



# 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

## NÁVRH ZAVĚŠENÉ LÁVKY PRO PĚŠÍ

DESIGN OF CABLE-STAYED PEDESTRIAN BRIDGE

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Lukáš Uher

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. RADIM NEČAS, Ph.D.

BRNO 2017



# 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. Lukáš Uher
Název	Návrh zavěšené lávky pro pěší
Vedoucí práce	Ing. Radim Nečas, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2016
Datum odevzdání	13. 1. 2017

V Brně dne 31. 3. 2016

---

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

---

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.,  
MBA  
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 zavěšenou mostní konstrukci.

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)

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 DIPLOMOVÉ PRÁCE**

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).

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

---

Ing. Radim Nečas, Ph.D.

Vedoucí diplomové práce

## **ABSTRAKT**

Předmětem diplomové práce je návrh nosné konstrukce lávky pro pěší přes řeku Svratku. Byly vypracovány tři varianty přemostění. Pro další zpracování byla vybrána varianta zavěšené konstrukce. Tvoří ji dva pylony, které jsou v podélném i příčném směru ve sklonu a pomocí závěsů vynášejí monolitickou předpjatou mostovku. Byl vytvořen konečnoprvkový model, hledán výchozí stav konstrukce a proveden statický výpočet v programovém prostředí Ansys. Hlavní nosné části konstrukce byly posouzeny podle mezních stavů únosnosti a použitelnosti v souladu s normou EN 1992.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

lávka pro pěší, zavěšený most, pylon, závěsy, předpjatý beton, mezní stav únosnosti, mezní stav použitelnosti, modální analýza, harmonická odezva

## **ABSTRACT**

This diploma thesis aims to design a structure of pedestrian bridge over the Svratka river. To make a preliminary study of possible bridging, three different outlines were drafted. The cable-stayed variant was selected for further analysis. Two towers, inclined in both their longitudinal and transverse direction, support a cast-in-place post-tensioned concrete deck through stay cables anchored in the tower and the deck. After determining the desired initial state, a finite element analysis was carried out using the Ansys software. The capacity of all main load-bearing elements was checked so it meets the ULS and SLS design criteria in accordance with EN 1992 codes.

## **KEYWORDS**

pedestrian bridge, cable-stayed bridge, tower, prestressed concrete, ultimate limit state, serviceability limit state,, modal analysis, harmonic response

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP**

Bc. Lukáš Uher *Návrh zavěšené lávky pro pěší*. Brno, 2017. 21 s., 207 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(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 6. 1. 2017

---

Bc. Lukáš Uher  
autor práce

# PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY VŠKP

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 6. 1. 2017

---

Bc. Lukáš Uher  
autor práce

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto chci poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Radimu Nečasovi, Ph.D., za cenné rady a vždy ochotný a vstřícný přístup ke konzultacím.

Děkuji také své rodině a přítelkyni za podporu během celého studia.



## Obsah

Úvod.....	10
Vstupní parametry pro návrh .....	10
Situace a podélný profil .....	10
Studie variant .....	11
Varianta A.....	11
Varianta B.....	12
Varianta C.....	13
Výběr varianty.....	14
Geometrie a konstrukční řešení .....	14
Výchozí stav .....	15
Posouzení.....	17
Závěr .....	19
Seznam použité literatury .....	20
Seznam příloh.....	21

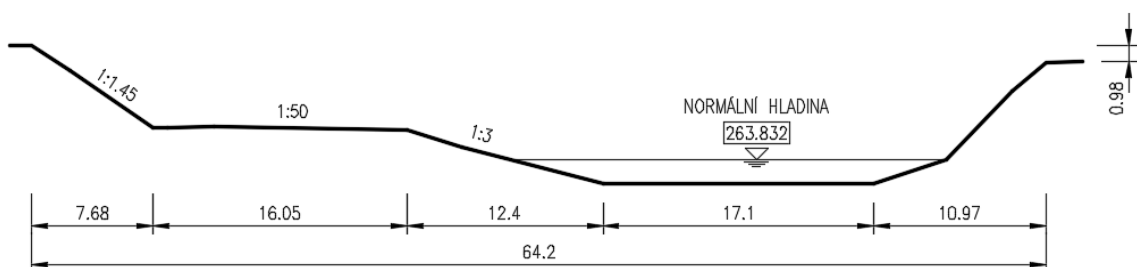
# Úvod

Cílem této diplomové práce je návrh a statické posouzení lávky pro pěší přes řeku Svratku. Lávka je situována v brněnské části Komárov a spojuje cyklostezky na obou stranách řeky. Jedná se o alternativní návrh konstrukce k obloukové lávce, která byla v této lokalitě postavena. Byly vypracovány tři studie přemostění a na základě posouzení architektonických, statických, ekonomických a geologických požadavků pak vybrána jedna varianta pro detailnější návrh.

## Vstupní parametry pro návrh

### Situace a podélný profil

Profil terénu, který je základním předpokladem pro zahájení návrhu, byl inspirován skutečným terénem ve výše zmíněné brněnské lokalitě.



## Studie variant

Předběžný návrh lávky je zpracován ve třech variantách, z nichž je pro následnou podrobnější analýzu vybrána varianta C.

