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

TRÁMOVÝ MOST NAD MÍSTNÍ KOMUNIKACÍ

BEAM BRIDGE OVER A LOCAL ROAD

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE Edita Kunčarová

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. RADIM NEČAS, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2020

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3647R013 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav betonových a zděných konstrukcí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Edita Kunčarová
Název	Trámový most nad místní komunikací
Vedoucí práce	Ing. Radim Nečas, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2019
Datum odevzdání	22. 5. 2020

V Brně dne 30. 11. 2019

PODKLADY A LITERATURA

Podklady:
Situace, příčný a podélný řez, geotechnické poměry
Základní normy:
ČSN 736201: 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: na základě doporučení vedoucího práce

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Z předběžného návrhu možných typů mostních konstrukcí preferujte trámovou konstrukci o jednom poli z předpjatého betonu.
V práci zpracujte dvě až tři studie mostu včetně jejich zhodnocení. Most můžete navrhnout kolmý.
Dimenzování proveďte podle EN v rozsahu stanoveném vedoucím práce.
Ostatní úpravy provádějte podle pokynů vedoucího práce.
Požadované výstupy:
Textová část (obsahuje zprávu a ostatní náležitosti podle níže uvedených směrnic)
Přílohy textové části:
P1. Podklady, studie a vizualizace
P2. Přehledné a podrobné výkresy zvoleného návrhu mostu
P3. Statický výpočet (v rozsahu určeném vedoucím práce)
Prohlášení o shodě listinné a elektronické formy VŠKP (1x).
Popisný soubor závěrečné práce (1x).
Bakalářská práce bude odevzdána v listinné a elektronické formě a pro ÚBZK 1x na CD.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ 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).

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

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je navržení mostu o jednom poli, vedoucí přes místní komunikaci. V rámci práce byly zpracovány tři varianty řešení, přičemž dále byla rozvedena jedna z nich. Konstrukce je navržena a posouzena na mezní stav únosnosti a mezní stav použitelnosti. Výpočet probíhal pomocí kombinace ručního a softwarového řešení.

Výpočet a grafické vyobrazení vnitřních sil bylo provedeno v programu Scia Engineer 19.1.

KLÍČOVÁ SLOVA

trámový most, předpjatý beton, beton, jednopolový, most, místní komunikace, mezní stav únosnosti, mezní stav použitelnosti ...

ABSTRACT

The aim of this thesis is to design a one-span pre-stressed bridge structure over a local road. There are three possible versions of this particular construction designed as a part of this thesis, one of which was chosen for further design. The structure has been designed and calculated for the ultimate limit state as well as the service limit state. The calculations were made both by software and manually.

Scia Engineer 19.1 has been used for software calculations and for the display of internal forces.

KEYWORDS

girder bridge, pre-stressed concrete, concrete, one span, bridge, local road, ultimate limit state, service limit state. ...

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Edita Kunčarová *Trámový most nad místní komunikací.* Brno, 2020. 37 s., 159 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav betonových a zděných konstrukcí. Vedoucí práce Ing. Radim Nečas, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Trámový most nad místní komunikací* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 3. 6. 2020

_____

Edita Kunčarová

autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Trámový most nad místní komunikací* zpracoval(a) samostatně, a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 3. 6. 2020

_____

Edita Kunčarová

autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěla všem vyučujícím, kteří se prostřednictvím výkladů, konzultací a přednášek podíleli na nabytí vědomostí, které byly zúročeny při tvorbě této práce. Speciální dík patří panu Ing. Radimu Nečasovi, Ph.D., jak za odborné a věcné tipy, tak za vstřícný přístup a skvělou komunikaci i v nelehké situaci, se kterou jsme se po většinu doby zpracování protýkali.

Dále všem svým kolegům, kteří můj profesně-studijní život velmi obohatili. A i přesto, že se jedná o ne zcela související obory, věřím, že se zkušenosti ze všech pracovních projektů na této práci pozitivně podepsaly.

A v neposlední řadě rodině a své studijní skupině s krycím jménem *Raketáci*, po jejichž boku jsem se probojovala až do této fáze akademického života.

Děkuji!

OBSAH

1. ÚVOD 11
2. PRŮVODNÍ A TECHNICKÁ ZPRÁVA 12
2.1. OBECNÉ ÚDAJE 12
2.2. ZÁKLADNÍ ÚDAJE 12
3. STUDIE VARIANT 13
3.1. VARIANTA 1 13
3.2. VARIANTA 2 13
3.3. VARIANTA 3 14
4. MOST 16
4.1. HLAVNÍ NOSNÁ KONSTRUKCE 16
4.2. ZALOŽENÍ A SPODNÍ STAVBA 16
4.3. SVRŠEK 16
4.4. ULOŽENÍ MOSTU 17
4.5. MOSTNÍ ZÁVĚRY 17
4.6. ODVODNĚNÍ 17
4.7. ŘÍMSY 18
4.8. MOSTNÍ VYBAVENÍ 18
4.9. POSTUP A TECHNOLOGIE VÝSTAVBY 18
5. VOLBA MATERIÁLU 20
5.1. BETON 20
5.2. PŘEDPÍNACÍ VÝZTUŽ 20
5.3. BETONÁŘSKÁ VÝZTUŽ 20
6. ZATÍŽENÍ 21
6.1. STÁLÉ 21
6.1.1. VLASTNÍ TÍHA 21
6.1.2. OSTATNÍ STÁLÉ 21
6.2. ZATÍŽENÍ PROMĚNNÉ – DOPRAVA 21
6.2.1. LM1 21
6.2.2. LM3 22
6.2.3. LM4 23

6.2.4. KOMBINACE & SHRNUTÍ 23
7. POSTUP PŘI ZPRACOVÁNÍ NÁVRHU A POSUDKU 24
7.1. STATICKÉ SCHÉMA 24
8. PŘEDPĚTÍ 25
8.1. ZTRÁTY 26
9. OVĚŘENÍ MEZNÍCH STAVŮ 27
9.1. MEZNÍ STAV POUŽITELNOSTI 27
9.2. MEZNÍ STAV ÚNOSNOSTI 27
9.2.1. PODÉLNÝ SMĚR 27
9.2.2. PŘÍČNÝ SMĚR 28
10. DESKOVÉ MODELY 29
11. KOTEVNÍ OBLAST 33
12. ZÁVĚR 34
13. SEZNAM OBRÁZKŮ 35
14. SEZNAM ZDROJŮ 36
15. SEZNAM PŘÍLOH 37

1. ÚVOD

Cílem této bakalářské práce je navrhnou most, převádějící silnici II. třídy přes místní komunikaci. Ve stručné studii byly zpracovány tři varianty, ze kterých byla jedna vybrána pro detailnější návrh, zpracování dokumentace a statické posouzení nosné konstrukce.

Konstrukce byla zatížena stálým i proměnným zatížením viz kapitola *6. Zatížení*.

Posudky byly provedeny v podélném a v omezené míře i příčném směru, dle platných norem.

Ve výpočtu byla aplikována zjednodušení. Postup výpočtu je blíže popsán v kapitole *7. Postup při zpracování posudku a výpočtu.*

Statický výpočet je doplněn o výkresovou dokumentaci a vizualizaci zvolené varianty.

2. PRŮVODNÍ A TECHNICKÁ ZPRÁVA

2.1. OBECNÉ ÚDAJE

Stavba	Betonový trámový most
Název	Most v obci Želechovice nad Dřevnicí
Evidenční číslo	183130
Předmět přemostění (překážka):	místní komunikace
Kraj	Zlínský
Okres	Zlín
Katastrální území:	Želechovice nad Dřevnicí
Úhel křížení:	90 °
Pozemní komunikace:	III/1831
Kategorie pozemní komunikace:	místní komunikace

2.2. ZÁKLADNÍ ÚDAJE

Poloha mostovky:	horní
Doba trvání:	100 let
Šikmost	90°
Délka přemostění	27,47 m
Délka nosné konstrukce	30,1 m
Délka mostu	39,73 m
Počet polí	1
Šířka vozovky	7,5 m
Šířka chodníků	1,25 m
Šířka římsy (L/P)	1,55 m
Šířka mostu	10,6 m
Šířka nosné konstrukce	10,1 m
Příčný sklon	2,5 %
Podélný sklon	-1,5 %

