



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

ZAVĚŠENÝ MOST PŘES ŘEKU MORAVU

CABLE-STAYED BRIDGE ACROSS THE RIVER MORAVA

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Damek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. RADIM NEČAS, Ph.D.

BRNO 2020



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

Student	Bc. Martin Damek
Název	Zavěšený most přes řeku Moravu
Vedoucí práce	Ing. Radim Nečas, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2019
Datum odevzdání	10. 1. 2020

V Brně dne 31. 3. 2019

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

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Podklady:

Situace, příčný a podélný řez, geotechnické poměry.

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.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

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

Ve výběru varianty se zaměřte na konstrukci podporovanou předpínacími kabely - zavěšený most.

Podrobný návrh nosné konstrukce vybrané varianty mostu proveďte podle mezních stavů včetně zohlednění 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)

Diplomová práce bude odevzdána v listinné a elektronické formě a pro ÚBZK 1x na CD.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).

2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

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



ABSTRAKT

Tato práce se zabývá návrhem mostu pro pěší a cyklistickou dopravu přes řeku Moravu ve městě Olomouc. V rámci diplomové práce byly navrženy 3 varianty konstrukcí. Zavěšená konstrukce s páteřním nosníkem z předpjatého betonu byla vybrána jako nejvhodnější a dále rozpracována. Byl proveden statický výpočet předpjaté mostovky a železobetonového pylonu a byly stanoveny vlastní frekvence a tvary konstrukce. Vnitřní síly byly stanoveny pomocí programu SCIA Engineer se zavedením nelinearit do výpočtu. Výpočet byl proveden podle platných předpisů a norem.

KLÍČOVÁ SLOVA

Most pro pěší a cyklisty, zavěšená konstrukce, páteřní nosník, pylon

ABSTRACT

The subject of this master thesis is a design of a bridge for pedestrians and cyclists across the river Morava in Olomouc. Within the scope of thesis there are 3 studies of bridges. Cable-stayed bridge with prestressed spine beam was found appropriate and further calculations were assessed. Static calculations of prestressed spine deck and reinforced concrete pylon were made. Eigen frequencies and modes of construction were obtained. Internal forces were provided by SCIA Engineer with effect of non-linear parameters. Calculations were made according to valid standards and regulations.

KEYWORDS

Bridge for pedestrians and cyclists, cable-stayed bridge, spine beam, pylon



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. Martin Damek *Zavěšený most přes řeku Moravu*. Brno, 2019. 32 s., 201 s. příl.
Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav
betonových a zděných konstrukcí. Vedoucí práce Ing. Radim Nečas, Ph.D.



PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Zavěšený most přes řeku Moravu* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 10. 1. 2020

Bc. Martin Damek
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Zavěšený most přes řeku Moravu* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 10. 1. 2020

Bc. Martin Damek
autor práce



PODĚKOVÁNÍ

Mé poděkování patří vedoucímu práce Ing. Radimovi Nečasovi, Ph.D. za ochotu při vedení mé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat rodině a nejbližším přátelům za podporu během celého studia.



OBSAH

1	ÚVOD.....	9
2	PODKLADY.....	10
3	VARIANTY.....	11
3.1	Varianta A	11
3.2	Varianta B	12
3.3	Varianta C.....	13
4	PŘÍLOHY.....	15
4.1	Podklady a varianty řešení	15
4.2	Výkresy	15
4.3	Stavební postup a vizualizace	15
4.4	Statický výpočet	16
4.4.1	Statický výpočet.....	16
5	ZÁKLADNÍ ÚDAJE	23
5.1	Použité materiály.....	23
5.2	Materiálové charakteristiky.....	23
5.3	Mostní vybavení.....	25
6	ZÁVĚR	28
7	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	29
8	SEZNAM PŘÍLOH.....	31
9	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	32

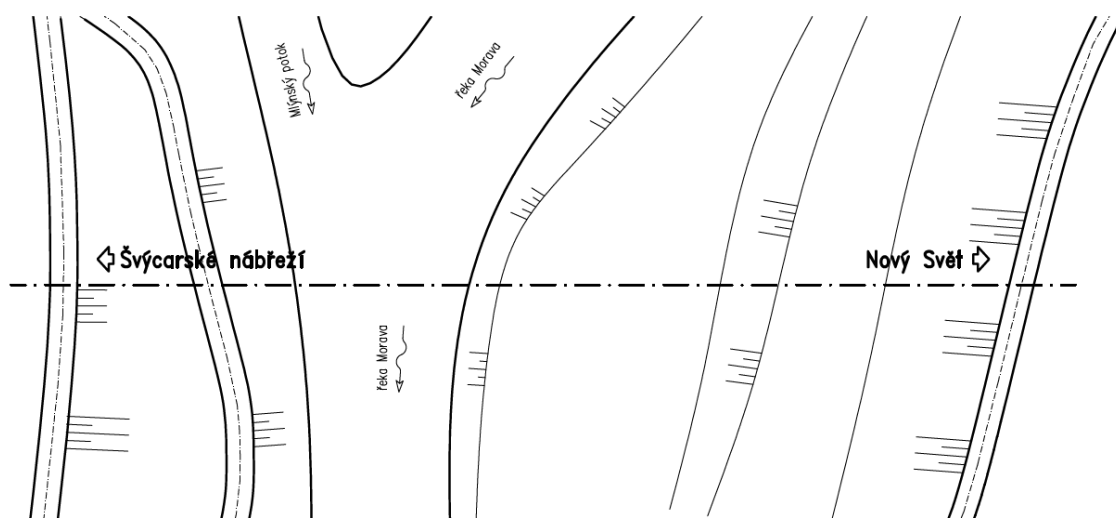
1 ÚVOD

Předmětem diplomové práce je návrh a posudek mostní konstrukce, která převede pěší a cyklistickou dopravu přes řeku Moravu ve městě Olomouc. Koryto řeky tvoří přirozenou hranici mezi centrem města a přilehlými městskými částmi na východě města. Pro návrh lávky bylo vybráno místo, kde je velké množství silniční dopravy a proto oddělení chodců a cyklistů na samostatnou konstrukci je z hlediska bezpečnosti výhodné. Dle zadání byly navrženy varianty možného řešení, z nichž výsledná varianta zavěšené konstrukce byla podrobněji rozpracována.

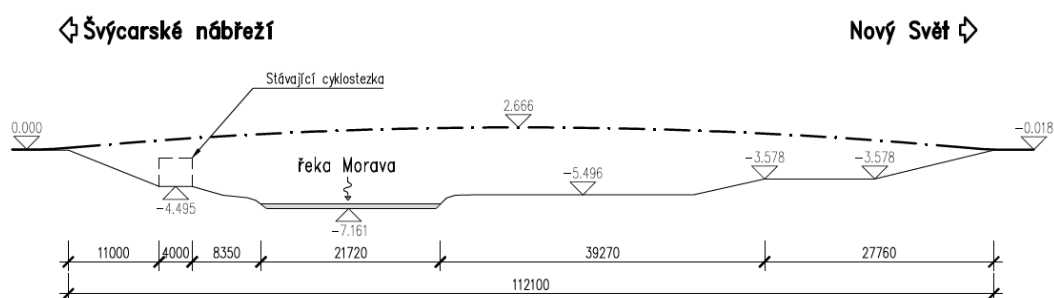
Byl proveden návrh předpjaté mostovky v podélném a příčném směru, dále byl posouzen pylon a závěsy. Statický návrh byl proveden v souladu s platným Eurokódem, vnitřní síly byl získány pomocí programu SCIA Engineer 18.1.