Při návrhu možného způsobu přemostění ve fázi studie je prvním krokem volba typu konstrukce, a to jak z hlediska svého statického působení, tak z hlediska volby hlavního nosného materiálu. Tato volba musí být v souladu se všemi požadavky, které jsou na tvorbu takového díla kladeny. Stavba musí spolehlivě plnit nejen svůj primární účel, tedy umožnit bezpečný přechod chodců a cyklistů, ale též být svým tvarem a celkovým architektonickým působením v souladu s estetickými požadavky. Konstrukce by měla být lehká, elegantní a úměrná krajině, ve které se nachází.

Při studiu možných variant z hlediska statického působení a z hlediska uvažovaného terénu přichází v úvahu několik základních typů konstrukcí:

Spojité trámy podporované v několika místech vnitřními podpěrami. Varianta poměrně jednoduchá na výstavbu, avšak ztrácí v ohledu svého estetického působení.

Předpjatý pás. Vysoce elegantní konstrukce, která však z podstaty svého statického působení klade značné nároky na založení, resp. základovou půdu. Předpjatý pás byl zpracován jako jedna z variant.

Oblouková konstrukce. Implicitně oblouk požaduje též únosnou zeminu, aby se zachytila vodorovná složka obloukové síly. Tento problém se však dá snadno vyřešit, pokud se konstrukce navrhne (různými způsoby) jako samokotvená. Z architektonického pohledu působí oblouková konstrukce příznivě. Pro studii nebyla vybrána, jelikož právě k obloukové lávce se snažíme najít alternativu.

Kombinace oblouku a předpjatého pásu. Velmi elegantní způsob přemostění. Pokud se spojí předpjatý pás mostovky s patami oblouku vzpěrami, vznikne žádoucí samokotvený systém. Vypracována jako jedna z variant.

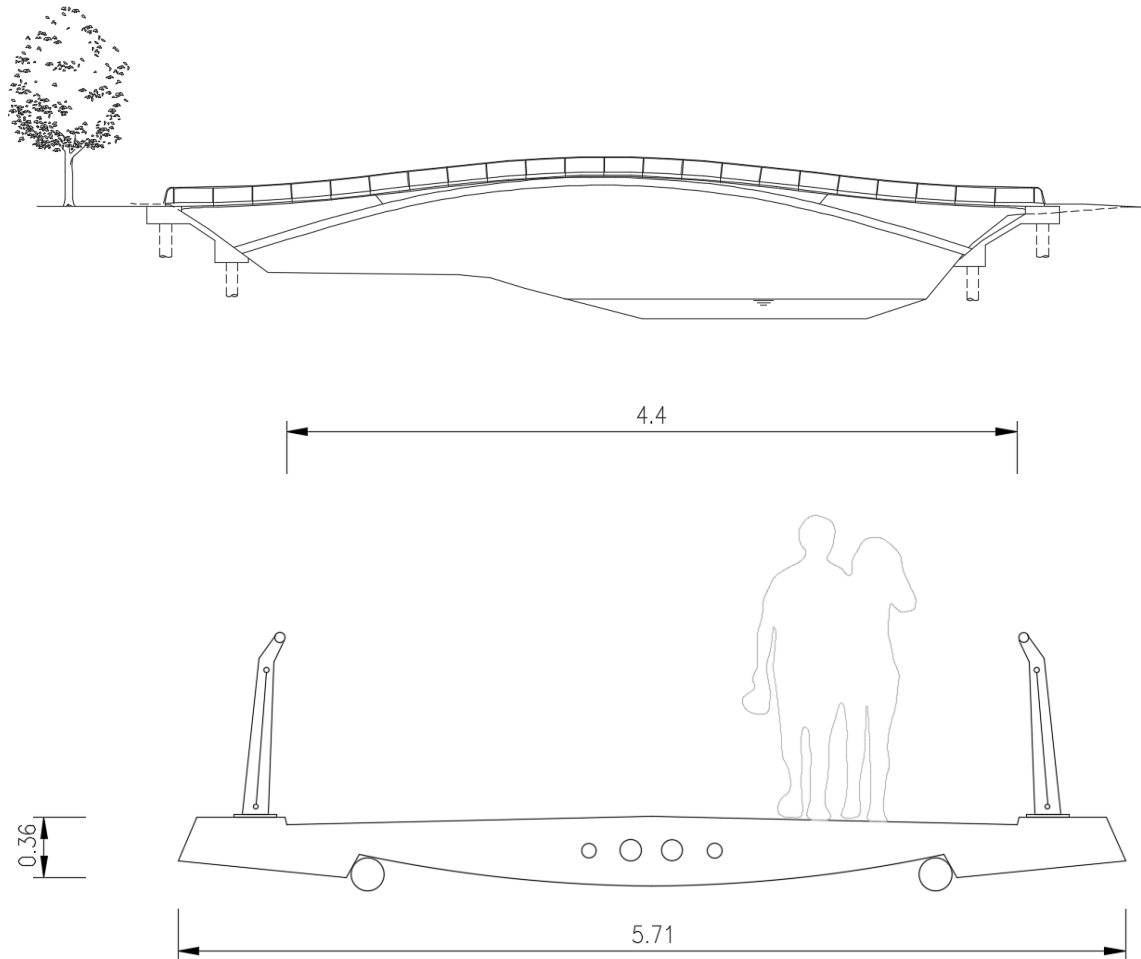
Zavěšená konstrukce.

