



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

ZAVĚŠENÁ LÁVKA PŘES VODNÍ TOK

CABLE-STAYED PEDESTRIAN BRIDGE OVER THE RIVER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jakub Ilčík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JAN KOLÁČEK, 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. Jakub Ilčík
Název	Zavěšená lávka přes vodní tok
Vedoucí práce	Ing. Jan Kolářek, 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 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.

ČSN 73 6214: Navrhování betonových mostních konstrukcí

Literatura doporučená vedoucím diplomové práce.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Pro zadaný problém navrhnete dvě až tři varianty řešení a zhodnotíte je. Podrobný návrh nosné konstrukce vybrané varianty lávky pro pěší provedete včetně zohlednění vlivu výstavby mostu na jeho návrh. Nosnou konstrukci můžete zkrátit na konci a případně i na začátku mostu. S ohledem na velký poloměr směrového oblouku můžete most napřímit. Ostatní úpravy provádějte podle pokynů vedoucího diplomové práce.

Požadované výstupy:

Textová část (obsahuje 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 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).

ABSTRAKT

Cílem diplomové práce je návrh zavěšené lávky přes vodní tok. Byly navrženy 2 varianty z nichž jedna byla vybrána pro statickou analýzu. Vybranou variantou je zavěšená lávka s nakloněným pylonem tvaru „A“ na jednom břehu a mostovkou z prefabrikovaných segmentů. Příčný řez je volen tak, aby umožnil převedení pěší i cyklistické dopravy. Práce obsahuje statický výpočet konstrukce modelované v programu SCIA Engineer a posuzované v programu IDEA Statica. Návrh a posouzení je provedeno dle aktuálně platných evropských norem.

KLÍČOVÁ SLOVA

Zavěšená lávka, prefabrikace, vlastní tvary a frekvence, SCIA Engineer, IDEA Statica, statický výpočet

ABSTRACT

The aim of this masters thesis is a design of a suspended pedestrian bridge over a watercourse. There are two variants designed, one of which is selected for static analysis. The chosen variant is a suspended pedestrian bridge with an inclined „A“ shaped pylon situated on one bank and deck made of prefabricated segments. The cross-section is designed to allow the transfer of both pedestrian and bicycle traffic. Thesis contains structural design of construction modeled in SCIA Engineer and checked in IDEA Statica. Design and assessment are according to the current European standards.

KEYWORDS

Cable-stayed pedestrian bridge, prefabrication, natural modes and frequencies, SCIA Engineer, IDEA statica, structural design

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. Jakub Ilčík *Zavěšená lávka přes vodní tok*. Brno, 2019. 20 s., 245 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav betonových a zděných konstrukcí. Vedoucí práce Ing. Jan Kolářek, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Zavěšená lávka přes vodní tok* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 29. 10. 2019

Bc. Jakub Ilčík
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Zavěšená lávka přes vodní tok* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 29. 10. 2019

Bc. Jakub Ilčík
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Musím poděkovat zejména rodině za důvěru, podporu, a to možná nejdůležitější za snahu zdržet se neustálých otázek typu „tak co ta diplomka“.

Dále musím poděkovat vedoucímu práce za poskytnuté rady a poznatky.

A nemůžu opomenout poděkování zaměstnavateli, který mi umožnil věnovat této práci dostatek času ke zdárnému dokončení.

Obsah:

1. ÚVOD	2
2. VARIANTY	2
1.1. 1. varianta – zavěšená lávka s jedním pylonem	2
1.2. 2. varianta – symetrická visutá lávka.....	4
3. ZVOLENÁ VARIANTA	4
3.1. pylon	4
3.2. příčný řez	5
3.3. závěsy, předpětí.....	5
3.4. příslušenství.....	5
4. ZATÍŽENÍ A KOMBINACE	6
4.1. vlastní tíha	6
4.2. ostatní stálé	6
4.3. předpětí	6
4.4. zatížení chodci	6
4.5. Zatížení teplotou.....	6
4.6. Kombinace.....	7
5. POSUDKY	7
6. VÝCHOZÍ STAV KONSTRUKCE.....	7
7. FÁZE VÝSTAVBY	9
7.1. Stavební postup.....	9
7.2. Vliv výstavby na konstrukci	10
8. DYNAMICKÁ ANALÝZA.....	11
8.1. modální analýza.....	11
8.2. Harmonická odezva	11
9. ZÁVĚR	12
10. SEZNAMY	12
10.1. Seznam obrázků.....	12
10.2. Seznam tabulek	12
11. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	12
11.1. Literatura	12
11.2. Internetové zdroje	13
12. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	13
13. SEZNAM PŘÍLOH	13

1. ÚVOD

Cílem diplomové práce je návrh zavěšené lávky přes vodní tok – řeku Berounku. Byly navrženy 2 varianty – visutá symetrická konstrukce a asymetrická zavěšená konstrukce s nakloněným pylonem na jednom břehu.

Příčný řez a vzdálenosti závěsů jsou u obou konstrukcí totožné. Příčný řez mostovkou je volen tak, aby umožnil převedení pěší dopravy i cyklistů včetně bezpečnostních odstupů. Mostovka se skládá z prefabrikovaných segmentů délky 7,0m.

