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

LÁVKA PŘES DÁLNICI D1 V BOHUMÍNĚ
PEDESTRIAN BRIDGE ACROSS THE HIGHWAY D1 IN BOHUMÍN

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE — Bc. Vlastimil Muroň
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — doc. Ing. RADIM NEČAS, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2022

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N0732A260026 Stavební inženýrství – konstrukce a dopravní stavby
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Specializace	bez specializace
Pracoviště	Ústav betonových a zděných konstrukcí

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Vlastimil Muroň
Název	Lávka přes dálnici D1 v Bohumíně
Vedoucí práce	doc. Ing. Radim Nečas, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2021
Datum odevzdání	14. 1. 2022

V Brně dne 31. 3. 2021

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

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

PODKLADY A LITERATURA

Podklady:
Situace, příčný a podélný řez, geotechnické poměry.
Základní normy:
ČSN 73 6201 Projektování mostních objektů.
ČSN 73 6214 Navrhování betonových mostních konstrukcí.
ČSN EN 1990 včetně změny A1: Zásady navrhování konstrukcí.
ČSN EN 1991-2: Zatížení mostů dopravou.
ČSN EN 1992-1-1: Navrhování betonových konstrukcí. Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby.
ČSN EN 1992-2: Betonové mosty - Navrhování a konstrukční zásady.
Literatura doporučená vedoucím diplomové práce.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Pro zadaný problém navrhněte dvě až tři varianty řešení a zhodnoťte je.
Ve výběru varianty se zaměřte na předpjatou obloukovou konstrukci nebo konstrukci podporovanou kabely.
Podrobný návrh nosné konstrukce vybrané varianty mostu proveďte podle mezních stavů včetně zohlednění vlivu výstavby mostu na jeho návrh.
Ostatní úpravy provádějte podle pokynů vedoucího diplomové práce.
Požadované výstupy:
Textová část (obsahuje průvodní zprávu a ostatní náležitosti podle níže uvedených směrnic)
Přílohy textové části:
P1. Použité podklady a varianty řešení
P2. Výkresy (přehledné, podrobné a detaily v rozsahu určeném vedoucím diplomové práce)
P3. Stavební postup a vizualizace
P4. Statický výpočet (v rozsahu určeném vedoucím diplomové práce)
Diplomová práce bude odevzdána pro ÚBZK 1x na CD.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:
1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).
2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

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

ABSTRAKT

Úkolem této diplomové práce je návrh a posouzení lávky pro pěší přes dálnici D1 v Bohumíně. Jsou vypracovány dvě varianty v podobě studie. Z nich je vybraná zavěšená konstrukce, která je podrobně vypracována. Konstrukce se nachází v půdorysném oblouku s poměrně malým poloměrem, proto je pro analýzu konstrukce vytvořen prutový model, který respektuje skutečnou geometrii konstrukce. Model taktéž zohledňuje fáze výstavby. Konstrukce je posouzena z hlediska mezního stavu použitelnosti a únosnosti dle současně platných norem. V rámci práce je taktéž provedena modální analýza a harmonická odezva konstrukce. Součásti je podrobná výkresová dokumentace.

KLÍČOVÁ SLOVA

Lávka pro pěší, zavěšený most, zakřivená konstrukce, předpjatý beton, Midas Civil, fáze výstavby, mezní stav použitelnosti, mezní stav únosnosti, modální analýza, harmonická odezva.

ABSTRACT

The aim of final thesis is design and assessment of footbridge over highway D1 in Bohumín. The design is processed in two options. From these two options there is cable-stayed construction solved in greater detail. Because counstruction is in circular arch with small radius, it is necessary to contain real geometry to computational model. Model is created by beams and construction stages are included too. The construction is assessed for the ultimate and serviceability limit state according to valid standards. In the thesis is performed eigenvalue analysis and harmonic response of the construction. Detailed drawings are included too.

KEYWORDS

Footbridge, cable-stayed bridge, curved structure, prestressed concrete, Midas Civil, construction stage, service limit state, ultimate limit state, eigenvalue analysis, harmonic response.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. Vlastimil Muroň *Lávka přes dálnici D1 v Bohumíně.* Brno, 2022. 29 s., 432 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav betonových a zděných konstrukcí. Vedoucí práce doc. Ing. Radim Nečas, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Lávka přes dálnici D1 v Bohumíně* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 14. 1. 2022

Bc. Vlastimil Muroň
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Lávka přes dálnici D1 v Bohumíně* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 14. 1. 2022

Bc. Vlastimil Muroň
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Radimu Nečasovi, Ph.D. za odborné vedení práce a užitečné rady. Dále bych chtěl poděkovat svojí přítelkyni a rodině za jejich trpělivost, ochotu a případné rady, a kolegům v práci za odborné rady, tipy, triky a postřehy.

V Brně dne 14. 1. 2022

OBSAH

1 ÚVOD 9
2 POŽADAVKY NA KONSTRUKCI 10
3 STUDIE VARIANT MOŽNÝCH ŘEŠENÍ 11
3.1 VARIANTA 1 – ZAVĚŠENÁ KONSTRUKCE 11
3.2 VARIANTA 2 – OBLOUKOVÁ KONSTRUKCE 12
3.3 SROVNÁNÍ VARIANT ŘEŠENÍ 14
4 STATICKÉ A KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ KONSTRUKCE 15
4.1 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ 15
4.2 STATICKÉ SCHÉMA 18
4.3 POSTUP VÝSTAVBY 19
4.4 ZAJIŠTĚNÍ DOSTATEČNÉ ÚNOSNOSTI KONSTRUKCE 20
5 STATICKÉ POSOUZENÍ KONSTRUKCE 22
5.1 ZATÍŽENÍ, VNITŘNÍ SÍLY A KOMBINACE 22
5.2 MEZNÍ STAV POUŽITELNOSTI 22
5.3 MEZNÍ STAV ÚNOSNOSTI 23
5.4 OSTATNÍ POSOUZENÍ 23
6 DYNAMICKÉ POSOUZENÍ KONSTRUKCE 24
7 ZÁVĚR 25
SEZNAM OBRÁZKŮ 26
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ 27
SEZNAM PŘÍLOH 29

1 ÚVOD

Úkolem této diplomové práce je návrh konstrukce lávky pro pěší v Bohumíně. Lávka má umožnit převedení pěší a cyklistické dopravy přes dálnici D1, silnici II. třídy a místní potok. Jsou vypracovány studie dvou variant možného řešení. Každá varianta je zhodnocena a následně je vybrána jedna, ta je řešena podrobně.

Pro tuto variantu je vypracován výpočetní model konstrukce, statický výpočet a výkresová dokumentace. Konstrukce je posouzena na mezní stav únosnosti a použitelnosti jak v jednotlivých fázích výstavby, tak po celou dobu její životnosti. Konstrukce je taktéž podrobena modální analýze a odezvě konstrukce na harmonické buzení.