Visuté konstrukce. Visuté mosty jsou velmi působivé, avšak dle autorova názoru pro daný terén nevhodné, neboť efektivita takového systému se začne ukazovat až při značně větších délkách přemostění.

### **Varianta A**

První variantu tvoří konstrukce předpjatého pásu podporovaného obloukem. Mostovka sestává z prefabrikovaných segmentů nesených dvěma externími předpínacími kabely, ve své prostřední části se skrze prefabrikovaná žebra opírá o betonový oblouk se vzepětím 5.43 m a teoretickým rozpětím 56.73 m. Ten je

obdélníkového průřezu 4.4 m x 0.62 m. Finální předpětí mostovky je realizováno skrze vnitřní kabely ve čtyřech kanálcích. Paty oblouku jsou spojeny s mostovkou pomocí betonových vzpěr a konstrukce tak tvoří samokotvený systém.

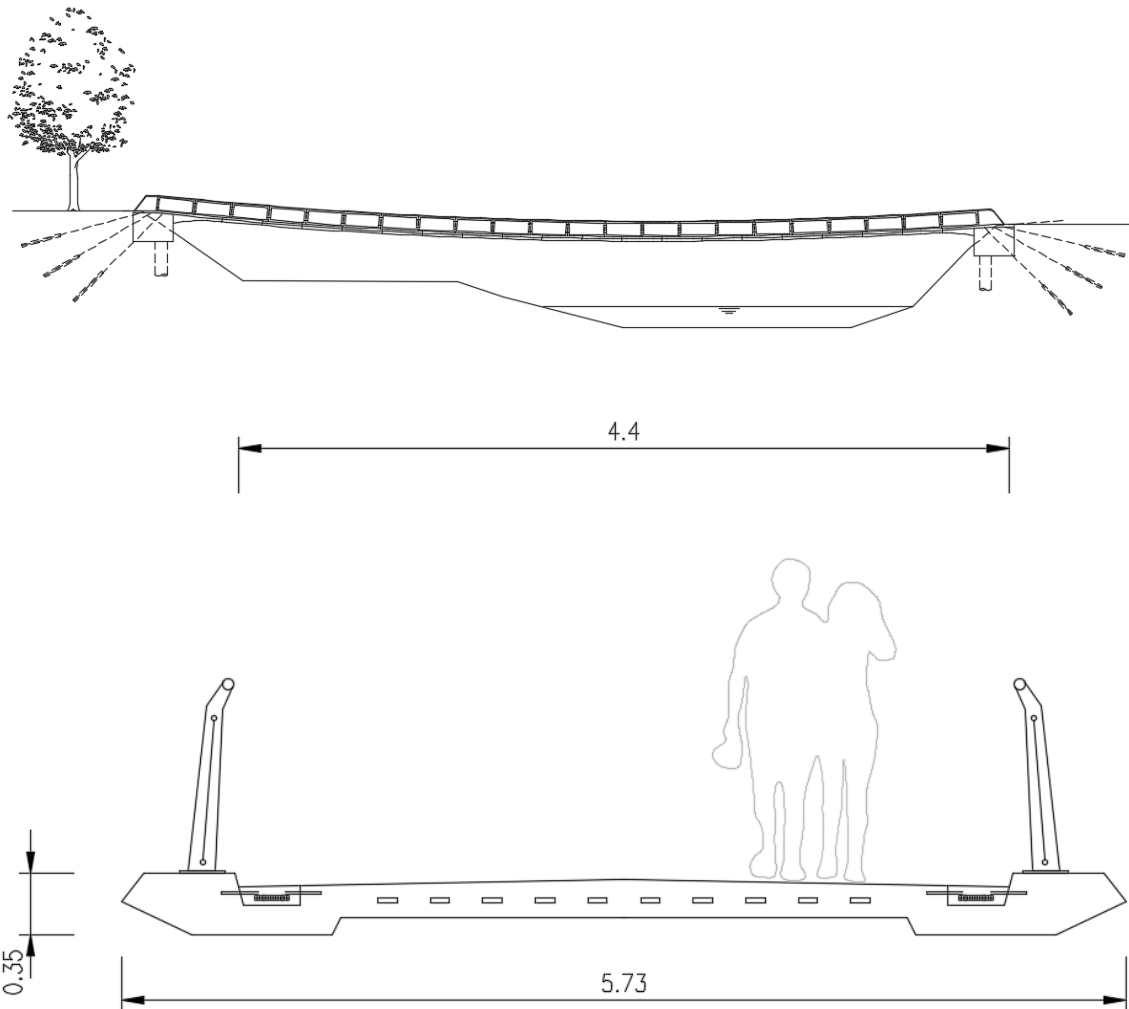


### Varianta B

Jako druhá varianta je řešena konstrukce z předpjatého pásu. Celková délka nosné konstrukce činí 66.06 m. Z konstrukčního hlediska jde o mostovku subtilního příčného průřezu, vynášenou montážními předpínacími kabely po stranách říms a vnitřními plochými kabely se soudržností, vedenými po celé šířce mostovky. Kabely jsou kotveny do poměrně masivních základových bloků šířky 3 m, které jsou pak kotveny do poloskalního prostředí pomocí mikropilot.

