

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta stavební

Katedra betonových a zděných konstrukcí



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Návrh silničního mostu s pomocí nástrojů pro BIM modelování

Design of a road bridge with the use of BIM modelling tools

Vypracoval: Jakub Libánek

Vedoucí práce: Ing. Radek Hájek, Ph.D.

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

Praha: 2019/2020

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta stavební
Thákurova 7, 166 29 Praha 6



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Libánek	Jméno: Jakub	Osobní číslo: 468261
Zadávající katedra: Katedra betonových a zděných konstrukcí		
Studijní program: Stavební inženýrství		
Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby		

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Návrh silničního mostu s pomocí nástrojů pro BIM modelování	
Název bakalářské práce anglicky: Design of a road bridge with the use of BIM modelling tools	
Pokyny pro vypracování: Součástí řešení bude 1) Rešerše na téma BIM pro dopravní stavby, dostupné softwarové nástroje, motivace pro zavedení BIM do projektování dopravních staveb 2) Návrh silničního nadjezdu a komentovaný statický výpočet nosné konstrukce za použití běžných metod a moderních BIM modelovacích nástrojů. Posouzení hlavních prvků konstrukce a návrh založení 3) Diskuse výhod a případných nevýhod použití moderních modelovacích metod	
Seznam doporučené literatury: Stráský, J. (2001) Betonové mosty. Knižnice autorizovaného inženýra a technika, TK21, ČSSI, s. 103 Navrátil, J. (2004) Předpjaté betonové konstrukce. Akademické nakladatelství CERM, s. 160	
Jméno vedoucího bakalářské práce: Ing. Radek Hájek, Ph.D.	
Datum zadání bakalářské práce: 26. 2. 2020	Termín odevzdání bakalářské práce: 18. 5. 2020 <small>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém národním kalendářním ak. roku</small>
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské 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“.

Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)
-----------------------	---------------------

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem svoji bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a podkladů.

V Praze dne 24.5.2020

.....

Jakub Libánek

Poděkování:

Chtěl bych tímto poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Radku Hájkovi, Ph.D., za časté konzultace, odborné vedení, trpělivost a cenné rady, které mi při konzultacích poskytl. Současně bych rád poděkoval Ing. Filipu Adlerovi, který mi věnoval čas při konzultaci výpočetního modelu Allplan Bridge.

Abstrakt

Hlavním tématem bakalářské práce bylo využití BIM modelovacích nástrojů pro návrh předpjatého trémového silničního mostu. Rešeršní část byla zaměřena na současný trend zavádění BIM metod v projektování dopravní infrastruktury, vývoj BIM softwarů a jeho využití při navrhování konstrukcí. Zadaná konstrukce byla navržena současně běžnými metodami a v BIM softwaru Allplan Bridge. Výsledky získané z výpočetních modelů podle obou metod byly srovnány mezi sebou, a navíc se zjednodušeným ručním výpočtem. Porovnávány byly zejména vnitřní síly od působícího zatížení a účinků předpětí. Vybrané konstrukční prvky navržené konstrukce byly nakonec posouzeny na MSÚ a MSP podle platných norem ČSN EN. V závěru jsou shrnuty a zhodnoceny přínosy a negativa použití BIM softwaru pro řešení zadané konstrukce, včetně diskuse nedostatků současně dostupných modelovacích softwarů.

Klíčová slova:

Silniční most, BIM, dvoutrémová konstrukce, SCIA Engineer, Allplan Bridge, předpětí

Abstract

The main topic of the bachelor thesis was the use of BIM modelling tools to design a prestressed concrete truss road bridge. A research on the current trend of introducing the BIM modelling approach in civil infrastructure design and the state-of-the-art on the available BIM software was conducted. The bridge was designed concurrently using the standard design approach and using Allplan Bridge BIM software. Results of the models were compared with a simplified non-computer calculations. Mainly the internal forces caused by the applied loading and effects of prestressing were compared. Selected structural parts of the bridge were subsequently checked for SLS and ULS requirements according to current design standards. In the conclusions, the positives and negatives of BIM modelling were discussed as well as the state of abilities of the currently available BIM modelling tools and softwares.

Key words:

Road bridge, BIM, double beam structure, SCIA Engineer, Allplan Bridge, preload

Obsah

1	ÚVOD	13
2	SITUAČNÍ ŘEŠENÍ	14
2.1	Návaznost na okolní komunikaci.....	14
2.1.1	Směrové řešení	14
2.1.2	Výškové řešení	14
2.2	Návrhy variant.....	16
2.2.1	Varianta A	16
2.2.2	Varianta B.....	17
2.2.3	Varianta C – podklad pro bakalářskou práci.....	18
3	REŠERŠE	20
3.1	Co je to BIM?	20
3.1.1	Úvod.....	20
3.1.2	Definice BIM.....	20
3.2	Zavedení BIM do dopravního stavitelství.....	21
3.2.1	Koncept	21
3.2.2	Legislativa.....	22
3.3	Funkce BIM modelu	25
3.3.1	Rozměry modelu BIM	25
3.3.2	Vliv digitalizace.....	27
3.3.3	Prostředí CDE a formát IFC	28
3.4	Dostupné modelovací programy.....	31
3.4.1	CIVIL 3D	31
3.4.2	ALLPLAN BRIDGE	33
3.5	Výhody, nevýhody.....	36

3.5.1	Výhody	36
3.5.2	Nevýhody	36
4	KOMENTOVANÝ STATICKÝ VÝPOČET	37
4.1	Vstupní údaje	38
4.1.1	Geometrie	38
4.1.2	Materiály	40
4.1.3	Výpočetní modely	44
4.2	Zatížení	47
4.2.1	Stálé zatížení	47
4.2.2	Proměnné zatížení	49
4.2.3	Definice zatížení Allplan Bridge	54
4.3	Vnitřní síly.....	58
4.3.1	Vnitřní síly od stálého zatížení, SCIA engineer.....	58
4.3.2	Vnitřní síly od proměnného zatížení, SCIA Engineer	60
4.3.3	Vykreslení vnitřních sil od proměnného zatížení.....	66
4.3.4	Přehled vnitřních sil Allplan Bridge 2020	72
4.3.5	Zjednodušená deformační metoda	75
4.4	POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ A VÝPOČETNÍCH METOD	78
4.4.1	Vnitřní síly	78
4.4.2	Porovnání výpočetních metod s ručním výpočtem	83
4.5	Kombinace zatížení	84
4.5.1	Kombinace na MSÚ (kromě ověření na únavu).....	84
4.5.2	Kombinace na mezní stav použitelnosti	85
4.5.3	Sestavy zatížení.....	85
4.5.4	Kombinace výpočet.....	86
4.6	Návrh předpětí	89

4.6.1	Parametry předpětí:.....	89
4.6.2	Předběžný návrh předpínací výztuže	90
4.6.3	Podrobný návrh předpínací výztuže	92
4.7	Posouzení konstrukce	98
4.7.1	MSP – Omezení napětí.....	98
4.7.2	MSÚ – Posouzení mostovky.....	101
4.7.3	MSÚ - Posouzení založení	106
5	ZÁVĚR.....	109
	ZDROJE	110
	Seznam obrázků.....	112
	Seznam tabulek.....	117
	Přílohy	117

1 ÚVOD

Tato práce se zabývá návrhem a výpočtem trémového silničního nadjezdu přes elektrifikovanou železniční trať pomocí standartních výpočetních metod a pomocí metod pro BIM modelování. Rešeršní část se zabývá otázkou, co je to BIM, jaká je jeho funkce, využití ve stavebnictví a jestli ej při zavádění do stavebního procesu výhodou či komplikací. V první kapitole bylo ukázáno řešení umístění trémového mostu do okolní zástavby, kde byly navrženy 3 varianty řešení. Posuzovaná varianta byla zobrazena se schématickým návrhem a podrobné výkresy se nachází v přílohách. V dalších fázích se bakalářská práce zabývá výpočtem trémového mostu ve dvou výpočetních programech na třech výpočetních modelech, s rozdílným směrovým řešením. V závěru došlo k návrhu předpětí a posouzení vybraných prvků konstrukce na MSÚ a MSP.

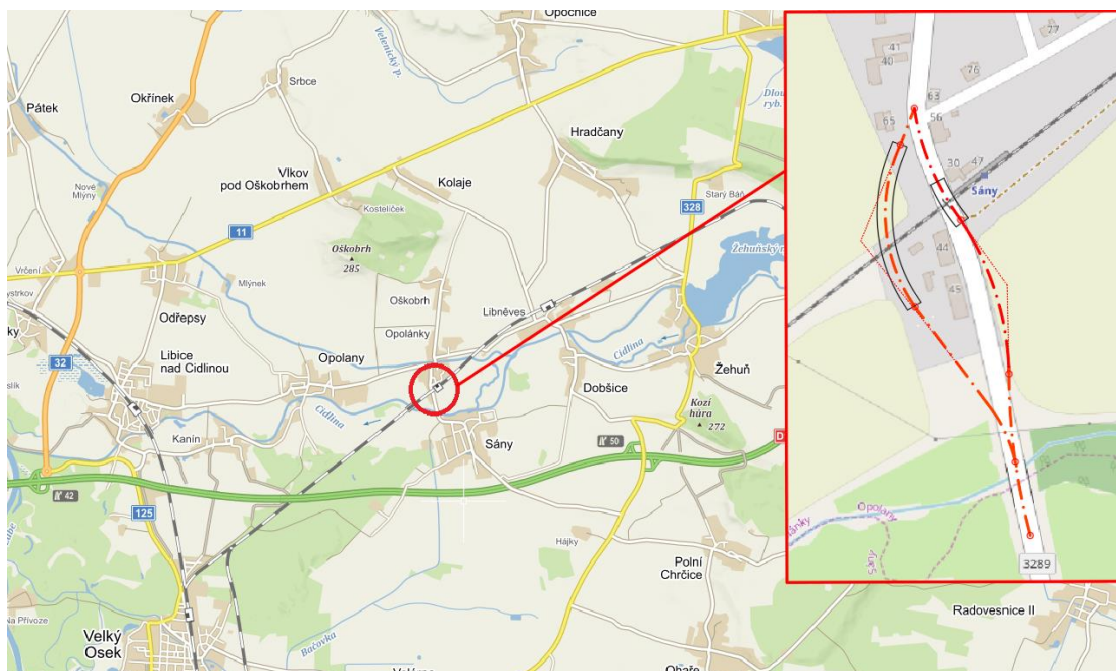
Práce byla provedena v programech Autocad 2019, CIVIL 3D 2019, Allplan Bridge 2019, Allplan Bridge 2020, Allplan Bridge 2020-1, SCIA Engineer a Microsoft Office.

2 SITUAČNÍ ŘEŠENÍ

2.1 Návaznost na okolní komunikaci

2.1.1 Směrové řešení

Navrhované varianty řešení se nacházeli v místě železničního přejezdu mezi obcemi Sány a Opolany. Varianty A, B byly vedeny podél stávající komunikace a přemostovali železniční trať v místě stávajícího železničního přejezdu. Varianta C byla vedena obchvatem mimo okolní zástavbu. Na začátku úseku navazují na stávající mostní objekt a na konci se plynule napojovala na stávající zástavbu.

