed}	-33,492	kN
M _{y,Ed}	1012,978	kNm
M _{z,Ed}	5,906	kNm

Posudek 1,005

Posudky

$$\frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} \leq 0,5 \text{ - podmínka malého smyku}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,b,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,c,Rd}} \leq 1,00$$

$$N_{t,Rd} = 5331,462 \text{ kN}$$

$$V_{pl,Rd} = 945,700 \text{ kN}$$

$$M_{y,b,Rd} = 1090,228 \text{ kNm}$$

$$M_{z,c,Rd} = 109,735 \text{ kNm}$$



$$Z_{LM71} = 1,00: \frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} = \frac{40,880}{945,700} = 0,043 \leq 0,5 \rightarrow \text{VYHOVÍ}$$

$$Z_{LM71} = 1,00: \frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,b,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,c,Rd}} = \frac{109,464}{5331,462} + \frac{1301,325}{1090,228} + \frac{7,119}{109,735} = 1,279$$

Pro nižší hodnoty zatížitelnosti, a tedy nižší posouvající síly podmínka malého smyku vyhoví a není nutné ji znovu ověřovat.

$$\text{Iterace 1: } Z_{LM71} = 0,75: \frac{115,414}{5331,462} + \frac{989,405}{1090,228} + \frac{5,712}{109,735} = 0,981$$

$$\text{Iterace 2: } Z_{LM71} = 0,76: \frac{115,467}{5331,462} + \frac{1001,156}{1090,228} + \frac{5,841}{109,735} = 0,993$$

$$\text{Iterace 3: } Z_{LM71} = 0,77: \frac{115,221}{5331,462} + \frac{1012,978}{1090,228} + \frac{5,906}{109,735} = 1,005 \doteq 1,0$$

Průřez 2

Z_{LM71}	1,00
V_{Ed}	-786,439 kN

Posudek 0,832

Iterace	1
Z_{LM71}	1,20
V_{Ed}	-932,565 kN

Posudek 0,986

Iterace	2
Z_{LM71}	1,21
V_{Ed}	-939,871 kN

Posudek 0,994

Iterace	3
Z_{LM71}	1,22
V_{Ed}	-947,178 kN

Posudek 1,002

Posudky

$$\frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} \leq 1,00$$

$$V_{pl,Rd} = 945,700 \text{ kN}$$

$$Z_{LM71} = 1,00: \frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} = \frac{786,439}{945,700} = 0,832$$



$$\text{Iterace 1: } Z_{LM71} = 1,20: \frac{932,565}{945,700} = 0,986$$

$$\text{Iterace 2: } Z_{LM71} = 1,21: \frac{939,871}{945,700} = 0,994$$

$$\text{Iterace 3: } Z_{LM71} = 1,22: \frac{947,178}{945,700} = 1,002 \doteq 1,0$$

4.2.2. Horní vodorovné ztužení

Průřez 3

Z_{LM71}	1,00
N_{Ed}	111,373 kN

Posudek 0,341

Iterace 1

Z_{LM71}	5,00
N_{Ed}	306,286 kN

Posudek 0,937

Iterace 2

Z_{LM71}	5,50
N_{Ed}	329,772 kN

Posudek 1,008

Iterace 3

Z_{LM71}	5,45
N_{Ed}	327,423 kN

Posudek 1,001

Iterace 4

Z_{LM71}	5,44
N_{Ed}	326,954 kN

Posudek 1,000

Posudky

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1,00$$

$$N_{t,Rd} = 327,027 \text{ kN}$$

$$Z_{LM71} = 1,00: \frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} = \frac{111,373}{327,027} = 0,341$$

$$\text{Iterace 1: } Z_{LM71} = 5,00: \frac{306,286}{327,027} = 0,937$$

$$\text{Iterace 2: } Z_{LM71} = 5,50: \frac{329,772}{327,027} = 1,008$$

$$\text{Iterace 3: } Z_{LM71} = 5,45: \frac{327,423}{327,027} = 1,001$$

$$\text{Iterace 4: } Z_{LM71} = 5,44: \frac{326,954}{327,027} = 1,000$$



Průřez 4

Z_{LM71}	1,00
N_{Ed}	-78,575 kN

Posudek 0,415

Iterace 1

Z_{LM71}	5,00
N_{Ed}	-223,310 kN

Posudek 1,179

Iterace 2

Z_{LM71}	4,00
N_{Ed}	-190,522 kN

Posudek 1,006

Iterace 3

Z_{LM71}	3,95
N_{Ed}	-188,891 kN

Posudek 0,997

Iterace 4

Z_{LM71}	3,96
N_{Ed}	-189,217 kN

Posudek 0,999

Posudky

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,00$$

$$N_{b,Rd} = 189,458 \text{ kN}$$

$$Z_{LM71} = 1,00: \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{78,575}{189,458} = 0,415$$

$$\text{Iterace 1: } Z_{LM71} = 5,00: \frac{223,310}{189,458} = 1,179$$

$$\text{Iterace 2: } Z_{LM71} = 4,00: \frac{190,522}{189,458} = 1,006$$

$$\text{Iterace 3: } Z_{LM71} = 3,95: \frac{188,891}{189,458} = 0,997$$

$$\text{Iterace 4: } Z_{LM71} = 3,96: \frac{189,217}{189,458} = 0,999 \doteq 1,0$$

4.2.3. Dolní vodorovné ztužení

V důsledku přerozdělení vnitřních sil v nelineárním výpočtu bylo dosaženo pro nejnepříznivější kombinaci průřezu 5 se zatížitelností 1,0 maximální síly ve čtvrté diagonále vedoucí zprava doleva v průřezu označeném 5a. Zde je uvedena již výsledná síla pro nejnepříznivější kombinaci právě tohoto průřezu.



Rozhodující kombinace C2 – Průřez 5a

$$\xi \cdot \gamma_G \cdot G + Z_{LM71} \cdot \gamma_{Q,LM71} \cdot gr12_{LM71} \cdot \alpha \cdot \Phi \cdot Q_{LM71} + \gamma_{Q,BR} \cdot gr12_{BR} \cdot \alpha \cdot Q_{BR(11,\rightarrow)} + \gamma_{Q,ROZ} \cdot gr12_{ROZ} \cdot \alpha \cdot Q_{ROZ(+)} + \gamma_{Q,V} \cdot \psi_{0,V} \cdot Q_{V(\rightarrow+\downarrow)} + \gamma_{Q,T} \cdot \psi_{0,T} \cdot Q_{T(OHŘ)}$$

$$0,95 \cdot 1,2 \cdot G + Z_{LM71} \cdot 1,3 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,541 \cdot Q_{LM71} + 1,3 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot Q_{BR(11,\rightarrow)} + 1,3 \cdot 0,5 \cdot 1,0 \cdot Q_{ROZ(+)} + 1,35 \cdot 0,5 \cdot Q_{V(\rightarrow+\downarrow)} + 1,35 \cdot 0,6 \cdot Q_{T(OHŘ)}$$

$$1,14 \cdot G + Z_{LM71} \cdot 2,003 \cdot Q_{LM71} + 1,3 \cdot Q_{BR(11,\rightarrow)} + 0,65 \cdot Q_{ROZ(+)} + 0,675 \cdot Q_{V(\rightarrow+\downarrow)} + 0,81 \cdot Q_{T(OHŘ)}$$

