



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta stavební
Katedra mechaniky**

Návrh a projekt lávky pro pěší přes Labe v Hradci Králové

Diplomová práce

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

Vedoucí práce: Ing. arch. Ing. František Denk, Ph.D.

Bc. Martin Šedý



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Šedý Jméno: Martin Osobní číslo: 396565
Zadávací katedra: Katedra mechaniky
Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Návrh a projekt lávky pro pěší přes Labe v Hradci Králové
Název diplomové práce anglicky: Structural design of footbridge across Labe river in Hradec Králové
Pokyny pro vypracování:
Zpracování rešerše realizovaných lávek pro pěší včetně popisu technického, materiálového a konstrukčního řešení, zpracování 3 variant přemostění v souladu se zadávacími podmínkami, zhodnocení a výběr finální varianty, rozpracování návrhu, materiálového a konstrukčního řešení, podrobný statický výpočet spodní i vrchní stavby, zpracování výkresové části - výkresy dispozice, vzorové příčné řezy, min. 3 konstrukční detaily.

Seznam doporučené literatury:

Zadávací podmínky pro návrh přemostění, stanoviska dotčených orgánů státní správy, vyhláška č. 398/2009 Sb., odpovídající technické normy EC

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. arch., Ing. František Denk, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 24.2.2017 Termín odevzdání diplomové práce: 21.5.2017
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

24.2.2017

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, pouze za odborného vedení vedoucího Ing. arch. Ing. Františka Denka, Ph.D.

Dále prohlašuji, že veškeré podklady, ze kterých jsem čerpal, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Datum:

Podpis:

Poděkování:

Rád bych poděkoval všem lidem, kteří mi pomohli a podpořili mě při vymýšlení, psaní a počítání této diplomové práce. Jmenovitě pak svému vedoucímu diplomové práce panu Ing. arch. Ing. Františkovi Denkovi, Ph.D. za odborné vedení a cenné rady. Dále pak svému bratrovì Vojtovi Šedému za pomoc při tvorbě vizualizace lávky. A nakonec celé své rodině a přátelům za psychickou podporu.

Abstrakt

Práce se zabývá Návrhem lávky pro pěší přes Labe v Hradci Králové. Byly zpracovány 3 varianty přemostění pro zadané podmínky. Ty byly porovnány a následně byla vybrána nejlepší varianta. Jedná se o prefabrikovanou lávku z UHPFRC s vloženým polem. Cílem práce bylo navrhnout a posoudit nosnou konstrukci lávky včetně spodní stavby podle norem EC.

Klíčová slova

Lávka pro chodce, UHPFRC, vložené pole, spolupůsobení nosné konstrukce a spodní stavby, předpjatá mostní konstrukce, mezní stavy použitelnosti, mezní stavy únosnosti

Abstract

This thesis deals with the design of a footbridge across the river Labe in the city of Hradec Králové. Three design variants were made, compared, and consequently the best one was chosen. It is a precast footbridge made of UHPFRC with a suspended middle span. The aim of the thesis was the design of the best variant to the ultimate limit state and serviceability limit state according to Eurocodes.

Key words

Footbridge, UHPFRC, suspended span, interaction between load-bearing structure and foundations, serviceability limit state, ultimate limit state

Obsah

1. Úvod.....	8
2. Cíle práce	9
3. Požadavky na stavbu.....	9
4. Rešerše realizovaných lávek	10
4.1 Varianta A.....	11
4.2 Varianta B	12
4.3 Varianta C	15
5. Navržené varianty.....	17
5.1 Varianta A.....	17
5.2 Varianta B	18
5.3 Varianta C	19
5.4 Zhodnocení variant	19
6. Materiály.....	20
6.1 UHPC.....	20
6.1.1 Výhody použití UHPC	20
6.1.2 Navrhování konstrukcí z UHPC.....	21
6.1.3 Materiálové charakteristiky UHPFRC použité pro výpočet.....	24
6.2 Monolitický Beton	24
6.3 Předpínací výztuž	24
6.4 Betonářská výztuž.....	25
7. Technické řešení lávky	25
7.1 Popis částí lávky.....	25
7.1.1 Tvar konstrukce.....	25
7.1.2 Statické působení	27
7.1.3 Způsob založení lávky.....	27
7.2 Zatížení konstrukce	28
7.2.1 Stálá zatížení.....	28
7.2.2 Zatížení chodci.....	28
7.2.3 Zatížení teplotou.....	29
7.2.4 Zatížení větrem.....	30
7.3 Zatěžovací stavy	30
7.4 Kombinace zatížení	31

7.4.1 Montážní kombinace.....	31
7.4.2 Návrhové kombinace.....	31
7.4.3 Provozní kombinace.....	32
7.5 Numerický model.....	33
7.5.1 Podélný směr.....	33
7.5.2 Příčný směr	34
7.6 Návrh předpětí.....	35
7.8 Posouzení konstrukce.....	37
7.8.1 Spodní stavba	37
7.8.2 Montážní stavy.....	39
7.8.3 Posouzení mezního stavu únosnosti	45
7.8.4 Posouzení mezního stavu použitelnosti	48
7.8.5 Posouzení příčného směru.....	50
7.9 Postup výstavby	51
7.10 Mostní vybavení.....	52
7.10.1 Uložení	52
7.10.2 Povrch mostovky	52
7.10.3 Odvodnění.....	52
7.10.4 Zábradlí	52
7.10.5 Dilatační spáry	52
Závěr.....	53
Seznam použité literatury	54
Seznam obrázků	55
Seznam tabulek	56
Použitý software	56
Seznam příloh.....	57

1. Úvod

Dá se říct, že se navrhování lávek pro pěší stalo v poslední době samostatnou kapitolou mostního stavitelství. S celkovým rozvojem společnosti začal být kladen větší důraz na tvorbu kvalitního veřejného prostoru. Středobodem takového veřejného prostoru už není automobil, ale člověk. S tím také souvisí budování stezek pro pěší a cyklostezek a následně lávek pro pěší a cyklisty.

Lávky pro pěší, stejně tak jako silniční, nebo železniční mosty, mohou překonávat různé druhy překážek. Na rozdíl od většiny silničních a železničních mostů ale není úlohou lávky pro pěší pouhé překonání takové překážky. Je zde kladen větší důraz na originalnost stavby. Na to, jak stavba působí v krajině a jaké pocity vyvolává v lidech, kteří ji používají. Lávky pro pěší mohou být navrhovány jako nové dominanty v krajině, jako orientační body. Anebo naopak mohou být navrženy „neviditelné“, tam, kde je to žádoucí. Lávky pro pěší mohou plnit roli nové atrakce a přitáhnout tak turisty do požadované lokality.

Navrhování lávek pro pěší má určitá specifika. Proměnná zatížení nejsou zdaleka tak velká, jako u ostatních mostních staveb. Kvalitnější materiály, lepší pochopení jejich působení a lepší možnosti statické a dynamické analýzy nám umožnily navrhovat subtilnější konstrukce a zajímavější tvary. Při navrhování lávek pro pěší hraje často rozhodující roli mezní stav použitelnosti, protože vlastní frekvence lávek bývá blízko frekvenci lidské chůze. Je kladen důraz na snadnou udržitelnost lávek a jednoduchost konstrukčních detailů. Zkrátka na to, aby lávka plnila svou funkci co nejdéle, s co nejmenšími náklady na údržbu a opravu.

2. Cíle práce

Cílem diplomové práce bylo navrhnout 3 varianty lávky pro pěší v Hradci Králové přes řeku Labe, vybrat nejvhodnější variantu a tu následně zpracovat do větší podrobnosti. Zadání práce vychází ze zadání architektonické soutěže, kterou vypsal statutární město Hradec Králové v roce 2014. Soutěž je nyní vyhodnocena, ale vítězný návrh se ještě nezačal realizovat.

Součástí této diplomové práce je rešerše lávek pro pěší, které byly realizované v posledních letech po celém světě. Na základě rešerše poté byly vybrány konstrukce vhodné pro místní podmínky.



Obr. 1 Ortofoto lokality s vyznačeným umístěním lávky

3. Požadavky na stavbu

Navrhovaná lávka se nachází v Hradci Králové a přemostuje Labe v severní části města. Lávka má být navržena v návaznosti na Škroupovu ulici a Collinovu ulici. Oba břehy Labe v dané lokalitě jsou významnou částí městského prostoru a slouží jako vycházková trasa a spojnice pro chodce i cyklisty.

Ze zadání architektonické soutěže vyplývá, ať už přímo, nebo nepřímo, několik důležitých požadavků, které bylo potřeba zohlednit hned při prvních úvahách o řešení celého problému.

Vzdálenost mezi břehy Labe je přibližně 67 m. Minimální průchozí šířka navržené konstrukce má být 4,5 m. Stavba musí být realizovaná podle ČSN. Mostovka lávky má

být navržena tak, aby zajišťovala pohodlnou a bezpečnou chůzi a jízdu na kole, či vozíku. Lávka musí splňovat kompletní bezbariérovost dle vyhlášky 398/2009 Sb. Pro konstrukční uspořádání to znamená maximální podélný sklon mostovky 1:12 a maximální příčný sklon mostovky 1:40.

Konstrukce nesmí omezovat průtok v korytě řeky při velké vodě. Podle podkladů Povodí Labe dosahuje Labe při stoleté vodě hladiny $Q_{100} = 231,6$ m.n.m. (Bpv). Konstrukce lávky tedy nesmí být z tohoto ohledu níže, než v úrovni 232,10 m.n.m. (Bpv). Dále je potřeba dodržet výšku 233,90 m.n.m. (Bpv) uprostřed koryta kvůli rekreační plavbě a do koryta nesmí být umístěný žádný pilíř.

Na lávce má být umožněný pojezd vozidla technických služeb. Vozidlo váží 4 tuny, je 2 metry široké a 2,5 metrů vysoké. Povrch mostovky by měl být odolný vůči posypové směsi. Lávka má být dále navržena s ohledem na co nejmenší provozní náklady a náklady na realizaci nesmí překročit částku 40 milionů korun.

Navrhovaná konstrukce se nachází v biokoridoru vodního ptactva a z důvodu jeho ochrany byly investorem formulovány požadavky na co nejmenší konstrukční výšku a to především uprostřed toku Labe. Dále by měla být zachována minimální tloušťka konstrukčních prvků 10 cm z důvodu jejich viditelnosti.

Součástí zadávací dokumentace byly také výsledky inženýrsko - geologického průzkumu, který byl proveden v roce 2000. Z vrtaných sond byla zjištěna navážka do hloubky 1,6 m na pravém břehu, respektive 2 m na levém břehu. Dále aluviální náplav tloušťky 1-1,2 m, šterkopísková terasa tloušťky cca 8 m na pravém břehu a cca 4 m na levém břehu. Skalní podloží se nachází v hloubce 10,7 m na pravém břehu a v hloubce 6,9 m na levém břehu.

4. Rešerše realizovaných lávek

Po prvotním zhodnocení zadávacích parametrů a vynesení příčného řezu řečiště v místě budoucí lávky byly zjištěny základní omezení pro návrh. Je to především malá stavební výška, špatné základové poměry a poměrně stísněný prostor, který je limitovaný pobřežními cyklostezkami, na které bylo nutné se funkčně napojit. S ohledem na tyto skutečnosti byly vybrány 3 konstrukční varianty, které byly dále rešeršovány.

Tyto varianty jsou:

Varianta A – Zavěšená lávka s parapetními nosníky a jedním pylonem

Varianty B – Prefabrikovaná lávka z vysokohodnotného betonu

Varianta C – Oblouková lávka s dolní mostovkou a obloukem vetknutým do mostovky

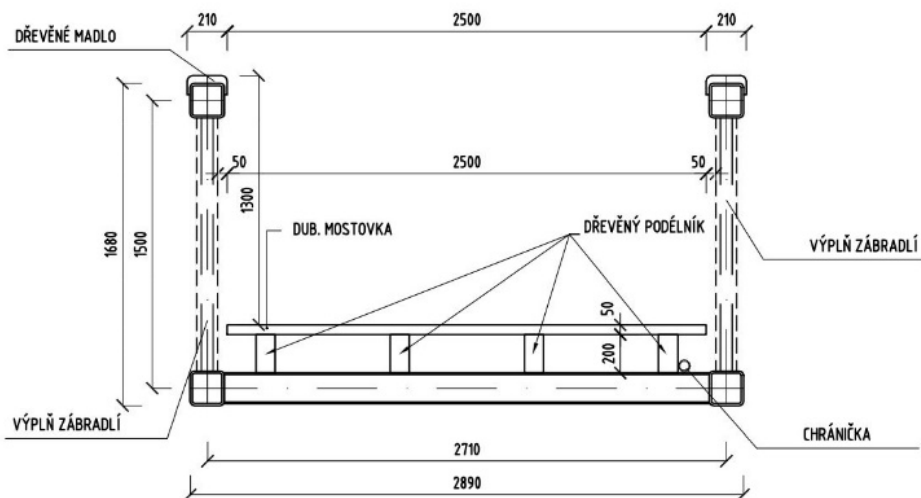
4.1 Varianta A

- Lávka přes Berounku v Hýskově

Na šikmém pylonu výšky 26 metrů je třemi dvojicemi závěsů zavěšen subtilní ocelový příhradový trám s parapetními nosníky. Délka nosné konstrukce je cca 86 m a rozpětí většího pole je cca 70 m. Mostovka je tvořena dřevěnými fošami, které jsou uloženy na dřevěných podélnících. Průchozí šířka je 2,5 m. Konstrukční výška je 1,68 m. Pruty příhradového trámu jsou tvořeny čtvercovými profily. Založení lávky je kombinované, jedna z opěr je masivní tížná a druhá opěra a pylon jsou založeny hlubinně na pilotách průměru 0,6 m. Náklady na stavbu jsou uváděny 10,9 milionů Kč.



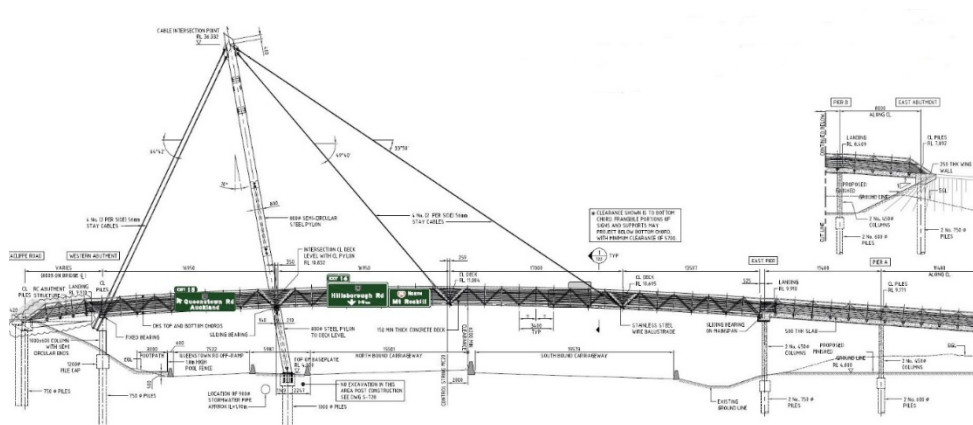
Obr. 2 Pohled na lávku v Hýskově



Obr. 3 Vzorový příčný řez lávky v Hýskově

- Beachcroft bridge, Nový Zéland

Tato lávka z roku 2010 v Aucklandu na Novém Zélandu překlenuje dálnici SH20. Je tvořena nakloněným pylonem tvaru A, který je 32 m vysoký, a ocelovým parapetním trámem zavěšeným dvěma dvojicemi závěsů. Průchozí šířka na lávce je 3,5 m. Rozpětí nejdelšího pole je 47,5 m a rozpětí krajních polí je 17 m a 2 x 11,5 m. Krajní pole jsou prosté nosníky. Mostovka je tvořena prefabrikovanými betonovými dílci. Založení obou opěr, pylonu a dvou krajních podpůrných sloupů je hlubinné. Pylon je založený na pilotách průměru 1 m a piloty pod opěrami mají průměr 0,75 m.