2 PODKLADY

Všechny varianty byly navrženy a zpracovány na základě podkladů, kterými byly situace v bezprostředním okolí navrhované konstrukce a podélný řez terénem v ose konstrukce. Geotechnické poměry nebyly v rámci diplomové práce podrobněji řešeny, návrh spodní stavby a založení nebylo předmětem práce. Navržený typ založení a rozměry základů vycházejí z podobných konstrukcí a nebyla dále ověřována správnost jejich návrhu.



Obr. 1 Půdorysné schéma



Obr. 2 Podélný řez terénem v ose mostu

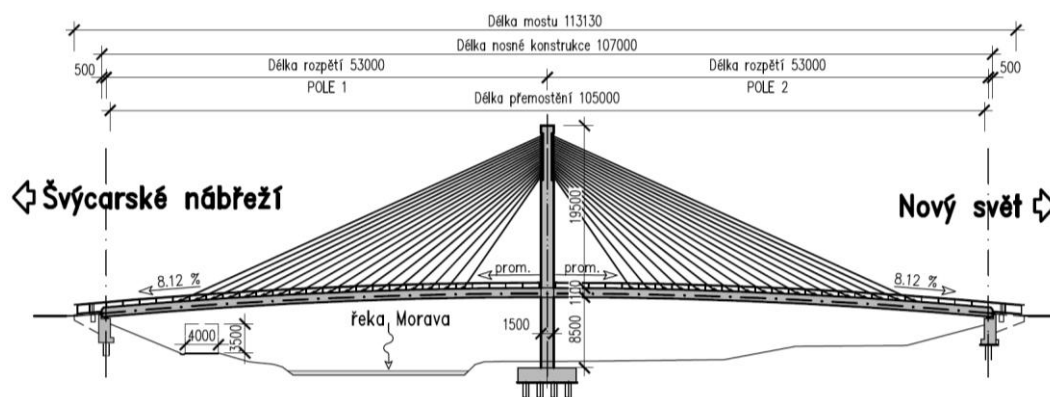
3 VARIANTY

Pro návrh jednotlivých variant nebyl stanoven žádný požadavek na typ konstrukce. Snahou bylo navrhnout jednotlivé varianty konstrukcí tak, aby funkčně splňovaly požadavky na fungování konstrukce, zapadly do dané lokality a esteticky ladily s prostředím, jehož dominantou je koryto řeky Moravy a síť cyklostezek.

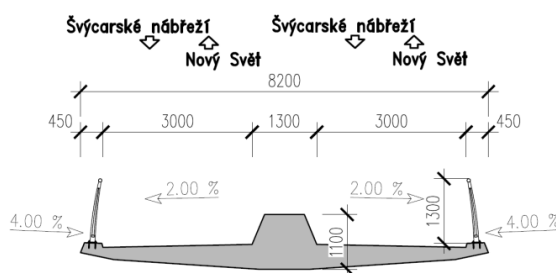
3.1 Varianta A

První variantou je zavěšená konstrukce o dvou polích s rozpětím $2 \times 53,0$ m. Mostovka, která je zavěšena 18 páry tyčových závěsů se semi-radiálním uspořádáním na železobetonový pylon, je tvořena páteřním nosníkem a deskou. Ta působí jako konzola podpíraná žebry s rastrem 2,0 m. Mostovka je navržena v zakružovacím oblouku s poloměrem $R = 600$ m. Pylon je umístěný v ose konstrukce jak v podélném, tak příčném směru. V podélném směru je mostovka předeprnuta. Na opěrách jsou navrženy elastomerová ložiska, v místě pylonu je mostovka vetknuta s pylonem. Volná šířka je navržena $2 \times 3,0$ m (pruh pro pěší + pruh pro cyklisty), celková šířka mostovky je 8,2 m. Na okrajích mostovky jsou navrženy římsy se sklonem 4,0 %, sklon mostovky v příčném směru je navržen 2,0 % směrem k římse. V celé šířce dopravních pruhů je navržena pochozí hydroizolace tloušťky 5 mm.

Celkový koncept této varianty je obdobou návrhu lávky přes dálnici D1 u města Bohumín. Byla však upravena geometrie příčného řezu, tvar pylonu, uspořádání a materiál závěsů i předpětí mostovky. Hlavním rozdílem oproti původnímu návrhu je jiné statické schéma, kdy oproti této variantě byla konstrukce navržena jako rám.



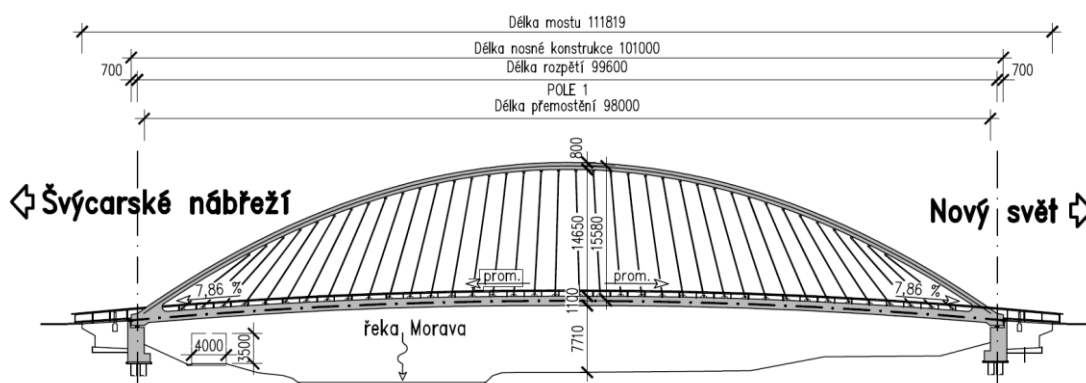
Obr. 3 Podélný řez - varianta A



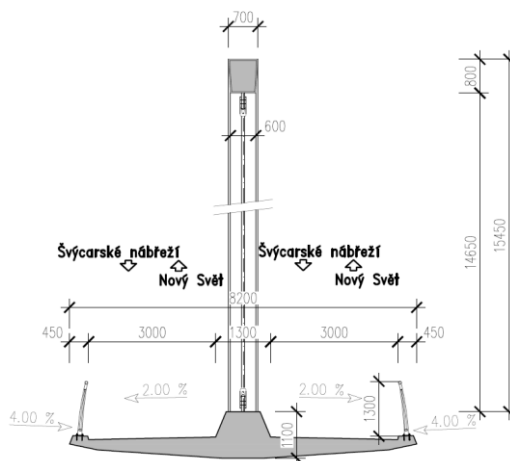
Obr. 4 Příčný řez - varianta A

3.2 Varianta B

V druhé variantě je nosná konstrukce navržena jako Langrův trám. Mostovka je řešena stejným principem jako v předchozí variantě. Ocelový oblouk lichoběžníkového průřezu s výškou 0,80 m je navržený jako parabola druhého stupně. Je umístěný nad páteřním nosníkem v ose konstrukce. Závěsy jsou v semi-radiálním uspořádání. Oproti zavěšené variantě je nosná konstrukce o 6,0 m kratší, čímž vznikl větší prostor za opěrami. Křídla jsou proto navržena na samostatném základu oproti zavěšeným křídům předchozí varianty. Podélný sklon je proměnný s maximálním sklonem 7,86 %.



