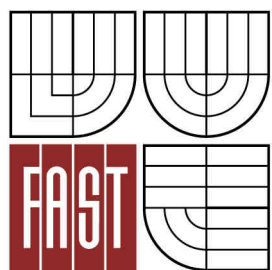




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV BETONOVÝCH A ZDĚNÝCH KONSTRUKCÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF CONCRETE AND MASONRY STRUCTURES

LÁVKA PRO PĚŠÍ PŘES ŘEKU MORAVU

PEDESTRIAN BRIDGE ACROSS THE RIVER MORAVA

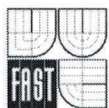
DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JAN NOVÁČEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. RADIM NEČAS, Ph.D.



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. JAN NOVÁČEK
Název Lávka pro pěší přes řeku Moravu
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 konstrukci lávky pro pěší podporovanou obloukem.

Podrobný návrh nosné konstrukce vybrané varianty mostu provedte 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 uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování 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 práce je návrh lávky pro pěší přes řeku Moravu. Jsou srovnány 3 varianty řešení konstrukce. Dále je práce zaměřena na variantu předpjatého pásu podepřeného betonovým obloukem. Geometrie lávky je hledána tak, aby se vytvořil samokotvený systém. Konstrukce je následně posouzena dle Eurocodů.

Klíčová slova

lávka pro pěší, předpjatý pás, předpjatý pás podepřený betonovým obloukem

Abstract

Subject of the work is design of pedestrian bridge across the river Morava. There are compared 3 variants of structures. Thesis is focused on stress ribbon supported by arch. The geometry of initial stage has been searched to form self-anchored structural system. The structure is verified in according to the European Standards.

Keywords

pedestrian bridge, stress ribbon, stress ribbon supported by concrete arch

Bibliografická citace VŠKP

NOVÁČEK, Jan. *Lávka pro pěší přes řeku Moravu*. Brno, 2013. 27 s., 237 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 zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 17.1.2014

.....
podpis autora

Poděkování:

Rád bych na tomto místě poděkoval vedoucímu práce Ing. Radimu Nečasovi, Ph.D. za jeho odborné rady a především za čas, který věnoval konzultacím této práce.

V Brně dne 17.1.2014

.....
podpis autora

Obsah

Obsah	7
1 Úvod	8
2 Studie variant řešení	8
2.1 Varianta 1 – předpjatý pás podepřený obloukem.....	8
2.2 Varianta 2 – zavěšená lávka na šikmém pylonu	9
2.3 Varianta 3 – oblouková lávka s dolní mostovkou.....	9
2.4 Vyhodnocení variant.....	10
3 Řešení vlastní konstrukce	11
3.1 Statický systém	11
3.2 Konstrukční prvky	12
4 Geometrie	14
4.1 Hledání výchozí geometrie	14
4.1.1 Předpínací síla v předpjatém pásu	14
4.1.2 Horizontální reakce v patě oblouku.....	17
4.2 Nalezená výchozí geometrie.....	19
5 Posouzení konstrukce	20
5.1 Mezní stav použitelnosti	20
5.2 Mezní stav únosnosti	21
5.3 Dynamická analýza.....	22
6 Závěr	24
7 Seznam použitých zdrojů	25
7.1 Seznam použité literatury	25
7.2 Seznam použitých internetových zdrojů.....	26
7.3 Použitý software	26
8 Seznam příloh	27

1 Úvod

Součástí návrhu každé nové konstrukce bývá uvážení řešení v několika variantách. Stejněho přístupu je použito i v této diplomové práci, kde je navrženo několik možných variant přemostění přes řeku a navzájem jsou mezi sebou porovnány.

Zvolená varianta řešení je dále podrobněji rozpracována včetně analýzy hledání vhodné výchozí geometrie. Pro tuto konstrukci je následně vypracován statický výpočet s posudky dle platných norem včetně základní dynamické analýzy chování lávky.

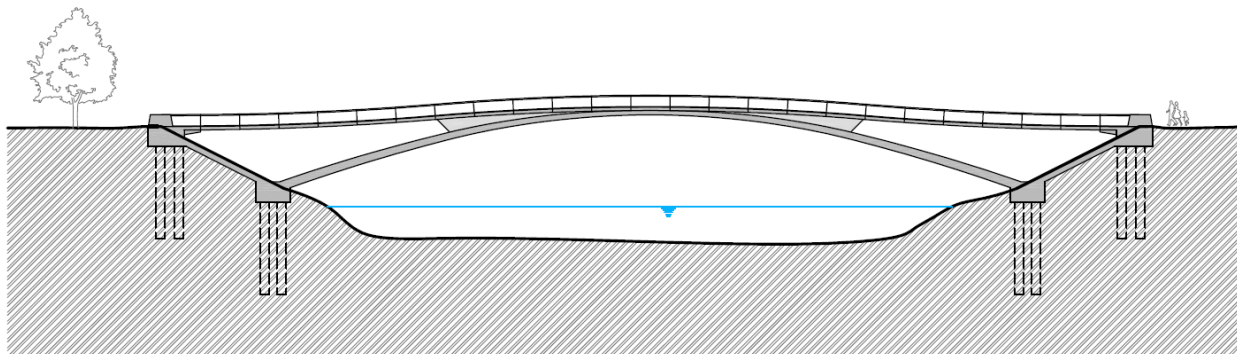
2 Studie variant řešení

Umístění navrhované lávky pro pěší je v oblasti jižně od Olomouce, kde řeka Morava dosahuje šířky při běžné hladině cca 45 metrů. Vzhledem k zadanému příčnému je předpokládána celková délka mostu cca 75 metrů. Upřednostňována je varianta, ve které části konstrukce nezasahují přímo do oblasti obvyklé hladiny vody.

Jedná se tedy o relativně velké rozpětí, na kterém se neuplatní obvyklé řešení lávek menších rozpětí. S ohledem na zadané předpoklady jsou vypracovány celkem 3 studie řešení přemostění.

2.1 Varianta 1 – předpjatý pás podepřený obloukem

Navržená konstrukce lávky je uvažována jako samokotvený systém, který zatěžuje základy pouze svíslými silami. Mostovku tvoří předpjatý pás ze segmentů, který je ve své střední části podporován betonovým plochým obloukem s proměnnou výškou. Pro vytvoření samokotveného systému je pata oblouku spojena s kotevními bloky předpjatého pásu. Vlastní předepnutí mostovky je navrženo pomocí externích kabelů, které jsou spřažené s mostovkou

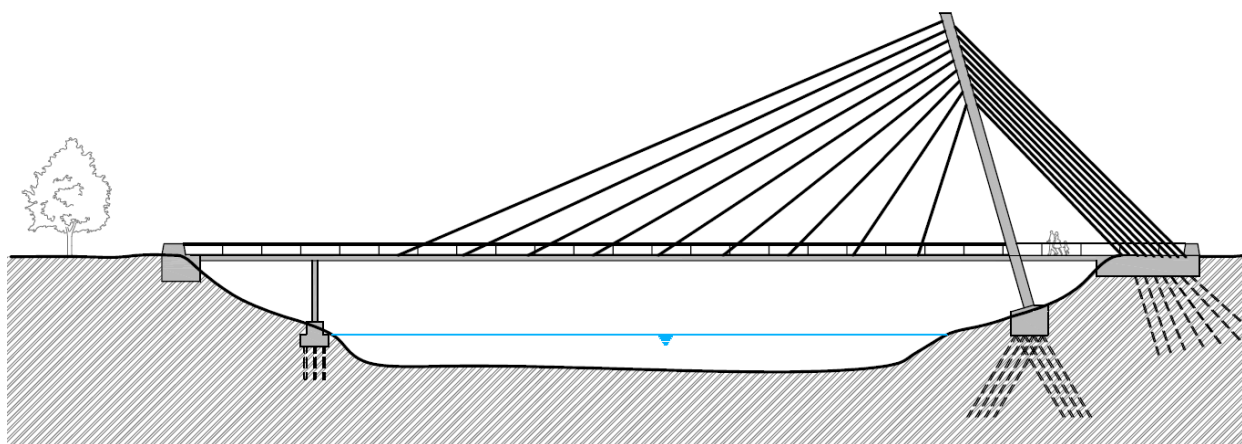


Obr. 1 Schéma Varianty 1 – předpjatého pásu podepřeného obloukem

Tento typ konstrukce je uvážení i s ohledem na nedalekou již realizovanou lávku pro pěší stejného typu, která převádí provoz pěších a cyklistů přes rychlostní silnici R35 na obchvatu Olomouce.