Průřez 5a

Z_{LM71}	1,00
N_{Ed}	53,501 kN

Posudek 0,318

Iterace 1

Z_{LM71}	5,00
N_{Ed}	110,319 kN

Posudek 0,657

Iterace 2

Z_{LM71}	10,00
N_{Ed}	208,884 kN

Posudek 1,243

Iterace 3

Z_{LM71}	8,00
N_{Ed}	169,854 kN

Posudek 1,011

Iterace 4

Z_{LM71}	7,95
N_{Ed}	168,917 kN

Posudek 1,005

Iterace 5

Z_{LM71}	7,90
N_{Ed}	167,924 kN

Posudek 1,000

Posudky

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1,00$$

$$N_{t,Rd} = 168,000 \text{ kN}$$

$$Z_{LM71} = 1,00: \frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} = \frac{53,501}{168,000} = 0,318$$

$$\text{Iterace 1: } Z_{LM71} = 5,00: \frac{110,319}{168,000} = 0,657$$



$$\text{Iterace 2: } Z_{LM71} = 10,00: \frac{208,884}{168,000} = 1,243$$

$$\text{Iterace 3: } Z_{LM71} = 8,00: \frac{169,854}{168,000} = 1,011$$

$$\text{Iterace 4: } Z_{LM71} = 7,95: \frac{168,917}{168,000} = 1,005$$

$$\text{Iterace 5: } Z_{LM71} = 7,90: \frac{167,924}{168,000} = 1,000$$

4.2.4. Příčné ztužení

Příčné ztužení – pasy

Pro výchozí zatížitelnost $Z_{LM71} = 1,0$ bylo dosaženo maximální tlakové síly v jiném průřezu než v lineárním výpočtu. Tento průřez, označený 7a, leží na dolním pase třetího ztužení úplně vpravo. Zde je i pro zatížitelnost 1,0 uvedena hodnota odpovídající jeho nejnepříznivější kombinaci.

Rozhodující kombinace C2 – Průřez 7a

$$\xi \cdot Y_G \cdot G + Z_{LM71} \cdot Y_{Q,LM71} \cdot gr12_{LM71} \cdot \alpha \cdot \Phi \cdot Q_{LM71} + Y_{Q,BR} \cdot gr12_{BR} \cdot \alpha \cdot Q_{BR(10,\rightarrow)} + Y_{Q,ROZ} \cdot gr12_{ROZ} \cdot \alpha \cdot Q_{ROZ(-)} + Y_{Q,V} \cdot \psi_{0,V} \cdot Q_{V(\rightarrow+\downarrow)} + Y_{Q,T} \cdot \psi_{0,T} \cdot Q_{T(OCH)}$$

$$0,95 \cdot 1,2 \cdot G + Z_{LM71} \cdot 1,3 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,541 \cdot Q_{LM71} + 1,3 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot Q_{BR(10,\rightarrow)} + 1,3 \cdot 0,5 \cdot 1,0 \cdot Q_{ROZ(-)} + 1,35 \cdot 0,5 \cdot Q_{V(\rightarrow+\downarrow)} + 1,35 \cdot 0,6 \cdot Q_{T(OCH)}$$

$$1,14 \cdot G + Z_{LM71} \cdot 2,003 \cdot Q_{LM71} + 1,3 \cdot Q_{BR(10,\rightarrow)} + 0,65 \cdot Q_{ROZ(-)} + 0,675 \cdot Q_{V(\rightarrow+\downarrow)} + 0,81 \cdot Q_{T(OCH)}$$

Průřez 7a

Z_{LM71}	1,00
N_{Ed}	-53,733 kN

Posudek 0,112

Iterace 1

Z_{LM71}	10,00
N_{Ed}	-480,016 kN

Posudek 0,999

Iterace 2

Z_{LM71}	10,01
N_{Ed}	-480,472 kN

Posudek 1,00



Posudky

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,00$$

$$N_{b,Rd} = 480,400 \text{ kN}$$

$$Z_{LM71} = 1,00: \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{53,733}{480,400} = 0,112$$

$$\text{Iterace 1: } Z_{LM71} = 10,00: \frac{480,016}{480,400} = 0,999$$

$$\text{Iterace 2: } Z_{LM71} = 10,01: \frac{480,472}{480,400} = 1,000$$

Příčné ztužení – diagonály (Průřez 8a)

Při prvotním nelineárním výpočtu se zatížitelností $Z_{LM71} = 1,0$ diagonála s průřezem 8 vybočí a nepřenáší žádnou sílu. Maximální tahová síla vzniká v průřezu 8a na vzestupné diagonále třetího ztužení úplně vpravo. V uvedených výsledcích je počítáno s nejnepříznivější kombinací právě pro tento průřez.

Rozhodující kombinace C2 – Průřez 8a

$$\xi \cdot Y_G \cdot G + Z_{LM71} \cdot Y_{Q,LM71} \cdot gr12_{LM71} \cdot \alpha \cdot \Phi \cdot Q_{LM71} + Y_{Q,BR} \cdot gr12_{BR} \cdot \alpha \cdot Q_{BR(9,\rightarrow)} + Y_{Q,ROZ} \cdot gr12_{ROZ} \cdot \alpha \cdot Q_{ROZ(-)} + Y_{Q,V} \cdot \psi_{0,V} \cdot Q_{V(\rightarrow+\downarrow)} + Y_{Q,T} \cdot \psi_{0,T} \cdot Q_{T(OCH)}$$

$$0,95 \cdot 1,2 \cdot G + Z_{LM71} \cdot 1,3 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,541 \cdot Q_{LM71} + 1,3 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot Q_{BR(9,\rightarrow)} + 1,3 \cdot 0,5 \cdot 1,0 \cdot Q_{ROZ(-)} + 1,35 \cdot 0,5 \cdot Q_{V(\rightarrow+\downarrow)} + 1,35 \cdot 0,6 \cdot Q_{T(OCH)}$$

$$1,14 \cdot G + Z_{LM71} \cdot 2,003 \cdot Q_{LM71} + 1,3 \cdot Q_{BR(9,\rightarrow)} + 0,65 \cdot Q_{ROZ(-)} + 0,675 \cdot Q_{V(\rightarrow+\downarrow)} + 0,81 \cdot Q_{T(OCH)}$$

Průřez 8a

Z_{LM71}	1,00
N_{Ed}	55,485 kN

Posudek 0,605

Iterace 1

Z_{LM71}	2,00
N_{Ed}	104,518 kN

Posudek 1,141

Iterace 2

Z_{LM71}	1,75
N_{Ed}	92,391 kN

Posudek 1,008



<i>Iterace</i>	3
<i>Z_{LM71}</i>	1,74
<i>N_{Ed}</i>	91,906 kN
<i>Posudek</i>	1,003

<i>Iterace</i>	4
<i>Z_{LM71}</i>	1,73
<i>N_{Ed}</i>	91,421 kN
<i>Posudek</i>	0,998

Posudky

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1,00$$

$$N_{t,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{4,800 \cdot 10^{-4} \cdot 210 \cdot 10^3}{1,10} = 91,636 \text{ kN}$$

$$Z_{LM71} = 1,00: \frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} = \frac{55,485}{91,636} = 0,605$$

$$\text{Iterace 1: } Z_{LM71} = 2,00: \frac{104,518}{91,636} = 1,141$$

$$\text{Iterace 2: } Z_{LM71} = 1,75: \frac{92,391}{91,636} = 1,008$$

$$\text{Iterace 3: } Z_{LM71} = 1,74: \frac{91,906}{91,636} = 1,003$$

$$\text{Iterace 4: } Z_{LM71} = 1,73: \frac{91,421}{91,636} = 0,998 \approx 1,0$$