Vybranou variantou je asymetrická zavěšená konstrukce s pylonem tvaru „A“ ukloněným směrem od toku s osmi řadami závěsů vynášejících jednotlivé segmenty mostovky, a stejným počtem závěsů kotvící pylon do opěry. Pylon působí jako kyvná stojka s vrubovým kloubem v patě. Mostovka v místě pylonu je pak podporována dvojicí kyvných stojek, vystupujících ze stejného základového bloku jako pylon. Alternativou je varianta symetrické zavěšené lávky s pylony ve tvaru „V“ na obou březích.

Z podkladů k vypracování není zřejmé přesné umístění lávky, s ohledem na určení klimatických zatížení byla vybrána lokalita na začátku Prahy, kde Berounka dosahuje podobné šířky.

Zatížení konstrukce je uvažováno dle platných evropských norem, včetně úprav a změn. Dimenzování je nosné konstrukce je provedeno dle ČSN EN 1992.

Společně se statickým výpočtem byla zpracována výkresová a obrazová dokumentace, která je součástí příloh.

2. VARIANTY

1.1. 1. varianta – zavěšená lávka s jedním pylonem

První variantou je asymetrická zavěšená konstrukce s pylonem tvaru „A“ ukloněným směrem od toku s osmi řadami závěsů vynášejících jednotlivé segmenty mostovky, a stejným počtem závěsů kotvící pylon do opěry. Osobní vzdálenost podpor na mostovce je 7,0 m stejně jako délka jednotlivých prefabrikovaných segmentů, z kterých je mostovka uvažována.

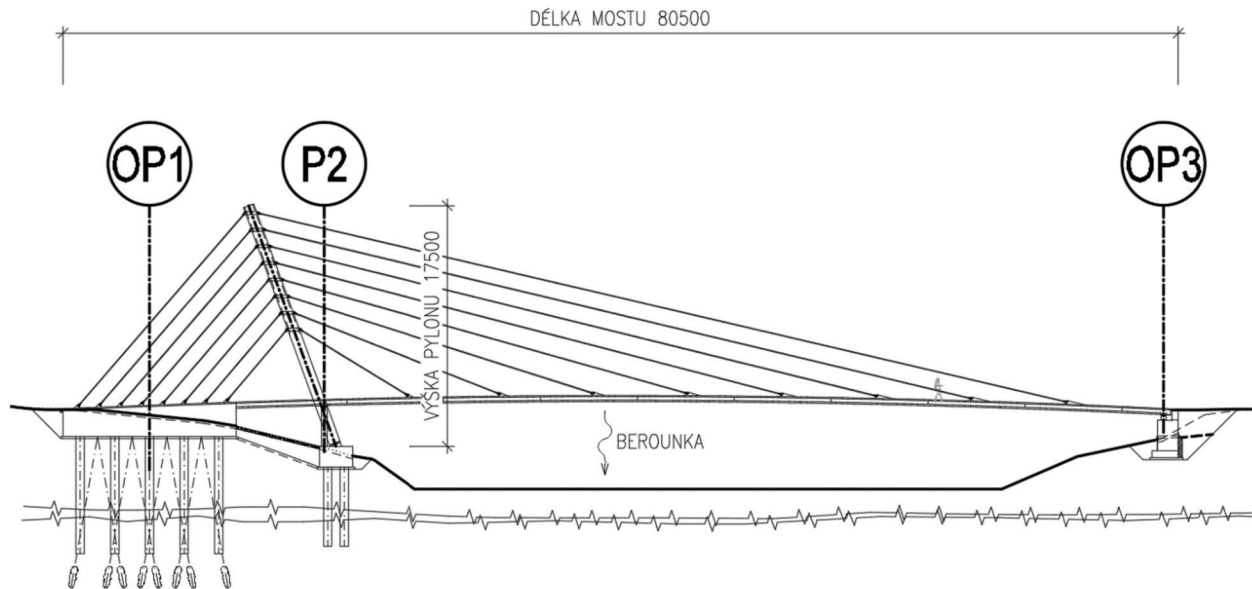
Mostovka je vetknuta do OP1 v místě pylonu je vynášena dvojicí kyvných stojek. Tato část mostovky je zamýšlena jako monolitická, následující části mostovky včetně koncové části u OP3 jsou uvažovány jako prefabrikované segmenty, které budou postupně připínány k pylonu.

Šířka mostovky vychází z charakteru převáděné dopravy 2 pruhy pro pěší šířky 0,75, 2 pruhy pro cyklisty šířky 1,0m, bezpečnostní odstupy mezi pěšiči a cyklisty 0,25m a římsa tvořící zároveň hlavní nosný prvek šířky 0,8m, která je dána potřebou umístění zábradlí a zároveň závěsů, tak aby vlivem uklonění závěsů nedocházelo ke kolizím. Celková šířka mostovky pak vychází na 5,6 m, s volnou šířkou 4,0m. Předpokládám, že intenzita cyklistů nepřesáhne 120/h – bezpečnostní odstup mezi protiběžnými pruhy tedy není nutné uvažovat.

Odvodnění je zajištěno příčným a podélným sklonem mostovky, dvojicí odvodňovacích trubiček na každém segmentu. Příčný sklon pochozí plochy je střečovitý, 2,0 %, horní povrch římsy je ve sklonu 4,0 %. V podélném směru je mostovka vedena v parabolickém oblouku se vzepětím 1,1m. maximální podélný sklon je 5,0 % u opěr. Spodní povrch mostovky je pak vodorovný, s místech teoretických podpor jsou provedeny příčníky šířky 0,5m.

