



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV BETONOVÝCH A ZDĚNÝCH KONSTRUKCÍ

INSTITUTE OF CONCRETE AND MASONRY STRUCTURES

LÁVKA PODPOROVANÁ KABELY

CABLE-SUPPORTED PEDESTRIAN BRIDGE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Richard Řehulka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Radim Nečas, Ph.D.

BRNO 2025

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav betonových a zděných konstrukcí
Student: **Bc. Richard Řehulka**
Vedoucí práce: **doc. Ing. Radim Nečas, Ph.D.**
Akademický rok: 2024/25
Studijní program: N0732A260026 Stavební inženýrství – konstrukce a dopravní stavby

Děkan Fakulty Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Lávka podporovaná kabely

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Návrh mostu zpracujte na základě předaných podkladů, tj. situace, příčný a podélný řez a geotechnické poměry.

Ve statickém výpočtu uplatněte řešení s postupnou výstavbou nosné monolitické konstrukce z předpjatého betonu.

Můžete drobně upravit základní geometrii mostu - délku a šířku konstrukce, polohu nivelety apod. Ostatní úpravy lze provádět podle pokynů vedoucího diplomové práce.

Cíle a výstupy diplomové práce:

Cílem práce je pro zadaný most podrobně navrhnout všechny části jeho nosné konstrukce.

Pro zadaný problém navrhnut dvě až tři studie řešení a zhodnotit je. Ve výběru varianty se zaměřit na nosnou konstrukci podporovanou kabely.

Vypracovat podrobný statický výpočet nosné konstrukce vybrané studie mostu podle mezních stavů.

Zpracovat v rámci výkresové dokumentace dispoziční výkresy, výkresy výztuže počítaných částí konstrukce a minimálně jeden detail.

Textovou část zpracovat v rozsahu a ve formě průvodní zprávy.

Diplomovou práci je třeba vypracovat a rozčlenit podle této struktury: Textová část a přílohy textové části – použité podklady a studie řešení, výkresy přehledné, podrobné a detaily, stavební postup a vizualizace a statický výpočet. Rozsah jednotlivých částí určí vedoucí diplomové práce.

Diplomová práce bude odevzdána v listinné a elektronické formě.

Seznam doporučené literatury a podklady:

Základní normy:

ČSN 73 6201 Projektování mostních objektů.

ČSN 73 6214 Navrhování betonových mostních konstrukcí.

ČSN EN 1990 včetně změny A1: Zásady navrhování konstrukcí.

ČSN EN 1991-2: Zatížení mostů dopravou.

ČSN EN 1992-1-1: Navrhování betonových konstrukcí. Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby.

ČSN EN 1992-2: Betonové mosty. Navrhování a konstrukční zásady.

Literatura doporučená vedoucím diplomové práce.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne 31. 3. 2024

L. S.

doc. Ing. Miloš Zich, Ph.D.
vedoucí ústavu

doc. Ing. Radim Nečas, Ph.D.
vedoucí práce

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr. h. c.
děkan

ABSTRAKT

Předmětem této diplomové práce je návrh visuté lávky přes ulici Bauerova v Brně. Konstrukce lávky je tvořena visutým lanem, na kterém je jednostranně zavěšena nesymetrická mostovka. Nesymetrie je vyvážena pomocí předpínacího kabelu upevněného na půdorysně zakřivené mostovce. Visuté lano je kotveno do šikmého pylonu. Který přenáší zatížení do založení. Pro lávku byly provedeny studie přemostění na jejichž základě byla vybrána navrhnutá konstrukce, pro kterou byla provedena statická, dynamická a stabilitní analýza. Pro modelování byl použit program vhodný pro lanové konstrukce a výstupem z diplomové práce jsou kromě textové části i přílohy, do kterých mimo jiné patří výkresová dokumentace, vizualizace a statický výpočet.

KLÍČOVÁ SLOVA

Lávka, lávka pro pěší, lávka přes vodoteč, lávka přes silnici, visutá lávka, samokotvená visutá lávka, půdorysně zakřivená lávka, ulice Bauerova, předpjatý beton, spřažený pylon, visuté lano, závěs, statická analýza, dynamická analýza, stabilitní analýza

ABSTRACT

The aim of this master's thesis is to design suspension pedestrian bridge across street Bauerova in Brno. Construction consists of plan-curved deck, which is connected on one side to the suspension cable by hangers. The asymmetry is balanced using a prestressing cable attached to the plan-curved deck. The suspended cable is anchored to an inclined pylon, which transfers the load to the foundation. Chosen design of this bridge was based on case studies. Performed calculations consists of static, dynamic, and stability analyses. The modeling was carried out using software suitable for cable structures, and the output of the thesis includes not only the written thesis but also appendices, which include drawings, visualization, and static calculation.

KEYWORDS

Pedestrian bridge, suspended pedestrian bridge, pedestrian bridge across river, pedestrian bridge across road, plan-curved deck, street Bauerova, prestressed concrete, composite pylon, suspension cable, hanger, static analysis, dynamic analysis, stability analysis

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŘEHULKA, Richard. *Lávka podporovaná kabely*. Brno, 2025. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav betonových a zděných konstrukcí. Vedoucí doc. Ing. Radim Nečas, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Lávka podporovaná kabely* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 17. 1. 2025

Bc. Richard Řehulka
autor

PODĚKOVÁNÍ

Poděkování patří mému vedoucímu doc. Nečasovi za jeho náměty při zpracovávání této diplomové práce. Předně bych chtěl poděkovat mému tátovi, který mě během mého studia na vysoké škole plně podporoval a v rámci výstavby mostů mi předal spoustu teoretických a praktických znalostí. Jeho přínosem jsem se mohl posunout vědomostmi a zkušenostmi dále, než mi umožnilo studium. Děkuji patří dále celé mé rodině a přítelkyni, bez jejichž podpory bych se studiu nemohl naplno věnovat.

OBSAH

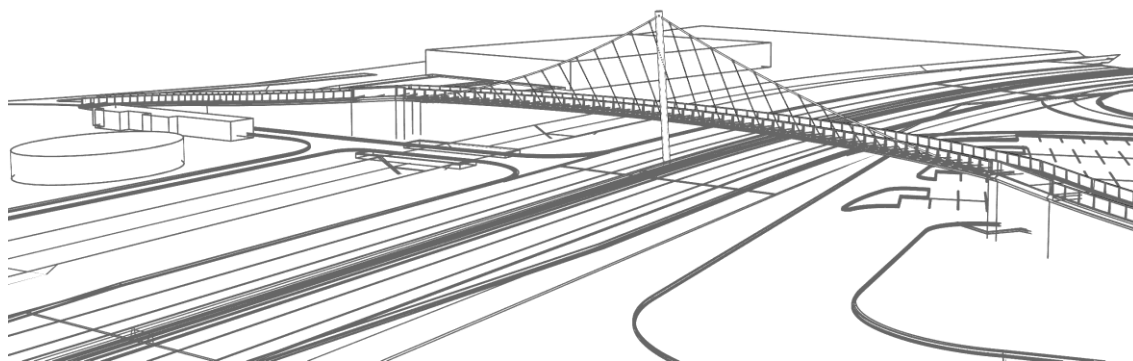
1. Úvod	9
2. Studie přemostění.....	10
2.1. Studie 1	11
2.2. Studie 2	12
2.3. Výběr vhodného řešení	13
3. Řešení zvolené varianty	14
3.1. Příčný směr	15
3.2. Podélný směr	16
4. Statické řešení	17
4.1. Model příčného směru.....	17
4.2. Globální výpočtový model	19
4.3. Výsledné modely	26
4.4. Výchozí stav	27
5. Postup výstavby.....	28
5.1. Fáze 1	28
5.2. Fáze 2	28
5.3. Fáze 3	29
5.4. Fáze 4	30
5.5. Fáze 5	31
5.6. Fáze 6	31
5.7. Fáze 7	32
6. Vybrané materiály a průřezy	33
6.1. Mostovka	33
6.2. Pylon	33
6.3. Předpínací lana	33
6.4. Visuté lano.....	34
6.5. Závěsy.....	34
6.6. Opěra	34
7. Statická analýza.....	35
7.1. Zatížení	35
7.2. Založení.....	39
7.3. Změny předpětí	40
7.4. Mezní stavy použitelnosti	41
7.5. Mezní stavy únosnosti	51
8. Dynamická analýza.....	56
8.1. Modální analýza	56
8.2. Harmonická analýza	57
9. Stabilitní analýza.....	58
10. Závěr	59
Seznam zdrojů.....	60
Seznam příloh	61

1. ÚVOD

Cílem této diplomové práce je komplexní návrh lávky podporované kabely na základě předaných podkladů. Mezi podklady patří půdorys a geotechnický profil. Lávka se nachází v Brně a přemostuje ulici Bauerova, Mlýnský náhon a příjezd k parkovišti.

Nejdříve dojde ke stanovení vhodné konstrukce lávky na základě vypracovaných studií. Práce se bude dále zabývat předběžným návrhem konstrukce, modelováním konstrukce ve výpočetním programu a výběrem vhodných materiálů. Po předběžném návrhu dojde k úpravě konstrukce a zpřesnění modelu konstrukce. Na základě těchto úprav dojde ke stanovení výsledného řešení lávky a jeho statické, dynamické a stabilitní posouzení. Součástí řešení konstrukce se stane i postup výstavby. Lávka bude posouzena v rozhodujících časech a ve všech přípustných kombinacích zatížení.

Veškerá tvrzení v rámci této diplomové práce budou podloženy přílohami, které budou zahrnovat mimo jiné přehledné výkresy, vizualizaci a statický výpočet.

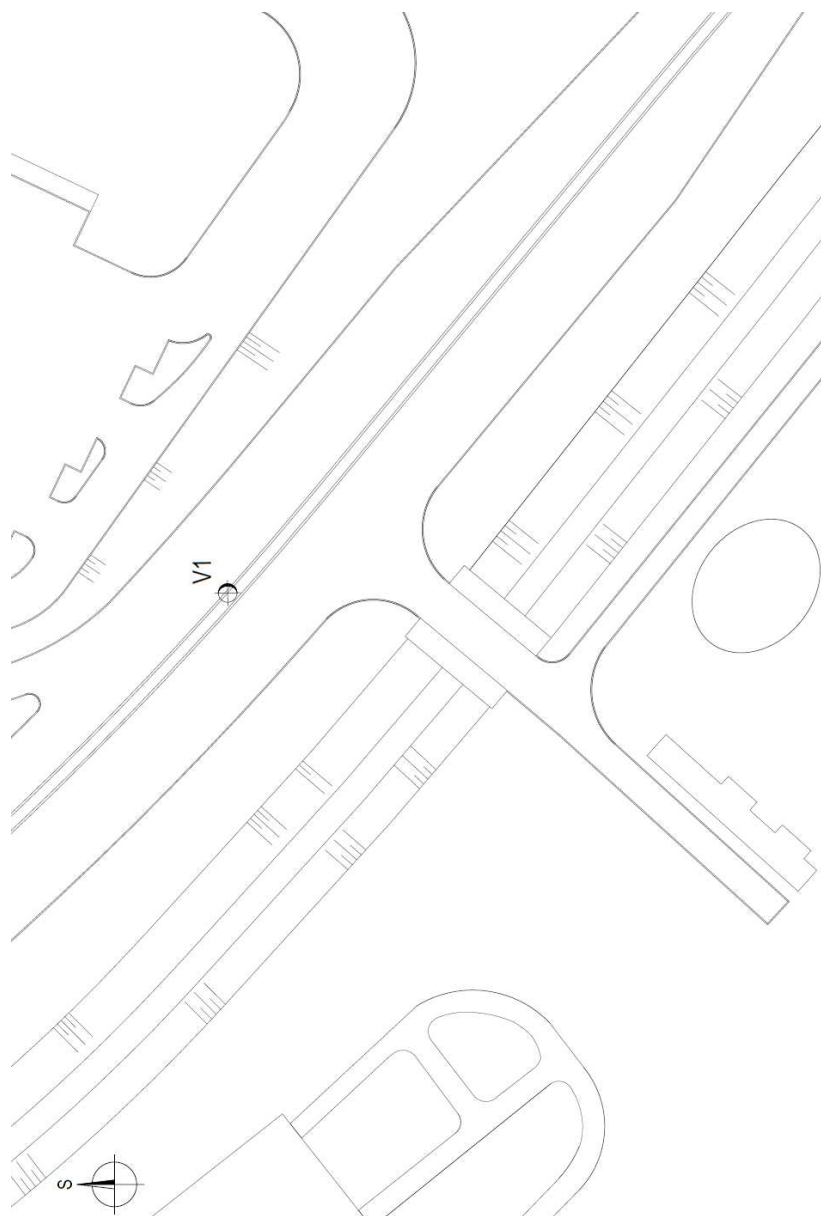


Obr. 1 3D model: Pohled z východu

2. STUDIE PŘEMOSTĚNÍ

Podle zadání došlo k vypracování 2 studií řešení lávky. Lávka přemostňuje Mlýnský náhon, ulici Bauerova a příjezd k parkovišti. Obě studie sledují obdobné příčné uspořádání. Studie lávek mají volnou šířku mezi zábradlím 4,0 m, což je vhodné vzhledem k předpokládané intenzitě provozu na konstrukci. Po okrajích je provedena monolitická římsa, betonované společně s nosnou konstrukcí, sloužící zároveň jako vodící linie. Na římsu je upevněno zábradlí.

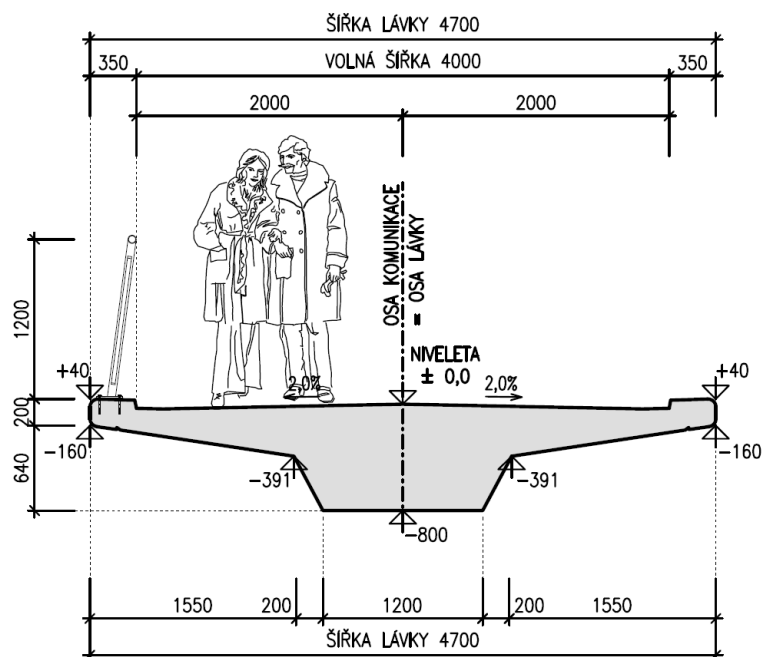
Lávka přemostňuje Velký městský okruh Brno, který je největším limitem z hlediska volné výšky pod mostem. Limitujícím faktorem výškového řešení konstrukce je i příjezd na parkoviště, které se nachází v blízkosti konce mostu. Vodoteč je vzhledem k nízkým průtokům limitující pouze v půdorysném umístění podpor. Výkresy studií jsou součástí příloh k této diplomové práci.



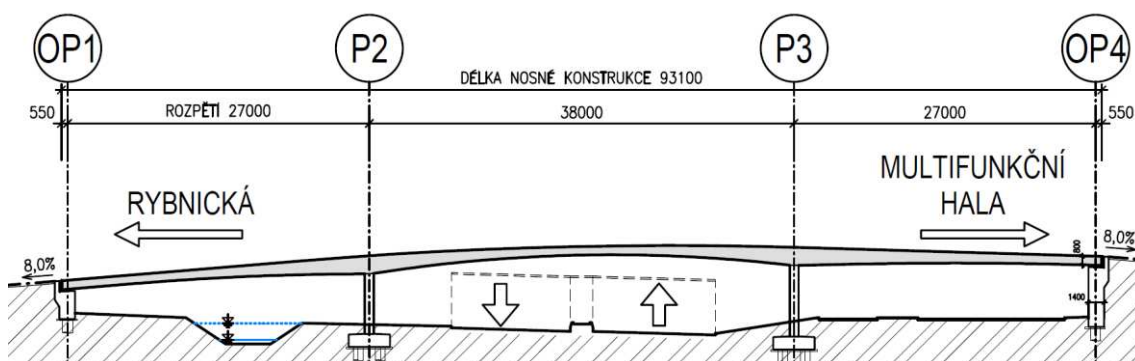
Obr. 2 Půdorys přemostřovaného prostředí

2.1. STUDIE 1

První variantou se stala dodatečně předpjatá rámová konstrukce o třech polích. V druhém poli je proveden náběh na trémové části příčle nosné konstrukce. Výška nosné konstrukce je tedy proměnná. Uprostřed rozpětí je výška nosné konstrukce 0,8 m a nad pilíři dosahuje 1,6 m. V krajních polích je náběh proveden pouze na straně pilířů. V příčném směru je lávka ve střechovitém sklonu o velikosti 2,0 %. V podélné směru se jedná o parabolický zakružovací oblouk s tečnami o sklonu 8,0 %, což umožnilo vytvořit dostatečnou volnou výšku ve středním poli za zachování minimální výšky nad terénem v místě opěr. Délka nosné konstrukce je 93,10 m.



Obr. 3 STUDIE 1 – Příčný řez



Obr. 4 STUDIE 1 – Podélný řez

2.3. VÝBĚR VHODNÉHO ŘEŠENÍ

Obě varianty se jeví jako vhodné pro řešení daného přemostění. Ani jedna varianta nezasahuje do průjezdního prostoru komunikací.

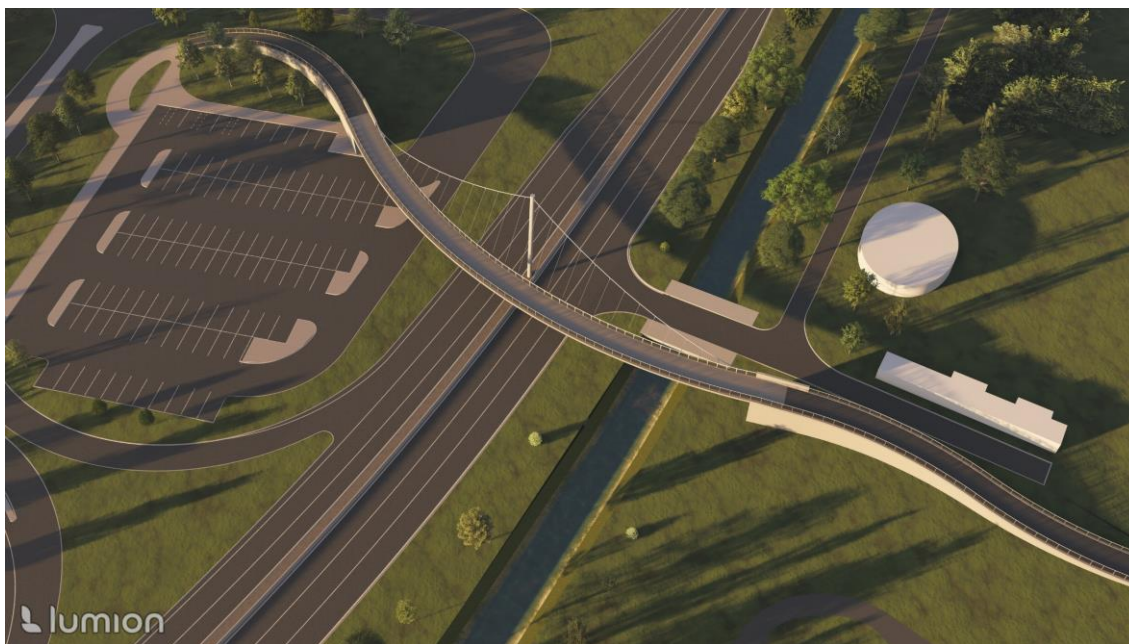
První varianta lávky bude méně náročná z hlediska statického výpočtu, délky a náročnosti výstavby. Dále bude mít rámová konstrukce kratší navazující opěrné zdi, které svedou komunikaci na stávající terén, jelikož je niveleta lávky svedena pomocí podélného sklonu k terénu. Dá se říci, že tato varianta bude také ekonomicky méně náročná.

Studie lávky s číslem 2 je esteticky zajímavější. Visutá konstrukce tvoří dominantu nad Velkým městským okruhem před tím, než se otevře pohled na historické centrum Brna a zajišťuje stejnou funkci jako první varianta přemostění. Zároveň se jedná o konstrukci se zajímavým statickým řešením.

Vzhledem k tomu, že před koncem mostu je třeba přemostit příjezd na parkoviště zkrátí výšková změna nivelety lávky opěrné zdi jen před mostem. Proto tento faktor není rozhodující a vzhledem k poloze a využitelnosti lávky volím estetičtější druhou variantu lávky.

3. ŘEŠENÍ ZVOLENÉ VARIANTY

Tvar nosné konstrukce vychází ze zvolené studie. Jedná se o visutou lávku, která je samokotvená. Mostovka je monolitická z předpjatého betonu. Lávka je vedena půdorysně v kružnicovém oblouku o poloměru 100 m v ose komunikace. Na lávku navazují opěrné zdi, které svádějí komunikaci do úrovně stávajícího terénu. Poloměry oblouků na navazujících jsou 61,8 m, 38,2 m a 20,0 m. Půdorysný tvar konstrukce je inspirován zlatým řezem.



Obr. 7 Vizualice: Pohled z ptačí perspektivy



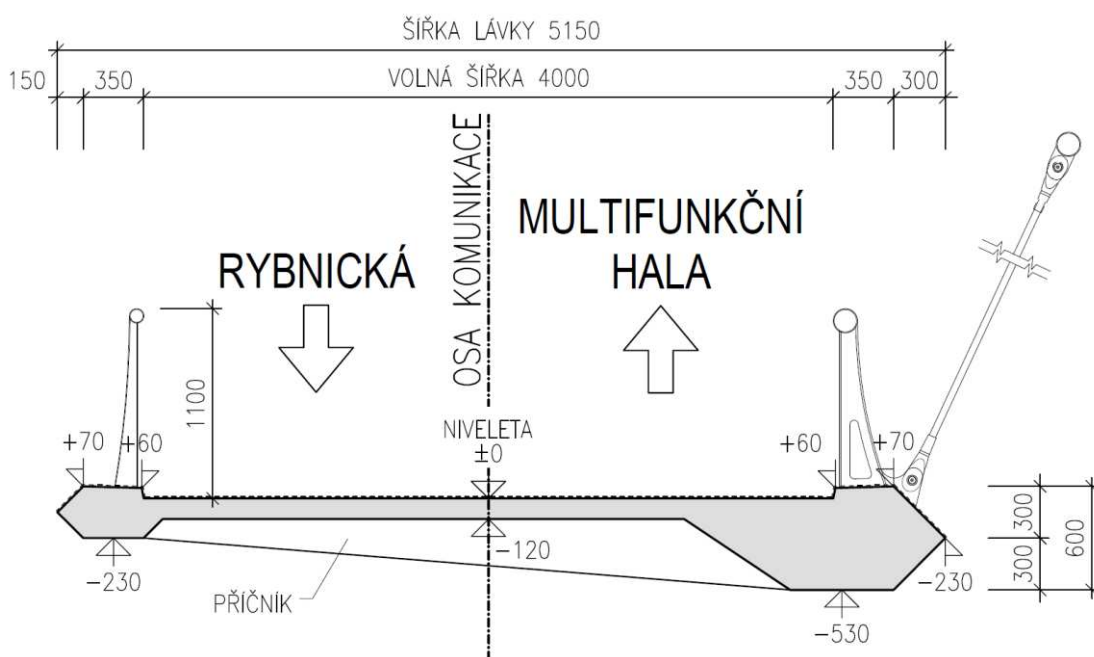
Obr. 8 Vizualizace: V pozadí Koupaliště Riviéra, řeka Svratka a ji přemostující lávka

3.1. PŘÍČNÝ SMĚR

Mostovka lávky je tvořena trámem, který je jednostranně zavěšený pomocí závěsů na visutém laně po vzdálenosti 3,0 m. Z trámu vybíhá tenká deska, která je vylehčena a podporována příčnícími po vzdálenosti 1,5 m.