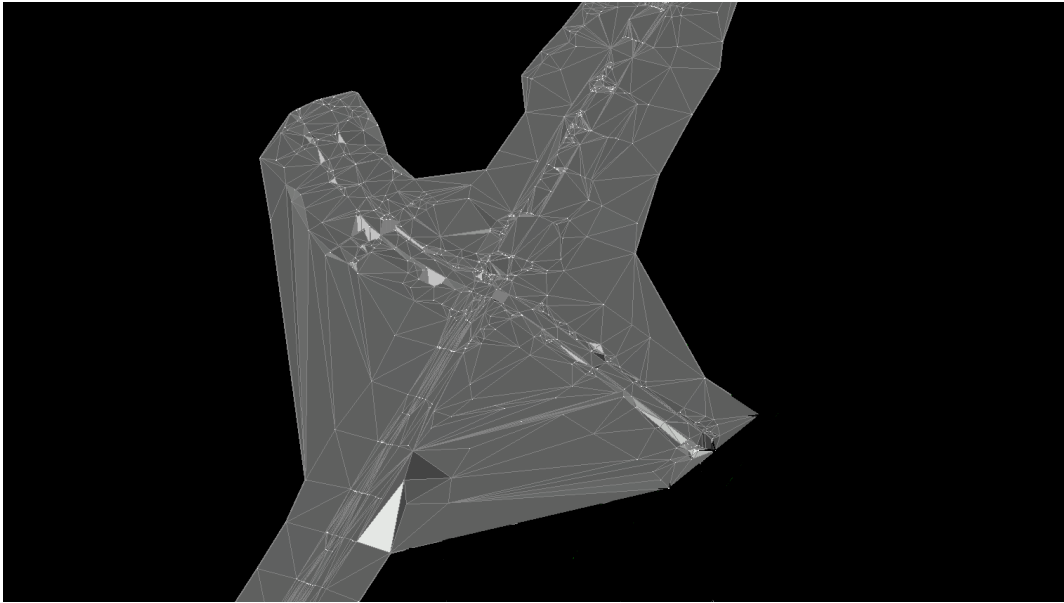


Obrázek 1 Řešení směrového vedení (1)

2.1.2 Výškové řešení

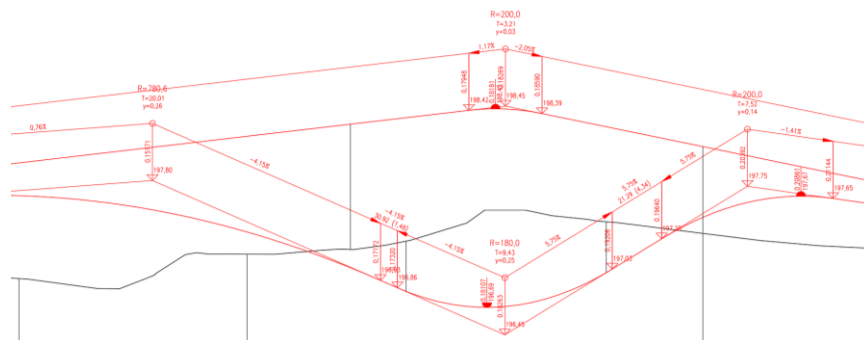
Z geodetického zaměření byl v Civilu 3D vymodelován povrch, pomocí kterého byly vytvořené podélné profily, sloužící k přesnému návrhu mostní konstrukce. Zároveň bylo zjištěno potřebné množství násypů, výkopů a dalších požadavků, ze kterých šlo snadněji určit vhodnost jednotlivých variant.

- Model povrchu z geodetického zaměření.

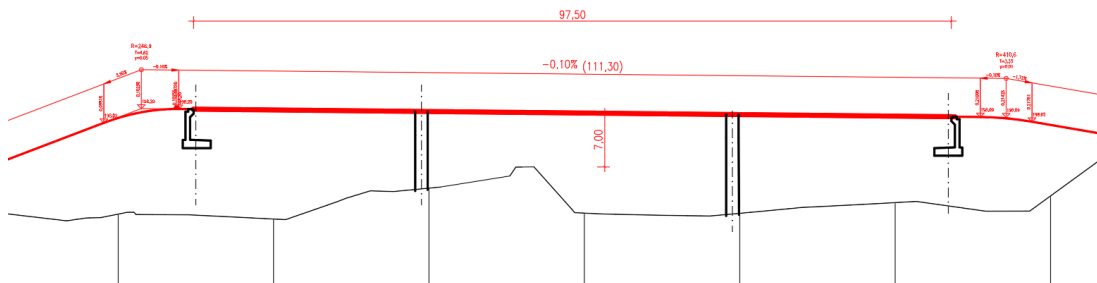


Obrázek 4 Model povrchu

- Podélné profily z navrhovaného směrového řešení.



Obrázek 2 Podélná profil var. A, B



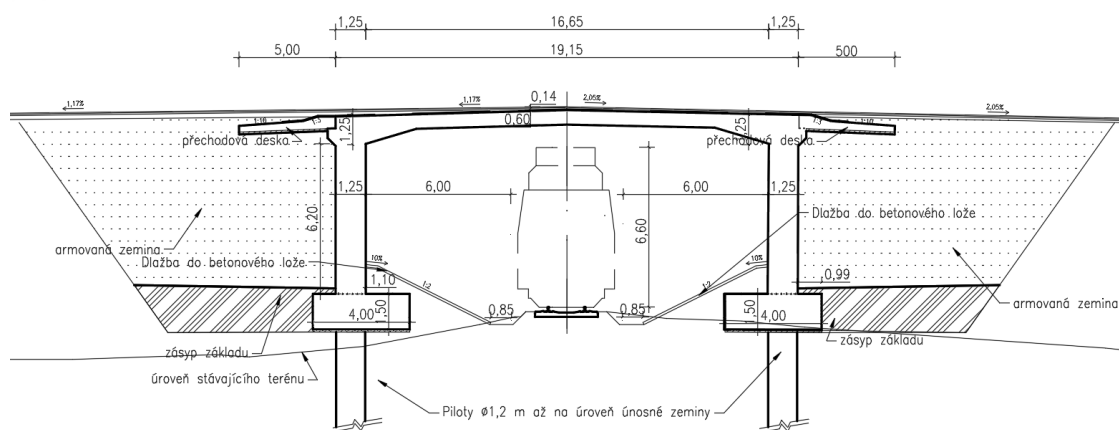
Obrázek 3 Podélný profil var. C

2.2 Návrhy variant

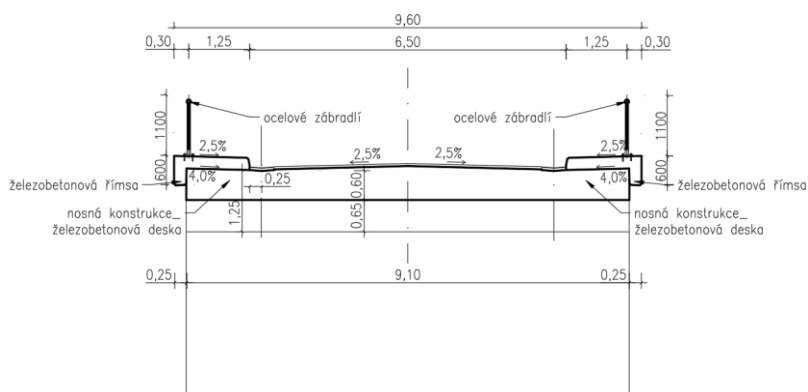
2.2.1 Varianta A

Varianta A byla vedena v místě stávajícího železničního přejezdu. Byla řešena jako integrovaný rámový most s deskovou mostovkou. Aby nebyla okolní zástavba příliš ovlivněna potřebnými zásypy pro přemostění, bylo zvoleno omezení násypů armovanou zeminou. Délka mostu je 19,15 m a délka přemostění je 16,65 m.

Návrh mostovky byla deska o šířce 9,1 m a výšce 0,6 m. V rámci intravilánového řešení byl šířka komunikace 6,5 m. *(Obrázky jsou pouze schématické, bez daného měřítka)*



Obrázek 5 Podélný řez var. A

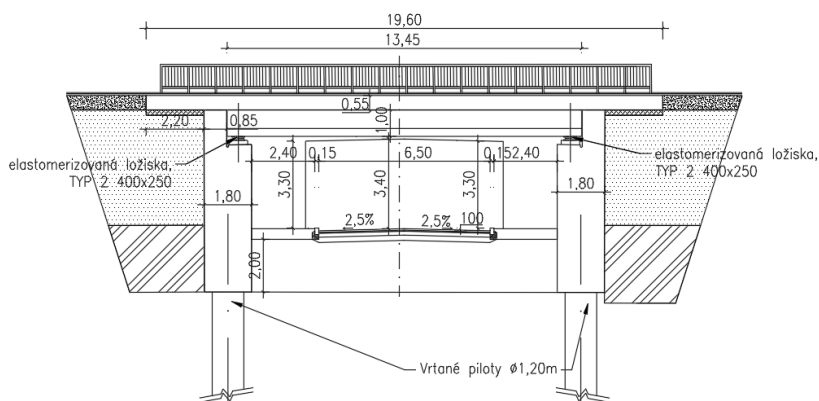


Obrázek 6 Příčný řez var. A

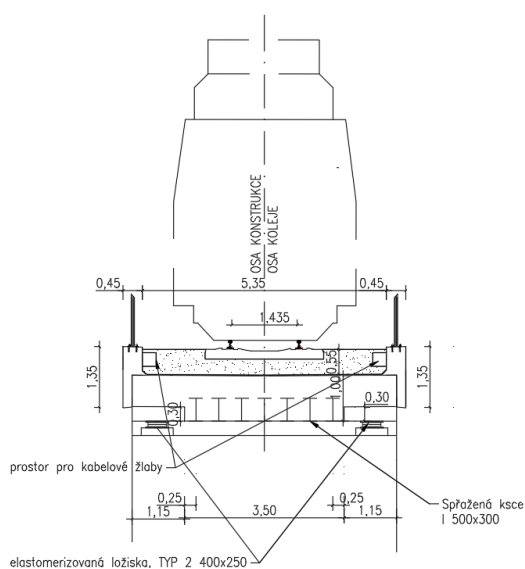
2.2.2 Varianta B

Varianta B byla řešena jako železniční most s betonovou deskou s zabetonovanými nosníky. Směrové řešení bylo provedeno v trase stávající železniční trati a komunikace byla vedena pod železniční tratí ve směrovém oblouku o poloměru $R=240$ m. Niveleta trati byla zachována ve stávající výšce.

Návrh mostovky byla betonová deska o výšce 1 m se zabetonovanými nosníky o profilu 500x300. Deska je uložena na elastomerových ložiscích, 400x250. Celková výška příčného řezu je 1,55 m a šířka 5,8 m. Šířkové uspořádání konstrukce splňuje průjezdné profily.