Založení OP1 je kombinací pilot vetknutých so skalního podloží a lanových zemních kotev s ohledem na tahovou reakci, kterou vyvozuje kotvení závěsů. P2 je pak založena na pilotách a propojena s OP1 betonovými vzpěrami. OP3 je vzhledem k malým silám které zde konstrukce vyvozuje založena plošně.

Schéma podélného řezu:



Obr. 1 – schéma podélného řezu varianty 1

1.2. 2. varianta – symetrická visutá lávka

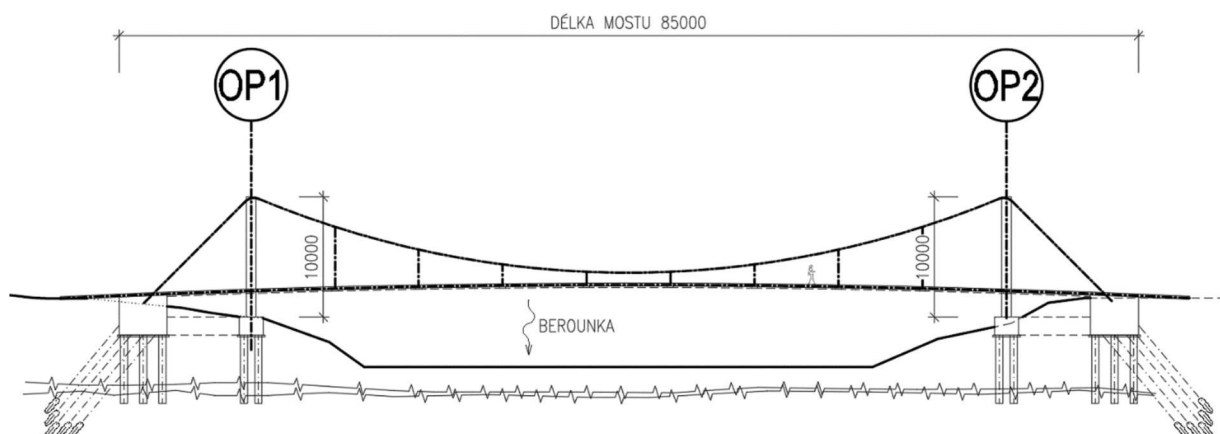
Alternativní variantou je pak zavěšená konstrukce s kolmými pylony ve tvaru „V“ výšky 10,0 m. Hlavní část mostovky je vynášena závěsy po 7,0m. Mostovka je na březích uvažována jako monolitická s ohledem na možnost výstavby skruže, a na opěrách a podpěrách je uložena na elastomerových ložiscích. Hlavní lano pak přes závěsy vynáší prefabrikované segmenty.

Mostovka je svým příčným uspořádáním totožná s mostovkou z varianty 1. Stejně tak odvodnění je provedeno stejným stylem.

Pylony ukloněné v příčném řezu do tvaru „V“ jsou voleny s ohledem na možnost provedení kompaktnější spodní stavby oproti kolmé variantě. Průřez pylonu je obdélníkovitý, s rozšířením u paty

Založení je s ohledem na nutnost přenesení tahových reakcí voleno jako kombinace pilot vetknutých do skalního podloží a lanových zemních kotev.

Schéma podélného řezu:



Obr. 2 – schéma podélného řezu varianty 2

Jak už bylo uvedeno výše, pro další návrh byla zvolena varianta 1. Působí elegantněji a z hlediska údržby je tento typ konstrukce výhodnější – pouze 2 ložiska. Z pohledu založení tato konstrukce vychází taky jako praktičtější, postačuje jedna velká spodní stavba a jsou tak minimalizovány dopady na okolní krajinu.