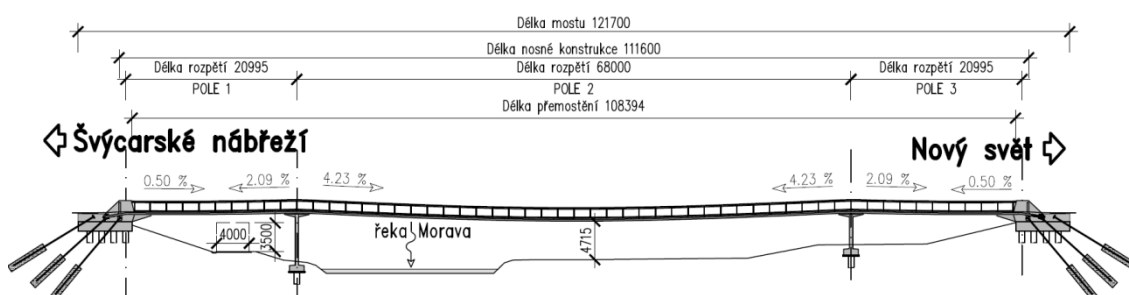
Obr. 5 Příčný řez - varianta B



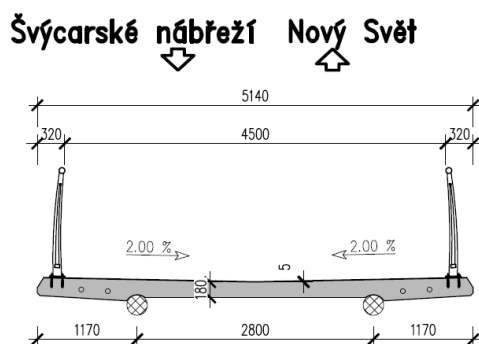
Obr. 6 Příčný řez - varianta B

3.3 Varianta C

Varianta C je navržena jako předpjatý pás s prefabrikovanou mostovkou. Celkem jsou navržena 3 pole s rozpětím 20,995 m pro pole 1 a 3 a 68,000 m pro pole 2. Volná šířka oproti předchozím variantám byla snížena z 6,0 m na 4,5 m. Typický segment mostovky má šířku 5,14 m a délku 1,5 m s minimální tloušťkou desky 180 mm. Nad podpěrami a v oblasti opěr jsou segmenty kratší s délkou 0,5 m vzhledem k menšímu poloměru zakřivení mostovky. Mostovka je předepnuta vnějšími kabely, má tvar paraboly druhého stupně a v polovině rozpětí dosahuje vzepětí 1,0 m. V krajních polích je vzepětí navrženo dle shodné horizontální síly v podpěře a závislosti na délce pole a má hodnotu 95 mm. Maximální podélný sklon na mostovce dosahuje hodnoty 4,23 %. Na mostovce je v celé šířce navržena pochozí hydroizolace tloušťky 5 mm. Podpěry jsou navrženy jako kyvné stojky, předpínací kabely jsou kotveny do mohutných základových bloků, které jsou založeny na pilotách v kombinaci se zemními kotvami.



Obr. 7 Podélný řez - varianta C



Obr. 8 Příčný řez - varianta C

Výsledná varianta

Zavěšená konstrukce se hodí do místních poměrů ze všech tří variant nejlépe. Pylon se závěsy v kombinaci s páteřním nosníkem, který od sebe odděluje pěší a cyklistickou dopravu, tvoří dominantní prvek koryta řeky, zároveň je oproti obloukové konstrukci více transparentní. Nejvíce transparentní a ekonomicky výhodná je varianta předpjatého pásu. Velkou nevýhodou této varianty je zakřivená niveleta a dynamické chování konstrukce. Jako výsledná varianta i s ohledem na zadání byla zvolena varianta A.

4 PŘÍLOHY

4.1 Podklady a varianty řešení

Jednotlivé varianty a podklady pro diplomovou práci byly popsány výše. Podrobnější výkresy jednotlivých variant viz. příloha P1. *Použité podklady a varianty řešení.*

4.2 Výkresy

Pro výslednou variantu návrhu byly zpracovány přehledné výkresy - půdorys, podélný řez a příčné řezy. Dále byly zpracovány výkresy předpínací výztuže a betonářské výztuže mostovky a pylonu. Viz. příloha P2. *Výkresy.*

4.3 Stavební postup a vizualizace

V příloze P3. *Stavební postup a vizualizace* je uveden výkres, který schematicky popisuje postup výstavby konstrukce od zemních prací, zhotovení založení mostu, pylonu a mostovky až po uvedení do provozu. Konstrukce je navržena jako monolitická, pro zhotovení pylonu je vhodné použít překládané bednění. Posuvné bednění vzhledem k zárodku mostovky je komplikované, navíc pylon nedosahuje takové délky, aby tato metoda betonáže významněji šetřila čas. Monolitická mostovka je navržena na pevné skruži, konkrétní typ záleží na zhotoviteli, zvoleném postupu betonářských prací a požadavcích investora.

Pro navrženou variantu byla zpracována vizualizace, která vyobrazuje prostorový model konstrukce a její návaznost na okolní terén a infrastrukturu.

4.4 Statický výpočet

V této kapitole je obsažena podstatná část diplomové práce. Byla rozdělena na dva samostatné soubory - příloha P4.01 *Statický výpočet* a P4.02 *Vnitřní síly a vlastní tvary*.

4.4.1 Statický výpočet

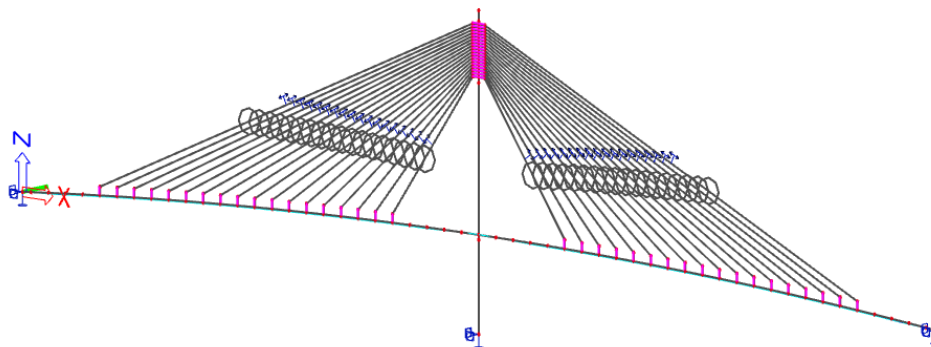
První část přílohy P4 je zaměřena na návrh a statický posudek vybraných částí nosné konstrukce. Je zde popsána výchozí geometrie, prutový model, postup při hledání výchozího stavu zavěšené konstrukce - počáteční přetvoření závěsů a návrh předpětí a jednotlivé zatěžovací stavy, které byly při stanovování vnitřních sil brány v potaz. Dále byly závěsy, předpínací výztuž a mostovka v podélném směru posouzeny na mezní stav použitelnosti. Vybrané části nosné konstrukce - mostovka v podélném směru a pylon - byly posouzeny na mezní stav únosnosti. Únosnost byla také ověřena pro příčný směr, kde byly zvlášť posouzeny žebra a mezilehlá deska (průřez bez žebra byl uvažovaný pro posouzení mostovky v podélném směru, tíha žeber byla zohledněna při stanovení objemové tíhy materiálu a byla rozpočítána tak, aby se jejich hmotnost rovnoměrně promítla po délce mostovky - viz. příloha P4.01 *Statický výpočet* - kapitola 5.1.1 *Vlastní tíha + ostatní stálé*). V závěru přílohy byly stanoveny vlastní frekvence a tvary. Statický výpočet byl proveden bez uvážení dotvarování a smršťování betonu.

