

**FAKULTA
STAVEBNÍ
ČVUT V PRAZE**

Katedra betonových a zděných konstrukcí

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh zavěšeného mostu přes Vltavu u Suchdola

Design of a cable-stayed bridge over Vltava river at Suchdol

Vypracoval: Bc. Jakub Doležal
Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby
Vedoucí diplomové práce: Ing. Roman Šafář, Ph.D.

Praha, 2019



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Doležal</u>	Jméno: <u>Jakub</u>	Osobní číslo: <u>409749</u>
Zadávající katedra: <u>11 133 Katedra betonových a zděných konstrukcí</u>		
Studijní program: <u>Stavební inženýrství</u>		
Studijní obor: <u>Konstrukce a dopravní stavby</u>		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Návrh zavěšeného mostu přes Vltavu u Suchdola

Název diplomové práce anglicky: Design of a cable stayed bridge over Vltava river at Suchdol

Pokyny pro vypracování:
Vypracujte technickou zprávu, statický výpočet hlavní nosné konstrukce a závěsů, výkresovou dokumentaci (dispoziční výkresy, výkres závěsů, výkres předpínací výztuže).

Seznam doporučené literatury:
[1] Projektové podklady
[2] Šafář, R.: Betonové mosty 2 - přednášky, ČVUT v Praze 2014

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Roman Šafář, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 3.10.2018 Termín odevzdání diplomové práce: 6.1.2019
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

[Redacted Signature] Podpis vedoucího práce

[Redacted Signature] Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

3.10.2018 Datum převzetí zadání

[Redacted Signature] Podpis studenta(ky)

Čestné prohlášení

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

.....

Jakub Doležal

V Praze dne 6.1.2019

Anotace

Tato práce se zabývá návrhem mostu na silničním okruhu kolem Prahy, který propojí městské části Suchdol a Čimice přes údolí řeky Vltavy a přilehlé komunikace. Jedná se o zavěšený most o třech polích. Hlavní nosná konstrukce je posouzena v mezních stavech použitelnosti a únosnosti.

Klíčová slova

Silniční most, zavěšený most, návrh mostu, betonová konstrukce, předpjatý beton, časově závislá analýza

Abstract

The thesis deals with design of a bridge which will be a part of the Prague ring road and which will connect two city districts Suchdol and Čimice over the valley of Vltava river and adjacent roads. The proposal is a three span cable-stayed bridge. The superstructure is verified at serviceability and ultimate limit states.

Key words

Motorway bridge, cable-stayed bridge, bridge design, concrete structure, prestressed concrete, time dependent analysis

Poděkování

Především děkuji mému vedoucímu této diplomové práce Romanu Šafářovi za jeho cenné rady, připomínky a odborné vedení.

1 Obsah

2	Úvod.....	9
2.1	Přemostované překážky.....	9
2.2	Návrh řešení.....	9
3	Technická zpráva	11
3.1	Identifikační údaje mostu.....	11
3.2	Základní údaje o mostu.....	11
3.3	Zdůvodnění stavby mostu a jeho umístění.....	11
3.3.1	Údaje o přemostovaných překážkách	11
3.3.2	Údaje o převáděné komunikaci.....	12
3.4	Technické řešení mostu	12
3.4.1	Všeobecně	12
3.4.2	Nosná konstrukce	12
3.4.3	Spodní stavba a zakládání.....	12
3.4.4	Závěsy.....	13
3.4.5	Mostní svršek a vybavení mostu	13
3.4.5.1	Vozovka a izolace	13
3.4.5.2	Okraje mostu a zádržné systémy	13
3.4.5.3	Římsy	14
3.4.5.4	Odvodnění mostu.....	14
3.4.6	Výstavba mostu.....	14
4	Statický výpočet.....	15
4.1	Úvod.....	15
4.1.1	Celkové působení konstrukce.....	15
4.1.2	Příčný řez.....	17
4.2	Podklady.....	18
4.2.1	Literatura a normy.....	18
4.2.2	Použité programy	18
4.3	Údaje pro výpočet	18
4.3.1	Materiály	18
4.3.1.1	Beton nosné konstrukce.....	18
4.3.1.2	Betonářská výztuž	20
4.3.1.3	Předpínací výztuž	21
4.3.1.4	Závěsy	21
4.3.2	Geometrické parametry	22

4.3.2.1	Rozpětí a okrajové podmínky	22
4.3.2.2	Příčné řezy	22
4.3.3	Průřezové charakteristiky	24
4.4	Modely konstrukce	24
4.4.1	2D prutový model	24
4.4.2	3D desko-stěnový model	25
4.5	Zatížení	27
4.5.1	Zatížení stálé	27
4.5.2	Rektifikace závěsů	27
4.5.3	Zatížení proměnné	28
4.5.3.1	Zatížení dopravou	28
4.5.3.2	Zatížení teplotními změnami	31
4.5.4	Zatížení větrem	32
4.5.5	Zatížení během výstavby	32
4.5.5.1	Stálá zatížení během výstavby	32
4.5.5.2	Proměnná zatížení během výstavby	34
4.5.6	Kombinace zatížení	34
4.6	Návrh závěsů	36
4.7	Výsledky z 2D modelu	38
4.7.1	Vnitřní síly od jednotlivých zatížení	38
4.7.1.1	Vnitřní síly od stálých zatížení	38
4.7.1.2	Vnitřní síly od proměnných zatížení	42
4.7.2	Vnitřní síly po rektifikaci závěsů	54
4.7.3	Reakce	55
4.7.4	Vliv zatížení na tuhost závěsů	57
4.8	Výsledky z 3D modelu	61
4.8.1	Studie působení příčného řezu	61
4.9	Předpětí	67
4.9.1	Návrh předpětí	67
4.9.2	Ztráty předpětí	71
4.10	Časově závislá analýza postupu výstavby	72
4.10.1	Vnitřní síly od kombinací pro MSP	74
4.10.1.1	Charakteristická kombinace	74
4.10.1.2	Častá kombinace	75
4.10.1.3	Kvazistálá kombinace	76
4.10.2	Vnitřní síly od kombinací pro MSÚ	77
4.11	Mezní stavy použitelnosti	78

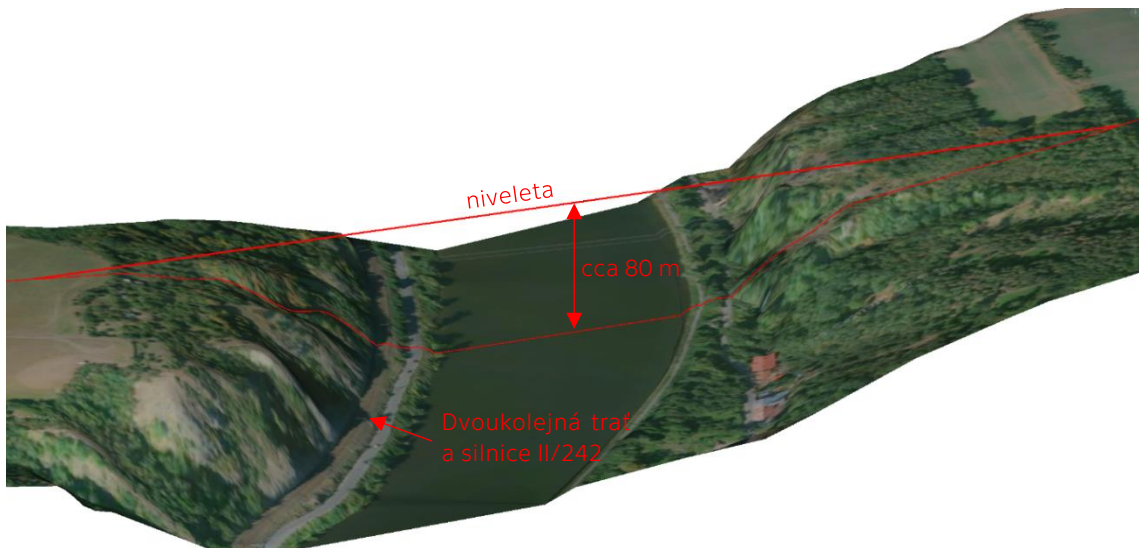
4.11.1	Omezení napětí v betonu	78
4.11.1.1	Během výstavby.....	78
4.11.1.2	Uvedení do provozu	99
4.11.1.3	Konec životnosti.....	100
4.11.2	Kontrola trhlin.....	101
4.11.3	Omezení napětí v závěsech.....	101
4.11.3.1	Během výstavby.....	101
4.11.3.2	Uvedení do provozu	113
4.11.3.3	Konec životnosti.....	114
4.11.4	Průhyb	115
4.12	Mezní stavy únosnosti.....	116
4.12.1	Ohyb a normálová síla.....	116
4.12.1.1	Extrémní kladný ohybový moment	117
4.12.1.2	Extrémní záporný ohybový moment	118
4.12.2	Normálová síla v závěsech	119
4.12.3	Únava	120
4.13	Předběžné ověření pylonu	121
4.14	Příčný směr.....	124
4.14.1	Předpětí	125
4.14.2	Mezní stav použitelnosti.....	127
4.14.2.1	Omezení napětí.....	127
4.14.2.2	Kontrola trhlin	132
4.14.3	Mezní stav únosnosti	134
4.14.3.1	Extrémní záporný ohybový moment	138
4.14.3.2	Extrémní kladný ohybový moment	139
4.14.3.3	Ohybový moment – pouze od stálých zatížení.....	140
4.14.4	Příčná betonová táhla	142
5	Závěr.....	148
6	Literatura.....	149
6.1	Literatura	149
6.2	Normy	149
6.3	Webové stránky.....	149
7	Seznam obrázků	150
8	Seznam tabulek	154
9	Seznam příloh.....	156

2 Úvod

Přemostění, kterým se zabývá tato práce, je součástí plánované severní části silničního okruhu kolem Prahy – směrově rozdělené komunikace se třemi jízdními pruhy v každém směru. Jde o přemostění údolí Vltavy, které propojí městské části Suchdol a Čimice. Výškový návrh trasy je řešen přechodem celého údolí v úrovni okolo 80 m nad hladinou Vltavy.

2.1 Přemostované překážky

Vltavské údolí je v místě přemostění hluboké až 80 m, jeho skalní svahy jsou navíc blíže k Vltavě poměrně příkré. Levý břeh Vltavy kopíruje dvoukolejná trať Praha – Kralupy nad Vltavou a vedle ní blíže k břehu silnice II/242. Na pravém břehu se nachází místní komunikace malého významu ulice V Zámčích. Oba svahy údolí spadají pod ochranu přírodních parků, na pravém břehu to je park Sedlecké skály, na levém břehu je to menší park Zámky. Vizualizace údolí s vyznačenou niveletou mostu je v Obr. 2.1.1.



Obr. 2.1.1: Model vltavského údolí

2.2 Návrh řešení

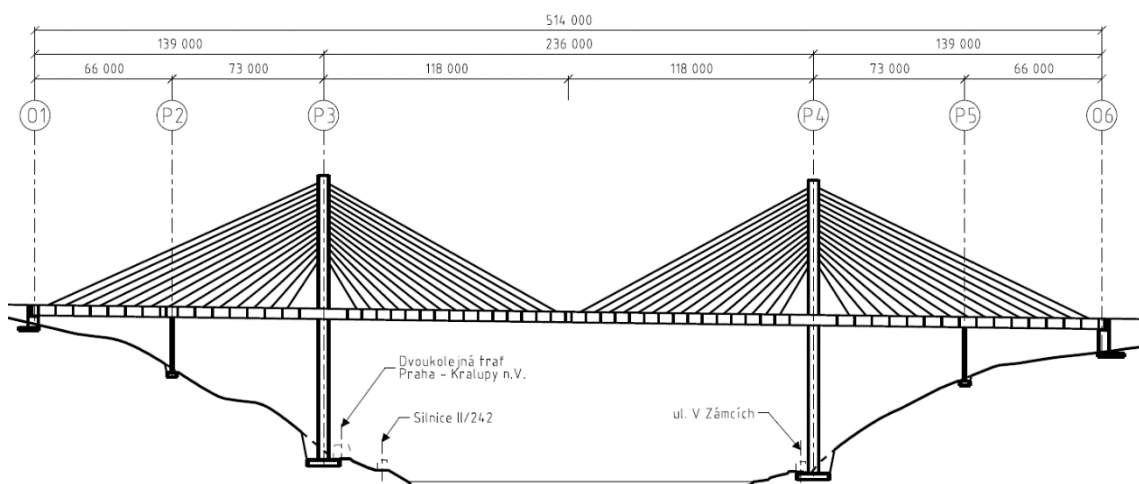
Vzhledem k charakteru údolí v místě křížení je umístění možných podpěr mostní konstrukce dosti limitováno. Tento fakt tedy vede k volbě konstrukce s velkým rozpětím. Různé konstrukční typy mostů byly zváženy již v mé bakalářské práci, kde volba padla na zavěšený most. Tento typ mostů umožní minimalizovat množství podpěr na dva pylony a v tomto případě ještě dva pilíře v krajních polích. Zavěšený most o třech polích je zvolen i v této práci. Oproti bakalářské práci, kde jsem zvolil poměrně nestandardní řešení se třemi stejně dlouhými poli a s pylony i na koncích

mostu, je v této práci přistoupeno k detailnější analýze v podélném i příčném směru typičtějšího zavěšeného mostu se dvěma pylony.

Umístění pylonů je značně limitováno zejména železnicí a silnicí na levém břehu Vltavy. Pro umístění pylonů vzhledem k levému břehu připadají tedy v úvahu tři možnosti – mezi břeh Vltavy a silnici, mezi silnici a železnici nebo za železnici k patě svahu údolí. Druhý faktor, který ovlivnil tuto volbu, je rozpětí krajního a středního pole, respektive poměr jejich délek. Poslední třetí faktor je výška opěr. Po zvážení všech faktorů a omezení je vybráno umístění pylonu za železnici k patě svahu údolí. Tato volba umožní co nejvíce zkrátit rozpětí krajních polí, ale zároveň je zachovat dostatečně dlouhá, aby bylo dosaženo rozumné výšky opěr při stejné délce obou krajních polí. Konstrukce je tak díky tomu symetrická. Nevýhoda tohoto řešení spočívá v nutnosti výluky provozu na jedné koleji zmiňované trati během realizace spodní stavby, avšak díky tomu, že je trať dvoukolejná, dojde pouze k částečnému omezení provozu. Během výstavby dojde pravděpodobně také k omezení provozu na pravém břehu Vltavy v ulici V Zámčích. Jedná se ale o poměrně nevýznamnou místní komunikaci.

Most převádí značně širokou komunikaci, celková šířka mostovky tak narostla na 514,4 m. Pylony jsou proto do mostovky vetknuty, i vzhledem k jejich výšce by jejich šířka příliš narostla, kdyby měly mostovku „obcházet“ a zajistit tak kloubové podepření. Příčný řez mostovky je zvolen komorový s vyloženými konzolami podepřenými vzpěrami. Dvojice závěsů je kotvena do nálitků uprostřed horní desky komory.

Výkresová dokumentace je v příloze č. 1. Zjednodušený podélný řez s hlavními kótami je v Obr. 2.2.1.



Obr. 2.2.1: Zjednodušený podélný řez

3 Technická zpráva

3.1 Identifikační údaje mostu

Tab. 3.1.1: Identifikační údaje mostu

Stavba	519 Suchdol – Březiněves
Katastrální území	Suchdol, Čimice
Obec	Praha
Kraj	Praha
Objednatel stavby	Ředitelství silnic a dálnic ČR
Projektant	Jakub Doležal

3.2 Základní údaje o mostu

Tab. 3.2.1: Základní údaje o mostu

Charakteristika mostu	Trvalý silniční most zavěšený o třech polích
Délka přemostění	511,0 m
Délka mostu	539,94 m
Délka nosné konstrukce	517,0 m
Šikmost mostu	100 g
Šířka mostu	38,40 m
Volná šířka	2 x 15,50 m
Šířka průchozího prostoru	2 x 0,75 m
Výška mostu nad terénem	cca 80 m
Plocha nosné konstrukce	19 542,6 m ²
Zatížení	PK1

3.3 Zdůvodnění stavby mostu a jeho umístění

3.3.1 Údaje o přemostovaných překážkách

Navržené přemostění je součástí plánované severní části silničního okruhu kolem Prahy v místě křížení s Vltavou v městských částech Suchdol a Čimice. Z důvodu přítomnosti chráněných přírodních parků na obou březích Vltavy je trasa převedena

na mostním objektu přes celé údolí ve výšce nad hladinou až 80 m. Na levém břehu Vltavy se nachází dvoukolejná trať Praha – Kralupy nad Vltavou a také silnice II/242. Na pravém břehu je místní komunikace ulice V Zámčích. Na levém svahu údolí je přírodní park Sedlecké skály, na pravém svahu je přírodní park Zámky.

3.3.2 Údaje o převáděné komunikaci

Most převádí směrově rozdělenou komunikaci o třech jízdnicích pružích v každém směru 3 x 3,75 m se zpevněnou krajnicí šířky 2,5 m. Celková šířka vozovky v jednom směru je 15,5 m. Chodník je navržen na obou stranách jako nouzový, šířky 0,75 m. Šířka středního dělicího pásu je 4,0 m. Komunikace je v místě mostu v přímé a v podélném sklonu 1,3 %. Příčný sklon je střechovitý 2,5 %.

3.4 Technické řešení mostu

3.4.1 Všeobecně

Jedná se zavěšenou mostní konstrukci o třech polích s rozpětím obou krajních polí 139 m, rozpětí hlavního pole je 236 m. Most převádí oba jízdnicí směry na jedné konstrukci. Mostovka je vetknuta do pylonů P3 a P4, v krajních polích je také vetknuta do pilířů P2 a P6. Na svých koncích je mostovka uložena na posuvná ložiska na opěrách O1 a O6. Pylon P3 se nachází na úpatí skály na levém břehu Vltavy vedle přilehlé dvoukolejné trati. Pylon P4 je umístěn také na úpatí svahu na pravém břehu Vltavy.

3.4.2 Nosná konstrukce

Hlavní nosnou konstrukci tvoří jeden komorový nosník o třech polích s rozpětím 139 + 236 + 139 m kolmo uložený kloubově na opěrách O1 a O6, vetknutý do pylonů P3 a P4 a do pilířů P2 a P6. Celková šířka nosné konstrukce je 37,8 m. Konzoly komory jsou obě dlouhé 10,8 m a jsou podepřeny betonovými vzpěrami kotvenými do žeber na kraji konzol. Podélné ztužující žebro se nachází také uprostřed horní desky komory, kde jsou i nálitky pro ukotvení dvojic mostních závěsů. Poslední závěsy Z1 a Z60 jsou z důvodu velké síly kotveny do čela příčnicku u opěry. Uvnitř komory jsou navrženy diagonální táhla z předpjatého betonu, která ztužují celý příčný řez. V místě vetknutí do pylonů a pilířů je komora vyplněna příčnickem, v místě uložení na opěry je vyplněna celá plocha příčného řezu. Sklon povrchu horní desky je střechovitý 2,5 %, pod římsami na krajích mostovky je protispád 4 %.

Mostovka se skládá z jednotlivých lamel betonovaných letmo s postupným vyvšováním. Lamely krajního pole jsou dlouhé 7 m a lamely krajních polí mají délku 8,4 m. Horní deska lamel krajních polí má tloušťku 350 mm s náběhy na 550 mm, to samé platí i pro dolní desku. Stěny mají konstantní tloušťku 550 mm. Lamely středního pole mají tloušťku horní a dolní sjednocenou na 550 mm. Tloušťka stěn je 600 mm.

3.4.3 Spodní stavba a zakládání

Opěry se skládají ze základu, úložného prahu, závěrné zídky a rovnoběžných křídel vetknutých do základu. V závěrné zídce je vytvořen výklenek pro možnost kontroly a dopínání závěsů Z1 a Z60 kotvených do čela příčnicku. Na úložném prahu jsou umístěny dva ložiskové bloky. Úložný práh je vyspádován směrem k závěrné zídce

4,0 %, kde bude vytvořen odvodňovací žlábek vyvedený pomocí čedičových tvarovek do boku opěry. Rub opěry je odvodněn drenážní trubkou vyvedenou na svah náspu do vsakovací jámky. V závěrné zídce budou vytvořeny otvory po podélný svod odvodnění vozovky. Pilíře se skládají ze základu a dřívku tvaru I se stojinou o rozměrech 5 x 1 m a přírub o rozměrech 1 x 3 m. Menší tloušťkou pilíře v podélném směru se dosáhne menšího odporu proti dilatačním posunům v podélném směru mostu. Přesné základové poměry nejsou známy, ale vzhledem k výskytu skal v oblasti mostu je zvoleno plošné zatížení. Základ pylonů i pilířů tvoří základové patky, které jsou uloženy přímo na skalní podloží.

Spodní část pylonů je tvořena základem a dřívkem s rozměry 5 x 5 m. Horní část pylonů navazuje na dolní, je ovšem omezena šířkou dělicího pásu 4 m. Průřez horní části pylonu je tak obdélníkový 5 x 3 m. V místě pylonů je proto betonové svodidlo vytvarované do boků pylonu, které se plynule napojuje na svodidla ocelová. Toto betonové svodidlo bude dobetonováno až po nanesení izolace desky mostovky.

V horní části pylonu jsou závěsy kotveny do spřaženého ocelového jádra.

3.4.4 Závěsy

Jsou vybrány závěsy firmy VSL. Závěsy jsou tvořeny paralelními sedmi-drátovými lany o průměru 15,7 mm s $f_{pk} = 1860$ MPa. Lana jsou dle specifikace výrobce potažena HDPE povlakem a injektovaná mazivem s vnější HDPE chráničkou. Použity jsou závěsy se 37, 55, 73 a 95 lany.

Závěsy jsou uspořádány do dvojic, které jsou kotveny vždy ve stejném příčném řezu.

3.4.5 Mostní svršek a vybavení mostu

3.4.5.1 Vozovka a izolace

Vozovka na mostě je navržena třívrstvá – obrušná vrstva ACO 16 S 40 mm, ložní vrstva ACL 16 S 50 mm, ochranná vrstva izolace MA 11 IV 40 mm, izolace NAIP 5 mm + pečticí vrstva, celkem 135 mm. Vodotěsná izolace je celoplošná z natavitelných asfaltových izolačních pásů (NAIP).

Tab. 3.4.1: Vozovka a izolace na mostě

Vrstva	Materiál	Tloušťka [mm]
Obrušná	ACO 16 S	40
Ložní	ACL 16 S	50
Ochranná	MA 11 IV	40
Izolace	NAIP	5
Celkem:	-	135

3.4.5.2 Okraje mostu a zádržné systémy

Podél vnějšího a vnitřního okraje vozovky jsou ocelová zábradelní svodidla s úrovní zadržetí H2, v místě pylonů jsou na bocích pylonu betonová svodidla. Na mostě se na krajích říms nachází protihlukové stěny.

3.4.5.3 Římsy

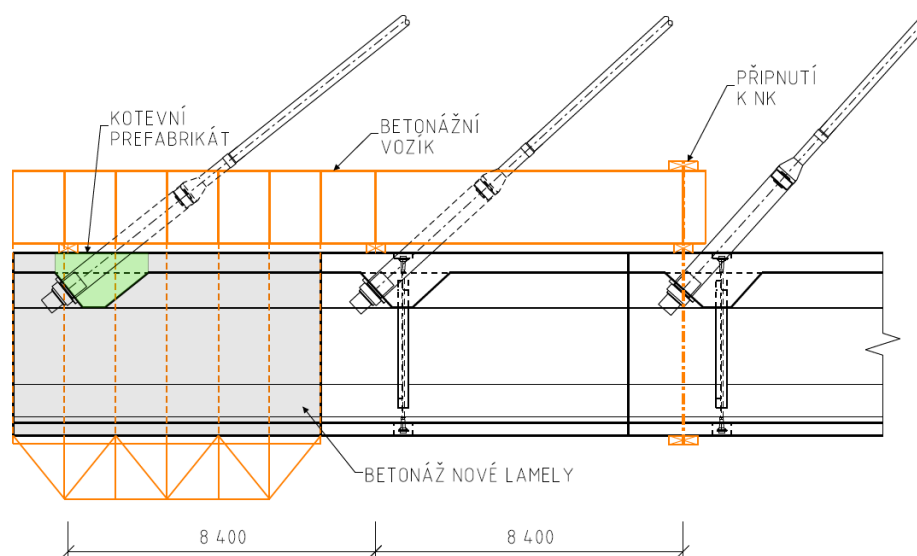
Římsy jsou monolitické železobetonové. Sklon říms je 4,0 % směrem k vozovce, výška obrubníku nad vozovkou činí 150 mm, sklon obrub je 5:1. Krajiní římsy mají šířku 1,7 m, střední římsa je 4,0 m široká. Římsy jsou kotveny do desky mostovky pomocí ocelových („motýlkových“) kotev a betonářské výztuže.

3.4.5.4 Odvodnění mostu

Voda je odváděna z vozovky pomocí příčného střešovitého sklonu 2,5 % a podélného sklonu 1,3 % do mostních odvodňovačů v odvodňovacím proužku šířky 500 mm. Odvodňovače jsou na obou stranách napojeny příčnými svody do podélného tepelně izolovaného potrubí DN max. 400, které je zavěšeno pod konzolou mostovky. Toto potrubí je vyvedeno otvory v závěrné zídce do dálniční kanalizace.

3.4.6 Výstavba mostu

Most se bude stavět metodou letmé betonáže s postupným vyvěšováním jednotlivých lamel. Výstavba bude probíhat tak, že se nejprve realizuje spodní stavba, následně i horní část pylonů, do které se pak budou postupně zavěšovat všechny lamely. K tomuto postupnému zavěšování budou použity již finální závěsy. Z mostovky se vybetonují nejdříve její zárodky v podobě příčnicku u pylonů, na které pak budou navazovat lamely středního a krajních polí. K betonáži lamel slouží betonážní vozík, který se postupně posouvá a během betonáže tvoří podporu nové lamely. Vozík je podepřen na dvou předešlých lamelách a je také zavěšen za závěs pro novou lamelu, viz Obr. 3.4.1. K tomu, aby betonážní vozík nemusel být kotven pomocí dočasných závěsů, je nálietek pro závěsy nosné konstrukce mostovky prefabrikovaný. Vzhledem ke geometrii a působícímu zatížení na vozík od betonované lamely musí být v místě jeho podepření na druhé lamente přikotven k mostovce.

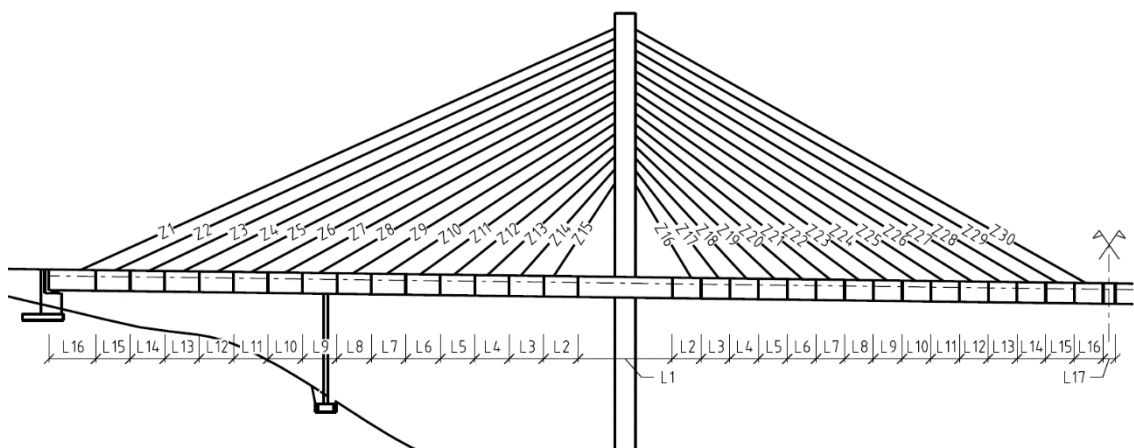


Obr. 3.4.1: Betonážní vozík

4 Statický výpočet

4.1 Úvod

Statický výpočet je v rámci této práce zaměřen na návrh, analýzu a posouzení hlavní nosné konstrukce (mostovky) a závěsů včetně postupu výstavby letmou betonáží s postupným vyvěšováním. Označení jednotlivých lamel a závěsů jsou v Obr. 4.1.1. Vzhledem k tomu, že konstrukce je symetrická, jsou v této práci uvedeny dílce na jedné polovině mostu (závěsy Z1 – Z30, nosná konstrukce O – 258,5 m), pokud není uvedeno jinak.



Obr. 4.1.1: Označení částí konstrukce

Vnitřní síly a předpětí v podélném směru jsou vyhodnocovány na 2D prutovém modelu, současně je ale konstrukce zkoumána z hlediska prostorového působení mostovky na 3D desko-stěnovém modelu, kteréhož výstupy jsou využity u zpracování dat z 2D modelu. Statický výpočet se tedy sestává nejprve ze stanovení účinku zatížení, analýze konstrukce na 2D a 3D modelu, návrhu předpětí a rektifikace závěsů a posouzení konstrukce v jednotlivých časových úsecích během výstavby, za provozu a na konci životnosti.

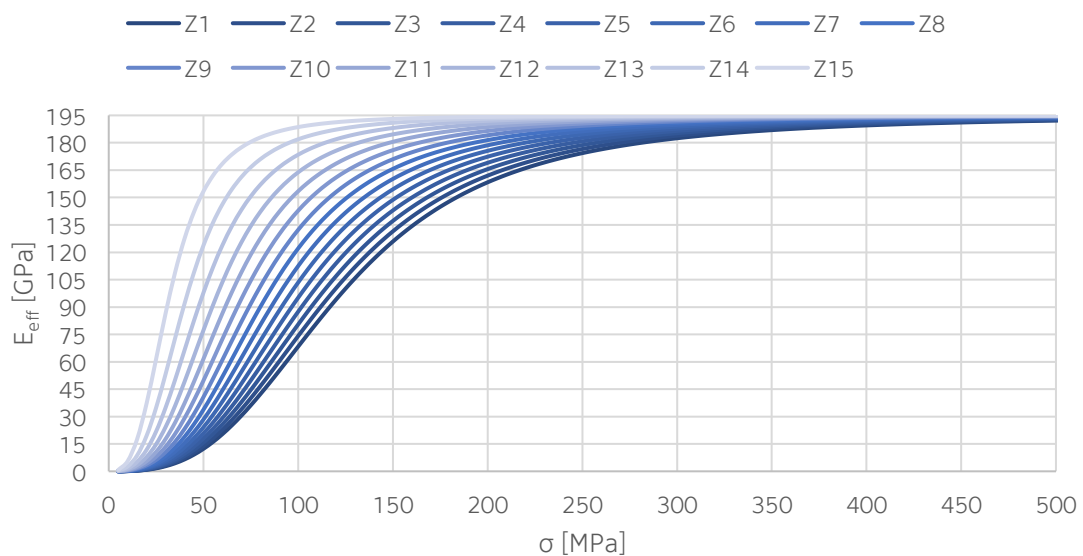
4.1.1 Celkové působení konstrukce

Jedná se o zavěšený most s poměrně běžným konstrukčním uspořádáním o třech polích a dvou pylonech. Rozvržení závěsů je zvoleno jako poloharfóvité, což kombinuje výhody obou způsobů rozvržení závěsů. Tvar Vltavského údolí a uspořádání přemostovaných překážek ovšem vedl k méně tradičnímu rozpětí polí. Hlavní střední pole přes Vltavu je dlouhé 236 m a krajní pole jsou dlouhá obě 139 m. Poměr délek středního a krajního pole je tedy roven 0,6. Což převyšuje doporučený poměr, který se pohybuje od 0,3 do 0,45 [2]. Tento fakt je kompenzován umístěním pilířů do krajních polí působících tlakově, na rozdíl od zavěšených mostů s doporučeným poměrem krajního a středního pole, kde se tyto podpory v krajních polích chovají jako táhla.

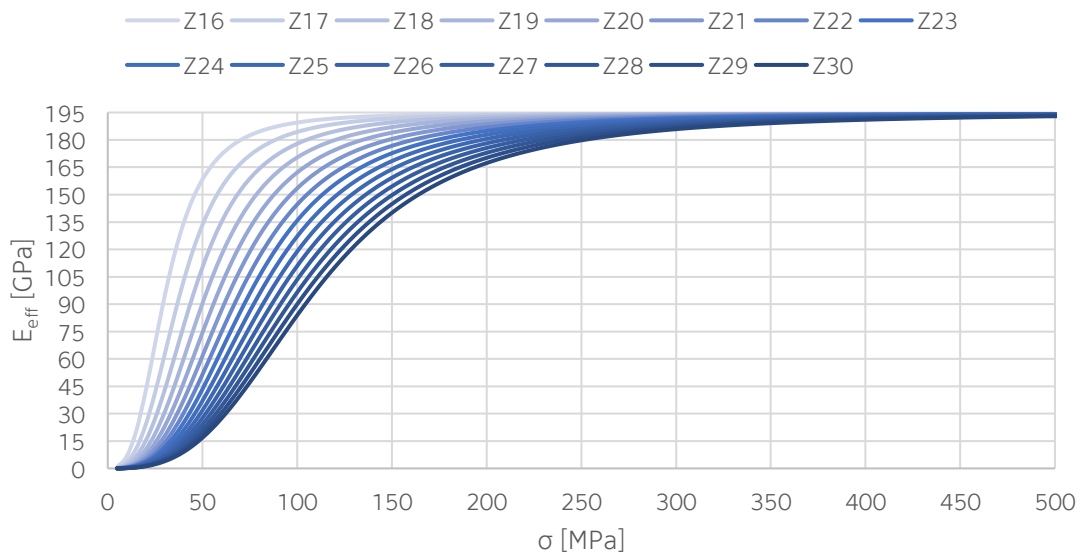
Rozdělení vnitřních sil po konstrukci dále ovlivňuje velikost normálové síly v závěsech, čímž je také kompenzován nepříznivý poměr krajního a středního pole. Závěsy se během výstavby i po dokončení rektifikují (zkracují), dochází tak k navyšování tahové síly. Cílem je, aby se konstrukce pod stálým zatížením chovala víceméně jako spojitý nosník. Zmíněná velikost normálové síly v závěsech je velmi důležitý faktor ovlivňující celý výpočet zejména kvůli svému vlivu na tuhost závěsů. Během analýzy je tedy vypočten efektivní modul pružnosti E_{eff} závěsů, který když se blíží hodnotě skutečného modulu pružnosti E_0 závěsů, lze říci že se konstrukce chová lineárně a je možno použít princip superpozice. Toto musí být prokázáno jak během všech fází výstavby, tak i na dokončené konstrukci. Efektivní modul pružnosti, nazývaný také Ernstův modul pružnosti, je spočten dle vzorce dole z [1] a [2].

$$E_{eff} = \frac{E_0}{1 + \frac{\gamma^2 * l_h^2 * E_0}{12 * \sigma^3}} \quad (\text{Rov. 1})$$

Kde E_0 je modul pružnosti materiálu závěsů ($E_0 = 195$ GPa), γ je objemová tíha materiálu závěsů, l_h je horizontální průmět délky závěsu a σ je napětí v závěsu. Dle tohoto vztahu je v Obr. 4.1.2 a Obr. 4.1.3 znázorněn vztah mezi napětím v jednotlivých závěsech a jejich efektivním modulem pružnosti. Vzhledem k symetrii konstrukce je v této práci ověřena polovina závěsů Z1-Z30.



Obr. 4.1.2: E_{eff} pro závěsy Z1-Z15

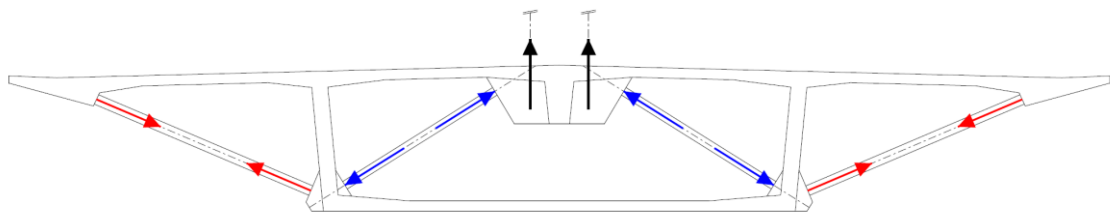


Obr. 4.1.3: E_{eff} pro závěsy Z16-Z30

Z toho plyne, že když je napětí v závěsech dostatečné, je jejich efektivní modul pružnosti velice blízko modulu pružnosti jejich materiálu a konstrukci tak lze počítat lineárně. Toto je ověřeno na stranách 57 - 60.

4.1.2 Příčný řez

Uspořádání příčného řezu mostovky je také na této konstrukci hodné větší pozornosti. Vzhledem k tomu, že jedna mostní konstrukce převádí dva jízdny pásy o třech pružích, narostla celková šířka nosné konstrukce na 37,8 m. Konstrukce mostovky je proto zvolena jako jedna poměrně široká komora s vyloženými konzolami, které jsou podepřeny vzpěrami. Závěsy jsou kotveny uprostřed komory, kde se také nachází ztužující podélné žebro. Komora je také vyztužena diagonálními táhly. Z důvodů atypického řešení příčného řezu je provedena analýza jeho působení na 3D desko-stěnovém modelu, a to zejména z důvodu prověření vlivu ochabnutí smykem na takto širokou konstrukci. V druhé řadě jsou na 3D modelu také sledovány vnitřní síly a napětí v deskách, na které je navrženo předpětí v příčném směru. Působení příčného řezu je schematicky znázorněno v Obr. 4.1.4.



Obr. 4.1.4: Schématické znázornění působení příčného řezu

4.2 Podklady

4.2.1 Literatura a normy

Použitá literatura a normy jsou uvedeny v samostatné kapitole na konci této práce, viz kapitola 6.

4.2.2 Použité programy

Analýza konstrukce je provedena na 2D a 3D modelu v programu SCIA Engineer verze 18.1. Pro další výpočty je použito programů Microsoft Excel a PTC Mathcad Prime 4.0.

Výkresy a schémata jsou zhotoveny v programu Bentley Microstation v8i.

4.3 Údaje pro výpočet

V této kapitole jsou uvedena vstupní data pro výpočet. Údaje jsou rozděleny na fyzikální (materiály), geometrické (rozpětí a příčné řezy). Dále jsou uvedeny průřezové charakteristiky.

4.3.1 Materiály

Konstrukce mostovky je provedena z předpjatého betonu třídy C50/60, taktéž pylon je z betonu třídy C50/60. Materiál předpínací výztuže i závěsů se uvažuje jako ocel třídy Y1860.

Dílčí součinitele spolehlivosti γ pro mezní stavy únosnosti jsou uvedeny v Tab. 4.3.1. Dále je uvažován součinitel zohledňující dlouhodobé účinky na pevnost betonu v tlaku $\alpha_{cc} = 0,9$.

Tab. 4.3.1: Dílčí součinitele spolehlivosti

γ_c (beton)	1,50
γ_s (ocel)	1,15
γ_s (závěsy)	1,35

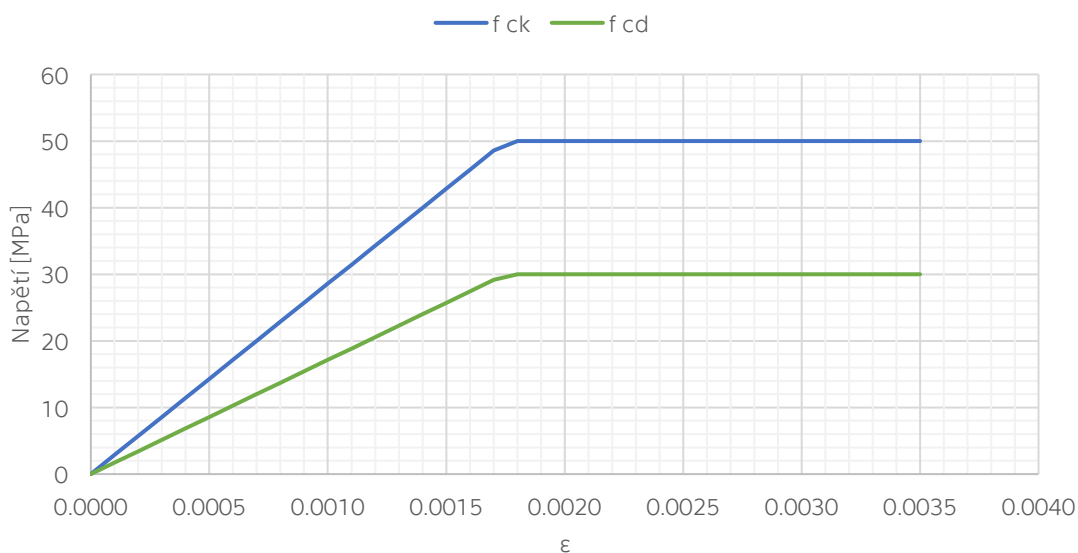
4.3.1.1 *Beton nosné konstrukce*

Beton C50/60 – XF2 – XD1 – XC4. Parametry pro čas $t \geq 28$ dní jsou uvedeny v Tab. 4.3.2.

Tab. 4.3.2: Parametry betonu C50/60 pro $t \geq 28$ dní

Parametr	Znak	Hodnota	Jednotka
Válcová pevnost v tlaku, char.	f_{ck}	50,00	MPa
Válcová pevnost v tlaku, návrh.	f_{cd}	30,00	MPa
Prům. hodnota pevnosti v tlaku	f_{cm}	58,00	MPa
Dolní hodnota pevnosti v tahu, char.	$f_{ctk;0,05}$	2,90	MPa
Dolní hodnota pevnosti v tahu, návrh.	$f_{ctd;0,05}$	1,93	MPa
Horní hodnota pevnosti v tahu, char.	$f_{ctk;0,95}$	5,30	MPa
Horní hodnota pevnosti v tahu, návrh.	$f_{ctd;0,95}$	3,53	MPa
Prům. hodnota pevnosti v tahu	f_{ctm}	4,10	MPa
Sečnový modul pružnosti	E_{cm}	37,00	GPa
Tečnový modul pružnosti	E_c	38,85	GPa
Poissonův součinitel	ν	0,20	-
Součinitel teplotní roztažnosti	α	1e-5	-
Mezní poměrné stlačení	$\epsilon_{cu2} = \epsilon_{cu3}$	3,5e-3	-
Mezní poměrné stlačení na el. pl. mezi	ϵ_{c2}	2e-3	-
Mezní poměrné stlačení na el. pl. mezi	ϵ_{c3}	1,75e-3	-

Bilineární pracovní diagram pro beton C50/60 je v Obr. 4.3.1.

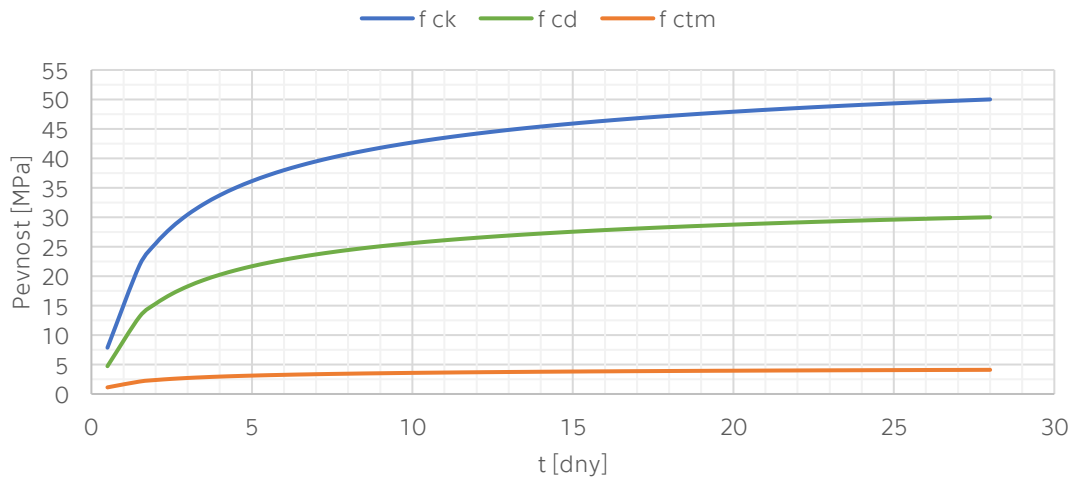


Obr. 4.3.1: Pracovní diagram betonu C50/60

K určení parametrů pro čas menší než 28 dní je použito funkce vývoje pevnosti β_{cc} .

$$\beta_{cc} = \exp s \left(1 - \sqrt{28/t} \right) \quad (\text{Rov. 2})$$

Kde s je součinitel druhu cementu uvažovaný 0,2 pro cement typu R. S použitím této funkce je vývoj tlakové a tahové pevnosti znázorněn v Obr. 4.3.2.



Obr. 4.3.2: Vývoj pevnosti betonu C50/60 pro $t < 28$ dní

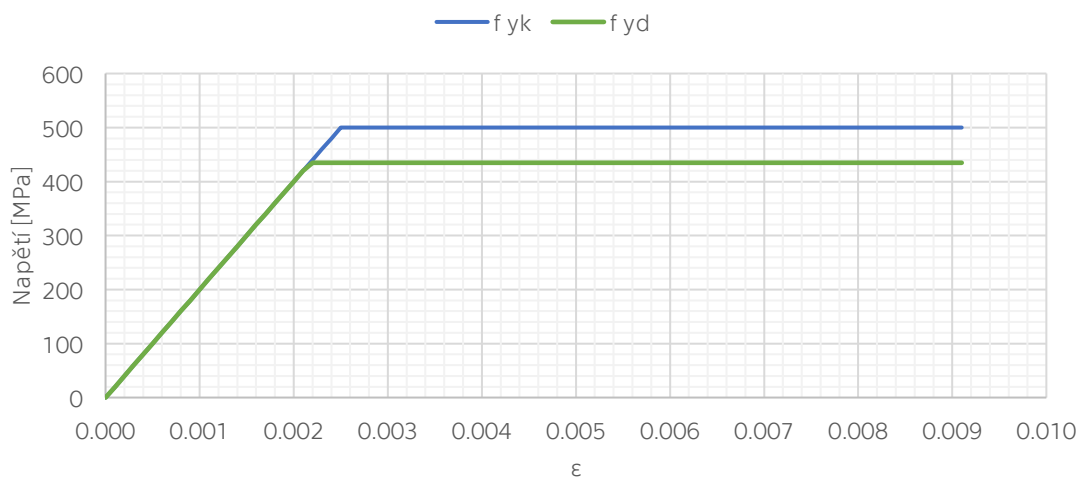
4.3.1.2 Betonářská výztuž

Ocel B500B. Parametry jsou uvedeny v Tab. 4.3.3.

Tab. 4.3.3: Parametry pro ocel B500B

Parametr	Znak	Hodnota	Jednotka
Mez kluzu, char.	f_{yk}	500	MPa
Mez kluzu, návrh.	f_{yd}	435	MPa
Pevnost v tahu	f_t	550	MPa
Modul pružnosti	E_s	200	GPa
Pom. přetvoření na el. pl. mezi, char.	ϵ_{el-pl}	1,9e-3	-
Pom. přetvoření na el. pl. mezi, návrh.	ϵ_{el-pl}	1,65e-3	-

Bilineární pracovní diagram je v Obr. 4.3.3.



Obr. 4.3.3: Pracovní diagram oceli B500B

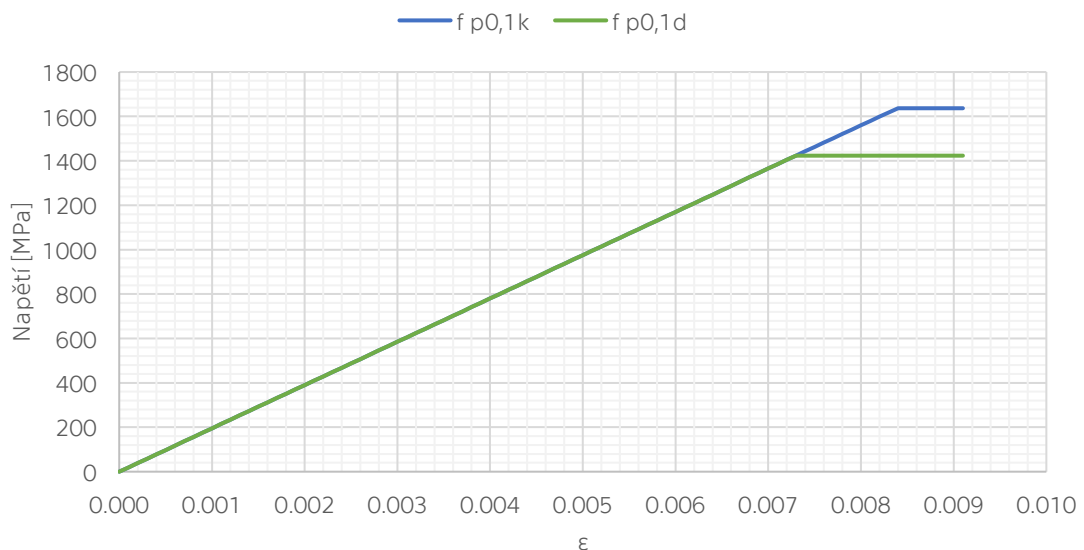
4.3.1.3 Předpínací výztuž

Ocel Y1860 S7 15,7. Parametry jsou uvedeny v Tab. 4.3.4.

Tab. 4.3.4: Parametry pro ocel Y1860

Parametr	Znak	Hodnota	Jednotka
Průměr lana	\emptyset	15,7	mm
Plocha lana	A_{p1}	150	mm ²
Pevnost v tahu	f_{pk}	1860	MPa
Smluvní mez kluzu	$f_{p0,1k}$	1636,8	MPa
Návrhové napětí	f_{pd}	1423,3	MPa
Modul pružnosti	E_p	195	GPa
Pom. přetvoření na el. pl. mezi, char.	ϵ_{el-pl}	8,4e-3	-
Pom. přetvoření na el. pl. mezi, návrh.	ϵ_{el-pl}	7,3e-3	-

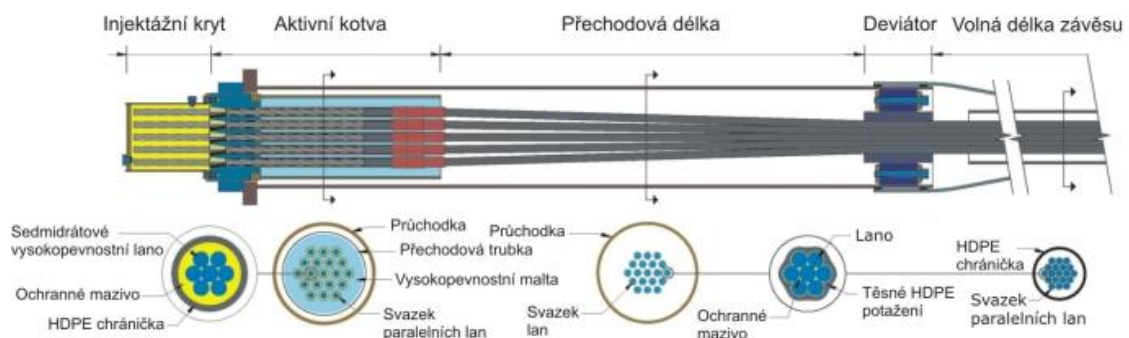
Bilineární pracovní diagram je v Obr. 4.3.4.



Obr. 4.3.4: Pracovní diagram oceli Y1860

4.3.1.4 Závěsy

Pro závěsy je použito taktéž oceli Y1860 S7 15,7. Závěsy jsou tvořeny paralelními sedmi drátovými lany o průměru 15,7 mm. Lana jsou potažena HDPE povlakem a injektované mazivem s vnější HDPE chráničkou. Barva vnější chráničky je předpokládána světlá kvůli minimalizování teplotních účinků na závěsy. Ve výpočtech je předpokládáno použití závěsu systému VSL SSI 2000 [11]. Použity jsou závěsy se 37, 55, 73 a 95 lany. Závěs s kotvou a příčné řezy jsou znázorněné v Obr. 4.3.5.

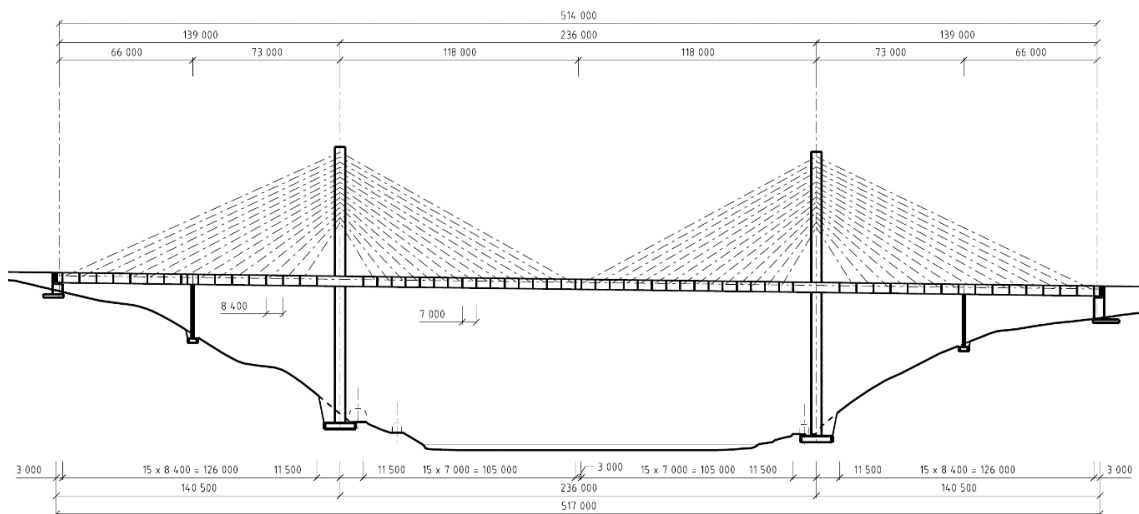


Obr. 4.3.5: Systém závěsů VSL SSI 2000 [11]

4.3.2 Geometrické parametry

4.3.2.1 Rozpětí a okrajové podmínky

Jedná se o zavěšenou konstrukci o třech polích, rozpětí hlavního pole je 236 m, rozpětí obou krajních polí je 139 m. Lamely středního pole jsou dlouhé 7 m, lamely krajních polí 8,4m. Závěsy jsou kotveny po stejných délkách jako je délka lamel. Konstrukce mostovky je vetknutá jak do pylonů, tak do krajních pilířů. Na koncích je uložena na podélně posuvných ložiscích na opěrách. Rozpětí jsou znázorněna na schématickém podélném řezu v Obr. 4.3.6.

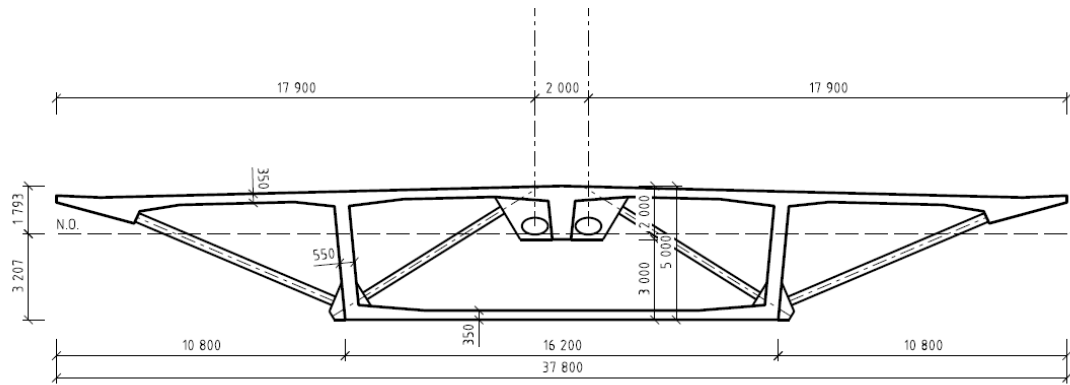


Obr. 4.3.6: Rozpětí

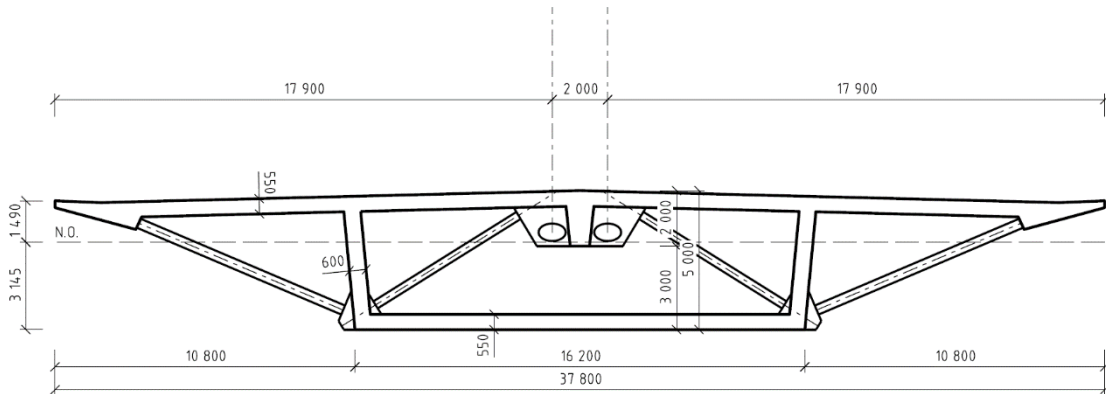
4.3.2.2 Příčné řezy

Na hlavní nosné konstrukci jsou použity tři typy příčných řezů. V poli je použit příčný řez s vnějšími vzpěrami a vnitřními táhly, v místech vetknutí do pylonu a pilíře je komora vyplněna příčnickem a v místě uložení na opěru je vyplněn celý příčný řez. Z již zmíněného poměru krajního a středního pole má průřez pro střední pole větší tloušťku desek a stěn. Toto jednak zvyšuje tuhost průřezu a také mu přidává na vlastní tíže, což je vhodné z hlediska postupu výstavby, kde lamela ve středním poli je kratší, takže přidaná tíha pomáhá konstrukci vyrovnat („vybalancovat“).

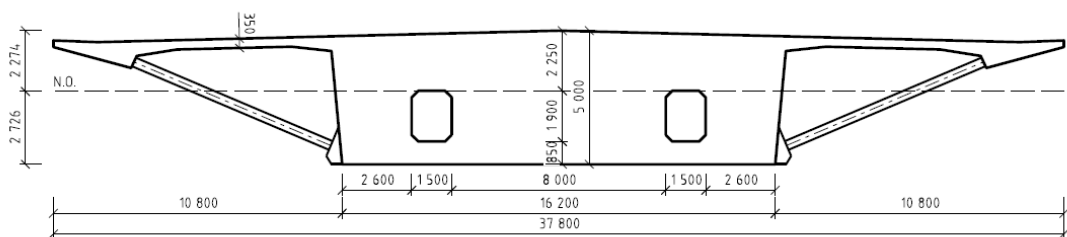
Příčné řezy jsou znázorněny v Obr. 4.3.7, Obr. 4.3.8, Obr. 4.3.9, Obr. 4.3.10 a Obr. 4.3.10. Detailnější výkresy jsou v Příloze 1.



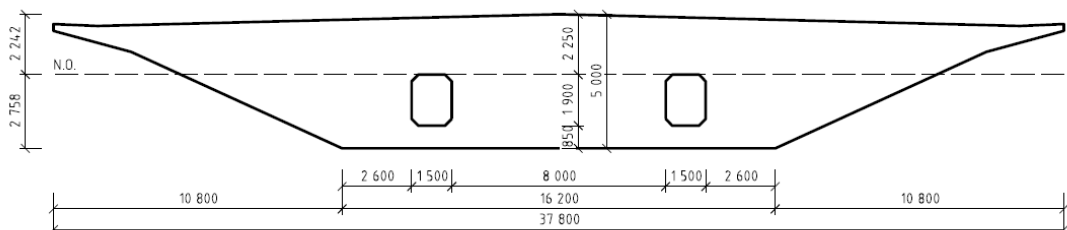
Obr. 4.3.7: Příčný řez v krajním poli



Obr. 4.3.8: Příčný řez ve středním poli



Obr. 4.3.9: Příčný řez u pylonu a pilíře



Obr. 4.3.10: Příčný řez u opěry

4.3.3 Průřezové charakteristiky

Níže v Tab. 4.3.5 jsou uvedeny charakteristiky pro plný průřez, pro výpočet jsou redukovány v kapitole 4.8.1.

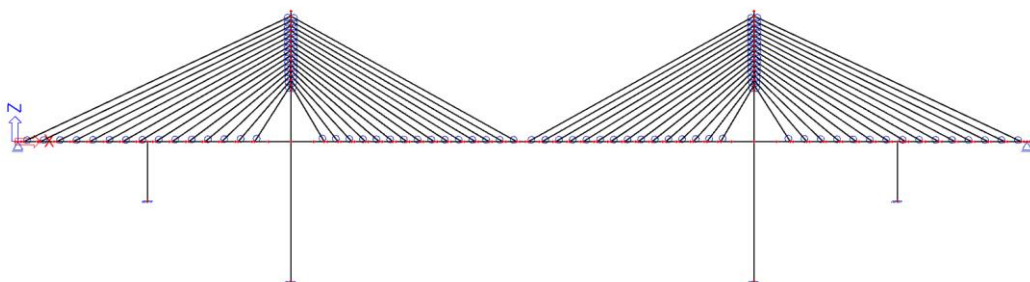
Tab. 4.3.5: Průřezové charakteristiky

PR	A_c	h	$z_{T,h}$	$z_{T,d}$	I_y	$W_{y,el,h}$	$W_{y,el,d}$
	[m ²]	[m]	[m]	[m]	[m ⁴]	[m ³]	[m ³]
krajní pole	28,3935	5,0	1,793	3,207	95,27	53,13	29,71
střední pole	35,7997	5,0	1,490	3,145	120,78	81,06	38,40
u pylonu/pilíře	85,5566	5,0	2,274	2,726	188,83	83,04	69,27
u opěry	123,1587	5,0	2,242	2,758	227,36	101,41	82,44

4.4 Modely konstrukce

4.4.1 2D prutový model

Pro účely výpočtu vnitřních sil v podélném směru je vytvořen prutový model konstrukce ve 2D prostředí – rám XZ v programu SCIA Engineer. Mostovka je modelována jako přímý prut vetknutý do prutů tvořících pylony a pilíře a na krajích podepřena posuvným kloubem. Pylon i pilíře jsou vetknuty. Podélný sklon 1,3 % je v modelu zanedbán. Závěsy jsou modelovány jako pruty s vnitřními klouby na koncích a s omezeným namáháním pouze osovými silami. Tento prutový model je znázorněn v Obr. 4.4.1.

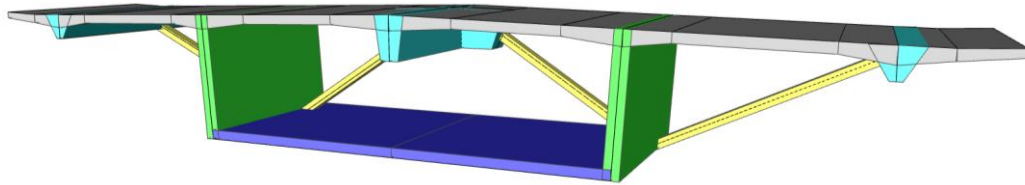


Obr. 4.4.1: 2D prutový model

Tento 2D model slouží i k časově závislé analýze postupu výstavby včetně modelování předpětí. V tomto případě jsou postupně aktivovány lamely a k nim příslušné závěsy a předpínací výztuž. Pro každou fázi výstavby je definován časový uzel, díky čemuž jsou v programu počítány jak účinky dotvarování a smršťování, tak i ztráty předpětí. Časově závislá analýza je popsána v samostatné kapitole 4.10.

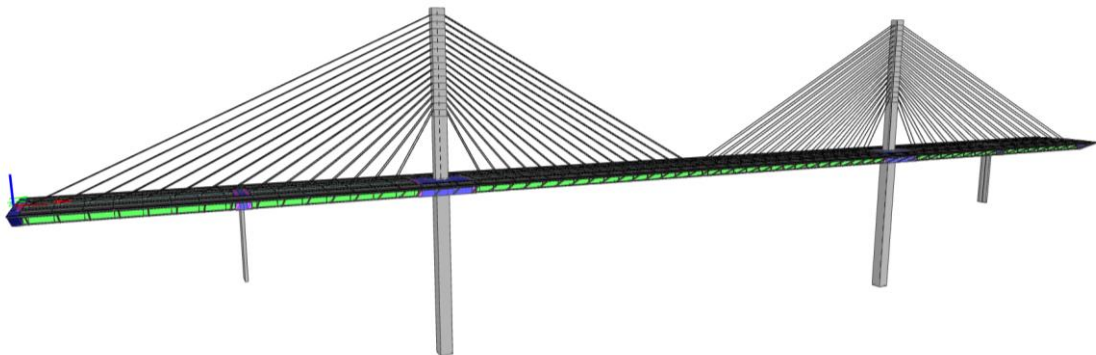
4.4.2 3D desko-stěnový model

Konstrukce je dále také zkoumána ve 3D desko-stěnovém modelu vytvořeném v programu SCIA Engineer. Příčný řez mostovky je v tomto modelu složen z plošných elementů nazývaných skořepina, které kombinují působení stěn a desek. Krajní žebro konzoly pro vnější vzpěry a střední podélník je vytvořené jedním prvkem s náběhem ve svislém směru, podobně je řešen i nálitek, do kterého jsou napojeny vnitřní vzpěry a závěsy. Vnější vzpěry a vnitřní táhla jsou modelovány jako prutové prvky. Průměrná velikost plošného prvku FEM sítě je nastavena na 0,5 m.