Na lávce je po pravé straně masivní zábradlí, které vede předpínací kabel, který vyrovnává momentovou rovnováhu v příčném směru lávky. Řešení jednostranného zavěšení je vysvětleno dále v textu této práce. Zábradlí na levé straně je inspirováno tvarem zábradlí na pravé straně a je shodné výšky 1,10 m. Mostovka má po celé délce konstantní tvar. Římsy lávky jsou monolitické s výškou obruby 0,06 m, která slouží jako vodící linie. Vnější okraje říms mají čochovitý tvar za účelem omezení účinků větru na konstrukci.

Celková šířka lávky je 5,10 m z čehož 4,0 m je volná šířka mostu. Výška trámu včetně římsy je 0,60 m. Lávka je na horním povrchu opatřena přímo pochozí izolací včetně monolitických říms.



Obr. 9 Příčný řez lávkou

3.2. PODÉLNÝ SMĚR

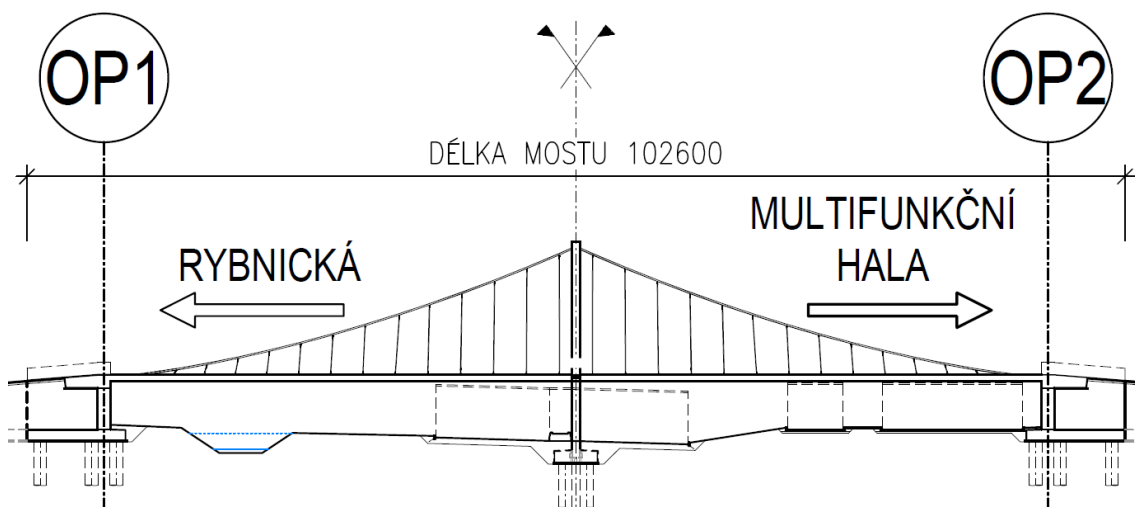
Niveleta lávky je přímá, což je vhodné, pro již tvarově složitou konstrukci bez náběhů po délce, což je vhodnější než vytvoření náběhů na koncích mostovky. Konstrukce z hlediska statického vyhoví i bez náběhů, ale za účelem mezního stavu únosnosti bylo potřeba průřez vyztužit betonářskou výztuží. Za dřikem opěry směrem od konstrukce niveleta klesá se sklonem 8,0 %, aby komunikace klesla co nejdříve na stávající terén a zároveň bylo vyhověno normě ČSN 73 4001 Přístupnost a bezbariérové využívání staveb.

Konstrukce překračuje nejprve Mlýnský náhon. Koryto vodoteče neomezuje návrh konstrukce z hlediska volné výšky pod mostem, protože hladina stoleté vody se nachází na úrovni stávajícího terénu. Lávka dále překračuje silnici I/42, kde překračuje průjezdní prostor včetně rezervy, která postačí na průhyb od charakteristické kombinace zatížení. Poslední překážkou je parkoviště pro osobní automobily, které lávka překračuje bez zásahu do průjezdního prostoru, průhyb od charakteristické kombinace může zasáhnout do rezervy nad průjezdním prostorem. To bylo však vzhledem k charakteru komunikace, rychlosti a používaným dopravním prostředkům vyhodnoceno jako dostatečné.

Lávka je tvořena jedním polem a visuté lano je zavěšené na pylonu uprostřed rozpětí pole. Pylon není spojen s mostovkou.

Pylon je založen pod středním dělicím pásem komunikace tak, aby byl dostatečně hluboko pod vozovkou a základ konstrukce se neprokresloval do vozovky silnice I/42. Zároveň pylon nezasahuje do průjezdního prostoru komunikace. Pylon je skloněn od konstrukce pod úhlem, který zajišťuje, že pylon není ohýbaný od vlastní tíhy lávky.

Závěsy Macalloy jsou zavěšeny pomocí kotevních plechů na visutém lanu a s mostovkou spřaženy pomocí plechů, které jsou součástí sloupků zábradlí vedoucí visuté lano.



Obr. 10 Podélný řez lávkou

4. STATICKÉ ŘEŠENÍ

Za účelem návrhu lávky o tomto konstrukčním uspořádání bylo zapotřebí vytvořit výpočtový model konstrukce. Řešení je rozděleno na řešení příčného směru konstrukce a řešení podélného směru konstrukce. Takto je zajištěno dostatečně přesný popis chování konstrukce.

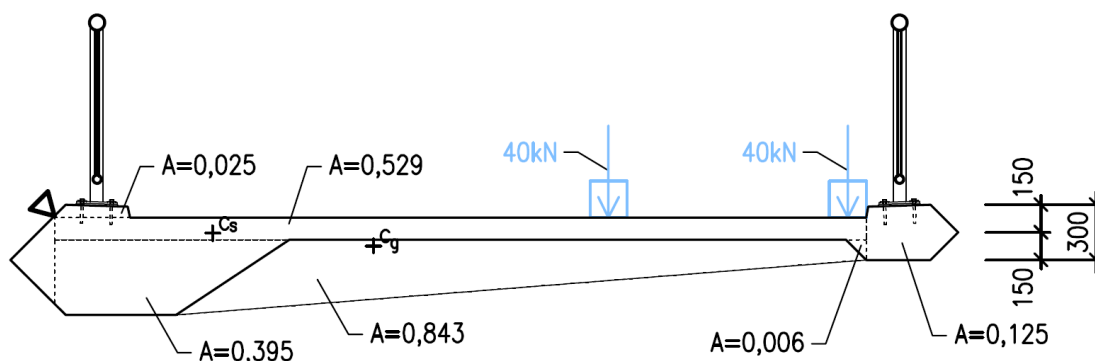
Globální výpočtový model je vytvořen ve výpočetním programu Ansys 2024 R1, který umožňuje přesný a rychlý výpočet konstrukce s lanovými prvky jednak z hlediska statického řešení, a to jak nelineárně, tak i lineárně. Dále na stejném modelu můžeme provést i modální a harmonickou analýzu konstrukce. Velkou výhodou tohoto programu je podpora zadávání modelu pomocí dávek textových příkazů, které lze mít samostatně připravené a konstrukci je možno rychle upravit a není třeba se obávat pádu programu a ztráty dat.

Pro výpočet příčného směru byl zvolen ruční výpočet. Jako statické schéma byla zvolena konzola a vetknutí je předpokládáno v místě zavěšení mostovky. Vzduchující průřez ve vylehčené části průřezu je T průřez tvořený příčnicí a přiléhající částí desky, která efektivně spolupůsobí s příčnicí.

4.1. MODEL PŘÍČNÉHO SMĚRU

Model globální je prutový a z toho důvodu nebylo možné zjistit účinky v příčném směru přímo z globálního modelu. Je posuzována část průřezu o délce rozpětí desky mezi příčnicí. Tvar je neměnný po celé délce lávky. Na konstrukci působí kromě vlastní tíhy a ostatního stálého zatížení, v podobě zábradlí, i proměnné zatížení. Zatížení chodci není v příčném směru rozhodující a největší účinky vznikají od obslužného vozidla jedoucím po okraji konstrukce.

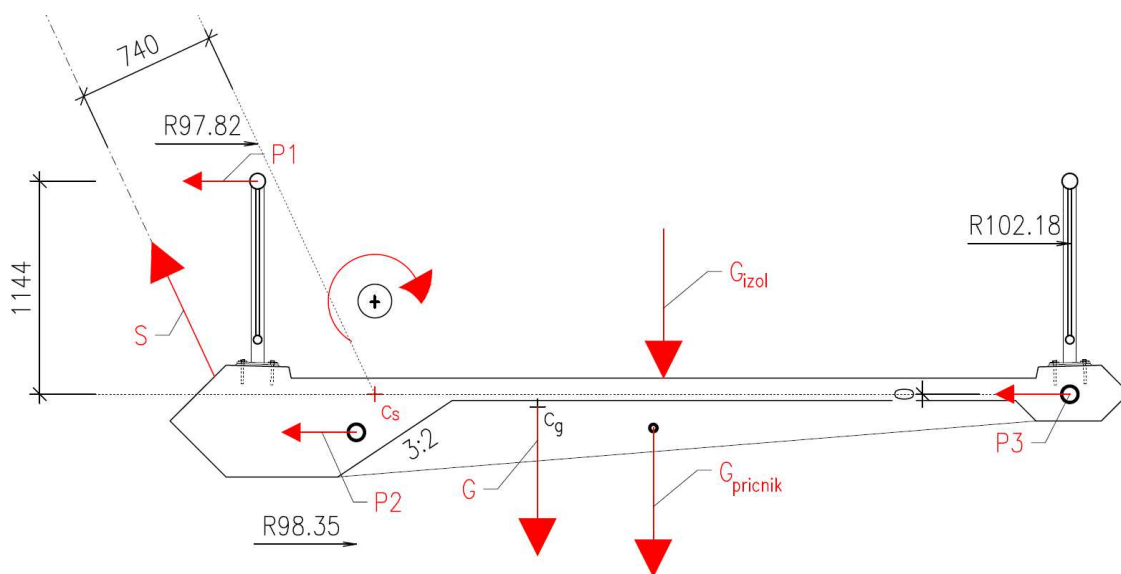
Vnitřní síly byly spočteny ručně na základě zjištění objemů jednotlivých částí průřezu a polohy jejich těžišť. Zatížení od vozidla bylo uvažováno jako bodová síla uprostřed kola vozidla, které je voleno Podle zatěžovací normy ČSN EN 1991-2.



Obr. 11 Schéma modelu příčného směru

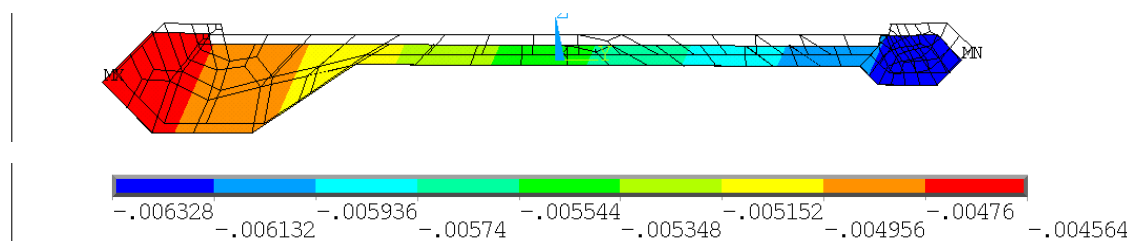
4.1.1. Vyrovnání jednostranně zavěšeného mostu

Jedná se o nesymetrický průřez, který by se při zavěšení jen od vlastní tíhy prohýbal v příčném směru. Vzhledem k tomu, že se jedná o nesymetrický průřez není střed smyku ve stejné poloze průřezu jako těžiště. Při nerovnováze v příčném směru dochází k pootočení průřezu kolem středu smyku. Abychom tomuto jevu zabránili je potřeba vyrovnat momenty v průřezu vůči středu smyku. Střed smyku je na schématu označen jako c_s – shear centre.



Obr. 12 Schéma působících sil v příčném směru

Vzhledem k řešení příčného směru točí s průřezem v kladném směru nejen vlastní tíha materiálů, ale i závěs. Pro výsledný model bylo užito tohoto schématu pro výpočet nutného předpětí v laně označeného silou P1 k vyrovnání průřezu. Moment vůči středu smyku se blíží nule. Tento jev je zřejmý jednak z průhybu v příčném směru, který je v řádech milimetrů. Dále je možné vidět výsledek na velikosti kroutících momentů ve výchozím stavu, který nabývá hodnoty pouze okolo 35 kNm.



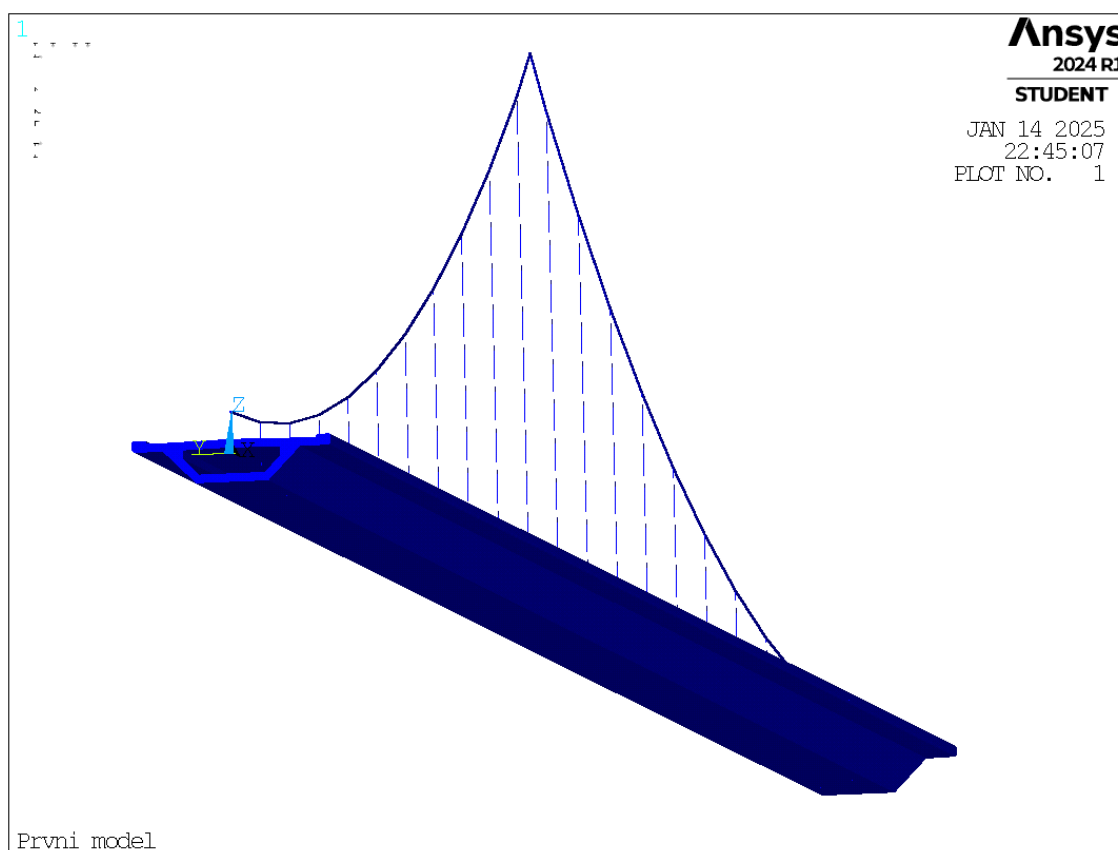
Obr. 13 Průhyb průřezu v příčném směru

4.2. GLOBÁLNÍ VÝPOČTOVÝ MODEL

Globální model byl tvořen v programu Ansys Mechanical 2024 R1, který je vhodný pro modelování lanových konstrukcí. Jeho jedinou nevýhodou je, že v počátečním stavu mají tuhost a jsou součástí tuhosti konstrukce, a proto je třeba uměle zvýšit počáteční poměrné protažení tak, aby odpovídající napětí v kabelech přesně vyrovnalo počáteční zatížení.¹ Proto musí být počáteční poměrné přetvoření určeno v několika iteracích. Jelikož se jedná o geometricky nelineární konstrukci, není možné použít princip superpozice statických účinků a každá kombinace zatížení musí být vytvořena a spočtena samostatně.

4.2.1. První model

Vzhledem k tomu, že autor neměl doposud zkušenosti s lanovými konstrukcemi a výpočetním programem Ansys, byl první model půdorysně v přímé a na něm byly provedeny první pokusy o vyrovnání modelu. Tento model byl prováděn ještě s průřezem, který vychází ze studie. Jedná se o rovinný prutový model.



Obr. 14 Pohled na první model

Po ověření schopnosti vyrovnat model byly nabyté zkušenosti a přetvoření lanových prvků získaných na tomto modelu využity pro přípravu dalších modelů.

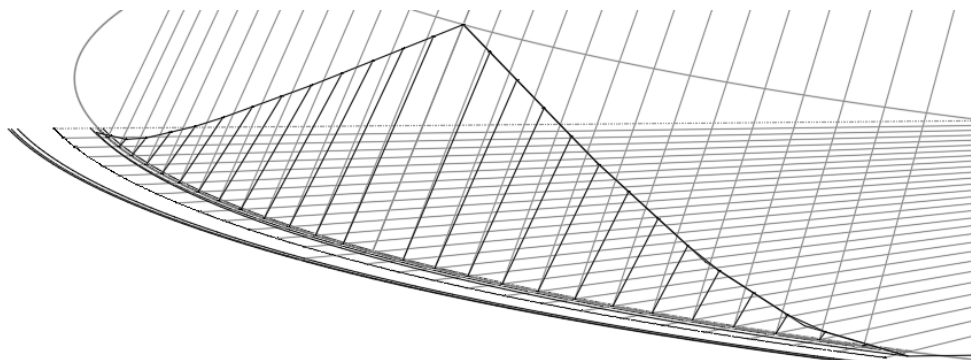
¹ STRÁSKÝ, Jiří. *Stress Ribbon and Cable-supported Pedestrian Bridges*. ICE Publishing, 2011. ISBN 0727741462.

4.2.2. Druhý model

Druhý model je již proveden v půdorysném oblouku. Pro vytvoření geometrie byly vypočítány body na mostovce za použití stejného principu jako se používá při výpočtu souřadnic z dat získaných při měření totální stanicí. Princip je upraven pro využití v rovině. Geometrie mostovky je vypočítaná v tabulkovém procesoru Microsoft Excel a využita v textových dávkách již připravených pro první model.

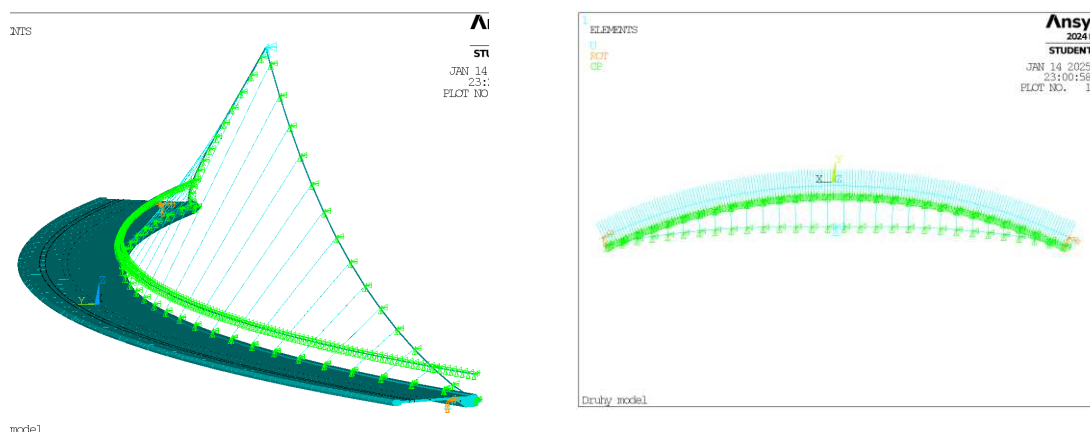
V rámci přípravy tohoto modelu došlo ke změně příčného řezu na výsledný příčný řez. Tento tvar mostovky je jednodušší pro provedení na místě a umožňuje zavedení visutého lana do průřezu před opěrou. Z prvního modelu jsem již měl proveden odhad přetvoření visutých lan a závěsů. Podílem odhadnutých a skutečných přetvoření z prvního modelu byly upraveny odhadnuté přetvoření pro druhý model. Tento přístup se ukázal jako efektivní a již nebylo třeba provádět tolik iterací úprav přetvoření v lanech.

Jako hlavní pro lávku s tímto konstrukčním uspořádáním se ukázalo být nalezení výslednicové polohy visutého lana. Pro nalezení výchozího tvaru je po úpravě přetvoření lan zapotřebí provést množství iterací geometrie visutého lana. Při vytváření geometrie byly závěsy obaleny na kužel, aby vytvořily zajímavější pohled na konstrukci.