Obrázek 7 Podélný řez var. B



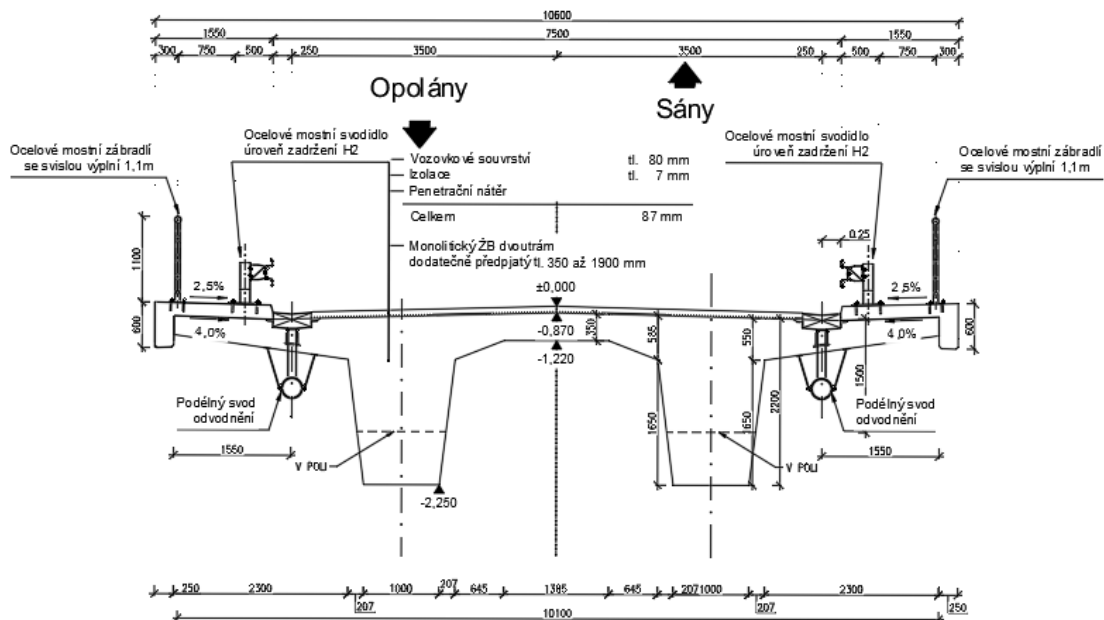
Obrázek 8 Příčný řez var. B

2.2.3 Varianta C – podklad pro bakalářskou práci

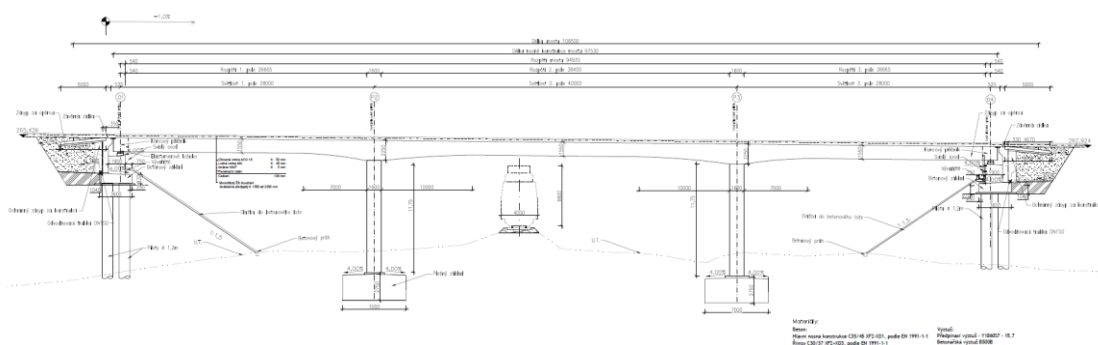
Varianta C byla řešena jako trémový most o celkovém délce 106,5 m. Jeho statické schéma je spojitý nosník s náběhy s rozpětím jednotlivých polí v poměru 0,7:1:0,7. Krajiní pole mají rozpětí 28 m a vnitřní pole 40 m. Výška mostu nad terénem je 9 – 14 m. Založení mostu je navrženo plochém základu o rozměrech 6 x 7 x 2,75 m.

Příčný řez byl navržen jako dvoutrám s proměnou výškou průřezu. Trámy mají konstantní šířku v celé délce mostu. V poli jsou trámy nižší a dosahují maximální výšky 1,5 m v poli a 2,2 m nad podporou. Odvodnění bylo navrženo pomocí podélného sklonu 1% a podélných svodů odvodnění, které zaústějí do vývazíště.

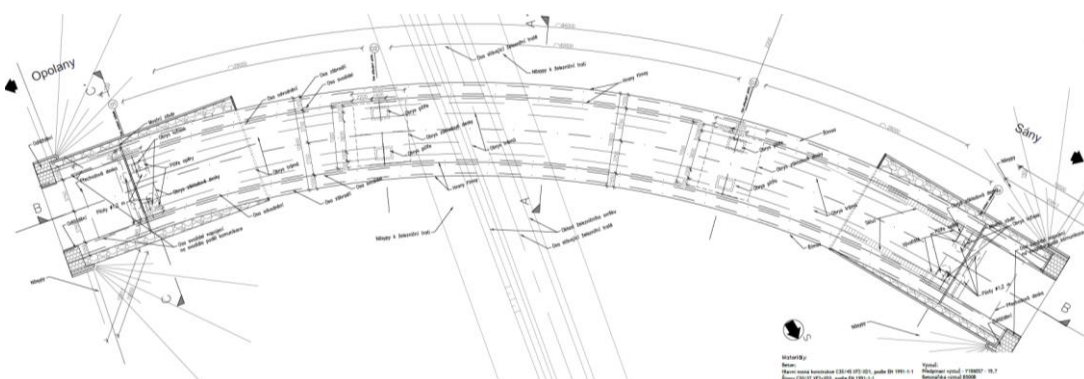
V půdorysném uspořádání je navržen jako oblouk o poloměru $R = 110$ m se zakřivenými trámy. Šířka komunikace odpovídá šířkovému uspořádání pro komunikace s7,5. Pohyb po mostě je pro chodce zajištěn chodníkem o šířce 0,75 m po obou stranách mostu. Chodník je zabezpečen svodidly a zábradlím do požadované výšky. Dimenze příčného řezu byla provedena pomocí empirických vzorců a dále byla opravena pomocí nových poznatků při výpočtu mostu.



Obrázek 9 Příčný řez var. C



Obrázek 10 Podélný řez var. C



Obrázek 11 Půdorys var. C

Volba trémového mostu byla zvolena jako nejvhodnější z hlediska ohleduplnosti vůči okolní zástavbě, nižší vytíženosti trati při výstavbě a také pro možnou rozmanitost řešení při BIM modelování. Varianta A byla zavrhnuta především z důvodů ohrožení okolní zástavby a neestetického provedení. Varianta B byla zamítnuta především kvůli záplavovému území, ve kterém se stavba nachází.

3 REŠERŠE

3.1 Co je to BIM?

3.1.1 Úvod

Co je to BIM (informační model stavby/building information modelling)?

Principy informačního modelování jsou známy již od roku 1974, avšak BIM jako obecný pojem se uplatňuje až od roku 2002. Informační model stavby si lze představit jako digitalizovaný informační model s databází informací, které zahrnují jak kompletní data o návrhu, tak kompletní data o výstavbě, správě stavby a případné úpravy na stavebních dílech, které mohou nastat až v pozdějších stádiích výstavby. Do této databáze přispívají svým dílem všichni účastníci stavebního cyklu a tím usnadňují komunikaci v jednotlivých fázích výstavby.¹ (2)

Z projekčního hlediska je BIM vnímán spíše jako proces, který využívá digitálního modelu pro výpočet konstrukcí, sdílení informací a jejich využívání. Nejedná se však o pouhý program, který hodláme využít při projektování, ale o zavedení nové metodiky a spolupráce. Zásadní výhodou je využívání jednoho určitého modelu bez ztráty dat a stálému přístupu k informacím o projektu. Pro plynulý průběh výstavby je vyžadovaná maximální spolupráce všech zúčastněných. (3)

3.1.2 Definice BIM

Ukázky definice BIM z různých zdrojů:

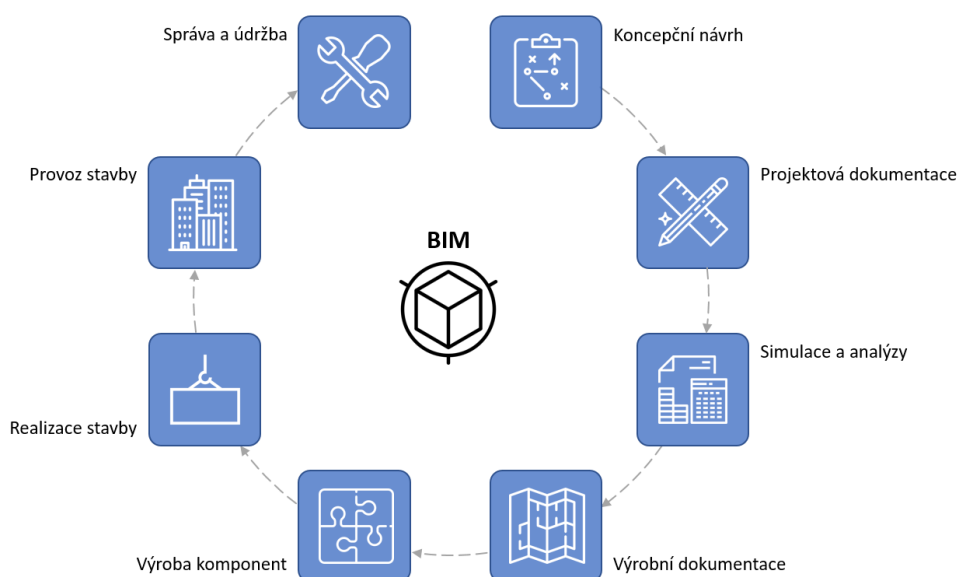
„BIM - Informační model budovy je inteligentní proces pro tvorbu a správu projektů založený na modelu.“² (3)

„Informační model budovy (anglicky Building Information Modelling nebo Building Information Management, zkráceně BIM) je proces vytváření a správy dat o budově během celého jejího životního cyklu“ (2)

3.2 Zavedení BIM do dopravního stavitelství

3.2.1 Koncept

BIM se ve stavebnictví užívá hlavně kvůli tomu, že umožňuje kompletní a rychlé návaznosti všech účastníků stavebního procesu. Propojenost jednotlivých účastníků je zajištěna především spoluprací na jednom digitálním 3D modelu. Do modelu mohou v současné době vstupovat všichni účastníci a doplňovat ho o negeometrické informace (data), ze kterých je model vytvořen. Data obsahují údaje o materiálech, harmonogramu, ceny za jednotlivé procesy a přesnější odhad potřebných nákladů. Za konstrukčním návrhem stojí hlavní projektant, který spolu s ostatními specialisty provede kompletní řešení. Tímto způsobem je vytvořen model skutečného objektu. V průběhu má možnost nahlédnout do modelu investor, popř. zástupce investora, který může zhodnotit cenový rozsah a koordinovat průběh. Model je nadále využíván i v průběhu realizace. V průběhu je aktualizován o případné změny při výstavbě a doplňován o nově nabyté informace. Po dokončení stavby se data uchovávají a jsou stále dostupná. Ať už pro kontrolu veřejné správy ohledně souladu provedení stavby se chváleným projekčním návrhem, tak pro případné rekonstrukce nebo demolice, které by mohly nastat v příštích letech. (2)



Obrázek 12 Procesy využití BIM (4)

3.2.2 Legislativa

3.2.2.1 Obsah dokumentace BIM

„Dokumentace pro BIM, její obsah a struktura, by měla při současném pojetí navazovat na vyhlášku č. 499/2006 Sb., o dokumentaci staveb ve znění vyhlášky č. 62/2013 Sb. a vyhlášku č. 146/2008 Sb., o rozsahu a obsahu projektové dokumentace dopravních staveb.“ (5)

Doposud nebyla zavedena žádná určitá pravidla, která by určovala, jak se mají předávat jednotlivé stupně dokumentace. Proto zavedení BIM stojí v pozadí a veškerá stavební řízení, kolaudace a povolení probíhají pomocí 2D tištěné dokumentace. Pro úplnější zavedení BIM do užívání ve stavitelství by měl zákon vytvořit předpoklady pro možnosti předávání dokumentace v elektronické podobě. V současné době jsou SW, které mohou vytvářet 2D dokumentaci a současně mají aktualizovaný 3D - 5D model.

