

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 ŘEKU BEČVU

SUSPENSION FOOTBRIDGE OVER THE BEČVA RIVER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jakub Kavecký

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Radim Nečas, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav betonových a zděných konstrukcí
Student:	Bc. Jakub Kavecký
Vedoucí práce:	doc. Ing. Radim Nečas, Ph.D.
Akademický rok:	2023/24
Studijní program:	N0732A260026 Stavební inženýrství – konstrukce a dopravní stavby

Děkan Fakulty Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Zavěšená lávka přes řeku Bečvu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Návrh mostu zpracujte na základě předaných podkladů, tj. situace, příčný a podélný řez a geotechnické poměry.

Ve statickém výpočtu uplatněte řešení s postupnou výstavbou nosné monolitické konstrukce z předpjatého betonu.

Můžete drobně upravit základní geometrii mostu - délku a šířku konstrukce, polohu nivelety apod. Ostatní úpravy lze provádět podle pokynů vedoucího diplomové práce.

Cíle a výstupy diplomové práce:

Cílem práce je pro zadaný most podrobně navrhnout všechny části jeho nosné konstrukce.

Pro zadaný problém navrhnut dvě až tři studie řešení a zhodnotit je. Ve výběru varianty se zaměřit na zavěšenou mostní konstrukci.

Vypracovat podrobný statický výpočet nosné konstrukce vybrané studie mostu podle mezních stavů.

Zpracovat v rámci výkresové dokumentace dispoziční výkresy, výkresy výztuže počítaných částí konstrukce a minimálně jeden detail.

Textovou část zpracovat v rozsahu a ve formě průvodní zprávy.

Diplomovou práci je třeba vypracovat a rozčlenit podle této struktury: Textová část a přílohy textové části – použité podklady a studie řešení, výkresy přehledné, podrobné a detaily, stavební postup a vizualizace a statický výpočet. Rozsah jednotlivých částí určí vedoucí diplomové práce.

Diplomová práce bude odevzdána v listinné a elektronické formě.

Seznam doporučené literatury a podklady:

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.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne 31. 3. 2023

L. S.

doc. Ing. Miloš Zich, Ph.D.
vedoucí ústavu

doc. Ing. Radim Nečas, Ph.D.
vedoucí práce

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr. h. c.
děkan

ABSTRAKT

Diplomová práca sa zaoberá návrhom lávky pre chodcov a cyklistov cez rieku Bečva. Z troch vypracovaných variant premostenia je vybraná zavesená lavička. Konštrukcia bola podrobnejšie analyzovaná v programe Midas Civil kde bola zahrnutá aj časová os výstavby. Lavička bola zaťažená stálym zaťažením, premenným zaťažením od chodcov, klimatickými od vetra a teploty. Na vnútorné sily bola konštrukcia posúdená na medzné stavy únosnosti a použiteľnosti. V programe bol posúdený pylón aj s účinkami II. rádu. Model lavičky bol podrobený aj dynamickej analýze. Grafický výstup práce tvoria prehľadné výkresy, výkresy výstuže, detail a výkres postupnej výstavby s vizualizáciou.

KLÍČOVÁ SLOVA

Lavička, zavesená konštrukcia, záves, pylón, predpätie, medzný stav únosnosti, medzný stav použiteľnosti, statický výpočet

ABSTRACT

The theme of this master thesis is the design of a footbridge for pedestrians and cyclists over the river Bečva. A suspended footbridge is selected from three developed bridge variants. The design was analyzed in more detail in the Midas Civil program where the construction timeline was also included. The footbridge was loaded with dead loads, live loads from pedestrians and climatic loads from wind and temperature. For internal forces, the structure was assessed for ultimate and serviceability limit states. The pylon was also considered in the program with 2nd order effects. The model of footbridge was subjected to dynamic analysis. The graphical output of the work consists of overview drawings, reinforcement drawings, detail and phased construction drawing with visualization.

KEYWORDS

Footbridge, suspended structure, hinge, pylon, prestressing, ultimate limit state, serviceability limit state, static calculation

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KAVECKÝ, Jakub. *Zavěšená lávka přes řeku Bečvu*. Brno, 2024. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav betonových a zděných konstrukcí. Vedoucí doc. Ing. Radim Nečas, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Zavěšená lávka přes řeku Bečvu* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 12. 1. 2024

Bc. Jakub Kavecký
autor

Pod'akovanie

V prvom rade sa chcem pod'akovať vedúcemu diplomovej práce doc. Ing. Radimu Nečasovi, Ph.D. za odborné rady a čas, ktorý mi venoval.

Pod'akovanie venujem svojej rodine za nepretržitú podporu, pochopenie počas mojej akademickej cesty a možnosť ísť študovať. Chcel by som sa pod'akovať partnerke a kamarátom za trpezlivosť a dôveru. Ďakujem aj kolegom za cenné rady a ochotu zdieľať svoje skúsenosti.

OBSAH

1. Úvod	10
2. Podklady	11
3. Varianty	12
3.1. Variant A	12
3.2. Variant B	13
3.3. Variant C	15
3.4. Výsledný variant	16
4. Prílohy	17
5. Technické riešenie zvolenej varianty	18
6. Popis modelov	25
6.1. Prúťový globálny model	25
6.2. Dostkostenový model	27
7. Zaťaženie a vnútorné sily	28
7.1. Zoznam zaťažovacích stavov	29
7.2. Kombinácie zaťaženia	30
7.3. Použité materiály	30
8. Statické posúdenie	30
8.1. Medzný stav použiteľnosti	30
8.2. Medzný stav únosnosti	31
9. Dynamická analýza	34
10. Záver	36
11. Zoznam obrázkov	37
12. Zoznam tabuliek	38
13. Zoznam použitých zdrojov	39
13.1. Technické normy	39

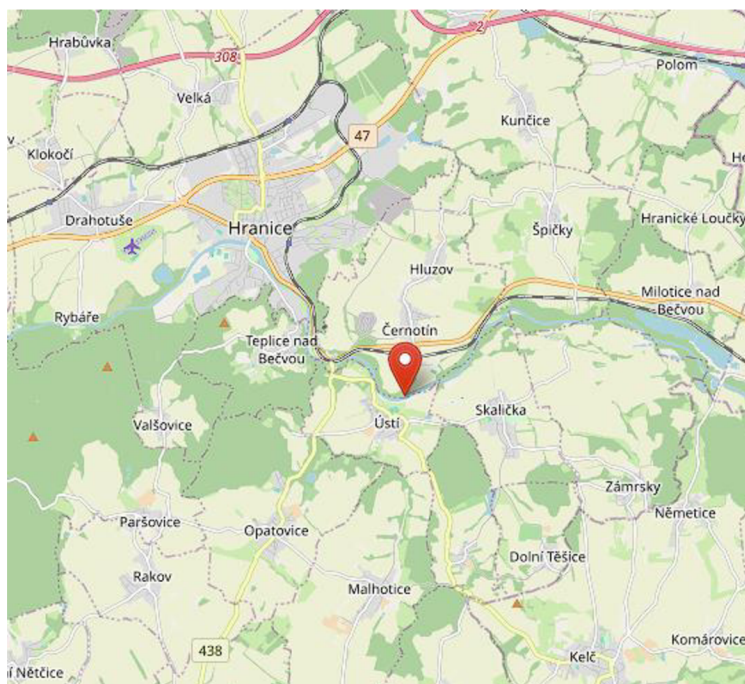
13.2.	Odborná literatúra.....	39
13.3.	Internetové zdroje.....	39
13.4.	Výpočtové programy	40
14.	Zoznam príloh.....	41

1. Úvod

Obsahom diplomovej práce je návrh a následné posúdenie konštrukcie lávky, ktorá premostí koryto rieky Bečvy. Návrh konštrukcie bol podnietený návrhom cyklotrasy a jej prevedenie ponad prekážku. V závislosti na teréne boli vytvorené 3 varianty, ktoré boli zhodnotené. Vybraný variant bol spracovaný podrobnejšie.

Hlavnú časť práce tvoril návrh vhodnej geometrie, návrh mostovky v pozdĺžnom a priečnom smere, posudok pylónov a závesov. Podrobnejšia analýza si vyžadovala vytvorenie numerických modelov v programe Midas Civil 2022. Nasledoval statický výpočet podľa platných noriem. Na konštrukcii bola urobená dynamická analýza.

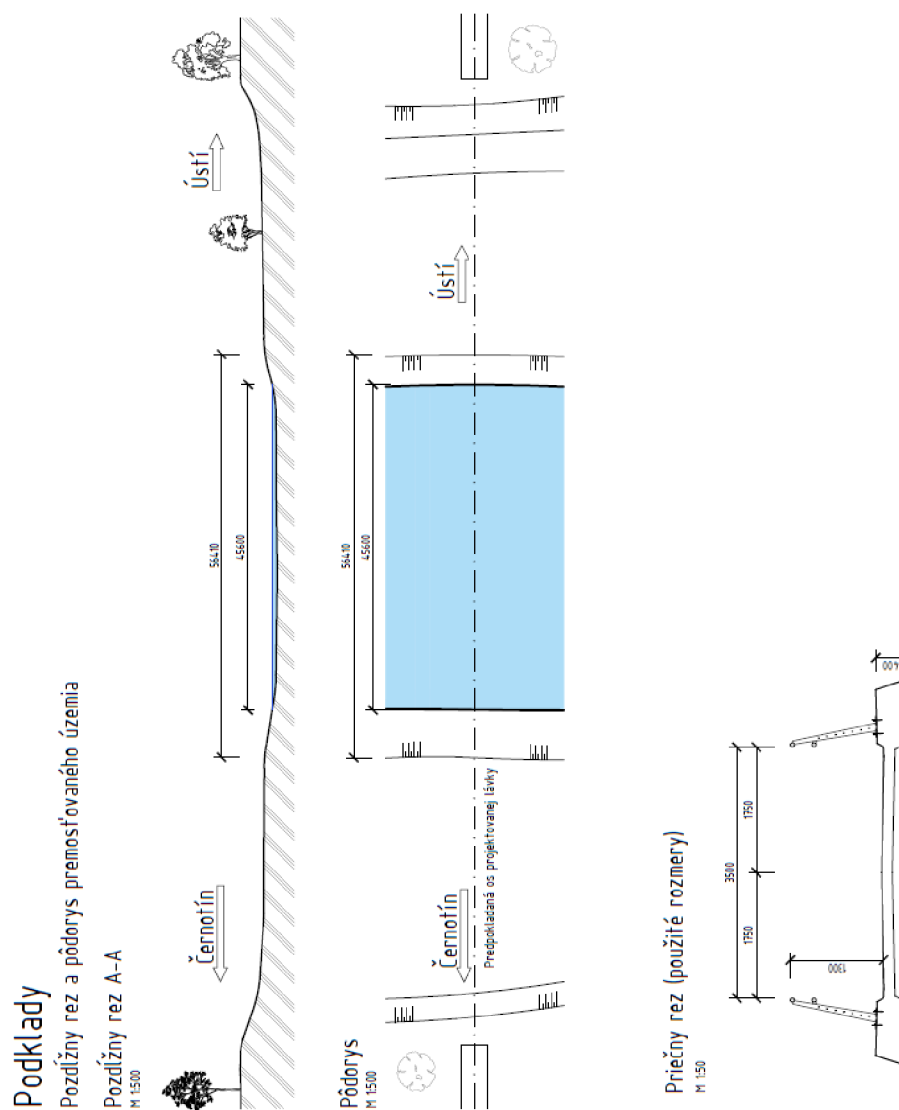
Grafický výstup v tejto diplomovej práci tvoria výkresy s odpovedajúcim rozsahom podľa zadania práce.