Výpočetní model

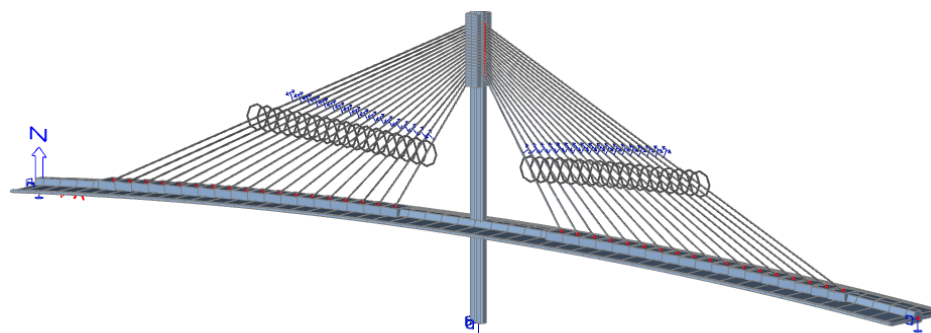
Výpočetní model pro stanovení vnitřních sil byl vytvořen v programu SCIA Engineer 18.1 jako prutová konstrukce skládající se z 1D dílců. Středem konstrukce je vetknutý pylon, u opěr jsou uvažované posuvné podpory.

Závěsy jsou k mostovce a pylonu připojeny pomocí tuhých ramen. Jejich délka vychází z předpokládaného tvaru detailu připojení závěsných tyčí ke kotevním plechům, které jsou spřaženy s betonovým průřezem. Na obou koncích závěsů jsou modelovány klouby, aby nedocházelo k rámovým účinkům konstrukce.

Výpočet byl proveden nelineárně, z toho důvodu byly zavedeny další nelinearity závěsů - vyloučení tlaku (závěsy přenášejí pouze tahové síly) a vyloučení posouvajících a ohybových účinků (závěsy přenášejí pouze osové síly).



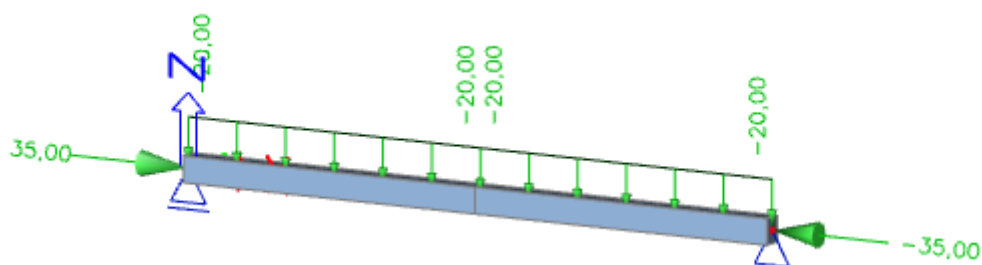
Obr. 9 Prutový model konstrukce



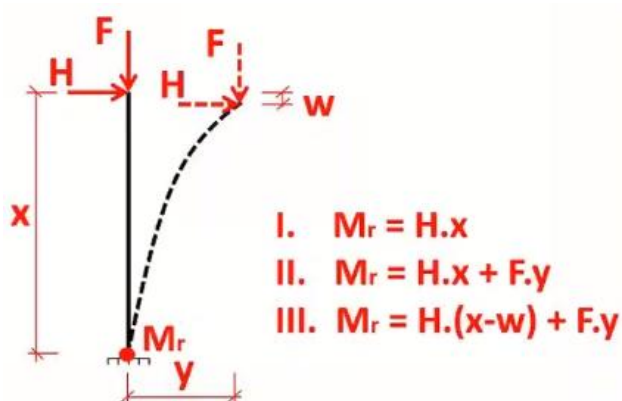
Obr. 10 Render modelu

Kontrola vnitřních sil

Pro ověření správnosti modelu a započítání účinků druhého řádu byla vytvořena kontrolní úloha. Ta spočívá v porovnání vnitřních sil na prostém nosníku zatíženém normálovou silou v koncových uzlech simulující předpětí a rovnoměrným spojitým zatížením po délce nosníku simulující zatížení chodci. Byly porovnávány výsledné momenty od těchto dvou složek zatížení. Zvolený průřez (obdélník $B \times H = 300 \times 400$ mm C25/30) ovlivňuje výsledky svým průhybem, kdy při nelineárním výpočtu se přičítá moment o velikosti normálové síly na prutu a příslušné excentricity (deformace prutu v daném místě).



Obr. 11 Model kontrolní úlohy

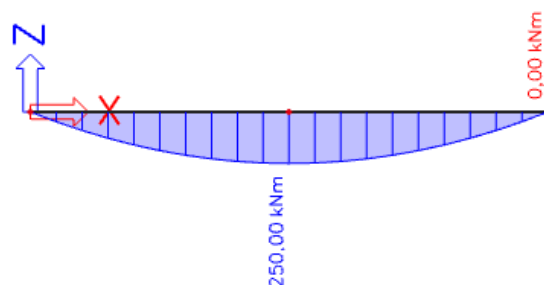


Obr. 12 Schéma účinků

Pro účely této kontrolní úlohy byl nosník délky $L = 10 \text{ m}$ zatížen oboustranně normálovou silou o velikosti $35,0 \text{ kN}$ a spojitým zatížením o velikosti -20 kN/m ve směru Z . Výsledky lineárního výpočtu jsou zřejmé, normálová vnitřní síla odpovídá zatížení N a velikost momentu M_y nabývá hodnoty $1/8 \cdot q \cdot L^2$.