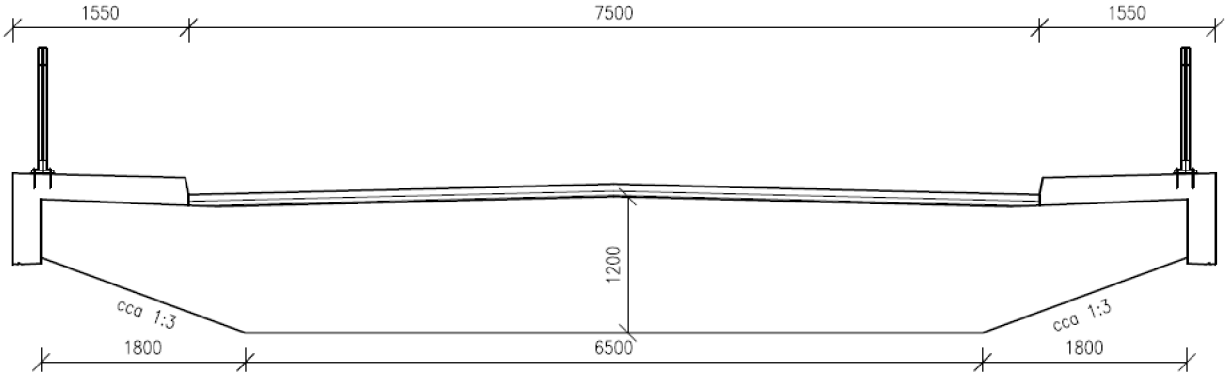
3. STUDIE VARIANT

V rámci studie byly zpracovány tři návrhy. Většina geometrických vlastností jednotlivých konstrukcí přemostění je pro všechny tři varianty totožná nebo se liší jen pouze nepatrně. Uložení na spodní stavbu je uvažováno prostřednictvím čtyř hrncových ložisek – schéma viz kapitola **4.4. ULOŽENÍ MOSTU.**

3.1. VARIANTA 1

MOST TVOŘENÝ MONOLITICKOU PŘEDPJATOU DESKOU

Varianta 1 uvažuje hlavní nosnou konstrukci tvořenou monolitickou, dodatečně předpjatou deskou, jejíž rozměry byly stanoveny dle běžně užívaných doporučení. Výška nosné desky v ose komunikace, též tedy v ose mostu, je 1200 mm, na stranách je deska zešikmena ve sklonu cca 1:3.



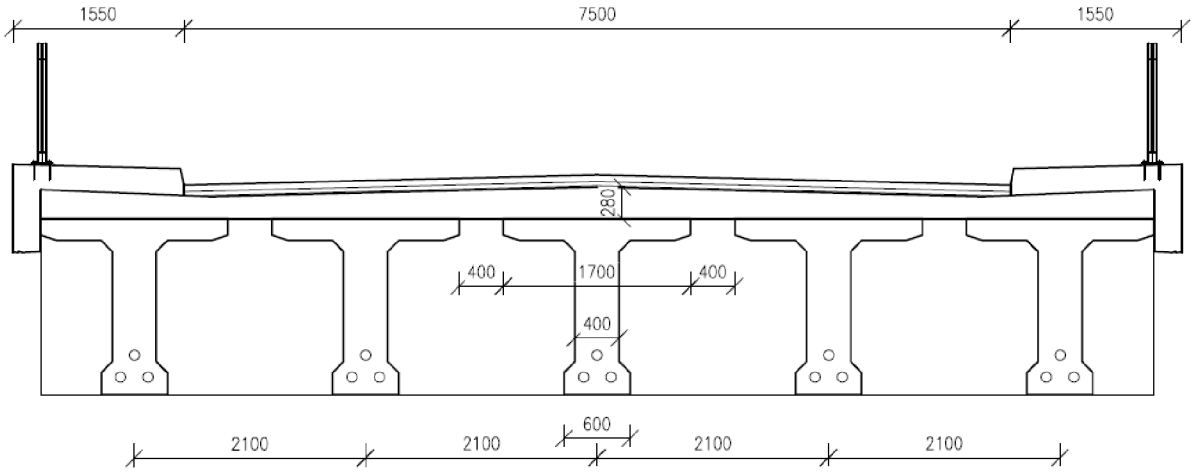
Obrázek 1 Příčný řez – Varianta 1

3.2. VARIANTA 2

MOST Z PREFABRIKOVANÝCH NOSNÍKŮ

Jako druhá varianta byl navržen most z prefabrikovaných nosníků, konkrétně z dodatečně předpínaných odlehčených nosníků – KSP-NDPO tvaru T, které jsou spřaženy železobetonovou deskou minimální výšky 290 mm v ose komunikace. Šířka stojiny je 400 mm, výška nosníku 1600 mm, což odpovídá doporučení pro mosty délky 27–30 m, dané výrobcem. Nosníky mají být dodatečně předepnuty kabely o 12–13 lanech průměru Lp 15,5–1800 s využitím kotevního systému Skanska, případně jiného rovnocenného předpínacího a kotevního systému.

**Prefabrikované nosníky ze sortimentu KŠ PREFA s.r.o.*

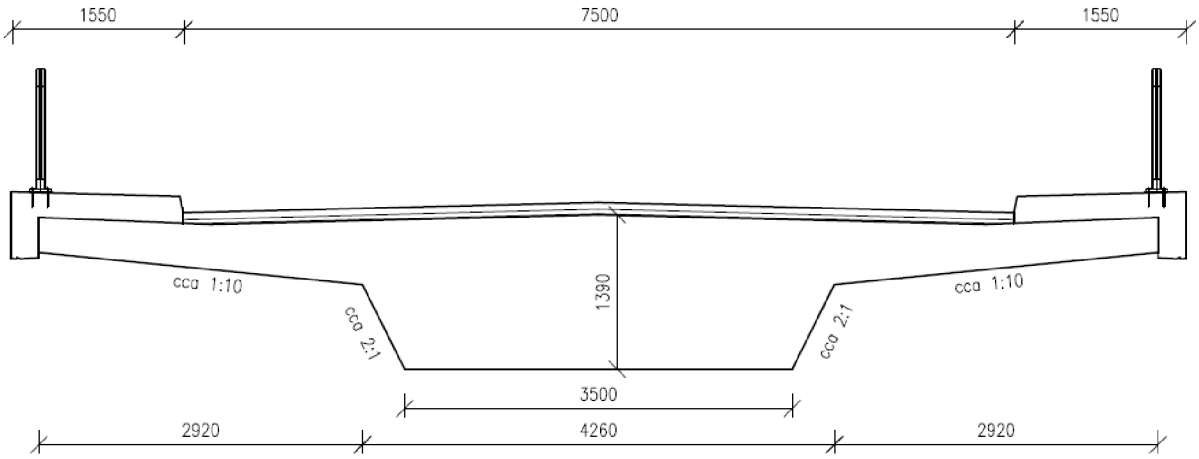


Obrázek 2 Příčný řez – Varianta 2

3.3.VARIANTA 3

JEDNOTRÁMOVÝ MOST

Monolitický jednotrámový most s konstantním průřezem po celé délce mostu. Po stranách hlavní nosné části trámu jsou vykonzolované části průřezu, shodné délky 2920 mm na obou stranách, mají proměnnou výšku, spodní hrana je provedena ve sklonu cca 1:10. Přechod mezi konzolami a trámem je plynulý ve sklonu cca 2:1. Trám bude předepnut kabely, které jsou ve středu rozpětí rozmístěny rovnoměrně po šířce hlavní nosné části průřezu v jedné výškové úrovni.



Obrázek 3 Příčný řez – Varianta 3

VOLBA VARIANTY

Jako finální varianta, určená pro podrobnější návrh a následné statické posouzení včetně tvorby výkresové dokumentace, byla zvolena varianta 3.

Vzhledem k podobnosti variant a charakteru projektu (nejedná se o reálný projekt, u kterého by bylo třeba zabývat se dopravou materiálů/dílců na staveniště, případnými omezeními, způsobenými stavbou, mající vliv na dopravní situaci v okolí) je volba varianty poměrně subjektivní záležitostí, podložena především osobní preferencí, a to jak z konstrukčního, tak i estetického hlediska.

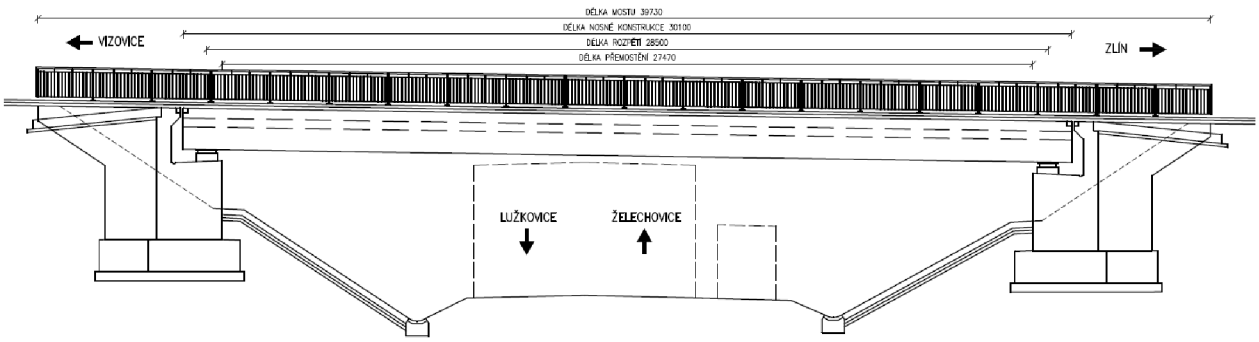
4. MOST

4.1. HLAVNÍ NOSNÁ KONSTRUKCE

Hlavním nosným prvkem celé konstrukce je předpjatý trám lichoběžníkového průřezu. Jeho výška ve svislé těžištní ose činí 1,39 m. Trám je hostitelem 10 předpínacích kabelů, přičemž každý kabel je složen z 19 lan o průměru 15,7 mm. Při obou površích je v provedeno vyztužení betonářskou výztuží.