Obr. 15 Obalení závěsů na kužel

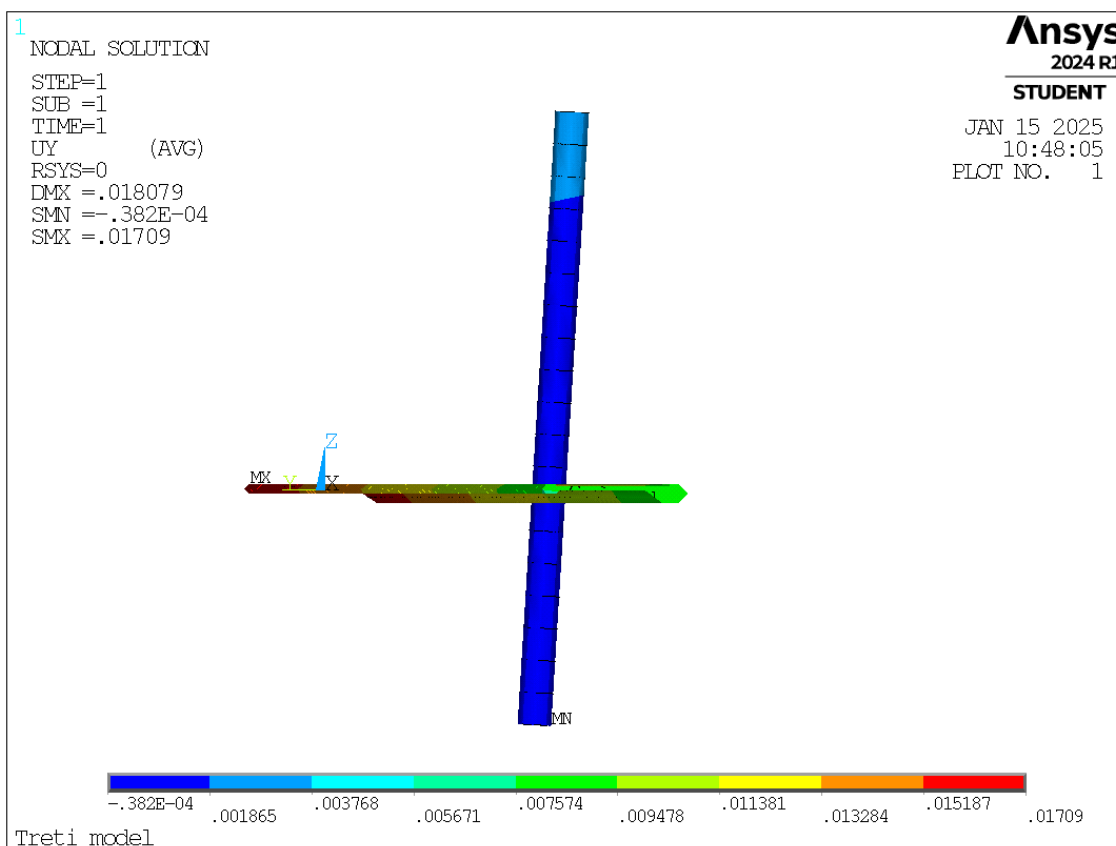
Jedná se o prostorový prutový model, který je v místě opěr vetknutý.



Obr. 16 Pohled na druhý model

4.2.3. Třetí model

Po vymodelování druhého modelu a zkoumání vnitřních sil byly zjištěny velké extrémy vznikající ve vetknutí. Bylo potřeba zjistit do jaké míry jsou tyto vnitřní síly skutečné. Prvně došlo k nahrazení podpor ve vrcholu visutého lana pylonem o skutečném průřezu. Byl vytvořen výpočet, který určoval úhel pylonu tak, aby vnitřní síly v pylonu ve výchozím stavu konstrukce byly blízké nule. Výchozím předpokladem byla známá hodnota síly ve vrcholu pylonu v příčném směru. Dále při úpravách konstrukce byl úhel pylonu opravován iteračně na základě informace o deformaci v příčném směru. Vzhledem k tomu, že pylon je ocelobetonový nešlo jeho průřez nadefinovat přímo, ale byl použit betonový průřez o ekvivalentní tuhosti. Plocha oceli byla přenásobena podílem modulů pružnosti oceli a betonu. S tímto zvětšeným průřezem se v modelu i zobrazuje, a proto působí pylon v modelu masivněji než ve skutečnosti. Velikost jeho průřezu je dána zejména potřebou umístit kotevní objímky do vrcholu pylonu. Zatímco z hlediska statického, by mohl být průřez tenčí.



Obr. 17 Deformace pylonu v příčném směru

Pylon nemá modelované založení, jelikož vzhledem k nízkému momentovému namáhání založení není očekáván velký vliv tohoto založení na působení konstrukce globálně.

Dále bylo třeba zohlednit zejména chování konstrukce v opěrách. Proto došlo k modelování opěr, tvořených obdélníkovým průřezem. Následně bylo

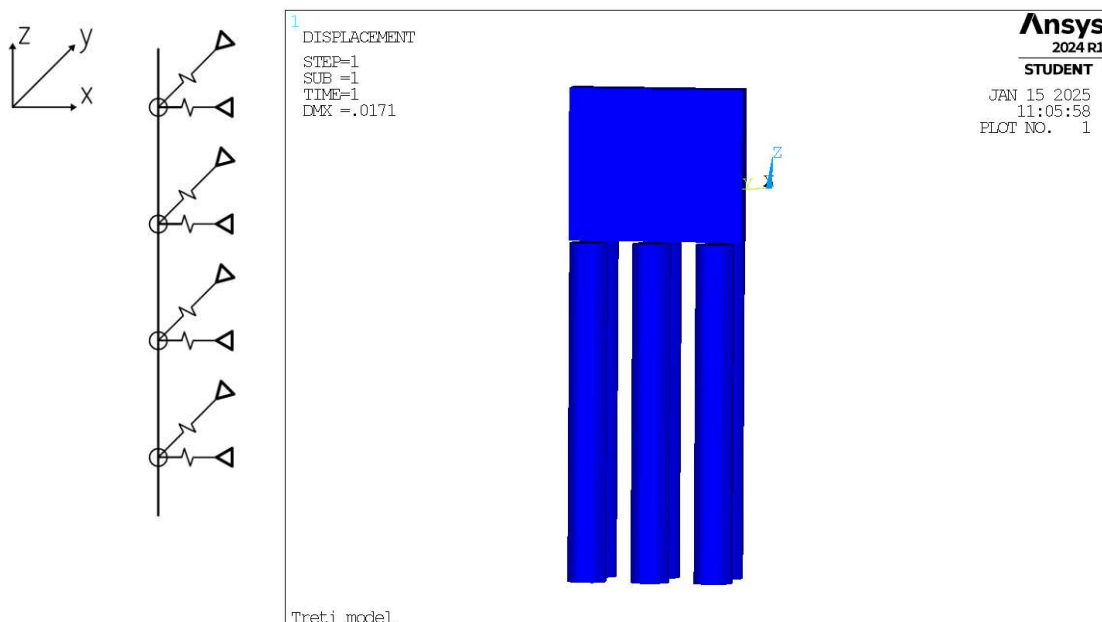
LÁVKA PODPOROVANÁ KABELY

zohledněno založení sestávajícího se z velkopřůměrových pilot, které jsou pružně uloženy v zeminovém prostředí. Byla zjištěna tuhost podloží na základě informací z geologického vrtu a spočítána podle normy ČSN 73 1004 Navrhování základových konstrukcí.

Označení	E_{def} [Mpa]	k_{hz} [MN/m ³]
F8	5	2.825
R6	8	4.520

Tab. 1 Tabulka tuhosti podloží

Do Ansysu byly piloty zavedeny jako kruhové průřezy o průměru pilot, na něž byly po pravidelné vzdálenosti ve směru x a y připevněny pruty COMBIN14, což jsou prvky s lineárně pružným chováním na základě zadané tuhosti. Tyto pruty jsou ukončeny podporami v daném směru.

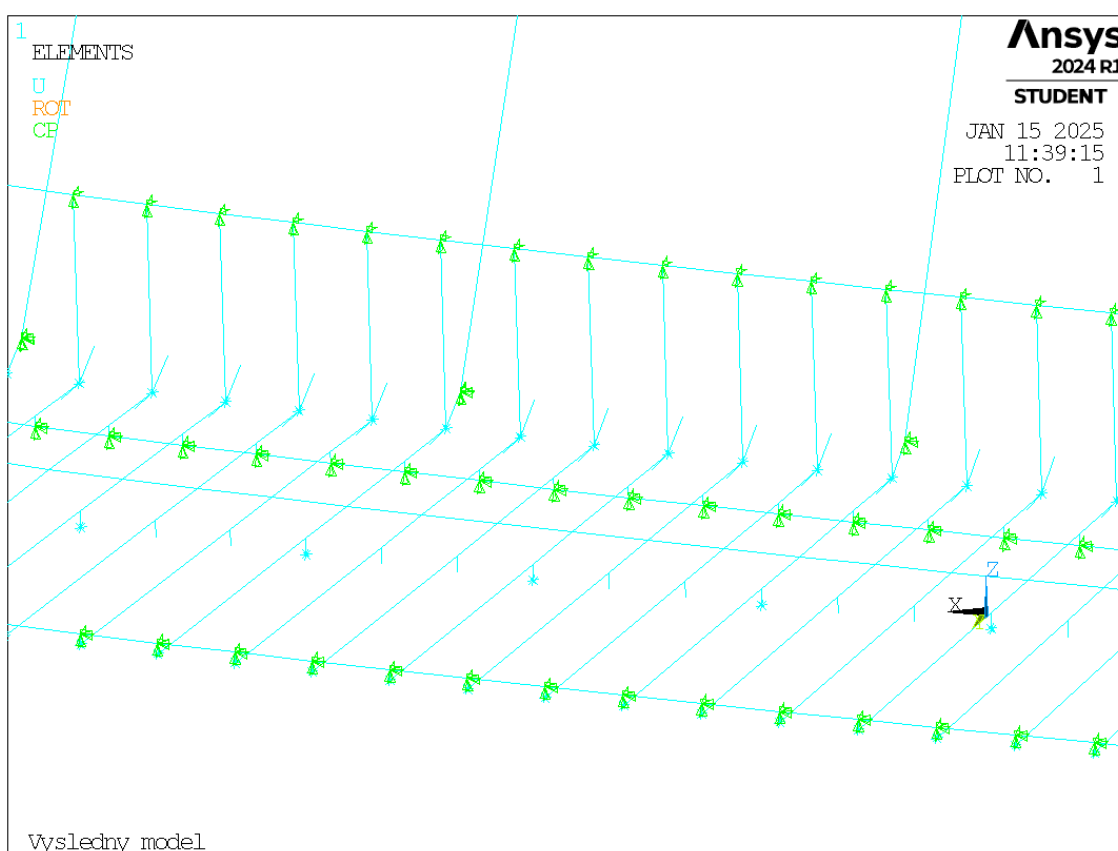


Obr. 18 Vymodelované opěry a založení

Tento model mi dal představu o skutečném průběhu vnitřních sil a na základě výpočtu napětí a posouzení na mezní stavy použitelnosti bylo navrženo předpětí mostovky, které bylo zavedeno do výsledného modelu. Konstrukce se chová převážně vhodně z hlediska statického řešení. Největší problém vzniká ve vetknutí na straně trámu, kde vlivem extrémních momentů, jak ve svislém, tak ve vodorovném směru vznikají tahová namáhání. Tyto tahová namáhání jsou následně vykryty vložení tlakové rezervy do průřezu a redukcí špičky momentu ve vodorovném směru na průřezu vložení kabelu předpětí do levé římsy.

4.2.4. Výsledný model

Vzhledem k tomu, že příčnický nevstupují do výpočtu tuhosti konstrukce nejsou modelovány. Tato skutečnost byla do výsledného modelu zohledněna pomocí zvýšené objemové tíhy v modelu. Ve výsledném modelu byla objemová hodnota betonu mostovky upravena na standardní a příčnický byly zadány do svého těžiště pomocí prvku MASS21, což je hmotový prvek programu Ansys umožňující zadat do uzlů hmotu. Obdobným způsobem bylo do výsledného modelu zaneseno i zábradlí a přímo pochozí izolace, jejíž váha byla vložena společně se zábradlím do stejných uzlů. Toto bylo vhodné pro vytvoření přesnějšího modelu, ale zejména nutné pro dynamickou analýzu, která musí zahrnovat veškerou kmitající hmotu.



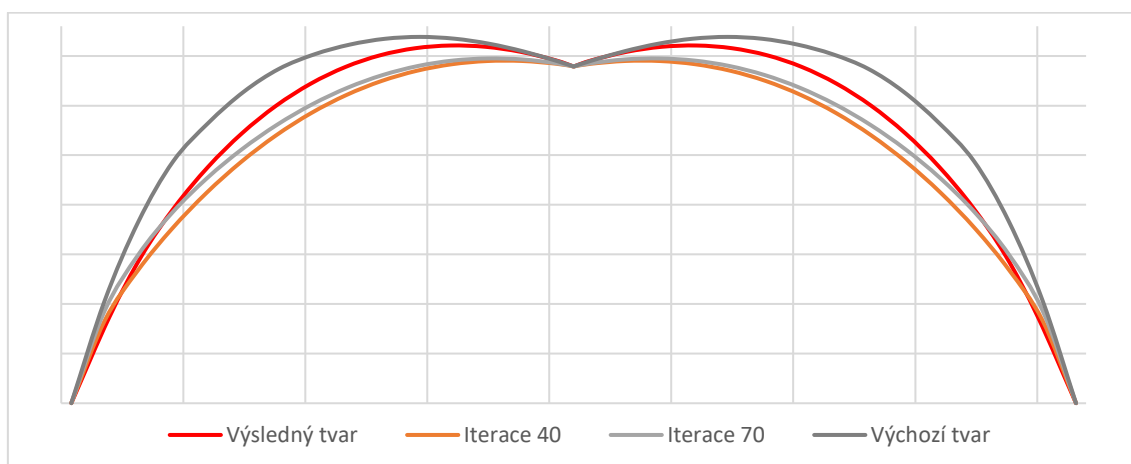
Obr. 19 Pohled na příčné vazby s prvky MASS21 a předpětím

Do tohoto modelu bylo vloženo předpětí, v softwaru Ansys modelované jako pruhy, které nepřenáší ohybová namáhání. Obdobně jako závěsy a visuté lano. Jsou spojeny s mostovkou ve směrech xyz v každé příčné vazbě. Kabel vedený v zábradlí je uchycen po délce jen ve směrech yz a to z důvodu, že se jedná o nezainjektovaný kabel, který se může volně pohybovat a působí na lávku silami zejména v příčném směru, kterou vyrovnává příčný řez.

4.2.5. Nalezení výslednicového tvaru visutého lana

Po nalezení vhodných přetvoření lan a závěsů byla převážná část času hledání výchozího tvaru věnována hledání vhodného tvaru visutého lana. Vzhledem k tomu, že se jedná o trojrozměrnou křivku nebylo tak snadné nalezení jejího tvaru jako u rovinné křivky. Tvar visutých lan se blíží parabole druhého stupně.

S obdobným předpokladem jsem vstoupil i do návrhu výchozího tvaru visutého lana. Výchozí geometrie lan byla určena při obalení závěsů na kužel, kde jsem promítnul tvar lana na kužel, což se ukázalo jako nevhodné a při opětovném tvoření geometrie bych volil promítnutí závěsů na visuté lano, které bylo vykresleno jako trojrozměrná parabolická křivka.



Obr. 22 Půdorys tvarů visutého lana

Celkem bylo při hledání výchozích tvarů vytvořeno 184 iterací tvaru. Po každé úpravě tvaru visutého lana bylo zkontrolováno naklonění průřezu a deformace pylonu. Po dotažení lana v zábradlí a změně geometrie pylonu byly vytištěny posuny bodů visutého lana. O tyto rozdíly byla opravena geometrie visutého lana a závěsů a spuštěna další iterace výpočtu. Vzhledem k možnosti spuštění výpočtu a vytištění deformací pomocí jediného příkazu není tento způsob příliš časově náročný a osvědčil se při hledání výchozího stavu lávky.



Obr. 23 Pohled na tvary visutého lana

4.3. VÝSLEDNÉ MODELY

Vzhledem k tomu, že pro statickou analýzu je používán nelineární výpočet, není možné použít princip superpozice účinků. Proto pro každou kombinaci v každém čase jsou hledány vnitřní síly samostatně. Ve statickém výpočtu je možno nalézt tabulku s označením kombinací. Číselné označení kombinace vyjadřuje, jaké zatížení je v kombinaci obsažené a určuje jaké zatížení je uvažováno jako hlavní. Pro všechny dílčí modely je poté zatížení přenásobeno příslušnými součiniteli dle série norem ČSN EN 1991.

4.3.1. MSP v čase výstavby

Na tento model jsou aplikována pouze klimatická zatížení. Jsou vyšetřovány veškeré kombinace s charakteristikami materiálů příslušných tomuto času. Je to zároveň model vyjadřující výchozí stav konstrukce.

4.3.2. MSP v čase životnosti

Na tento model jsou aplikována veškerá možná zatížení. Aplikován vliv smršťování a dotvarování. Jsou vyšetřovány veškeré kombinace s charakteristikami materiálů příslušných tomuto času. V globálním modelu nebylo uvažováno zatížení obslužným vozidlem, jelikož vzhledem k rozpětí není rozhodující. Zatížení obslužným vozidlem je uvažováno pouze v modelu příčného směru, kde je rozhodující.

4.3.2. MSÚ dle 6.10a v čase životnosti

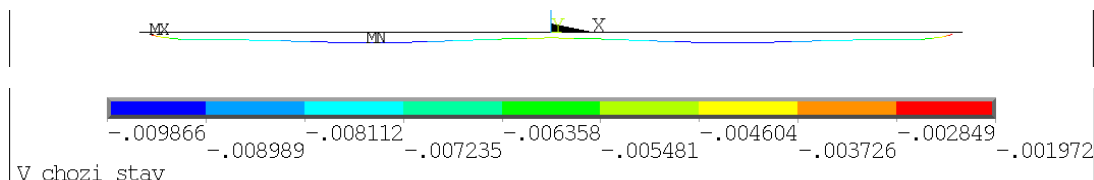
Na tento model jsou aplikována veškerá možná zatížení. Aplikován vliv smršťování a dotvarování. Jsou vyšetřovány veškeré kombinace s charakteristikami materiálů příslušných tomuto času. Materiálové vlastnosti jsou přenásobeny součinitelem 1,35, stejně tak přetvoření v závěsech, visutém lanu a kabelu v zábradlí. Vyšetřovány jsou pouze vybrané kombinace podle výsledků z charakteristické kombinace z mezního stavu použitelnosti v čase životnosti.

4.3.2. MSÚ dle 6.10b v čase životnosti

Na tento model jsou aplikována veškerá možná zatížení. Aplikován vliv smršťování a dotvarování. Jsou vyšetřovány veškeré kombinace s charakteristikami materiálů příslušných tomuto času. Materiálové vlastnosti jsou přenásobeny součinitelem 1,15, stejně tak přetvoření v závěsech, visutém lanu a kabelu v zábradlí. Vyšetřovány jsou pouze vybrané kombinace podle výsledků z charakteristické kombinace z mezního stavu použitelnosti v čase životnosti.

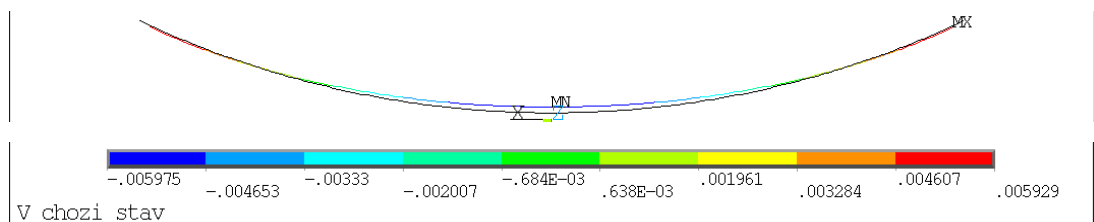
4.4. VÝCHOZÍ STAV

Konstrukce na vnesení normálových sil reaguje deformací opěr, které zároveň zkonsumují část normálových sil vnesených do kotevního bloku. Deformace opěr zahrnuje jejich vyklonění a tím pádem i klesnutí krajních uzlů mostovky a určení počáteční tečny sklonu. To má za následek, že konstrukce není vyrovnaná do výšky ± 0 mm, ale do výšky -9 mm s odchylkou ± 4 mm, která se projevuje uprostřed rozpětí. Svislý ohybový moment tak není rovnoměrný, ale odchyluje se ± 200 kNm na obě strany od střednice.



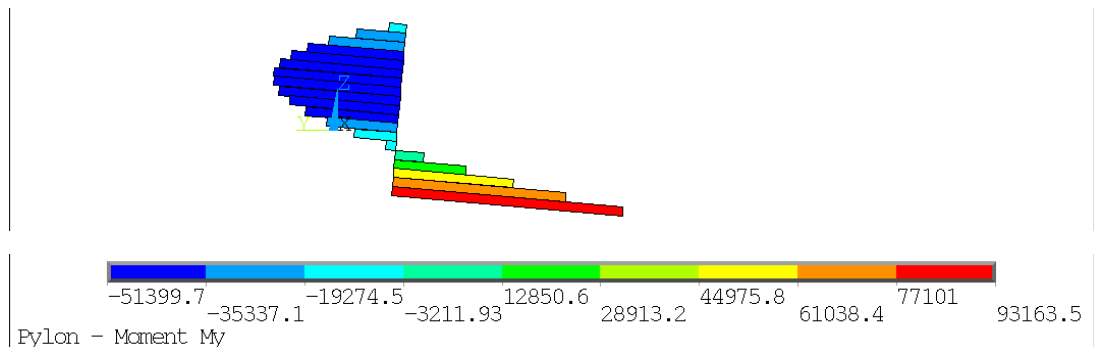
Obr. 24 Deformace ve svislém směru

Konstrukce má dále tendenci se pohybovat v příčném směru. Celková výchylka ve výchozím stavu je pouhých 6 mm, jelikož došlo k jejímu snížení vlivem předpětí mostovky. Ale při působení teploty se pro konstrukci v pozitivním smyslu část zatížení projeví pohybem ve vodorovném směru.



Obr. 25 Deformace v příčném směru

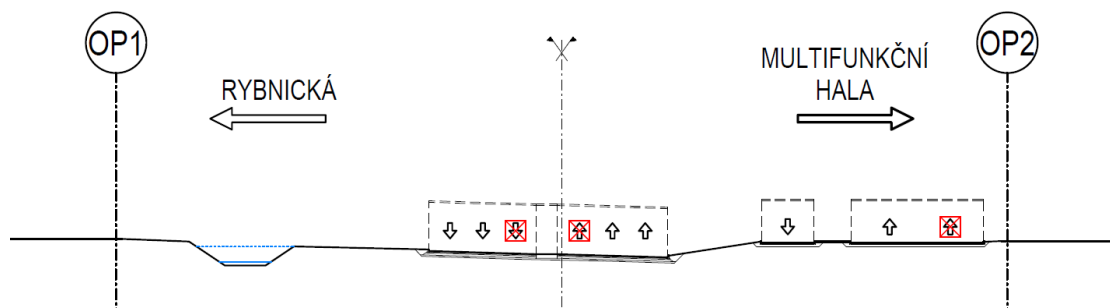
Pylon je ve výchozím stavu prakticky bez momentový, jelikož sílu od visutého lana vyrovnává vlastní tíhou. Extrém ve vetknutí 93 kNm při současném působení normálové síly 4500 kN.