Obrázok 1 Umiestnenie stavby

2. Podklady

Na základe podkladov boli navrhnuté a spracované 3 varianty, ktoré zohľadňovali charakter terénu a taktiež účel konštrukcie. Poskytnuté podklady vedúcim práce sú pre návrh visutej konštrukcie. Z poskytnutých podkladov bol vytvorený terén pre návrh variant. Ďalej bolo použité šírkové usporiadanie prevádzanej komunikácie a približný tvar mostovky v priečnom reze. Pozdĺžne riešenie nebolo zohľadnené pri návrhu. Geotechnické pomery, návrh spodnej stavby a založenie neboli v rámci diplomovej práce podrobne riešené. Navrhnutý typ založenia a rozmery základov vychádzajú z podobných konštrukcií. V diplomovej práci nebola overená ich únosnosť.



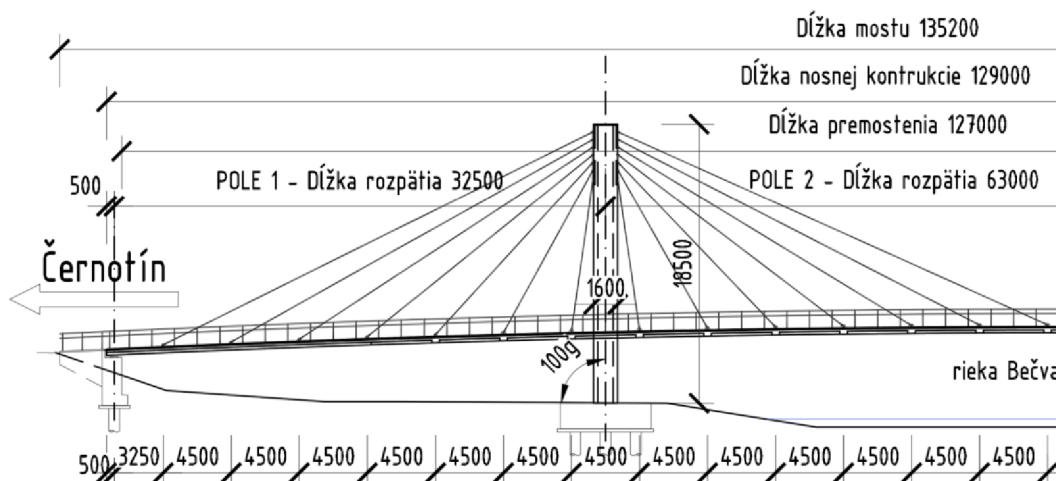
Obrázok 2 Podklady

3. Varianty

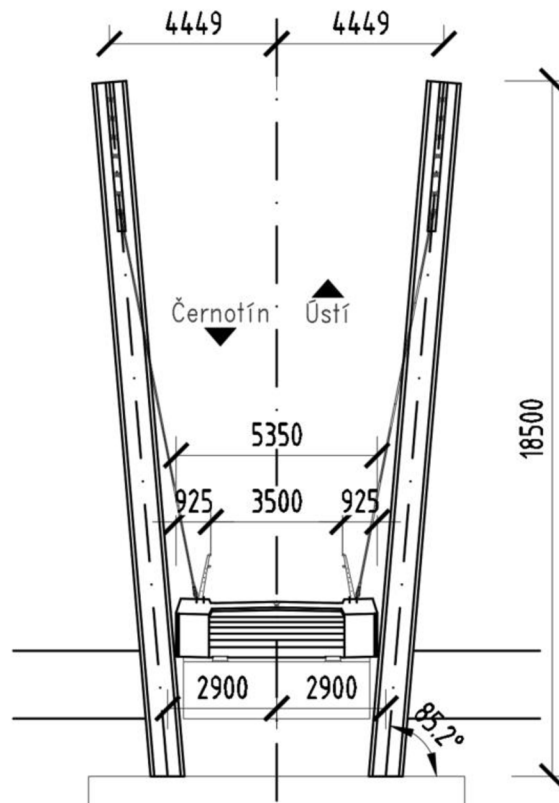
Návrh variant vycházel z požiadavky na vytvorenie premostenia pre rozvíjajúcu sa cyklotrasu. Snahou bolo vytvoriť také varianty ktoré budú funkčne spĺňať požiadavky na fungovanie konštrukcie a esteticky nebudú narúšať charakter krajiny. Pri výbere vhodnej konštrukcie berieme do úvahy názor investora (obce) a tiež požiadavky zhotoviteľa na technológiu.

3.1. Variant A

Prvý variant je zavesená konštrukcia o 3 poliach s rozpätím krajných polí 33,50 m a rozpätím stredného poľa 63,00 m. Nosný systém tvorí mostovka ktorú vynášajú tyčové závesy ukotvené do pylónu. Závesy sú na oboch stranách mostovky. Spolu ich je 28 párov rozdelených po 7 pároch v krajných poliach a zvyšných 14 pároch v strednom poli. Usporiadanie závesov je semi-radiálne. Pylóny sú vysoké 18,50 m od úrovne základov a ich odklon je 4,80 ° od zvislej roviny smerom od mostovky. Mostovka je uložená len na svojich koncoch na ložiskách. V pozdĺžnom smere je mostovka predopnutá. Voľná šírka lavičky je 3,50 m, čo vytvára dostatočný priestor pre chodcov a cyklistov. Celková šírka mostovky je 5,35 m. Niveleta mostovky je vo vrcholovom oblúku s polomerom $R = 1387,50$ m s premenným sklonom Na operách je sklon 4,60 %. Priečny sklon na mostovke je strechovitý s hodnotou 2,00 %. V celej voľnej šírke je povrch opatrený ochrannou hydroizolačnou vrstvou s hrúbkou 3 mm. Vďaka nízkemu korytu rieky umožňuje zhotoviť mostovku na skruži.



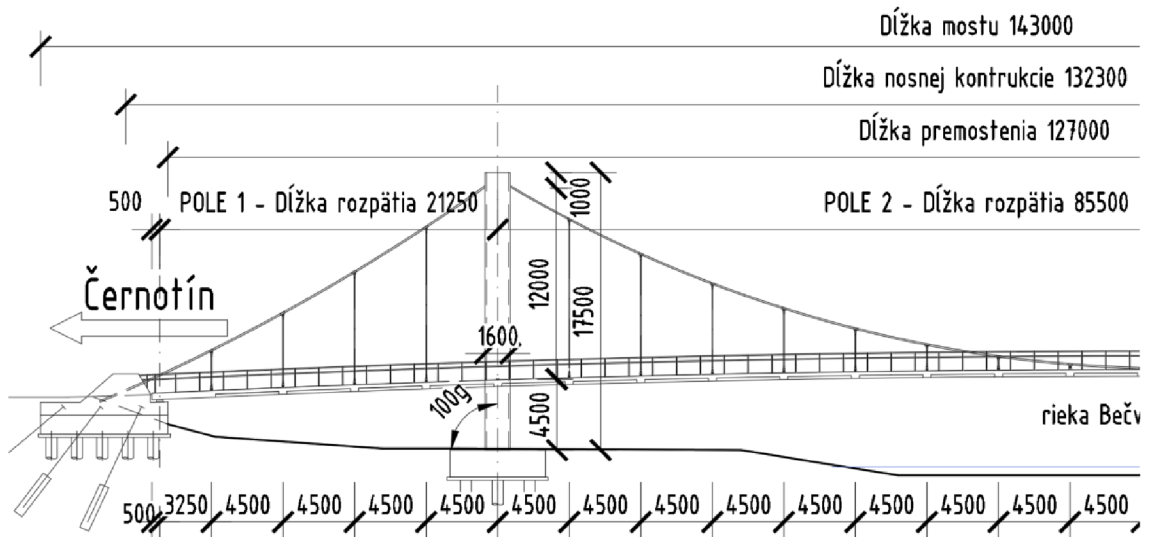
Obrázok 4 VAriant A - pozdĺžny rez



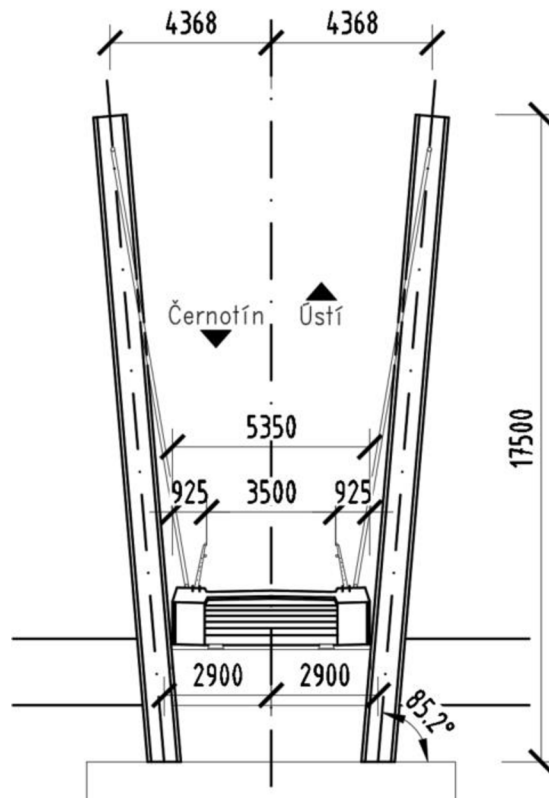
Obrázok 5 Variant A - priečny rez

3.2. Variant B

Pre druhý variant bola, ako nosný systém, zvolená visutá konštrukcia. Mostovka je riešená rovnakým princípom ako vo Variante A. Rozdielom je že závesové tyče sú vynášané visutým lanom ktoré je nesenné pylónmi a zakotvené v podporách do kotevných blokov. Týmto typom založenia je možné zachytiť výraznú horizontálnu silu od visutého kábla. Navrhnutá konštrukcia má 3 polia s menším rozpätím krajných polí 21,50 m a rozpätím stredného poľa 85,50 m. Tento variant má výhodu možnosti montáže bez závislosti na teréne. Pylóny sú vyklonené o $4,80^\circ$ a zakotvené do plošného základu nad skupinou pilót, rovnakých ako vo Variante A.