4.2.5. Přípoj horního vodorovného ztužení

Průřez 3

<i>Z_{LM71}</i>	1,00
<i>N_{Ed}</i>	111,373 kN
<i>Posudek</i>	0,826

<i>Iterace</i>	1
<i>Z_{LM71}</i>	1,50
<i>N_{Ed}</i>	135,368 kN
<i>Posudek</i>	1,004

<i>Iterace</i>	2
<i>Z_{LM71}</i>	1,49
<i>N_{Ed}</i>	136,157 kN
<i>Posudek</i>	1,010

<i>Iterace</i>	3
<i>Z_{LM71}</i>	1,48
<i>N_{Ed}</i>	135,658 kN
<i>Posudek</i>	1,006

<i>Iterace</i>	4
<i>Z_{LM71}</i>	1,47
<i>N_{Ed}</i>	133,632 kN
<i>Posudek</i>	0,991



Posudky

$$\frac{N_{Ed}}{F_{Rd}} \leq 1,00$$

$$F_{Rd} = 134,847 \text{ kN}$$

$$Z_{LM71} = 1,00: \frac{N_{Ed}}{F_{Rd}} = \frac{111,373}{134,847} = 0,826$$

$$\text{Iterace 1: } Z_{LM71} = 1,50: \frac{135,368}{134,847} = 1,004$$

$$\text{Iterace 2: } Z_{LM71} = 1,49: \frac{136,157}{134,847} = 1,010$$

$$\text{Iterace 3: } Z_{LM71} = 1,48: \frac{135,658}{134,847} = 1,006 \doteq 1,0$$

$$\text{Iterace 4: } Z_{LM71} = 1,47: \frac{133,632}{134,847} = 0,991$$

4.2.6. Přípoj dolního vodorovného ztužení

Průřez 5a

Z_{LM71}	1,00
N_{Ed}	53,501 kN
Posudek	0,397

Iterace	1
Z_{LM71}	5,00
N_{Ed}	110,319 kN
Posudek	0,818

Iterace	2
Z_{LM71}	8,00
N_{Ed}	169,840 kN
Posudek	1,260

Iterace	3
Z_{LM71}	6,50
N_{Ed}	140,017 kN
Posudek	1,038

Iterace	4
Z_{LM71}	6,40
N_{Ed}	138,031 kN
Posudek	1,024

Iterace	5
Z_{LM71}	6,25
N_{Ed}	135,052 kN
Posudek	1,002

Iterace	6
Z_{LM71}	6,24
N_{Ed}	134,853 kN
Posudek	1,000



Posudky

$$\frac{N_{Ed}}{F_{Rd}} \leq 1,00$$

$$F_{Rd} = 134,847 \text{ kN}$$

$$Z_{LM71} = 1,00: \frac{N_{Ed}}{F_{Rd}} = \frac{53,501}{134,847} = 0,397$$

$$\text{Iterace 1: } Z_{LM71} = 5,00: \frac{110,319}{134,847} = 0,818$$

$$\text{Iterace 2: } Z_{LM71} = 8,00: \frac{169,840}{134,847} = 1,260$$

$$\text{Iterace 3: } Z_{LM71} = 6,50: \frac{140,017}{134,847} = 1,038$$

$$\text{Iterace 4: } Z_{LM71} = 6,40: \frac{138,031}{134,847} = 1,024$$

$$\text{Iterace 5: } Z_{LM71} = 6,25: \frac{135,052}{134,847} = 1,002$$

$$\text{Iterace 6: } Z_{LM71} = 6,24: \frac{134,853}{134,847} = 1,000$$

4.2.7. Přípoj příčného ztužení: pas – hlavní nosník

Průřez 7a

Z_{LM71}	1,00
N_{Ed}	-53,733 kN

Posudek 0,598

Iterace	1
Z_{LM71}	2,00
N_{Ed}	-112,084 kN

Posudek 1,247

Iterace	3
Z_{LM71}	1,55
N_{Ed}	-90,842 kN

Posudek 1,011

Iterace	2
Z_{LM71}	1,60
N_{Ed}	-92,966 kN

Posudek 1,034

Iterace	4
Z_{LM71}	1,53
N_{Ed}	-89,898 kN

Posudek 1,000



Posudky

$$\frac{N_{Ed}}{F_{Rd}} \leq 1,00$$

$$F_{Rd} = 89,898 \text{ kN}$$

$$Z_{LM71} = 1,00: \frac{N_{Ed}}{F_{Rd}} = \frac{53,733}{89,898} = 0,598$$

$$\text{Iterace 1: } Z_{LM71} = 2,00: \frac{112,084}{89,898} = 1,247$$

$$\text{Iterace 2: } Z_{LM71} = 1,60: \frac{92,966}{89,898} = 1,034$$

$$\text{Iterace 3: } Z_{LM71} = 1,55: \frac{90,842}{89,898} = 1,011$$

$$\text{Iterace 4: } Z_{LM71} = 1,53: \frac{89,898}{89,898} = 1,000$$

4.2.8. Přípoj příčného ztužení: pas – diagonály

Síla, se kterou se porovnává únosnost přípoje, byla v lineárním výpočtu stanovena vektorovým součtem sil vyskytujících se v křížících se diagonálách. V tomto případě u větších tahových sil tlačaná diagonála vybočí, a výsledná síla je tedy dána pouze hodnotou v taženém prvku. Křížící se diagonály, ve kterých se vyskytuje tah i tlak, přenáší tak malé síly, že jejich výslednice nemůže být větší než síla v nejméně tažené diagonále.

Průřez 8a

Z_{LM71}	1,00
N_{Ed}	55,485 kN

Posudek 1,061

Iterace 1

Z_{LM71}	0,99
N_{Ed}	50,994 kN

Posudek 0,975

Posudky

$$\frac{N_{Ed}}{F_{Rd}} \leq 1,00$$

$$F_{Rd} = 52,308 \text{ kN}$$

$$Z_{LM71} = 1,00: \frac{N_{Ed}}{F_{Rd}} = \frac{55,485}{52,308} = 1,061$$

$$\text{Iterace 1: } Z_{LM71} = 0,99: \frac{50,994}{52,308} = 0,975 \doteq 1,0$$



4.3. Přehled zatížitelností

Zatížitelnost stanovená lineárním výpočtem		
Prvek	Posudek	Zatížitelnost
Hlavní nosník	Interakce tahu a dvojosého ohybu	0,73
	Smyk	1,19
Horní vodorovné ztužení	Tah	5,90
	Vzpěr	2,04
Dolní vodorovné ztužení	Tah	4,59
	Vzpěr	-0,94
Příčné ztužení - pas	Vzpěr	3,23
Příčné ztužení - diagonála	Vzpěr	0,26
Přípoj horního vodorovného ztužení	Smyk	1,23
Přípoj dolního vodorovného ztužení	Smyk	3,64
Přípoj pasu příčného ztužení k hlavnímu nosníku	Smyk	0,41
Přípoj diagonál příčného ztužení k pasu	Smyk	0,71
Výsledná zatížitelnost hlavních nosných prvků		0,73
Výsledná zatížitelnost vedlejších nosných prvků		-0,94
Výsledná zatížitelnost mostu		-0,94