3. ZVOLENÁ VARIANTA

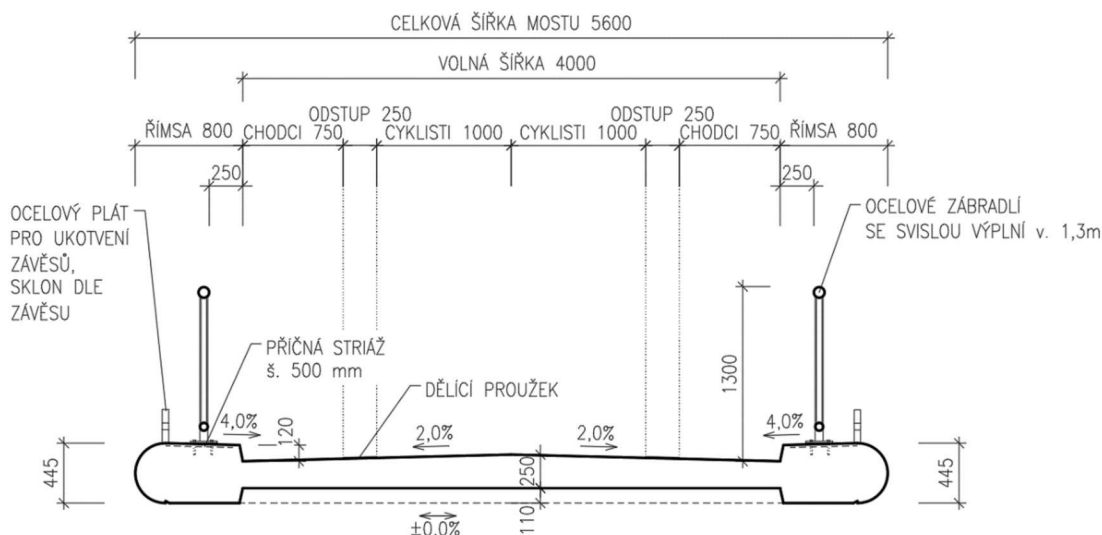
3.1. pylon

Pylon ve tvaru „A“ je tvořen obdélníkovým příčným řezem s rozměry 1,08x0,8 m v patě, 0,5x0,8 m ve střední části, v horní části z důvodu kotvení závěsů pokračuje s vykrojením do tvaru písmene „H“. Osa pylonu je v podélném směru ukloněna o 20° od svislice, v příčném řezu je pylon ukloněn o 13° od svislice. Pylon je v horní části propojen čtveřicí betonových vzpěr 0,4x0,4 m. Naklonění pylonu v podélném směru je provedeno s ohledem na estetické působení konstrukce, příčném řezu je pak naklonění provedeno s ohledem na zajištění dodatečné stability mostovky, kdy ukloněné závěsy zajišťují přirozené stabilizační síly při bočních výkyvech. Velikost náklonu je volena tak, aby závěsy

nekolidovaly se zábradlím. Rozšíření v patě pylonu je pak provedeno s ohledem na vyztužení vrubového kloubu (viz statický výpočet).

3.2. příčný řez

Jak již bylo popsáno výše šířka mostovky, a tedy i příčný vychází z charakteru převáděné dopravy. Dimenze jsou voleny tak, aby konstrukce působila co nejlehčím dojmem a nejjednodušším dojmem. Římsy plní funkci hlavních nosných prvků, výška obruby je 120 mm.



Obr. 3 – příčný řez

3.3. závěsy, předpětí

Závěsy jsou navrženy tak, aby tvořily podpory pomyslného spojitého nosníku, každý tedy vynáší „svoji“ část tíhy mostovky. Spáry mezi segmenty jsou pak voleny tak, aby procházeli místy nulových momentů na tomto myšleném nosníku. Tlaková rezerva vzniká v konstrukci přirozeně od vlastní tíhy, respektive rozkladem síly v závěsu do svislé a vodorovné složky, předpětí je tedy navrženo spíše jako pojistka.

Pro závěsy bylo hledáno takové přetvoření, aby deformace od účinků kombinace vlastní tíhy, stálých složek, předpětí a přetvoření závěsů nepřekračovali zvolenou limitní hodnotu průhybu a zároveň výslednice sil od kotvení závěsů na pylonu směřovala do osy pylonu. Více viz statický výpočet.

3.4. příslušenství

Na mostě je s ohledem na pohyb cyklistů navrženo ocelové zábradlí se svislou výplní s horním madlem ve výšce 1,3 m od pochozí plochy. Na OP3 je umístěn hřebenový mostní závěr s trojúhelníkovými zuby Freyssinet Wd 110 umožňující dilatační pohyby do 110 mm u kterého díky tvaru zubů nehrozí cyklistům zaseknutí kola při případném poškození mostního závěru. Odvodnění mostu je zajištěno trubičkou na každém segmentu, voda je odváděna volně do řeky pod lávkou. Před i za mostem je s ohledem na spád okolního terénu použit liniový odvodňovací žlab.

4. ZATÍŽENÍ A KOMBINACE

4.1. vlastní tíha

$g_{0,k}$ automaticky generována softwarem

4.2. ostatní stálé

$g_{1,k}$ ostatní stálé složky – zábradlí, uvažováno 2x1,0 kN/m

4.3. předpětí

$P_{k,0}$ krátkodobé ztráty předpětí generovány softwarem

$P_{k,oo}$ dlouhodobé ztráty předpětí odhadnuty jako 10%

4.4. zatížení chodci

$q_{1,k}$ Uvažováno zatížení davem 5 kN/m² pro prověření stavů MSÚ včetně příslušné vodorovné složky (10% ze svislých účinků), pro prověření stavů MSP je uvažováno zatížení vypočtené dle následujícího vztahu:

$$q_{fk} = 2,0 + \frac{120}{L + 30} \quad [kN/m^2]$$

Kde L je rovno délce lávky, v tomto případě 80,0m. Zatížení je pak 3,1 kN/m².

Zatížení bylo uvažováno v několika polohách, rozhodující účinky vyvozuje vždy plné zatížení.

4.5. Zatížení teplotou

Jsou modelovány 4 zatěžovací stavy:

Rovnoměrné oteplení	$T_{R,+}$	+30,5 °C
Rovnoměrné ochlazení	$T_{R,-}$	-33,0 °C
Nerovnoměrné oteplení	$T_{N,+}$	15,0 °C
Nerovnoměrné ochlazení	$T_{N,-}$	8,0 °C

Tabulka 1. zatížení teplotou

Výchozí teploty jsou vztaženy k hodnotám pro oblast Prahy. Pro nelineární účinky je uvažován typ konstrukce 3.a - betonová desková konstrukce. Účinky teploty jsou pak uvažovány dle klíče:

$$T = \max\{0,75 * T_R + 1,0 * T_N; 1,0 * T_R + 0,35 * T_N\}$$

Další typy zatížení jako je vítr, pokles podpor apod. nebyly v rámci diplomové práce uvažovány. Zatížení větrem by mělo zásadní vliv pouze na návrh podélně posuvného ložiska na OP3 – přenáší příčné účinky větru z téměř celé mostovky, na návrh ostatních prvků by vzhledem ke kombinačním součinitelům neměl vliv. Pokles podpor je pak s ohledem na charakter podloží (R2) nepravděpodobný.