Obr. 4 Pohled na Beachcroft bridge

4.2 Varianta B

- Lávka Sakata Mirai, Japonsko

Rozpětí lávky Sakata Mirai je 50,2 m a je tvořena 6 prefabrikovanými dílci z UHPC s rozptýlenou ocelovou výztuží. Lávka nemá kromě rozptýlené výztuže žádnou další betonářskou výztuž. Spojení dílců je docíleno dodatečným předepnutím celé konstrukce pomocí 2 předpínacích lan průměru 15,2 mm. Globálně lávka působí jako prostý nosník. V příčném řezu se jedná o komorový nosník s konzolami na krajích. Příčný řez se směrem od podpor ke středu rozpětí zvyšuje z 0,55 m na 1,56 m. Stěny dílců jsou navíc vylehčeny kruhovými otvory. Díky UHPC bylo možné docílit tloušťky pochozí desky pouze 50 mm a tloušťky stěn pouze 80 mm. Šířka lávky je 2,4 m.



Obr. 5 lávka Sakata Mirai

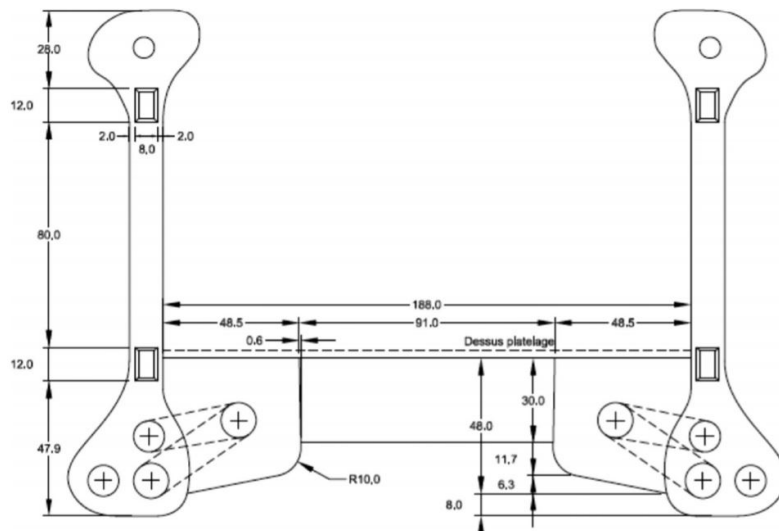
- Pont du Diable, Francie

Použití UHPC při realizaci Pont du Diable vyplynulo z požadavků investora. Ten měl zájem přemostit údolí řeky Herault lávkou s rozpětím 70 m, která bude vizuálně zapadat do okolí. Z toho důvodu byly zavrhnuty zavěšené lávky i obloukové lávky. Výsledné řešení používá UHPC vyvinuté ve Francii



Obr. 6 Pohled na Pont du Diable

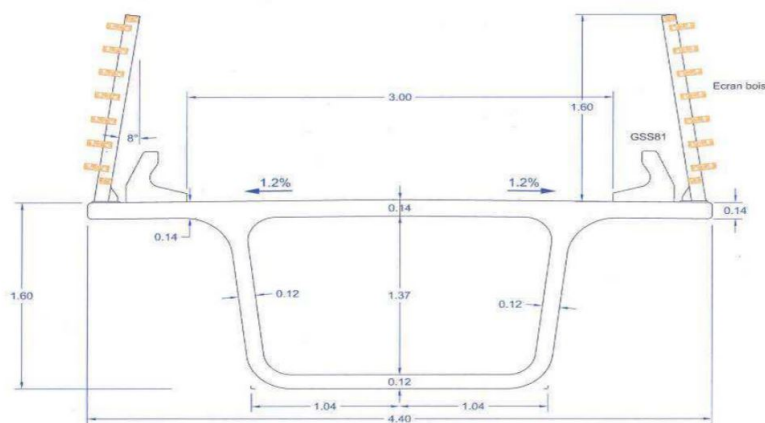
s obchodním názvem Ductal. Jedná se o UHPC s rozptýlenou drátkovou výztuží, které dosahuje tlakové pevnosti až 200MPa. Lávkou je tvořena z 15 prefabrikovaných dílců, které byly dodatečně předepnuty a globálně působí jako prostý nosník. Každý dílec je tvořený dvěma parapetními nosníky 1,8 m vysokými, které mají tvar kosti, 3 výztužnými žebry a přímo pochozí mostovkou tloušťky 30 mm.



Obr. 7 Příčný řez lávky Pont du Diable

- Pont de la Chabotte, Francie

Lávka Pont de la Chabotte má rozpětí 47,4 m a přemostňuje bez mezilehlých podpor zářez dálnice. Konstrukce je tvořena 22 segmenty z UHPC s tlakovou



Obr. 9 Příčný řez lávky Pont de la Chabotte



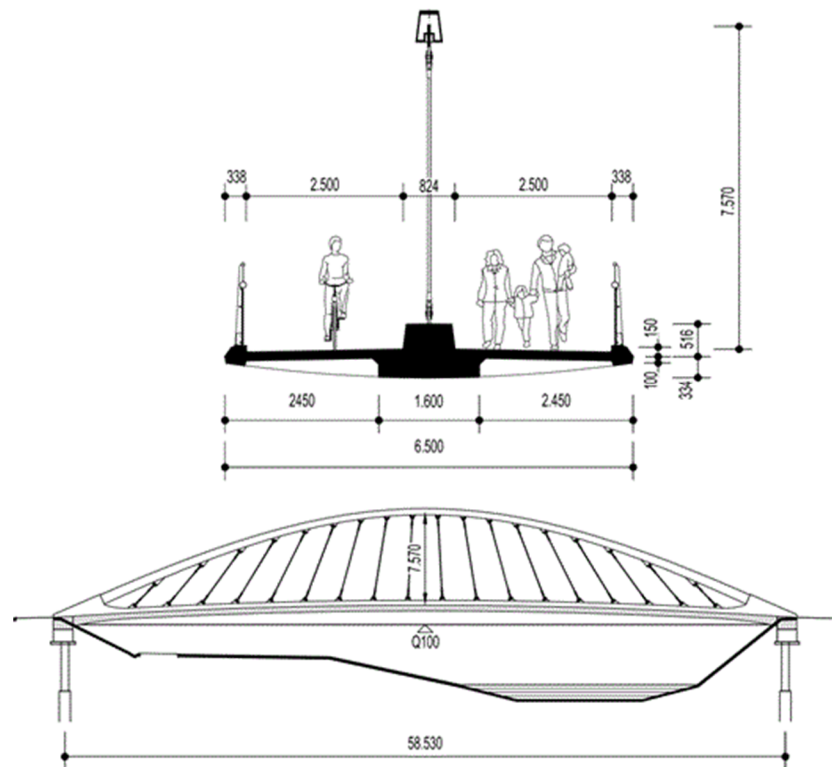
Obr. 8 Pohled na Pont de la Chabotte

pevností 130/150 MPa (podle tepelného ošetření). Jednotlivé prefabrikované segmenty na styčných stranách disponují systémem pero-drážka. Při montáži byla nejdříve na styky segmentů nanesena epoxidová pryskyřice a poté byly dodatečně předepnuty 6 předpínacími lany. V příčném řezu je lávka komorovým nosníkem s vykonzolovanými stranami. Výška segmentů je 1,6 m. Tloušťka horní desky je 140 mm. Tloušťka stěn a dolní desky je 120 mm.

4.3 Varianta C

- Lávka přes Svatku v Brně – Komárově

Jedná se o obloukovou lávku se spodní mostovkou, jejíž oblouk je vetknutý do mostovky a vodorovné reakce z oblouku jsou zachyceny mostovkou. Rozpětí lávky je 58,5 m. Šikmé závěsy jsou situovány uprostřed mostovky, čímž je

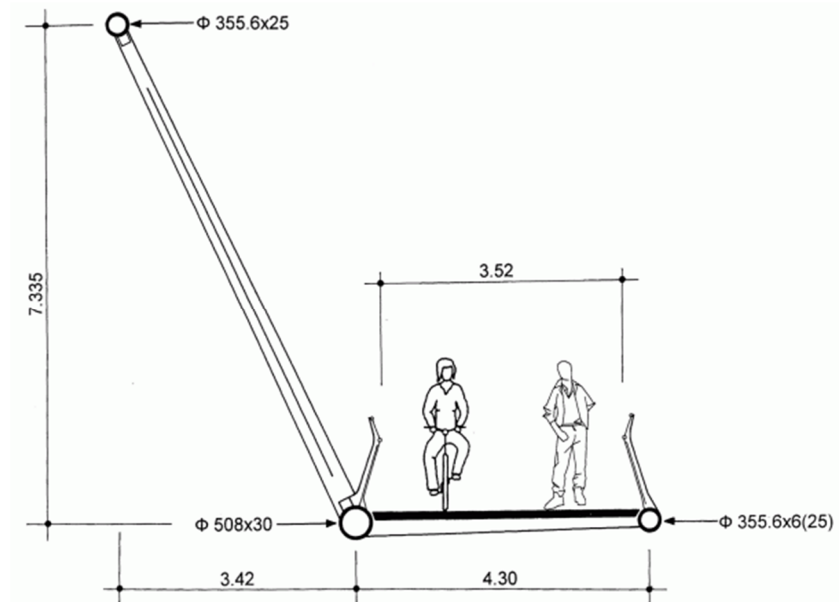


Obr. 10 Příčný řez a pohled na lávku přes Svatku v Brně-Komárově

průchozí prostor rozdělený na dva pruhy o šířce 2,5 m. Vzepětí oblouku je 8,76 m. Oblouk je z ocelového lichoběžníkového průřezu s proměnnou výškou. Vnitřek oblouku je vybetonovaný. Mostovka je z předpjatého monolitického betonu a byla betonovaná na pevné skruži. Je tvořena páteřním nosníkem zavěšeným do oblouku a vykonzolovanými kraji s podpurnými žebry. Opěry jsou tvořené monolitickými železobetonovými bloky, které jsou uloženy na vetknutých pilotách s průměrem 900 mm. Cena realizace byla 12 milionů Kč.

- Lávka přes Vltavu v Českých Budějovicích

Nosná konstrukce této lávky je tvořena jednostranným šikmým ocelovým obloukem, ze kterého jsou vykonzolována žebra nesoucí betonovou mostovku z vysokopevnostního betonu. Rozpětí lávky je 53,2 m. Oblouk je vetknutý do



Obr. 12 Příkladný řez lávkou přes Vltavu v Českých Budějovicích



Obr. 11 Pohled na lávku přes Vltavu v Českých Budějovicích

ocelobetonové mostovky. Je tvořený kruhovým ocelovým profilem s průměrem 355,6 mm. Jeho vzepětí je 8 m. Mostovka je tvořena kruhovým profilem průměru 508 mm, do kterého je vetknutý oblouk, a kruhovým profilem s průměrem 355,6 mm, který tvoří vykonzolovaný konec mostovky. Závěsy jsou tvořeny profilem I. Konstrukce lávky je navržena tak, aby stálé zatížení lávky

nekroutilo. Lávka je založena hlubinně na pilotách, které jsou v jejich horní části zeslabeny.

5. Navržené varianty

5.1 Varianta A

První varianta je zavěšená ocelová lávka s dřevěnou mostovkou. Vzdálenost mezi ložisky je 63,75 m. Hlavní nosník je však ještě uložený na pylonu a teoretické rozpětí lávky je proto 59,5 m. V půdoryse je lávka přímá a v pohledu má mostovka tvar paraboly 2. stupně. Její vzepětí je 1,8 metrů. Maximální podélný sklon mostovky je 8 %. Příčný sklon je nulový. Odvodnění je zajištěné mezerami mezi prkny. Průchozí šířka lávky je 4,5 m. Pylon lávky je skloněný se sklonem 80 stupňů a má tvar písmene A. Výška pylonu je 21,1 m.

Hlavní nosník tvoří otevřenou příhradovou soustavu bez svislic. Výška příhradového trámu je 2.25 m. Horní pás, dolní pás i diagonály jsou tvořeny uzavřeným kruhovým profilem průměru 250 mm. Ztužení hlavního trámu v příčném směru je zajištěno příčnicími stejného profilu a diagonálami v úrovni příčnicíků.

Na příčnicích jsou uloženy podélníky, které jsou 150 mm vysoké. Mostovka je tvořena dubovými fošnami. Madlo zábradlí je bodově uchyceno v místě diagonál.

Hlavní nosník je zavěšený 2 dvojicemi závěsů firmy Macalloy. Předpokládá se příslušná úprava závěsů podle doporučení ornitologa. Pylon vysoký 21,1 metrů je závěsem uchycený do kotevního bloku, který se nachází na pravém břehu Labe. Konstrukce je uložena na ložiskách. Ložiska se nacházejí v požadované výšce 232,1 m.n.m. Lávka je založena hlubinně pomocí pilot, které jsou vetknuty do únosného podloží. Základový blok pod pylonem tvoří jeden prvek spolu se základovým blokem opěry.

5.2 Varianta B

Druhá varianta je lomená prefabrikovaná lávka z vysokohodnotného betonu (UHPC). Lávka se skládá z 3 segmentů. Krajiní segmenty jsou vetknuty do masivních opěr a na ně je posazený třetí segment vloženého pole. Ve vzdálenosti 18 metrů od vetknutí jsou klouby, které zároveň slouží pro dilataci konstrukce. Vzdálenost vetknutí krajiních segmentů do opěr je 60 metrů. Délka lávky včetně opěr je pak 80 metrů. Podélný sklon je 8,33 % a odpovídá maximální přípustné hodnotě z hlediska bezbariérového užívání stavby. Prostřední segment je ve vrcholovém zakružovacím oblouku. Průchozí šířka je 4,5 m.

Segmenty budou prefabrikované z vysokohodnotné betonu (UHPC) s rozptýlenou drátkovou výztuží a s předpínací výztuží. V příčném řezu budou mít segmenty podobu komorového nosníku s vykonzolovanými kraji, které budou mít náběhy. Komora bude mít výšku 1,6 m v místě vetknutí. Dolní hrana se bude směrem od vetknutí k prostředku rozpětí přibližovat k horní desce a uprostřed rozpětí bude mít nosník výšku 0,6 m. Horní deska bude tlustá 150 mm. Délka vykonzolovaných krajiních částí bude 1,5 metru. Trám bude mít tvar sinusoidy a bude vylehčený. Prefabrikované segmenty budou přímo pochozí bez dalších dodaných konstrukčních vrstev.

Opěry lávky budou založené hlubinně pomocí skupiny pilot. Při realizaci lávky se nejdříve provedou piloty a opěry v podobě krabice s připravenou betonářskou výztuží. Poté se jeřábem umístí krajiní prefabrikáty a základová krabice se vybetonuje. Po příslušné době bude předepnuta předpínací výztuž konzol a nakonec se na konzoli umístí vložené pole. Spodní hrana lávky ve vetknutí se bude nacházet ve výšce 231,6 m.n.m a uprostřed rozpětí bude dolní hrana lávky ve výšce 234,59 m.n.m.