2.2 Varianta 2 – zavěšená lávka na šikmém pylonu

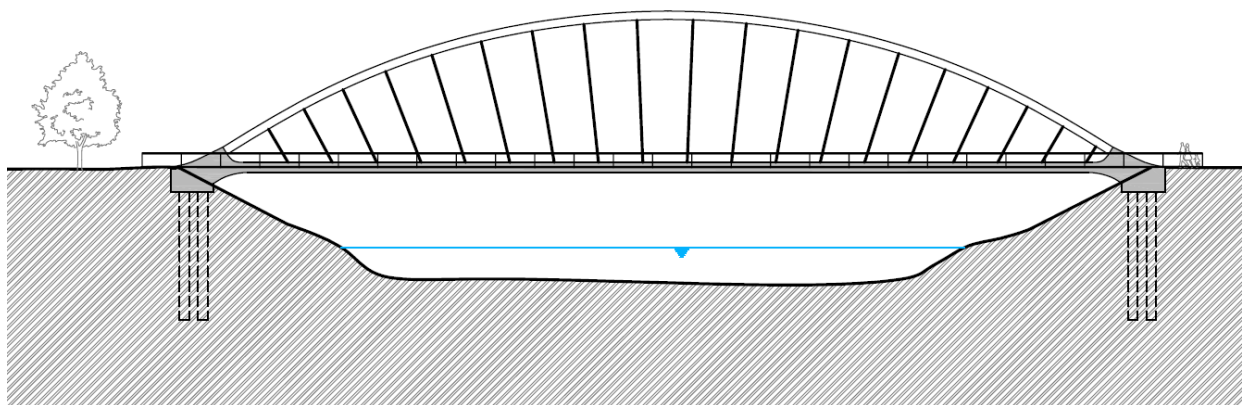
V této variantě lávku tvoří mostovka, která je zavěšená na šikmém pylonu. Uspořádání závěsů je směrem k řece semiharfové a na stranu od řeky rovnoběžné. Na druhém břehu je navržen jeden štíhlý pilíř podporující mostovku v její podélné ose.



Obr. 2 Schéma Varianty 2 – zavěšená lávka na šikmém pylonu

2.3 Varianta 3 – oblouková lávka s dolní mostovkou

V poslední variantě je vypracován návrh lávky, která je tvořena ocelovým obloukem umístěným v podélné ose mostovky. Pro zachycení horizontálních sil je využito betonové předepnuté mostovky, která tvoří „táhlo“ v tomto konstrukčním systému. Integrovaná opěra je v místě styku s ocelovým obloukem zvýšena a tvoří tak plynulý přechod mezi mostovkou a obloukem. Jednotlivé závěsy mají radiální uspořádání a sbíhají se ke středu mostovky. V příčném řezu je zavěšen centrální nosník a z něj vybíhají konzoly na obě strany.

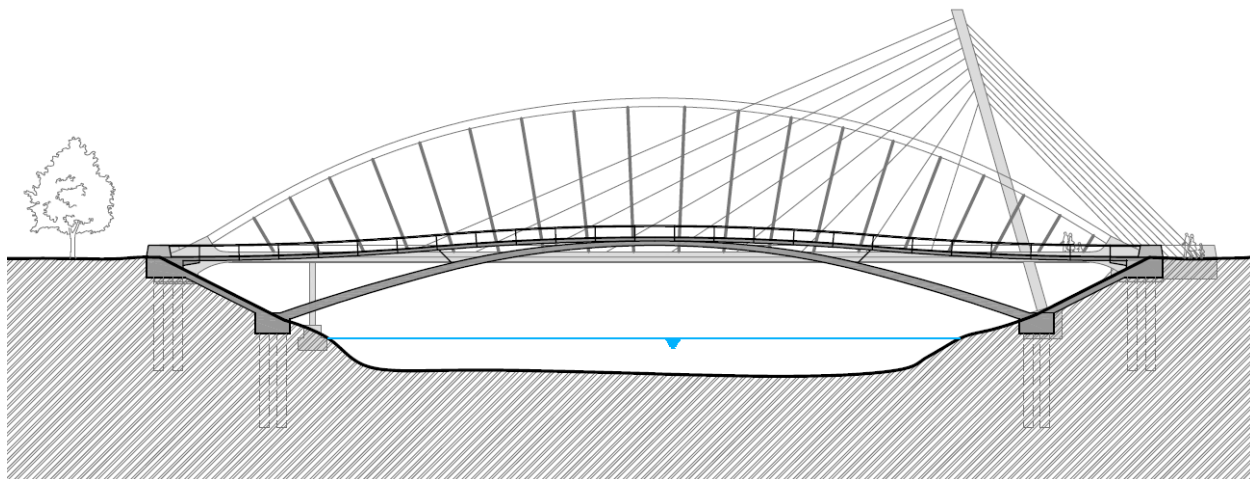


Obr. 3 Schéma Varianty 3 – oblouková lávka s dolní mostovkou

2.4 Vyhodnocení variant

Každá navržená varianta respektuje požadavky, které jsou uvažovány, a zajišťuje tak přemostění řeky Moravy pro pěší. Z hlediska porovnání statické analýzy mají Varianty 1 a 3 obdobné statické systémy, ve kterých je navržena samokotvená konstrukce. U obou variant je nutné najít výchozí geometrii, ve které budou působit pouze svislými reakcemi. Při podrobnější analýze Varianty 2 je nutné optimalizovat geometrii skloněného pylonu s ohledem na vyrovnání sil v závěsech z obou stran.

Rozhodujícím faktorem pro výběr varianty je samotné tvarové řešení konstrukce a její začlenění do okolní krajiny. Vlastní srovnání dimenzí jednotlivých návrhů je vidět na Obr. 4, kde tmavší barvou je zobrazena Varianta 1 jako porovnávací vzor. Vzhledem k okolnímu rázu krajiny, která je v oblasti inundace Moravy velmi plochá, nejlépe respektuje navazující prostor Varianta 1. Proto je v další části této práce rozebrána právě konstrukce lávky tvořená předpjatým pásem podepřeným obloukem.



Obr. 4 Srovnání tvarů jednotlivých variant

3 Řešení vlastní konstrukce

3.1 Statický systém

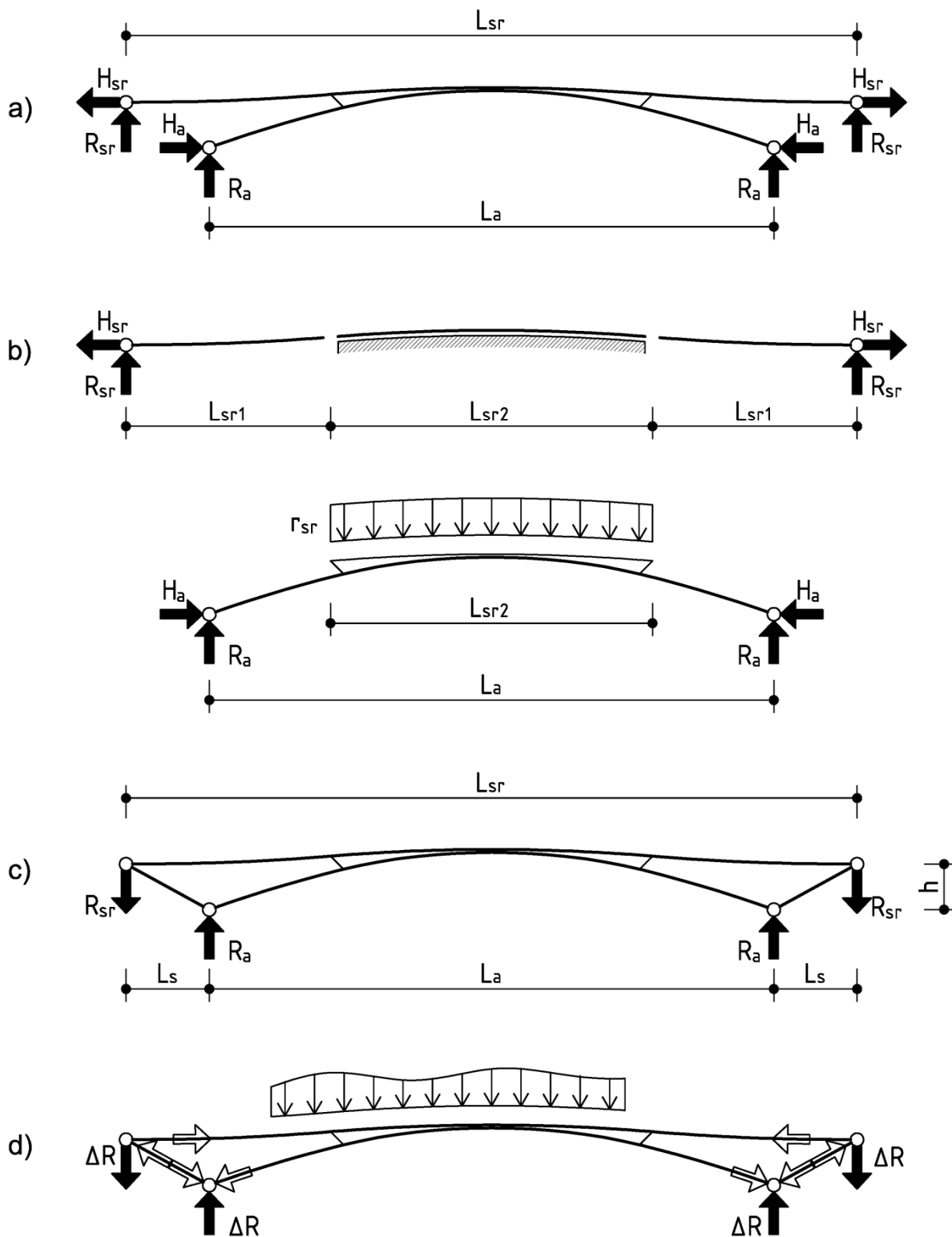
Lávka je tvořena předpjatým pásem, který je podporován ve své středové části plochým obloukem. Předpjatý pás je s patou oblouku spojen tuhými betonovými vzpěrami, které zajišťují přenos vodorovné síly. Díky vhodně zvolené geometrii se celý systém chová jako samokotvený, kde horizontální síla v patě oblouku je vyrovnávána silou předpínacích lan v předpjatém pásu.