4.6. Kombinace

Pro mezní stavy použitelnosti jsou použita kombinační pravidla:

$$6.14b) \quad \Sigma G_{k,jj \geq 1} + P + Q_{k,1} + \Sigma \psi_{0,ii \geq 1} Q_{k,i} \quad (\text{charakteristická})$$

$$6.15b) \quad \Sigma G_{k,jj \geq 1} + P + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \Sigma \psi_{2,ii \geq 1} Q_{k,i} \quad (\text{častá})$$

$$6.16b) \quad \Sigma G_{k,jj \geq 1} + P + \Sigma \psi_{2,ii \geq 1} Q_{k,i} \quad (\text{kvazistálá})$$

Pro mezní stavy použitelnosti je použita kombinace rozhodující s následujících:

$$6.10a) \quad \Sigma \gamma_{G,jj \geq 1} G_{k,j} + \gamma_p P + \gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1} + \Sigma \gamma_{Q,ii \geq 1} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

$$6.10b) \quad \Sigma \xi \gamma_{G,jj \geq 1} G_{k,j} + \gamma_p P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \Sigma \gamma_{Q,ii \geq 1} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

Pro posudky pylonu je pak konzervativně použita rovnice 6.10:

$$6.10) \quad \Sigma \gamma_{G,jj \geq 1} G_{k,j} + \gamma_p P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \Sigma \gamma_{Q,ii \geq 1} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

5. POSUDKY

Posouzení na mezní stavy je podrobně uvedeno ve statickém výpočtu. Posouzení vybraných řezů na mostovce a na pylonu je provedeno pomocí programu IDEA Statica 10.1. Ručně je pak ověřen vrubový kloub, místo kotvení závěsu na mostovce, závěsy a možnost založení mostu.

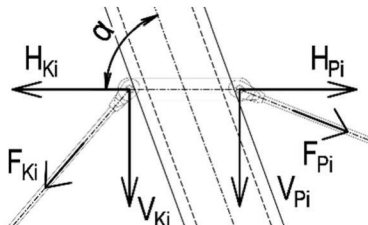
6. VÝCHOZÍ STAV KONSTRUKCE

Klíčovou částí pro správné fungování konstrukce je stanovení „výchozího stavu“. Jedná se o nalezení takového přetvoření v závěsech, které spolu se stálými složkami zatížení a předpětím zajistí, že mostovka bude po sestavení mostu v požadované poloze.

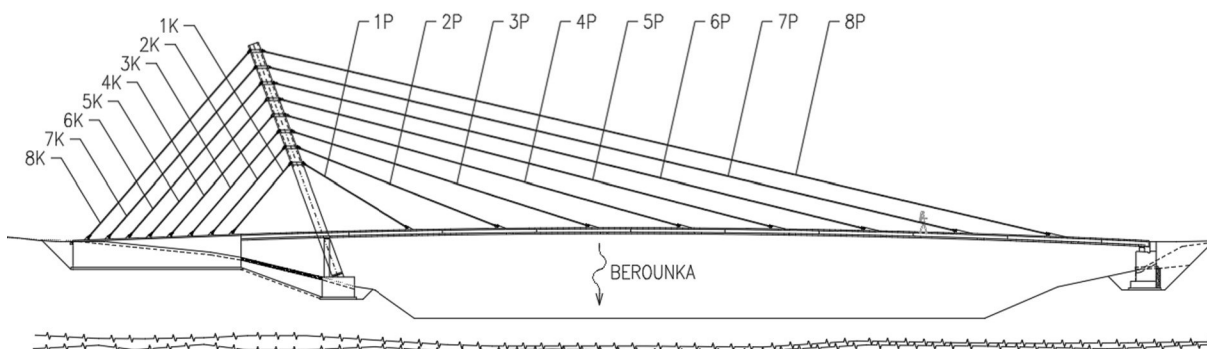
Tento výchozí stav jsem hledal tak, že jsem vytvořil spojitý nosník s podporami v místech závěsů, reakce na tomto nosníku odpovídají vertikální síle, kterou závěsy musí v místě kotvení vyvozovat. Z této síly je pak na základě geometrie konstrukce, respektive úhlu závěsu určena osová síla, která v závěsu musí být vyvozena. Taková je teorie za předpokladu, že geometrie konstrukce je neměnná. Společně s vertikální složkou ovšem na konstrukci působí horizontální složka síly způsobující okamžité pružné přetvoření betonu mostovky, a tedy narušení geometrie které se zvětšuje se vzrůstající vzdáleností od pevného bodu (OP1), na konci mostu toto přetvoření dosahuje hodnoty přes 10 mm při kombinaci účinků stálých složek, teoretických zkrácení závěsů a předpětí.