4.2.ZALOŽENÍ A SPODNÍ STAVBA

Založení není předmětem této BP. Mostní opěry, závěr a přechodová deska nebyli v této BP posuzovány, pro zpracování výkresové dokumentace byly jejich tvary odhadnuty empiricky. Byl zvolen beton C30/37. Horní povrch úložného prahu je zhotoven ve spádu 4 % směrem k závěrné zídce. Mostní křídla kopírují půdorysný směr osy komunikace.



Obrázek 4 Podélný řez mostem

4.3. SVRŠEK

Vozovka o celkové tloušťce 110 mm (*) se skládá z:

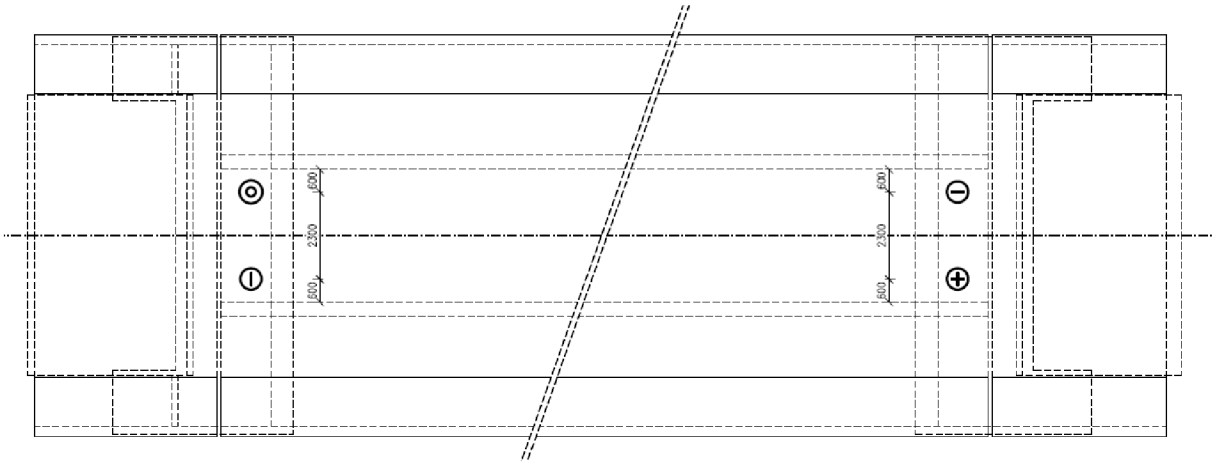
Asfaltový beton pro obrusnou vrstvu ACO 11	60 mm
Spojovací postřik pro asfaltovou emulzi 0,18 kg/m^2	
Asfaltový beton pro ložní vrstvu ACL 16	40 mm
Asfaltový izolační pás	10 mm
Celkem	**110 mm**

*ve výpočtu zatížení je uvažováno případně snížení na 80 % tloušťky, či zvýšení až na 140 % původně zamýšlené tloušťky.

4.4. ULOŽENÍ MOSTU

Most je uložen na hrncových ložiscích Freyssinet.

- Pevné hrncové ložisko TETRON FX 5000–500
- Všesměrně posuvné hrncové ložisko TETRON GL 5000–500–20
- 2x Jednosměrně posuvné hrncové ložisko TETRON GG 5000–500–20



Obrázek 5 Schéma uložení mostu

4.5. MOSTNÍ ZÁVĚRY

Návrh mostního závěru není předmětem této bakalářské práce.

4.6. ODVODNĚNÍ

Odvodnění povrchu vozovky je zajištěno střechovitým sklonem vozovky 2,5 %, společně se sklonem nivelety, který je 1,5 % klesající ve směru staničení.

Před mostním závěrem budou zřízeny mostní odvodňovače odvádějící vodu přitékající na most, které budou vyvedeny skrz obě mostní křídla opěry 1. Za mostem bude voda svedena pomocí skluzů do vývařiště, odkud bude odvedena stávajícím příkopem. Drenáž rubu opěr je spádována ve sklonu 3 % do středu opěry odkud je zapuštěnými tvárnicemi vedena do příkopu lemující převáděnou komunikaci.

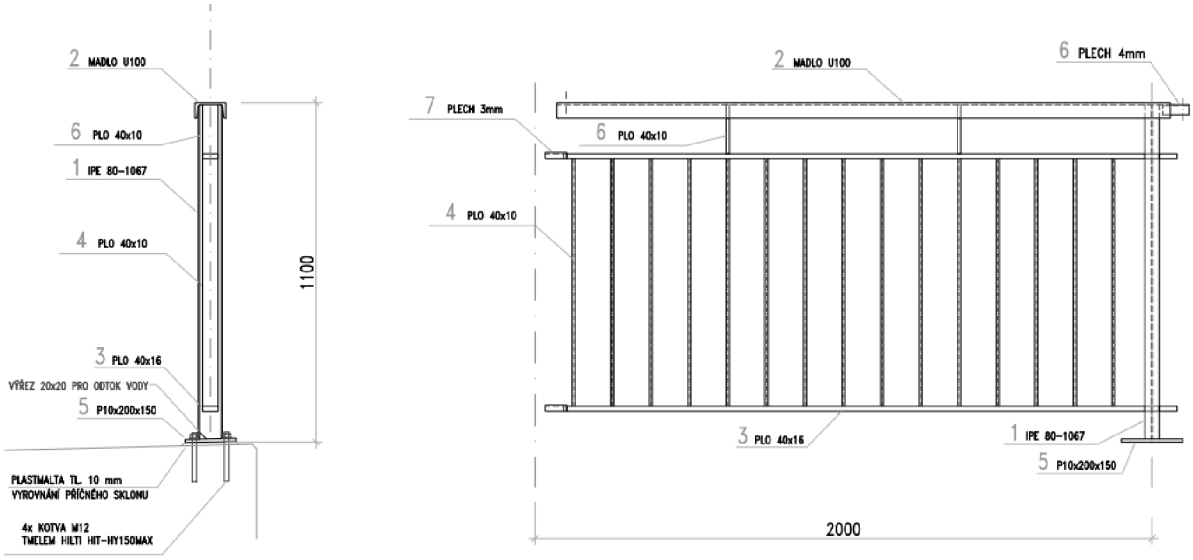
4.7. ŘÍMSY

Monolitické římsy jsou provedeny na obou stranách mostu, jejich sklon je 2,5 %. Římsy jsou symetrické, stejně jako zbytek mostu, jejich šířka je 1,55 m. Na vnějším okraji mají výšku 0,6 m. Spodní líc říms je spádovaný a opatřený ozubem dle TP.

Římsy budou sloužit jako chodník pro pěší, prostorové uspořádání je v souladu s ČSN 73 6201.

4.8. MOSTNÍ VYBAVENÍ

S ohledem na charakter a maximální dovolenou rychlost na převáděné komunikaci nebudou na mostě zřízena svodidla. Při vnějším okraji říms budou upevněna mostní zábradlí z otevřených válcovaných profilů 1,1 m nad povrchem římsy. Jednotlivé sloupky jsou od sebe vzdáleny 2 m, výplň mezi sloupky má vzájemné mezery do 120 mm v souladu s TP 186.