5.3 Varianta C

Poslední varianta je ocelová oblouková lávka se spodní mostovkou a jedním, centrálně umístěným obloukem. Rozpětí lávky je 60,5 m. Oblouk má vzepětí 9,5m. Průchozí šířka je 4,5 metrů, respektive 2x2,25 metrů. Mostovka je půdorysně přímá a v pohledu je ve vrcholovém zakružovacím oblouku s poloměrem 450 m. Ložiska se nacházejí v požadované výšce 232,1 m.n.m. Uprostřed rozpětí je spodní hrana konstrukce v požadované výšce 233,9 m.n.m. Maximální podélný sklon mostovky je 8,3%

Nosná konstrukce je tvořena páteřním nosníkem z uzavřeného obdélníkového profilu, do kterého je vetknutý oblouk ve tvaru paraboly 2°. Průřez oblouku bude uzavřený obdélníkový profil. Páteřní nosník je zavěšen do oblouku pěti šikmými táhly firmy Macalloy. Prostřední závěs je kolmý na vodorovnou osu. Krajní závěsy mají odklon od svislé osy 10°, respektive 20°. Konzoly z páteřního nosníku tvoří příčnice, které nesou krajní nosníky a mezi kterými je pnutá spolupůsobící železobetonové mostovka.

Nosná konstrukce je uložena na ložiska. Opěry jsou založené hlubinně pomocí skupiny pilot.

5.4 Zhodnocení variant

Varianta A představuje zavěšenou lávku s jedním šikmým pylonem a parapetním trámem. Na takto malé rozpětí se varianta se dvěma pylony jevila jako zbytečná. Navíc by pylony a jejich kotvení tvořily výrazný prvek, což nebylo žádoucí. Výsledný návrh se proto snažil minimalizovat počet závěsů i pylonů. I přes to tato varianta není vhodná s ohledem na migrující ptactvo. Předpokládá se úprava tenkých prvků nátěrem, nebo jejich jiné zvýraznění po konzultaci s ornitology. Díky zvolení parapetního příhradového nosníku bylo docíleno malé stavební výšky a lávka tak mohla být bez problémů napojena na pobřežní stezky. Nevýhodou lávky z hlediska nákladů na údržbu je její uložení na ložiska. Výhodou prvkové dřevěné mostovky je její rychlá a nenáročná montáž a také snadná výměna poškozených částí. Zvolené řešení také snižuje časovou náročnost stavby, kdy je minimalizováno použití monolitického betonu (až na opěry).

Varianta B předpokládá využití UHPC, což umožňuje návrh velmi subtilních a únosných prvků. Výsledná konstrukce je tak velice elegantní a bez problému zapadá do krajiny. Výhoda této varianty je rychlá montáž prefabrikovaných dílů pomocí jeřábů a minimalizování mokrého procesu na stavbě. Díky vetknutí lávky do opěr úplně chybí ložiska a v kombinaci s vysokohodnotným betonem vzniká takřka bezúdržbové řešení s velmi vysokou životností. Naopak nevýhodou je náročnější

založení, než u jiných variant a pak také náročná technologie UHPC, ze kterého bylo u nás realizováno pouze malé množství konstrukcí a není s ním ještě taková zkušenost, jako v zahraničí.

Varianta C představuje poměrně zavedené řešení. Největší výhodou této varianty jsou malé nároky na založení, respektive eliminování vodorovných reakcí přenášených do podloží. Snahou návrhu bylo, podobně jako u varianty A, eliminovat počet závěsů. Nicméně samotná přítomnost prvků tenčích než 10 cm neodpovídá zadání a bylo by proto nutné tyto prvky upravit podle doporučení ornitologa. Konstrukce lávky u této varianty bude uložena na ložiska, což s sebou nese větší náklady na údržbu. Tato varianta by také tvořila poměrně výrazný prvek při pohledu k centru Hradce Králové, což bylo v tomto případě hodnoceno jako nevýhoda.

Po zhodnocení všech kritérií byla jako nejvhodnější varianta vybrána varianta B. A to především díky její netradičnosti a originalitě.

6. Materiály

6.1 UHPC

Ultra vysokohodnotný beton s rozptýlenou drátkovou výztuží bude použitý pro prefabrikované části lávky. Jsou to 2 stejné prefabrikáty krajních polí a 1 prefabrikát prostředního vloženého pole.

6.1.1 Výhody použití UHPC

Jako ultra vysokohodnotné betony (UHPC – ultra high performance concrete) se označují betony, které vynikají nejen svou vysokou pevností, ale také dalšími příznivými vlastnostmi. Pevnost v tlaku UHPC se v závislosti na mnoha faktorech pohybuje v rozmezí 150 MPa – 200 MPa. Ani pevnost v tahu UHPC není zanedbatelná. Typické hodnoty tahové pevnosti UHPC leží v rozmezí 7 MPa – 11 MPa. Modul pružnosti UHPC obvykle leží v rozmezí 45 - 55 GPa [1]. Příznivé vlastnosti UHPC jsou dány jeho složením a strukturou.

UHPC je obvykle tvořeno cementem CEM I pevnostních tříd 42,5 R a 52,5 R, dále pak kamenivem s maximální velikostí zrna 1 mm, vodou, přísadami a příměsemi. Jsou používány superplastifikátory k dosažení co nejmenšího vodního součinitele. Výsledný produkt má po zatvrdnutí velmi homogenní hmotu, která je v podstatě bez jakýchkoliv kapilár. Případné trhliny, vznikající pod zatížením, se šíří přímo cementem i kamenivem. Z toho vyplývá křehkost UHPC, kterou je ale možné kompenzovat betonářskou, drátkovou, nebo předpínací výztuží.

Přidáním drátkové výztuže do UHPC získáme materiál, jehož tahová pevnost může v závislosti na množství výztuže dosáhnout až hodnoty 25 MPa, a který zároveň vykazuje vysokou duktilitu. V anglické literatuře se takový materiál nazývá UHPFRC (ultra high performance fibre reinforced concrete). UHPFRC je použito také v této diplomové práci.

Kromě výše zmíněných mechanických vlastností UHPC vyniká také svou vysokou trvanlivostí. Struktura UHPC je bez kapilár a proto je možné ho používat i v těch nejnáročnějších podnebných podmínkách a to bez dalších úprav povrchu a s vysokou životností.

6.1.2 Navrhování konstrukcí z UHPC

Pro návrh lávky byla použita metoda dílčích součinitelů. Dílčí součinitele pro zatížení mohou být podle [1] použity stejné, jako pro konstrukce z jiných materiálů. Dílčí materiálové součinitele jsou převzaty z [2] a jsou následující:

	Návrhová situace	
	Trvalá a dočasná	Mimořádná
UHPC v tlaku		
Vysoká úroveň kvality	$\gamma_c = 1,35$	$\gamma_c = 1,35$
Normální úroveň kvality	$\gamma_c = 1,5$	$\gamma_c = 1,35$
Bez zaručení duktility	$\gamma'_c = 1,2$	
UHPC v tahu (vysoká úroveň kv.)		
Obecně	$\gamma_{cf} = 1,5$	$\gamma_{cf} = 1,3$
Pro lokální posouzení	$\gamma_{cf} = 2,1$	$\gamma_{cf} = 1,5$
Betonářská nebo předpínací výztuž	$\gamma_s = 1,15$	$\gamma_s = 1,0$

Tabulka 1 Dílčí materiálové součinitele UHPC

Vzhledem k prefabrikaci konstrukce a použití drátkové výztuže se v tabulce 1 předpokládá vysoká úroveň kvality a zaručení duktility. Návrhová pevnost UHPC v tlaku se spočítá podle následujícího vzorce:

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \times f_{ck} / (\gamma_c \times \gamma'_c), \text{ kde}$$

f_{ck} charakteristická válcová pevnost UHPC v tlaku

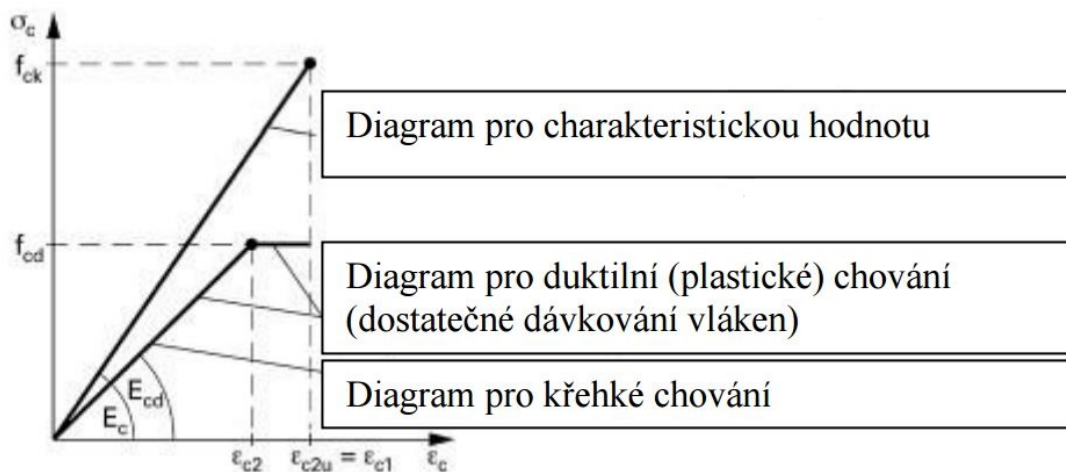
γ_c a γ'_c dílčí materiálové součinitele podle Tabulky 1

α_{cc} součinitel zohledňující délku zatížení (dotvarování)

$\alpha_{cc} = 0,85$ pro dlouhodobé, nebo opakující se zatížení

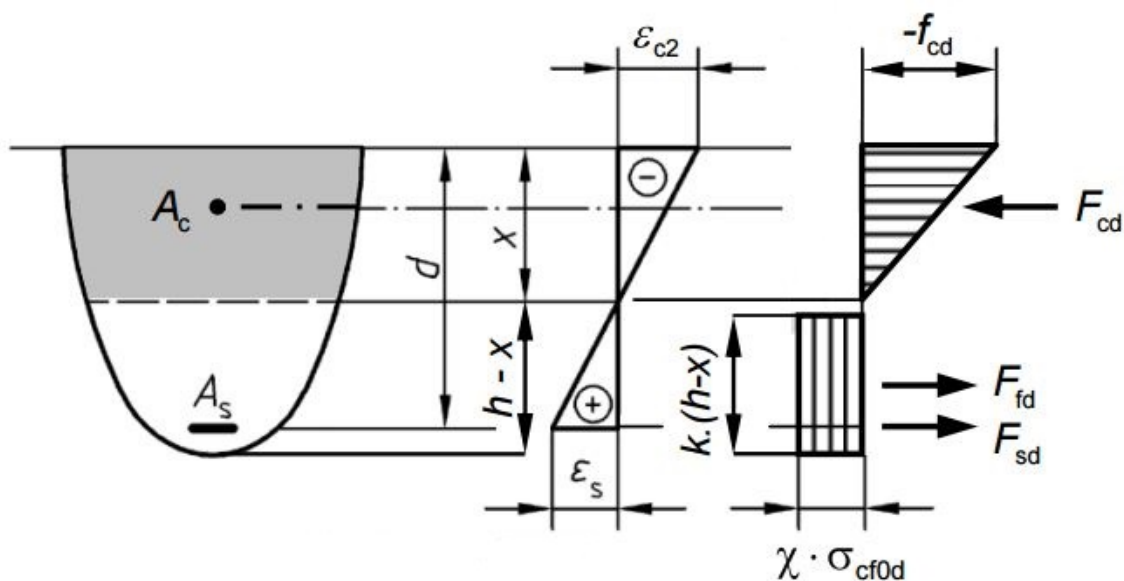
$\alpha_{cc} = 0,95$ pro krátkodobé zatížení

Dále byl použit zjednodušený pracovní diagram podle [1].



Obr. 13 Zjednodušený pracovní diagram UHPC v tlaku

Pro posouzení průřezů na ohyb při MSÚ byl použit jednoduchý model s rozdělením napětí po průřezu podle [1].



Obr. 14 Rozdělení napětí po průřezu při MSÚ

Legenda k Obr. 14

$k = 0,9$

$\chi = 0,9$ (obecně)

$\chi = 0,85$ Pokud se šířka příčného řezu zužuje směrem k taženým vláknům. To platí pro posuzování průřezů vloženého pole

Při MSÚ je tah v průřezu přenášen předpínací výztuží a drátkovou výztuží. ζ_{cf0d} je návrhová hodnota účinnosti rozptýlené výztuže. Platí vztah:

$$\zeta_{cf0d} = \alpha_{ct} \times (\zeta_{cf0k} / \gamma_{cf}), \text{ kde}$$

ζ_{cf0k} charakteristická hodnota účinnosti rozptýlené výztuže, která je dána skutečným rozmístěním a uspořádáním rozptýlené výztuže v prvku. Hodnota je určena na základě statistického vyhodnocení zkoušených vzorků.

α_{ct} součinitel zohledňující délku zatížení

$\alpha_{ct} = 0,9$ pro dlouhodobé zatížení

$\alpha_{ct} = 1,0$ pro krátkodobé zatížení

γ_{cf} viz Tabulka 1

Platí rovnováha vnitřních sil na průřezu.

$$F_{cd} = F_{sd} + F_{fd}$$

Při posuzování konstrukce na smyk bylo vycházeno z experimentálního výzkumu Technické univerzity v Delftu [1], při kterém byly testovány trámy z UHPC bez smykové výztuže a s rozptýlenou drátkovou výztuží. Výsledkem výzkumu byl vzorec pro výpočet smykové únosnosti prvků z UHPC pouze s rozptýlenou drátkovou výztuží, přebírající funkci smykové výztuže. Tento vzorec je:

$$V_u = b_w \times h \times \cot\theta \times \zeta_{pf}, \text{ kde}$$

b_w tloušťka stěny (je uvažována nejmenší tloušťka „stěny“ průřezu, která u všech průřezů 150 mm)

h maximální výška průřezu

ζ_{pf} pevnost v tahu rozpraskaného prvku. Tato pevnost byla určena z tahové zkoušky prvků a konkrétně v tomto výzkumu byla stanovena jako 5,6 MPa pro UHPC s 0,8% objemu drátkové výztuže, respektive 9 MPa pro UHPC s 1,6% objemu drátkové výztuže

θ sklon šikmé trhliny

$\cot\theta$ má být uvažovaný v rozmezí 1-3. Skutečná smyková únosnost testovaných trámů ukázala, že uvažování $\cot\theta = 3$ je stále ještě na bezpečné straně.

Tloušťka průřezu b_w a maximální výška průřezu byla v našem případě nahrazena smykovou průřezovou plochu spočítanou programem Dlubal SHAPE_MASSIVE. Vzorec pro posouzení smyku má poté tvar:

$$V_u = A_z \times \cot\theta \times \zeta_{pf}$$

6.1.3 Materiálové charakteristiky UHPFRC použité pro výpočet

Při realizaci konstrukce podobného významu by velkou částí projektu byl samotný návrh a zkoušení UHPFRC. Takový přístup nebyl v mém případě objektivně možný, takže pro potřeby diplomové práce byly s ohledem na dostupnou literaturu a výsledky experimentů zvoleny materiálové charakteristiky podle Tabulky 2. Předpokládá se použití UHPC s drátkovou ocelovou výztuží a obsahem výztuže 1,6% objemu. Dále se předpokládá tepelné ošetření prefabrikátu při betonáži, které ještě více zlepší jeho vlastnosti (především sníží dotvarování)

Charakteristická pevnost UHPC v tlaku	f_{ck}	180	MPa
Charakteristická pevnost UHPC v tahu	σ_{cf0k}	25	MPa
Střední hodnota Youngova modulu pružnosti	E_{cm}	55	GPa
Poissonovo číslo	ν	0,2	

Tabulka 2 Materiálové charakteristiky UHPC

Odhadované množství UHPC: 119 m³

6.2 Monolitický Beton

Pro betonáž základové krabice a její zmonolitnění s prefabrikáty bude použitý monolitický beton třídy C45/55 třídy prostředí XC2, XD2, XF3. Pro betonáž pilot bude použitý beton C25/30.