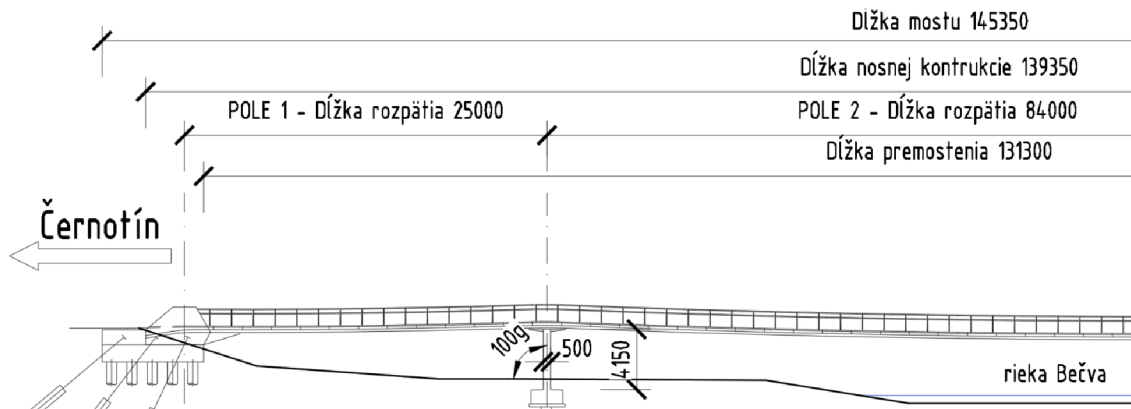
Obrázok 6 Variant B - pozdĺžny rez



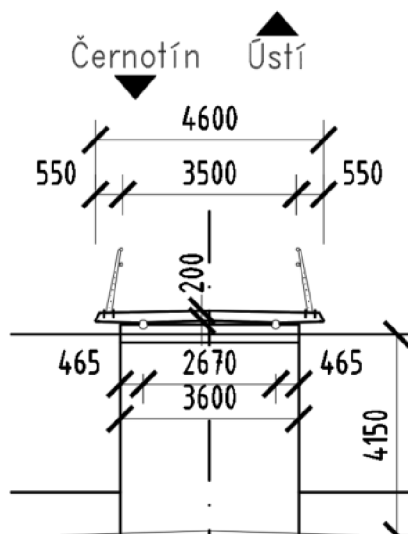
Obrázok 7 Variant B - priečny rez

3.3. Variant C

Ako tretí variant bol vyhotovený návrh premostenia predpäťým pásom. Táto konštrukcia je prefabrikovaná zo segmentov a tento postup výstavby taktiež neovplyvňuje terén. Celkovo sú navrhnuté 3 polia. Krajné polia majú dĺžku 25,00 m a stredné pole má dĺžku 84,00 m. Typický segment mostovky má šírku 4,60 m a dĺžku 2,00 m s minimálnou hrúbkou dosky 0,20 m. Konštrukcia je podporovaná vonkajšími predpäťými lanami ktoré majú tvar paraboly druhého stupňa so vzopätím 0,80 m. Krajné polia sú so vzopätím 0,18 m a vyrovnávajú horizontálne sily v podporách. Podpory sú navrhnuté ako kyvné stojky. Maximálny pozdĺžny sklon na mostovke je 3,80%. Povrch mostovky je opatrený ochrannou vrstvou hydroizolácie s nášľapnou funkciou hrúbky 3 mm. Predpínacie káble sú kotvené v základových blokoch uložených na základe tvoreným skupinou pilót.



Obrázok 8 Variant C - pozdĺžny rez



Obrázok 9 Variant C - priečny rez

3.4. Výsledný variant

Zavesená konstrukcia vytvorí dominantu v podobe premostenia rieky Bečvy a napojenia na sieť cyklotrás. Variant B, popisujúci visutú konštrukciu, je menej nápadný v krajine ako variant A so zavesenou konštrukciou. Má však oveľa väčšie požiadavky na založenie pri zachytávaní vodorovných síl do kotevných blokov. Najviac transparentný variant bol s predpätým pásom ale nevýhodou tejto varianty bola nepravidelná niveleta a náchylnosť na dynamické zaťaženie.

Na základe rozhodnutia investora s ohľadom na technológiu zhotoviteľa a taktiež popísaných výhod a nevýhod bol zvolený **Variant A** pre podrobnejší návrh. Požiadavka zhotoviteľa na použitie skruže pri výstavbe je možné s ohľadom na s plytké koryto rieky Bečvy.

4. Přílohy

P1. Podklady a varianty řešení

Vypracované varianty pre diplomovú prácu boli slovné popísané vyššie. V prílohe *P1. Použité podklady a varianty riešenia* nájdete výkresy spracované detailnejšie.

P2. Výkresová dokumentácia

Pre vybraný variant bola spracovaná výkresová dokumentácia v rozsahu diplomovej práce zo zadania. V *P.2 Výkresová dokumentácia* sa nachádzajú postupne výkresy pôdorysu, pozdĺžneho rezu, priečného rezu, výkresu predpínacej výstuže, výkresu výstuže mostovky a pylónu a detail.

P.3 Postup výstavby a vizualizácia

V prílohe *P3.1 Postup výstavby* sa nachádza schematický výkres postupu výstavby aj so stručným popisom prác v jednotlivých fázach.

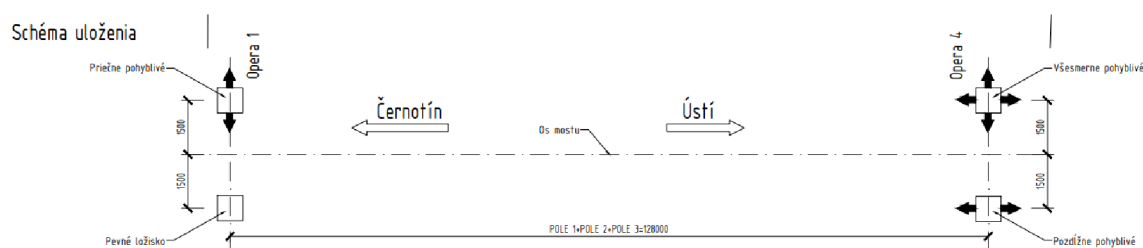
Príloha *P3.2 Vizualizácia* obsahuje aj vybraný variant spracovaný aj vo forme 3D modelu celej konštrukcie aj so zasadením do prostredia pre lepšiu predstavu rozmerov a kontrastu s okolím. Prvotný model bol vytvorený za pomoci programu Rhinoceros a dotvorený do svojej konečnej podoby v Lumione.

P.4 Statický výpočet

Táto príloha obsahuje *P4.1 Statický výpočet* kde sú podrobnejšie riešené posudky vybraných častí konštrukcie a dynamickú analýzu. Dokument *P4.2 Vnútorne sily a vlastné tvary* obsahuje kombinácie zaťaženií a vlastné tvary použité pri posudkoch.

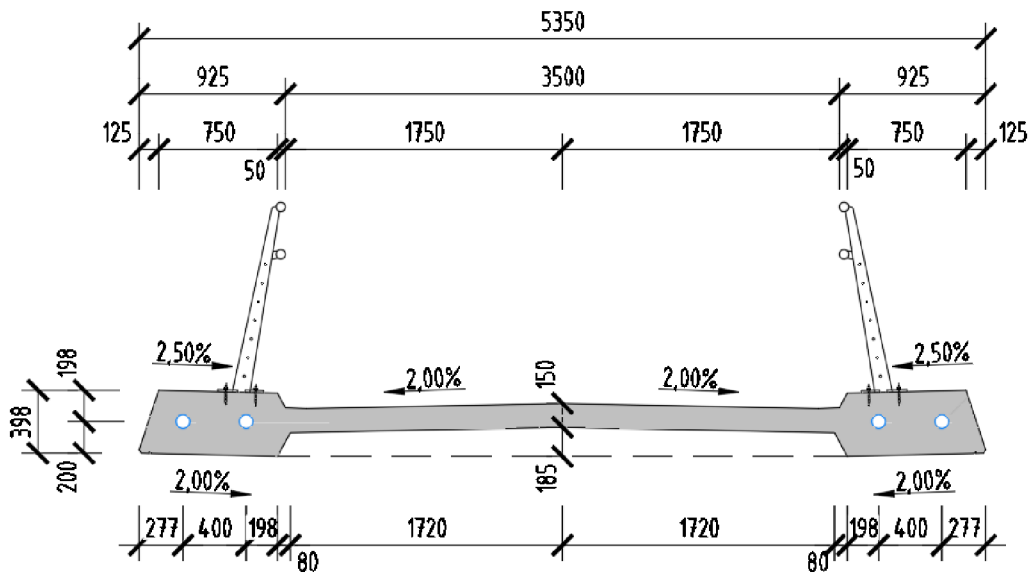
5. Technické riešenie zvolenej varianty

Podopretie konštrukcie tvorí na krajoch lávky vždy dvojica ložísk. V poli je podporovaná závesmi kotvenými do pylónu obdĺžnikového tvaru. Pylóny sú odklonené vo zvislom smere o $4,80^\circ$ kolmo na niveletu mostovky. Závesy sú kotvené v krajoch mostovky pomocou vidlicových ukončení tiahla a pripojením na kotevné plechy ktoré sú osadené na krajoch mostovky. Do hláv pylónov sú závesy pripojené vidlicovými koncovkami na kotevný plech v semi-radiálnom usporiadaní. Toto usporiadanie je kombinácia radiálneho a harfového usporiadania. Jeho výhodou je nižšie momentové namáhanie v mieste kotvenia ako pri radiálnom usporiadaní ale nevýhodou menšie vyvesenie. Závesy boli navrhnuté pozdĺžne v osových vzdialenostiach 4,50 m. V mieste kotvenia ich bol zväčšený prierez mostovky. Rebrá boli navrhnuté so šírkou 0,50 m. Pozdĺžna os lávky je navrhnutá vo vrcholovom oblúku s polomerom $R = 1387,50$ m a premenným sklonom s nábehmi dĺžky 1,50 m, ktoré sú v sklone 4,60 %.