Hledání výchozího stavu je tedy iterativní proces hledání takového nastavení jednotlivých kabelů, které zajistí správnou polohu mostovky i s ohledem na přetvoření prvků. Podstatnou částí procesu hledání nastavení kabelů je taky rovnováha sil v pylonu, snahou je najít takové nastavení kdy je pylon od stálých složek namáhán pouze osovou silou. Toto jsem při hledání zohlednil tak, že síla a jí odpovídající přetvoření v závěsech kotvených v opěře je stanovena z následující podmínky:

$$\tan \alpha = \frac{\sum V}{\sum H}$$



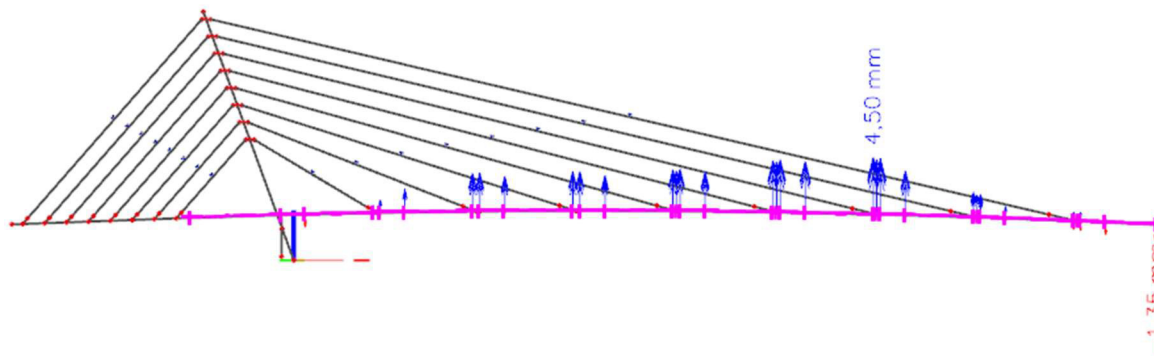
Obr. 4 – schéma sil v závěsu na pylonu



Obr. 5 – značení závěsů

Za těchto podmínek jsem tedy začal s iterací, výchozí přetvoření vychází z reakcí na spojitém nosníku. Přetvoření odpovídajících si závěsů např ϵ_{1K} a ϵ_{1P} byly vloženy do zatěžovacích stavů. Celkem 8 stavů pro 8 řad závěsů. Pro kombinaci těchto zatěžovacích stavů, stálých složek a předpětí (včetně krátkodobých ztrát) pak byly hledány takové součinitele pro jednotlivé závěsy, které zajistí maximální vertikální deformaci mostovky menší než limitní deformaci která byla zvolena jako $U_{z,max} = 5 \text{ mm}$.

Iterace byla zastavena při hodnotě $U_z = 4,5 \text{ mm}$. (v místě kotvení šestého závěsu).
pozn. Deformace -1,35 mm na OP3 je způsobena průhybem příčného řezu



Obr. 6 - deformace mostovky ve výchozím stavu

Pozn. - podrobné nastavení závěsů ve výchozím stavu je uvedeno v příloze P4.

7. FÁZE VÝSTAVBY

7.1. Stavební postup

Výstavba konstrukce bude probíhat v těchto etapách

- úprava terénu, zajištění staveniště
- provedení pilotážních plošin
- provedení pilot a zemních kotev
- betonáž spodní stavby P2
- betonáž OP1 a monolitické části mostovky, zabetonování mrtvých kotev
- betonáž P3 po úroveň závěrné zídky
- postupné bednění, armování a betonáž pylonu, při betonáži musí být zajištěna polohová stálost pylonu, pylon musí být během výstavby dodatečně kotven lany minimálně v místech příčných ztužujících prvků
- odbednění pylonu, ponechání jistících prvků
- postupná montáž segmentů a aktivace jejich závěsů
- uložení koncového segmentu na pomocnou skruž
- předeptnutí kabelů spojitosti
- demontáž pomocné skruže, odstranění jistících prvků pylonu
- dobetonování závěrné zídky OP3, instalace mostního závěru, instalace zábradlí
- provedení přímopochozí izolace mostovky
- odvodnění za opěrami, přechodové oblasti, terénní úpravy kolem opěr, palisády
- instalace zábradlí před a za mostem, instalace prvků proti vjezdu motorových vozidel,
- finální úpravy a uvedení do provozu

7.2. Vliv výstavby na konstrukci

Z výchozího stavu, který odpovídá teoretickému stavu konstrukce v čase po předepnutí je možné reverzní analýzou – postupným odebráním jednotlivých segmentů určit napětí a odpovídající přetvoření v závěsech. Díky sledování napětí v posledních závěsech každé fáze rozebírání konstrukce je tedy možné předepsat délky závěsů instalovaných v jednotlivých fázích takovou, že po skončení výstavby bude délka závěsů odpovídat délce projektované. Výsledky jsou zřejmé z následující tabulky:

ZÁVĚS - FÁZE	Projektovaná délka závěsu	síla v závěsu	$\Delta l = F/(EA)*L$ rozdíl oproti projektované délce	délka závěsu při instalaci do konstrukce	odchylka konce mostu od projektované polohy
	m	kN	m	m	mm
8P - ODEBRÁNÍ KONCOVÉ ČÁSTI	60.155	618.02	0.045	60.111	103.23
7P - ODEBRÁNÍ 8. SEGMENTU	52.721	542.65	0.034	52.687	86.16
6P - ODEBRÁNÍ 7. SEGMENTU	45.300	536.65	0.042	45.258	97.12
5P - ODEBRÁNÍ 6. SEGMENTU	37.909	469.96	0.031	37.878	63.37
4P - ODEBRÁNÍ 5. SEGMENTU	30.560	418.32	0.022	30.538	44.41
3P - ODEBRÁNÍ 4. SEGMENTU	23.273	368.10	0.020	23.254	38.71
2P - ODEBRÁNÍ 3. SEGMENTU	16.103	290.08	0.014	16.089	23.08
1P - ODEBRÁNÍ 2. SEGMENTU	9.218	246.39	0.007	9.211	11.85
8KP - ODEBRÁNÍ KONCOVÉ ČÁSTI	18.446	599.100	0.020	18.427	-
7K - ODEBRÁNÍ 8. SEGMENTU	16.777	510.630	0.015	16.763	-
6K - ODEBRÁNÍ 7. SEGMENTU	15.109	458.030	0.012	15.097	-
5K - ODEBRÁNÍ 6. SEGMENTU	13.441	484.630	0.011	13.430	-
4K - ODEBRÁNÍ 5. SEGMENTU	11.773	364.110	0.007	11.766	-
3K - ODEBRÁNÍ 4. SEGMENTU	10.105	318.920	0.007	10.098	-
2K - ODEBRÁNÍ 3. SEGMENTU	8.436	203.190	0.004	8.432	-
1K - ODEBRÁNÍ 2. SEGMENTU	6.770	96.370	0.002	6.768	-