Obr. 14 N_x - lineární výpočet

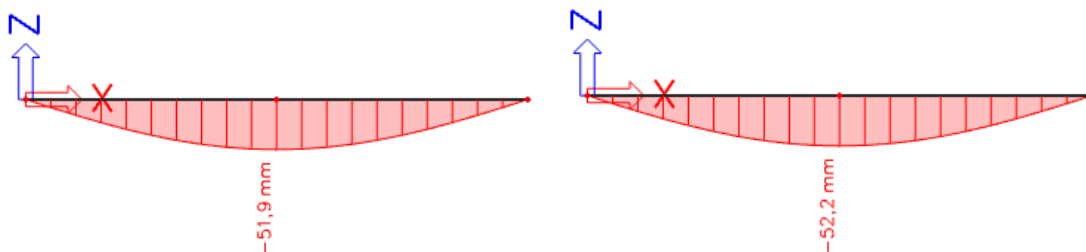


Obr. 13 M_y - lineární výpočet

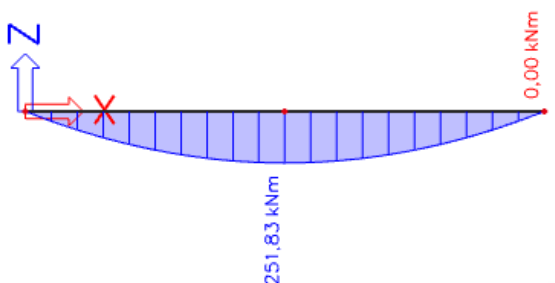
Při nelineárním výpočtu se započítáním účinků druhého řádu vzniká přidavný moment dle obrázku, který je uvedený výše. Tato metoda je založena zvyšování zatížení na konstrukci v krocích, výhodou oproti metodě III. řádu je, že potřebuje pouze dva kroky pro dosažení řešení. U metody třetího řádu je zatížení aplikováno ve více krocích a využívá se u konstrukcí s velkými deformacemi, ale metoda

konverguje i pro malé deformace, které lze rychleji stanovit výpočtem s metodou druhého řádu.

Výsledná deformace konstrukce po 1 přírůstku zatížení (2 krocích) je 52,2 mm. Tato hodnota je o něco vyšší než hodnota lineárního výpočtu, kde je maximální průhyb v polovině nosníku $u_z = 51,9$ mm.



Obr. 15 Průhyb u_z - lineární a nelineární výpočet



Obr. 16 M_x - nelineární výpočet

Výsledný moment nelineárního výpočtu $M_y = 251,83$ kNm. Tuto hodnotu lze ověřit ručně - viz. vzorec na obrázku výše:

$$M_{y,II} = \frac{1}{8} \cdot q \cdot L^2 + N_x \cdot u_{z,II} = \frac{1}{8} \cdot 20 \cdot 10^2 + 35 \cdot 0,0522 = 250 + 1,827 = 251,827 \text{ kNm}$$

Ručně stanovená hodnota odpovídá hodnotám z programu. Po ověření funkčnosti nelineárního výpočtu v prostředí programu byl výpočet proveden na modelu zavěšené konstrukce. Ve výsledných vnitřní silách z programu jsou již započtené účinky druhého řádu a není nutné je ručně přičítat.

Zatížení

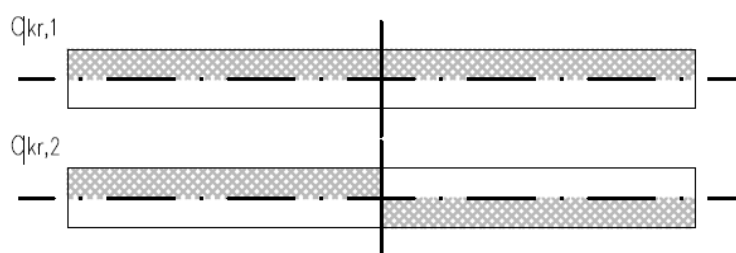
Na konstrukci byly uvažovány stále a proměnné složky zatížení. Vlastní tíha byla generována automaticky dle navrženého průřezu a přiřazeného materiálu a jeho objemové tíhy. Výpočet objemové tíhy mostovky byl upraven tak, aby byla

započítána tíha žeber, které pro podélný směr nebyly modelovány. Objemová tíha materiálů pro ostatní průřezy (pylon a závěsy) vychází z knihovny materiálů a jsou neupravené. Tuhá ramena vytvářející tuhé vazby mezi závěsy a pylonem s mostovkou mají nulovou hmotnost. Do ostatního stálého zatížení je započítána tíha zábradlí, pochozí izolace je promítnuta do vlastní tíhy.

Počáteční přetvoření závěsů pro výchozí stav konstrukce je vzhledem k dodržení podmínek mezního stavu použitelnosti považováno za neměnné a tak je v nelineárních kombinacích vždy uvažován kombinační součinitel 1,0.

Předpětí na konstrukci je navrženo 4 ks po 19 lanech Y1860-S7-15,7-A. Ztráty krátkodobé jsou určené programem Scia, dlouhodobá složka předpětí je stanovena odhadem jako $0,9 \cdot P_0$.

Proměnná zatížení jsou rozdělena na zatížení chodci, rovnoměrnou změnou teploty a zatížení větrem. Chodci byly uvažovány v několika zatěžovacích stavech. Pro posouzení v podélném směru (návrh mostovky a pylonu) a návrh výztuže v příčném směru desky a žebra byli chodci (pěší + cyklistická doprava) uvažováni v obou dopravních pruzích. Pro návrh výztuže na kroucení páteřního nosníku byly vytvořeny nové zatěžovací stavy, které vyvolávají maximální kroučící moment. Zatížení chodci bylo uvažováno jen v jednom dopravním pruhu.



Obr. 17 Schéma zatížení chodci pro posudek kroucení

Zatížení teplotou bylo uvažováno jako rovnoměrné oteplení a rovnoměrné ochlazení. Hodnoty změn teplot vycházejí z příslušné oblasti a jsou dále vztaženy k základní teplotě $T_0 = 10\text{ °C}$.

Zatížení větrem bylo v diplomové práci značně zjednodušeno. Vítr byl uvažovaný pouze ve směru kolmo k ose mostu a zatížení bylo aplikováno na mostovku a pylon. Hodnota zatížení na mostovku je konstantní po celé délce, zatížení na pylon bylo rozděleno po výšce pylonu na 3 dílčí hodnoty. Výsledky od větru byly

stanoveny v samostatném výpočtu a byly přiřazeny k vnitřním silám pro podélný směr od příslušných kombinací.

Kombinace

Pro jednotlivé posudky (MSP a MSÚ) byly vytvořeny příslušné kombinace. Pro posouzení omezení napětí a trhlin byly vytvořeny charakteristická, častá a kvazistálá kombinace, pro posouzení mezního stavu únosnosti byly kombinace vytvořeny dle kombinačních předpisů 6.10a, 6.10b. Pro návrh a posouzení mostovky v příčném směru byla konzervativně použita kombinace 6.10. Vnitřní síly z jednotlivých zatěžovacích stavů při nelineárním výpočtu nelze sčítat jako při běžném lineární výpočtu, všechny kombinace proto byly vytvořeny v prostředí programu s příslušnými kombinačními součiniteli. Všechny použité kombinace s dílčími součiniteli jsou uvedeny v příloze P4.01 *Statický výpočet*. Obrázkový výstup vnitřních sil od nelineárních kombinací je uveden v samostatném souboru P4.02 *Vnitřní síly a vlastní tvary*.

Mezní stav použitelnosti

Na mezní stav použitelnosti byly posouzeny závěsy, předpínací výztuž a pátevní nosník v podélném směru.