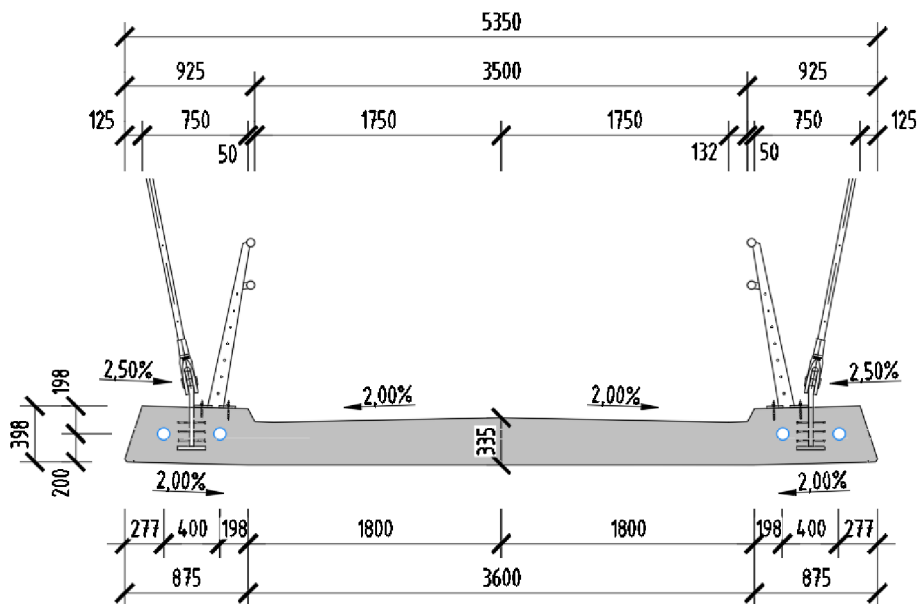


Obrázok 10 Schéma uloženia

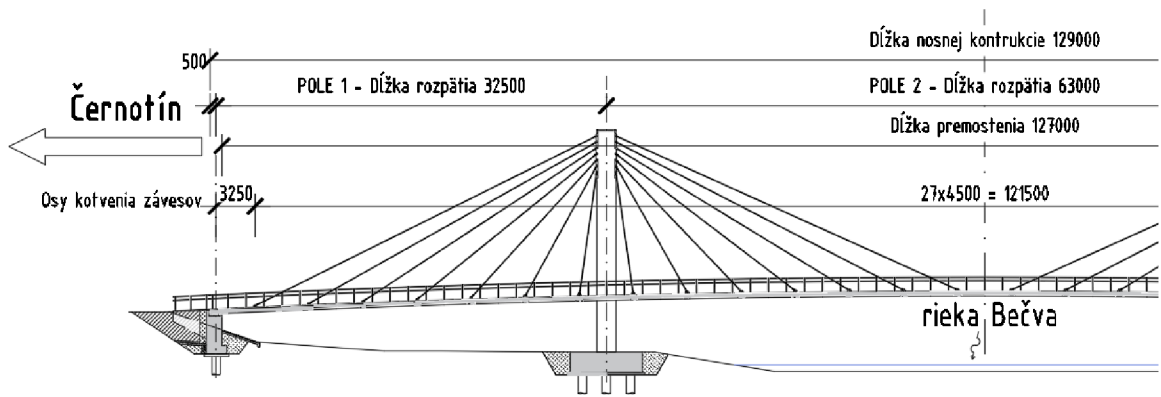
Mostovka má priečny strechovitý sklon s hodnotou 2,00 % a s premenným pozdĺžnym sklonom. Voľnú šírku pre cyklistov a chodcov s hodnotou 3,50 m tvorí doska ktorá prenáša účinky premenného zaťaženia od chodcov do nosníkov na krajoch prierezu. Rímasy alebo aj krajné nosníky sú v opačnom 2,50% sklone.



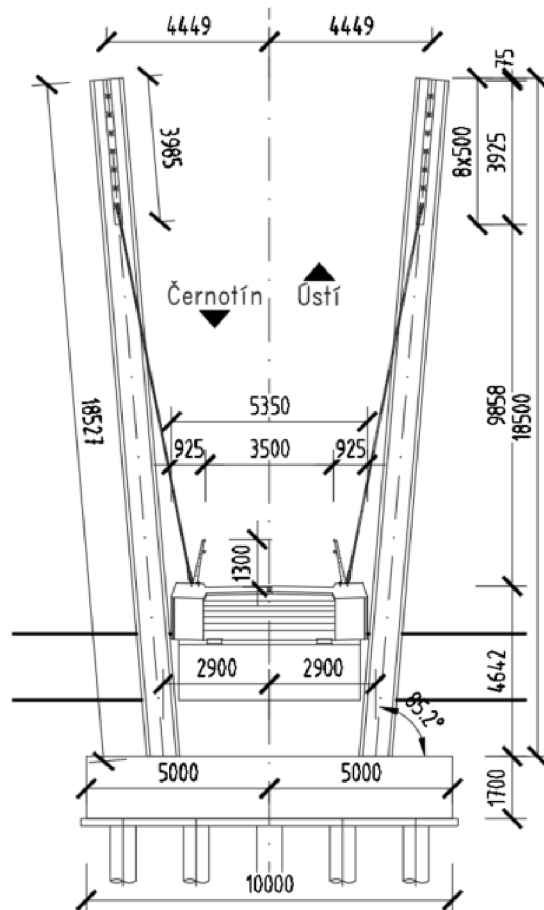
Obrázok 11 Priečný rez – pole



Obrázok 12 Priečný rez – rebro



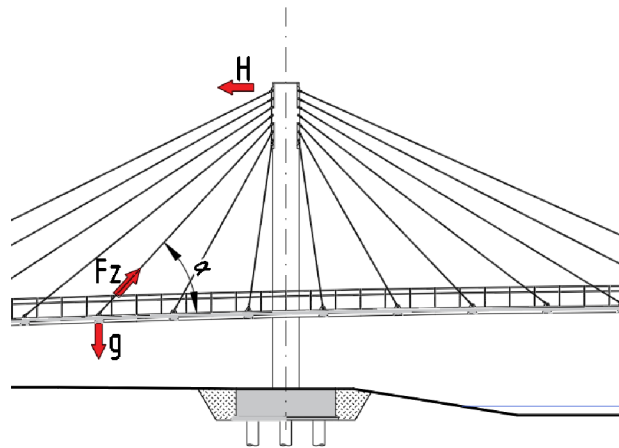
Obrázok 13 Pozdĺžny rez



Obrázok 14 Priečny rez – pylónom

5.1.1. Počiatkový návrh

Princíp zavesenej konštrukcie pomocou priamych šikmých lán/tyčí je vytvoriť medzi závesmi a mostovkou takzvané „trojuholníky“ ktoré zabezpečujú tuhosť sústavy. Závesy vynášajú tiaž mostovky a jej zaťaženia do kotvenia na pylóne. Závesy vytvoria spojitý nosník s poddajnými podporami v mieste ukotvenia. Je potrebné dbať na rozmiestnenie pylónov, aby boli v polohe, kde sú normálové sily z oboch strán zhodné, kvôli minimalizovaniu namáhania.



Obrázok 15 Schéma prenosu síl

Výška nivelety mostovky v jednotlivých bodoch bola určená podľa predpisu rovnice:

$$h = 2 \cdot p \cdot x^2 + \text{vzopätie},$$

$$2 \cdot p = -\frac{\text{vzopätie}}{\frac{L^2}{2}}$$

Kde vzopätie mostovky je 1,500 m.

Ako finálny návrh geometrie je možno brať stav, ktorý vyvodí na mostovku čo najmenšie deformácie a minimálne ohybové namáhanie. V počiatkovom návrhu sa uvažuje vlastná tiaž mostovky vrátane rebier a ostatného zaťaženia, ako aj predopnutie závesov a napnutie predpínacej výstuže.

Pri návrhu rozmerov bol braný ohľad aj na vzopätie oblúka ku dĺžke premostenia aby bola konštrukcia esteticejšia. Pri návrhu sklonu a polohy pylónu bol použitý predpoklad vyrovnania horizontálnych síl v rovine pre minimalizovanie namáhania.

5.1.2. Návrh závesov

Návrh závesov vychádza hlavne z ich geometrie, vzdialeností a uhlov v príslušných rovinách. Závesy Z1-Z7 sa nachádzajú medzi operou 1 a osou pylónu 1. Závesy Z8-Z14 pokračujú od pylónu 1 do stredu lávky. Zvyšné závesy nie sú v tabuľke 1 uvedené kvôli symetričnosti konštrukcie.