Obr. 26 Moment M_y na pylonu

5. POSTUP VÝSTAVBY

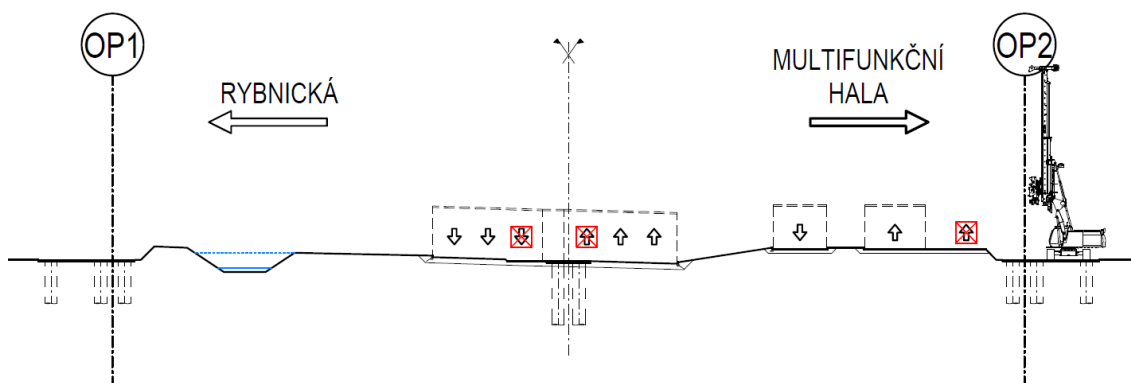
5.1. FÁZE 1



Obr. 27 Postup výstavby – fáze 1

V první fázi výstavby dojde k sejmutí ornice v místech, kde dojde k výstavbě a pohybu mechanizace v okolí lávky. Vedení dopravy bude na silnici I/42 upraveno na uspořádání dvou pruhů v každém dopravním pásu. K zachování počtu pruhů může dojít z toho důvodu, že pod lávkou vedou odbočovací pruhy. Dojde ke snížení rychlosti na silnici a umístění provizorních betonových svodidel ohraničující okraj staveniště ve středním dělicím pásu. Po provedení dopravně inženýrských opatření dojde k rozebrání středního dělicího pásu v rozsahu nutném pro výstavbu. Dále stavby zúží příjezd na parkoviště.

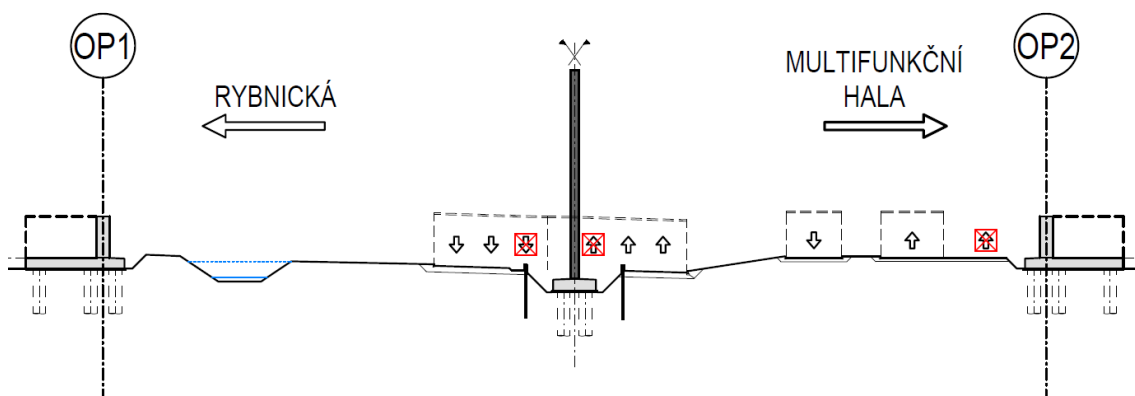
5.2. FÁZE 2



Obr. 28 Postup výstavby – fáze 2

V druhé fázi dojde k výkopu na úroveň základové spáry opěr. Provedení podkladního betonu opěr, který zároveň slouží jako pilotážní šablona. Následně dojde k provedení pilot. Při provádění založení pylonu nedojde nejdříve k výkopu, ale provede se pilotážní šablona na pilotážní plošině, která je na úrovni stávajícího terénu za účelem proveditelnosti. Při provádění pilot bude využito technologie hluchého vrtání, kde pilota nad úrovní základové spáry nebude vyztužena, kromě vyztuže kotvené do základu a tento přebývající materiál bude při výkopových pracích následně odbourán.

5.3. FÁZE 3



Obr. 29 Postup výstavby – fáze 3

Po provedení pilot dojde k zapažení terénu ve vzdálenosti 0,5m od provizorního betonového svodidla. Je uvažováno pažení ze štětovnic, jelikož v okolí se nenachází obytná zástavba a není problém štětovnice zavibrovat. Jedná se o rychlou výstavbu pažení s minimální deformací pažící konstrukce vzhledem k charakteru výkopu. Pažení má eliminovat deformace vozovky v pojížděné části.

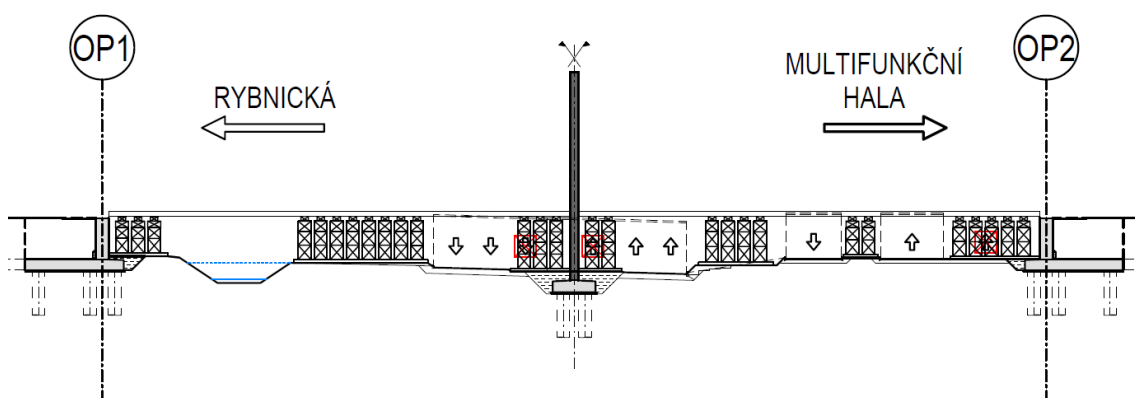
Dále dojde k výkopu k základové spáře pylonu. Odbourání nadbetonávky pilot a provedení podkladního betonu. Následně dochází k vyztužení veškerých základů, osazení kotevních šroubů pro osazení kotevních šroubů zárodku pylonu. Betonáž všech základů s omezením u základu pylonu, kde je ponechán kalich pro vložení pylonu.

Na opěrách dojde k vyztužení opěr a křídel a následné betonáží. U křídel je třeba pamatovat na vložení kabelové trasy kabelu číslo 5 a kotvy do zesíleného konce křídla. Následuje zahájení provádění izolací na rubech konstrukce.

Ve středovém dělicím pásu dojde k osazení pylonu za pomoci dvou autojeřábů, každý o nosnosti alespoň 20 t. Pylon bude přikotven do základu a zbylá část základu bude zabetonována. Dále dojde k betonáži pylonu po stanovenou úroveň pod vrchol pylonu.

Následně je zaizolován jak základ, tak i dřík pylonu do úrovně budoucího zásypu konstrukce.

5.4. FÁZE 4



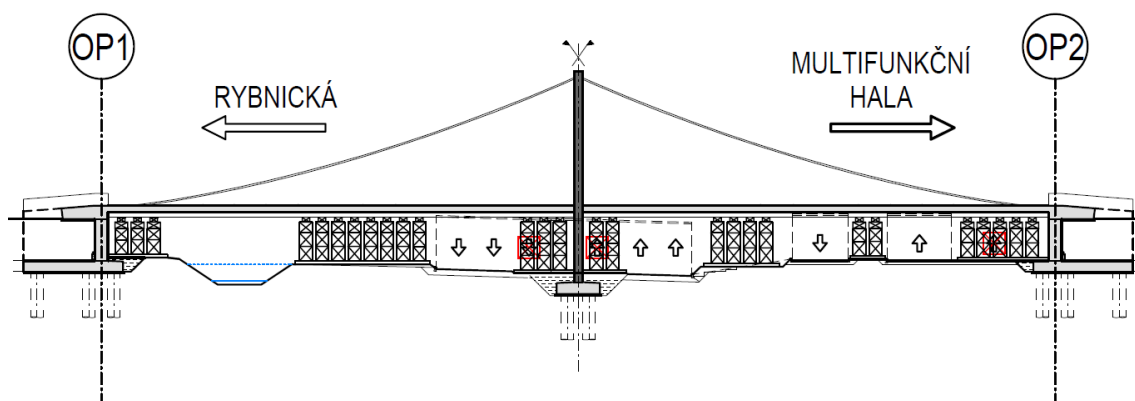
Obr. 30 Postup výstavby – fáze 4

V této fázi dojde k zásypu základu pylonu a zásypu části konstrukce za opěrou. Pod kotevním blokem je opěra zasypána do úrovně podkladního betonu a ten je následně na zásypu proveden. Konec křídel opěry musí být odhalen do úrovně, kde je umístěna kotva kabelu s číslem 5.

Budou vystavěny podpůrné konstrukce pro bednění mostovky. Podle vybraného profilu nosníku nad vozovkou ve směru Poříčí musí být na silnici v tomto směru dáno výškové omezení průjezdu vozidel. Kromě zachování průjezdních prostorů a prostoru nad Mlýnským náhonem se uvažuje podepření jako celoplošné.

Na podpůrných konstrukcích bude vytvořeno bednění pro armování a betonování mostovky. Do bednění jsou kromě výztuže osazeny i všechny prvky spřahované s mostovkou, tedy sloupky zábradlí vedoucí předpínací kabel spojené s kotevním plechem visutého lana. Dále budou osazeny kanálky soudržných předpínacích lan, vytvořeno madlo zábradlí vedoucí předpínací kabel, trubka vedoucí visuté lano do průřezu a osazeny kotvy předpětí.

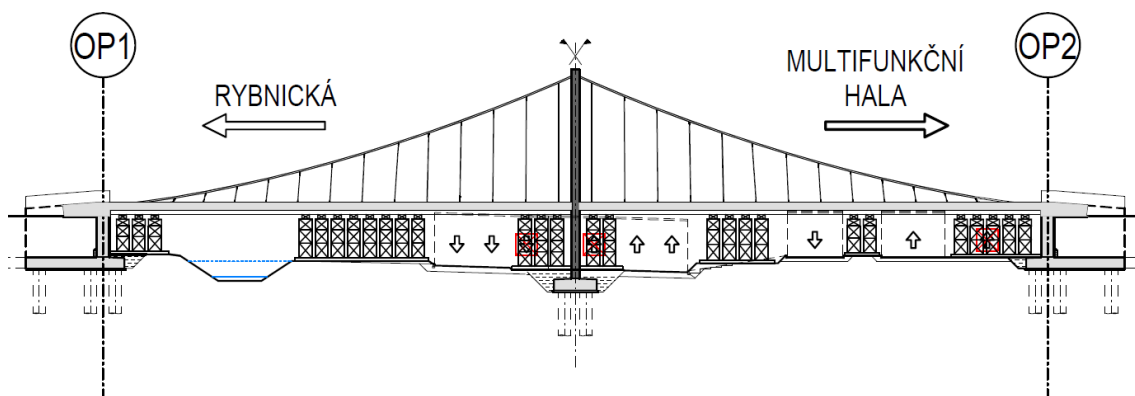
5.5. FÁZE 5



Obr. 31 Postup výstavby – fáze 5

V této fázi dojde k betonáži mostovky a natažení lanka mezi pylonem a opěrou. Toto lanko následně slouží pro vyvážení trubky vedoucí visuté lano a získání jeho požadovaného tvaru.

5.6. FÁZE 6

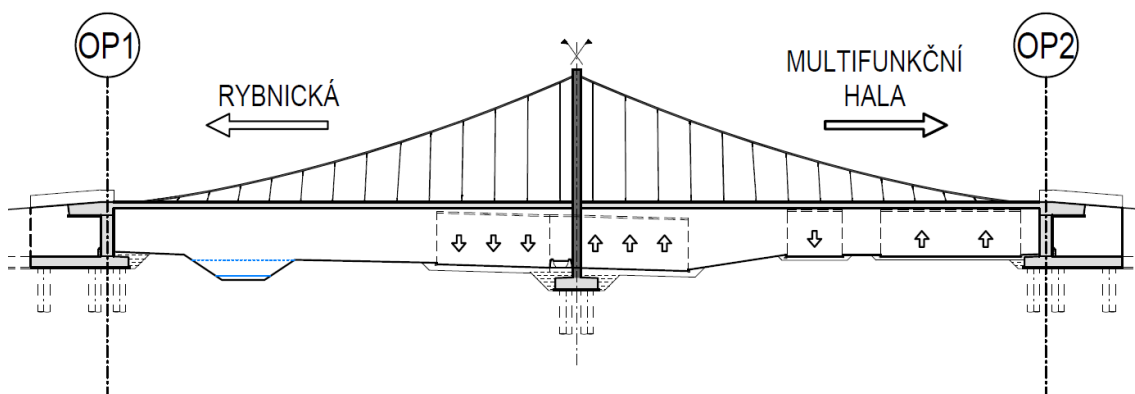


Obr. 32 Postup výstavby – fáze 6

Následuje osazení závěsů a dokončení zábradlí vedoucí kabel v zábradlí. Nyní je třeba přistoupit k odstranění podepření mostovky, které by bránilo příčnému posunu mostovky při předpínání. Je třeba umožnit posun v příčném směru alespoň ± 20 mm.

Následuje předpínání předpínacích kabelů v pořadí podle přílohy P2.5 Výkres předpínací výztuže. Nejprve se předepnou kabely v mostovce, tím je vnesena tlaková rezerva do průřezu následuje předepnutí kabelu visuté lano buď postupně se zvyšováním napětí po 10 % z napínacího napětí se střídáním napínáním na opěře 1 a 2. Vhodnější je použití dvou přepínacích pistolí a současné napínání každé poloviny visuté lano. Jako poslední se napne kabel z předpínacích lan obalených mazivem v PE hadičkách, který vede v madle zábradlí na pravé straně mostu. Následně dojde k injektáži kabelových tras pomocí injektážní malty z kotevních oblastí.

5.7. FÁZE 7



Obr. 33 Postup výstavby – fáze 7

V poslední části výstavby dojde k aplikaci přímo pochozí izolace a osazení zbylého zábradlí. Dojde k odskržení mostovky a odstranění podpůrných konstrukcí. Dokončení opěrných zdí na předpolí. Zásyp veškerých rubových stran konstrukce a provedení asfaltové vozovky komunikace před a za lávkou.

Pod a kolem mostu jsou provedeny úpravy terénu tak, aby plynule navazovaly na stávající terén. U opěry 2 dojde k vydláždění prostoru kolem opěry tak, aby plynule bylo navázáno na stávající parkoviště. Všude, kde dojde k zásypu zemínou se provede v horních 10 cm zpětný zásyp kulturní vrstvou zeminy sňatou ve fázi 1 a provede se osetí trávou.

Střední dělicí pás bude obnoven podle původního rozsahu, tedy osazení betonových svodidel výšky 1,10 m a prostor mezi nimi bude zasypán do požadované úrovně nenamrzavým materiálem. Dojde k obnovení vozovkových vrstev s odstupňováním po vzdálenostech min. 0,60 m.

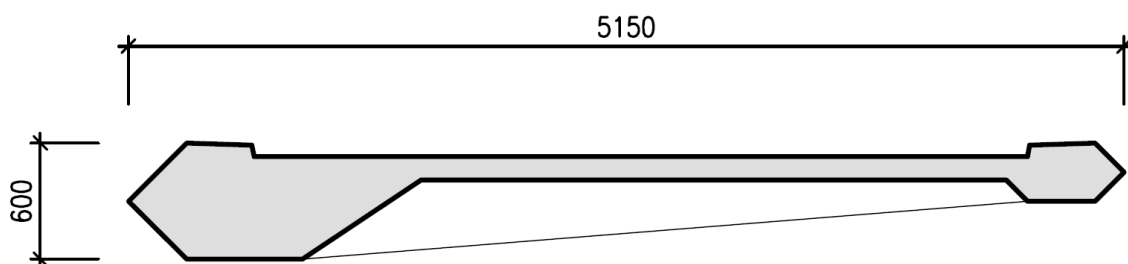


Obr. 34 Vizualizace: Pohled na dokončenou konstrukci

6. VYBRANÉ MATERIÁLY A PRŮŘEZY

6.1. MOSTOVKA

Tvar mostovky vychází z návrhu jednostranně zavěšené konstrukce. Je co nejvíce vylehčen na straně vzdálené od závěsu, čímž je střed smyku a těžiště přisunuto co nejbližší k závěsu.



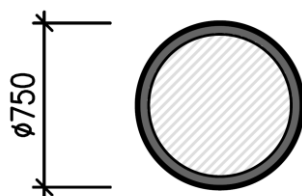
Obr. 35 Průřez mostovky

ŽB MOSTOVKA

C50/60 XF4, XD3

6.2. PYLON

Průřez pylonu je dán zejména nutností umístit do vrcholu pylonu pasivní kotvy předpětí pro visuté lano. Tloušťka stěny z oceli o síle 50 mm zajišťuje co nejvyšší tuhost za použití základní konstrukční oceli.



Obr. 36 Průřez pylonu

PYLON

S235 JR

6.3. PŘEDPÍNACÍ LANA

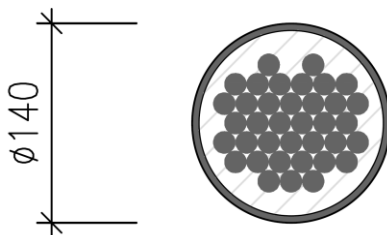
Zvoleny dva druhy předpínacích systémů, a to kabely o 19 lanech a 37 lanech

PŘEDPÍNACÍ VÝZTUŽ

Y1860 S7 – 15,7

6.4. VISUTÉ LANO

Je tvořeno předpínacím kabelem o 37 lanech obalených v cementové zálivce uvnitř ocelové trubky s tloušťkou stěny 5 mm.



Obr. 37 Průřez visutého lana

PŘEDPÍNAČÍ VÝZTUŽ	Y1860 S7 – 15,7
TRUBKA VISUTÉHO LANA	S235 JR

6.5. ZÁVĚSY

Závěsy jsou vybrány od společnosti Macalloy S550 průřezu M42.

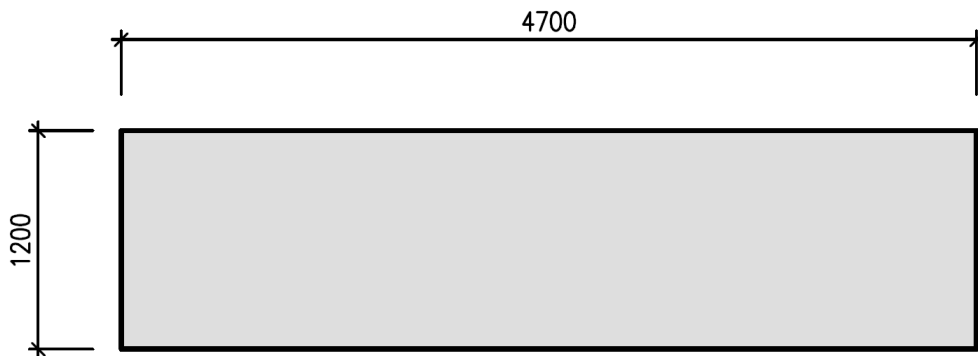


Obr. 38 Průřez závěsu

ZÁVĚSY	MACALLOY S550
--------	---------------

6.6. OPĚRA

Vzhledem k vznikajícím deformacím od normálových sil byl zvolen masivnější průřez opěry. Po opěrných zdech je zkopírován tvar říms z mostovky, proto je opěra užší o 0,45 m než mostovka.



Obr. 39 Průřez opěry

ŽB OPĚRY, KŘÍDLA	C30/37 XF2
------------------	------------

7. STATICKÁ ANALÝZA

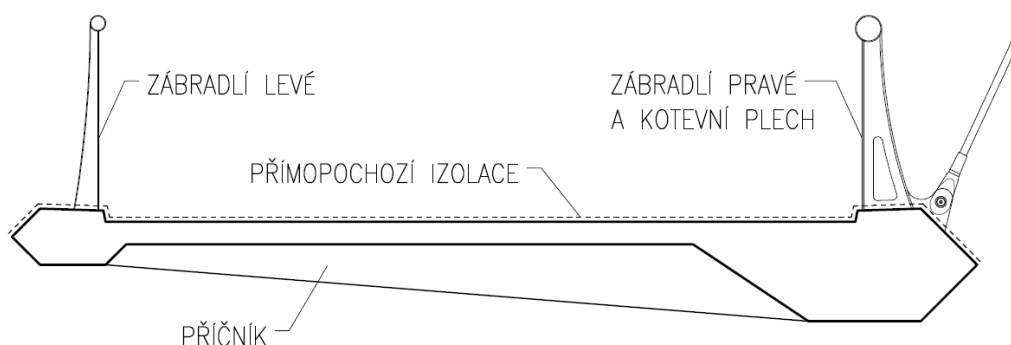
7.1. ZATÍŽENÍ

7.1.1. Stálá zatížení

Vlastní tíhy materiálů byly do výpočtu zadány jako skutečné materiálové charakteristiky k průřezům, které jsou modelovány ve svém skutečném tvaru. Části konstrukce nemodelované tvarem jsou zadány pomocí hmotnosti prvkem MASS21 jako je zábradlí a přímo pochozí izolace, ale i základ opěry je jen přidán jako hmotnost. Jediné stálé zatížení, které je zadáno silově je zemní tlak působící na opěru. U zemního tlaku nepředpokládám, že bude kmitat s lávkou, a proto je zadán pouze silově do výpočtu.

Velikosti stálých zatížení jsou uvažovány charakteristickou hodnotou. Pokud se má uvažovat vyšší hodnota, jako je tomu v mezním stavu únosnosti, je příslušným součinitelem přenásobena hodnota objemové tíhy materiálu, resp. hmotnost či síla.

V prvních modelech došlo ke kontrole celkové sumy svislých sil vstupujících do podpor a tím bylo ověřeno, že se model chová správně.



