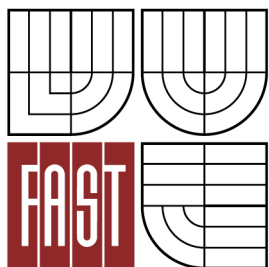




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV BETONOVÝCH A ZDĚNÝCH KONSTRUKCÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF CONCRETE AND MASONRY STRUCTURES

LÁVKA PRO PĚŠÍ PODPOROVANÁ OCELOVÝM OBLOUKEM

PEDESTRIAN BRIDGE SUPPORTED BY STEEL ARCH

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. LUCIE KADRMANOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. RADIM NEČAS, Ph.D.

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T009 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav betonových a zděných konstrukcí

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant	Bc. LUCIE KADRMANOVÁ
Název	Lávka pro pěší podporovaná ocelovým obloukem
Vedoucí diplomové práce	Ing. Radim Nečas, Ph.D.
Datum zadání diplomové práce	31. 3. 2013
Datum odevzdání diplomové práce	17. 1. 2014

V Brně dne 31. 3. 2013

.....
prof. RNDr. Ing. Petr Štěpánek, CSc.
Vedoucí ústavu

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT



Podklady a literatura

Podklady:

Situace, podélný řez překážkou, geotechnické poměry.

Základní normy:

ČSN 736201 Projektování mostních objektů.

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.

Zásady pro vypracování (zadání, cíle práce, požadované výstupy)

Pro zadaný problém navrhnete dvě až tři varianty řešení a zhodnotíte je.

Ve výběru varianty se zaměřte na obloukovou konstrukci lávky pro pěší.

Podrobný návrh nosné konstrukce vybrané varianty mostu proveďte podle mezních stavů včetně řešení vlivu výstavby mostu na jeho návrh.

Ostatní úpravy provádějte podle pokynů vedoucího diplomové práce.

Požadované výstupy:

Textová část (obsahuje průvodní zprávu a ostatní náležitosti podle níže uvedených směrnic)

Přílohy textové části:

P1. Použité podklady a varianty řešení

P2. Výkresy (přehledné, podrobné a detaily v rozsahu určeném vedoucím diplomové práce)

P3. Stavební postup a vizualizace

P4. Statický výpočet (v rozsahu určeném vedoucím diplomové práce)

Prohlášení o shodě listinné a elektronické formy VŠKP (1x).

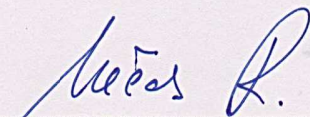
Popisný soubor závěrečné práce (1x).

Diplomová práce bude odevzdána v listinné a elektronické formě podle směrnic a 1x na CD.

Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).



Ing. Radim Nečas, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce



Abstrakt

Předmětem diplomové práce je návrh lávky přes dané koryto řeky. Hlavní náplní je návrh a výpočet lávky pro pěší podporované ocelovým obloukem. Na ocelovém oblouku je pomocí táhel zavěšen předpjatý pás. Výpočet účinků zatížení je proveden pomocí výpočetního software ANSYS 12.0 a Nemetschek SCIA 2011.1, posudky jsou provedeny pomocí programu EXCEL v souladu s ČSN EN. Výpočet je proveden včetně časové analýzy.

Klíčová slova

lávka, předpjatý pás, ocelový oblouk

Abstract

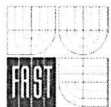
The aim of this master's thesis is to design a footbridge across a river. The main objective is design and analysis of a footbridge supported by a steel arch. Stress ribbon is suspended on steel arch using hangers. The analysis of the structure has been carried out using ANSYS 12.0 and Nemetschek SCIA 2011.1 software, design checks using EXCEL in accordance with Eurocodes. Time dependent analysis was considered.

Keywords

footbridge, stress ribbon, steel arch



KADRMANOVÁ, Lucie. *Lávka pro pěší podporovaná ocelovým obloukem*. Brno, 2013. 36 s., 515 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav betonových a zděných konstrukcí. Vedoucí práce Ing. Radim Nečas, Ph.D..



Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 17.1.2014



podpis autora

Bc. Lucie Kadrmanová



Poděkování

Děkuji Ing. Radimu Nečasovi, PhD., vedoucímu práce, za vedení a pomoc při zpracovávání této práce. Dále mé poděkování patří mé rodině a příteli za podporu v průběhu studia a obzvlášť v průběhu zpracovávání této práce.

OBSAH

1. Úvod	9
2. Předběžný návrh.....	9
2.1 Podklady řešení	9
2.2 Varianta 1: Lávka podporovaná ocelovým obloukem	9
2.3 Varianta 2: Visutá lávka	10
2.4 Varianta 3: Lávka o třech polích	11
2.5 Zhodnocení variant.....	11
3. Statické působení konstrukce lávky	12
4. Postup výstavby lávky	12
5. Model pro podélný směr	14
5.1 Postup výstavby v modelu pro podélný směr	14
5.2 Zatížení	19
5.3 model pro podélný směr - shrnutí.....	20
6. Optimalizace oblouku.....	20
6.1 Vliv sklonu oblouku na příčné momenty	21
6.2 Vliv vzdálenosti oblouků na příčné momenty	23
6.3 vliv vzájemné vzdálenosti oblouků na příčné momenty	24
7. Dimenzování lávky v podélném směru.....	26
7.1 Mezní stavy použitelnosti.....	26
7.2 mezní stavy únosnosti	27
8. Spoje a přípoje.....	28
8.1 Připojení táhel	28
8.2 Připojení oblouku na opěru.....	28
8.3 Spojení segmentů čepy v montážním stavu	29
9. Dynamické posouzení lávky	29
9.1 Modální analýza	29
9.2 Harmonická analýza	30
10. Účinky dotvarování a smršťování na konstrukci	31
11. Model pro příčný směr	31
11.1 Segment v montážním stavu	32
11.2 Segment ve finálním stavu	32
12. Závěr.....	34
13. Seznam použitých zdrojů.....	35
14. Seznam příloh.....	36

1. Úvod

Cílem práce je navrhnout nosnou konstrukci lávky na fiktivní lokalitě, která je zadána příčným řezem. Lávka bude přemostovat koryto řeky. Pro návrh přemostění byly vypracovány tři varianty.

V souladu se zadáním je dále preferována oblouková konstrukce, jejíž návrh je proveden podle mezních stavů včetně vlivu výstavby lávky na její návrh. Ve výpočtu jsou uvažována pouze hlavní zatížení - chodci, průběh lineární teploty a vítr.

2. PŘEDBĚŽNÝ NÁVRH

2.1 PODKLADY ŘEŠENÍ

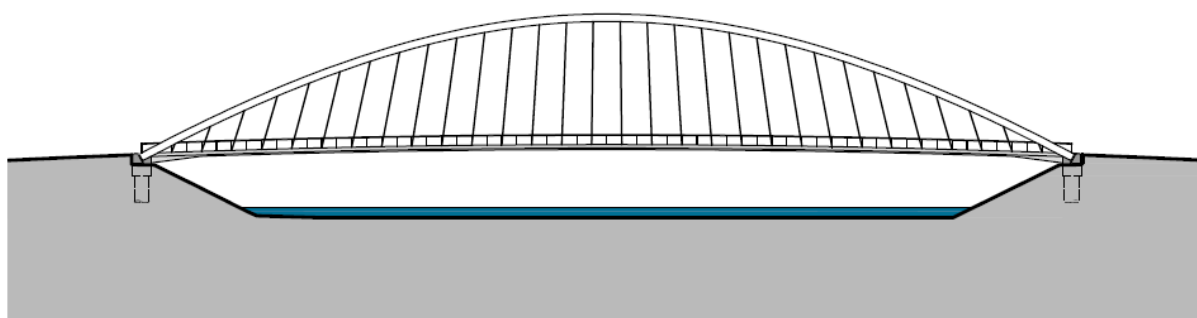
Lávka je navržena na fiktivní lokalitě, která je zadána příčným řezem (obrázek 1). Má přemostovat řeku o šířce koryta přibližně 74,5m. Koryto je po obou stranách lemováno svahem ve sklonu přibližně 1:2, jehož výška je 5,0m nad hladinou vody.



Obrázek 1. Řez lokalitou.

2.2 VARIANTA 1: LÁVKA PODPOROVANÁ OCELOVÝM OBLOUKEM

První variantou předběžného návrhu je lávka o jednom poli podporovaná ocelovým obloukem (Obrázek 2). Nosnou konstrukci lávky tvoří ocelový oblouk, na kterém je pomocí táhel Macalloy zavěšen předpjatý pás. Ocelový oblouk a předpjatý pás tvoří samokotvený systém.

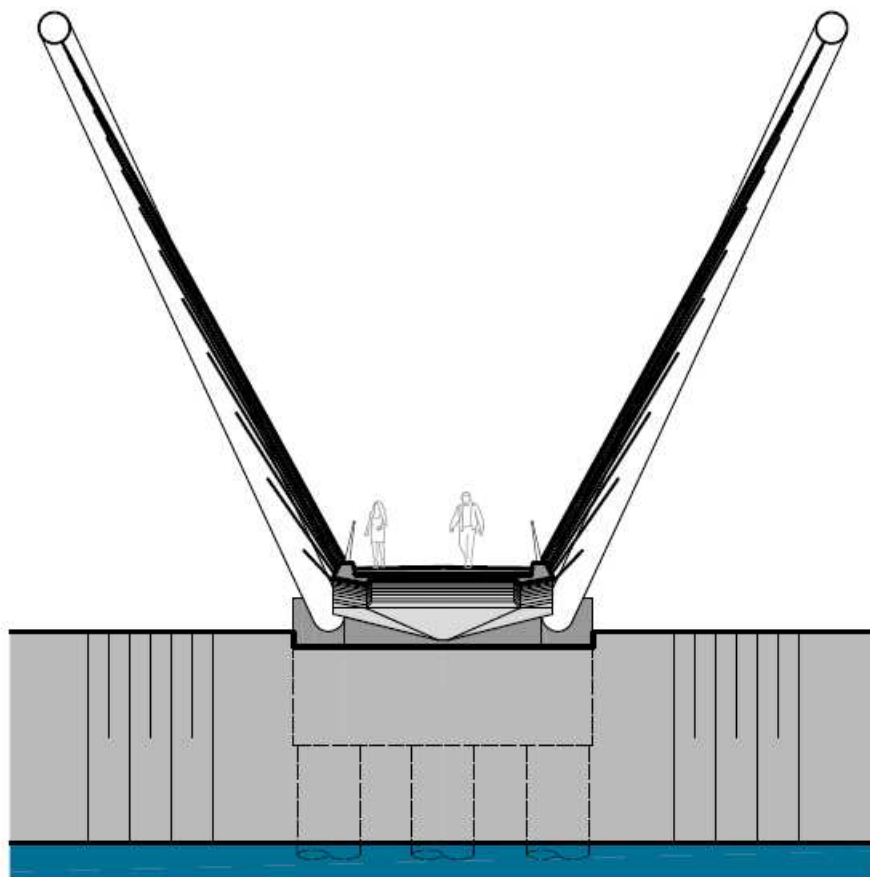


Obrázek 2. Lávka podporovaná ocelovým obloukem: podélný pohled.

Ocelový oblouk je tvořen trubkou 762x25 jakosti S355 a má tvar hyperboly. Rovina, ve které leží, svírá se svislou rovinou úhel 25° a lávka tak připomíná rozevřená motýlí křídla (Obrázek 3). Vzepětí oblouků v jejich rovině je 15.389m, rozpětí je 93.401m.

Předpjatý pás je tvořen prefabrikovanými segmenty z betonu C50/60, které jsou zmonolitněny deskou betonovanou in situ, také betonem C50/60. Mostovka je předepnuta soudržnou předpínací výztuží celkem 110-ti kabely Y 1860-16,0-A.

Předpjatý pás je na ocelovém oblouku zavěšen pomocí 60-ti předpjatých táhel Macalloy 520 závitu M30 v nerezové úpravě.

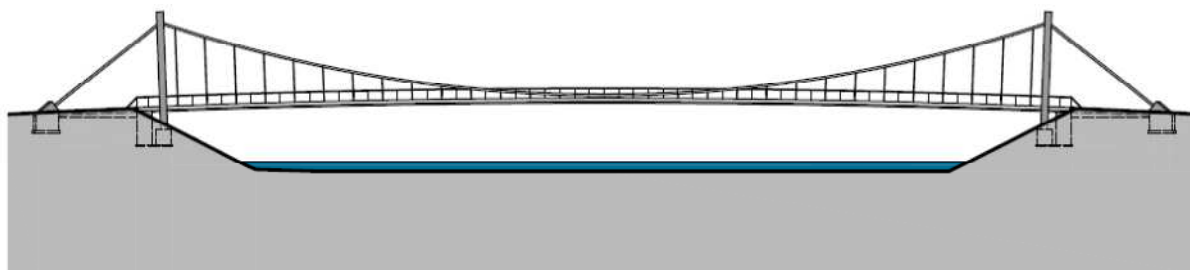


Obrázek 3. Lávka podporovaná ocelovým obloukem: příčný řez.

Ocelové oblouky jsou v patách vetknuty do integrovaných opěr, do kterých je vetknut i předpjatý pás.

2.3 VARIANTA 2: VISUTÁ LÁVKA

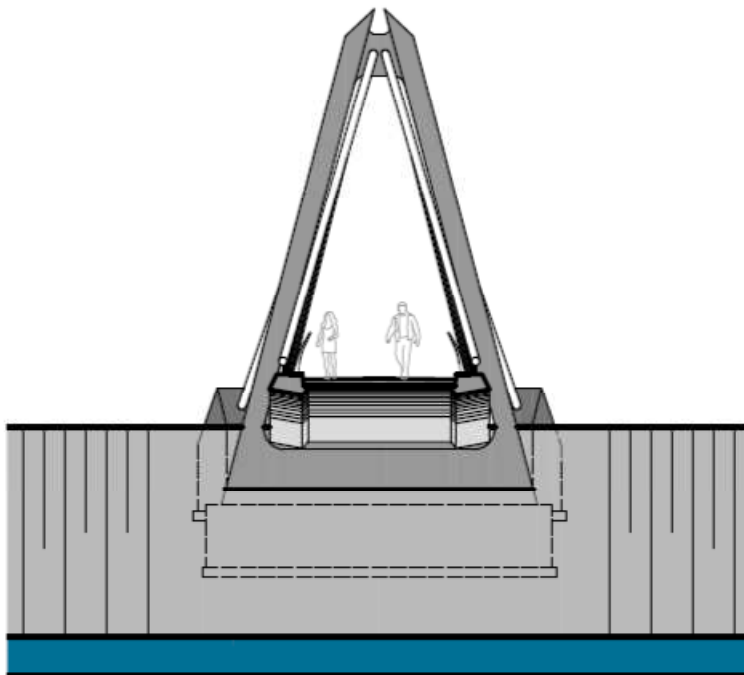
Druhou variantou předběžného návrhu je visutá lávka o jednom poli (Obrázek 4). Na dvou visutých kabelech o průměru 200mm jsou zavěšeny prefabrikované segmenty tvořící předpjatý pás.