Tabuľka 1 Geometria pre návrh závesov

Záves	Δx	Δy	Δz	L	α
Z1	29,00	2,20	14,50	32,50	26,50
Z2	24,50	2,15	13,34	27,98	28,48
Z3	20,00	2,10	12,67	23,77	32,20
Z4	15,50	2,04	12,00	19,71	37,52
Z5	11,00	1,99	11,36	15,94	45,46
Z6	6,50	1,94	10,73	12,69	57,69
Z7	2,50	1,89	10,11	10,59	72,78
Z8	2,00	1,89	10,01	10,38	74,63
Z9	6,50	1,94	10,42	12,43	56,94
Z10	11,00	1,99	10,85	15,58	44,14
Z11	15,50	2,04	11,29	19,28	35,83
Z12	20,00	2,10	11,75	23,29	30,29
Z13	24,50	2,20	12,22	27,47	26,41
Z14	29,50	1,94	12,70	32,18	23,25

Δx pôdorysná vzdialenosť v smere x medzi kotvením v pylóne a v mostovke

Δy pôdorysná vzdialenosť v smere y medzi kotvením v pylóne a v mostovke

Δz zvislá vzdialenosť medzi koncami závesov

L dĺžka závesu

α uhol závesu od vodorovnej roviny

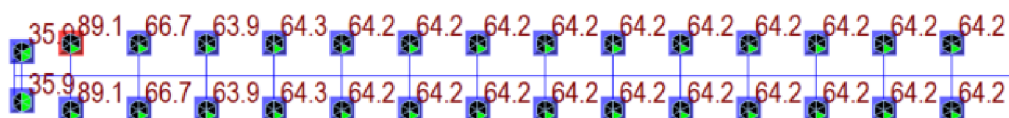
Tabuľka 2 Prehľad sil v závesoch

Záves	Reakcia Fz [kN] na 1 záves			PRET [kN]
	Vl. tiaž	Ost. Stále	Vl.+Ost.	
Z1	35,90	1,00	36,90	83,84
Z2	89,10	2,60	91,70	195,10
Z3	66,70	2,70	69,40	132,39
Z4	63,90	2,70	66,60	111,45
Z5	64,30	2,70	67,00	96,00
Z6	64,20	2,70	66,90	80,76
Z7	64,20	2,70	66,90	70,88
Z8	64,20	2,70	66,90	68,81
Z9	64,20	2,70	66,90	78,18
Z10	64,20	2,70	66,90	93,88
Z11	64,20	2,70	66,90	111,87
Z12	64,20	2,70	66,90	130,17
Z13	64,20	2,70	66,90	147,94
Z14	64,20	2,70	66,90	167,05

Z prútového modelu s podporami v mieste kotvenia závesov boli odčítané zvislé reakcie a zapísané do tabuľky 2. s použitím vzťahu:

$$PRET = F_z / \sin \alpha$$

Bolo možné nájsť sily ktoré vyrovnajú mostovku v pozdĺžnom smere a tie boli vložené do závesov ako osovú silu.



Obrázok 16 Zvislá reakcia od vlastnej tiaže



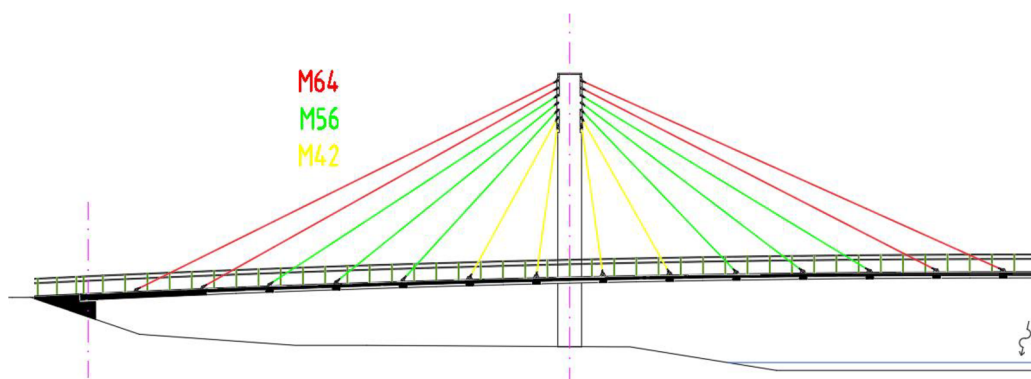
Obrázok 17 Zvislá reakcia od ostatného stáleho zataženia

5.1.3. Návrh predpätia

Ďalším krokom bol návrh predpätia kde bolo pristúpené k centrickému zaťaženiu pre získanie tlakovej rezervy. Predpätie tvoria 4 súdržné káble ktoré boli zadané priamo v programe MIDAS Civil a ich ťažisko je zhodné s ťažiskom mostovky. Ich poloha sa snaží čo najvernejšie vystihnúť ťažisko pre minimalizovanie ohybových momentov od predpätia. Krátkodobé straty po zadaní parametrov predpínacej výstuže stanovil program. Dlhodobé straty predpätia boli odhadnuté na 10%. Predpätie je mimo ťažiska v oblasti zväčšeného prierezu kvôli zakotveniu predpínacej výstuže.

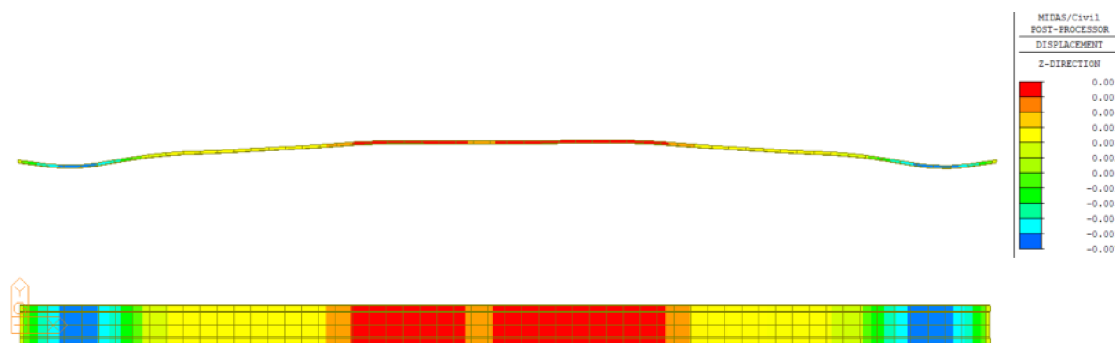
5.1.4. Finálny návrh

Pri nájdení geometrie, z ktorej vychádzalo obmedzenie napätí a vyhovujúce vo všetkých časoch, bolo pristúpené k optimalizácii návrhu závesov. Potrebné napätie v závesoch bolo v rozmedzí $(0,10 - 0,45) \cdot f_{yk}$ pre lineárne pôsobenie. Podľa tohto kritéria boli závesy rozdelené do 3 skupín podľa namáhania s 3-ma rôznymi priermi tyčí.



Obrázok 18 Rozdelenie závesov

Na obrázkoch nižšie je priehyb v zaťažovacom stave nazvanom Vyrovnanie. Ukazuje snahu o vyrovnanie vlastnej tiaže mostovky vrátane rebier, ostatného stáleho zaťaženia, deformácie od predpätia a sily v závesoch pri ich napínaní. Pre účel tejto práce bol zhodnotený priehyb 9 mm ako dostatočné.



Obrázok 19 Priebeh zvislej deformácie mostovky po vyrovnani

5.1.5. Postup výstavby

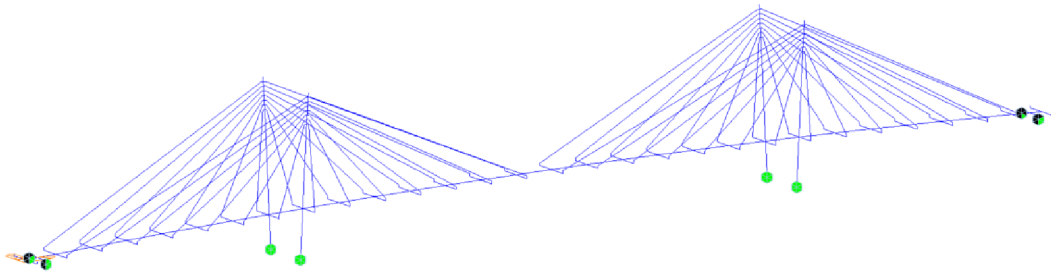
Príloha P3 *Stavebný postup a vizualizácie* obsahuje výkres, ktorý schematicky popisuje postup výstavby celej konštrukcie od zemných prác, založenia, pylónu a mostovky až po začiatok používania. Konštrukcia mostovky je navrhnutá ako monolitická na pevnej skruži. Typ skruže bude upravený podľa požiadaviek zhotoviteľa. Pylón bude zadenbený a betónovaný po častiach vo svojej finálnej polohe, nebude betónovaný vo výrobnjej polohe. Mostovka bola betónovaná na skruži kde po 14 dňoch bolo pridané predpätie a predopnutie závesov. Pri demontáži skruže sa uloží konštrukcia na ložiská. V ďalšom kroku sa aplikuje nášľapná hydroizolačná vrstva a lávka je uvedená do prevádzky.

6. Popis modelov

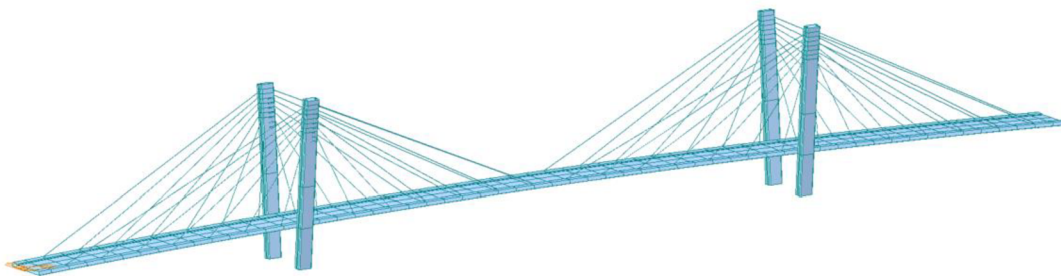
Pre statické posúdenie a dynamickú analýzu boli vytvorené a popísané 2 modely na získanie vnútorných síl a na zistenie správania sa konštrukcie. Modely boli vytvorené v programe MIDAS Civil.