Tabulka 21: Zatížitelnost stanovená lineárním výpočtem

Zatížitelnost stanovená nelineárním výpočtem		
Prvek	Posudek	Zatížitelnost
Hlavní nosník	Interakce tahu a dvojosého ohybu	0,77
	Smyk	1,22
Horní vodorovné ztužení	Tah	5,44
	Vzpěr	3,96
Dolní vodorovné ztužení	Tah	7,90
Příčné ztužení - pas	Vzpěr	10,01
Příčné ztužení - diagonála	Tah	1,73
Přípoj horního vodorovného ztužení	Smyk	1,48
Přípoj dolního vodorovného ztužení	Smyk	6,24
Přípoj pasu příčného ztužení k hlavnímu nosníku	Smyk	1,53
Přípoj diagonál příčného ztužení k pasu	Smyk	0,99
Výsledná zatížitelnost hlavních nosných prvků		0,77
Výsledná zatížitelnost vedlejších nosných prvků		0,99
Výsledná zatížitelnost mostu		0,77

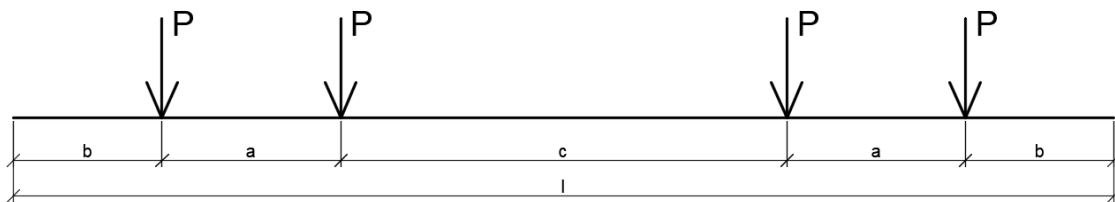
Tabulka 22: Zatížitelnost stanovená nelineárním výpočtem



5. OVĚŘENÍ PŘECHODNOSTI

Při výpočtu ověřujícím přechodnost tohoto mostního objektu bylo postupováno podle Metodického pokynu [1] a dokumentu SR 5 [17].

Konstrukce byla zatížena normovým schématem dle Obr. 73 s hodnotami odpovídající traťové třídě C2 s přidruženou rychlostí 80 km/h. Pro zjištění nejnepříznivější polohy zatížení byla opět ve statickém softwaru využita funkce pohyblivé zatížení.



Obr. 73: Přechodnostní schéma [16]

Traťová třída	P [kN]	p^9 [kN/m]	a [m]	b [m]	c [m]	l [m]
A	160	50	1,8	1,5	6,20	12,80
B 1	180	50	1,8	1,5	7,80	14,40
B 2	180	64	1,8	1,5	4,65	11,25
C 2	200	64	1,8	1,5	5,90	12,50
C 3	200	72	1,8	1,5	4,50	11,10
C 4	200	80	1,8	1,5	3,40	10,00
D 2	225	64	1,8	1,5	7,45	14,05
D 3	225	72	1,8	1,5	5,90	12,50
D 4	225	80	1,8	1,5	4,65	11,25

Tabulka 23: Traťové třídy s parametry zatížení [16]

Výpočet se zabývá prvkem s nejnižší zatížitelností. V tomto případě byla ověřena přechodnost pro lineární i nelineární výpočet a pro prvky udávající zatížitelnost hlavních i vedlejších nosných prvků. Aby byla splněna podmínka přechodnosti, musí platit následující nerovnost.

$$Z_{LM71} \geq \psi \cdot \lambda_{LM71}$$

$$\psi = \varphi_{T1} / \Phi_i = 1,79 / 1,541 = 1,162$$

$$\lambda_{LM71} = E_{T,Ed} / E_{LM71}$$

Dynamický součinitel φ_{T1} je pro standardně udržovanou trať definován součinitelem φ_{T1} a musí platit $1,05 \leq \varphi_{T1} \leq 2,00$. Součinitel $\varphi_{T1} = 1,79$ byl získán z tabulky Metodického pokynu [1] pro rychlost 80 km/h a rozpětí $L = 8,2$ m.

Účinky provozního zatížení jsou násobeny dílčím součinitelem $\gamma_T = 1,30$.

⁹ Údaj o náhradním rovnoměrném zatížení slouží pouze jako orientační.



5.1. Lineární výpočet

Průřez 1

Pro výslednou zatížitelnost hlavních nosných prvků byl rozhodující posudek interakce tahu a dvojosého ohybu v průřezu 1.

$$Z_{LM71} = 0,73$$

$$N_{t,Rd} = 5331,462 \text{ kN}$$

$$M_{y,b,Rd} = 1090,228 \text{ kNm}$$

$$M_{z,c,Rd} = 109,735 \text{ kNm}$$

$$E_{T,Ed} = \frac{N_{T,Ed}}{N_{t,Rd}} + \frac{M_{y,T,Ed}}{M_{y,b,Rd}} + \frac{M_{z,T,Ed}}{M_{z,c,Rd}} = \frac{0,468}{5331,462} + \frac{690,555}{1090,228} + \frac{6,517}{109,735} = 0,693$$

$$E_{LM71} = \frac{N_{LM71}}{N_{t,Rd}} + \frac{M_{y,LM71}}{M_{y,b,Rd}} + \frac{M_{z,LM71}}{M_{z,c,Rd}} = \frac{4,956}{5331,462} + \frac{1190,710}{1090,228} + \frac{11,516}{109,735} = 1,198$$

$$\lambda_{LM71} = E_{T,Ed} / E_{LM71} = 0,693 / 1,198 = 0,578$$

$$\psi \cdot \lambda_{LM71} = 1,162 \cdot 0,578 = 0,67$$

$$Z_{LM71} \geq \psi \cdot \lambda_{LM71}$$

$$0,73 > 0,67 \rightarrow \text{VYHOVÍ}$$

Průřez 6

Výsledná zatížitelnost mostu byla shodná se zatížitelností vedlejších nosných prvků, kterou udával posudek vzpěru v dolním vodorovném ztužení v průřezu 6.

$$Z_{LM71} = -0,94$$

$$N_{b,Rd} = 1,694 \text{ kN}$$

$$E_{T,Ed} = \frac{N_{T,Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{9,634}{1,694} = 5,687$$

$$E_{LM71} = \frac{N_{LM71}}{N_{b,Rd}} = \frac{16,972}{1,694} = 10,019$$

$$\lambda_{LM71} = E_{T,Ed} / E_{LM71} = 5,687 / 10,019 = 0,568$$

$$\psi \cdot \lambda_{LM71} = 1,162 \cdot 0,568 = 0,66$$

$$Z_{LM71} \geq \psi \cdot \lambda_{LM71}$$

$$-0,94 < 0,66 \rightarrow \text{NEVYHOVÍ}$$



5.2. Nelineární výpočet

Průřez 1

Stejně jako u lineárního výpočtu hodnota zatížitelnosti hlavních nosných prvků, která v tomto případě odpovídá i výsledné zatížitelnosti konstrukce, závisela na interakci namáhání v průřezu 1.