Obrázek 4. Visutá lávka - podélný pohled.

Kabely jsou podporovány betonovými pylony, jejichž vzájemná vzdálenost je 89,3m. Pylony jsou 9,0m vysoké. Visuté kabely jsou ukotveny v kotevních blocích. Předpjatý pás je vetknut do monolitického základu.

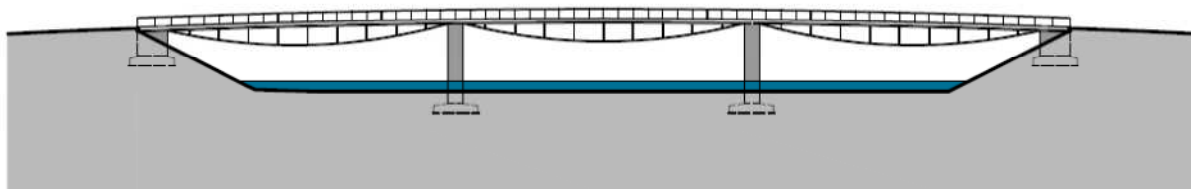
Příčné uspořádání visuté lávky je patrné z obrázku 5.



Obrázek 5. Visutá lávka - příčný řez.

2.4 VARIANTA 3: LÁVKA O TŘECH POLÍCH

Třetí variantou předběžného návrhu je lávka o třech polích (Obrázek 6). Rozpětí všech tří polí je 28,5m. Mostovka sestavená z prefabrikovaných segmentů je podporována předpjatými membránami o tloušťce 0,1m. Membrány jsou předpjaté monostrandy a mají tvar paraboly druhého stupně.



Obrázek 6. Lávka o třech polích - podélný pohled.

2.5 ZHODNOCENÍ VARIANT

První varianta, lávka podporovaná ocelovým obloukem, je velmi elegantní a lehká a výborně se hodí do zadané lokality.

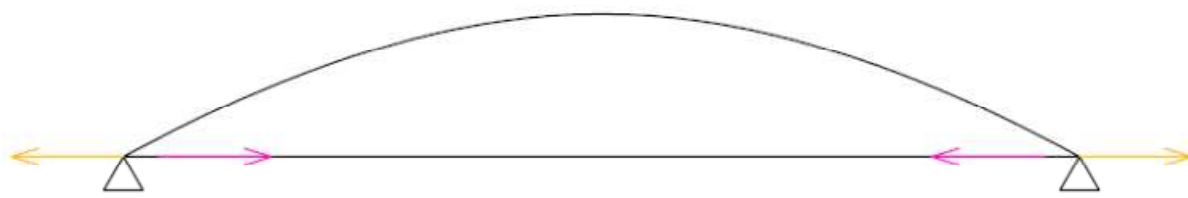
Druhá varianta je z estetického hlediska také velmi příjemná a působí lehce.

Lávka o třech polích podporovaná předpjatými membránami byla vytvořena ze zvědavosti, jak by taková konstrukce vypadala. Výsledné řešení ale není estetické, navíc je pro ni nutné zbudovat dva pilíře v řece.

V souladu se zadáním je dále preferována oblouková konstrukce, která je z vytvořených variant dle mého názoru nejhezčí.

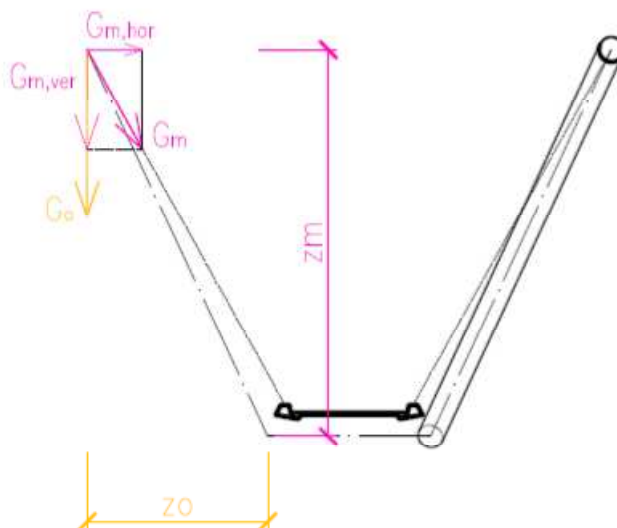
3. STATICKÉ PŮSOBNÍ KONSTRUKCE LÁVKY

Ocelový oblouk a předpjatý pás tvoří v montážním stavu tzv. samokotvený systém (Obrázek 7). Vodorovná reakce v patách oblouku je zachycena táhlem - předpjatým pásem [5]. V případě, že je takový oblouk prostě podepřený, musí být vodorovné posunutí v patě oblouku nulové.



Obrázek 7. Samokotvený systém.

Na ocelovém oblouku jsou zavěšeny prefabrikované segmenty, které oblouk stabilizují (Obrázek 8). Vlastní tíha oblouku G_o a svislá složka síly v závěsech $G_{m,ver}$ působí na rameni z_o . Proti tomuto momentu působí vodorovná složka síly v závěsu $G_{m,hor}$, která okolo paty oblouku otáčí na rameni z_m .



Obrázek 8. Působení konstrukce v příčném směru.

Po zmonolitnění mostovky, dopnutí montážních kabelů a předeptnutí definitivních kabelů přenáší vodorovnou sílu z předpjatého pásu integrovaná opěra. Ve výchozím stavu tedy už vodorovné přemístění v patě prostě podepřeného oblouku není nulové.

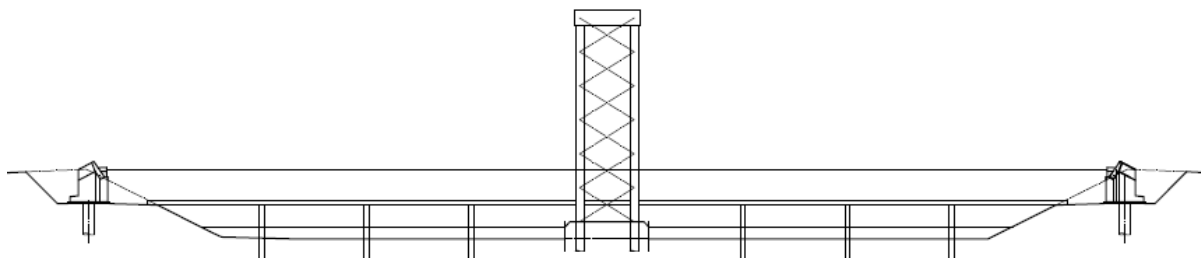
4. POSTUP VÝSTAVBY LÁVKY

Nejprve budou provedeny výkopy a pilotážní plošiny. Následně budou vybetonovány piloty a základy integrovaných opěr (Obrázek 9).



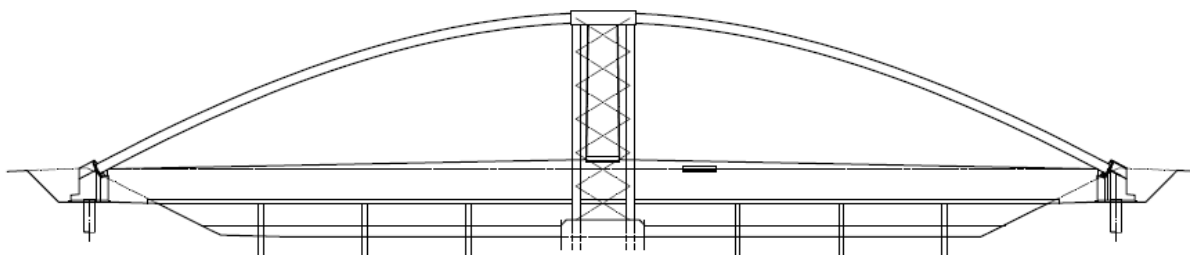
Obrázek 9. Vybetonování pilot a základů integrovaných opěr.

Po provedení montážního náspu v řece a odklonu vody pomocí štětových stěn budou postaveny montážní podpěry pro oblouk a mezi ně budou natažena montážní lana (Obrázek 10). Montážní lana budou napnutá na sílu odpovídající vodorovné reakci oblouku v montážním stavu ($\sigma_p = 742 \text{ MPa}$).



Obrázek 10. Provedení montážní podpěry pro oblouk a natažení montážních lan.

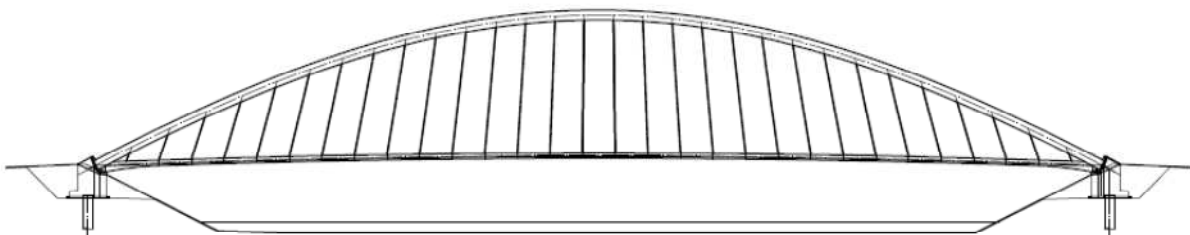
Následovat bude vztyčení ocelového oblouku. Prostřednictvím závěsů připevněných na montážní podpěru bude oblouk osazen do projektované polohy. Poté budou ve vrcholu zavařeny montážní svary a odstraněny navařené desky. Dalším krokem bude zavěšení středního segmentu S2 (Obrázek 11).



Obrázek 11. Zavěšení středního segmentu.

Po zavěšení středního segmentu budou zavěšeny ostatní segmenty. Zavěšování bude probíhat postupně, vždy po dvou na každé straně. Následně bude na poslední závěsy a prefabrikované segmenty zavěšeno bednění, do kterého bude vybetonován monolitický náběh.

Po ztvdnutí náběhu bude odstraněno bednění a také montážní podpěra pro oblouk a montážní násep. Na mostovku budou nataženy kabely definitivního předpětí a bude vybetonována mostovka. Prefabrikované segmenty a monolitický náběh budou tvořit ztracené bednění a pomocí spřahovacích trnů dojde ke zmonolitnění celé mostovky.



Obrázek 12. Dokončená lávka.

Týden po vybetonování mostovky dojde k dopnutí montážních lan a k předepnutí kabelů definitivního předpětí (všechny na napětí $\sigma_p=1440\text{MPa}$). Po zasypání výkopů a provedení příslušenství mostu bude následovat uvedení do provozu (Obrázek 12).

5. MODEL PRO PODÉLNÝ SMĚR

Model pro podélný směr byl vytvořen pomocí výpočetního programu ANSYS 12.0. Model byl vytvořen s ohledem na postup výstavby.

Dotvarování a smršťování betonu nebylo modelováno, protože hlavní nosná část lávky, ocelový oblouk, nedotvaruje ani nesmršťuje. Z toho důvodu jsme se rozhodli reologické jevy při návrhu lávky zanedbat. Účinky dotvarování a smršťování byly nakonec odhadnuty na definitivní konstrukci, viz kapitola 8.

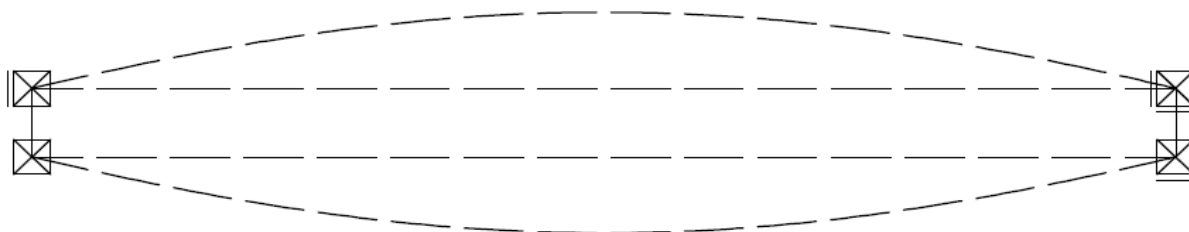
5.1 POSTUP VÝSTAVBY V MODELU PRO PODÉLNÝ SMĚR

Budování konstrukce bylo modelováno ve třech časech/stavech: montážní stav, výchozí stav a konec životnosti konstrukce.

5.1.1 Čas -1: Montážní stav

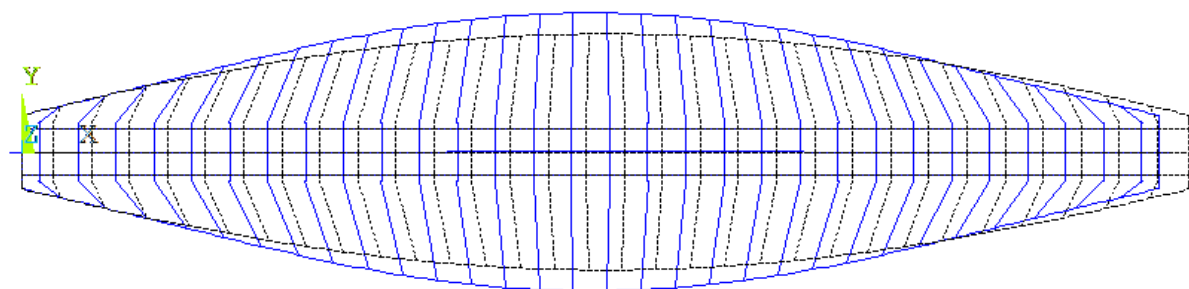
Na ocelovém oblouku jsou pomocí závěsů zavěšeny prefabrikované segmenty, monolitická mostovka je na nich nalita, ještě ale není ztuhlá. Vodorovná reakce oblouku je zachycena pomocí dvou montážních lan, které ještě nejsou zainjektovány - do mostovky tedy není vneseno předpětí.