Působení konstrukce bez použití vzpěr je zřejmé z Obr. 5a. Při použití tohoto statického systému je potřeba přenést velké horizontální složky do základů. Na Obr. 5b je ukázáno, jak předpjatý pás působí na oblouk v podepírané části vlastní tíhou i radiálními silami, které způsobuje zakřivení předpínacích kabelů. Pokud je konstrukce doplněna o vzpěry nevznikne automaticky samokotvený systém, ten nastane pouze při nalezení výchozí geometrie, v níž jsou horizontální složky H_{sr} v předpjatém pásu (předpětí v předpínacích lanech) vyrovnány horizontální silou H_a způsobenou reakcí oblouku. Při takovém nastavení systému jsou základy zatěžovány pouze svislými reakcemi. Moment $h \cdot H_a$, který je vyvolaný vodorovnou silou, je přenášen do základů momentem $L_s \cdot \Delta R$.

Konstrukce ve své výchozí geometrii je namáhána tlakem v oblouku a ve vzpěrách. Naopak tahem je namáhán pouze předpjatý pás. Zde je s výhodou použito předpětí mostovky, které způsobuje tlakovou rezervu v betonu. Cílem celého statického systému je, aby i mostovka byla během své návrhové životnosti namáhána pouze tlakem a nedocházelo v žádném místě ke vzniku trhlin.

Tento typ konstrukcí je tvořen segmentovou mostovkou, pro kterou je ještě více zásadní podmínka namáhání pouze tlakem během své životnosti. Z praktických důvodů není uvažováno s pevností betonu v tahu, jelikož nelze zaručit neotevření spár mezi segmenty, které jsou zpravidla tvořeny dobetonávkou.

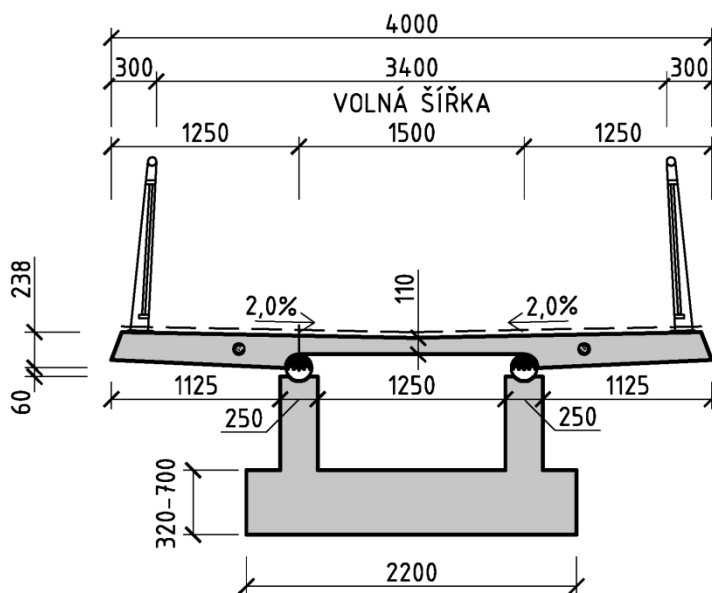
Ve střední části je předpjatý pás podepřený obloukem, se kterým není po celé délce spojen, ale pouze ve vrcholu oblouku. Na krajích je tak umožněno předpjatému pásu se oddálit od sedla při předpínání a ochlazení. Při zvýšení zatížení nebo oteplení se předpjatý pás může zpět přivinout k sedlu.



Obr. 5 Princip samokotveného systému předpjatého pásu podepřeného obloukem

3.2 Konstrukční prvky

V předchozí kapitole byl popsán princip statického působení konstrukce. V této části jsou rozebrány základní prvky, které tvoří konstrukci.



Obr. 6 Schéma typického příčného řezu

Externí předpínací lana jsou navržena ve formě monostrandů, které jsou umístěny v ocelové trubce. Pro zvýšení ochrany předpínacích lan je navrženo zainjektování monostrandů v trubce cementovou injektážní směsí. Tento systém si zachová vlastnosti monostrandů jako nesoudržného předpětí a zároveň se díky injektáži ještě zvýší jeho ochrana.

Základy pro ukotvení předpjatého pásu jsou založeny na velkopřůměrových pilotách. Ve směru předpjatého pásu je základ tvořen lineárním monolitickým náběhem, ze kterého vybíhají dva externí předpínací kabely.

Ve střední části je předpjatý pás, respektive externí kabely jsou podpírány monolitickými betonovými žebry vybíhajícími z oblouku. Žebro je tvarově upraveno v horní části v souladu s geometrií trubky externího předpětí. Střední segment je navržen pro monolitické spojení s obloukem.

Oblouk je také monolitický betonový. S ohledem na vzhled i statické působení je zvolen proměnný průřez oblouku. Ve svém vrcholu má teoretickou výšku 320 mm a v patě 700 mm. Šířka oblouku je konstantní po celé délce a to 2200 mm.

Vzpěry jsou navrženy jako monolitické betonové. Jejich rozměr je konstantní po celé délce. Svoji šířkou 2200 mm navazují na šířku oblouku a jejich výška je uvažována 500 mm.

4 Geometrie

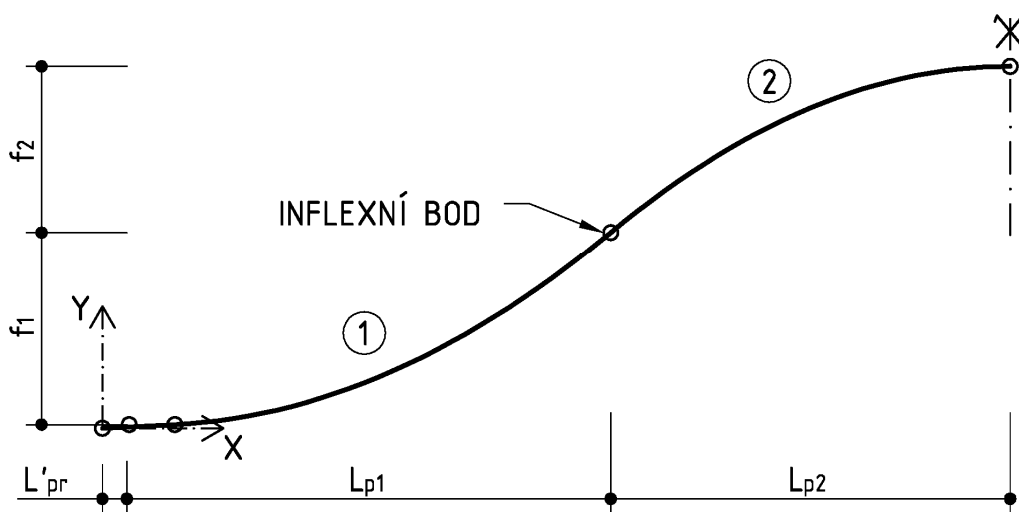
4.1 Hledání výchozí geometrie

Za výchozí geometrii byl zvolen stav po vybetonování spár mezi segmenty před definitivním dopnutím mostovky. Při hledání této geometrie musely být respektovány všechny předpoklady uvedené v kapitole 3.1 Statický systém. Kromě těchto předpokladů musely být respektovány i konstrukční a normová omezení např. omezení maximálního podélného sklonu 1:12 (8,3%), podélné odvodnění mostovky (min.0,5%), rozmístění segmentů atp.