6.1. Prúťový globálny model

Prvý model vytvorený v prostredí programu MIDAS Civil bol modelovaný ako prúťový z 1D prvkov. Tento model bol globálny a zohľadňoval všetky prvky ako aj časové hľadisko výstavby. Pre materiály boli priradené reologické javy, vysychanie a dotvarovanie.



Obrázok 20 Pohľad na celý prúťový model



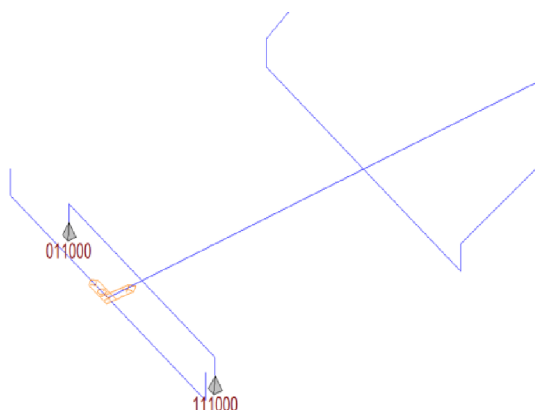
Obrázok 21 Pohľad na celý prúťový model – render

Z modelu boli získané vnútorné sily na dimenzovanie mostovky v pozdĺžnom smere, obmedzenie napätí, namáhanie v závesoch a sily pôsobiace na pylón.

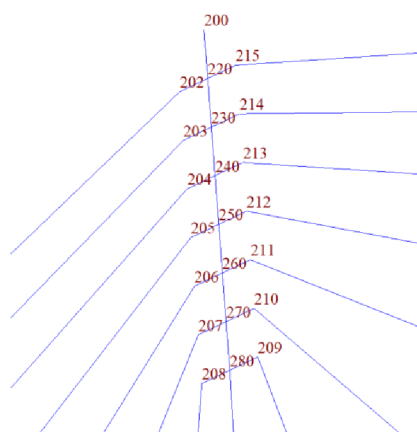
Pre posúdenie mostovky boli vytvorené dva prierezy. Prvý prierez, v poli a druhý prierez je v umiestnený v rebrách a nábehu pre zakotvenie predpínacej výstuže. Mostovka je vymodelovaná z 58 prútov, v dĺžke 2,25 m, čo je polovica osovej vzdialenosti závesov pre plynulejšie priebehy síl.

Pylón bol modelovaný ako prút s plným prierezom po celej výške okrem hlavy pylónu kde je oslabený prierez pre uloženie kotevného plechu.

Tuhé ramienka boli vytvorené pre uloženie mostovky na ložiskách. Namodelované boli v polohách presného zakotvenia závesov a pripojené na prút mostovky. Tuhými ramienkami bolo namodelované aj zakotvenie závesov v hlave pylónu.



Obrázok 23 Detail modelovania uloženia OPI



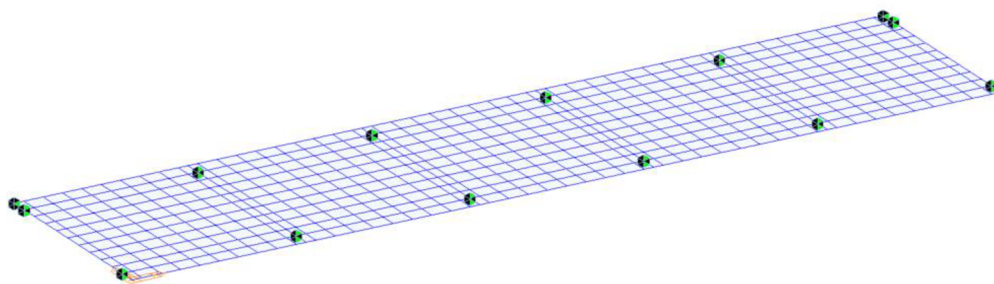
Obrázok 22 Detail modelovania hlavy pylónu

Závěsy boli modelované ako TRUSS elementy s podmienkou TENSION-ONLY čo vystihuje ich správanie. Takýto prvok prenesie len ťahovú silu a vylučuje pôsobenie zápornej osovej sily a pôsobenie momentov.

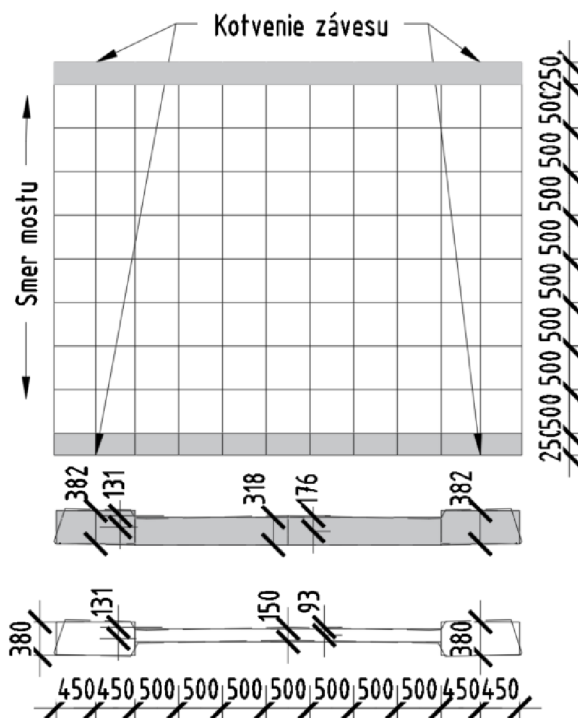
6.2. Dskostenový model

Druhý model na popisánie správania sa konštrukcie v priečnom smere ako doskostenový. Model je vytvorený z 2D prvkov s rôznou hrúbkou pre danú časť prierezu. Pre najvýstižnejšie výsledky na dimenzovanie priečného smeru, bol model vytvorený v dĺžke 5-tich závesov s vloženíím podpôr do miest zavesenia. Pre posudky bol vybraný stredný celok ktorý hodnoverne odráža správanie zavesenej konštrukcie.

Dskostenový model bol zaťažný vlastnou tiažou, ostatným stálym zaťažením a chodcami vo svojej celej voľnej šírke. Zaťaženie modelu aj s hodnotami je podrobnejšie popísané v prílohe P4.2 *Statický výpočet, kapitola 8.2 Zaťaženie priečného smeru.*



Obrázok 24 Dskostenový model – pohľad



Obrázok 25 Schéma veľkosti elementov – doskostenový model

7. Zaťaženie a vnútorné sily

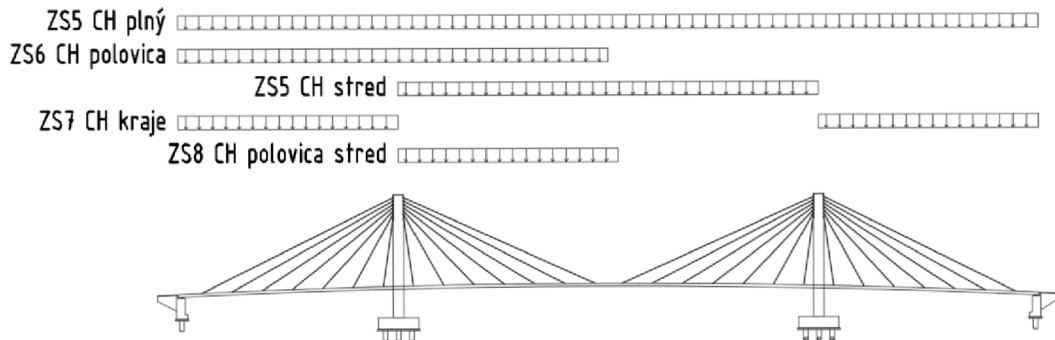
Na konštrukciu boli uvažované zaťažovacie stavy, tvorené stálym zaťažením, predpätím, zaťažením premenným a klimatickým. Jednotlivé účinky zaťaženia sú vyčíslené v prílohe P4.2 *Statický výpočet, kapitola 4*.

Vlastná tiaž bola generovaná automaticky výpočtovým systémom podľa navrhnutého prierezu a objemovej tiaže vybraného materiálu. Tiaž rebier je zahrnutá v globálnom modeli líniovým zaťažením na tuhé rameno kvôli čo najvernejšiemu rozloženiu hmoty na konštrukcii pre dynamickú analýzu. Všetky objemové tiaže vychádzajú z materiálových knižníc, okrem tuhých ramien, ktorým bola priradená nulová objemová tiaž.

Predpätie v konštrukcii bolo navrhnuté ako súdržné a tvoria ho celkovo 4 káble po 7 lanách. Laná majú triedu Y1860-S7-15,7-A. Podrobnejšie informácií sú v prílohe P2. *Statický výpočet, kapitola 4.1.3*.

Premenné zložky zaťaženia tvoria chodci, zmena teploty a účinky vetra. Zaťaženie chodcami bolo uvažované v rôznych možnostiach rozmiestnenia v celej dĺžke konštruk-

cie. Zaťaženie teplotou bolo rozdelené na rovnomerné oteplenie a rovnomerné ochladenie. Zaťaženie vetrom bolo uvažované iba v smere kolmo k ose mostovky a bolo aplikované na mostovku aj pylón.



Obrázok 26 Rozmiestnenie zaťaženia od chodcov po dĺžke

Pozn.: Pri zaťažení chodcami bolo toto zaťaženie aplikované na celú voľnú šírku. Zaťaženie bolo súmerné a teda nevyvodzovalo žiadne krútiace účinky. Preto pri posudzovaní medzného stavu nebola konštrukcia posúdená na krútenie.

7.1. Zoznam zaťažovacích stavov

- ZS1 – Vlastná tiaž (vrátane rebier)
- ZS2 – Predopnutie závesov
- ZS3 – Predopnutie mostovky
- ZS4 – Ostatné stálie
- ZS5 – Chodci - plný
- ZS6 – Chodci - polovica
- ZS7 – Chodci – stred
- ZS8 – Chodci - kraje
- ZS9 – Chodci – polovica stred
- ZS10 – Teplota - oteplenie
- ZS11 – Teplota - ochladenie
- ZS12 – Vietor

7.2. Kombinácie zaťaženia

Po zostavení zaťaženia a zaťažovacích stavov boli vytvorené kombinácie jednotlivu pre posudzovanie medzného stavu použiteľnosti a medzného stavu únosnosti. Pre posúdenie obmedzení napätí boli vytvorené nasledujúce kombinácie: charakteristická, častá a kvázistála. Pre medzný stav únosnosti boli rovnice skombinované podľa rovníc 6.10a a 6.10b s príslušnými súčiniteľmi. Zostavenie jednotlivých kombinácií ako aj súčinitele sú v prílohe *P4.2 Statický posudok, kapitola 5*.