Obrázek 6 Schéma mostního zábradlí

4.9. POSTUP A TECHNOLOGIE VÝSTAVBY

I. Skrývka ornice
II. Zemní práce – výkopy pro základové konstrukce
III. Betonáž základů
IV. Betonáž spodní stavby
V. Osazení ložisek

VI. Bednění a betonáž hlavní nosné konstrukce

VII. Předpínání nosné konstrukce

VIII. Dobetonování kotevní oblasti a závěrné zídky

IX. Dodatečné zemní práce – dosypání okolo konstrukce

X. Zřízení přechodových desek

XI. Montáž a nastavení mostních závěrů, izolace konstrukce

XII. Zřízení říms, položení vozovky

XIII. Osazení vybavení mostu a elementů odvodnění

XIV. Dokončovací práce

XV. Revize

XVI. Uvedení do provozu

5. VOLBA MATERIÁLU

Stupeň vlivu prostředí	XD1
Stupeň konzistence čerstvého betonu	S2

5.1. BETON

Nosná konstrukce	C30/37 – XF4
Monolitické římsy	C30/37 – XF4
Monolitické schodiště	C30/37 – XF4
Podkladní beton – pod základy, přechodovými deskami…	C12/15 – X0
Základy opěr	C 30/37 – XF1

5.2. PŘEDPÍNACÍ VÝZTUŽ

Předpínací kabely Y1860S7 -15,7 – A

10 kabelů po 19 lanech

5.3. BETONÁŘSKÁ VÝZTUŽ

B500B

Bližší charakteristiky viz **P3 – Statický výpočet** kapitola **1.3 CHARAKTERISTIKY POUŽITÝCH MATERIÁLŮ**.

6. ZATÍŽENÍ

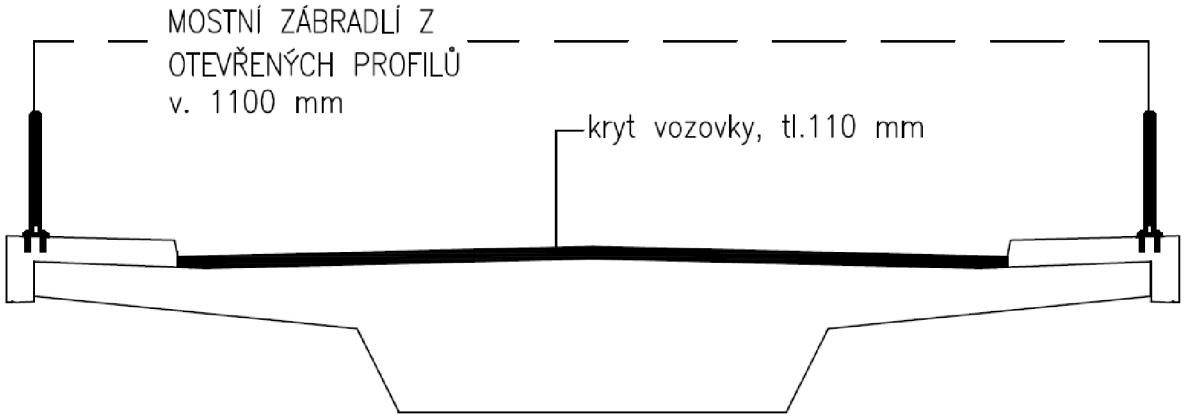
6.1. STÁLÉ

6.1.1. VLASTNÍ TÍHA

Vnitřní síly způsobené vlastní tíhou konstrukce byly vždy pomyslným etalonem výpočtu. Všechny sestavované modely byly vždy ověřovány v první řadě za pomoci srovnání reakcí od ZS1 s ručním výpočtem.

6.1.2. OSTATNÍ STÁLÉ

Ostatní stálé zatížení – kryt vozovky a mostní zábradlí bylo pro primární návrh, resp. prutový model, v jednotkách kN/m, pro deskové modely bylo později přepočítáno na kN/m^2.



Obrázek 7 Ostatní stálé zatížení

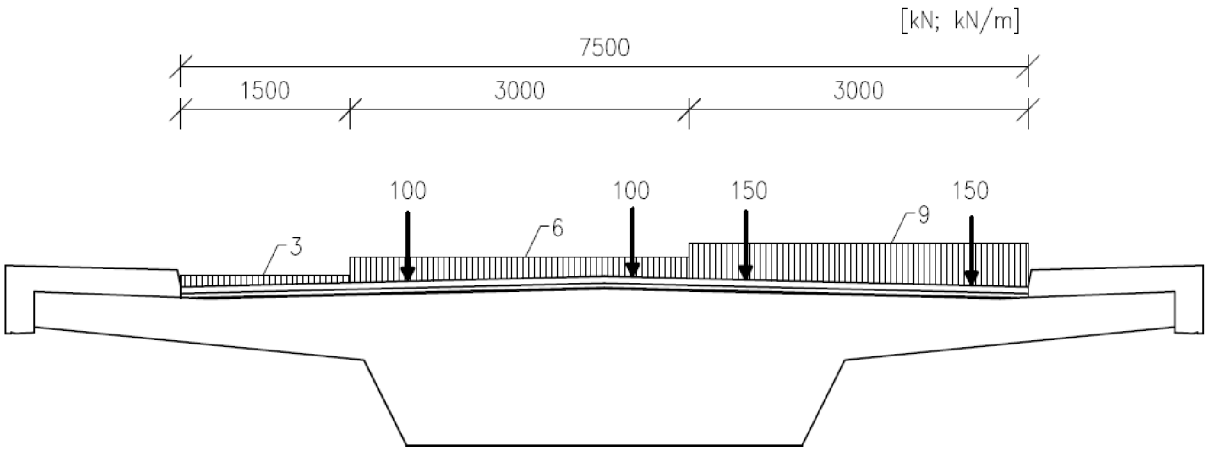
6.2. ZATÍŽENÍ PROMĚNNÉ – DOPRAVA

K simulaci účinků dopravy na konstrukci byly uvažovány různé normové sestavy zatížení. Pro umístění modelů, z nichž jsou sestavy tvořeny, bylo nezbytné rozdělit konstrukci na dopravní pruhy. Jelikož je navržena komunikace o šířce mezi obrubníky 7,5 m, byly uvažovány dva zatěžovací pruhy o dílčích šířkách 3 m. Příčné zarovnání pruhů nehraje v případě globálního posudku roli. Zarovnání vlevo resp. vpravo by vyvodilo zcela stejné účinky, jelikož se jedná o konstrukci, která je osově symetrická.

6.2.1. LM1

Uvažovaný model zatížení LM1, který reprezentuje většinu účinků od běžné automobilové (jak osobní, tak nákladní) dopravy, se skládá ze dvou dílčích

soustav, a to ze soustředného zatížení od dvojnápravy (Tandem System) a spojitého zatížení UDL.



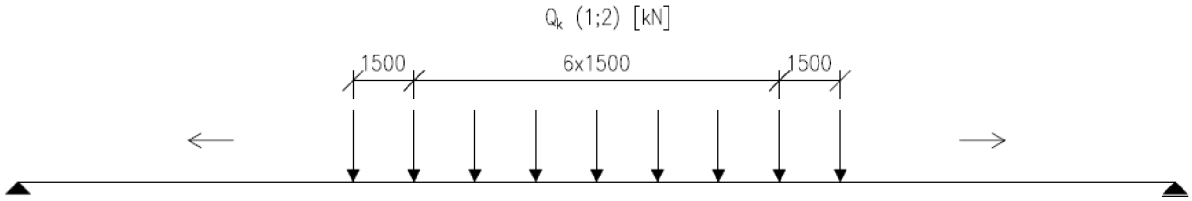
Obrázek 8 Model LM1

Jednotlivé nápravy TS mají tíhu $\alpha_Q Q_k$. Tato dvounáprava se může při posuzování globálních účinků libovolně pohybovat v ose pruhu.

Dílčí stykové plochy soustředného zatížení s povrchem vozovky mají všechny čtyři shodné rozměry 400 mm x 400 mm. Pro přesné zatížení deskového modelu složkou TS byl proveden roznos zatížení do střednice desky pod úhlem 45°. Vzhledem k nerovné střednici desky byly hodnoty roznosu průměrovány tak, aby výstupem byla obdélníková plocha, kterou je možné zadat do softwaru (viz **P3 – Statický výpočet** kapitola **2.2.1 ZS4 – LM1 – TANDEM SYSTEM**).

Druhou dílčí soustavou LM1 je rovnoměrné zatížení UDL o velikosti $\alpha_q q_k$. Toto zatížení má být umístěno pouze do nepříznivých částí příčinkových ploch, to pro podélný směr u prostého nosníků znamená po celé délce.

6.2.2. LM3



Obrázek 9 Silová reprezentace zatížení prostého nosníku od zvláštního vozidla v podélném směru

Soubor nápravových sil představující zvláštní vozidla na trasách, kde je povoleno výjimečné zatížení. Pro silnice I. a II. tříd zvláštní vozidlo s označením 1800 / 200 odpovídající vozidle šířky 3 m o 9 nápravách a celkové

tíze 1800 kN. Toto vozidlo, schválené k provozu na trasách evropské silniční sítě, má osově vzdálené nápravy 1,5 m. Jejich rychlost se pohybuje mezi 5–70 km/h.

Mimo to byl uvažován vliv dynamického součinitele pro pohyb normální rychlosti (70 km/h) φ=1,25. Na silnici se vozidlo pohybuje v ideální stopě v rámci prostoru mezi obrubníky. Možná odchylka od stopy pro vyvození maximálních účinků zatížení je povolena ∓ 0,5 m. V době pohybu zvláštního vozidla se na mostě nesmí nacházet žádná jiná složka zatížení dopravou.