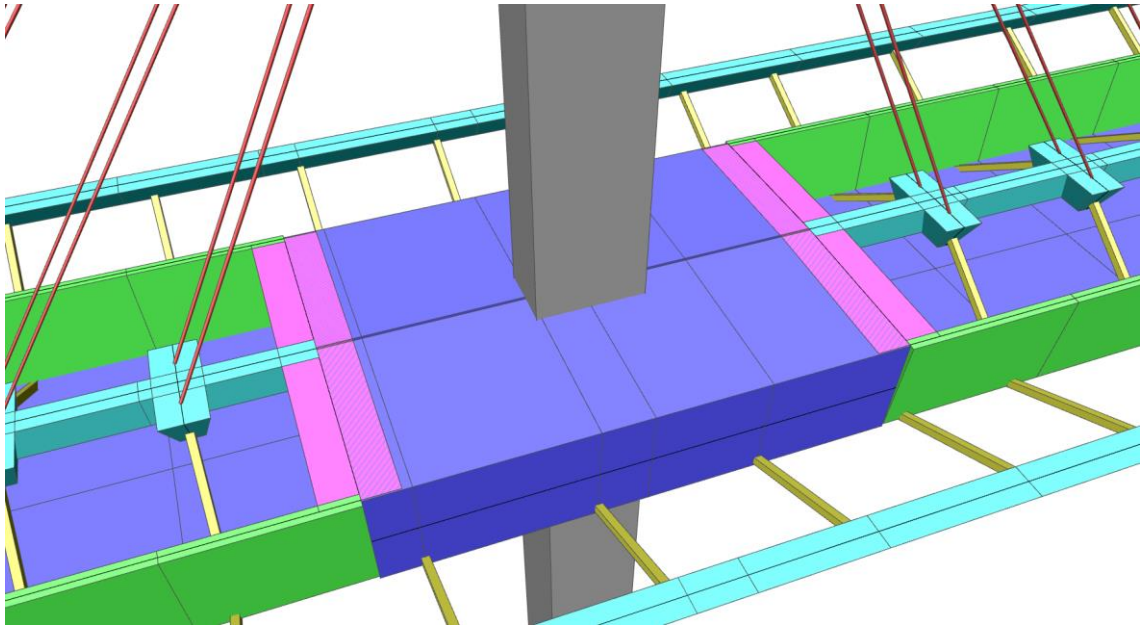
Obr. 4.4.2: Model příčného řezu ve 3D

Pylony a závěsy jsou řešeny stejně jako ve 2D prutovém modelu. Celkový pohled na model konstrukce je v Obr. 4.4.3.



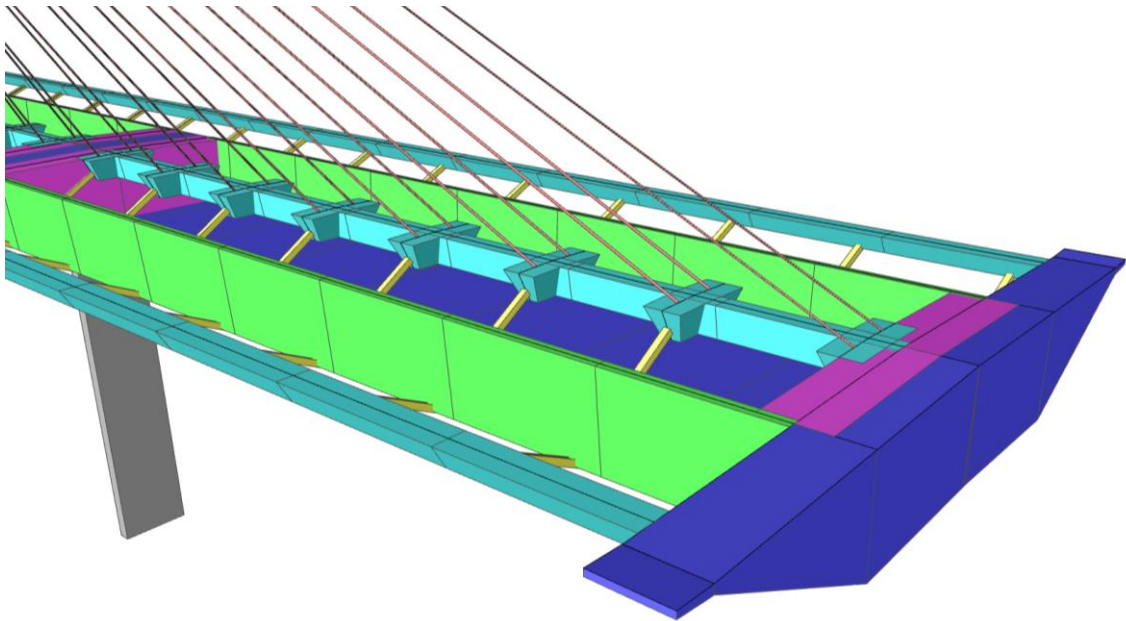
Obr. 4.4.3: 3D model konstrukce

Modelování příčnicku v místě vetknutí mostovky do pylonu a pilře je vzhledem k jistým omezením modelování konstrukcí ve SCIA Engineer provedeno propojením elementu příčnicku se stěnami a deskami průřezu v poli přes fiktivní nekonečně tuhý element s nulovou hmotností. V Obr. 4.4.4 je tento element znázorněný růžovou barvou, pro názornost je vypnuto zobrazení horní desky.



Obr. 4.4.4: Propojení příčnicku

Stejně jako napojení příčnicku je řešeno i napojení příčného řezu u opěry na Obr. 4.4.5.



Obr. 4.4.5: Propojení u opěry

4.5 Zatížení

4.5.1 Zatížení stálé

Vlastní tíha je v programu SCIA Engineer počítána automaticky ze zadaných příčných řezů a materiálů, v Tab. 4.5.1 jsou tyto hodnoty uvedeny.

Tab. 4.5.1: Vlastní tíha

PR	A_c	γ_c	$g_{0,k}$
	[m ²]	[kN/m ³]	[kN/m]
krajní pole	28,3935	26	738,231
střední pole	35,7997	26	930,7922
u pylonu/pilíře	85,5566	26	2224,4716
u opěry	123,1587	26	3202,1262

Jako ostatní stálé zatížení je v Tab. 4.5.2 zadána tíha železobetonových říms, vrstev vozovky, zábradelních svodidel a protihlukové zdi.

Tab. 4.5.2: Ostatní stálé zatížení

Položka	A	γ	$(g-g_0)_{m,k}$
	[m ²]	[kN/m ³]	[kN/m]
ŽB římsy	2,21	25,00	55,32
ACO 16 S 50 mm	1,50	25,00	37,49
ACL 16 S 50 mm	1,55	25,00	38,70
MA 11 IV 35 mm	1,08	23,00	24,90
4x zábradelní svodidla	-	-	4,00
2x protihluková zeď	-	-	4,00
Celkem	-	-	164,40

Pro generování maximálních a minimálních vnitřních sil je dále použita horní a dolní charakteristická hodnota ostatního stálého zatížení.

$$(g - g_0)_{sup,k} = 55,32 + 1,4 * (37,49 + 38,70 + 24,90) + 4 + 4 = 204,83 \text{ kN/m} \quad (\text{Rov. 3})$$

$$(g - g_0)_{inf,k} = 55,32 + 0,8 * (37,49 + 38,70 + 24,90) + 4 + 4 = 144,19 \text{ kN/m} \quad (\text{Rov. 4})$$

Dále je jako stálé zatížení do modelu zadán pokles jednotlivých podpor o 10 mm.

4.5.2 Rektifikace závěsů

Rektifikace závěsů je do modelu přidána jako další stálé zatížení udělené jako zkrácení prutů tvořících závěsy. Míra zkrácení je zvolena tak, aby v kombinaci s ostatními stálými zatíženími bylo minimalizováno namáhání konstrukce. K tomu je ještě navíc brán ohled na pohyblivé zatížení, což vyústilo k větší míře rektifikaci uprostřed rozpětí. V Tab. 4.5.3 jsou shrnuty hodnoty zkrácení jednotlivých závěsů.

Uvedena je polovina závěsů (kotvená do jednoho pylonu), druhá polovina je vzhledem k symetrii konstrukce rektifikována stejně.

Tab. 4.5.3: Rektifikace závěsů

Závěs	L	σ_{nap}	ΔL	Závěs	L	σ_{nap}	ΔL
	[m]	[MPa]	[mm]		[m]	[MPa]	[mm]
Z1	150,22	560	-432	Z16	33,44	420	-73
Z2	141,56	420	-306	Z17	39,44	420	-87
Z3	132,91	420	-287	Z18	45,86	420	-101
Z4	124,28	420	-269	Z19	52,55	420	-115
Z5	115,67	420	-250	Z20	59,42	420	-131
Z6	107,09	420	-232	Z21	66,41	560	-194
Z7	98,53	420	-213	Z22	73,48	560	-215
Z8	90,02	560	-260	Z23	80,62	560	-235
Z9	81,56	560	-236	Z24	87,81	560	-256
Z10	73,17	210	-79	Z25	95,04	560	-277
Z11	64,88	210	-70	Z26	102,29	560	-298
Z12	56,73	280	-82	Z27	109,57	560	-319
Z13	48,80	280	-71	Z28	116,87	560	-340
Z14	41,21	210	-45	Z29	124,18	560	-361
Z15	34,18	210	-37	Z30	131,51	560	-383

Uvedené hodnoty jsou celková rektifikace, závěsy jsou rektifikovány i během výstavby (kapitola 4.5.5.1) a po dokončení jsou závěsy dopnuty na hodnoty uvedené v Tab. 4.5.3.

4.5.3 Zatížení proměnné

4.5.3.1 *Zatížení dopravou*

Pro modelování zatížení dopravou je v programu SCIA Engineer použita funkcionální „pohyblivá zatížení“. V programu jsou vytvořeny zatěžovací soustavy vyjmenované v této kapitole, následně jsou spočteny příčinkové čáry a podle nich jsou generovány jednotlivé zatěžovací stavy pro maximalizaci či minimalizaci vnitřních sil a reakcí.

4.5.3.1.1 LM1

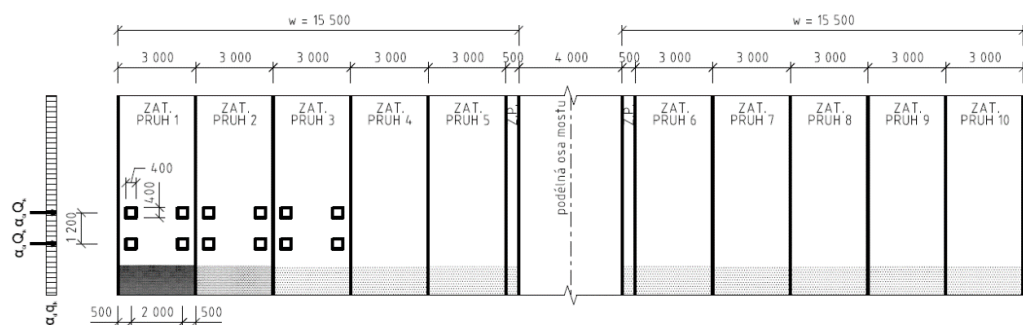
Vozovka se skládá ze dvou částí oddělených trvalým silničním záchytným systémem na jedné nosné konstrukci, použije se jedno číslování zatěžovacích pruhů pro celou vozovku. Volná šířka mostu v obou směrech je 15,5 m, šířka vozovky tedy ve smyslu stanovení počtu zatěžovacích pruhů 31 m. Při šířce jednoho zatěžovacího pruhu 3,0 m je tedy na mostě celkem 10 zatěžovacích pruhů, šířka zbývajících ploch je 1,0 m. V Tab. 4.5.4 jsou shrnuty hodnoty zatížení pro model LM1. Dynamické účinky jsou již v těchto hodnotách zahrnuty.

Tab. 4.5.4: Zatížení LM1

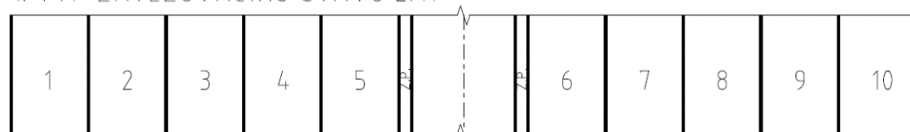
Umístění	Dvojnáprava TS			Rovnoměrné zat. UDL			zat. na m'	
	Q_{ik}	α_{Qi}	$\alpha_{Qi} Q_{ik}$	q_{ik}	α_{qi}	$\alpha_{qi} q_{ik}$	š.	$\alpha_{qi} q_{ik}'$
	[kN]	-	[kN]	[kN/m ²]	-	[kN/m ²]	[m]	[kN/m']
Pruh č. 1	300,0	1,0	300,0	9,00	1,0	9,0	3,0	27,0
Pruh č. 2	200,0	1,0	200,0	2,50	2,4	6,0	3,0	18,0
Pruh č. 3	100,0	1,0	100,0	2,50	1,2	3,0	3,0	9,0
Ostatní pruhy	-	-	-	2,50	1,2	3,0	21,0	63,0
Zbývající plocha	-	-	-	2,50	1,2	3,0	1,0	3,0
Celkem	-	-	600,0	-	-	24,0	-	120,0

Ve 3D modelu je zatížení od náprav modelováno jako plošné zatížení o rozměrech 400x400 mm. Pro pruh č. 1 je to 937,5 kN/m², pruh č.2 625 kN/m² a pruh č.3 312,5 kN/m² na jedno kolo.

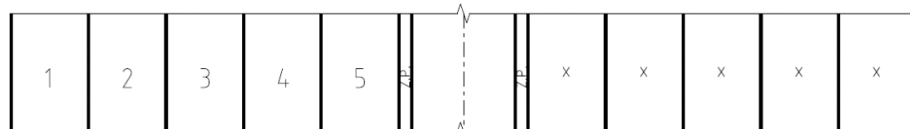
Rozmístění zatěžovacích pruhů na mostě je znázorněno na Obr. 4.5.1. Jsou uvažovány tři typy uspořádání pruhů pro maximalizaci celkového namáhání (typ 1), maximalizaci kroucení (typ 2), maximalizaci sil v závěsech (typ 3).



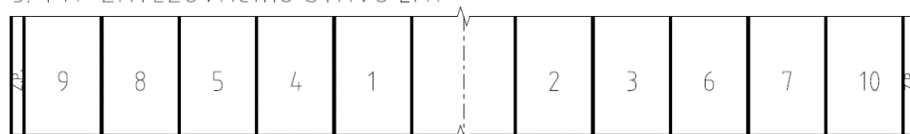
1. TYP ZATĚŽOVACÍHO STAVU LM1



2. TYP ZATĚŽOVACÍHO STAVU LM1



3. TYP ZATĚŽOVACÍHO STAVU LM1



Obr. 4.5.1: Zatížení LM1

4.5.3.1.2 LM2

Zatěžovací model 2 je jedna náprava o síle na jedno kolo 200 kN, nebo ve 3D modelu jako plošné zatížení 952,38 kN/m² na jedno kolo.

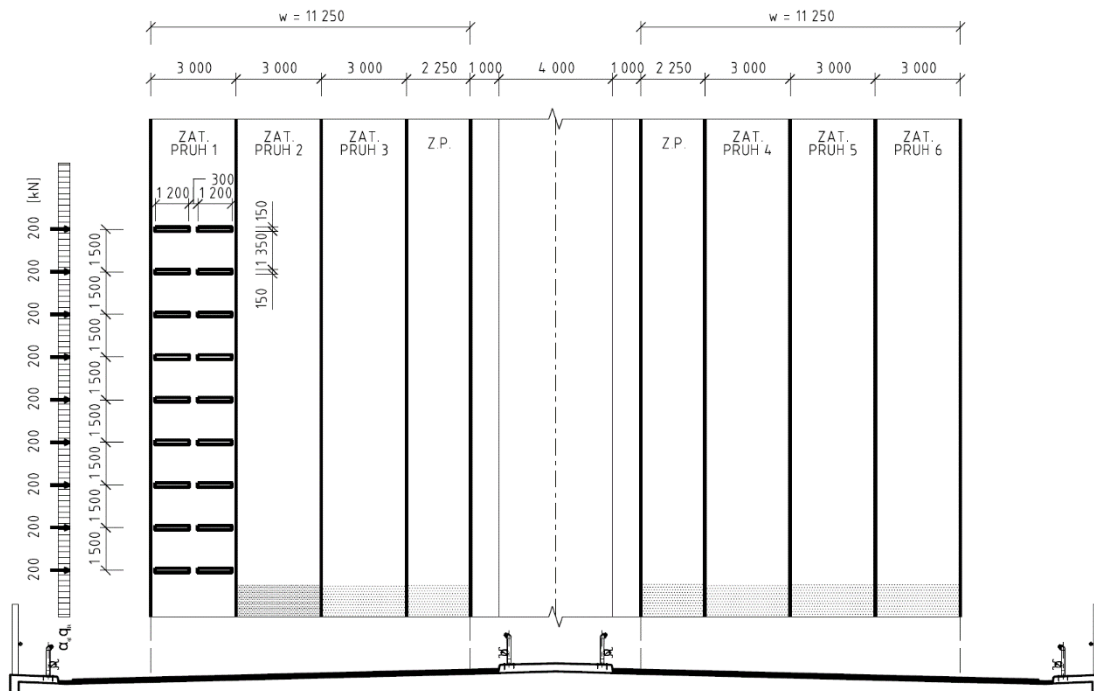
4.5.3.1.3 LM3 – vozidlo 180 t

Pro tento zatěžovací stav se vozovka definuje bez nouzových pruhů, krajnic a vodících proužků. Šířka vozovky je tedy 22,5 m a počet zatěžovacích pruhů je 6. V pruhu číslo 1 se nachází vozidlo 180 t, v ostatních pruzích se uplatní zatížení UDL z LM1, viz Tab. 4.5.5. Hodnoty zatížení od náprav jsou následně přenásobeny dynamickým součinitelem $\varphi = 1,25$.

Tab. 4.5.5: Zatížení LM3 – 180 t

Umístění	TS	Rovnoměrné zat. UDL			Zat. na m'	
	Q_{ik}	q_{ik}	α_{qi}	$\alpha_{qi} q_{ik}$	š.	$\alpha_{qi} q_{ik}'$
	[kN]	[kN/m ²]	-	[kN/m ²]	[m]	[kN/m']
Pruh č. 1: 180 t	9 x 200	-	-	-	-	-
Pruh č. 2: LM1	-	2,5	2,4	6,00	3,0	18,0
Pruh č. 3: LM1	-	2,5	1,2	3,00	3,0	9,0
Ostatní pruhy: LM1	-	2,5	1,2	3,00	9,0	27,0
Zbývající plocha: LM1	-	2,5	1,2	3,00	4,5	13,5

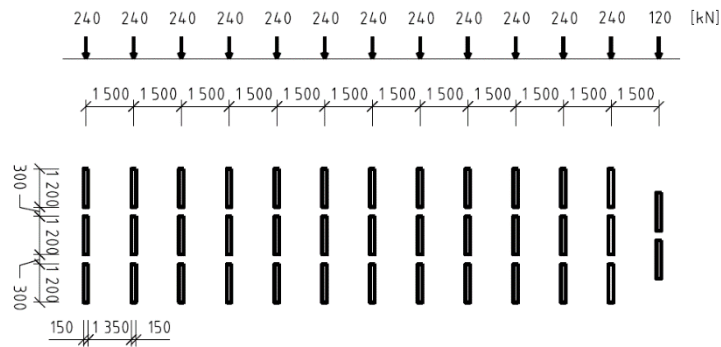
Ve 3D modelu je toto vozidlo modelováno jako plošné zatížení 1111,11 kN/m² na jedno kolo. Model zatížení LM3 s vozidlem 180 t je znázorněn na Obr. 4.5.2.



Obr. 4.5.2: Zatížení LM3 – 180 t

4.5.3.1.4 LM3 – vozidlo 300 t

Tato zatěžovací soustava je na mostě uvažována jako samotná, hodnoty nápravových sil jsou v tomto případě přenásobeny dynamickým součinitelem $\varphi = 1,05$. Zatížení vozidlem 3000 t je zobrazeno na Obr. 4.5.3. Poloha toho vozidla v příčném směru je rozebrána v kapitole 4.13.

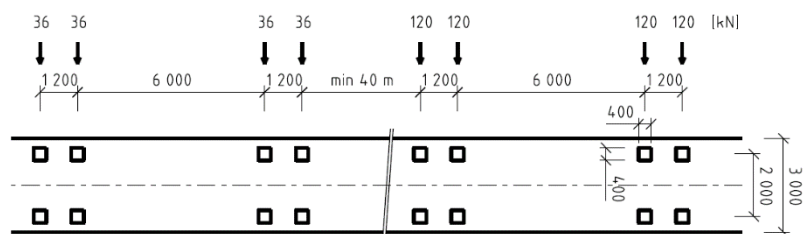


Obr. 4.5.3: Zatížení LM3 – 300 t

Ve 3D modelu je toto vozidlo modelováno jako plošné zatížení $1388,89 \text{ kN/m}^2$, respektive $666,67 \text{ kN/m}^2$ na jedno kolo.

4.5.3.1.5 Zatížení na únavu LM3

Jedná se o vozidlo o čtyřech nápravách, se silou na každou nápravu $120,0 \text{ kN}$. Druhé vozidlo ve stejném zatěžovacím pruhu má stejnou geometrii, ale se silou na nápravu $36,0 \text{ kN}$, viz Obr. 4.5.4. Vzdálenost mezi vozidly je min. $40,0 \text{ m}$.



Obr. 4.5.4: Zatížení na únavu LM3

4.5.3.1.6 Zatížení chodníků

Na chodnících šířky $0,75 \text{ m}$ po stranách konstrukce je uvažováno rovnoměrné spojitě zatížení $q_{fk} = 5 \text{ kN/m}^2$. Kombinační hodnota pro sestavu zatížení gr1a je 3 kN/m^2 .

4.5.3.1.7 Zatížení davem lidí LM4

Toto rovnoměrné zatížení rovno 5 kN/m^2 je umístěno na vozovce a chodnících. Dynamické účinky jsou v uvedené hodnotě již zahrnuty.

4.5.3.2 Zatížení teplotními změnami

Pro danou oblast je roční maximum vzduchu ve stínu $T_{\max} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ a minimum $T_{\min} = -32 \text{ }^\circ\text{C}$. Maximální a minimální složka rovnoměrné teploty konstrukce a pak rovnoměrné oteplení a ochlazení jsou spočteny dle následujících vzorců. Základní teplota T_0 je $+10 \text{ }^\circ\text{C}$.

$$T_{e,max} = 40 + 1,5 = 41,5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Rov. 5})$$

$$T_{e,min} = -32 + 8 = -24 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Rov. 6})$$

$$\Delta T_{N,exp} = 41,5 - 10 = 31,5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Rov. 7})$$

$$\Delta T_{N,con} = -24 - 10 = -34 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Rov. 8})$$

Konstrukce je vystavena i nerovnoměrnému ochlazení a oteplení mostovky dle vzorců dole.

$$\Delta T_{M,heat}^h = 10 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Rov. 9})$$

$$\Delta T_{M,heat}^d = 0 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Rov. 10})$$

$$\Delta T_{M,cool}^h = -5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Rov. 11})$$

$$\Delta T_{M,cool}^d = 0 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Rov. 12})$$

Vliv mostního svršku je zahrnut součinitelem k_{sur} pro oteplení mostovky $k_{sur} = 0,56$ a pro ochlazení mostovky $k_{sur} = 1,0$.

U pylonů je uvažován rozdíl teplot v příčném a podélném 5 °C. Dále je počítáno s rozdílem teplot jednotlivých částí konstrukce vůči zbývajícím částem:

- rozdíl teplot pro pylony 15 °C
- rozdíl teplot pro mostovku 15 °C
- rozdíl teplot pro závěsy (světlá barva) 10 °C

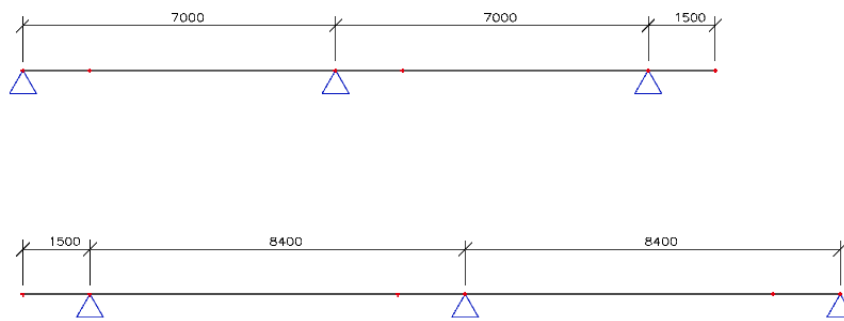
4.5.4 Zatížení větrem

Současné působení zatížení větrem a teplotou se v tomto předběžném návrhu neuvažuje.

4.5.5 Zatížení během výstavby

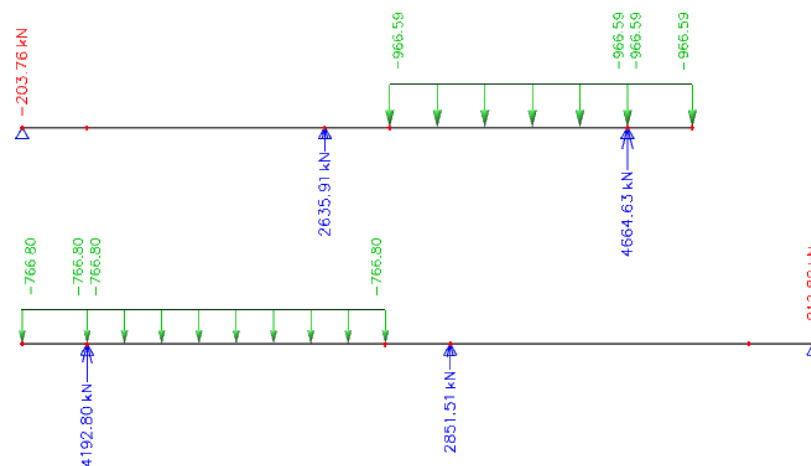
4.5.5.1 *Stálá zatížení během výstavby*

Vlastní tíha je do modelu zadávána ručně jako spojité zatížení dle Tab. 4.5.1. Jako stálé zatížení je také v daných fázích zadáno zatížení od betonážního vozíku, který na konstrukci působí vlastní tíhou a také tíhou nově betonované lamely, kterou vozík přenáší do předchozí lamely a do závěsů. Pro čerstvý beton je uvažována objemová tíha 27 kN/m³. Zatížení vozíkem je vypočteno na samostatném zjednodušeném modelu, kdy betonážní vozík se předpokládá podepřen na již zhotovených lamelách v místech dvou předchozích závěsů a také zavěšen na závěsu pro lamelu právě betonovanou, toto je modelováno jako kloubové podepření, viz Obr. 4.5.5.



Obr. 4.5.5: Modely betonážního vozíku

Konstrukce je pak zatížena reakcemi z tohoto modelu. V Obr. 4.5.6 jsou zobrazeny vypočtené reakce (tíha vozíku + tíha lamely), nahoře od vozíku pro střední pole, dole od vozíku pro krajní pole.



Obr. 4.5.6: Reakce od vozíku a betonované lamely

Během výstavby jsou také rektifikovány závěsy, tak aby bylo zmenšováno namáhání konstrukce ve všech fázích výstavby. Hodnoty zkrácení závěsů jsou v Tab. 4.5.6. Po dokončení konstrukce jsou závěsy dopnuty na finální hodnoty uvedené v Tab. 4.5.3. Napínání závěsů je tedy rozděleno na dvě fáze – první během výstavby postupným vyvážováním a druhá po dokončení stavby, kdy se všechny závěsy dopnou.

Tab. 4.5.6: Rektifikace závěsů během výstavby (1. fáze)

Závěs	σ_{nap}	ΔL	Závěs	σ_{nap}	ΔL
	[MPa]	[mm]		[MPa]	[mm]
Z1	500	-113	Z16	300	-52
Z2	300	-266	Z17	300	-62
Z3	300	-249	Z18	300	-72
Z4	300	-233	Z19	300	-82
Z5	300	-217	Z20	300	-93
Z6	300	-201	Z21	400	-139
Z7	300	-185	Z22	400	-153
Z8	400	-68	Z23	400	-168
Z9	400	-62	Z24	400	-183
Z10	150	-55	Z25	400	-198
Z11	150	-98	Z26	400	-213
Z12	200	-85	Z27	400	-228
Z13	200	-74	Z28	400	-243
Z14	150	-62	Z29	400	-258
Z15	150	-26	Z30	400	-273

4.5.5.2 Proměnná zatížení během výstavby

Staveništní zatížení je uvažováno jako rovnoměrné zatížení o hodnotě 1 kN/m².

Dále jako proměnné zatížení je během výstavby přidáno zatížení teplotou, hodnoty jsou zadány s poloviční hodnotou oproti těm na dokončené konstrukci vypsané v kapitole 4.5.3.2 (v kvazi-stálé kombinaci). Ve stádiích výstavby se ještě na mostovce nenachází mostní svršek a jsou proto upraveny hodnoty součinitele k_{sur} , a to pro oteplení mostovky je $k_{\text{sur}} = 0,8$ a pro ochlazení $k_{\text{sur}} = 1,1$.

4.5.6 Kombinace zatížení

Kombinace zatížení jsou sestaveny dle [3]. Pro mezní stavy únosnosti je použita účinnější kombinace dle vzorce 6.10a a 6.10b.

Kombinace dle vzorce 6.10a (Rov. 13):

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

Kombinace dle vzorce 6.10b (Rov. 14):

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

Dále pro mezní stavy použitelnosti jsou sestaveny kombinace dle následujících vzorců.

Charakteristická kombinace (Rov. 15):

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

Častá kombinace (Rov. 16):

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P_k + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

Kvazistálá kombinace (Rov. 17):

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P_k + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

Hodnoty dílčích součinitelů pro kombinace jsou shrnuty v Tab. 4.5.7.

Tab. 4.5.7: Dílčí součinitelé

Dílčí součinitelé		Nepříznivé účinky	Příznivé účinky
Stálá zatížení	γ_G	1,35	1,00
Nerovnoměrné poklesy	$\gamma_{G,set}$	1,20	0,00
Zatížení dopravou	γ_Q	1,35	0,00
Ostatní prom. zatížení	γ_Q	1,50	0,00
Redukční souč.	ξ	0,85	

Kombinační součinitelé ψ dle [3] v programu SCIA Engineer jsou v Obr. 4.5.7. V tomto programu jsou také zatížení kombinována. Hlavní důvod k tomuto kroku je velký počet zatěžovacích stavů a počet z nich možných kombinací.

Zatížení	Psi0	Psi1	Psi2
1 Doprava - gr1a - TS	0.75	0.75	0
2 Doprava - gr1a - UDL	0.4	0.4	0
3 Doprava - gr1a - chodci + pruh pro cyklisty	0.4	0.4	0
4 Doprava - gr1b - jednonápravová	0	0.75	0
5 Doprava - gr2 - vodorovné síly	0	0	0
6 Doprava - gr3 - zatížení od chodců	0	0.4	0
7 Doprava - gr4 - zatížení od davu	0	0	0
8 Doprava - gr5 - speciální vozidla	0	0	0
9 Zatížení větrem - FWk - stálé	0.6	0.2	0
10 Zatížení větrem - FWk - provádění	0.8	0	0
11 Zatížení větrem - F*W - návrhové	1	0	0
12 Teplotní zatížení - Tk	0.6	0.6	0.5
13 Zatížení sněhem - QSn,k - provádění	0.8	0	0
14 Zatížení od výstavby - Qc	1	0	1

Obr. 4.5.7: Kombinační součinitelé

4.6 Návrh závěsů

Závěsy jsou navrženy dle předpokladu, podle kterého se mají chovat pod stálým zatížením jako podpory spojitě mostovky. V prutovém modelu konstrukce jsou tedy závěsy v místech jejich připojení k mostovce v prvním kroku nahrazeny kloubovou podporou. Zatížení je v tuto chvíli bráno jako dvojnásobek vlastní tíhy, čímž je přibližně započítán vliv proměnného zatížení a rektifikace závěsů. Z tohoto modelu jsou následně vzaty reakce R_z , které jsou přepočteny na sílu v závěsech N_z dle vzorce níže.

$$N_z = \frac{R_z}{2 \sin \alpha} \quad (\text{Rov. 18})$$

Kde $\sin \alpha$ je sklon závěsu, a dělením dvěma se dostane síla v jednom závěsu.

Samotný návrh závěsů je proveden z podmínky omezení napětí v závěsech na $0,45 f_{pk}$. Požadovaná plocha závěsu je spočtena dle vzorce níže.

$$A_{z,req} = \frac{N_z}{0,45 f_{pk}} \quad (\text{Rov. 19})$$

Z této požadované plochy je pak nakonec vypočten počet lan v závěsu n_{req} , při ploše jednoho lana 150 mm^2 .

Výsledky výpočtu a návrh je v Tab. 4.6.1.

Při návrhu je dbán ohled na sjednocení počtu lan v závěsech, použity jsou tak celkem 4 druhy závěsů podle počtu lan – 37, 55, 73 a 91.

Tab. 4.6.1: Návrh závěsů

Závěs (dvojice)	R_z	α	N_z	$A_{z,req}$	n_{req}	n_{prov}	$A_{z,prov}$
	[kN]	[°]	[kN]	[mm ²]	[ks]	[ks]	[mm ²]
Z1	3 594,5	24,9	4 272,99	5 105	34	37	5 550
Z2	5 336,6	25,4	6 223,97	7 436	50	73	10 950
Z3	5 211,8	26,0	5 951,65	7 111	47	73	10 950
Z4	5 187,0	26,6	5 786,66	6 914	46	73	10 950
Z5	5 179,6	27,4	5 629,96	6 726	45	73	10 950
Z6	5 165,0	28,3	5 452,53	6 514	43	73	10 950
Z7	5 094,1	29,3	5 203,42	6 217	41	73	10 950
Z8	8 204,9	30,5	8 072,94	9 645	64	73	10 950
Z9	8 131,0	32,0	7 664,26	9 157	61	73	10 950
Z10	5 097,4	33,9	4 572,51	5 463	36	73	10 950
Z11	5 145,3	36,2	4 356,55	5 205	35	73	10 950
Z12	5 071,4	39,2	4 012,59	4 794	32	73	10 950
Z13	4 628,5	43,2	3 380,95	4 039	27	73	10 950
Z14	2 336,4	48,7	1 553,99	4 318	29	73	10 950
Z15	18 406,3	56,7	11 006,40	13 150	88	91	13 650
Z16	18 607,7	58,8	10 879,07	12 998	87	91	13 650
Z17	1 395,0	51,8	886,99	2 464	16	55	8 250
Z18	3 531,2	46,8	2 420,67	2 892	19	55	8 250
Z19	4 106,3	43,1	3 005,26	3 591	24	55	8 250
Z20	4 261,1	40,2	3 299,69	3 942	26	55	8 250
Z21	4 302,8	37,9	3 498,53	4 180	28	55	8 250
Z22	4 314,0	36,1	3 659,44	4 372	29	55	8 250
Z23	4 317,1	34,6	3 800,12	4 540	30	55	8 250
Z24	4 317,9	33,4	3 926,70	4 691	31	55	8 250
Z25	4 318,2	32,3	4 041,89	4 829	32	55	8 250
Z26	4 318,5	31,4	4 147,42	4 955	33	55	8 250
Z27	4 319,4	30,6	4 244,97	5 072	34	55	8 250
Z28	4 322,7	29,9	4 337,32	5 182	35	55	8 250
Z29	4 335,0	29,3	4 432,18	5 295	35	55	8 250
Z30	3 986,7	28,7	4 146,29	4 954	33	55	8 250

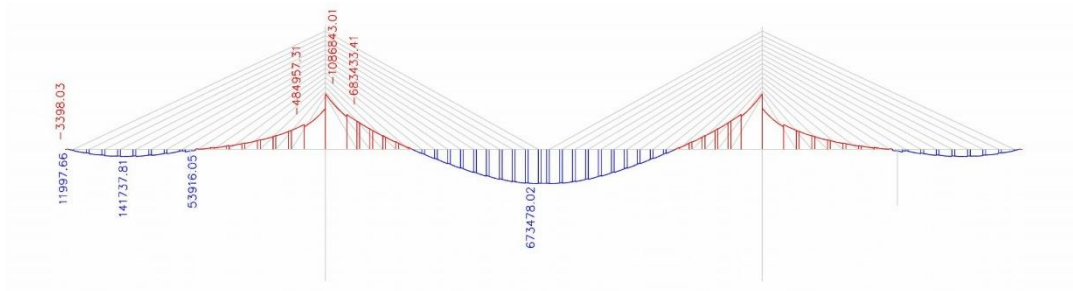
4.7 Výsledky z 2D modelu

V této kapitole jsou zobrazeny vnitřní síly na finální model mostu od jednotlivých zatěžovacích stavů a kombinace zatížení s rektifikací závěsů. Ohybové momenty M_y jsou vždy uvedeny v kNm , normálová síla N v kN a posouvající síla V_z v kN . Výsledky z modelu s časově závislou analýzou jsou uvedeny v samostatné kapitole 4.10. Dále je v této kapitole rozebrán vliv stálých a proměnných zatížení na chování závěsů, respektive jejich tuhost (viz 4.7.4).

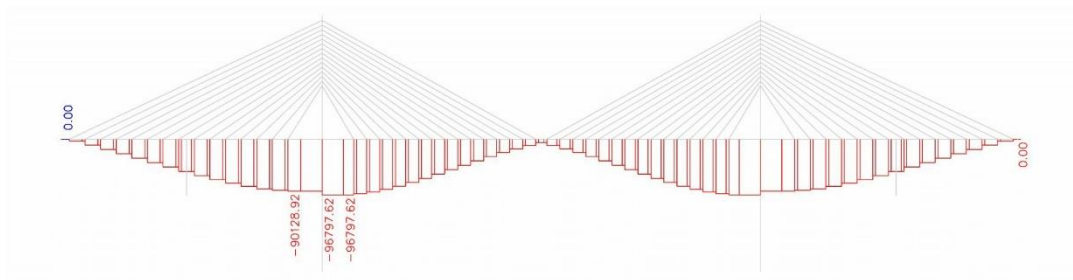
4.7.1 Vnitřní síly od jednotlivých zatížení

4.7.1.1 Vnitřní síly od stálých zatížení

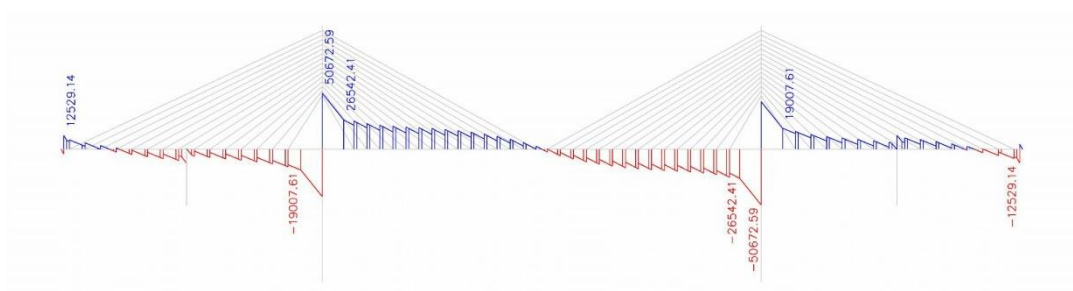
4.7.1.1.1 Vlastní tíha nosné konstrukce



Obr. 4.7.1: M_y – vlastní tíha

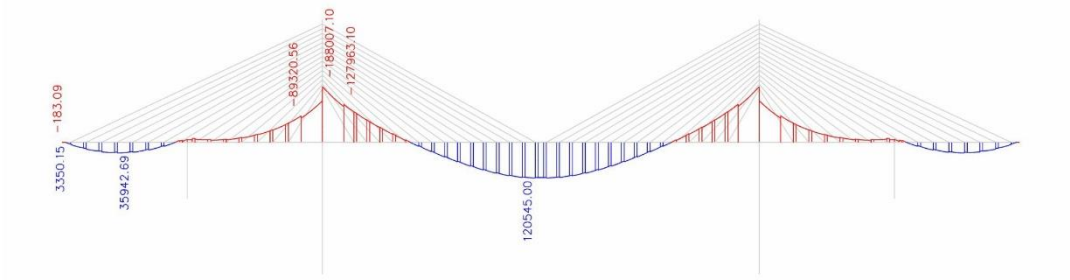


Obr. 4.7.2: N – vlastní tíha

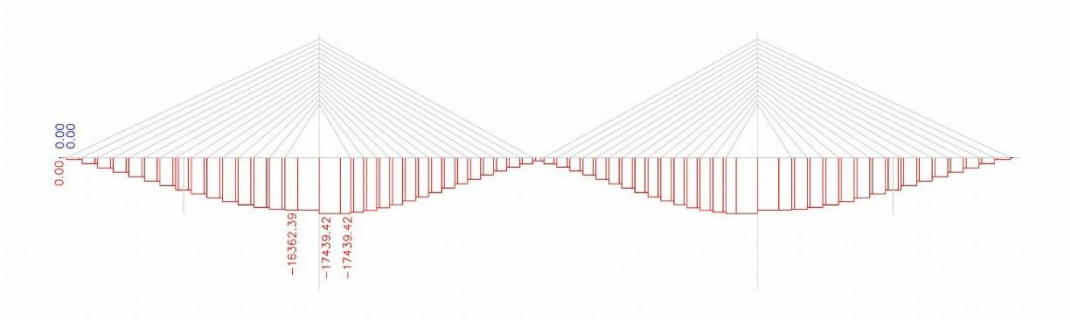


Obr. 4.7.3: V_z – vlastní tíha

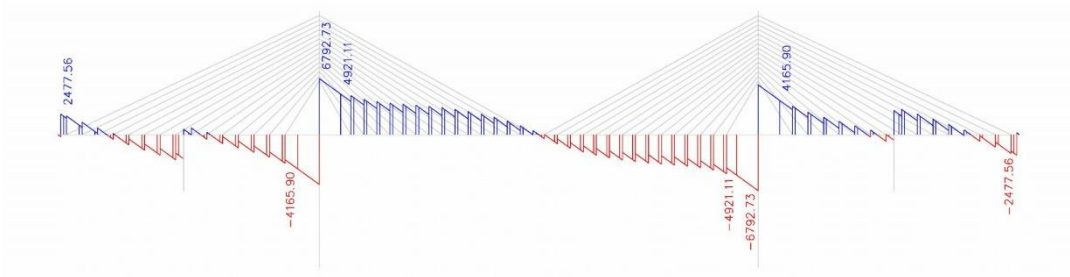
4.7.1.1.2 Ostatní stálé zatížení



Obr. 4.7.4: My – ostatní stálé zat.



Obr. 4.7.5: N – ostatní stálé zat.

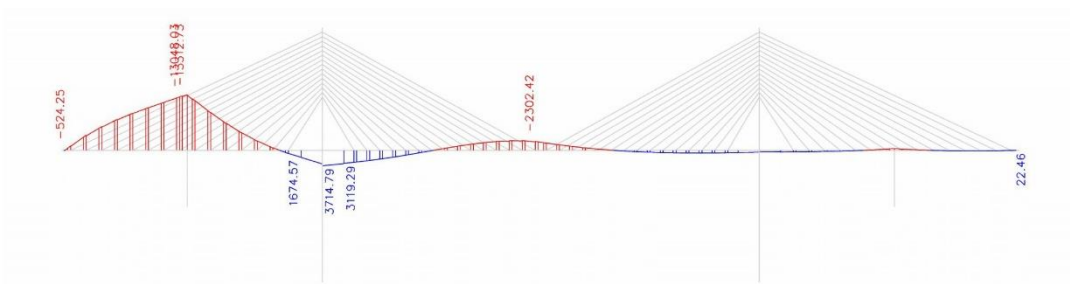


Obr. 4.7.6: Vz – ostatní stálé zat.

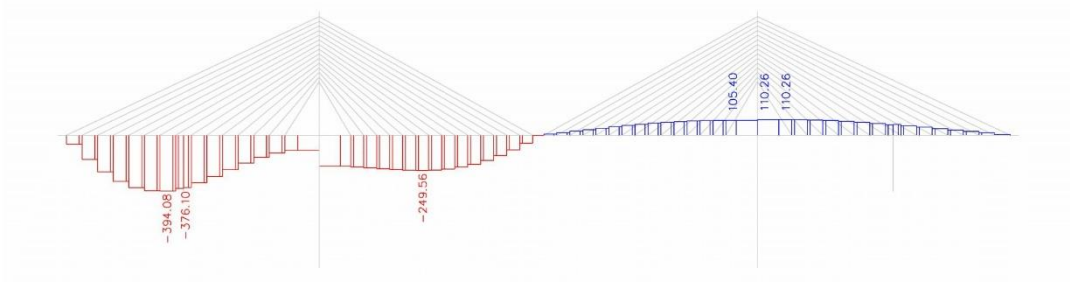
4.7.1.1.3 Poklesy podpor

Uvedeny jsou vnitřní síly od poklesu O1, P2 a P3. Vnitřní síly od poklesů dalších podpor P4, P5 a O6 jsou symetrické (M_y , N) a antisymetrické (V_z).

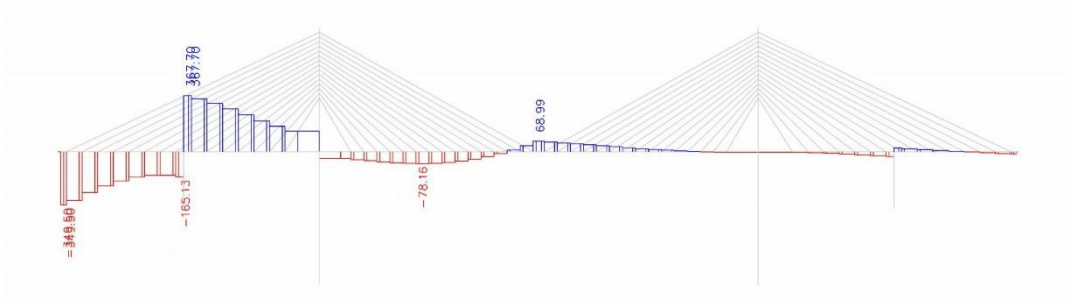
- Pokles O1:



Obr. 4.7.7: My – pokles O1

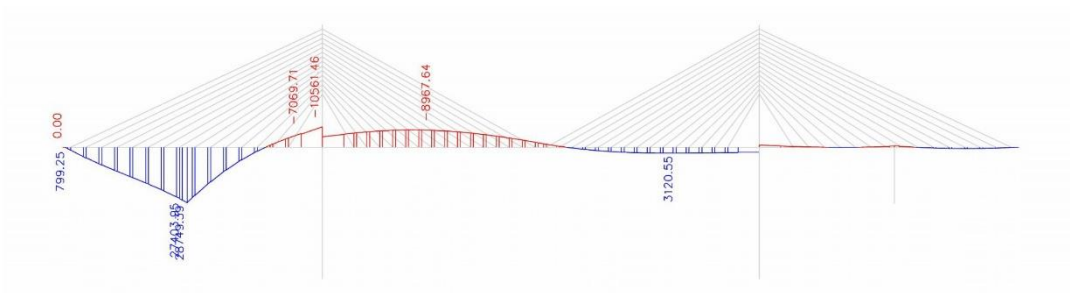


Obr. 4.7.8: N – pokles O1

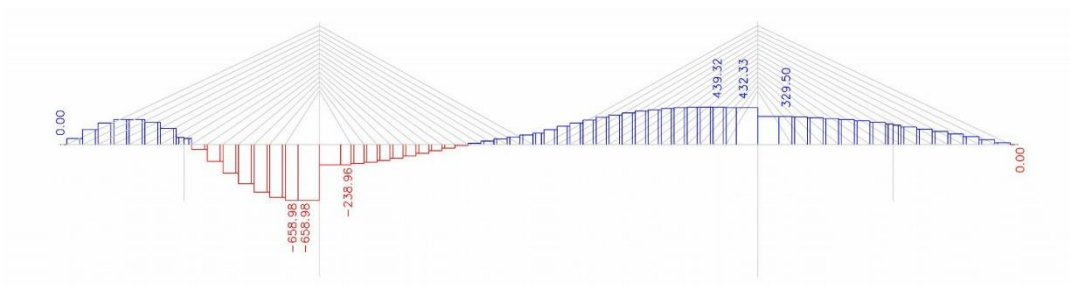


Obr. 4.7.9: Vz – pokles O1

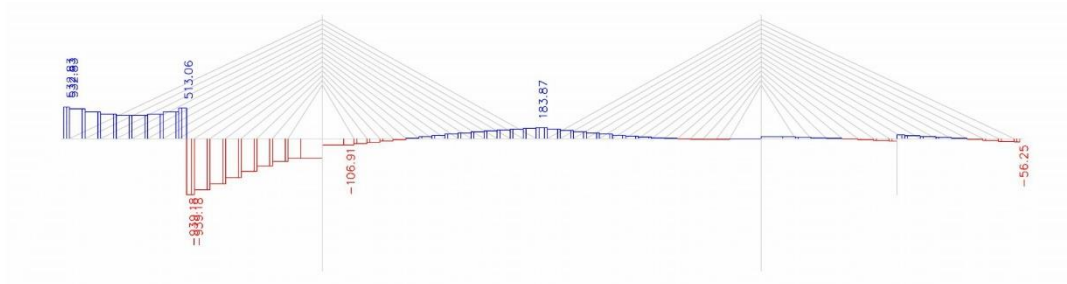
- Pokles P2:



Obr. 4.7.10: My – pokles P2

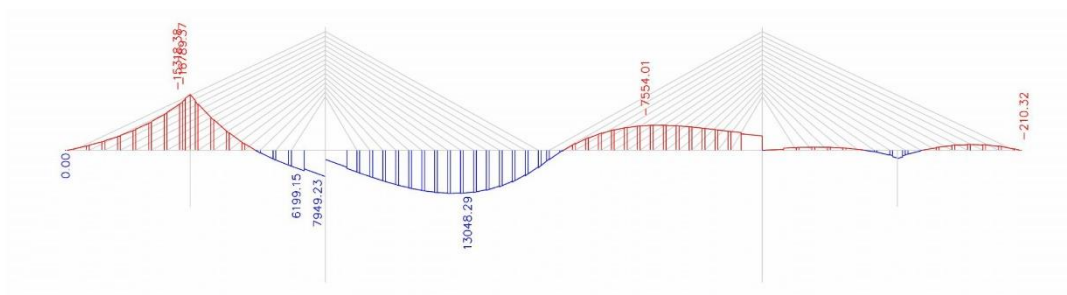


Obr. 4.7.11: N – pokles P2

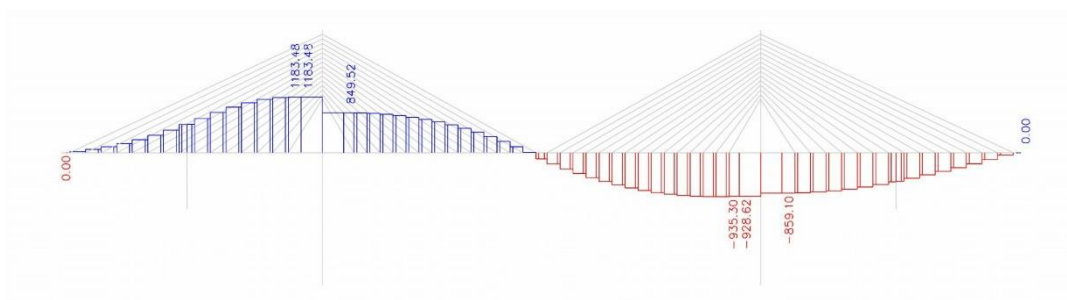


Obr. 4.7.12: Vz – pokles P2

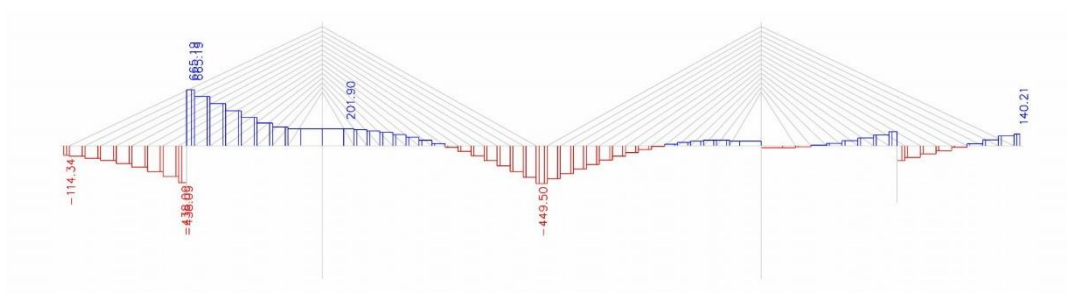
- Pokles P3:



Obr. 4.7.13: My – pokles P3

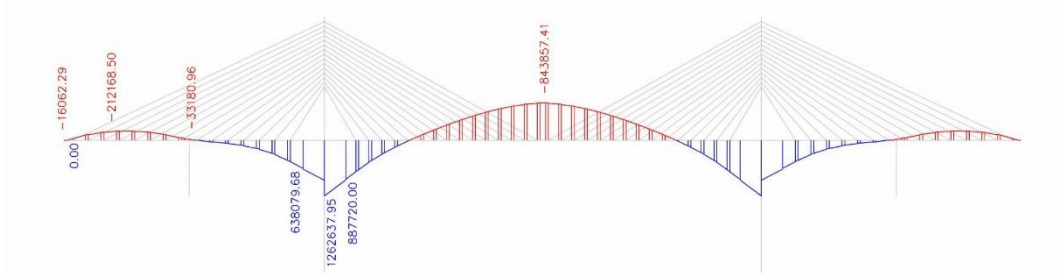


Obr. 4.7.14: N – pokles P3

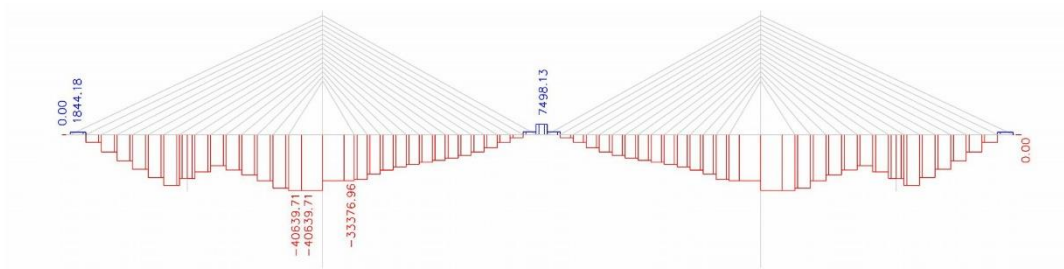


Obr. 4.7.15: Vz – pokles P3

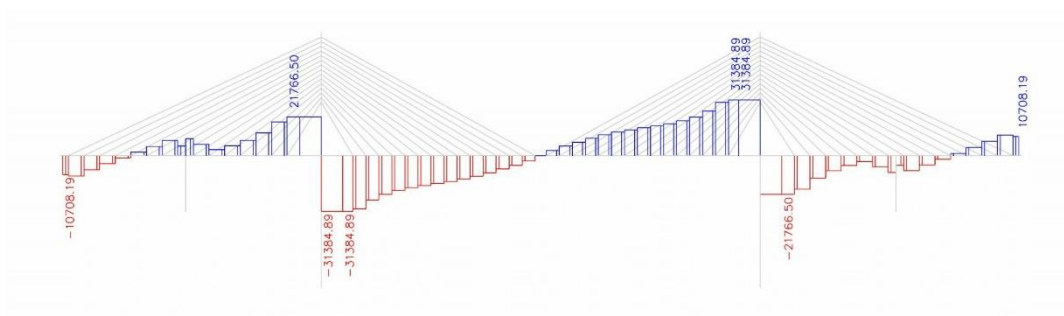
4.7.1.1.4 Rektifikace závěsů



Obr. 4.7.16: My – rektifikace závěsů



Obr. 4.7.17: N – rektifikace závěsů

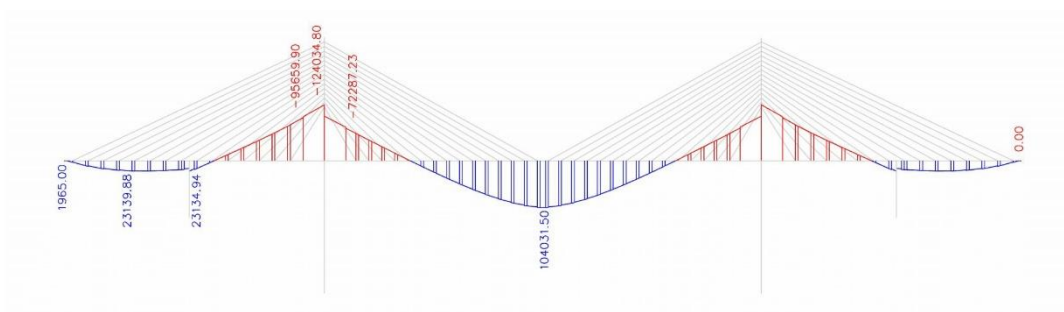


Obr. 4.7.18: Vz – rektifikace závěsů

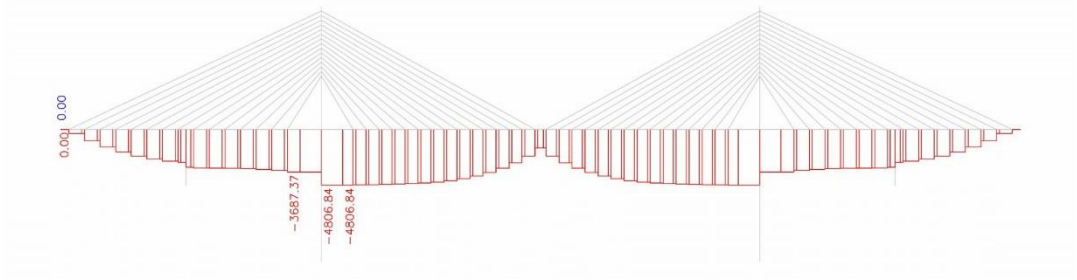
4.7.1.2 Vnitřní síly od proměnných zatížení

4.7.1.2.1 Teplotní zatížení

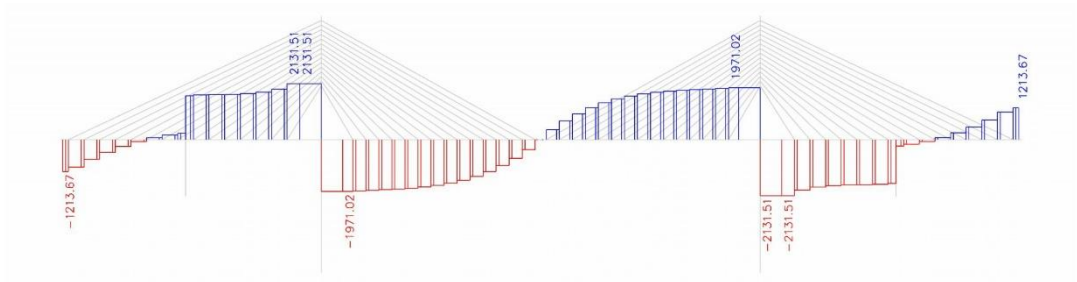
- Rovnoměrné oteplení mostovky:



Obr. 4.7.19: My – rovn. oteplení mostovky

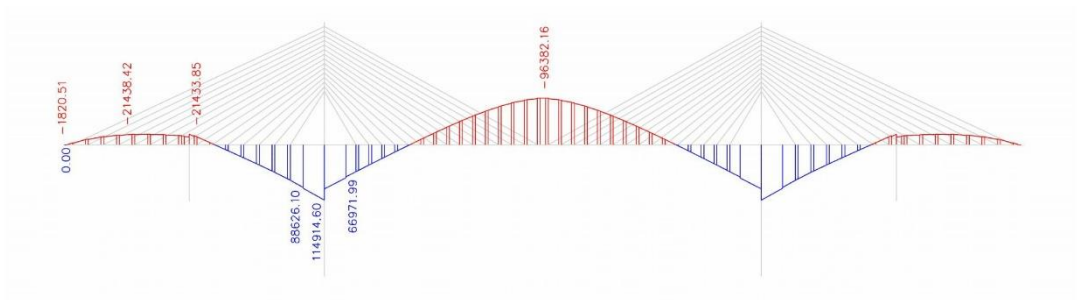


Obr. 4.7.20: N – rovn. oteplení mostovky

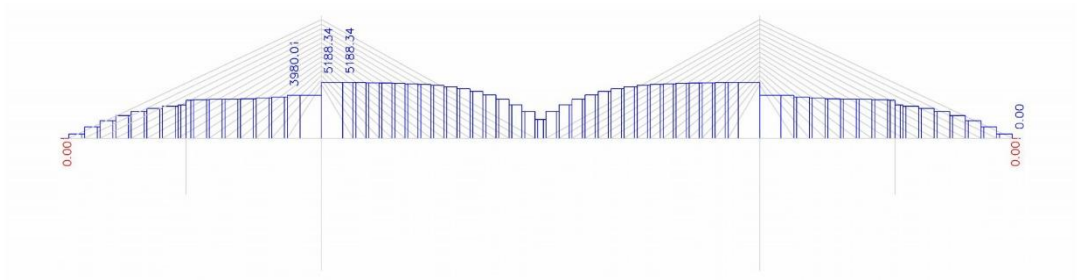


Obr. 4.7.21: Vz – rovn. oteplení mostovky

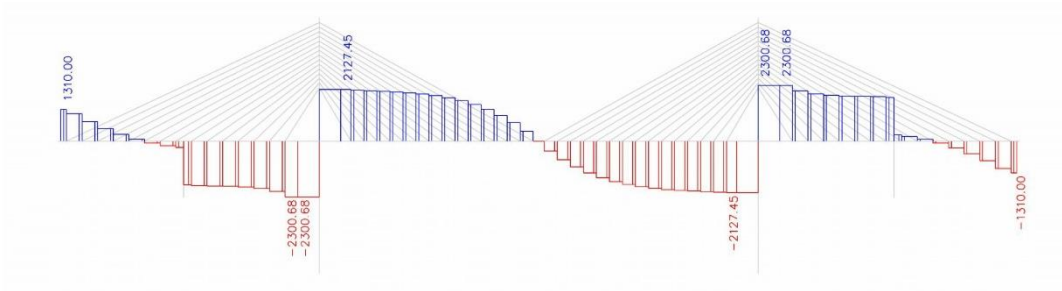
- Rovnoměrné ochlazení mostovky:



Obr. 4.7.22: My – rovn. ochlazení mostovky

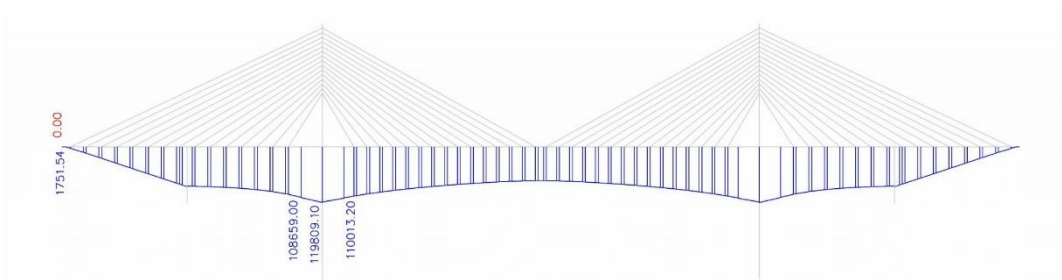


Obr. 4.7.23: N – rovn. ochlazení mostovky

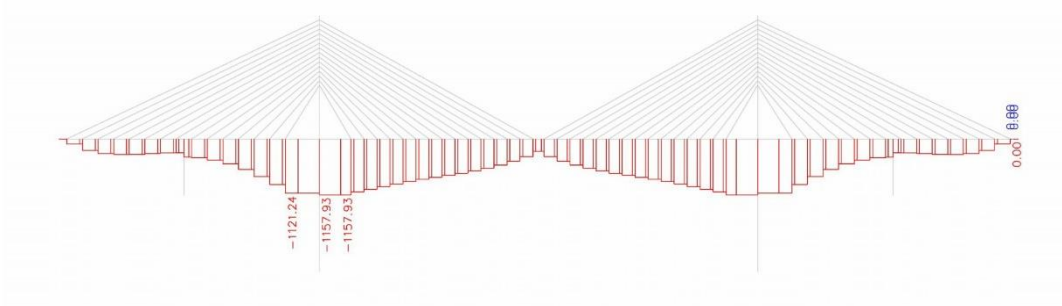


Obr. 4.7.24: Vz – rovn. ochlazení mostovky

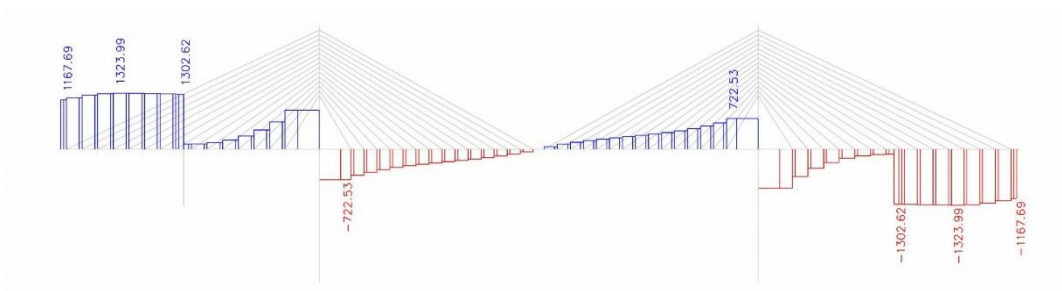
- Nerovnoměrné oteplení mostovky:



Obr. 4.7.25: My – nerovn. oteplení mostovky

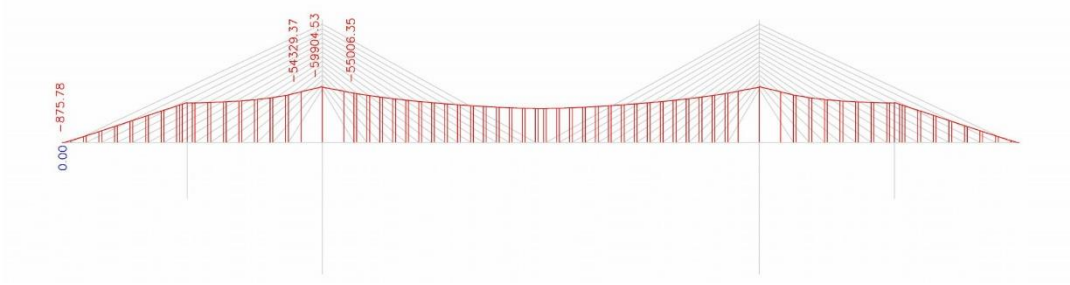


Obr. 4.7.26: N – nerovn. oteplení mostovky

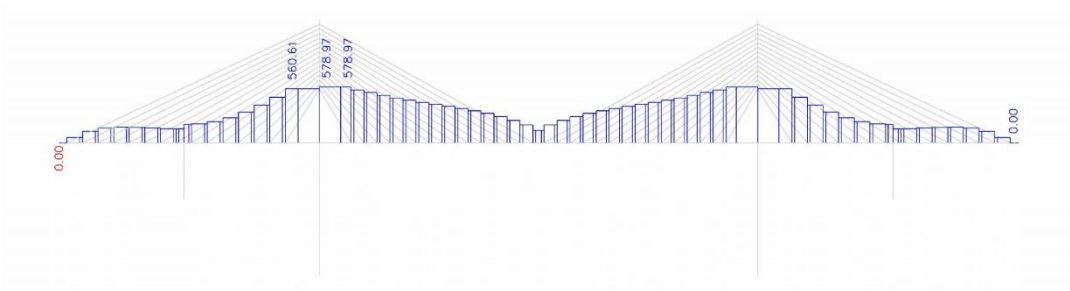


Obr. 4.7.27: Vz – nerovn. oteplení mostovky

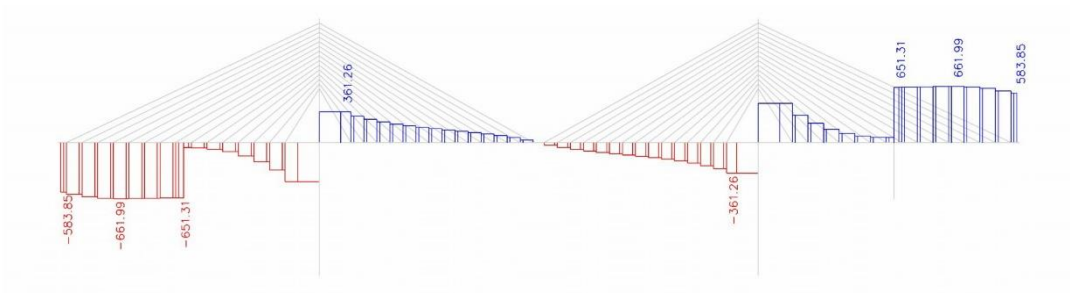
- Nerovnoměrné ochlazení mostovky:



Obr. 4.7.28: My – nerovn. ochlazení mostovky

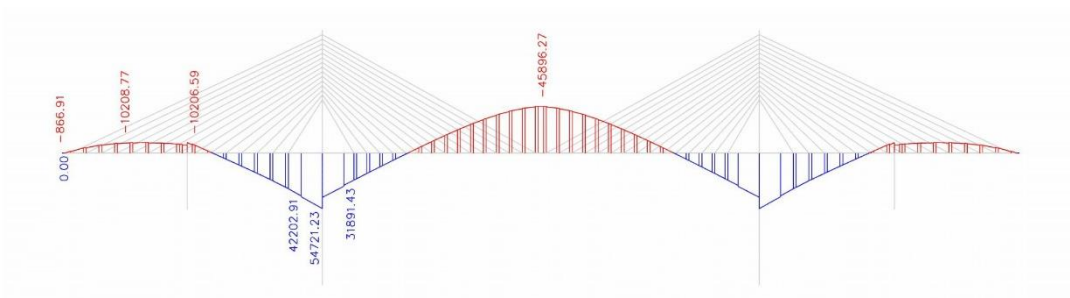


Obr. 4.7.29: N – nerovn. ochlazení mostovky

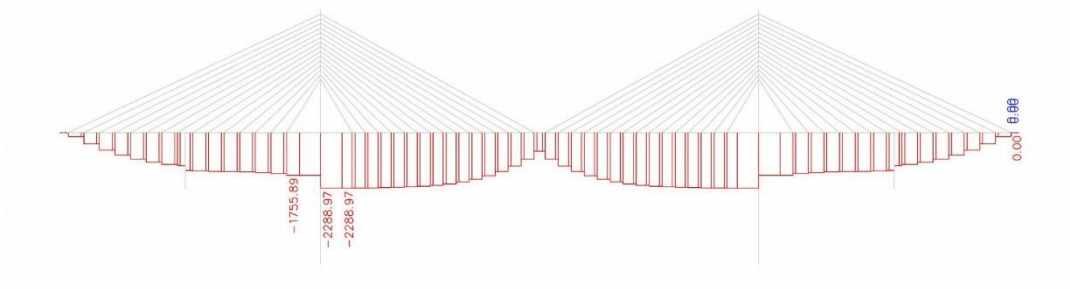


Obr. 4.7.30: Vz – nerovn. ochlazení mostovky

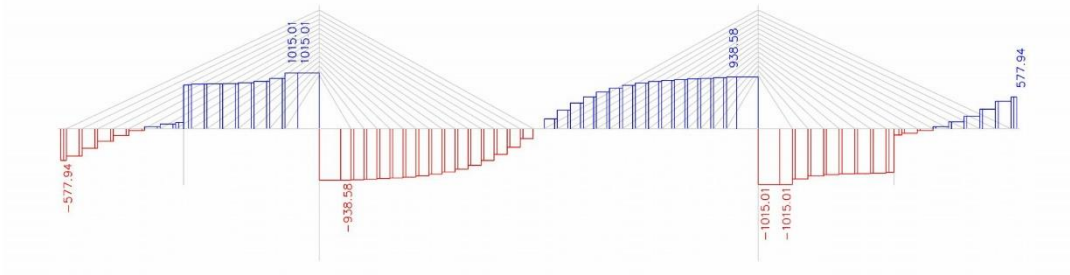
- Rozdíl teplot – mostovka:



Obr. 4.7.31: My – rozdíl teplot – mostovka

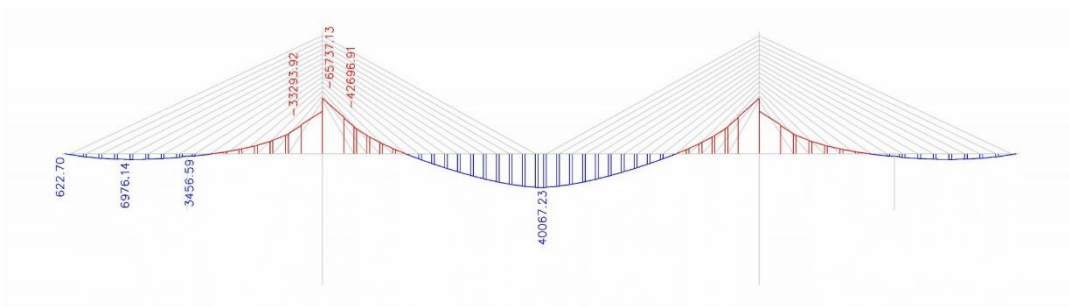


Obr. 4.7.32: N – rozdíl teplot – mostovka

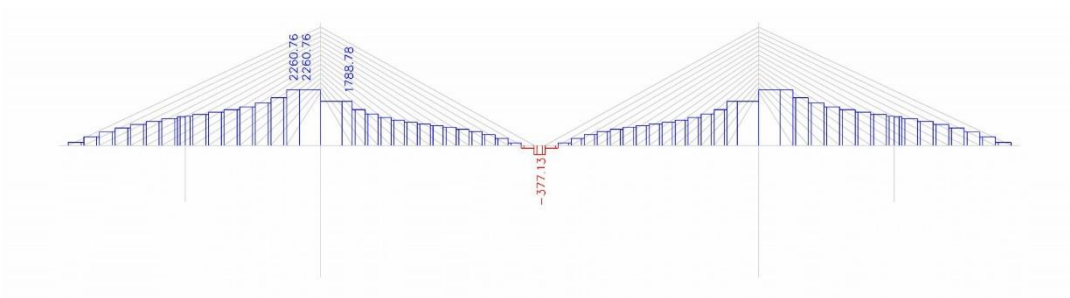


Obr. 4.7.33: Vz – rozdíl teplot – mostovka

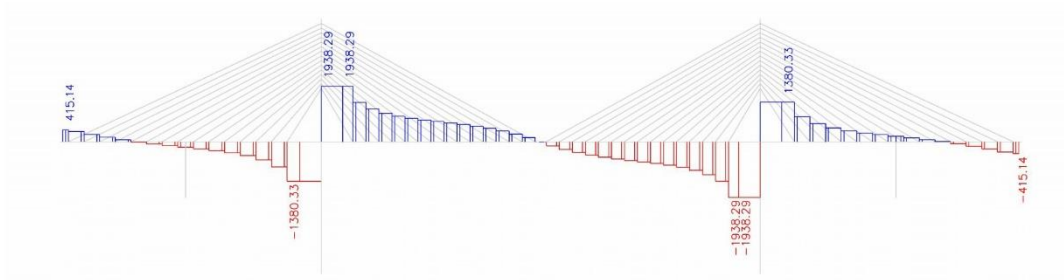
- Rozdíl teplot – závěsy (oteplení):



Obr. 4.7.34: My – rozdíl teplot – závěsy

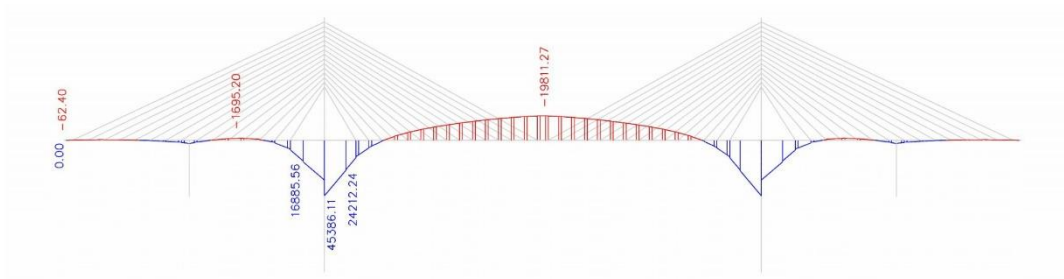


Obr. 4.7.35: N – rozdíl teplot – závěsy

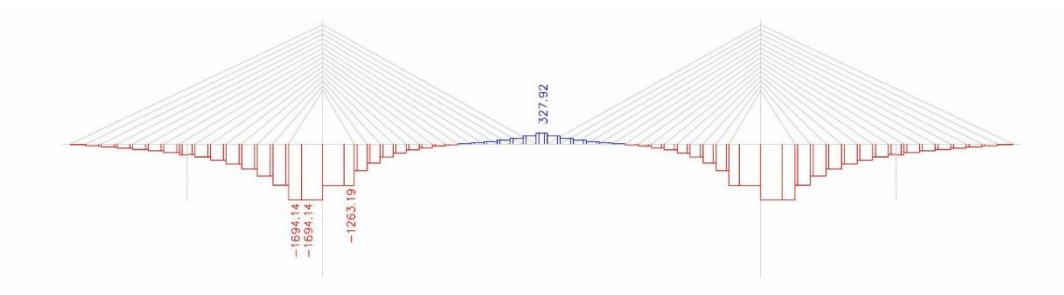


Obr. 4.7.36: Vz – rozdíl teplot – závěsy

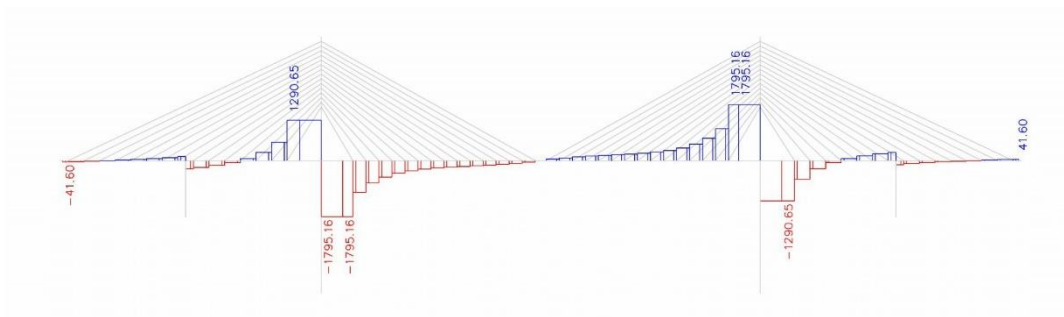
- Rozdíl teplot – pylony (oteplení):



Obr. 4.7.37: My – rozdíl teplot – pylony

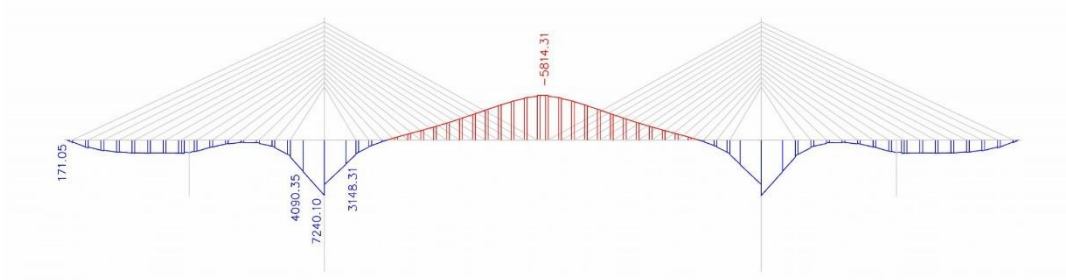


Obr. 4.7.38: N – rozdíl teplot – pylony

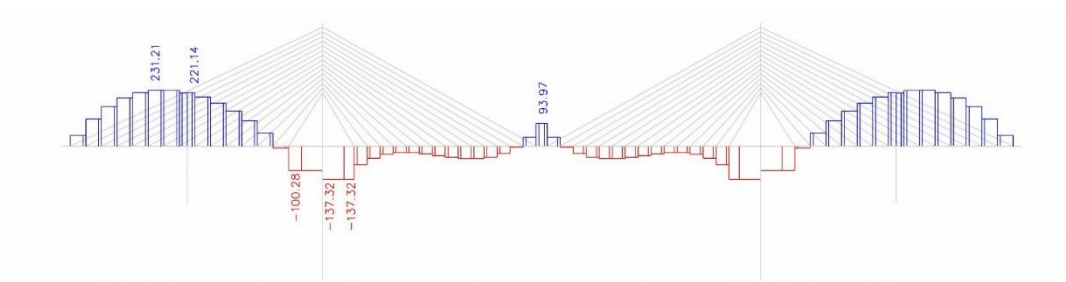


Obr. 4.7.39: Vz – rozdíl teplot – pylony

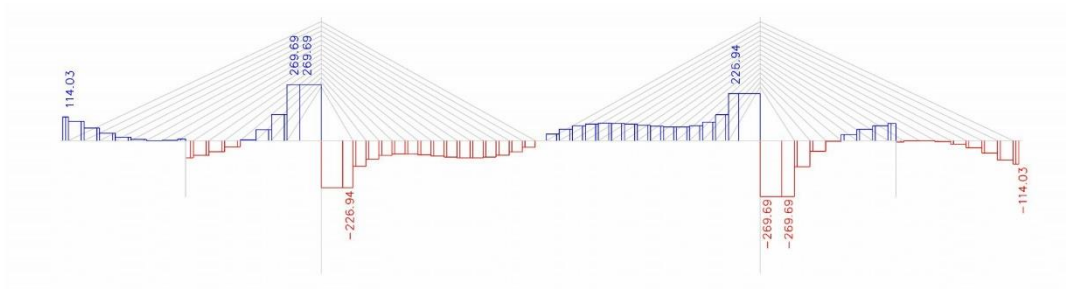
- Rozdíl teplot pro pylon – příčně (změna teploty o 5°C v příčném směru):



Obr. 4.7.40: My – rozdíl teplot pro pylon – příčně

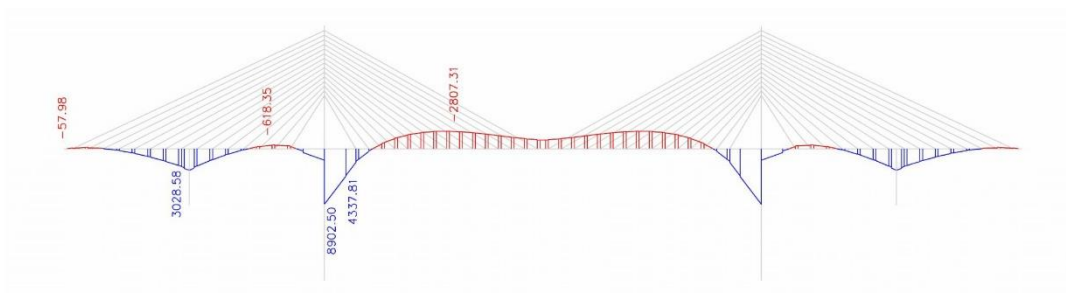


Obr. 4.7.41: N – rozdíl teplot pro pylon – příčně

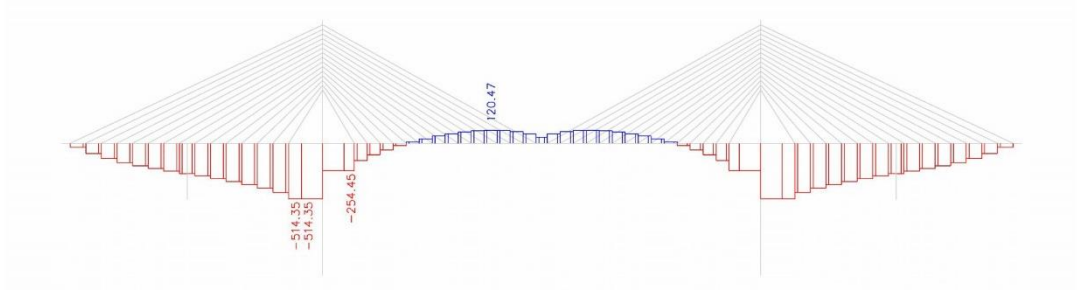


Obr. 4.7.42: Vz – rozdíl teplot pro pylon – příčně

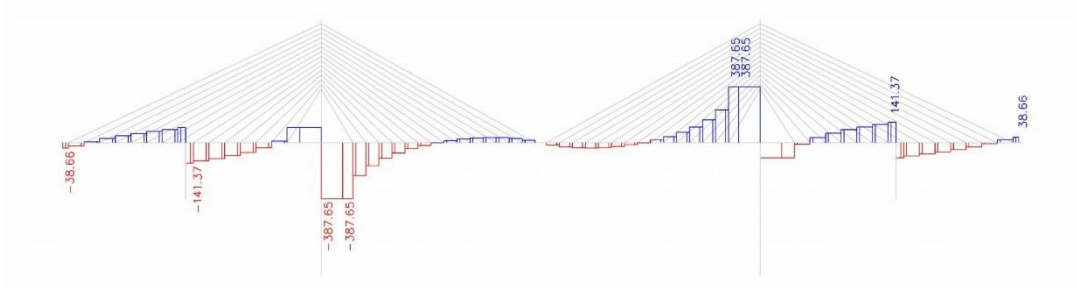
- Rozdíl teplot pro pylon – podélně (změna teploty o 5°C v podélném směru):



Obr. 4.7.43: My – rozdíl teplot pro pylon – podélně

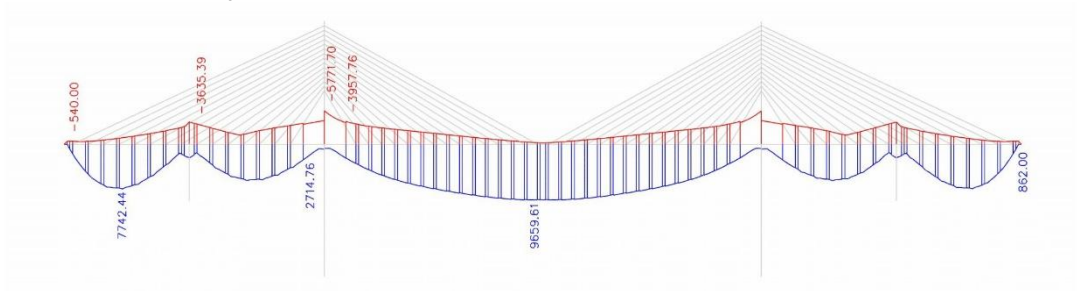


Obr. 4.7.44: N – rozdíl teplot pro pylon – podélně

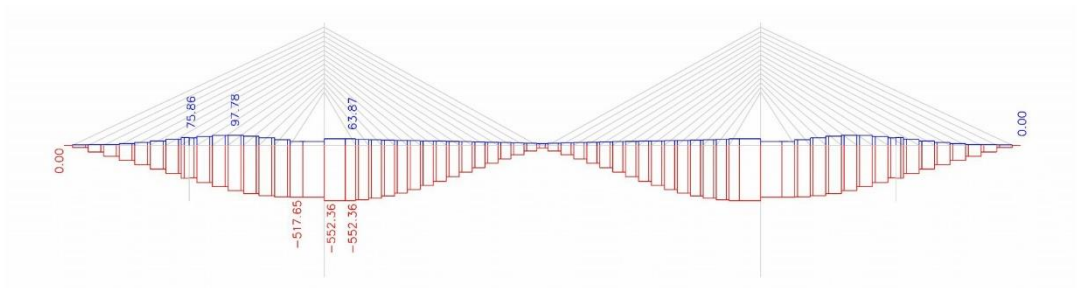


Obr. 4.7.45: Vz – rozdíl teplot pro pylon – podélně

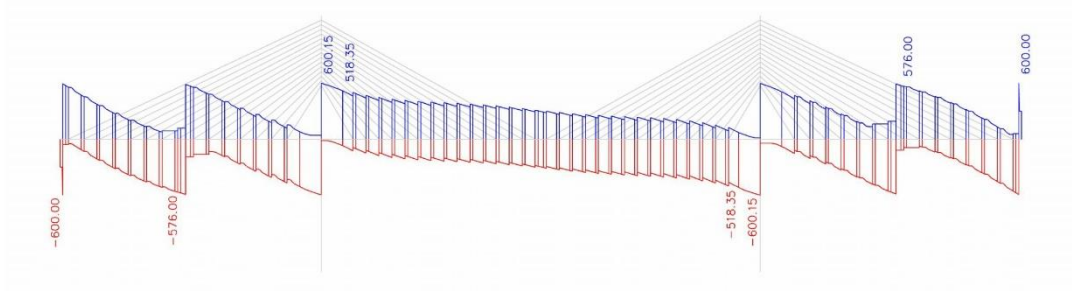
4.7.1.2.2 LM1 Dvojnáprava



Obr. 4.7.46: My – LM1 TS

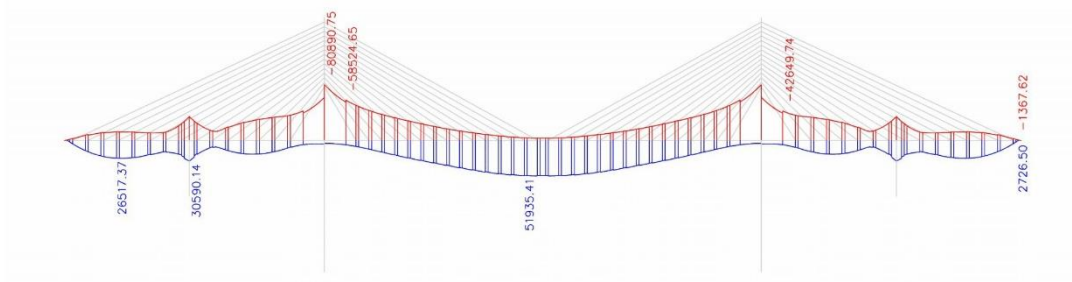


Obr. 4.7.47: N – LM1 TS

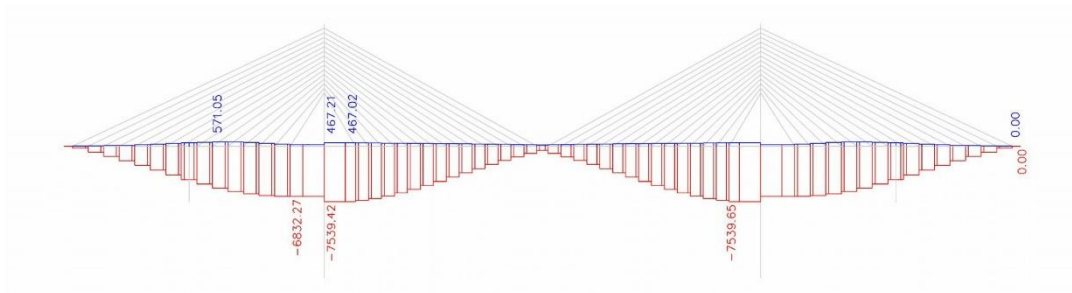


Obr. 4.7.48: Vz – LM1 TS

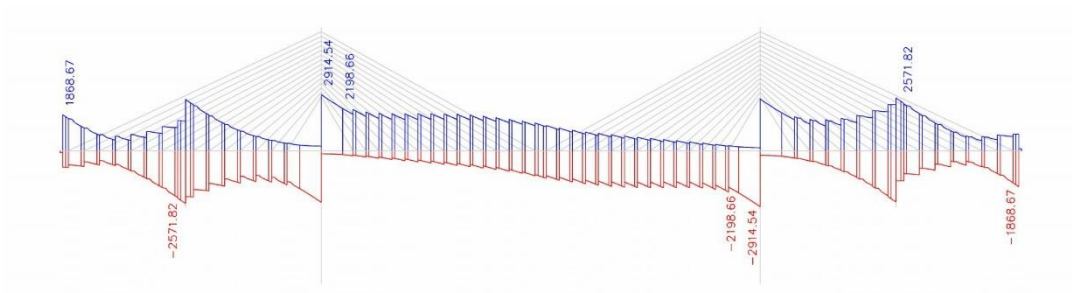
4.7.1.2.3 LM1 UDL



Obr. 4.7.49: My – LM1 UDL

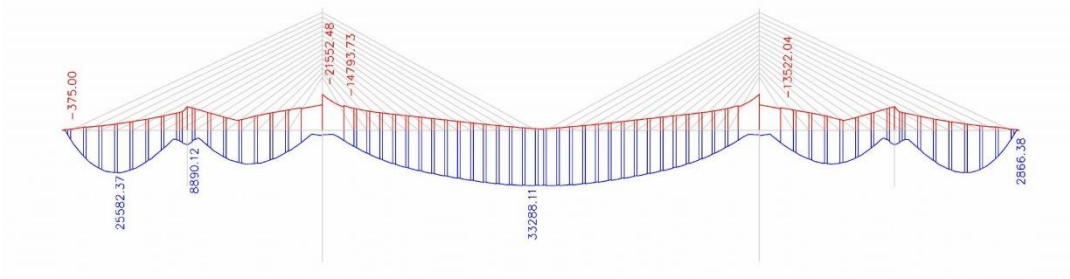


Obr. 4.7.50: N – LM1 UDL

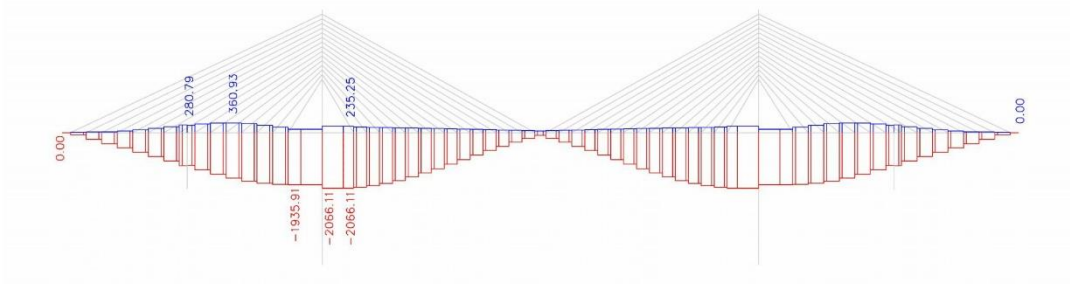


Obr. 4.7.51: Vz – LM1 UDL

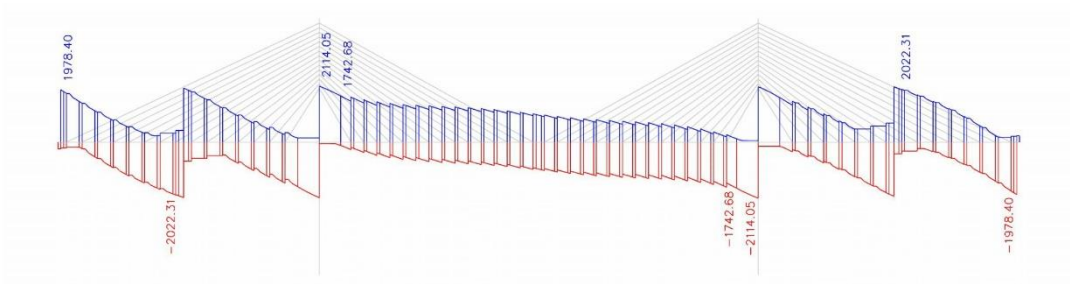
4.7.1.2.4 LM3 vozidlo 1800/200



Obr. 4.7.52: M_y – LM3 1800/200

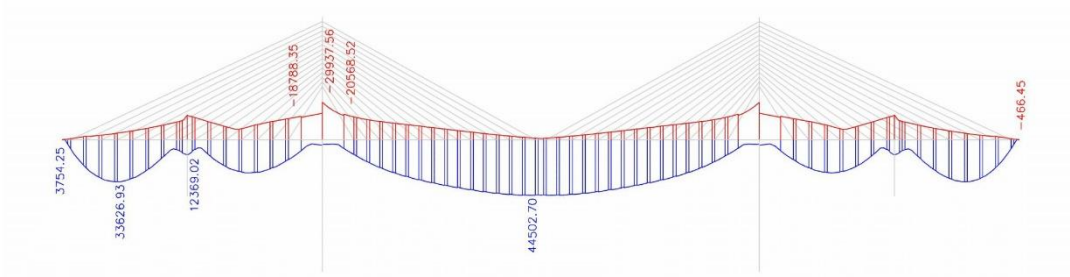


Obr. 4.7.53: N – LM3 1800/200

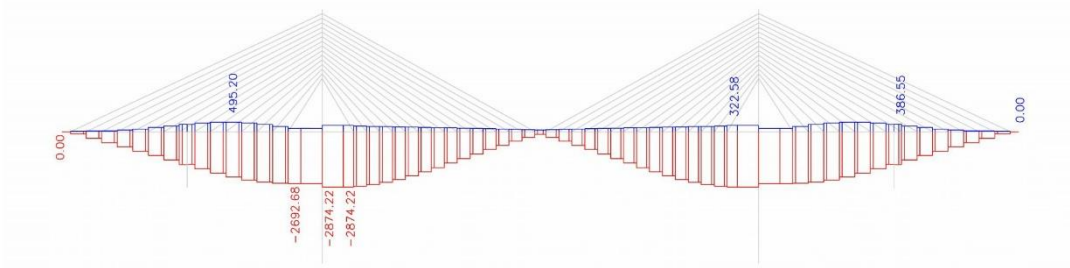


Obr. 4.7.54: V_z – LM3 1800/200

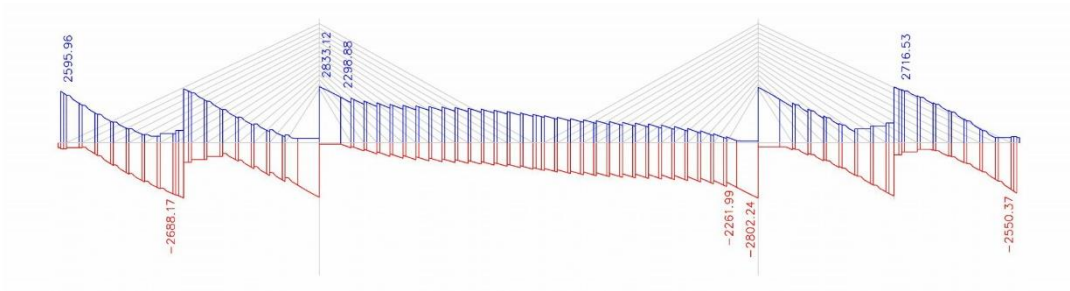
4.7.1.2.5 LM3 vozidlo 3000/240



Obr. 4.7.55: M_y – LM3 3000/240

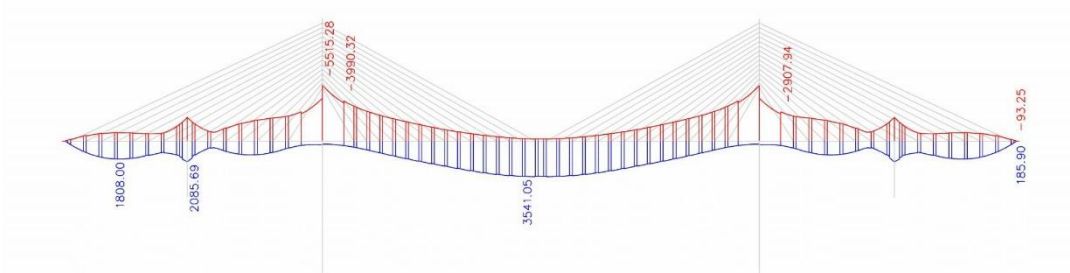


Obr. 4.7.56: N – LM3 3000/240

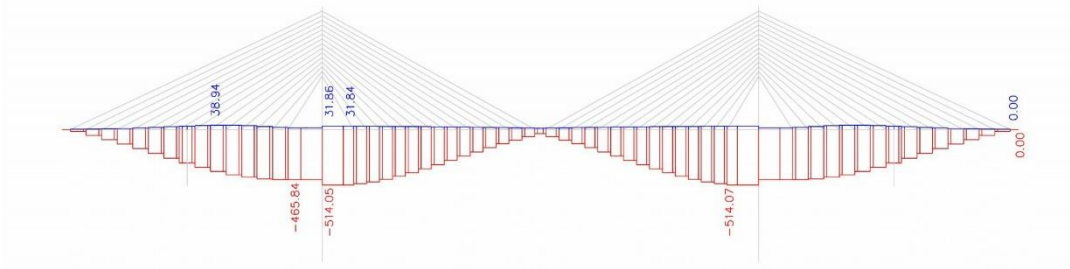


Obr. 4.7.57: Vz – LM3 3000/240

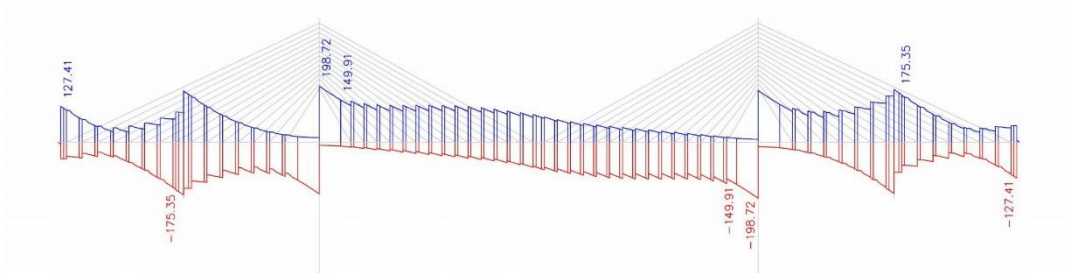
4.7.1.2.6 Chodci



Obr. 4.7.58: My – chodci

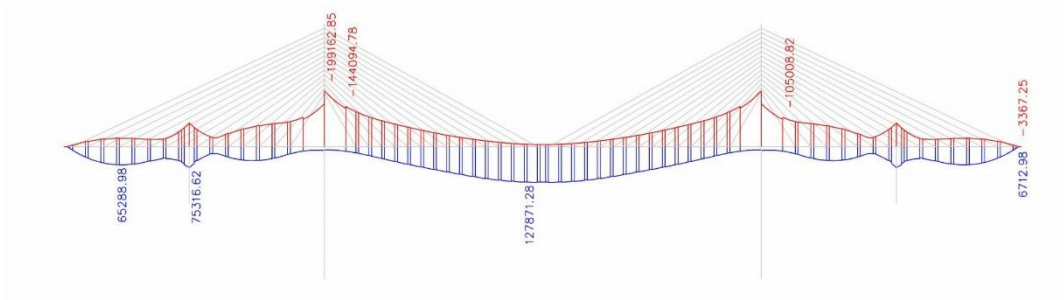


Obr. 4.7.59: N – chodci

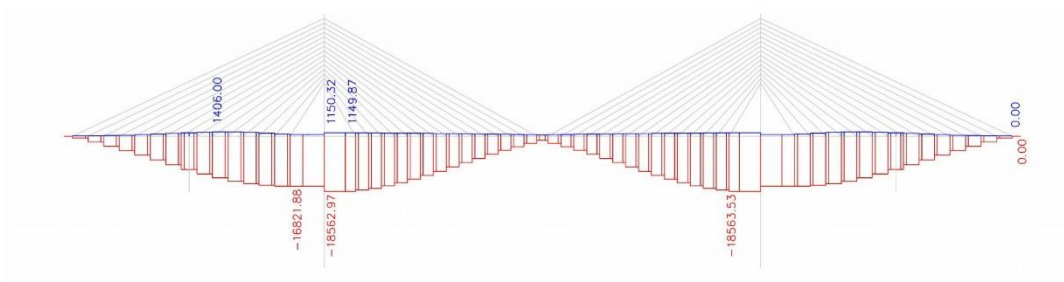


Obr. 4.7.60: Vz – chodci

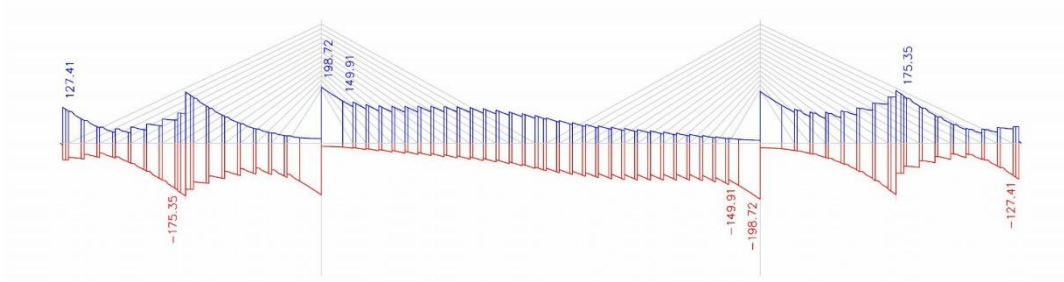
4.7.1.2.7 LM4 (dav)



Obr. 4.7.61: M_y – dav



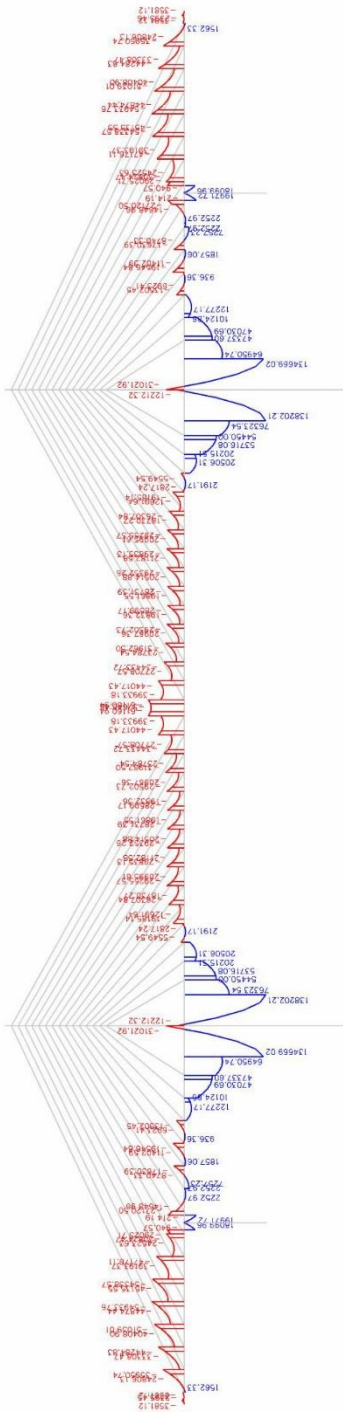
Obr. 4.7.62: N – dav



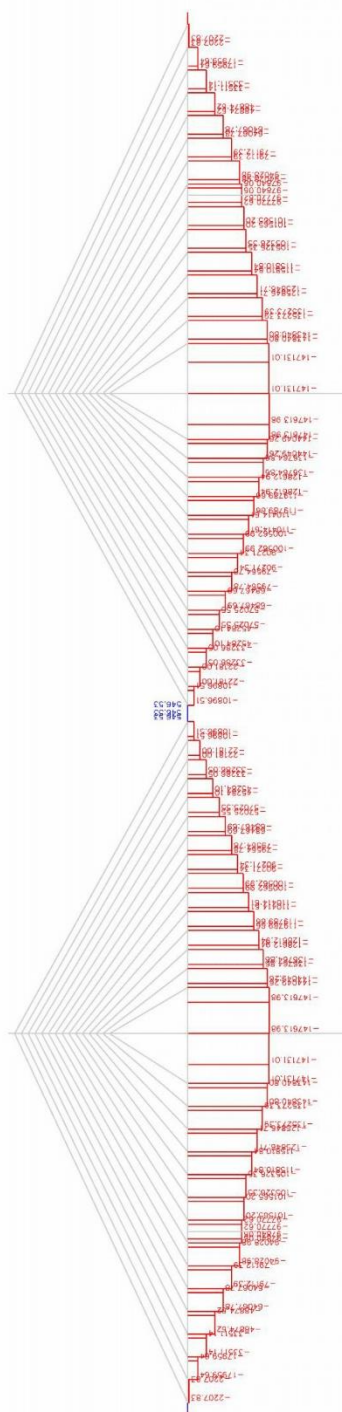
Obr. 4.7.63: V_z – dav

4.7.2 Vnitřní síly po rektifikaci závěšů

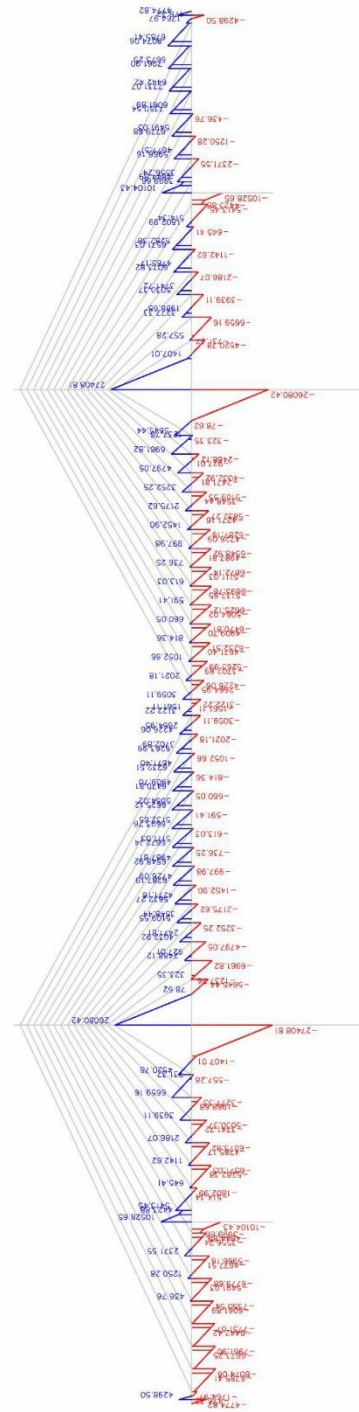
Vnitřní síly od kombinace stálých zatížení s rektifikací závěšů jsou zobrazeny níže.



Obr. 4.7.64: M_y – stálá zat. + rektifikace



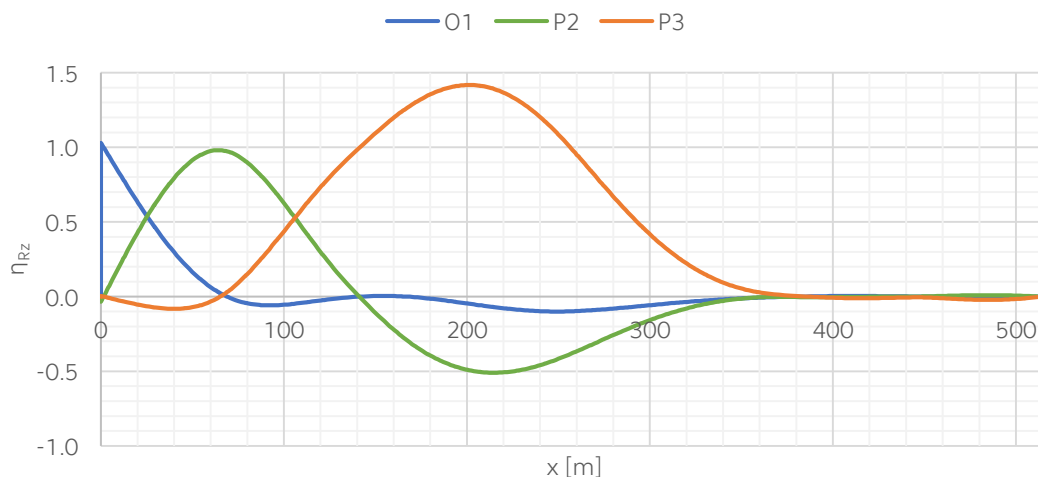
Obr. 4.7.65: N – stálá zat. + rektifikace



Obr. 4.7.66: V_z – stálá zat. + rektifikace

4.7.3 Reakce

Ve 2D modelu jsou pomocí příčnickových čar a z nich vygenerovaným poloh proměnných zatížení vypočteny maximální a minimální reakce v podporách mostu – opěra O1, pilíř P2 a pylon P3. Příčinkové čáry pro svislé reakce jsou zobrazeny v grafu v Obr. 4.7.67.



Obr. 4.7.67: Příčinkové čáry pro svislé reakce

V Tab. 4.7.1 jsou shrnuty výsledky svislých reakcí od stálých zatížení (včetně rektifikace) a od proměnných zatížení v poloze pro maximální a minimální reakce. V posledních dvou sloupcích je uveden součet reakce od stálých a proměnných zatížení. Z výsledků je vidět, že záporné reakce se v konstrukci nevyskytují.

Tab. 4.7.1: Reakce od stálých a proměnných zatížení

Podpora	Stálá zat.	Prom. zat. max	Prom. zat. min	$R_{z,g} + R_{z,q,max}$	$R_{z,g} + R_{z,q,min}$
	$R_{z,g}$	$R_{z,q,max}$	$R_{z,q,min}$		
	[kN]	[kN]	[kN]		
O1	9 073.3	10 470.2	-3 518.3	19 543.5	5 555.0
P2	24 348.6	23 323.6	-16 288.5	47 672.2	8 060.2
P3	325 772.2	59 285.0	-1 448.5	385 057.2	324 323.7

Reakce od kombinace pro MSÚ (horší z 6.10a a 6.10b) jsou v Tab. 4.7.2.

Tab. 4.7.2: Reakce od kombinace pro MSÚ

Podpora	komb. pro max. Rz			komb. pro min. Rz		
	$R_{x,Ed}$	$R_{z,Ed,max}$	$M_{y,Ed}$	$R_{x,Ed}$	$R_{z,Ed,min}$	$M_{y,Ed}$
	[kN]	[kN]	[kNm]	[kN]	[kN]	[kNm]
O1	0.0	19 662.6	0.0	0.0	3 992.2	0.0
P2	428.2	48 340.3	6 616.6	-400.0	8 108.2	-6 936.8
P3	-2 006.1	450 076.5	-53 089.6	1 309.4	324 036.6	36 644.9

Reakce od kombinací pro MSP jsou v Tab. 4.7.3

Tab. 4.7.3: Reakce od kombinací pro MSP

Charakteristická kombinace						
Podpora	komb. pro max. R_z			komb. pro min. R_z		
	$R_{x,Ek}$	$R_{z,Ek,max}$	$M_{y,Ek}$	$R_{x,Ek}$	$R_{z,Ek,min}$	$M_{y,Ek}$
	[kN]	[kN]	[kNm]	[kN]	[kN]	[kNm]
O1	0.0	15 722.1	0.0	0.0	5 473.3	0.0
P2	269.1	39 271.1	4 155.1	-289.8	12 549.4	-5 090.3
P3	-1 385.1	362 841.5	-13 916.2	713.9	324 537.3	18 328.6
Častá kombinace						
Podpora	komb. pro max. R_z			komb. pro min. R_z		
	$R_{x,Ek}$	$R_{z,Ek,max}$	$R_{x,Ek}$	$R_{z,Ek,max}$	$R_{x,Ek}$	$R_{z,Ek,max}$
	[kN]	[kN]	[kNm]	[kN]	[kN]	[kNm]
O1	0.0	11 875.6	0.0	0.0	7 431.5	0.0
P2	212.7	28 447.7	3 056.5	-253.1	20 701.4	-4 083.3
P3	-1 233.8	333 227.7	-32 413.0	515.4	325 220.2	15 919.7
Kvazi-stálá kombinace						
Podpora	komb. pro max. R_z			komb. pro min. R_z		
	$R_{x,Ek}$	$R_{z,Ek,max}$	$R_{x,Ek}$	$R_{z,Ek,max}$	$R_{x,Ek}$	$R_{z,Ek,max}$
	[kN]	[kN]	[kNm]	[kN]	[kN]	[kNm]
O1	0.0	10 576.8	0.0	0.0	7 845.5	0.0
P2	212.7	25 697.8	3 007.1	-253.1	22 618.2	-3 951.3
P3	-1 233.8	326 258.1	-37 497.2	515.4	325 392.0	16 772.4

4.7.4 Vliv zatížení na tuhost závěsů

Od kombinace stálých zatížení je v Tab. 4.7.4 ověřena normálová síla v závěsech a její vliv na tuhost závěsů. Z normálové síly je vypočteno napětí a efektivní modul pružnosti E_{eff} . Vypočten je také poměr efektivního a základního modulu pružnosti E_{eff}/E_0 , což vypovídá o tom, jaký má vliv průvės závěsů na jejich působení (tuhost). V kapitole 4.11.3 je toto ověřeno během všech fází výstavby a provozu.

Tab. 4.7.4: Normálová síla a E_{eff} závěsů od stálých zat.

Z.	N	σ	E_{eff}	E_{eff}/E_0	Z.	N	σ	E_{eff}	E_{eff}/E_0
	[kN]	[MPa]	[GPa]	[%]		[kN]	[MPa]	[GPa]	[%]
Z1	1 246,6	224,6	167,6	85,95	Z16	3 536,6	259,1	194,7	99,83
Z2	8 789,3	802,7	194,4	99,69	Z17	6 005,6	727,9	195,0	99,99
Z3	8 719,9	796,3	194,5	99,72	Z18	6 051,7	733,5	195,0	99,98
Z4	8 664,0	791,2	194,5	99,75	Z19	6 124,1	742,3	194,9	99,96
Z5	8 626,6	787,8	194,6	99,79	Z20	6 214,0	753,2	194,9	99,95
Z6	8 612,9	786,6	194,6	99,82	Z21	6 316,6	765,7	194,9	99,94
Z7	8 626,3	787,8	194,7	99,85	Z22	6 436,6	780,2	194,9	99,93
Z8	2 261,0	206,5	182,6	93,65	Z23	6 568,6	796,2	194,8	99,91
Z9	2 286,1	208,8	185,3	95,05	Z24	6 705,2	812,7	194,8	99,90
Z10	2 313,0	211,2	187,7	96,27	Z25	6 828,9	827,7	194,8	99,89
Z11	6 573,4	600,3	194,8	99,87	Z26	6 936,7	840,8	194,8	99,87
Z12	6 560,0	599,1	194,8	99,91	Z27	7 028,5	851,9	194,7	99,86
Z13	6 563,0	599,4	194,9	99,94	Z28	6 462,3	783,3	194,6	99,79
Z14	6 612,7	603,9	194,9	99,97	Z29	6 526,7	791,1	194,5	99,76
Z15	3 085,9	226,1	194,4	99,71	Z30	6 583,6	798,0	194,5	99,74

Dále je v Tab. 4.7.5 a Tab. 4.7.6 vypočten poměr E_{eff}/E_0 s vlivem proměnných zatížení. Pro každý závěs je uvedena normálová síla od stálých zatížení a maximální zvýšení a snížení normálové síly od proměnných zatížení $\Delta N_{prom.zat}$. Vliv proměnných zatížení na tuhost závěsů je shrnut grafem v Obr. 4.7.68.

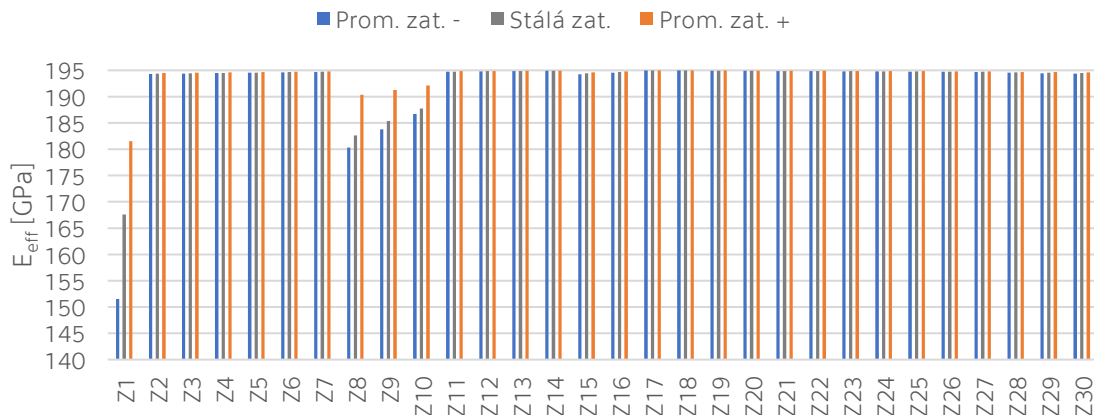
Tab. 4.7.5: Normálová síla a E_{eff} závěsů od proměnných zat. (Z1-Z15)

Závěs	Stálá zat.	Prom. zat.	Celkem			
	$N_{st.zat.}$	$\Delta N_{prom.zat.}$	N_{tot}	σ	E_{eff}	E_{eff}/E_0
	[kN]	[kN]	[kN]	[MPa]	[GPa]	[%]
Z1	1 246,6	375,8	1 622,4	292,3	181,5	93,10
Z1	1 246,6	-213,2	1 033,4	186,2	151,5	77,71
Z2	8 789,3	-372,5	8 416,8	768,7	194,3	99,64
Z2	8 789,3	742,8	9 532,1	870,5	194,5	99,75
Z3	8 719,9	-321,0	8 399,0	767,0	194,4	99,69
Z3	8 719,9	786,3	9 506,2	868,1	194,6	99,78
Z4	8 664,0	-267,6	8 396,4	766,8	194,5	99,73
Z4	8 664,0	837,6	9 501,6	867,7	194,6	99,81
Z5	8 626,6	-214,1	8 412,4	768,3	194,5	99,77
Z5	8 626,6	882,2	9 508,8	868,4	194,7	99,84
Z6	8 612,9	-162,1	8 450,8	771,8	194,6	99,81
Z6	8 612,9	915,0	9 527,9	870,1	194,7	99,87
Z7	8 626,3	-130,2	8 496,1	775,9	194,7	99,84
Z7	8 626,3	930,7	9 557,0	872,8	194,8	99,89
Z8	2 261,0	-134,2	2 126,8	194,2	180,3	92,47
Z8	2 261,0	923,0	3 184,0	290,8	190,4	97,63
Z9	2 286,1	-119,4	2 166,6	197,9	183,8	94,23
Z9	2 286,1	889,8	3 175,8	290,0	191,3	98,09
Z10	2 313,0	-104,0	2 209,0	201,7	186,7	95,74
Z10	2 313,0	851,3	3 164,3	289,0	192,1	98,51
Z11	6 573,4	-89,2	6 484,3	592,2	194,7	99,87
Z11	6 573,4	800,5	7 374,0	673,4	194,8	99,91
Z12	6 560,0	-84,3	6 475,8	591,4	194,8	99,91
Z12	6 560,0	736,7	7 296,8	666,4	194,9	99,94
Z13	6 563,0	-110,6	6 452,4	589,3	194,9	99,94
Z13	6 563,0	641,3	7 204,2	657,9	194,9	99,96
Z14	6 612,7	-161,9	6 450,8	589,1	194,9	99,96
Z14	6 612,7	490,7	7 103,5	648,7	194,9	99,97
Z15	3 085,9	-297,1	2 788,8	204,3	194,2	99,60
Z15	3 085,9	413,9	3 499,8	256,4	194,6	99,80

Tab. 4.7.6: Normálová síla a E_{eff} závěsů od proměnných zat. (Z16-Z30)

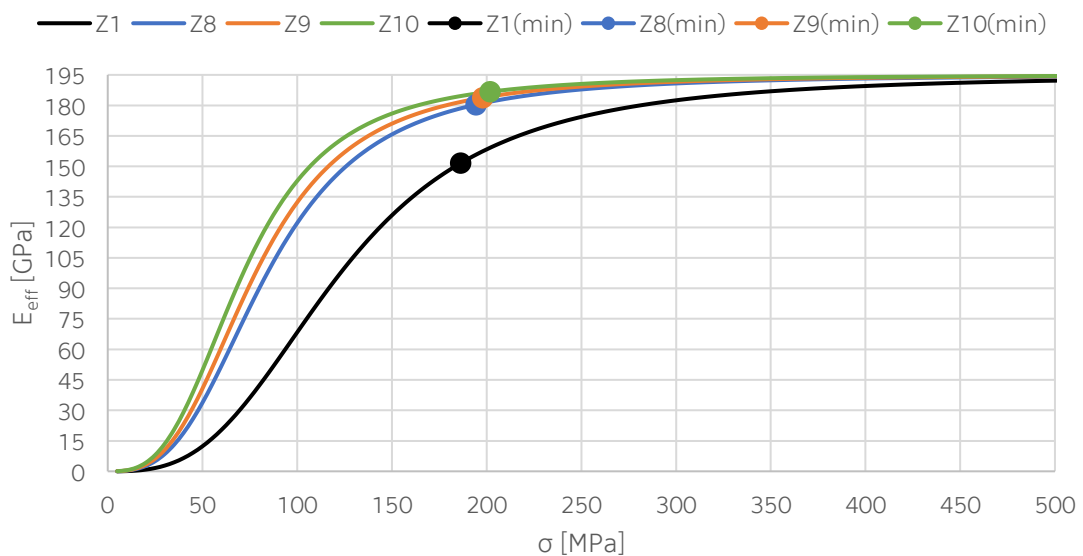
Závěs	Stálá zat.	Prom. zat.	Celkem			
	$N_{st.zat.}$	$\Delta N_{prom.zat.}$	N_{tot}	σ	E_{eff}	E_{eff}/E_0
	[kN]	[kN]	[kN]	[MPa]	[GPa]	[%]
Z16	3 536,6	-328,1	3 208,5	235,1	194,6	99,78
Z16	3 536,6	501,1	4 037,7	295,8	194,8	99,89
Z17	6 005,6	-144,2	5 861,4	710,5	195,0	99,98
Z17	6 005,6	474,2	6 479,8	785,4	195,0	99,99
Z18	6 051,7	-103,6	5 948,1	721,0	194,9	99,97
Z18	6 051,7	611,4	6 663,1	807,7	195,0	99,98
Z19	6 124,1	-75,4	6 048,7	733,2	194,9	99,96
Z19	6 124,1	714,0	6 838,1	828,9	195,0	99,97
Z20	6 214,0	-56,9	6 157,1	746,3	194,9	99,95
Z20	6 214,0	787,1	7 001,1	848,6	194,9	99,97
Z21	6 316,6	-46,3	6 270,3	760,0	194,9	99,94
Z21	6 316,6	836,3	7 152,9	867,0	194,9	99,96
Z22	6 436,6	-55,0	6 381,7	773,5	194,9	99,92
Z22	6 436,6	864,8	7 301,5	885,0	194,9	99,95
Z23	6 568,6	-78,8	6 489,7	786,6	194,8	99,91
Z23	6 568,6	875,2	7 443,7	902,3	194,9	99,94
Z24	6 705,2	-109,4	6 595,8	799,5	194,8	99,90
Z24	6 705,2	869,3	7 574,5	918,1	194,9	99,93
Z25	6 828,9	-146,6	6 682,3	810,0	194,8	99,88
Z25	6 828,9	849,1	7 677,9	930,7	194,8	99,92
Z26	6 936,7	-190,3	6 746,5	817,8	194,7	99,86
Z26	6 936,7	815,9	7 752,6	939,7	194,8	99,91
Z27	7 028,5	-240,3	6 788,2	822,8	194,7	99,84
Z27	7 028,5	771,3	7 799,8	945,4	194,8	99,90
Z28	6 462,3	-296,3	6 166,0	747,4	194,5	99,76
Z28	6 462,3	716,8	7 179,1	870,2	194,7	99,85
Z29	6 526,7	-357,8	6 168,8	747,7	194,5	99,72
Z29	6 526,7	653,6	7 180,3	870,3	194,7	99,82
Z30	6 583,6	-424,4	6 159,1	746,6	194,4	99,68
Z30	6 583,6	583,5	7 167,1	868,7	194,6	99,80

Grafické zobrazení efektivního modulu pružnosti závěsu je v Obr. 4.7.68, kde je E_{eff} porovnán pro případ pouze stálých zatížení, proměnných zatížení, které snižují tuhost závěsů a zvyšují tuhost závěsů.



Obr. 4.7.68: E_{eff} od prom. a stálých zatížení

Z obrázku výše je vidět, že nejcitlivější jsou závěsy Z1, Z8, Z9 a Z10. Jedná se o závěsy, které jsou kotveny blízko podpor mostu (opěra a pilíř). Pozice na křivce vývoje E_{eff} je pro tyto závěsy zobrazena v Obr. 4.7.69. Z toho vyplývá, že první závěs Z1 se již nachází v nelineární zóně, ne však nijak výrazně, jeho minimální tuhost je 77 % E_0 . Vliv jednoho závěsu na celkové působení konstrukce ale není takový, aby musel být proveden nelineární výpočet nebo zmenšena jeho plocha, čímž se zvýší napětí a tím tuhost. Ostatní závěsy mají tuhost prakticky neměnnou.



Obr. 4.7.69: Znázornění E_{eff} pro vybrané závěsy

4.8 Výsledky z 3D modelu

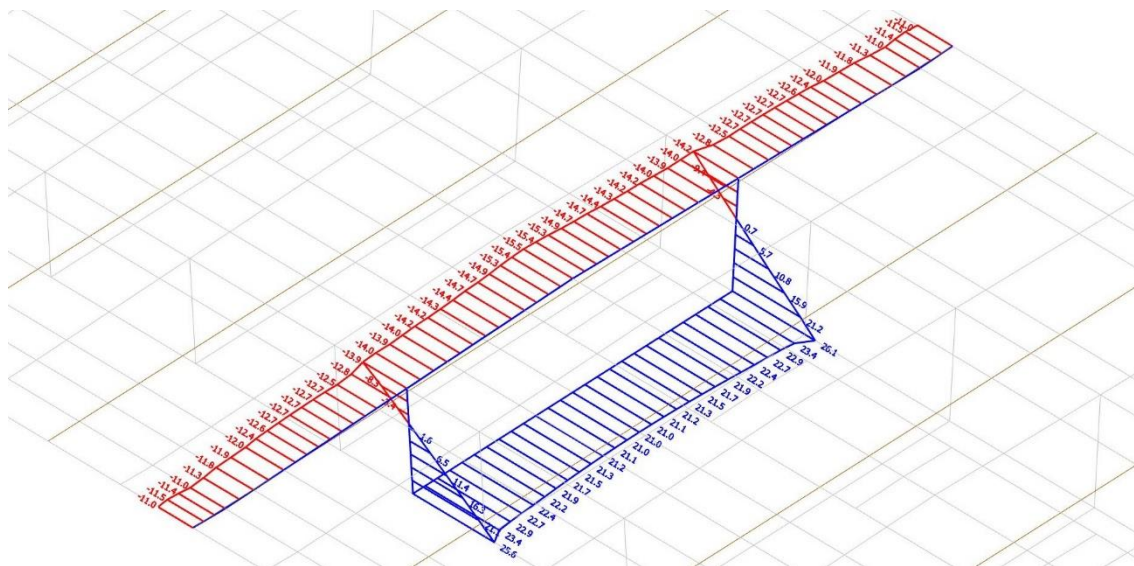
3D model slouží zejména k ověření fungování příčného řezu, který je poměrně hodně široký a atypicky řešený. V této kapitole je tedy prověřeno působení příčného řezu skrze zkoumání normálových napětí. Výsledky z 3D modelu jsou také využity pro návrh předpětí v horní desce v příčném směru v samostatné kapitole 4.13.

4.8.1 Studie působení příčného řezu

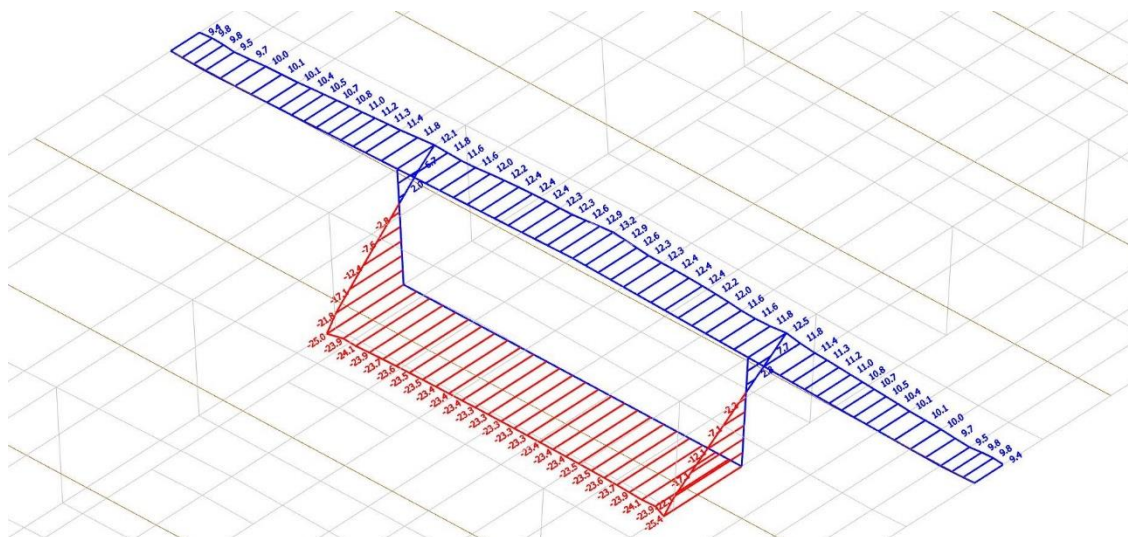
Protože navržený příčný řez je poměrně nestandardní, je namísto výpočtu efektivních šířek přistoupeno k analýze působení příčného řezu ve 3D modelu. V horní a dolní desce po délce konstrukce je studován průběh normálových napětí. Pro tyto účely jsou výsledky z modelu sledovány na příčných řezech ve středním a krajním poli. Na těchto řezech jsou extrahována normálová napětí od stálých zatížení, od rektifikace a pro zahrnutí vlivu proměnných zatížení také od LM1 ve středním poli a na celé konstrukci. Od těchto zatížení je na řezech v horní a dolní desce vypočteno průměrné napětí a extrémní napětí, pak je vyjádřen jejich poměr. Tím je charakterizováno, jak velká plocha horní a dolní desky se podílí na přenosu normálových napětí.