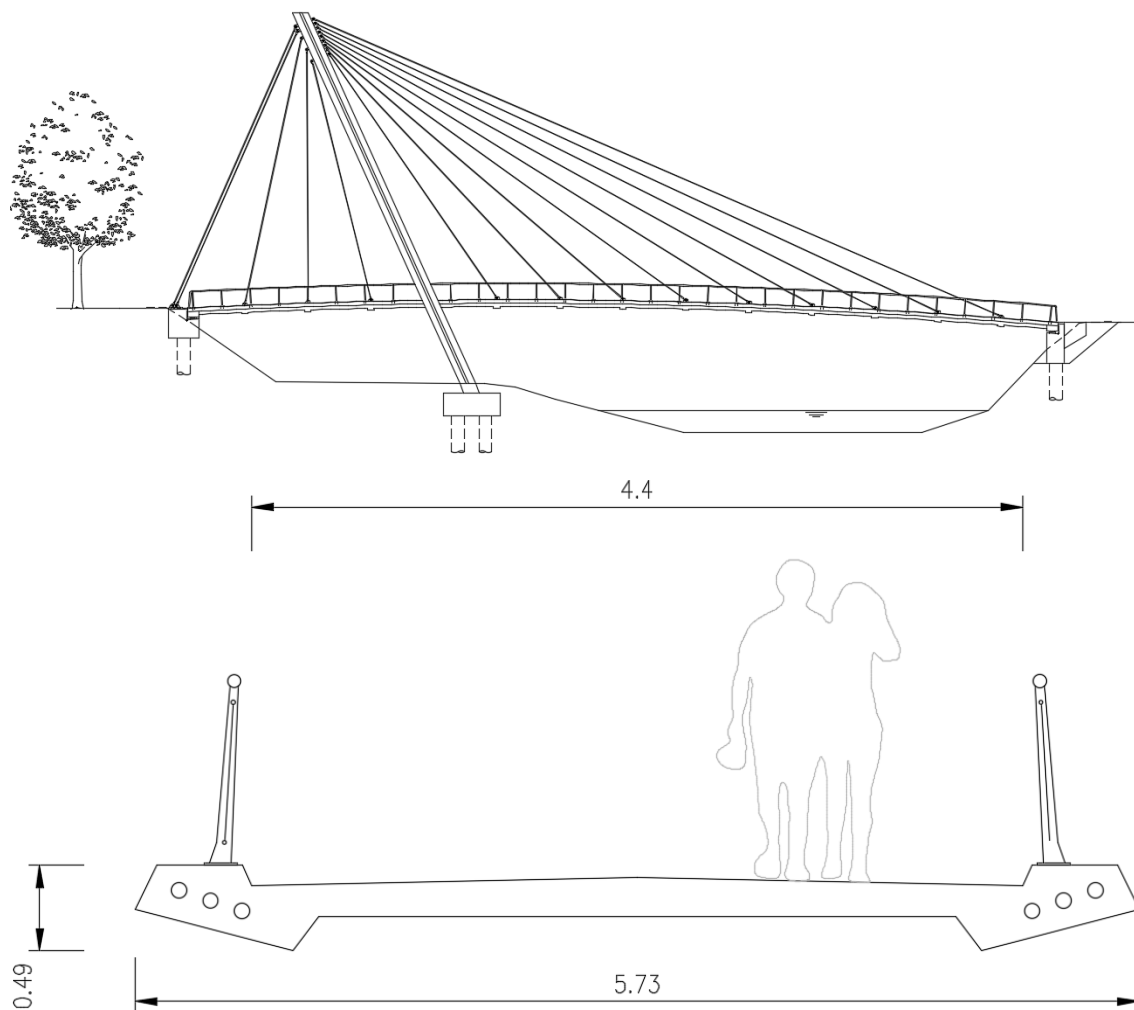
Mostovka je tvořena jako segmentová, s délkou jednotlivých segmentů 3.0 m. Při montáži budou jednotlivé segmenty postupně instalovány díky dvěma nosoucím kabelům. Po uložení posledního segmentu bude mostovka na krajích zmonolitněna se základovými patkami a předeprnuta finálními vnitřními kabely.

Konstrukce je ve tvaru paraboly  $2^\circ$  s teoretickým rozpětím  $L = 62.78$  m a vzetím  $f = 1.36$  m.



### Varianta C

Třetí variantou je zavěšená konstrukce. Tvoří ji dva pylony, které jsou skloněny v podélném i příčném směru. Mostovka je monolitická, výškově v parabolickém oblouku  $2^\circ$  s převýšením konců 1.0 m, půdorysně v přímé. Je vynášena pomocí 24 závěsů (12 na každé straně), které jsou kotveny v hlavě pylonu v semi-harfovém uspořádání. Pylon je stabilizován celkem 4 kotvicemi závěsy, které jsou spojeny s opěrou - kotevním blokem.



## Výběr varianty

Zvolena byla varianta C, tedy zavěšená konstrukce. Má přijatelné požadavky na založení a jelikož konstrukce podobné variantě A i B se již v Brně nachází, tato je originální a při vhodném tvaru pylonu, jeho sklonech a vhodném počtu závěsů tvoří v krajině velmi elegantní a neotřelou stavbu.

