



VYSOKÉ UČENÍ TECHICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV BETONOVÝCH A ZDĚNÝCH
KONSTRUKCÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF CONCRETE AND MASONRY STRUCTURES

VISUTÁ LÁVKA PRO PĚŠÍ PŘES ŘEKU

SUSPENSION FOOTBRIDGE ACROSS THE RIVER

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. PETRA CHUMOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. RADIM NEČAS, Ph.D.

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

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

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant	Bc. Petra Chumová
Název	Visutá lávka pro pěší přes řeku
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., MBA
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

Pro zadaný problém navrhněte dvě až tři varianty řešení a zhodnoťte je.

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

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

Ostatní úpravy provádějte podle pokynů vedoucího diplomové práce.

Požadované výstupy:

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

Přílohy textové části:

P1. Použité podklady a varianty řešení

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

P3. Stavební postup a vizualizace

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

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

Popisný soubor závěrečné práce (1x).

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

Předepsané přílohy

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

Abstrakt

Předmětem diplomové práce je návrh lávky pro pěší přes koryto řeky. Pro zadaný problém byly vytvořeny tři variantní studie. K podrobnému zpracování byla vybrána visutá lávka pro pěší. Hlavní náplní práce je statické řešení nosné konstrukce. Model konstrukce pro výpočet účinků vybraných zatížení včetně zahrnutí vlivu výstavby mostu, byl vytvořen ve výpočetním programu Ansys. Posouzení a dimenzování proběhlo ručním výpočtem dle zásad mezních stavů a platných norem.

Klíčová slova

lávka pro pěší, visutá konstrukce, lano, segment, pylon, beton, předpětí

Abstract

The subject of the thesis is to design a footbridge over a river basin. Three different studies were created for the assigned problem. The suspension footbridge was chosen for the thorough elaboration. The most important part of the thesis is the static solution of the supporting structure. The structure model for calculation of impacts of selected strains including the impact of the footbridge construction was created in computational software Ansys. Assessment and dimensioning was carried out using manual calculation according the principles of limit states and applicable standards.

Keywords

footbridge, suspension structure, cable, segment, tower, concrete, prestressing

Bibliografická citace VŠKP

Bc. Petra Chumová *Visutá lávka pro pěší přes řeku*. Brno, 2014. 32 s., 173 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 17.1.2014

.....

podpis autora

Bc. Petra Chumová

Poděkování

Ráda bych poděkovala vedoucímu své diplomové práce panu Ing. Radimu Nečasovi, Ph.D. za pomoc, čas a ochotu udělit cenné rady, které napomohly jejímu zpracování.

OBSAH:

1. ÚVOD	9
2. VARIANTY ŘEŠENÍ	9
2.1. VARIANTA A	9
2.1.1. MOSTOVKA	10
2.1.2. VISUTÁ LANA A ZÁVĚSY	11
2.1.3. PYLONY	11
2.2. VARIANTA B	11
2.2.1. MOSTOVKA	12
2.2.2. ZÁVĚSNÉ KABELY	12
2.2.3. PYLONY	12
2.3. VARIANTA C	13
2.3.1. MOSTOVKA	13
2.3.2. MEZILEHLÉ PODPĚRY	14
3. VISUTÁ LÁVKA PRO PĚŠÍ	14
4. MATERIÁL NOSNÝCH PRVKŮ	15
5. ZATÍŽENÍ	16
5.1. ZATÍŽENÍ V PODÉLNÉM SMĚRU	16
5.2. ZATÍŽENÍ V PŘÍČNÉM SMĚRU	17
6. VÝPOČTOVÝ MODEL V PODÉLNÉM SMĚRU	17
6.1. PRVNÍ FÁZE TVORBY MODELU	17
6.1.1. PRVKY A JEJICH CHARAKTERISTIKY	18
6.1.2. GEOMETRIE	19
6.1.3. SPOJENÍ UZLŮ A PODEPŘENÍ KONSTRUKCE	22
6.1.4. NELINEÁRNÍ VÝPOČET	22
6.2. DRUHÁ FÁZE TVORBY MODELU	23
6.2.1. PYLON	23
6.2.2. PODEPŘENÍ KONSTRUKCE	23
6.2.3. NÁVRH PŘEDPĚTÍ MOSTOVKY	24
6.2.4. SPOJENÍ UZLŮ PŘEDPĚTÍ A MOSTOVKY	24
6.3. TŘETÍ FÁZE TVORBY MODELU	25

7. POSOUZENÍ KONSTRUKCE V PODÉLNÉM SMĚRU	25
7.1. MEZNÍ STAV ÚNOSNOSTI	26
7.2. MEZNÍ STAV POUŽITELNOSTI	26
8. PŘÍČNÝ SMĚR	27
8.1. MODEL V PŘÍČNÉM SMĚRU	27
8.2. POSOUZENÍ V PŘÍČNÉM SMĚRU	28
9. DYNAMICKÁ ANALÝZA	28
10. ZÁVĚR	29
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	30
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	31
SEZNAM PŘÍLOH	32

1. ÚVOD

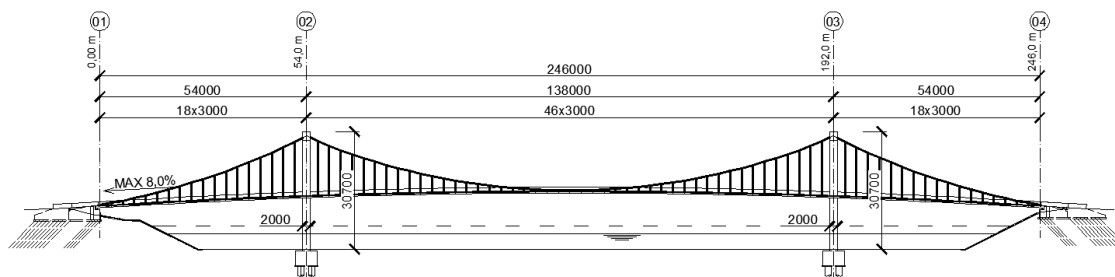
Prvním požadavkem diplomové práce bylo navrhnout tři varianty lávek pro pěší k přemostění vodního toku. Jednou z variant je konstrukce tvořená ocelovými visutými lany a betonovou mostovkou, která je prostřednictvím ocelových závěsných tyčí zavěšená na visutých kabelech. Dalším návrhem řešení je zavěšená lávka pro pěší a poslední variantou je konstrukce předpjatého pásu. Z těchto tří různých studií byla pro podrobnější zpracování vybrána první varianta visuté lávky.