Průběh normálového napětí po jednom průřezu (řez 35 ve středním poli) je od jednotlivých zatížení znázorněn graficky na Obr. 4.8.1 - Obr. 4.8.5.

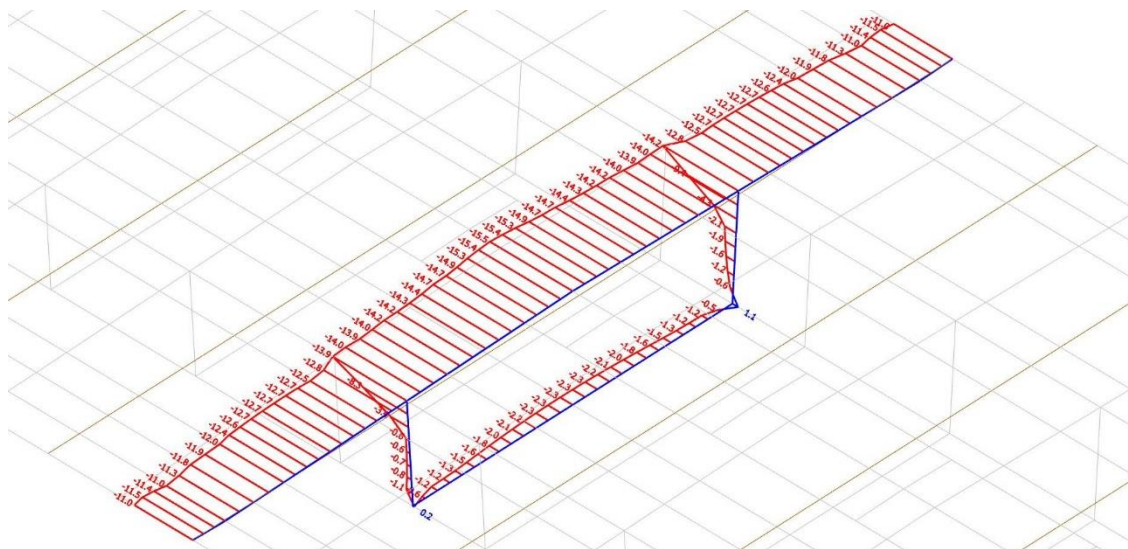
V tabulkách níže jsou pak výsledky shrnuty pro všechny řezy.



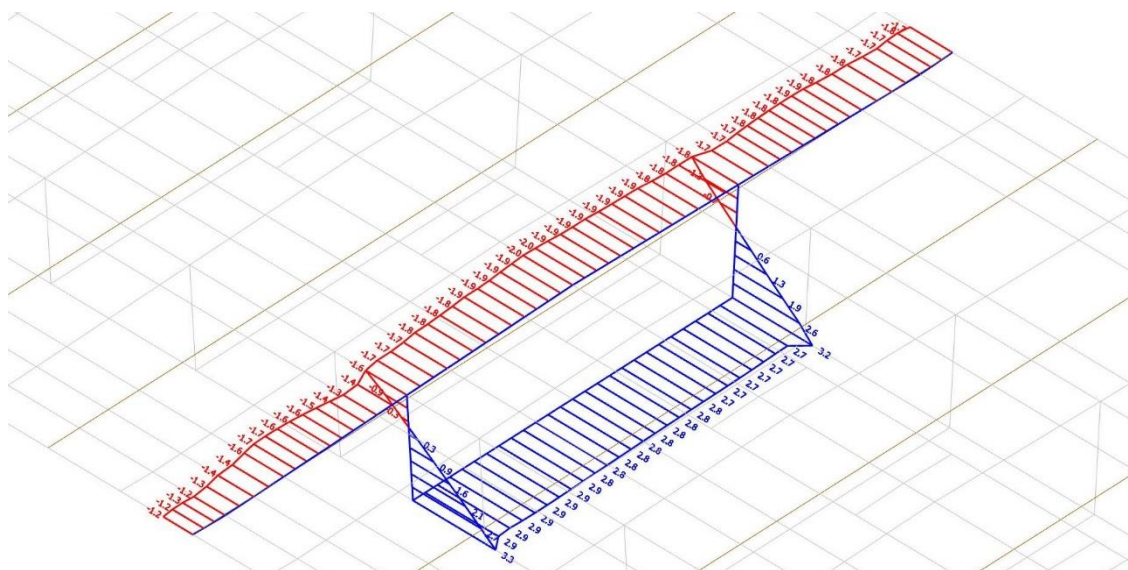
Obr. 4.8.1: Normálové napětí, řez 35, stálá zat.



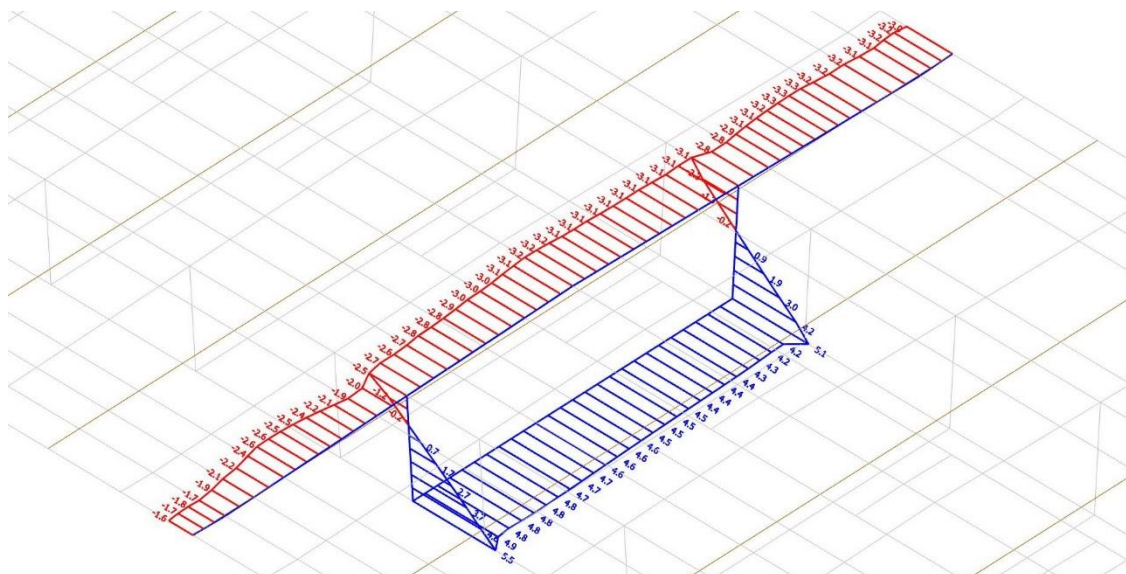
Obr. 4.8.2: Normálové napětí, řez 35, rektifikace



Obr. 4.8.3: Normálové napětí, řez 35, stálá zat. s rektifikací



Obr. 4.8.4: Normálové napětí, řez 35, LM1 střední pole



Obr. 4.8.5: Normálové napětí, řez 35, LM1 vše

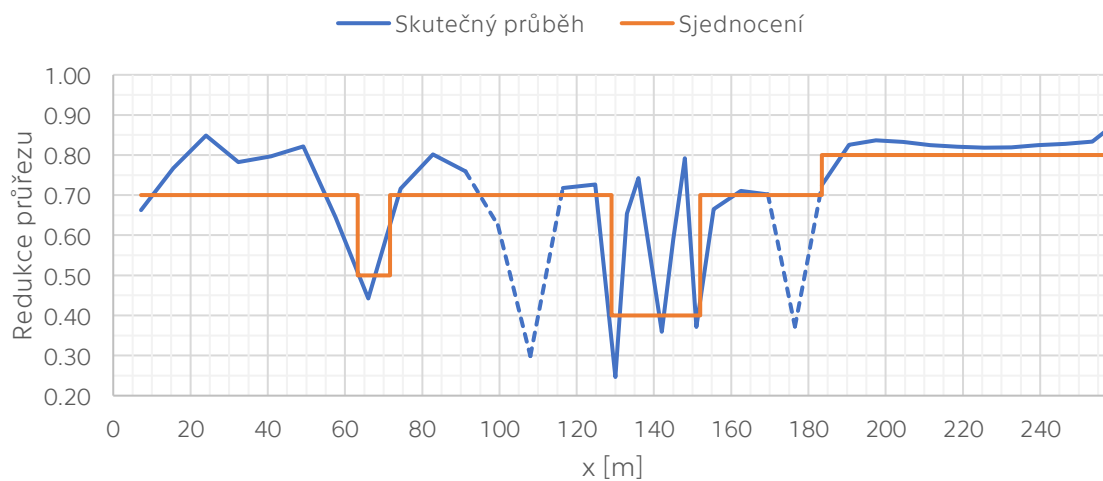
Vypočtené poměry normálových napětí pro všechny řezy pro horní desku je v Tab. 4.8.1.

Tab. 4.8.1: Poměry normálových napětí – horní deska

Řez	Umístění	Poloha řezu	Poměr			Prům. poměrů
		[m]	Stálá zat.	LM1 vše	LM1 střední	
1	Krajní pole	7.20	0.67	0.65	0.67	0.66
2	Krajní pole	15.60	0.79	0.74	0.78	0.77
3	Krajní pole	24.00	0.85	0.85	0.85	0.85
4	Krajní pole	32.40	0.78	0.78	0.78	0.78
5	Krajní pole	40.80	0.80	0.80	0.79	0.80
6	Krajní pole	49.20	0.82	0.83	0.82	0.82
7	Krajní pole	57.60	0.64	0.65	0.65	0.64
8	Příčnick	66.00	0.42	0.41	0.50	0.44
9	Krajní pole	74.40	0.71	0.71	0.72	0.72
10	Krajní pole	82.80	0.82	0.78	0.81	0.80
11	Krajní pole	91.20	0.77	0.75	0.75	0.76
12	Krajní pole	99.60	0.66	0.64	0.58	0.63
13	Krajní pole	108.00	0.23	0.26	0.40	0.30
14	Krajní pole	116.40	0.73	0.68	0.75	0.72
15	Krajní pole	124.80	0.73	0.70	0.74	0.73
16	Příčnick	130.00	0.25	0.23	0.26	0.25
17	Příčnick	133.00	0.66	0.65	0.65	0.65
18	Příčnick	136.00	0.75	0.72	0.76	0.74
19	Příčnick	139.00	0.56	0.53	0.57	0.55
20	Příčnick	142.00	0.36	0.35	0.36	0.36
21	Příčnick	145.00	0.60	0.59	0.59	0.59
22	Příčnick	148.00	0.80	0.79	0.79	0.79

Řez	Umístění	Poloha řezu	Poměr			Prům. poměrů
		[m]	Stálá zat.	LM1 vše	LM1 střední	
23	Příčník	151.00	0.39	0.35	0.38	0.37
24	Střední pole	155.50	0.68	0.65	0.67	0.66
25	Střední pole	162.50	0.71	0.71	0.71	0.71
26	Střední pole	169.50	0.72	0.68	0.71	0.70
27	Střední pole	176.50	0.40	0.35	0.36	0.37
28	Střední pole	183.50	0.73	0.71	0.73	0.73
29	Střední pole	190.50	0.82	0.83	0.83	0.83
30	Střední pole	197.50	0.83	0.84	0.84	0.84
31	Střední pole	204.50	0.83	0.83	0.83	0.83
32	Střední pole	211.50	0.83	0.83	0.82	0.82
33	Střední pole	218.50	0.82	0.82	0.82	0.82
34	Střední pole	225.50	0.82	0.82	0.82	0.82
35	Střední pole	232.50	0.82	0.82	0.82	0.82
36	Střední pole	239.50	0.83	0.82	0.83	0.82
37	Střední pole	246.50	0.83	0.83	0.83	0.83
38	Střední pole	253.50	0.83	0.83	0.83	0.83
39	Střední pole	258.50	0.87	0.87	0.87	0.87

Vypočtené poměry a jejich sjednocení pro horní desku jsou graficky shrnuty v Obr. 4.8.6.



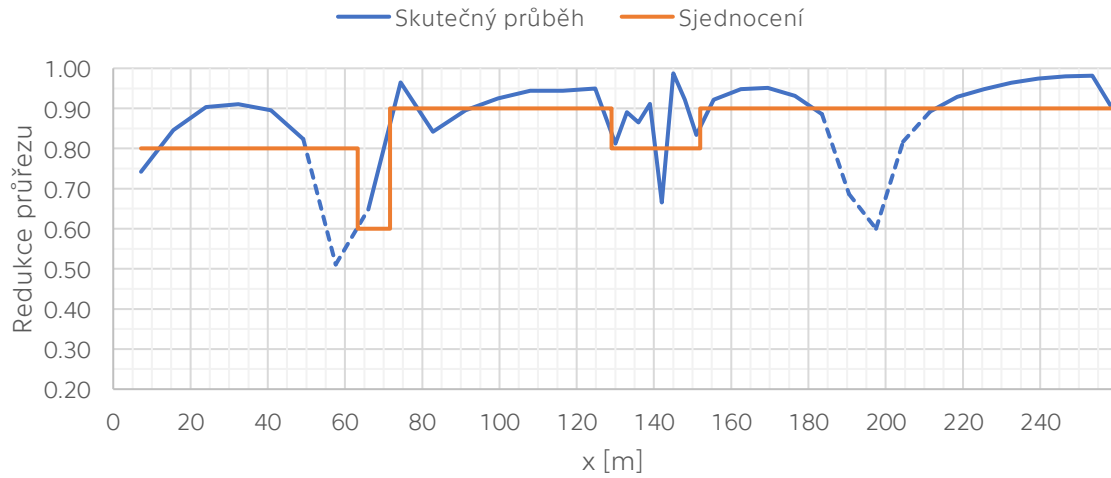
Obr. 4.8.6: Průběh redukce pro horní desku

Dále pro dolní desku jsou poměry normálových napětí vypočteny v Tab. 4.8.2.

Tab. 4.8.2: Poměry normálových napětí – dolní deska

Řez	Umístění	Poloha řezu	Poměr			Prům. poměrů
		[m]	Stálá zat.	LM1 vše	LM1 střední	
1	Krajní pole	7.20	0.75	0.74	0.74	0.74
2	Krajní pole	15.60	0.84	0.86	0.83	0.85
3	Krajní pole	24.00	0.90	0.92	0.89	0.90
4	Krajní pole	32.40	0.91	0.93	0.90	0.91
5	Krajní pole	40.80	0.89	0.91	0.89	0.90
6	Krajní pole	49.20	0.81	0.84	0.82	0.82
7	Krajní pole	57.60	0.48	0.50	0.55	0.51
8	Příčnick	66.00	0.70	0.66	0.59	0.65
9	Krajní pole	74.40	0.97	0.95	0.97	0.97
10	Krajní pole	82.80	0.83	0.86	0.84	0.84
11	Krajní pole	91.20	0.89	0.90	0.89	0.90
12	Krajní pole	99.60	0.92	0.93	0.92	0.93
13	Krajní pole	108.00	0.95	0.94	0.94	0.94
14	Krajní pole	116.40	0.94	0.94	0.95	0.94
15	Krajní pole	124.80	0.95	0.95	0.95	0.95
16	Příčnick	130.00	0.81	0.81	0.81	0.81
17	Příčnick	133.00	0.89	0.89	0.89	0.89
18	Příčnick	136.00	0.87	0.86	0.87	0.87
19	Příčnick	139.00	0.92	0.91	0.91	0.91
20	Příčnick	142.00	0.67	0.66	0.66	0.67
21	Příčnick	145.00	0.99	0.98	0.99	0.99
22	Příčnick	148.00	0.92	0.92	0.92	0.92
23	Příčnick	151.00	0.84	0.83	0.83	0.83
24	Střední pole	155.50	0.93	0.92	0.92	0.92
25	Střední pole	162.50	0.94	0.95	0.95	0.95
26	Střední pole	169.50	0.95	0.95	0.95	0.95
27	Střední pole	176.50	0.93	0.93	0.93	0.93
28	Střední pole	183.50	0.88	0.88	0.89	0.89
29	Střední pole	190.50	0.69	0.68	0.69	0.69
30	Střední pole	197.50	0.67	0.64	0.48	0.60
31	Střední pole	204.50	0.87	0.84	0.74	0.82
32	Střední pole	211.50	0.93	0.91	0.84	0.89
33	Střední pole	218.50	0.96	0.94	0.89	0.93
34	Střední pole	225.50	0.96	0.96	0.92	0.95
35	Střední pole	232.50	0.97	0.97	0.95	0.96
36	Střední pole	239.50	0.98	0.98	0.97	0.97
37	Střední pole	246.50	0.98	0.98	0.98	0.98
38	Střední pole	253.50	0.98	0.98	0.98	0.98
39	Střední pole	258.50	0.98	0.98	0.74	0.90

Vypočtené poměry a jejich sjednocení pro dolní desku jsou graficky shrnuty v Obr. 4.8.7.



Obr. 4.8.7: Průběh redukce pro dolní desku

Sjednocení redukce horní a dolní desky je bráno s ohledem na celkový průběh poměru normálových napětí. Čárkované části grafu jsou v oblasti, kde se mění konkávnost a konvexnost ohybu a kde namáhání konstrukce je menší.

Závěrem této studie je redukce plochy horní a dolní desky a tím i redukce průřezových charakteristik v Tab. 4.8.3.

Tab. 4.8.3: Redukované průřezové charakteristiky

Horní deska			
Průřez	redukce	$W_{y,el,h}$	$W_{y,el,h,red}$
		[m ³]	[m ³]
krajní pole	0.70	53.13	37.19
střední pole	0.70	81.06	56.74
	0.80	81.06	64.85
u pylonu	0.40	83.04	33.22
u pilíře	0.50	83.04	41.52
Dolní deska			
Průřez	redukce	$W_{y,el,d}$	$W_{y,el,d,red}$
		[m ³]	[m ³]
krajní pole	0.80	29.71	23.77
	0.90	29.71	26.74
střední pole	0.90	38.40	34.56
u pylonu	0.80	69.27	55.42
u pilíře	0.60	69.27	41.56

4.9 Předpětí

4.9.1 Návrh předpětí

Díky tomu, že konstrukce je namáhána značnými kladnými i zápornými momenty a také s přihlédnutím k šířce příčného směru, jsou předpínací kabely rozprostřeny po celé ploše příčného řezu. Všechny kabely jsou navrženy ze sedmi-drátových lan, počet lan je ve všech kabelech také sjednocen a to na 22.

Maximální napětí je stanoveno dle vzorce níže.

$$\sigma_{p,max} = \min(0,8 * f_{pk}; 0,9 * f_{p0,1k}) \quad (\text{Rov. 20})$$

$$\sigma_{p,max} = \min(0,8 * 1860; 0,9 * 1637) = 1473,12 \text{ MPa}$$

Krytí předpínací výztuže je vypočteno ze vzorce dole, přičemž je vycházeno ze třídy betonu nosné konstrukce (C50/60 - XF2, XD1, XC4), návrhové životnosti 100 let, třídy konstrukce S5 a zajištění zvláštní kontroly kvality výroby betonu.

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev} \quad (\text{Rov. 21})$$

$$c_{nom} = 80 + 10 = 90 \text{ mm}$$

Síla v předpínací výztuži je vypočtena z maximálního napětí a je stanovena ze vzorce:

$$N_p = A_p * \sigma_{p,max} \quad (\text{Rov. 22})$$

Je předpokládáno měření předpínací síly, platí tedy $P_{k,sup} = P_{k,inf} = P_m$.

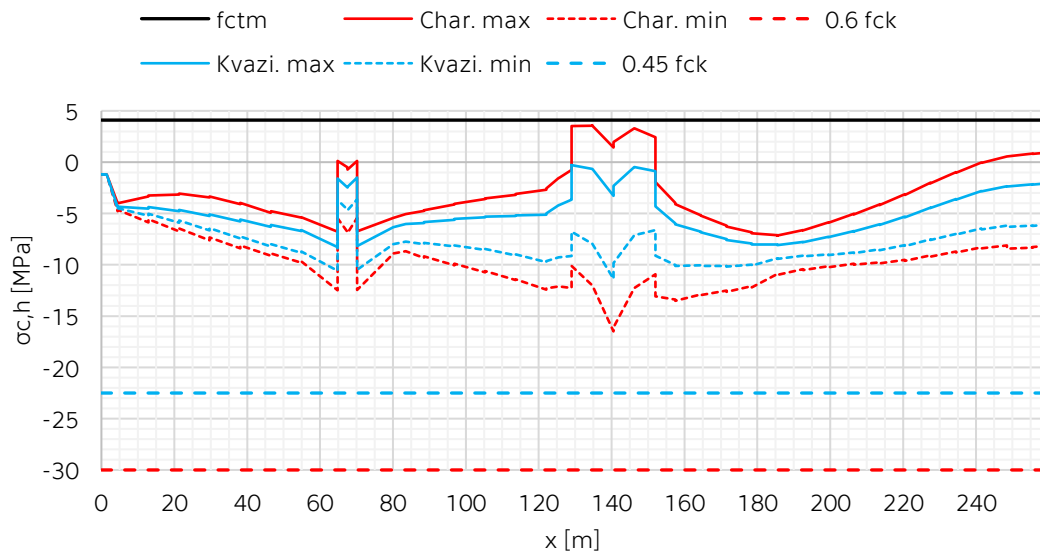
První návrh předpětí je proveden vyrovnáním napětí v mezním stavu použitelnosti na konci životnosti. Nejprve jsou odhadnuty ztráty předpětí na 25%, a staticky neurčitý moment od předpětí je zanedbán, $\Delta M = 0$. Napětí je pak spočteno v horních a dolních vláknech dle vzorů dole.

$$\sigma_{c,h} = \frac{N_E}{A_c} + \frac{M_E}{W_{el,y,h,red}} + \frac{N_p}{A_c} + \frac{M_p}{W_{el,y,h,red}} \quad (\text{Rov. 23})$$

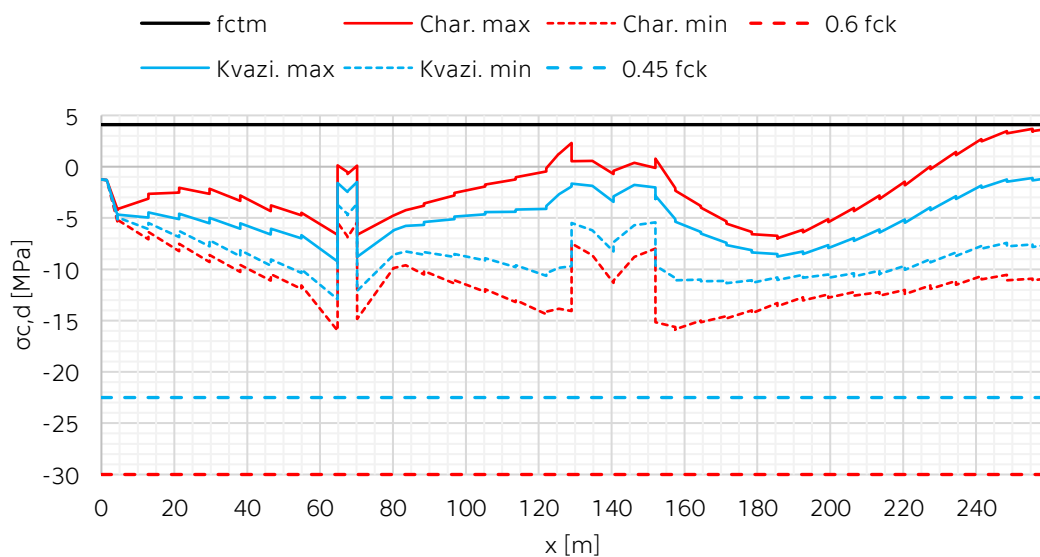
$$\sigma_{c,d} = \frac{N_E}{A_c} + \frac{M_E}{W_{el,y,d,red}} + \frac{N_p}{A_c} + \frac{M_p}{W_{el,y,d,red}} \quad (\text{Rov. 24})$$

Díky tomu je tak vypočítáno potřebné množství předpínací výztuže na idealizované excentricitě tak, aby bylo vyhověno meznímu stavu omezení napětí a omezení trhlin v betonu. K výpočtu napětí je použit redukovaný průřezový modul, viz kapitola 4.8.1. Celý výpočet je proveden v Excelu s celkem 260 řádky, v Tab. 4.9.1 je uveden výňatek z tohoto výpočtu.

Průběh napětí na polovině symetrické konstrukce je pro horní vlákna na Obr. 4.9.1 a pro dolní vlákna na Obr. 4.9.2.



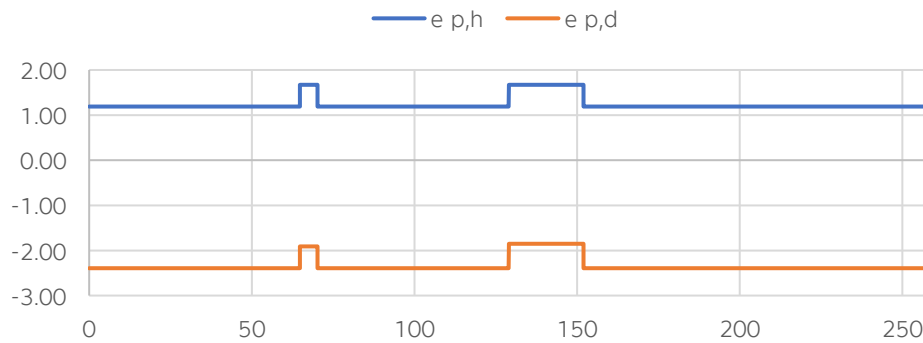
Obr. 4.9.1: Předběžný návrh výztuže – napětí v horních vláknech NK



Obr. 4.9.2: Předběžný návrh výztuže – napětí v dolních vláknech NK

Výsledkem tohoto výpočtu je potřebný počet a ideální excentricita kabelů umístěných v horní a dolní desce (viz Obr. 4.9.3).

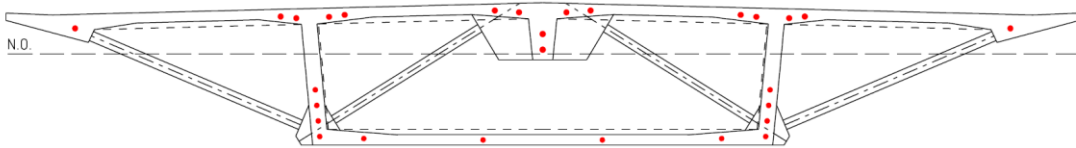
Pro horní desku je navrženo 16 kabelů a pro dolní desku je navrženo 12 kabelů. Dalších 8 kabelů je v příčniku u pylonu.



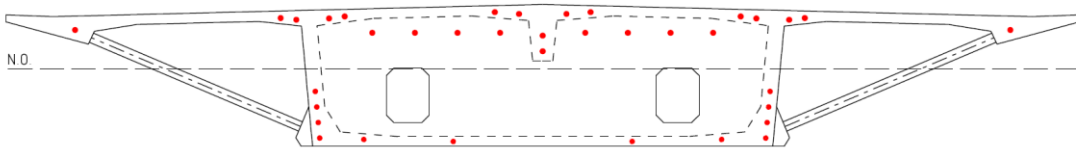
Obr. 4.9.3: Excentricita ideálních kabelů

Na Obr. 4.9.4 je znázorněno rozmístění kabelů v příčných řezech. Jeden kabel je umístěn v krajních žebrech, v náběžích horní desky jsou vždy dva kabely a ve středním žebře jsou také dva kabely. Dále u dolního povrchu stěny komory jsou celkem čtyři kabely nad sebou a v dolní desce jsou také čtyři kabely. Celkem je to tedy 28 kabelů, z nichž je vždy polovina spojována ob jednu lamelu. Na koncích konstrukce jsou pak kabely kotveny tak, aby jejich těžiště odpovídalo neutrální ose průřezu. Detailnější výkresy viz příloha č. 1, výkres 7.

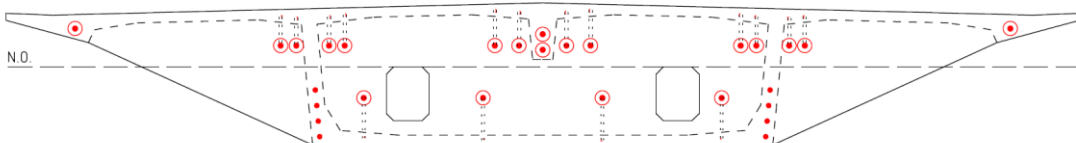
PŘÍČNÝ ŘEZ V POLI:



PŘÍČNÝ ŘEZ PŘÍČNÍKEM:

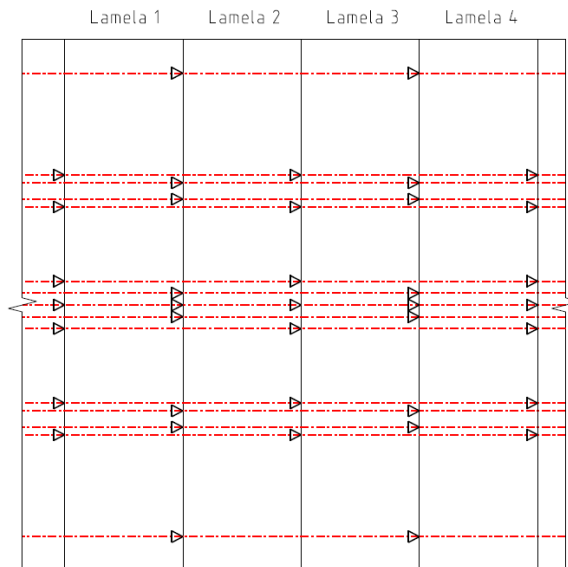


PŘÍČNÝ ŘEZ U OPĚRY:



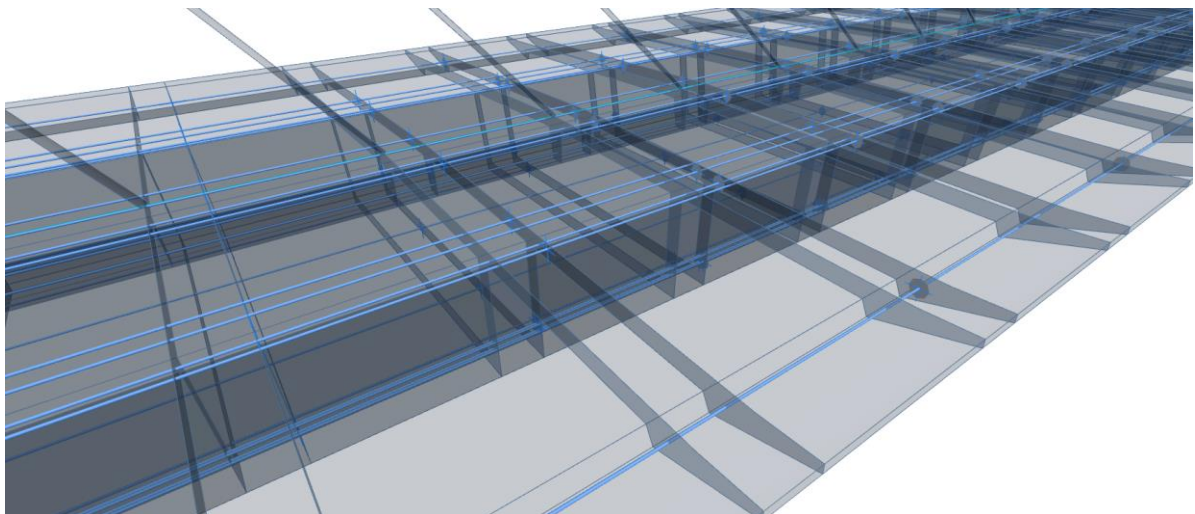
Obr. 4.9.4: Předpínací kabely v příčných řezech

Kabely jsou navrženy jako přímé po celé délce konstrukce, kromě oblasti na koncích konstrukce, kde jsou kabely vedeny tak, aby jejich celkové těžiště bylo v neutrální ose průřezu. Množství předpínací výztuže je po celé délce konstrukce s výjimkou příčníků u pylonu konstantní. Zjednodušené schéma vedení a spojování předpínací výztuže je pro kabely v horní desce v Obr. 4.9.5, kde vždy polovina kabelů je kotvená na konci jedné lamely a další kabely vedoucí přes dvě lamely jsou na ně naspojovány. Druhá polovina je vždy kotvena o jednu lamelu dál. Detailní výkres viz příloha č. 1, výkres 8.



Obr. 4.9.5: Schéma spojkování předpínací výztuže

Tak jak jsou kabely navrženy dle obrázků výše, jsou přesně namodelovány v programu SCIA Engineer, náhled na tento model je v Obr. 4.9.6. Vzhledem k tomu, že se jedná o poměrně složitou konstrukci mnohokrát staticky neurčitou, jsou účinky předpětí a jeho vývoj v čase podrobněji zkoumány v tomto modelu.



Obr. 4.9.6: Modelování předpětí ve SCIA Engineer

4.9.2 Ztráty předpětí

Ve výpočtu jsou uvažovány následující ztráty napětí v předpínací výztuži.

- Okamžité ztráty: ztráty třením, ztráty pokluzem v kotvě (3 mm), ztráty elastickou deformací betonu, ztráty relaxací oceli, ztráty rozdílem teplot mezi předpínací ocelí a předpínací dráhou
- Dlouhodobé ztráty (časově závislé): ztráty způsobené dotvarováním a smršťováním betonu, ztráty způsobené dlouhodobou relaxací oceli

4.10 Časově závislá analýza postupu výstavby

Postup výstavby je počítán na 2D prutovém modelu skrze funkcionalitu programu SCIA Engineer Časově závislá analýza (TDA). To umožňuje přiřadit k jednotlivým prutovým prvkům jednotlivé fáze výstavby a tomu odpovídající čas. V tomto modelu jsou tak zahrnuty všechny časově závislé jevy – dotvarování a smršťování betonu a ztráty předpětí. Při modelování TDA jsou tedy postupně aktivovány pruty tvořící nejprve pylony a pak jednotlivé lamely mostovky a k nim náležící závěsy a předpínací kabely. V Tab. 4.10.1 jsou uvedeny fáze TDA s popisem a časy. Označení „B“ značí betonáž v lokálním čase 0, označení „V“ znamená zatížení lamely betonážním vozíkem pro další lamelu v lokálním čase 13 dní. Předpínání je uvažováno v lokálním čase 7 dní, kdy je také odstraněna liniová podpora bednění.

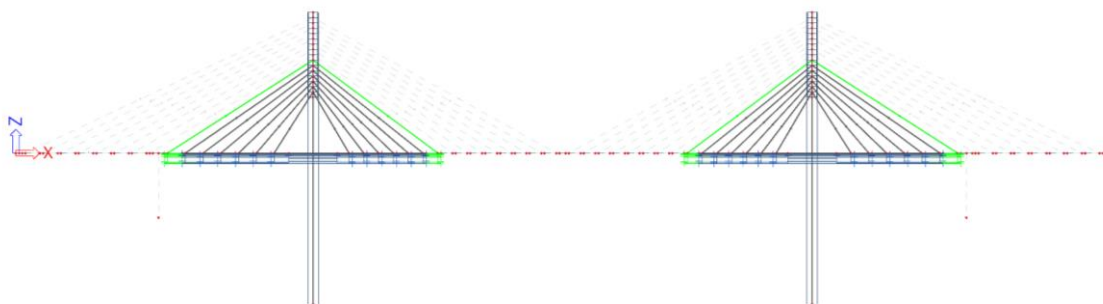
Tab. 4.10.1: Postup výstavby

Fáze	Č.	Čas (dny)	Popis
P-1	F1	0	Betonáž dolní části pylonu, předp. rychlost posuvného bednění 5m/24hod
P-2	F2	15	Betonáž horní části pylonu, předp. rychlost posuvného bednění 5m/24hod
L-1-B	F3	29	Betonáž lamely 1
L-1-V	F4	42	Zatížení vozíkem pro lamelu 2
L-2-B	F5	43	Betonáž lamely 2, odstranění zatížení vozíkem pro lamelu 2
L-2-V	F6	56	Zatížení vozíkem pro lamelu 3
L-3-B	F7	57	Betonáž lamely 3, odstranění zatížení vozíkem pro lamelu 3
L-3-V	F8	70	Zatížení vozíkem pro lamelu 4
L-4-B	F9	71	Betonáž lamely 4, odstranění zatížení vozíkem pro lamelu 4
L-4-V	F10	84	Zatížení vozíkem pro lamelu 5
L-5-B	F11	85	Betonáž lamely 5, odstranění zatížení vozíkem pro lamelu 5
L-5-V	F12	98	Zatížení vozíkem pro lamelu 6
L-6-B	F13	99	Betonáž lamely 6, odstranění zatížení vozíkem pro lamelu 6
L-6-V	F14	112	Zatížení vozíkem pro lamelu 7
L-7-B	F15	113	Betonáž lamely 7, odstranění zatížení vozíkem pro lamelu 7
L-7-V	F16	126	Zatížení vozíkem pro lamelu 8
L-8-B	F17	127	Betonáž lamely 8, odstranění zatížení vozíkem pro lamelu 8
L-8-V	F18	140	Zatížení vozíkem pro lamelu 9
L-9-B	F19	141	Betonáž lamely 9 a krajních pilířů, odstranění zatížení vozíkem pro lamelu 9
L-9-V	F20	154	Zatížení vozíkem pro lamelu 10
L-10-B	F21	155	Betonáž lamely 10, odstranění zatížení vozíkem pro lamelu 10
L-10-V	F22	168	Zatížení vozíkem pro lamelu 11
L-11-B	F23	169	Betonáž lamely 11, odstranění zatížení vozíkem pro lamelu 11
L-11-V	F24	182	Zatížení vozíkem pro lamelu 12
L-12-B	F25	183	Betonáž lamely 12, odstranění zatížení vozíkem pro lamelu 12
L-12-V	F26	196	Zatížení vozíkem pro lamelu 13
L-13-B	F27	197	Betonáž lamely 13, odstranění zatížení vozíkem pro lamelu 13

Fáze	Č.	Čas (dny)	Popis
L-13-V	F28	210	Zatížení vozíkem pro lamelu 14
L-14-B	F29	211	Betonáž lamely 14 odstranění zatížení vozíkem pro lamelu 14
L-14-V	F30	224	Zatížení vozíkem pro lamelu 15
L-15-B	F31	225	Betonáž lamely 15, odstranění zatížení vozíkem pro lamelu 15
L-15-V	F32	238	Zatížení vozíkem pro lamelu 16
L-16-B	F33	239	Betonáž lamely 16 a příčnicku u opěry, uložení na opěry, odstranění zatížení vozíkem pro lamelu 16
L-17	F34	253	Betonáž závěrečné lamely 17
KV	F35	281	Konec výstavby, vnesení ostatního stálého zat., dopnutí závěsů
UP	F36	300	Uvedení do provozu, zatížení dle EN
KŽ	F37	36500	Konec životnosti, zatížení dle EN

Jak již bylo uvedeno v TDA jsou modelovány také dodatečně předpjaté kabely. Kabely jsou modelovány jeden po jednom, což umožní realistické počítání ztrát a celkové působení na konstrukci. V Obr. 4.10.1 je zobrazen model konstrukce s kabely pro TDA ve fázi L-8-B (zelená barva značí pruty aktivované v této fázi).

Zatížení je do modelu přidáváno a odebíráno dle Tab. 4.10.1. Zatížení dopravou dle kapitoly 4.5.3.1 je do modelu přidána pro fázi uvedení do provozu a na konci životnosti jako krátkodobé zatížení.

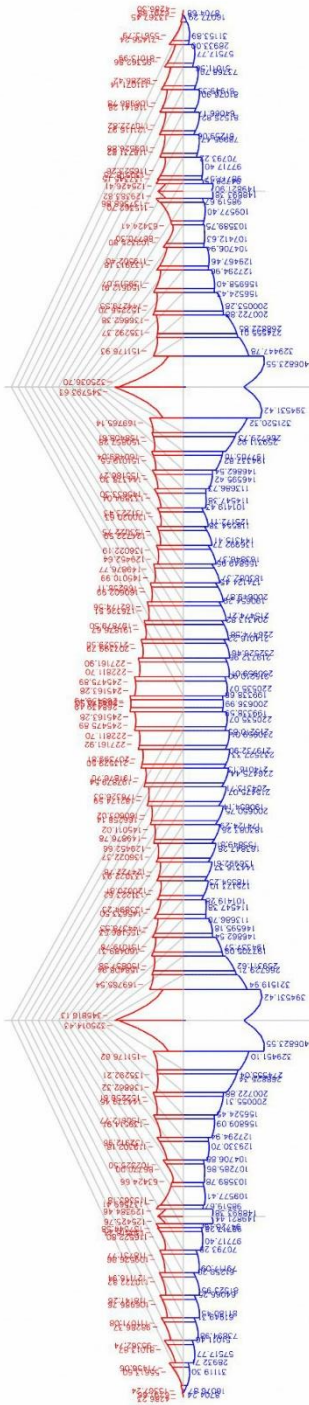


Obr. 4.10.1: TDA model konstrukce

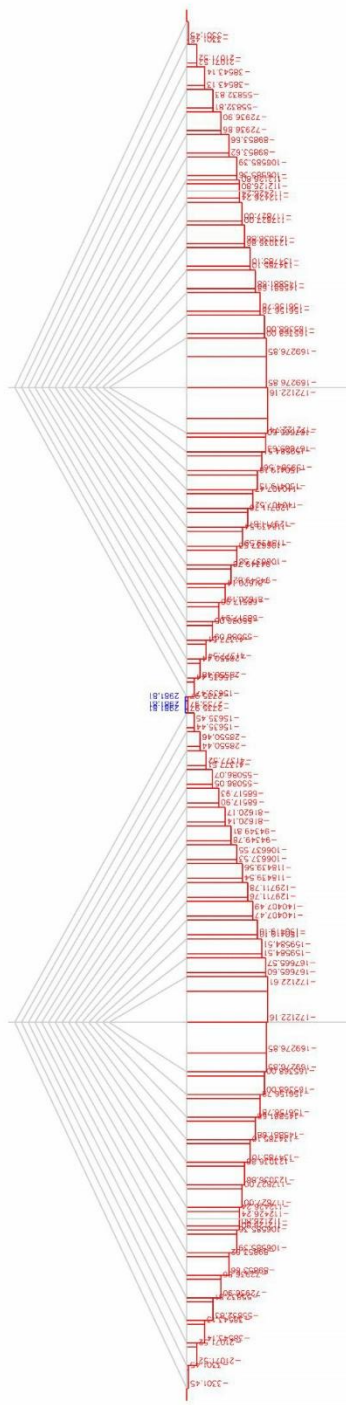
Na dalších stranách jsou uvedeny vnitřní síly od normových kombinací pro čas na konci životnosti.

4.10.1 Vnitřní síly od kombinací pro MSP

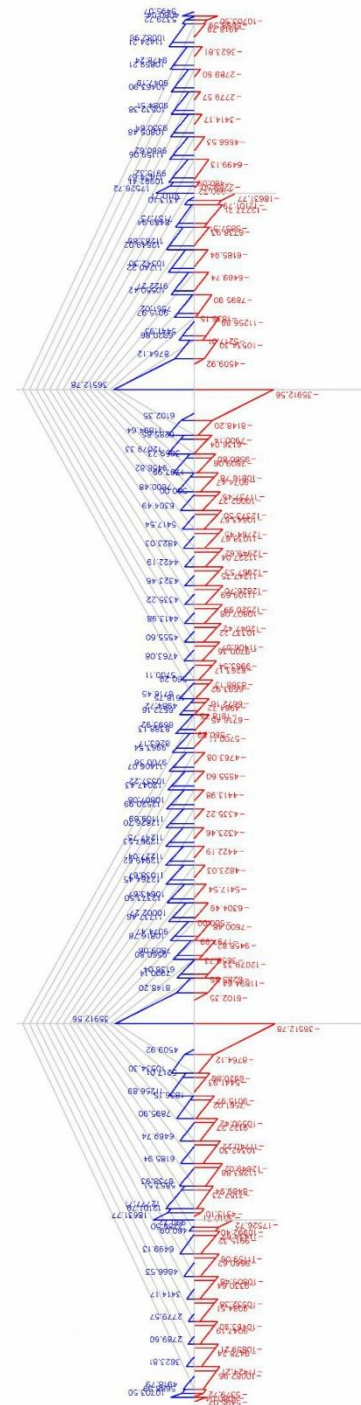
4.10.1.1 Charakteristická kombinace



Obr. 4.10.2: My – MSP Char. kombinace

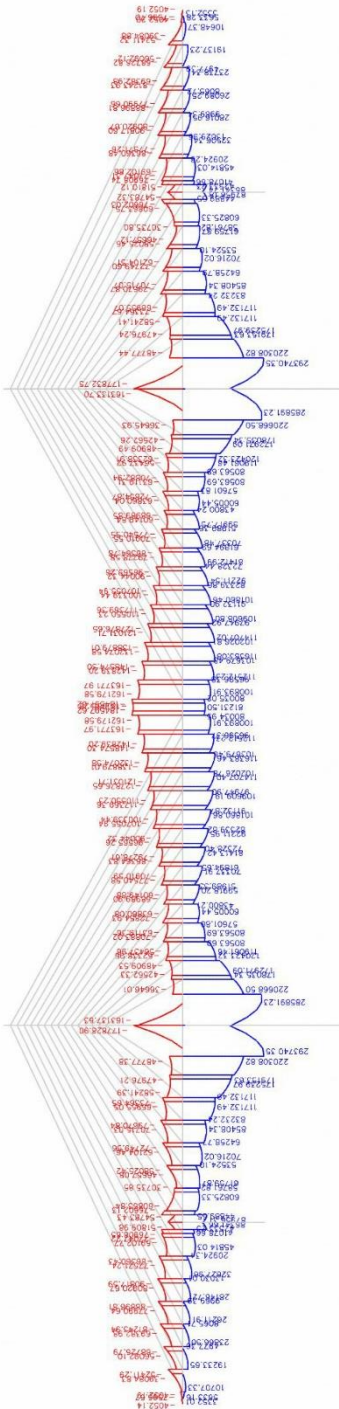


Obr. 4.10.3: N – MSP Char. kombinace

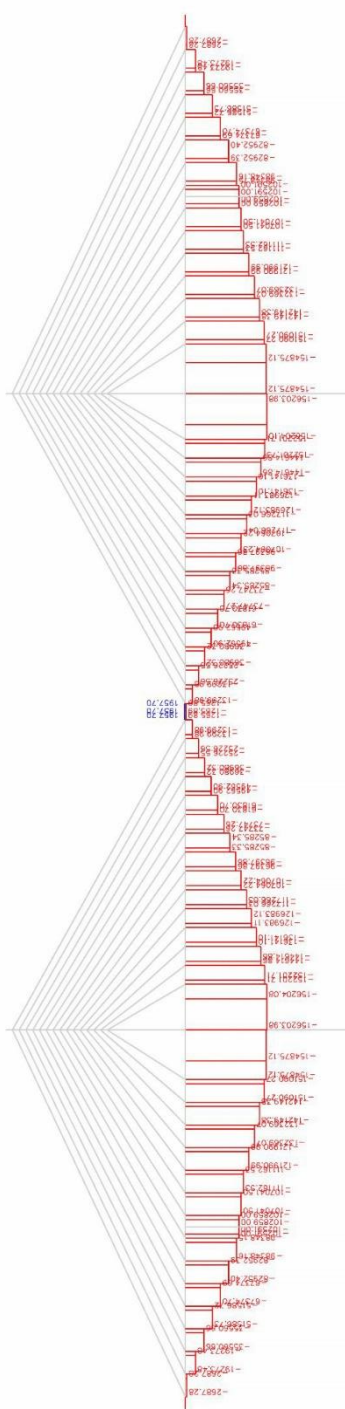


Obr. 4.10.4: Vz – MSP Char. kombinace

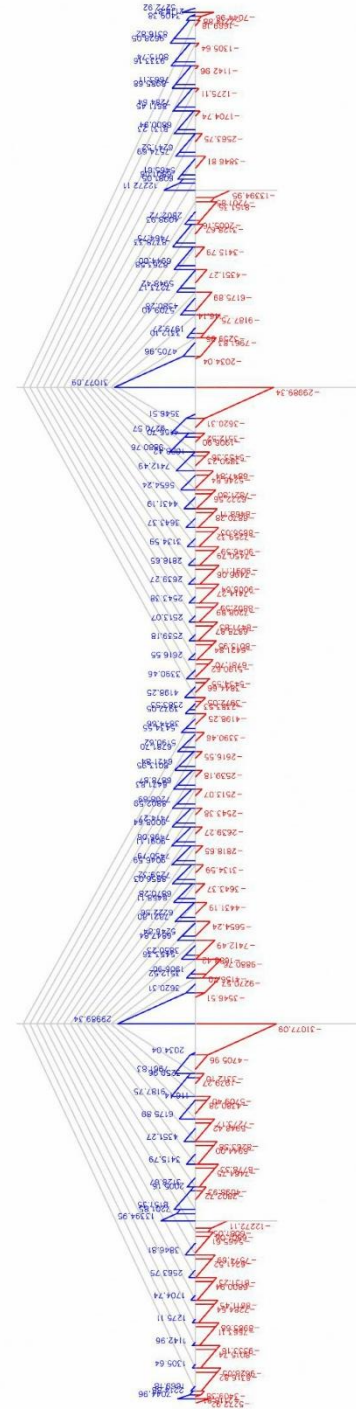
4.10.1.2 Častá kombinace



Obr. 4.10.5: My – MSP Častá kombinace

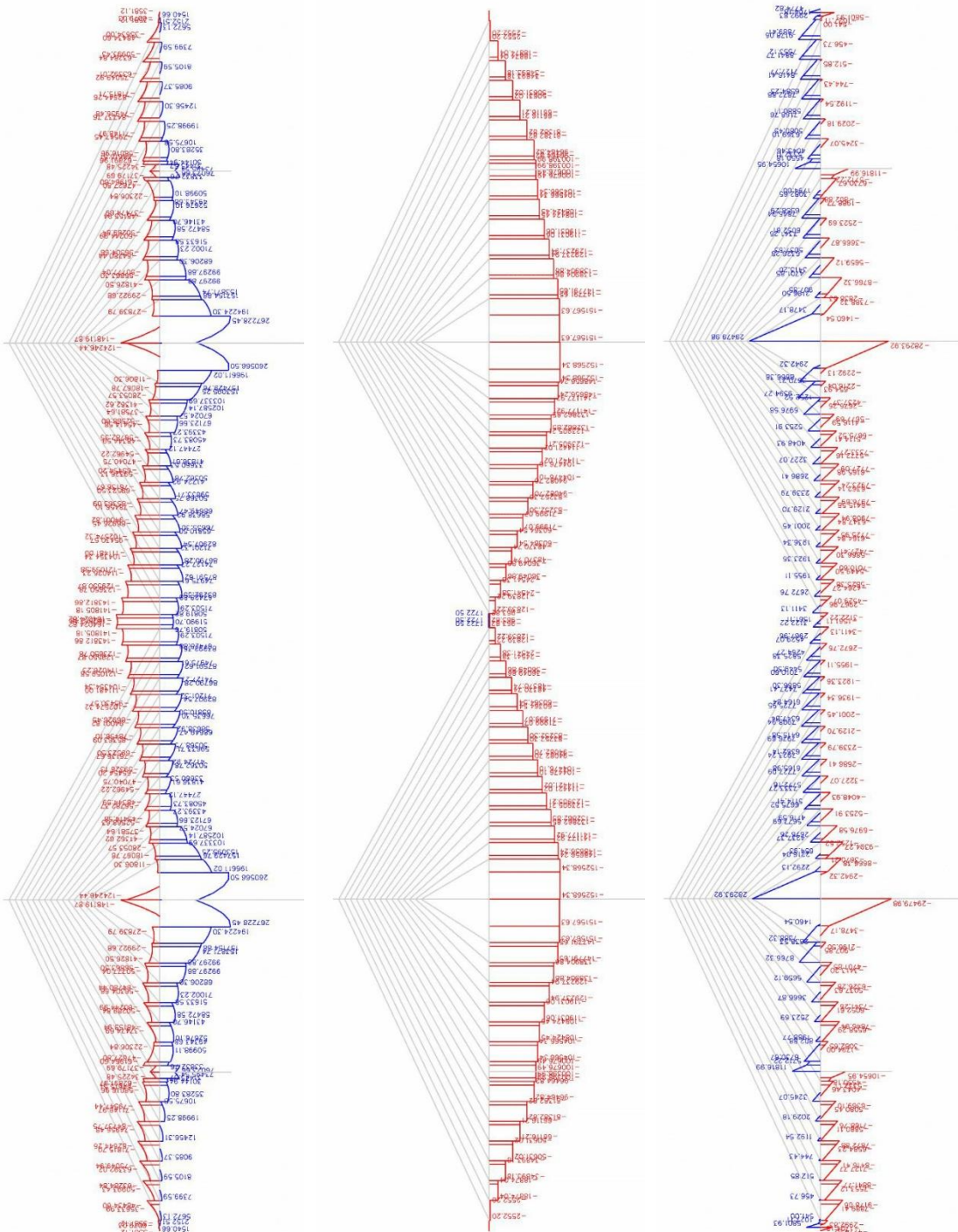


Obr. 4.10.6: N – MSP Častá kombinace



Obr. 4.10.7: Vz – MSP Častá kombinace

4.10.1.3 Kvazistálá kombinace

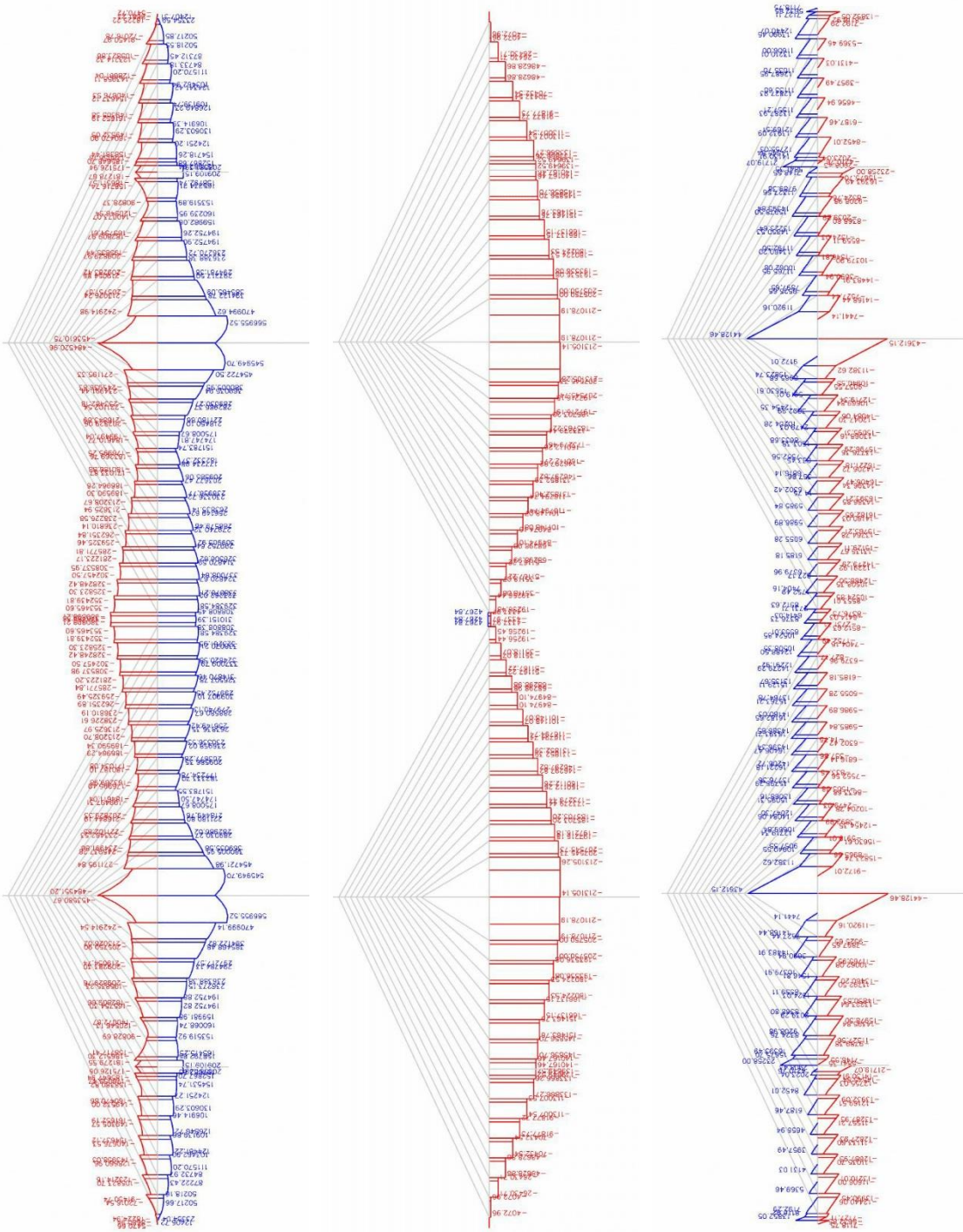


Obr. 4.10.8: My – MSP Kvazi.
kombinace

Obr. 4.10.9: N – MSP Kvazi.
kombinace

Obr. 4.10.10: Vz – MSP Kvazi.
kombinace

4.10.2 Vnitřní síly od kombinací pro MSÚ



Obr. 4.10.11: My – MSU

Obr. 4.10.12: N – MSU

Obr. 4.10.13: Vz – MSU

4.11 Mezní stavy použitelnosti

V mezním stavu použitelnosti je posouzeno omezení napětí v betonu hlavní nosné konstrukce (mostovky) a v závěsech, a to pro všechny fáze výstavby a provozu. Dále je posouzen rovněž průhyb mostovky.

4.11.1 Omezení napětí v betonu

4.11.1.1 *Během výstavby*

Konstrukce je během výstavby posouzena ve dvou nejdůležitějších okamžicích v každé fázi výstavby – vnesení předpětí v čase 7 dní od vybetonování nové lamely (L-i-P) a při zatížení lamely betonážním vozíkem pro lamelu novou v čase 13 dní od vybetonování (L-i-V). Hodnoty pevnosti betonu jsou vypočteny dle funkce β_{cc} . Tahová a tlaková pevnost pro uvedené časy je níže.

$$f_{ck}(t=7d) = 39,5 \text{ MPa}$$

$$f_{ctm}(t=7d) = 3,4 \text{ MPa}$$

$$f_{ck}(t=13d) = 44,8 \text{ MPa}$$

$$f_{ctm}(t=13d) = 3,7 \text{ MPa}$$

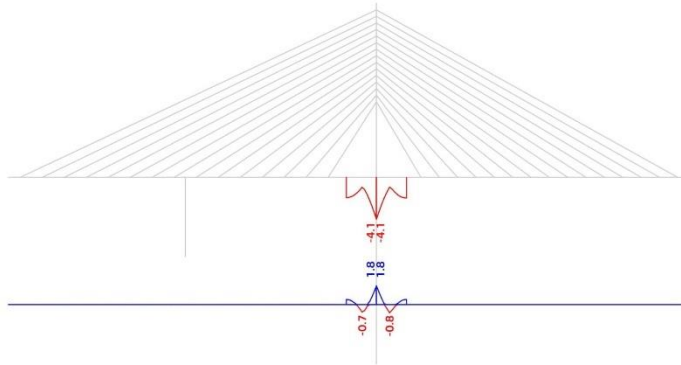
Stáří lamel v jednotlivých fázích výstavby je uvedeno v Tab. 4.11.1. K příslušným časům je uvedeno omezení napětí v betonu pro charakteristickou kombinaci $0,6 f_{ck}(t)$ v Tab. 4.11.2 a kvazistálou kombinaci $0,45 f_{ck}(t)$ v Tab. 4.11.3. Tahová napětí jsou omezena hodnotou $1,0 f_{ctm}(t)$ v Tab. 4.11.4.

Na obrázcích níže je zobrazen průběh normálových napětí při dolním a horním povrchu mostovky v jednotlivých fázích výstavby spočtené v časově závislé analýze konstrukce, které již zahrnují časově závislé jevy jako smršťování a dotvarování. Ve všech fázích výše uvedeným podmínkám je vyhověno.