Cílem zavádění BIM je tedy zavedení možnosti předávání elektronické dokumentace. Na základě analýzy dotčených orgánů bude řešena a zaváděna elektronizace povolovacích procesů. Plné zavedení BIM bude řešeno v jeho návaznosti a podle rekonstrukce veřejného stavebního práva. (5)

3.2.2.2 Předpis pro informační modelování staveb (BIM) pro stavby dopravní infrastruktury

„Účelem tohoto dokumentu je zajistit tvůrcům dat adekvátní podklady k tvorbě informačních modelů infrastrukturních staveb. Dokument určuje základní požadavky pro přípravu informačních modelů staveb.“ (6)

„Dokument specifikuje pravidla tvorby dat pro BIM tak, aby mohla být využita stavebníkem, projektantem, zhotovitelem, výrobcí stavebních prvků, poskytovateli BIM knihoven atd. a to ve všech fázích přípravy, provádění a provozu infrastrukturních staveb.“ (6)

- *Související dokumenty a databáze:*

a) BIM Protokol (fidic)

b) Analýza užití informačního modelování staveb (BIM) pro infrastrukturní stavby

- c) Metodika společného datového prostředí (CDE)
- d) Databáze datového standardu stavebnictví
- e) Příloha č.1 – (silniční stavby), Příloha 2. – (železniční stavby)

- Užívání dat

Při užívání BIM pro dopravní infrastrukturu bylo zpracováno relativní užívání dat. Tato analýza vytváří souběžně s užíváním dat datové standardy, na jejichž základech se data rozdělují do jednotlivých skupin, a vytváří tím kompletní soubor s užitými daty, který obsahuje požadované informace. (6)

- Kombinace užívání dat

Současné užívání dat umožňuje snadno definovat datové standardy dle určitých požadavků a potřeb na konkrétní projekt na základě potřebné metodiky, architektury a struktury. V rámci tabulek jsou pak možné jejich kombinace. Z toho vyplývá, že informační modely s obsahem dat rozděleným na základě DS do jednotlivých souborů dat je možné využít v rámci celého cyklu výstavby. To vše je možné nejen díky architektuře a rozměru dat, ale především díky tomu, že je možný export do neutrálního souborového formátu IFC. (6)

Skupiny vlastností / Užití BIM		Trasa, niveleta	Tvorba návrhu ve 3D	Údaje o výrobcích / elementech, specifikace vlastností	3D model stávajícího stavu	Společné datové prostředí (CDE) a integrace s podnikovými systémy	Vytváření výkresové dokumentace z modelů
Číslo užití dat (BIM)		1	11	32	2	3	19
Významnost v rámci PDPS		10	10	10	9	9	9
Index skupiny vlastností	Název skupiny vlasností						
I	Identifikace	1	1	1	1		1
S	Stavební výrobek / konstrukce			1			1
E	Etapizace						1
Z	Zobrazení	1	1	1	1		1
M	Množství						
F	Fáze						

Obrázek 13. Kombinace užívání dat (5)

3.2.2.3 BIM PROTOKOL – smluvní standard FIDIC

„Tento Protokol tvoří součást Smlouvy uzavřené mezi Objednatel a Dodavatelem. Ustanovení Smlouvy musí upřesnit právní sílu dokumentů tvořících Smlouvu, resp. prioritu jejich užití.“ (7)

„Dodavatel je povinen zajistit, aby Členové projektového týmu, s výjimkou Objednatele, a všichni jeho subdodavatelé, kteří nejsou Členy projektového týmu, byli vázáni tímto Protokolem. V případě rozporu mezi ustanoveními tohoto Protokolu a smlouvou, kterou uzavřel Dodavatel s jakýmkoliv Členem projektového týmu nebo subdodavatelem a připojil k ní tento Protokol, má ve vztahu k Objednateli mezi nimi přednost tento Protokol.“ (7)

Povinnost účastníků dle protokolu:

- Objednatel:

Zajišťuje až do konce stavby, ustanovené smlouvou, aktualizovaný rozvrh dodávaných modelů a požadavky objednavatele na informace o stavbě. Dohlíží, aby po celou dobu výstavby byly přítomny osoby pověřené k vykonávání jednotlivých fází výstavby.

Zajišťuje soulad se zpracováním osobních údajů.

- Dodavatel:

Zajišťuje dodržování protokolů a dohlíží na všechny účastníky stavebního procesu kromě objednavatele. V dalších postupech zajišťuje aktuálnost a správnost dat, upřesnění plánu realizace BIM odpovídající potřebám a dodržení plánu realizace BIM.

- Členové projektového týmu:

Zajišťují dodržování protokolu a plánu realizace BIM. S řádnou odpovědností musí dodat kompletní informační model stavby, nebo jeho jednotlivé části ve formátech, které jsou použitelné pro dostupné softwarové nástroje. (7)

3.3 Funkce BIM modelu

Se zaváděním informačního modelování jsou úzce spjaty dva další termíny. Digitalizace a automatizace ve stavebnictví. Se zvyšujícím výkonem počítačů a lepšími dostupnými softwary se více využívá výpočetní technika ve stavebnictví. (8)

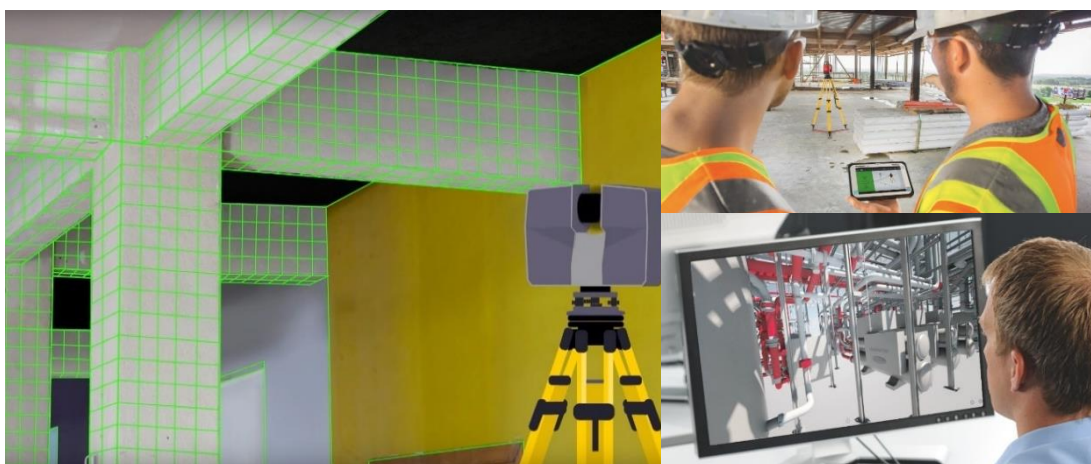
3.3.1 Rozměry modelu BIM

3.3.1.1 3D MODEL

V první řadě je nutné si ujasnit rozdíl mezi 3D modelem a 3D BIM modelem. 3D model je pouze geometrický útvar, což znamená, že obsahuje pouze tvary a rozměry bez materiálových charakteristik. 3D BIM model navíc obsahuje všechna potřebná data pro realizaci a vývoj stavby. Hlavní výhodou je, že pomocí 3D BIM modelu lze stanovit předem očekávané ambice a sledovat jejich dodržení. (9)

Dále je 3D model využíván pro vytváření výkazu výměr nebo pro výpočty související s ekologickým užíváním stavby. Současně používání dat ve 3D modelu umožňuje použití nových technologií, které se dají využít při výstavbě, rekonstrukci nebo revitalizaci. Metoda se nazývá 3D laserové skenování. (8)

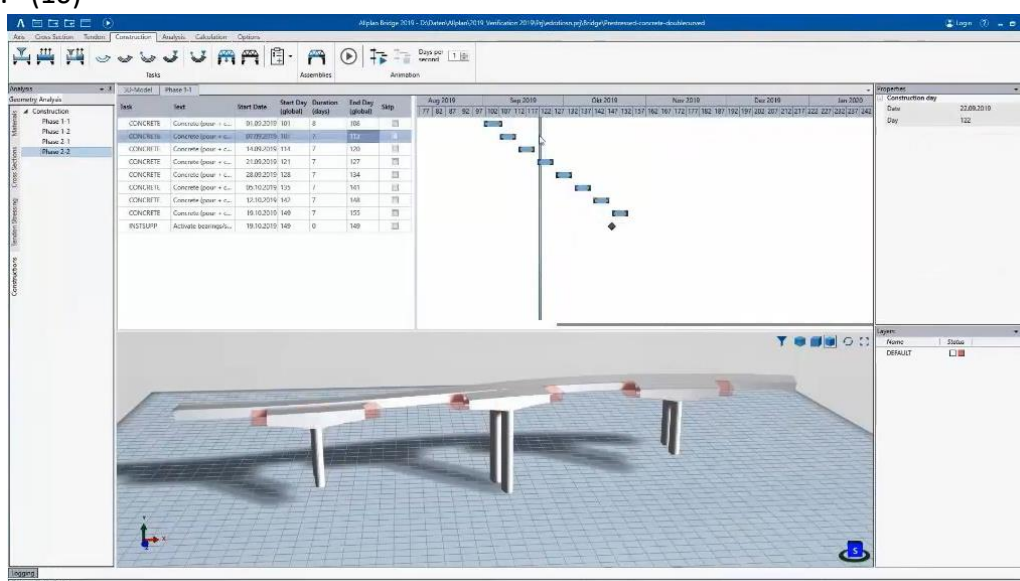
Laserové skenování se provádí pomocí 3D laserových skenerů, které vytváří bodový mrak. Pomocí něho je možné zabrat staveniště nebo budovu, s přesností na 2 mm. Výhodou je možnost nahrání a vymodelování aktuálního terénu, a přizpůsobit novou stavbu zabudovanému prostředí. Body se do bodového mraku měří a exportují pomocí totální stanice. (9)



Obrázek 14. Propojení BIM s totální stanicí (21)

3.3.1.2 4D MODEL

Rozdíl mezi 3D BIM modelem a 4D BIM modelem je přidání funkce, která zahrnuje časový průběh výstavby. Ve 4D je SW schopný vytvořit simulaci plánování a sledování postupu výstavby, tím je myšleno propojení harmonogramu výstavby a jeho zrealizování v digitálním modelu. Díky digitálnímu plánování je možné přesněji odhadnout požadovanou dobu výstavby a popřípadě přehodnotit pracovní postupy nebo pracovní plán výstavby. Softwary schopné vytvořit takové simulace jsou zároveň schopné rozpoznat anomálie v průběhu výstavby, a tím pádem minimalizovat vzniklá rizika. (10)



Obrázek 15. BIM workflow řešiče (10)

Možné zadávání a výstupy:

- Interaktivní zadávání, které je definováno časovou osou „Gantt-diagram“ a animací, která probíhá současně s průběhem grafu a znázorňuje čas výstavby.
- Snadno se dají modifikovat a monitorovat úkoly jako je: tuhnutí betonu, předpínání výztuže atd.
- Při definovaném průběhu výstavby lze jednotlivým prvkům mostní konstrukce přiřadit vlastnosti a jejich úkoly, které při výstavbě budou plnit.
- Snadno se znázorní vyztužování podle jednotlivých fází výstavby.
- Model průběhu výstavby lze později využít pro statickou analýzu. (10)

3.3.1.3 5D MODEL

Pod pojmem 5D modelování si lze představit 3D BIM model, který je doplněn o interaktivní harmonogramy výstavby, údaje o cenách materiálů a o dalších nákladech spojených s výstavbou. Takový model nabírá svým obsahem velké množství dat spolu s velkým množstvím podrobností. V případě 5D modelu se již mluví o kompletním nástroji, podle kterého bude probíhat stavební řízení.