Odhadované množství použitého monolitického betonu:

C45/55 - 200 m³

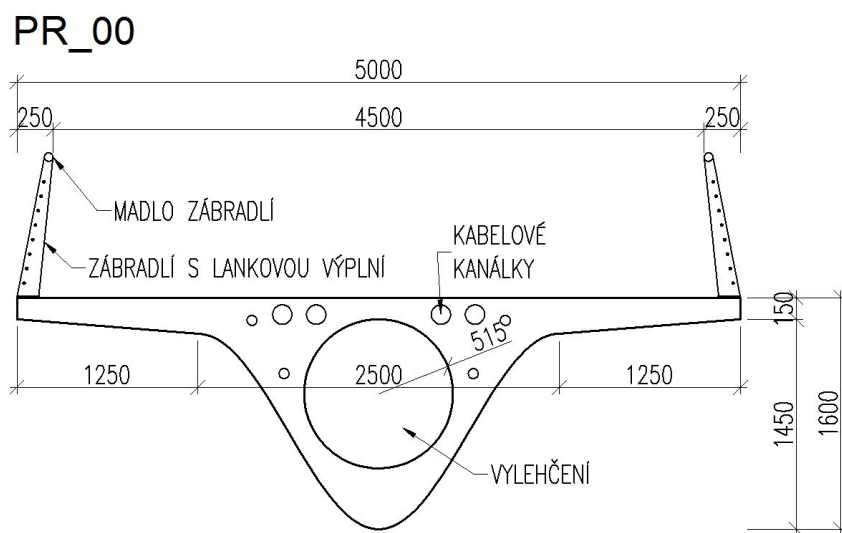
C25/30 - 330 m³

6.3 Předpínací výztuž

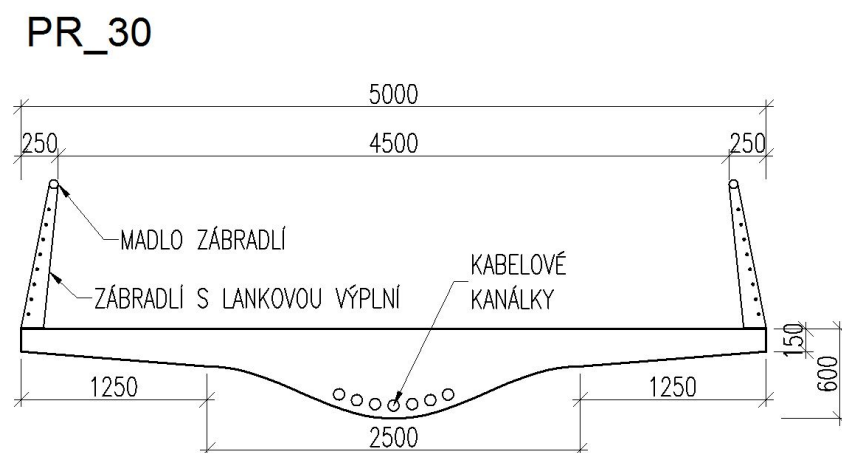
Pro předepnutí konstrukce budou použita sedmipramenná lana Freyssinet s označením Y-1860-S7-15,7-R2-F1-C1. Průměr jednoho lana je 15,7 mm a plocha jednoho lana je 150 mm². Lana budou vedena v plastových kabelových kanálcích a budou chráněna cementovou injektáží.

Niveleta krajních polí má sklon 8,33%, který je daný maximálním povoleným sklonem z hlediska bezbariérového používání stavby. Niveleta vloženého pole je tvořena vrcholovým obloukem o poloměru 145 metrů. Vzepětí konstrukce je 1,99 metrů. Příčný řez lávky je tvořený vylehčeným trámem proměnné výšky a krajními konzolami s náběhy. Výška průřezu se směrem od vetknutí ke středu lávky snižuje. Ve vetknutí je průřez vysoký 1,6 metrů a je vylehčený kruhem o poloměru 515 mm. Na konci konzoly je průřez vysoký 1 metr. Poloměr vylehčujícího kruhu se snižuje spolu se zmenšující se výškou průřezu. Průřez vloženého pole není vylehčený. Výška průřezu uprostřed rozpětí je 600 mm.

Průřez je široký 5 metrů, z toho je 4,5 metrů průchozí prostor. Na obou stranách průřezu vystupuje z nosného trámu konzola dlouhá 1,25 metrů.



Obr. 18 Průřez v místě vetknutí



Obr. 19 Průřez uprostřed rozpětí

Vložené pole je uloženo na ozub. Ten se nachází ve střední části průřezu a je vyztužený nerezovými diafragmaty, po kterých se pohybuje vložené pole při teplotních změnách.

7.1.2 Statické působení

Krajní prefabrikované segmenty jsou vetknuty do základové krabice. Na ně je kloubově na ozub uloženo střední předepnuté pole. V kloubech je dostatečná dilatační spára, aby nedocházelo k přitěžování nosné konstrukce od teplotních změn. Střední vložené pole se díky dilatační spáře může v uložení volně posouvat a natáčet a díky tomu není do konzol přenášena ani vodorovná reakce od klenbových účinků. Konstrukce je staticky určitá. Všechny segmenty jsou dodatečně předepnuty se soudržností. Základová krabice je uložena na skupině pilot. Zadní piloty jsou vytahovány a přední piloty jsou zatlačovány do zeminy.

Poloha kloubů vloženého pole byla určena tak, aby se co nejvíce zredukoval ohybový moment uprostřed rozpětí a bylo tak možné navrhnout co nejtenčí průřez a aby zároveň bylo možné nadimenzovat základy. Dalším faktorem, při určování polohy kloubů byly rozměry vzniklých prefabrikátů, které musí být přepravitelné.

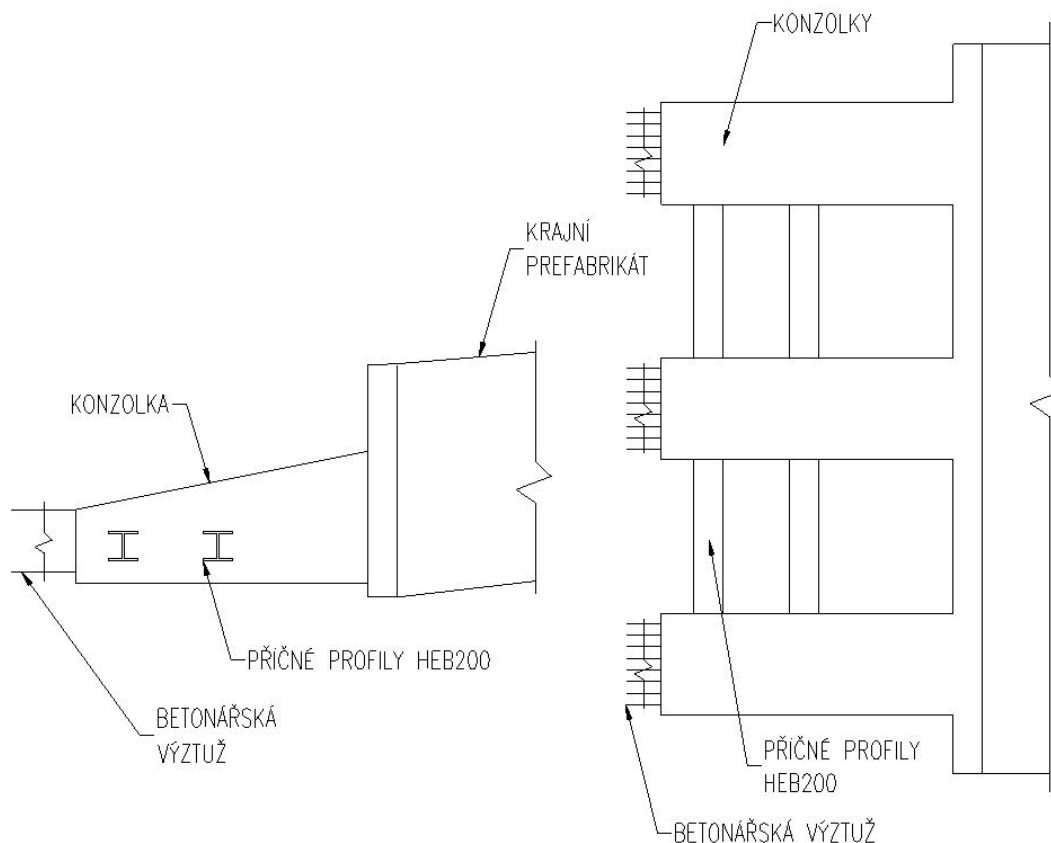


Obr. 21 Statické schéma konstrukce

7.1.3 Způsob založení lávky

Bylo navrženo hlubinné založení lávky. Spodní stavba je tvořena základovou krabicí uloženou na skupině velkopřůměrových pilot. Rozměry základové krabice jsou 5,4 x 2 x 10 metrů. Krabice je zkosená v podélném směru. Piloty jsou uspořádány ve třech řadách po 5 pilotách.

Do základové krabice budou vetknuté krajní prefabrikáty. Pro vytvoření vetknutí bylo navrženo několik opatření. Část předpínací výztuže bude probíhat základovou krabicí a bude zakotvena na jejím konci. Prefabrikáty budou mít 3 konzolky s vystartovanou betonářskou výztuží, která bude před zmonolitněním základové krabice nastykována s výztuží základové krabice. Těmito konzolkami budou navíc probíhat dva příčné profily HEB200.



Obr. 22 Schéma zakončení krajního prefabrikátu

7.2 Zatížení konstrukce

Lávka je zatížena dle ČSN EN 1991-1, ČSN EN 1991-2. Z užitných zatížení je uvažováno zatížení chodci, rovnoměrné oteplení a ochlazení lávky a zatížení větrem. Pro lokální posudek lávky v příčném směru bylo použito vozidlo údržby dle zadání investora, které má tíhu 4t

7.2.1 Stálá zatížení

Vlastní tíha lávky je dopočítaná ve výpočetním modelu ze zadaných příčných řezů. Objemová tíha předpjatého UHPFRC je uvažována 26 kN/m³. Gravitační zrychlení je uvažováno 9,81 m/s². Do vlastní tíhy je započítaná také tíha zábradlí. Hmotnost ztraceného bednění není započítána.

Předpětí je do konstrukce vneseno jako vynucené zkrácení předpínacích lan.

7.2.2 Zatížení chodci

Pro stanovení zatížení chodci v podélném směru je použit následující vztah zohledňující délku lávky:

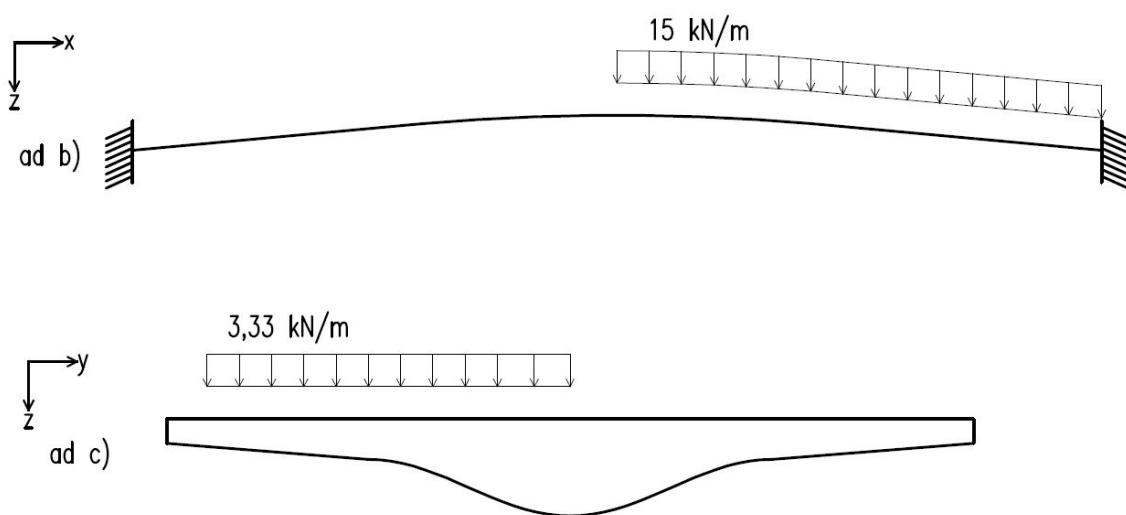
$$q_k^* = 2 + 120 \times (L + 30) = 2 + 120 \times (60 + 30) = 3,3 \text{ kN/m}^2$$

Zatěžovací šířka je 4,5 m.

$$q_k = q_k^* \times 4,5 = 15 \text{ kN/m}$$

Zatížení je uvažované ve třech variantách

- Zatížení chodci po celé délce lávky
- Zatížení chodci na půlce lávky v podélném směru
- Zatížení chodci na půlce lávky v příčném směru



Pro posouzení příčného směru byly plošné modely zatíženy obslužným vozidlem a chodci. V tomto případě bylo zatížení chodci uvažováno 5 kN/m.

7.2.3 Zatížení teplotou

Jako zatížení teplotou je uvažována rovnoměrná složka zatížení teplotou ΔT_u , která je vztažena ke srovnávací teplotě +10 °C a upravená pro typ konstrukce 3.

Lokalita stavby je Hradec Králové. Extrémní teploty vzduchu ve stínu jsou odečteny z národní mapy izoterm a jsou následující:

$$T_{\max} = 38,1 - 40,0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{\min} = -30,1 - -32,0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Rovnoměrné složky teploty pro 3. typ konstrukce:

$$T_{e,\max} = 39 + 1,5 = 40,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{e,\min} = -31 + 8 = -23 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Přepočítání ke srovnávací teplotě 10 °C:

$$\text{Zatížení konstrukce oteplením } +T_0 = 30,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\text{Zatížení konstrukce ochlazením } -T_0 = -23 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Vzhledem k navrženým dilatačním spárám a statické určitosti konstrukce nebudou teplotní změny vnášet do konstrukce přídatné zatížení. Vypočítané hodnoty zatížení teplotou byly použity pro návrh dilatační spáry.

7.2.4 Zatížení větrem

Pro lokalitu stavby Hradec Králové (oblast II) byla stanovena základní rychlost větru $v_b = 25 \text{ m/s}$. Referenční plocha byla stanovena 80 m^2 .

Výsledné příčné zatížení

$$q_w = 0,925 \text{ kN/m}$$

7.3 Zatěžovací stavy

ZS1 – Vlastní tíha lávky se započítáním zábradlí

ZS2 – Předpětí

ZS3 – Zatížení chodci po celé délce lávky

ZS4 - Zatížení chodci na půlce lávky v podélném směru

ZS5 – Zatížení rovnoměrný oteplením

ZS6 – Zatížení rovnoměrným ochlazením

ZS7 – Zatížení větrem

ZS8 - Zatížení chodci na půlce lávky v příčném směru

ZS9 – Zatížení vozidlem údržby (pouze posudek příčného směru)

7.4 Kombinace zatížení

7.4.1 Montážní kombinace

Montážní kombinace zatížení byla použita pro posouzení prefabrikovaných částí konstrukce během převozu a montáže do doby, než budou krajní ramena zmonolitněna se spodní stavbou a než bude předepnuta všechna předpínací výztuž.