Tabulka 2. výsledky zpětné analýzy fází výstavby

Dále jsem se pokoušel o podrobnější analýzu fází výstavby vzhledem k tomu, že výše uvedené postupy nezohledňují dotvarování prvků, počáteční napětí v prefabrikovaných segmentech, chování konstrukce s ohledem na dotvarování, redistribuci vnitřních sil apod. Po desítkách hodin strávených u modulu fáze výstavby v programu SCIA Engineer a posléze i MIDAS Civil, ve snaze najít správný mix zadání okrajových podmínek a prvků, aby na ně bylo možné aplikovat potřebné typy zatížení a počátečních napětí. Jsem nakonec jsem musel konstatovat že snaha o správný popis každé fáze na takovéto konstrukci, bez použití mnoha zjednodušujících předpokladů, je příliš ambiciózní a přesahuje mé znalosti příslušných softwarů. Díky této snaze jsem alespoň měl možnost nahlédnout do daných programů daleko hlouběji než v průběhu předchozího studia, a objevit nepřeberné množství různých možností, jak několika způsoby definovat stejný typ prvku, nelinearit, různých zatížení se stejným výsledným účinkem. A následně bohužel také kolik z těchto prvků, nelinearit a typů zatížení není podporováno v různých typech výpočtů.

Z výše uvedených důvodů jsou přijaty zjednodušující předpoklady – zejména není uvažováno s účinky dotvarování, konstrukce je uvažována na konci životnosti v čase t_{∞} za předpokladu že účinky počátečních napětí v prefabrikovaných segmentech již, odezněly, dlouhodobé ztráty předpětí jsou odhadnuty na 10 %, geometrie konstrukce odpovídá výchozímu stavu (předpoklad rektifikace závěsů v průběhu životnosti lávky). Zvýšené momenty na mostovce v místě kotvení závěsů v čase t_0 jsou pak zohledněny rezervou v posudku.

8. DYNAMICKÁ ANALÝZA

8.1. modální analýza

Byla provedena modální analýza. Zjištěno bylo prvních 15 tvarů konstrukce pokrývajících vlastní tvary a frekvence v rozsahu od 0,76 Hz u prvního tvaru a 6,29 Hz u patnáctého. Z hlediska použitelnosti konstrukce jsou klíčové frekvence blízké charakteristickým frekvencím chůze a běhu, jejichž hodnota je udávána jako 2,0 Hz u chůze respektive 2,5 Hz u běhu. Zjištěný rozsah je tedy dostatečný.

Problematická z hlediska lávek pro pěší je kombinace vlastních frekvencí horizontálních a vertikálních frekvencí blíží stavu kdy $f_h = 2,0$ Hz, $f_v = 1,0$ Hz. Při běžné chůzi pak dochází ke sčítání účinků vibrací ve svislém a příčném směru.

První 3 tvary odpovídají výkyvům mostovky ve svislém směru, prvním vlastním tvarem, ve kterém dochází k příčné deformaci mostovky je tak tvar čtvrtý s frekvencí $f_v = 1,77$ Hz. Dá se tedy říct, že ke sčítání účinků nebude docházet.

Vlastní frekvence

N	f [Hz]	ω [1/s]	ω^2 [1/s ²]	T [s]
Kombinace hmot : CM1				
1	0,76	4,76	22,66	1,32
2	1,13	7,07	50,05	0,89
3	1,61	10,11	102,26	0,62
4	1,77	11,14	124,15	0,56
5	2,00	12,59	158,42	0,50
6	2,30	14,44	208,39	0,44
7	2,50	15,72	247,20	0,40
8	3,13	19,65	385,95	0,32
9	3,19	20,04	401,49	0,31
10	3,58	22,49	505,78	0,28
11	4,29	26,94	725,73	0,23
12	4,62	29,05	843,74	0,22
13	5,60	35,19	1238,52	0,18
14	6,08	38,21	1459,75	0,16
15	6,29	39,50	1560,06	0,16

Tabulka 3. vlastní frekvence

8.2. Harmonická odezva

První ($f=0,76$ Hz) a šestý vlastní tvar ($f=2,3$ Hz) byly podrobeny harmonické analýze. Do míst maximálních výkyvů byla umístěna budící síla $F = 180$ N s frekvencí odpovídající frekvenci vlastního tvaru. Sledováno je maximální vybuzené vertikální zrychlení, kdy toto zrychlení nemá překročit limitní zrychlení určené dle vztahu:

$$\omega_{lim}^2 = 0,5 * \sqrt{f_0} \quad [m/s^2]$$

Limitní zrychlení pro první vlastní tvar je tedy 0,435 m/s² a pro šestý, který se nachází v klíčovém intervalu 2,0-2,5 Hz je limitní zrychlení 0,758 m/s².