Výpočetní model je zpracován v programu Midas Civil 2021 založený na metodě konečných prvků a umožňující zohlednit jednotlivé fáze výstavby včetně reologických účinků betonu. Posudky jsou zčásti prováděny ručně pomocí MS Excel a zčásti pomocí programu IDEA Statica 21.0.

2 POŽADAVKY NA KONSTRUKCI

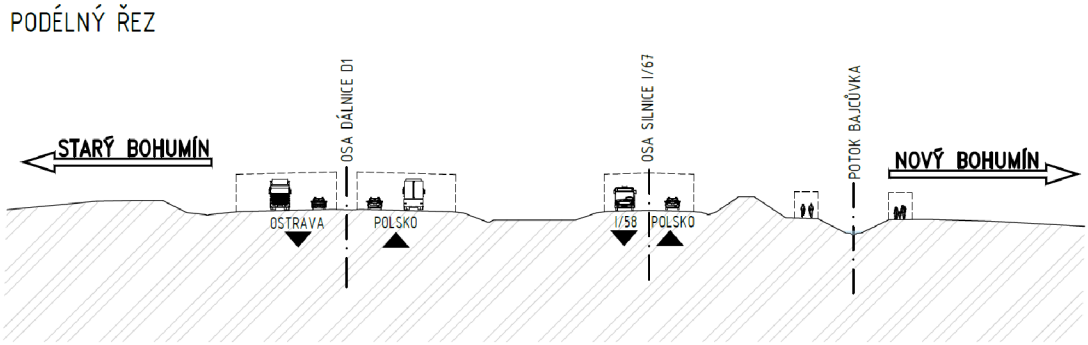
Základním požadavkem návrhu konstrukce je dodržení daných průjezdných profilů nad i pod mostem a zajištění volné šířky na mostě pro provoz cyklistů a chodců.

Jelikož je zde velký provoz chodců a cyklistů, doporučuje se oddělit pěší a cyklistickou dopravu z důvodu zajištění bezpečnosti provozu na mostě.

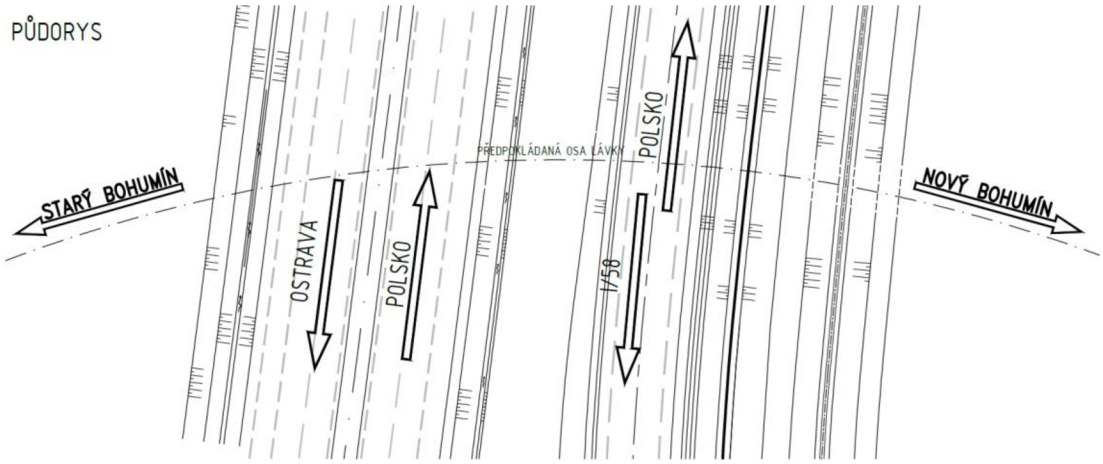
V neposlední řadě má být konstrukce hospodárná, ekonomická, elegantní a má zapadnout do okolí.

Samozřejmostí je dodržení předepsaných norem a předpisů.

Na následujících obrázcích (*Obrázek 1* a *Obrázek 2)* je zobrazen konečný podélný řez a půdorys dálnice D1. Výstavba mostu je plánována v rámci výstavby dálnice D1.



Obrázek 1: Podélný řez přemosťovaného území



Obrázek 2: Půdorys přemosťovaného území

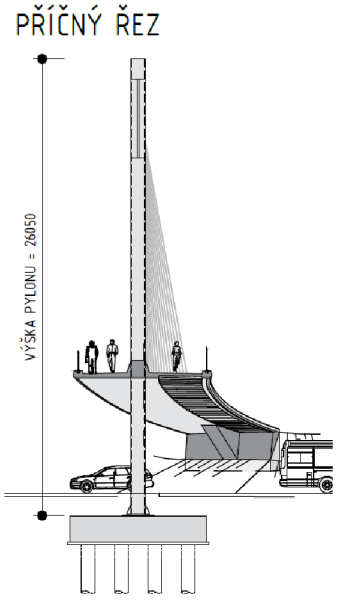
3 STUDIE VARIANT MOŽNÝCH ŘEŠENÍ

Pro návrh přemostění jsou vypracovány dvě varianty ve formě studie. Z těchto dvou variant je následně vybrána jedna a ta je dále zpracována.

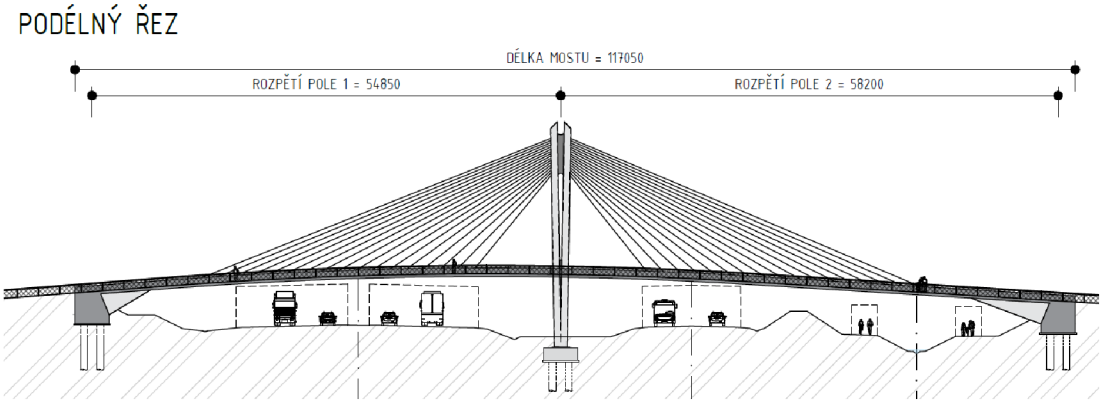
Výkresy jednotlivých studií jsou součásti přílohy *P1 Použité podklady a varianty řešení*.