MON_01 ZS1 + ZS2

7.4.2 Návrhové kombinace

Podle rovnice 6.10a) normy

NK_01 1,35 x ZS1 + 1 x ZS2 + 0,6 x ZS3 + 0,9 x ZS5 + 0,9 x ZS7

NK_02 1,35 x ZS1 + 1 x ZS2 + 0,6 x ZS3 + 0,9 x ZS6 + 0,9 x ZS7

NK_03 1,35 x ZS1 + 1 x ZS2 + 0,6 x ZS4 + 0,9 x ZS5 + 0,9 x ZS7

NK_04 1,35 x ZS1 + 1 x ZS2 + 0,6 x ZS4 + 0,9 x ZS6 + 0,9 x ZS7

NK_05 1,35 x ZS1 + 1 x ZS2 + 0,6 x ZS8 + 0,9 x ZS5 + 0,9 x ZS7

NK_06 1,35 x ZS1 + 1 x ZS2 + 0,6 x ZS8 + 0,9 x ZS6 + 0,9 x ZS7

Podle rovnice 6.10b) normy

NK_07 1,15 x ZS1 + 1 x ZS2 + 1,5 x ZS3 + 0,9 x ZS5 + 0,9 x ZS7

NK_08 1,15 x ZS1 + 1 x ZS2 + 1,5 x ZS3 + 0,9 x ZS6 + 0,9 x ZS7

NK_09 1,15 x ZS1 + 1 x ZS2 + 1,5 x ZS4 + 0,9 x ZS5 + 0,9 x ZS7

NK_10 1,15 x ZS1 + 1 x ZS2 + 1,5 x ZS4 + 0,9 x ZS6 + 0,9 x ZS7

NK_11 1,15 x ZS1 + 1 x ZS2 + 1,5 x ZS7 + 0,9 x ZS5 + 0,6 x ZS3

NK_12 1,15 x ZS1 + 1 x ZS2 + 1,5 x ZS7 + 0,9 x ZS6 + 0,6 x ZS3

NK_13 1,15 x ZS1 + 1 x ZS2 + 1,5 x ZS5 + 0,6 x ZS3 + 0,9 x ZS7

NK_14 1,15 x ZS1 + 1 x ZS2 + 1,5 x ZS6 + 0,6 x ZS3 + 0,9 x ZS7

NK_15 1,15 x ZS1 + 1 x ZS2 + 1,5 x ZS8 + 0,9 x ZS5 + 0,9 x ZS7

NK_16 1,15 x ZS1 + 1 x ZS2 + 1,5 x ZS8 + 0,9 x ZS6 + 0,9 x ZS7

7.4.3 Provozní kombinace

Charakteristické kombinace

CHAR_01 $ZS1 + ZS2 + ZS3 + 0,6 \times ZS5 + 0,6 \times ZS7$

CHAR_02 $ZS1 + ZS2 + ZS3 + 0,6 \times ZS6 + 0,6 \times ZS7$

CHAR_03 $ZS1 + ZS2 + ZS4 + 0,6 \times ZS5 + 0,6 \times ZS7$

CHAR_04 $ZS1 + ZS2 + ZS4 + 0,6 \times ZS6 + 0,6 \times ZS7$

CHAR_05 $ZS1 + ZS2 + ZS5 + 0,4 \times ZS3 + 0,6 \times ZS7$

CHAR_06 $ZS1 + ZS2 + ZS6 + 0,4 \times ZS3 + 0,6 \times ZS7$

CHAR_07 $ZS1 + ZS2 + ZS8 + 0,6 \times ZS5 + 0,6 \times ZS7$

CHAR_08 $ZS1 + ZS2 + ZS8 + 0,6 \times ZS6 + 0,6 \times ZS7$

Časté kombinace

CAS_01 $ZS1 + ZS2 + 0,4 \times ZS3 + 0,5 \times ZS5$

CAS_02 $ZS1 + ZS2 + 0,4 \times ZS4 + 0,5 \times ZS5$

CAS_03 $ZS1 + ZS2 + 0,6 \times ZS5$

CAS_04 $ZS1 + ZS2 + 0,6 \times ZS6$

CAS_05 $ZS1 + ZS2 + 0,4 \times ZS3 + 0,5 \times ZS6$

CAS_06 $ZS1 + ZS2 + 0,4 \times ZS4 + 0,5 \times ZS6$

CAS_07 $ZS1 + ZS2 + 0,2 \times ZS7 + 0,5 \times ZS5$

CAS_08 $ZS1 + ZS2 + 0,2 \times ZS7 + 0,5 \times ZS6$

Kvazistálé kombinace

KVA_01 $ZS1 + ZS2 + 0,5 \times ZS5$

KVA_01 $ZS1 + ZS2 + 0,5 \times ZS6$

KVA_03 $ZS1 + ZS2$

Příčný směr

PS_01 $ZS1 + ZS9$

PS_02 $ZS1 + ZS8$

7.5 Numerický model

7.5.1 Podélný směr

V první fázi návrhu byla lávka modelována v programu Dlubal RFEM jako prutová konstrukce ve 2D. Takto byla namodelována střednicová křivka lávky, které byla následně rozdělena po dvou metrech a každé části byly přiřazeny příslušné průřezové charakteristiky, získané výpočtem z Bricscadu. Následně byla namodelována křivka spojující těžiště předpínací výztuže v jednotlivých průřezech a ta byla ke střednicové křivce lávky připnuta pomocí vazby typu vetknutí-vetknutí. Pruty znázorňující předpínací výztuž byly následně zatíženy vynuceným zkrácením a tím bylo do modelu vneseno předpětí. Na jedné straně byl model podepřený vetknutím a na druhé straně byl podepřený vetknutím s umožněním pohybu ve směru x (v podélném směru lávky). Tím byly eliminovány pozitivně působící klenbové účinky, které do konstrukce vnášely tlak. Takto vytvořený model fungoval a nevykazoval žádnou nestabilitu.

Ve druhé fázi byl vytvořen v programu Dlubal RFEM prutový model ve 3D. Opět byla



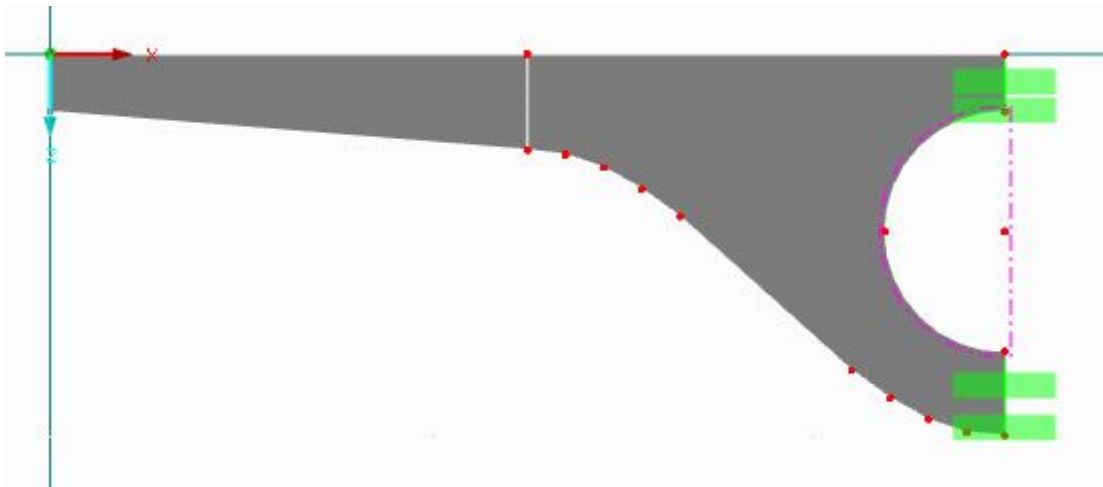
Obr. 24 Střednicová křivka lávky s předepnutím modelovaným na tuhých ramenech

namodelována střednicová křivka lávky, která byla následně rozdělena na části po 1 metru. Průřezy všech těchto částí byly namodelovány a importovány z programu Dlubal SHAPE MASSIVE. Tento model byl předepnutý a podepřený obdobně jako 2D model. Dále bylo provedeno porovnání výsledků prutového 2D a 3D modelu zatíženého vlastní tíhou a předpětím. Výsledky se lišily v řádu jednotek procent.

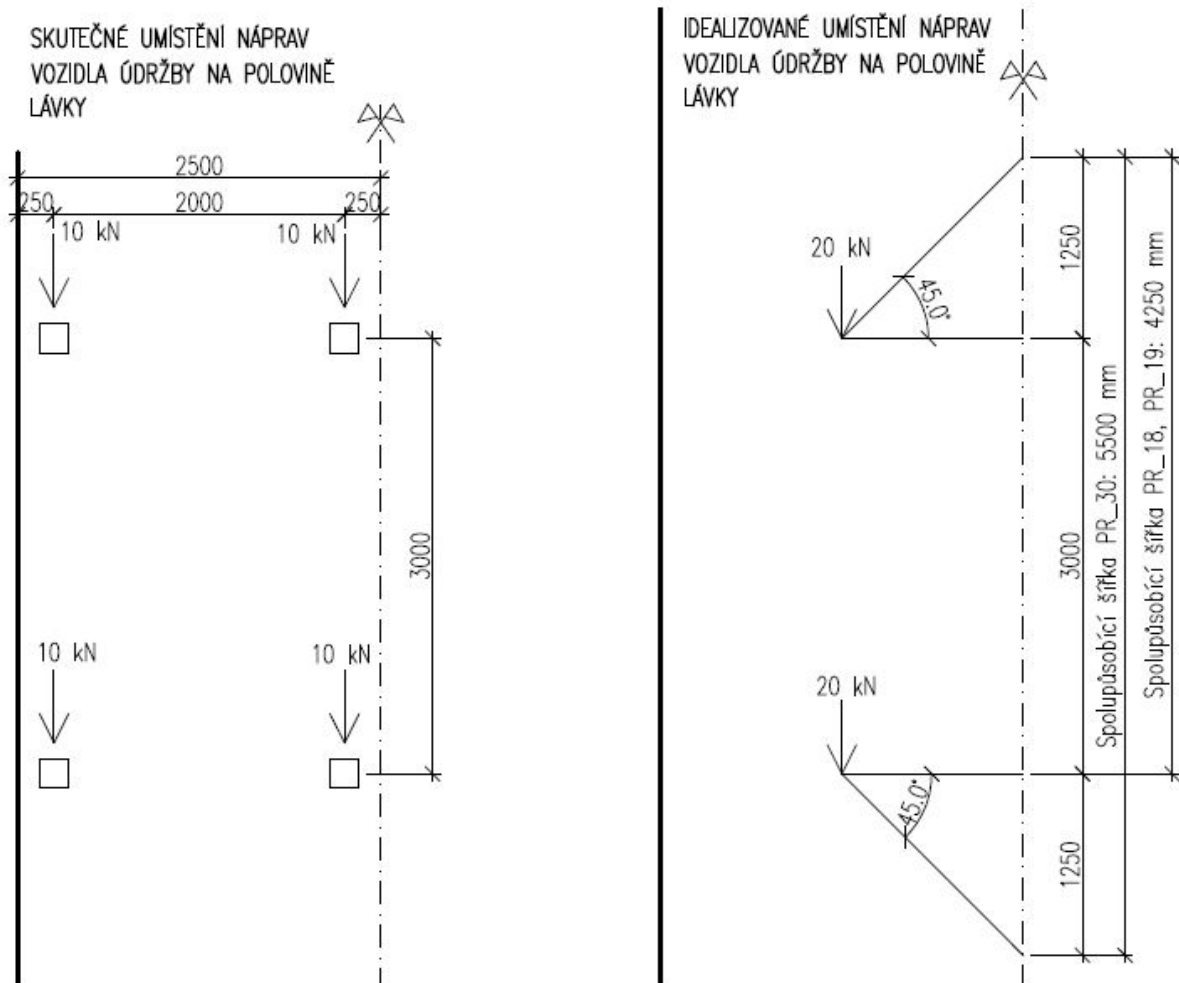
V další fázi byla navržena spodní stavba. Pro návrh byl použit program GEO 5 Skupina pilot, zeminy z geotechnického průzkumu a vnitřní síly z 3D modelu lávky. Iteračním procesem byly v GEO 5 navrženy rozměry základové krabice a počet a délka vetknutých pilot. Přední piloty jsou zatlačovány do zeminy a zadní piloty jsou vytahovány. Rozhodujícím faktorem pro návrh spodní stavby byla únosnost tahových pilot. Z deformací základové krabice od příslušného zatížení lávkou byly spočítány tuhosti. Podepření 3D modelu v RFEM byly změněny z dokonale tuhých na poddajné se spočítanými tuhostmi pro jednotlivé posuny a pootočení. Tímto postupem byla do modelu v RFEM iteračně zavedena interakce se spodní stavbou.

7.5.2 Příčný směr

Pro analýzu příčného směru byly vytvořeny 2D plošné modely, znázorňující půlku osově symetrického příčného řezu s vetknutím na ose symetrie. Tloušťka ploch byla určena podle spolupůsobící šířky (respektive délky). Byly vybrány 3 průřezy lávky, které byly určeny jako rozhodující. Jedná se o průřez PR_18 na konci konzoly, průřez PR_19 na kraji vloženého pole a průřez PR_30 uprostřed vloženého pole, respektive uprostřed lávky. Průřezy PR_18 a PR_19 byly zvoleny, protože se mezi nimi nachází kloub vloženého pole a zatížení v těchto místech se bude roznášet na menší šířku (respektive délku). Průřez PR_30 byl zvolen, protože se jedná o nejsubtilnější průřez ze všech.



Obr. 25 Plošný 2D model průřezu PR_18



Obr. 26 Schéma pro určení spolupůsobící šířky lávky v příčném směru

7.6 Návrh předpětí

Bylo navrženo dodatečné předpětí se soudržností. V krajním poli se nachází 8 osově symetricky umístěných kabelových kanálků. 4 kanálky jsou určeny pro montážní předpětí. V každém z nich se nachází 9 sedmipramenných lan. Zbylými 4 kanálky je vedena výztuž kotvená do základového bloku. Výztuž kotvená v základovém bloku je tvořena 4 x 37 sedmipramennými lany. Střední pole je předepnuté 66 lany v 7 kabelových kanálkách.

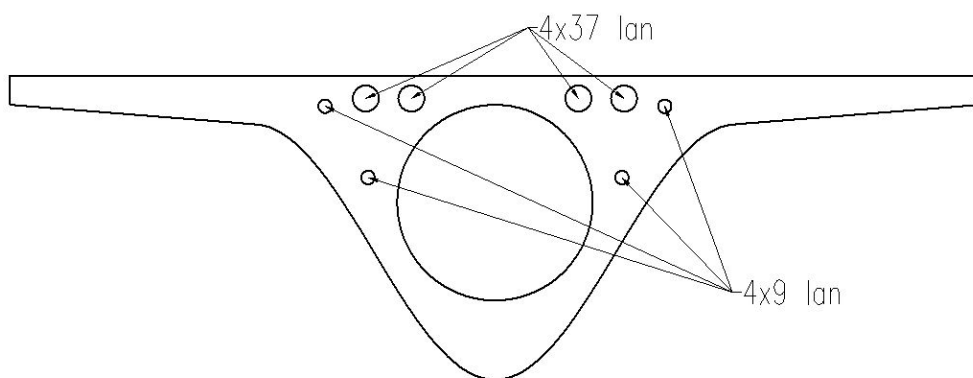
Vedení kabelových kanálků v krajním poli je půdorysně přímé a paralelní s niveletou. Pouze v okolí kotevnic oblastí se kanálky rozbíhají do kotev.