5D model může být využit ve dvou fázích. V první fázi, podobně jako 3D a 4D, je vhodný pro odhad budoucích nákladů na výstavbu, ale s podrobnějším měřítkem než nižší modely, díky podrobnějšímu obsahu informací. V druhém kroku slouží ke sledování průběhu realizace a ke kontrole výkonu stavebníků a strojů. Díky možnostem vytváření vizualizace pomocí harmonogramů a předběžných výpočtů v modelu je možné učinit správná rozhodnutí v počátečních fázích projektu, která ve finálním součtu ovlivní náklady na celé stavební dílo.

3.3.2 Vliv digitalizace

Se zavedením nové výkonnější počítačové technologie a využíváním nových SW v projekčním stádiu souvisí i digitalizace v dalších stádiích výstavby. Prvním krokem jsou totální stanice pro geodety využívající laserové skenování viz str.16. Dalším postupem je přechod k bezpapírové dokumentaci. Díky mobilním technologiím, jako jsou chytré telefony nebo tablety, je možné přinášet výkresy na stavby v digitální formě. S těmito technologiemi mohou technici přistupovat do společného datového prostředí (**CDE**) nebo do databází sdílených s ostatními účastníky. Tímto přístupem se zlepšuje kvalita



Obrázek 16. Vliv digitalizace (11)

práce, snižuje se přesnost a zkracuje se čas strávený při hledání informací, popřípadě při čekání na projekční úpravy.

Kromě funkcí zhotovitele se mobilní zařízení využívá v případě kontrolních schůzek a zkušebních plánů, při provádění kontrol technickým dozorem, stavebníkem, požárním bezpečnostním technikem a k pořizování úprav během realizace, které se pak zavádí do stávajícího modelu. Všechny nové inovace vedou k úspoře času, zlepšení efektivity a k zpřehlednění celého stavebního procesu, včetně využití v administrativních procesech a v uchovávání dat. Současně nedílnou součástí nových postupů je i 3D vizualizace, která má silný vliv na marketing a pochopení stavby pro okolní veřejnost. (8)

3.3.3 Prostředí CDE a formát IFC

3.3.3.1 *Definice CDE = Common Data Enviroment:*

„Společné datové prostředí (CDE) je jediným zdrojem informací používaných ke shromažďování, správě a šíření informací pro celý tým projektu. Vytvoření tohoto jediného zdroje informací usnadňuje spolupráci mezi jednotlivými účastníky projektu, jednoznačně definuje jedinou platnou verzi informace a pomáhá vyhnout se nedorozumění, duplicitě a chybám.“ (12)

Zjednodušeně by se dalo říci, že předávání informací pomocí BIM modelu není myšleno jako předávání 2D dokumentů a 3D modelů s popisem jednotlivých prvků, ale jedná se o veškerou komunikaci a procesy s nimi spojené. Dokumenty, které určitým způsobem definují základní charakteristiky procesu a jejich výstupy. (12)

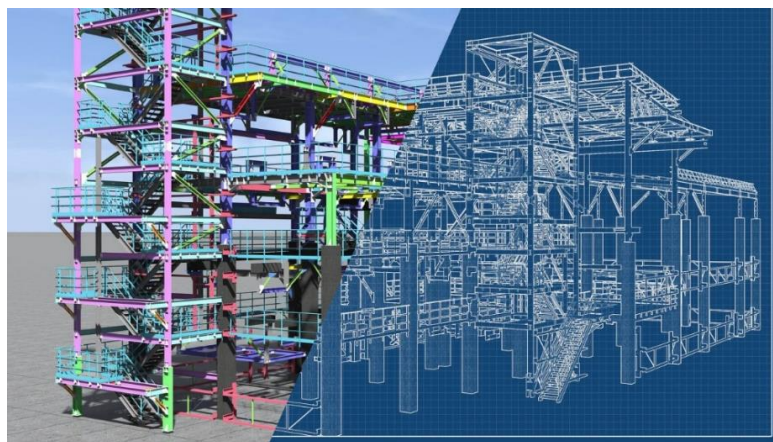
Hlavním účelem dokumentu *„společné datové prostředí“* je poskytnout kvalifikované informace pro uživatele ve všech odvětvích, na které by se mohl při výstavbě zaměřit. Už z toho důvodu, že CDE systém je klíčovým systémem pro BIM, doprovází stavbu ve všech provozních fázích výstavby. Pro zdařilé implementace BIM v rámci celého životního cyklu výstavby je nezbytná účast všech účastníků výstavby v BIM prostředí a dostupnost CDE prostředí. CDE ve všech fázích slouží jako informační a komunikační centrum, kde je možné sehnat informace o projektu a zajistit dostupnost a celistvost modelu pro investora. (12)

- Technické řešení

„Současný rozvoj informačních technologií umožňuje pro tento typ aplikací reálně využívat cloudové aplikace, které se ukazují jako nejvhodnější pro umožnění přístupu velkého množství nezávislých subjektů k systému. Samozřejmě pro technické řešení je možné využít i on-premise systém, avšak hardwarové i databázové řešení spolu s bezpečnostní politikou budou klást enormní požadavky na bezpečnost, on-line propustnost, zálohování a scénáře pro případy různých poruch (disaster recovery).“ (12)

- Cloudové aplikace

Cloudové aplikace nabízejí pokročilé technologie ať už sdílené lokálně nebo externě renovovanými globálními poskytovateli. Poskytují profesionální správu, flexibilitu z hlediska omezení provozu při užívání různých operačních systémů. Jejich provoz, který běží v internetovém prohlížeči a nevyžaduje žádnou instalaci či jiné zdoluhavé nároky na straně uživatele, je nenáročný. Můžeme využívat on-premise řešení, cloudových řešení.



Obrázek 17. BIM výkres-model. (13)

Další výhodou CDE a využití cloudového sdílení dat je možnost používat přímo mobilní aplikace s pokročilými operačními systémy. Jedním z příkladů užití mobilní aplikace, už celkem běžným v současné době, je BIMx. Aplikace byla stvořena pro prezentaci BIM projektu na mobilních zařízeních. Při spuštění využívá technologii hyper-model a elegantně spojuje 2D dokumenty s 3D modelem. Zavedení této aplikace velmi urychlilo spolupráci mezi stavenišťem a projekčním týmem. Kromě zobrazení a užívání kompletního modelu stavby je schopen tisknout dokumentaci přímo ze staveniště pomocí sdíleného cloud souboru. (14)

3.3.3.2 IFC= industry foundation classes

„IFC umožňuje výměnu dat mezi autorskými BIM aplikacemi různých výrobců“. (15)

Většina modelovacích a projekčních SW podporuje export a import dat v IFC formátu. Obsahem IFC formátu je různé množství dat, která obsahují grafické a popisné informace. (15)

- Grafický přenos dat

Při exportu BIM modelu do formátu IFC z jedné aplikace a následujícím importu nebývá běžně problém se ztrátou geometrie. Problémy mohou nastat v případě, že SW nedokáže zobrazit celý 3D model a také nebývá zpravidla možné model upravovat. Možné je prvky přemísťovat a upravovat jejich orientaci, ale upravit data prvku je obtížné. Důvody jsou prosté. Každá modelovací aplikace používá své vlastní tvorby geometrie 3D a přípustné upravování parametrů. Nedá se ovšem říci, že přenosem v IFC formátech se geometrické prvky ztrácí, pouze určité formáty nedokáží zobrazit vytvořené prvky v jiných platformách. (15)

- Popisné informace

Nejprve je třeba připomenout, že IFC jako takové je v první řadě specifikací, která definuje datovou strukturu umožňující dopodrobna popsat stavbu, její prvky a některé vztahy mezi nimi. Autorské BIM aplikace také pracují s datovými strukturami, avšak s jinými než IFC. Některé z těchto atributů jsou vestavěné přímo v programu a u daných prvků se tak vyskytují vždy, jiné jsou doplněné uživatelem a mohou obsahovat prakticky libovolný typ informací. Pro takové atributy může existovat ekvivalent ve struktuře IFC, ale také nemusí. Důležité je však to, že pokud při exportu chceme informace v attributech přenést do IFC souboru, musíme je nějakým způsobem namapovat. U uživatelských atributů je pak mapování zcela na nás. Pokud tedy při převodech do IFC dochází ke ztrátovosti informací, obvykle nebývá na vině formát samotný, ale špatné nastavení mapování. Mapování bohužel vyžaduje dobrou znalost IFC struktury a dané problematiky, proto pokud je správný přenos informací nezbytný, doporučuji poradit se s odborníkem. (15)

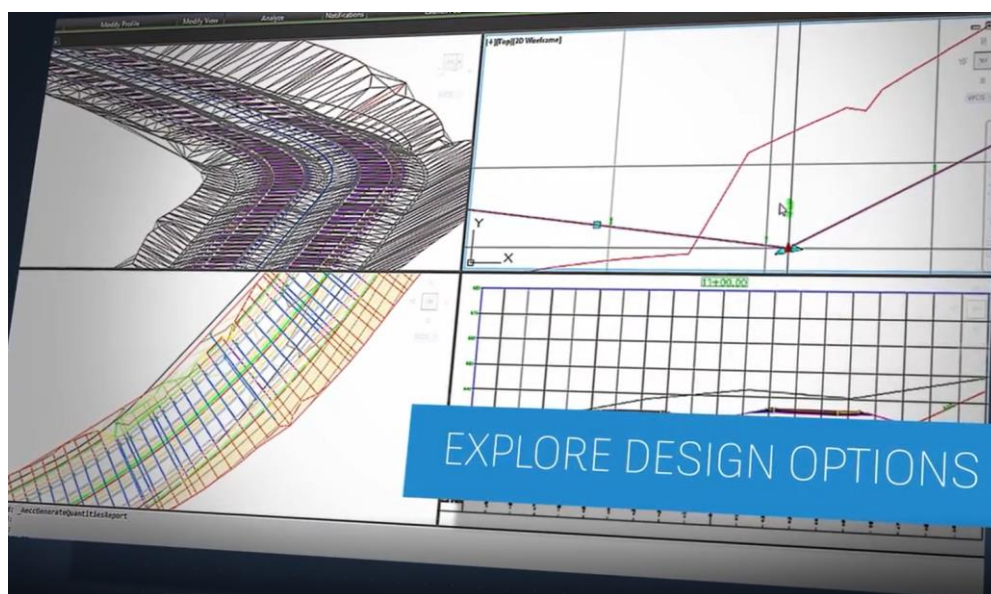
3.4 Dostupné modelovací programy

Aplikace, které se během praxe nejvíce užívají pro dopravní stavby, jsou CIVIL 3D, Autocad, Revit, Allplan (nově Allplan bridge) a další. Programy použité při návrhu:

3.4.1 CIVIL 3D

3.4.1.1 Funkce

Autodesk CIVIL 3D je objektová integrovaná CAD/BIM aplikace založená na jádru Autocadu. Slouží k výkonnějšímu a časově úspornějšímu projektování především liniových a dopravních staveb. Jeho modelovací funkce mohou využít i projekty obchodních a obytných zón, krajinářské, TZB (potrubí a kanalizace) a mnohé další. Vzhledem k tomu, že je CIVIL 3D nástavbou Autocadu, je uživatelsky přístupnější a zároveň usnadňuje práci pomocí norem, které poskytují tvorbu dynamických prvků pro jednodušší projektování. Veškeré prvky vytvořené pomocí CIVILU jsou propojené, proto se dá jejich úprava jednotlivých fází automaticky propojit do zbylých „oken“. Například úprava koridorů vytvořených z modelu povrchu se automaticky promítne do úrovně terénu jednotlivých příčných řezů. Při využití těchto funkcí lze snadno vyhodnotit nejvhodnější a nejúspornější variantu. Směrové řešení je zjednodušeno pomocí předdefinovaných přechodnic, příčných sklonů, klopení zatáček, a dalších prvků dle ČSN 73 6101, 73 6110. Jejich vzhled se dá upravovat v nastavení jednotlivých prvků. (17)

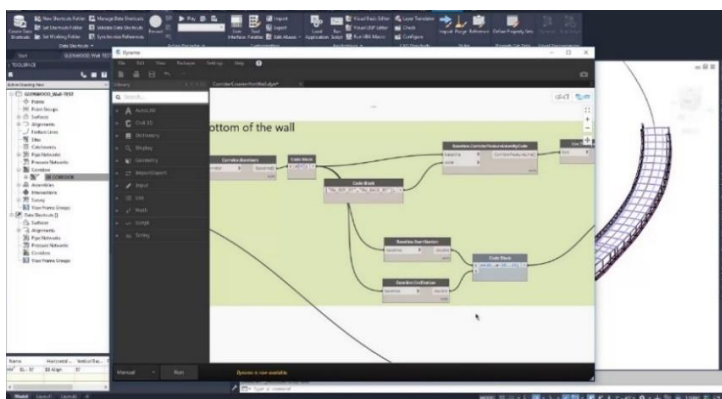


Obrázek 18. Civil 3D model + výstupy (16)

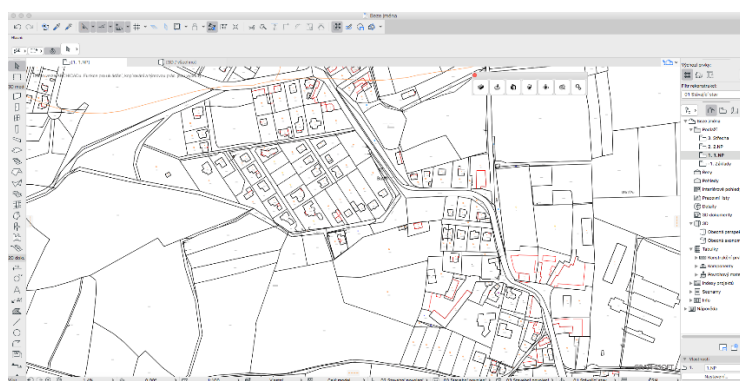
3.4.1.2 Formát

Do Civilu lze importovat data pro tvorbu bodového pole z řady vstupních formátů jako je MDB a LandXML. Kromě bodového pole lze načítat mapy a GIS data ze zdrojů WMS a WFS. Z dalších výhod jako nástavby Autocadu je dwg formát, který umožňuje datovou komunikaci s aplikacemi Autodesk 3ds Max, InfraWorks, Revit(IFC) a Infrastructure Map Server. Rovněž lze snadno sdílet data mezi aplikacemi od firmy Autodesk. (17)

V Civilu lze pracovat s bodovým polem v řadě vstupních formátů, včetně MDB a LandXML. Lze načítat mapová a GIS data z řady zdrojů, včetně WMS a WFS (nabízí též import dat katastru ČR). Civil 3D pracuje se standardním formátem DWG, takže data lze sdílet s dalšími aplikacemi firmy Autodesk. (17)



Obrázek 19. Civil funkce Dynamo (17)



Obrázek 20. Civil BIM tech tools (17)

Současně je Civil možnou platformou pro připojení nadstavbových aplikací díky širokému API rozhraní. Příklady nástaveb jsou programovací nástroje Dynamo, který umožní naplánovat časový průběh výstavby, a Civil Tools, který slouží k nahrání prvkového katastru nemovitost do prostředí Civil. (17)

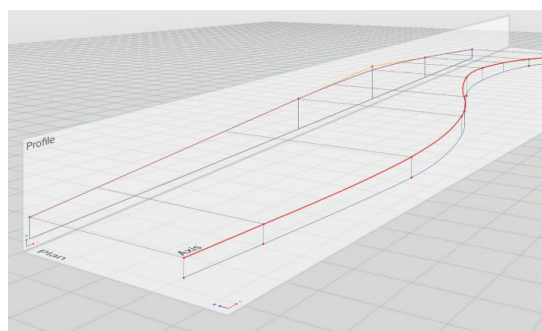
3.4.2 ALLPLAN BRIDGE

Allplan Bridge se zatím jeví jako vhodný SW pro modelování, výpočty a konstruování ve 4D. Díky svému dynamickému modelu, který propojuje statické výpočty a modelování je schopen propojovat jednotlivé fáze modelu. Stačí upravit nedostatky ve směrovém řešení a model se snadno přepočítá i s konstrukčními prvky. Zároveň umožňuje díky svému vysokému stupni detailního zpracování vizuální plánování a koordinaci. Na rozdíl od Civilu 3D neslouží pouze jako projekční SW pro výkresy a modely, ale je schopný vytvořit kompletní statický model pro výpočet vnitřních sil a pro návrh a posouzení předpětí. Je to platforma Allplanu zaměřená na mostní objekty. (10)

3.4.2.1 Schématický postup podrobného návrhu 3D modelu:

- **Návrh směrového řešení**

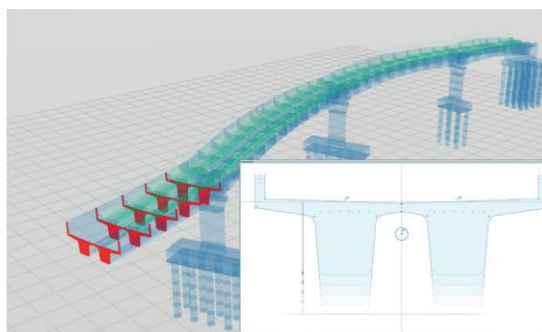
Je možné převzít směrové řešení z dat z existujícího návrhu nebo vytvořit vlastní pomocí osového zadávání.



Obrázek 21. Směrové řešení (18)

- **Definování průřezu**

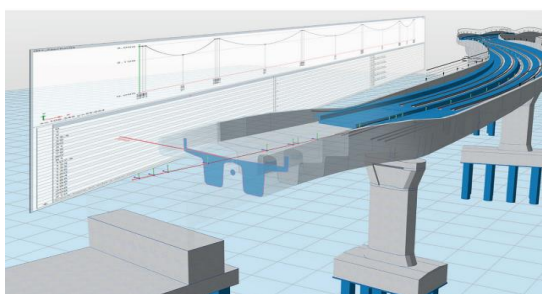
Pomocí ekvidistant osového systému lze vytvořit geometrii, kterou lze poté definovat materiálové charakteristiky a možné dimenze.



Obrázek 22. Definovaný průřez (18)

- **Parametrické modelování**

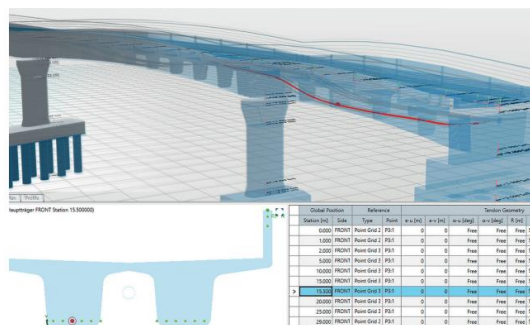
3D model lze snadno vytvářet ve 3D prostoru pomocí navržených entit a směrového řešení. Model se automaticky přepočítá při jejich úpravě. (18)



Obrázek 23. Parametrické modelování (18)

- **Návrh a definování předpětí**

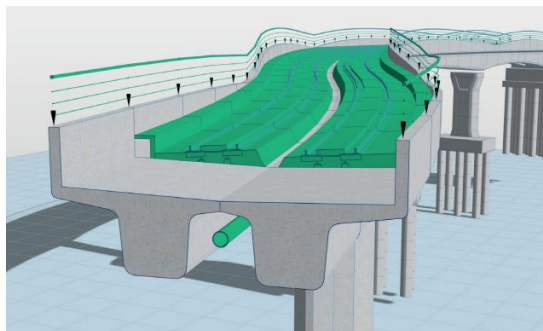
Pomocí geometrických standartních povelů lze namodelovat prutové prvky předpětí. Po návrhu se navrhnou potřebné vlastnosti jako pokluz, počáteční předpětí apod. (18)



Obrázek 24. Návrh a definování předpětí (18)

- **Přidání ostatního zatížení**

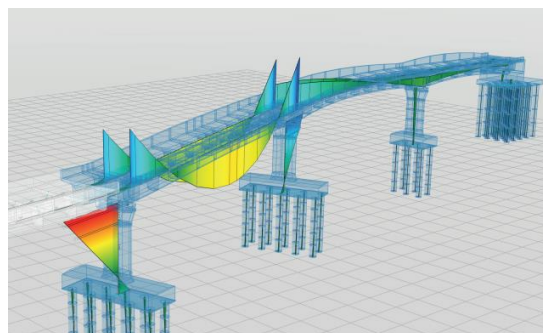
Po návrhu základní konstrukce je možné přidat nosné prvky konstrukce a určit dobu zatížení. Lze přidat i ostatní zatížení například od teploty nebo větru.



Obrázek 25. Přidání ostatního zatížení (18)

- **Definování statického modelu a výpočet vnitřních sil**

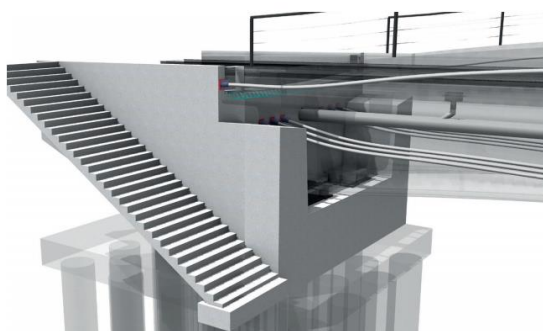
Pomocí Bernoulliho teorie nosníku lze vypočítat vnitřní síly na celém mostě s ohledem na změny průřezu. (18)



Obrázek 26. Definování statického modelu (18)

- **Závěr**

Lze provést zapracování ostatních potřebných úprav do modelu. Což znamená přidávat ostatní nosné prvky a modelovat příslušenství mostní stavby.



Obrázek 27. Závěr (18)

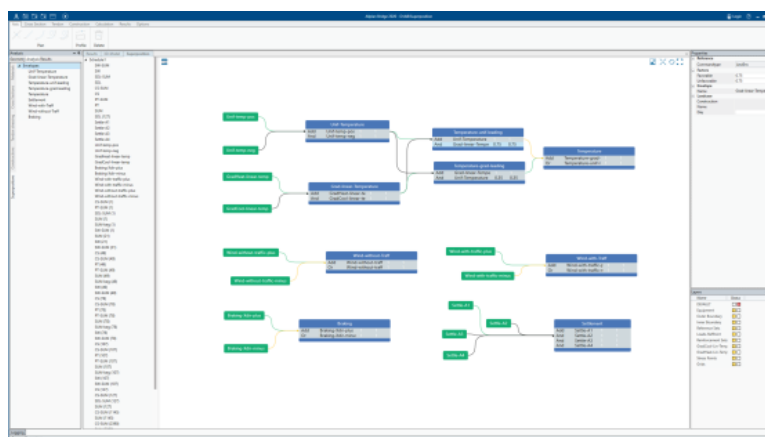
(10)

3.4.2.2 4D MODEL

Kromě klasického návrhu lze nastavit zatížení podle časového harmonogramu výstavby a namodelovat další funkce s tím související. Rozdělení modelu podle aktivace prvků a výpočtové akce, přitom stále zaručuje naprostou transparentci.