Podrobný návrh jednotlivých prvků nosné konstrukce byl proveden podle metody mezních stavů se zahrnutím vlivu výstavby mostu. Pro výpočet statických a dynamických účinků zatížení lávky byl použit software Ansys, v němž se zkoumalo namáhání modelu v podélném směru. Pro model v příčném směru byl použit výpočetní program Scia Engineer. K vybrané variantě byl zpracován statický výpočet, přehledné výkresy, výkresy tvaru betonových prvků lávky, výkresy předpínací a betonářské výztuže a detaily vybraných konstrukčních částí. Pro názornou představu o vzhledu celé konstrukce byly vytvořeny přehledné vizualizace. Součástí příloh práce je schematické naznačení postupu výstavby v deseti krocích.

2. VARIANTY ŘEŠENÍ

2.1. VARIANTA A

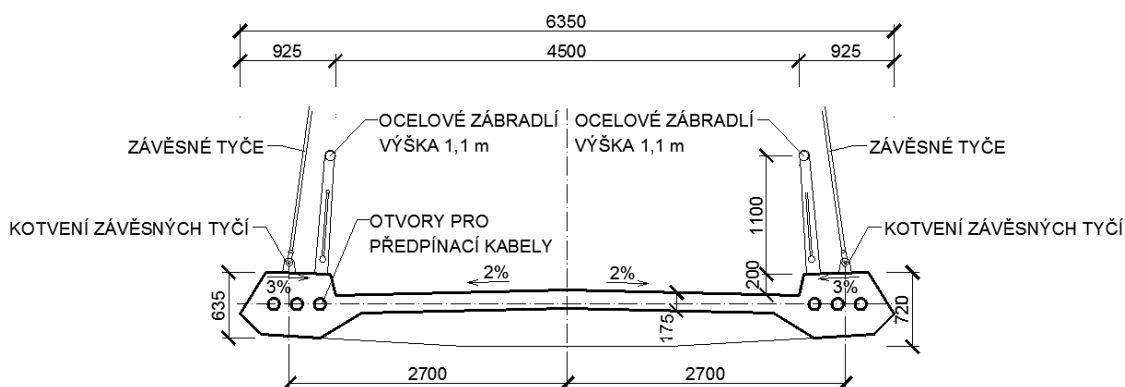
Řešením Varianty A je visutá konstrukce tvořená mostovkou z předpjatého betonu, která je prostřednictvím ocelových závěsů, zavěšená na visutých lanech. Lávka má tři pole. Obě krajní pole mají rozpětí 54,0 m, střední pole 138,0 m. Celkové rozpětí konstrukce je tedy 246,0 m. Krajní pole jsou vymezena betonovými pylony, do nichž jsou upnuta visutá lana a zapuštěna mostovka. Na okrajích mostu jsou lana kotvena do kotevních bloků, které přenáší zatížení do podloží, to znamená, že se jedná o klasickou visutou konstrukci.



2.1.1. MOSTOVKA

Mostovka je v podélném směru vedena v parabolickém oblouku, tak aby maximální podélný sklon nepřesahoval 8,0 %. Jedná se o parabolu druhého stupně a její vzepětí je 3,850 m. Mostovka je sestavena z betonových prefabrikovaných segmentů o délce 3,0 m a šířce 6,315 m. Z celkové šířky zaujímá na každé straně 0,925 m římsa. Na ní je umístěno bezpečnostní zábradlí a ve vzdálenosti 2,7 m od osy příčného řezu, zde vyčnívají ocelové prvky pro kotvení závěsných tyčí. Římsa je v příčném sklonu 3,0 %. Zbývající část 4,5 m z celkové šířky lávky tvoří chodník, který je symetricky směrem od středu proveden v příčném sklonu 2,0 %.

Ve střední části, tam kde je chodník, má betonová deska prefabrikátu tloušťku 0,175 m. Římsa je proměnné tloušťky, jejíž nejvyšší hodnota je 0,635 m. Okraje každého segmentu, v podélném směru, jsou ztuženy betonovým příčником, který narůstá až do tloušťky 0,720 m.



2.1.2. VISUTÁ LANA A ZÁVĚSY

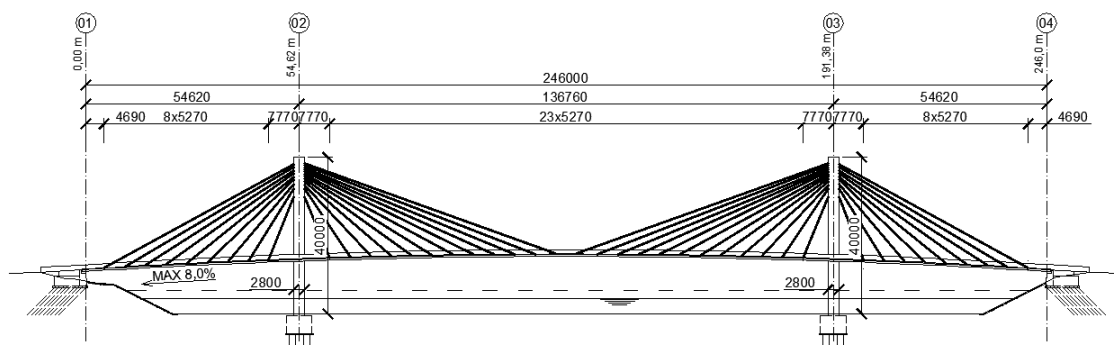
Geometrickým tvarem visutých lan je parabola druhého stupně. Na visutá lana jsou přichyceny ocelové závěsy, které vynášejí segmenty mostovky. Rozteč závěsů odpovídá délce jednoho prefabrikátu, což je vzdálenost 3,0 m. V polovině rozpětí lávky jsou visutá lana přichycena k mostovce.

2.1.3. PYLONY

Střední pole je od krajních omezeno dvěma pylony. Pylony mají tvar písmene A. Geometrický návrh tvaru pylonů vychází z požadavku na dodržení průchozího prostoru na mostovce, která je do pylonů zapuštěná. Výška průchozího prostoru je 2,5 m a je dbáno na to, aby byla dodržena v celé šířce chodníku 4,5 m. Celková výška pylonů je 30,7 m a rozkročení v ose stojin je v místě paty 11,632 m. Každá stojina má průřez o rozměrech 1,2 m krát 2,0 m.