6.2.3. LM4

V neposlední řadě bylo uvažováno u zatížení davem lidí, které je reprezentováno hodnotou plošného zatížení 5 kN/m^2 včetně vlivu dynamického součinitele. Jedná se výhradně o dočasnou návrhovou situaci.

Tyto výše vyjmenované zatěžovací stavy byly seskupeny do sestav, a jako sestavy poté vstupovaly do jednotlivých kombinací. Tato vícesložková zatížení jsou označována jako gr1a, gr4 a gr5. Vodorovné síly na konstrukci nebyly uvažovány.

6.2.4. KOMBINACE & SHRNUTÍ

Pro *mezní stav použitelnosti* byly uvažovány kombinace kvazistálá ($M_{Ed\,\psi_2}$= *25 335 kNm*), častá ($M_{Ed\,\psi_1}$= *32 464 kNm*) a charakteristická pro sestavy gr1a, gr4 a gr5, jako nejméně příznivá se prokázala sestava **gr1a**, kde ohybový moment nabyl hodnoty M_{Ed} = *37 947 kNm.*

Pro *mezní stav únosnosti* byla z hlediska namáhání ohybovým momentem rozhodující kombinace **6.10b**, při které bylo dosaženo na maximální hodnoty M_{Ed} = *45 070 kNm.*

7. POSTUP PŘI ZPRACOVÁNÍ NÁVRHU A POSUDKU

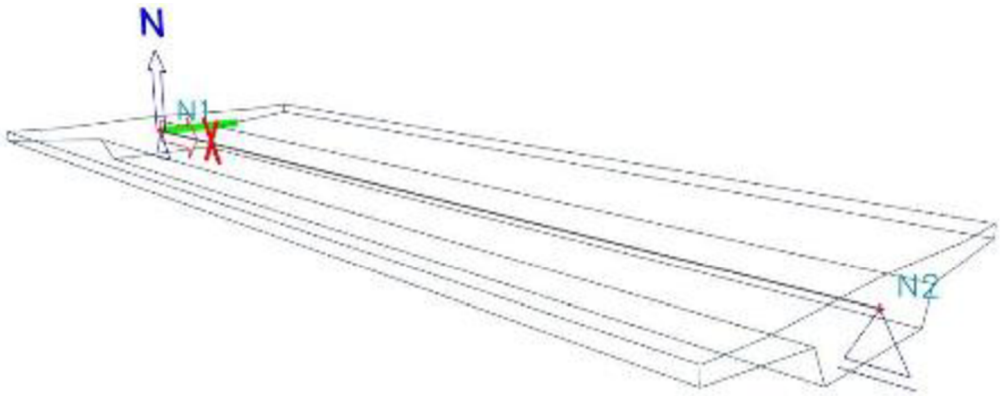
Vzhledem k charakteru konstrukce, rozpětí a statickému schématu byl navržen průřez, jehož rozměry byly stanoveny empiricky. Rovněž materiál byl zvolen dle běžné praxe.

Návrh konstrukce a statický posudek byli prováděny v programu *Scia Engineer 19.1* v kombinaci s ručním výpočtem, který mimo jiné sloužil jako ověření některých programově získaných výsledků.

7.1. STATICKÉ SCHÉMA

Návrh a posouzení konstrukce probíhalo ve třech fázích.

1. Pro stanovení základních vnitřních sil a napětí, dále sloužících pro návrh předpětí, je tento jednotrámový most uvažován jako prostě uložený nosník o jednom poli. Na tomto jednoduchém modelu s neoslabeným průřezem byly stanoveny vnitřní síly, souběžně pomocí *Scia Engineer 19.1* a ručního výpočtu. Výsledky odpovídají předpokládaným průběhům a vzájemně se shodují.



Obrázek 10 Model – prosný nosník – Scia Engineer 19.1

2. Následně byla navržena předpínací síla (viz kapitola *8. Předpětí*), stanoven počet a rozmístění kabelů, resp. kabelových kanálků. Průřezové charakteristiky byly opraveny tak, aby oslabení průřezu vlivem kanálků bylo při následném posudku zohledněno.

3. Pro posouzení mezního stavu únosnosti v příčném směru byly ve *Scia Engineer 19.1* sestaveny deskové modely, z nichž byl vybrán jeden, zdánlivě nejvíce odpovídající skutečnému stavu, který byl použit k získání vstupních hodnot pro dimenzování. Více o deskových modelech v kapitole *10. Deskové modely.*

8. PŘEDPĚTÍ

Předpětí bylo navrženo pomocí **metody omezení napětí** pro častou, charakteristickou i kvazistálou kombinaci v čase t_∞, tedy v čase konce uvažované životnosti konstrukce, a pro čas t_0, okamžitě po vnesení předpětí v době, kdy je konstrukce zatížena pouze **ZS1** – Vlastní tíha.

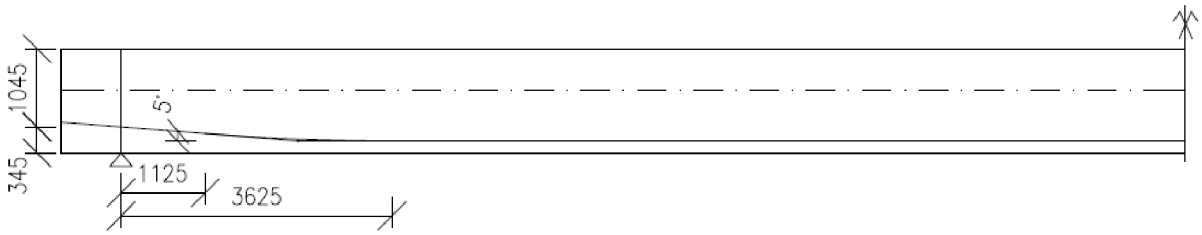
Pro určení těchto hodnot bylo třeba odhadnout průměrnou excentricitu všech kabelů, hodnota byla stanovena na *0,674 m*. Za těchto předpokládaných podmínek byla vypočtena minimální předpínací síla $P_0 = 37\,754{,}75$ *kN*.

Při maximálním kotevním napětí $\sigma_{p.max} = 1\,476{,}00$ *MPa, po vnesení předpětí a zakotvení* s přihlédnutím k odhadu okamžitých ztrát, byla stanovena pro napětí $\sigma_{p.m0} = 1\,328{,}40$ *MPa* nutná plocha předpínací výztuže *28 421,221* mm^2, což po zaokrouhlení odpovídá 190 lanům navrženého průměru 15,7 mm. Požadovaný počet lan byl rozdělen do 10 kabelů po 19 lanech.

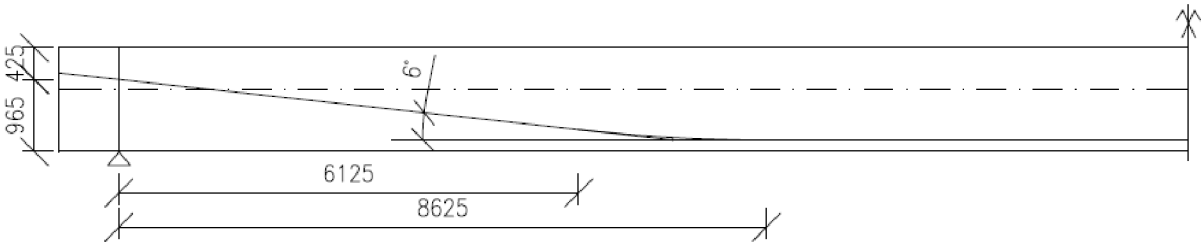
Pro kontrolu byl proveden výpočet stanovení předpínací síly **metodou vyrovnání účinků stálého zatížení**, pro 80 % a 90 % zatížení. I v tomto případě bylo potřeba stanovit geometrickou charakteristiku předpínacích kabelů, tentokrát se jednalo o zamýšlené vzepětí paraboly výsledného kabelu. Hodnoty předpínací síly v čase t_0, získané tímto postupem, byly o něco vyšší než při prvotním odhadu pro 80 % zatížení $P_{0,8} = 41\,618{,}30$ *kN*, pro 90 % $P_{0,9} = 46\,820{,}59$ *kN*). Tato metoda je však obecně považována za méně přesnou s vyšší pravděpodobností chybného odhadu geometrických vlastností kabelu nebo nepřesně stanovené procento stálého zatížení, které je předpětím vyrovnáváno. *V pozdější fázi výpočtu se tato domněnka v podstatě potvrdí při vykreslení napětí v jednotlivých řezech. Návrh dle metody mezních napětí se tedy jeví jako správný.*

Dovolená napětí v jednotlivých kombinacích byla využita také pro návrh obálky výsledné excentricity, na základě které bylo provedeno trasování kabelů. V původním návrhu byly zvednuty 4 z 10 předpínacích kabelů. A to tak, aby průměrný kabel nepadl mimo vymezené excentricity, a aby se v místě osy ložisek nacházel v dolní části jádra průřezu. Excentricita v ohybem nejvíce namáhaném místě byla upřesněna a na průřezu oslabeném o kabelové kanálky stanovena na hodnotu 0,679 m.