- **L-1-P**

Charakteristická kombinace:

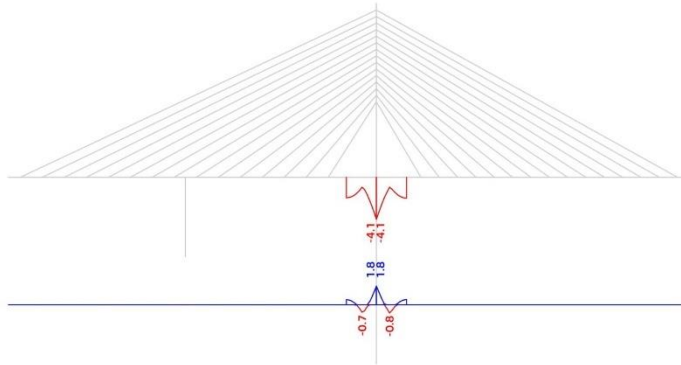
$\sigma_{c,d,Ek}$ [MPa]
Dolní povrch:



$\sigma_{c,h,Ek}$ [MPa]
Horní povrch:

Kvazistálá kombinace:

$\sigma_{c,d,Ek}$ [MPa]
Dolní povrch:



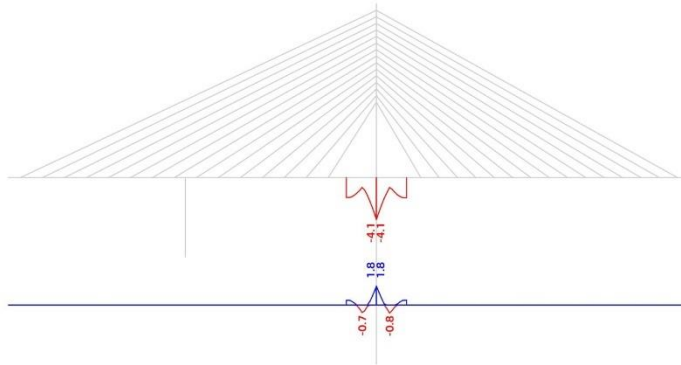
$\sigma_{c,h,Ek}$ [MPa]
Horní povrch:

Obr. 4.11.1: σ_c , fáze L-1-P

- **L-1-V**

Charakteristická kombinace:

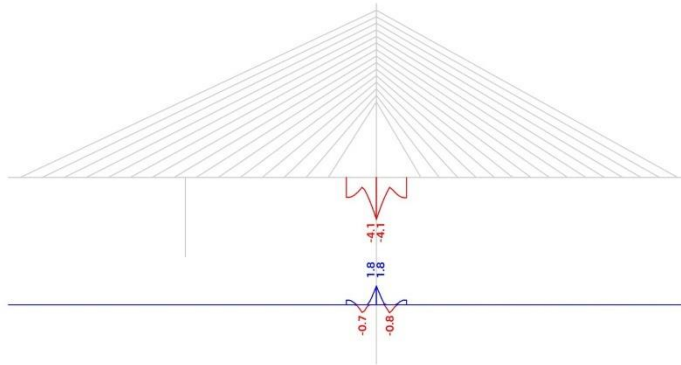
$\sigma_{c,d,Ek}$ [MPa]
Dolní povrch:



$\sigma_{c,h,Ek}$ [MPa]
Horní povrch:

Kvazistálá kombinace:

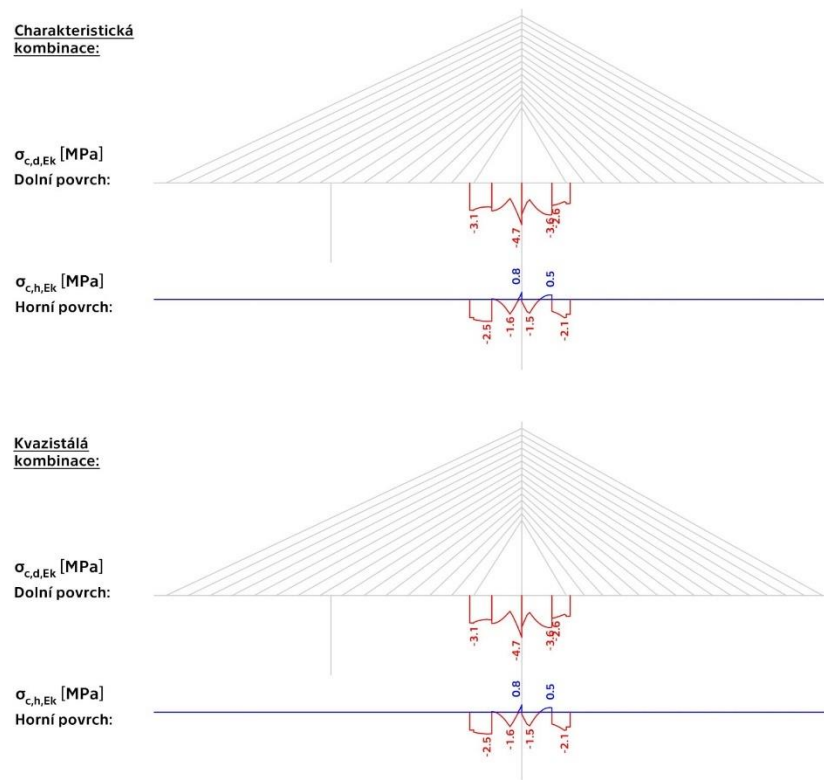
$\sigma_{c,d,Ek}$ [MPa]
Dolní povrch:



$\sigma_{c,h,Ek}$ [MPa]
Horní povrch:

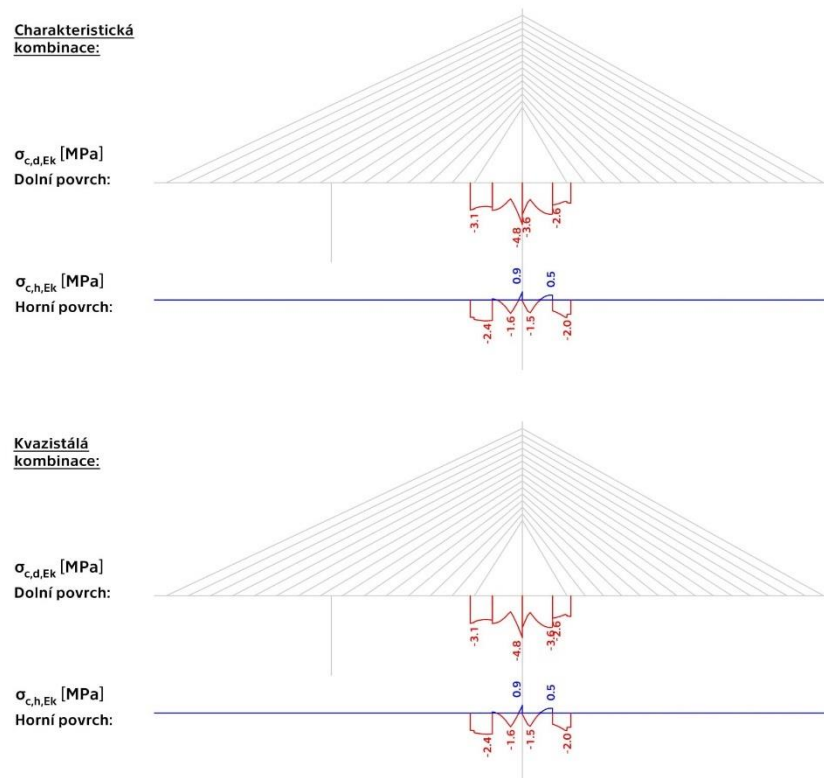
Obr. 4.11.2: σ_c , fáze L-1-V

- **L-2-P**



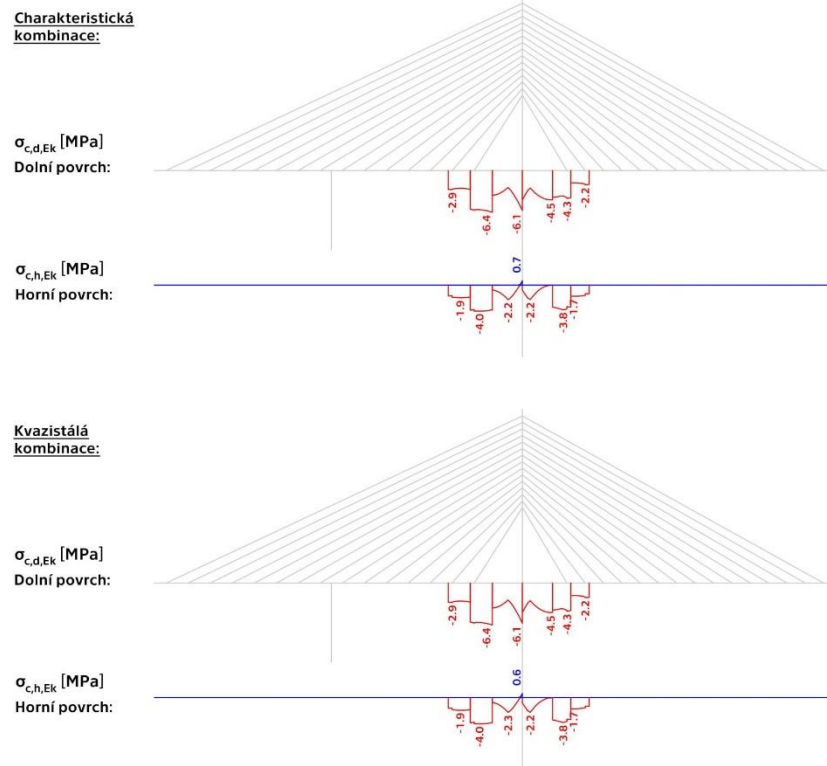
Obr. 4.11.3: σ_c , fáze L-2-P

- **L-2-V**



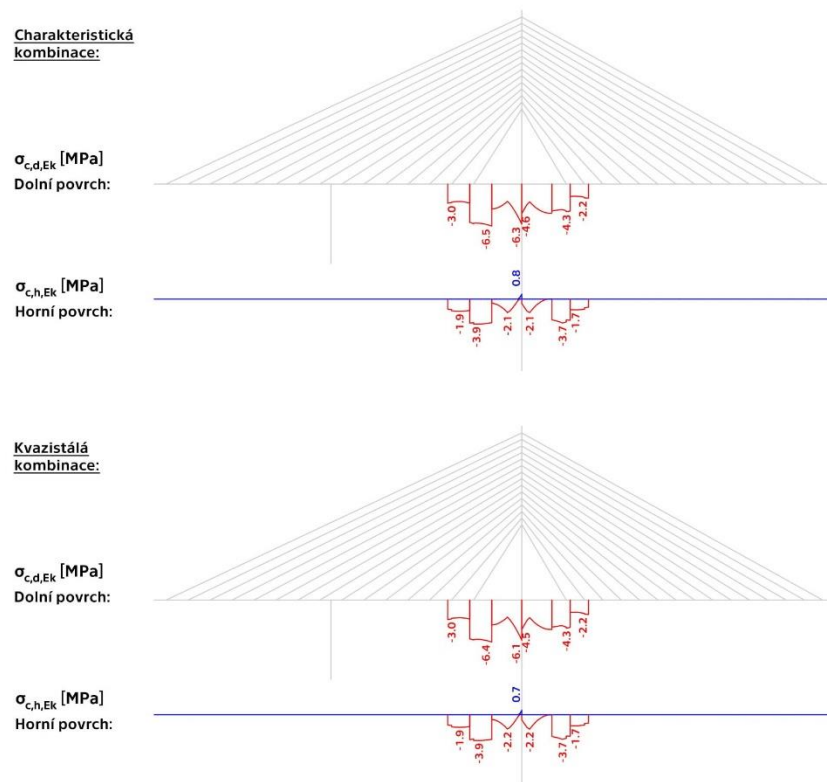
Obr. 4.11.4: σ_c , fáze L-2-V

- **L-3-P**



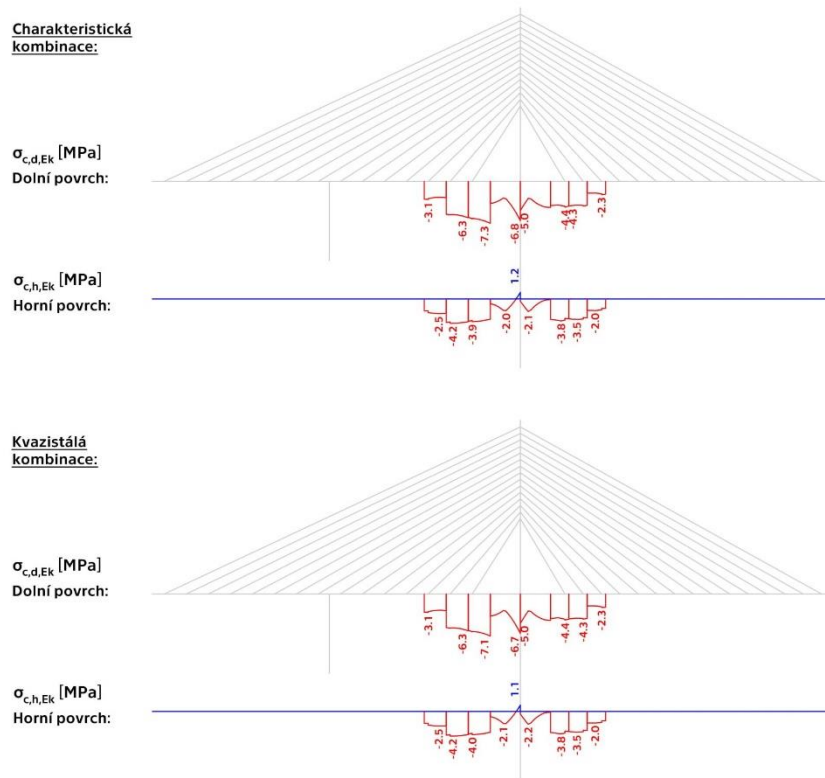
Obr. 4.11.5: σ_c , fáze L-3-P

- **L-3-V**



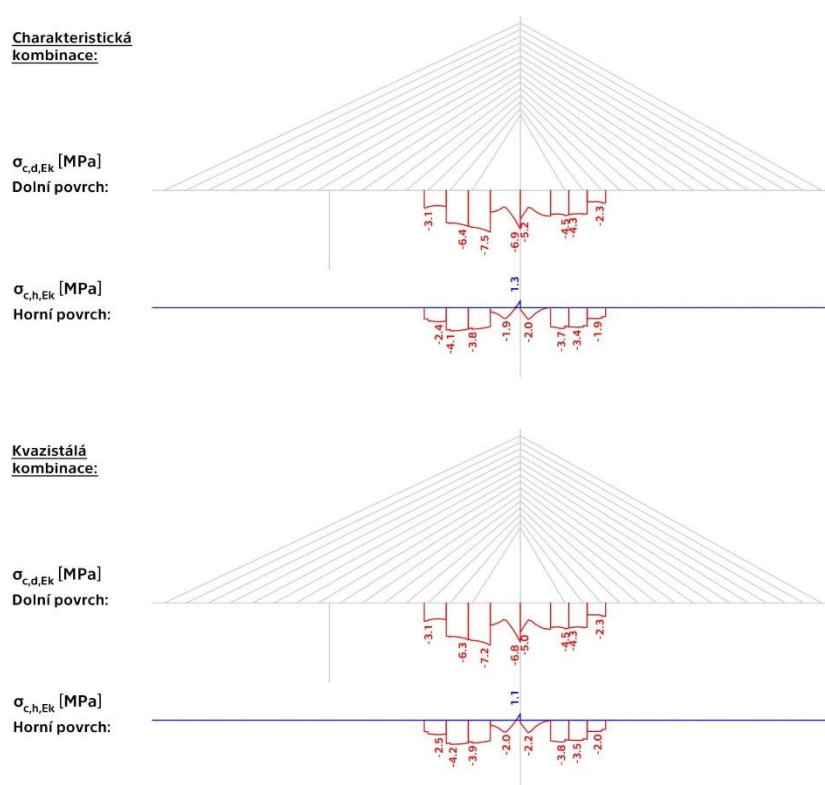
Obr. 4.11.6: σ_c , fáze L-3-V

- **L-4-P**



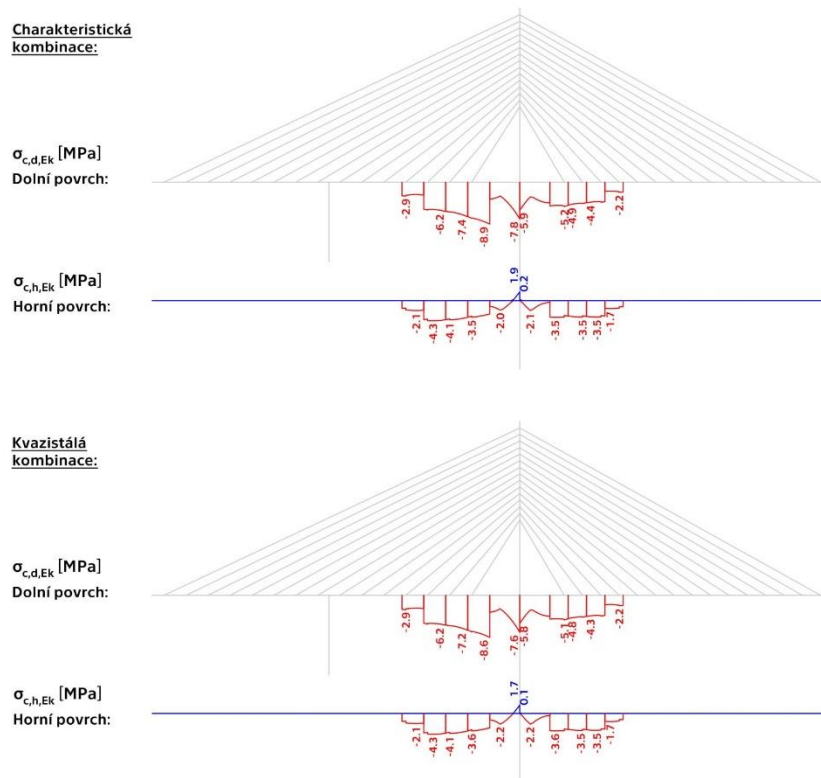
Obr. 4.11.7: σ_c , fáze L-4-P

- **L-4-V**



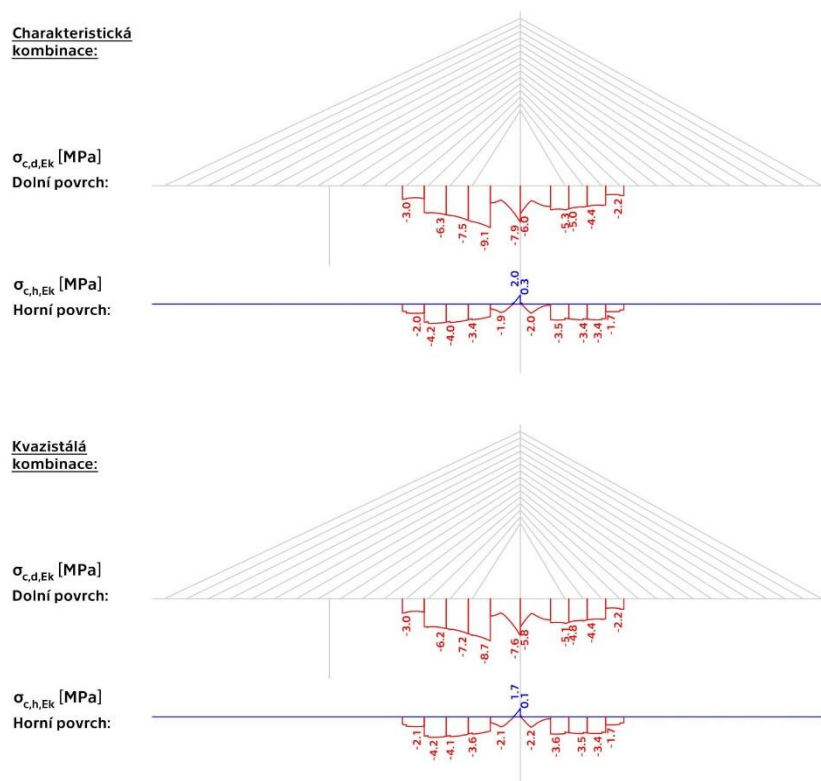
Obr. 4.11.8: σ_c , fáze L-4-V

• **L-5-P**



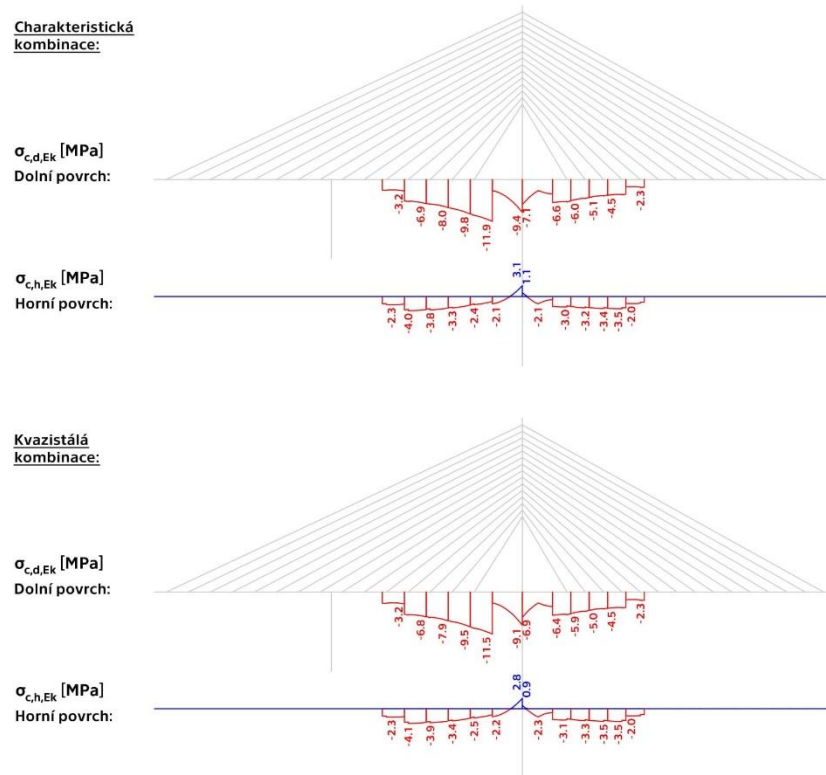
Obr. 4.11.9: σ_c , fáze L-5-P

• **L-5-V**



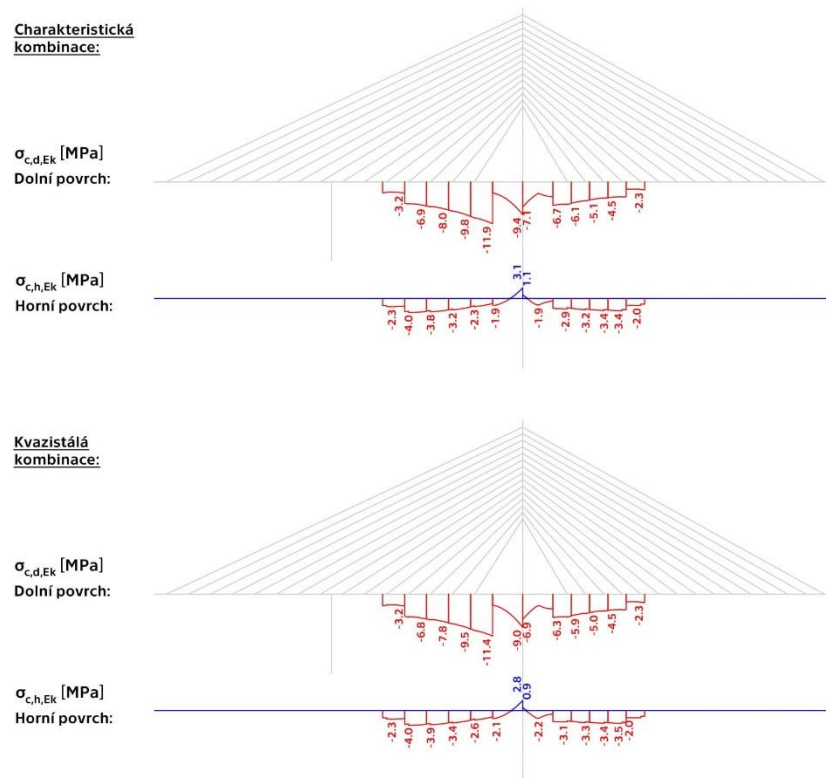
Obr. 4.11.10: σ_c , fáze L-5-V

- L-6-P**



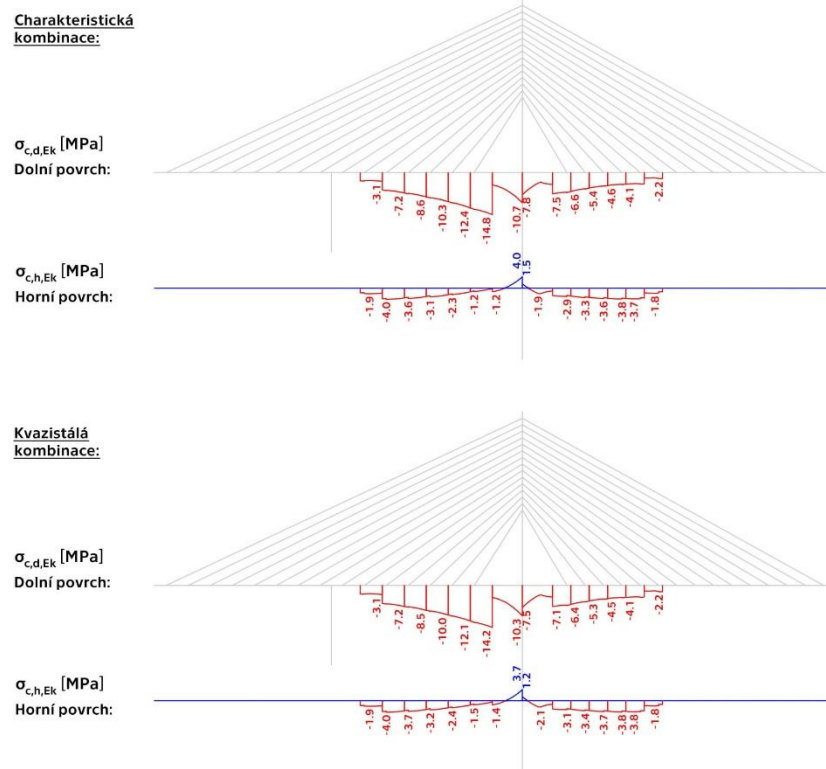
Obr. 4.11.11: σ_c fáze L-6-P

- L-6-V**



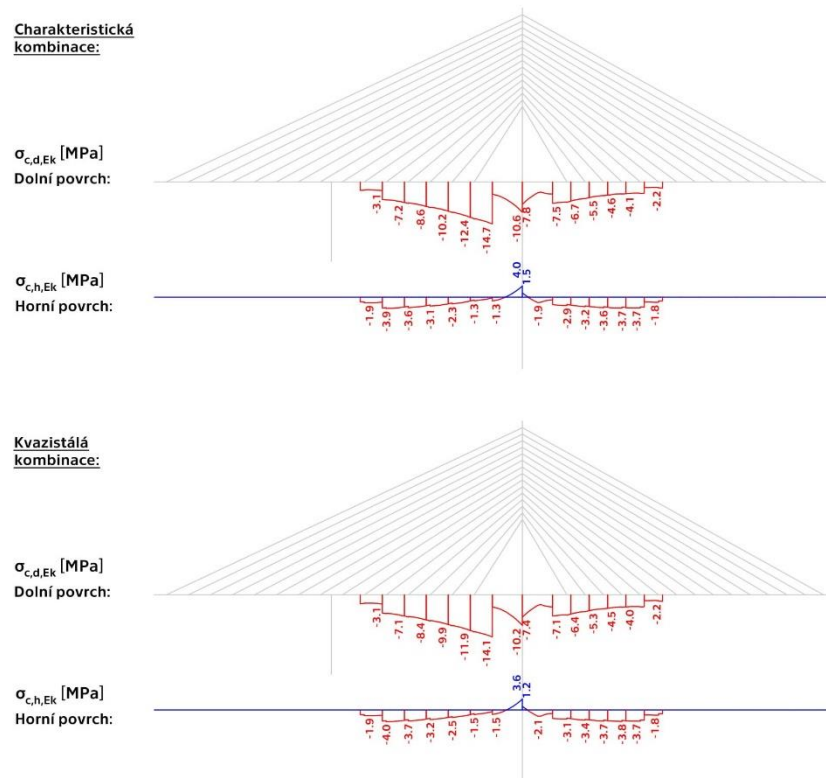
Obr. 4.11.12: σ_c fáze L-6-V

- **L-7-P**



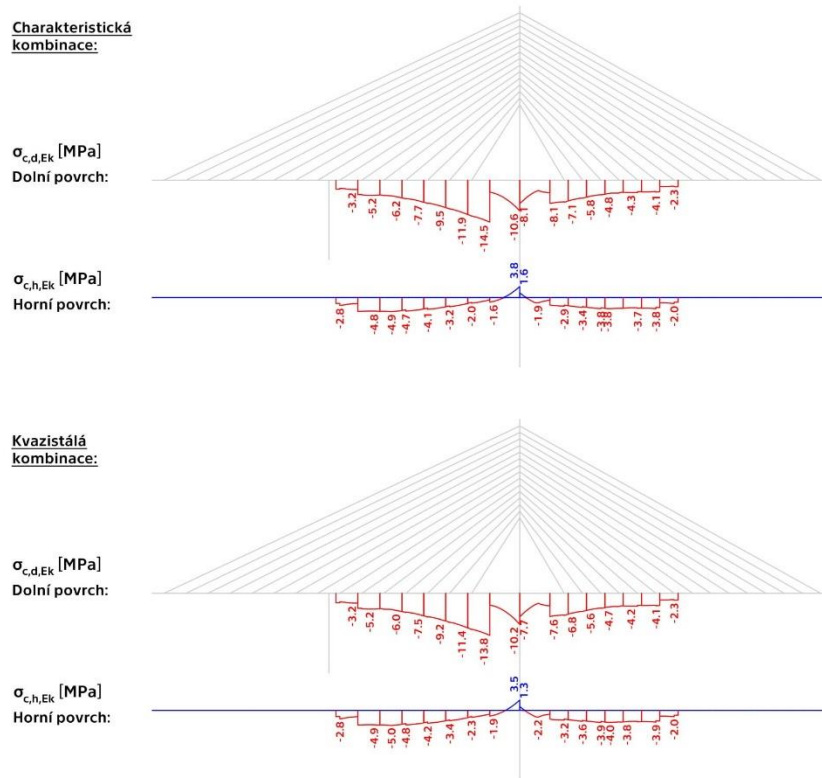
Obr. 4.11.13: σ_c fáze L-7-P

- **L-7-V**



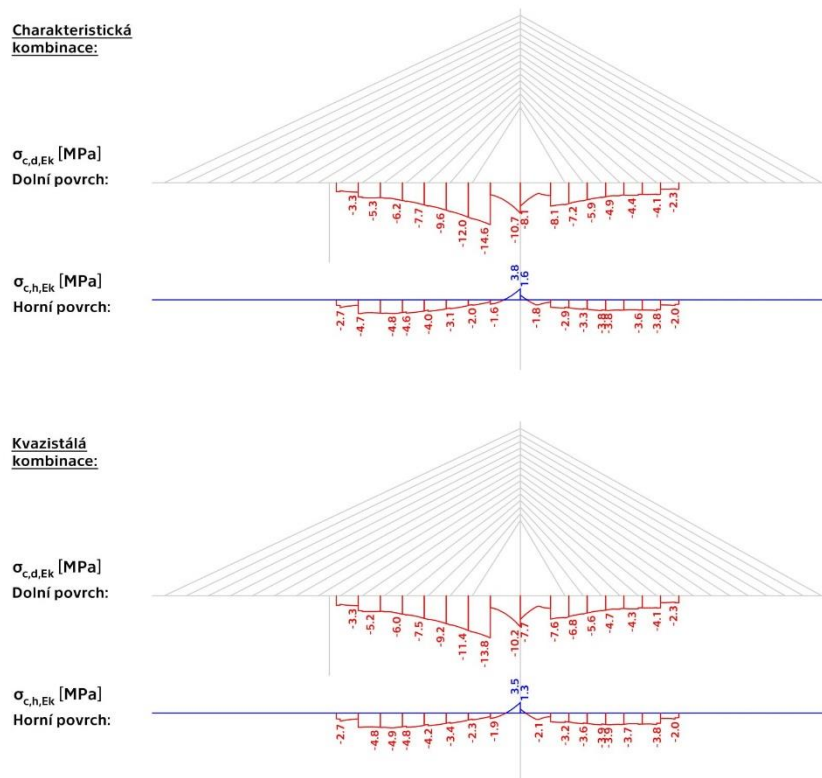
Obr. 4.11.14: σ_c fáze L-7-V

- L-8-P**



Obr. 4.11.15: σ_c fáze L-8-P

- L-8-V**

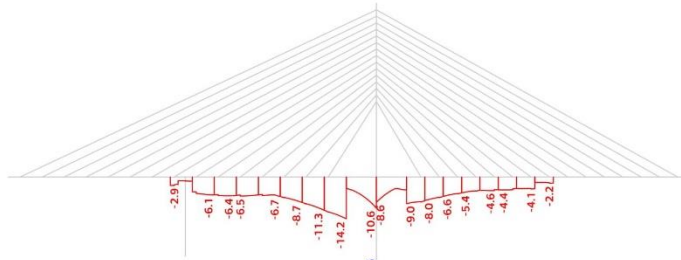


Obr. 4.11.16: σ_c fáze L-8-V

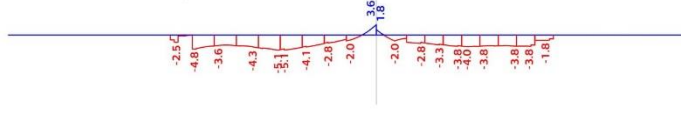
- **L-9-P**

Charakteristická kombinace:

$\sigma_{c,d,Ek}$ [MPa]
Dolní povrch:

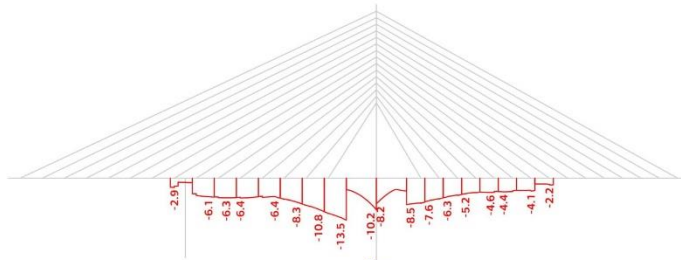


$\sigma_{c,h,Ek}$ [MPa]
Horní povrch:

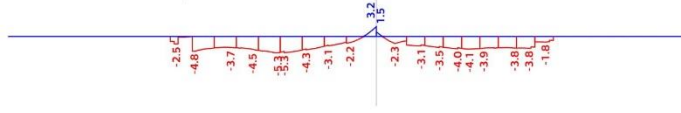


Kvazistálá kombinace:

$\sigma_{c,d,Ek}$ [MPa]
Dolní povrch:



$\sigma_{c,h,Ek}$ [MPa]
Horní povrch:

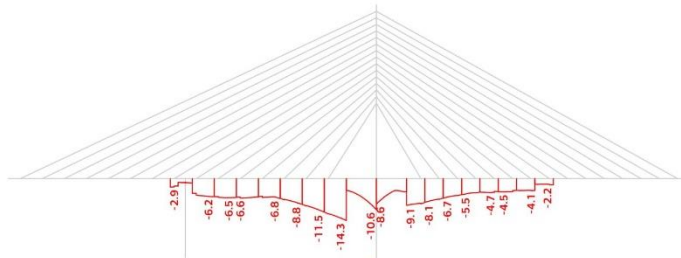


Obr. 4.11.17: σ_c fáze L-9-P

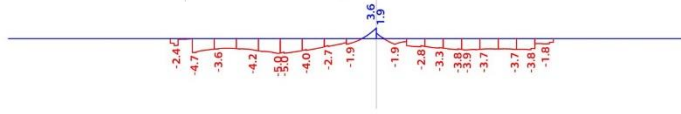
- **L-9-V**

Charakteristická kombinace:

$\sigma_{c,d,Ek}$ [MPa]
Dolní povrch:

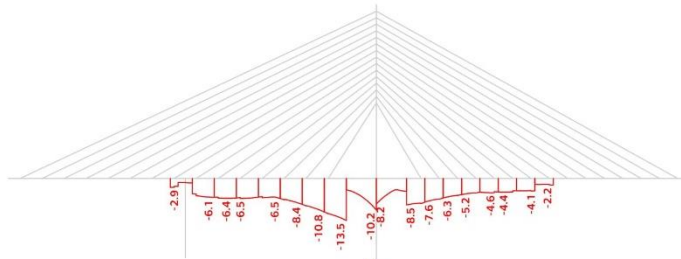


$\sigma_{c,h,Ek}$ [MPa]
Horní povrch:

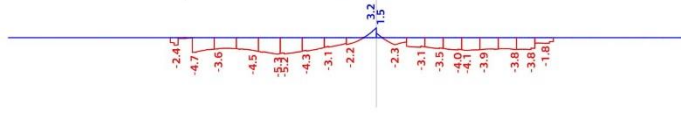


Kvazistálá kombinace:

$\sigma_{c,d,Ek}$ [MPa]
Dolní povrch:



$\sigma_{c,h,Ek}$ [MPa]
Horní povrch:

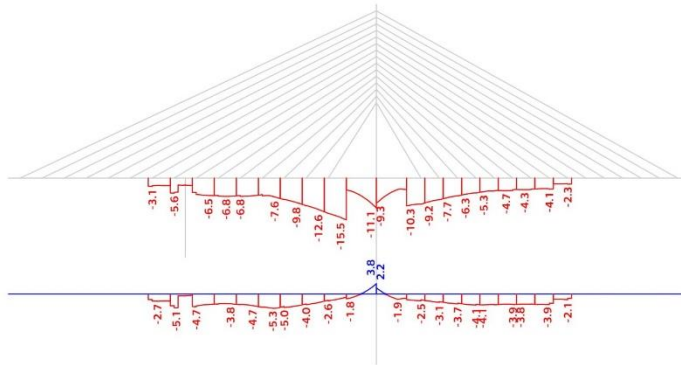


Obr. 4.11.18: σ_c fáze L-9-V

- **L-10-P**

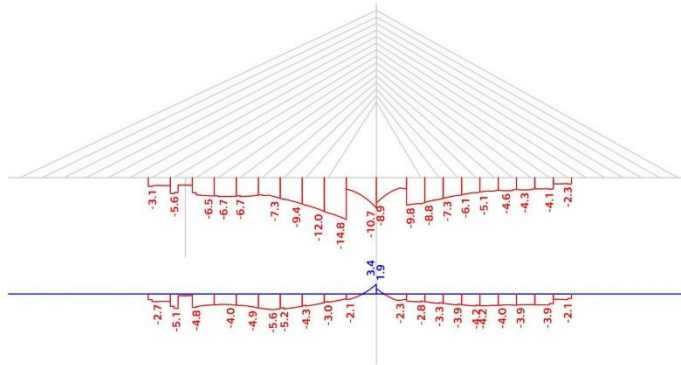
Charakteristická kombinace:

$\sigma_{c,d,Ek}$ [MPa]
Dolní povrch:



Kvazistálá kombinace:

$\sigma_{c,d,Ek}$ [MPa]
Dolní povrch:

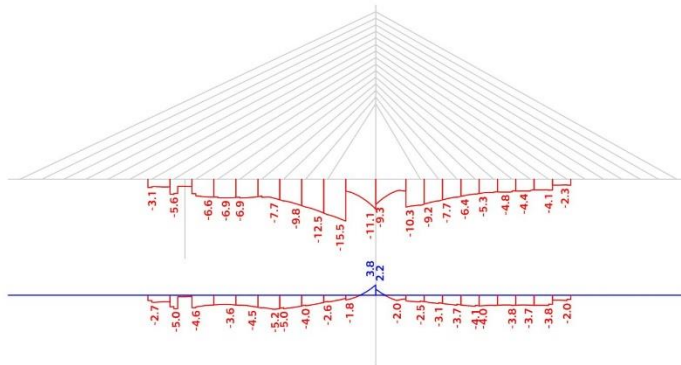


Obr. 4.11.19: σ_c fáze L-10-P

- **L-10-V**

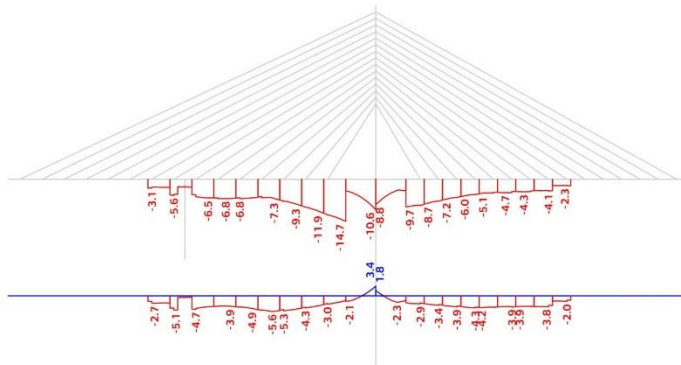
Charakteristická kombinace:

$\sigma_{c,d,Ek}$ [MPa]
Dolní povrch:



Kvazistálá kombinace:

$\sigma_{c,d,Ek}$ [MPa]
Dolní povrch:

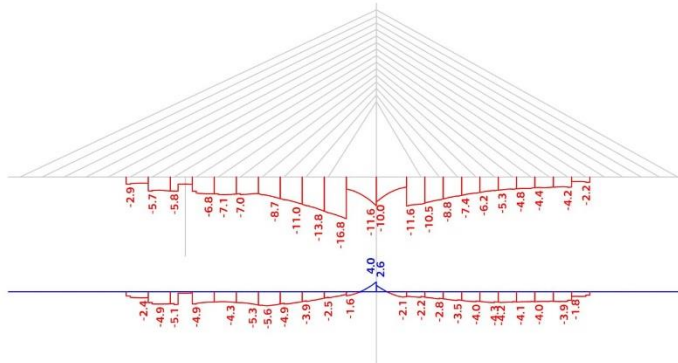


Obr. 4.11.20: σ_c fáze L-10-V

• **L-11-P**

Charakteristická kombinace:

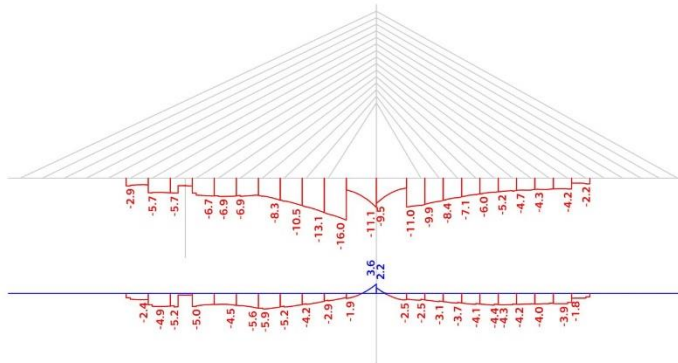
$\sigma_{c,d,Ek}$ [MPa]
Dolní povrch:



$\sigma_{c,h,Ek}$ [MPa]
Horní povrch:

Kvazistálá kombinace:

$\sigma_{c,d,Ek}$ [MPa]
Dolní povrch:



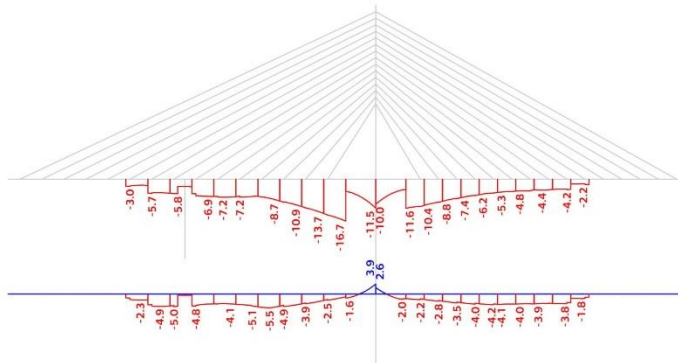
$\sigma_{c,h,Ek}$ [MPa]
Horní povrch:

Obr. 4.11.21: σ_c fáze L-11-P

• **L-11-V**

Charakteristická kombinace:

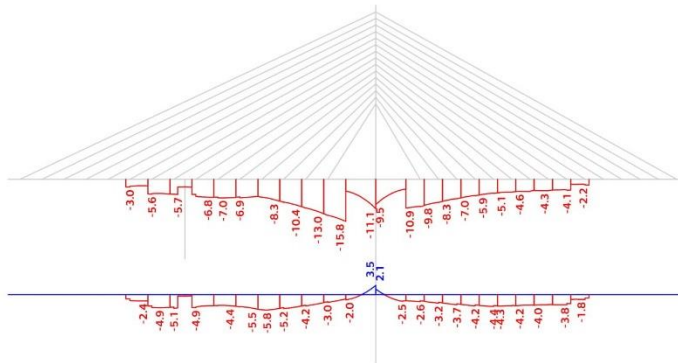
$\sigma_{c,d,Ek}$ [MPa]
Dolní povrch:



$\sigma_{c,h,Ek}$ [MPa]
Horní povrch:

Kvazistálá kombinace:

$\sigma_{c,d,Ek}$ [MPa]
Dolní povrch:



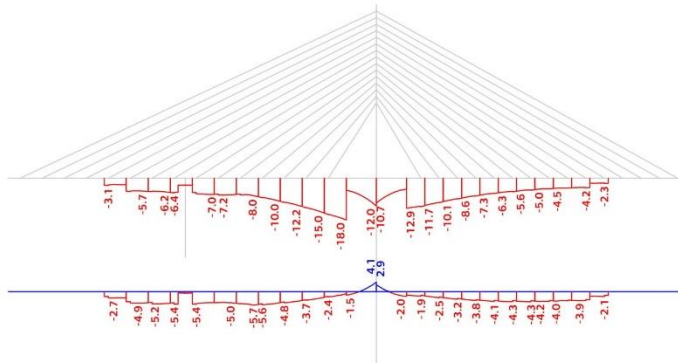
$\sigma_{c,h,Ek}$ [MPa]
Horní povrch:

Obr. 4.11.22: σ_c fáze L-11-V

- **L-12-P**

Charakteristická kombinace:

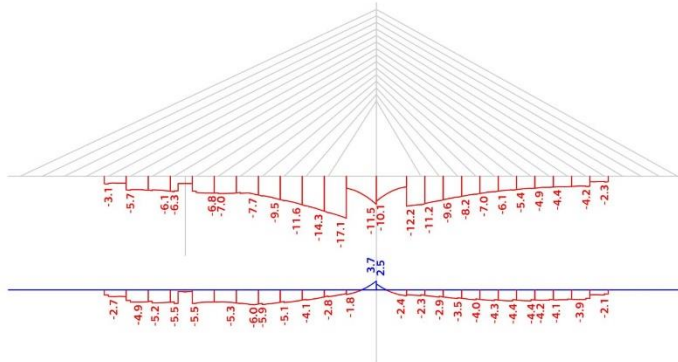
$\sigma_{c,d,Ek}$ [MPa]
Dolní povrch:



$\sigma_{c,h,Ek}$ [MPa]
Horní povrch:

Kvazistálá kombinace:

$\sigma_{c,d,Ek}$ [MPa]
Dolní povrch:



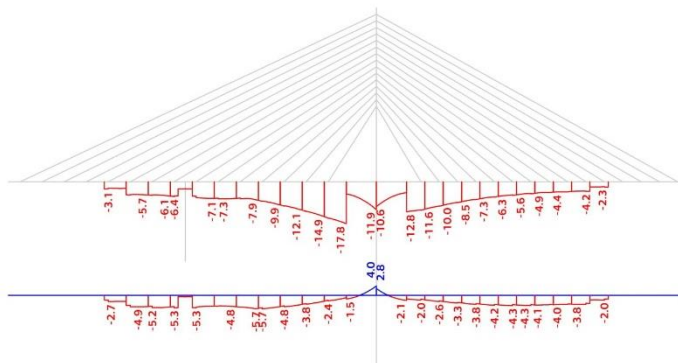
$\sigma_{c,h,Ek}$ [MPa]
Horní povrch:

Obr. 4.11.23: σ_c , fáze L-12-P

- **L-12-V**

Charakteristická kombinace:

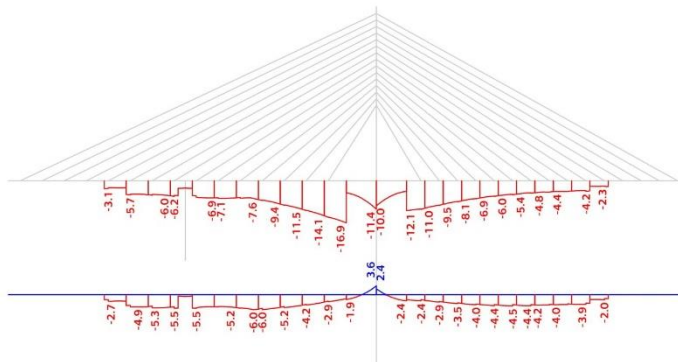
$\sigma_{c,d,Ek}$ [MPa]
Dolní povrch:



$\sigma_{c,h,Ek}$ [MPa]
Horní povrch:

Kvazistálá kombinace:

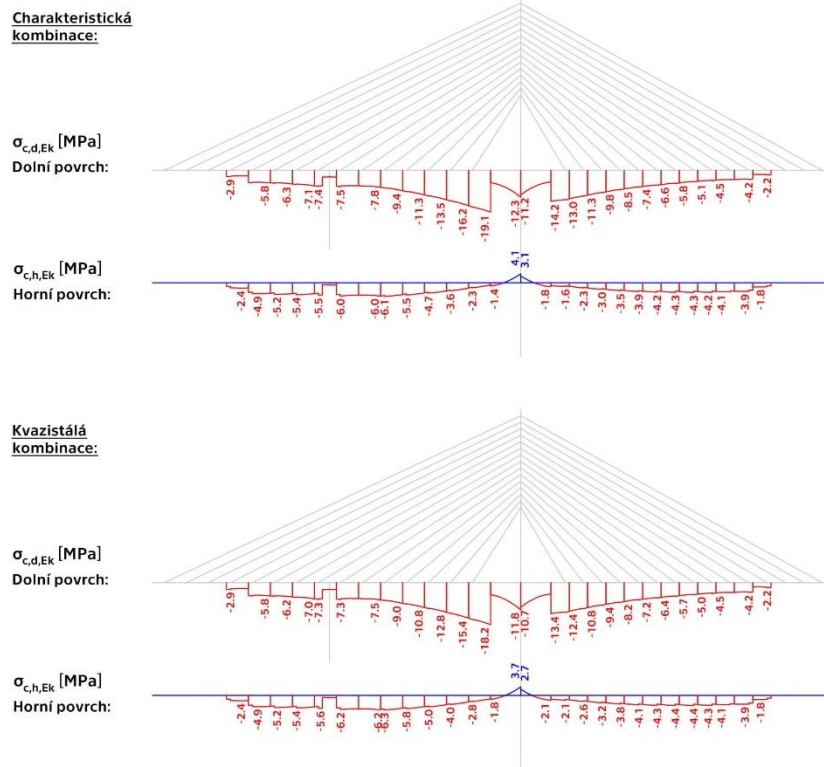
$\sigma_{c,d,Ek}$ [MPa]
Dolní povrch:



$\sigma_{c,h,Ek}$ [MPa]
Horní povrch:

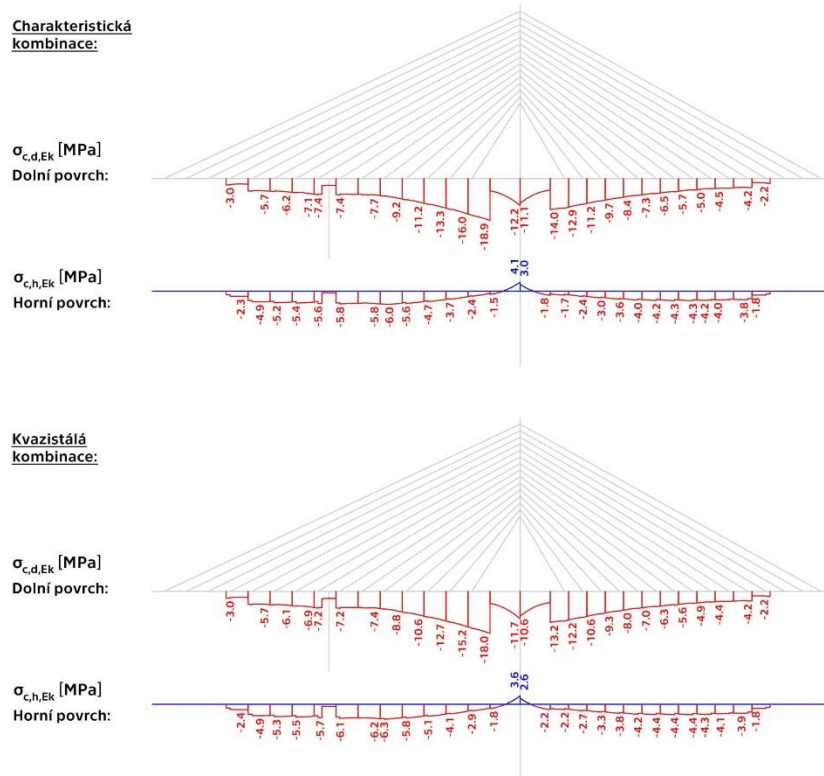
Obr. 4.11.24: σ_c , fáze L-12-V

- **L-13-P**



Obr. 4.11.25: σ_c , fáze L-13-P

- **L-13-V**

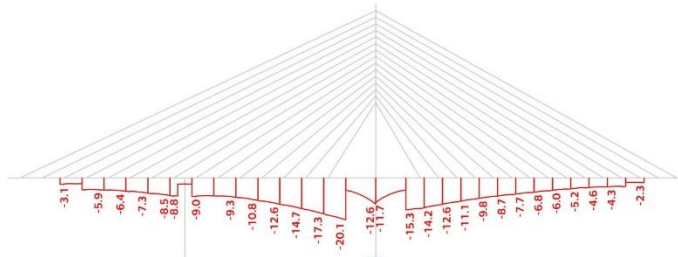


Obr. 4.11.26: σ_c , fáze L-13-V

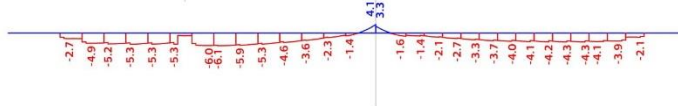
• **L-14-P**

Charakteristická kombinace:

$\sigma_{c,d,Ek}$ [MPa]
Dolní povrch:

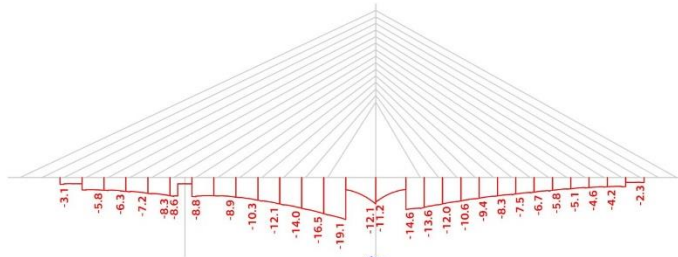


$\sigma_{c,h,Ek}$ [MPa]
Horní povrch:



Kvazistálá kombinace:

$\sigma_{c,d,Ek}$ [MPa]
Dolní povrch:



$\sigma_{c,h,Ek}$ [MPa]
Horní povrch:

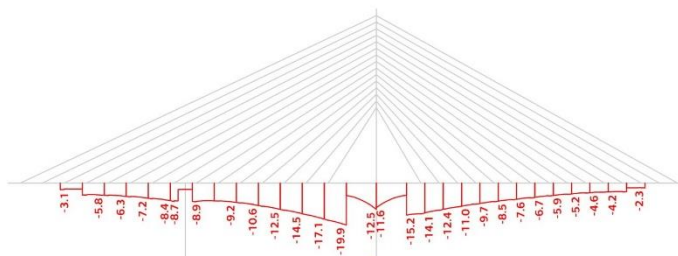


Obr. 4.11.27: σ_c , fáze L-14-P

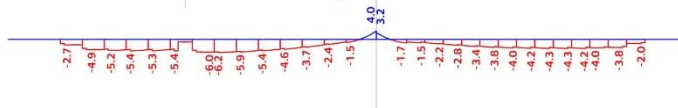
• **L-14-V**

Charakteristická kombinace:

$\sigma_{c,d,Ek}$ [MPa]
Dolní povrch:

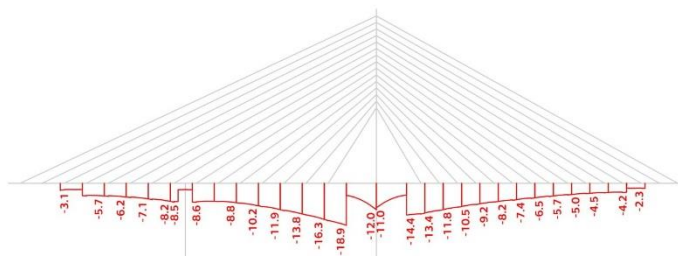


$\sigma_{c,h,Ek}$ [MPa]
Horní povrch:

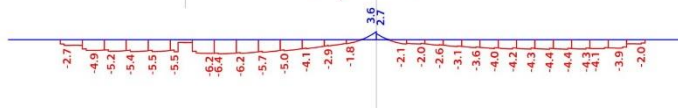


Kvazistálá kombinace:

$\sigma_{c,d,Ek}$ [MPa]
Dolní povrch:



$\sigma_{c,h,Ek}$ [MPa]
Horní povrch:

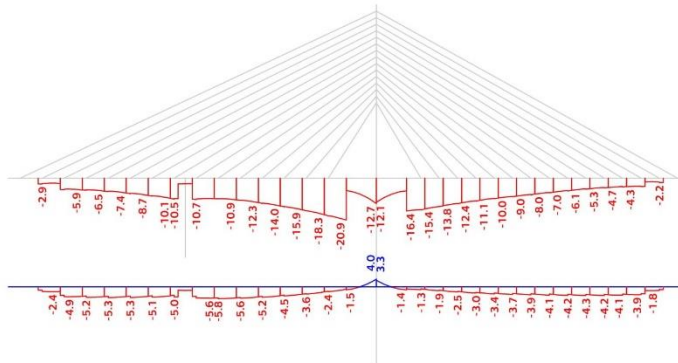


Obr. 4.11.28: σ_c , fáze L-14-V

- L-15-P**

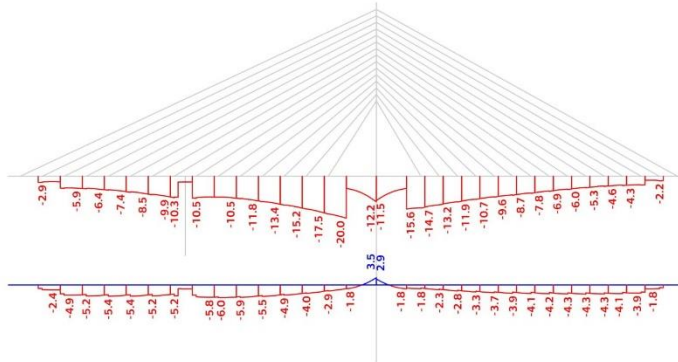
Charakteristická kombinace:

$\sigma_{c,d,Ek}$ [MPa]
Dolní povrch:



Kvazistálá kombinace:

$\sigma_{c,d,Ek}$ [MPa]
Dolní povrch:

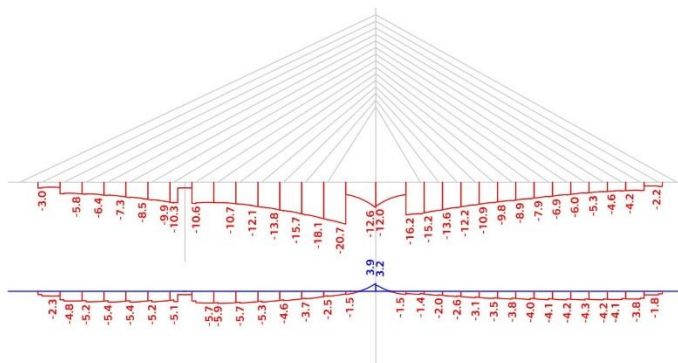


Obr. 4.11.29: σ_c , fáze L-15-P

- L-15-V**

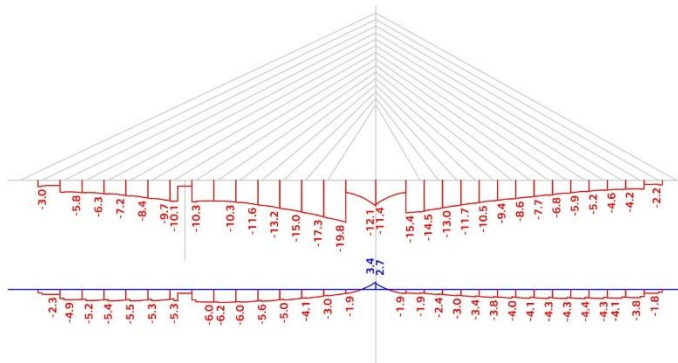
Charakteristická kombinace:

$\sigma_{c,d,Ek}$ [MPa]
Dolní povrch:



Kvazistálá kombinace:

$\sigma_{c,d,Ek}$ [MPa]
Dolní povrch:

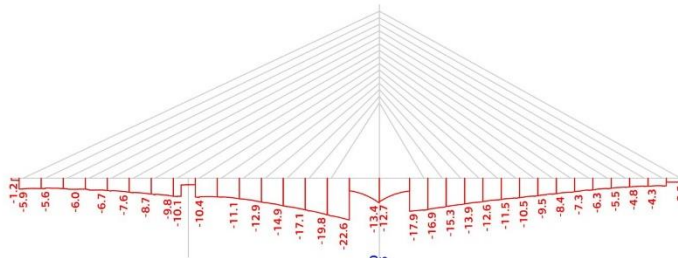


Obr. 4.11.30: σ_c , fáze L-15-V

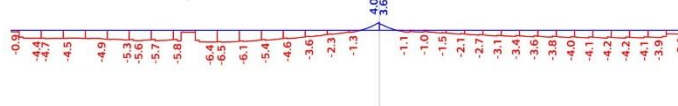
- **L-16-P**

Charakteristická kombinace:

$\sigma_{c,d,Ek}$ [MPa]
Dolní povrch:

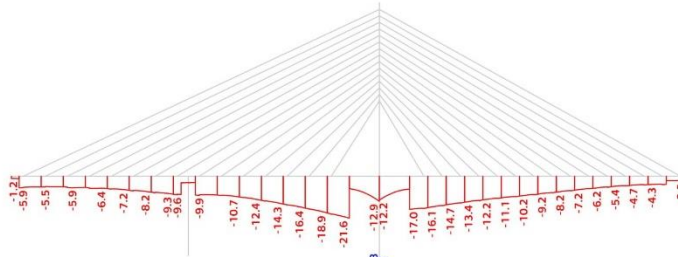


$\sigma_{c,h,Ek}$ [MPa]
Horní povrch:

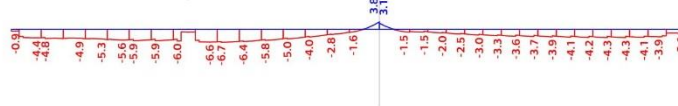


Kvazistálá kombinace:

$\sigma_{c,d,Ek}$ [MPa]
Dolní povrch:

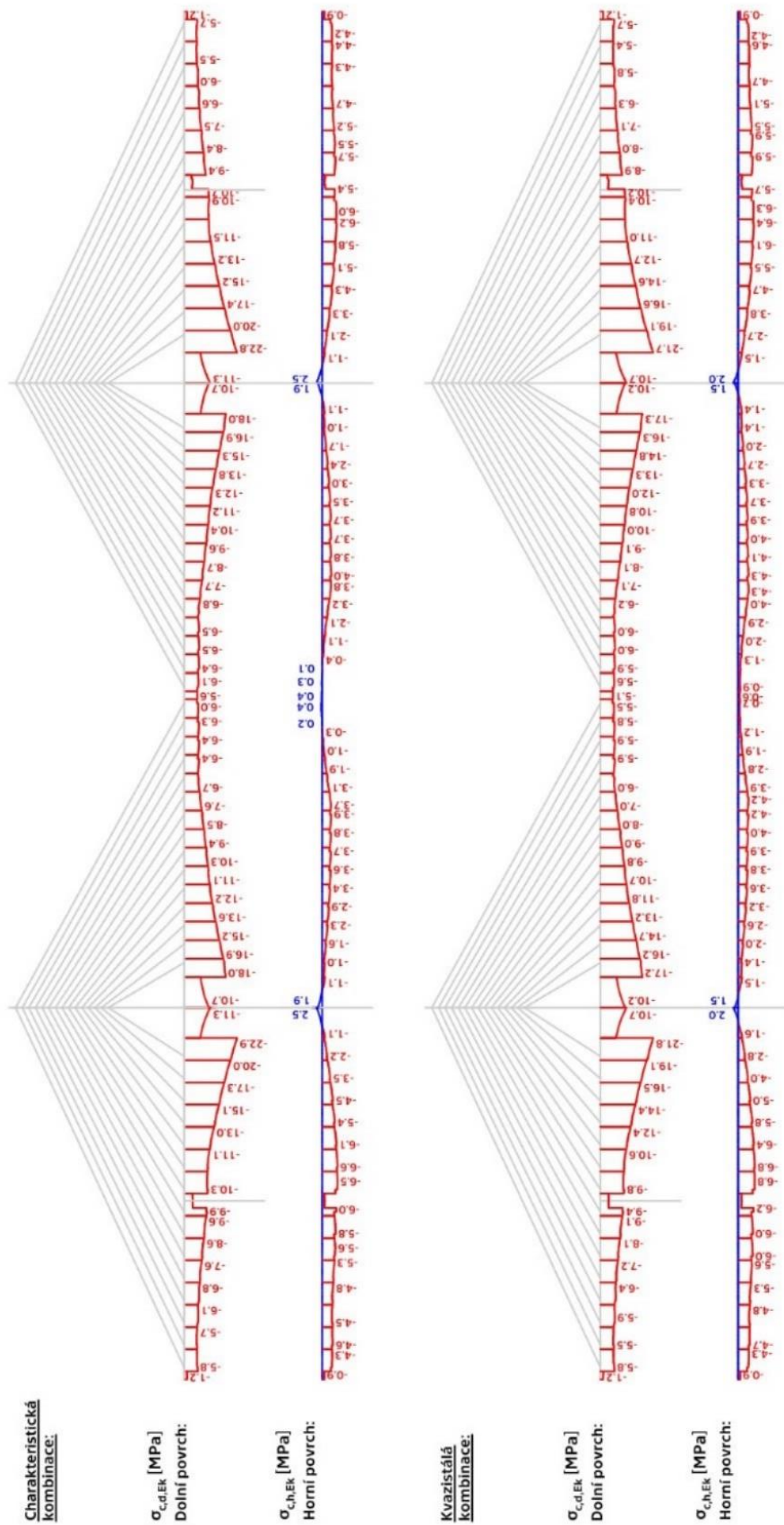


$\sigma_{c,h,Ek}$ [MPa]
Horní povrch:



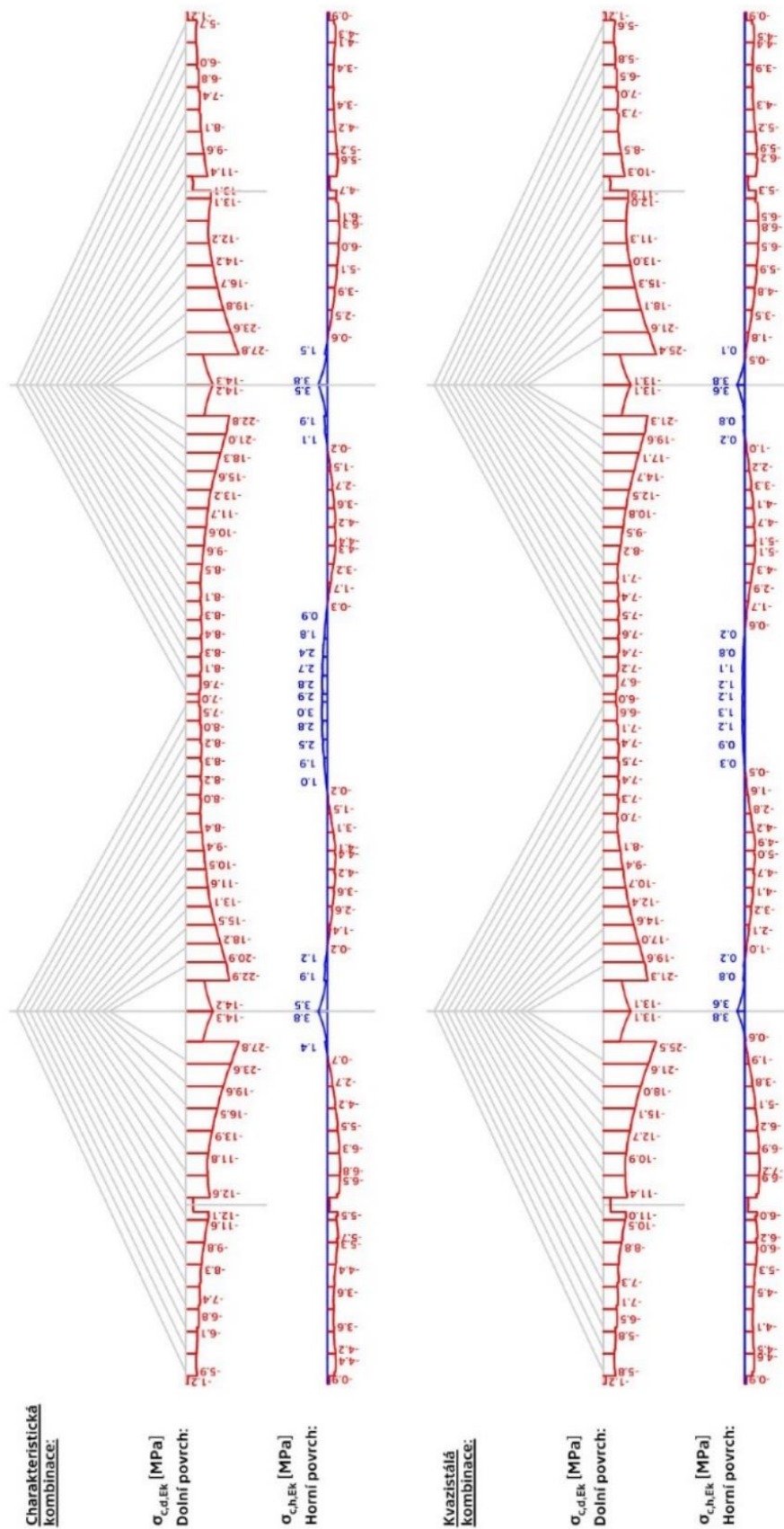
Obr. 4.11.31: σ_c , fáze L-16-P

- **L-17-P**



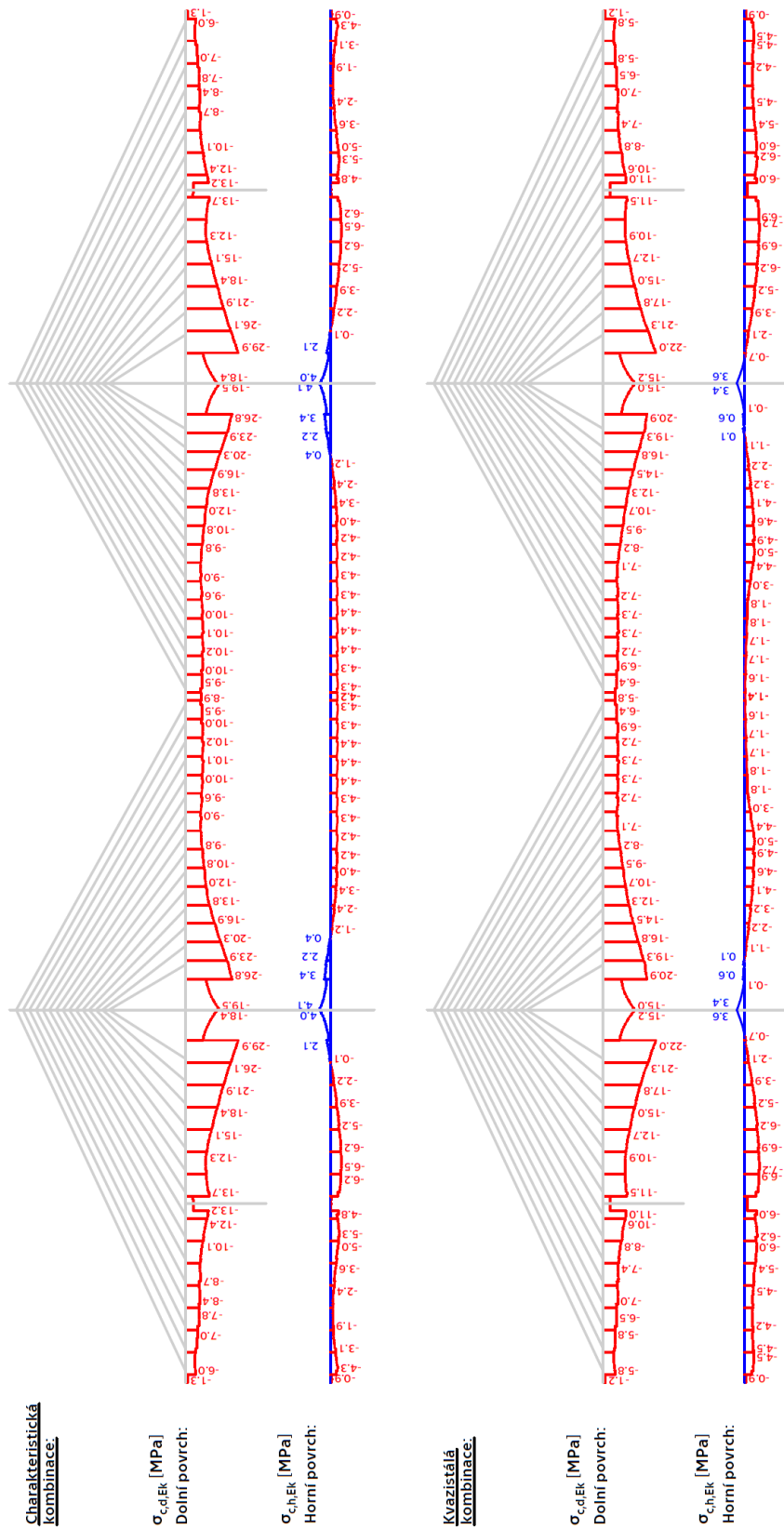
Obr. 4.11.32: σ_c , fáze L-17-P

- **KV (vnesení ostatního stálého zat., dopnutí závěsů)**



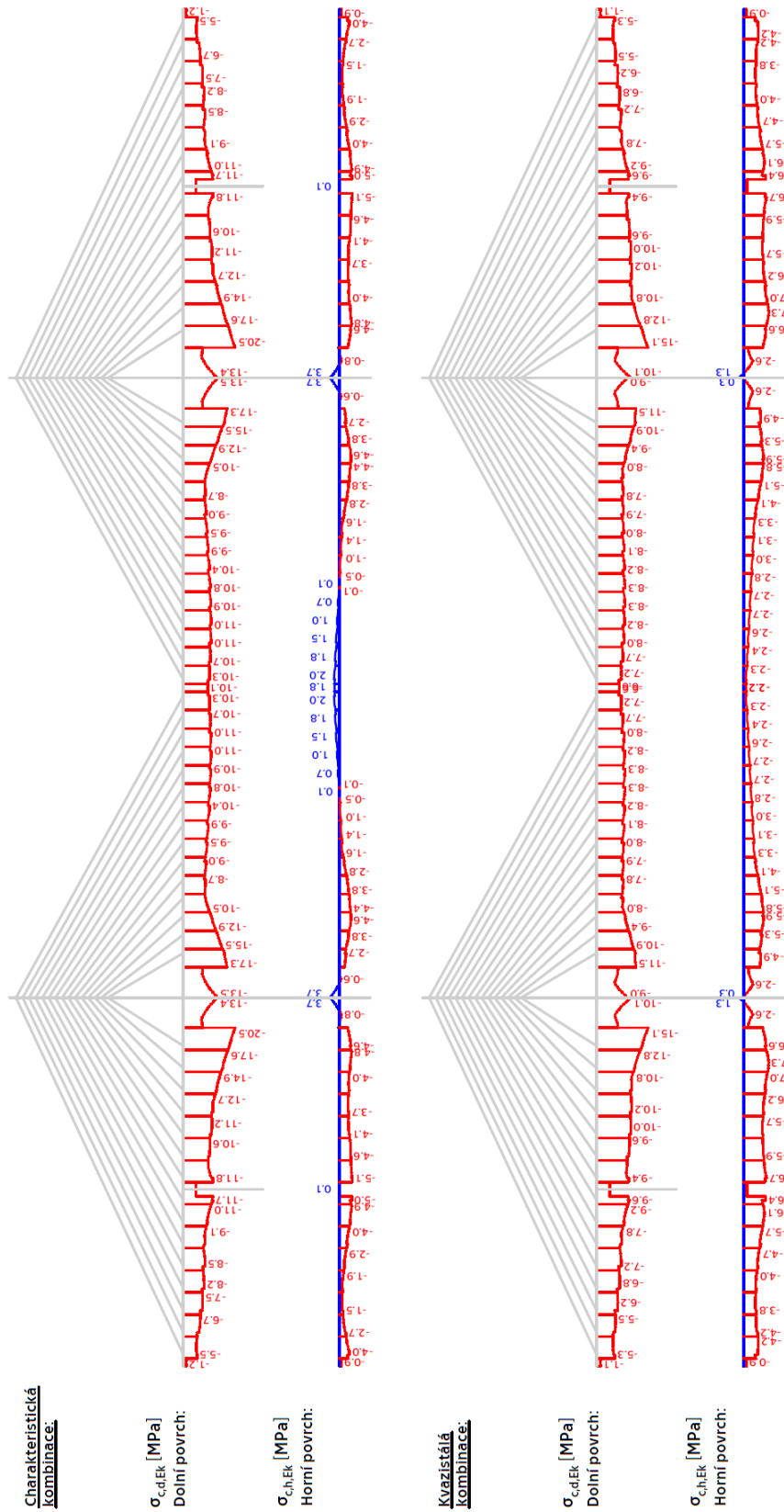
Obr. 4.11.33: σ_c , fáze KV

4.11.1.2 Uvedení do provozu



Obr. 4.11.34: σ_c , fáze UP

4.11.1.3 Konec životnosti



Obr. 4.11.35: σ_c fáze KŽ

4.11.2 Kontrola trhlin

Tahová pevnost betonu $f_{ctm} = 4,1$ MPa není v žádné fázi překročena, trhliny tedy není nutno posuzovat. A však z průběhu napětí u horního povrchu v místě u pylonů vzniká dekomprese pro kvazi-stálou kombinaci jak pro čas uvedení do provozu, tak i pro čas na konci životnosti. Opatřením tedy je použití stupně protikorozní ochrany předpínací výztuže PL2 – plastové kanálky.