Vedení kabelových kanálků ve středním poli je přímé s výškovým a půdorysným lomem uprostřed rozpětí. Pouze v blízkosti kotevní oblasti jsou kanálky ve výškovém oblouku.

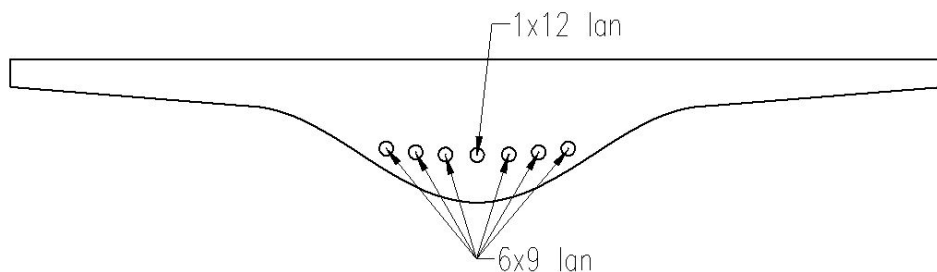
Všechna předpínací výztuž vloženého pole bude napnuta ve 28 dnech a takto bude vložené pole transportováno na místo stavby. Část předpínací výztuže krajního pole bude předepnuta už ve výrobě prefabrikátů po 28 dnech. Zbytek předpínací výztuže bude vedený základovou krabicí a bude předepnutý po zmonolitnění spodní stavby s prefabrikáty.

Pro předepnutí konstrukce budou použita sedmipramenná lana Freyssinet s označením Y-1860-S7-15,7-R2-F1-C1. Průměr jednoho lana je 15,7 mm a plocha jednoho lana je 150 mm².

Minimální krytí kabelových kanálků je 50 mm



Obr. 28 Schéma kabelových kanálků v krajním poli



Obr. 27 Schéma kabelových kanálků ve středním poli

Kabel	počet lan	Plocha lan	Předpínací síla
K1	9	1350 mm ²	1944 kN
K2	12	1800 mm ²	2592 kN
K3	37	5550 mm ²	7992 kN

	K1	K2	K3	Lan celkem	Plocha celkem (mm ²)
Konzola	4	0	4	184	27600
Vl. pole	6	1	0	66	9900

Napínací napětí: $\sigma_{p,max} = 1440$ MPa

Ztráta předpětí byly odhadnuty

Krátkodobé ztráty 10%

Dlouhodobé ztráty 15%

Celkové ztráty 25%

Napětí v předpínací výztuži na začátku životnosti $\sigma_{p,0} = 1296$ MPa

Napětí v předpínací výztuži na konci životnosti $\sigma_{p,00} = 1080$ MPa

Předpínací systém a jeho části

Pro předepnutí konstrukce byl zvolen systém Freyssinet

Předpínací lana Y1860 S7 – 15,7

Kabelové kanálky Plyduct Ø135 mm, Ø75 mm

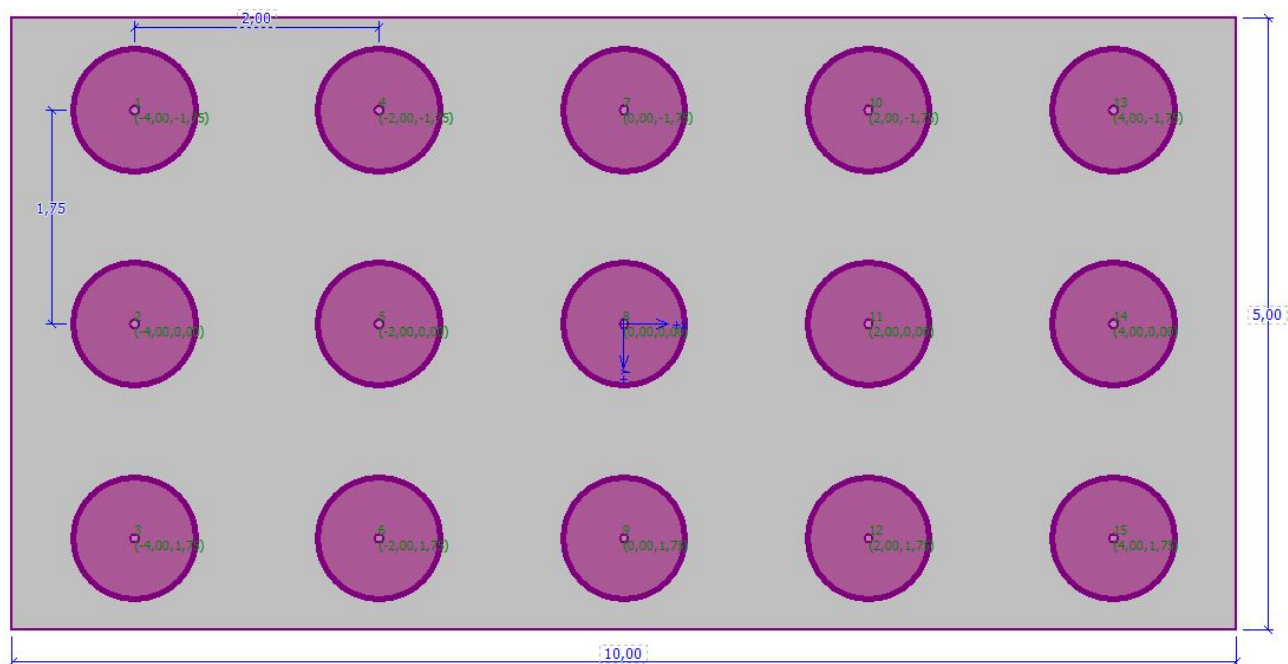
Kotvy 9C15, 12C15, 37C15

Cementová malta Freyssiflow HP 215

7.8 Posouzení konstrukce

7.8.1 Spodní stavba

Bylo navrženo hlubinné založení lávky na skupině velkopřůměrových pilot. Piloty jsou vetknuté do skalního podloží R4. Mají průměr 1 metr a u každé podpěry je jich 5 ve 3 řadách. Opěry jsou namáhány ohybovými momenty a posouvajícími silami od lávky. Díky dilataci nosné konstrukce lávky nejsou piloty příčně namáhány od teplotních změn ani od klenbového účinku vloženého pole.



Obr. 29 Schéma spodní stavby

Základová krabice s pilotami byla namodelována v programu GEO 5 Skupina pilot a následně zatížena maximálními reakcemi ve vetknutí lávky z výpočetního modelu v RFEM Dlubal. Tento výpočet byl zvolený s ohledem na vzájemné možné ovlivňování pilot, které jsou spojeny tuhou deskou (základovou krabicí výšky 1,5-2 m)

Výsledné deformace základové krabice z programu GEO 5 byly použity pro dopočítání tuhostí vetknutí výpočetního modelu Dlubal RFEM.

Výsledné normálové síly v pilotách byly převzaty pro posouzení tažených a tlačných pilot. Pro kontrolu roznosu sil do jednotlivých pilot byl proveden výpočet na jednoduchém modelu v programu RFEM Dlubal. Jedná se o 2D model spodní stavby u kterého je základová krabice modelována jako tuhý prut a piloty jsou modelovány jako podpory.

	GEO 5	Ruční výpočet
Maximální tlak (kN)	1370	1172
Maximální tah (kN)	322	500

Tabulka 3 Porovnání výsledů z GEO 5 a ručního výpočtu

Pro zjednodušení byly na tah a tlak posuzovány maximálně zatížené piloty, které byly brány jako samostatně působící. Tento posudek je na bezpečnou stranu. Výpočet je proveden podle ČSN EN 1997-1 NP2.

Tážená pilota			
	R_{Rd} (kN)	R_{Ed} (kN)	Posouzení
Levý břeh	2959	500	vyhovuje
Pravý břeh	2235	500	vyhovuje

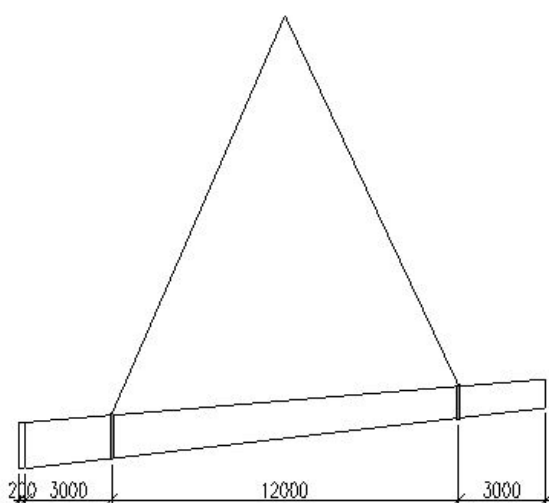
Tlačená pilota			
	R_{Rd} (kN)	R_{Ed} (kN)	Posouzení
Levý břeh	6007	1370	vyhovuje
Pravý břeh	5283	1370	vyhovuje

Tabulka 4 Posouzení pilot na MSÚ

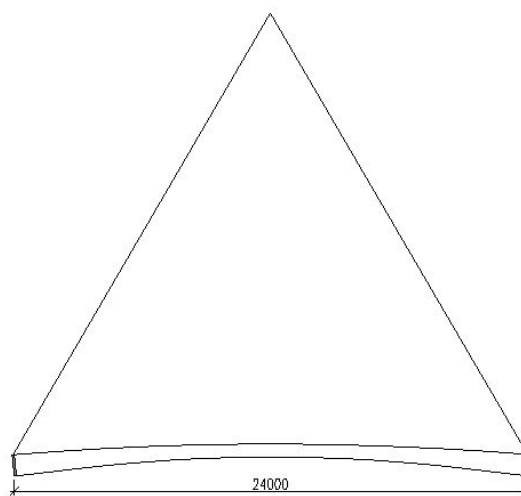
7.8.2 Montážní stavy

Montážní stavy simulují zatížení ramen prefabrikátů během transportu, jejich ukládání a betonáže základová krabice.

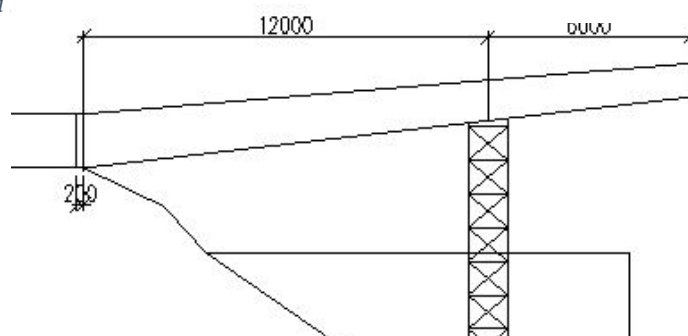
Kritériem pro návrh předpětí při montážních stavech bylo zamezení vzniku tahových napětí na konstrukci. Krajiní ramena byla z toho důvodu částečně předepnuta ještě před transportem a to 36 předpínacími lany ve 4 kabelových kanálcích. Vložené pole bylo kompletně předepnuté ještě před transportem.



Obr. 30 Schéma uchycení



Obr. 32 Schéma uchycení středního pole při montáži



Obr. 31 Schéma podepření krajního pole při betonáži základové krabice

Byly ověřeny dvě varianty postupu předpínání konzol do základové krabice.

1. Postup:

Prefabrikáty jsou dopraveny na místo stavby a montážně podepřeny. Po vybetonování základové krabice je předepnuto 2 x 37 lan, tedy polovina dosud nepředepnuté výztuže. Poté je umístěno vložené pole a nakonec je předepnuta zbývající výztuž

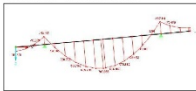
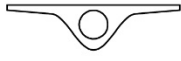




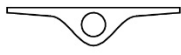



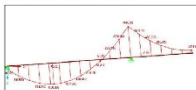
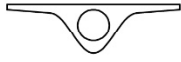




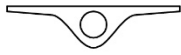


















2. Postup:

Prefabrikáty jsou dopraveny na místo stavby a montážně podepřeny. Po vybetonování základové krabice jsou předepnuta všechna dosud nepředepnutá lana (4 x 37) Poté je umístěno vložené pole.

Při 1. postupu vznikají ve vetknutí tahová napětí při horních vláknech. Je proto vhodnější použít 2. postup. Předpínací výztuž není totiž trasována s takovou excentricitou, aby při druhém postupu vznikaly u nezatížené konzoly tahová napětí při dolních vláknech.

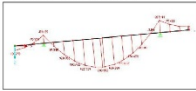
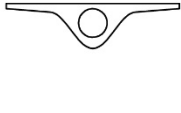

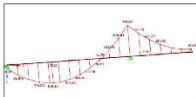
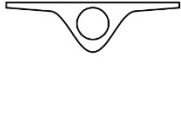




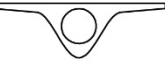
Průběh napětí po průřezech během transportu a montáže

POSTUP 1

<p>1) <u>Transport</u> Charakteristické příčné řezy: PR_09 – maximální moment dolní vlákna</p>	<p>Průběh momentu</p> 	<p>PR_09</p> 	<p>SIGMA N MPa -3,66</p> 	<p>SIGMA M MPa -1,09</p> 	<p>SIGMA V MPa -4,75</p> 
<p>PR_15 – podpora, maximální moment horní vlákna</p>	<p>Průběh momentu</p> 	<p>PR_15</p> 	<p>SIGMA N MPa -3,84</p> 	<p>SIGMA M MPa +0,61</p> 	<p>SIGMA V MPa -3,23</p> 
<p>2) <u>Montážní podepření</u> Charakteristické příčné řezy: PR_05 – maximální moment dolní vlákna</p>	<p>Průběh momentu</p> 	<p>PR_05</p> 	<p>SIGMA N MPa -3,56</p> 	<p>SIGMA M MPa -0,82</p> 	<p>SIGMA V MPa -4,38</p> 
<p>PR_12 – podpora, maximální moment horní vlákna</p>	<p>Průběh momentu</p> 	<p>PR_12</p> 	<p>SIGMA N MPa -3,73</p> 	<p>SIGMA M MPa +1,67</p> 	<p>SIGMA V MPa -2,06</p> 
<p>3) <u>Napnutí 1/2 lan</u></p>	<p>Průběh momentu</p> 	<p>PR_01</p> 	<p>SIGMA N MPa -10,61</p> 	<p>SIGMA M MPa +6,21</p> 	<p>SIGMA V MPa -4,40</p> 
<p>4) <u>Umístění vloženého pole</u></p>	<p>Průběh momentu</p> 	<p>PR_01</p> 	<p>SIGMA N MPa -10,61</p> 	<p>SIGMA M MPa +17,44</p> 	<p>SIGMA V MPa +6,83</p> 
<p>5) <u>Dopnutí zbytku lan</u></p>	<p>Průběh momentu</p> 	<p>PR_01</p> 	<p>SIGMA N MPa -17,30</p> 	<p>SIGMA M MPa +10,92</p> 	<p>SIGMA V MPa -6,38</p> 