- Funkce překrývání

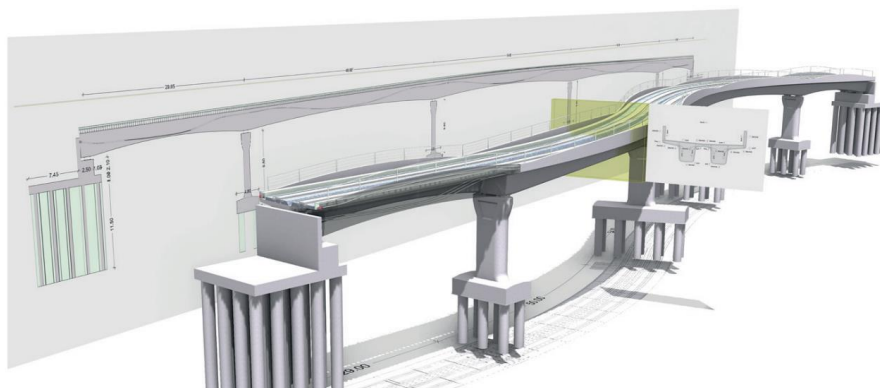
Funkce překrývání byla novinkou v Allplan Bridge 2020. Schematické se snaží zkombinovat flexibilitu s optimální přehledností. Umožňuje vybrat více komponentů a nastavit definování bodů napětí, jejich překrývání a uložení příslušných velikostí řezů mezi různými prvky. (10)



Obrázek 28. Překrývání (18)

3.4.2.3 Výkresové pole

Veškeré výkresy mohou být vytvořeny z digitálního modelu, kde lze z jednoho libovolného bodu do druhého vytvořit řezovou rovinu, která podle norem a zásad pro vykreslování vytvoří řez či půdorys, který může být po exportu upravován. (10)



Obrázek 29. Výkresy (10)

3.5 Výhody, nevýhody

3.5.1 Výhody

3.5.1.1 *Investor*

- Potřebné náklady na realizaci vyčíslené před začátkem výstavby.
- Výkaz všech použitých prvků a materiálů z projektového modelu.
- Vytvoření časového plánu výstavby pomocí vizualizace. Odstranění případných prodlev, které by vznikly přímo na stavbě.
- Kontrola o spotřebě i použitém materiálu. Kontrola správnosti provedení.

3.5.1.2 *Zhotovitel*

- Možnost využívání nových technologií, které usnadní komunikaci a řízení stavby.
- Zapracovávání změn do interaktivního modelu -> rychlejší konzultace s projekční kanceláří a investorem.
- 3D model přítomný na stavbě umožňuje lepší orientaci a přehlednost.

3.5.1.3 *Projekční kancelář a specialisté*

- Předními výhodami je úspora času, lepší srozumitelnost, přesnost a jednodušší interpretace pro veřejnost a investora.
- Přístup k novým softwarům, které umožňují spolupráci se všemi účastníky na 3D modelu.
- Menší přenos dat mezi jednotlivými formáty. Model je schopný uchovávat všechna data potřebná pro všechny zapojené strany.

3.5.2 Nevýhody

- Zavedení nových principů do projekčního i realizačního provozu.
- Investice do nových SW a školení zaměstnanců.
- Porušení zaběhlých standardů ve stavebním procesu pro všechny účastníky.
- Možné nedokonalosti nových SW a neznalost účastníků.

4 KOMENTOVANÝ STATICKÝ VÝPOČET

V komentovaném statickém výpočtu byly provedeny výpočty v jednotlivých kapitolách, které byly vždy uzavřeny zhodnocením výsledků. V první řadě byly určeny vstupní údaje výpočetních modelů pro ověření správnosti geometrických a materiálových charakteristik, aby výpočet dosahoval správných hodnot. V dalších krocích bylo určeno stálé i proměnné zatížení na konstrukci podle norem a dostupných zdrojů. Výsledky vnitřních sil ze všech programů byly v závěru kapitoly zhodnoceny.

Celým statickým výpočet provázely tři výpočetní modely: SCIA Engineer, Allplan Bridge – přímý model a Allplan Bridge – model v oblouku. Pro veškeré podrobné výpočty sloužil model SCIA jako výstupní, a tudíž pro něj byly spočteny jak kombinace, tak jednotlivá posouzení. Výsledky z Allplan Bridge byly vždy porovnány a okomentovány.

Cílem komentovaného statického výpočtu bylo ověřit funkčnost nového výpočetního softwaru a okomentovat postup řešení bakalářské práce.

4.1 Vstupní údaje

4.1.1 Geometrie

4.1.1.1 Příčný řez

Příčné uspořádání mostu bylo navrženo v programu Autocad 2019, kde byl podle normy navržen trémový třípolový most. Rozdělení polí bylo v poměru 0,7:1:0,7 a průřez je proměnný po délce kvůli náběhům nad pilíři.

Do programu SCIA Engineer byly z Autocadu importovány dva příčné řezy, které pomocí proměnného průřezu definovaly rozměry mostovky. V Allplan Bridge byl příčný řez vytvořen pomocí ekvidistant. Kontrola geometrie byla ověřena pomocí průřezových charakteristik.

Allplan bridge

Property	Struct. Unit 1		Dim. unit	Description
	Value			
Ax	6.9202		[m ²]	Cross section area
Ay	3.9525		[m ²]	Shear area Vy
Az	3.6911		[m ²]	Shear area Vz
I2 (y)	43.5444		[m ⁴]	Moment of inertia about second principal axis
I1 (z)	1.3609		[m ⁴]	Moment of inertia about first principal axis
Iy	43.5444		[m ⁴]	Moment of inertia about Y
Iz	1.3609		[m ⁴]	Moment of inertia about Z
Iyz	0		[m ⁴]	Deviation moment of inertia
It	1.5878		[m ⁴]	Torsional moment of inertia
Alpha	0		[deg]	Angle of principle axes
ey	-0.5766		[m]	Center of gravity Y
ez	0		[m]	Center of gravity Z
ey,S	-0.22		[m]	Shear center Y
ez,S	0.001094		[m]	Shear center Z

Obrázek 30. Řez v poli Allplan

SCIA Engineer

```

----- OBLASTI -----
Plocha: 6.920
Obvod: 24.189
Ohraničující kvádr: X: -5.047 -- 5.048
                   Y: -1.002 -- 0.569
Těžiště: X: -0.004
          Y: 0.000
Momenty setrvačnosti: X: 1.283
                      Y: 43.594
Deviační moment: XY: 0.004
Pol. setrvačnosti: X: 0.431
                  Y: 2.513
Hlavní momenty a X-Y směry z těžiště:
I: 1.283 podél [1.000 0.000]
J: 43.694 podél [0.000 1.000]
    
```

Obrázek 31. Řez v poli SCIA

Property	Struct. Unit 1		Dim. unit	Description
	Value			
Ax	8.4410		[m ²]	Cross section area
Ay	5.2026		[m ²]	Shear area Vy
Az	3.5023		[m ²]	Shear area Vz
I2 (y)	50.0822		[m ⁴]	Moment of inertia about second prin
I1 (z)	3.5893		[m ⁴]	Moment of inertia about first princ
Iy	50.0822		[m ⁴]	Moment of inertia about Y
Iz	3.5893		[m ⁴]	Moment of inertia about Z
Iyz	0		[m ⁴]	Deviation moment of inertia
It	2.4254		[m ⁴]	Torsional moment of inertia
Alpha	0		[deg]	Angle of principle axes
ey	-0.8112		[m]	Center of gravity Y
ez	0		[m]	Center of gravity Z
ey,S	-0.05369		[m]	Shear center Y
ez,S	0.0004435		[m]	Shear center Z

Obrázek 32. Nad podporou Allplan

```

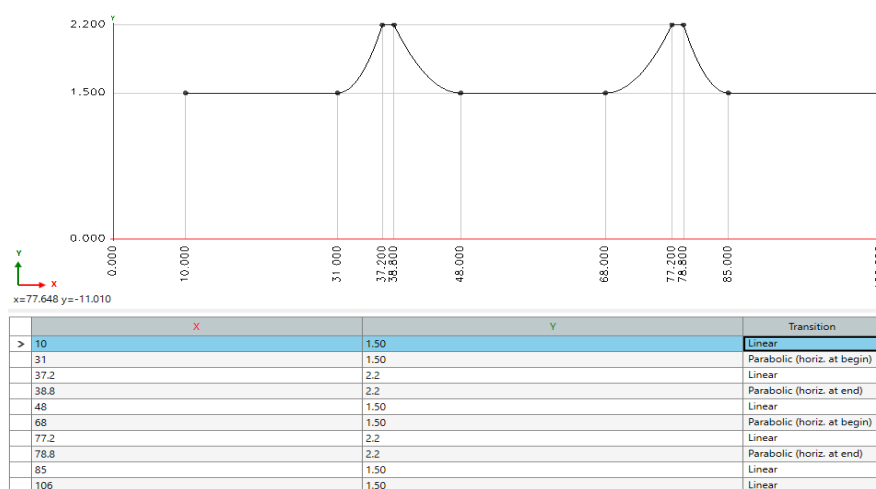
----- OBLASTI -----
Plocha: 8.441
Obvod: 26.659
Ohraničující kvádr: X: -5.048 -- 5.048
                   Y: -1.459 -- 0.811
Těžiště: X: -0.003
          Y: 0.000
Momenty setrvačnosti: X: 3.590
                      Y: 50.194
Deviační moment: XY: 0.010
Pol. setrvačnosti: X: 0.652
                  Y: 2.439
Hlavní momenty a X-Y směry z těžiště:
I: 3.590 podél [1.000 0.
J: 50.194 podél [0.000 1
    
```

Obrázek 33. Nad podporou SCIA

4.1.1.2 Proměnná výška průřezu

Náběhy byly v programu SCIA zadány pomocí proměnného průřezu, kde byly po jednotlivých intervalech nahrány příslušné průřezy. Náběhy byly zvoleny zjednodušenou metodou ve čtvrtině rozpětí pole.

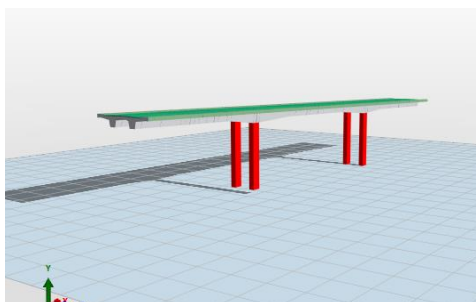
V programu Allplan Bridge byly náběhy provedeny pomocí funkce hsection, která se zadala v příčném řezu na dolní hranu příčného řezu. Funkce se potom definovala v geometrickém modelu matematickou funkcí. Funkce byla po vytvoření zadána jednotlivým průřezům a zahrnuta do analytického výpočtu.



Obrázek 34. Allplan náběhy

4.1.1.3 Pilíře

Pilíře byly obdélníkového průřezu o rozměrech 1,6 m x 1,0 m. Ve Scie byly určeny jako jeden objekt vytvořený v programu Autocad nahráný na osu a tuze připojený k mostovce. V programu Allplan Bridge byl každý pilíř vytvořen jako samostatný objekt a připojen k mostovce.