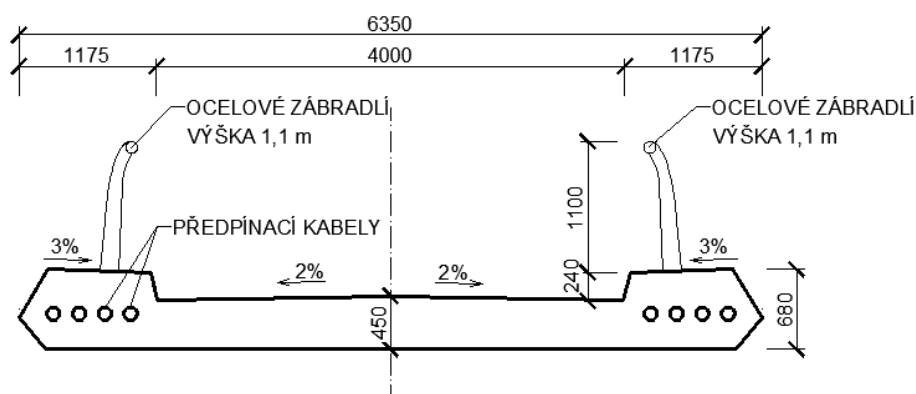
2.2. VARIANTA B

Další variantní řešení je lávka zavěšená. Stejně jako visutá konstrukce má tato varianta tři pole a celkové rozpětí 246,0 m. Krajní pole jsou o rozpětí 54,62 m a střední pole 136,76 m. Krajní pole tvoří přibližně 0,4 násobek délky středního pole. Konstrukce je tvořena nosníkem, který je zavěšen na přímých kabelech, kotvených v pylonech.



2.2.1. MOSTOVKA

Mostovka je tvořena ztužujícím monolitickým nosníkem z předpjatého betonu. V podélném směru je ve tvaru paraboly druhého stupně s maximálním sklonem 8,0 %. Příčný řez mostovky se skládá z chodníku, širokého 4,0 m, v příčném sklonu 2,0 %, směrem od osy průřezu. Na okrajích jsou římsy široké 1,175 m, ve spádu 3,0 % a je na nich umístěno bezpečnostní zábradlí. Celková šířka nosníku je tedy 6,350 m. V ose průřezu je tloušťka desky 0,450 m. Římsy mají mocnost 0,680 m.



2.2.2. ZÁVĚSNÉ KABELY

Kabely, na nichž je zavěšená mostovka, jsou kotveny v pylonech. Uspořádání kabelů v podélném směru je semi-radiální. V příčném směru jsou ve dvou symetrických rovinách. Kabely jsou přímé a v mostovce kotveny po vzdálenostech 5,27 m.

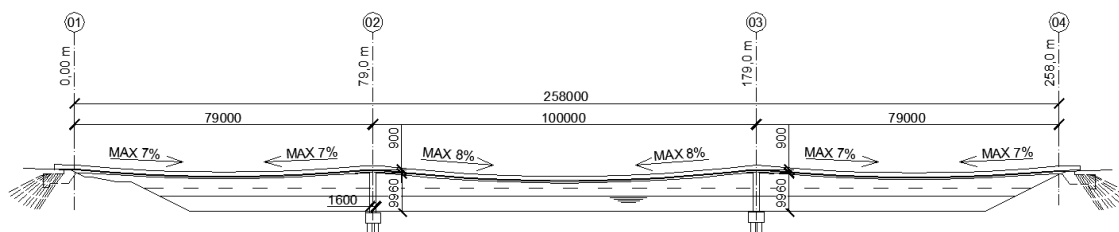
2.2.3. PYLONY

Betonové pylony navržené lávky jsou ve tvaru písmene H. Jejich výška je 40,0 m. Vzdálenost mezi vnitřním povrchem dvou stojin je 6,850 m. Průřez každé stojiny je obdélníkový o rozměrech 2,8 m v podélném směru konstrukce a 1,4 m v příčném.

2.3. VARIANTA C

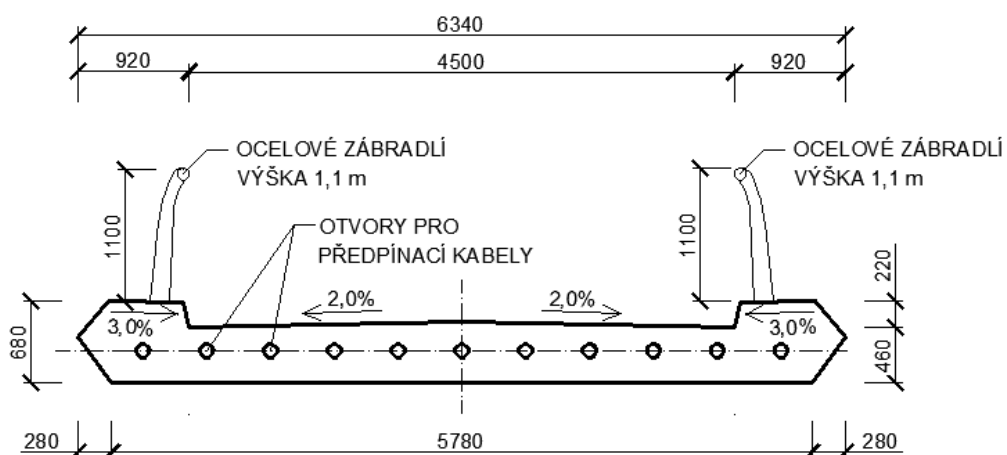
Jako třetí studie, byla navržena konstrukce předpjatého pásu. Protože je k přemostění koryta řeky potřeba značné délky, bylo nutné pás navrhnout se dvěma vnitřními podpěrami. Dvě krajní pole jsou o rozpětí 79,0 m a střední pole 100,0 m. Lávka je o celkovém rozpětí 258,0 m.

Podélný tvar mostovky je parabola druhého stupně a to ve všech třech polích. Vzepětí paraboly vychází z požadavku, že podélný sklon chodníku nesmí překročit 8,0 %. Zatímco v předchozích dvou variantách byla niveleta mostovky v polovině rozpětí lávky nejvyšší, u předpjatého pásu je to místo nejnižší. Tato varianta se nejvíce jeví jako příliš šťastné řešení, protože světlá výška mezi konstrukcí a stoletou vodní hladinou je pouze 1,27 m.