$$Z_{LM71} = 0,77$$

$$N_{t,Rd} = 5331,462 \text{ kN}$$

$$M_{y,b,Rd} = 1090,228 \text{ kNm}$$

$$M_{z,c,Rd} = 109,735 \text{ kNm}$$

$$E_{T,Ed} = \frac{N_{T,Ed}}{N_{t,Rd}} + \frac{M_{y,T,Ed}}{M_{y,b,Rd}} + \frac{M_{z,T,Ed}}{M_{z,c,Rd}} = \frac{4,343}{5331,462} + \frac{687,236}{1090,228} + \frac{5,116}{109,735} = 0,678$$

$$E_{LM71} = \frac{N_{LM71}}{N_{t,Rd}} + \frac{M_{y,LM71}}{M_{y,b,Rd}} + \frac{M_{z,LM71}}{M_{z,c,Rd}} = \frac{25,274}{5331,462} + \frac{1187,587}{1090,228} + \frac{6,226}{109,735} = 1,151$$

$$\lambda_{LM71} = E_{T,Ed}/E_{LM71} = 0,678/1,151 = 0,589$$

$$\psi \cdot \lambda_{LM71} = 1,162 \cdot 0,589 = 0,68$$

$$Z_{LM71} \geq \psi \cdot \lambda_{LM71}$$

$$0,77 > 0,68 \rightarrow \text{VYHOVÍ}$$

Průřez 8a

Rozhodující posudek pro zatížitelnost vedlejších nosných prvků byl přípoj diagonály příčného ztužení k jejímu pasu v průřezu 8a.

$$Z_{LM71} = 0,99$$

$$F_{Rd} = 52,308 \text{ kN}$$

$$E_{T,Ed} = \frac{N_{T,Ed}}{F_{Rd}} = \frac{21,692}{52,308} = 0,415$$

$$E_{LM71} = \frac{N_{LM71}}{F_{Rd}} = \frac{40,248}{52,308} = 0,769$$

$$\lambda_{LM71} = E_{T,Ed}/E_{LM71} = 0,415/0,769 = 0,540$$

$$\psi \cdot \lambda_{LM71} = 1,162 \cdot 0,540 = 0,63$$

$$Z_{LM71} \geq \psi \cdot \lambda_{LM71}$$

$$0,99 > 0,63 \rightarrow \text{VYHOVÍ}$$



6. MEZNÍ STAVY POUŽITELNOSTI

Pro mezní stavy použitelnosti bylo do výpočtu zavedeno pouze zatížení od modelu LM71. Dílčí součinitel zatížení γ_F i klasifikační součinitel α jsou rovny 1,0. Hodnota dynamického součinitele Φ je 1,541.

V kapitole 6.2., 6.3. a 6.4. se uvedené hodnoty deformací vztahují k působení modelu LM71 s výslednou zatížitelností 0,77 a je zkoumáno, zda takto namáhaná konstrukce vyhoví předepsaným limitním hodnotám.

6.1. Pružný stav konstrukce

V mezních stavech únosnosti, ze kterých se počítala zatížitelnost, bylo uvažováno pružné chování konstrukce, a není nutné jej tak znovu ověřovat. [1]

6.2. Svislé deformace nosné konstrukce

Největší průhyb hlavní nosné konstrukce nastává v polovině rozpětí levého hlavního nosníku. Pro zatížitelnost 0,77 odpovídá svislá deformace 9,6 mm. Limitní hodnotou průhybu je pro železniční mosty 1/600 rozpětí. [12]

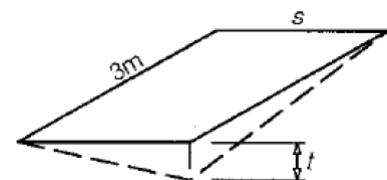
$$\delta_{\text{lim}} = \frac{L}{600} = \frac{8200}{600} = 13,7 \text{ mm}$$

$$\delta = 9,6 \text{ mm} \leq \delta_{\text{lim}} = 13,7 \text{ mm} \rightarrow \text{VYHOVÍ}$$

6.3. Zkroucení koleje

Pro rychlost menší než 120 km/h je maximální dovolená hodnota zkroucení koleje 4,5 mm/3m. [12]

Zkroucení bylo zkoumáno ve dvou místech. Jednou vedl třímetrový úsek od nulové svislé deformace a podruhé od nejvyšší. Pro zjištění této hodnoty bylo vycházeno z průhybů kolejnic ve stanoveném místě a ve třímetrové vzdálenosti od něj. Tři body s nejnižší svislou deformací byly proloženy rovinou a vzdálenost mezi skutečným umístěním čtvrtého bodu a jeho průmětem ve zkonstruované rovině určuje zkroucení.



Obr. 74: Zkroucení [12]

Tímto postupem byly získány hodnoty 1,5 mm/3m a 2,4 mm/3m, které jsou nižší než limitní hodnota, a tedy vyhovují.



6.4. Pootočení podporových průřezů

Pro zjednodušení bylo posouzeno natočení podporových průřezů dle kritérií pro most s průběžným kolejovým ložem. Pro přesnější postup by měla být provedena analýza interakce most – kolej.



Obr. 75: Úhlové pootočení podporových průřezů [12]

$$\theta_{1,lim} = 0,0065 \text{ rad [1]}$$

$$\theta_1 = 0,0045 \text{ rad} \leq 0,0065 \text{ rad} \rightarrow \text{VYHOVÍ}$$

6.5. Štíhlosti prvků

Štíhlost prvku se vypočítá dle vzorce $\lambda = L_{cr}/i$ [15]

Pruty	Největší štíhlost λ
Pruty tlačené	
Pruty hlavních nosných částí	130
Pruty vedlejších nosných částí	180
Pruty tažené	
Pruty hlavních nosných částí	280
Pruty vedlejších nosných částí	300

Tabulka 24: Největší doporučené štíhlosti prutů [1]

Hlavní nosník

$$L_{cr,y}/i_y = 8200/320,8 = 25,6 \leq 130 \rightarrow \text{VYHOVÍ}$$

$$L_{cr,z}/i_z = 2050/46,7 = 43,9 \leq 130 \rightarrow \text{VYHOVÍ}$$

Horní vodorovné ztužení

$$L_{cr,z}/i_z = 2495/27,2 = 91,7 \leq 180 \rightarrow \text{VYHOVÍ}$$

Dolní vodorovné ztužení

$$L_{cr,y}/i_y = 3345/3,2 = 1045,3 > 180 \rightarrow \text{NEVYHOVÍ}$$

$$L_{cr,z}/i_z = 3345/23,1 = 144,8 \leq 180 \rightarrow \text{VYHOVÍ}$$

Příčné ztužení – pas

$$L_{cr,y}/i_y = 1422/25,7 = 55,3 \leq 180 \rightarrow \text{VYHOVÍ}$$

$$L_{cr,z}/i_z = 1422/43,1 = 33,0 \leq 180 \rightarrow \text{VYHOVÍ}$$



Příčné ztužení – diagonála

$$L_{cr,y}/i_y = 340/2,3 = 147,8 \leq 180 \rightarrow \text{VYHOVÍ}$$

$$L_{cr,z}/i_z = 238/17,3 = 13,8 \leq 180 \rightarrow \text{VYHOVÍ}$$

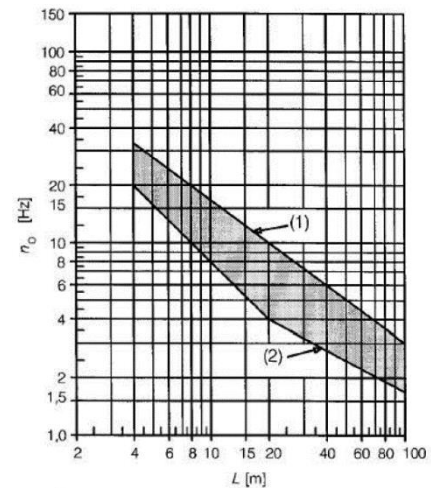
Pouze dolní ztužení má větší štíhlost, než je doporučena, ostatní prvky vyhoví. Konstrukce při daném rozpětí a výšce není náchylná na dýchání stěn.