## Geometrie a konstrukční řešení

Hlavní nosnou konstrukci tvoří dva pylony, které pomocí závěsů v osových vzdálenostech 4.4 m vynášejí mostovku. Ta je monolitická, dodatečně předpjatá šesti kabely po 13 lanech, tedy dohromady 78 lany a je vedená výškově v parabolě  $2^\circ$  s převýšením konců 1.0 m. Teoretické rozpětí konstrukce a zároveň délka parabolky je 60.0 m. Vzepětí parabolky je 1.0 m a maximální sklon činí 8.33 %. Pylony jsou v podélném směru ve sklonu  $24.29^\circ$ , příčně pak  $10.98^\circ$ . Pro závěsy byla použita lana Pfeifer průměru 26 mm, kotvící lana 40 mm. Beton mostovky je třídy C

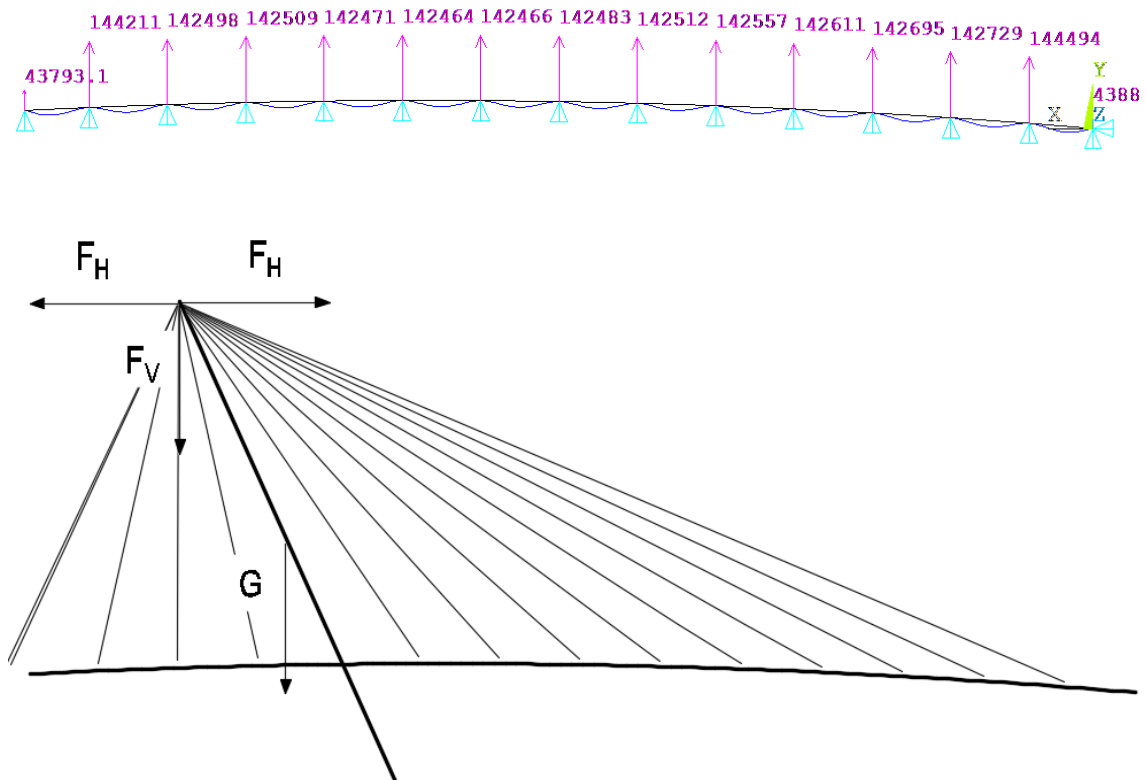
45/55, pylonu C 35/45. Lávka je řešena jako konstrukce s ložisky. Ty jsou na obou opěrách a též v místě příčníku, který spojuje pylony.