2.3.1. MOSTOVKA

Mostovka je seskládána z prefabrikovaných betonových segmentů, navléknutých na předpínacích kabelech. V příčném řezu jsou široké 6,340 m. Z toho každá krajní římsa tvoří 0,920 m. Římsy jsou ve spádu 3,0 % směrem k vnitřní straně průřezu a je na nich osazeno zábradlí vysoké 1,1 m. Chodník zaujímá šířku 4,5 m a směrem od osy řezu je na každou stranu ve sklonu 2,0 %. Segmenty v polích mají tloušťku desky 0,460 m. V místech pilířů jsou vytvořeny náběhy a tloušťka mostovky je zde 0,680 m. Římsa zvyšuje celkovou mocnost o 0,220 m.



2.3.2. MEZILEHLÉ PODPĚRY

Mezilehlé betonové podpěry jsou obdélníkového průřezu. V podélném směru široké 1,6 m a v příčném 5,4 m. Jejich výška je 9,96 m.

3. VISUTÁ LÁVKA PRO PĚŠÍ

Při podrobném zpracování vybrané varianty jsem vycházela z výše uvedené studie. Nejprve bylo potřeba zvolit vhodný software pro analýzu chování konstrukce a výpočet vnitřních sil pro řešené zatěžovací stavy a to s ohledem na vliv výstavby. Při výběru výchozího softwaru byla důležitá možnost nelineárního výpočtu konstrukce a možnost iterační úpravy prvotního návrhu geometrie a sil v jednotlivých konstrukčních prvcích lávky.

Po složitém procesu úprav, změn a ladění modelu konstrukce, byly navrženy prvky, jejich materiály a dimenze posuzovány statickým výpočtem dle zásad metody mezních stavů. Dále byl vytvořen model konstrukce v příčném směru, který byl rovněž posouzen statickým výpočtem. Takto upravené a vyhovující části konstrukce již mohly být zpracovány a podrobně znázorněny ve výkresové dokumentaci a přehledných vizualizacích.

4. MATERIÁLY NOSNÝCH PRVKŮ

VISUTÁ A PŘEDPÍNACÍ LANA

Visutá lana a předpínací lana mostovky jsou navrženy z kabelů Y 1860 MPa S7 - 15,7 – A tvořených 55 lany. Jejich charakteristická mez kluzu je $f_{pk} = 1860$ MPa, smluvní mez kluzu $f_{p0,1k} = 1600$ MPa. Průřezová plocha jednoho lana $A_l = 150$ mm². Modul pružnosti předpínací oceli $E_p = 195$ GPa.

ZÁVĚSY

Jako závěsné prvky byly navrženy ocelové předpínací tyče Dywidag 32 WS, s průřezem $\varnothing 32$ mm, charakteristickou mezí kluzu $f_{yk} = 1050$ MPa, modulem pružnosti $E_s = 205$ GPa.

MOSTOVKA

Segmenty mostovky jsou z vysokopevnostního betonu třídy C60/75. Vysokopevnostní beton byl vybrán z důvodů vzniku velkých napětí plynoucích ze zatěžovacích stavů davem lidí. Charakteristická pevnost betonu je $f_{ck} = 60$ MPa, modul pružnosti $E_{cm} = 39$ GPa.

PYLONY

Materiálem pro konstrukci pylonů byl zvolen beton pevnostní třídy C50/60. Jeho charakteristická pevnost v tlaku je $f_{ck} = 50$ MPa, modul pružnosti $E_{cm} = 37$ GPa.

BETONÁŘSKÁ VÝZTUŽ

Navržena byla betonářská různých profilů. V segmentech mostovky i jako výztuž pylonů byla použita ocel B500 s mezí kluzu $f_{yk} = 500\text{MPa}$ a modulem pružnosti $E_s = 210\text{ GPa}$.

5. ZATÍŽENÍ

Konstrukce byla navrhována a posuzována na vybrané zatěžovací stavy. Byla uvažována zatížení stálá a z nahodilých pouze zatížení vyvozené chodci. Klimatická zatížení uvažována nebyla.

5.1. ZATÍŽENÍ V PODÉLNÉM SMĚRU

ZS0 Stálá zatížení

Zatížení stálé je tvořeno vlastní tíhou konstrukce. Výpočetní program si toto zatížení generuje automaticky. Během tvorby modelu při prvotním návrhu konstrukce, bylo toto zatížení vypočítáno, hodnota vlastní tíhy segmentu je $22,92\text{ kN/m}$. Z ostatního stálého zatížení byla uvažována tíha zábradlí, jejíž hodnota je 1 kN/m .

ZS1 – ZS5 Zatížení davem lidí

Model zatížení davem lidí uvažuje hodnotu $q = 5\text{ kN/m}^2$.

- ZS1 Dav lidí na celém rozpětí konstrukce
- ZS2 Dav lidí na celém střední poli
- ZS3 Dav lidí na prvním a druhém poli
- ZS4 Dav lidí na části středního pole
- ZS5 Dav lidí na polovině rozpětí konstrukce

5.2. ZATÍŽENÍ V PŘÍČNÉM SMĚRU

ZS1 Vlastní tíha

Vlastní tíha betonové desky segmentu generována automaticky výpočtním programem Scia Engineer.

ZS2 Ostatní stálé - tíha římsy a zábradlí

ZS3 Dav lidí na celé šířce lávky

ZS4 Dav lidí na polovině šířky lávky

6. VÝPOČTOVÝ MODEL V PODÉLNÉM SMĚRU

Pro tvorbu výpočtového modelu v podélném směru byl vybrán software Ansys verze 12.1. Tento software umožňuje vkládání dat pomocí dávkových převodů. Prostřednictvím jednotlivých dávek vkládáme geometrii uzlů konstrukce. Uzly následně propojíme pomocí elementů, které jsou sestaveny z prvků výpočtního modelu. Každému elementu přiřazujeme reálné charakteristiky a materiál. Spojení jednotlivých elementů je zajišťováno pomocí cp – vazeb, které umožňují zabránit nebo naopak uvolnit spojení ve směrech souřadnicových os x, y a z a dále také rotace kolem těchto os.

Práci ve výpočtovém modelu bych rozdělila na 3 fáze.