Obr. 40 Schéma ostatního stálého zatížení

7.1.2. Proměnné zatížení – doprava

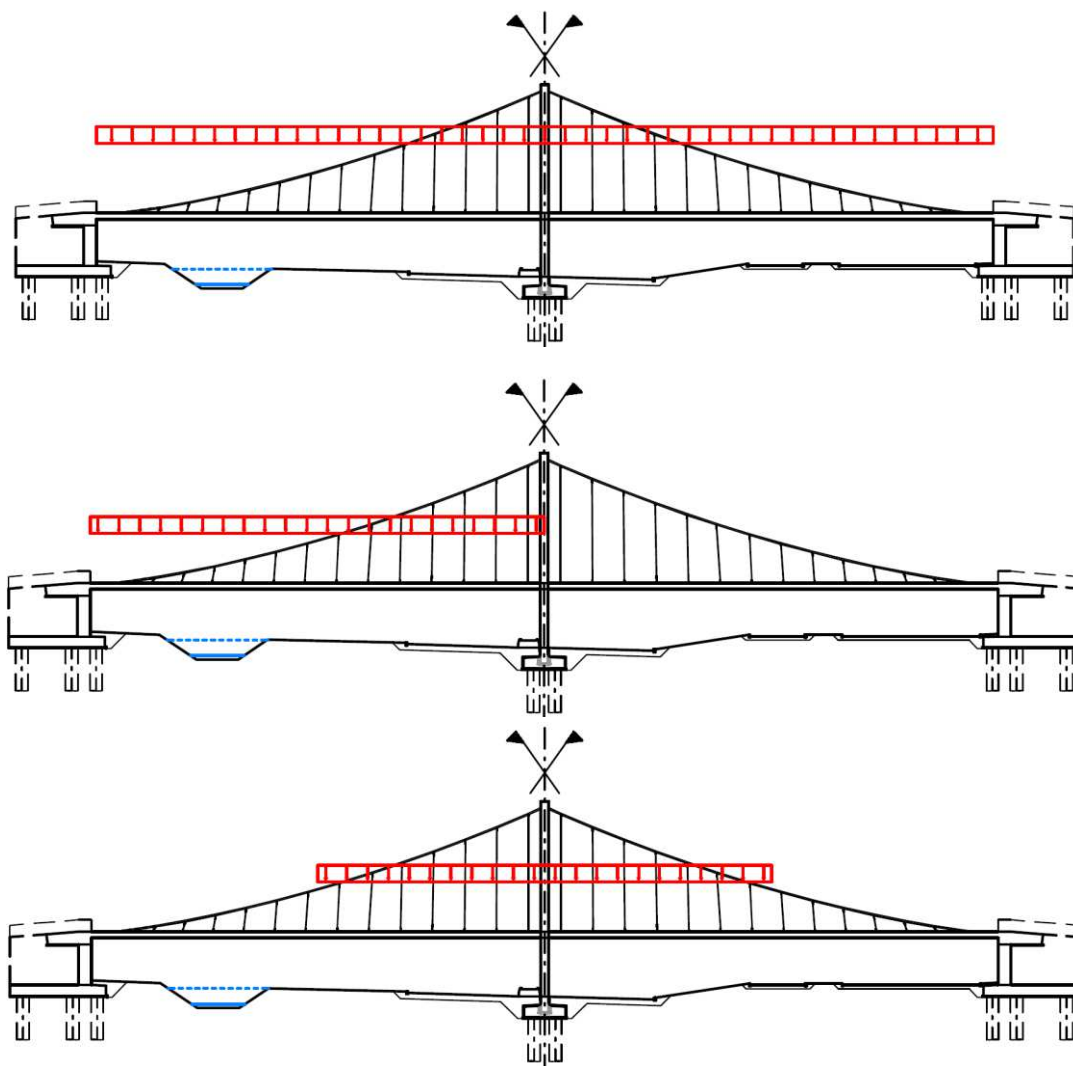
Zatížení mostů dopravou se u lávek řídí dle ČSN EN 1991-2 Kap. 5. Pro výpočet lávky byly uvažovány oba možné modely zatížení lávek dopravou, a to jak vozidlem, tak zatížení chodci. Obslužnému vozidlu není bráněno při vjetí na mostovku. Z toho důvodu se musí uvažovat. Autor práce došel k závěru, že obslužné vozidlo není rozhodující v podélném směru, jelikož jeho přítomnost na lávce podle zatěžovací normy vylučuje zatížení chodci na konstrukci.

Vozidlo je, ale uvažováno v příčném směru, kde působí na posuzované šírce s většími zatěžovacími účinky než chodci s plným plošným zatížením.

Zatížení chodci bylo redukováno podle toho, na jaké zatěžovací délce působí.

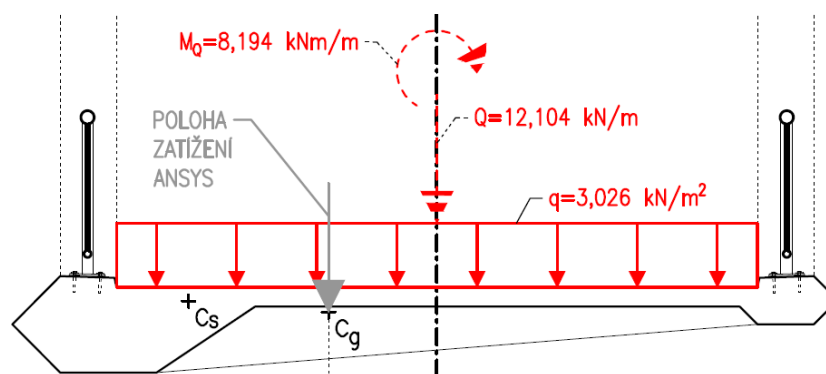
LÁVKA PODPOROVANÁ KABELY

Byly stanoveny 4 možné zatěžovací stavy: Zatížení po celé délce, zatížení po celé délce na polovině konstrukce, zatížení na polovině délky rozpětí uprostřed rozpětí a zatížení na polovině délky rozpětí na levé polovině konstrukce.



Obr. 41 Schéma zatížení chodci

Zatížení na lávce s tímto konstrukčním uspořádáním působí kromě silových účinků i přídavnými momenty od zatížení.



Obr. 42 Přídavné momentové namáhání od zatížení

7.1.3. Proměnné zatížení – teplotou

Most se nachází v Brně podle toho byly určeny minimální a maximální teploty vzduchu ve stínu. Z nich došlo ke spočítání rozdílových složek teplot pro ochlazení a oteplení. Rovnoměrná složka společně se zatížení chodci se ukázalo jako nejméně příznivé zatížení. Pod Podle článku 6.1.6 ČSN EN 1991-1-5 se má uvažovat i rozdíl v rovnoměrné složce teploty mezi závěsy, nosnou konstrukcí a pylonem o hodnotě 10 stupňů. Tato skutečnost byla na konstrukci vyzkoušena, ale nikdy nedošlo k zhoršení výsledků, proto tento rozdíl mezi jednotlivými částmi konstrukce nebyl nadále uvažován.

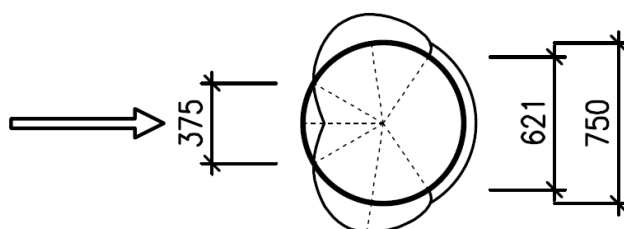
Rozdílová složka byla vypočítaná pro konstrukci betonovou 3. typ. Předpokládám lineární průběh teploty po výšce průřezu. Jako součinitele byly zvoleny pro horní povrch součinitel pro povrch opatřený izolací. Pro dolní povrch konstrukce byl určen součinitel pro betonový neochráněný povrch. Rozdílová složka byla uvažována pouze ve svislém směru. Není předpokládáno, že by rozdílová složka mohla působit ve vodorovném směru. Slunce bude vždy působit na konstrukci pod takovým úhlem, že bude docházet k ohřívání spíše celého horního povrchu než boku konstrukce. Tento předpoklad je znásoben tím, že konstrukce se nachází v údolí řeky Svratky. Vliv rozdílové složky na vnitřní síly je relativně malý, a proto nebyla uvažována ve společných kombinacích s jinými zatíženími za účelem snížení počtu možných kombinací.

Na počátku došlo i k uvažování současného působení rovnoměrné a rozdílové složky teploty, ale tato kombinace teplot nikdy nevyvodila vyšší účinky, než je tomu u rovnoměrné složky teploty. Tyto kombinace nejsou vůbec zahrnuty do kombinací.

7.1.4. Proměnné zatížení – větrem

Zatížení větrem bylo určeno samostatně pro mostovku a pylon. Poloha mostu nám dává výchozí rychlost větru. Podle normy byly vypočteny účinky od zatížení větrem na mostovku. Zatěžovací výška byla zvýšena o dvoje prodyšná zábradlí. Účinky větru byly na mostovku aplikovány ve vodorovném směru na vnější okraj konstrukce, aby zhoršovaly obloukové působení mostovky ve vodorovném směru. Zatížení větrem je poměrně malé vzhledem k nízké výšce nad terénem.

Zatížení na pylon bylo vypočteno speciálním postupem pro kruhové stožáry. Došlo k určení rozdělení tlaku na pylon bez vlivu koncových efektů.



Obr. 43 Rozložení tlaku na pylon

7.1.5. Reologické vlivy

Pro mostovku byl vypočítán účinek od dotvarování. Pro výpočet bylo použito zjednodušeného postupu a byl tak zjištěn efektivní modul pružnosti a efektivní modul pružnosti v závislosti na stáří. Výpočet byl proveden podle základní normy pro betonové konstrukce ČSN EN 1992-1-1.

Dále došlo k výpočtu smršťování jak autogenního, tak smršťování od vysychání.

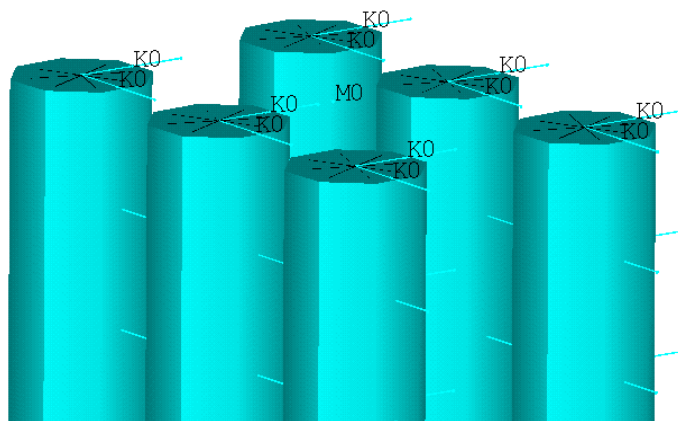
Účinky od dotvarování jsou zahrnuty pouze do modelu v čase životnosti pomocí změny modulu pružnosti. Účinky smršťování jsou zadány jako teplotní změna zkrácením v obou počítaných časech, velikost však závisí na množství proběhnutého smršťování v daném čase.

7.1.5. Kombinace zatížení

Jak již bylo zmíněno vzhledem k nelineárnímu výpočtu není možné použít princip superpozice sil. Proto byla každá kombinace zatížení vyšetřována samostatně. Pro přehlednost bylo pro kombinaci stejných zatížení využíváno vždy stejné označení. Například kombinace K14 vždy znamená zatížení chodci na plné zatěžovací délce a zatížení od rovnoměrného zkrácení teplotou. V charakteristické a časté kombinaci se pak tyto kombinace liší velikostí zatížení dle příslušných součinitelů. Ve statickém výpočtu je v tabulce zaneseno, jaká zatížení jsou v příslušné kombinaci využita. Podle času se pak liší kombinace jen skutečností, zda nebo v jaké míře jsou aplikovány reologické jevy.

7.2. ZALOŽENÍ

Pro piloty byla spočítána tuhost zemních pružin a ta byla následně aplikována na model. Piloty byly navrženy o průměru 1,18 m. Tuhost pružin viz Tab. 1 Tabulka tuhosti podloží.



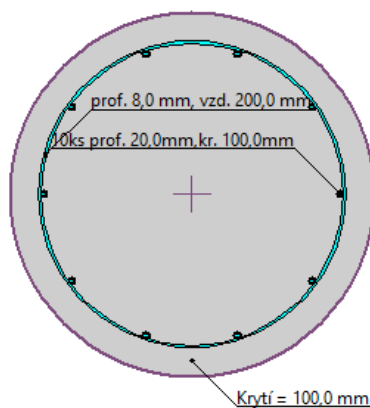
Obr. 44 Detail pilot s pružinami COMBIN14

Ověřeny výpočtem byly pouze piloty pod pylonem, které přenáší většinu zatížení mostu do podloží a nebyly modelovány. Z podpory, která se nachází pod pylonem byly získány reakce a z nich byly vypočítány účinky do hlav pilot. Piloty byly následně posouzeny na největší účinky do zatížení.

Výpočet je proveden dle ČSN 73 1002 s metodikou posouzením vycházející z ČSN EN 1997. Únosnost pilot se skládá z únosnosti v patě a na plášti. Pro výpočet únosnosti na plášti u tlačených pilot byla uvažována redukce délky piloty dle Caquot – Kérisela. Předpokládá se betonáž do výpažnice po odčerpání vody.

Po výpočtu jednotlivé únosnosti pilot dochází k redukci únosnosti z důvodu vlivu skupiny pilot pomocí součinitele η_g . Součinitel je uvažován vzhledem k vzdálenosti mezi pilotami menší než 2,5 d roven 0,7.

Výpočet pilot byl následně ověřen v programu GEO5 s přibližnou shodou ve výpočtu. V témže programu došlo k návrhu vyztužení pilot.

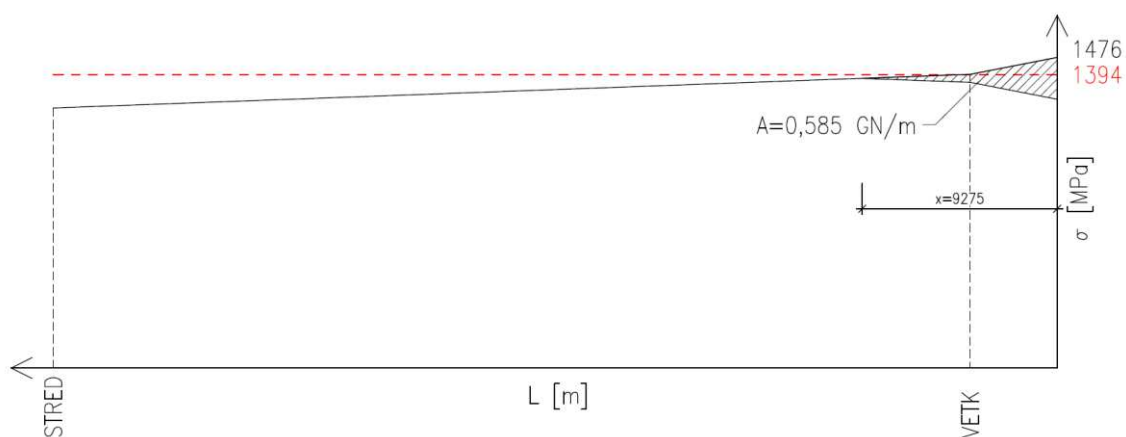


Obr. 45 Vyztužení pilot

7.3. ZMĚNY PŘEDPĚTÍ

Došlo k výpočtu ztrát předpětí, jak krátkodobých, tak dlouhodobých. Všechny kabely jsou napínané z obou stran s korekcí relaxace podržením napětí po dobu 5 minut. Příslušné charakteristiky tření, nezamýšlených úhlových změn jsou přebrány z dokumentace příslušného výrobce předpínacího systému.²

U krátkodobých ztrát došlo k uvažování ztráty třením, postupným předpínáním, pokluzem a krátkodobou relaxací. Byly počítány pouze dva řezy, a to vetknutí mostovky a střed mostovky. Mezi nimi dochází ke změně napětí lineárně a lineárním způsobem došlo k zanesení ztrát do výpočtového modelu na předpínací lana v mostovce. Výpočet je prováděn za předpokladu symetrického napnutí předpínacího lana. Ve skutečnosti uprostřed rozpětí bude vlivem napínání z obou stran napětí o něco vyšší. Ztráta třením byla vypočítána pomocí vzorce. Ztráta pokluzem byla nalezena pomocí grafické metody.



Obr. 46 Průběh ztráty třením a ztráty pokluzem

Po ztrátě pokluzem je již dodrženo omezení napětí v předpínací výztuži, kdy napětí není již nadále vyšší než 1394 MPa. Dále byla vypočítána i ztráta postupným předpínáním a ztráty krátkodobou relaxací, které jsou zanedbatelné.

Na konci kapitoly byly určeny protažení kabelů v mostovce při předpínání. Byly určeny jak teoretické hodnoty, které změří strojní technik na stavbě po geometrické stabilizaci kabelu v rozsahu 0,2 až 1,0.

Dlouhodobé ztráty byly počítány jen z hlediska krátkodobé relaxace, protože účinky smršťování a dotvarování jsou již zahrnuty v modelu.

Na konci této kapitoly bylo spočítáno napínací napětí pro visuté lano a kabel vedoucí v zábradlí.

Kotevní oblasti jsou navrženy podle ETA³ a jediným chybějícím posudkem je posouzení roztržení líce prvku, který byl do výpočtu doplněn.

² DYWIDAG Strand, *European Technical Assessment ETA-13/0815*. Vídeň: ÖIB, 2018

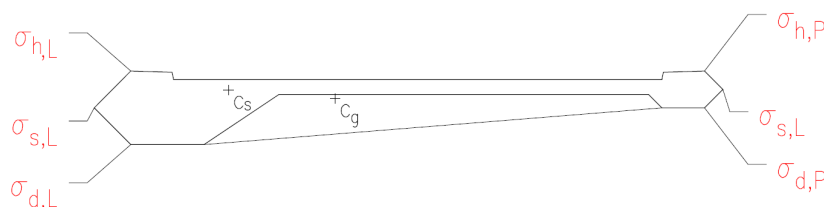
³ Tamtéž

7.4. MEZNÍ STAVY POUŽITELNOSTI

Konstrukce je v mezních stavech použitelnosti posuzovaná ve dvou časech, a to v čase výstavby, také označovaného jako t_0 , a v čase životnosti konstrukce, také označovaného jako t_{inf} .

7.4.1. Návrh konstrukce

Konstrukce lávky byla navržena za pomoci zkoumání napětí ve výchozím stavu a podle napětí došlo k rozhodnutí o volbě výše a polohy předpětí. Napětí jsou na konstrukci počítána v softwaru Microsoft Excel. Ruční výpočet byl následně ověřen s výstupem napětí na průřezu přímo v Ansysu. V ručním výpočtu došlo k zanedbání pootočení os setrvačnosti. Průběh napětí se v ručním výpočtu přibližně shoduje s průběhem z výpočetního programu, tím došlo k ověření ručního výpočtu a zanedbaný vliv pootočení je reflektován zvýšenou rezervou od příslušného omezení v mezních stavech použitelnosti.



Obr. 47 Označení počítaných bodů

$$\sigma_{h,L} = -10,65 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{h,P} = -13,73 \text{ MPa}$$

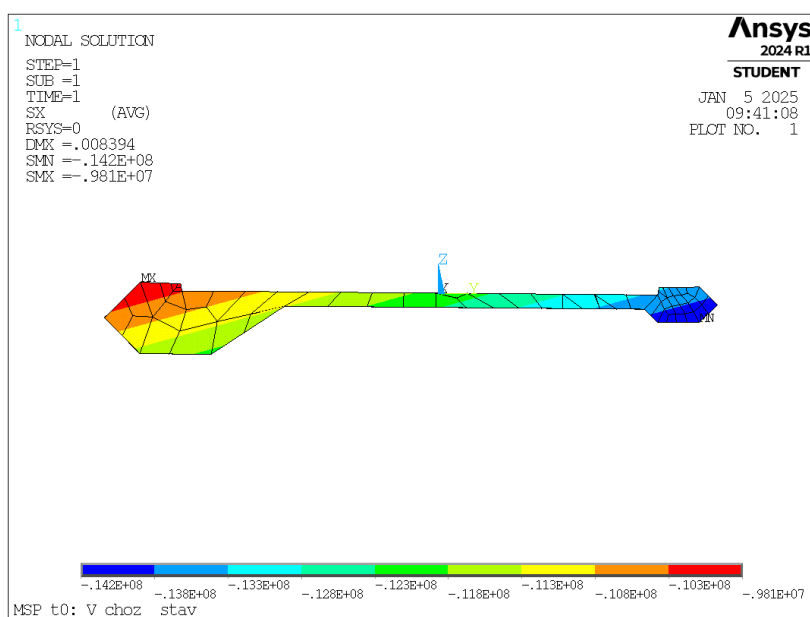
$$\sigma_{s,L} = -10,40 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{s,P} = -13,80 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{d,L} = -10,54 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{d,P} = -13,68 \text{ MPa}$$

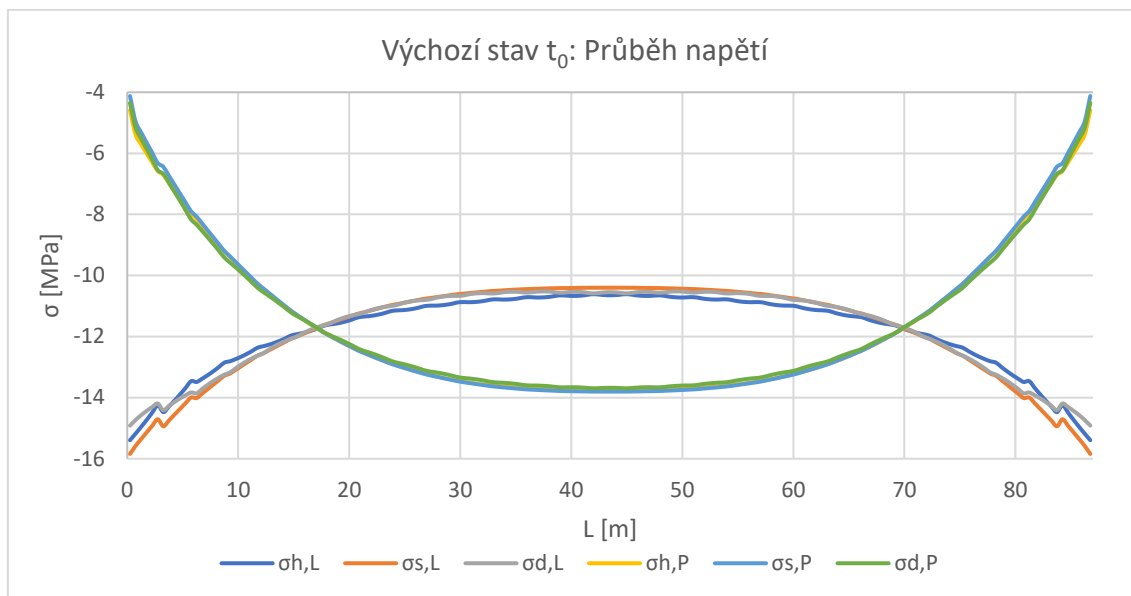
Tab. 2 Výsledky ručního výpočtu



Obr. 48 Napětí Ansys

LÁVKA PODPOROVANÁ KABELY

Z průběhu napětí po délce došlo k zjištění, že postačí mostovku posuzovat v řezu ve vetknutí a řezu uprostřed rozpětí, kde vznikají extrémní napětí.