3.1 VARIANTA 1 – ZAVĚŠENÁ KONSTRUKCE

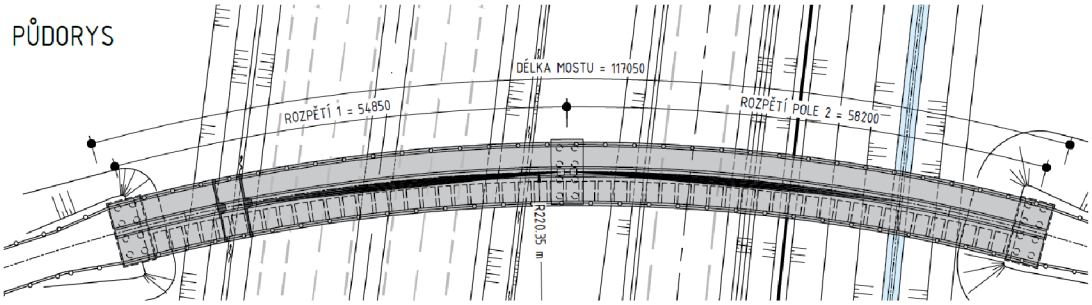
První varianta přemostění je zavěšená konstrukce. Konstrukce je tvořena parapetním nosníkem o celkovém rozpětí 113,05 m, který zajišťuje přemostění mostu. Parapetní nosník je vyložen oboustrannou konzolou, ta umožnuje převést dopravu z jedné strany mostu na druhou. Velikost vyložení konzol je pro každou stranu odlišné, jelikož jsou pruhy pro chodce a pro cyklisty různě široké. Z důvodu minimalizace kroucení od vlastní tíhy je delší konzola vylehčena pomocí kazet v daném rastru. Parapetní nosník je zavěšen na ocelových závěsech. Závěsy jsou uspořádány semiradiálně a jsou kotveny v ocelobetonovém pylonu výšky 26,05 m, jenž je rámově spojen s parapetním nosníkem. Pylon dělí konstrukci na dvě nesymetrická pole s rozpětím 54,85 m a 58,20 m. Pro zajištění únosnosti je navrženo podélné předpětí soudržnými kabely v parapetním nosníku. Konstrukce je vetknuta do opěr a vytváří tak bezúdržbový integrovaný systém. Založení opěr a pylonu je provedeno na skupině vrtaných pilot.



Obrázek 3: Varianta 1 – příčný řez



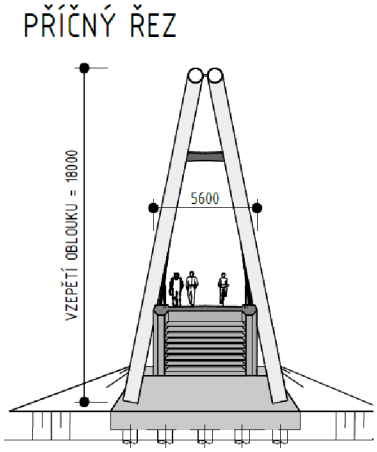
Obrázek 4: Varianta 1 – podélný řez



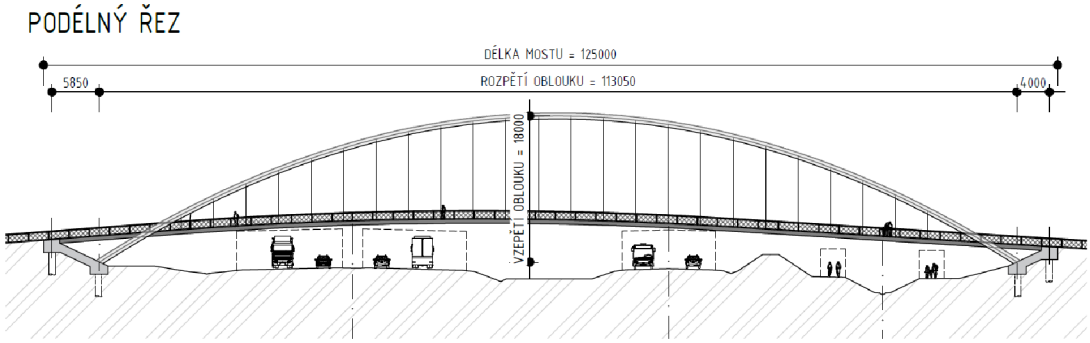
Obrázek 5: Varianta 1 – půdorys

3.2 VARIANTA 2 – OBLOUKOVÁ KONSTRUKCE

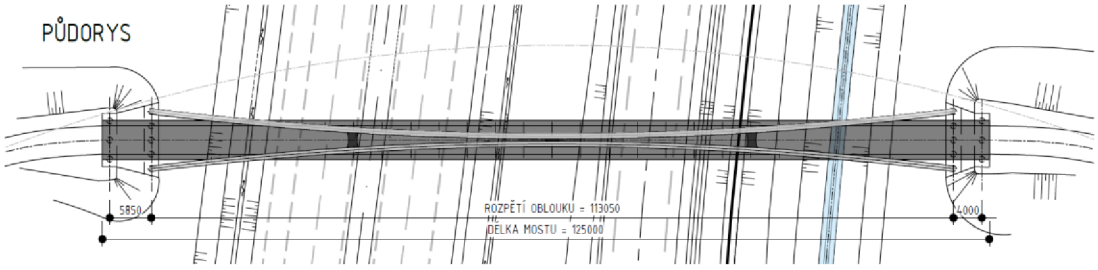
Druhá varianta přemostění je tvořena obloukovou konstrukcí, na níž je zavěšena mostovka. Hlavní nosná část je tvořena dvojicí ukloněných parabolických oblouků se vzepětím 18,0 m a rozpětím 113,05 m. Ty jsou tvořeny ocelovou trubkou průměru 0,75 m. Oblouky jsou vetknuty do masivních kotevních bloků. Doprava chodců a cyklistů je zajištěna pomocí štíhlé mostovky, ta je zavěšena pomocí ocelových závěsů na oblouky. Mostovka je tvořena prefabrikovanými dílci délky 4,0 m. V mostovce je navrženo podélné předpětí. Celková délka mostu je 125,0 m. Soustava tvoří samokotvený systém, jelikož vodorovná složka od předpětí působí přes vzpěru v kotevním bloku proti vodorovné složce z oblouku. Založení je provedeno na skupině vrtaných pilot.