Velikost předpínací síly, na kterou je třeba montážní lana napnout, byla stanovena iteračně na prostě podepřeném modelu (Obrázek 13).

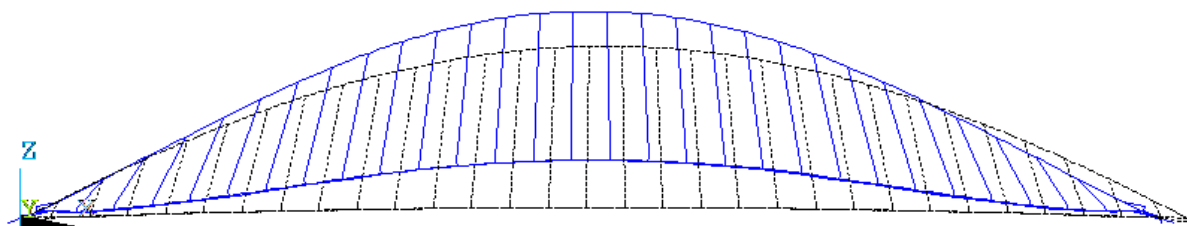


Obrázek 13. Schéma prostého podepření modelu.

V případě, že byla zvolena příliš velká předpínací síla, byly paty oblouku táhnuty k sobě, jak je vidět na obrázcích 14 a 15. Původní tvar konstrukce je naznačen čárkovanou čarou, deformovaný tvar konstrukce plnou čarou.

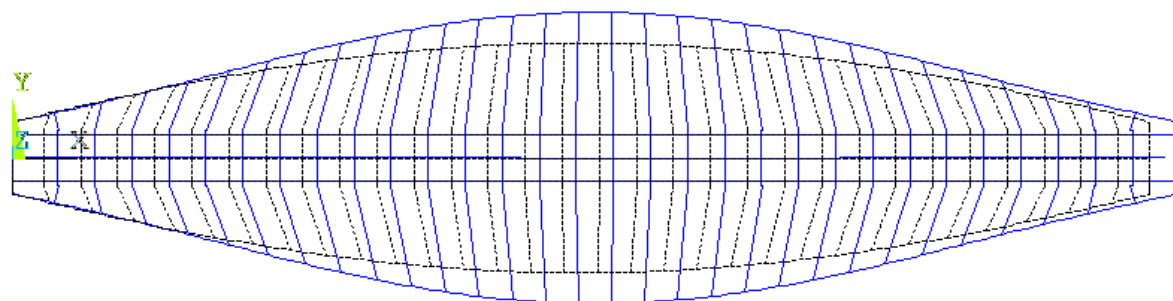


Obrázek 14. Účinek příliš velké předpínací síly v montážním stavu - půdorys(ANSYS 12.0).

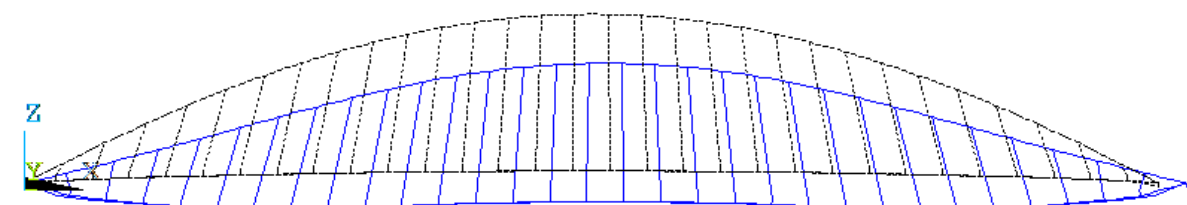


Obrázek 15. Účinek příliš velké předpínací síly v montážním stavu - pohled (ANSYS 12.0).

Pokud byla zvolena příliš malá předpínací síla, paty oblouku se „rozjely“, jak je vidět na obrázcích 16 a 17.

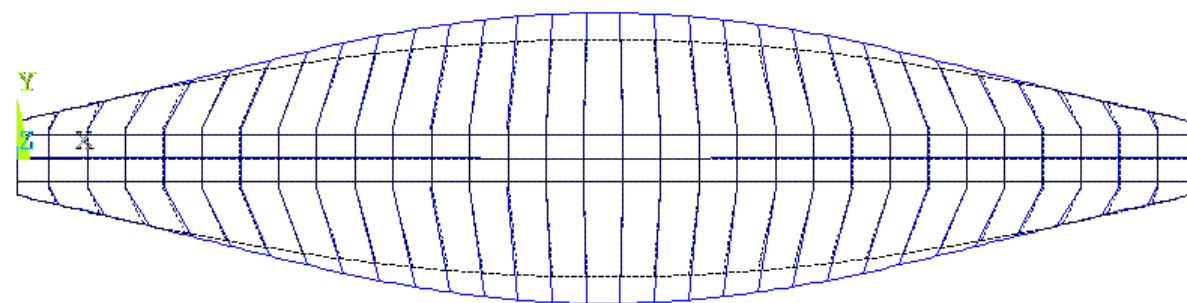


Obrázek 16. Účinek příliš malé předpínací síly v montážním stavu - půdorys (ANSYS 12.0).

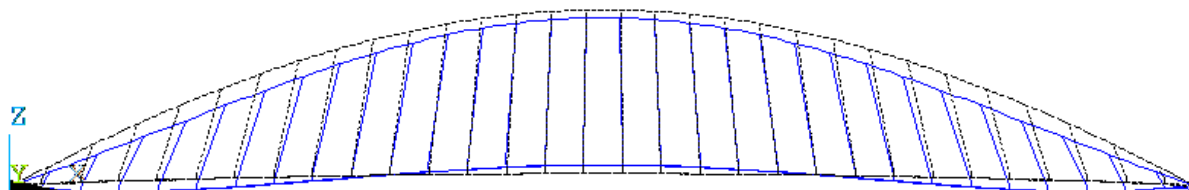


Obrázek 17. Účinek příliš malé předpínací síly v montážním stavu - pohled (ANSYS 12.0).

Na obrázcích 18 a 19 je vidět deformace konstrukce v případě, že je předpínací síla v montážních lanech zvolena optimálně. Po dohodě s vedoucím práce jsme za nulovou vodorovnou deformaci v patě oblouku považovali deformaci menší než 0,5mm. Hodnota deformace v patě oblouku na mém definitivním modelu (modelu včetně náběhů) je -0,39mm.

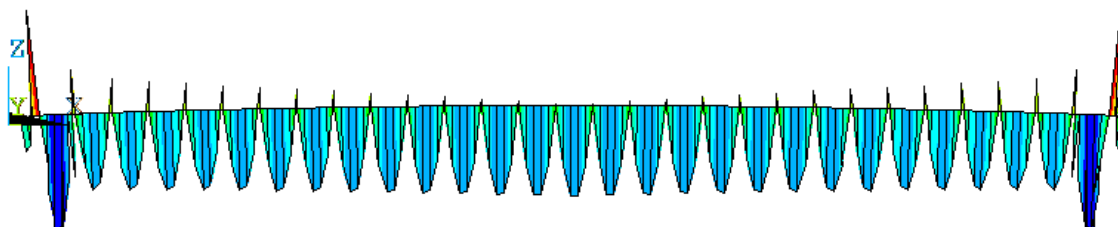


Obrázek 18. Účinek optimální předpínací síly v montážním stavu - půdorys (ANSYS 12.0).



Obrázek 19. Účinek optimální předpínací síly v montážním stavu - pohled (ANSYS 12.0).

Vzájemné spojení segmentů v montážním stavu bylo v modelu realizováno pomocí tzv. cp-ček („coupled sets“): v bodě, kde se stýkají dva segmenty, se nachází dva souměstné uzly. Pomocí cp-ček je umožněno vzájemné pootočení segmentů okolo osy y . O tom, že mostovka není v montážním stavu zmonolitněná a že segmenty jsou jen zavěšeny na závěsech, se můžeme přesvědčit na průběhu ohybových momentů (Obrázek 20).

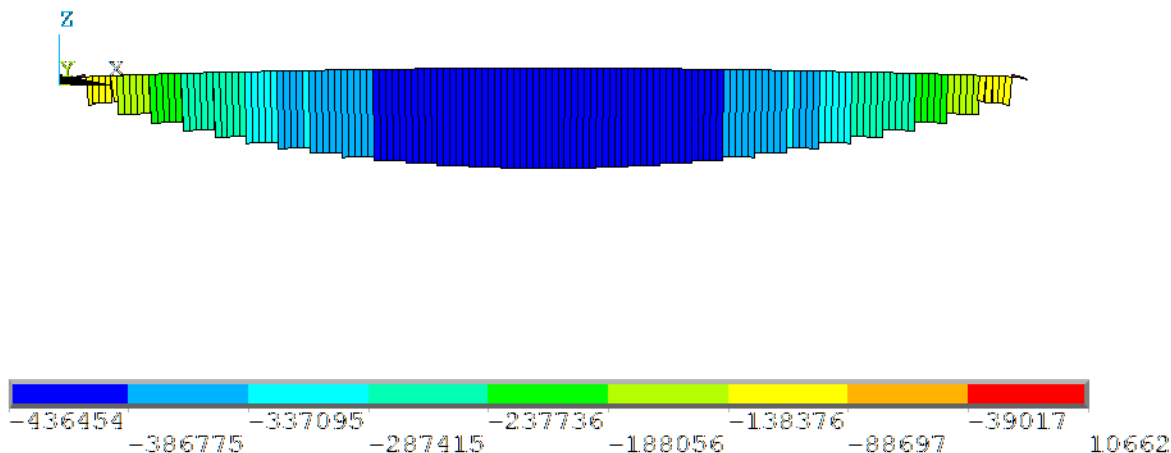


Obrázek 20. Průběh ohybových momentů na mostovce v montážním stavu (ANSYS 12.0).

Montážní lana jsou k segmentům připojena pomocí tuhých vazeb. V místech styku lana s tuhou vazbou se opět nachází dva souměstné uzly vzájemně spojené pomocí cp-čka, které umožňuje pouze vzájemné posunutí lana vůči tuhé vazbě ve směru osy x . Montážní lana jsou tedy položena na segmentech, mohou po nich ale klouzat - předpětí tedy není vneseno do mostovky a montážní lana pouze přenášejí vodorovnou reakci z oblouku.

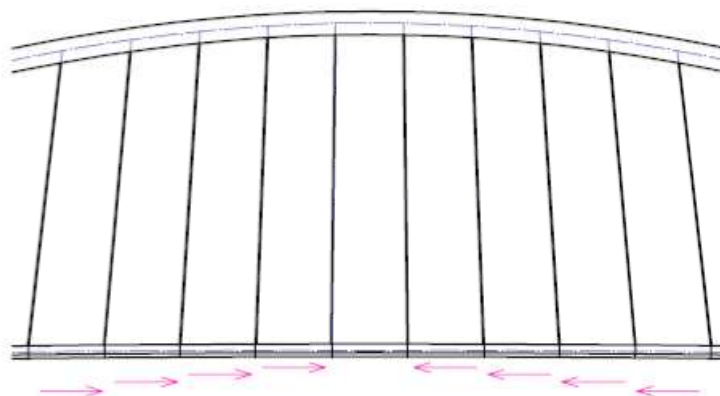
Poté, co byla stanovena velikost předepnutí montážních lan v montážním stavu, bylo změněno podepření konstrukce. Prosté podepření bylo nahrazeno pružinami, které představují podloží. Podepření pružinami je popsáno v kapitole 5.3 Statického výpočtu.

O tom, že předpětí v montážním stavu ještě není vneseno do mostovky, svědčí průběh normálových sil (Obrázek 21). Při tvorbě modelu byl průběh normálových sil na mostovce v první chvíli překvapující, protože jsme ho očekávali nulový. Z hodnot na obrázku 21 je ale vidět, že velikosti těchto normálových sil neodpovídají síle v montážních lanech, která je 2220 kN.



Obrázek 21. Průběh normálových sil na mostovce v montážním stavu (ANSYS 12.0).

Normálové síly na mostovce v montážním stavu jsou způsobeny sklonem závěsů. Závěsy se „chtějí“ narovnat takovým způsobem, aby visely svisle, a v důsledku toho tlačí na sousední segmenty, které jsou blíže u středu lávky (Obrázek 22). Průběh normálových sil na mostovce je tedy v pořádku.

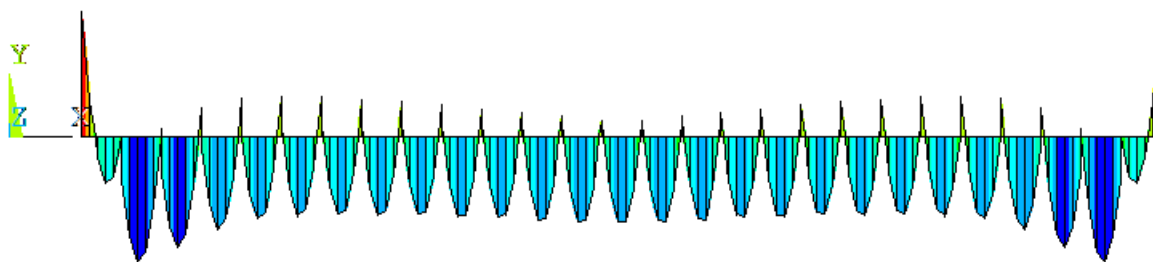


Obrázek 22. K vysvětlení normálových sil na mostovce

Lana definitivního předpětí jsou v tomto kroku umrtvena a nepůsobí.