6.1. PRVNÍ FÁZE TVORBY MODELU

V první fázi byla jednoduchá geometrie s se základním průřezem segmentu, vyplývající z variantní studie, vložena dávkovým převodem do programu Ansys. Dávky nebo-li makra byly vytvářeny pomocí tabulek v programu Microsoft Excel, pro

usnadnění a zpřehlednění orientace ve velkém množství souřadnic bodů a charakteristik prvků. Následně převedeny do poznámkového bloku a importovány do Ansysu.

6.1.1. PRVKY A JEJICH CHARAKTERISTIKY

- LINK8
- visutá lana
 - závěsy
 - předpínací lana v mostovce
 - pružina jako krajní pružné podepření v podélném směru

Reálné charakteristiky tohoto prvku jsou zadávány pomocí průřezové plochy a jejího přetvoření. V případech, kdy se jedná o lano či tyčový závěs, vycházíme z návrhu rozměrů prvku, ze kterých vyplývá průřezová plocha A . Dále z výpočtu normálových sil N , působících na daný prvek, a modulu pružnosti E materiálu si pomocí rovnice (1.1) vypočteme přetvoření.

ROVNICE PRO VÝPOČET PŘETVOŘENÍ

$$\varepsilon = \frac{N}{A} * E \quad (1.1)$$

- BEAM44
- mostovka
 - pylon

Reálné charakteristiky nutné k jednoznačnému určení zadáváme pomocí průřezových charakteristik. Zadáváme plochu A , momenty setrvačnosti I kolem těžištních os y a z , moment tuhosti v prostém kroucení, vzdálenosti okrajových bodů od těžiště průřezu a excentricitu těžiště od roviny souřadnic elementu. Pokud je prvek proměnného průřezu, zadáváme všechny tyto charakteristiky dvakrát. V prvním případě vzhledem k počátečnímu průřezu elementu a ve druhém ke koncovému průřezu elementu.

- BEAM4
- tuhé vazby v mostovce

Aby tuhá vazba splňovala svoji funkci, musí být dostatečně tuhá. Od toho se odvíjí zadání charakteristik. Zadáváme plochu, momenty setrvačnosti kolem těžištních os y a z, moment tuhosti v prostém kroucení a tloušťky kolem os y a z.

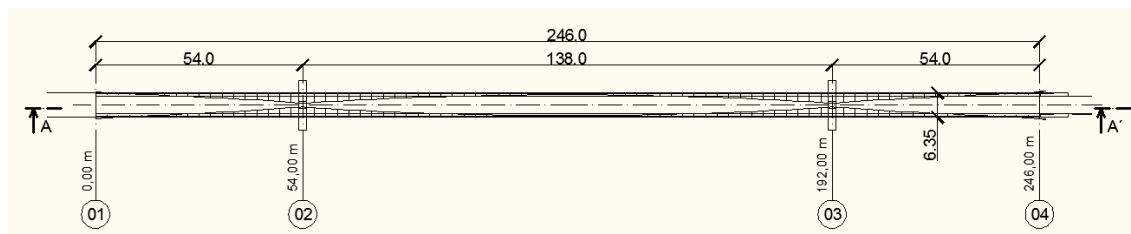
MATERIÁLOVÉ CHARAKTERISTIKY

Dále každému z jednotlivých konstrukčních prvků přiřadíme materiál. Ten zadáváme pomocí modulu pružnosti E , součinitele teplotní roztažnosti α , objemové hmotnosti γ a poissonova čísla ν .

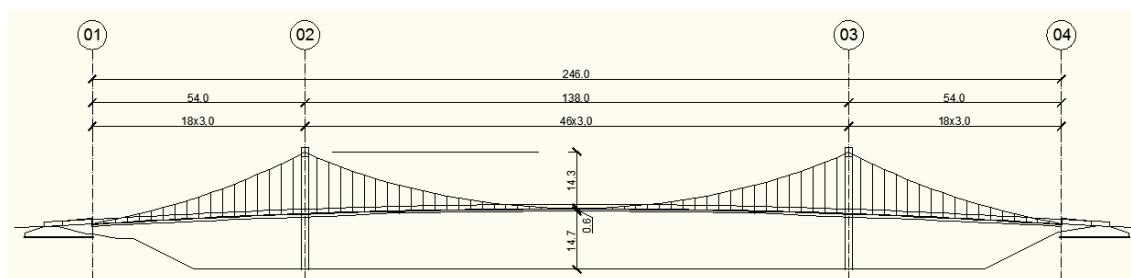
6.1.2. GEOMETRIE

Geometrii zadáváme pomocí souřadnic jednotlivých uzlů x, y, a z. Tyto uzly následně propojíme pomocí elementů.

PŮDORYS

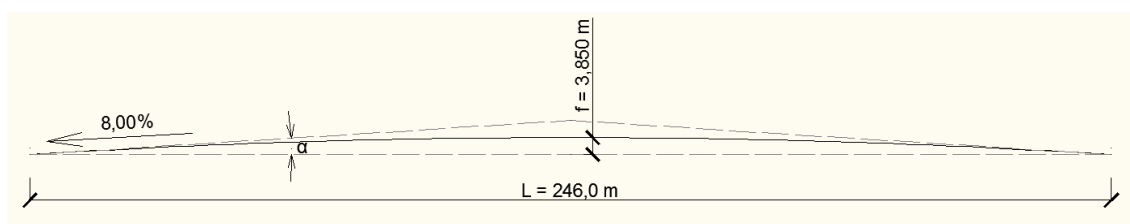


PODÉLNÝ ŘEZ A-A'



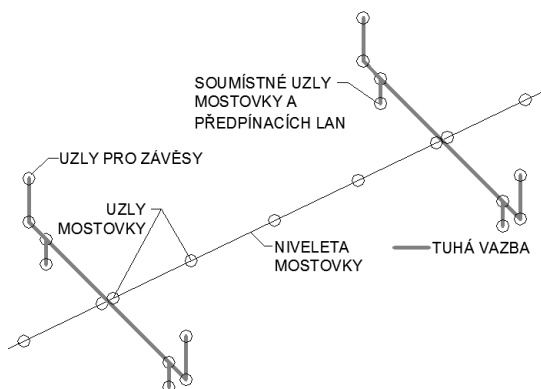
MOSTOVKA

Betonová mostovka je půdorysně vedena v přímé. V podélném směru je navržena v parabolickém oblouku tak, aby maximální podélný sklon nepřesahoval předepsaných 8,0 %. Na základě tohoto předpokladu, bylo pomocí jednoduchého výpočtu navrženo vzepětí paraboly 3,850 m.