Obr. 49 Průběh napětí po délce mostovky

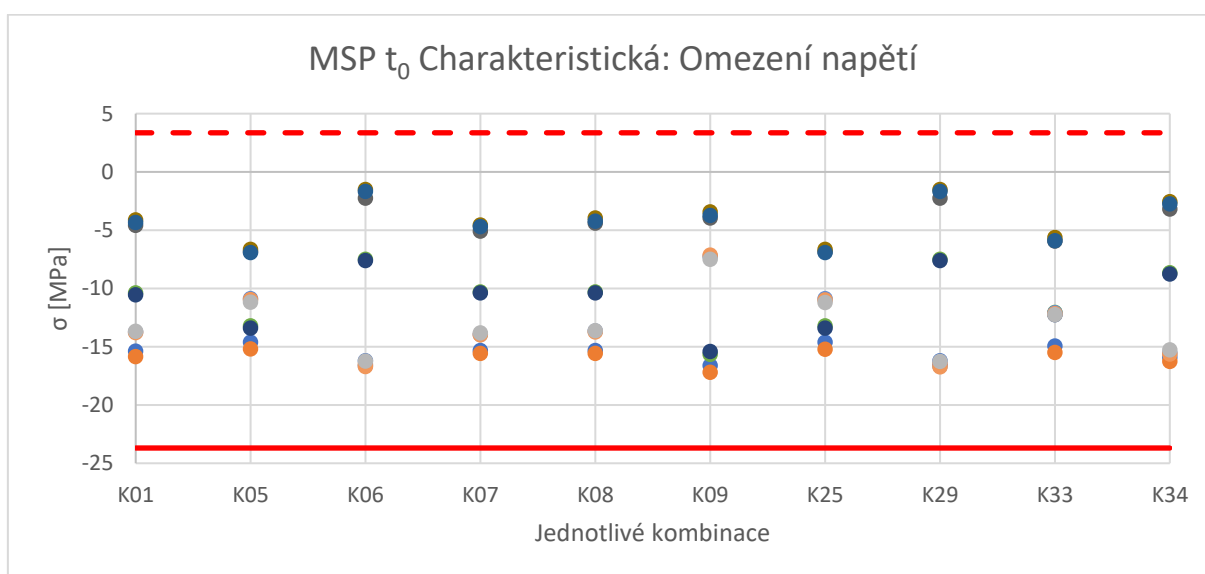
7.4.2. Omezení napětí v mostovce

Pro tento posudek určuje norma minimální napětí, největší tlakové namáhání, které konstrukce může přenášet, než dojde k určitému jevu. Z normy vyplývá pro omezení napětí pouze tlaková podmínka. Pro sledování chování konstrukce byla přidána do omezení napětí i tahová podmínky z omezení trhlin.

Podmínka pro charakteristickou kombinaci v čase výstavby:

$$\sigma > 0,60 \cdot (-f_{ck,0}) = 0,60 \cdot (-39,5) = -23,70 \text{ MPa}$$

$$\sigma < f_{ctm,0} = 3,36 \text{ MPa}$$



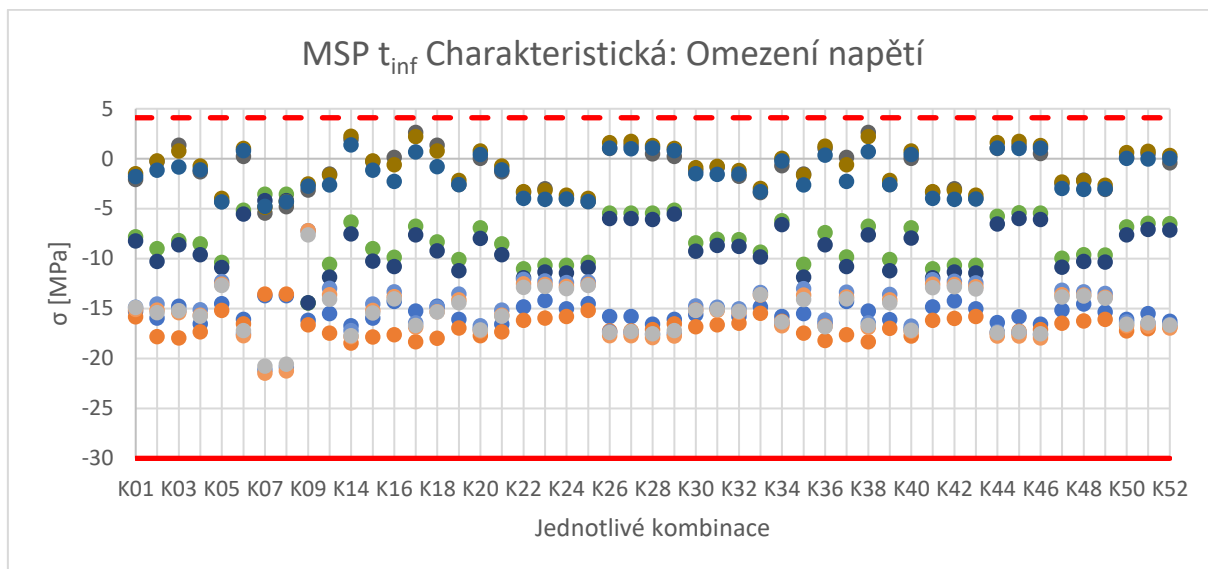
Obr. 50 Omezení napětí: charakteristická kombinace v čase výstavby

LÁVKA PODPOROVANÁ KABELY

Podmínka pro charakteristickou kombinaci v čase životnosti:

$$\sigma > 0,60 \cdot (-f_{ck}) = 0,60 \cdot (-50) = -30,00 \text{ MPa}$$

$$\sigma < f_{ctm} = 4,10 \text{ MPa}$$

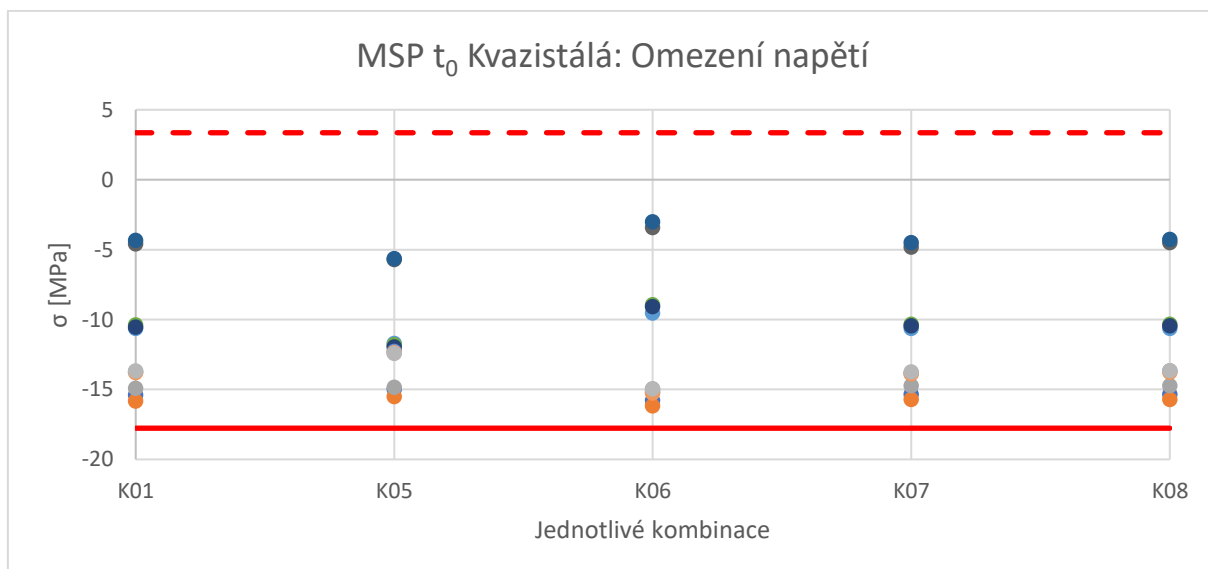


Obr. 51 Omezení napětí: charakteristická kombinace v čase životnosti

Podmínka pro kvazistálou kombinaci v čase výstavby:

$$\sigma > 0,45 \cdot (-f_{ck,0}) = 0,45 \cdot (-39,5) = -17,77 \text{ MPa}$$

$$\sigma < f_{ctm,0} = 3,36 \text{ MPa}$$



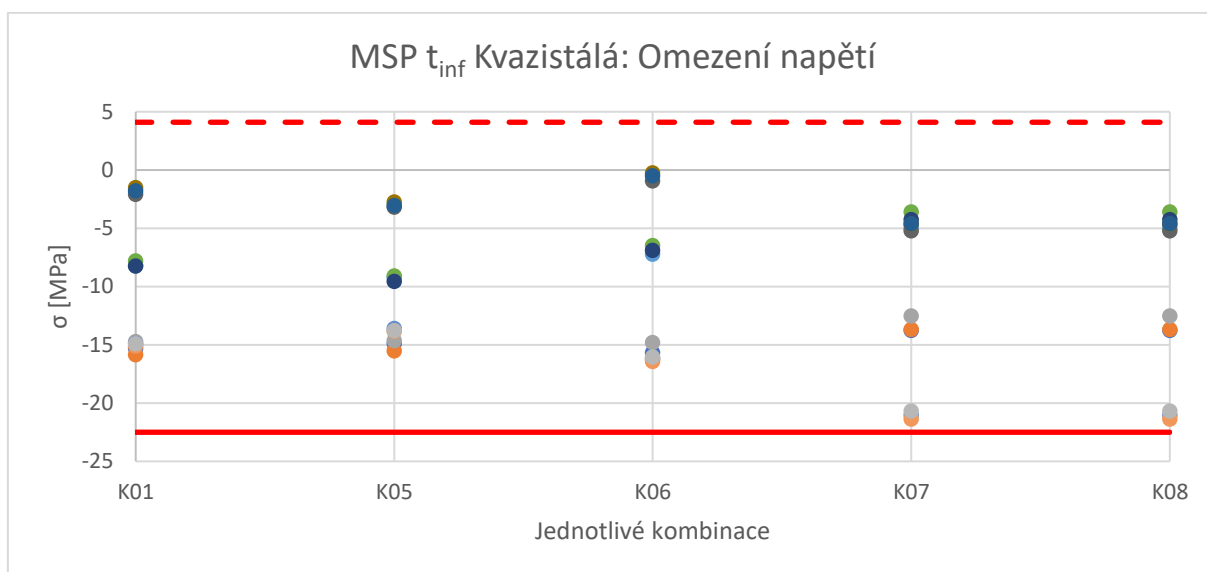
Obr. 52 Omezení napětí: kvazistálá kombinace v čase výstavby

LÁVKA PODPOROVANÁ KABELY

Podmínka pro kvazistálou kombinaci v čase životnosti:

$$\sigma > 0,45 \cdot (-f_{ck}) = 0,45 \cdot (-50) = -22,50 \text{ MPa}$$

$$\sigma < f_{ctm} = 4,10 \text{ MPa}$$



Obr. 53 Omezení napětí: kvazistálá kombinace v čase životnosti

Z uvedených grafů vyplývá, že podmínky pro konstrukci nejsou překročeny. Kvazistálá kombinace nám vyjadřuje, že beton se chová lineárně a z charakteristické kombinace, že v betonu nevznikají podélné trhliny. Mostovka z hlediska omezení napětí vyhovuje.

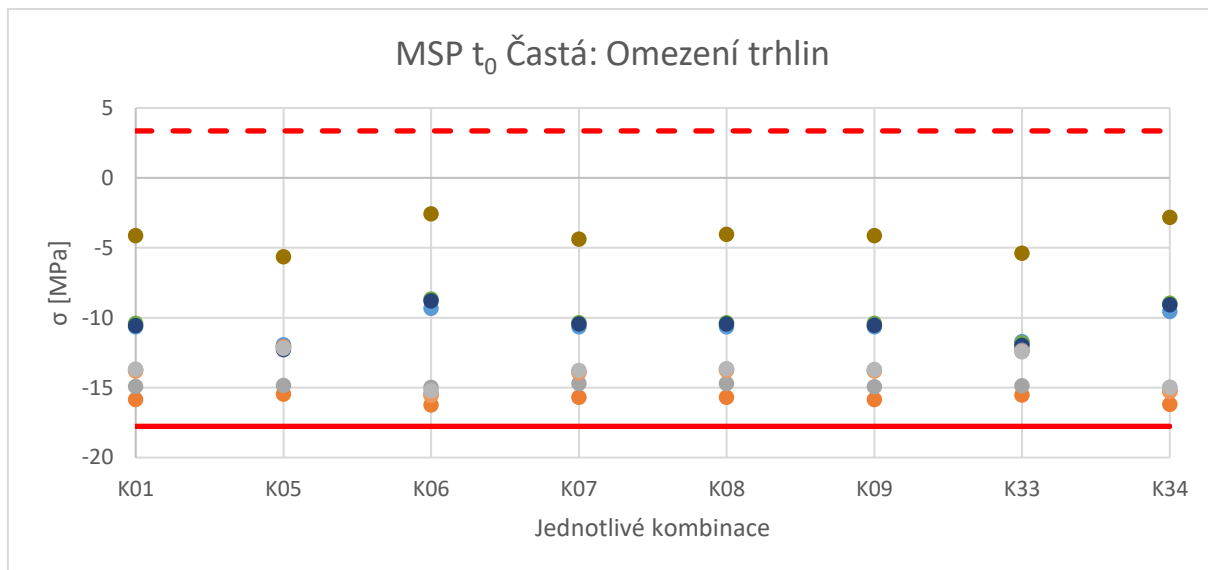
7.4.3. Omezení trhlin v mostovce

Z normy vyplývá pro omezení trhlin pouze tahová podmínka. Pro sledování chování konstrukce byla přidána do omezení trhlin i tlaková podmínka lineárního chování betonu.

Podmínka pro častou kombinaci v čase výstavby:

$$\sigma < f_{ctm,0} = 3,36 \text{ MPa}$$

$$\sigma > 0,45 \cdot (-f_{ck,0}) = 0,45 \cdot (-39,5) = -17,77 \text{ MPa}$$

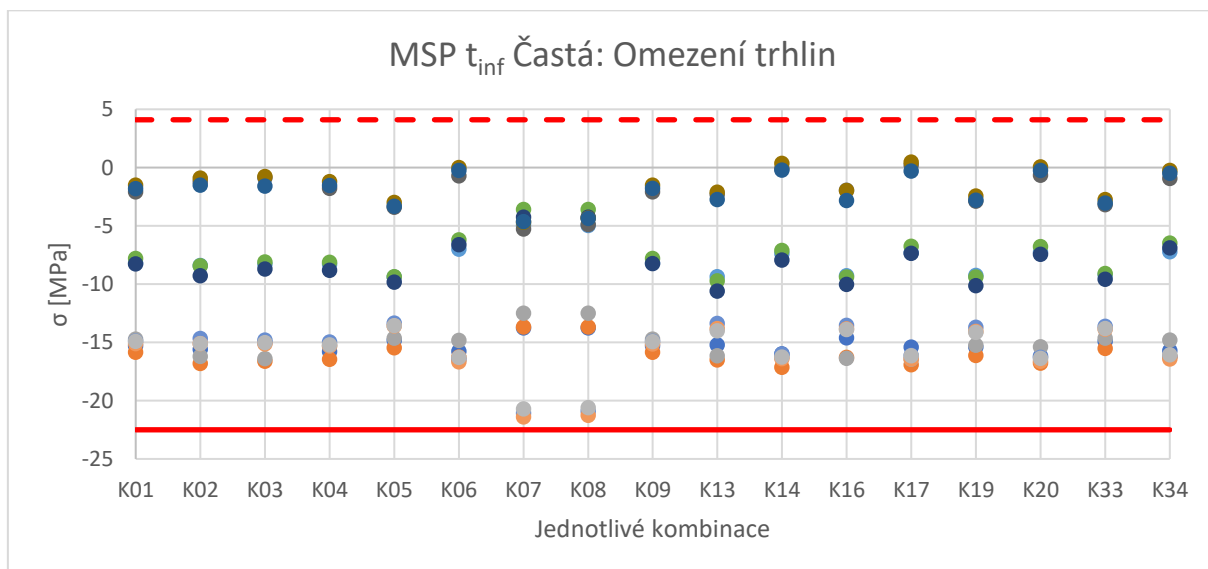


Obr. 54 Omezení trhlin: častá kombinace v čase výstavby

Podmínka pro častou kombinaci v čase životnosti:

$$\sigma < f_{ctm} = 4,10 \text{ MPa}$$

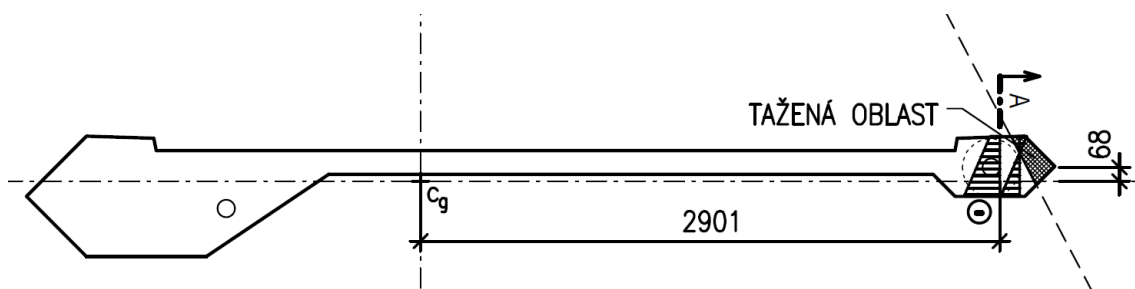
$$\sigma > 0,45 \cdot (-f_{ck}) = 0,45 \cdot (-50,0) = -22,50 \text{ MPa}$$



Obr. 55 Omezení trhlin: častá kombinace v čase životnosti

LÁVKA PODPOROVANÁ KABELY

Pro omezení trhlin existuje dodatečný požadavek pro předpjaté konstrukce s ocelovými kabelovými kanálky. Předpínací výztuž musí být více než 100 mm v tlačném průřezu. Největších tahů je dosaženo v kombinaci K17 a v této kombinaci je zjištěno rozmezí mezi tlačnou a taženou zónou.



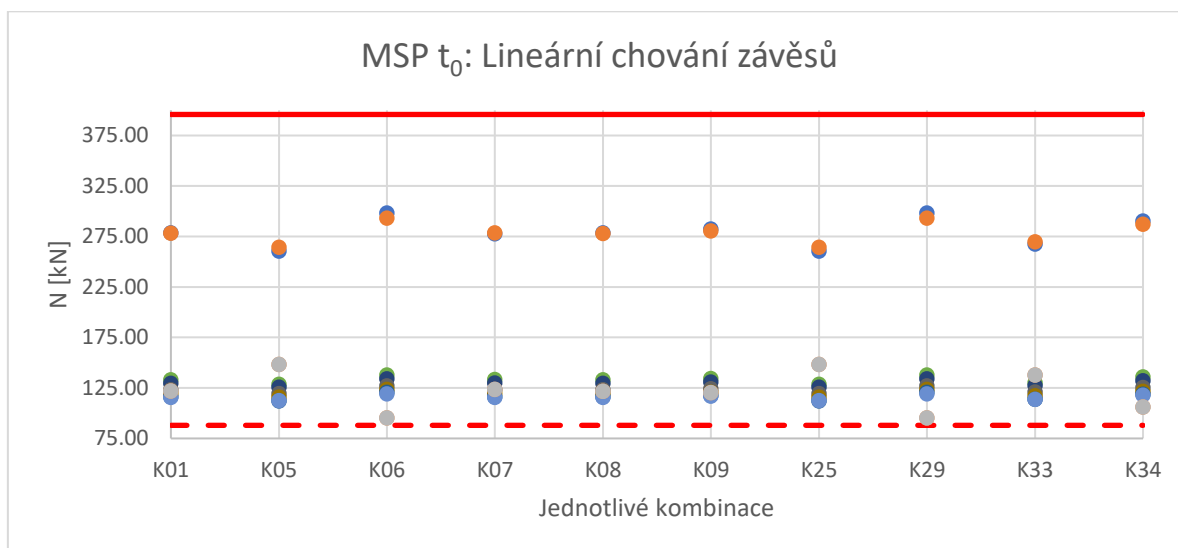
Obr. 56 Grafické znázornění podmínky dekomprese

Ze schématu můžeme vidět, že kabelový kanálek je více než 100 mm v tlačné zóně. Vzdálenost 100 mm určuje tečkovaná čára. Čárkovaná čára vymezuje rozmezí mezi tlačnou a taženou částí průřezu.

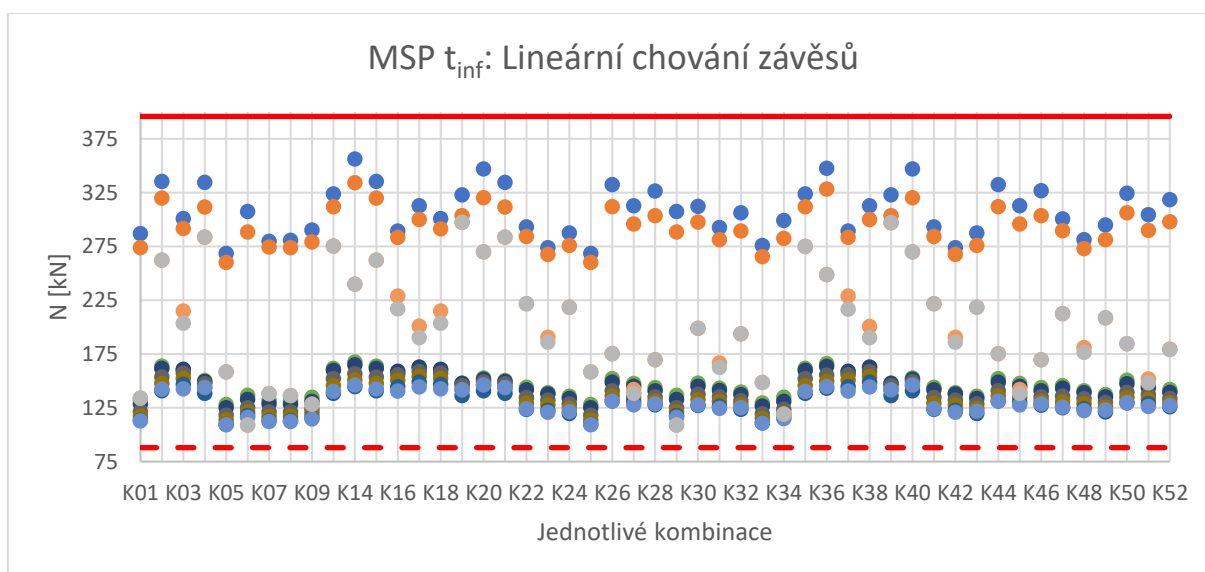
Z omezení trhlin mostovky vyplývá, že v čase životnosti nedojde v konstrukci k vzniku trhlin, jelikož napětí jsou i pod hodnotou návrhové pevnosti betonu v tahu. Mostovka na posudek omezení trhlin vyhovuje.

7.4.4. Omezení napětí v závěsech

Pro lineární chování závěsů je nutné, aby se napětí v závěsech drželo mezi 10 % až 45 % meze pevnosti oceli.⁴ Z meze pevnosti jsem určil sílu na mezi pevnosti a tu následně přenásobil 10 % a 45 %, čímž jsem získal dané podmínky pro omezení napětí.