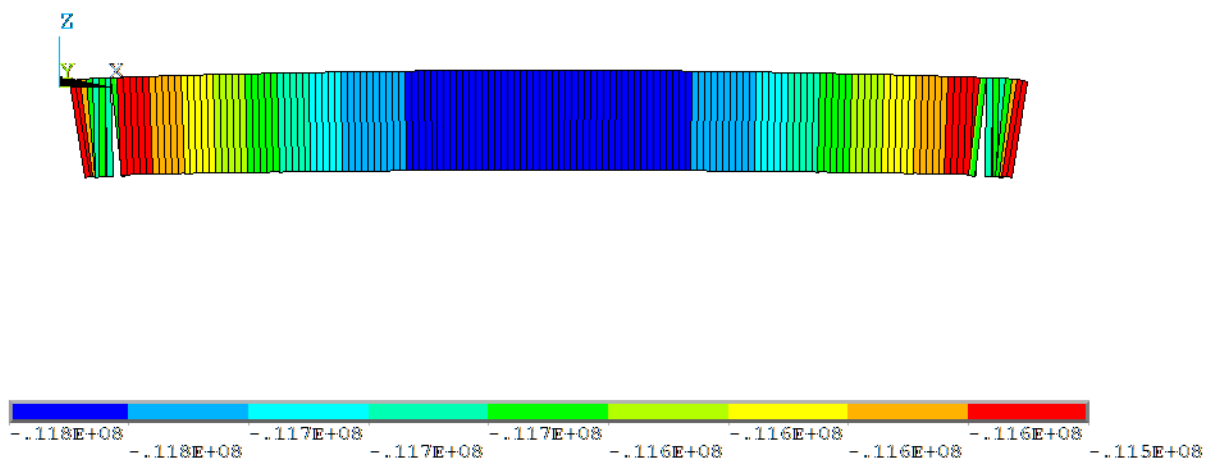
5.1.2 Čas 0: Výchozí stav

Ve výchozím stavu dojde ke zmonolitnění mostovky. Dojde k uzavření cp-ček mezi segmenty mostovky, to znamená, že již není povoleno jejich vzájemné pootáčení. Vzhledem k tomu, že na konstrukci nepůsobí žádné další zatížení, musejí být průběhy momentů shodné s těmi z montážního stavu (Obrázek 23).



Obrázek 23. Průběh ohybových momentů na mostovce ve výchozím stavu (ANSYS 12.0).

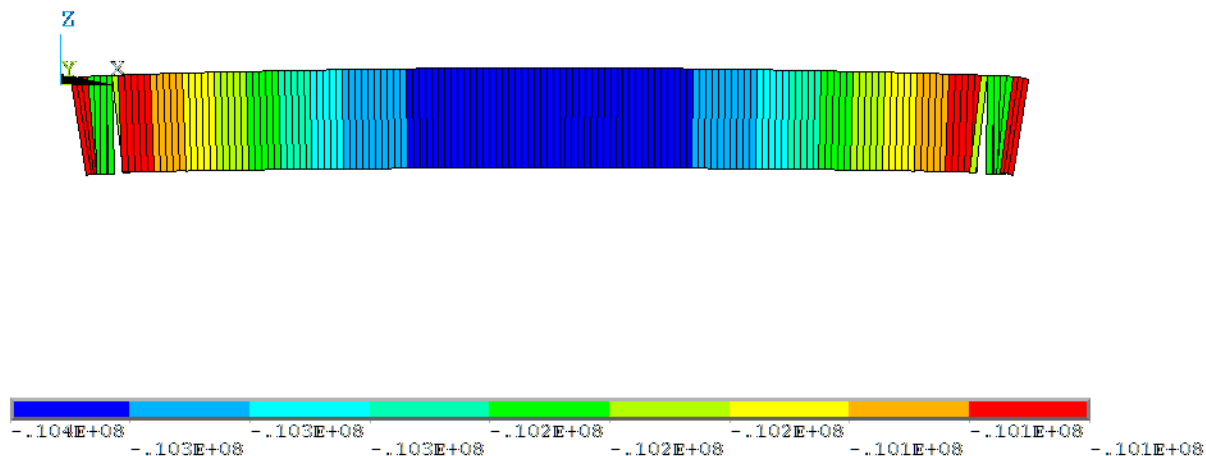
Dále dojde k uzavření cp-ček mezi segmenty a montážními kabely, k dopnutí montážních kabelů a k oživení lan definitivního předpětí. O tom, že došlo ke vnesení předpětí do mostovky, se můžeme přesvědčit z průběhu normálových sil na mostovce (Obrázek 24).



Obrázek 24. Průběh normálových sil na mostovce ve výchozím stavu (ANSYS 12.0).

5.1.3 Čas 1: Konec životnosti konstrukce

Na konci životnosti konstrukce proběhly veškeré ztráty předpětí, které byly odhadnuty na 10%. Dojde tedy ke snížení normálových sil na mostovce (Obrázek 25).



Obrázek 25. Průběh normálových sil na mostovce na konci životnosti konstrukce (ANSYS 12.0).

5.2 ZATÍŽENÍ

5.2.1 Stálá zatížení

Vlastní tíha

Zatížení konstrukce vlastní tíhou je generováno přímo v programu ANSYS pomocí tíhového zrychlení a objemových hmotností jednotlivých materiálů (Tabulka 1). Objemová tíha betonu mostovky byla zvětšena tak, aby se ve výpočetním modelu uplatnila i tíha příčných žeber na segmentech, která v modelu pro podélný směr nejsou modelována.

Prvek	Materiál				Objemová hmotnost
Mostovka	beton	C 50 / 60			2 583
Oblouk	ocel	S 355			7 850
Předpínací lana	ocel	Y 1860 S7 - 15,7 - A			7 850
Závěsy	ocel	520 (Macalloy)			7 850
Tuhé vazby	beton	C 50 / 60 _rigid			0
Pružiny					0

Tabulka 1. Objemové hmotnosti jednotlivých materiálů.

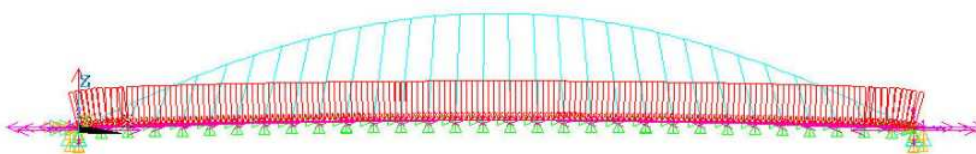
Předpětí

Předpětí bylo modelováno pomocí přetvoření prvků montážních a definitivních lan, viz kapitola 5.2 Statického výpočtu.

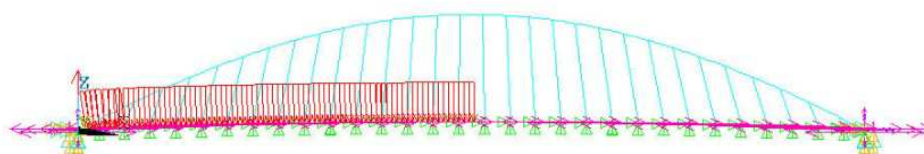
5.2.2 Proměnná zatížení

Užitné zatížení chodci

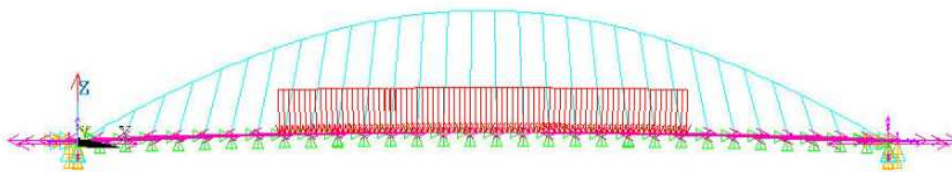
Užitné zatížení chodci je uvažováno ve čtyřech zatěžovacích stavech, a to postupně na celé délce lávky (Obrázek 26), na polovině lávky (Obrázek 27) a na středu lávky (Obrázek 29).



Obrázek 26. Zatížení chodci na celé délce lávky (ANSYS 12.0).



Obrázek 27. Zatížení chodci na polovině lávky (ANSYS 12.0).



Obrázek 28. Zatížení chodci na středu lávky (ANSYS 12.0).

Zatížení chodci je uvažováno vždy na delším úseku lávky a lávka neslouží jako přístupový kanál k objektům sloužícím ke shromažďování více lidí, je tedy navržena na redukovanou hodnotu zatížení chodci, viz kapitola 4.2.1 Statického výpočtu.

Zatížení větrem

Zatížení větrem je stanoveno dle ČSN-EN 1991-1-4, viz kapitola 4.2.2 Statického výpočtu.

Zatížení teplotou

Zatížení teplotou je stanoveno dle ČSN-EN 1991-1-4, viz kapitola 4.2.3 Statického výpočtu.

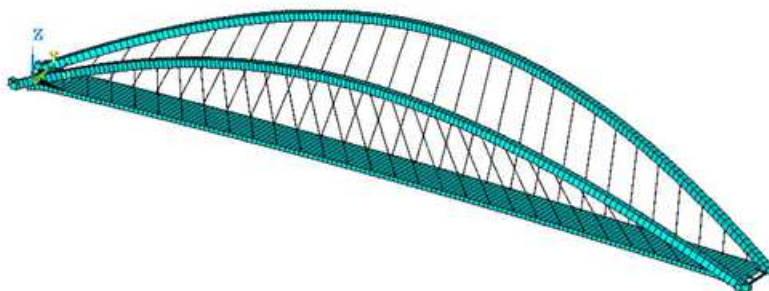
5.2.3 Kombinace zatížení

Kombinace zatížení byly stanoveny pro mezní stav použitelnosti a mezní stavy únosnosti. Jejich přehled viz kapitola 4.3 Statického výpočtu, průběhy vnitřních sil viz přílohy P6.01 a P6.02.

5.3 MODEL PRO PODÉLNÝ SMĚR - SHRUTÍ

Jednotlivé prvky modelu pro podélný směr jsou podrobně popsány v kapitole 5.2 Statického výpočtu. V něm jsou uvedeny materiálové i průřezové charakteristiky prvků modelu a typy jednotlivých elementů, které byly použity.

Původní model, který jsem vytvářela, byl bez parabolického náběhu. Vzhledem k tomu, že v koncových oblastech předpjatého pásu vznikaly příliš velké tahy, bylo nutné navrhnout parabolický náběh. Axonometrický pohled na finální model použitý pro posouzení konstrukce je na obrázku 29.



Obrázek 29. Axonometrický pohled na finální výpočetní model (ANSYS 12.0).

Všechny výpočty s výjimkou výpočtů na dynamické posouzení lávky byly nelineární.

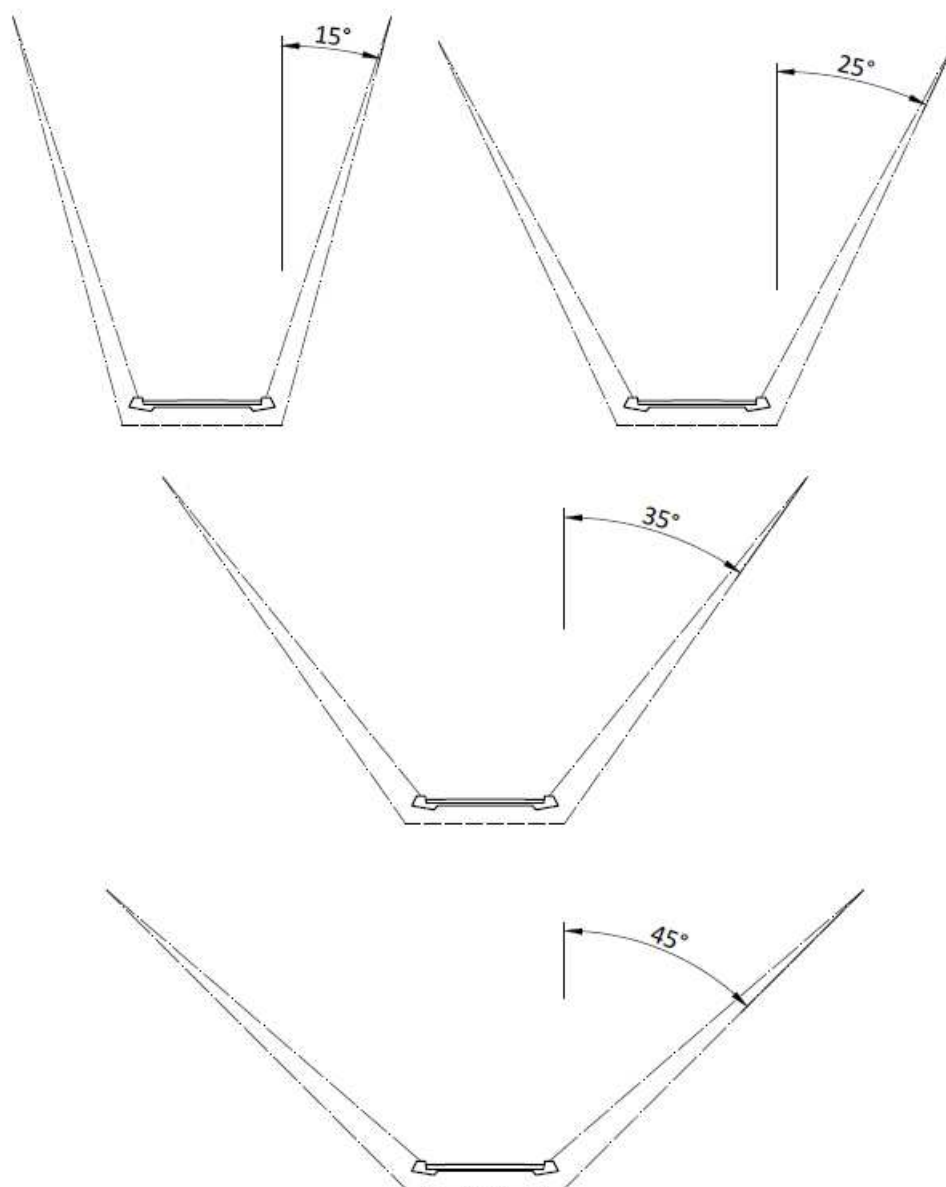
6. OPTIMALIZACE OBLOUKU

Po dohodě s vedoucím práce jsem postupovala následujícím způsobem: tvar oblouku (hyperbola, její parametry viz výkres P3.10 - Výkres tvaru oblouku) jsem považovala za daný a snažila jsem se docílit toho, aby byl oblouk ve výchozím stavu co nejméně namáhán příčnými momenty.

Optimalizace byla provedena na modelu, na kterém ještě nebyly namodelovány náběhy - ty byly navrženy později.