Průběh napětí po průřezech během transportu a montáže

POSTUP 2

<p>1) <u>Transport</u> Charakteristické příčné řezy: PR_09 – maximální moment dolní vlákna</p>	<p>Průběh momentu</p> 	<p>PR_09</p>  <p>PR_15</p> 	<table border="0"> <tr> <td>SIGMA N MPa</td> <td>SIGMA M MPa</td> <td>SIGMA V MPa</td> </tr> <tr> <td>-3,66</td> <td>+2,96</td> <td>-0,70</td> </tr> </table>	SIGMA N MPa	SIGMA M MPa	SIGMA V MPa	-3,66	+2,96	-0,70						
SIGMA N MPa	SIGMA M MPa	SIGMA V MPa													
-3,66	+2,96	-0,70													
<p>PR_15 – podpora, maximální moment horní vlákna</p>			<table border="0"> <tr> <td>SIGMA N MPa</td> <td>SIGMA M MPa</td> <td>SIGMA V MPa</td> </tr> <tr> <td>-3,84</td> <td>+0,61</td> <td>-4,38</td> </tr> </table>	SIGMA N MPa	SIGMA M MPa	SIGMA V MPa	-3,84	+0,61	-4,38						
SIGMA N MPa	SIGMA M MPa	SIGMA V MPa													
-3,84	+0,61	-4,38													
<p>2) <u>Montážní podepření</u> Charakteristické příčné řezy: PR_05 – maximální moment dolní vlákna</p>	<p>Průběh momentu</p> 	<p>PR_05</p>  <p>PR_12</p> 	<table border="0"> <tr> <td>SIGMA N MPa</td> <td>SIGMA M MPa</td> <td>SIGMA V MPa</td> </tr> <tr> <td>-3,56</td> <td>+2,26</td> <td>-1,30</td> </tr> <tr> <td>-3,73</td> <td>+1,67</td> <td>-2,06</td> </tr> <tr> <td></td> <td>-4,49</td> <td>-8,22</td> </tr> </table>	SIGMA N MPa	SIGMA M MPa	SIGMA V MPa	-3,56	+2,26	-1,30	-3,73	+1,67	-2,06		-4,49	-8,22
SIGMA N MPa	SIGMA M MPa	SIGMA V MPa													
-3,56	+2,26	-1,30													
-3,73	+1,67	-2,06													
	-4,49	-8,22													
<p>PR_12 – podpora, maximální moment horní vlákna</p>															
<p>3) <u>Napnutí všech lan</u> Charakteristické příčné řezy: PR_09 – maximální moment dolní vlákna</p>	<p>Průběh momentu</p> 	<p>PR_09</p> 	<table border="0"> <tr> <td>SIGMA N MPa</td> <td>SIGMA M MPa</td> <td>SIGMA V MPa</td> </tr> <tr> <td>-17,95</td> <td>-3,51</td> <td>-21,46</td> </tr> <tr> <td></td> <td>+9,49</td> <td>-8,46</td> </tr> </table>	SIGMA N MPa	SIGMA M MPa	SIGMA V MPa	-17,95	-3,51	-21,46		+9,49	-8,46			
SIGMA N MPa	SIGMA M MPa	SIGMA V MPa													
-17,95	-3,51	-21,46													
	+9,49	-8,46													
<p>5) <u>Umístění vloženého pole</u> Charakteristické příčné řezy: PR_01 – maximální moment horní vlákna</p>	<p>Průběh momentu</p> 	<p>PR_01</p> 	<table border="0"> <tr> <td>SIGMA N MPa</td> <td>SIGMA M MPa</td> <td>SIGMA V MPa</td> </tr> <tr> <td>-17,30</td> <td>+10,92</td> <td>-6,38</td> </tr> <tr> <td></td> <td>-30,01</td> <td>-47,31</td> </tr> </table>	SIGMA N MPa	SIGMA M MPa	SIGMA V MPa	-17,30	+10,92	-6,38		-30,01	-47,31			
SIGMA N MPa	SIGMA M MPa	SIGMA V MPa													
-17,30	+10,92	-6,38													
	-30,01	-47,31													

Posouzení krajní pole při montáži (postup 2)					
	Extrémní napětí		Omezení napětí		Posouzení
	min	max	min	max	
PR_00	-3,6	-3,2	-	0,0	Vyhovuje
PR_01	-3,6	-3,3	-	0,0	Vyhovuje
PR_02	-3,5	-3,6	-	0,0	Vyhovuje
PR_03	-3,5	-3,7	-	0,0	Vyhovuje
PR_04	-3,7	-3,3	-	0,0	Vyhovuje
PR_05	-4,0	-2,4	-	0,0	Vyhovuje
PR_06	-4,3	-1,8	-	0,0	Vyhovuje
PR_07	-4,3	-1,1	-	0,0	Vyhovuje
PR_08	-4,7	-0,9	-	0,0	Vyhovuje
PR_09	-4,8	-0,7	-	0,0	Vyhovuje
PR_10	-4,8	-0,6	-	0,0	Vyhovuje
PR_11	-4,8	-0,7	-	0,0	Vyhovuje
PR_12	-4,7	-1,0	-	0,0	Vyhovuje
PR_13	-4,6	-1,6	-	0,0	Vyhovuje
PR_14	-4,3	-2,5	-	0,0	Vyhovuje
PR_15	-3,8	-3,8	-	0,0	Vyhovuje
PR_16	-4,9	-3,5	-	0,0	Vyhovuje
PR_17	-4,6	-3,7	-	0,0	Vyhovuje
PR_18	-3,8	-3,2	-	0,0	Vyhovuje

Tabulka 5 Posouzení napětí v krajním poli při montáži (manipulace s ramenem)

Posouzení krajní pole betonáži základové krabice (postup 2)					
	Extrémní napětí		Omezení napětí		Posouzení
	min	max	min	max	
PR_00	-3,9	-2,6	-	0,0	Vyhovuje
PR_01	-3,6	-3,2	-	0,0	Vyhovuje
PR_02	-3,9	-2,5	-	0,0	Vyhovuje
PR_03	-4,2	-1,6	-	0,0	Vyhovuje
PR_04	-4,4	-1,4	-	0,0	Vyhovuje
PR_05	-4,4	-1,4	-	0,0	Vyhovuje
PR_06	-4,4	-1,3	-	0,0	Vyhovuje
PR_07	-4,3	-1,3	-	0,0	Vyhovuje
PR_08	-4,3	-1,9	-	0,0	Vyhovuje
PR_09	-4,1	-2,5	-	0,0	Vyhovuje
PR_10	-3,8	-3,4	-	0,0	Vyhovuje
PR_11	-3,3	-4,7	-	0,0	Vyhovuje
PR_12	-2,7	-6,4	-	0,0	Vyhovuje
PR_13	-2,5	-7,1	-	0,0	Vyhovuje
PR_14	-2,9	-6,2	-	0,0	Vyhovuje
PR_15	-5,4	-3,2	-	0,0	Vyhovuje
PR_16	-4,9	-3,5	-	0,0	Vyhovuje
PR_17	-4,6	-3,7	-	0,0	Vyhovuje
PR_18	-3,8	-3,2	-	0,0	Vyhovuje

Tabulka 6 Posouzení napětí v krajním poli při betonáži základové krabice (provizorní podepření)

Posouzení střední pole montáž					
	Extrémní napětí		Omezení napětí		Posouzení
	min	max	min	max	
PR_19	-6,6	-5,7	-	0,0	Vyhovuje
PR_20	-6,7	-5,7	-	0,0	Vyhovuje
PR_21	-6,7	-5,9	-	0,0	Vyhovuje
PR_22	-6,7	-5,7	-	0,0	Vyhovuje
PR_23	-6,5	-6,5	-	0,0	Vyhovuje
PR_24	-7,2	-6,2	-	0,0	Vyhovuje
PR_25	-7,8	-6,0	-	0,0	Vyhovuje
PR_26	-8,4	-6,0	-	0,0	Vyhovuje
PR_27	-8,7	-5,8	-	0,0	Vyhovuje
PR_28	-8,9	-5,7	-	0,0	Vyhovuje
PR_29	-9,0	-5,7	-	0,0	Vyhovuje
PR_30	-8,6	-5,9	-	0,0	Vyhovuje

Tabulka 7 Posouzení napětí ve středním poli při montáži

Konstrukce vyhovuje na montážní stavy.

7.8.3 Posouzení mezního stavu únosnosti

Pro výpočet mezních momentů únosnosti jednotlivých řezů byly použity vztahy podle [1], které jsou popsány v kapitole 6.1.2. Výsledné momenty únosnosti byly porovnány s maximálními momenty vznikajícími na konstrukci na konci životnosti.

Posouzení Ohyb				
	M_{ed} (kNm)	M_{Rd} (kNm)	Využití (%)	Posouzení
PR_00	23776	50416	47	Vyhovuje
PR_01	21529	49161	44	Vyhovuje
PR_02	19373	47948	40	Vyhovuje
PR_03	17306	46662	37	Vyhovuje
PR_04	15328	45505	34	Vyhovuje
PR_05	13439	44277	30	Vyhovuje
PR_06	11638	42986	27	Vyhovuje
PR_07	9925	41734	24	Vyhovuje
PR_08	8299	40514	20	Vyhovuje
PR_09	6759	39236	17	Vyhovuje
PR_10	5305	37940	14	Vyhovuje
PR_11	3936	36700	11	Vyhovuje
PR_12	2651	35434	7	Vyhovuje
PR_13	1451	34129	4	Vyhovuje
PR_14	334	32879	1	Vyhovuje
PR_15	1663	19734	8	Vyhovuje
PR_16	1661	19783	8	Vyhovuje
PR_17	1625	20096	8	Vyhovuje
PR_18	1120	24923	4	Vyhovuje
PR_19	372	12126	3	Vyhovuje
PR_20	1105	12196	9	Vyhovuje
PR_21	1283	12209	11	Vyhovuje
PR_22	1455	12167	12	Vyhovuje
PR_23	1603	12040	13	Vyhovuje
PR_24	1756	11844	15	Vyhovuje
PR_25	1874	11608	16	Vyhovuje
PR_26	1992	11362	18	Vyhovuje
PR_27	2101	10992	19	Vyhovuje
PR_28	2181	10574	21	Vyhovuje
PR_29	2292	10064	23	Vyhovuje
PR_30	2390	9560	25	Vyhovuje

Tabulka 8 Posouzení průřezů na ohyb

Posouzení smyk				
	V_{ed} (kN)	V_{Rd} (kN)	Využití (%)	Posouzení
PR_00	2282	4311	53	Vyhovuje
PR_01	2192	4394	50	Vyhovuje
PR_02	2103	4481	47	Vyhovuje
PR_03	2013	4600	44	Vyhovuje
PR_04	1925	4550	42	Vyhovuje
PR_05	1837	4712	39	Vyhovuje
PR_06	1750	4756	37	Vyhovuje
PR_07	1663	4804	35	Vyhovuje
PR_08	1576	4899	32	Vyhovuje
PR_09	1491	4919	30	Vyhovuje
PR_10	1405	4943	28	Vyhovuje
PR_11	1321	4987	26	Vyhovuje
PR_12	1237	5034	25	Vyhovuje
PR_13	1154	5008	23	Vyhovuje
PR_14	1071	5041	21	Vyhovuje
PR_15	992	5062	20	Vyhovuje
PR_16	382	5082	8	Vyhovuje
PR_17	95	4947	2	Vyhovuje
PR_18	360	7556	5	Vyhovuje
PR_19	948	7475	13	Vyhovuje
PR_20	522	7394	7	Vyhovuje
PR_21	221	7210	3	Vyhovuje
PR_22	217	7094	3	Vyhovuje
PR_23	194	7007	3	Vyhovuje
PR_24	203	6721	3	Vyhovuje
PR_25	173	6608	3	Vyhovuje
PR_26	176	6554	3	Vyhovuje
PR_27	170	6492	3	Vyhovuje
PR_28	146	6407	2	Vyhovuje
PR_29	180	6368	3	Vyhovuje
PR_30	177	6249	3	Vyhovuje

Tabulka 9 Posouzení na smyk

Posouzení kotevní oblasti

Kotevní oblast byla navržena podle podkladů výrobce kotev pro pevnost betonu s válcovou pevností 60 MPa. Vzhledem k použití vysokohodnotného betonu, který dosahuje daleko větších tlakových pevností, bylo toto opatření shledáno jako dostatečné pro zabezpečení přenosu tlaků mezi kotvami a betonem.

Konstrukce vyhovuje na mezní stavy únosnosti.

7.8.4 Posouzení mezního stavu použitelnosti

Omezení deformací

Pro lávky pro chodce nejsou normově stanovené maximální deformace. V našem případě lomené lávky s vloženým polem je ale nutné ověřit deformaci na konci konzoly od stálého zatížení a lávku navrhnout s nadvýšením, protože nadměrné deformace od stálého zatížení by kazily celkový vzhled.

Pro tyto potřeby byl proveden nelineární výpočet deformací na konci konzoly od stálého zatížení na konci životnosti, tedy po započítání celkových ztrát předpětí.

Svislý průhyb konce konzoly na konci životnosti:

$$u = 65,2 \text{ mm}$$

Krajní prefabrikáty budou umístěny do příslušné polohy s nadvýšením 65 mm na konci konzoly

Dále byl proveden zkušební výpočet průhybu konce konzoly na konci životnosti s vlivem dotvarování. Podle [1] má tepelné ošetřování UHPC během betonáže velmi pozitivní vliv na jeho dotvarování. Konečný součinitel dotvarování φ lze uvažovat v rozmezí 0,2 – 0,4. Při podrobnější návrhu konstrukce by bylo nutné věnovat dotvarování větší pozornost a případně navrhnout příslušné úpravy konstrukce. Zjednodušené zavedení dotvarování pomocí efektivního modulu pružnosti:

$$E_{c,eff} = E_{cm} / (1 + \varphi) = 55 / (1 + 0,4) = 39,3 \text{ GPa}$$

Svislý průhyb na konci konzoly od stálého zatížení s vlivem dotvarování:

$$u = 87 \text{ mm}$$

Omezení napětí

Mezní hodnoty napětí v betonu při MSP jsou uvažovány podle [2]

	Charakteristická kombinace	Častá kombinace
Beton v tahu	$0,5\sigma_{cf0k}$	$0,4\sigma_{cf0k}$
Beton v tlaku	$0,6f_{ck}$	$0,5f_{ck}$

Tabulka 10 Mezní hodnoty napětí při MSP

Posouzení napětí v betonu na začátku životnosti					
Označení kombinace	Extrémní napětí		Omezení napětí		Posudek
	min	max	min	max	
CHAR_01	-66,1	-0,7	-108	12,5	Vyhovuje
CHAR_02	-66,5	0,8	-108	12,5	Vyhovuje
CHAR_03	-63,7	-1,5	-108	12,5	Vyhovuje
CHAR_04	-64,1	-0,2	-108	12,5	Vyhovuje
CHAR_05	-55,9	-4,7	-108	12,5	Vyhovuje
CHAR_06	-56,6	-2,6	-108	12,5	Vyhovuje
CHAR_07	-57,7	-3,6	-108	12,5	Vyhovuje
CHAR_08	-58,1	-2,4	-108	12,5	Vyhovuje
CAS_01	-56,1	-4,1	-90	10	Vyhovuje
CAS_02	-55,2	-4,4	-90	10	Vyhovuje
CAS_03	-49,4	-4,0	-90	10	Vyhovuje
CAS_04	-49,8	-4,3	-90	10	Vyhovuje
CAS_05	-56,4	-3,0	-90	10	Vyhovuje
CAS_06	-55,2	-4,4	-90	10	Vyhovuje
CAS_07	-49,4	-4,0	-90	10	Vyhovuje
CAS_08	-49,8	-4,3	-90	10	Vyhovuje
KVA_01	-49,4	-4,0	-81	0	Vyhovuje
KVA_02	-49,8	-4,3	-81	0	Vyhovuje
KVA_03=MON_01	-49,2	-4,2	-81	0	Vyhovuje