Obr. 57 Omezení napětí v závěsech v čase výstavby

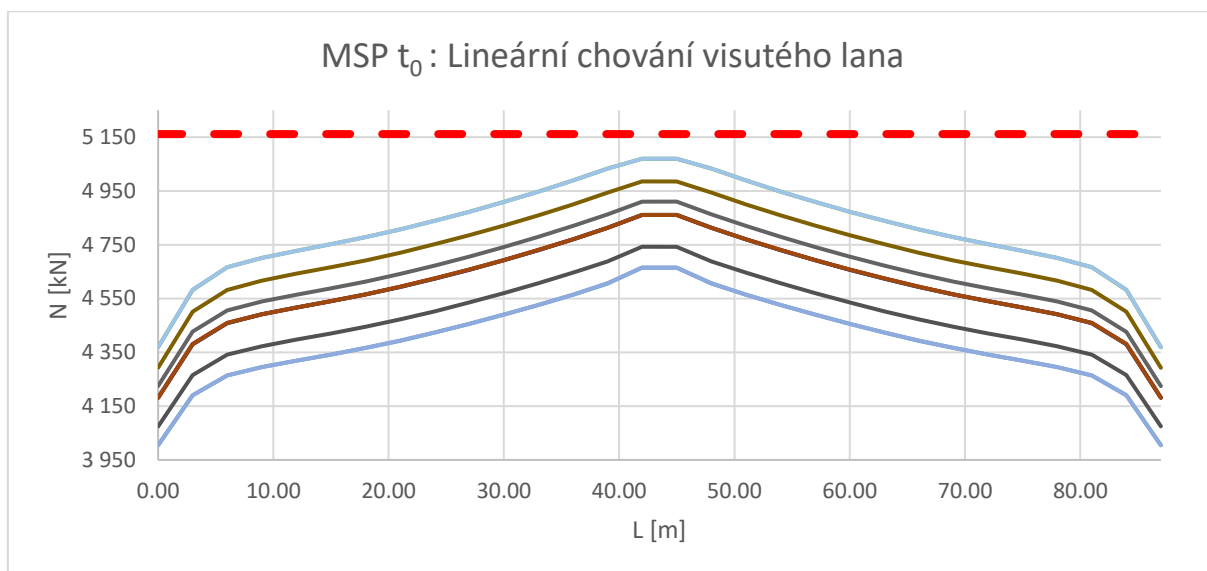


Obr. 58 Omezení napětí v závěsech v čase životnosti

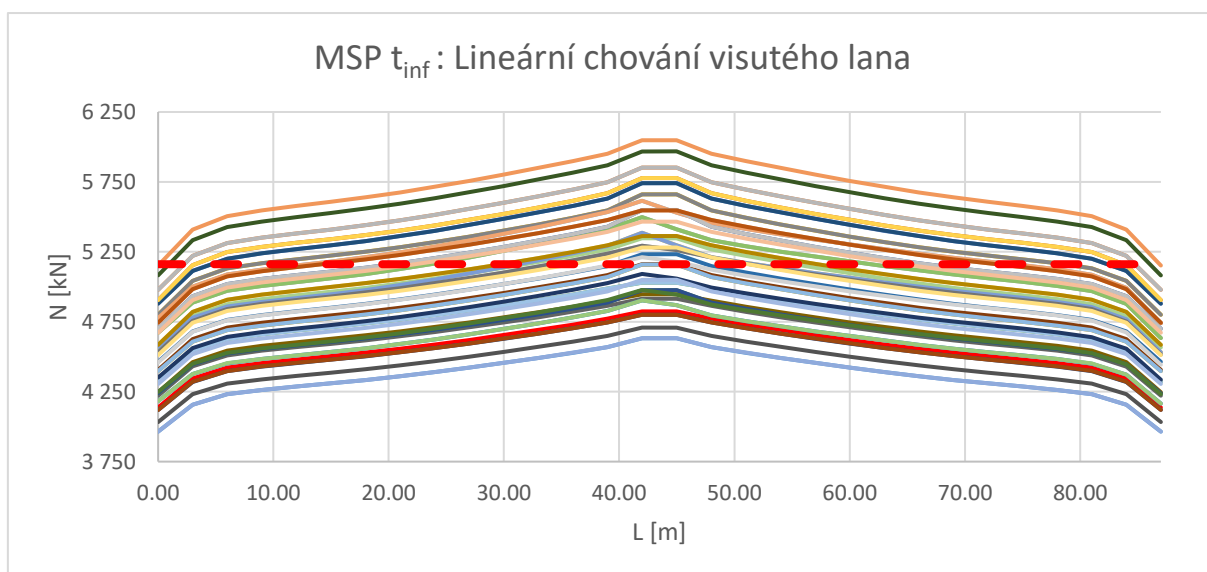
⁴ STRÁSKÝ, Jiří. *Speciální betonové konstrukce (K): Modul M03 Konstrukce podporované kabely*. Brno, 2012.

7.4.5. Omezení napětí ve visutém lanu a kabelu rovnováhy

Pro lineární chování a omezení relaxace a dalších jevů v předpínacích lanech je zapotřebí, aby se napětí v lanech drželo do 50 % meze pevnosti oceli.⁵ Z meze pevnosti byla určena síla na mezi pevnosti a z té jsem získal 50 %, která tvoří tuto podmínku pro omezení napětí.



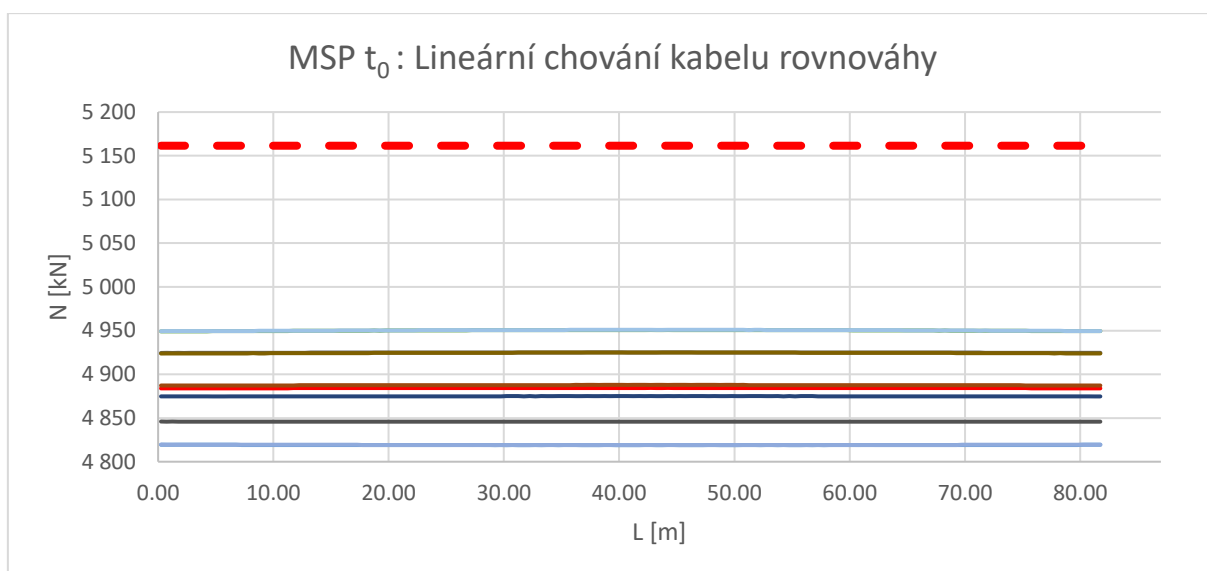
Obr. 59 Omezení napětí ve visutém lanu v čase výstavby



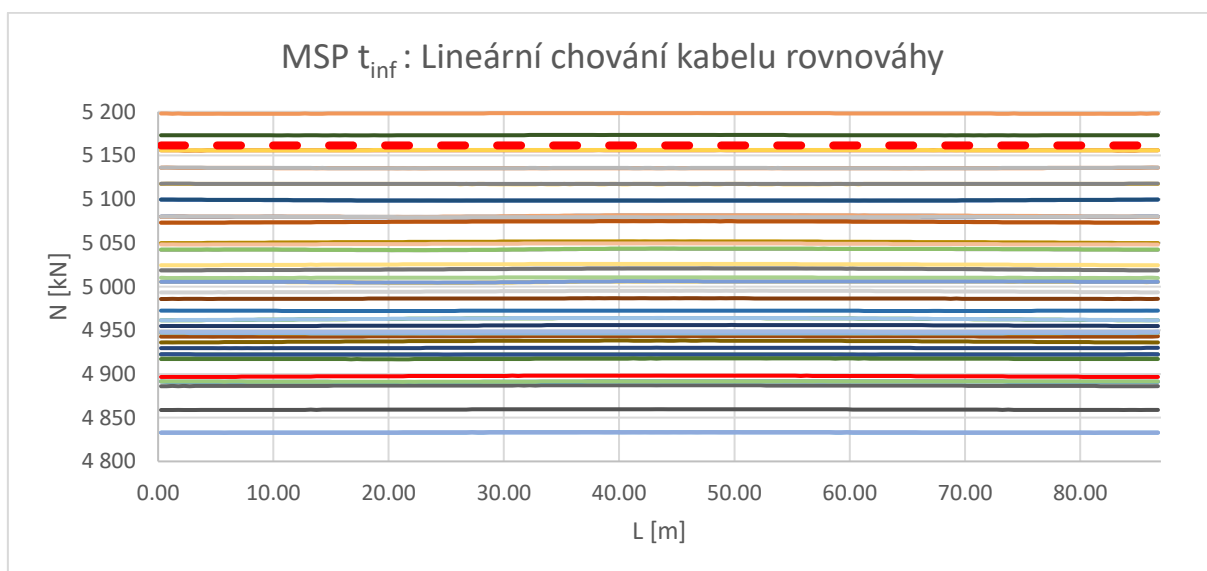
Obr. 60 Omezení napětí ve visutém lanu v čase životnosti

⁵ STRÁSKÝ, Jiří. *Stress Ribbon and Cable-supported Pedestrian Bridges*. ICE Publishing, 2011. ISBN 0727741462.

LÁVKA PODPOROVANÁ KABELY



Obr. 61 Omezení napětí v kabelu rovnováhy v čase výstavby

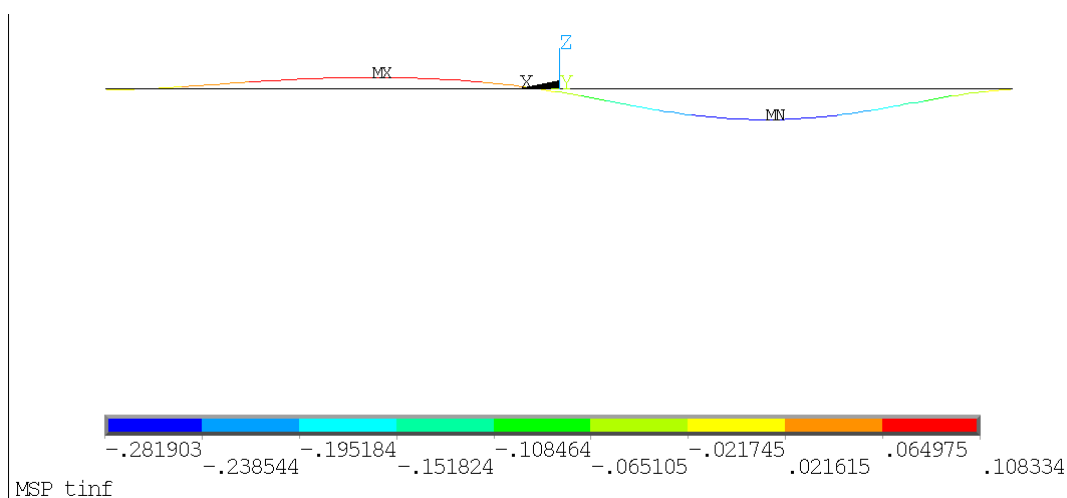


Obr. 62 Omezení napětí v kabelu rovnováhy v čase životnosti

Z grafů je zřejmé, že ve visutém lanu dojde místy k překročení 50% meze únosnosti oceli. Tento stav nastane však vždy jen krátkodobě pod vlivem ztížení. Nezátížená lávka, v grafu červená linie, je stále s dostatečnou rezervou pod podmínkou. V případě využití více lan by výstavba vyžadovala další typ předpínací pistole, proto je tento stav žádoucí a kabely vyhovují pro podmínku omezení napětí. Je, ale jisté, že tyto předpínací kabely vyhoví na standartní podmínky pro omezení předpínací výztuže, jejichž mez je 75 %.

7.4.6. Průhyb

Bylo pamatováno na požadavek ČSN 73 6201, která stanovuje mezní průhyb podílem z rozpětí. Pro lávku činí tento limit jedna šesti setina rozpětí a tomuto požadavku je vyhověno. Tato podmínka nebyla hlavním parametrem návrhu, jelikož nejdůležitější je zachování průjezdného prostoru pod mostem, což je v případě silnice I/42 splněno s rezervou. Dalším důležitý požadavek je dodržení maximálního přípustného podélného sklonu, který je stanoven pro veřejné chodníky jako 1:12. Tento sklon je dodržen, jelikož nejvyšší podélný sklon při zatížení charakteristickou kombinací je 1,17 %. Na nejvyšší přípustný sklon je pamatováno při návrhu navazujících zdí, které jsou navrženy se sklonem 8,0 %.



Obr. 63 Kombinace svislých průhybů: charakteristická kombinace (10x převýšeno)

Pro lávku o tomto konstrukčním uspořádání je důležitý i příčný průhyb, jelikož se zatížením je narušena momentová rovnováha v příčném směru.

Ve výchozím stavu je lávka vyrovnána ve středu rozpětí na hodnotu příčného sklonu 0,03 %. Sledovány byly příčné průhyby od jednotlivých zatěžovacích stavů v charakteristické kombinaci a docházím k závěru, že teplotní zatížení a vítr mají vliv na příčný sklon s hodnotami do čtvrtiny procenta. Rozhodující vliv má zatížení dopravou, jelikož zatížení nám přidává kroutící momenty. Nejhorší sklon působí chodci na levé polovině konstrukce ve směru staničení se sklonem 3,33 %. Tento sklon překračuje povolený příčný sklon pro chodníky, který je 2,0 %. K překročení tohoto parametru dojde pouze v charakteristické kombinaci, kterou lávka zažije spíše výjimečně. Při působení zatížení v časté kombinaci stejný zatěžovací stav způsobí příčný sklon jen 1,01 % z čehož vyvozují závěr, že konstrukce je vhodně navržena a k překročení příčného sklonu bude během životnosti lávky spíše ojedinělé.

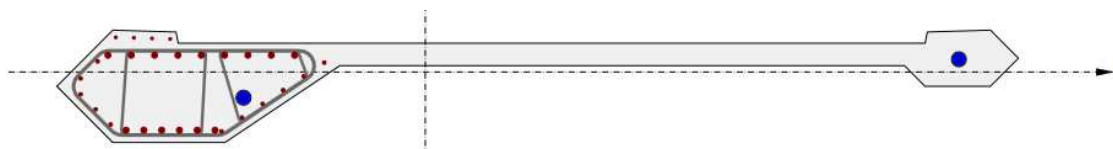
7.5. MEZNÍ STAVY ÚNOSNOSTI

Zatímco mezní stavy použitelnosti určují skutečné stavy, do kterých se konstrukce během své životnosti dostane, mezní stav únosnosti je myšleným stavem, který vychází z pravděpodobnostních metod a tento stav nastane u konstrukce s velmi malou pravděpodobností. Dojde k němu za současného působení vyšších silových účinků na konstrukci a nízkých pevnostních charakteristik materiálů. Tento stav zajišťuje, že se konstrukce zřítí s pravděpodobností jen kolem hodnoty desetkrát na minus šestou.

7.5.1. Ohyb mostovky

Vzhledem ke složitému hledání únosnosti při ohybu ve dvou směrech došlo k posouzení průřezu v programu Idea Statica. Pro ověření výpočtu došlo k zvolení jednoduchého obdélníkového průřezu, u něž byla únosnost vypočtená softwarem ověřena ručním postupem s přibližně shodným výsledkem.

Následně došlo k výpočtu únosnosti mostovky. Mostovka po celé délce kromě řezů blízkých vetknutí vyhoví na interakci momentů a normálové síly. V řezech blízkých vetknutí je zapotřebí dodat přídatnou betonářskou výztuž, která pomáhá vrátit výslednici sil do průřezu. Vyztužení si žádají zejména dolní vlákna, které mají malou délku. Do průřezu je přidáno kromě standartní konstrukční výztuže 15 profilů o průměru 32 mm na vzdálenost 5 m od vetknutí mostovky. Průřez, kdy jsou tažena dolní vlákna vyhoví jen s malou rezervou i po dodatečném vyztužení. Z čehož vyplývá, že konstrukci by z hlediska statického prospělo provedení náběhu před opěrou. Ten, ale nebyl vzhledem k estetice na konstrukci proveden.



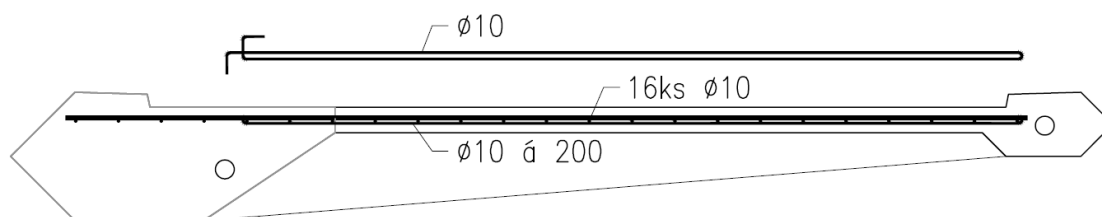
Obr. 64 Dodatečně vyztužený průřez v programu Idea Statica

7.5.2. Smyk a kroucení mostovky

Konstrukce se chová ve svislém směru jako standartní visutá konstrukce a velikosti smykových sil jsou ve svislém směru malé. Ve vodorovném směru se konstrukce chová jako oblouk a smykové síly jsou ve vodorovném směru značné. Mostovka je dále zatěžována kroucením od nesymetrického působení průřezu, které je ve výchozím stavu malé, ale roste s působícím svislým zatížením vzhledem k tomu, že výslednice neprochází středem smyku.

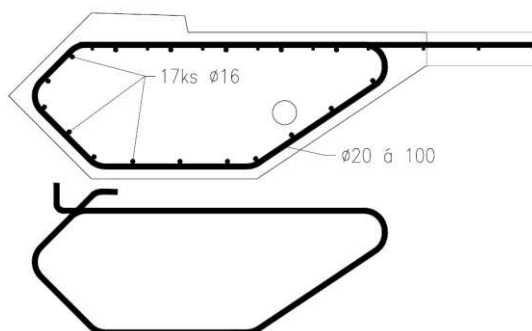
Průřez byl pro účely výpočtu smyku rozdělen po konzultaci s vedoucím práce na dvě části. Deska napravo od trámu přenáší vodorovný smyk a zbylá část průřezu svislý smyk a kroucení. Desku je třeba dodatečně vyztužit tříminky o průměru alespoň 10 mm a získat tak smykovou únosnost s rezervou přes 20 %.

LÁVKA PODPOROVANÁ KABELY



Obr. 65 Návrh vyztužení desky na smyk

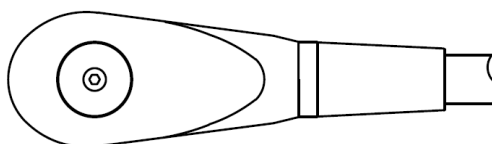
Zbylá část průřezu přenáší zejména kroucení. Smyk ve svislém směru přenesen jen beton. Ke smyku je třeba připočítat účinky odpovídajícího kroucení. Průřez přenesen kombinací smyku a kroucení jen s malou rezervou za předpokladu, že průřez není dodatečně vyztužen smykově. Vzhledem k tomu, že do průřezu byl následně přidán i smykový třmínek zejména z důvodu lepšího provádění armokoše mostovky a zvýšení jeho tuhosti, bude únosnost ve smyku ve skutečnosti s rezervou okolo 10 %. Z výpočtu maximální kroučící síly došlo k návržení uzavřeného třmínku působícího na kroucení o průměru 20 mm.



Obr. 66 Návrh vyztužení trámu na smyk a kroucení

7.5.3. Únosnost závěsů

Únosnost závěsů byla, jak spočítána jak z podkladů od společnosti Macalloy, tak porovnána s hodnotou návrhové únosnosti, která je součástí podkladů od společnosti Macalloy. V závěsech nedojde k překročení návrhové meze kluzu.



Obr. 67 Vidlice závěsu Macalloy M42 s navazujícím závěsem

7.5.4. Únosnost visutého lana

Visuté lano se ve skutečnosti skládá z únosnosti předpínacího kabelu, zálivky a ocelové trubky ve které je předpínací kabel veden. Při výpočtu únosnosti bylo užito jen únosnosti předpínacího kabelu, který v mezním stavu nepřekročí návrhovou mez únosnosti, ale dojde k překročení návrhové meze kluzu.

7.5.5. Únosnost kabelu rovnováhy

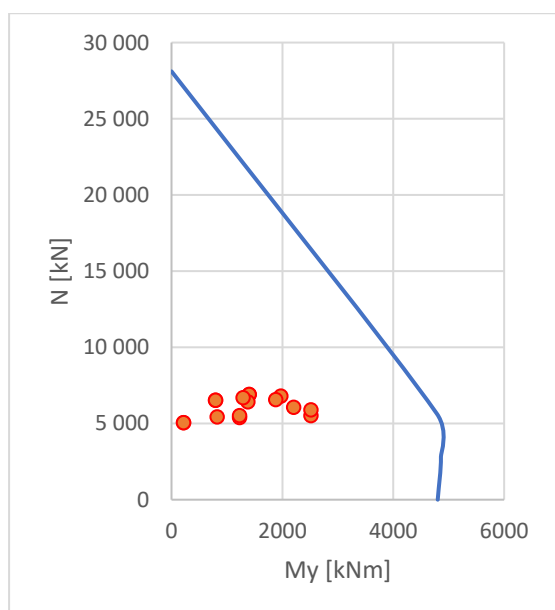
Kabel rovnováhy se skládá z 37 lan obalených mazivem a polyethylenovým obalem. Tento kabel při mezním stavu nepřekročí ani návrhovou mez kluzu.

7.5.6. Únosnost pylonu

Pro pylon je nalezen sklon pod, kterým není ve výchozím stavu ohýbán ohybovým momentem. Tato pozice je velice výhodná, jelikož průřez pylonu je díky tomuto minimální. Při návrhu bylo pamatováno na skutečnost, že je potřeba do průřezu v místě vstupu visuté lana zakotvit dvě kotevní objímky předpínacích kabelů. Proto byl zvolen průměr 0,75 m. Vzhledem k nutnosti vložení kotev byl volen ocelobetonový sprážený průřez s ocelovou trubkou o stěně tloušťky 50 mm. Zvolená tloušťka ocelové části je vhodná i z hlediska tuhosti pylonu.