Obrázek 6: Varianta 2 – příčný řez



Obrázek 7: Varianta 2 – podélný řez



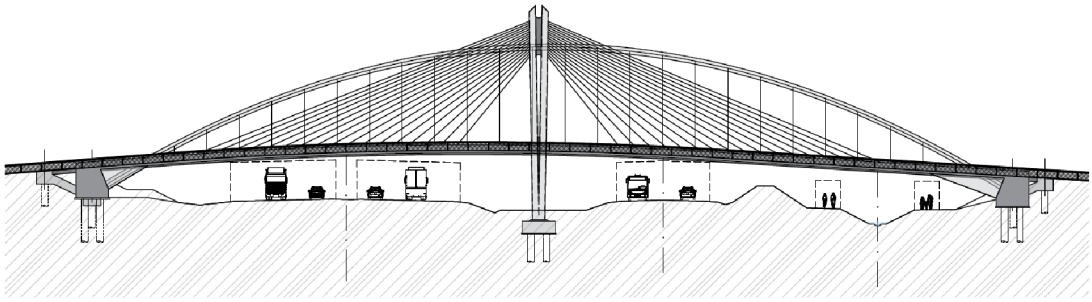
Obrázek 8: Varianta 2 – půdorys

3.3 SROVNÁNÍ VARIANT ŘEŠENÍ

Ze zhotovených studií je pro podrobnější analýzu vybrána Varianta 1 – Zavěšená konstrukce.

Varianta 1 je tvořena parapetním nosníkem s vyloženými konzolami, který je zavěšen na ocelobetonovém pylonu. Tato varianta se jeví z vypracovaných variant jako nejvhodnější, jelikož splňuje všechny požadavky: respektuje požadovanou geometrii konstrukce, splňuje šířkové poměry dopravy na mostě, odděluje pěší a cyklistickou dopravu, je hospodárná a elegantní. Konstrukce je staticky výhodná a zajímavá. Pylon působí dominantním dojmem a v kombinaci se štíhlou mostovkou vytváří komplexní celek, který do okolní krajiny zapadá.

Varianta 2, která je, dle autora, esteticky zajímavá, je tvořena prefabrikovanou mostovkou zavěšenou na obloucích. Tato varianta není zvolena především z důvodu nutné úpravy geometrie nivelety. Také neodděluje cyklistickou a pěší dopravu. Oblouk se pro konkrétní případ přemostění nehodí. Větší využití by nalezl při přemostění hlubokých údolí nebo řek.



Obrázek 9: Srovnání variant v podélném řezu

4 STATICKÉ A KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ KONSTRUKCE

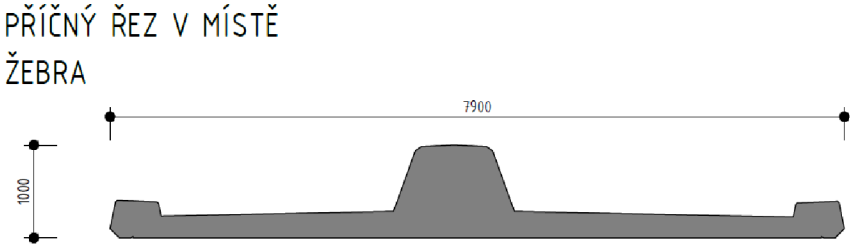
4.1 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

Konstrukce je tvořena parapetním nosníkem s vyloženými konzolami, který je zavěšený pomocí ocelových závěsů na ocelobetonovém pylonu. Výška pylonu je zvolena jako 1/5 celkového rozpětí a pylon je tvořen dvojicí ocelových komor vyplněných betonem, které jsou skloněny a tvoří tvar písmene V.

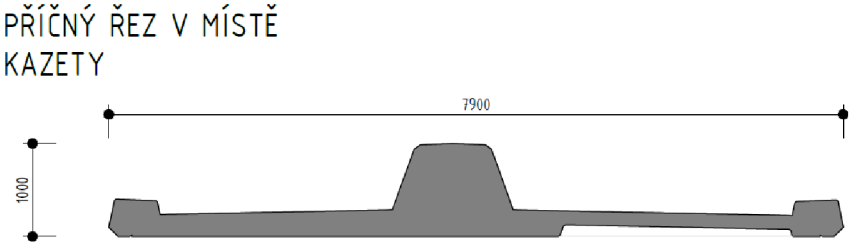
Parapetní nosník z beton C 55/67 je vetknut do opěr, ty jsou založeny, stejně jako základ pod pylonem, na skupině velkoprůměrových vrtaných pilot o průměru 800 mm. Opěry a základ pod pylonem jsou zhotoveny na podkladní beton tloušťky 150 mm. Pylon je vetknut do základu o výšce 1,5 m z betonu C 30/37.

Celková délka mostu je 117,05 m s volnou šířkou na mostě 2,5 m pro pruh pro chodce a 3,0 m v pruhu pro cyklisty. Konstrukce se nachází v poměrně malém půdorysném zakružovacím oblouku o poloměru 220,35 m v ose mostu. Podélný profil mostu se nachází ve vrcholovém oblouku s vrcholem v druhé třetině pole 1. Směrem k opěrám podélný sklon klesá v proměnném spádu. Zhruba ve třetinách rozpětí každého pole se pak podélný sklon mění na konstantní, -7,60 % směrem k opěře 1 a -6,20 % směrem k opěře 2. Příčný sklon mostovky je pak 2,0 % směrem od parapetního nosníku.

Jak již bylo zmíněno, mostovka je tvořena parapetním nosníkem lichoběžníkového tvaru, výšky 1,0 m a šířky 1,3 m při spodní základně a 0,8 m při horním povrchu. Nosník je vyložen oboustrannou konzolou. Výšky konzol jsou proměnné od 227 mm do 287 mm. Součástí konzol jsou římsy šířky 550 mm, do nichž je kotveno zábradlí. Vyložení konzol je pro každou stranu odlišné. Konzola zajišťující dopravu chodců je vyložená v délce 3,05 m a konzola s pruhem pro cyklisty pak v délce 3,55 m. Celkový průřez mostovky je pak vylehčen kazetami v pravidelném rastru na straně pruhu pro cyklisty. Výška vylehčení je proměnná, avšak výška desky nad vylehčením je konstantní 150 mm. Délka vylehčení v podélném směru je 1,6 m. Na délce 0,4 m je pak zhotoveno žebro. V příčném směru má vylehčení délku 2,5 m. Spodní povrch příčného řezu je vodorovný.