4.11.3 Omezení napětí v závěsech

Napětí v závěsech je v mezním stavu použitelnosti omezeno na hodnotu $0,45 f_{pk}$ od časté kombinace zatížení. Toto je ověřeno v tabulkách níže, v posledním sloupci je uvedeno jednotkové posouzení.

$$0,45 f_{pk} = 837 \text{ MPa.}$$

Závěsy ve všech fázích vyhoví. Uvedeny jsou také hodnoty efektivního modulu pružnosti závěsů během všech fází výstavby. Je tak ověřen vliv poklesu normálové síly během různých stádií výstavby, kdy dochází k nadvýšení mostovky a tím snížení napětí v závěsech. Největší pokles tuhosti se týká opět závěsů Z9 a Z10.

4.11.3.1 Během výstavby

Tab. 4.11.5: Omezení napětí v závěsech, výstavba

Fáze	Z.	σ_{nap}	σ_{min}	$E_{eff,min}$	$E_{eff,min}/E_0$	σ_{max}	$E_{eff,max}$	$E_{eff,min}/E_0$	Posouzení $0.45 f_{pk}$
		[MPa]	[MPa]	[GPa]	[%]	[MPa]	[GPa]	[%]	
L-2-B	Z15	150.0	150.0	193.1	99.0	150.0	193.1	99.0	0.18
L-2-B	Z16	300.0	300.0	194.8	99.9	300.0	194.8	99.9	0.36
L-2-V	Z15	150.0	139.9	192.6	98.8	160.9	193.4	99.2	0.19
L-2-V	Z16	300.0	289.7	194.8	99.9	308.9	194.8	99.9	0.37
L-3-B	Z14	150.0	150.0	125.9	64.6	150.0	125.9	64.6	0.18
L-3-B	Z15	150.0	145.2	192.9	98.9	166.8	193.6	99.3	0.20
L-3-B	Z16	300.0	283.4	194.8	99.9	303.1	194.8	99.9	0.36
L-3-B	Z17	300.0	300.0	194.6	99.8	300.0	194.6	99.8	0.36
L-3-V	Z14	150.0	137.2	113.6	58.2	166.5	139.2	71.4	0.20
L-3-V	Z15	150.0	146.5	192.9	98.9	165.7	193.6	99.3	0.20
L-3-V	Z16	300.0	283.4	194.8	99.9	302.6	194.8	99.9	0.36
L-3-V	Z17	300.0	286.8	194.5	99.8	315.0	194.6	99.8	0.38
L-4-B	Z13	200.0	200.0	158.3	81.2	200.0	158.3	81.2	0.24
L-4-B	Z14	150.0	139.4	115.8	59.4	169.9	141.5	72.6	0.20
L-4-B	Z15	150.0	148.5	193.0	99.0	168.4	193.6	99.3	0.20
L-4-B	Z16	300.0	282.8	194.8	99.9	302.6	194.8	99.9	0.36
L-4-B	Z17	300.0	285.9	194.5	99.8	314.9	194.6	99.8	0.38
L-4-B	Z18	300.0	300.0	194.3	99.6	300.0	194.3	99.6	0.36
L-4-V	Z13	200.0	185.5	151.1	77.5	219.4	165.9	85.1	0.26
L-4-V	Z14	150.0	141.6	118.0	60.5	167.8	140.1	71.9	0.20
L-4-V	Z15	150.0	150.0	193.1	99.0	167.0	193.6	99.3	0.20
L-4-V	Z16	300.0	283.3	194.8	99.9	302.1	194.8	99.9	0.36

Fáze	Z.	σ_{nap}	σ_{min}	$E_{eff,min}$	$E_{eff,min}/E_0$	σ_{max}	$E_{eff,max}$	$E_{eff,min}/E_0$	Posouzení 0.45 f_{pk}
		[MPa]	[MPa]	[GPa]	[%]	[MPa]	[GPa]	[%]	
L-4-V	Z17	300.0	286.7	194.5	99.8	314.1	194.6	99.8	0.38
L-4-V	Z18	300.0	284.6	194.2	99.6	319.4	194.4	99.7	0.38
L-5-B	Z12	200.0	200.0	158.3	81.2	200.0	158.3	81.2	0.24
L-5-B	Z13	200.0	191.9	154.5	79.2	227.6	168.5	86.4	0.27
L-5-B	Z14	150.0	147.2	123.4	63.3	174.8	144.8	74.3	0.21
L-5-B	Z15	150.0	153.6	193.2	99.1	171.4	193.7	99.3	0.20
L-5-B	Z16	300.0	284.6	194.8	99.9	304.1	194.8	99.9	0.36
L-5-B	Z17	300.0	289.0	194.5	99.8	317.4	194.6	99.8	0.38
L-5-B	Z18	300.0	287.1	194.2	99.6	323.2	194.4	99.7	0.39
L-5-B	Z19	300.0	300.0	194.0	99.5	300.0	194.0	99.5	0.36
L-5-V	Z12	200.0	185.8	151.3	77.6	221.8	166.7	85.5	0.26
L-5-V	Z13	200.0	195.0	156.0	80.0	225.1	167.8	86.0	0.27
L-5-V	Z14	150.0	149.6	125.6	64.4	172.9	143.5	73.6	0.21
L-5-V	Z15	150.0	155.1	193.2	99.1	170.2	193.7	99.3	0.20
L-5-V	Z16	300.0	285.6	194.8	99.9	303.6	194.8	99.9	0.36
L-5-V	Z17	300.0	290.4	194.5	99.8	316.5	194.6	99.8	0.38
L-5-V	Z18	300.0	289.0	194.2	99.6	322.0	194.4	99.7	0.38
L-5-V	Z19	300.0	283.9	193.8	99.4	322.8	194.2	99.6	0.39
L-6-B	Z11	150.0	150.0	125.9	64.6	150.0	125.9	64.6	0.18
L-6-B	Z12	200.0	207.9	161.7	82.9	246.1	173.5	88.9	0.29
L-6-B	Z13	200.0	214.7	164.3	84.2	246.7	173.6	89.0	0.29
L-6-B	Z14	150.0	165.1	138.2	70.8	189.7	153.4	78.7	0.23
L-6-B	Z15	150.0	165.0	193.5	99.3	180.8	193.9	99.4	0.22
L-6-B	Z16	300.0	286.5	194.8	99.9	305.3	194.8	99.9	0.36
L-6-B	Z17	300.0	293.0	194.6	99.8	320.3	194.7	99.8	0.38
L-6-B	Z18	300.0	292.8	194.3	99.6	327.3	194.5	99.7	0.39
L-6-B	Z19	300.0	288.0	193.8	99.4	328.7	194.2	99.6	0.39
L-6-B	Z20	300.0	300.0	193.5	99.3	300.0	193.5	99.3	0.36
L-6-V	Z11	150.0	137.6	114.0	58.4	174.0	144.2	74.0	0.21
L-6-V	Z12	200.0	212.3	163.4	83.8	244.0	173.0	88.7	0.29
L-6-V	Z13	200.0	218.3	165.5	84.9	244.9	173.2	88.8	0.29
L-6-V	Z14	150.0	167.7	140.0	71.8	188.3	152.6	78.3	0.22
L-6-V	Z15	150.0	166.4	193.6	99.3	179.8	193.9	99.4	0.21
L-6-V	Z16	300.0	288.0	194.8	99.9	305.0	194.8	99.9	0.36
L-6-V	Z17	300.0	295.2	194.6	99.8	319.7	194.7	99.8	0.38
L-6-V	Z18	300.0	295.5	194.3	99.6	326.3	194.5	99.7	0.39
L-6-V	Z19	300.0	291.2	193.9	99.4	327.4	194.2	99.6	0.39
L-6-V	Z20	300.0	284.5	193.3	99.1	325.5	193.9	99.4	0.39
L-7-B	Z10	150.0	150.0	125.9	64.6	150.0	125.9	64.6	0.18
L-7-B	Z11	150.0	168.7	140.7	72.2	207.8	161.6	82.9	0.25
L-7-B	Z12	200.0	240.8	172.2	88.3	274.9	179.0	91.8	0.33
L-7-B	Z13	200.0	242.8	172.7	88.5	271.2	178.4	91.5	0.32

Fáze	Z.	σ_{nap}	σ_{min}	$E_{eff,min}$	$E_{eff,min}/E_0$	σ_{max}	$E_{eff,max}$	$E_{eff,min}/E_0$	Posouzení 0.45 f_{pk}
		[MPa]	[MPa]	[GPa]	[%]	[MPa]	[GPa]	[%]	
L-7-B	Z14	150.0	186.8	151.8	77.9	208.6	162.0	83.1	0.25
L-7-B	Z15	150.0	178.9	193.9	99.4	193.0	194.1	99.5	0.23
L-7-B	Z16	300.0	283.4	194.8	99.9	301.3	194.8	99.9	0.36
L-7-B	Z17	300.0	290.4	194.5	99.8	316.3	194.6	99.8	0.38
L-7-B	Z18	300.0	290.5	194.2	99.6	323.0	194.4	99.7	0.39
L-7-B	Z19	300.0	285.6	193.8	99.4	323.9	194.2	99.6	0.39
L-7-B	Z20	300.0	278.0	193.2	99.1	321.2	193.8	99.4	0.38
L-7-B	Z21	400.0	400.0	194.2	99.6	400.0	194.2	99.6	0.48
L-7-V	Z10	150.0	138.9	115.3	59.1	174.8	144.8	74.2	0.21
L-7-V	Z11	150.0	173.3	143.9	73.8	205.4	160.7	82.4	0.25
L-7-V	Z12	200.0	244.7	173.1	88.8	272.7	178.7	91.6	0.33
L-7-V	Z13	200.0	245.7	173.4	88.9	269.3	178.1	91.3	0.32
L-7-V	Z14	150.0	188.7	152.9	78.4	207.1	161.3	82.7	0.25
L-7-V	Z15	150.0	179.8	193.9	99.4	191.9	194.1	99.5	0.23
L-7-V	Z16	300.0	285.0	194.8	99.9	300.9	194.8	99.9	0.36
L-7-V	Z17	300.0	292.5	194.6	99.8	315.3	194.6	99.8	0.38
L-7-V	Z18	300.0	293.0	194.3	99.6	321.5	194.4	99.7	0.38
L-7-V	Z19	300.0	288.4	193.8	99.4	321.8	194.2	99.6	0.38
L-7-V	Z20	300.0	281.0	193.2	99.1	318.8	193.8	99.4	0.38
L-7-V	Z21	400.0	384.4	194.1	99.5	426.2	194.3	99.7	0.51
L-8-B	Z9	400.0	400.0	191.0	98.0	400.0	191.0	98.0	0.48
L-8-B	Z10	150.0	117.3	90.8	46.6	156.2	131.2	67.3	0.19
L-8-B	Z11	150.0	154.9	130.1	66.7	189.6	153.4	78.6	0.23
L-8-B	Z12	200.0	229.0	168.9	86.6	259.3	176.3	90.4	0.31
L-8-B	Z13	200.0	232.8	170.0	87.2	258.1	176.0	90.3	0.31
L-8-B	Z14	150.0	178.5	147.1	75.4	198.0	157.4	80.7	0.24
L-8-B	Z15	150.0	172.2	193.7	99.3	184.8	194.0	99.5	0.22
L-8-B	Z16	300.0	289.7	194.8	99.9	306.7	194.8	99.9	0.37
L-8-B	Z17	300.0	298.6	194.6	99.8	322.8	194.7	99.8	0.39
L-8-B	Z18	300.0	299.9	194.3	99.6	330.2	194.5	99.7	0.39
L-8-B	Z19	300.0	295.8	193.9	99.4	331.3	194.2	99.6	0.40
L-8-B	Z20	300.0	288.5	193.4	99.2	328.7	193.9	99.4	0.39
L-8-B	Z21	400.0	391.5	194.1	99.6	435.9	194.4	99.7	0.52
L-8-B	Z22	400.0	400.0	193.9	99.5	400.0	193.9	99.5	0.48
L-8-V	Z9	400.0	386.8	190.6	97.8	421.8	191.6	98.3	0.50
L-8-V	Z10	150.0	119.4	93.3	47.9	151.1	126.9	65.1	0.18
L-8-V	Z11	150.0	157.0	131.9	67.6	185.4	151.1	77.5	0.22
L-8-V	Z12	200.0	231.1	169.5	86.9	256.0	175.6	90.1	0.31
L-8-V	Z13	200.0	234.7	170.6	87.5	255.8	175.6	90.0	0.31
L-8-V	Z14	150.0	179.9	148.0	75.9	196.6	156.8	80.4	0.23
L-8-V	Z15	150.0	173.1	193.7	99.4	184.2	193.9	99.5	0.22
L-8-V	Z16	300.0	290.5	194.8	99.9	305.5	194.8	99.9	0.37

Fáze	Z.	σ_{nap}	σ_{min}	$E_{eff,min}$	$E_{eff,min}/E_0$	σ_{max}	$E_{eff,max}$	$E_{eff,min}/E_0$	Posouzení 0.45 f_{pk}
		[MPa]	[MPa]	[GPa]	[%]	[MPa]	[GPa]	[%]	
L-8-V	Z17	300.0	299.9	194.6	99.8	321.0	194.7	99.8	0.38
L-8-V	Z18	300.0	301.6	194.3	99.7	327.8	194.5	99.7	0.39
L-8-V	Z19	300.0	297.8	193.9	99.5	328.4	194.2	99.6	0.39
L-8-V	Z20	300.0	290.6	193.4	99.2	325.3	193.9	99.4	0.39
L-8-V	Z21	400.0	393.8	194.1	99.6	432.0	194.3	99.7	0.52
L-8-V	Z22	400.0	384.3	193.8	99.4	426.1	194.1	99.6	0.51
L-9-B	Z8	400.0	400.0	191.0	98.0	400.0	191.0	98.0	0.48
L-9-B	Z9	400.0	366.4	189.9	97.4	401.2	191.1	98.0	0.48
L-9-B	Z10	150.0	101.9	70.9	36.3	133.5	109.6	56.2	0.16
L-9-B	Z11	150.0	142.2	118.6	60.8	170.5	142.0	72.8	0.20
L-9-B	Z12	200.0	218.9	165.7	85.0	243.7	172.9	88.7	0.29
L-9-B	Z13	200.0	224.9	167.7	86.0	246.0	173.4	88.9	0.29
L-9-B	Z14	150.0	172.4	143.2	73.4	189.2	153.1	78.5	0.23
L-9-B	Z15	150.0	167.5	193.6	99.3	179.0	193.9	99.4	0.21
L-9-B	Z16	300.0	294.9	194.8	99.9	310.0	194.8	99.9	0.37
L-9-B	Z17	300.0	305.9	194.6	99.8	327.5	194.7	99.8	0.39
L-9-B	Z18	300.0	308.8	194.4	99.7	336.0	194.5	99.7	0.40
L-9-B	Z19	300.0	305.9	194.0	99.5	337.8	194.3	99.6	0.40
L-9-B	Z20	300.0	299.4	193.5	99.3	335.5	194.0	99.5	0.40
L-9-B	Z21	400.0	402.8	194.2	99.6	442.9	194.4	99.7	0.53
L-9-B	Z22	400.0	393.3	193.9	99.4	437.0	194.2	99.6	0.52
L-9-B	Z23	400.0	400.0	193.7	99.3	400.0	193.7	99.3	0.48
L-9-V	Z8	400.0	386.9	190.6	97.8	418.5	191.5	98.2	0.50
L-9-V	Z9	400.0	367.8	189.9	97.4	396.7	190.9	97.9	0.47
L-9-V	Z10	150.0	103.5	73.0	37.5	129.7	105.5	54.1	0.15
L-9-V	Z11	150.0	144.0	120.3	61.7	167.6	140.0	71.8	0.20
L-9-V	Z12	200.0	220.6	166.3	85.3	241.6	172.4	88.4	0.29
L-9-V	Z13	200.0	226.5	168.2	86.3	244.7	173.1	88.8	0.29
L-9-V	Z14	150.0	173.7	144.1	73.9	188.6	152.8	78.4	0.23
L-9-V	Z15	150.0	168.4	193.6	99.3	178.9	193.9	99.4	0.21
L-9-V	Z16	300.0	295.5	194.8	99.9	308.9	194.8	99.9	0.37
L-9-V	Z17	300.0	306.9	194.6	99.8	325.9	194.7	99.8	0.39
L-9-V	Z18	300.0	310.2	194.4	99.7	333.8	194.5	99.7	0.40
L-9-V	Z19	300.0	307.6	194.0	99.5	335.1	194.3	99.6	0.40
L-9-V	Z20	300.0	301.4	193.6	99.3	332.4	193.9	99.5	0.40
L-9-V	Z21	400.0	405.0	194.2	99.6	439.2	194.4	99.7	0.52
L-9-V	Z22	400.0	395.6	193.9	99.4	433.0	194.2	99.6	0.52
L-9-V	Z23	400.0	385.3	193.5	99.2	425.7	193.9	99.4	0.51
L-10-B	Z7	300.0	300.0	185.9	95.3	300.0	185.9	95.3	0.36
L-10-B	Z8	400.0	390.8	190.8	97.8	424.9	191.7	98.3	0.51
L-10-B	Z9	400.0	372.4	190.1	97.5	403.5	191.1	98.0	0.48
L-10-B	Z10	150.0	108.3	79.3	40.7	136.4	112.7	57.8	0.16

Fáze	Z.	σ_{nap}	σ_{min}	$E_{eff,min}$	$E_{eff,min}/E_0$	σ_{max}	$E_{eff,max}$	$E_{eff,min}/E_0$	Posouzení 0.45 f_{pk}
		[MPa]	[MPa]	[GPa]	[%]	[MPa]	[GPa]	[%]	
L-10-B	Z11	150.0	148.6	124.6	63.9	173.9	144.2	73.9	0.21
L-10-B	Z12	200.0	224.7	167.6	86.0	247.1	173.7	89.1	0.30
L-10-B	Z13	200.0	229.8	169.2	86.8	249.0	174.1	89.3	0.30
L-10-B	Z14	150.0	175.8	145.4	74.6	191.3	154.2	79.1	0.23
L-10-B	Z15	150.0	169.0	193.6	99.3	179.7	193.9	99.4	0.21
L-10-B	Z16	300.0	298.0	194.8	99.9	312.1	194.8	99.9	0.37
L-10-B	Z17	300.0	311.2	194.6	99.8	331.3	194.7	99.8	0.40
L-10-B	Z18	300.0	316.1	194.4	99.7	341.1	194.5	99.8	0.41
L-10-B	Z19	300.0	314.7	194.1	99.5	344.0	194.3	99.6	0.41
L-10-B	Z20	300.0	309.3	193.7	99.3	342.5	194.0	99.5	0.41
L-10-B	Z21	400.0	413.6	194.3	99.6	450.2	194.4	99.7	0.54
L-10-B	Z22	400.0	404.5	194.0	99.5	444.5	194.2	99.6	0.53
L-10-B	Z23	400.0	394.0	193.6	99.3	437.3	194.0	99.5	0.52
L-10-B	Z24	400.0	400.0	193.4	99.2	400.0	193.4	99.2	0.48
L-10-V	Z7	300.0	288.9	184.9	94.8	319.6	187.4	96.1	0.38
L-10-V	Z8	400.0	393.0	190.8	97.9	421.1	191.6	98.3	0.50
L-10-V	Z9	400.0	374.5	190.2	97.5	400.2	191.1	98.0	0.48
L-10-V	Z10	150.0	110.3	82.0	42.0	133.7	109.9	56.4	0.16
L-10-V	Z11	150.0	150.5	126.4	64.8	171.8	142.8	73.2	0.21
L-10-V	Z12	200.0	226.4	168.2	86.2	245.5	173.3	88.9	0.29
L-10-V	Z13	200.0	231.2	169.6	87.0	248.0	173.9	89.2	0.30
L-10-V	Z14	150.0	176.8	146.1	74.9	190.7	153.9	78.9	0.23
L-10-V	Z15	150.0	169.6	193.7	99.3	179.6	193.9	99.4	0.21
L-10-V	Z16	300.0	298.7	194.8	99.9	311.2	194.8	99.9	0.37
L-10-V	Z17	300.0	312.3	194.6	99.8	330.0	194.7	99.8	0.39
L-10-V	Z18	300.0	317.6	194.4	99.7	339.4	194.5	99.8	0.41
L-10-V	Z19	300.0	316.6	194.1	99.5	341.8	194.3	99.6	0.41
L-10-V	Z20	300.0	311.5	193.7	99.3	339.9	194.0	99.5	0.41
L-10-V	Z21	400.0	415.9	194.3	99.6	447.2	194.4	99.7	0.53
L-10-V	Z22	400.0	407.0	194.0	99.5	441.1	194.2	99.6	0.53
L-10-V	Z23	400.0	396.7	193.6	99.3	433.5	194.0	99.5	0.52
L-10-V	Z24	400.0	386.8	193.2	99.1	426.4	193.7	99.3	0.51
L-11-B	Z6	300.0	300.0	185.9	95.3	300.0	185.9	95.3	0.36
L-11-B	Z7	300.0	295.8	185.5	95.1	329.1	188.0	96.4	0.39
L-11-B	Z8	400.0	400.2	191.1	98.0	430.8	191.8	98.4	0.51
L-11-B	Z9	400.0	381.5	190.5	97.7	409.3	191.3	98.1	0.49
L-11-B	Z10	150.0	116.9	90.3	46.3	142.2	118.6	60.8	0.17
L-11-B	Z11	150.0	156.4	131.4	67.4	179.2	147.5	75.6	0.21
L-11-B	Z12	200.0	231.4	169.6	87.0	251.7	174.7	89.6	0.30
L-11-B	Z13	200.0	234.9	170.6	87.5	252.5	174.9	89.7	0.30
L-11-B	Z14	150.0	179.0	147.4	75.6	193.4	155.3	79.6	0.23
L-11-B	Z15	150.0	170.1	193.7	99.3	180.2	193.9	99.4	0.22

Fáze	Z.	σ_{nap}	σ_{min}	$E_{eff,min}$	$E_{eff,min}/E_0$	σ_{max}	$E_{eff,max}$	$E_{eff,min}/E_0$	Posouzení 0.45 f_{pk}
		[MPa]	[MPa]	[GPa]	[%]	[MPa]	[GPa]	[%]	
L-11-B	Z16	300.0	301.5	194.8	99.9	314.7	194.8	99.9	0.38
L-11-B	Z17	300.0	317.2	194.6	99.8	335.9	194.7	99.8	0.40
L-11-B	Z18	300.0	324.3	194.5	99.7	347.4	194.6	99.8	0.42
L-11-B	Z19	300.0	324.8	194.2	99.6	351.8	194.4	99.7	0.42
L-11-B	Z20	300.0	321.0	193.8	99.4	351.4	194.1	99.5	0.42
L-11-B	Z21	400.0	426.4	194.3	99.7	460.0	194.5	99.7	0.55
L-11-B	Z22	400.0	418.2	194.1	99.5	454.9	194.3	99.6	0.54
L-11-B	Z23	400.0	408.4	193.8	99.4	448.0	194.1	99.5	0.54
L-11-B	Z24	400.0	398.5	193.4	99.2	441.1	193.8	99.4	0.53
L-11-B	Z25	400.0	400.0	193.1	99.0	400.0	193.1	99.0	0.48
L-11-V	Z6	300.0	290.2	185.0	94.9	320.1	187.4	96.1	0.38
L-11-V	Z7	300.0	298.1	185.7	95.2	325.5	187.8	96.3	0.39
L-11-V	Z8	400.0	402.4	191.1	98.0	427.6	191.8	98.3	0.51
L-11-V	Z9	400.0	383.6	190.5	97.7	406.6	191.2	98.1	0.49
L-11-V	Z10	150.0	118.8	92.7	47.5	139.9	116.3	59.7	0.17
L-11-V	Z11	150.0	158.1	132.8	68.1	177.4	146.4	75.1	0.21
L-11-V	Z12	200.0	232.8	170.0	87.2	250.4	174.4	89.4	0.30
L-11-V	Z13	200.0	236.0	170.9	87.6	251.6	174.7	89.6	0.30
L-11-V	Z14	150.0	179.7	147.8	75.8	193.0	155.0	79.5	0.23
L-11-V	Z15	150.0	170.5	193.7	99.3	180.1	193.9	99.4	0.22
L-11-V	Z16	300.0	302.0	194.8	99.9	313.9	194.8	99.9	0.38
L-11-V	Z17	300.0	318.1	194.7	99.8	334.7	194.7	99.8	0.40
L-11-V	Z18	300.0	325.6	194.5	99.7	345.9	194.5	99.8	0.41
L-11-V	Z19	300.0	326.5	194.2	99.6	349.9	194.3	99.7	0.42
L-11-V	Z20	300.0	322.9	193.8	99.4	349.1	194.1	99.5	0.42
L-11-V	Z21	400.0	428.6	194.3	99.7	457.4	194.4	99.7	0.55
L-11-V	Z22	400.0	420.6	194.1	99.5	451.9	194.3	99.6	0.54
L-11-V	Z23	400.0	410.9	193.8	99.4	444.6	194.0	99.5	0.53
L-11-V	Z24	400.0	401.3	193.4	99.2	437.4	193.8	99.4	0.52
L-11-V	Z25	400.0	388.1	192.9	98.9	426.8	193.4	99.2	0.51
L-12-B	Z5	300.0	300.0	185.9	95.3	300.0	185.9	95.3	0.36
L-12-B	Z6	300.0	299.6	185.9	95.3	332.4	188.2	96.5	0.40
L-12-B	Z7	300.0	307.6	186.5	95.6	337.7	188.5	96.7	0.40
L-12-B	Z8	400.0	411.5	191.4	98.1	439.0	192.0	98.5	0.52
L-12-B	Z9	400.0	392.0	190.8	97.8	417.0	191.5	98.2	0.50
L-12-B	Z10	150.0	126.4	101.7	52.2	149.1	125.1	64.2	0.18
L-12-B	Z11	150.0	164.6	137.8	70.7	185.2	151.0	77.4	0.22
L-12-B	Z12	200.0	238.0	171.5	87.9	256.5	175.7	90.1	0.31
L-12-B	Z13	200.0	239.7	171.9	88.1	255.9	175.6	90.1	0.31
L-12-B	Z14	150.0	181.8	149.0	76.4	195.3	156.1	80.1	0.23
L-12-B	Z15	150.0	170.8	193.7	99.3	180.4	193.9	99.4	0.22
L-12-B	Z16	300.0	304.9	194.8	99.9	317.4	194.8	99.9	0.38

Fáze	Z.	σ_{nap}	σ_{min}	$E_{eff,min}$	$E_{eff,min}/E_0$	σ_{max}	$E_{eff,max}$	$E_{eff,min}/E_0$	Posouzení 0.45 f_{pk}
		[MPa]	[MPa]	[GPa]	[%]	[MPa]	[GPa]	[%]	
L-12-B	Z17	300.0	323.2	194.7	99.8	340.7	194.7	99.9	0.41
L-12-B	Z18	300.0	332.7	194.5	99.7	354.3	194.6	99.8	0.42
L-12-B	Z19	300.0	335.3	194.3	99.6	360.4	194.4	99.7	0.43
L-12-B	Z20	300.0	333.3	193.9	99.5	361.5	194.2	99.6	0.43
L-12-B	Z21	400.0	440.3	194.4	99.7	471.3	194.5	99.7	0.56
L-12-B	Z22	400.0	433.4	194.2	99.6	467.1	194.3	99.7	0.56
L-12-B	Z23	400.0	424.5	193.9	99.4	460.9	194.1	99.6	0.55
L-12-B	Z24	400.0	415.4	193.6	99.3	454.5	193.9	99.4	0.54
L-12-B	Z25	400.0	402.4	193.1	99.0	444.2	193.6	99.3	0.53
L-12-B	Z26	400.0	400.0	192.7	98.8	400.0	192.7	98.8	0.48
L-12-V	Z5	300.0	291.3	185.1	94.9	320.5	187.5	96.1	0.38
L-12-V	Z6	300.0	301.9	186.0	95.4	328.8	188.0	96.4	0.39
L-12-V	Z7	300.0	309.7	186.7	95.7	334.6	188.3	96.6	0.40
L-12-V	Z8	400.0	413.5	191.4	98.2	436.3	191.9	98.4	0.52
L-12-V	Z9	400.0	393.8	190.9	97.9	414.7	191.4	98.2	0.50
L-12-V	Z10	150.0	128.0	103.5	53.1	147.2	123.4	63.3	0.18
L-12-V	Z11	150.0	166.0	138.8	71.2	183.7	150.2	77.0	0.22
L-12-V	Z12	200.0	239.1	171.7	88.1	255.4	175.5	90.0	0.31
L-12-V	Z13	200.0	240.5	172.1	88.2	255.2	175.5	90.0	0.30
L-12-V	Z14	150.0	182.2	149.3	76.6	194.9	156.0	80.0	0.23
L-12-V	Z15	150.0	171.0	193.7	99.3	180.3	193.9	99.4	0.22
L-12-V	Z16	300.0	305.3	194.8	99.9	316.7	194.8	99.9	0.38
L-12-V	Z17	300.0	323.9	194.7	99.8	339.7	194.7	99.9	0.41
L-12-V	Z18	300.0	333.7	194.5	99.7	352.9	194.6	99.8	0.42
L-12-V	Z19	300.0	336.7	194.3	99.6	358.6	194.4	99.7	0.43
L-12-V	Z20	300.0	335.0	194.0	99.5	359.4	194.2	99.6	0.43
L-12-V	Z21	400.0	442.3	194.4	99.7	468.9	194.5	99.7	0.56
L-12-V	Z22	400.0	435.6	194.2	99.6	464.4	194.3	99.7	0.55
L-12-V	Z23	400.0	426.9	193.9	99.4	457.9	194.1	99.5	0.55
L-12-V	Z24	400.0	418.0	193.6	99.3	451.2	193.9	99.4	0.54
L-12-V	Z25	400.0	405.1	193.1	99.0	440.5	193.5	99.3	0.53
L-12-V	Z26	400.0	389.2	192.5	98.7	427.0	193.1	99.0	0.51
L-13-B	Z4	300.0	300.0	185.9	95.3	300.0	185.9	95.3	0.36
L-13-B	Z5	300.0	303.1	186.1	95.5	335.3	188.4	96.6	0.40
L-13-B	Z6	300.0	313.5	187.0	95.9	343.3	188.8	96.8	0.41
L-13-B	Z7	300.0	320.8	187.5	96.1	348.1	189.1	97.0	0.42
L-13-B	Z8	400.0	423.7	191.7	98.3	448.6	192.2	98.6	0.54
L-13-B	Z9	400.0	403.0	191.1	98.0	425.6	191.7	98.3	0.51
L-13-B	Z10	150.0	135.9	112.2	57.5	156.5	131.5	67.4	0.19
L-13-B	Z11	150.0	172.5	143.3	73.5	191.2	154.2	79.1	0.23
L-13-B	Z12	200.0	244.1	173.0	88.7	261.1	176.6	90.6	0.31
L-13-B	Z13	200.0	243.8	172.9	88.7	258.9	176.2	90.4	0.31

Fáze	Z.	σ_{nap}	σ_{min}	$E_{eff,min}$	$E_{eff,min}/E_0$	σ_{max}	$E_{eff,max}$	$E_{eff,min}/E_0$	Posouzení 0.45 f_{pk}
		[MPa]	[MPa]	[GPa]	[%]	[MPa]	[GPa]	[%]	
L-13-B	Z14	150.0	183.8	150.2	77.0	196.6	156.8	80.4	0.23
L-13-B	Z15	150.0	170.9	193.7	99.3	180.2	193.9	99.4	0.22
L-13-B	Z16	300.0	308.2	194.8	99.9	320.1	194.8	99.9	0.38
L-13-B	Z17	300.0	329.0	194.7	99.8	345.6	194.7	99.9	0.41
L-13-B	Z18	300.0	340.9	194.5	99.8	361.2	194.6	99.8	0.43
L-13-B	Z19	300.0	345.8	194.3	99.7	369.2	194.4	99.7	0.44
L-13-B	Z20	300.0	345.8	194.0	99.5	371.9	194.2	99.6	0.44
L-13-B	Z21	400.0	454.6	194.4	99.7	483.2	194.5	99.8	0.58
L-13-B	Z22	400.0	449.2	194.3	99.6	480.3	194.4	99.7	0.57
L-13-B	Z23	400.0	441.7	194.0	99.5	475.2	194.2	99.6	0.57
L-13-B	Z24	400.0	433.6	193.7	99.3	469.7	194.0	99.5	0.56
L-13-B	Z25	400.0	421.4	193.3	99.2	459.9	193.7	99.3	0.55
L-13-B	Z26	400.0	405.9	192.8	98.9	446.8	193.4	99.2	0.53
L-13-B	Z27	400.0	400.0	192.3	98.6	400.0	192.3	98.6	0.48
L-14-B	Z3	300.0	300.0	186.9	95.9	300.0	186.9	95.9	0.36
L-14-B	Z4	300.0	306.2	186.4	95.6	338.1	188.5	96.7	0.40
L-14-B	Z5	300.0	318.9	187.4	96.1	348.4	189.1	97.0	0.42
L-14-B	Z6	300.0	328.4	188.0	96.4	355.6	189.4	97.1	0.42
L-14-B	Z7	300.0	334.5	188.3	96.6	359.3	189.6	97.2	0.43
L-14-B	Z8	400.0	436.0	191.9	98.4	458.6	192.4	98.6	0.55
L-14-B	Z9	400.0	413.6	191.4	98.2	434.2	191.9	98.4	0.52
L-14-B	Z10	150.0	144.8	121.1	62.1	163.6	137.0	70.3	0.20
L-14-B	Z11	150.0	179.5	147.7	75.7	196.8	156.9	80.4	0.24
L-14-B	Z12	200.0	249.2	174.2	89.3	265.0	177.3	90.9	0.32
L-14-B	Z13	200.0	247.0	173.7	89.1	261.2	176.6	90.6	0.31
L-14-B	Z14	150.0	185.1	150.9	77.4	197.2	157.1	80.6	0.24
L-14-B	Z15	150.0	170.5	193.7	99.3	179.4	193.9	99.4	0.21
L-14-B	Z16	300.0	311.1	194.8	99.9	322.5	194.8	99.9	0.39
L-14-B	Z17	300.0	334.3	194.7	99.8	350.1	194.7	99.9	0.42
L-14-B	Z18	300.0	348.6	194.6	99.8	367.8	194.6	99.8	0.44
L-14-B	Z19	300.0	355.7	194.4	99.7	377.8	194.5	99.7	0.45
L-14-B	Z20	300.0	357.9	194.1	99.6	382.4	194.3	99.6	0.46
L-14-B	Z21	400.0	468.6	194.5	99.7	495.4	194.6	99.8	0.59
L-14-B	Z22	400.0	465.0	194.3	99.7	494.0	194.4	99.7	0.59
L-14-B	Z23	400.0	459.1	194.1	99.6	490.3	194.3	99.6	0.59
L-14-B	Z24	400.0	452.5	193.9	99.4	485.8	194.1	99.5	0.58
L-14-B	Z25	400.0	441.4	193.6	99.3	477.0	193.9	99.4	0.57
L-14-B	Z26	400.0	426.8	193.1	99.0	464.7	193.5	99.3	0.56
L-14-B	Z27	400.0	409.0	192.5	98.7	449.1	193.1	99.0	0.54
L-14-B	Z28	400.0	400.0	191.9	98.4	400.0	191.9	98.4	0.48
L-14-V	Z3	300.0	293.1	186.4	95.6	321.5	188.4	96.6	0.38
L-14-V	Z4	300.0	308.3	186.6	95.7	334.7	188.3	96.6	0.40

Fáze	Z.	σ_{nap}	σ_{min}	$E_{eff,min}$	$E_{eff,min}/E_0$	σ_{max}	$E_{eff,max}$	$E_{eff,min}/E_0$	Posouzení 0.45 f_{pk}
		[MPa]	[MPa]	[GPa]	[%]	[MPa]	[GPa]	[%]	
L-14-V	Z5	300.0	320.9	187.5	96.1	345.4	188.9	96.9	0.41
L-14-V	Z6	300.0	330.3	188.1	96.5	352.8	189.3	97.1	0.42
L-14-V	Z7	300.0	336.1	188.4	96.6	356.9	189.5	97.2	0.43
L-14-V	Z8	400.0	437.3	192.0	98.4	456.4	192.3	98.6	0.55
L-14-V	Z9	400.0	414.8	191.4	98.2	432.3	191.9	98.4	0.52
L-14-V	Z10	150.0	145.7	121.9	62.5	162.0	135.9	69.7	0.19
L-14-V	Z11	150.0	180.2	148.1	75.9	195.5	156.3	80.1	0.23
L-14-V	Z12	200.0	249.7	174.3	89.4	264.1	177.2	90.9	0.32
L-14-V	Z13	200.0	247.2	173.7	89.1	260.6	176.5	90.5	0.31
L-14-V	Z14	150.0	185.2	151.0	77.4	196.9	156.9	80.5	0.24
L-14-V	Z15	150.0	170.5	193.7	99.3	179.3	193.9	99.4	0.21
L-14-V	Z16	300.0	311.2	194.8	99.9	321.9	194.8	99.9	0.38
L-14-V	Z17	300.0	334.6	194.7	99.8	349.2	194.7	99.9	0.42
L-14-V	Z18	300.0	349.1	194.6	99.8	366.6	194.6	99.8	0.44
L-14-V	Z19	300.0	356.5	194.4	99.7	376.3	194.5	99.7	0.45
L-14-V	Z20	300.0	359.0	194.1	99.6	380.7	194.3	99.6	0.45
L-14-V	Z21	400.0	470.0	194.5	99.7	493.4	194.6	99.8	0.59
L-14-V	Z22	400.0	466.6	194.3	99.7	491.8	194.4	99.7	0.59
L-14-V	Z23	400.0	460.9	194.1	99.6	487.8	194.3	99.6	0.58
L-14-V	Z24	400.0	454.6	193.9	99.4	483.1	194.1	99.5	0.58
L-14-V	Z25	400.0	443.7	193.6	99.3	474.1	193.8	99.4	0.57
L-14-V	Z26	400.0	429.3	193.1	99.1	461.5	193.5	99.2	0.55
L-14-V	Z27	400.0	411.5	192.6	98.7	445.7	193.1	99.0	0.53
L-14-V	Z28	400.0	391.2	191.7	98.3	427.4	192.5	98.7	0.51
L-15-B	Z2	300.0	300.0	194.0	99.5	300.0	194.0	99.5	0.36
L-15-B	Z3	300.0	309.0	187.6	96.2	340.8	189.4	97.1	0.41
L-15-B	Z4	300.0	323.7	187.7	96.2	353.1	189.3	97.1	0.42
L-15-B	Z5	300.0	335.4	188.4	96.6	362.5	189.7	97.3	0.43
L-15-B	Z6	300.0	343.5	188.8	96.8	368.4	190.0	97.4	0.44
L-15-B	Z7	300.0	347.9	189.1	97.0	370.7	190.1	97.5	0.44
L-15-B	Z8	400.0	447.7	192.2	98.5	468.3	192.5	98.7	0.56
L-15-B	Z9	400.0	423.5	191.7	98.3	442.2	192.1	98.5	0.53
L-15-B	Z10	150.0	152.7	128.3	65.8	169.9	141.5	72.6	0.20
L-15-B	Z11	150.0	185.5	151.1	77.5	201.4	158.9	81.5	0.24
L-15-B	Z12	200.0	253.3	175.0	89.8	267.9	177.9	91.2	0.32
L-15-B	Z13	200.0	249.2	174.2	89.3	262.5	176.9	90.7	0.31
L-15-B	Z14	150.0	185.6	151.2	77.5	197.1	157.0	80.5	0.24
L-15-B	Z15	150.0	169.6	193.7	99.3	178.2	193.8	99.4	0.21
L-15-B	Z16	300.0	313.5	194.8	99.9	324.7	194.8	99.9	0.39
L-15-B	Z17	300.0	339.0	194.7	99.9	354.3	194.7	99.9	0.42
L-15-B	Z18	300.0	355.6	194.6	99.8	374.0	194.6	99.8	0.45
L-15-B	Z19	300.0	365.0	194.4	99.7	385.9	194.5	99.7	0.46

Fáze	Z.	σ_{nap}	σ_{min}	$E_{eff,min}$	$E_{eff,min}/E_0$	σ_{max}	$E_{eff,max}$	$E_{eff,min}/E_0$	Posouzení 0.45 f_{pk}
		[MPa]	[MPa]	[GPa]	[%]	[MPa]	[GPa]	[%]	
L-15-B	Z20	300.0	369.3	194.2	99.6	392.5	194.3	99.7	0.47
L-15-B	Z21	400.0	482.1	194.5	99.8	507.2	194.6	99.8	0.61
L-15-B	Z22	400.0	480.4	194.4	99.7	507.6	194.5	99.7	0.61
L-15-B	Z23	400.0	476.3	194.2	99.6	505.4	194.3	99.7	0.60
L-15-B	Z24	400.0	471.3	194.0	99.5	502.4	194.2	99.6	0.60
L-15-B	Z25	400.0	461.7	193.7	99.4	494.8	194.0	99.5	0.59
L-15-B	Z26	400.0	448.4	193.4	99.2	483.5	193.7	99.3	0.58
L-15-B	Z27	400.0	431.5	192.9	98.9	468.8	193.3	99.1	0.56
L-15-B	Z28	400.0	411.7	192.2	98.6	451.2	192.9	98.9	0.54
L-15-B	Z29	400.0	400.0	191.5	98.2	400.0	191.5	98.2	0.48
L-15-V	Z2	300.0	293.9	193.9	99.4	322.1	194.2	99.6	0.38
L-15-V	Z3	300.0	311.1	187.7	96.3	337.4	189.2	97.0	0.40
L-15-V	Z4	300.0	325.7	187.8	96.3	350.1	189.2	97.0	0.42
L-15-V	Z5	300.0	337.1	188.5	96.7	359.7	189.6	97.2	0.43
L-15-V	Z6	300.0	345.0	188.9	96.9	365.9	189.9	97.4	0.44
L-15-V	Z7	300.0	349.2	189.1	97.0	368.4	190.0	97.4	0.44
L-15-V	Z8	400.0	448.7	192.2	98.6	466.4	192.5	98.7	0.56
L-15-V	Z9	400.0	424.3	191.7	98.3	440.5	192.0	98.5	0.53
L-15-V	Z10	150.0	153.2	128.7	66.0	168.5	140.5	72.1	0.20
L-15-V	Z11	150.0	185.8	151.3	77.6	200.2	158.4	81.2	0.24
L-15-V	Z12	200.0	253.4	175.1	89.8	267.0	177.7	91.1	0.32
L-15-V	Z13	200.0	249.2	174.2	89.3	261.9	176.8	90.7	0.31
L-15-V	Z14	150.0	185.5	151.1	77.5	196.8	156.9	80.4	0.24
L-15-V	Z15	150.0	169.5	193.7	99.3	178.1	193.8	99.4	0.21
L-15-V	Z16	300.0	313.5	194.8	99.9	324.1	194.8	99.9	0.39
L-15-V	Z17	300.0	339.1	194.7	99.9	353.4	194.7	99.9	0.42
L-15-V	Z18	300.0	355.8	194.6	99.8	372.8	194.6	99.8	0.45
L-15-V	Z19	300.0	365.5	194.4	99.7	384.5	194.5	99.7	0.46
L-15-V	Z20	300.0	370.0	194.2	99.6	390.8	194.3	99.7	0.47
L-15-V	Z21	400.0	483.1	194.5	99.8	505.4	194.6	99.8	0.60
L-15-V	Z22	400.0	481.7	194.4	99.7	505.5	194.5	99.7	0.60
L-15-V	Z23	400.0	477.8	194.2	99.6	503.1	194.3	99.7	0.60
L-15-V	Z24	400.0	473.1	194.0	99.5	499.9	194.2	99.6	0.60
L-15-V	Z25	400.0	463.7	193.8	99.4	492.1	194.0	99.5	0.59
L-15-V	Z26	400.0	450.5	193.4	99.2	480.6	193.7	99.3	0.57
L-15-V	Z27	400.0	433.9	192.9	98.9	465.7	193.3	99.1	0.56
L-15-V	Z28	400.0	414.2	192.2	98.6	447.9	192.8	98.9	0.54
L-15-V	Z29	400.0	392.1	191.3	98.1	427.6	192.1	98.5	0.51
L-16-B	Z1	500.0	500.0	192.2	98.5	500.0	192.2	98.5	0.60
L-16-B	Z2	300.0	308.3	194.0	99.5	334.1	194.2	99.6	0.40
L-16-B	Z3	300.0	326.2	188.7	96.7	350.7	189.9	97.4	0.42
L-16-B	Z4	300.0	341.1	188.7	96.8	364.5	189.8	97.3	0.44

Fáze	Z.	σ_{nap}	σ_{min}	$E_{eff,min}$	$E_{eff,min}/E_0$	σ_{max}	$E_{eff,max}$	$E_{eff,min}/E_0$	Posouzení 0.45 f_{pk}
		[MPa]	[MPa]	[GPa]	[%]	[MPa]	[GPa]	[%]	
L-16-B	Z5	300.0	352.8	189.3	97.1	375.2	190.2	97.6	0.45
L-16-B	Z6	300.0	360.8	189.7	97.3	382.3	190.5	97.7	0.46
L-16-B	Z7	300.0	365.1	189.8	97.4	385.7	190.6	97.7	0.46
L-16-B	Z8	400.0	464.5	192.5	98.7	484.4	192.8	98.8	0.58
L-16-B	Z9	400.0	439.6	192.0	98.5	458.7	192.4	98.6	0.55
L-16-B	Z10	150.0	167.7	140.0	71.8	186.3	151.6	77.7	0.22
L-16-B	Z11	150.0	199.0	157.9	81.0	216.9	165.1	84.6	0.26
L-16-B	Z12	200.0	264.8	177.3	90.9	282.0	180.1	92.4	0.34
L-16-B	Z13	200.0	258.4	176.1	90.3	274.4	179.0	91.8	0.33
L-16-B	Z14	150.0	192.0	154.6	79.3	206.1	161.0	82.5	0.25
L-16-B	Z15	150.0	173.1	193.7	99.4	183.7	193.9	99.5	0.22
L-16-B	Z16	300.0	314.1	194.8	99.9	324.4	194.8	99.9	0.39
L-16-B	Z17	300.0	341.7	194.7	99.9	355.9	194.8	99.9	0.43
L-16-B	Z18	300.0	360.5	194.6	99.8	377.8	194.7	99.8	0.45
L-16-B	Z19	300.0	372.2	194.5	99.7	391.8	194.5	99.8	0.47
L-16-B	Z20	300.0	378.8	194.3	99.6	400.3	194.4	99.7	0.48
L-16-B	Z21	400.0	493.6	194.6	99.8	517.0	194.6	99.8	0.62
L-16-B	Z22	400.0	494.0	194.4	99.7	519.1	194.5	99.8	0.62
L-16-B	Z23	400.0	491.7	194.3	99.6	518.6	194.4	99.7	0.62
L-16-B	Z24	400.0	488.4	194.1	99.5	517.1	194.3	99.6	0.62
L-16-B	Z25	400.0	480.4	193.9	99.4	510.9	194.1	99.5	0.61
L-16-B	Z26	400.0	468.4	193.6	99.3	500.7	193.8	99.4	0.60
L-16-B	Z27	400.0	452.7	193.2	99.1	487.0	193.5	99.2	0.58
L-16-B	Z28	400.0	433.9	192.6	98.8	470.2	193.1	99.0	0.56
L-16-B	Z29	400.0	412.2	191.8	98.4	450.5	192.5	98.7	0.54
L-16-B	Z30	400.0	400.0	191.0	98.0	400.0	191.0	98.0	0.48
L-17	Z1	500.0	496.7	192.1	98.5	520.7	192.5	98.7	0.62
L-17	Z2	300.0	313.4	194.1	99.5	335.9	194.3	99.6	0.40
L-17	Z3	300.0	331.7	189.0	96.9	352.6	189.9	97.4	0.42
L-17	Z4	300.0	346.8	189.0	96.9	366.5	189.9	97.4	0.44
L-17	Z5	300.0	358.8	189.6	97.2	377.2	190.3	97.6	0.45
L-17	Z6	300.0	367.0	189.9	97.4	384.3	190.6	97.7	0.46
L-17	Z7	300.0	371.5	190.1	97.5	387.8	190.7	97.8	0.46
L-17	Z8	400.0	471.1	192.6	98.7	486.4	192.8	98.9	0.58
L-17	Z9	400.0	446.1	192.1	98.5	460.6	192.4	98.7	0.55
L-17	Z10	150.0	173.9	144.2	74.0	188.0	152.5	78.2	0.22
L-17	Z11	150.0	204.6	160.3	82.2	218.6	165.6	84.9	0.26
L-17	Z12	200.0	269.5	178.1	91.4	283.5	180.3	92.5	0.34
L-17	Z13	200.0	261.9	176.8	90.7	275.7	179.2	91.9	0.33
L-17	Z14	150.0	194.1	155.6	79.8	207.3	161.4	82.8	0.25
L-17	Z15	150.0	173.6	193.7	99.4	184.7	194.0	99.5	0.22

Fáze	Z.	σ_{nap}	σ_{min}	$E_{eff,min}$	$E_{eff,min}/E_0$	σ_{max}	$E_{eff,max}$	$E_{eff,min}/E_0$	Posouzení 0.45 f_{pk}
		[MPa]	[MPa]	[GPa]	[%]	[MPa]	[GPa]	[%]	
L-17	Z16	300.0	317.0	194.8	99.9	325.1	194.8	99.9	0.39
L-17	Z17	300.0	345.8	194.7	99.9	357.7	194.8	99.9	0.43
L-17	Z18	300.0	365.8	194.6	99.8	380.5	194.7	99.8	0.45
L-17	Z19	300.0	378.5	194.5	99.7	395.3	194.5	99.8	0.47
L-17	Z20	300.0	385.8	194.3	99.6	404.3	194.4	99.7	0.48
L-17	Z21	400.0	501.2	194.6	99.8	521.2	194.6	99.8	0.62
L-17	Z22	400.0	502.0	194.5	99.7	523.3	194.5	99.8	0.63
L-17	Z23	400.0	500.0	194.3	99.7	522.6	194.4	99.7	0.62
L-17	Z24	400.0	496.8	194.2	99.6	520.6	194.3	99.6	0.62
L-17	Z25	400.0	488.6	193.9	99.5	513.8	194.1	99.5	0.61
L-17	Z26	400.0	476.3	193.6	99.3	502.7	193.8	99.4	0.60
L-17	Z27	400.0	460.1	193.2	99.1	487.9	193.5	99.2	0.58
L-17	Z28	400.0	440.4	192.7	98.8	469.6	193.1	99.0	0.56
L-17	Z29	400.0	417.6	191.9	98.4	448.3	192.5	98.7	0.54
L-17	Z30	400.0	394.2	190.9	97.9	426.3	191.7	98.3	0.51
KV	Z1	560.0	678.1	193.8	99.4	588.5	193.2	99.1	0.70
KV	Z2	420.0	400.6	194.6	99.8	445.7	194.7	99.8	0.53
KV	Z3	420.0	403.1	191.6	98.2	443.0	192.4	98.7	0.53
KV	Z4	420.0	405.5	191.2	98.1	440.4	192.0	98.5	0.53
KV	Z5	420.0	407.7	191.3	98.1	438.1	192.0	98.4	0.52
KV	Z6	420.0	409.8	191.3	98.1	436.0	191.9	98.4	0.52
KV	Z7	420.0	411.6	191.4	98.1	434.2	191.9	98.4	0.52
KV	Z8	560.0	553.2	193.5	99.2	572.9	193.6	99.3	0.68
KV	Z9	560.0	554.4	193.5	99.2	572.2	193.6	99.3	0.68
KV	Z10	210.0	204.7	160.4	82.2	222.7	167.0	85.6	0.27
KV	Z11	210.0	204.5	160.3	82.2	223.9	167.4	85.8	0.27
KV	Z12	280.0	274.0	178.9	91.7	296.2	182.0	93.3	0.35
KV	Z13	280.0	273.2	178.8	91.7	299.7	182.5	93.6	0.36
KV	Z14	210.0	202.3	159.4	81.7	234.5	170.5	87.4	0.28
KV	Z15	210.0	202.3	194.2	99.6	240.0	194.5	99.8	0.29
KV	Z16	420.0	416.9	194.9	100.0	444.1	194.9	100.0	0.53
KV	Z17	420.0	415.7	194.8	99.9	440.4	194.9	99.9	0.53
KV	Z18	420.0	414.9	194.7	99.9	437.6	194.8	99.9	0.52
KV	Z19	420.0	414.1	194.6	99.8	435.9	194.7	99.8	0.52
KV	Z20	420.0	413.3	194.4	99.7	435.1	194.5	99.8	0.52
KV	Z21	560.0	552.4	194.7	99.8	575.1	194.7	99.9	0.69
KV	Z22	560.0	551.2	194.6	99.8	575.8	194.6	99.8	0.69
KV	Z23	560.0	549.6	194.5	99.7	577.4	194.6	99.8	0.69
KV	Z24	560.0	547.7	194.4	99.7	579.7	194.5	99.7	0.69

Fáze	Z.	σ_{nap}	σ_{min}	$E_{eff,min}$	$E_{eff,min}/E_0$	σ_{max}	$E_{eff,max}$	$E_{eff,min}/E_0$	Posouzení 0.45 f_{pk}
		[MPa]	[MPa]	[GPa]	[%]	[MPa]	[GPa]	[%]	
KV	Z25	560.0	545.5	194.2	99.6	582.5	194.4	99.7	0.70
KV	Z26	560.0	543.0	194.1	99.5	585.8	194.3	99.6	0.70
KV	Z27	560.0	542.2	193.9	99.4	584.7	194.1	99.6	0.70
KV	Z28	560.0	541.4	193.8	99.4	584.1	194.0	99.5	0.70
KV	Z29	560.0	542.6	193.6	99.3	584.5	193.9	99.4	0.70
KV	Z30	560.0	542.4	193.4	99.2	587.4	193.7	99.4	0.70

4.11.3.2 Uvedení do provozu

Tab. 4.11.6: Omezení napětí v závěsech, uvedení do provozu

Fáze	Z.	σ_{nap}	σ_{min}	$E_{eff,min}$	$E_{eff,min}/E_0$	σ_{max}	$E_{eff,max}$	$E_{eff,min}/E_0$	Posouzení 0.45 f_{pk}
		[MPa]	[MPa]	[GPa]	[%]	[MPa]	[GPa]	[%]	
ST19 UP	Z1	560.0	669.9	193.8	99.4	604.8	193.4	99.2	0.72
ST19 UP	Z2	420.0	394.0	194.5	99.8	533.2	194.8	99.9	0.64
ST19 UP	Z3	420.0	397.8	191.4	98.2	532.1	193.5	99.2	0.64
ST19 UP	Z4	420.0	400.9	191.1	98.0	531.4	193.3	99.1	0.63
ST19 UP	Z5	420.0	403.1	191.1	98.0	531.4	193.3	99.1	0.63
ST19 UP	Z6	420.0	404.1	191.2	98.0	531.9	193.3	99.1	0.64
ST19 UP	Z7	420.0	404.1	191.2	98.0	532.9	193.3	99.1	0.64
ST19 UP	Z8	560.0	543.6	193.4	99.2	673.6	194.2	99.6	0.80
ST19 UP	Z9	560.0	544.7	193.4	99.2	672.8	194.2	99.6	0.80
ST19 UP	Z10	210.0	198.0	157.4	80.7	319.3	184.5	94.6	0.38
ST19 UP	Z11	210.0	201.3	158.9	81.5	313.0	183.9	94.3	0.37
ST19 UP	Z12	280.0	272.3	178.6	91.6	375.9	188.4	96.6	0.45
ST19 UP	Z13	280.0	271.2	178.4	91.5	368.1	188.0	96.4	0.44
ST19 UP	Z14	210.0	200.3	158.5	81.3	288.6	181.1	92.8	0.34
ST19 UP	Z15	210.0	200.6	194.2	99.6	274.8	194.7	99.8	0.33
ST19 UP	Z16	420.0	412.0	194.9	100.0	501.3	195.0	100.0	0.60
ST19 UP	Z17	420.0	411.9	194.8	99.9	524.4	194.9	100.0	0.63
ST19 UP	Z18	420.0	412.2	194.7	99.9	541.7	194.9	99.9	0.65
ST19 UP	Z19	420.0	412.6	194.6	99.8	553.8	194.8	99.9	0.66
ST19 UP	Z20	420.0	412.7	194.4	99.7	562.0	194.8	99.9	0.67
ST19 UP	Z21	560.0	552.4	194.7	99.8	707.5	194.9	99.9	0.85
ST19 UP	Z22	560.0	551.8	194.6	99.8	710.8	194.8	99.9	0.85
ST19 UP	Z23	560.0	550.3	194.5	99.7	712.2	194.8	99.9	0.85
ST19 UP	Z24	560.0	548.0	194.4	99.7	712.0	194.7	99.9	0.85
ST19 UP	Z25	560.0	545.4	194.2	99.6	710.6	194.7	99.8	0.85
ST19 UP	Z26	560.0	542.5	194.1	99.5	707.9	194.6	99.8	0.85
ST19 UP	Z27	560.0	539.4	193.9	99.4	703.8	194.5	99.7	0.84

Fáze	Z.	σ_{nap}	σ_{min}	$E_{eff,min}$	$E_{eff,min}/E_0$	σ_{max}	$E_{eff,max}$	$E_{eff,min}/E_0$	Posouzení 0.45 f_{pk}
		[MPa]	[MPa]	[GPa]	[%]	[MPa]	[GPa]	[%]	
ST19 UP	Z28	560.0	536.1	193.7	99.3	698.6	194.4	99.7	0.83
ST19 UP	Z29	560.0	532.5	193.5	99.2	693.8	194.3	99.7	0.83
ST19 UP	Z30	560.0	528.8	193.3	99.1	688.6	194.2	99.6	0.82

4.11.3.3 Konec životnosti

Tab. 4.11.7 Omezení napětí v závěsech, konec životnosti

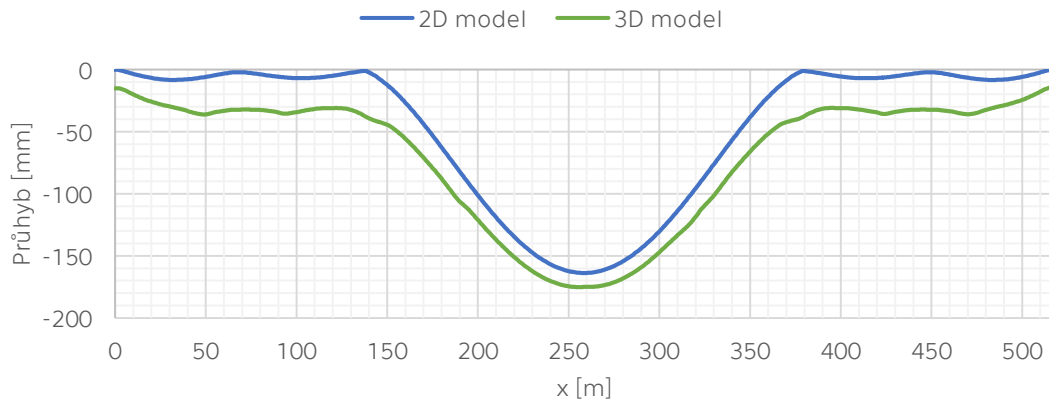
Fáze	Z.	σ_{nap}	σ_{min}	$E_{eff,min}$	$E_{eff,min}/E_0$	σ_{max}	$E_{eff,max}$	$E_{eff,min}/E_0$	Posouzení 0.45 f_{pk}
		[MPa]	[MPa]	[GPa]	[%]	[MPa]	[GPa]	[%]	
ST20 KŽ	Z1	560.0	574.4	193.1	99.0	584.6	193.2	99.1	0.70
ST20 KŽ	Z2	420.0	406.4	194.6	99.8	545.7	194.8	99.9	0.65
ST20 KŽ	Z3	420.0	412.3	191.8	98.4	546.5	193.6	99.3	0.65
ST20 KŽ	Z4	420.0	417.3	191.5	98.2	547.8	193.4	99.2	0.65
ST20 KŽ	Z5	420.0	421.0	191.6	98.3	549.3	193.5	99.2	0.66
ST20 KŽ	Z6	420.0	423.1	191.6	98.3	550.9	193.5	99.2	0.66
ST20 KŽ	Z7	420.0	423.8	191.7	98.3	552.6	193.5	99.2	0.66
ST20 KŽ	Z8	560.0	563.9	193.6	99.3	693.9	194.2	99.6	0.83
ST20 KŽ	Z9	560.0	564.5	193.6	99.3	692.6	194.2	99.6	0.83
ST20 KŽ	Z10	210.0	220.0	166.1	85.2	341.4	186.3	95.6	0.41
ST20 KŽ	Z11	210.0	225.5	167.9	86.1	337.1	186.0	95.4	0.40
ST20 KŽ	Z12	280.0	297.0	182.1	93.4	400.6	189.5	97.2	0.48
ST20 KŽ	Z13	280.0	294.2	181.8	93.2	391.1	189.1	97.0	0.47
ST20 KŽ	Z14	210.0	218.5	165.6	84.9	306.8	183.2	94.0	0.37
ST20 KŽ	Z15	210.0	211.0	194.3	99.6	285.2	194.7	99.9	0.34
ST20 KŽ	Z16	420.0	418.7	194.9	100.0	508.0	195.0	100.0	0.61
ST20 KŽ	Z17	420.0	427.8	194.9	99.9	540.3	194.9	100.0	0.65
ST20 KŽ	Z18	420.0	437.0	194.8	99.9	566.5	194.9	99.9	0.68
ST20 KŽ	Z19	420.0	444.2	194.7	99.8	585.5	194.9	99.9	0.70
ST20 KŽ	Z20	420.0	448.8	194.6	99.8	598.2	194.8	99.9	0.71
ST20 KŽ	Z21	560.0	590.9	194.7	99.9	746.0	194.9	99.9	0.89
ST20 KŽ	Z22	560.0	591.0	194.7	99.8	750.0	194.8	99.9	0.90
ST20 KŽ	Z23	560.0	588.7	194.6	99.8	750.6	194.8	99.9	0.90
ST20 KŽ	Z24	560.0	584.2	194.5	99.7	748.2	194.8	99.9	0.89
ST20 KŽ	Z25	560.0	578.1	194.4	99.7	743.3	194.7	99.8	0.89
ST20 KŽ	Z26	560.0	570.6	194.2	99.6	735.9	194.6	99.8	0.88
ST20 KŽ	Z27	560.0	561.8	194.0	99.5	726.2	194.6	99.8	0.87
ST20 KŽ	Z28	560.0	552.0	193.8	99.4	714.6	194.5	99.7	0.85
ST20 KŽ	Z29	560.0	541.5	193.6	99.3	702.7	194.3	99.7	0.84
ST20 KŽ	Z30	560.0	530.4	193.3	99.1	690.2	194.2	99.6	0.82

4.11.4 Průhyb

Požadavky na deformace v EN nejsou uvedeny, limitní hodnoty jsou uvedeny v Národní příloze ČR. Maximální průhyb od zatížení dopravou je omezen na hodnotu $L/600$.

$$v_{lim} = \frac{L}{600} = \frac{236000}{600} = 393 \text{ mm} \quad (\text{Rov. 25})$$

Průhyb je porovnán pro oba modely konstrukce, pro 3D model je navíc vybrán řez na kraji mostovky, kde je průhyb největší. Porovnání průhybu je v Obr. 4.11.36.