Vzhledem k tomu, že lávka je počítaná za pomocí nelineárního výpočtu není třeba uvažovat imperfekce na straně zatížení. Jediná imperfekce, se kterou je konstrukce vypočítána je montážní imperfekce pylonu. Ta je volena podle normy jako jedna třetí setina vzpěrné délky pylonu. O tuto hodnotu byla posunuta pata pylonu, aby se pylon více narovnal a vlastní tíha pylonu nepomáhala přenosu zatížení.

Pro výpočet pylonu bylo užito zjednodušeného interakčního diagramu dle normy ČSN EN 1994-2. Při výpočtu jsem postupoval následovně. Došlo k výpočtu průřezu v tlaku, následně průřezu v prostém ohybu. Následoval výpočet bodu D, kdy je normálová osa v těžišti, což mi přišlo jako vhodnější postup. Jelikož z bodu D jsem určil příslušnou normálovou sílu bodu C a dopočítal momentovou únosnost tohoto bodu.



Obr. 68 Interakční diagram pylonu v čase životnosti konstrukce

LÁVKA PODPOROVANÁ KABELY

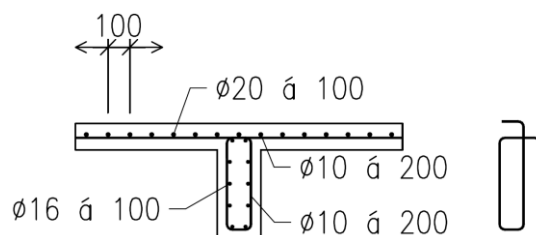
Dále došlo k výpočtu pylonu v čase výstavby, kdy stojí osamoceně. Posouzen byl stav, kdy průřezem pylonu je pouze ocelová trubka, ale již je naplněna betonem, který na ni působí jako zatížení. Pylon byl pro tento výpočet nakloněn o imperfekci opačným směrem, tak aby zatížení způsobilo větší ohybové účinky. Tento průřez však vyhoví na účinky prostého ohybu i vzpěru.

7.5.7. Výpočet únosnosti vyložené desky

Na modelu příčného směru došlo k ručnímu výpočtu nutného vyztužení. V příčném směru byl průřez počítán jako konzola o T průřezu. Z výpočtu bylo zjištěno nutné vyztužení desky v příčném směru a smykové vyztužení příčnicku.

Ruční výpočet byl proveden i pro desku v podélném směru. Bylo uvažováno pouze zatížení stálými zatíženími a zatížení obslužným vozidlem, které vyvoluje nejvyšší účinky. Poloha náprav vozidla je uvažována přímo u okraje betonové římsy.

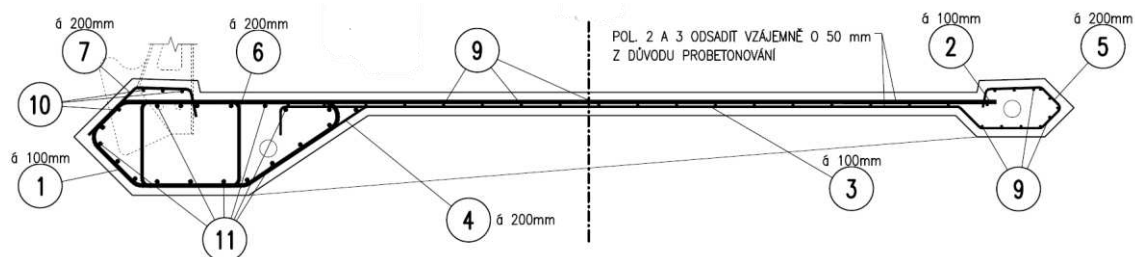
Silné vyztužení vyžaduje deska zejména v příčném směru, kde působí jako konzola, zatímco v podélném směru, kde působí jako spojitý nosník, není třeba vysokého stupně vyztužení.



Obr. 69 Nutné vyztužení příčnicku

7.5.8. Vyztužení mostovky

Ve statickém výpočtu bylo určeno minimální množství výztuže za účelem vyhovění statickým posudkům. Dále došlo ke stanovení minimálního vyztužení, aby se vyhovělo konstrukčním zásadám. Skutečné vyztužení mostovky je patrné z přílohy P2.6 Výkres betonářské výztuže.



Obr. 70 Skutečné vyztužení mostovky

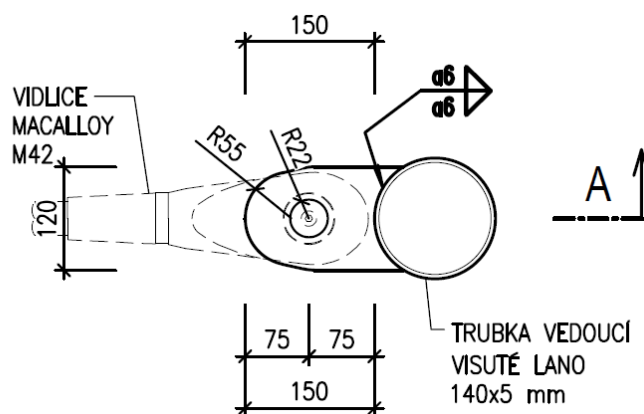
7.6. Návrh detailů

V rámci statického výpočtu došlo k návrhu společného prvku sloupku zábradlí a spřahovacího plechu kotvící závěs mostovky. Detail je navržen na přenesení síly na návrhové únosnosti závěsu a sloupek zábradlí na přenesení příčného ohybu od síly v mezním stavu únosnosti a přenesení podélného ohybu od předpínání.



Obr. 71 Pohled na sloupky zábradlí a plechy kotvící závěsy

Dále došlo k návrhu plechu a svaru připojující závěs k trubce visutého lana, které jsou navrženy na sílu, která působí v závěsu při návrhové únosnosti. Svar je navržen s rezervou za účelem omezení únavového namáhání.



Obr. 72 Detail připojení vidlice závěsu a připojení kotevního plechu k visutému lanu

V rámci výkresové dokumentace je navíc rozkreslen detail patky pylonu a detail uložení kotevních objímek předpínacího kabelu ve vrcholu pylonu.

8. DYNAMICKÁ ANALÝZA

Před dokončením statického výpočtu bylo zapotřebí posoudit konstrukci z hlediska dynamického chování, proto byly provedeny následující posudky. Dynamická analýza byla provedena na stejném modelu jako byla vyšetřována statická analýza. Veškerá hmota, která na konstrukci kmitá, byla zavedena jako prvek MASS21.

8.1. MODÁLNÍ ANALÝZA

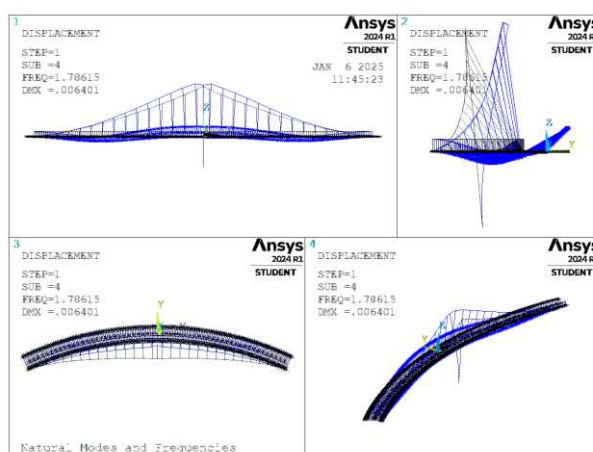
Účelem provedení modální analýzy bylo získat prvních 20 vlastních tvarů kmitů a jejich odpovídajících frekvencí. Následně byly vybrány vlastní kmitů v kritickém rozsahu podle národní přílohy NA.2.49 článku 5.7 normy ČSN EN 1991-2 ed.2.

Dle této normy je třeba vyšetřit u lávek se standardním tlumením konstrukce frekvence v rozsahu 1,3 Hz až 2,3 Hz pro ohybové tvary kmitů. Následně je potřeba vyšetřit vlastní tvary příčného kmitání v oblasti frekvencí 0,5 Hz až 1,2 Hz. Tyto zmíněné frekvence vyvozují chodci při chůzi po mostní konstrukci.

n	f [Hz]	Kmitající prvek	Směr kmitání	Počet půlvln
2	0.784	Mostovka a Pylon	Příčný	1
3	1.322	Mostovka a Pylon	Ohybový	3
4	1.786	Mostovka a Pylon	Ohybový	3
5	1.975	Mostovka a Lano	Ohybový	4

Tab. 3 Tabulka kritických vlastních frekvencí

V rámci modální analýzy byl ověřen poměr frekvencí první ohybové a první torzní. První torzní frekvence má být, alespoň 2,5násobek první ohybové frekvence.⁶ Pro bezpečnost byla jako první torzní frekvence zvolena 5 vlastní frekvence lávky, ačkoliv skutečně torzní chování lávky lze vidět až u 12 vlastní frekvence.

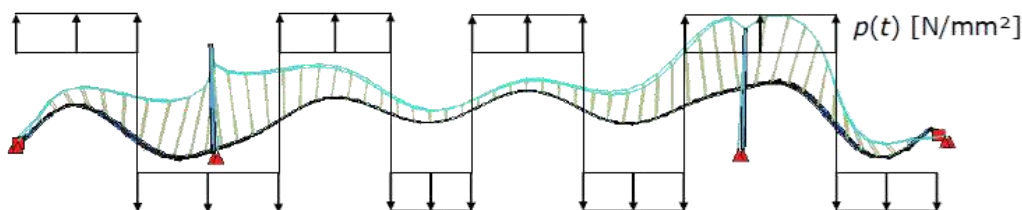


Obr. 73 Čtvrtá vlastní frekvence – ohybový tvar pro mostovku a pylon

⁶ STRÁSKÝ, Jiří. *Stress Ribbon and Cable-supported Pedestrian Bridges*. ICE Publishing, 2011. ISBN 0727741462

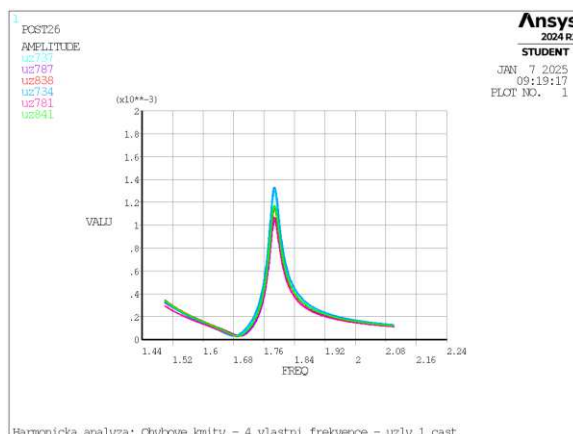
8.2. HARMONICKÁ ANALÝZA

Pro frekvence v kritickém rozsahu se provádí harmonická analýza, kdy opakovaným zatěžováním se snažíme vybudit kmitání od zatížení chodci. Pro výpočet harmonické analýzy byl použit JRC manuál⁷. Podle této publikace byla následně zvolena hustota provozu jako hustá, vzhledem k navržené konstrukci byl určen logaritmický dekrement útlumu. Dále byly určeny účinky od zatížení od chodců při chůzi, jak ve vodorovném směru, tak ve svislém směru v závislosti na kritické frekvenci.



Obr. 74 Schéma určující směr zatížení pro harmonickou analýzu lávky⁸

Dále byly z modální analýzy určeny uzly s amplitudou a uzly s nulovou výchylkou. Všem uzlům, kde byla nalezena amplituda, byla sledována v rámci harmonické analýzy výchylka. Mezi uzly s nulovými výchylkami bylo umístěno zatížení, aby jeho účinek zvyšoval výchylku v daném směru.



Obr. 75 Amplituda daných uzlů v závislosti na frekvenci

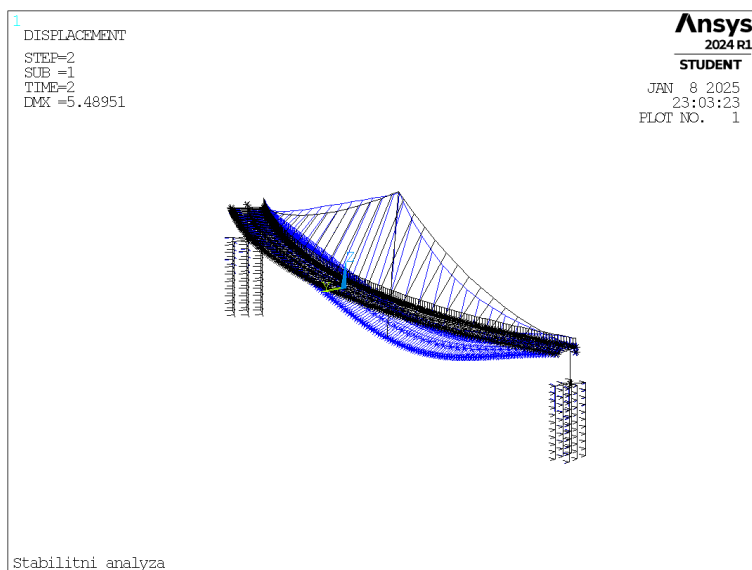
Ze všech výchylek byla následně vypočítána maximální rychlost a zrychlení kmitání lávky. Maximální zrychlení lávky bylo pak dle ČSN EN 1991-2 ed.2 zatříděno dle pohody lávek pro chodce. Výstupem harmonické analýzy je, že lávka spadá do třídy pohody vysoká. Využití limitu zrychlení je jen z 33 %. Z harmonické analýzy vyplývá, že 5 tvar není vlastní mostovce, ale lanu, jelikož mostovka nereagovala na buzení. Dále nebylo třeba posoudit lock-in efekt, jelikož příčné kmitý nejsou v příslušném rozsahu, který je pro tento jev kritický.

⁷ HEINEMEYER, Christoph et al. *Design of lightweight Footbridges for Human Induced Vibrations*. Aachen: Office for Official Publications of the European Communities, 2009.

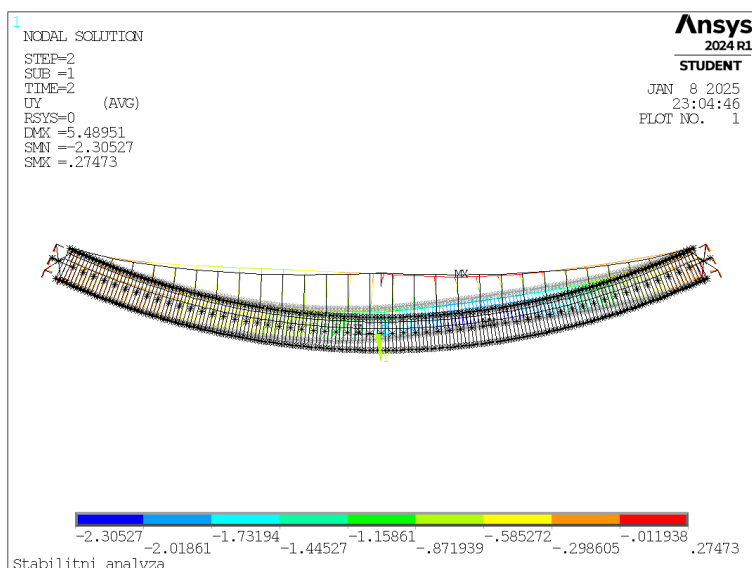
⁸ Tamtéž.

9. STABILITNÍ ANALÝZA

Na výpočetním programu bylo zkoušeno, zda má konstrukce problémy se stabilitou. Nejnižší stability dosahuje konstrukce od zatížení, které vyvolává největší deformace. Tímto zatížením je proměnné zatížení chodci na polovině konstrukce. Stabilitní problém byl hledán za pomoci zvyšování charakteristického zatížení násobitelem. První násobitel, před kterým výpočet přestal konvergovat byl s hodnotou 22,3. Zatížení, které bylo tímto násobitelem upraveno je zatížení chodci a větrem.



Obr. 76 Zobrazení deformací s násobitelem 22,2



Obr. 77 Zobrazení deformací ve vodorovném směru s násobitelem 22,2

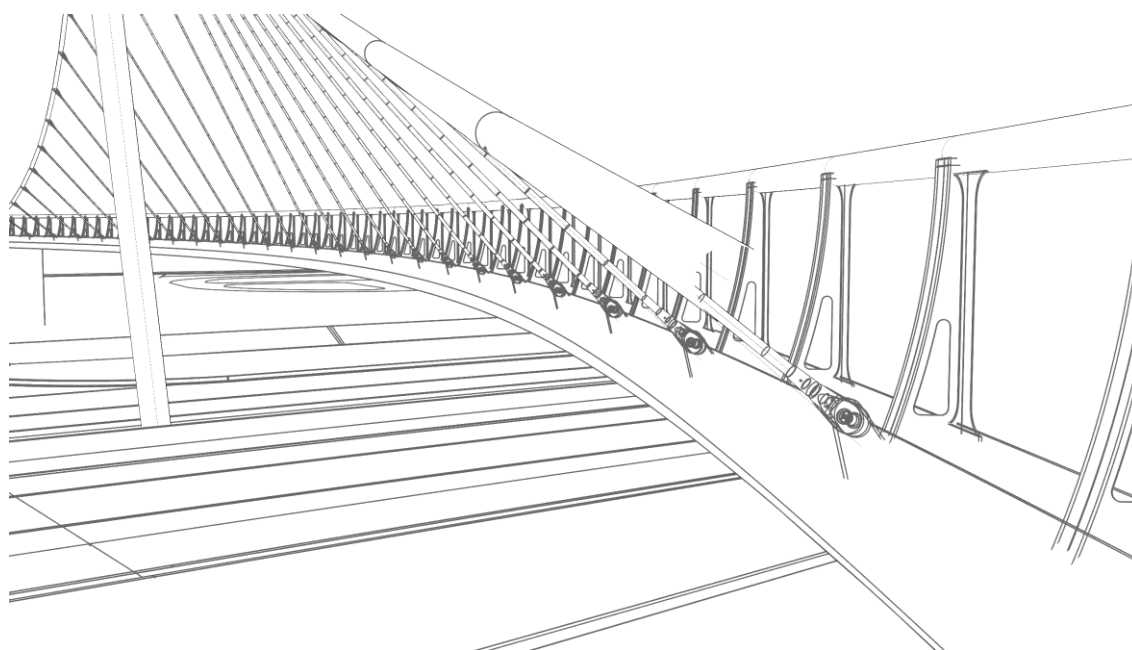
Výstupem ze stabilitní analýzy je zjištění, že konstrukce nemá problém se stabilitou.

10. ZÁVĚR

V této diplomové práci byla navržena visutá lávka o jednom poli přemostující Mlýnský náhon, silnici I/42 na ulici Bauerova v Brně a příjezd na parkoviště. Visutá lávka se skládá z jednoho visutého lana, kotveného mezi opěrami a pylonem, na němž je pomocí závěsů jednostranně zavěšena předpjatá půdorysně zakřivená mostovka. Lávka respektuje místní poměry a tvoří elegantní dominantu na Velkém městském okruhu v Brně, než se řidičům jedoucím ve směru na ulici Poříčí otevře pohled na historické centrum města Brna.

Tato varianta vyšla z předběžného návrhu jako zajímavější řešení. V práci došlo dále k popisu navržené konstrukce, postupu při vytváření modelu a hledání ideální geometrie jednotlivých částí konstrukce. Všechny části jsou podrobně posouzeny podle mezních stavů použitelnosti a mezního stavu únosnosti. Při výpočtu bylo pamatováno na postup výstavby. Po podrobném statickém posouzení došlo k ověření dynamického chování lávky a k provedení stabilitní analýzy.

Pro lávku byla vytvořena výkresová dokumentace sestávající z přehledných výkresů, výkresů předpínací a betonářské výztuže, výkresu detailů a postupu výstavby. Pro lávku byl následně vytvořen 3D model, který zobrazuje i okolí lávky na jehož základě byla provedena vizualizace konstrukce. V přílohách kromě zde zmíněného lze nalézt podklady, studie, statický výpočet a výstupy z výpočetních modelů.



Obr. 78 3D model: Pohled na zavěšený okraj mostovky

SEZNAM ZDROJŮ

HEINEMEYER, Christoph et al. *Design of lightweight Footbridges for Human Induced Vibrations*. Aachen: Office for Official Publications of the European Communities, 2009.

NAVRÁTIL, Jaroslav. *Předpjaté betonové konstrukce*. Brno: CERM, 2004. ISBN 80-214-2649-7.

STRÁSKÝ, Jiří. *Speciální betonové konstrukce (K): Modul M01 Konstrukční systémy a analýza lana*. Brno, 2012.

STRÁSKÝ, Jiří. *Speciální betonové konstrukce (K): Modul M03 Konstrukce podporované kabely*. Brno, 2012.

STRÁSKÝ, Jiří. *Stress Ribbon and Cable-supported Pedestrian Bridges*. ICE Publishing, 2011. ISBN 0727741462.

DYWIDAG Strand, *European Technical Assessment ETA-13/0815*. Vídeň: ÖIB, 2018

ČSN 73 1004 – Navrhování základových konstrukcí. Červenec 2020. Praha: Český normalizační institut, 2020.

ČSN 73 6110 - Projektování místních komunikací. Duben 2012. Praha: Český normalizační institut, 2012.

ČSN 73 6201 Projektování mostních objektů. Leden 2012. Praha: Český normalizační institut, 2012.

ČSN 73 6214 Navrhování betonových mostních konstrukcí. Březen 2023. Praha: Český normalizační institut, 2023.

ČSN EN 1990 včetně změny A1 Zásady navrhování konstrukcí. Únor 2021. Praha: Český normalizační institut, 2021.

ČSN EN 1991-1-4 ed. 2 Zatížení konstrukcí – Zatížení větrem. Listopad 2020. Praha: Český normalizační institut, 2020.

ČSN EN 1991-1-5 Zatížení konstrukcí – Zatížení teplotou. Květen 2005. Praha: Český normalizační institut, 2005.

ČSN EN 1991-2 ed.2 Zatížení mostů dopravou. Prosinec 2018. Praha: Český normalizační institut, 2018.

ČSN EN 1992-1-1 ed. 2 Navrhování betonových konstrukcí. Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. Listopad 2019. Praha: Český normalizační institut, 2019.

ČSN EN 1992-2: Betonové mosty. Navrhování a konstrukční zásady. Květen 2007. Praha: Český normalizační institut, 2007.

ČSN EN 1994-2: Navrhování spřažených ocelobetonových konstrukcí – Obecná pravidla a pravidla pro mosty. Únor 2007. Praha: Český normalizační institut, 2007.

SEZNAM PŘÍLOH

P1 PODKLADY, STUDIE

P1.1 Podklady

P1.2 Studie 1

P1.3 Studie 2

P2 PŘEHLEDNÉ, PODROBNÉ VÝKRESY A VIZUALIZACE

P2.1 Situace

P2.2 Půdorys

P2.3 Podélný řez

P2.4 Příčné řezy

P2.5 Výkres předpínací výztuže

P2.6 Výkres betonářské výztuže

P2.7 Detaily

P2.8 Postup výstavby

P2.9 Vizualizace

P3.1 STATICKÝ VÝPOČET

P3.2 VÝSTUPY Z VÝPOČETNÍCH MODELŮ