Pro závěsy je doporučený rozptyl $(0,1 - 0,45) f_{yk}$. Pro kombinace MSP byl vybrán nejvíce a nejméně namáhaný závěs a posouzen s podmínkou. Předpínací výztuž byla posouzena na MSP v čase t_0 a v čase t_∞ . Pro mostovku bylo počítáno napětí v nejvíce ohybově namáhaných řezech (od momentu M_y) pro charakteristickou kombinaci v čase t_0 a v čase t_∞ byly ověřeny podmínky pro charakteristickou, častou i kvazistálou kombinaci. Pro příčný řez bylo stanoveno 8 hraničních bodů průřezu ve kterých bylo počítáno napětí. Předpětí je navrženo jako omezené, tzn. na průřezu vznikají tahová napětí, není ale překročena pevnost betonu v tlaku. Pro častou kombinaci byl stanoven průhyb a porovnán s limitní hodnotou $1/500 L$.

Mezní stav únosnosti

Na mezní stav únosnosti byly posouzeny závěsy, kotevní plechy, pátevní nosník v podélném směru, deska a žebro mostovky v příčném směru a pylon.

Mostovka v podélném směru byla posouzena na namáhání ohybovým momentem M_y a M_z v řezech, kde vznikaly maximální účinky od zatížení. Pro posouzení smyku byl nosník (jedno pole) rozděleno na 5 dílčích částí a pro každé z nich byla navržena smyková výztuž a proveden posudek. Třmínky byly navrženy pouze konstrukčně, proto byla jejich plocha využita pro návrh výztuže na kroucení páteřního nosníku. Ten byl pro tento posudek převeden na tenkostěnný průřez a stejně jako smyk po pětinach rozpětí posouzen na kroutící moment i interakci kroutícího momentu s posouvající silou. Dále byla navržena výztuž pro podélný smyk mezi trámem (páteřním nosníkem) a deskou. Plocha byla přičtena k ploše výztuže na ohyb v podélném směru. Pro posouzení příčného směru byl vytvořen nový model sestavený z dílčích desek. Jejich tloušťky byly uspořádány tak, aby měla mostovka charakter desky s žebry a odpovídaly tak navrženému tvaru. Pro žebra byl uvažovaný zjednodušený obdélníkový průřez s šířkou 0,25 m. Podepření modelu je uvažováno v místech závěsů, pružné chování závěsů při zatížení bylo zanedbáno. Byl proveden posudek na ohyb a na smyk v místě desky a v místě žebra. Podobně jako u MSP byl posouzen nejvíce namáhaný závěs, byla vybrána kritická návrhová kombinace a posouzen průřez závěsu. Dále byl posouzen kotevní plech na únosnost oslabeného průřezu a únosnost plechu v otlacení. Při návrhu byly dodrženy doporučené rozměry dané výrobcem, ověření vidlicové spojky s čepem nebylo provedeno. Vzhledem k použití systémového prvku se dá očekávat, že prvek vyhoví. Pro posouzení pylonu byla nejprve provedena kontrolní úloha, která spočívá v ověření momentové únosnosti železobetonového průřezu s výsledky z programu IDEA StatiCa. Pro složitost výpočtu biaxiálního ohybu byla momentová únosnost stanovena pouze pro ohyb M_y na zjednodušeném obdélníkovém průřezu pylonu. Dvojosý ohyb byl poté posouzen pouze softwarově ve třech nejvíce namáhaných řezech.

Vlastní frekvence a tvary

Pro konstrukci byly zjištěny vlastní frekvence a vlastní tvary. Pro úplnost jednotlivých tvarů byla konstrukce rozšířena o tuhé příčné pruty, abych bylo v jednotlivých vlastních tvarech rozpoznatelné i kroucení. Ty byly modelovány pomocí nehmotných tuhých ramen.

5 ZÁKLADNÍ ÚDAJE

Délka mostního objektu	113,130 m
Délka nosné konstrukce	107,000 m
Délka přemostění	105,000 m
Počet polí	2 (osově symetrické)
Rozpětí jednotlivých polí	53,000 m (na osu uložení)
Šikmost	kolmá
Volná šířka	2 x 3,0 m
Šířka nosné konstrukce	8,200 m
Příčný sklon	2,0 % (střechovitý)
Podélný sklon	proměnný (0,00 - 8,12 %)

5.1 Použité materiály

Beton

Podkladní beton	C8/10	X0
Piloty	C25/30	XC2, XA2
Základy	C30/37	XC2, XF1, XA2
Mostovka	C50/60	XC4, XD1, XF2
Pylon	C40/50	XC4, XD1, XF2

Výztuž

Betonářská výztuž	B 500B
Předpínací výztuž	Ls 15,7/1860

Ocel

Závěsy	S460
Kotevní plechy	S355

5.2 Materiálové charakteristiky

Mostovka - Beton C50/60

Charakteristická pevnost v tlaku	$f_{ck} = 50 \text{ MPa}$
Střední pevnost v tahu	$f_{ctm} = 4,1 \text{ MPa}$
Dolní kvantil pevnosti v tahu	$f_{ctk,0,05} = 2,9 \text{ MPa}$
Modul pružnosti	$E_{cm} = 37 \text{ GPa}$
Mezní přetvoření	$\varepsilon_{cu3} = 3,5 \text{ ‰}$
	$\varepsilon_{c2} = 2,0 \text{ ‰}$

Součinitel spolehlivosti	$\gamma_c = 1,5$
Součinitel účinků zatížení pro mosty v tlaku	$\alpha_{cc} = 0,9$
Součinitel účinků zatížení pro mosty v tahu	$\alpha_{ct} = 1,0$
Návrhová pevnost v tlaku	$f_{cd} = \alpha_{cc} * f_{ck} / \gamma_c = 30 \text{ MPa}$
Návrhová pevnost v tahu	$f_{ctd} = \alpha_{ct} * f_{ck,0,05} / \gamma_c = 1,9 \text{ MPa}$
Součinitel teplotní roztažnosti	$\alpha = 1,00E-05 \text{ K}^{-1}$
Objemová hmotnost	$\gamma = 2500 \text{ kg/m}^3$

Pylon - C40/50

Charakteristická pevnost v tlaku	$f_{ck} = 40 \text{ MPa}$
Střední pevnost v tahu	$f_{ctm} = 3,5 \text{ MPa}$
Dolní kvantil pevnosti v tahu	$f_{ctk,0,05} = 2,5 \text{ MPa}$
Modul pružnosti	$E_{cm} = 35 \text{ GPa}$
Mezní přetvoření	$\varepsilon_{cu3} = 3,5\%$
Návrhová pevnost v tlaku	$f_{cd} = \alpha_{cc} * f_{ck} / \gamma_c = 24 \text{ MPa}$
Návrhová pevnost v tahu	$f_{ctd} = \alpha_{ct} * f_{ck,0,05} / \gamma_c = 1,66 \text{ MPa}$
Součinitel teplotní roztažnosti	$\alpha = 1,00E-05 \text{ K}^{-1}$
Objemová hmotnost	$\gamma = 2500 \text{ kg/m}^3$