Obr. 4.11.36: Průhyb

Maximální průhyb ze 2D modelu na konci životnosti:

$$v_{\max,2D} = 163,8 \text{ mm} < v_{lim} = 393 \text{ mm} \quad \dots \text{ vyhovuje}$$

Maximální průhyb ze 2D modelu na kraji nosné konstrukce:

$$v_{\max,3D} = 175,1 \text{ mm} < v_{lim} = 393 \text{ mm} \quad \dots \text{ vyhovuje}$$

4.12 Mezní stavy únosnosti

V mezním stavu únosnosti je v této práci posouzen průřez mostovky na ohyb a normálovou sílu, dále jsou posouzeny závěsy na normálovou sílu a únavu.

4.12.1 Ohyb a normálová síla

V této kapitole jsou posouzeny dva průřezy mostovky s extrémním kladným a záporným ohybovým momentem ve středním poli (oba u středu rozpětí, $x = 250,0$ m) v čase na konci životnosti. Pro účely posouzení MSÚ je zjednodušen tvar průřezu na obdélníky a sjednocena tloušťka desek. Působící část betonového průřezu i míra zplastizování materiálů se počítá v závislosti na daném zatížení průřezu - průřez je posouzen proužkovou metodou v Excelu, kdy je rozdělen na proužky výšky 5 mm. Proužky jsou rozděleny podle toho, jestli v nich je předpínací výztuž nebo beton. Pro zjednodušení jsou kabely sjednoceny do skupin: „h.d.“ – kabely v horní desce (14 ks), „ž1“ horní kabel ve středním žeburu (1 ks), „ž2“ – dolní kabel ve středním žeburu (1 ks), „s“ – kabely ve stěnách (8 ks), „d.d.“ – kabely v dolní desce (4 ks).

Celkové účinky přepínacích kabelů i rektifikace závěsů na konstrukci ($M_{P,tot}$) jsou počítány v časově závislé analýze konstrukce, v Tab. 4.12.1 níže je vyčíslení primárních (M_{PP}) a sekundárních (M_{PS}) účinků předpětí na posuzovaný průřez.

Tab. 4.12.1: Účinky předpětí na posuzovaný řez

Skupina kabelů	Počet kabelů	N_P	$N_P \cdot n$	e_P	M_{PP}	$M_{P,tot}$	M_{PS}
		[MN]	[MN]	[m]	[MNm]	[MNm]	[MNm]
h.d.	14	4.47	62.64	1.26	78.94	-	-
ž1	1	4.47	4.47	0.65	2.92	-	-
ž2	1	4.47	4.47	0.10	0.46	-	-
s	8	4.36	34.91	-2.13	-74.39	-	-
d.d	4	4.36	17.46	-3.05	-53.20	-	-
celkem:	28		123.95		-45.27	-789.92	-744.65

Napětí v kabelech je převzato z časově závislé analýzy konstrukce. Nejprve je určeno základní napětí a přetvoření kabelů od síly v kabelech na konci životnosti převzaté z TDA, viz Tab. 4.12.2.

Tab. 4.12.2: Základní přetvoření předpínací výztuže

Skupina kabelů	Síla v kabelech	ϵ_P	ϵ_{CP}	ϵ_{PO}
	[MN]	[-]	[-]	[-]
h.d.	4.47	0.00050	-0.00001	0.00051
ž1	4.47	0.00695	-0.00002	0.00697
ž2	4.47	0.00695	-0.00002	0.00697
s	4.36	0.00085	-0.00002	0.00087
d.d	4.36	0.00170	-0.00003	0.00172

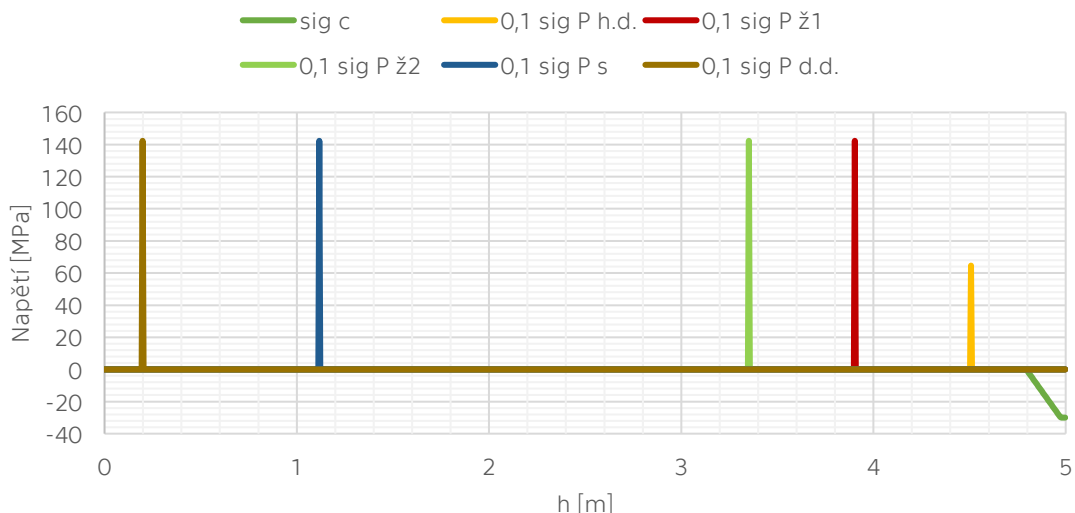
Kde ϵ_p je přetvoření předpínací výztuže, ϵ_{cP} je přetvoření betonu v úrovni předpínací výztuže a ϵ_{p0} je přetvoření předpínací výztuže po pružném odlehčení. Po pružném odlehčení je průřez přitížen na mez únosnosti, která nastane buď mezním přetvořením betonu nebo mezním přetvořením předpínací výztuže. Poloha neutrální osy je iterována z podmínky rovnosti sil působících na průřez – síla v betonu, v předpínací výztuži a vnější zatížení. A to za předpokladu mezního poměrného přetvoření betonu $\epsilon_{cu3} = 2 ‰$ (vzhledem k tenké horní a dolní desce nosné konstrukce se nepoužívá hodnota 3,5 ‰). Pracovní diagramy materiálů jsou uvedeny v kapitole 4.3.1. Na dalších stranách jsou uvedeny výsledky a diagram průběhu napětí po výšce průřezu z tohoto výpočtu.

4.12.1.1 Extrémní kladný ohybový moment

Maximální ohybový moment a normálová síla ze stejné kombinace:

$$M_{Ed,max} + \gamma_{P,fav} * M_{PS} = 338,070 \text{ MNm}$$

$$N_{Ed} = -35,120 \text{ MN}$$



Obr. 4.12.1: Průběh napětí v řezu v MSÚ ($M_{Rd,max}$)

Výsledné hodnoty:

$$x = 205 \text{ mm}$$

$$N_c = -130,748 \text{ MN}$$

$$N_{P,h.d.} = 29,871 \text{ MN}$$

$$N_{P,\dot{z}1} = 4,697 \text{ MN}$$

$$N_{P,\dot{z}2} = 4,697 \text{ MN}$$

$$N_{P,s} = 37,575 \text{ MN}$$

$$N_{P,d.d.} = 18,788 \text{ MN}$$

$$M_{Rd} = 544,287 \text{ MNm} \geq M_{Ed,max} + \gamma_{P,fav} * M_{PS} = 338,070 \text{ MNm}$$

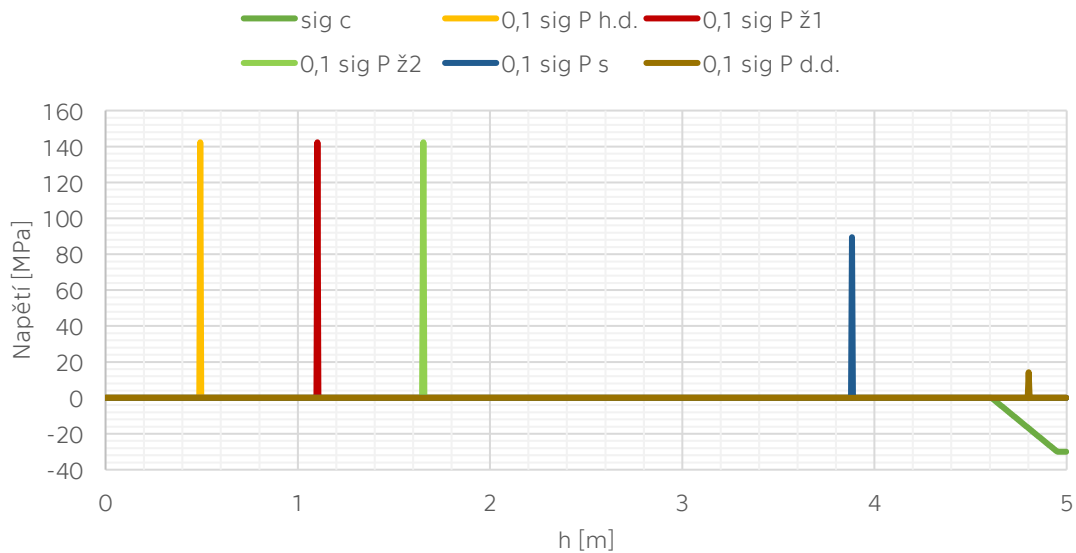
$$M_{Ed,max} / M_{Rd} = 0,621 \dots \text{ vyhovuje}$$

4.12.1.2 Extrémní záporný ohybový moment

Minimální ohybový moment a normálová síla ze stejné kombinace:

$$M_{Ed,min} + \gamma_{P,fav} * M_{PS} = -380,90 \text{ MNm}$$

$$N_{Ed} = -6,21 \text{ MN}$$



Obr. 4.12.2: Průběh napětí v řezu v MSÚ ($M_{Rd,min}$)

Výsledné hodnoty:

$$x = 391 \text{ mm}$$

$$N_c = -106,854 \text{ MN}$$

$$N_{P,h.d.} = 65,757 \text{ MN}$$

$$N_{P,\dot{z}1} = 4,697 \text{ MN}$$

$$N_{P,\dot{z}2} = 4,697 \text{ MN}$$

$$N_{P,s} = 23,621 \text{ MN}$$

$$N_{P,d.d.} = 1,882 \text{ MN}$$

$$\mathbf{M_{Rd} = 384,949 \text{ MNm} \geq M_{Ed,min} + \gamma_{P,fav} * M_{PS} = |-380,90| \text{ MNm}}$$

$$\mathbf{M_{Ed,max} / M_{Rd} = 0,989 \dots \text{ vyhovuje}}$$

4.12.2 Normálová síla v závěsech

Závěsy jsou v mezním stavu únosnosti posouzeny také na konci životnosti. Maximální návrhové napětí je spočteno podle vzorce níže, přičemž dílčí součinitel γ_s je pro závěsy 1,35.

$$f_{p0,1d} = \frac{f_{p0,1k}}{\gamma_s} = \frac{1636,8}{1,35} = 1212,4 \text{ MPa} \quad (\text{Rov. 26})$$

Napětí v závěsech na konci životnosti je vypočteno v časově závislé analýze konstrukce. Posouzení jednotlivých závěsů je uvedeno v tabulce Tab. 4.12.3, kde je uveden poměr napětí a pevnosti $\sigma_{Ed}/f_{p0,1d}$. Všechny závěsy vyhoví.

Tab. 4.12.3: Posouzení závěsů v MSÚ

Závěs	σ_{Ed}	Posouzení
	[MPa]	
Z1	1 179.30	0.97
Z2	779.55	0.64
Z3	780.73	0.64
Z4	782.52	0.65
Z5	784.71	0.65
Z6	787.06	0.65
Z7	789.36	0.65
Z8	991.30	0.82
Z9	989.36	0.82
Z10	487.69	0.40
Z11	481.59	0.40
Z12	572.31	0.47
Z13	558.69	0.46
Z14	438.31	0.36
Z15	407.46	0.34
Z16	725.72	0.60
Z17	771.83	0.64
Z18	809.26	0.67
Z19	836.37	0.69
Z20	854.55	0.70
Z21	1 065.78	0.88
Z22	1 071.47	0.88
Z23	1 072.33	0.88
Z24	1 068.85	0.88
Z25	1 061.80	0.88
Z26	1 051.27	0.87
Z27	1 037.38	0.86
Z28	1 020.84	0.84
Z29	1 003.89	0.83
Z30	986.00	0.81

4.12.3 Únava

V této kapitole jsou na únavu posouzeny závěsy. 2D model konstrukce je zatížen modelem LM3 na únavu (viz kapitola 4.5.3.1.5). Od tohoto zatížení je následně pomocí příčinkových čar spočtena maximální normálová síla N_{max} a minimální normálová síla N_{min} v každém závěsu, z těchto sil je pak vypočteno napětí. Rozdíl napětí je vypočten jako rozdíl maximálního a minimálního napětí. Tento rozdíl napětí je limitován hodnotou 200 MPa

$$\Delta\sigma_{lim} = 200 \text{ MPa}$$

Jednotkové posouzení je uvedeno v Tab. 4.12.4. Všechny závěsy na únavu vyhoví.

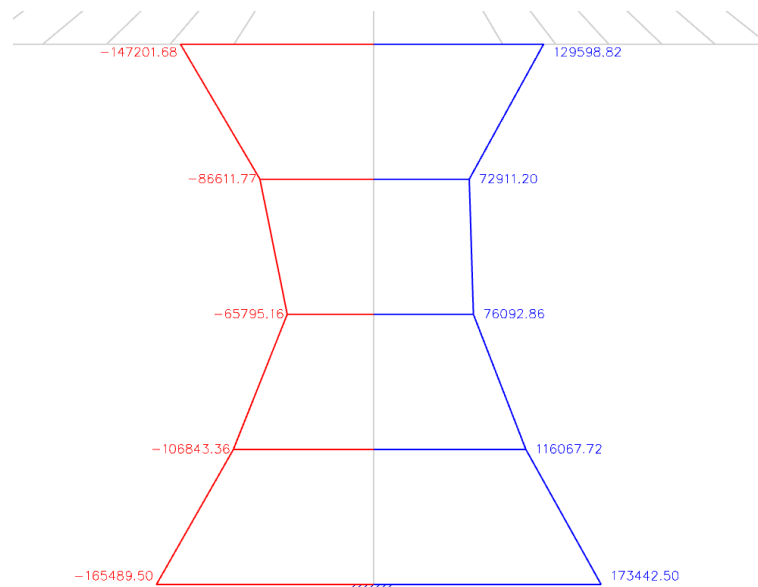
Tab. 4.12.4: Únava závěsů

Závěs	N_{max}	N_{min}	σ_{max}	σ_{min}	$\Delta\sigma$	Posouzení
	[kN]	[kN]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	$\Delta\sigma_{lim}$
Z1	238.30	-40.00	42.94	-7.21	50.14	0.25
Z2	463.10	-23.70	42.29	-2.16	44.46	0.22
Z3	458.80	-43.90	41.90	-4.01	45.91	0.23
Z4	460.10	-70.60	42.02	-6.45	48.47	0.24
Z5	468.70	-97.20	42.80	-8.88	51.68	0.26
Z6	485.60	-121.10	44.35	-11.06	55.41	0.28
Z7	509.20	-138.10	46.50	-12.61	59.11	0.30
Z8	534.10	-141.00	48.78	-12.88	61.65	0.31
Z9	543.50	-116.70	49.63	-10.66	60.29	0.30
Z10	524.10	-59.50	47.86	-5.43	53.30	0.27
Z11	477.10	-60.60	43.57	-5.53	49.11	0.25
Z12	403.20	-71.30	36.82	-6.51	43.33	0.22
Z13	303.40	-73.00	27.71	-6.67	34.37	0.17
Z14	327.90	-65.40	29.95	-5.97	35.92	0.18
Z15	363.30	-62.60	26.62	-4.59	31.20	0.16
Z16	481.30	-36.80	35.26	-2.70	37.96	0.19
Z17	407.00	-15.60	49.33	-1.89	51.22	0.26
Z18	489.10	-10.50	59.28	-1.27	60.56	0.30
Z19	545.80	-7.60	66.16	-0.92	67.08	0.34
Z20	582.70	-6.40	70.63	-0.78	71.41	0.36
Z21	603.60	-6.90	73.16	-0.84	74.00	0.37
Z22	611.00	-9.20	74.06	-1.12	75.18	0.38
Z23	606.60	-12.20	73.53	-1.48	75.01	0.38
Z24	591.90	-15.60	71.75	-1.89	73.64	0.37
Z25	568.40	-18.70	68.90	-2.27	71.16	0.36
Z26	537.20	-21.60	65.12	-2.62	67.73	0.34
Z27	500.00	-24.40	60.61	-2.96	63.56	0.32
Z28	459.10	-27.20	55.65	-3.30	58.95	0.29
Z29	416.90	-30.10	50.53	-3.65	54.18	0.27
Z30	376.00	-33.10	45.58	-4.01	49.59	0.25

4.13 Předběžné ověření pylonu

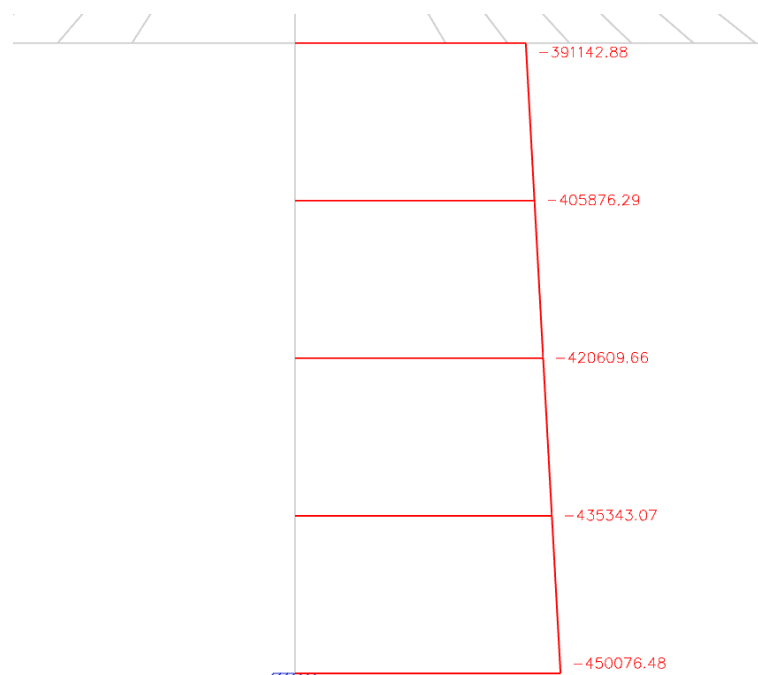
Hlavním předmětem této práce je návrh a posouzení hlavní nosné konstrukce mostovky. Její působení však ovlivňují i dimenze prvků spodní stavby. V této kapitole je tedy předběžně ověřena spodní část pylonu P3 na kombinaci normálové síly a podélného ohybového momentu M_y .

Obálka ohybového momentu v pylonu P3 od kombinace pro MSÚ je v Obr. 4.13.1.



Obr. 4.13.1: $M_{y,Ed}$ – pylon v MSÚ [kNm]

Normálová síla v pylonu P3 od kombinace pro MSÚ je v Obr. 4.13.2.



Obr. 4.13.2: N_{Ed} – pylon v MSÚ [kN]

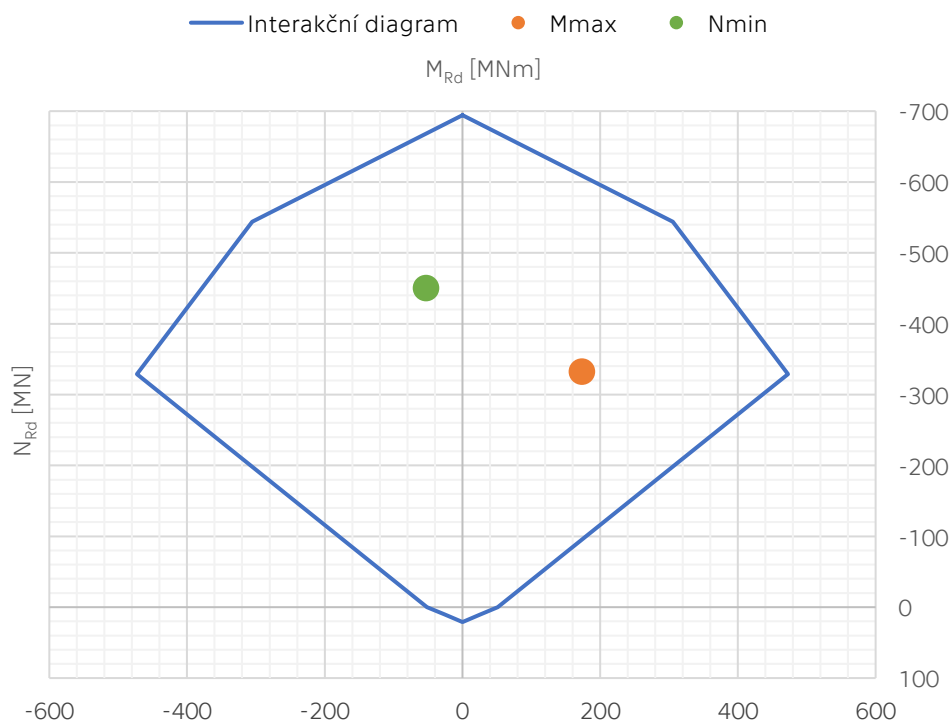
Průřez pylonu je ověřen interakčním diagramem pro kombinaci normálové síly a podélného ohybového momentu M_y . Pro bod 0 je pylon namáhán prostým tlakem. Pro bod 1 je přetvoření betonářské výztuže na tažené straně nulové. Pro bod 2 je napětí v tažené betonářské výztuži rovno mezi kluzu. Pro bod 3 je prvek namáhán čistě ohybem. Pro bod 4 je přetvoření v betonářské výztuži na tlačené straně nulové. A bod 5 je pro prostý tah.

Betonářská výztuž pylonu o rozměrech 5 x 5 m je navržena $\varnothing 32\text{mm}$ 30ks u obou povrchů. Výsledné body interakčního diagramu jsou v Tab. 4.13.1.

Tab. 4.13.1: Body interakčního diagramu pylonu

Bod	N_{Rd}	M_{Rd}
	[MN]	[MNm]
0	-684.65	0.00
1	-538.66	292.51
2	-329.04	447.20
3	0.00	25.84
4	5.25	12.79
5	10.49	0.00

Grafické znázornění interakčního diagramu pylonu včetně posouzení kombinací zatížení pro maximální tlak a maximální ohyb je v Obr. 4.13.3. Pylon na oba případy vyhoví.



Obr. 4.13.3: Interakční diagram pylonu

Z dané geometrie a namáhání pylonu je zřejmé, že posudek bude do značné míry ovlivněn vzpěrem. Štíhlost pylonu je spočtena dle zjednodušeného postupu dle článku 5.8.3 v EN 1992-1-1 [9].

$$\lambda = \frac{l_0}{i} \quad (\text{Rov. 27})$$

Kde i je poloměr setrvačnosti a l_0 je efektivní délka, která je odhadnuta pro oboustranně vetknutý a v horním konci posuvný prvek jako $l_0 \approx l = 68 \text{ m}$.

$$\lambda = \frac{68}{\sqrt{\frac{5^4}{12}/5^2}} = \frac{68}{1.44} = 47.11$$

Relativní normálová síla je spočtena dle rovnice dole.

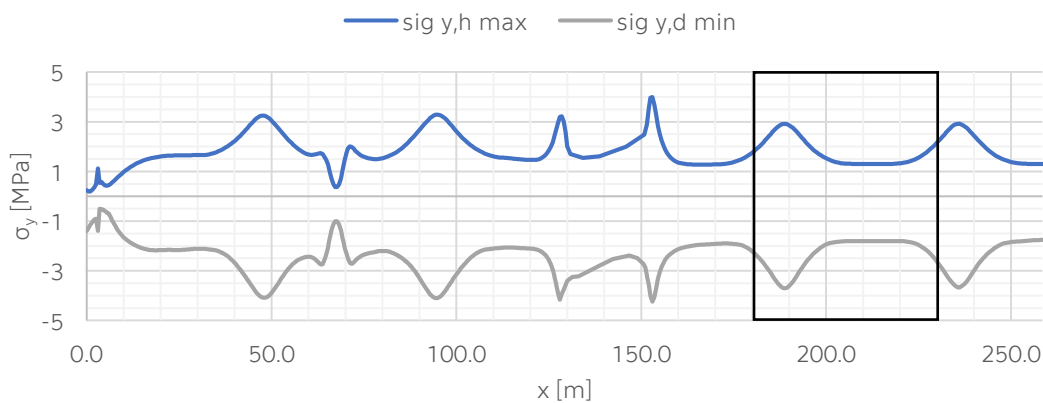
$$n = \frac{N_{Ed}}{A_c f_{cd}} \quad (\text{Rov. 28})$$

$$n = \frac{-391142.88}{5 * 5 * 30 * 10^3} = -0.52$$

Pro $|n| > 0,41$ je limitní hodnota štíhlosti $\lambda_{lim} = 25$, účinek druhého řádu by se tedy měl uvažovat. V návrhu je z tohoto důvodu proto ponechána větší rezerva.

4.14 Příčný směr

V této kapitole je posouzena horní deska mostovky v příčném směru. Posudek je v této práci z důvodu časové náročnosti výpočtu ve 3D modelu omezen na část středního pole (staničení nosné konstrukce 180 – 229 m). Avšak pro ověření působení horní desky mostovky v příčném směru je pro zatížení dopravou LM1 proveden výpočet na celém modelu. Pro lepší názornost výsledku je vybrán podélný řez uprostřed horní desky mezi stěnou komory a krajními vzpěrami (řez 11' viz Obr. 4.14.2), na tomto řezu je zobrazen průběh σ_y při horním a dolním povrchu desky v Obr. 4.14.1 níže.

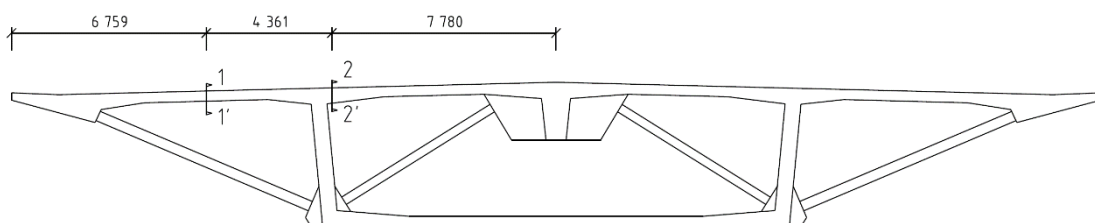


Obr. 4.14.1: σ_y od LM1 – horní deska ve vybraném podélném řezu 11'

Z toho vyplývá, že extrémní hodnoty napětí jsou pro krajní a střední pole přibližně stejné a vybraná část středního pole (znázorněno na obrázku výše) nijak nevybočuje z rozptylu hodnot v celé konstrukci.

Rozmístění zatížení od dopravy ve vybraném úseku je v příčném směru uvažováno v každém zatěžovacím pruhu 1–10, kdy pruh 1 je postupně uvažován v každém zatěžovacím pruhu. Pruhy jsou kombinovány i ve více polohách současně, jsou tak získána všechna možná umístění zatížení. Do pruhů jsou umístěna vozidla z LM1 a LM3, a to jak vozidlo 180 t i 300 t (i když norma dovoluje stanovit dráhu vozidla 300 t, v této práci je umístěno do všech pruhů, výpočet je tedy na straně bezpečné).

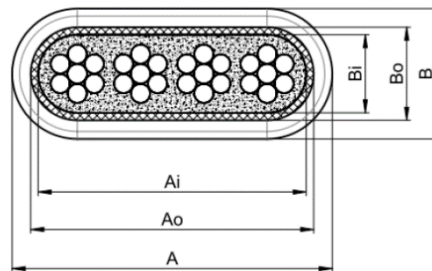
Při posouzení se rovněž uvažoval stav, kdy je konstrukce namáhána pouze stálým zatížením.



Obr. 4.14.2: Posuzované řezy pro příčný směr

4.14.1 Předpětí

Pro předpětí v horní desce je vybrán systém VSLab-S firmy VSL [11]. Jedná se o ploché kabely určené pro desky. Lana jsou v kabelu uspořádána vedle sebe, a to v počtu 2, 3, 4 nebo 5 lan. Lana jsou stejně jako v podélném směru sedmi-drátová o průměru 15,7 mm a s $f_{pk} = 1860$ MPa. Příčný řez kabelem je v Obr. 4.14.3. Kanálky pro příčnou předpínací výztuž jsou zvoleny plastové, stupeň protikoroziční ochrany je tedy PL2.



Obr. 4.14.3: Kabel VSLab-S [11]

Rozměry kabelu podle počtu lan jsou v Tab. 4.14.1.

Tab. 4.14.1: Rozměry kabelu VSLab-S [11]

Rozměr [mm]	Počet lan			
	2	3	4	5
A	51	68	86	104
B	35	35	35	35
Ai	37	54	72	90
Bi	21	21	21	21
A0	41	58	76	94
B0	25	25	25	25

Vedení kabelu v příčném směru je přizpůsobeno způsobu namáhání desky – maximální excentricity je využito nad podporami horní desky (které tvoří stěna komory a střední žebro, kde jsou kotveny závěsy) a ve středech rozpětí desky. Minimální poloměr zakřivení kabelu je stanoven výrobcem na 2,5 m. Navržené vedení kabelu je na Obr. 4.14.4.

TEČNOVÝ POLYGON:

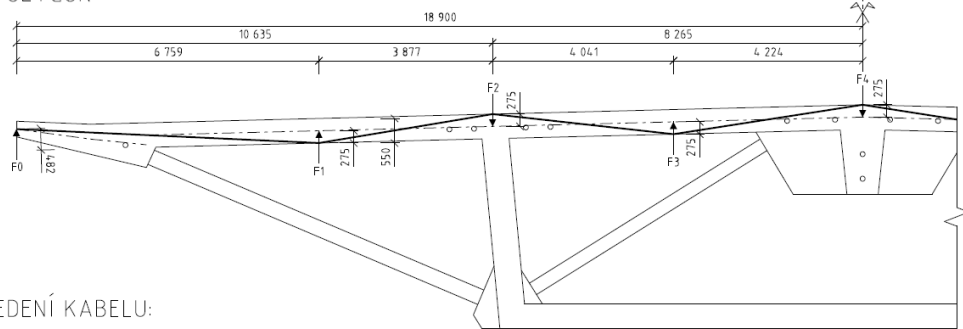


SCHÉMA VEDENÍ KABELU:

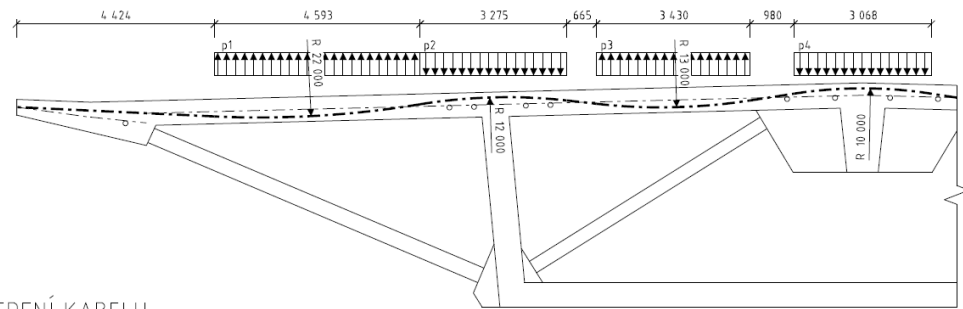
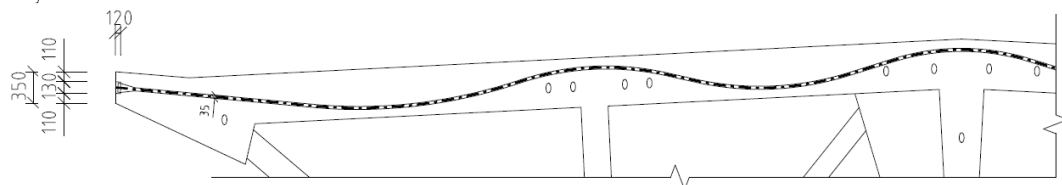


SCHÉMA VEDENÍ KABELU:

Převýšeno 2x



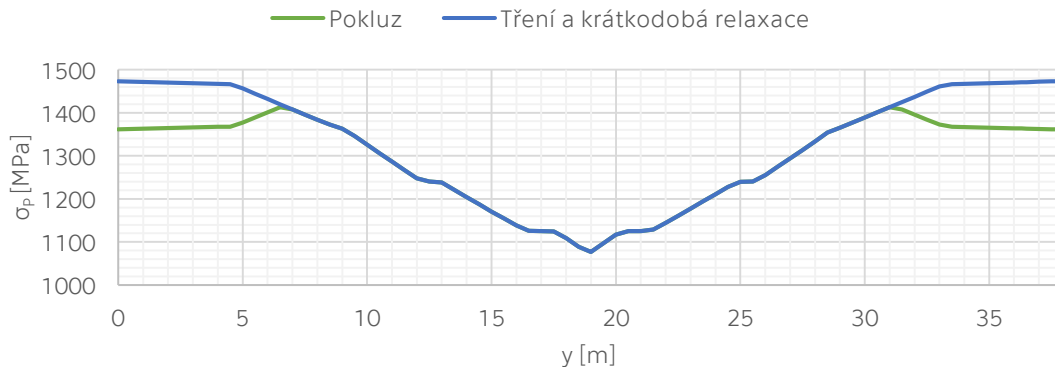
Obr. 4.14.4: Schéma vedení kabelu v příčném směru

Ze schématu výše jsou vypočteny síly od předpětí působící na horní desku. Vzhledem k velkému rozpětí jsou vybrány kabely s 5 lany. Plocha jednoho kabelu je tedy 750 mm². K tomu, aby se dalo předpokládat, že síla od předpětí je do konstrukce přenášena rovnoměrně, je zvolen rozestup mezi kabely 0,5 m. Shrnutí hodnot je v Tab. 4.14.2. Ztráty jsou uvažovány pro čas na konci životnosti 25 %.

Tab. 4.14.2: Návrhová síla v příčných kabelech

Parametr	Znak	Hodnota	Jednotka
Max. napětí ve výztuži	$\sigma_{p,max}$	1473	MPa
Plocha jednoho kabelu	A_{p1}	750	mm ²
Rozestup kabelů	s	0,5	m
Plocha kabelů na 1 m	A_p	1500	mm ² /m
Max. síla ve výztuži na 1 m	P_{max}	2,21	MN/m
Uvažované dlouhodobé ztráty předpětí	-	25	%
Návrhová síla ve výztuži na 1 m	N_p	1,66	MN/m

Krátkodobé ztráty předpětí způsobené třením, krátkodobou relaxací a pokluzem v kotvě 3 mm jsou v Obr. 4.14.5. Je předpokládáno dopnutí kabelu na konci.



Obr. 4.14.5: Krátkodobé ztráty předpětí pro příčné kabely

Následně jsou z geometrie tečnového polygonu a poloměru zakřivení kabelu v Tab. 4.14.3 vypočtené síly působící na konstrukci, ty jsou potom zadány do 3D deskostěnového modelu.

Tab. 4.14.3: Zatížení od příčného předpětí

Bod	L	e	F	Lo	p
	[m]	[m]	[kN/m]	[m]	[kN/m ²]
0	6,759	0,482	118,173	-	-
1	6,759	0,482	118,173	4,593	25,729
2	3,877	0,550	232,753	3,275	71,070
3	4,401	0,550	205,495	6,430	31,959
4	4,224	0,550	213,965	3,068	69,741

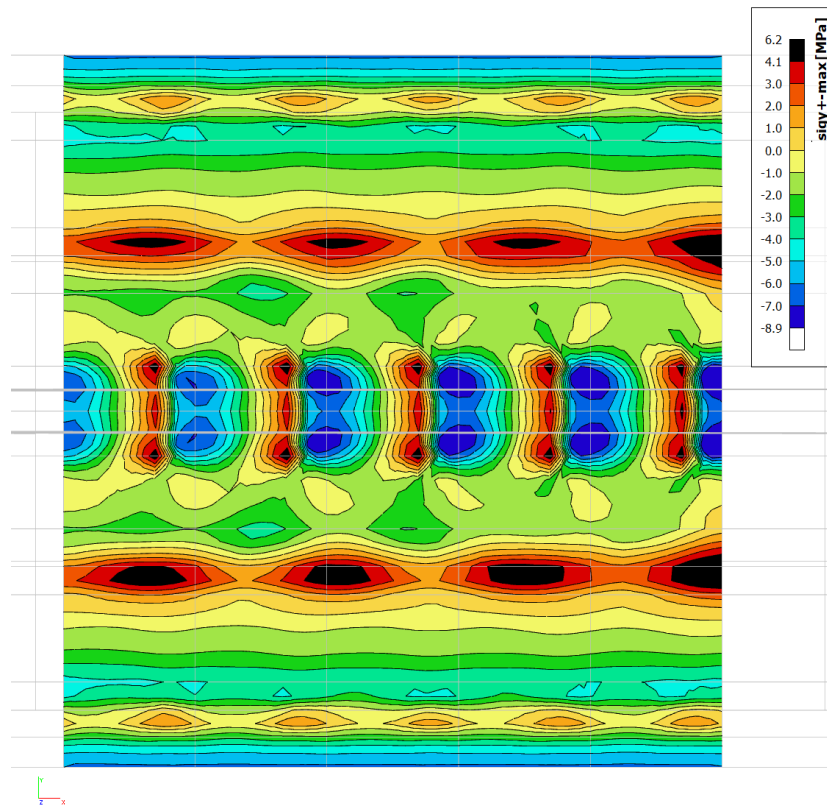
Kde L jsou jednotlivé délky teč. polygonu, e je vzepětí, F jsou síly v lomech polygonu, L_o je horizontální průmět délky oblouků a p je příčné zatížení v místech oblouků.

4.14.2 Mezní stav použitelnosti

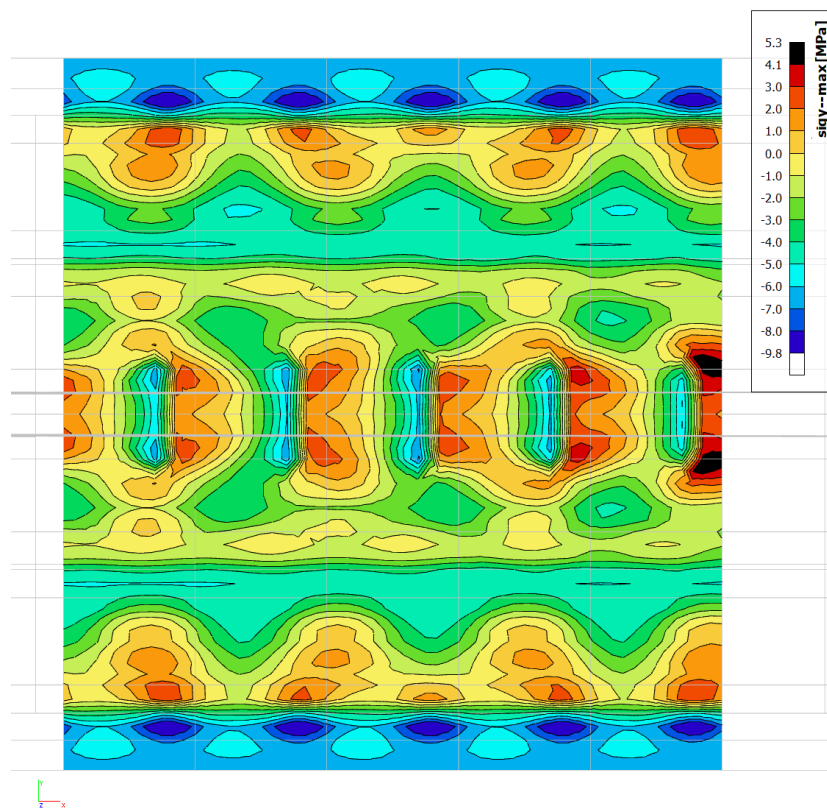
4.14.2.1 Omezení napětí

Předpětí je zadáno do výpočetního modelu jako další zatížení kombinované s ostatními zatěžovacími stavy. Dále jsou uvedeny výsledné hodnoty normálových napětí σ_y u horního povrchu (σ_{y+}) a u dolního povrchu (σ_{y-}) horní desky. Rozhodující se ukázala být maximální kombinace pro tahová napětí v místech nad stěnami komory a nad kotvením závěsů. Na následujících obrázcích jsou zobrazena izopásma pro maximální obálku od kombinací pro MSP a pouze od stálých zatížení.

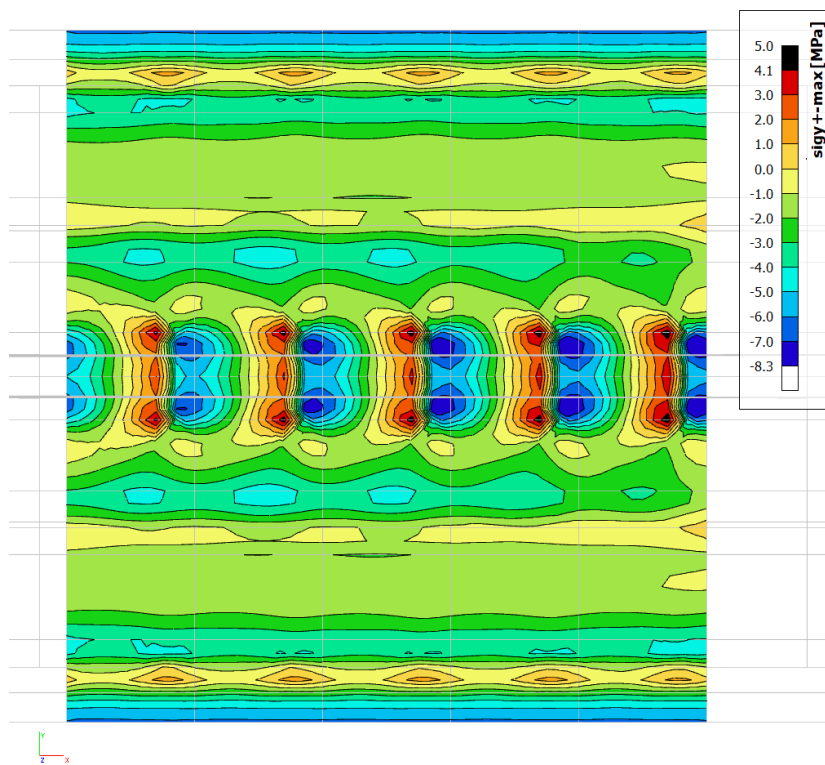
Pro charakteristickou kombinaci zatížení je napětí v betonu omezeno na hodnotu $0,6 f_{ck} = 30$ MPa. Pro kvazi-stálou kombinaci je to $0,45 f_{ck} = 22,5$ MPa. Tyto hodnoty nejsou pro žádnou z kombinací překročeny.



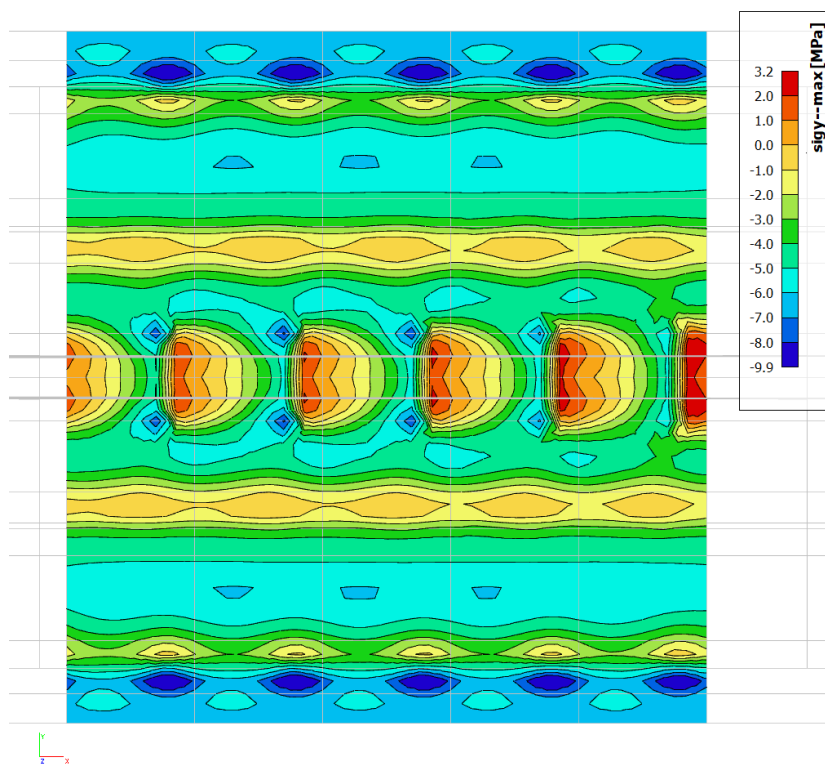
Obr. 4.14.6: σ_y – horní povrch horní desky, char. max.



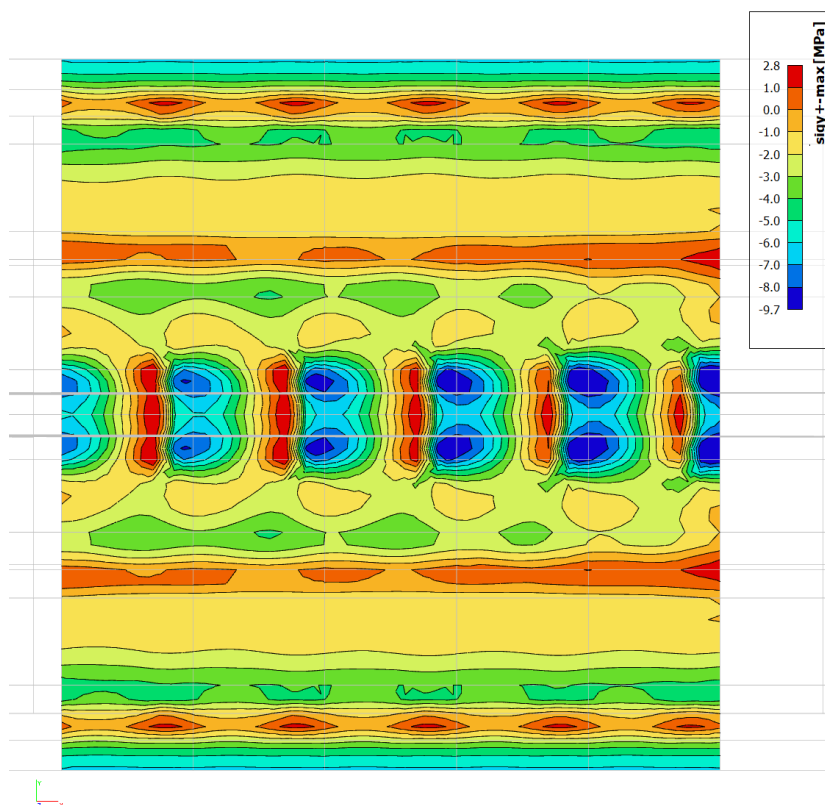
Obr. 4.14.7: σ_y – dolní povrch horní desky, char. max.



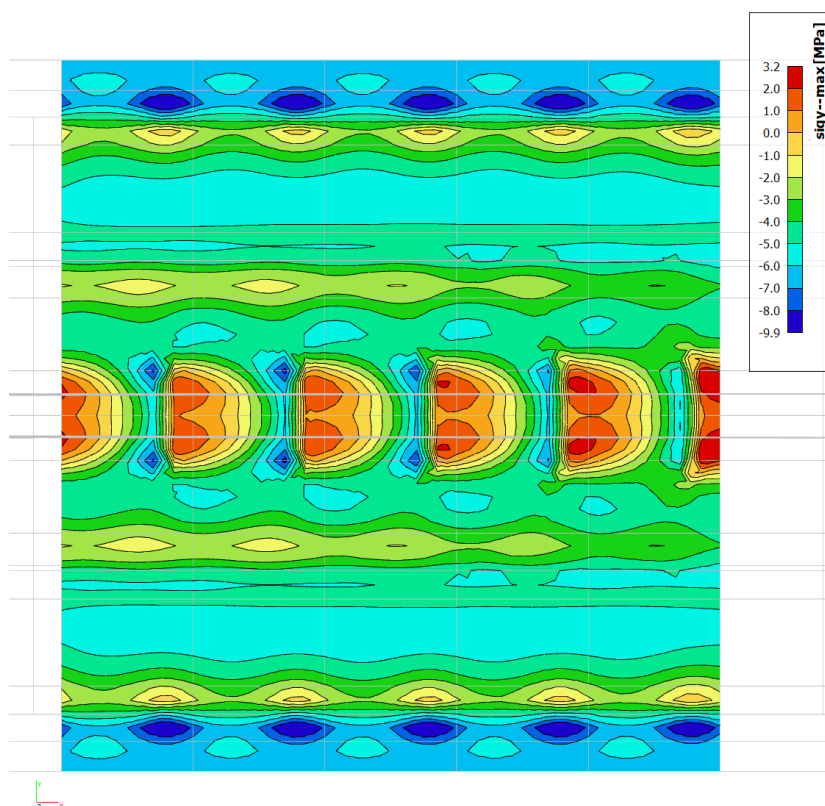
Obr. 4.14.8: σ_y – horní povrch horní desky, část. max.



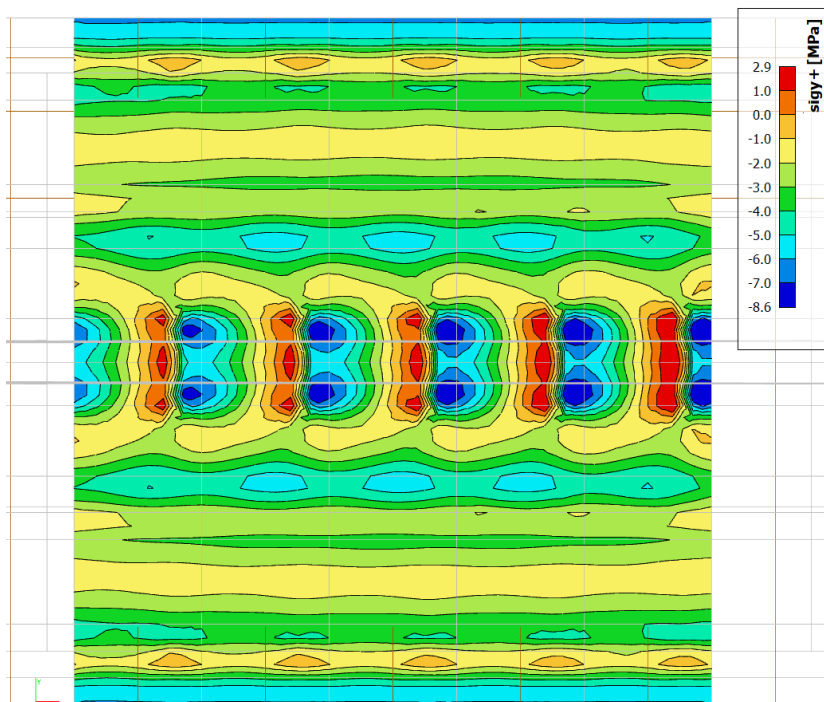
Obr. 4.14.9: σ_y – dolní povrch horní desky, část. max.



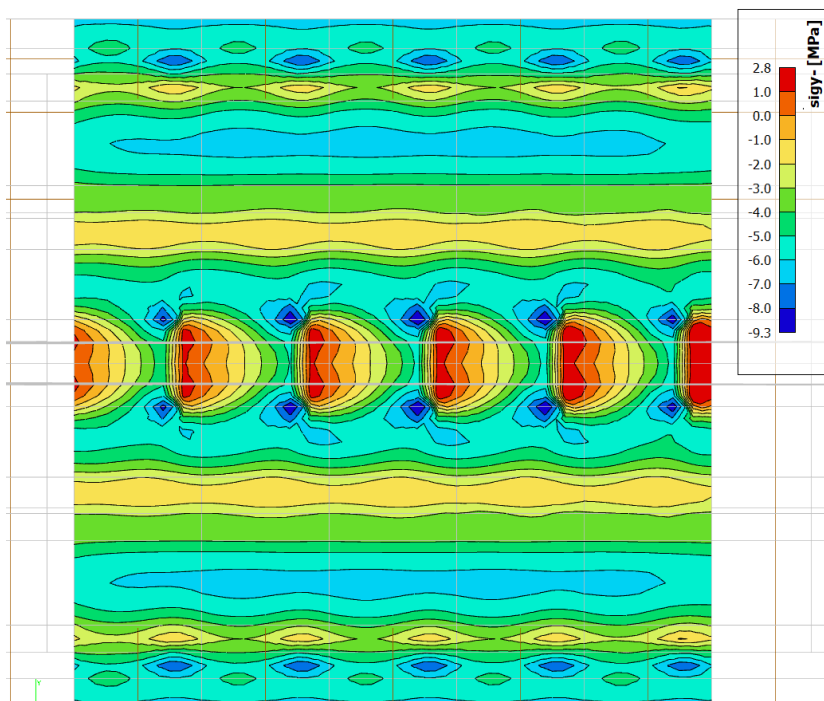
Obr. 4.14.10: σ_y – horní povrch horní desky, kvazi. max.



Obr. 4.14.11: σ_y – dolní povrch horní desky, kvazi. max.



Obr. 4.14.12: σ_y – horní povrch horní desky, stálá zat.

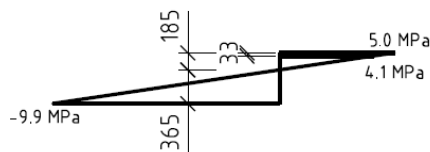


Obr. 4.14.13: σ_y – dolní povrch horní desky, stálá zat.

4.14.2.2 Kontrola trhlin

Z průběhu maximálních normálových napětí je vidět, že došlo k překročení tahové pevnosti betonu $f_{ctm} = 4,1$ MPa při časté kombinaci zatížení. A to v místech okolo kotvení závěsů do mostovky. Je tedy nutno ověřit šířku trhlin. Dle [10] je pro častou kombinaci zatížení, stupeň protikorozní ochrany PL2 a vliv prostředí XD maximální šířka trhliny $w_{max} = 0,2$ mm.

Betonářská výztuž je navržena při horním i dolním povrchu desky $\varnothing 16$ po 150 mm. Na jeden metr šířky je tedy plocha výztuže u jednoho povrchu $1340,4$ mm². Síla ve v horní vrstvě betonářské výztuže se určí z průběhu normálového napětí po výšce desky, viz Obr. 4.14.14.



Obr. 4.14.14: Průběh σ_y v místě vzniku trhlin

V místě vzniku trhliny při překročení tahové pevnosti betonu začne tahové napětí přenášet výztuž. Síla výztuži je rovna objemu obrazce napětí.

$$\sigma_s = \frac{N_{c,t}}{A_s} = \frac{0,5 \cdot (5 + 4,1) \cdot 0,033}{1340,4 \cdot 10^{-6}} = 112,02 \text{ MPa} \quad (\text{Rov. 29})$$

Na dalších stranách je uveden výpočet šířky trhliny.

VÝPOČET ŠÍŘKY TRHLINY

Průřez:

$$b := 1 \text{ m}$$

$$h := 0.55 \text{ m}$$

Beton C50/60:

$$f_{ctm} := 4.1 \text{ MPa}$$

$$f_{ct,eff} := f_{ctm} = 4.1 \text{ MPa}$$

$$E_{cm} := 37 \text{ GPa}$$

Výztuž B500B:

$$E_s := 200 \text{ GPa}$$

$$\sigma_s := 112.02 \text{ MPa}$$

průměr prutů $\phi := 16 \text{ mm}$

os. vzd. $s := 150 \text{ mm}$

$$A_s := \pi \cdot \frac{\phi^2}{4} \cdot \frac{b}{s} = 1340.413 \text{ mm}^2$$

Výpočet vzdálenosti mezi trhlinami:

$$c := 30 \text{ mm}$$

$$x := 365 \text{ mm}$$

$$d := h - c - \frac{\phi}{2} = 512 \text{ mm}$$

$$h_{c,eff} := \min\left(2.5 \cdot (h - d), \frac{(h - x)}{3}, \frac{h}{2}\right) = 61.667 \text{ mm}$$

$$A_{c,eff} := b \cdot h_{c,eff} = 0.062 \text{ m}^2$$

$$\rho_{p,eff} := \frac{A_s}{A_{c,eff}} = 0.022$$

$$k_1 := 0.8$$

$$k_2 := 0.75 \quad (\text{kombinace ohybu a tahu})$$

$$k_3 := 3.4$$

$$k_4 := 0.425$$

$$s_{r,max} := k_3 \cdot c + k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \frac{\phi}{\rho_{p,eff}} = 0.29 \text{ m}$$

Výpočet rozdílu poměrných přetvoření:

$$\alpha_e := \frac{E_s}{E_{cm}} = 5.405$$

$$k_t := 0.6 \quad (\text{krátkodobé zat.})$$

$$\varepsilon_{sm} \varepsilon_{cm} := \max \left(\frac{\sigma_s - k_t \cdot \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} \cdot (1 + \alpha_e \cdot \rho_{p,eff})}{E_s}, 0.6 \frac{\sigma_s}{E_s} \right) = 3.361 \cdot 10^{-4}$$

Šířka trhliny:

$$w_k := s_{r,max} \cdot \varepsilon_{sm} \varepsilon_{cm}$$

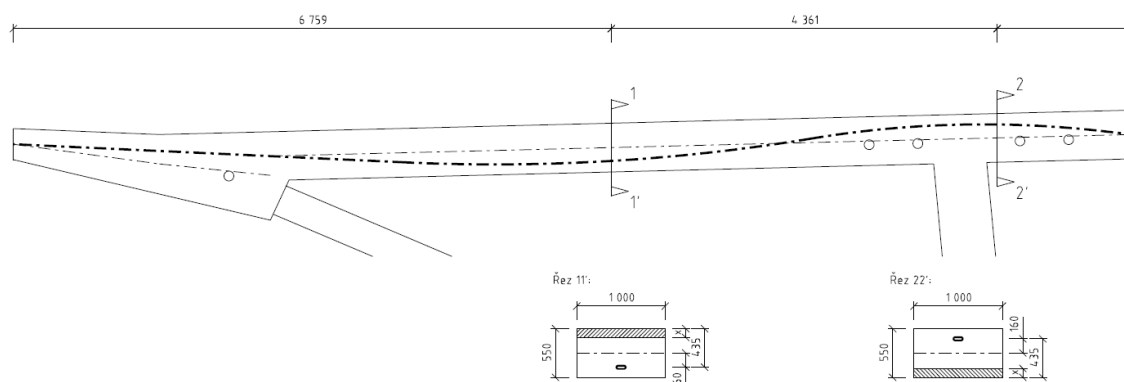
$$w_k = 0.097 \text{ mm}$$

Šířka trhliny tedy vyhoví $w_k = 0,097 \text{ mm} < w_{k,lim} = 0,2 \text{ mm}$.

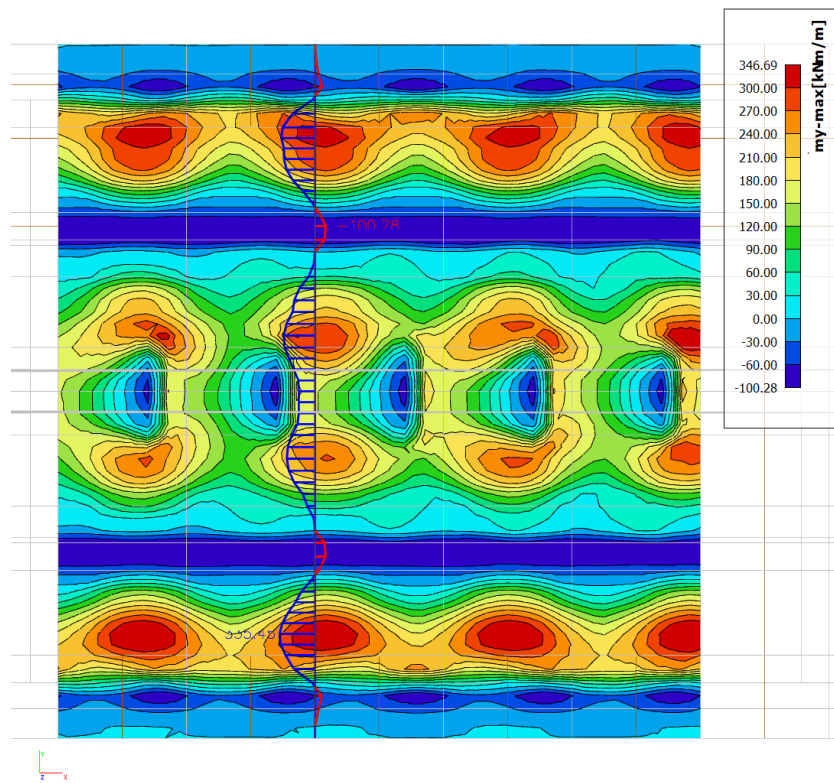
4.14.3 Mezní stav únosnosti

Je posouzen průřez desky v místě největšího záporného a kladného ohybového momentu. Maximální a minimální obálky vnitřních sil od kombinace pro MSÚ jsou v Obr. 4.14.16 - Obr. 4.14.21. Posuzované řezy jsou vyznačeny na Obr. 4.14.15.