6.6. První vlastní frekvence

Dle normy ČSN EN 1991-2 [7] odpovídá první vlastní frekvence pro prostý nosník namáhaný ohybem přibližně následujícímu vzorci.

$$n_0 = \frac{17,75}{\sqrt{\delta}} = \frac{17,75}{\sqrt{0,5}} = 25,1 \text{ Hz}$$

Tato frekvence při daném rozpětí mostu nespadá do oblasti mezi křivkami (1) a (2) na Obr. 76, tudíž by měla být provedena dynamická analýza.

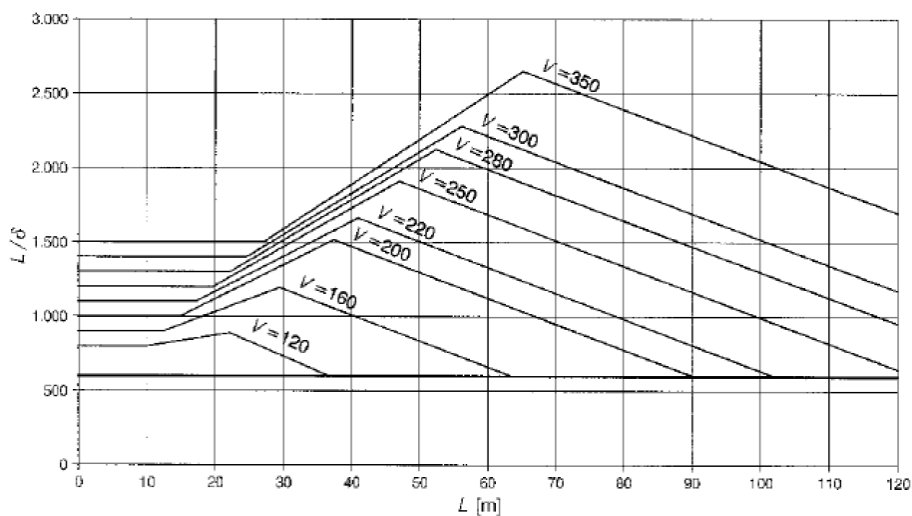


Obr. 76: Meze vlastních frekvencí [7]

6.7. Úroveň pohody cestujících

Graf na Obr. 77 znázorňuje vztah mezi přípustným svislým průhybem při svislém zrychlení $b_v = 1 \text{ m/s}^2$, které je hodnoceno velmi dobrou úrovní pohody, pro tři a více za sebou následujících prostě uložených polí. Pro jedno prostě uložené pole se poměr L/δ násobí hodnotou 0,7. [12]

$$0,7 \cdot L/\delta = 0,7 \cdot 8,2/0,0096 = 597,9 \rightarrow \text{VYHOVÍ}$$



Obr. 77: Maximální svislé průhyby odpovídající zrychlení $b_v = 1 \text{ m/s}^2$ [12]



7. ZÁVĚR

Na základě prohlídky mostu byl zhodnocen stavební stav nosné konstrukce K4 stupněm 3 především z důvodu rozšířené koroze. Spodní stavba se jevila v lepším stavu, a proto jí byl přisouzen stupeň 2. Toto hodnocení se shoduje s Protokolem o podrobné prohlídce z roku 2017 [2].

Vzhledem k rozšíření koroze by mělo obratem dojít k obnovení protikorozní ochrany. Kromě toho by měly být zkontrolovány mostnice a některé s ohledem na jejich stav vyměněny. Dále je nutné vyměnit styčnickový plech dolního ztužení vlevo u opěry O2 (viz Obr. 12). Zatížitelnost je stanovena za předpokladu provedení těchto uvedených opatření.

Statický model byl vytvořen na základě vlastního měření doplněným Protokolem o podrobné prohlídce [2] a archivní dokumentací [3]. Vzhledem k náročnosti konstrukce, podmínkám při měření a jisté časové tísní nejsou i přes snahu co nejlepšího zaměření konstrukce vyloučeny jisté nepřesnosti.

Pro nejvíce namáhané prvky a přípoje byla stanovena zatížitelnost. Nejprve se postupovalo na základě vnitřních sil získaných z lineárního výpočtu. Výsledná zatížitelnost hlavních nosných prvků byla 0,73 a vedlejších nosných prvků -0,94. Tato velmi nízká hodnota byla dána nízkou vzpěrnou únosností dolního ztužení, které by mělo být především tažené. Tlak v tomto prvku vzniká zejména kvůli excentrickému umístění koleje. Záporná hodnota vyjadřuje, že i když z nejnepříznivější kombinace budou vyjmuty účinky LM71, dojde u prvku stejně ke ztrátě stability. Nízká zatížitelnost se objevila i u diagonál příčného ztužení.

U těchto vedlejších prvků mostní konstrukce, které výrazně snižují výslednou zatížitelnost, lze připustit jejich vybočení. Vnitřní síly byly v tomto případě získány nelineárním výpočtem. Výsledná zatížitelnost mostu o hodnotě 0,77 odpovídá zatížitelnosti hlavních nosných prvků. Zatížitelnost vedlejších nosných prvků tímto postupem vzrostla významně až na hodnotu 0,99.

Přestože je na mostě snížena rychlost na 70 km/h, byla přechodnost ověřena pro traťovou třídu C2 s přidruženou rychlostí 80 km/h. Kvůli dvojímu typu výpočtu zatížitelnosti byla ověřována přechodnost hlavních i vedlejších nosných prvků pro výpočet lineární i nelineární. Podle očekávání nevyhověla přechodnost pro zápornou zatížitelnost dolního vodorovného ztužení v lineárním výpočtu a ani snížení rychlosti by tento závěr nezměnilo. Naproti tomu v nelineárním výpočtu přechodnost vyhovuje pro hlavní i vedlejší nosné prvky.

Deformace konstrukce získané pro výslednou zatížitelnost 0,77 v mezním stavu použitelnosti vyhoví limitním hodnotám. Na základě orientační hodnoty první vlastní frekvence by měla být provedena dynamická analýza objektu. Dle průhybů byla stanovena velmi dobrá úroveň pohody cestujících.



ZNAČKY

Většina značení je v souladu s technickými normami uvedenými v seznamu literatury. Následující přehled byl vytvořen a použit pouze pro účely této práce.