Výsledné priebehy vnútorných síl kombinácií zaťaženia obsahuje príloha *P4.1 Vnútorné sily a vlastné tvary*.

7.3. Použité materiály

Mostovka – C40/50

Pylón – C45/55

Betonárska výstuž – B500B

Predpínacia výstuž –Y 1860 S7-15,7-A

Tiahla – Macalloy 460

Podrobnejšie charakteristiky sú vypísané v prílohe *P4.2 Statický výpočet, kapitola 2*.

8. Statické posúdenie

8.1. Medzný stav použiteľnosti

Na medzný stav použiteľnosti bola posúdená mostovka v čase $t_0=14$ dní (predopnutie mostovky) a t_{oo} v čase návrhovej životnosti t_{oo} . Pri posúdení bol zohľadnený vek konštrukcie pri stanovení pevnosti. Posudky boli zostavené ručne pre horné aj dolné vlákna v MS Excel a vždy bola braná minimálna aj maximálna hodnota z príslušného zaťažovacieho stavu.

Kontrolované podmienky pre MSP:

Rozhodnutie o vzniku trhlin:

$$\sigma_{c,max} < f_{ctm} = +3,50 \text{ MPa} \quad \text{v čase } t_{oo}$$

Obmedzenie napätí betónu v tlaku:

$$\sigma_{c,\min} \leq 0,60 \cdot f_{ck(D)} \quad \text{charakteristická komb. s príslušnou } f_{ck(D)} \text{ v čase } t_0 \text{ a } t_{00}$$

$$\sigma_{c,\min} \leq 0,45 \cdot f_{ck} \quad \text{kvázistála komb. v čase } t_{00}$$

Obmedzenie napätí v predpínacej výstuži:

$$\sigma_{Pmo} \leq 0,75 \cdot f_{pk} \quad \text{v čase } t_0$$

Viac v prílohe P4.2 Statický výpočet, kapitola 6.1.

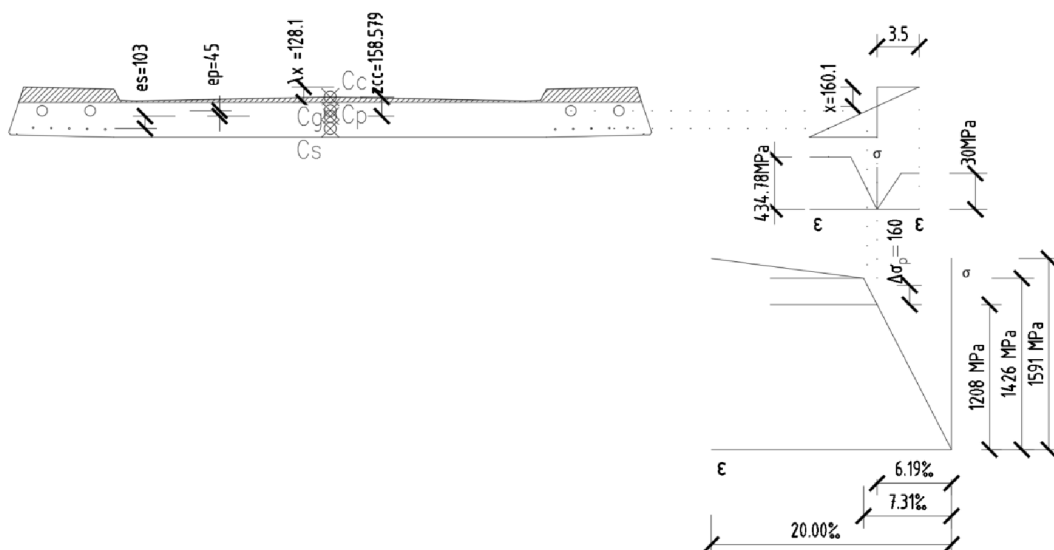
Pre použiteľnosť bol porovnaný priehyb s limitnými hodnotami pre častú konštrukciu.

Viac v prílohe P4.2 Statický výpočet, kapitola 6.4.

8.2. Medzný stav únosnosti

8.2.1. Ohyb

Z hľadiska ohybového namáhania boli urobené celkovo 4 posudky pre pozdĺžny smer. Boli stanovené únosnosti prierezu pre hodnoty kladných a záporných momentov M_y a M_z . Výpočet bol overený aj graficky.



Obrázok 27 Grafické riešenie únosnosť mostovky na $M_y \max$

Interakcia M_{yd} a M_{zd} (ťah v dolných vláknach)

$$\left(\frac{M_{Ed,y}}{M_{Rd,y}}\right)^\alpha + \left(\frac{M_{Ed,z}}{M_{Rd,z}}\right)^\alpha = \left(\frac{869,23}{1150,05}\right)^1 + \left(\frac{1430,07}{18230,92}\right)^1 = 0,834 \leq 1,00$$

Interakcia M_{yd} a M_{zd} (ťah v dolných vláknach)

$$\left(\frac{M_{Ed,y}}{M_{Rd,y}}\right)^\alpha + \left(\frac{M_{Ed,z}}{M_{Rd,z}}\right)^\alpha = \left(\frac{615,64}{949,25}\right)^1 + \left(\frac{1430,07}{17838,04}\right)^1 = 0,729 \leq 1,00$$

8.2.2. Šmyk

Mostovka bola rozdelená do 6 oblastí a boli zistené maximálne hodnoty posúvajúcich síl a príslušné normálové sily a ohybové momenty. Zo vzťahu nižšie bolo rozhodnuté o vzniku trhlín v priereze a to malo vplyv na výpočet. Potrhaný prierez sa počíta ako ŽB a prierez bez vzniku trhlín podľa pružnosti.

$$\sigma_{c,h/d} = \frac{N_d}{A} \pm \frac{M_{yd}}{W_d/h}$$

Tabuľka 3 Vznik trhlín pri dim. šmyku

Úsek	σ_H [Mpa]	σ_D [Mpa]	Trhliny
1	4,77	-7,92	áno
2	0,29	-7,55	nie
3	-0,48	-7,73	nie
4	-2,01	-6,37	nie
5	0,80	-8,33	nie
6	-1,12	-5,89	nie

V celej dĺžke bola navrhnutá šmyková výstuž konštrukčne: 4-strižný strmienok Ø10/200.

Postup výpočtu v prílohe P4.1 *Statický výpočet, kapitola 7.3.*

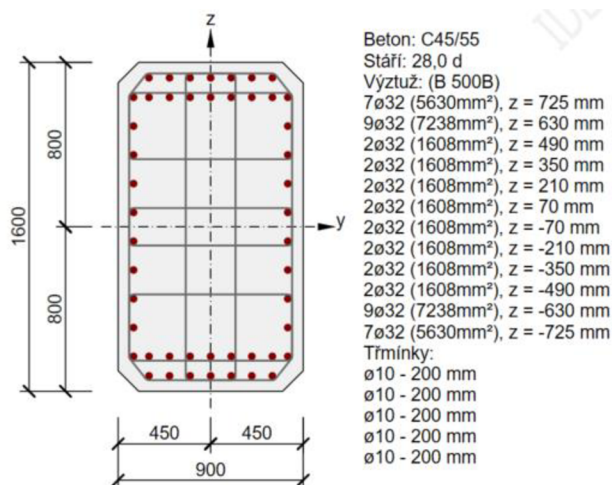
8.2.3. Pylón

Súčasťou nosného systému sú aj pylóny ktoré boli posúdené v programe Idea StatiCa. Po podrobnejšej analýze bol konečný rozmer upravený na hodnoty 1,60 x 0,90 m. Pylón bol posúdený vo svojej päte v mieste votknutia do základu. Ako rozhodujúci posudok sa ukázalo obmedzenie napätí. Pylón bol počítaný aj na účinky II. rádu priamo v programe

Midas Civil pomocou nelineárneho výpočtu s 20 iteráciami. Výstupy z Idea StatiCa sú v prílohe *P4.1 Statický výpočet, kapitola 9.*

Tabuľka 4 Vnútorne sily v päte pylónu

Päta (nelin. výp.)		komb.	F _x =N [kN]	V _y [kN]	V _z [kN]	M _y [kN]	M _z [kN]
F _x =N	max	b_19	-1809,58	-189,67	-81,51	-1,89	1655,72
	min	a_2	-2365,84	-0,63	-96,59	2006,07	-48,84
M _y	max	b_7	-2321,21	1,43	-112,95	2227,89	442,95
	min	b_14	-1809,58	-189,67	-81,51	1634,50	3115,00
M _z	max	b_19	-1809,58	-189,67	-81,51	1655,72	3637,72
	min	b_3	-2178,56	108,90	-98,53	1981,43	-1718,70



Obrázok 28 Schéma vystuženia pylónu

8.2.4. Priečny smer

Dimenzačné veličiny sú z doskostenového modelu a posudzoval sa ohyb a šmyk. Každý posudok sa robil v poli a v mieste rebra. Priečny smer bol zaťažený vlastnou tiažou, ostatným stálym zaťažením a chodcami. Po skombinovaní zaťaženia sme dostali dimenzačné momenty zo vzorca:

$$M_{Ed} = M_{yy} + \text{sgn}(m_y) \cdot |M_{xy}|$$

Pri šmyku v mieste kotvenia závesu vzniká lokálny extrém od posúvajúcej sily a ten si roznesieme na celú šírku rebra. Na upravenú veľkosť navrhujeme šmykovú výstuž len konštrukčne.