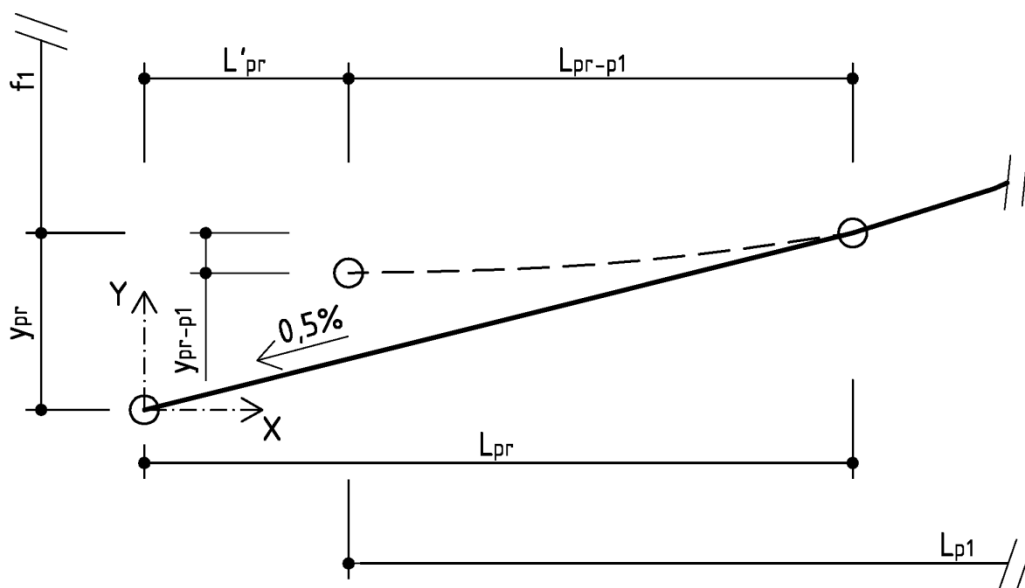
Z výše uvedeného je zřejmé, že se jedná o komplikovaný systém, kde horizontální reakce oblouku závisí na tíze segmentů, geometrii předpjatého pásu, předpínací síle a geometrii žeber. Předpínací síla v předpjatém pásu je navržena, aby vynášela vlastní tíhu segmentů ve visuté části.

4.1.1 Předpínací síla v předpjatém pásu

Návrh síly v předpjatém pásu vychází z geometrie nepodepřené části, jejíž tíha bude vynášena pouze předpínací silou v externích kabelech. Při prvním přiblížení k výchozí geometrii lze uvažovat zjednodušeně geometrii mostovky pouze s dvěma parabolickými částmi, kde první je konvexní a druhá je konkávní. Změna funkcí se odehraje v inflexním bodě, který je zároveň začátek podepírané části mostovky. Při využití pouze těchto dvou funkcí bude komplikované řešení odvodnění na začátku respektive na konci lávky. V těchto místech by nebyl žádný podélný sklon. Proto je nutné upravit geometrii s počátečním (koncovým) minimálním podélným spádem 0,5%.



Obr. 7 Schéma geometrie poloviny předpjatého pásu



Obr. 8 Schéma geometrie na krajích předpjatého pásu

Jako první krok je nutné zohlednit kompatibilitu podélného sklonu v inflexním bodě. Při vyjádření rovnice první paraboly ve vyznačeném souřadném systému (Obr. 7):

$$y_1(x) = \frac{f_1(x - L'_{pr})^2}{L_{p1}^2} + y_{pr} - y_{pr-p1}$$

$$y_1(x) = \frac{f_1(x - L'_{pr})^2}{L_{p1}^2} + L_{pr}S - \frac{f_{p1}L_{pr-p1}^2}{L_{p1}^2}$$

Derivace funkce první paraboly reprezentuje směrnici tečny v místě x:

$$y'_1(x) = \frac{2f_1x}{L_{p1}^2} - \frac{2f_1L'_{pr}}{L_{p1}^2}$$

Rovnice druhé paraboly ve vyznačeném souřadném systému:

$$y_2(x) = -\frac{f_2(x - L_{p1} - L'_{pr})^2}{L_{p2}^2} + \frac{2f_2(x - L_{p1} - L'_{pr})}{L_{p2}} + f_1 - y_{pr-p1} + y_{pr}$$

$$y_2(x) = -\frac{f_2(x - L_{p1} - L'_{pr})^2}{L_{p2}^2} + \frac{2f_2(x - L_{p1} - L'_{pr})}{L_{p2}} + f_1 - \frac{f_{p1}L_{pr-p1}^2}{L_{p1}^2} + L_{pr}S$$

Derivace funkce druhé paraboly reprezentuje směrnici tečny v místě x:

$$y'_2(x) = -\frac{2f_2x}{L_{p2}^2} + \frac{2f_2(L_{p1} + L'_{pr})}{L_{p2}^2} + \frac{2f_2}{L_{p2}}$$

Následně lze vyjádřit poměr mezi parametry první a druhé paraboly pro zachování směrnice tečny v inflexním bodě:

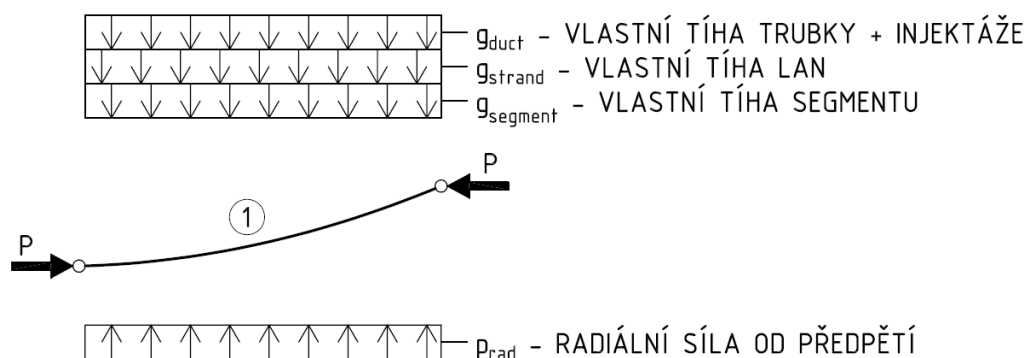
$$\frac{f_1}{L_1} = \frac{f_2}{L_2}$$

Samozřejmě je nutné popsat i počátek geometrie, která je tvořena částí s konstantním sklonem s (na Obr. 8 je místo s použita přímo hodnota minimálního podélného sklonu 0,5%). Díky definici minimálního podélného sklonu je možné nalézt místo průniku první paraboly s přímou částí, pokud vyjdeme z definice směrnice tečny.

$$y_{pr}(x) = x \cdot s$$

$$y'_{pr}(x) = s$$

Na základě popsané geometrie a vzájemných vztahů mezi jednotlivými vstupními parametry lze již definovat předpínací sílu nutnou k vynesení visutého předpjatého pásu.



Obr. 9 Vyrovnání vlastní tíhy nepodepřené předpjaté pásu radiální silou předpětí

Jak je patrné z Obr. 9 veškerá vlastní tíha v montážním stavu bude vynášena radiální silou od předpětí P :

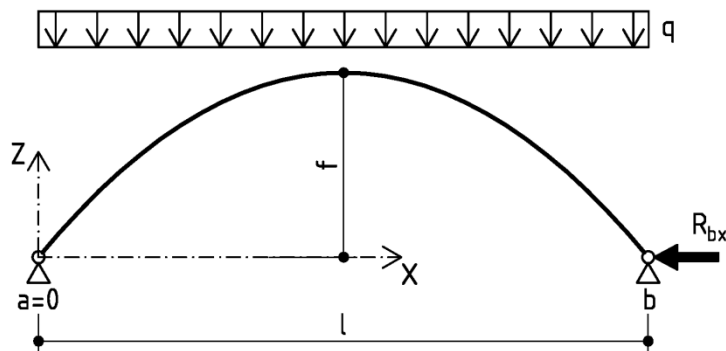
$$p_{rad} = g_{segment} + g_{strand} + g_{duct}$$