Toto trasování bylo později změněno a bylo zvedáno 6 z 10 kabelů. Změna byla provedena kvůli nevyhovujícímu uspořádání kotev v čele nosné konstrukce.



Obrázek 11 Přímé kabely



Obrázek 12 Zvedané kabely

8.1. ZTRÁTY

Ztráty (krátkodobé i dlouhodobé shodně odhadem uvažované 10 %) byly ověřeny částečně v programu Scia Engineer 19.1 (ztráty třením a pokluzem) a zbylé (postupné napínání, krátkodobá relaxace) ručním výpočtem. Hodnota krátkodobých ztrát v polovině rozpětí byla výpočtem stanovena na *7,397 %,* nepřekročila tedy odhadovaných 10 %.

Následný výpočet *dlouhodobých ztrát* (vysychání, autogenní smršťování, dotvarování, relaxace výztuže a ztráta pružným přetvořením), byl proveden zcela ručním výpočtem. Výsledná hodnota *8,274 %* opět splnila předpoklad, který byl stanoven na 10 %.

Konkrétní výpočty viz **P3 – Statický výpočet** kapitola **8. ZTRÁTY**.

Síly v předepnutých kabelech pro kombinace MSP byly vypočteny následující:

Charakteristická kombinace $P'_{m\infty} = 36\,867{,}81$ kN

Častá kombinace $P'_{m\infty,\psi_1} = 36\,414{,}96$ kN

Kvazistálá kombinace $P_{m\infty} = 35\,731{,}24$ kN

9. OVĚŘENÍ MEZNÍCH STAVŮ

9.1. MEZNÍ STAV POUŽITELNOSTI

Mezní stav použitelnosti byl ověřen v polovině rozpětí, z hlediska omezení napětí jak v předpínací výztuži, tak v betonu. Z vyhodnocení napětí na konstrukci vyplynulo, že v charakteristické kombinaci v čase t_{∞}, dojde v betonu k překročení f_{ctm} a na konstrukci vzniknout trhliny. Napětí ve výztuži splňuje předepsané podmínky. V čase t_0 nepřekročí minimální z hodnot *(0,75 f_{pk}; 0,85 $f_{pk.01}$)*, což je *1 394,00 MPa.* Na konci životnosti při napětí *1 253,728 MPa* je podmínka <0,*75 f_{pk}* rovněž dodržena.

Při výpočtu průhybu od zatížení, které se na mostě nejčastěji vyskytuje, bylo uvažováno přetvoření okamžité i dlouhodobé. Jelikož u dlouhodobého průhybu převládá vliv předpětí, směrodatná byla hodnota průhybu způsobeném krátkodobým působením zatížení od dopravy *(LM1)*, které vyvolává $v_{q.max}$ *= 25 mm.* Obecně platné doporučení *v < L/600 (48 mm)* bylo dodrženo, nebylo tedy třeba navrhovat nadvýšení konstrukce.

9.2. MEZNÍ STAV ÚNOSNOSTI

9.2.1. PODÉLNÝ SMĚR

Bylo provedeno ověření mezního stavu únosnosti, konstrukce byla posouzena na namáhání ohybem a smykem. V případě ohybu bylo dokázáno, že předpínací výztuž plně přenese moment od zatížení ve všech uvažovaných kombinacích MSÚ.

$$M_{Rd} = 21\,793{,}48 \text{ kNm} < M_{Ek}\ (6.10b) = 20\,037 \text{ kNm}$$

Při návrhu betonářské výztuže bylo vycházeno z konstrukčních zásad.

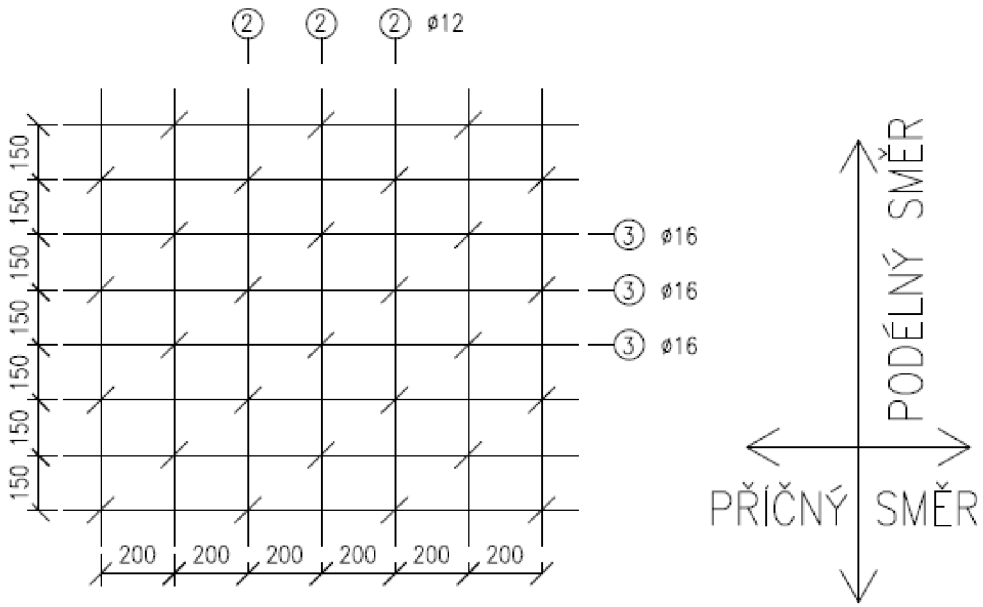
Byla ověřena započitatelnost výztuže a stanovena N.O. spolu s výškou tlačeného betonu.

Únosnost ve smyku byla rozdělena do dvou částí. Zvlášť byly posuzovány části průřezu, kde se očekával vznik trhlin a kde ne, rozhraní se nachází ve vzdálenosti 4,78 m od podpory. Ve všech průřezech je smyková výztuž navržena dle konstrukčních zásad.

9.2.2. PŘÍČNÝ SMĚR

V příčném směru byl prověřován pouze mezní stav únosnosti. V místech uložení konstrukce vznikaly lokální extrémy posouvací síly i ohybového momentu. Tyto hodnoty byly redukovány za pomoci průměrovacího pásu o šířce 1,5 metru, tak aby došlo z redukci nepřiměřených lokálních extrémů. Konstrukce byla v podélném směru rozdělena na tři úseky – nad podporami pásy v šířce cca 1,5 m, odpovídající průměrovacímu pásu a mezilehlý prostor. Se shodnou roztečí 150 mm byly u podpor navrženy profily o průměru 25 mm, přenášející maximální moment *667,13 kNm, a* v poli o průměru 16 mm což odpovídá výztuži požadované pro maximální moment ve třetině rozpětí, jehož hodnota je *250,18 kNm*. Momenty v obou oblastech dosáhly svých maxim od kombinace 6.10b se sestavou gr1a jako složkou proměnného zatížení.

Smyková výztuž byla navržena formou spon o průměru 8 mm v rastru 150x300 mm dle následujícího schématu (shodné pro oba povrchy).



Obrázek 13 Schéma smykové výztuže konzol – spony

10. DESKOVÉ MODELY

Prutový model, zmiňovaný v kapitole *7.1 Statické schéma* bylo dále třeba zpřesnit tak, aby bylo možné stanovit momenty a navrhnout výztuž u horního líce vykonzolovaných částí průřezu trámového profilu nosníku mostní konstrukce.

Pro tuto část výpočtu bylo nezbytné vytvořit model, který dokáže toto deskové působení zohlednit. Modelace proběhla opět v programu Scia Engineer 19.1.

Model byl tvořen ze vzájemně spojených desek. Pro co nejpřesnější výsledky byly experimentálně sestaveny 3 variace zadání geometrie, a pro následný výpočet byl zvolen ten zdánlivě nejpřesnější. Počet jednotlivých desek, které tvořily model byl vždy shodně sedm. Jedna představovala střední část, ve které se výška průřezu mění nepatrně pouze vlive spádování povrchu, dvě simulovaly přechody z trámu na vykonzolované části a zbylé převislé části konstrukce byly rozděleny vždy na dvě části tak, aby bylo možné konstrukci pohodlně a co možná nejpřesněji zatížit s využitím dílčích segmentů profilu.

Model 1 měl určující rovinu desek *při horním povrchu* a jeho tloušťky byly *proměnné,* v řezu tak vizuálně nejvíce odpovídá skutečnosti.