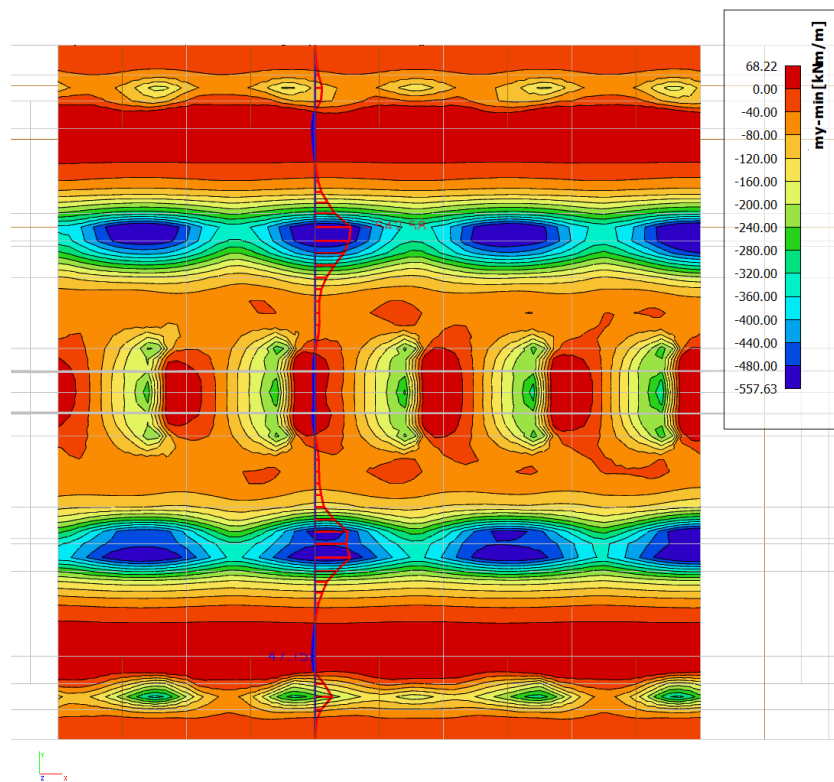
Betonářská výztuž je navržena dle mezního stavu omezení trhlin Ø16 po 150 mm při horním i dolním povrchu.



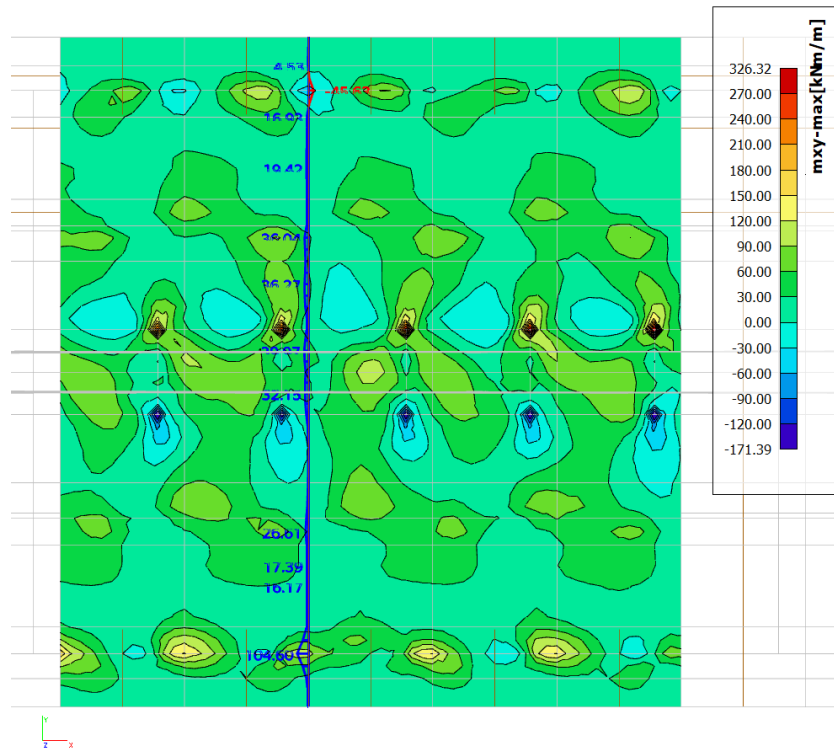
Obr. 4.14.15: Posuzované řezy – příčný směr, MSÚ



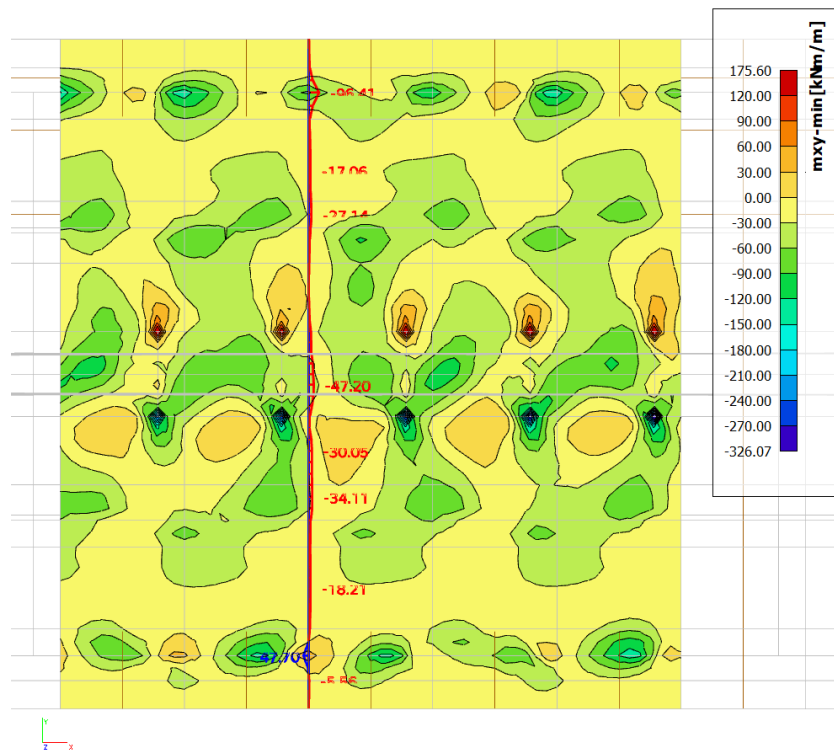
Obr. 4.14.16: m_y max, MSÚ



Obr. 4.14.17: m_y min, MSÚ

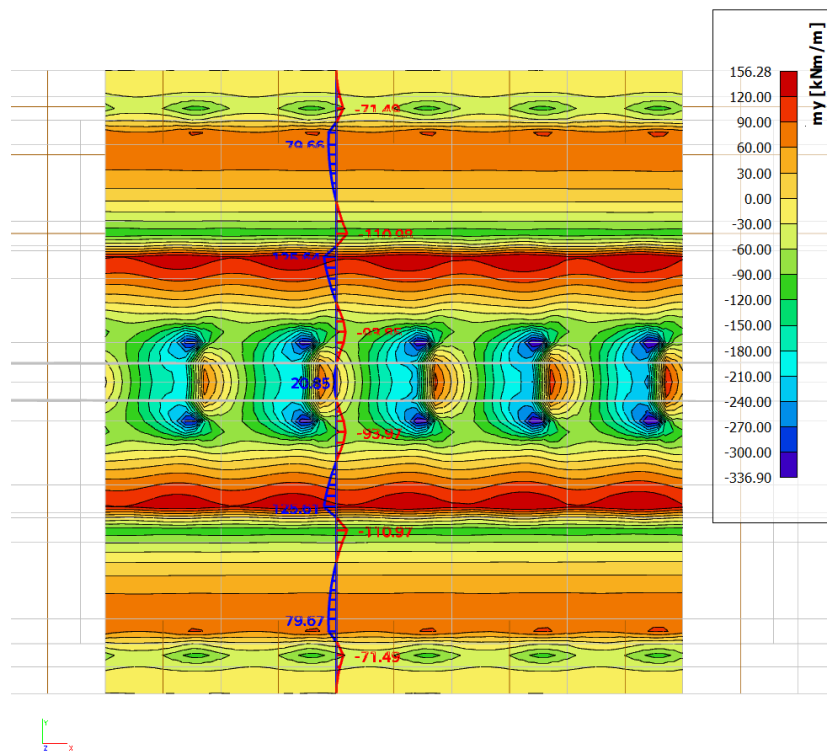


Obr. 4.14.18: m_{xy} max, MSÚ

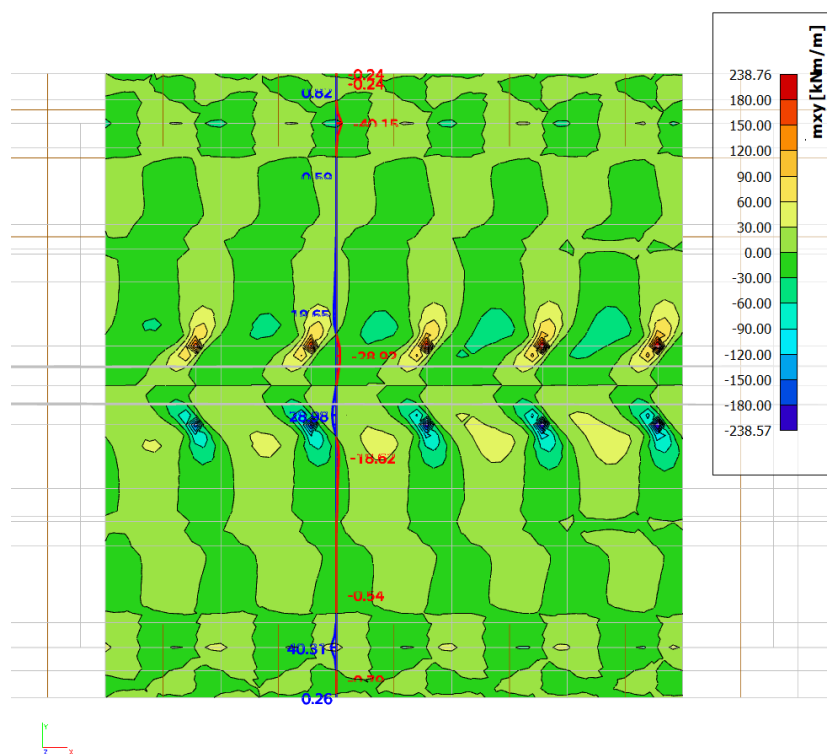


Obr. 4.14.19: m_{xy} min, MSÚ

Deska je také v mezním stavu únosnosti ověřena při působení pouze stálých zatížení, což by mohlo v místech maximálních excentricit předpínací výztuže být rozhodující. V Obr. 4.14.20 a Obr. 4.14.21 jsou vnitřní síly od stálých zatížení.



Obr. 4.14.20: m_y od stálých zat.



Obr. 4.14.21: m_{xy} od stálých zat.

4.14.3.1 Extrémní záporný ohybový moment

Největší záporný moment je v horní desce nad stěnou komory (řez 22'), návrhové hodnoty m_y , m_{xy} , z nich vypočtený dimenzační moment $m_{y,D}$ a n_y ze stejné kombinace jsou uvedeny níže. Účinky předpětí včetně rektifikace závěsů na posuzovaný řez jsou v Tab. 4.14.4.

$$m_{y,Ed,min} = -542,58 \text{ kNm/m}$$

$$m_{xy,Ed} = -19,96 \text{ kNm/m}$$

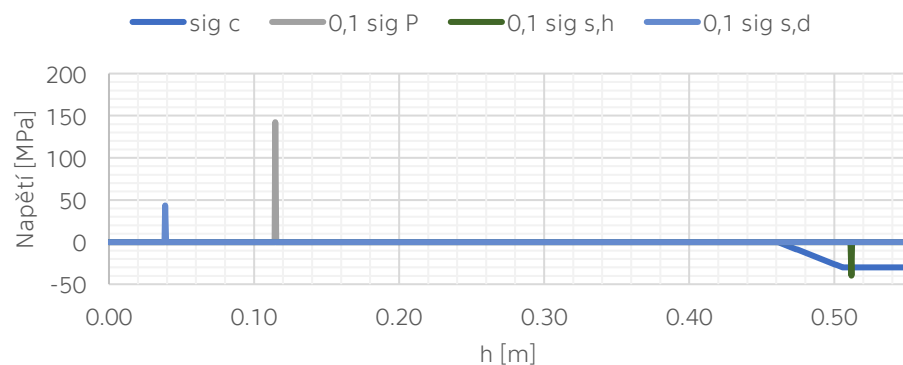
$$m_{y,D} = -(-542,58) + |-19,96| = 562,54 \text{ kNm/m}$$

$$n_{y,Ed} = 183,73 \text{ kN/m}$$

Tab. 4.14.4: Účinky předpětí na řez 22'

N_P	e_P	M_{PP}	$M_{P,tot}$	M_{PS}
[MN]	[m]	[MNm]	[MNm]	[MNm]
1.66	0.16	0.267	0.058	-0.209

Rozložení napětí po průřezu je stejně jako pro podélný směr vypočteno proužkovou metodou, průběh napětí po výšce průřezu je na Obr. 4.14.22.



Obr. 4.14.22: Průběh napětí v řezu 22' v MSÚ

Výsledné hodnoty:

$$x = 89 \text{ mm}$$

$$N_c = -1,995 \text{ MN}$$

$$N_P = 2,135 \text{ MN}$$

$$N_{s,h} = -0,480 \text{ MN}$$

$$N_{s,d} = 0,524 \text{ MN}$$

$$m_{Rd} = 958,46 \text{ kNm/m} \geq m_{y,D} + \gamma_{P,fav} * M_{PS} = |-562,54 - 1,0 * 209| = 771,54 \text{ kNm/m}$$

$$(m_{y,D} + M_{PS}) / m_{Rd} = 0,804 \dots \text{ řez 22' vyhovuje}$$

4.14.3.2 Extrémní kladný ohybový moment

Největší kladný moment je v horní desce v poli mezi krajem konstrukce a stěnou komory (řez 11'), návrhové hodnoty m_y , m_{xy} , z nich vypočtený dimenzační moment $m_{y,D}$ a n_y ze stejné kombinace jsou uvedeny níže. Účinky předpětí včetně rektifikace závěsů na posuzovaný řez jsou v Tab. 4.14.5.

$$m_{y,Ed,max} = 335,45 \text{ kNm/m}$$

$$m_{xy,Ed} = 17,39 \text{ kNm/m}$$

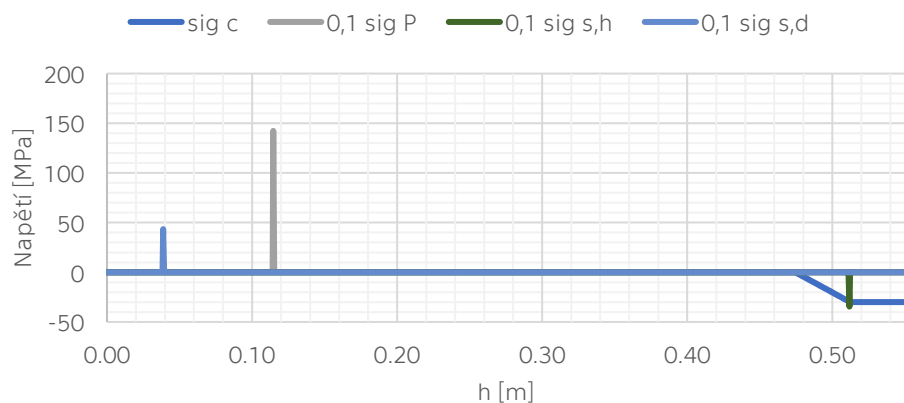
$$m_{y,D} = 335,45 + |17,39| = 352,84 \text{ kNm/m}$$

$$n_{y,Ed} = 546,37 \text{ kN/m}$$

Tab. 4.14.5: Účinky předpětí na řez 11'

N_P	e_P	M_{PP}	$M_{P,tot}$	M_{PS}
[MN]	[m]	[MNm]	[MNm]	[MNm]
1.66	-0.16	-0.267	-0.097	0.170

Rozložení napětí po průřezu je stejně jako pro podélný směr vypočteno proužkovou metodou, průběh napětí po výšce průřezu je na Obr. 4.14.23.



Obr. 4.14.23: Průběh napětí v řezu 11' v MSÚ

Výsledné hodnoty:

$$x = 75 \text{ mm}$$

$$N_c = -1,697 \text{ MN}$$

$$N_P = 2,135 \text{ MN}$$

$$N_{s,h} = -0,103 \text{ MN}$$

$$N_{s,d} = 0,524 \text{ MN}$$

$$m_{Rd} = 681,27 \text{ kNm/m} \geq m_{y,D} + \gamma_{P,fav} * M_{PS} = 352,84 + 1,0 * 170 = 522,84 \text{ kNm/m}$$

$$(m_{y,D} + M_{PS}) / m_{Rd} = 0,767 \dots \text{ řez 11' vyhovuje}$$

4.14.3.3 Ohybový moment – pouze od stálých zatížení

Ověření posuzovaných řezů pro případ namáhání pouze stálými zatíženími je uvedeno níže.

4.14.3.3.1 Řez 22'

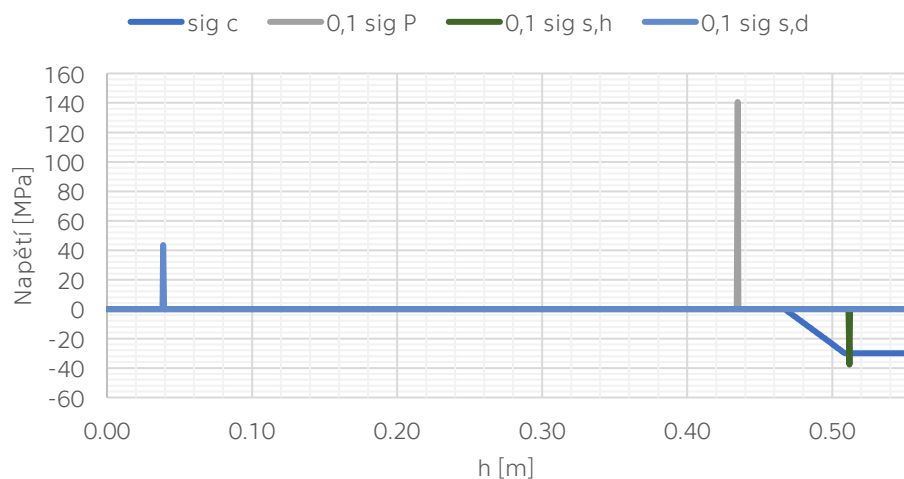
$$m_{y,Ed} + \gamma_{P,fav} * M_{PS} = -110,97 \text{ kNm/m}$$

$$m_{xy,Ed} = -0,59 \text{ kNm/m}$$

$$m_{y,D} = -(-110,97) + |-0,59| = 111,58 \text{ kNm/m}$$

$$n_{y,Ed} = 316,60 \text{ kN/m}$$

Rozložení napětí po průřezu je stejně jako pro podélný směr vypočteno proužkovou metodou, průběh napětí po výšce průřezu je na Obr. 4.14.24.



Obr. 4.14.24: Průběh napětí v řezu 22' v MSÚ – stálá zat.

Výsledné hodnoty:

$$x = 83 \text{ mm}$$

$$N_c = -1,863 \text{ MN}$$

$$N_p = 2,109 \text{ MN}$$

$$N_{s,h} = -0,524 \text{ MN}$$

$$N_{s,d} = 0,454 \text{ MN}$$

$$m_{Rd} = 172,52 \text{ kNm/m}$$

$$m_{y,D} / m_{Rd} = 0,647 \text{ ... řez 22' na stálá zatížení vyhovuje}$$

4.14.3.3.1 Řez 11'

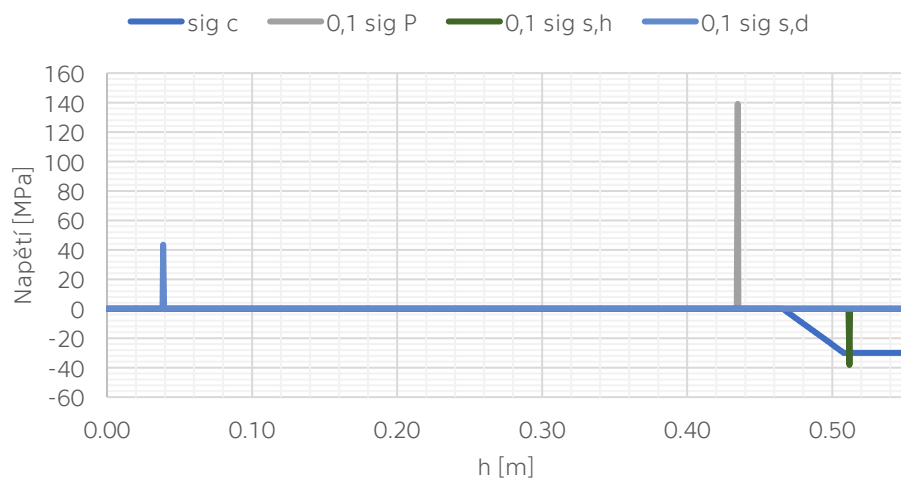
$$m_{y,Ed} + \gamma_{P,fav} * M_{PS} = 79,69 \text{ kNm/m}$$

$$m_{xy,Ed} = 10,49 \text{ kNm/m}$$

$$m_{y,D} = 79,69 + |10,49| = 90,16 \text{ kNm/m}$$

$$n_{y,Ed} = 256,45 \text{ kN/m}$$

Rozložení napětí po průřezu je stejně jako pro podélný směr vypočteno proužkovou metodou, průběh napětí po výšce průřezu je na Obr. 4.14.25.



Obr. 4.14.25: Průběh napětí v řezu 11' v MSÚ – stálá zat.

Výsledné hodnoty:

$$x = 84 \text{ mm}$$

$$N_c = -1,893 \text{ MN}$$

$$N_p = 2,086 \text{ MN}$$

$$N_{s,h} = -0,524 \text{ MN}$$

$$N_{s,d} = 0,461 \text{ MN}$$

$$m_{Rd} = 217,25 \text{ kNm/m}$$

$$m_{y,D} / m_{Rd} = 0,419 \dots \text{ řez 11' na stálá zatížení vyhovuje}$$

4.14.4 Příčná betonová táhla

Velmi důležitý prvek nosné konstrukce mostovky jsou betonová diagonální táhla uvnitř komory, která ztužují celý příčný řez. Na zkoumaném úseku, stejném jako pro návrh předpětí do horní desky jsou zároveň zkoumána tyto táhla v mezním stavu únosnosti. V úseku se nachází celkem 10 táhel (5 dvojic).

Nejprve je zkontrolováno, zda jsou táhla ve všech případech pozic proměnných zatížení tažena. V Tab. 4.14.6 jsou normálové síly od stálých zatížení a od maximálních a minimálních kombinací proměnných zatížení, následně je proveden jejich součet, čímž je dokázáno, že opravdu působí jen tahově.

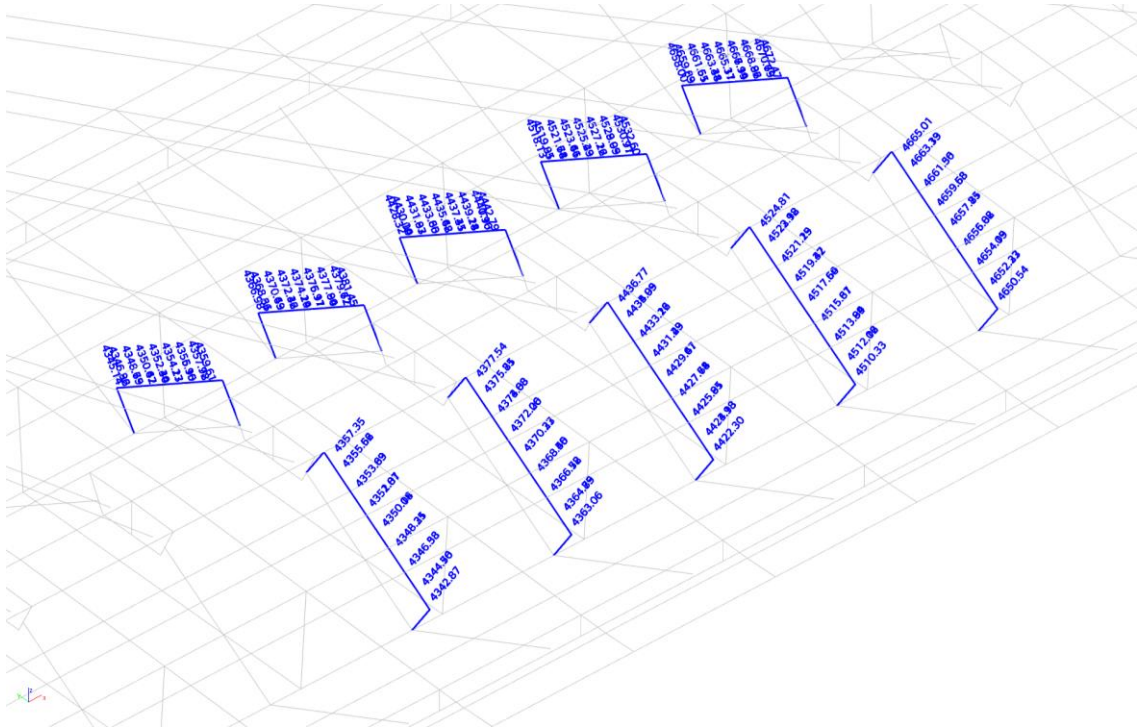
Tab. 4.14.6: Normálové síly v táhlech od stálých a prom. zat.

Táhlo	N_g	$N_{q,min}$	$N_{q,max}$	$N_g+N_{q,min}$	$N_g+N_{q,max}$
	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
1	3503.82	-1054.2	746.25	2449.62	4250.07
2	3501.93	-1242.97	761.32	2258.96	4263.25
3	3529.24	-982.05	717.75	2547.19	4246.99
4	3525.97	-1148.56	729.83	2377.41	4255.8
5	3552.85	-727.71	675.01	2825.14	4227.86
6	3547.82	-785.22	671.4	2762.6	4219.22
7	3573.37	-1055.77	689.78	2517.6	4263.15
8	3566.86	-1225.24	702.55	2341.62	4269.41
9	3588.7	-1189.72	754.96	2398.98	4343.66
10	3582.46	-1381.84	770.88	2200.62	4353.34

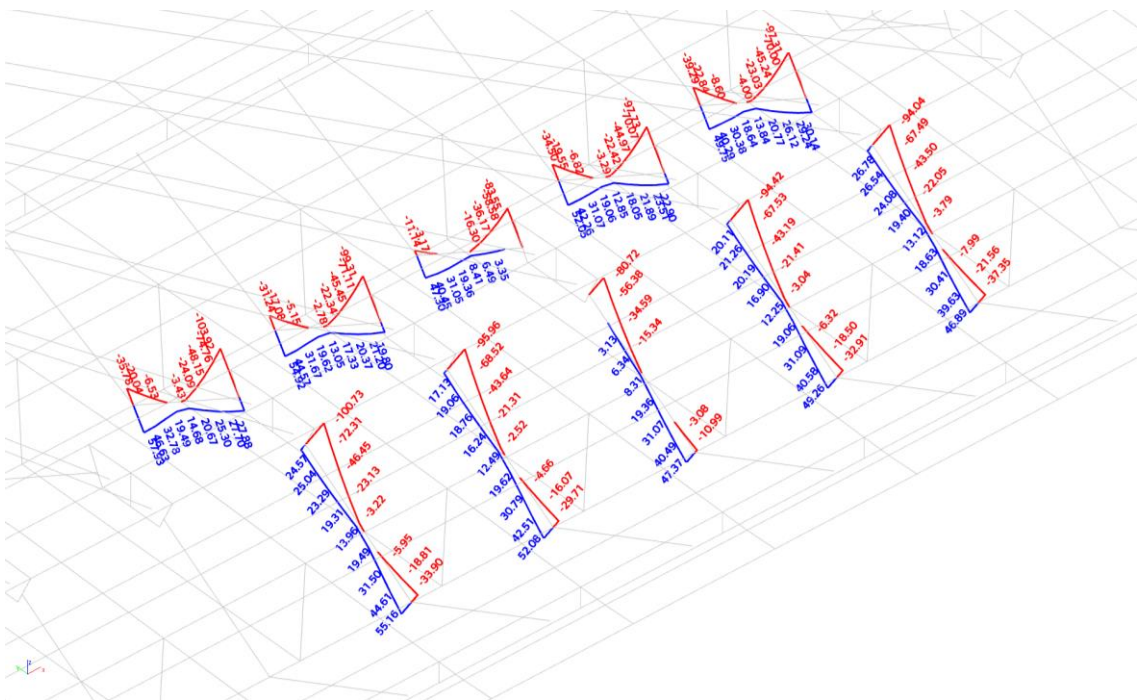
Následně jsou pro tyto táhla vypočteny vnitřní síly od kombinace pro MSÚ, včetně všech poloh zatížení, jako při posuzování desky. Extrémní hodnoty pro jednotlivá táhla jsou uvedeny v Tab. 4.14.7. Graficky jsou znázorněny v Obr. 4.14.26 – Obr. 4.14.28

Tab. 4.14.7: Vnitřní síly v táhlech, MSÚ

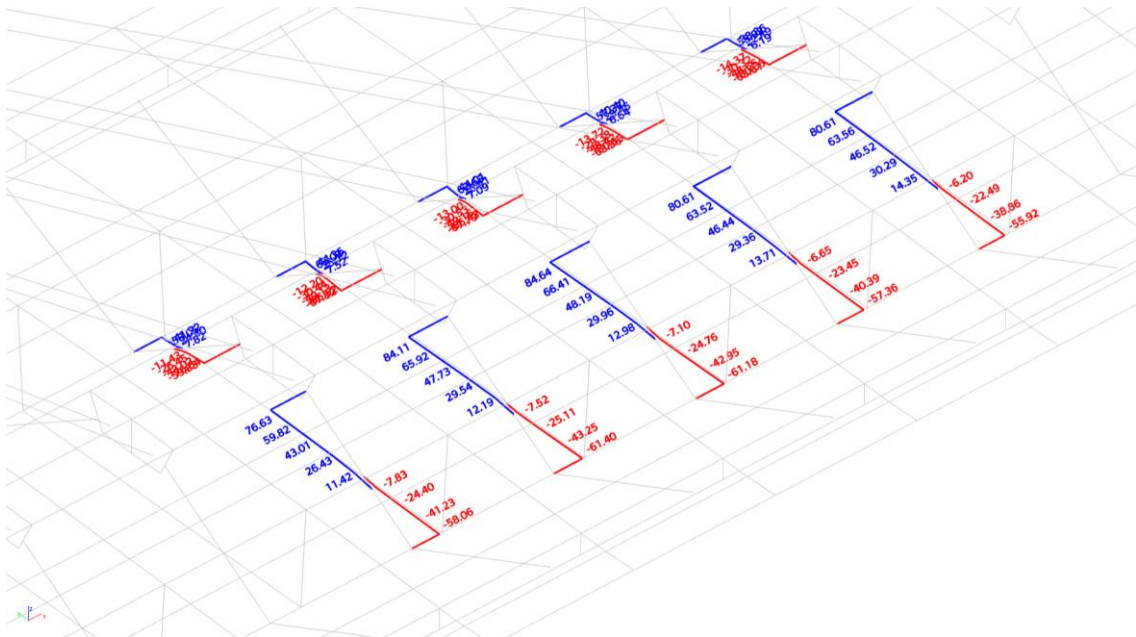
Táhlo	$N_{Ed,min}$	$N_{Ed,max}$	$M_{y,Ed,min}$	$M_{y,Ed,max}$	$M_{z,Ed,min}$	$M_{z,Ed,max}$
	[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
1	1601.45	4359.61	-103.92	57.93	-76.64	58.05
2	1345.22	4357.35	-100.73	55.16	-58.06	76.63
3	1633.29	4381.45	-99.31	54.92	-86.52	63.02
4	1406.07	4377.54	-95.96	52.08	-61.4	84.11
5	1858.31	4332.79	-83.55	47.3	-86.43	62.65
6	1776.92	4336.77	-80.72	47.37	-61.18	84.64
7	1252.66	4432.60	-97.73	52.05	-80.65	57.37
8	1019.02	4424.81	-94.42	49.26	-57.36	80.61
9	886.73	4422.47	-97.31	49.75	-80.66	55.93
10	622.7	4415.01	-94.04	46.89	-55.92	80.61



Obr. 4.14.26: N_{Ed} v táhlech, MSÚ [kN]



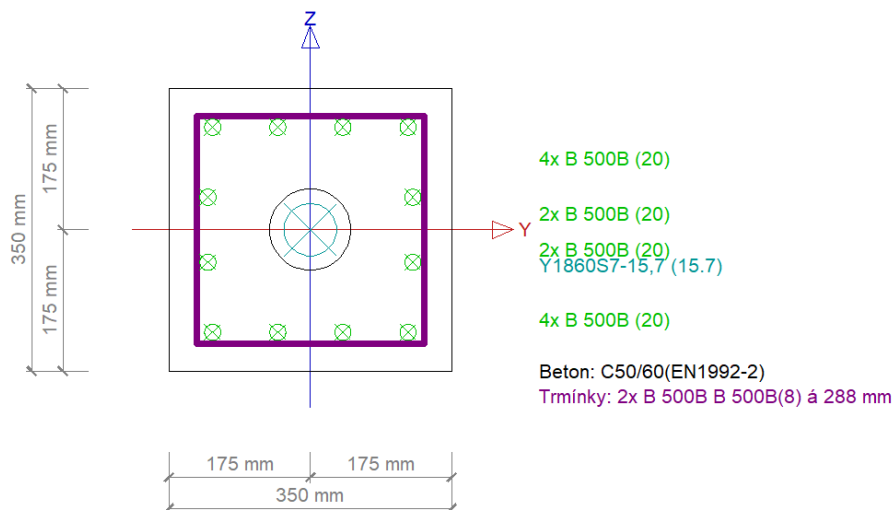
Obr. 4.14.27: $M_{y,Ed}$ v táhlech, MSÚ [kNm]



Obr. 4.14.28: Mz,Ed v táhlech, MSÚ [kNm]

Návrh a posouzení táhel je provedeno v programu SCIA Engineer v modulu „Beton pokročilý“. Navržená výztuž je znázorněna v Obr. 4.14.29.

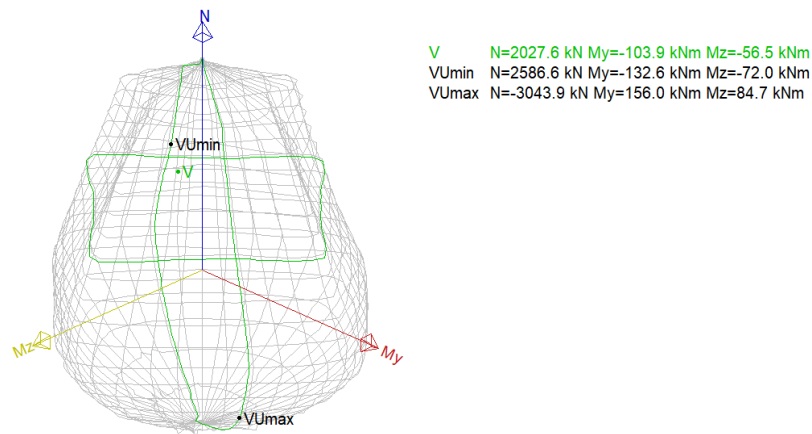
Do táhla je navržen jeden předpínací kabel s 22 lany stejný jako pro podélný směr. Předpínací síla je navržena $\sigma_{p,max} = 1473$ MPa. Po obvodu je umístěno celkem 12ks $\text{Ø}20\text{mm}$.



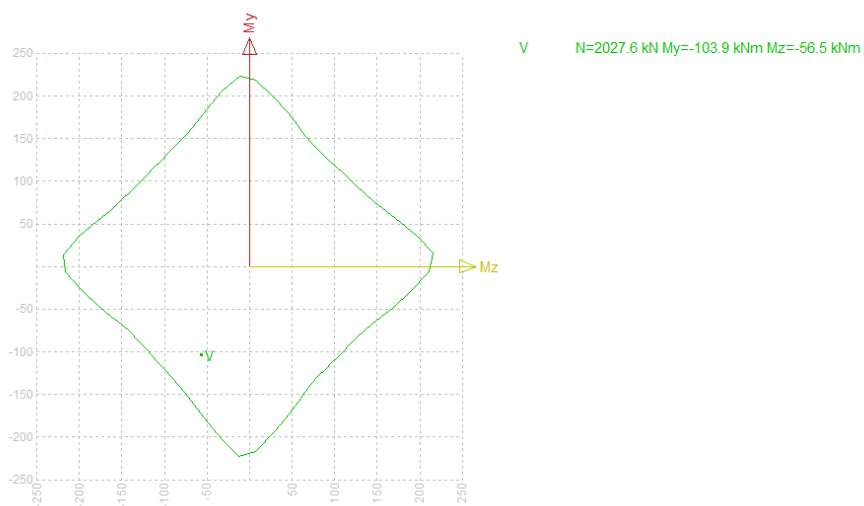
Obr. 4.14.29: Vyztužení bet. táhla

Posouzeny jsou tři případy namáhání – maximální ohyb, maximální tah a minimální tah pro případ, kdy by mohla předpínací síla drtit beton.

Jako nejhorší kombinace zatížení pro ohyb se ukázala být kombinace pro min. ohybový moment M_y v táhle č. 1. Pro toto táhlo je tedy vypočítán interakční diagram pro dvojosý ohyb (Obr. 4.14.30, Obr. 4.14.31)



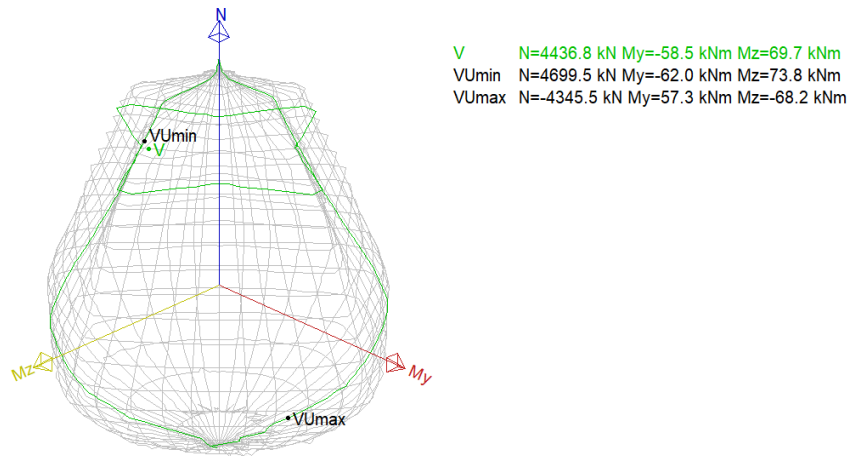
Obr. 4.14.30: Interakční diagram pro táhlo č.1



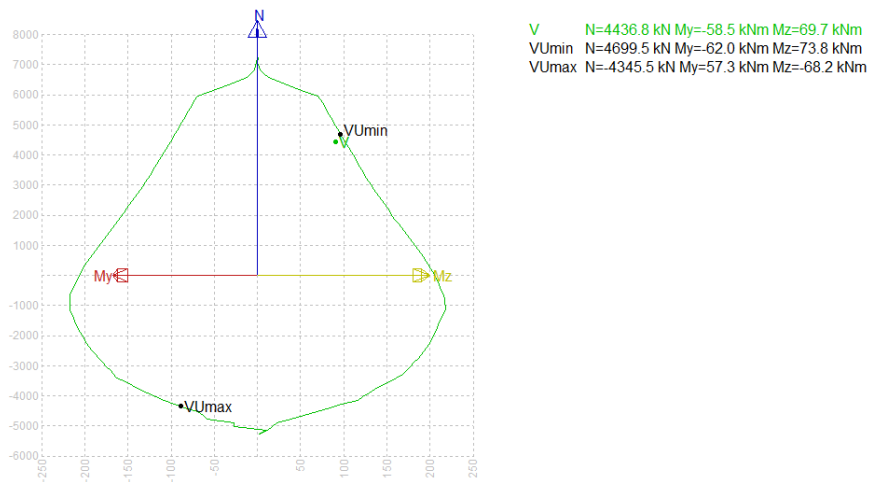
Obr. 4.14.31: Interakční diagram pro táhlo č.1, řez

Bod pro kombinaci zatížení se nachází uvnitř diagramu, táhlo č. 1 tedy vyhoví.

Nejhorší kombinace pro maximální tah je pro táhlo č. 6, pro toto táhlo je tedy také vypočten interakční diagram pro dvojosý ohyb, viz Obr. 4.14.32 a Obr. 4.14.33.



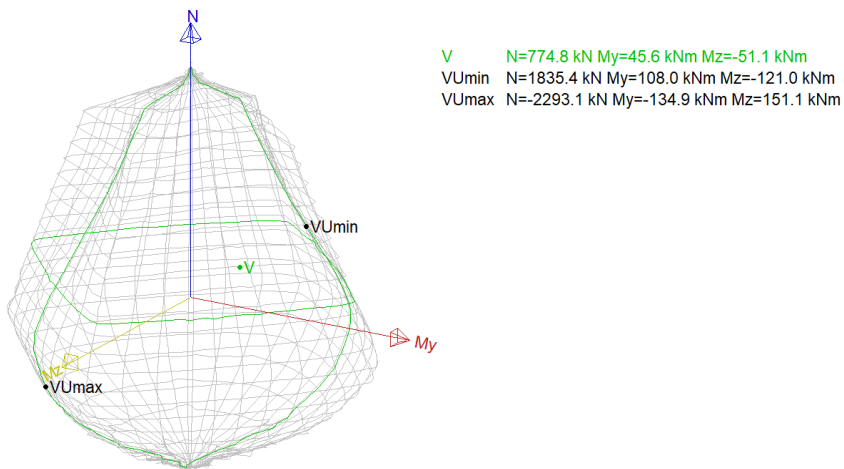
Obr. 4.14.32: Interakční diagram pro táhlo č.6



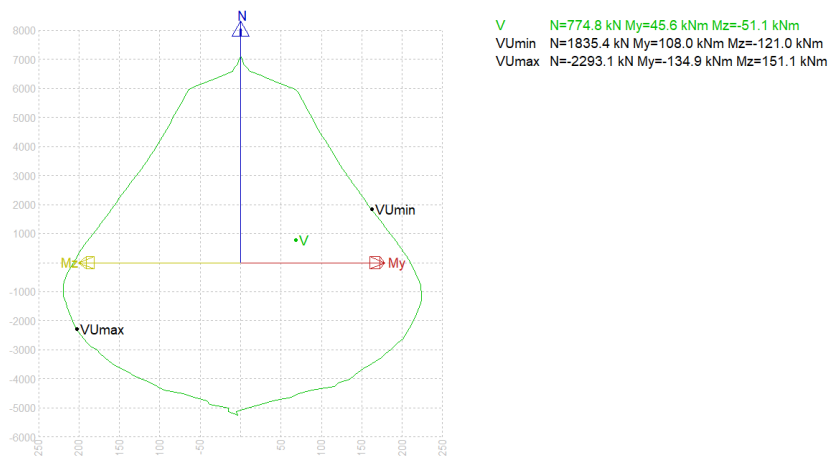
Obr. 4.14.33: Interakční diagram pro táhlo č.6, řez.

Bod pro kombinaci zatížení se nachází uvnitř diagramu, táhlo č. 6 tedy vyhoví.

Kombinace pro minimální tah, kdy by mohlo dojít k drčení betonu předpětím je pro táhlo č.10. Interakční diagram pro toto táhlo je v Obr. 4.14.34 a Obr. 4.14.35.



Obr. 4.14.34: Interakční diagram pro táhlo č.10



Obr. 4.14.35: Interakční diagram pro táhlo č.10, řez

Bod pro kombinaci zatížení se nachází uvnitř diagramu, táhlo č. 10 tedy vyhoví.

5 Závěr

Statickým výpočtem se podařilo prokázat fungování relativně hodně širokého příčného řezu nosné konstrukce mostovky. Nosná konstrukce byla navržena a posouzena v podélném směru v mezních stavech použitelnosti a únosnosti včetně postupu výstavby. V podélném směru byla konstrukce analyzována ve 2D modelu, včetně časově závislé analýzy. Dále byla konstrukce zkoumána v příčném směru ve 3D modelu, kde bylo navrženo a posouzeno předpětí v horní desce a v diagonálních táhlech. Ve všech případech posuzované prvky vyhověly.

Jako shrnutí návrhu je nakonec v Tab. 5.1 spočten celkový objem a plocha nosné konstrukce mostovky, hmotnost předpínací výztuže a závěsů. Tyto hmotnosti jsou pak přepočítány na jednotku objemu a plochy betonu, což do jisté míry prokazuje ekonomičnost navrženého mostu a možnost srovnání s ostatními návrhy.

Tab. 5.1: Množství předpínací výztuže a závěsů

Parametr	Znak	Hodnota	Jednotka
Objem NK	V_c	19 901,496	m^3
Plocha NK	A_c	19 542,600	m^2
Srovnaná výška NK	V_c/A_c	1,018	m
Hmotnost předp. výzt.	m_p	435 659	kg
Hmotnost závěsů	m_z	271 048	kg
Předp. výzt. na objem bet.	m_p/V_c	21,89	kg/m^3
Předp. výzt. na plochu bet.	m_p/A_c	22,29	kg/m^2
Závěsy na objem bet.	m_z/V_c	13,62	kg/m^3
Závěsy na plochu bet.	m_z/A_c	13,87	kg/m^2

6 Literatura

6.1 Literatura

[1] SVENSSON, Holger. *Cable-stayed bridges: 40 years of experience worldwide*. Berlin: Ernst, c2012. ISBN 978-3-433-02992-3.

[2] ŠAFÁŘ, Roman. *Concrete bridges: lectures*. V Praze: České vysoké učení technické, 2015. ISBN 978-80-01-05631-8.

6.2 Normy

[3] ČSN EN 1990 Eurokód: *Zásady navrhování konstrukcí*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.

[4] ČSN EN 1991-1-1 Eurokód 1: *Zatížení konstrukcí – Část 1-1: Obecná zatížení – Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.

[5] ČSN EN 1991-1-4 Eurokód 1: *Zatížení konstrukcí – Část 1-4: Obecná zatížení – Zatížení větrem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.

[6] ČSN EN 1991-1-5 Eurokód 1: *Zatížení konstrukcí – Část 1-5: Obecná zatížení – Zatížení teplotou*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.

[7] ČSN EN 1991-1-6 Eurokód 1: *Zatížení konstrukcí – Část 1-6: Obecná zatížení – Zatížení během provádění*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.

[8] ČSN EN 1991-2 Eurokód 1: *Zatížení konstrukcí – Část 2: Zatížení mostů dopravou*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.

[9] ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2: *Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.

[10] ČSN EN 1992-2 Eurokód 2: *Navrhování betonových konstrukcí – Část 2: Betonové mosty – Navrhování a konstrukční zásady*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.

6.3 Webové stránky

[11] VSL. VSL [online]. Copyright © VSL SYSTEMS [cit. 27.11.2018]. Dostupné z: <http://www.vsl.cz/>

7 Seznam obrázků

Obr. 2.1.1: Model vltavského údolí.....	9
Obr. 2.2.1: Zjednodušený podélný řez.....	10
Obr. 3.4.1: Betonážní vozík.....	14
Obr. 4.1.1: Označení částí konstrukce.....	15
Obr. 4.1.2: E_{eff} pro závěsy Z1-Z15.....	16
Obr. 4.1.3: E_{eff} pro závěsy Z16-Z30.....	17
Obr. 4.1.4: Schématické znázornění působení příčného řezu.....	17
Obr. 4.3.1: Pracovní diagram betonu C50/60.....	19
Obr. 4.3.2: Vývoj pevnosti betonu C50/60 pro $t < 28$ dní.....	20
Obr. 4.3.3: Pracovní diagram oceli B500B.....	20
Obr. 4.3.4: Pracovní diagram oceli Y1860.....	21
Obr. 4.3.5: Systém závěsů VSL SSI 2000 [11].....	22
Obr. 4.3.6: Rozpětí.....	22
Obr. 4.3.7: Příčný řez v krajním poli.....	23
Obr. 4.3.8: Příčný řez ve středním poli.....	23
Obr. 4.3.9: Příčný řez u pylonu a pilíře.....	23
Obr. 4.3.10: Příčný řez u opěry.....	23
Obr. 4.4.1: 2D prutový model.....	24
Obr. 4.4.2: Model příčného řezu ve 3D.....	25
Obr. 4.4.3: 3D model konstrukce.....	25
Obr. 4.4.4: Propojení příčnicku.....	26
Obr. 4.4.5: Propojení u opěry.....	26
Obr. 4.5.1: Zatížení LM1.....	29
Obr. 4.5.2: Zatížení LM3 – 180 t.....	30
Obr. 4.5.3: Zatížení LM3 – 300 t.....	31
Obr. 4.5.4: Zatížení na únavu LM3.....	31
Obr. 4.5.5: Modely betonážního vozíku.....	33
Obr. 4.5.6: Reakce od vozíku a betonované lamely.....	33
Obr. 4.5.7: Kombinační součinitelé.....	35
Obr. 4.7.1: M_y – vlastní tíha.....	38
Obr. 4.7.2: N – vlastní tíha.....	38
Obr. 4.7.3: V_z – vlastní tíha.....	38
Obr. 4.7.4: M_y – ostatní stálé zat.....	39
Obr. 4.7.5: N – ostatní stálé zat.....	39
Obr. 4.7.6: V_z – ostatní stálé zat.....	39
Obr. 4.7.7: M_y – pokles O1.....	39
Obr. 4.7.8: N – pokles O1.....	40
Obr. 4.7.9: V_z – pokles O1.....	40
Obr. 4.7.10: M_y – pokles P2.....	40
Obr. 4.7.11: N – pokles P2.....	40
Obr. 4.7.12: V_z – pokles P2.....	41
Obr. 4.7.13: M_y – pokles P3.....	41
Obr. 4.7.14: N – pokles P3.....	41
Obr. 4.7.15: V_z – pokles P3.....	41

Obr. 4.7.16: My – rektifikace závěsů	42
Obr. 4.7.17: N – rektifikace závěsů	42
Obr. 4.7.18: Vz – rektifikace závěsů	42
Obr. 4.7.19: My – rovn. oteplení mostovky	42
Obr. 4.7.20: N – rovn. oteplení mostovky	43
Obr. 4.7.21: Vz – rovn. oteplení mostovky	43
Obr. 4.7.22: My – rovn. ochlazení mostovky	43
Obr. 4.7.23: N – rovn. ochlazení mostovky	43
Obr. 4.7.24: Vz – rovn. ochlazení mostovky	44
Obr. 4.7.25: My – nerovn. oteplení mostovky	44
Obr. 4.7.26: N – nerovn. oteplení mostovky	44
Obr. 4.7.27: Vz – nerovn. oteplení mostovky	44
Obr. 4.7.28: My – nerovn. ochlazení mostovky	45
Obr. 4.7.29: N – nerovn. ochlazení mostovky	45
Obr. 4.7.30: Vz – nerovn. ochlazení mostovky	45
Obr. 4.7.31: My – rozdíl teplot – mostovka	45
Obr. 4.7.32: N – rozdíl teplot – mostovka	46
Obr. 4.7.33: Vz – rozdíl teplot – mostovka	46
Obr. 4.7.34: My – rozdíl teplot – závěsy	46
Obr. 4.7.35: N – rozdíl teplot – závěsy	46
Obr. 4.7.36: Vz – rozdíl teplot – závěsy	47
Obr. 4.7.37: My – rozdíl teplot – pylony	47
Obr. 4.7.38: N – rozdíl teplot – pylony	47
Obr. 4.7.39: Vz – rozdíl teplot – pylony	47
Obr. 4.7.40: My – rozdíl teplot pro pylon – příčně	48
Obr. 4.7.41: N – rozdíl teplot pro pylon – příčně	48
Obr. 4.7.42: Vz – rozdíl teplot pro pylon – příčně	48
Obr. 4.7.43: My – rozdíl teplot pro pylon – podélně	48
Obr. 4.7.44: N – rozdíl teplot pro pylon – podélně	49
Obr. 4.7.45: Vz – rozdíl teplot pro pylon – podélně	49
Obr. 4.7.46: My – LM1 TS	49
Obr. 4.7.47: N – LM1 TS	49
Obr. 4.7.48: Vz – LM1 TS	50
Obr. 4.7.49: My – LM1 UDL	50
Obr. 4.7.50: N – LM1 UDL	50
Obr. 4.7.51: Vz – LM1 UDL	50
Obr. 4.7.52: My – LM3 1800/200	51
Obr. 4.7.53: N – LM3 1800/200	51
Obr. 4.7.54: Vz – LM3 1800/200	51
Obr. 4.7.55: My – LM3 3000/240	51
Obr. 4.7.56: N – LM3 3000/240	52
Obr. 4.7.57: Vz – LM3 3000/240	52
Obr. 4.7.58: My – chodci	52
Obr. 4.7.59: N – chodci	52
Obr. 4.7.60: Vz – chodci	52
Obr. 4.7.61: My – dav	53
Obr. 4.7.62: N – dav	53
Obr. 4.7.63: Vz – dav	53
Obr. 4.7.64: My – stálá zat. + rektifikace	54

Obr. 4.7.65: N – stálá zat. + rektifikace	54
Obr. 4.7.66: Vz – stálá zat. + rektifikace	54
Obr. 4.7.67: Příčinkové čáry pro svislé reakce	55
Obr. 4.7.68: E_{ff} od prom. a stálých zatížení	60
Obr. 4.7.69: Znázornění E_{eff} pro vybrané závěsy	60
Obr. 4.8.1: Normálové napětí, řez 35, stálá zat.	61
Obr. 4.8.2: Normálové napětí, řez 35, rektifikace	62
Obr. 4.8.3: Normálové napětí, řez 35, stálá zat. s rektifikací	62
Obr. 4.8.4: Normálové napětí, řez 35, LM1 střední pole	62
Obr. 4.8.5: Normálové napětí, řez 35, LM1 vše	63
Obr. 4.8.6: Průběh redukce pro horní desku	64
Obr. 4.8.7: Průběh redukce pro dolní desku	66
Obr. 4.9.1: Předběžný návrh výztuže – napětí v horních vláknech NK	69
Obr. 4.9.2: Předběžný návrh výztuže – napětí v dolních vláknech NK	69
Obr. 4.9.3: Excentricita ideálních kabelů	70
Obr. 4.9.4: Předpínací kabely v příčných řezech	70
Obr. 4.9.5: Schéma spojkování předpínací výztuže	71
Obr. 4.9.6: Modelování předpětí ve SCIA Engineer	71
Obr. 4.10.1: TDA model konstrukce	73
Obr. 4.10.2: My – MSP Char. kombinace	74
Obr. 4.10.3: N – MSP Char. kombinace	74
Obr. 4.10.4: Vz – MSP Char. kombinace	74
Obr. 4.10.5: My – MSP Častá kombinace	75
Obr. 4.10.6: N – MSP Častá kombinace	75
Obr. 4.10.7: Vz – MSP Častá kombinace	75
Obr. 4.10.8: My – MSP Kvazi. kombinace	76
Obr. 4.10.9: N – MSP Kvazi. kombinace	76
Obr. 4.10.10: Vz – MSP Kvazi. kombinace	76
Obr. 4.10.11: My – MSU	77
Obr. 4.10.12: N – MSU	77
Obr. 4.10.13: Vz – MSU	77
Obr. 4.11.1: σ_c , fáze L-1-P	81
Obr. 4.11.2: σ_c , fáze L-1-V	81
Obr. 4.11.3: σ_c , fáze L-2-P	82
Obr. 4.11.4: σ_c , fáze L-2-V	82
Obr. 4.11.5: σ_c , fáze L-3-P	83
Obr. 4.11.6: σ_c , fáze L-3-V	83
Obr. 4.11.7: σ_c , fáze L-4-P	84
Obr. 4.11.8: σ_c , fáze L-4-V	84
Obr. 4.11.9: σ_c , fáze L-5-P	85
Obr. 4.11.10: σ_c , fáze L-5-V	85
Obr. 4.11.11: σ_c , fáze L-6-P	86
Obr. 4.11.12: σ_c , fáze L-6-V	86
Obr. 4.11.13: σ_c , fáze L-7-P	87
Obr. 4.11.14: σ_c , fáze L-7-V	87
Obr. 4.11.15: σ_c , fáze L-8-P	88
Obr. 4.11.16: σ_c , fáze L-8-V	88
Obr. 4.11.17: σ_c , fáze L-9-P	89

Obr. 4.11.18: σ_c , fáze L-9-V.....	89
Obr. 4.11.19: σ_c , fáze L-10-P.....	90
Obr. 4.11.20: σ_c , fáze L-10-V.....	90
Obr. 4.11.21: σ_c , fáze L-11-P.....	91
Obr. 4.11.22: σ_c , fáze L-11-V.....	91
Obr. 4.11.23: σ_c , fáze L-12-P.....	92
Obr. 4.11.24: σ_c , fáze L-12-V.....	92
Obr. 4.11.25: σ_c , fáze L-13-P.....	93
Obr. 4.11.26: σ_c , fáze L-13-V.....	93
Obr. 4.11.27: σ_c , fáze L-14-P.....	94
Obr. 4.11.28: σ_c , fáze L-14-V.....	94
Obr. 4.11.29: σ_c , fáze L-15-P.....	95
Obr. 4.11.30: σ_c , fáze L-15-V.....	95
Obr. 4.11.31: σ_c , fáze L-16-P.....	96
Obr. 4.11.32: σ_c , fáze L-17-P.....	97
Obr. 4.11.33: σ_c , fáze KV.....	98
Obr. 4.11.34: σ_c , fáze UP.....	99
Obr. 4.11.35: σ_c , fáze KŽ.....	100
Obr. 4.11.36: Průhyb.....	115
Obr. 4.12.1: Průběh napětí v řezu v MSÚ ($M_{Rd,max}$).....	117
Obr. 4.12.2: Průběh napětí v řezu v MSÚ ($M_{Rd,min}$).....	118
Obr. 4.13.1: $M_{y,Ed}$ – pylon v MSÚ [kNm].....	121
Obr. 4.13.2: N_{Ed} – pylon v MSÚ [kN].....	121
Obr. 4.13.3: Interakční diagram pylonu.....	122
Obr. 4.14.1: σ_y od LM1 – horní deska ve vybraném podélném řezu 11'.....	124
Obr. 4.14.2: Posuzované řezy pro příčný směr.....	124
Obr. 4.14.3: Kabel VSLab-S [11].....	125
Obr. 4.14.4: Schéma vedení kabelu v příčném směru.....	126
Obr. 4.14.5: Krátkodobé ztráty předpětí pro příčné kabely.....	127
Obr. 4.14.6: σ_y – horní povrch horní desky, char. max.....	128
Obr. 4.14.7: σ_y – dolní povrch horní desky, char. max.....	128
Obr. 4.14.8: σ_y – horní povrch horní desky, čast. max.....	129
Obr. 4.14.9: σ_y – dolní povrch horní desky, čast. max.....	129
Obr. 4.14.10: σ_y – horní povrch horní desky, kvazi. max.....	130
Obr. 4.14.11: σ_y – dolní povrch horní desky, kvazi. max.....	130
Obr. 4.14.12: σ_y – horní povrch horní desky, stálá zat.....	131
Obr. 4.14.13: σ_y – dolní povrch horní desky, stálá zat.....	131
Obr. 4.14.14: Průběh σ_y v místě vzniku trhlin.....	132
Obr. 4.14.15: Posuzované řezy – příčný směr, MSÚ.....	134
Obr. 4.14.16: m_y max, MSÚ.....	135
Obr. 4.14.17: m_y min, MSÚ.....	135
Obr. 4.14.18: m_{xy} max, MSÚ.....	136
Obr. 4.14.19: m_{xy} min, MSÚ.....	136
Obr. 4.14.20: m_y od stálých zat.....	137
Obr. 4.14.21: m_{xy} od stálých zat.....	137
Obr. 4.14.22: Průběh napětí v řezu 22' v MSÚ.....	138
Obr. 4.14.23: Průběh napětí v řezu 11' v MSÚ.....	139
Obr. 4.14.24: Průběh napětí v řezu 22' v MSÚ – stálá zat.....	140

Obr. 4.14.25: Průběh napětí v řezu 11' v MSÚ – stálá zat.....	141
Obr. 4.14.26: N_{Ed} v táhlech, MSÚ [kN].....	143
Obr. 4.14.27: $M_{y,Ed}$ v táhlech, MSÚ [kNm]	143
Obr. 4.14.28: $M_{z,Ed}$ v táhlech, MSÚ [kNm]	144
Obr. 4.14.29: Vyztužení bet. táhla.....	144
Obr. 4.14.30: Interakční diagram pro táhlo č.1	145
Obr. 4.14.31: Interakční diagram pro táhlo č.1, řez	145
Obr. 4.14.32: Interakční diagram pro táhlo č.6	146
Obr. 4.14.33: Interakční diagram pro táhlo č.6, řez	146
Obr. 4.14.34: Interakční diagram pro táhlo č.10.....	147
Obr. 4.14.35: Interakční diagram pro táhlo č.10, řez.....	147

8 Seznam tabulek

Tab. 3.1.1: Identifikační údaje mostu	11
Tab. 3.2.1: Základní údaje o mostu	11
Tab. 3.4.1: Vozovka a izolace na mostě.....	13
Tab. 4.3.1: Dílčí součinitele spolehlivosti	18
Tab. 4.3.2: Parametry betonu C50/60 pro $t \geq 28$ dní	19
Tab. 4.3.3: Parametry pro ocel B500B	20
Tab. 4.3.4: Parametry pro ocel Y1860	21
Tab. 4.3.5: Průřezové charakteristiky	24
Tab. 4.5.1: Vlastní tíha	27
Tab. 4.5.2: Ostatní stálé zatížení	27
Tab. 4.5.3: Rektifikace závěsů.....	28
Tab. 4.5.4: Zatížení LM1	29
Tab. 4.5.5: Zatížení LM3 – 180 t.....	30
Tab. 4.5.6: Rektifikace závěsů během výstavby (1. fáze).....	34
Tab. 4.5.7: Dílčí součinitelé	35
Tab. 4.6.1: Návrh závěsů.....	37
Tab. 4.7.1: Reakce od stálých a proměnných zatížení	55
Tab. 4.7.2: Reakce od kombinace pro MSÚ	55
Tab. 4.7.3: Reakce od kombinací pro MSP	56
Tab. 4.7.4: Normálová síla a E_{eff} závěsů od stálých zat.....	57
Tab. 4.7.5: Normálová síla a E_{eff} závěsů od proměnných zat. (Z1-Z15).....	58
Tab. 4.7.6: Normálová síla a E_{eff} závěsů od proměnných zat. (Z16-Z30).....	59
Tab. 4.8.1: Poměry normálových napětí – horní deska	63
Tab. 4.8.2: Poměry normálových napětí – dolní deska	65
Tab. 4.8.3: Redukované průřezové charakteristiky	66
Tab. 4.9.1: Návrh předpínací výztuže – vyrovnání napětí (výňatek)	68
Tab. 4.10.1: Postup výstavby	72
Tab. 4.11.1: Lokální stáří lamel [dny].....	79
Tab. 4.11.2: $0,6 f_{ck}(t)$ pro lokální stáří lamel [MPa]	79
Tab. 4.11.3: $0,45 f_{ck}(t)$ pro lokální stáří lamel [MPa].....	80
Tab. 4.11.4: $f_{ctm}(t)$ pro lokální stáří lamel [MPa]	80
Tab. 4.11.5: Omezení napětí v závěsech, výstavba.....	101

Tab. 4.11.6: Omezení napětí v závěsech, uvedení do provozu	113
Tab. 4.11.7 Omezení napětí v závěsech, konec životnosti.....	114
Tab. 4.12.1: Účinky předpětí na posuzovaný řez	116
Tab. 4.12.2: Základní přetvoření předpínací výztuže	116
Tab. 4.12.3: Posouzení závěsů v MSÚ	119
Tab. 4.12.4: Únava závěsů.....	120
Tab. 4.13.1: Body interakčního diagramu pylonu	122
Tab. 4.14.1: Rozměry kabelu VSLab-S [11].....	125
Tab. 4.14.2: Návrhová síla v příčných kabelech.....	126
Tab. 4.14.3: Zatížení od příčného předpětí	127
Tab. 4.14.4: Účinky předpětí na řez 22'	138
Tab. 4.14.5: Účinky předpětí na řez 11'	139
Tab. 4.14.6: Normálové síly v táhlech od stálých a prom. zat.....	142
Tab. 4.14.7: Vnitřní síly v táhlech, MSÚ.....	142
Tab. 5.1: Množství předpínací výztuže a závěsů.....	148

9 Seznam příloh

Příloha č.1 – výkresová dokumentace

Číslo výkresu	Název
1	Podélný řez osou mostu
2	Půdorys
3	Vzorový příčný řez
4	Příčný řez AA' (pylon P3)
5	Příčný řez BB' (pilíř P2)
6	Příčný řez CC' (opěra O1)
7	Příčné řezy lamelou s předpínací výztuží
8	Výkres předpínací výztuže
9	Výkres závěsů