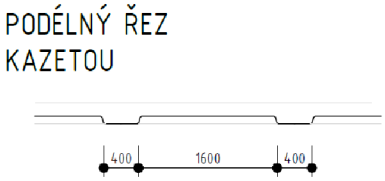


Obrázek 10: Zvolená varianta – příčný řez v místě žebra



Obrázek 11: Zvolená varianta – příčný řez v místě kazety

Obrázek 12: Zvolená varianta – příčný řez kazetou



Obrázek 13: Zvolená varianta – podélný řez kazetou

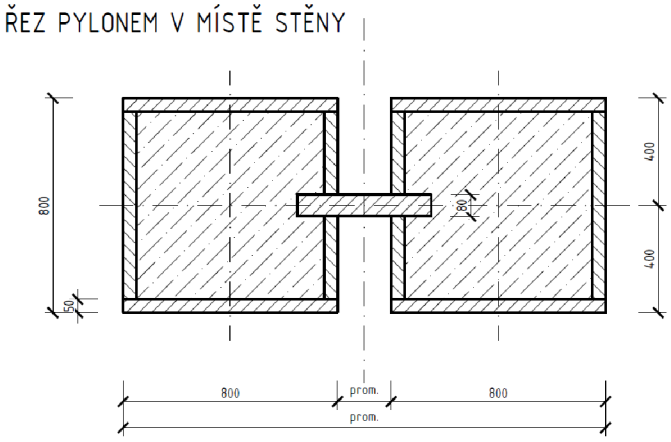
Nosník je vetknut do opěr a vytváří tak bezúdržbový integrovaný systém. Z opěr pak vychází nosník s náběhem při svém spodním povrchu. Náběh je tvořen pouze v místě parapetního nosníku, je tedy šířky 1,3 m. Náběh končí vždy ve vzdálenosti 6,0 m od kotvení posledního závěsu. Spojení pylonu a nosníku je rámové.

Pro zajištění dostatečné tlakové rezervy je navrženo dodatečné podélné předpětí. To je tvořeno pěti soudržnými kabely po dvaadvaceti lanech Y1860 S7 – 15.7. Kabely kopírují půdorysné zakřivení konstrukce. Výškově jsou navrženy tři centrické kabely a dva, které mění svou výškovou polohu po délce. Všechny kabely jsou napínány z obou stran a jsou kotveny do opěr. V místě pylonu prochází kabely ocelovými deviátory.

Parapetní nosník je zavěšen na sedmnácti ocelových závěsech v každém poli. Vzdálenost kotvení závěsů na horním povrchu nosníku je 2,0 m. Závěsy jsou kotveny do kotevních plechů, které jsou zabetonovány v parapetním nosníku, a v pylonu jsou kotveny do kotevního plechu, který spojuje komory pylonu. První závěs je kotven do nosníku ve vzdálenosti 10,0 m od osy pylonu. Pro prvních sedm závěsů jsou použity závěsy průměru 35 mm, zbylých deset závěsů jsou průměru 40 mm. Osová vzdálenost čepů koncovek závěsů v pylonu je 250 mm. Jelikož je konstrukce jak v půdorysném, tak výškovém oblouku, jsou půdorysné i výškové úhly závěsů odlišné, a tudíž i délky jsou různé. Každý závěs má svoje unikátní rozměry, nenalezneme zde dva závěsy, které mají shodné geometrické rozměry. Jednotlivé geometrické parametry jsou součástí výkresu v příloze *P2.4 Výkres závěsů*. Všechny

závěsy jsou opatřeny koncovkami. V místě kotvení do parapetního nosníku jsou pak opatřeny rektifikační tyčí. Závěsy jsou rektifikovatelné a vyměnitelné.

Pylon je tvořen dvojicí ocelových komor o vnějších rozměrech 800 x 800 mm. Ocelové komory jsou ukloněny a vytváří tak tvar písmene „V“. Tloušťka jednotlivých plechů komor je po výšce různá od 30 do 50 mm. Vnitřní část pylonu je vybetonována betonem C 60/75. V části pylonu pod mostovkou a v kotvení oblasti závěsů jsou jednotlivé komory spojeny ocelovou stěnou tloušťky 80 mm. V místě závěsů slouží pro jejich kotvení. Spojení pylonu a mostovky je provedeno jako rámové a je zajištěno ocelovými spřahujícími trny průměru 19 mm délky 150 mm. V místě parapetního nosníku jsou v pylonu zhotoveny otvory pro deviátory podélného předpětí. Pylon je vetknut do základu skrz patní plech tloušťky 80 mm a čtrnáct kotevních šroubů M48 délky 710 mm. Kotevní šrouby jsou opatřeny čtvercovou kotevní hlavou šířky 150 mm. Patní plech je vyztužen několika výztuhami tloušťky 50 mm. Roznos zatížení z patního plechu do základu je proveden prostřednictvím podlití tloušťky 30 mm z vysokopevnostního betonu C 60/75.



Obrázek 14: Příčný řez pylonem v místě stěny

Pochozí část nosníku je opatřena přímopochozí izolací tloušťky 5 mm, která má požadované protismykové vlastnosti. Odvodnění probíhá skrz odvodňovače 300 x 300 mm, umístěné v úžlabí vyložených konzol. Odvodňovače jsou půdorysně umístěny především tak, aby byl přímo zajištěn odvod srážkové vody do příkopů umístěných pod mostem. Zábradlí je tvořeno sloupky po 2,5 m s výplní tvořenou tahokovem. Sloupky jsou připevněny k římsám pomocí šroubů a patních plechů. Výška zábradlí je v pruhu pro chodce 1,1 m, v pruhu pro cyklisty 1,3 m.

4.1.1 POUŽITÝ MATERIÁL

Parapetní nosník:	Beton C 55/67 – XC4, XD1, XF3
Betonářská výztuž:	B500B
Předpínací výztuž:	Y1860 S7 – 15.7
Kotvy předpínací výztuže:	Aktivní kotvy VSL typ GC 6-22
Pylon:	Ocel S355NL + N
	Beton C 60/75 – X0
Spojení pylonu:	Ocel S460NL + N
Patní plech:	Ocel S355NL + N
Výztuhy patního plechu:	Ocel S355NL + N
Kotevní šrouby:	Pevnostní třída 8.8
Podlití patního plechu:	Beton C 60/75 – X0
Spřahovací trny:	S235 + C450
Závěsy:	Pfeifer PV 150
	Pfeifer PV 115
Kotevní plechy závěsů:	Ocel S355NL + N
Základ pod pylonem:	Beton C 30/37 – XC2
Podkladní beton:	Beton C 12/15 – X0

4.2 STATICKÉ SCHÉMA

Samotný parapetní nosník by musel být neekonomických a nevzhledných rozměrů, aby dokázal sám přemostit délku 113 m. Proto je navrženo zavěšení konstrukce pomocí závěsů kotvených do pylonu. Síly v závěsech jsou navrženy tak, aby vyrovnaly účinky od stálých složek. Nosník pak působí jako spojitý nosník na pružných podporách. Pružné podpory reprezentují ukotvení závěsů do nosníku. Výškové zakřivení konstrukce způsobuje podobné chování jako u kleneb, jelikož je nosník vetnut do opěr.

4.3 POSTUP VÝSTAVBY

4.3.1 REALIZACE

Podrobně je postup výstavby zobrazen v příloze *P3.1 Postup výstavby*.

FÁZE 1

- V první fázi výstavby probíhá příprava staveniště, zhodnocení geotechnických poměrů, zařízení staveniště a vytyčení základních bodů konstrukce.