6.1 VLIV SKLONU OBLOUKU NA PŘÍČNÉ MOMENTY

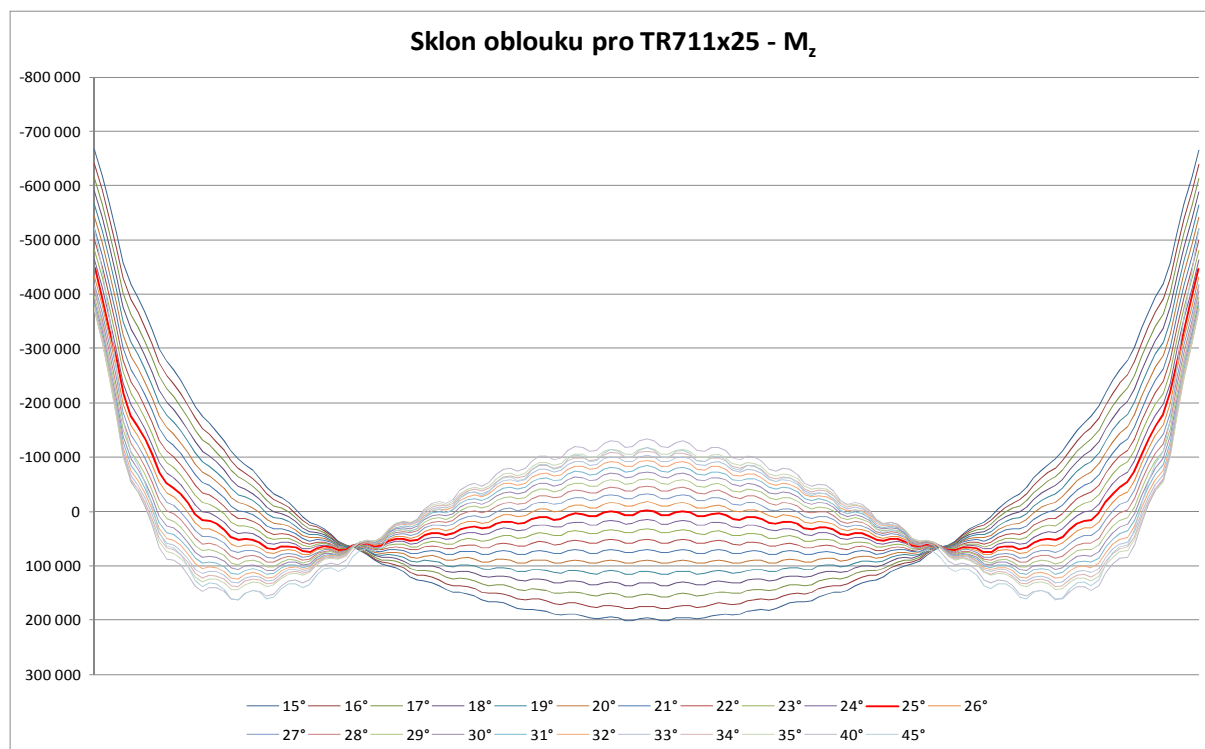
Vliv sklonu oblouku na příčné momenty jsem zkoumala pro úhly 15 - 45°, které svírá rovina, ve které leží oblouk, se svislou rovinou. Schémata příčného řezu pro úhly 15°, 25°, 35° a 45° jsou uvedena na obrázku 30.



Obrázek 30. Schematické příčné řezy pro různé sklony oblouku.

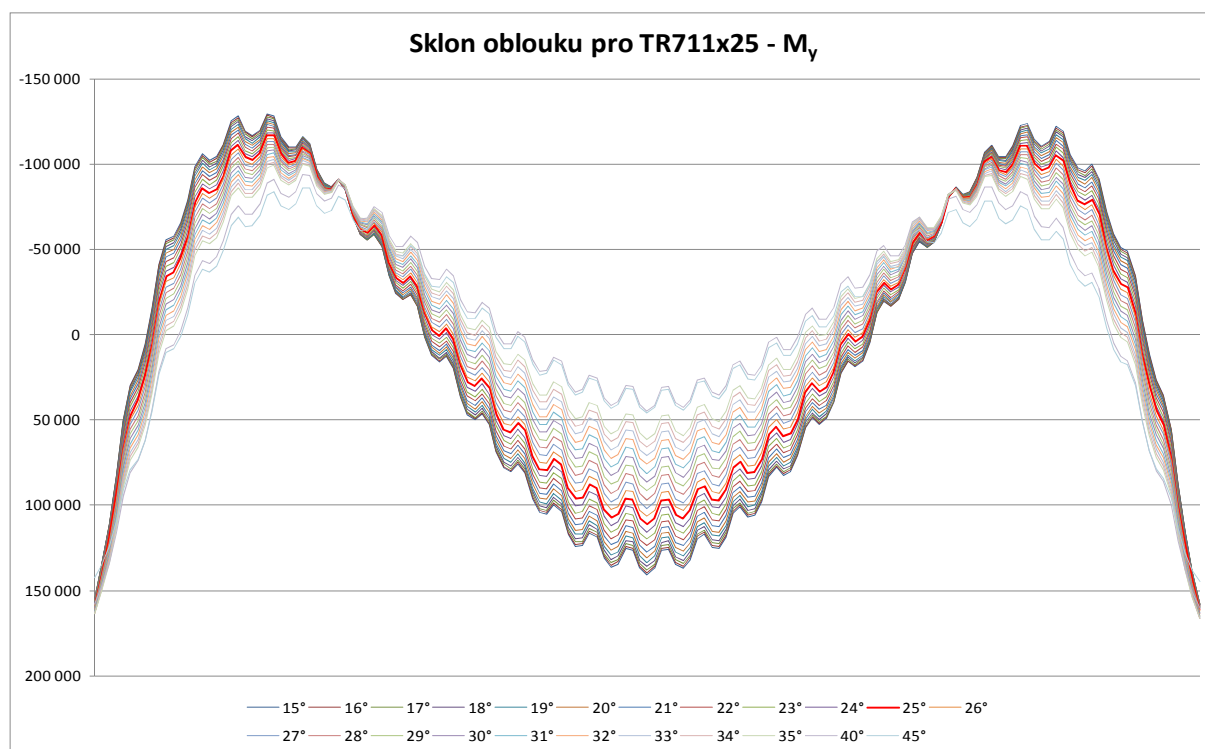
Už na první pohled je vidět, že úhly 35° a 45° jsou příliš velké. Dopředu jsme tedy očekávali, že bychom se mohli pohybovat někde okolo 15° - 25°.

Z grafu 1 je vidět, že pro eliminaci příčných momentů je nejlepší sklon oblouku 25°. Při tomto sklonu se velikosti příčných momentů ve středu rozpětí oblouku nejvíce blíží nule. Tento sklon byl proto vybrán pro konstrukci lávky a všechny následující studie byly provedeny na oblouku s tímto sklonem.



Graf 1. Průběhy příčných momentů na obloucích různého sklonu.

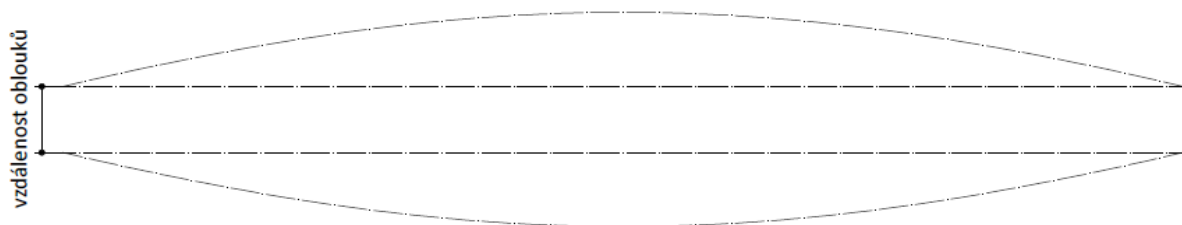
Z grafu 2, který zobrazuje průběhy podélných momentů na obloucích různého sklonu, je vidět, že pro daný tvar oblouku není možné pomocí sklonu eliminovat podélné momenty.



Graf 2. Průběhy podélných momentů na obloucích různého sklonu.

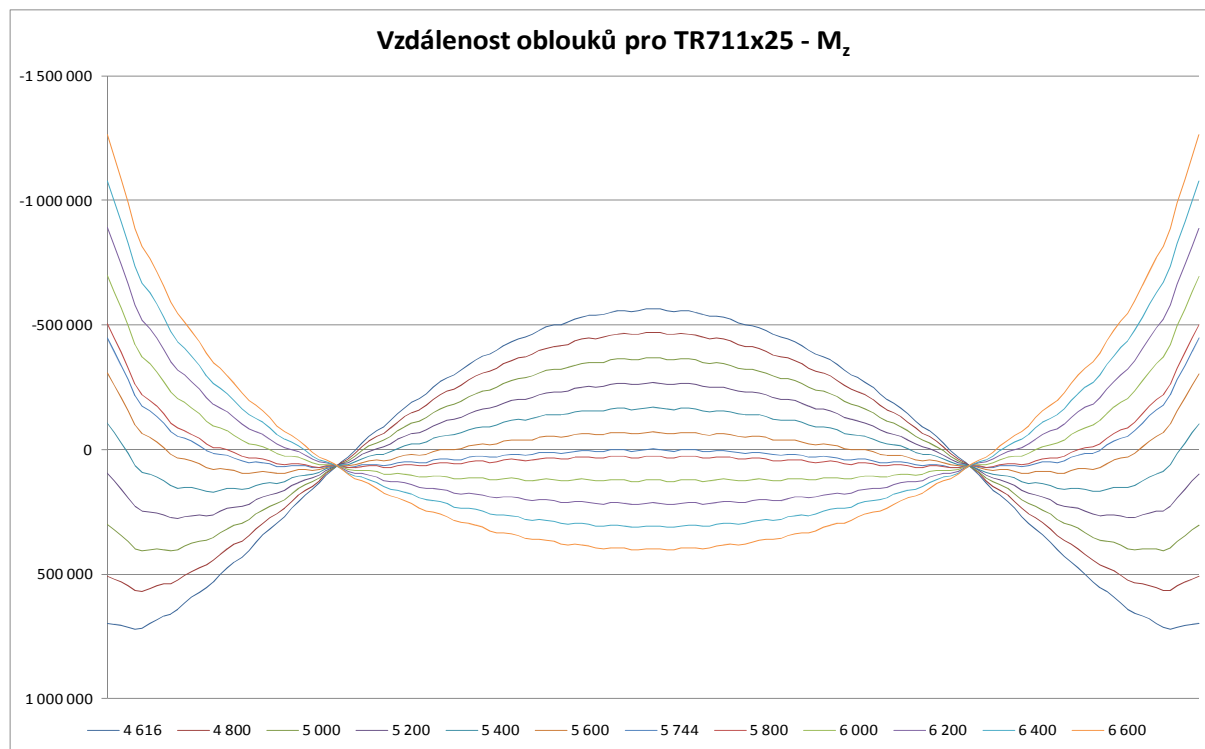
6.2 VLIV VZDÁLENOSTI OBLOUKŮ NA PŘÍČNÉ MOMENTY

Během tvorby výpočetního modelu bylo zjištěno, že na velikost příčných momentů má podstatný vliv také vzdálenost oblouků (Obrázek 31).



Obrázek 31. Vzájemná vzdálenost oblouků.

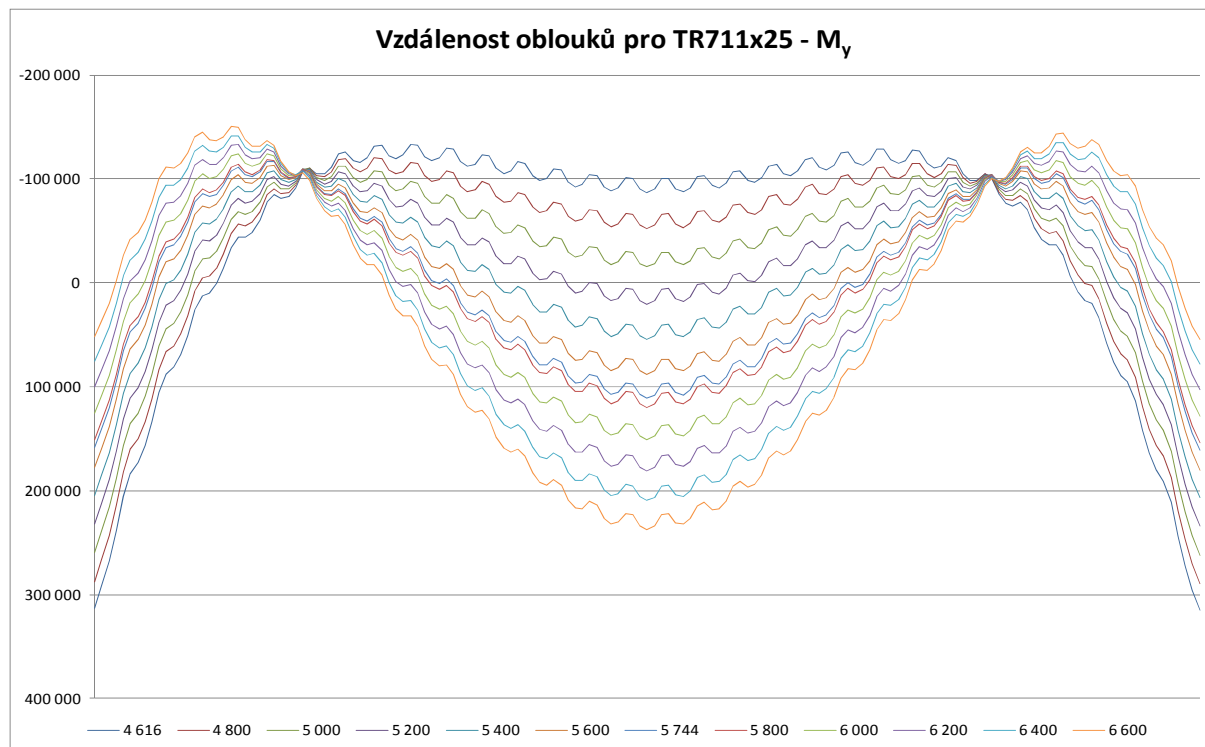
Vliv vzájemné vzdálenosti oblouků na příčné momenty je patrný z grafu 3. Požadavku na eliminaci příčných momentů nejlépe vyhovuje vzdálenost oblouků okolo 5800mm.