Tabulka 11 Posouzení napětí v betonu na začátku životnosti

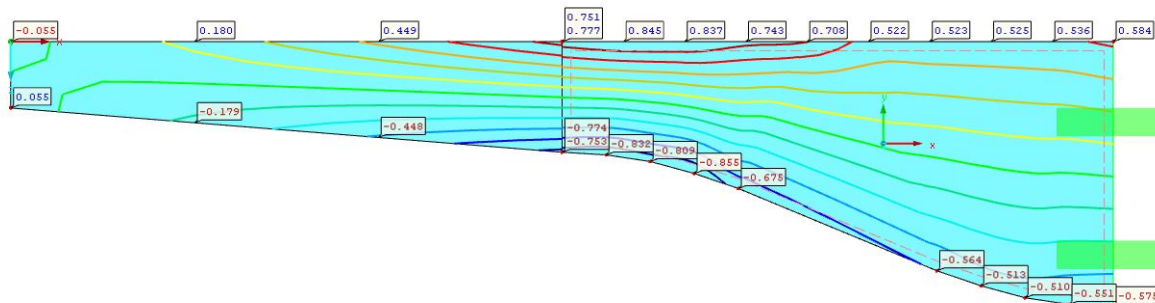
Posouzení napětí v betonu na začátku životnosti					
Označení kombinace	Extrémní napětí		Omezení napětí		Posudek
	min	max	min	max	
CHAR_01	-67,4	9,2	-108	12,5	Vyhovuje
CHAR_02	-67,8	11,7	-108	12,5	Vyhovuje
CHAR_03	-65,0	2,8	-108	12,5	Vyhovuje
CHAR_04	-65,4	5,2	-108	12,5	Vyhovuje
CHAR_05	-57,3	0,5	-108	12,5	Vyhovuje
CHAR_06	-57,9	4,7	-108	12,5	Vyhovuje
CHAR_07	-59,0	2,6	-108	12,5	Vyhovuje
CHAR_08	-59,4	3,1	-108	12,5	Vyhovuje
CAS_01	-57,5	1,7	-90	10	Vyhovuje
CAS_02	-56,5	0,0	-90	10	Vyhovuje
CAS_03	-50,7	-2,2	-90	10	Vyhovuje
CAS_04	-51,1	-0,9	-90	10	Vyhovuje
CAS_05	-57,8	3,8	-90	10	Vyhovuje
CAS_06	-56,5	0,0	-90	10	Vyhovuje
CAS_07	-50,8	-2,1	-90	10	Vyhovuje
CAS_08	-51,1	-1,0	-90	10	Vyhovuje
KVA_01	-50,8	-2,1	-81	0	Vyhovuje
KVA_02	-51,1	-1,0	-81	0	Vyhovuje
KVA_03=MON_01	-50,5	-1,6	-81	0	Vyhovuje

Tabulka 12 Posouzení napětí v betonu na konci životnosti

Konstrukce vyhověla na mezní stavy použitelnosti

7.8.5 Posouzení příčného směru

Posouzení příčného směru bylo provedeno pomocí 2D plošných modelů kritických míst lávky. Bylo stanoveno maximální napětí na konstrukci od zatížení chodci a vozidlem údržby. Výsledné tahy nepřekročily 1MPa a bylo proto konstatováno, že



Obr. 33 Normálové napětí na průřezu PR_30 od zatížení chodci

konstrukce v příčném směru vyhoví a od provozního zatížení nebudou v konstrukci vznikat nepřiměřené tahy.

Extrémy normálového napětí v příčném směru				
Kombinace	PS_01		PS_02	
	MIN	MAX	MIN	MAX
Průřez				
PR_18	-0,907	0,837	-0,855	0,778
PR_19	-0,950	0,846	-0,897	0,786
PR_30	-0,778	0,789	-0,855	0,845

7.9 Postup výstavby

V první fázi budou vyrobeny prefabrikáty z UHPFRC. Předpokládá se tepelné ošetřování prefabrikátů. Po 28 dnech bude část předpínací výztuže napnuta. U prefabrikátů konzol bude před transportem napnuto 9 předpínacích lan ve 4 kanálcích. Celkem 36 ze 148 předpínacích lan. Prefabrikát vloženého pole bude před transportem předepnutý kompletně.

Mezitím bude na místě stavby provedena betonáž pilot a základové desky. Poté se na stavbu dopraví prefabrikáty a jeřábem se umístí do projektované polohy. Následně budou krajní prefabrikáty montážně podepřeny. Kabelové kanálky z prefabrikátů budou provedeny do základové krabice a bude vyvázána betonářská výztuž základové krabice.

V další fázi stavby se provede betonáž základové krabice. Po příslušné době se kabelovými kanálky protáhne zbývající předpínací výztuž a předepne se.

Nakonec se pomocí jeřábu umístí prostřední vložené pole a do připravených úchytnů se namontuje zábradlí

7.10 Mostní vybavení

7.10.1 Uložení

Prefabrikáty jsou vetknuty do spodní stavby a lávka proto neobsahuje ložiska ani mostní závěry

7.10.2 Povrch mostovky

Prefabrikáty jsou navrženy jako přímo pochozí bez dalších dodaných vrstev

7.10.3 Odvodnění

Odvodnění lávky je zabezpečené podélným sklonem lávky v rozmezí 8,33 – 0%. Příčný sklon není navržený.

7.10.4 Zábradlí

Zábradlí se skládá ze sloupků, madla ve výšce 1 metr nad pochozím povrchem lávky a lankovou výplní. Sloupky jsou tvořeny šikmou pásovinou a jsou od sebe vzdálené 1 metr. Zábradlí je šroubované přes patní plech do kotevních prvků, které jsou zabetonované v prefabrikátu.

7.10.5 Dilatační spáry

Dilatační spáry umožňují roztahování a smršťování nosné konstrukce a v tomto případě také eliminují přenos klenbových sil ze středního pole do konzol. Byla navržena dilatační spára šířky 15 mm, která nebude chráněná před zatékáním vody. Voda zateklá do dilatační spáry je odvodněná spádem 0,5% v místě ozubu.

Zatížení konstrukce oteplením $+\Delta T = 30,5 \text{ }^\circ\text{C}$

Zatížení konstrukce ochlazením $-\Delta T = -23 \text{ }^\circ\text{C}$

Maximální protažení konzoly: $\Delta L = \alpha \times \Delta T \times L = 1 \times 10^{-5} \times 30,5 \times 18000 = \underline{5,5 \text{ mm}}$

Maximální zkrácení konzoly: $\Delta L = \alpha \times \Delta T \times L = 1 \times 10^{-5} \times -23 \times 18000 = \underline{-4,1 \text{ mm}}$

Maximální protažení vloženého pola: $\Delta L = \alpha \times \Delta T \times L = 1 \times 10^{-5} \times 30,5 \times 24000 = \underline{7,3 \text{ mm}}$

Maximální zkrácení vloženého pole: $\Delta L = \alpha \times \Delta T \times L = 1 \times 10^{-5} \times -23 \times 24000 = \underline{-5,5 \text{ mm}}$

Navržená šířka dilatační spáry: $\check{s}_0 = \underline{15 \text{ mm}}$

Minimální šířka dilatační spáry: $\check{s}_- = 15 - 5,5 - (7,3/2) = \underline{5,8 \text{ mm}}$

Maximální šířka dilatační spáry: $\check{s}_+ = 15 + 4,1 + (5,5/2) = \underline{21,9 \text{ mm}}$

Závěr

Cílem práce bylo navrhnout přemostění řeky Labe v Hradci Králové pro pěší a cyklisty v souladu se zadáním architektonické soutěže, která proběhla v roce 2014. Byly navrženy 3 varianty, ze kterých byla jedna vybrána a dále zpracována.

Navržená konstrukce byla posouzena na mezní stavy použitelnosti a mezní stavy únosnosti a v obou mezních stavech vyhověla.

Výstupem práce je návrh přemostění na dané zadání, výkresy jednotlivých variant, podrobná výkresová dokumentace vítězného návrhu, statický posudek a vizualizace vybraného návrhu.

Seznam použité literatury

- [1] FEHLING Ekkehard, SCHMIDT Michael, WALRAVEN Jost, LEUTBECHER Torsten, FRÖHLICH Sussane. *Ultra-High Performance concrete UHPC*. Wilhelm Ernst & Sohn, 2014. 188s. ISBN 978-3-433-03087-5
- [2] KALNÝ Milan, KOMANEC Jan, KVASNIČKA Václav, KOLÍSKO Jiří, TEJ Petr. *Metodika 2 – Metodika pro navrhování prvků z UHPC*, výstup projektu TA01010269. Kloknerův ústav ČVUT v Praze, 2014. 18s. Dostupné na webové str. <http://www.klok.cvut.cz/wp-content/uploads/2016/02/Metodika-2-Navrhování-UHPC.pdf>
- [3] ČSN EN 1991-1-1 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-1: Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb. Český normalizační institut, 2004. 44s.
- [4] ČSN EN 1991-2-1 Eurokód 2: Zatížení konstrukcí – Část 2: Zatížení mostů dopravou. Český normalizační institut, 2004. 44s.
- [5] ČSN EN 1992-2 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 2: Betonové mosty – Navrhování a konstrukční zásady, Český normalizační institut, 2007. 90s.
- [5] ČSN EN 1997-1 Eurokód7: Navrhování geotechnických konstrukcí – Část 1: Obecná pravidla, Český normalizační institut, 2006. 138s
- [6] MASOPUST Jan. *Vrtané piloty*. Čeněk a Ježek, 1994. 264s. ISBN 80-238-2755-3
- [7] CHEN Wai Fah, DUAN Lian. *Handbook of international bridge engineering*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis group, 2014. ISBN 978-1-4398-1029-3
- [8] VANÍČEK Ivan, ČIHÁKOVÁ Tereza, JIRÁSKO Daniel, KOS Jan, SALÁK Jan, VANÍČEK Martin. *Projektování základových a zemních konstrukcí*. České vysoké učení technické, 2016. ISBN 978-80-01-05913-5

Seznam obrázků

Obr. 1 Ortofoto lokality s vyznačeným umístěním lávky	9
- Převzato ze zadávací dokumentace soutěže	
Obr. 2 Vzorový příčný řez lávky v Hýskově	11
Dostupné na webové stránce: http://www.stavbaroku.cz/db_image/site_large/7739.JPG	
Obr. 3 Pohled na lávku v Hýskově	11
Dostupné na webové stránce: http://www.stavbaroku.cz/db_binary_file/plans/3659.pdf	
Obr. 4 Pohled na Beachcroft bridge	12
http://www.nzta.govt.nz/assets/projects/mhc/resources/pdf/beachcroft-footbridge-design.pdf	
Obr. 5 lávka Sakata Mirai	13
https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/hpc/13060/images/fig20.jpg	
Obr. 6 Pohled na Pont du Diable	13
https://42mzqz26jebqf6rd034t5pef-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2016/04/pont.jpg	
Obr. 7 Příčný řez lávky Pont du Diable	14
Dostupné na webové stránce: http://www.abece.com.br/web/restrito/restrito/pdf/ch048.pdf	
Obr. 8 Pohled na Pont de la Chabotte	14
https://www.researchgate.net/publication/283637789_Construction_du_pont_de_la_Chabotte_en_BFU_P_sur_l'autoroute_A51	
Obr. 9 Příčný řez lávky Pont de la Chabotte	14
https://www.researchgate.net/publication/283637789_Construction_du_pont_de_la_Chabotte_en_BFU_P_sur_l'autoroute_A51	
Obr. 10 Příčný řez a pohled na lávku přes Svratku v Brně-Komárově	15
http://www.shp.eu/picture/gallery//lavky-obloukove-brno-komarov/previews/brno-komarov-02.gif	
Obr. 11 Pohled na lávku přes Vltavu v Českých Budějovicích	16
http://www.shp.eu/picture/gallery//lavky-obloukove-ceske-budejovice/previews/lavky-obloukove-ceske-budejovice-05.gif	
Obr. 12 Příčný řez lávkou přes Vltavu v Českých Budějovicích	16
http://www.shp.eu/picture/gallery//lavky-obloukove-ceske-budejovice/previews/lavky-obloukove-ceske-budejovice-01.jpg	
Obr. 13 Zjednodušený pracovní diagram UHPC v tlaku	22
Obr. 14 Rozdělení napětí po průřezu při MSÚ	22
Obr. 15 Pohled na polovinu konstrukce	25
Obr. 16 Tvar krajního prefabrikátu	25
Obr. 17 Tvar středního prefabrikátu	25
Obr. 18 Průřez v místě vetknutí	26

Obr. 19 Průřez uprostřed rozpětí	26
Obr. 20 Pohled na polovinu lávky	26
Obr. 21 Statické schéma konstrukce	27
Obr. 22 3D model lávky s přiřazenými průřezy	33
Obr. 23 Střednicová křivka lávky s předepnutím modelovaným na tuhých ramenech	33
Obr. 24 Plošný 2D model průřezu PR_18	34
Obr. 25 Schéma pro určení spolupůsobící šířky lávky v příčném směru	35
Obr. 26 Schéma kabelových kanálků ve středním poli	36
Obr. 27 Schéma kabelových kanálků v krajním poli	36
Obr. 28 Schéma spodní stavby	38
Obr. 29 Schéma uchycení středního pole při montáži	39
Obr. 30 Schéma uchycení krajního pole při montáži	39
Obr. 31 Schéma podepření krajního pole při betonáži základové krabice	39

Seznam tabulek

Tabulka 1 Dílčí materiálové součinitele UHPC	21
Tabulka 2 Materiálové charakteristiky UHPC	24
Tabulka 3 Porovnání výsledů z GEO 5 a ručního výpočtu	38
Tabulka 4 Posouzení pilot na MSÚ	39
Tabulka 5 Posouzení napětí v krajním poli při montáži (manipulace s ramenem)	43
Tabulka 6 Posouzení napětí v krajním poli při betonáži základové krabice (provizorní podepření)	44
Tabulka 7 Posouzení napětí ve středním poli při montáži	45
Tabulka 8 Posouzení průřezů na ohyb	46
Tabulka 9 Posouzení na smyk	47
Tabulka 10 Mezní hodnoty napětí při MSP	49
Tabulka 11 Posouzení napětí v betonu na začátku životnosti	49
Tabulka 12 Posouzení napětí v betonu na konci životnosti	50

Použitý software

RFEM Dlubal 5.06

RFEM SHAPE_MASSIVE 6.58

MS Excel 2013

MS Word 2013

Bricscad 2016

Seznam příloh

P01 – Varianty řešení

P01_01_VATIANTA A

P01_02_VATIANTA B

P01_03_VATIANTA C

P02 – Výkresová dokumentace

P02_01_PŮDORYS

P02_02_POHLED

P02_03_PODÉLNÝ ŘEZ

P02_04_PŘÍČNÉ ŘEZY

P02_05_VÝKRES PŘEDPÍNACÍ VÝZTUŽE

P02_06_DETAILS

P02_07_SCHÉMA BETONÁŘSKÉ VÝZTUŽE

P03 – STATICKÝ VÝPOČET

P03_01_STATICKÝ VÝPOČET

P03_02_VNITŘNÍ SÍLY Z MODELŮ

P04 – VIZUALIZACE

P04_01_VIZUALIZACE 1

P04_02_VIZUALIZACE 2

P04_03_VIZUALIZACE 3

P04_04_ZÁKRES DO FOTOGRAFIE 1