Souřadnice mostovky jsou zadávány v ose nivelety chodníku. Souřadnice y má hodnotu 0,0 m. Každý segment mostovky, který má celkovou délku 3,0 m, sestává ze 4 elementů o délce 0,750 m. Tudiž souřadnice x narůstá od 0,0 m po 0,750 m až do celkové délky mostu 246,0 m. V místě styku dvou segmentů jsou uzly dva, přičemž každý z nich patří jednomu ze segmentů. Souřadnice z určujeme pomocí rovnice pro vzepětí paraboly.

Dalšími uzly, které jsou součástí mostovky a jsou s výchozími body mostovky spojeny pomocí tuhých vazeb jsou uzly v místech předpínacích lan. Spojení souměrných uzlů mostovky a předpínacích lan je zajištěno pomocí cp – vazeb. Další tuhé vazby vedou od nivelety mostovky k závěsům.

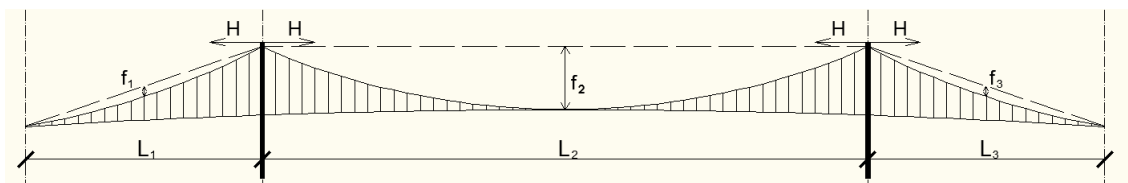


VISUTÁ LANA

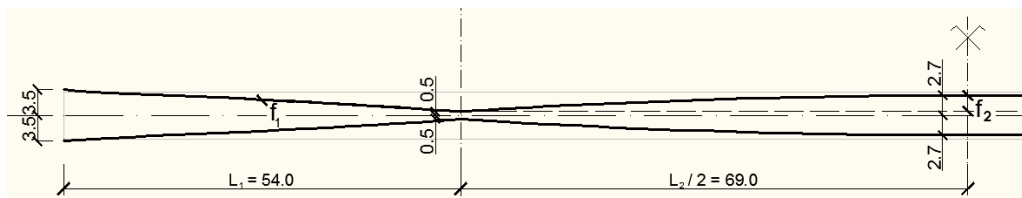
Geometrie visutých lan je dána parabolami druhého stupně. Jejich vzepětí vychází z předpokladu momentové rovnováhy sil v místech pylonů. Vodorovná síla H , vyvozená vlastní tíhou mostovky, je ve všech polích stejná. Nejprve řešíme geometrii v podélném směru. Navrhujeme vzepětí paraboly ve středním poli, vypočítáme sílu H (1.2) a pomocí rovnice (1.3.) dopočítáme vzepětí v krajních polích.

$$H = \frac{g \cdot L_2^2}{8f_2} \quad (1.2)$$

$$f_1 = \frac{g \cdot L_1^2}{8H} \quad (1.3)$$



Po vyřešení podélného směru přejdeme na půdorysný a řešíme stejným způsobem. Nejdříve návrh vzepětí ve středním poli a pomocí síly, kterou známe ze směru podélného, dopočítáme vzepětí v polích krajních.



ZÁVĚSY

Závěsy na rozdíl od ostatních prvků nemají své vlastní uzly. K vytvoření elementů dojde spojením uzlů visutých lan a pomocných uzlů mostovky.

6.1.3. SPOJENÍ UZLŮ A PODEPŘENÍ KONSTRUKCE

Jak již bylo zmíněno, je spojení soumístných uzlů zajištěno pomocí cp - vazeb. V této fázi bylo vycházeno z montážního stavu konstrukce, kdy je spojení mezi jednotlivými segmenty mostovky kloubové, což umožňuje natočení segmentů vůči sobě, spáry mezi nimi ještě nejsou monoliticky spojené a mostovka není finálně předepnuta, i když jsou již předpínací lana uvnitř mostovky v otvorech připravena, jejich tíha je tedy započítána do stálého zatížení.

Vazby cp byly dále využity v polovině rozpětí konstrukce, pro neposuvné přichycení visutého lana k mostovce.

Mostovka je v místech krajních opěr pevně podepřena v příčném a svislém směru. V podélném směru je v první fázi spojení volné. V místech pylonů mostovku opět podepřeme v příčném a svislém směru.

Visutá lana jsou pevně podepřena ve všech směrech v místech kotvení do kotevních bloků a v první fázi i v místech pylonu. Protože prvek link8 nepřenáší ohybové momenty, rotace necháme volné.

6.1.4. NELINEÁRNÍ VÝPOČET

Po vytvoření požadovaných elementů, jejich propojení a řádném podepření konstrukce, byl proveden první nelineární výpočet. Výsledky tohoto výpočtu byly použity pro úpravy geometrie visutých lan a reálných charakteristik visutých lan a závěsů. Tyto úpravy probíhaly pomocí procesu iterace.

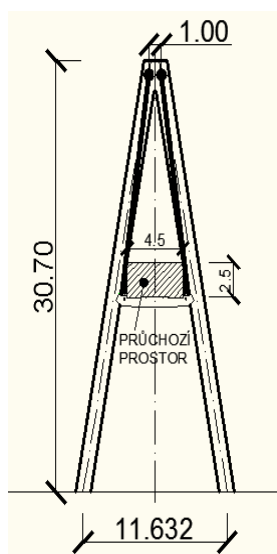
Geometrie každého z uzlů visutých lan byla změněna o hodnotu deformace v daném místě. Reálné charakteristiky byly upraveny přepočtem výsledných normálových sil v daných elementech konstrukčních prvků pomocí výše zmíněné rovnice pro výpočet přetvoření (1.1).

Poté byl výpočetní model znovu přepočítán a celý proces se opakoval tak dlouho, dokud výsledné deformace nebyly větší než 3 mm.

6.2. DRUHÁ FÁZE TVORBY MODELU

6.2.1. PYLON

V dalším kroku tvorby modelu byly vytvořeny elementy pylonů. Oba pylony jsou ve tvaru A. Geometrie bodů je zadávána pro každou stojinu zvlášť. Každá stojina sestává ze čtyř uzlů o souřadnicích x, y a z. První bod je v místě paty pylonu, druhý v místě mostovky, třetí v místě kotvení visutých lan a poslední je v hlavě. Celková výška pylonů je 30,7 m a osově rozkročení stojin v nejnižší části je 11,632 m. Tato geometrie byla navrhována s ohledem na dodržení průchozího prostoru a v úvahu bylo bráno také následné zapuštění mostovky do stojin pylonu.