$C1-C6$	označení kombinací
$d_{dřevo}$	výška mostnic
d_{ocel}	výška hlavního nosníku
F_{Rd}	rozhodující únosnost ve smyku celého přípoje
F_{In}	charakteristická hodnota síly od podlahového nosníku a podlahového plechu na levé straně koleje působící na levý hlavní nosník (pořadová čísla v indexu odpovídají pořadí jednotlivých podlahových nosníků ve směru staničení)
f_{In}	charakteristická hodnota spojitého zatížení od podlahových plechů v koleji působící na levý hlavní nosník
$F_{In,p}$	charakteristická hodnota síly od podlahových plechů na levé straně koleje působící na levý hlavní nosník (působíště síly odpovídá působíšti $F_{In,pn}$ a pořadová čísla v indexu odpovídají pořadí jednotlivých podlahových nosníků ve směru staničení)
$F_{In,pn}$	charakteristická hodnota síly od podlahového nosníku působící na levý hlavní nosník
f_{pn}	charakteristická hodnota spojitého zatížení od podlahových plechů působící na pravý hlavní nosník
f_{sn}	charakteristická hodnota spojitého zatížení od podlahových plechů působící na střední hlavní nosník
$f_{sn,1}$	charakteristická hodnota spojitého zatížení od podlahových plechů v koleji působící na střední hlavní nosník
$f_{sn,2}$	charakteristická hodnota spojitého zatížení od podlahových plechů na pravé straně koleje působící na střední hlavní nosník
$f_{w,l}$	charakteristická hodnota spojitého zatížení příčným větrem
$f_{w,m}$	charakteristická hodnota spojitého zatížení příčným větrem vzniklá rozložením momentu do dvojice silových zatížení
$f_{w,z,l}$	charakteristická hodnota spojitého zatížení svislým větrem
$f_{w,z,m}$	charakteristická hodnota spojitého zatížení svislým větrem vzniklá rozložením momentu do dvojice silových zatížení



$f_{w,z,l,L}$	charakteristická hodnota spojitého zatížení svislým větrem působící na levý hlavní nosník
$f_{w,z,l,P}$	charakteristická hodnota spojitého zatížení svislým větrem působící na pravý hlavní nosník
$f_{w,z,l,S}$	charakteristická hodnota spojitého zatížení svislým větrem působící na střední hlavní nosník
G	zatížení vlastní tíhou
K1-K7	pracovní označení jednotlivých nosných konstrukcí mostu
k_x, k_y, k_z	náhradní tuhosti ve stycích ve směrech příslušných os
m	počet nýtů v přípoji
M_{In}	charakteristická hodnota momentu od podlahového nosníku a podlahového plechu na levé straně koleje působící na levý hlavní nosník (pořadová čísla v indexu odpovídají pořadí jednotlivých podlahových nosníků ve směru staničení)
m_{In}	charakteristická hodnota spojitého momentu od podlahových plechů v koleji působící na levý hlavní nosník
$M_{In,p}$	charakteristická hodnota momentu od podlahových plechů na levé straně koleje působící na levý hlavní nosník (působíště momentu odpovídá působíšti $M_{In,p}$ a pořadová čísla v indexu odpovídají pořadí jednotlivých podlahových nosníků ve směru staničení)
$M_{In,pn}$	charakteristická hodnota momentu od podlahového nosníku působící na levý hlavní nosník
m_{pn}	charakteristická hodnota spojitého momentu od podlahových plechů působící na pravý hlavní nosník
m_{sn}	charakteristická hodnota spojitého momentu od podlahových plechů působící na střední hlavní nosník
$m_{sn,1}$	charakteristická hodnota spojitého momentu od podlahových plechů v koleji působící na střední hlavní nosník
$m_{sn,2}$	charakteristická hodnota spojitého momentu od podlahových plechů na pravé straně koleje působící na střední hlavní nosník
$m_{w,l}$	charakteristická hodnota spojitého momentu od příčného větru
$m_{w,z,l}$	charakteristická hodnota spojitého momentu od svislého větru
n	počet stříhů v přípoji
O1, O2	pracovní označení opěr



$Q_{BR(7,\leftarrow)}$	zatížení bočním rázem (číslo v indexu označuje konkrétní zatěžovací stav a šipka směr působení)
Q_{LM71}	zatížení modelem LM71
$Q_{ROZ(+)}$	zatížení rozjezdovými silami (znaménko v indexu značí směr působení ve vztahu ke směru staničení)
$Q_{T(OHŘ)}$	zatížení rovnoměrným ohřátím
$Q_{T(OCH)}$	zatížení rovnoměrným ochlazením
$Q_{V(\leftarrow+\uparrow)}$	zatížení větrem (šipky v indexu ukazují směry působení větru)
ΔT_{12}	charakteristická hodnota rozdílu teplot mezi horními vlákny mostnic a horními vlákny hlavního nosníku
ΔT_{13}	charakteristická hodnota rozdílu teplot mezi horními vlákny mostnic a dolními vlákny hlavního nosníku
ΔT_{23}	charakteristická hodnota rozdílu teplot mezi horními a dolními vlákny hlavního nosníku
θ_1	charakteristická hodnota teploty horních vláken mostnic
θ_2	charakteristická hodnota teploty horních vláken hlavního nosníku
θ_3	charakteristická hodnota teploty dolních vláken hlavního nosníku



SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Celkový pohled na most.....	9
Obr. 2: Schéma mostu	10
Obr. 3: Železniční svršek u opěry O2	11
Obr. 4: Schéma uspořádání mostnic	11
Obr. 5: Pohled zdola na nosnou konstrukci	12
Obr. 6: Ložisko.....	13
Obr. 7: Opěra O2.....	13
Obr. 8: Podlahové plechy a kabelový žlab	14
Obr. 9: Podlahové nosníky mezi konstrukcemi (zleva) K4 a K3.....	15
Obr. 10: Uvolněná vrtule	16
Obr. 11: Poškozená mostnice u opěry O2.....	16
Obr. 12: Oslabený styčnickový plech u opěry O2	16
Obr. 13: Korodování nosné konstrukce (pohled z kraje opěry O1)	16
Obr. 14: Kaverny ve zdivu na opěře O2	17
Obr. 15: Zvětrání betonu na opěře O2	17
Obr. 16: Drátový 3D model.....	18
Obr. 17: 3D model s vykreslenými průřezy (pohled shora)	19
Obr. 18: 3D model s vykreslenými průřezy (pohled zdola)	19
Obr. 19: Hlavní nosník (průřez 1)	21
Obr. 20: Hlavní nosník (průřez 2)	21
Obr. 21: Průřez horního ztužení	22
Obr. 22: Průřez dolního ztužení	22
Obr. 23: Průřez pasů příčného ztužení.....	22
Obr. 24: Průřez diagonál příčného ztužení	22
Obr. 25: Průřez mostnic.....	23
Obr. 26: Průřez kolejnic S 49 a T.....	23
Obr. 27: Uložení hlavních nosníků.....	24
Obr. 28: Styk horního ztužení	24
Pavla Fialová	89



Obr. 29: Přípoj dolního ztužení.....	24
Obr. 30: Styky příčného ztužení.....	25
Obr. 31: Řešení přípoje mostnic	26
Obr. 32: Uložení kolejnic.....	26
Obr. 33: Schéma rozmístění podlahových plechů v příčném řezu	27
Obr. 34: Schéma rozložení podlahových nosníků na levém nosníku.....	27
Obr. 35: Zatížení levého nosníku podlahovými nosníky a plechy	29
Obr. 36: Ostatní stálé zatížení působící na střední nosník	30
Obr. 37: Zatížení pravého nosníku od podlahových plechů.....	30
Obr. 38: Excentricita svislých proměnných zatížení [7]	31
Obr. 39: Zatěžovací schéma modelu LM71 [7]	31
Obr. 40: Zatížení rozjezdovými silami	32
Obr. 41: Podélný roznos zatížení [7]	32
Obr. 42: Boční ráz (příklad jednoho zatěžovacího stavu)	32
Obr. 43: Kategorie terénů a jejich parametry [8]	33
Obr. 44: Mapa větrných oblastí na území ČR [8]	33
Obr. 45: Graf pro stanovení součinitele expozice [8]	34
Obr. 46: Parametry b a d_{tot} [8]	34
Obr. 47: Graf pro stanovení součinitele síly [8]	34
Obr. 48: Schéma působení větru	35
Obr. 49: Zatížení větrem v příčném směru	35
Obr. 50: Zatížení větrem ve svislém směru	36
Obr. 51: Maximální teplota vzduchu ve stínu [9].....	37
Obr. 52: Minimální teplota vzduchu ve stínu [9].....	37
Obr. 53: Teplota vzduchu a rovnoměrná teplotou na konstrukci [9]	38
Obr. 54: Zatížení ochlazením	38
Obr. 55: Zatížení ohřátím	39
Obr. 56: Schéma pro výpočet vedení tepla	40
Obr. 57: Přehled posuzovaných prvků a průřezů.....	43