FÁZE 2

- Během druhé fáze jsou odstraněny porosty v místě stavby. Také je sejmuta ornice v požadované tloušťce. Provedou se výkopové práce, tj. především pažení výkopové jámy pylonu a odtěžení zeminy na úroveň základové spáry. Násypy jsou zhotoveny v oblasti opěr.

FÁZE 3

- Ve třetí fázi se provedou vrty pro piloty. Do nich se osadí výztuž a následuje betonáž pilot.

FÁZE 4

- Po zhotovení pilot se provede betonáž podkladního betonu pod základy. Následně jsou vybetonovány základy opěr a základ pod pylonem. Součástí základu pylonu jsou také kotevní šrouby, které jsou v základu zabetonovány. Následuje technologická přestávka.

FÁZE 5

- Jakmile je dosažena minimální tlaková pevnost u základu pylonu je provedeno podlití pod patní plech pylonu. Po zatvrdnutí je osazen patní plech, na který je osazena ocelová schránka pylonu do požadované polohy včetně nadvýšení. Pylon je na staveniště dopraven po částech, zde je pak spojen montážními svary a osazen na patní plech. Během celého procesu montáže pylonu je zajištěna jeho stabilita. Je třeba brát ohled na povětrnostní podmínky během montáže pylonu. Jakmile je pylon osazen, vybetonuje se jeho vnitřní část. Betonáž probíhá od paty pylonu směrem vzhůru skrz betonážní otvory tak, aby došlo k dokonalému odvzdušnění betonu a nevznikaly zde kaverny. Betonážní otvory jsou následně zaceleny ze stejného materiálu jako je pylon.

FÁZE 6

- Během čekání na dosažení minimální tlakové pevnosti betonu pylonu se smontuje podpěrná skruž pro betonáž mostovky 1. části. Také zde se počítá s nadvýšením konstrukce. Jakmile beton v pylonu dosáhne minimální tlakové

pevnosti, vybetonuje se mostovka 1. části. Zároveň jsou vybetonovány obě opěry včetně náběhů.

FÁZE 7

- V sedmé fázi se po dosažení minimální tlakové pevnosti betonu mostovky 1. části osadí závěsy. Provede se jejich napnutí dle pořadí stanoveném v příloze *P2.4 Výkres závěsů*. Nakonec jsou závěsy rektifikovány tak, aby výsledné napětí v závěsech odpovídalo konečnému napětí požadovanému dokumentací.

FÁZE 8

- Následuje částečné odstranění podpěrné skruže. Montážní podpěry jsou ponechány pouze na koncích mostovky 1. části, okolo pylonu a v polovině vzdálenosti mezi pylonem a prvními závěsy. Podpěrná skruž se přesune do oblasti mostovky 2. části, tj. do oblasti opěr. Vybetonuje se mostovka 2. části.

FÁZE 9

- Jakmile je v betonu mostovky dosažena minimální tlaková pevnost, napnou se předpínací lana v parapetním nosníku. Napínání probíhá oboustranně. Postup napínání je stanoven v příloze *P2.5 Výkres předpínací výztuže – podélný řez a půdorys*. Na konci této fáze se odstraní všechny podpěrné skruže.

FÁZE 10

- V poslední fázi jsou provedeny dokončovací práce pod lávkou, tj. např. zpevnění svahů, přechodové oblasti, zhotovení vozovky dálnice aj. Dále je provedena izolace mostovky, montáž zábradlí a osvětlení na mostě. Nakonec je lávka uvedena do provozu.

4.3.2 VÝPOČETNÍ MODEL

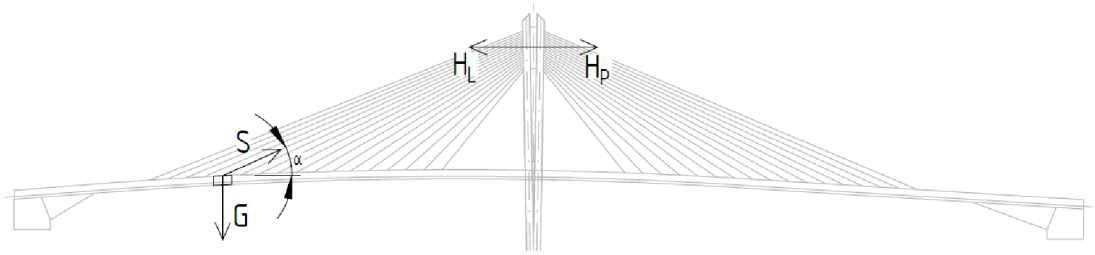
Fáze výstavby ve výpočetním modelu jsou popsány v příloze *P4.1 Statický výpočet*. Obecně jsou voleny tak, aby co nejvíce odpovídaly skutečnému provedení lávky a konstrukce mohla být kontrolována během celé její výstavby.

4.4 ZAJIŠTĚNÍ DOSTATEČNÉ ÚNOSNOSTI KONSTRUKCE

4.4.1 STANOVENÍ SIL V ZÁVĚSECH

Síly v závěsech jsou navrženy tak, aby vyrovnaly účinky od vlastní tíhy konstrukce. Jsou tedy stanoveny podle vzorce $N = G / \sin \alpha$, kde N je síla v závěsu, G je výsledná síla od vlastní tíhy a α je úhel závěsu, který svírá se svislou rovinou. Následně jsou síly v závěsech upraveny tak, aby výslednice vodorovných sil od závěsů byla v místě kotvení v pylonu téměř nulová $H_L = H_P$, tj. aby pylon nebyl ohýbán v podélném směru mostu. Jelikož je konstrukce v půdorysném oblouku, způsobují síly v závěsech velké ohybové namáhání v rovině kolmé na podélný směr. Proto jsou konečné síly

v závěsech určeny iteračně tak, aby byl proveden kompromis mezi vyrovnáním účinků od stálých složek a příčným ohybovým namáháním pylonu. Síly v závěsech jsou také navrženy s ohledem na zajištění jejich lineárního chování, aby výpočet mohl být proveden lineárně. Podrobněji v příloze *P4.1 Statický výpočet*.



Obrázek 15: Stanovení sil v závěsech

4.4.2 STANOVENÍ GEOMETRIE DODATEČNÉHO PŘEDPĚTÍ

Pro zajištění únosnosti parapetního nosníku je třeba zajistit dostatečnou tlakovou rezervu v betonu. Proto jsou navrženy tři centrické kabely, které zajišťují tuto skutečnost. Dále jsou navrženy dva kabely, které redukují síly v posledních závěsech a zmenšují ohybové namáhání mostovky mezi pylonem a prvními závěsy tím, že jejich radiální složka působí proti složce vlastní tíhy.

5 STATICKÉ POSOUZENÍ KONSTRUKCE

Veškeré posudky konstrukce, informace o výpočetním modelu a výsledky jsou v příloze *P4.1 Statický výpočet*.