## Výchozí stav

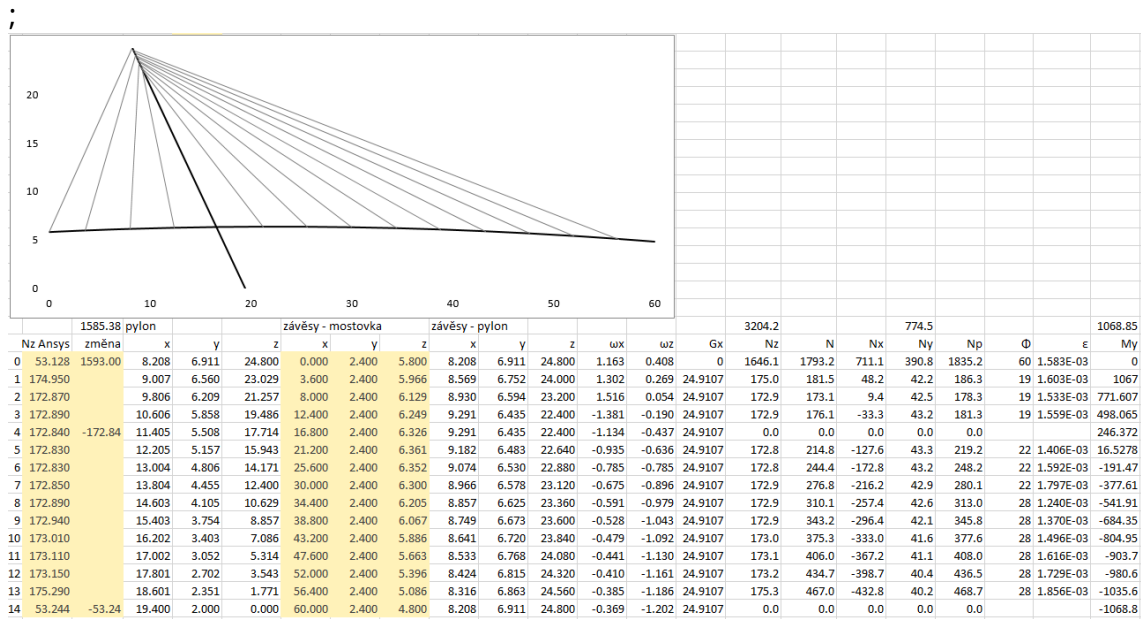
Samostatnou a stěžejní kapitolou celého návrhu konstrukce bylo tzv. nalezení výchozího stavu. To je stav, kdy na konstrukci působí jen stálé složky zatížení a deformace mostovky, resp. celé konstrukce, je minimální, tedy v rozsahu předem stanovené limitní hodnoty.

Z architektonického hlediska byl požadavek na skloněné pylony a to v obou rovinách. Pokud je konstrukce symetrická a pylon vertikální, působí na něj zatížení z obou stran stejnou hodnotou a pylon tedy není pro stálé složky namáhán ohybem. V případě skloněného pylonu je však situace jiná. Ten je namáhán jednak ohybem od vlastní tíhy, jednak nerovnoměrně působícími silami od závěsů. Úkolem může být tedy např. najít takový sklon pylonu a takové počáteční přetvoření závěsů, aby byla nejenom deformace mostovky ideálně nulová, ale taky deformace pylonu, resp. jeho co nejmenší ohybové namáhání.

Prvotní návrh byl hledán ručně, resp. s pomocí MS Excel. Po prvotním zjištění, jaké každé lano přenáší reakci, byla z geometrie přepočtena vertikální a horizontální složka síly na pylon

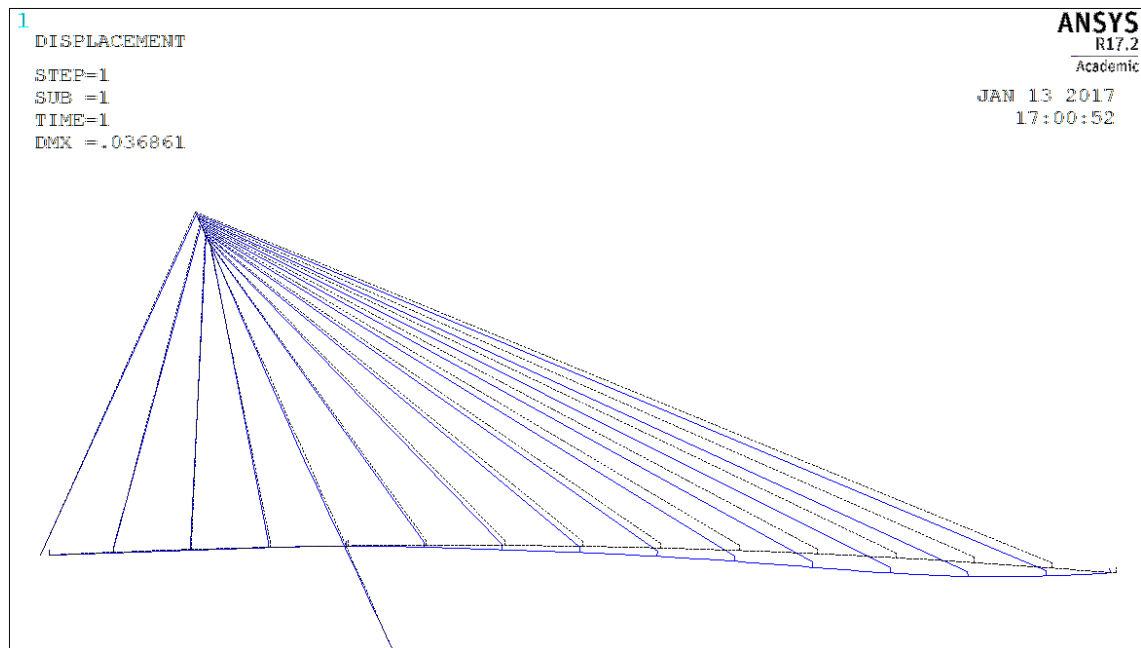


Byl počítán v každém místě pylonu působící ohybový moment a hledán takový sklon pylonů a napětí v závěsech, aby tento byl minimální.



Celý proces je rozumné co nejvíce zautomatizovat, protože se bude pravděpodobně několikrát opakovat.

Pokud se takto ručně nalezená geometrie zadá do výpočtu, deformace konstrukce je následující.