Do výpočtu lze předpokládat délku paraboly jako dvojnásobek vzdálenosti L_{p1} a vzepětí lze uvažovat o velikosti f_1 . Korektně by se měla uvažovat zkrácená délka paraboly $L_{p1} - L'_{pr}$ a jí odpovídající menší vzepětí. Při těchto dimenzích hodnoty délky a vzepětí paraboly použitých do výpočtu se jedná o chybu v řádu jednotek promile, proto není uvažována s redukovánými hodnotami. Z popsaných veličin lze ze známého vzorce odvodit potřebnou předpínací sílu pro vynesení vlastní tíhy segmentů:

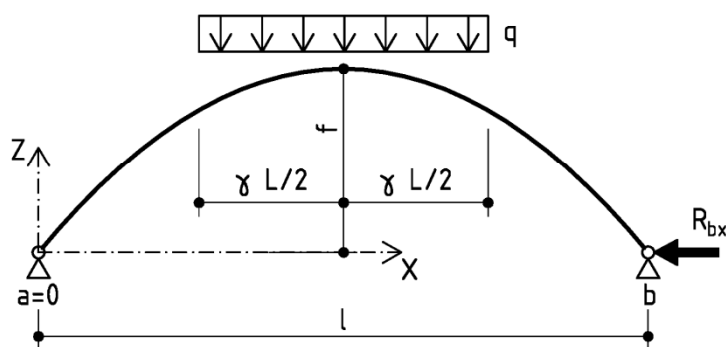
$$P = \frac{(g_{segment} + g_{strand} + g_{duct}) \cdot (2L_{p1})^2}{8f_1}$$

4.1.2 Horizontální reakce v patě oblouku

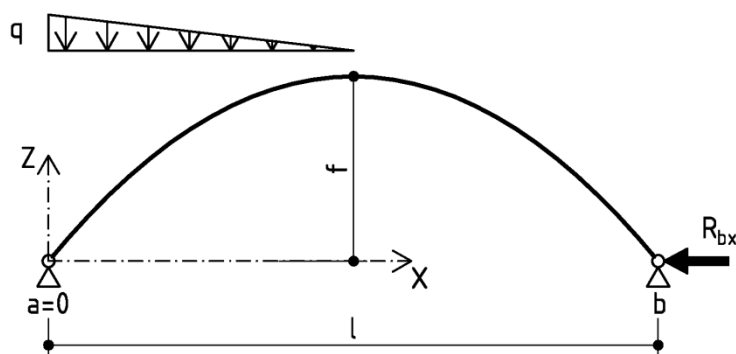
Pro první přiblížení se k výchozímu tvaru je použito tabulkových hodnot pro výpočet horizontální složky reakce pro souměrný parabolický dvojklobový oblouk [16].



$$R_{bx} = \frac{1}{8} \frac{gl^2}{f}$$



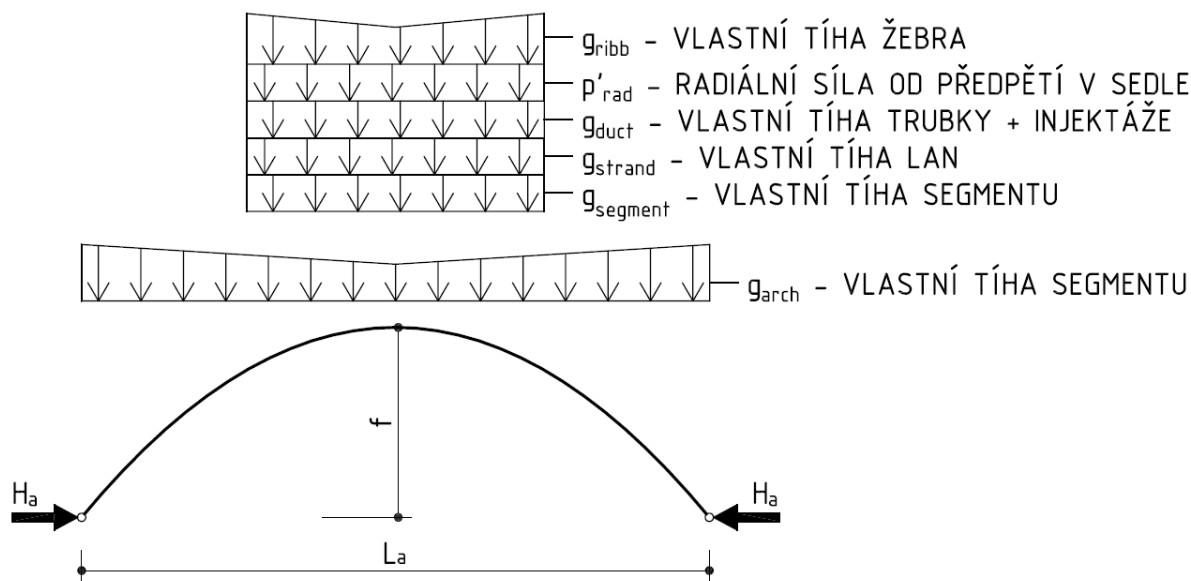
$$R_{bx} = \frac{1}{128} \gamma (5 - \gamma^2)^2 \frac{gl^2}{f}$$



$$R_{bx} = \frac{35}{1536} \frac{gl^2}{f}$$

Obr. 10 Tabulkové hodnoty horizontální reakce parabolického dvojklobového oblouku

Na Obr. 10 je výběr z tabulkových hodnot, které se použijí v tomto konkrétním případě. Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách je oblouk zatěžován kromě vlastní tíhy (která nemá konstantní průběh po délce) také vlastní tíhou segmentů s kabely i vlastní tíhou podporujícího žebra, které také nemá konstantní průběh po délce.



Obr. 11 Zatížení oblouku ovlivňující horizontální složku reakce v patě

Je nutné poznamenat, že hodnota p_{rad} na Obr. 9 není totožná s hodnotou p'_{rad} na Obr. 11. Pro výpočet radiální složky v každém případě uvažují jiné hodnoty pro vzepětí a délku paraboly.

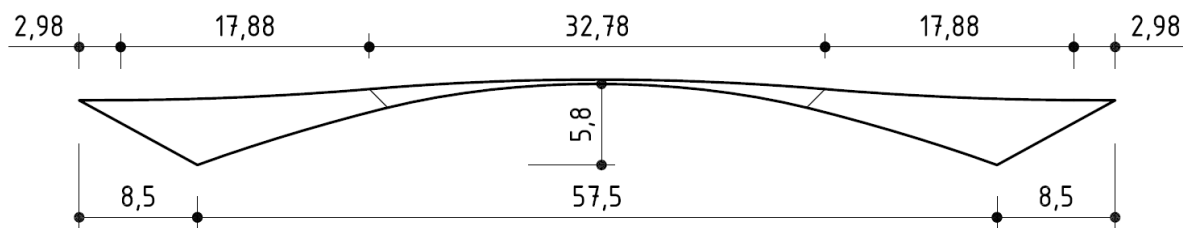
$$p'_{rad} = P \frac{8f_2}{(2L_{p2})^2}$$

V tomto stádiu již je zohledněno nerovnoměrné namáhání oblouku a je potřeba hledat výchozí geometrii oblouku. Pokud by byl oblouk navržen s parabolickým průběhem a byl zatížen, jak je vyobrazeno na Obr. 11, tak by jeho deformace (s tím související vnitřní síly a naopak) byly vyšší v centrální části, která je značně přítěžována. Proto je použita jednoduchá rektifikace geometrie pomocí afinnosti vůči ohybovému momentu na prostém nosníku.

Oblouk je modelován jako prostý nosník o rozpětí oblouku. Na tomto nosníku je spočítán maximální moment, který je následně podělen vzepětím oblouku. Výsledné číslo určuje poměr, kterým je nutné vydělit každou pořadnici momentového průběhu na prostém nosníku. Vzniklá hodnota určuje z-souřadnici optimální střednice oblouku, který bude namáhán pouze tlakem.

Po definování vzájemných vztahů mezi dílčími proměnnými byl vytvořen algoritmus v prostředí VBA MS Excel, který zohledňoval všechny výše definované vztahy včetně změny geometrie oblouku. Pomocí iteračního řešiče byla stanovena výchozí geometrie.