Obr. 58: Obálka normálových sil na hlavních nosnících	45
Obr. 59: Obálka posouvajících sil na hlavních nosnících	45
Obr. 60: Obálka momentů M_y na hlavních nosnících	46
Obr. 61: Obálka momentů M_z na hlavních nosnících	46
Obr. 62: Definice šířek pro zatřídění nýtovaného průřezu [1]	47
Obr. 63: Hodnoty součinitelů C_1 , C_2 a C_3 [13]	48
Obr. 64: Obálka normálových sil na horním vodorovném ztužení	52
Obr. 65: Obálka normálových sil na dolním vodorovném ztužení	55
Obr. 66: Obálka normálových sil na příčném ztužení	58
Obr. 67: Přípoj horního ztužení.....	61
Obr. 68: Přípoj dolního ztužení	62
Obr. 69: Přípoj pasu příčného ztužení k hlavnímu nosníku	63
Obr. 70: Přípoj diagonál příčného ztužení k pasu	64
Obr. 71: Výslednice sil pro přípoj pas – diagonály	65
Obr. 72: Doplněný přehled posuzovaných prvků a průřezů	66
Obr. 73: Přechodnostní schéma [16].....	79
Obr. 74: Zkroucení [12]	82
Obr. 75: Úhlové pootočení podporových průřezů [12]	83
Obr. 76: Meze vlastních frekvencí [7]	84
Obr. 77: Maximální svislé průhyby odpovídající zrychlení $b_v = 1 \text{ m/s}^2$ [12]	84



SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Průřezové charakteristiky hlavního nosníku (průřezu 1)	21
Tabulka 2: Průřezové charakteristiky hlavního nosníku (průřezu 2)	21
Tabulka 3: Průřezové charakteristiky horního vodorovného ztužení	22
Tabulka 4: Průřezové charakteristiky dolního vodorovného ztužení	22
Tabulka 5: Průřezové charakteristiky pasu příčného ztužení.....	23
Tabulka 6: Průřezové charakteristiky diagonály příčného ztužení	23
Tabulka 7: Průřezové charakteristiky mostnice.....	23
Tabulka 8: Průřezové charakteristiky kolejnic.....	23
Tabulka 9: Vnitřní síly při různých stycích příčného ztužení	25
Tabulka 10: Součinitele zatížení	41
Tabulka 11: Sestavy zatížení	42
Tabulka 12: Kombinace.....	42
Tabulka 13: Vnitřní síly v průřezu 1	44
Tabulka 14: Vnitřní síly v průřezu 2.....	44
Tabulka 15: Vnitřní síly v průřezu 3.....	52
Tabulka 16: Vnitřní síly v průřezu 4.....	52
Tabulka 17: Vnitřní síly v průřezu 5	55
Tabulka 18: Vnitřní síly v průřezu 6.....	55
Tabulka 19: Vnitřní síly v průřezu 7	58
Tabulka 20: Vnitřní síly v průřezu 8.....	58
Tabulka 21: Zatížitelnost stanovená lineárním výpočtem.....	78
Tabulka 22: Zatížitelnost stanovená nelineárním výpočtem.....	78
Tabulka 23: Traťové třídy s parametry zatížení [16]	79
Tabulka 24: Největší doporučené štíhlosti prutů [1]	83



SEZNAM LITERATURY

- [1] *Metodický pokyn pro určování zatížitelnosti železničních mostních objektů.* SŽDC, 2015
- [2] *Protokol o podrobné prohlídce mostního objektu provedené dle Vyhlášky MD č. 177/95 Sb., a předpisu SŽDC S5 Správa mostních objektů: TÚ 0101, DÚ E1 žst. Hostivice, evd. km 15,037.* SŽDC, 2017.
- [3] *Projektová dokumentace: Praha – Chomutov km 15,037 výměna OK v kolejích č. 1,2,3,5. Ústí nad Labem: ČSD – Severozápadní dráha v Praze – Projekční kancelář dráhy v Ústí nad Labem, 1976.*
- [4] SOKOL, Zdeněk a František WALD. *Ocelové konstrukce: tabulky.* 3. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2016. ISBN 978-80-01-06032-2.
- [5] JIRÁSEK, Milan a Jan ZEMAN. *Přetváření a porušování materiálů: Dotvarování, plasticita, lom a poškození.* 2. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2012. ISBN 978-80-01-05064-4.
- [6] ČSN EN 338 (731711) *Konstrukční dřevo – Třídy pevnosti.* Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016. Česká technická norma.
- [7] ČSN EN 1991-2 ed. 2 (736203) *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 2: Zatížení mostů dopravou.* Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015. Česká technická norma.
- [8] ČSN EN 1991-1-4 (730035) *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-4: Obecná zatížení – Zatížení větrem.* Praha: Český normalizační institut, 2007. Česká technická norma.
- [9] ČSN EN 1991-1-5 (730035) *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-5: Obecná zatížení – Zatížení teplotou.* Praha: Český normalizační institut, 2005. Česká technická norma.
- [10] SVOBODA, Zbyněk a Jiří NOVÁK. *Řešené příklady ze stavební fyziky: Šíření tepla konstrukcí v ustáleném stavu.* Praha: Evropský sociální fond, Praha a EU: Investujeme do vaší budoucnosti, 2014
- [11] ČSN 730540-3: *Tepelná ochrana budov – Část 3: Návrhové hodnoty veličin.* Praha: Český normalizační institut, 2005. Česká technická norma.
- [12] ČSN EN 1990 ed. 2 (730002) *Eurokód: Zásady navrhování.* Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015. Česká technická norma.



- [13] ČSN EN 1993-1-1 ed. 2 (731401) Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011. Česká technická norma.
- [14] ČSN EN 1993-1-5 ed. 2 (731401) Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-5: Boulení stěn. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013. Česká technická norma.
- [15] STUDNIČKA, Jiří. *Ocelové konstrukce*. V Praze: České vysoké učení technické, 2004. ISBN 80-01-02942-5.
- [16] ČSN EN 1993-1-8 ed. 2 (731401) Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-8: Navrhování styčnicků. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013. Česká technická norma.
- [17] ČD SR 5 (S): *Služební rukověť: Určování zatížitelnosti železničních mostů*. Praha: SUDOP Praha, a.s. pro odbor tratí divize dopravní cesty, o.z. Českých drah, s.o., 1995.

POUŽITÉ PROGRAMY

Microsoft Word 2016

Microsoft Excel 2016

Autocad 2018

Scia Engineer 18.1.2052



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

Prohlídka a přechodnost železničního mostu v km 15,037, TU0101

SEZNAM PŘÍLOH

- 1 – PŘÍČNÝ ŘEZ A-A
- 2 – PODÉLNÝ ŘEZ B-B
- 3 – PŮDORYS – SVRŠEK C
- 4 – PŮDORYS – HORNÍ ZTUŽENÍ D-D
- 5 – PŮDORYS – DOLNÍ ZTUŽENÍ E-E