Výpočetní model je zpracován v programu Midas Civil 2021, jenž je založen na metodě konečných prvků. Model je tvořen prutově a respektuje skutečnou geometrii konstrukce. V modelu jsou taktéž zahrnuty všechny stěžejní fáze výstavby tak, aby se co nejvíce vystihlo skutečné chování konstrukce.

Jednotlivé posudky jsou provedeny v kombinaci ručního výpočtu a pomocí programu IDEA Statica 21.0.

5.1 ZATÍŽENÍ, VNITŘNÍ SÍLY A KOMBINACE

Všechna působící zatížení jsou popsána v příloze *P4.1 Statický výpočet*. Obecně se jedná o zatížení stálé, zatížení předpětím a zatížení proměnné. Mezi zatížení stálá patří vlastní tíha konstrukce, ostatní stálá zatížení, tvořená především zatížením od zábradlí, a působení sil v závěsech. Proměnná zatížení reprezentuje vodorovná a svislá složka zatížení chodci a zatížení servisním vozidlem. Dále mezi proměnná zatížení patří zatížení větrem, které se skládá z vodorovné a svislé složky. Dalším proměnným zatížením je zatížení vyvolané změnou teplot. Jednotlivé prvky jsou zatíženy odpovídající rovnoměrné změně teploty a hlavní nosný prvek je navíc zatížen nerovnoměrnou změnou teploty. Nakonec je konstrukce zatížena předpětím vyvolaným dodatečným předpětím předpínacích kabelů.

Výstupy vnitřních sil od jednotlivých zatěžovacích stavů jsou v příloze *P4.2 Výstup vnitřních sil z programu.*

Kombinace vnitřních sil je provedena dle normy ČSN EN 1990. Jsou provedeny charakteristické, časté a kvazistálé kombinace vnitřních sil pro ověření mezního stavu použitelnosti a kombinace dle rovnic 6.10a a 6.10b pro posouzení mezního stavu únosnosti.

5.2 MEZNÍ STAV POUŽITELNOSTI

Konstrukce je posouzena na mezní stavy použitelnosti ve všech rozhodujících časech jak v průběhu životnosti, tak v jednotlivých fázích výstavby.

Z hlediska mezního stavu použitelnosti je ověřeno omezení napětí v závěsech, v předpínací výztuži, v betonu mostovky a pylonu, v konstrukční oceli pylonu. Dále je provedeno ověření omezení deformací mostovky.

Podrobněji v příloze *P4.1 Statický výpočet*.

5.3 MEZNÍ STAV ÚNOSNOSTI

Konstrukce je z hlediska mezního stavu únosnosti posouzena na extrémní vnitřní síly vyvolané jak během životnosti konstrukce, tak během jednotlivých fází výstavby.

V mezním stavu únosnosti jsou ověřeny maximální přípustné síly v závěsech, únosnost průřezu pylonu a mostovky v ohybu a smyku.

Podrobněji v příloze *P4.1 Statický výpočet*.

5.4 OSTATNÍ POSOUZENÍ

5.4.1 ZALOŽENÍ KONSTRUKCE

Jelikož jsou v modelu zajištěny okrajové podmínky za pomocí poddajného podepření pilot, je nutné provést ověření svislé únosnosti pilot pro zjištění potřebného průměru pilot, jejich délky a celkového počtu. Posuzována je minimální tlaková a maximální tahová složka v pilotách pod každou podpěrou.

Taktéž je ověřeno, zda není překročeno limitní sedání pilot.

5.4.2 SPŘAŽENÍ PYLONU A MOSTOVKY

Pro zajištění rámového spojení pylonu a mostovky je navržen minimální počet spřahovacích trnů tak, aby přenesly posouvající sílu v místě styku mostovky a pylonu.

5.4.3 KOTVENÍ PYLONU DO ZÁKLADU

V rámci této práce je proveden návrh patního plechu a kotevních šroubů. Ověření únosnosti je pro drcení betonu pod patním plechem, přenos smyku třením a přenos tahu kotevními šrouby.

6 DYNAMICKÉ POSOUZENÍ KONSTRUKCE

V rámci dynamického posudku konstrukce je realizováno vyhodnocení vlastních tvarů konstrukce (modální analýza) a vyhodnocení odezvy na zatížení harmonickým buzením, tj. ověření pohody chodců na mostě.

Pro dynamickou analýzu je použit prutový model, který je vytvořený v programu Midas Civil 2021. Výstupy jsou k nahlédnutí v příloze *P4.3 Výstup modální analýzy z* programu.

V rámci určení harmonické odezvy jsou použity modely zatížení DLM1 a DLM2. DLM1 charakterizuje zatížení vyvolané jednou osobou a skládá se z vertikální a horizontální složky. Velikost jednotlivých složek je závislá na frekvenci vlastního tvaru. DLM2 reprezentuje zatížení vyvolané skupinou osob, taktéž se skládá z vertikální a horizontální složky. Jejich velikost závisí na frekvenci vlastního tvaru a na synchronizačním faktoru.

Podrobněji v příloze *P4.1 Statický výpočet*.

7 ZÁVĚR

Úkolem této diplomové práce bylo navrhnout vhodnou konstrukci pro přemostění dálnice D1 v Bohumíně. Ze dvou variant byla vybrána zavěšená konstrukce. Ta byla podrobena bližší analýze. Posouzení konstrukce bylo provedeno jak v jednotlivých fázích výstavby, tak během provozu konstrukce z hlediska mezního stavu únosnosti a mezního stavu použitelnosti dle aktuálně platných norem a předpisů. Součástí práce je taktéž dynamická analýza konstrukce, kde bylo posouzeno hlavně hledisko dodržení kritéria pohody.

K vyšetření účinků jednotlivých zatížení na konstrukci byl použit výpočetní program Midas Civil 2021.

Daná konstrukce vyhoví ve všech provedených posudcích. Součástí práce je výkresová část a vizualizace v požadovaném rozsahu.