Obrázek 14 Scia Engineer 19.1 – Deskový model 1

Model 2 měl určující rovinu modelovanou *reálně*, takže odpovídala střednici konstrukce. Tloušťky jednotlivých segmentů byly *proměnné*.

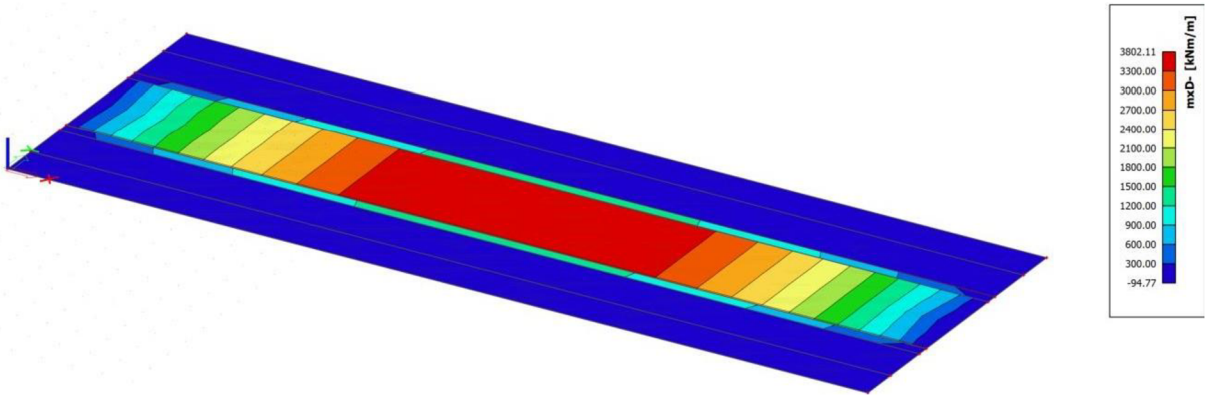
Obrázek 15 Scia Engineer 19.1 – Deskový model 2

Model 3 uvažoval obdobně jako model 1 *rovnou* určující rovinu desek, tentokrát však *v geometrickém středu/těžišti jednotlivých dílčích desek*. Tloušťky desek byly *konstantní*.

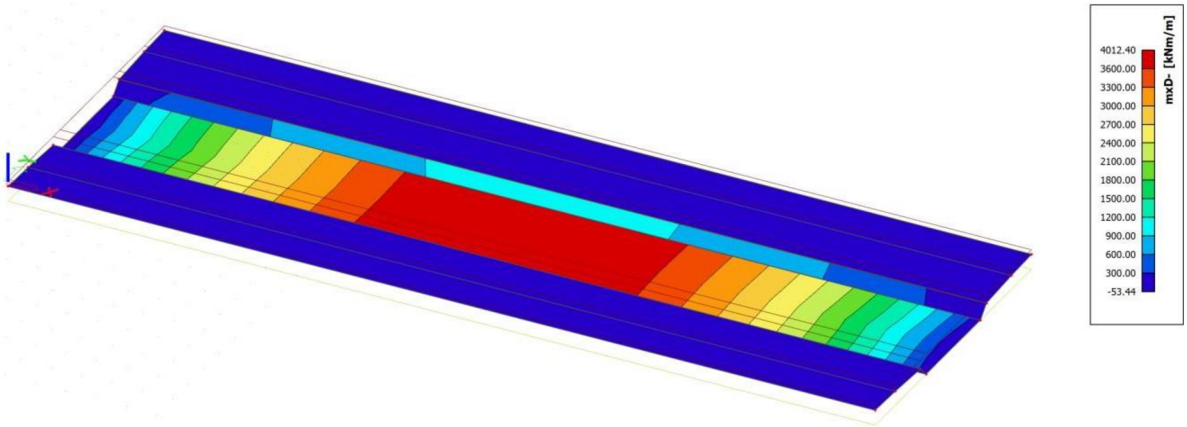
Obrázek 16 Scia Engineer 19.1 – Deskový model 3

Modely byly podepřeny pomocí 4 podpor dle navrženého schématu. Správnost geometrie byla ověřena porovnáním reakcí v podporách od *ZS1 – Vlastní tíha*, které se v součtu zcela shodovaly s ručním výpočtem.

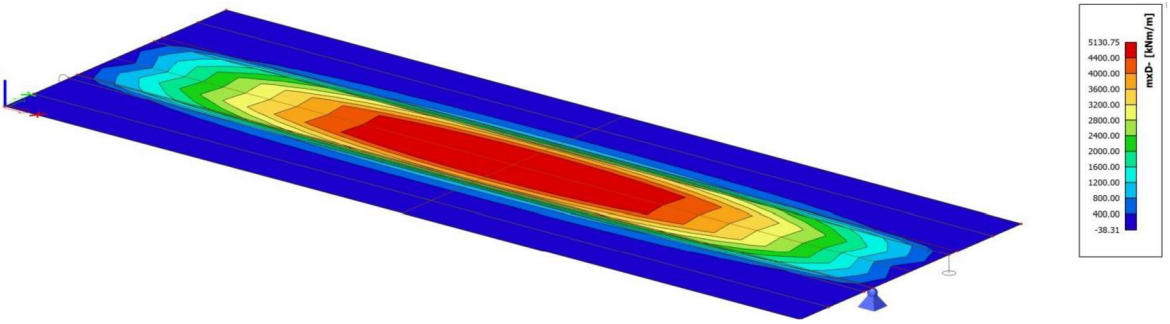
Na všech modelech byly vykresleny průběhy ohybových momentů od ZS1.



Obrázek 17 Průběh ohybových momentů od ZS1 – model 1

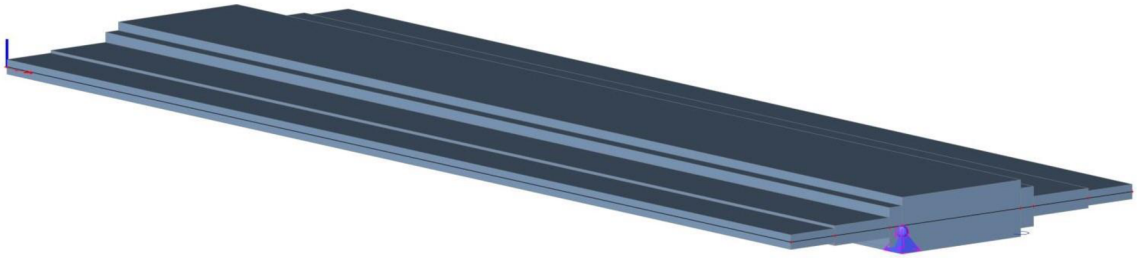


Obrázek 18 Průběh ohybových momentů od ZS1 – model 2

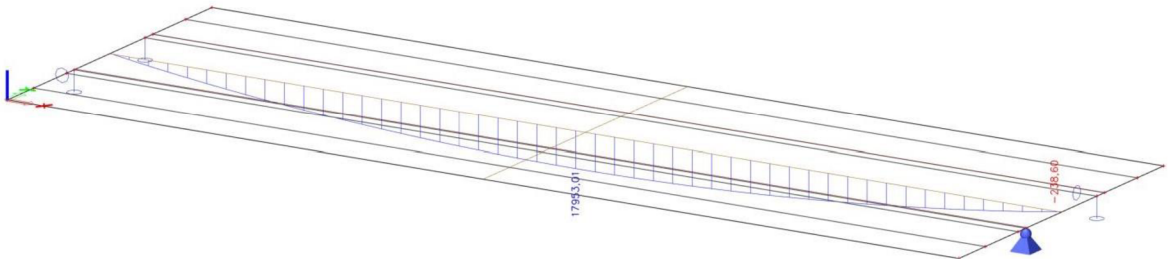


Obrázek 19 Průběh ohybových momentů od ZS1 – model 3

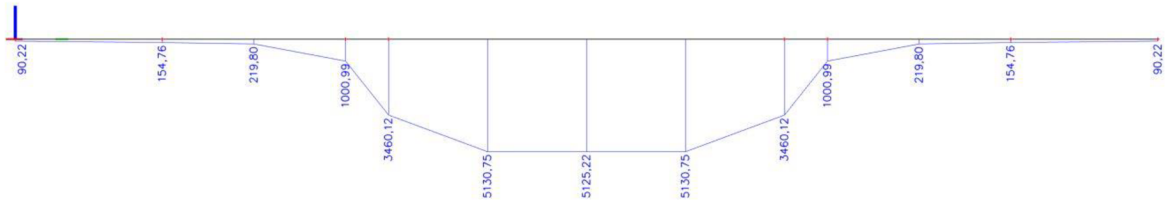
Pro posouzení příčného směru byl zvolen **Model 3**, jelikož byl vyhodnocen jako nejdůvěrněji odpovídající skutečnému stavu.