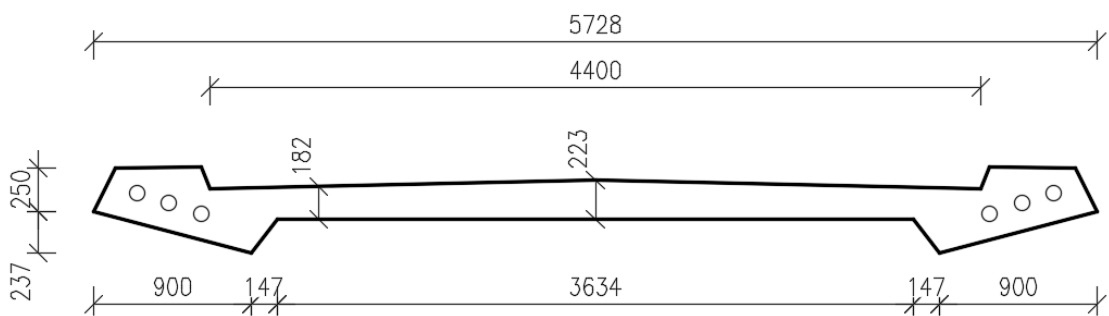


Deformace mostovky je pro počáteční krok v řádu jednotek centimetrů, což naznačuje, že ruční odhad počáteční geometrie byl rozumný. Rozdíl ve výpočtu je pochopitelný, neboť zřejmě nelze srovnávat jednoduchý ruční výpočet s tím, který je provedený softwarem na několikrát staticky neurčitým systémem, navíc s uvažováním stlačení pylonu a mostovky.



Po takovémto výpočtu lze postupovat např. tím způsobem, že se odečtou hodnoty svislých deformací mostovky a o tuto hodnotu se opět zkrátí závěsy. Je zřejmé, že se jedná o proces iterační, kterým se však požadovaného stavu dá poměrně rychle dosáhnout. Celý postup, resp. nalezenou rovnováhu pak naruší přidané zatížení v podobě předpětí. Mostovka je sice předepnuta centricky, jelikož je ale vedena v parabolickém oblouku, z elementární statiky je zřejmé, že vliv na změnu rovnováhy bude velký.

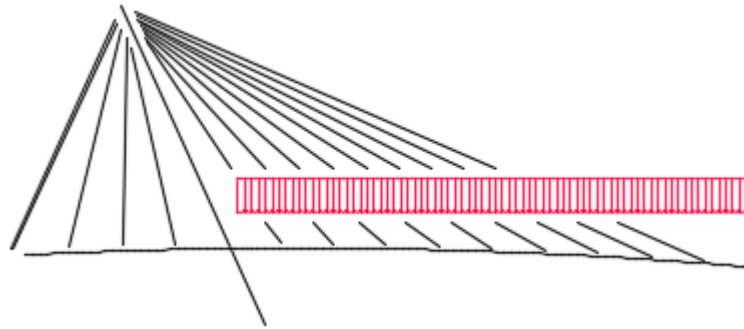
Celý návrh výchozího stavu je tedy o neustálém iteračním řešení, který je navíc žádoucí provázat s kontrolou mezního stavu použitelnosti, který je koneckonců tím rozhodujícím faktorem pro finální návrh. Byly řešeny desítky různých konstrukcí tak, aby výsledný návrh působil esteticky a zároveň vyhovoval podmínkám norem pro bezpečný návrh. Probíhala neustálá optimalizace průřezu mostovky, předpětí a osové vzdálenosti závěsů tak, aby výsledná konstrukce byla esteticky působivá, subtilní a zároveň bezpečná.



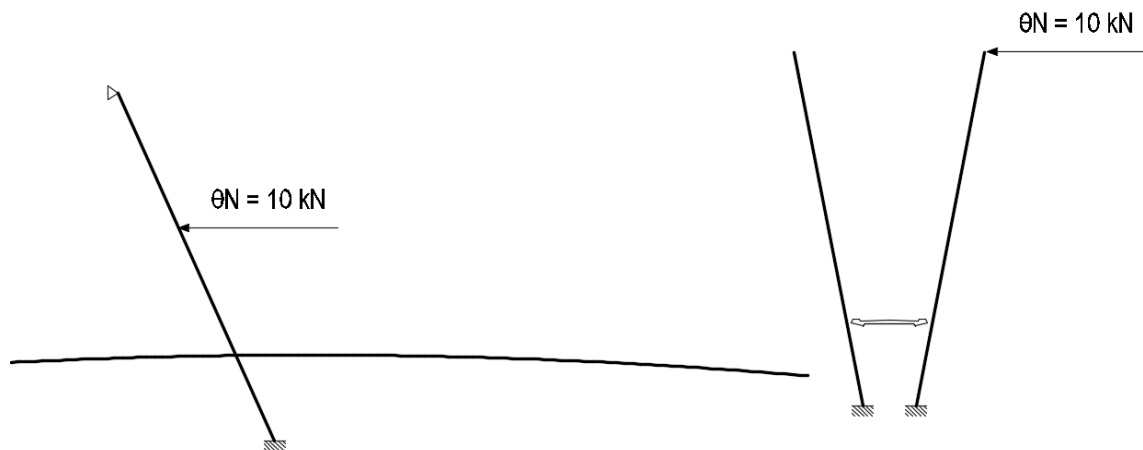
## Posouzení

Po nalezení výchozího stavu byla mostovka posouzena na mezní stav použitelnosti a únosnosti. O návrhu konstrukce víceméně rozhodla charakteristická kombinace zatížení s chodci na delším poli mostu.