Graf 3. Průběhy příčných momentů v závislosti na vzájemné vzdálenosti oblouků.

Z grafu 4 je patrné, že čím menší je vzájemná vzdálenost oblouků, tím menší jsou podélné ohybové momenty ve střední části oblouku a zároveň jsou tyto momenty tím větší v patách oblouku.

Z prostorových a konstrukčních důvodů (velikost patního plechu oblouku a z toho plynoucí velikost opěry) byla nakonec zvolena vzájemná vzdálenost oblouků 5858mm.

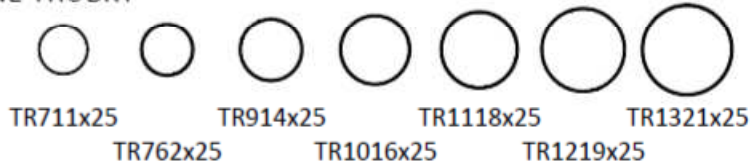


Graf 4. Průběhy podélných momentů v závislosti na vzájemné vzdálenosti oblouků.

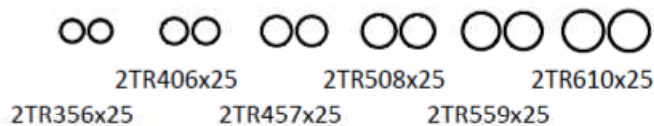
6.3 VLIV VZÁJEMNÉ VZDÁLENOSTI OBLOUKŮ NA PŘÍČNÉ MOMENTY

Po zvolení definitivní geometrie oblouku byl stanoven jeho průřez. Zkoumané průřezy jsou uvedeny na obrázku 32.

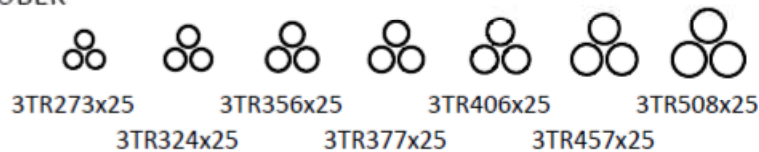
SAMOSTATNÉ TRUBKY



DVOJICE TRUBEK

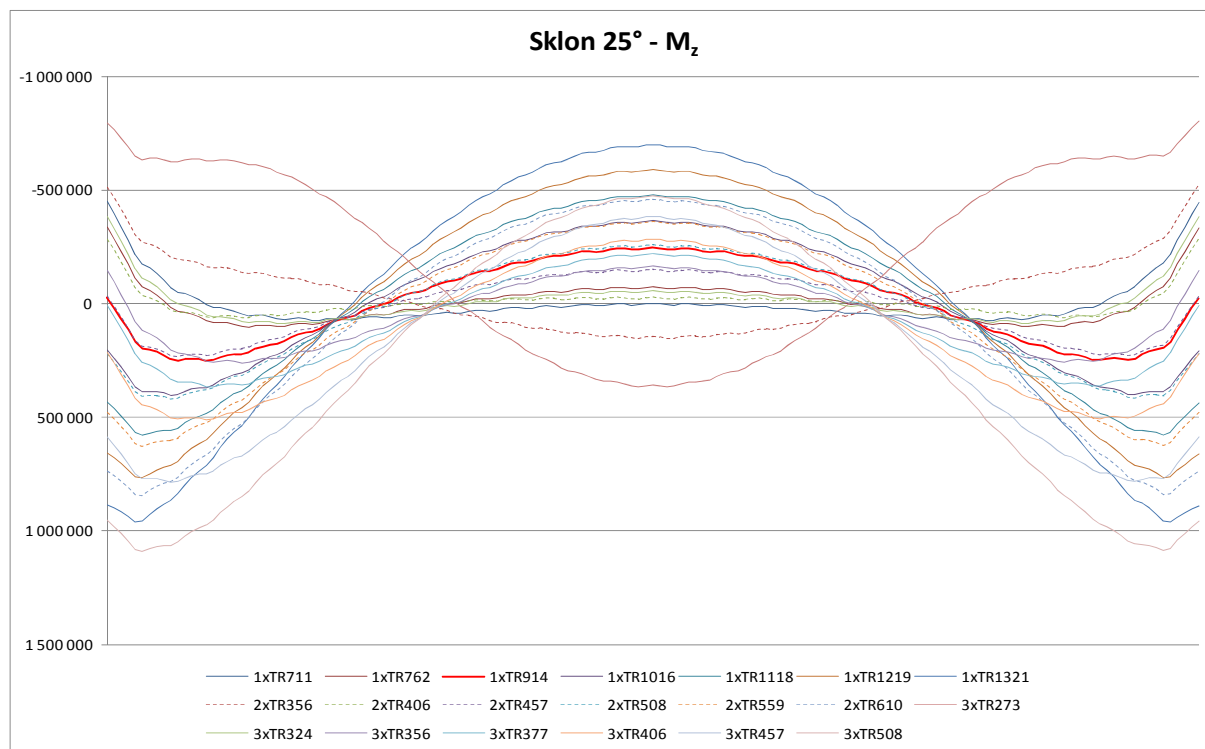


TROJICE TRUBEK

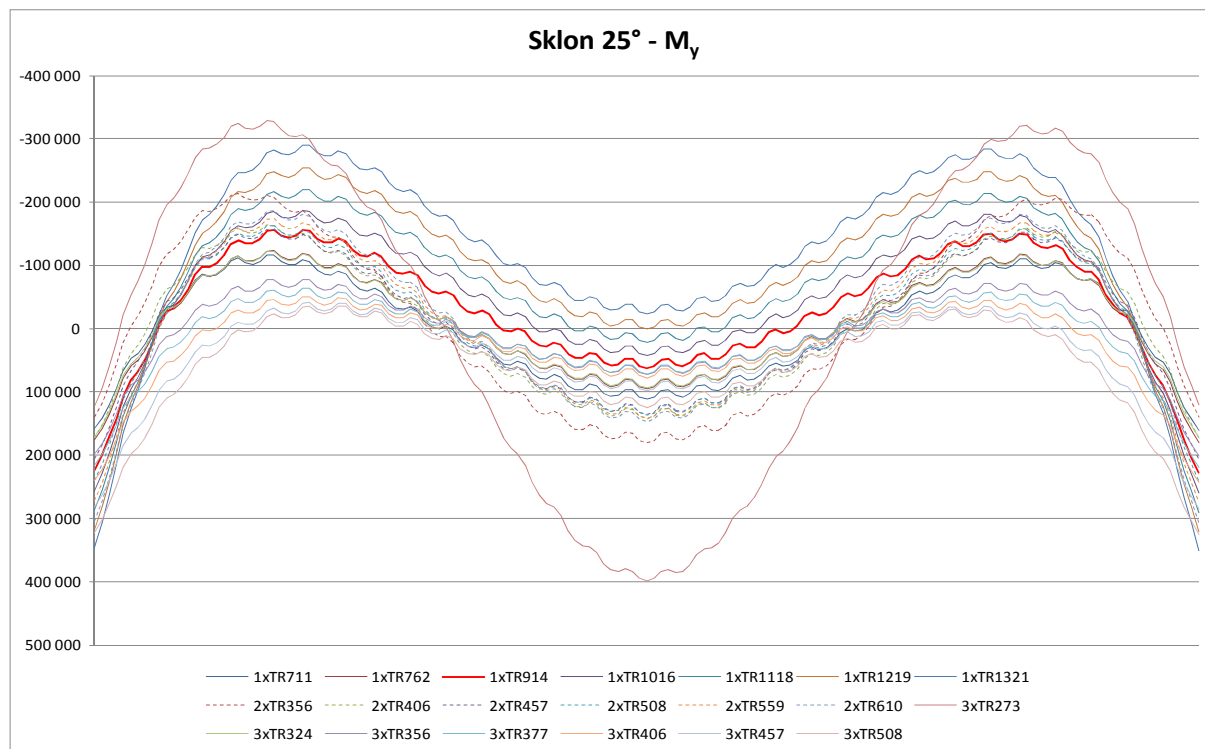


Obrázek 32. Průřezy oblouku.

Vzhledem k obtížné vyrobiteľnosti oblouku požadovaného tvaru ze dvojice a trojice trubek bylo dopředu zřejmé, že bude použita jedna ze samostatných trubek. Pro účely této studie byly ovšem výpočty provedeny i pro dvojice a trojice trubek.



Graf 5. Průběhy příčných momentů v závislosti na průřezu oblouku.



Graf 6. Průběhy podélných momentů v závislosti na průřezu oblouku.

Z grafu 5 je vidět, že pro sklon 25° je z hlediska eliminace příčných momentů uprostřed oblouku nejvhodnější trubka TR711x25. Ze stabilitních důvodů, a také kvůli únosnosti, byl ovšem pro konstrukci zvolen průřez TR914x25.

Z grafu 6 je vidět, že pro eliminaci podélných momentů ve střední části oblouku se nejvíce hodí průřez TR1219x25. Tomuto průřezu ale odpovídají při daném sklonu a vzdálenosti oblouků poměrně velké příčné momenty. Navíc je tento průřez z estetického hlediska příliš velký. Volba průřezu TR914x25 je tedy z hlediska podélných momentů méně výhodná, ale z estetického hlediska a také z hlediska příčných momentů, o jejichž eliminaci nám šlo především, vhodná.

7. DIMENZOVÁNÍ LÁVKY V PODÉLNÉM SMĚRU

7.1 MEZNÍ STAVY POUŽITELNOSTI

V mezním stavu použitelnosti byly posouzeny segmenty mostovky, náběh, betonářská výztuž, předpínací výztuž a přetvoření konstrukce.

7.1.1 Segmenty mostovky

Napětí na segmentech mostovky bylo vypočítáno dle pružnosti. Vyhoví beton v tlaku i mezní stav vzniku trhlin.

7.1.2 Náběh

Napětí na segmentech náběhu bylo vypočítáno dle pružnosti. V charakteristické a časté kombinaci na konci životnosti konstrukce a také v kvazistálé kombinaci ve výchozím stavu na průřezu vznikají v dolních vláknech nepřípustná tahová napětí.

Proto bylo nutné napětí přepočítat na potřhaném průřezu (beton v tahu nepůsobí). Po přepočítání napětí bylo prokázáno, že v charakteristické kombinaci nedojde k drcení betonu ani ke vzniku podélných trhlin, že ani v časté a v kvazistálé kombinaci nedojde k drcení betonu a že je v obou těchto kombinacích splněn požadavek dekomprese (předpínací výztuž minimálně 100mm v tlaceném betonu).

Vzhledem k tomu, že ale v náběhu vznikla tahová napětí, bude muset být náběh proveden jako monolitický, aby nedošlo k rozevírání trhlin ve spárách mezi segmenty.

Zmonolitnění náběhu už po dohodě s vedoucím práce nebylo z časových důvodů zavedeno do výpočtu.

7.1.3 Betonářská výztuž

Bylo prokázáno, že napětí v betonářské výztuži nepřekročí 80% meze kluzu. Betonářská výztuž vyhoví.

7.1.4 Předpínací výztuž

Maximální napětí v předpínací výztuži v charakteristické kombinaci, 1170MPa, nepřekročí 75% f_{pk} . Předpínací výztuž vyhoví.

7.1.5 Omezení přetvoření

Maximální vodorovný průhyb, 40mm, se objeví na oblouku. Maximální svislý průhyb, 46mm, se objeví na mostovce. Obě tyto hodnoty jsou menší, než je limitní hodnota průhybu $L/250$, tj. 374mm. Lávka z hlediska omezení přetvoření vyhoví.

7.2 MEZNÍ STAVY ÚNOSNOSTI

V mezním stavu únosnosti byly posouzeny segmenty a náběh na ohyb a na smyk, a dále ocelový oblouk a závěsy.

7.2.1 Segmenty mostovky

Segmenty mostovky byly v mezním stavu únosnosti za ohybu posouzeny na kombinace obsahující minimální a maximální podélný moment a maximální a minimální příčný moment.

Kombinace obsahující maximální podélný moment a maximální a minimální příčný moment vyhověly, aniž by bylo nutné navrhovat betonářskou výztuž.

Pro kombinaci obsahující minimální podélný moment bylo nutné navrhnout betonářskou výztuž, která bude rozmístěna v mostovce betonované in-situ. Bylo navrženo 28 prutů průměru 12mm, které budou v mostovce rozmístěny po 150mm.

Segmenty v mezním stavu únosnosti ve smyku vyhoví, aniž by bylo nutné navrhovat smykovou výztuž.

7.2.2 Náběh

Náběh byl v mezním stavu únosnosti za ohybu posouzen celkem ve třech řezech, z opěry, uprostřed, a na styku se segmenty. Posuzované kombinace byly voleny stejným způsobem jako kombinace pro posouzení segmentů.

Kombinace obsahující maximální podélný moment a maximální a minimální příčný moment vyhověly, aniž by bylo nutné navrhovat betonářskou výztuž.

Pro kombinaci obsahující minimální podélný moment bylo nutné navrhnout betonářskou výztuž, která bude rozmístěna v mostovce betonované in-situ. Bylo navrženo 28 prutů průměru 12mm, které budou v mostovce rozmístěny po 150mm.

V náběhu bylo nutné v mezním stavu únosnosti ve smyku navrhnout spony. Spony byly navrženy průměru 12mm, vzdálenost $s=150\text{mm}$ a v jednom řezu jich bude rozmístěno 16.

7.2.3 Ocelový oblouk

Výpočet konstrukce v programu ANSYS byl proveden nelineárně, s uvažováním teorie druhého řádu. Při posouzení jsme proto nemuseli počítat vzpěr, stačilo porovnání napětí na průřezu s mezí kluzu použité oceli.

Ocelový oblouk byl posouzen na kombinace vnitřních sil obsahující maximální a minimální normálovou sílu, maximální a minimální podélné momenty a maximální a minimální příčné momenty.

Ocelový oblouk na mezní stav únosnosti vyhoví.