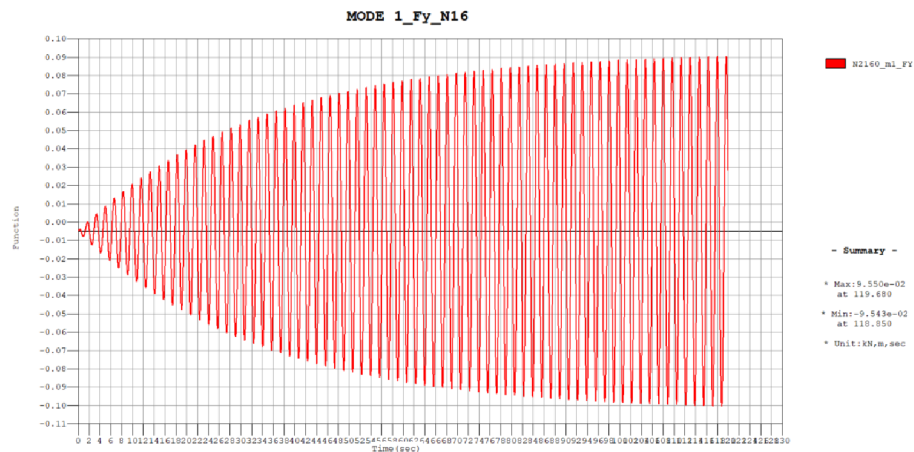
Priečnemu smeru je venovaná celá kapitola v *P4.1 Statický výpočet, kapitola 8.*

9. Dynamická analýza

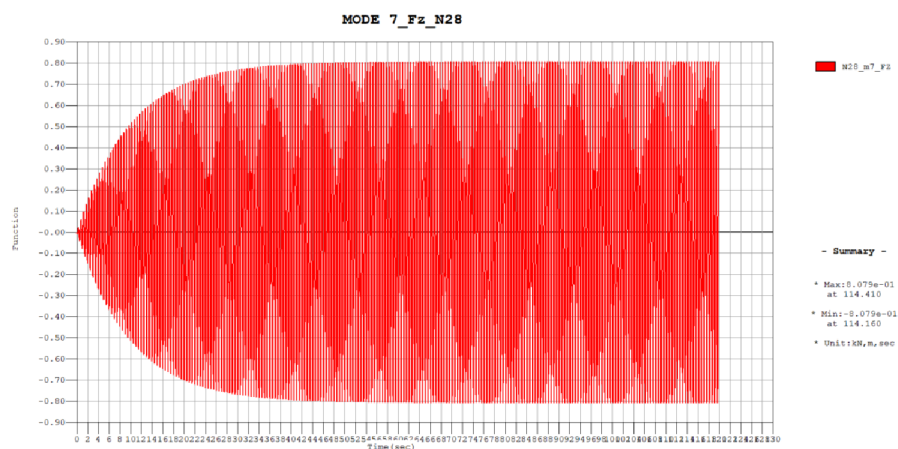
Pri type štíhlej konštrukcie ako bola navrhnutá je nutné posúdiť dynamické účinky zaťaženia. Mali by sme analyzovať kmitanie konštrukcie a posúdiť aj komfort a pohodu jej používateľov. Táto analýza vychádzala z dokumentu *Sétra Footbridges Assessment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading*.

Dynamické posúdenie pozostáva z dvoch častí. Prvým krokom je získanie vlastných tvarov pomocou modálnej analýzy na prúťovom modeli. Druhým krokom je harmonická analýza pri ktorej sledujeme odozvu konštrukcie na harmonické zaťaženia.

Výstupom sú grafy zrýchlenia ktoré porovnáme s intervalmi pre zatriedenie do triedy komfortu. Najhoršia trieda bude priradená ku konštrukcií.



Obrázok 29 Zrýchlenie v čase - MODE 1 Fy N16



Obrázok 30 Zrýchlenie v čase - MODE 7 Fz N28

Tabulka 5 Třídy komfortu

Acceleration ranges	0	0.5	1	2.5
Range 1	Max			
Range 2		Mean		
Range 3			Min	
Range 4				

Table 2.1: Acceleration ranges (in m/s²) for vertical vibrations

Acceleration ranges	0	0.1	0.15	0.3	0.8
Range 1	Max				
Range 2			Mean		
Range 3				Min	
Range 4					

Table 2.2: Acceleration ranges (in m/s²) for horizontal vibrations

The acceleration is limited in any case to 0.10 m/s² to avoid "lock-in" effect

Rozhodující je zrychlení ve zvislém směru kde s maximální hodnotou 0,8079 m.s⁻² a to zařazuje konstrukci do 2. skupiny komfortu.

Podrobný postup dynamickej analýzy je v prílohe: *P4.1 Statický výpočet, kapitola 10.*

10. Závěr

Cieľom diplomovej práce bol návrh a posúdenie konštrukcie lávky, ktorá premostuje koryto rieky Bečvy. Podrobnejšie bol spracovaný variant zavesenej lavičky. Hlavnú časť práce tvoril návrh vhodnej geometrie lavičky a následné posúdenie vybraných častí. Správanie konštrukcie na získanie vnútorných síl a deformácií sa snažili vystihnúť dva modely, prúťový a doskostenový. Nasledoval statický výpočet podľa platných noriem a vo všetkých posudkoch konštrukcia vyhovela. Na prúťovom modeli bola urobená aj dynamická analýza ktorá preverila bezpečnosť konštrukcie s dobrým komfortom.

Grafický výstup v tejto diplomovej práci tvoria prehľadné výkresy, výkresy výstuže, detail, postup výstavby a vizualizácia.

11. Zoznam obrázkov

Obrázok 1 Umiestnenie stavby	10
Obrázok 2 Podklady.....	11
Obrázok 3 Podklady.....	11
Obrázok 4 VARIANT A - pozdĺžny rez.....	12
Obrázok 5 Variant A - priečny rez.....	13
Obrázok 6 Variant B - pozdĺžny rez	14
Obrázok 7 Variant B - priečny rez.....	14
Obrázok 8 VARIANT C - pozdĺžny rez	15
Obrázok 9 Variant C - priečny rez.....	15
Obrázok 10 Schéma uloženia	18
Obrázok 11 Priečny rez – pole.....	19
Obrázok 12 Priečny rez – rebro	19
Obrázok 13 Pozdĺžny rez	20
Obrázok 14 Priečny rez – pylónom	20
Obrázok 15 Schéma prenosu síl.....	21
Obrázok 16 Zvislá reakcia od vlastnej tiaže	23
Obrázok 17 Zvislá reakcia od ostatného stáleho zaťaženia	23
Obrázok 18 Rozdelenie závesov	24
Obrázok 19 Priebek zvislej deformácie mostovky po vyrovnaní	25
Obrázok 20 Pohľad na celý prúťový model	26
Obrázok 21 Pohľad na celý prúťový model – render	26
Obrázok 22 Detail modelovania hlavy pylónu	27
Obrázok 23 Detail modelovania uloženia OP1.....	27
Obrázok 24 Dostupný model – pohľad	27
Obrázok 25 Schéma veľkosti elementov – dostupný model	28
Obrázok 26 Rozmiestnenie zaťaženia od chodcov po dĺžke	29
Obrázok 27 Grafické riešenie únosnosť mostovky na My max	31
Obrázok 28 Schéma vystuženia pylónu.....	33
Obrázok 29 Zrýchlenie v čase - MODE 1 Fy N16	34
Obrázok 30 Zrýchlenie v čase - MODE 7 Fz N28	34

12. Zoznam tabuliek

Tabuľka 1 Geometria pre návrh závesov	22
Tabuľka 2 Prehľad síl v závesoch.....	23
Tabuľka 3 Vznik trhlín pri dim. šmyku	32
Tabuľka 4 Vnútorne síly v päte pylónu	33
Tabuľka 5 Triedy komfortu	35

13. Zoznam použitých zdrojov

13.1. Technické normy

- [1] ČSN 73 6201 Projektování mostních objektů
- [2] ČSN EN 73 6214: Navrhování betonových mostních konstrukcí
- [3] ČSN EN 1992-2: Zatížení mostů dopravou
- [4] ČSN EN 1992-1-1: Navrhování betonových konstrukcí. Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby.
- [5] ČSN EN 1992-2: Betonové mosty – Navrhování a konstrukční zásady
- [6] ČSN EN 1991-1-4 Zatížení konstrukcí: Část 1-4 Obecná zatížení – zatížení větrem
- [7] ČSN EN 1991-1-5 Zatížení konstrukcí: Část 1-4 Obecná zatížení – zatížení teplotou

13.2. Odborná literatura

- [8] WALTHER, Rene. *Cable stayed Bridges*. 2nd Ed. London: Thomas Telford, 1999. ISBN 0-7277-2773-7
- [9] STRÁSKÝ, J. *Speciální betonové konstrukce (K) – konstrukce podporované kabely*. Brno, VUT FAST, 2012. Elektronická studijní opora.

13.3. Internetové zdroje

- [10] IdeaStatica [online]. [cit. 2023-12-20]
Dostupné z: <https://www.ideastatica.com/cz/podpora/teoreticky-manual-rcs-pro-1d-prvky>
- [11] Freyssinet [online]. [cit. 2023-09-10]
Dostupné z: www.freyssinet.cz
- [12] Macalloy [online]. [cit. 2023-09-10]
Dostupné z: www.macalloy.cz
- [13] Mapy.cz [online]. [cit. 2023-12-16]
Dostupné z: www.mapy.cz

13.4. Výpočtové programy

[14] Autodesk AutoCAD 2022, Autodesk, Inc.

[15] Idea StatiCa, Idea Statica s.r.o.

[16] Midas Civil 2022, MIDAS software s.r.o.

[17] Microsoft office WORD, Microsoft Corporation

[18] Microsoft office EXCEL, Microsoft Corporation

[19] Rhinoceros 8.0, DIMENSIO s.r.o.

[20] Lumion, Lumiartsoft s.r.o

14. Zoznam príloh

P1. Použité podklady a varianty riešenia

P1.1 Zadanie

P1.2 Variant A

P1.3 Variant B

P1.4 Variant C

P.2 Výkresová dokumentácia

P2.1 Pôdorys

P2.2 Pozdĺžny rez

P2.3 Priečny rez

P2.4 Výkres predpínacej výstuže

P2.5 Výkres výstuže

P2.6 Detail

P.3 Postup výstavby a vizualizácia

P3.1 Postup výstavby

P.2 Vizualizácia

P4. Statický výpočet

P4.1 Vnútorne sily a vlastné tvary

P4.2 Statický výpočet