Obrázek 20 Model 3 – 3D geometrie



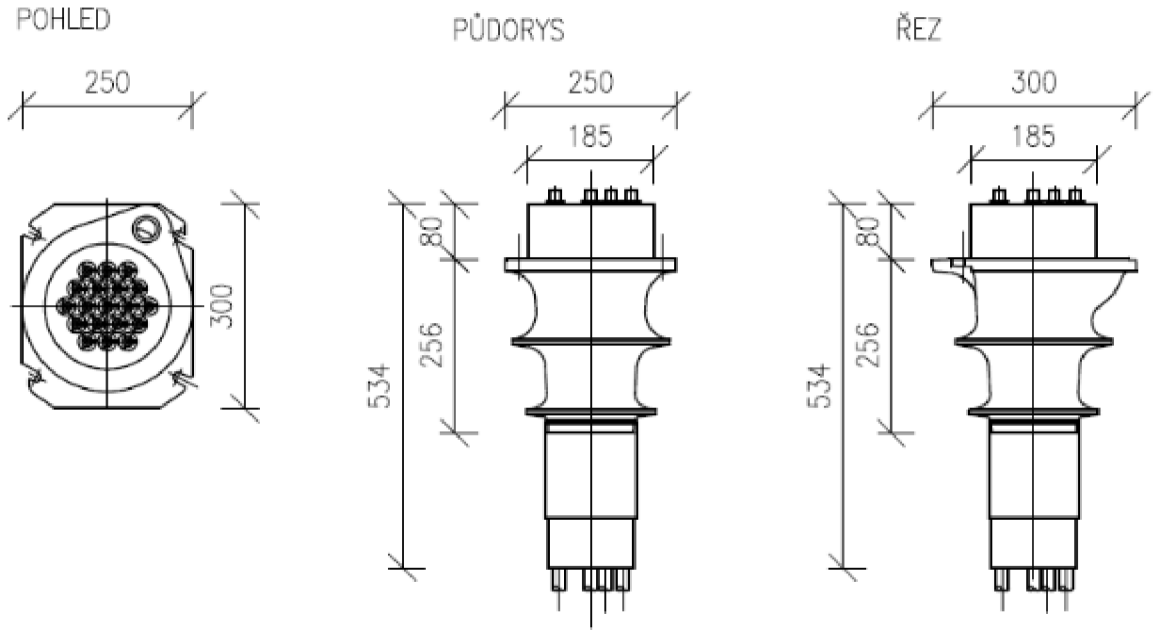
Obrázek 21 Model 3 – Průběh dimenzačního ohybového momentu mxD- [kNm]



Obrázek 22 Model 3 – Rozdělení dimenzačního ohybového momentu mxD- [kNm/m] v příčném směru

11. KOTEVNÍ OBLAST

Pro zakotvení byly použity kotvy typu 19C15 – Freyssinet.



Obrázek 23 Rozměry kotvy typu 19C15 – Freyssinet

Soustředěný tlak pod kotvou byl vypočten pouze orientačně. Pro zaručení únosnosti je nutné dodržet konstrukční zásady dané výrobcem kotevního systému.

Pro oblasti pod kotvou byly stanoveny minimální hodnoty vyztužení. V konečném řešení byly navrženy spirály dle doporučení výrobce.

Globální kotevní oblast byla rovněž vypočtena pomocí příhradové analogie, a bylo navrženo sedm mříží ve vzájemné vzdálenost 200 mm. Mříže jsou tvořeny 19 svislými pruhy a 4 pruty ve vodorovném směru, všechny o průměru 16 mm. Výsledná plocha $3{,}236*10^{-2}$ m^2 splňuje požadované konstrukční zásady.

Čelo nosné konstrukce je vyztuženo vždy dvěma pruty o průměru 18 mm při každé kotvě.

12. ZÁVĚR

Výstupem této práce je statický výpočet a dokumentace obsahující návrh mostní konstrukce převádějící silnici II. třídy přes místní komunikaci. Pro toto zadání byla zpracována studie obsahující tři varianty možného provedení.

Deskotrámová předpjatá konstrukce, která byla vybrána pro detailnější zpracování, byla navržena dle platných norem, posouzena kombinací ručního výpočtu a hodnot získaných ze softwaru *Scia Engineer 19.1*. Sestavené modely (prutový i deskový) byly zatíženy jak stálým zatížením, tak sestavami reprezentujícími proměnné zatížení dopravou. Zatěžovací stavy jsou popsány v textu výše.

Konstrukce byla posouzena na mezní stavy únosnosti a použitelnosti a řádně vyztužena s přihlédnutím ke konstrukčním zásadám.

Na závěr byla posouzena kotevní oblast a její výztuž navržena jako kombinace ručního výpočtu a doporučení výrobce.

13. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Příčný řez – Varianta 1 13
Obrázek 2 Příčný řez – Varianta 2 14
Obrázek 3 Příčný řez – Varianta 3 14
Obrázek 4 Podélný řez mostem 16
Obrázek 5 Schéma uložení mostu 17
Obrázek 6 Schéma mostního zábradlí 18
Obrázek 7 Ostatní stálé zatížení 21
Obrázek 8 Model LM1 22
Obrázek 9 Silová reprezentace zatížení prostého nosníku od zvláštního vozidla v podélném směru 22
Obrázek 10 Model – prosný nosník – Scia Engineer 19.1 24
Obrázek 11 Přímé kabely 26
Obrázek 12 Zvedané kabely 26
Obrázek 13 Schéma smykové výztuže konzol – spony 28
Obrázek 14 Scia Engineer 19.1 – Deskový model 1 29
Obrázek 15 Scia Engineer 19.1 – Deskový model 2 29
Obrázek 16 Scia Engineer 19.1 – Deskový model 3 30
Obrázek 17 Průběh ohybových momentů od ZS1 – model 1 30
Obrázek 18 Průběh ohybových momentů od ZS1 – model 2 31
Obrázek 19 Průběh ohybových momentů od ZS1 – model 3 31
Obrázek 20 Model 3 – 3D geometrie 31
Obrázek 21 Model 3 – Průběh dimenzačního ohybového momentu mxD- [kNm] 32
Obrázek 22 Model 3 – Rozdělení dimenzačního ohybového momentu mxD- [kNm/m] v příčném směru 32
Obrázek 23 Rozměry kotvy typu 19C15 – Freyssinet 33

14. SEZNAM ZDROJŮ

[1] NEČAS, Radim, Jan KOLÁČEK a Josef PANÁČEK. *BL12 – Betonové mosty I: zásady navrhování*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2014. Studijní opory pro studijní programy s prezenční formou studia. ISBN 978-80-214-4979-4.

[2] ZICH, Miloš. *Příklady posouzení betonových prvků dle Eurokódů*. Praha: Dashöfer, 2010. ISBN 978-80-86897-38-7.

[3] ČSN 73 6201. *Projektování mostních objektů*. Praha: Český normalizační institut, 2008.

[4] ČSN EN 1992-1-1. *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí: Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. 210 stran. Praha: Český normalizační institut, 2006.

[5] ČSN EN 1992-2. *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí: Část 2: Betonové mosty – Navrhování a konstrukční zásady*. 90 stran. Praha: Český normalizační institut, 2007.

[6] TP 107. *ODVODNĚNÍ MOSTŮ POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ: TECHNICKÉ PODMÍNKY*. MINISTERSTVO DOPRAVY ODBOR INFRASTRUKTURY. Praha: PRAGOPROJEKT, 2008.

[7] TP 186. *ZÁBRADLÍ NA POZEMNÍCH KOMUNIKACÍCH: TECHNICKÉ PODMÍNKY*. MINISTERSTVO DOPRAVY ODBOR INFRASTRUKTURY. Praha: PRAGOPROJEKT, 2007.

[8] *VZOROVÉ LISTY STAVEB POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ: VL 4 – MOSTY*. Praha: Ministerstvo dopravy, 2015.

[9] *Podklady pro projektování: FREYSSINET CS a.s.* 2011. Dostupné také z: www.freyssinet.cz

[10] Dopravní a inženýrské stavby, KATALOG VÝROBKŮ. *KŠ PREFA* [online]. [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: https://ksprefa.cz/

[11] Poklady pro předmět *BL011 – Předpjatý beton*

15. SEZNAM PŘÍLOH

P1 – Podklady, studie a vizualizace

01 Podklady

02 Studie 1

03 Studie 2

04 Studie 3

05 Vizualizace

P2 – Přehledné a podrobné výkresy zvoleného návrhu

01 Půdorys

02 Podélný řez A-A‘

03 Příčný řez B-B‘

04 Příčný řez C-C‘

05 Výkres předpínací výztuže

06 Výkres betonářské výztuže

P3 – Staticky výpočet