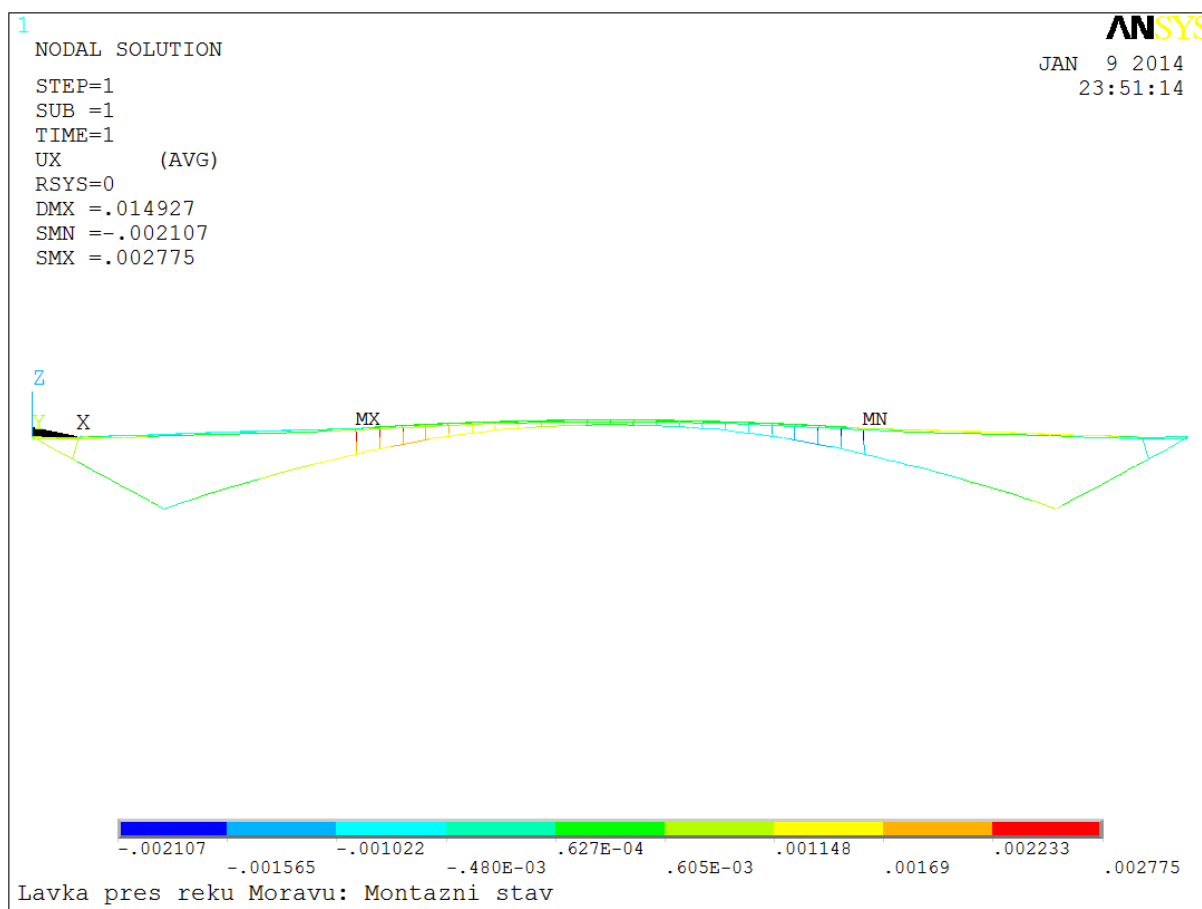
4.2 Nalezená výchozí geometrie



Obr. 12 Schéma výchozí geometrie samostatného statického systému lávky

Na Obr. 12 jsou naznačeny na schématu konstrukce celkové rozměry, které jsou následně použity jako vstupní hodnoty v části P4 Statický výpočet.

Veškeré předpoklady je velice snadné ověřit pomocí sestavení modelu konstrukce, která je podepřena ve směru x pouze v jednom uzlu. Ostatní uzly mají možnost volného pohybu v horizontálním směru. Na Obr. 13 je graficky zobrazena deformace uzlů ve směru x v montážním stavu po umístění všech segmentů, tedy ve výchozí geometrii. Deformace v místech podpěr dosahuje hodnot řádově desetin milimetru. Je tedy možné považovat geometrii za správně zvolenou.



Obr. 13 Deformace ve směru osy x na prostě podepřené konstrukci

5 Posouzení konstrukce

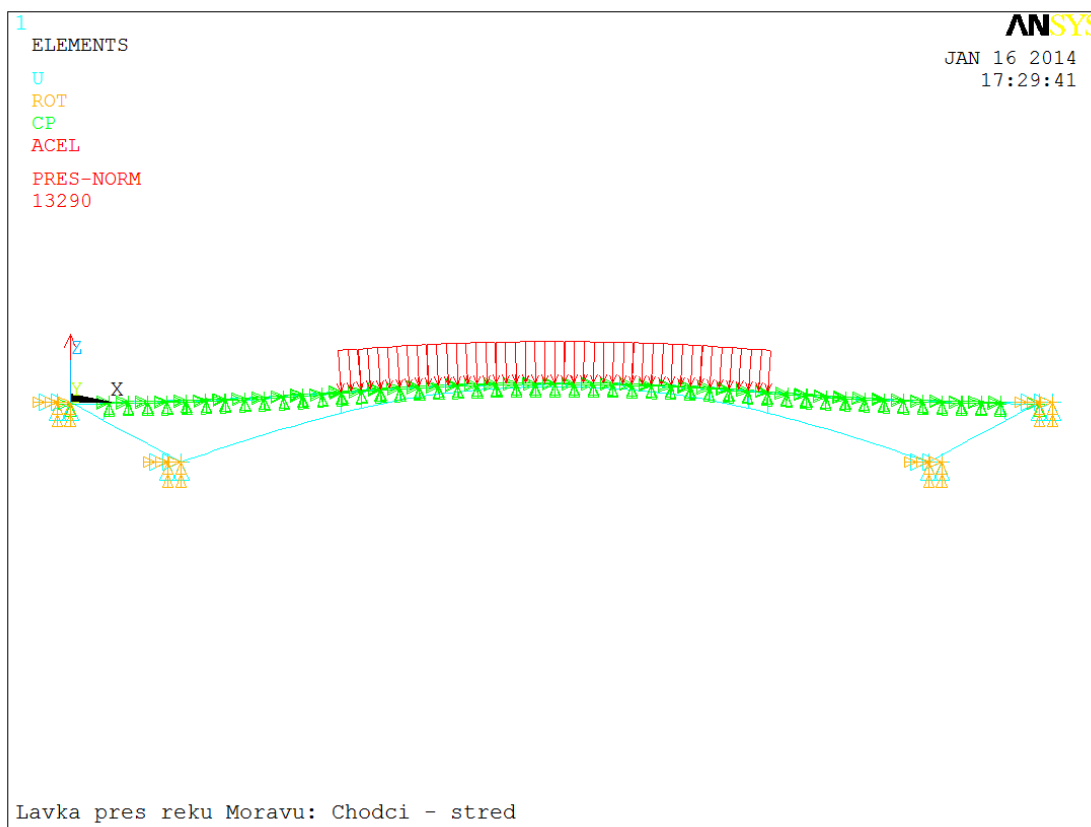
Na lávce je modelováno několik zatěžovacích stavů od různého rozmístění zatížení chodci. Další skupinu zatěžovacích stavů (kombinací) tvoří rovnoměrné oteplení konstrukce. Výpočetní model také zohledňuje postupnou výstavbu lávky.

U segmentových konstrukcí je nutné věnovat zvýšenou pozornost spárám mezi segmenty. Proto je zvolen přístup návrhu konstrukce předpjatého pásu, kdy v provozních stavech bude spára mezi segmenty vždy po celé výšce průřezu tlačena. S ohledem na toto omezení bylo optimalizováno definitivní dopnutí mostovky.

V následujících kapitolách jsou uvedeny rozhodující posudky konstrukce. Podrobný výpočet jednotlivých posudků je uveden v části P4 Statický výpočet.