6.2.2. PODEPŘENÍ KONSTRUKCE

Jelikož přibýly reálné podpěry, dochází ve druhém kroku výpočtu ke změnám podepření. Každá stojina pylonu je na spodním konci pevně vetknutá. V místě styku mostovky s pylonem je původní podepření mostovky v modelu podporami posuvnými

ve směru x, nahrazeno připojením ke stojinám pylonu prostřednictvím cp – vazeb. A taktéž v místech kotvení visutých lan jsou modelové podpory nahrazeny spojením cp - vazbami s pylonem.

Opět následuje nelineární výpočet a iterační procesy, dokud nejsou výsledné deformace 3 mm. Tímto je v rámci druhé fáze vyřešen montážní stav modelu. Následuje výchozí stav, kdy dojde k předepnutí mostovky a zmonolitnění spár mezi segmenty.

6.2.3. NÁVRH PŘEDPĚTÍ MOSTOVKY

Návrhu předpětí předcházelo vložení maker jednotlivých zatěžovacích stavů nahodilého zatížení davem lidí. Opět byl proveden nelineární výpočet a výsledné hodnoty normálových sil a ohybových momentů byly dosazeny do rovnice (1.4) pro výpočet napětí v průřezu.

$$\sigma = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{W} \quad (1.4)$$

Předpínací síla byla navržena na nejvyšší průměrnou hodnotu napětí, tak aby v mostovce nevznikaly žádné tahy. Extrémy, které vznikaly v místech pylonů nebyly v této fázi uvažovány.

6.2.4. SPOJENÍ UZLŮ PŘEDPĚTÍ A MOSTOVKY

Uzly mostovky a předpínacích lan jsou v montážním stavu spojeny kloubově. Ve výchozím stavu konstrukce však dojde ke zmonolitnění spár betonem a tím jsou klouby odstraněny, dojde tedy k úpravě cp – vazeb, tím, že se zabrání pootočení jednotlivých segmentů vůči sobě.

Další změnou ve výchozím stavu je podepření mostovky v podélném směru osy x. Zatímco v montážním stavu byla mostovka ve směru x volná, ve výchozím stavu je připojena k pružině, která snižuje napětí vzniklá při zatížení.

Po těchto úpravách necháme model opět projít výpočtem.

6.3. TŘETÍ FÁZE TVORBY MODELU

Další fáze ladění konstrukce byla zaměřená na tvorbu náběhů v místech pylonů, kde vznikala velká tahová napětí, která nebylo možno eliminovat předpínací silou. Důvodem je, že předpětí by bylo tak velké, že by docházelo k drcení betonu mostovky v jiných částech lávky.

Po vytvoření náběhovaných segmentů bylo nutné opět iteračním způsobem opravovat geometrii a reálné charakteristiky visutých lan a závěsů, tak aby se v montážním stavu konstrukce nejvyšší hodnoty přemístění uzlů pohybovaly okolo 3 mm.

Když byl montážní stav vyrovnán, byl spuštěn výchozí stav a následně jednotlivé zatěžovací stavy, z nichž byly opět kontrolovány hodnoty napětí na konstrukci a upravena předpínací síla.

Problémem se však stala krajní pole, kde vlivem zatížení od ZS2 - Dav lidí na celém středním poli, se napětí pohybovalo v kladných hodnotách, čili vznikala tah. Jako řešení tohoto problému jsem zvolila zvětšení průřezu segmentů v místech tahu, což vedlo k přetížení konstrukce a tím byla tahová napětí eliminována. Po těchto změnách průřezů, však bylo nejprve nutno opět vyrovnat geometrii a reálné charakteristiky visutých lan a závěsů v montážním stavu konstrukce. A teprve potom opět ověřit, zda v některém stavu nevznikají v mostovce nežádoucí tahy.

Když byl model konstrukce dotažen do konečné podoby, vyrovnána geometrie i reálné charakteristiky prvků v montážním stavu, a hodnoty napětí v mostovce byly v požadovaných mezích. Mohly být výsledné veličiny použity pro statický výpočet.

7.POSOUZENÍ KONSTRUKCE

Posouzení visuté lávky pro pěší bylo prováděno dle metod mezních stavů. Výsledky vnitřních sil od jednotlivých typů zatížení byly dosazeny do kombinací, z nich byly vybrány nejextrémnější hodnoty, které byly použity ve statických posudcích.

7.1. MEZNÍ STAV ÚNOSNOSTI

Mostovka byla na mezní stav únosnosti posuzována při krajní opěře, v krajním poli, v místech pylonu a ve středním poli. Předpjaté průřezy ve všech těchto místech vyhověly na ohyb i na smyk, betonářská výztuž byla přidána pouze dle konstrukčních zásad.

Dále byly posouzeny visutá lana a závěsy. Místa největších namáhání vznikala v blízkosti pylonů. Navržená visutá lana i závěsy vyhověly.

Dalším posuzovaným prvkem byl pylon. Jelikož je pylon namáhán kombinací normálové síly a ohybu, byl mezní stav únosnosti posuzován pomocí interakčních diagramů. Takto dimenzovaná výztuž byla ověřena na konstrukční zásady. Dále byl posuzován smyk. Stojina posudkům vyhověla, byly přidány pouze konstrukční třmínky.

7.2. MEZNÍ STAV POUŽITELNOSTI

Z mezních stavů použitelnosti mostovky bylo kontrolováno omezení napětí, ve všech zatěžovacích stavech na charakteristickou a kvazistálou kombinaci.

Omezující podmínka pro charakteristickou kombinaci: $|\sigma_c| \leq 0,6 f_{ck}$

Omezující podmínka pro kvazistálou kombinaci: $|\sigma_c| \leq 0,45 f_{ck}$

Segmenty omezujícím kritériím ve všech zatěžovacích stavech a všech místech rozpětí lávky vyhověly. Požadavek vzniku pouze tlakových napětí splněn nebyl v zatěžovacím stavu 5 - Dav lidí na polovině rozpětí mostu, kdy v místech podepření pylonem v mostovce stále vznikají minimální tahy, které by spáry mezi prefabrikáty nepřenesly. Tento problém se vyřeší nahrazením dvou segmentů monolitem betonovaným na místě, který díky pevnosti v tahu $f_{ctm} = 4,4 \text{ MPa}$ na požadavek omezení napětí dle mezních stavů použitelnosti vyhoví.