Betonářská výztuž B500B

Charakteristická pevnost v tahu	$f_{yk} = 500 \text{ MPa}$
Součinitel spolehlivosti	$\gamma_s = 1,15$
Návrhová pevnost v tahu	$f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s = 434,78 \text{ MPa}$
Modul pružnosti	$E_s = 200 \text{ GPa}$
Poměrné přetvoření na mezi kluzu	$\varepsilon_{yd} = 2.17\%$
Součinitel teplotní roztažnosti	$\alpha = 1,20E-05 \text{ K}^{-1}$
Objemová hmotnost	$\gamma = 7850 \text{ kg/m}^3$

Předpínací výztuž

Typ výztuže	Y 1860 S7-15,7-A
Charakteristická pevnost v tahu	$f_{pk} = 1860 \text{ MPa}$
Smluvní mez kluzu	$f_{p0,1k} = 1640 \text{ MPa}$
Modul pružnosti	$E_p = 195 \text{ GPa}$
Dílčí součinitel materiálu	$\gamma_s = 1,15$
Návrhová pevnost v tahu	$f_{pd} = f_{p0,1k} / \gamma_s = 1426,08 \text{ MPa}$
Průměr lana	$\Phi_p = 15,7 \text{ mm}$
Plocha 1 lana	$A_{p,1} = 150 \text{ mm}^2$
Průměr kabelu	$\Phi_{duct} = 80 \text{ mm}$
Průměr kabelového kanálku	$\Phi_{pk} = 87 \text{ mm}$
Maximální napínací napětí	$\sigma_{p,max} = \min\{0,8f_{pk}; 0,9f_{p0,1k}\} = 1476 \text{ MPa}$
Maximální napětí po zakotvení	$\sigma_{p0,max} = \min\{0,75f_{pk}; 0,85f_{p0,1k}\} = 1394 \text{ MPa}$
Součinitel teplotní roztažnosti	$\alpha = 1,20E-05 \text{ K}^{-1}$
Objemová hmotnost	$\gamma = 7850 \text{ kg/m}^3$

Konstrukční táhla Macalloy 460

Charakteristická pevnost v tahu	$f_{yk} = 460 \text{ MPa}$
Mez pevnosti	$f_{uk} = 610 \text{ MPa}$
Součinitel spolehlivosti	$\gamma_s = 1,00$
Návrhová pevnost v tahu	$f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s = 460 \text{ MPa}$
Modul pružnosti	$E_s = 190 \text{ GPa}$
Součinitel teplotní roztažnosti	$\alpha = 1,20 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$
Objemová hmotnost	$\gamma = 7850 \text{ kg/m}^3$

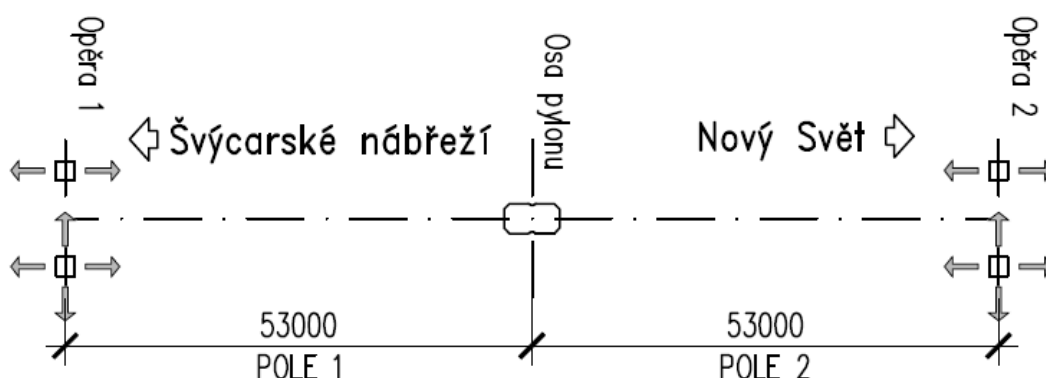
Ocel S355

Charakteristická pevnost v tahu	$f_{yk} = 335 \text{ MPa}$
Mez pevnosti	$f_{uk} = 470 \text{ MPa}$
Součinitel spolehlivosti	$\gamma_s = 1,00$
Návrhová pevnost v tahu	$f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s = 335 \text{ MPa}$
Modul pružnosti	$E_s = 210 \text{ GPa}$
Součinitel teplotní roztažnosti	$\alpha = 1,20 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$
Objemová hmotnost	$\gamma = 7850 \text{ kg/m}^3$

5.3 Mostní vybavení

Ložiska

Celkově jsou pro nosnou konstrukci navržena 4 elastomerová ložiska - pro každou opěru 2 ks. V podélném směru jsou pohyblivá, v příčném směru je jedno ložisko navrženo jako pevné, druhé posuvné. Střed dilatace tvoří osa pylonu, který je rámově spojený s mostovkou. Ložiska jsou navržena na nálitcích, které budou zhotoveny před aktivací ložisek z nízkosmršťovacího materiálu.



Obr. 18 Schéma ložisek

Dilatační závěr

Na koncích nosné konstrukce jsou umístěny povrchové dilatační závěry, konkrétní typ není navržen. Velikost kapsy pro dilatační závěr v nosné konstrukci a závěrné zdi je nutné dodržet dle zvoleného typu závěru.

Odvodnění

Odvodnění povrchu mostovky je zajištěno příčným 2% sklonem a podélným sklonem mostovky. Voda je sváděna do odvodňovačů umístěných u říms a dále PVC trubek Ø80 k opěrám, kde je vyústěna na upravený povrch pod mostem.

Zábradlí

Na římsách bude umístěno ocelové zábradlí se svislou výplní. Výška je navržena 1300 mm od horního římsy z důvodu pohybu cyklistů na lávce. Pro větší bezpečnost je stejná výška zábradlí umístěna i v pruhu pro chodce. Sloupky jsou umístěny po vzdálenosti 2,0 m a budou uchyceny chemickými kotvami do předem připravených chrániček v římse.

Izolace

Horní povrch mostovky v dopravních pruzích bude opatřen hydroizolační stěrkou tl. 5 mm po celé šířce volného prostoru. Spodní stavba bude ošetřena penetračním nátěrem a dvojitým asfaltovým nátěrem proti zemní vlhkosti.

Úprava pod mostem

V bezprostředním okolí mostního objektu je navržena úprava povrchu pod mostem. Bude provedeno zpevnění lomovým kamenem do betonu. Podél stávající cyklostezky pod mostem je navrženo odvodnění z betonových prefabrikovaných žlabů. Na porušených nezpevněných místech bude provedeno zpětné ohumusování a osetí travním semenem.

Revizní přístupy

Navržená konstrukce nevyžaduje žádné speciální revizní otvory a přístupy. Ložiska na opěrách lze volně kontrolovat z přilehlého terénu pod mostem.

Geodetické body

Geodetické značky budou osazeny na nosnou konstrukci i spodní stavbu. Přesné umístění a počet je nutné odsouhlasit s investorem.