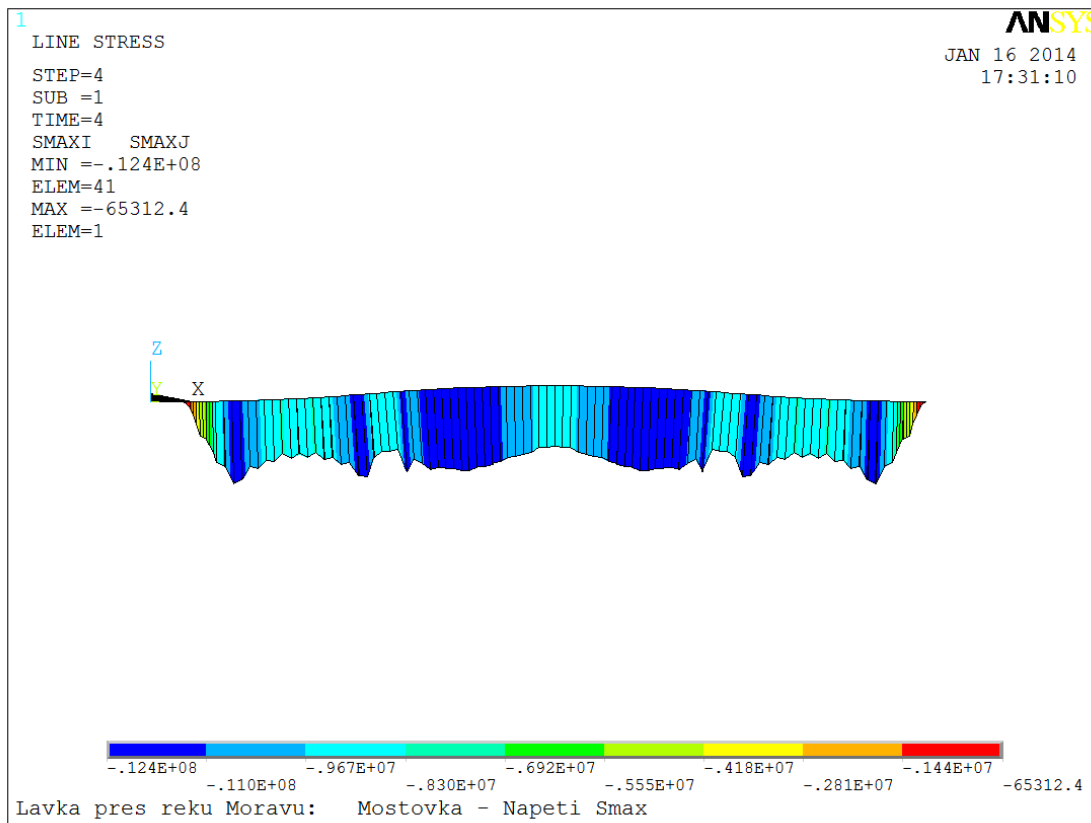
5.1 Mezní stav použitelnosti

Rozhodující kombinací pro maximální napětí v mostovce (tlak uvažován dle konvence zápornými hodnotami) je umístění chodců ve střední části. Tento stav nastane při modelování konstrukce v čase životnosti, kde jsou zjednodušeně uváženy dlouhodobé ztráty napětí i přetvoření od dotvarování a smršťování.



Obr. 14 Rozhodující stav pro omezení napětí

Maximální hodnoty napětí je dosažena u integrovaných opěr na obou stranách vzhledem k symetrickému zatížení.



Obr. 15 Průběh maximálních hodnot napětí v mostovce

V čase po vybudování rozhoduje stejné postavení zatížení včetně zatížení rovnoměrným ochlazením. Zde dochází v místech u opěry k hodnotám maximálního napětí $-1,32 \text{ MPa}$.

Průřez oblouku je ve všech kombinacích namáhán pouze tlakem. U vzpěr dochází k namáhání v tahu, ale velice zanedbatelných hodnot (maximum dosahuje $+0,33 \text{ MPa}$), betonářská výztuž není v tažené oblasti.

Další požadavky ohledně omezení napětí v betonu, omezení napětí v betonářské a v předpínací výztuži konstrukce splňuje.

5.2 Mezní stav únosnosti

Mostovka je posouzena v mezním stavu únosnosti jako předpjatý průřez s nesoudržnou výztuží. Oblouk a vzpěry jsou posouzeny pomocí interakčního diagramu, který zohledňuje současné namáhání normálovou silou a ohybovým momentem.

Vliv účinků druhého řádu vystihuje model konstrukce díky řešení pomocí geometrické nelinearity. Vliv možných výrobních nepřesností je uvažován formou zavedení minimální výstřednosti. Oblouk je posouzen na maximální kombinace namáhání ve své patě i ve vrcholu.

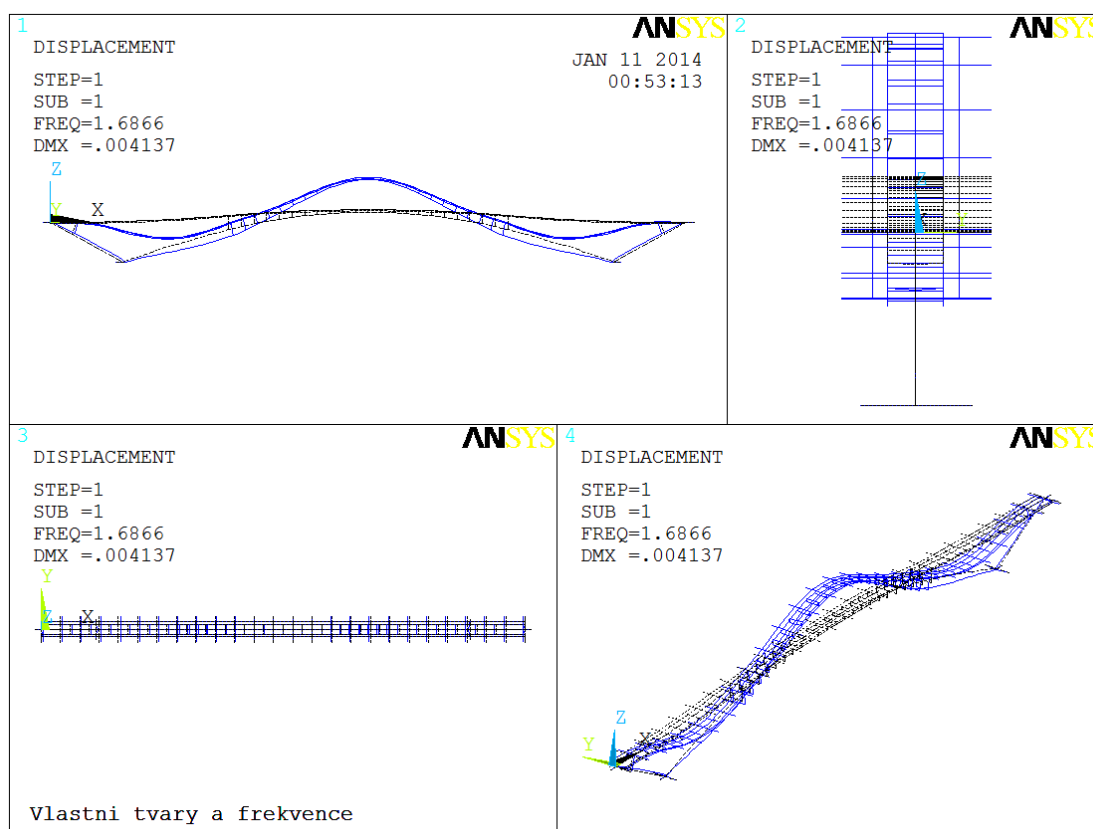
V příloze P4.1 lze v tabulkách najít extrémní hodnoty momentů na oblouku. Tyto hodnoty se nacházejí v oblasti řezu 18,63 – 20,86 m, proto je zaveden ještě dodatečný posudek pomocí interakčního diagramu, který posoudí tyto extrémy konzervativně na nejtenším průřezu z extrémů.

Oblouk i vzpěry vyhoví ve všech kombinacích v současném namáhání normálovou silou a ohybovým momentem.

Všechny prvky jsou posouzeny také na namáhání smykem. U mostovky jsou hodnoty posouvajících sil malé, segmenty totiž „leží“ na externích předpínacích kabelech. U vzpěr i oblouku smykové síly dosahují hodnot, které nepřesahují únosnost samotného betonu ve smyku, proto je zde navržena pouze konstrukční smyková výztuž.