7.2.4 Závěsy

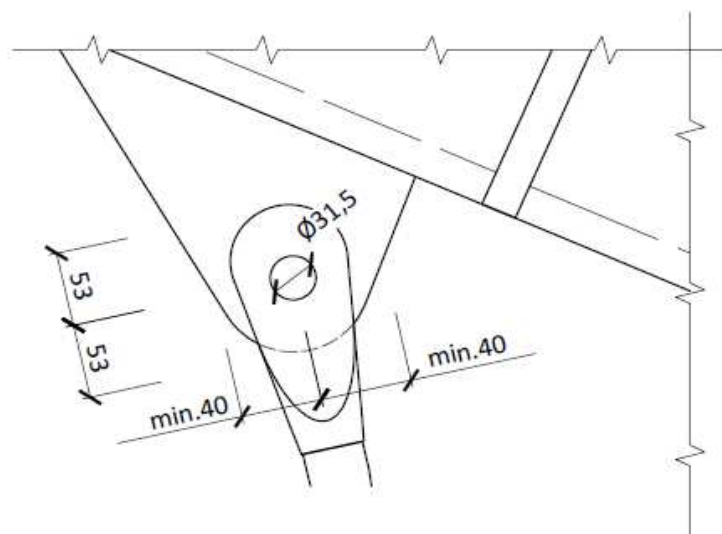
Závěsy budou zhotoveny z táhel Macalloy 520 závitů M30. Bylo posouzeno krajní táhlo, ve kterém vzniká maximální tahová síla.

Táhla na mezní stav únosnosti vyhoví.

8. SPOJE A PŘÍPOJE

8.1 PŘÍPOJENÍ TÁHEL

Připojení táhel k ocelovému oblouku, případně k plechu zabetonovanému do segmentů mostovky, je realizováno dle katalogu Macalloy pomocí styčnickového plechu jakosti S355 (Obrázek 33).



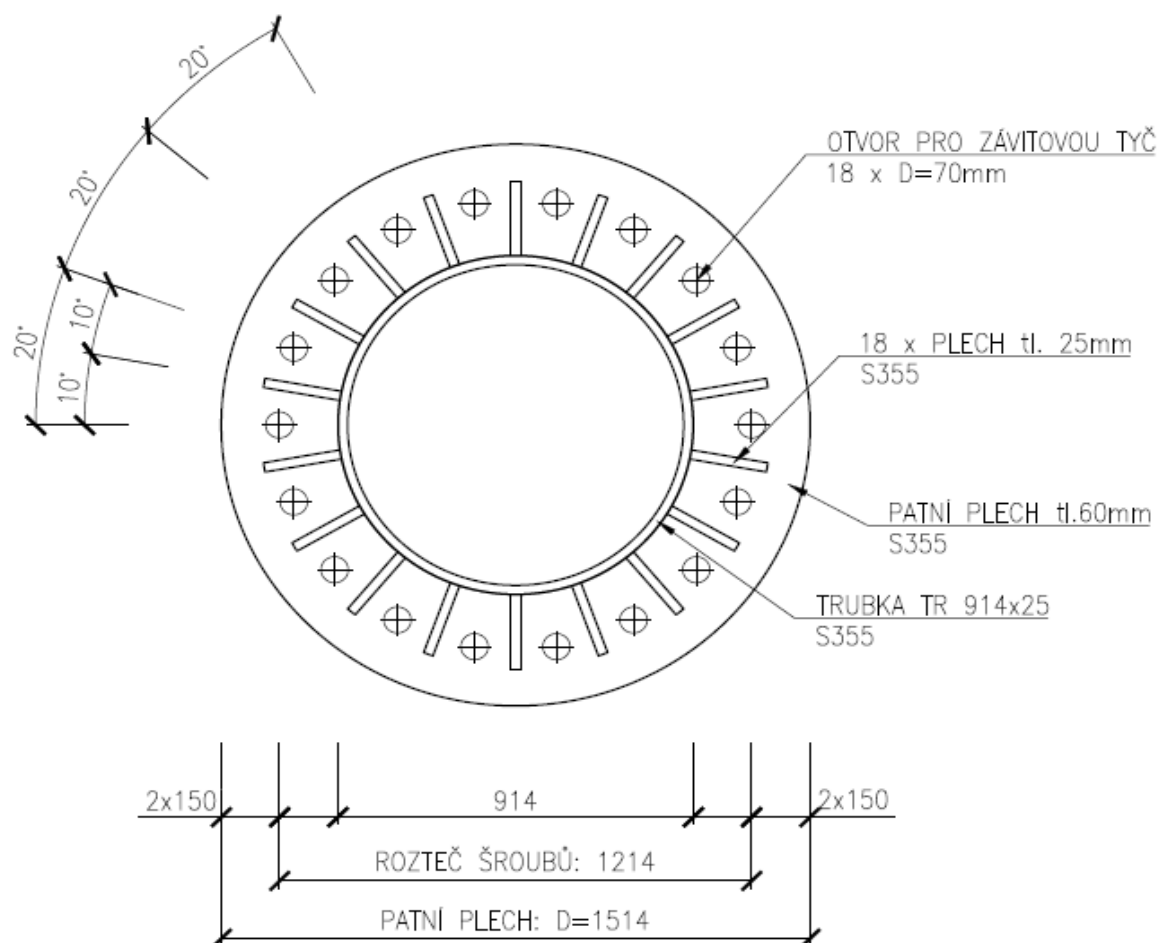
Obrázek 33. Připojení táhla Macalloy k oblouku.

Připojení táhla bylo posouzeno na střih, ohyb, kombinaci ohybu a smyku, a na otláčení. Byl posouzen také oslabený styčnickový plech.

Připojení táhel pomocí styčnickového plechu vyhoví.

8.2 PŘÍPOJENÍ OBLOUKU NA OPĚRU

Připojení oblouku na opěru bude realizováno přes patní plech tloušťky 60mm pomocí 18-ti závitových tyčí M64 8.8 (Obrázek 34). Spoj je posouzen jako momentový, moment je přenášen tahem v závitových tyčích.



Obrázek 34. Kotvení patního plechu.

Patní plech vyhoví. Závitové tyče byly posouzeny na tah, páčení, smyk a na kombinaci tahu a smyku a také vyhoví.

8.3 SPOJENÍ SEGMENTŮ ČEPY V MONTÁŽNÍM STAVU

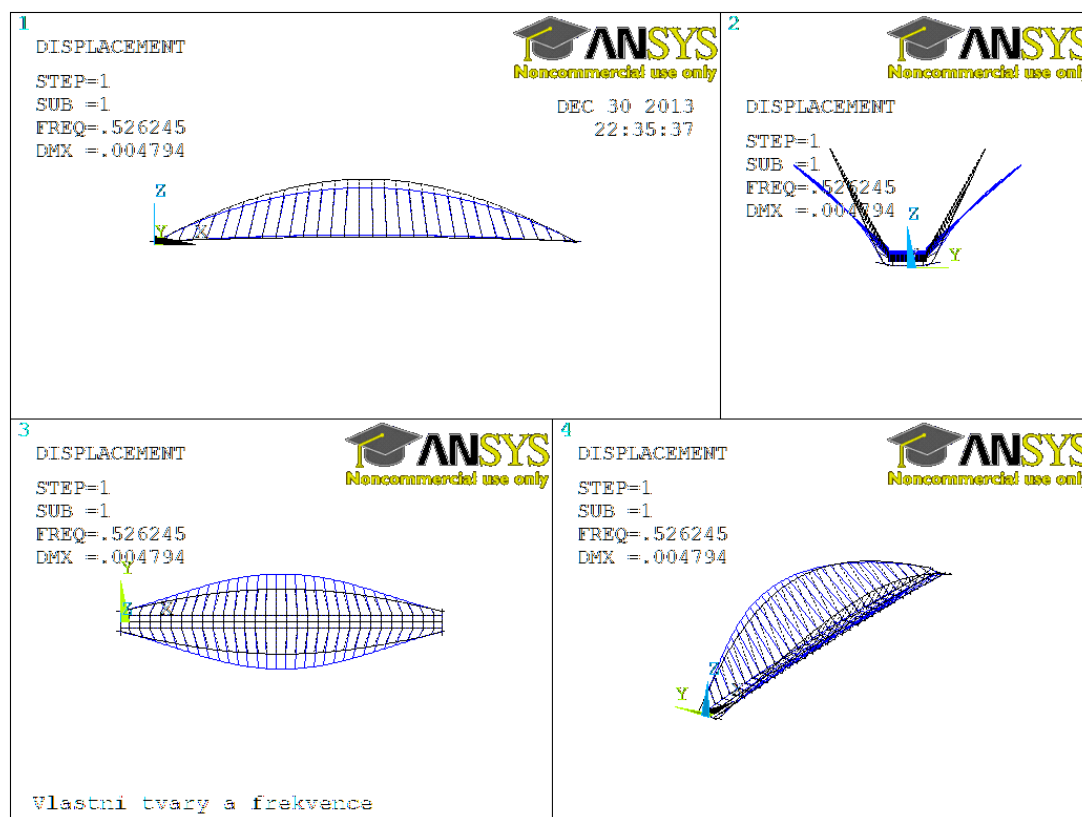
V montážním stavu budou segmenty na jednom konci zavěšeny na závěsech, na druhém konci budou vzájemně spojeny pomocí čepů. Čep je průměru 24mm, plechy jsou tloušťky 12mm jakosti S235.

Připojení čepů bylo posouzeno na střih, ohyb, kombinaci ohybu a smyku, a na otláčení. Spojení segmentů čepů v montážním stavu vyhoví.

9. DYNAMICKÉ POSOUZENÍ LÁVKY

9.1 MODÁLNÍ ANALÝZA

V modální analýze bylo zjišťováno prvních 20 vlastních tvarů lávky, výsledky viz příloha P6.03. Na obrázku 35 je pro ilustraci uveden 1. vlastní tvar. Na základě analýzy výsledků modální analýzy byly vybrány čtyři uzly, do kterých byly postupně umístěny síly pro harmonickou analýzu.



Obrázek 35. První vlastní tvar.

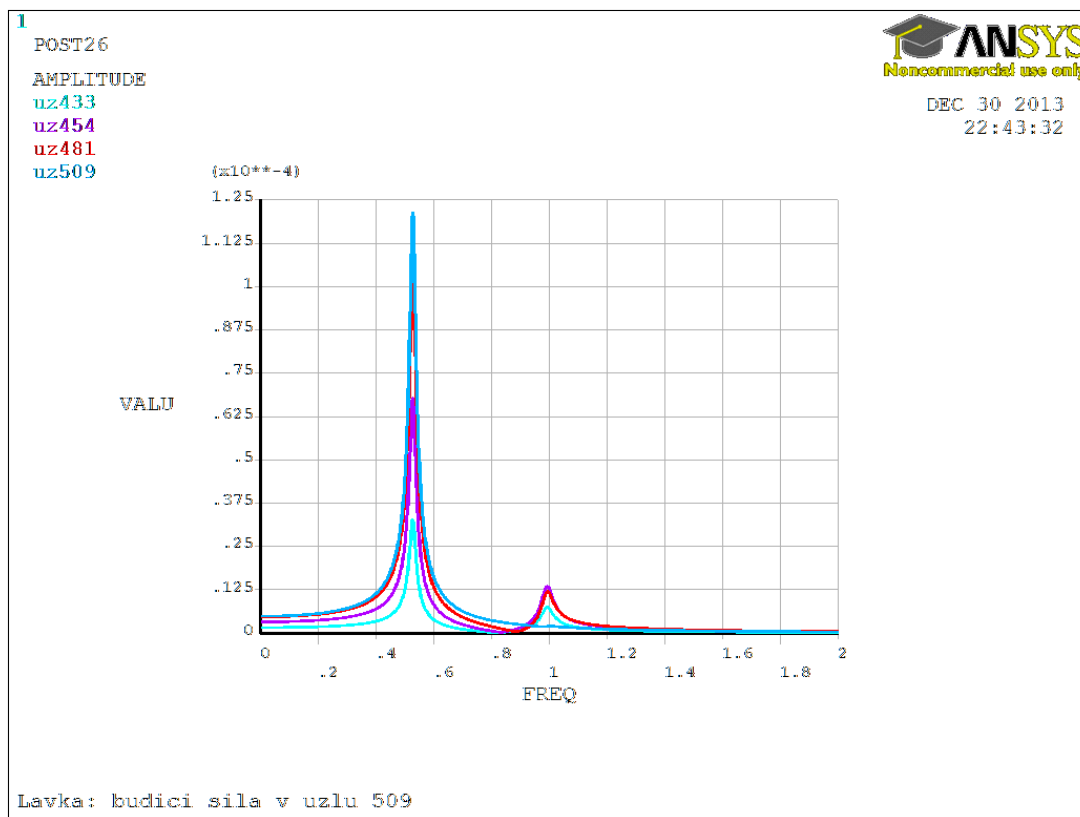
9.2 HARMONICKÁ ANALÝZA

Při harmonické analýze byla budící síla o velikosti 180 kN umístěna postupně do všech čtyř vybraných uzlů, kde kmitala s proměnnou frekvencí od 0 do 2Hz, frekvence byla měněna v tisíci přírůstcích.

Na obrázku 36 jsou uvedeny výsledky harmonické analýzy pro budící sílu umístěnou v polovině rozpětí lávky. Výsledky pro další tři uzly jsou uvedeny v příloze P6.03.

Z rezonančních frekvencí a příslušných amplitud byly vypočítány amplitudy zrychlení. Ty byly porovnány s limitními hodnotami vypočítanými pomocí první vlastní frekvence lávky, viz kapitola 10 Statického výpočtu.

Lávka na dynamické posouzení vyhoví.



Obrázek 36. Výsledky harmonické analýzy - budící síla v polovině lávky.

10. ÚČINKY DOTVAROVÁNÍ A SMRŠŤOVÁNÍ NA KONSTRUKCI

Dotvarování a smršťování bylo ve všech výpočtech po dohodě s vedoucím práce zanedbáno. Vycházeli jsme z toho, že je oblouk ocelový, tudíž nedotvaruje ani nesmršťuje. Pro ověření hypotézy, že dotvarování a smršťování nemá na konstrukci významný vliv, byl proveden kontrolní výpočet v ANSYSu, ve kterém byl použit třetinový modul pružnosti betonu.