Podmínka pro působení betonu v tahu: $\sigma_c \leq f_{ctm}$

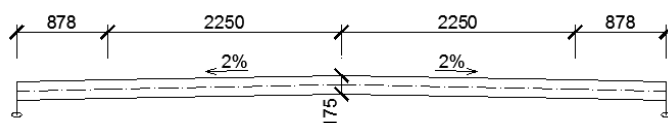
Dále byl ověřován vznik trhlin v mostovce. Trhliny nevzniknou, pokud při časté kombinaci zatížení budou ve všech vláknech průřezu pouze tlaková napětí. Toto kritérium bylo splněno.

8. PŘÍČNÝ SMĚR

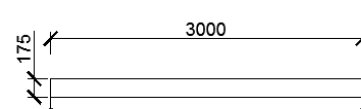
8.1. MODEL V PŘÍČNÉM SMĚRU

Pro tvorbu výpočetního modelu v příčném směru byl zvolen software Scia Engineer. Pomocí deskostěnových prvků byl vymodelován průřez mostovky v rozsahu 6 segmentů, což činí 18,0 m délky. V místech uchycení segmentů závěsy, byla mostovka podepřena ve svislém směru. Poté bylo naneseno zatížení.

PŘÍČNÝ ŘEZ SEGMENTEM



PODÉLNÝ ŘEZ SEGMENTEM



8.2. POSOUZENÍ V PŘÍČNÉM SMĚRU

Posouzení na mezní stav únosnosti v příčném směru proběhlo nejdříve na namáhání ohybovým momentem. Byla navržena příčná výztuž, ověřena minimálními konstrukčními požadavky a následně porovnána výpočtová návrhová únosnost takto dimenzovaného průřezu s návrhovou kombinační hodnotou od zatížení. Poté byly vyhovující průřezy kontrolovány na únosnost ve smyku. Mostovka vyhověla na únosnost bez smykové výztuže. Třmínky byly tedy navrženy pouze dle konstrukčních zásad.

9. DYNAMICKÁ ANALÝZA KONSTRUKCE

V rámci výpočetního modelu v programu Ansys, byla také provedena dynamická analýza pro zjištění požadovaných hodnot k posouzení lávky pro pěší na dynamiku. Modálním výpočtem bylo zjištěno prvních 20 vlastních frekvencí. Na základě největších hodnot posunutí uzlů mostovky, vyvozených kmitáním v každé z těchto frekvencí, byly vybrány 4 nejkritičtější uzly. Poloha prvního z nich je přibližně v polovině rozpětí krajního pole. Další tři se nachází ve středním poli přibližně ve třetině, čtvrtině a polovině rozpětí tohoto pole.

V každém z těchto čtyř uzlů byla postupně sledována harmonická odezva. To zahrnovalo dosazení budící síly do každého z uzlů a následného vypočítání maximálního zrychlení, které bylo porovnáno s limitní hodnotou. Lávka na dynamické účinky vyhověla.

10. ZÁVĚR

Navržené nosné prvky visuté lávky pro pěší byly navrhovány a posuzovány dle mezních stavů v souladu s platnými normami. Všechny řešené části nosné konstrukce těmto požadavkům vyhověly. Účinky zatížení na konstrukci, včetně vlivů výstavby mostu, byly řešeny pomocí výpočtového programu Ansys. Dalším podpůrným výpočtním softwarem byla Scia Engineer. Správnost programových výsledků byla orientačně ověřena jednoduchými výpočty na základních statických modelech.

Statický výpočet a výkresy, ze kterých jsou dimenze a konstrukční uspořádání navržených prvků jasně patrné jsou součástí příloh. Mezi další přiložené soubory patří vizualizace celého objektu a stavební postup, který je schematicky znázorněn a popsán v deseti krocích.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

NORMY:

- [1] ČSN 736201 Projektování mostních objektů
- [2] ČSN EN 1990 včetně změny A1: Zásady navrhování konstrukcí
- [3] ČSN EN 1991-2: Zatížení mostů dopravou
- [4] ČSN EN 1992-1-1: Navrhování betonových konstrukcí. Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby
- [5] ČSN EN 1992-1-2: Betonové mosty - Navrhování a konstrukční zásady

LITERATURA:

- [6] STRÁSKÝ, J. *Stress gibbon and cable-supported pedestrian bridges*. London: Thomas Telford Publishing, 2005. ISBN 0 7277 3282 X
- [7] NAVRÁTIL, J. *Předpjaté betonové konstrukce..* Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 978-80-7204-561-7
- [8] STRÁSKÝ, J. *Speciální betonové konstrukce (K): Moduly M01 – M03*. Studijní opory VUT v Brně 2012
- [9] ŠTĚPÁNEK, P. – ZMEK, B. *Prvky betonových konstrukcí: Navrhování dle ULS – kombinace ohyb – síla, místní namáhání, prostý beton navrhování dle SLS*. Studijní opory VUT v Brně 2005

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

ZS	zatěžovací stav
MSÚ	mezní stav únosnosti
MSP	mezní stav použitelnosti
$\varnothing$	průměr
C XX/YY	třída pevnosti betonu C $f_{ck}/f_{ck,cube}$
f_{ck}	charakteristická 28-mi denní pevnost betonu v tlaku, stanovená na válcích o průměru 150 mm a výšce 300 mm
$f_{ck,cube}$	charakteristická 28-mi denní pevnost betonu v tlaku, stanovená na krychlích o hraně 150 mm
f_{pk}	charakteristická mez kluzu předpínací oceli
f_{yk}	charakteristická mez kluzu betonářské oceli
E	modul pružnosti materiálu
B 500	B betonářská ocel 500 charakteristická mez kluzu v MPa
Y 1860	Y předpínací ocel 1860 charakteristická mez kluzu v MPa
ϵ	přetvoření
N	normálová síla
A	plocha
g	označení stálého zatížení
q	označení nahodilého zatížení
σ	normálové napětí
W	průřezový modul

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P1. Použité podklady a varianty řešení

Příloha P2. Výkresy

Příloha P3. Stavební postup a vizualizace

Příloha P4. Statický výpočet

P4.1. Statický výpočet

P4.2. Výstup z modelu