5.3 Dynamická analýza

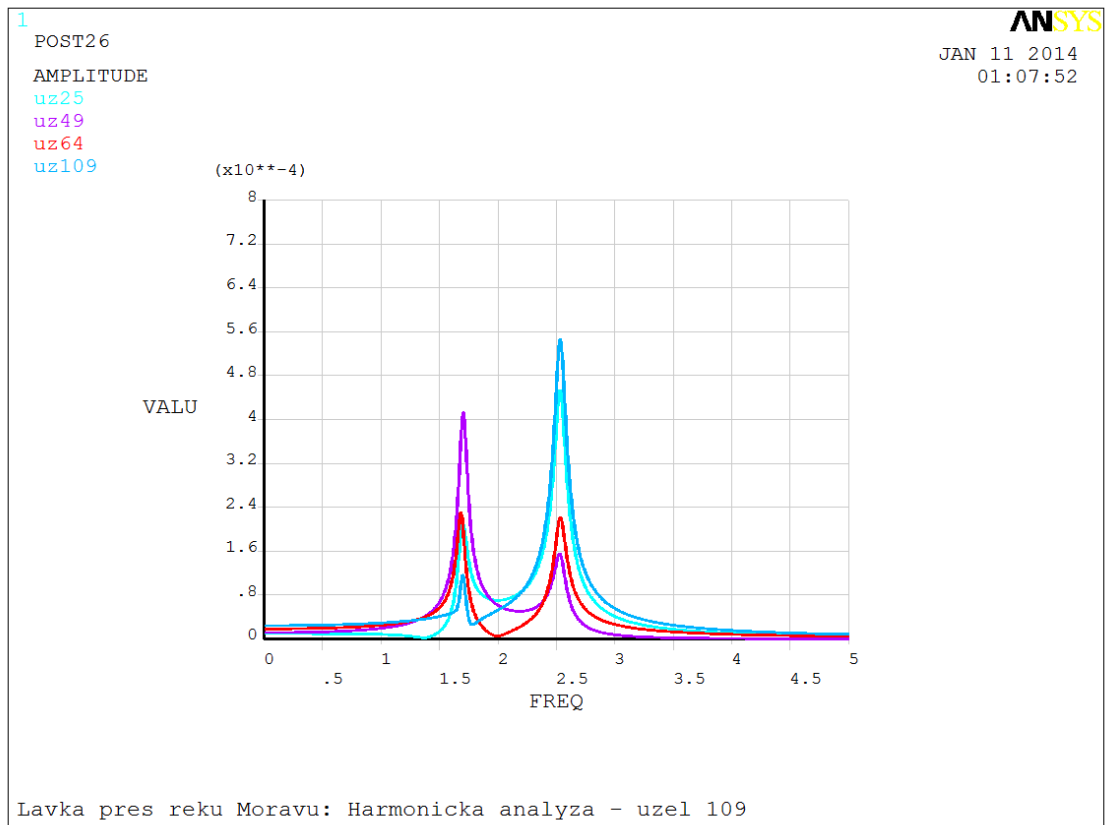
Pro lávku jsou modální analýzou vyhodnoceny její vlastní tvary.



Obr. 16 První vlastní tvar lávky

První ohybové frekvence mají hodnoty od 1,687 Hz – 2,562 Hz. Tyto frekvence jsou blízké frekvenci pohybu chodců po lávce, proto je provedena harmonická analýza na svislou budící sílu.

$$F = 180 \sin(2\pi f_1 t) = 180 \sin(2\pi \cdot 1,866 \cdot t) = 180 \sin(10,59 t) [N]$$



Obr. 17 Harmonická analýza

Hodnota maximálního vybuzeného zrychlení $a_{max} = 0,138 \text{ m/s}^2$, které vzniká v uzlu 109 při umístění pulzující síly ve stejném uzlu, je porovnávána s limitní hodnotou. $a_{lim} = 0,5 \sqrt{f_1} = 0,5 \sqrt{1,687} = 0,644 \text{ m/s}^2$. Maximální vybuzené zrychlení zdaleka nedosahuje hodnot limitního zrychlení. Chodci tedy nebudou mít nepříjemné pocity při pohybu ani při stání na lávce.

6 Závěr

V práci je předveden postup návrhu lávky pro pěší od úplného počátku zhodnocení několika různých variant až k vytvoření vlastních výkresů. Současně je popsáno hledání výchozí geometrie konstrukce pro její chtěné působení. Vlastním modelem konstrukce je prokázáno její dobré působení v provozních stavech. Konstrukce je také podrobena dynamické analýze včetně harmonické odezvy na budící sílu.

Vzhledem k rozsahu a potřebám diplomové práce jsou v některých částech přijatá zjednodušení. Řádně byly vyšetřeny především zatěžovací stavy od rovnoměrného oteplení konstrukce a zatížení chodci. Současně je v práci nastíněno dlouhodobé působení konstrukce v čase její životnosti.

7 Seznam použitých zdrojů

7.1 Seznam použité literatury

- [1] ČSN EN 1991-1-1 (730035) Zatížení konstrukcí - Část 1-1: Obecná zatížení - Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb
- [2] ČSN EN 1991-2 (736203) Zatížení konstrukcí - Část 2: Zatížení mostů dopravou
- [3] ČSN EN 1992-1-1 (731201) Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby
- [4] ČSN EN 1992-2 (736208) Navrhování betonových konstrukcí - Část 2: Betonové mosty – Navrhování a konstrukční zásady
- [5] ČSN 73 6201 Projektování mostních objektů
- [6] BD 37/01. *Design Manual for Road and Bridges: Loads for Highway Bridges*. London: Highway Agency, 2001. Dostupné z:
<http://www.dft.gov.uk/ha/standards/dmrb/vol1/section3/bd3701.pdf>
- [7] NAVRÁTIL, Jaroslav. *Předpjaté betonové konstrukce*. Brno, 2008. ISBN 978-80-7204-561-7.
- [8] STRÁSKÝ, Jiří. *Betonové mosty*. Praha, 2001. ISBN 80-86426-05-X.
- [9] ČÍRTEK, Ladislav. *Betonové konstrukce II. Konstrukce prutové a základové*. Brno, 1999. ISBN 80-214-1543-6
- [10] STRÁSKÝ, Jiří a Radim NEČAS. *Betonové mosty I: Základní principy navrhování*. Brno, 2006.
- [11] KLUSÁČEK, Ladislav. *Betonové mosty I: Nosné konstrukce mostů*. Brno, 2006
- [12] PANÁČEK, Josef. *Betonové mosty I: Spodní stavba a příslušenství mostních objektů*. Brno, 2006.
- [13] PROCHÁZKA, Jaroslav, Jiří ŠMEJKAL, Jan L. VÍTEK a Jitka VAŠKOVÁ. *Navrhování betonových konstrukcí: Příručka k ČSN EN 1992-1-1 a ČSN EN 1992-1-2*. ISBN 978-80-87438-03-9.
- [14] ZICH, Miloš. *Příklady posouzení betonových prvků dle eurokódu*. Praha: Dashofer & Verlag, 2010. ISBN 978-80-86897-38-7.
- [15] TERZIJSKI, Ivailo. Mosty z vysokopevnostního betonu v české republice. *Beton TKS*. 2010, roč. 2010, č. 4. ISSN 1213-3116.

- [16] KADLČÁK, Jaroslav a Jiří KYTÝR. *Statika II. stavebních konstrukcí: Staticky neurčité prutové konstrukce*. druhé. Tišnov: SURSUM, 2009. ISBN 978-80-214-3428-8.
- [17] Měsíční data. *Portál ČHMÚ: Historická data : Počasí* [online]. [cit. 2014-01-05]. Dostupné z:
http://www.chmi.cz/portal/dt?menu=JSPTabContainer/P4_Historicka_data/P4_1_Pocasi/P4_1_9_Mesicni_data

7.2 Seznam použitých internetových zdrojů

- [1] <http://www.vsl.cz>
- [2] <http://www.freyssinet.cz/>
- [3] <http://www.shp.eu/>

7.3 Použitý software

- [1] Microsoft Excel 2007
- [2] Microsoft Word 2007
- [3] ANSYS Mechanical 13.0
- [4] Scia Engineer 2012.0.183
- [5] Rhinoceros 4.0
- [6] AutoCAD 2014

8 Seznam příloh

P1 – Použité podklady a varianty řešení

P1.1	<i>Studie Varianty 1</i>	1:200; 1:50
P1.2	<i>Studie Varianty 2</i>	1:200; 1:50
P1.3	<i>Studie Varianty 3</i>	1:200; 1:50
P1.4	<i>Srovnání variant</i>	1:200

P2 – Výkresy

P2.1-2	<i>Situace, podélný řez</i>	1:100
P2.3	<i>Příčné řezy</i>	1:50
P2.4	<i>Tvar segmentu</i>	1:20; 1:10
P2.5	<i>Výztuž segmentu</i>	1:20; 1:10
P2.6	<i>Tvar oblouku</i>	1:50
P2.7	<i>Výztuž oblouku</i>	1:50, 1 :25
P2.8	<i>Tvar integrované opěry</i>	1:50, 1 :25
P2.9	<i>Výztuž integrované opěry</i>	1:50, 1 :25
P2.10	<i>Trasování kabelových drah</i>	1:50
P2.11	<i>Tvar segmentu nad obloukem</i>	1:20; 1:10

P3 – Stavební postup a vizualizace

P3.1	<i>Schéma stavebního postupu</i>	1:300
P3.2	<i>Vizualizace</i>	

P4 – Statický výpočet

P4.1	<i>Přehled hodnot vnitřních sil kombinací</i>	
P4.2	<i>Průběhy vnitřních sil</i>	
P4.3	<i>Vlastní tvary konstrukce</i>	