Výsledky z kvazistálé kombinace zatížení na konci životnosti konstrukce pro $E_c = 37\text{ GPa}$ byly porovnány s výsledky z kvazistálé kombinace zatížení v T_0 pro $E_c = 12.5\text{ GPa}$, viz kapitola 11 Statického výpočtu.

Účinek dotvarování a smršťování betonu, který by se projevil na ocelovém oblouku, byl odhadnut na cca 10 MPa. To je vzhledem k únosnosti oblouku zanedbatelná hodnota.

Účinek dotvarování a smršťování betonu, který by se projevil na předpjatém pásu, byl odhadnut na cca 1,5 MPa. Z porovnání také plyne, že dotvarování a smršťování snižuje napětí v extrémně namáhaných tažených vláknech. Výsledky, na které byl předpjatý pás posouzen, jsou tedy konzervativní.

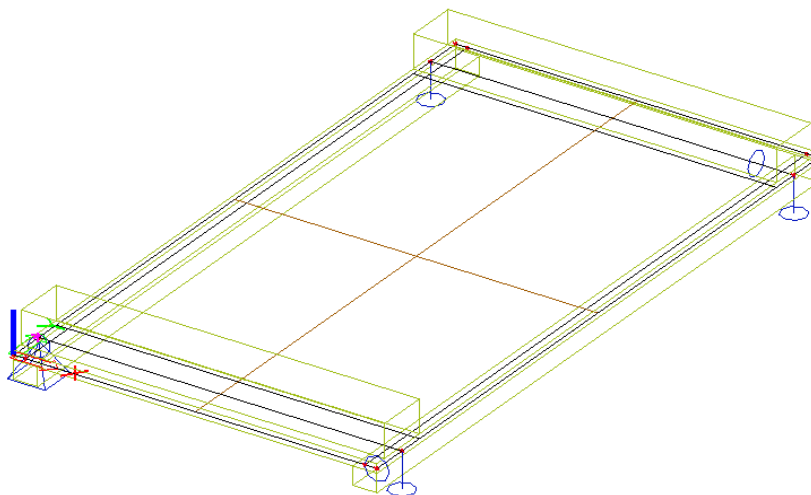
11. MODEL PRO PŘÍČNÝ SMĚR

V příčném směru byly po dohodě s vedoucím práce modelovány pouze prefabrikované segmenty.

Pro segmenty byly vytvořeny dva modely, model pro montážní stav, kdy jsou segmenty zavěšeny na závěsech, a model pro finální stav, kdy jsou segmenty zmonolitněny. Výpočetní modely byly vytvořeny v programu Nemetschek SCIA.

11.1 SEGMENT V MONTÁŽNÍM STAVU

Segment byl modelován jako prostě podepřená deska se žebry (Obrázek 37). Segment je v montážním stavu zatížen vlastní tíhou, tíhou mokrého betonu, radiálními silami od předpětí a také montážním zatížením o velikosti 1 kN/m^2 . Zatížení je podrobně popsáno v kapitole 12.1.1 Statického výpočtu.



Obrázek 37. Model segmentu v montážním stavu.

V montážním stavu byl segment dimenzován jak v podélném, tak v příčném směru, protože do něj ještě není vneseno předpětí. Byla dimenzována jak deska, tak žebra.

V podélném i příčném směru byly v desce navrženy pruty profilu 10mm po 150-ti milimetrech.

Do žebra působícího v podélném směru bylo navrženo 6 prutů profilu 10mm, do žebra působícího v příčném směru byly navrženy 4 pruty profilu 16mm ve dvou řadách.

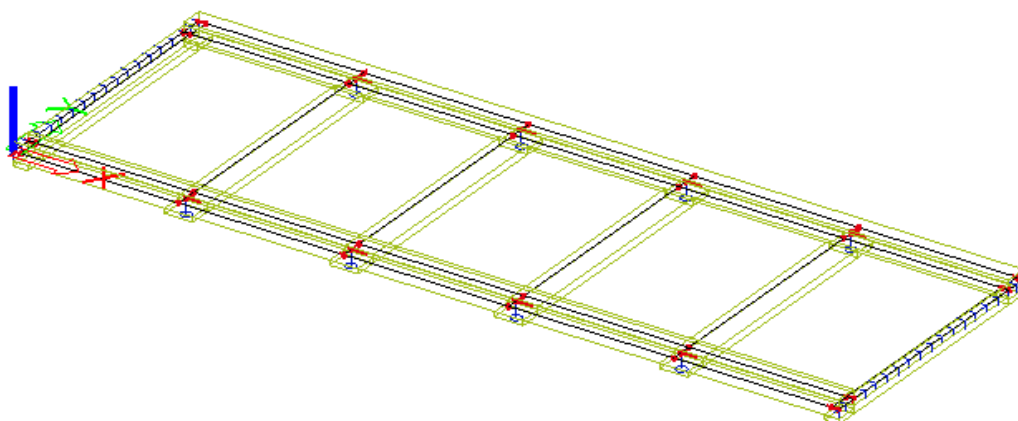
Na smyk stačí obě žebra vyztužit konstrukčně, návrh smykové výztuže není ani v jednom z nich nutný.

11.2 SEGMENT VE FINÁLNÍM STAVU

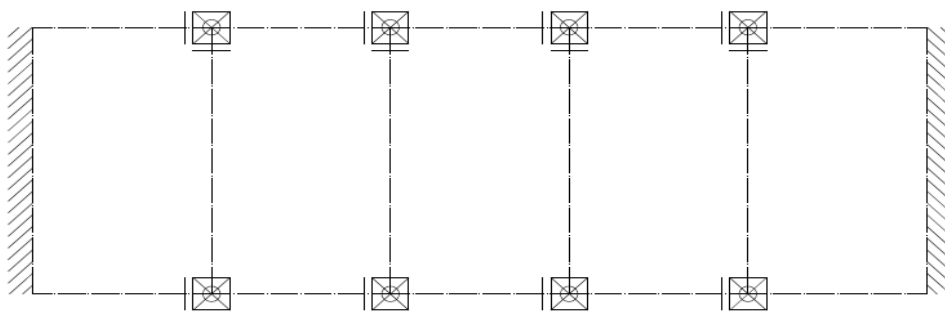
Ve finálním stavu je segment zabudován do konstrukce a zmonolitněn s ostatními segmenty. Bylo proto namodelováno pět segmentů vedle sebe (Obrázek 38), segment ve finálním stavu byl dimenzován na vnitřní síly stanovené na prostředním segmentu. Podepření segmentů v příčném směru je znázorněno na obrázku 39.

V modelu pro finální stav jsou žebra modelována pouze v příčném směru, v místě římsy v podélném směru je zvětšena tloušťka desky.

Segment byl posouzen s výztuží navrženou v předchozím modelu. Deska i žebro v příčném směru s tímto vyztužením na ohyb vyhoví. Na smyk opět postačí pouze konstrukční vyztužení.



Obrázek 38. Model segmentu ve finálním stavu.



Obrázek 39. Model segmentu ve finálním stavu.

12. ZÁVĚR

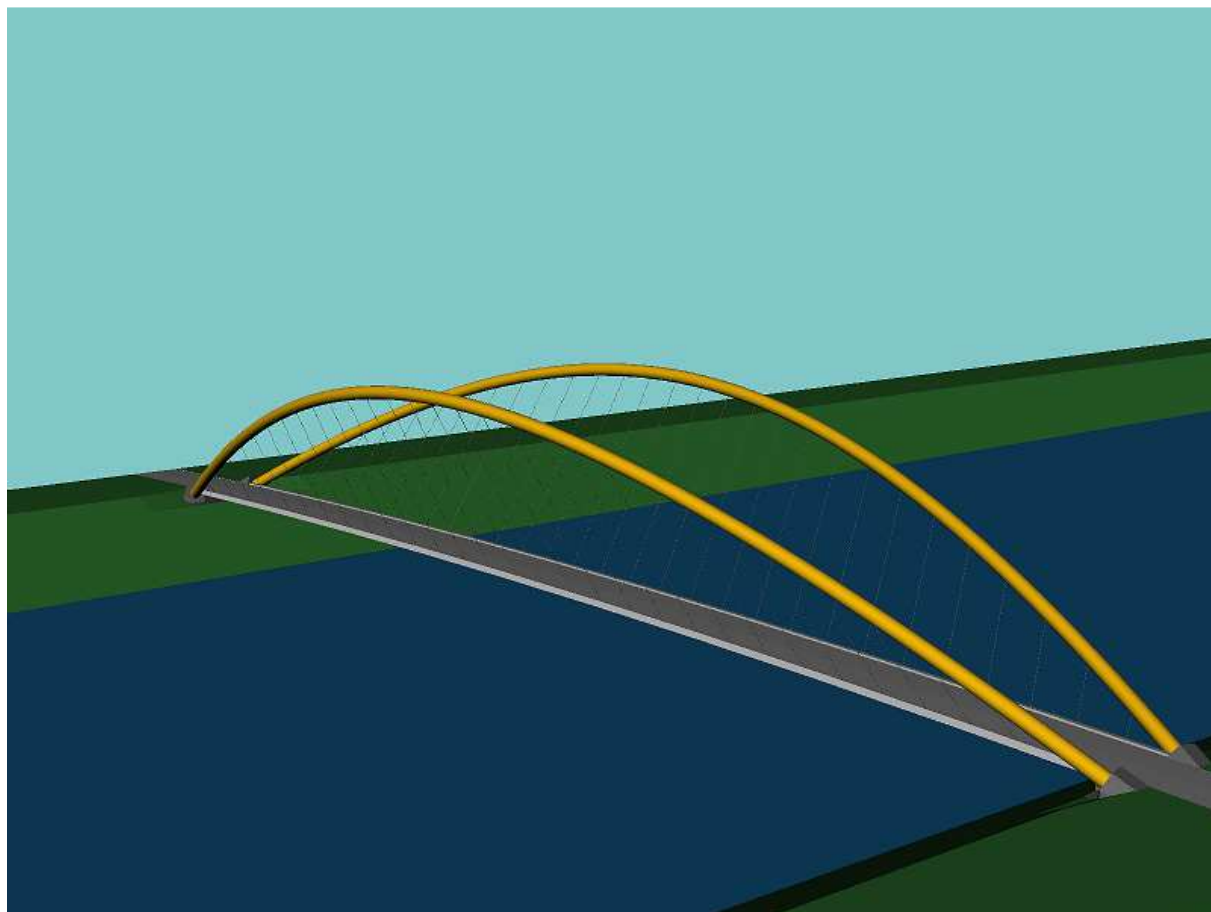
V rámci diplomové práce jsem v předběžné fázi navrhla tři varianty přemostění. Z nich jsem pro další zpracování zvolila lávku podporovanou ocelovým obloukem.

Analýzu konstrukce v podélném směru jsem provedla v programu ANSYS 12.0 včetně zahrnutí vlivu postupu výstavby na konstrukci. Dotvarování a smršťování bylo vzhledem k charakteru konstrukce zanedbáno. Nakonec jsem prokázala, že jeho vliv je malý. Na modelu konstrukce pro podélný směr jsem také provedla dynamické posouzení lávky.

V softwaru Nemetschek SCIA jsem vytvořila dva modely pro analýzu konstrukce v podélném směru. První byl pro montážní stav, druhý pro finální stav.

Konstrukci jsem posuzovala dle teorie mezních stavů v souladu s požadavky platných norem.

Během řešení práce jsem si vyzkoušela programový systém ANSYS 12.0, který je dle mého názoru výborným nástrojem pro pochopení chování konstrukce.



Obrázek 40. Vizualizace.

13. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ČSN EN 1992-1-1. Eurokód 2: *Navrhování betonových konstrukcí: Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [2] ČSN EN 1992-2. Eurokód 2: *Navrhování betonových konstrukcí: Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [3] NAVRÁTIL, Jaroslav. *Předpjaté betonové konstrukce*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2008. ISBN 978-80-7204-561-7.
- [4] *Navrhování betonových konstrukcí 1: Prvky z prostého a železového betonu*. Praha: ČBS servis, s.r.p., 2006. ISBN 978-80-903807-5-2.
- [5] STRÁSKÝ, Jiří. *Stress ribbon and cable-supported pedestrian bridges*. 1. vyd. London: Thomas Telford books, 2005. ISBN 0 7277 3282 X.
- [6] VSL [online]. 2007-2014 [cit. 2014-01-03]. Dostupné z: www.vsl.cz
- [7] *Systém konstrukčních táhel Macalloy* [online]. 2013 [cit. 2014-01-03]. Dostupné z: www.tension.cz
- [8] *Ferona: Sortimentní katalog* [online]. 2004-2014 [cit. 2014-01-03]. Dostupné z: <http://www.ferona.cz/cze/katalog/search.php>
- [9] *Fabory* [online]. 2009-2012 [cit. 2014-01-03]. Dostupné z: <http://www.fabory.cz/>
- [10] *HILTI online* [online]. 2009-2011 [cit. 2014-01-03]. Dostupné z: <http://www.hilti.cz/holcz/>
- [11] *ANSYS Help*. 2010.



14. SEZNAM PŘÍLOH

P0 Průvodní a technická zpráva

P1 Použité podklady a varianty řešení

P1.01 Podklady

P1.02 Studie lávky: varianta 1

P1.03 Studie lávky: varianta 2

P1.04 Studie lávky: varianta 3

P2 Přehledné výkresy

P2.01 Přehledná situace

P2.02 Přehledný podélný pohled

P2.03 Přehledný příčný řez

P3 Podrobné výkresy

P3.01 Segment S1: Výkres tvaru

P3.02 Segment S1: Výkres výztuže

P3.03 Segment S2: Výkres tvaru

P3.04 Segment S2: Výkres výztuže

P3.05 Monolitický náběh: Výkres tvaru

P3.06 Monolitický náběh: Výkres tvaru - detaily

P3.07 Monolitický náběh: Výkres výztuže - část 1

P3.08 Monolitický náběh: Výkres výztuže - část 2

P3.09 Vedení kabelových drah

P3.10 Výkres tvaru oblouku

P4 Postup výstavby

P4.01 Postup výstavby - část I

P4.02 Postup výstavby - část II

P5 Vizualizace

P6 Statický výpočet

P6 Statický výpočet

P6.01 Mezní stavy použitelnosti

P6.02 Mezní stavy únosnosti

P6.03 Dynamika