Tato práce umožnila autorovi rozšířit jeho znalosti v oblasti zavěšených konstrukcí, především v jejich působení a navrhování. Také nabyl zkušenosti v oblasti modelování konstrukcí ve výpočetních programech a posuzování prvků pomocí programů. Naučil se efektivněji využívat program MS Excel, protože jak se říká: „Důvěřuj, ale prověřuj.“

Práce vycházela ze skutečného provedení konstrukce. Velkou výzvou byl návrh v půdorysném oblouku o malém poloměru. Řešení konstrukce se tak zkomplikovalo jak po výpočetní stránce, tak po stránce grafické a výkresové. Nicméně, tímto se tato diplomová práce odlišuje od ostatních.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Podélný řez přemosťovaného území 10
Obrázek 2: Půdorys přemosťovaného území 10
Obrázek 3: Varianta 1 – příčný řez 11
Obrázek 4: Varianta 1 – podélný řez 12
Obrázek 5: Varianta 1 – půdorys 12
Obrázek 6: Varianta 2 – příčný řez 13
Obrázek 7: Varianta 2 – podélný řez 13
Obrázek 8: Varianta 2 – půdorys 13
Obrázek 9: Srovnání variant v podélném řezu 14
Obrázek 10: Zvolená varianta – příčný řez v místě žebra 15
Obrázek 11: Zvolená varianta – příčný řez v místě kazety 16
Obrázek 12: Zvolená varianta – příčný řez kazetou 16
Obrázek 13: Zvolená varianta – podélný řez kazetou 16
Obrázek 14: Příčný řez pylonem v místě stěny 17
Obrázek 15: Stanovení sil v závěsech 21

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

7.1.1 TECHNICKÉ NORMY

[1] *ČSN EN 1990 ed.2: Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí*. Ed.2. Praha: ÚNMZ, 2021.

[2] *ČSN EN 1991-1-1: Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-1: Obecná zatížení - Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb*. Z2. Praha: ČNI, 2010.

[3] *ČSN EN 1991-1-4 ed.2: Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1- 4: Obecná zatížení – Zatížení větrem*. Ed.2. Praha: ÚNMZ, 2020.

[4] *ČSN EN 1991-1-5: Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-5: Obecná zatížení – Zatížení teplotou*. Opr.2. Praha: ČNI, 2011.

[5] *ČSN EN 1991-2 ed.2: Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 2: Zatížení mostů dopravou*. Ed.2. Praha: ÚNMZ, 2018.

[6] *ČSN EN 1992-1-1 ed. 2: Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Ed.2. Praha: ÚNMZ, 2019.

[7] *ČSN EN 1992-2: Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 2: Betonové mosty – Navrhování a konstrukční zásady*. Z2. Praha: ÚNMZ, 2014.

[8] *ČSN EN 1993-1-1 ed.2: Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. A1. Praha: ÚNMZ, 2016.

[9] *ČSN EN 1993-1-11: Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-11: Navrhování ocelových tažených prvků*. Z1. Praha: ČNI, 2010.

[10] *ČSN EN 1993-2: Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 2: Ocelové mosty*. Opr.1. Praha: ČNI, 2010.

[11] *ČSN EN 1994-1-1 ed.2: Eurokód 4: Navrhování spřažených ocelobetonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Ed.2. Praha: ÚNMZ, 2011.

[12] *ČSN EN 1994-2: Eurokód 4: Navrhování spřažených ocelobetonových konstrukcí – Část 2: Obecná pravidla a pravidla pro mosty*. Opr.1. Praha: ČNI, 2009.

[13] *ČSN EN 1997-1: Eurokód 7: Navrhování geotechnických konstrukcí – Část 1: Obecná pravidla*. A1. Praha: ČNI, 2014.

[14] *ČSN 73 1004: Navrhování základových konstrukcí – Stanovení požadavků pro výpočetní metody*. 1. Praha: ÚNMZ, 2020.

ODBORNÁ LITERATURA

[15] STRÁSKÝ, Jiří. *Stress ribbon and cable supported pedestrian bridges*. [Praha]: Akademie věd České republiky, 2006.

[16] JANDA, Lubor, Zdeněk KLEISNER a Jozef ZVARA. *Betonové mosty*. Praha: SNTL, 1988.

[17] KLIMEŠ, Jiří a Karel ZŮDA. *Betonové mosty I: Mosty z prostého a železového betonu*. Praha: SNTL, 1968.

[18] KLIMEŠ, Jiří a Karel ZŮDA. *Betonové mosty II: Mosty z předpjatého betonu*. Praha: SNTL, 1969.

[19] PILGR, Milan. *Kovové konstrukce: Podklady pro navrhování ocelových konstrukcí* [online]. Brno, 2018. Dostupné také z: https://www.fce.vutbr.cz/KDK/pilgr.m/studijni-materialy.htm

[20] STUDNIČKA, Jiří. *Ocelobetonové konstrukce*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005.

[21] STRÁSKÝ, Jiří. *Stress ribbon and cable supported pedestrian bridges*. 2nd ed. London: Akademie věd České republiky, 2011. ISBN 978-0-7277-4146-2.

INTERNETOVÉ ODKAZY A DALŠÍ ZDROJE

[21] VSL International | *Construction specialist* since 1956 [online].

[22] PFEIFER [online]. *Dostupné* také z: https://www.pfeifer.info/cs/home/

[23] Guidelines for the *design of* footbridges: guide to good practice. Lausanne: Federation Internationale du béton (FIB), 2005. Bulletin / Fédération internationale du béton. ISBN 2-88394-072-x.

[24] Ivana Laníková [online*].* [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: https://www.fce.vutbr.cz/BZK/lanikova.i/

SOFTWARE

[25] *Autodesk AutoCAD 2020.* Autodesk, Inc.

[26] *IDEA StatiCa 21.0.* IDEA StatiCa s.r.o.

[27] *Midas Civil 2021.* MIDAS software s.r.o.

[28] *Microsoft office EXCEL*. Microsoft Corporation.

[29] *Microsoft office WORD*. Microsoft Corporation.

[30] *Rhinoceros 7.* Rober McNeel & Associates.

[31] *V-ray.* Chaos Software

SEZNAM PŘÍLOH

P1 POUŽITÉ PODKLADY A VARIANTY ŘEŠENÍ

P1.1 PODÉLNÝ ŘEZ A PŮDORYS PŘEMOSŤOVANÉHO ÚZEMÍ

P1.2 VARIANTA 1 – ZAVĚŠENÁ KONSTRUKCE

P1.3 VARIANTA 2 – OBLOUKOVÁ KONSTRUKCE

P2 VÝKRESOVÁ DOKUMENTACE

P2.1 PŘEHLEDNÉ VÝKRESY

P2.2 VÝKRES TVARU NOSNÉ KONSTRUKCE

P2.3 VÝKRES PYLONU

P2.4 VÝKRES ZÁVĚSŮ

P2.5 VÝKRES PŘEDPÍNACÍ VÝZTUŽE – PODÉLNÝ ŘEZ A PŮDORYS

P2.6 VÝKRES PŘEDPÍNACÍ VÝZTUŽE – ŘEZY

P2.7 VÝKRES BETONÁŘSKÉ VÝZTUŽE

P3 POSTUP VÝSTAVBY A VIZUALIZACE

P3.1 POSTUP VÝSTAVBY

P3.2 VIZUALIZACE KONSTRUKCE

P4 STATICKÝ VÝPOČET

P4.1 STATICKÝ VÝPOČET

P4.2 VÝSTUP VNITŘNÍCH SIL Z PROGRAMU

P4.3 VÝSTUP MODÁLNÍ ANALÝZY Z PROGRAMU