Požadavky na použité materiály

- Pro jednotlivé části konstrukce jsou specifikované třídy betonu s požadovaným stupněm odolnosti proti prostředí
- Ve všech konstrukčních prvcích je nutné dodržovat stanovené minimální krytí.
- Vytrnování výztuže při zárodku mostovky + výztuž mostovky v kapsách pro dilatační závěr je nutné opatřit protikorozním nátěrem cementovou suspenzí.
- Ocelové přípravky na styku s okolním prostředím a v betonové vrstvě, která je menší než jmenovité krytí, musí být opatřeny protikorozním nátěrem. Specifikace jednotlivých vrstev dle zvolené protikorozní ochrany. Veškeré poškození protikorozní vrstvy musí být před uvedením lávky do provozu opraveno. Ocelové prvky opatřené protikorozní ochranou nelze bez souhlasu výrobce na stavbě dále řezat nebo svařovat.
- Veškeré otvory po bednění budou zaslepeny plastovými záslepkami nebo epoxidem.
- Na všech betonových prvcích bude proveden pasport trhlin. Trhliny větší než 0,5 mm budou injektovány epoxidovou injektážní pryskyřicí. V nosné konstrukci bude injektáž provedena pro trhliny 0,3 mm a více.

6 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce byl návrh variant konstrukcí, z kterých vybraná varianta byla dále rozpracována. Výchozí stav konstrukce byl nalezen iteračně pomocí ručního výpočtu v MS Excel a Scia Engineer 18.1. Jednotlivé části nosné konstrukce zavěšeného mostu byly posouzeny na mezní stav použitelnosti a byly provedeny posudky na únosnost s příslušným návrhem výztuže. Z velké části byly posudky provedeny ručním výpočtem, posouzení pylonu po porovnání s kontrolní úlohou bylo provedeno v programu IDEA StatiCa 10.1.

Pro zvolenou variantu byl navržen postup výstavby a zpracována vizualizace zobrazující prostorovou konstrukci mostu v návaznosti na okolní krajinu a komunikace. 3D model konstrukce byl vytvořen v programu Rhinoceros 5.0, z kterého byly získány první obrázkové výstupy. Ten byl později rozšířen o dílčí materiály v prostředí Lumion 7.

Pro staticky posuzované prvky nosné konstrukce byly vytvořeny výkresy výztuže mostovky - předpínací a betonářská a výkres výztuže pylonu pomocí softwaru AutoCAD.

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ČSN 73 6201 *Projektování mostních objektů*. ČNI, Praha, 2008
- [2] ČSN EN 1990 ed 2 *Zásady navrhování konstrukcí*. ÚNMZ, Praha, 2011
- [3] ČSN EN 1991-1-5 *Zatížení konstrukcí. Obecná zatížení - zatížení teplotou*. ČNI a ÚNMZ, Praha, 2005 až 2011
- [4] ČSN EN 1991-1-4 ed.2 *Zatížení konstrukcí. Obecná zatížení – Zatížení větrem*. Praha: ČNI, 2013.
- [5] DUCHÁČ, Petr, RŮŽIČKA, Stanislav, KLUSÁČEK, Ladislav. *Konstrukce z předpjatého betonu a jejich statická analýza. Sbírka příkladů*. Brno: VUT, fakulta stavební. 2012.
- [6] FREYSSINET. *Předpínací systém Freyssinet*. [online]. [cit. 2019-11-10].
Dostupné z:
http://www.freyssinet.cz/gallery/predpinaci_system_freyssinet.pdf
- [7] LANÍKOVÁ, Ivana. *Prvky betonových konstrukcí BL01*. [online]. [cit. 2019-12-10]. Dostupné z:
https://www.fce.vutbr.cz/BZK/lanikova.i/BL01/BL01_prednaska_6.pdf
- [8] MĚSTSKÉ KOMUNIKACE. *Návrh stezek pro cyklisty*. [online]. [cit. 2019-12-2]. Dostupné z:
<https://www.fce.vutbr.cz/PKO/novak.m/bm03/prednasky/11.pdf>
- [9] NEČAS, Radim, KOLÁČEK, Jan, PANÁČEK, Josef. *Betonové mosty I - zásady navrhování*. Brno, 2014. ISBN 978-80-214-4979-4.
- [10] OCELÁŘ. *Materiálové charakteristiky*. [online]. [cit. 2019-12-2]. Dostupné z: <http://www.steelcalc.com/cs/materchar.aspx>
- [11] *Politika jakosti pozemních komunikací: VL a TP* [online]. [cit. 2019-12-03].
Dostupné z: <http://www.pjpk.cz>
- [12] ŠTĚPÁNEK, Petr, TERZIJSKI, Ivailo, LANÍKOVÁ, Ivana a kol. *BL01 Prvky betonových konstrukcí. Výukové texty, příklady a pomůcky*. Brno: VUT, fakulta stavební, 2015.
- [13] ŠVARŤÍČKOVÁ, Ivana. *Tabulky do cvičení betonových konstrukcí*. [online]. [cit. 2019-12-2]. Dostupné z:
<https://www.fce.vutbr.cz/BZK/svarickova.i/pdf/BL01/Tabulky.pdf>

- [14] TENSION SYSTEM. *Systém konstrukčních táhel Macalloy*. [online]. [cit. 2019-12-2]. Dostupné z: http://www.tension.cz/www/media/files/pdf-k-pripojeni_12/macalloy-system-konstrukcnich-tahel_57.pdf
- [15] ZAPLETALOVÁ, Lenka, MOJZÍK, Petr, STRÁSKÝ, Jiří. *Zavěšená lávka přes dálnici D1 v Bohumíně*. [online]. [cit. 2019-12-04]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/104883683-Zavesena-lavka-pres-dalnici-d1-v-bohumine-cable-stayed-pedestrian-bridge-across-the-motorway-d1-at-bohumin.html>

8 SEZNAM PŘÍLOH

P1 - Použité podklady a varianty řešení

P1.01	Podklady
P1.02	Varianta A
P1.03	Varianta B
P1.04	Varianta C

P2 - Výkresy

P2.01	Půdorys
P2.02	Podélný řez
P2.03	Příčné řezy
P2.04	Výkres předpínací výztuže
P2.05	Výkres betonářské výztuže
P2.06	Výkres výztuže pylonu

P3 - Stavební postup a vizualizace

P3.01	Stavební postup
P3.02	Vizualizace

P4 - Statický výpočet

P4.01	Statický výpočet
P4.02	Vnitřní síly a vlastní tvary

9 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Půdorysné schéma	10
Obr. 2 Podélný řez terénem v ose mostu	10
Obr. 3 Podélný řez - varianta A	11
Obr. 4 Příčný řez - varianta A	12
Obr. 5 Příčný řez - varianta B	12
Obr. 6 Příčný řez - varianta B	13
Obr. 7 Podélný řez - varianta C	13
Obr. 8 Příčný řez - varianta C	14
Obr. 9 Prutový model konstrukce	17
Obr. 10 Render modelu	17
Obr. 11 Model kontrolní úlohy	18
Obr. 12 Schéma účinků	18
Obr. 13 M_y - lineární výpočet	18
Obr. 14 N_x - lineární výpočet	18
Obr. 15 Průhyb u_z - lineární a nelineární výpočet	19
Obr. 16 M_x - nelineární výpočet	19
Obr. 17 Schéma zatížení chodci pro posudek kroucení	20
Obr. 18 Schéma ložisek	25