Maximální vypočtená zrychlení dosahují 0,112 m/s² pro první vlastní tvar a -0,223 m/s² pro druhý vlastní tvar. Zrychlení tedy dosahují přibližně čtvrtiny limitního zrychlení u prvního vlastního tvaru a třetiny u tvaru šestého. Při pohybu tedy nebudou vznikat pohyby nepříjemně působící na přítomné chodce.

9. ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá návrhem lávky pro pěší od návrhu variant, návrhu geometrie prvků konstrukce, posouzení vybraných prvků konstrukce včetně dynamického posouzení lávky jako celku, až po vypracování výkresové dokumentace a vizualizace.

Při zpracovávání statického výpočtu a posudků jsou přijata zjednodušení, např. při stanovení výchozího stavu konstrukce není zohledněna fázovaná výstavba. Dále není podrobně řešeno založení, spodní stavba apod.

Ve statickém výpočtu je navržena výztuž vybraných řezů mostovky a pylonu, a jejich posouzení na mezní stavy únosnosti a použitelnosti. Řešen je také návrh a posouzení závěsů a vybraných detailů na konstrukci. Konstrukce je modelována v programu SCIA Engineer 19.1, posudky jsou zpracovány ručně a pomocí programu IDEA Statica 10.1, výkresová dokumentace je vytvořena v programu AutoCAD 2018, vizualizace je zpracována v programu LUMION 10.0.2

10. SEZNAMY

10.1. Seznam obrázků

- Obr. 1 – schéma podélného řezu varianty 1
- Obr. 2 – schéma podélného řezu varianty 2
- Obr. 3 – příčný řez
- Obr. 4 – schéma závěsu na pylonu
- Obr. 5 – značení závěsů
- Obr. 6 - deformace mostovky ve výchozím stavu

10.2. Seznam tabulek

- Tabulka 1. zatížení teplotou
- Tabulka 2. výsledky zpětné analýzy fází výstavby
- Tabulka 3. vlastní frekvence

11. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

11.1. Literatura

- NEČAS, R.; KOLÁČEK, J.; PANÁČEK, J. BETONOVÉ MOSTY I - ZÁSADY NAVRHOVÁNÍ. Studijní opory pro studijní předměty s prezenční formou studia BETONOVÉ MOSTY I - ZÁSADY NAVRHOVÁNÍ. Brno: Ing. Vladislav Pokorný-LITERA Brno, Tábor 43a, 612 00 Brno, 2014. ISBN: 978-80-214-4979- 4.
- ZICH, Miloš. Příklady posouzení betonových prvků dle Eurokódů. Praha: Dashöfer, 2010. ISBN 978-80-86897-38-7.
- STRÁSKÝ, Jiří. Stress ribbon and cable-supported pedestrian bridges. London: Thomas Telford Publishing, 2005. ISBN 07277-3282-x.
- MASOPUST, Jan: Speciální zakládání - 1. díl. Brno: AN CERM, s.r.o., 2004. ISBN 80-214-2770-1. (CS)
- ČSN 736201: Projektování mostních objektů.
- ČSN EN 1990 včetně změny A1: Zásady navrhování konstrukcí.
- ČSN EN 1991 - Zatížení konstrukcí-Část 1-1: Obecná zatížení – Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- ČSN EN 1992-1-1: Navrhování betonových konstrukcí. Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby.
- ČSN EN 1991-2. Zatížení konstrukcí -Část 2: Zatížení mostů dopravou. Praha: Český normalizační institut, 2005.

- ČSN EN 1992 - Navrhování betonových konstrukcí-Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- ČSN EN 1992-2: Betonové mosty - Navrhování a konstrukční zásady.
- ČSN 73 6214: Navrhování betonových mostních konstrukcí

11.2. Internetové zdroje

- <http://www.freyssinet.cz/>
- <https://macalloy.com/>
- <http://www.vsl.cz/>
- <http://www.pjpk.cz/technicke-podminky-tp/>

12. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Viz P4.1 Statický výpočet, použité zkratky a symboly jsou uvedeny na koncích protokolů posouzení mostovky a pylonu. Jiné používané zkratky a symboly jsou vysvětleny v textu.

13. SEZNAM PŘÍLOH

P1	POUŽITÉ PODKLADY A VARIANTY ŘEŠENÍ		
P1.1	Použité podklady	1:250	(3A4)
P1.2a	Varianta 1	1:200, 1:50	(8A4)
P1.2b	Varianta 2	1:200, 1:50	(10A4)
P2	VÝKRESOVÁ ČÁST		
P2.1	půdorys	1:100	(5A4)
P2.2	podélný řez	1:100	(12A4)
P2.3	příčné řezy	1:50, 1:25	(6A4)
P2.4	schéma výztuže mostovky	1:25, 1:10	(44A)
P2.5	schéma výztuže pylonu	1:500, 100, 25	(4A4)
P2.6	detaily	---	(11A4)
P3	STAVEBNÍ POSTUP A VIZUALIZACE		
P3.1	stavební postup	1:500	(6A4)
P3.2	vizualizace	---	(5A4)
P4	STATICKÝ VÝPOČET		
P4.1	Statický výpočet	---	(130A4)
P4.2	Obrazové přílohy statického výpočtu	---	(45A4)