$\sigma_{c,max} =$	2.95 MPa	<	$f_{ct,eff} =$	3.77 MPa
--------------------	----------	---	----------------	----------



Mostovka v mezním stavu únosnosti vyhověla na větší z kombinací 6.10a a 6.10b, pro pylon uvažována zjednodušeně konzervativní rovnice 6.10. Pylon byl posouzen na základě nelineárního výpočtu s uvážením imperfekcí. Ty byly zadány ve formě přídavné síly působící na konstrukci jako cca (1/300)násobek působící normálové síly v pylonu, tedy 10 kN a to vždy tak, aby vyvodily nejhorší možný účinek. V příčném směru je to síla působící v hlavě pylonu buď zleva, nebo zprava. V podélném směru byl systém uvažován jako ztužený a síla působící cca uprostřed výšky pylonu.



Byl proveden jeden ruční výpočet biaxiálního ohybu, pro ostatní extrémy ve všech pěti sledovaných řezech pak posudky pomocí softwaru.

Posouzení mostovky v příčném směru proběhlo na deskostěnovém modelu. Kromě stálých složek zatížení uvažováno s plošným zatížením chodců a zatížením od obslužného vozidla. To bylo na konstrukci umístěno podle Winklerova a břemenového kriteria a s použitím příčinkových čar vždy tak, aby vyvodilo maximální účinky hledané statické veličiny. Posouzena byla deska a žebro na ohyb a na smyk.

Byla provedena modální analýza a zjištěno prvních 20 vlastních tvarů a frekvencí. Poté harmonická analýza, kdy byla místa s maximálními svislými výchylkami prvního a druhého ohybového tvaru zatěžována pulsující svislou silou 180 N. Z porovnání první ohybové a první torzní vlastní frekvence (1.05 a 2.71 Hz), kdy poměr je  $> 2.5$  a z výsledků harmonické odezvy, kdy maximální vybuzené zrychlení  $0.19 \text{ ms}^{-2}$  je 37 % z limitní hodnoty zrychlení, lze usoudit, že konstrukce vyhovuje i

na dynamická zatížení a nebude vyvolávat negativní pocity či působit negativně na pohodu chodců.

## Závěr

Úkolem diplomové práce bylo ze tří předběžných studií přemostění řeky Svratky vybrat jednu variantu a tu dále zpracovat. Návrh a hledání výchozího stavu konstrukce proběhlo jednak ručně s pomocí tabulkového procesoru MS Excel, jednak s pomocí MKP softwaru Ansys, v kterém byla následně konstrukce posouzena v podélném směru. Ztráty předpětí byly počítány ručně, posudky na MSÚ a MSP ručně v MS Excel a s pomocí softwaru IDEA Statica. Příčný směr řešen deskostěnovým modelem v programu Scia Engineer. Dynamická analýza v systému Ansys. K vybrané variantě byla zpracována výkresová dokumentace v prostředí AutoCAD.

## Seznam použité literatury

- [1] ČSN EN 1992 - Navrhování betonových konstrukcí-Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [2] ČSN EN 1991 - Zatížení konstrukcí-Část 1-4 ed. 2: Obecná zatížení – Zatížení větrem. Praha: Český normalizační institut, 2013.
- [3] ČSN EN 1991-2. *Zatížení konstrukcí – Část 2: Zatížení mostů dopravou*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [4] VSL. *Post tensioning solutions EN*. Dostupné z: [http://concrete.fsv.cvut.cz/~hamouz/Technicka\\_specifikace\\_VSL.pdf](http://concrete.fsv.cvut.cz/~hamouz/Technicka_specifikace_VSL.pdf)
- [5] NAVRÁTIL, Jaroslav. *Předpjaté betonové konstrukce*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. 186 s. ISBN 978-80-7204-561-7.
- [6] NEČAS, Radim. Zatížení mostů dle evropských norem (EN). Dokument [online]. Dostupné z: <http://www.necasradim.cz/BL12/prednasky/TISK%2002%20-%20Zatizeni%20mostu%20EN.pdf>
- [7] STRÁSKÝ, Jiří. *Betonové mosty*. Praha, 2001. ISBN 80-86426-05-X.

# Seznam příloh

## P1 - Podklady a varianty

P1.1 - Použité podklady

P1.1 - Varianta A

P1.2 - Varianta B

P1.3 - Varianta C

## P2 - Výkresy

P2.01 - Situace

P2.02 - Podélný řez

P2.03 - Příčné řezy

P2.04 - Výkres betonářské výztuže

P2.05 - Výkres předpínací výztuže

P2.06 - Výkres výztuže pylonu

P2.07 - Výkres kotevního plechu

## P3 - Stavební postup a vizualizace

P3.1 - Stavební postup

P3.2 - P3.10 - Obrázky vizualizace

## P4 - Statický výpočet

P4.1 - Statický výpočet

P4.2 - Příloha statického výpočtu