Property	Struct. Unit 1	Dim. unit	Description
	Value		
Ax	1.6000	[m ²]	Cross section area
Ay	1.6000	[m ²]	Shear area Vy
Az	1.6000	[m ²]	Shear area Vz
I2 (y)	0.1333	[m ⁴]	Moment of inertia about second princi
I1 (z)	0.3413	[m ⁴]	Moment of inertia about first principal
Iy	0.1333	[m ⁴]	Moment of inertia about Y
Iz	0.3413	[m ⁴]	Moment of inertia about Z
Iyz	0	[m ⁴]	Deviation moment of inertia
It	0.3835	[m ⁴]	Torsional moment of inertia

Obrázek 35. Pilíře - Allplan bridge

4.1.2 Materiály

4.1.2.1 Beton

Pro nosnou konstrukci mostu je navržen beton C35/45 – XF2 + XD1 + XC4.

Vlastnosti betonu:

a) Pevnost betonu v tlaku

- v čase 28 dní:

charakteristická válcová pevnost betonu $f_{ck} = 35$ MPa

průměrná hodnota válcové pevnosti v tlaku $f_{cm} = f_{ck} + 8 = 43$ MPa

návrhová pevnost betonu v tlaku $f_{cd} = \alpha_{cc} * f_{ck} / \gamma_c = 0,9 * 35 / 1,5 = 21$ MPa.

(α_{cc} – součinitel zohledňující dlouhodobé účinky na tlakovou pevnost betonu)

- v čase 7 dní:

charakteristická válcová pevnost betonu v čase t $f_{ck}(t) = f_{cm}(t) - 8,0$

průměrná hodnota pevnosti betonu v tlaku v čase t $f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) * f_{cm}$

funkce popisující vývoj pevnosti betonu v tlaku v čase $\beta_{cc}(t) = \exp\{s[1 - (28/t)^{0,5}]\}$

t – stáří betonu [dny]

s – součinitel, který se mění podle použitého druhu cementu [-] $\rightarrow 0,2$

$\beta_{cc}(7) = \exp\{s[1 - (28/7)^{0,5}]\} = 0,819$ [-]

$f_{cm}(7) = \beta_{cc}(7) * f_{cm} = 0,819 * 43 = 35,205$ MPa

$f_{ck}(7) = f_{cm}(7) - 8,0 = 35,205 - 8,0 = 27,205$ MPa

b) Pevnost betonu v tahu:

- v čase 28 dní:

dolní charakteristická hodnota $f_{ctk;0,05} = 0,7 * f_{ctm} = 2,2$ MPa

horní charakteristická hodnota $f_{ctk;0,95} = 1,3 * f_{ctm} = 4,2$ MPa

průměrná hodnota pevnosti v dostředném tahu $f_{ctm} = 0,30 * f_{ck}(2/3) < C50/60 = 3,2$ MPa

návrhová pevnost betonu v tahu $f_{ctd} = \alpha_{ct} * f_{ctk;0,05} / \gamma_c = 0,9 * 2,2 / 1,5 = 1,32$ MPa

(α_{ct} – součinitel uvažující dlouhodobé účinky na tahovou pevnost betonu)

- v čase 7 dní:

$$f_{ctm}(7) = \beta_{cc}(7)^\alpha * f_{ctm} = (0,819)^1 * 3,2 = 2,620 \text{ MPa}$$

$$(\alpha=1 \text{ pro } t < 28 \text{ dní, } \alpha=2/3 \text{ pro } t > 28 \text{ dní})$$

c) Ostatní materiálové charakteristiky

- Tečnový modul pružnosti obyčejného betonu v $t = 28$ dní při nulovém napětí

$$E_{cm} = 22(f_{cm}/10)^{0,3} = 34,08 \text{ GPa}$$

$$E_c = 1,05 * E_{cm} = 1,05 * 34 = 35,78 \text{ GPa}$$

- Mezní poměrné stlačení betonu $\varepsilon_{cu2} (\text{‰}) = \varepsilon_{cu3} (\text{‰}) = 3,5 \text{ ‰}$
- Poměrné stlačení betonu $\varepsilon_{c2} (\text{‰}) = 2 \text{ ‰}$; $\varepsilon_{c3} (\text{‰}) = 1,75 \text{ ‰}$
- Poissonova konstanta $\nu = 0,2$
- Součinitel teplotní délkové roztažnosti $\alpha = 10 * 10^{-6} * \text{K}^{-1}$

d) Dotvarování

- Lineární dotvarování

Lineární dotvarování se uvažuje jen pro hodnoty normálového napětí $\sigma_c < 0,45 * f_{ck}(t_0)$, kde $f_{ck}(t_0)$ je charakteristická válcová pevnost betonu v tlaku v čase vnesení zatížení t_0 . Při lineárním dotvarování závisí součinitel dotvarování $\phi(t, t_0)$ na jednotlivých parametrech: (19)

- na relativní vlhkosti vzduchu ϕ_{RH}
- rozměrech prvku $h_0 = 2 * A_c / u$
- složení betonu $\beta_c(f_{cm})$ a stáří betonu v okamžiku vnesení zatížení $\beta_c(t_0)$
- času vnesení zatížení t_0 a době působení zatížení t . $\beta_c(t, t_0)$

- Nelineární dotvarování

S nelineárním dotvarováním se počítá při vyšším normálovém napětí tj.: $\sigma_c > 0,45 * f_{ck}(t_0)$. Při tomto napětí se pak součinitel dotvarování značí $\phi_{nl}(t, t_0)$. (19)

- Základní vzorce

Poměrné přetvoření vyvolané dotvarováním betonu se vypočte: $\epsilon_{cc}(t, t_0) = \phi(t, t_0) * (\sigma_c/E)$

Součinitel dotvarování $\phi(t, t_0) = \phi_0 * \beta_c(t, t_0)$

Základní součinitel dotvarování $\phi_0 = \phi_{RH} * \beta_c(f_{cm}) * \beta_c(t_0)$

$\beta_c(t_0) = 1 / (0,1 + t_0)^{0,5}$

4.1.2.2 Předpínací výztuž

Návrh konstrukce i předpětí byl proveden podle Eurokódů, a tudíž i návrh předpínací oceli odpovídá Evropskému technickému schválení.

Parametry předpětí: (EN:Y1860S7-15,7)

Průměr:	$\varnothing = 15,7 \text{ mm}$
Plocha jednoho lana:	$A_{p,01} = 150 \text{ mm}^2$
Charakteristická pevnost v tahu:	$f_{pk} = 1860 \text{ MPa}$ $f_{p0,1k} = 0,88 * f_{pk} = 0,88 * 1860 = 1636,8 \text{ Mpa}$
Modul pružnosti:	$E_p = 195 \text{ Gpa}$
Návrhová hodnota napětí v předpínací oceli:	$f_{pd} = f_{p0,1k} / \gamma_s = 1636,8 / 1,15 = 1423,304 \text{ Mpa}$
Duktilita:	$f_{pk} / f_{p0,1k} > 1,1 \quad 1,136 > 1,1$
Relaxace:	2. třída s nízkou relaxací

4.1.2.3 Betonářská výztuž

Při návrhu a vyztužení bude využita výztuž B500B. Parametry betonářské výztuže:

Charakteristická pevnost:	$f_{yk} = 500 \text{ MPa}$
Dílčí součinitel	$\gamma_s = 1,15$
Návrhová mez kluzu:	$f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s = 434,783 \text{ MPa}$
Modul pružnosti:	$E_s = 200 \text{ Gpa}$
Duktilita:	Návrhová třída skupiny B

4.1.2.4 Materiály Allplan Bridge

Definování materiálů do Allplan Bridge bylo provedeno pomocí vlastního zadání a importu z Bim+. Jedná se o web s dostupnou databází pro společnou platformu programů Allplan. Obsahuje množství podkladů, které jsou pro uživatele zdarma k dispozici. Hodnoty materiálů jsou v souladu s normovými požadavky byly upraveny a sjednoceny podle statického výpočtu standartní metodou.

General	
Name	C35/45
Description	C35/45,EN 1991-1-1
Group	Concrete
Foreign name	EN_Eurocode:C_35/45
Basic material values	
E	34 000 [N/mm ²]
G	14 167 [N/mm ²]
v	0.2
α-T	0.000010 [1/°C]
γ	25.0 [kN/m ³]
f _{ct}	35 [N/mm ²]
f _{cm}	43 [N/mm ²]
Cement class	1.000

Obrázek 36. Materiály C35/45

General	
Name	B 500B
Description	
Group	Reinforcing steel
Foreign name	EN_Eurocode:St500(B)
Basic material values	
E	200 000 [N/mm ²]
G	83 333 [N/mm ²]
v	0.2
α-T	0.000010 [1/°C]
γ	77.0 [kN/m ³]

Obrázek 37. Materiály B 500B

General	
Name	C30/37
Description	C30/37,EN 1991-1-1
Group	Concrete
Foreign name	EN_Eurocode:C_30/37
Basic material values	
E	32 800 [N/mm ²]
G	13 667 [N/mm ²]
v	0.2
α-T	0.000010 [1/°C]
γ	25.0 [kN/m ³]
f _{ct}	30 [N/mm ²]
f _{cm}	38 [N/mm ²]
Cement class	1.000

Obrázek 38. Materiály C30/37

General	
Name	Asfaltová vozovka
Description	TP 170
Group	Vozovka
Foreign name	TP 170 uprav.
Basic material values	
E	55 000 [N/mm ²]
G	13 667 [N/mm ²]
v	0.3
α-T	0.000010 [1/°C]
γ	25.0 [kN/m ³]
f _{ct}	30 [N/mm ²]
f _{cm}	38 [N/mm ²]
Cement class	0.000

Obrázek 39. Materiály Vozovka

Materiály byly poté přiřazeny geometrickému modelu podle kódového označení konstrukčních částí tzv. Structural unit. Konstrukční části byly definovány v příčných řezech konstrukce, které slouží i k jejímu parametrickému vynášení. Dle rozsahu staničení zde byly definovány jednotlivé prvky jak mostovky, tak i nosných pilířů.

Global Station		Structural Unit 1		Structural Unit 2		Structural Unit 3		Structural Unit 4	
Start [m]	End [m]	Beam	Material	Beam	Material	Beam	Material	Beam	Material
10.000000	11.200000	101	EN:C35/45		EN:C30/37		EN:C30/37		EN:Asfaltová vozovka
11.200000	15.000000	102	EN:C35/45		EN:C30/37		EN:C30/37		EN:Asfaltová vozovka
15.000000	20.000000	103	EN:C35/45		EN:C30/37		EN:C30/37		EN:Asfaltová vozovka
20.000000	21.200000	104	EN:C35/45		EN:C30/37		EN:C30/37		EN:Asfaltová vozovka
21.200000	25.000000	105	EN:C35/45		EN:C30/37		EN:C30/37		EN:Asfaltová vozovka
25.000000	30.000000	106	EN:C35/45		EN:C30/37		EN:C30/37		EN:Asfaltová vozovka
30.000000	31.000000	107	EN:C35/45		EN:C30/37		EN:C30/37		EN:Asfaltová vozovka

Obrázek 40. Definice mostovka

Global Station		Structural Unit 1	
Start [m]	End [m]	Beam	Material
-11.750000	0.000000	3101	EN:C35/45

Global Station		Structural Unit 1	
Start [m]	End [m]	Beam	Material
-11.750000	0.000000	1201	EN:C35/45

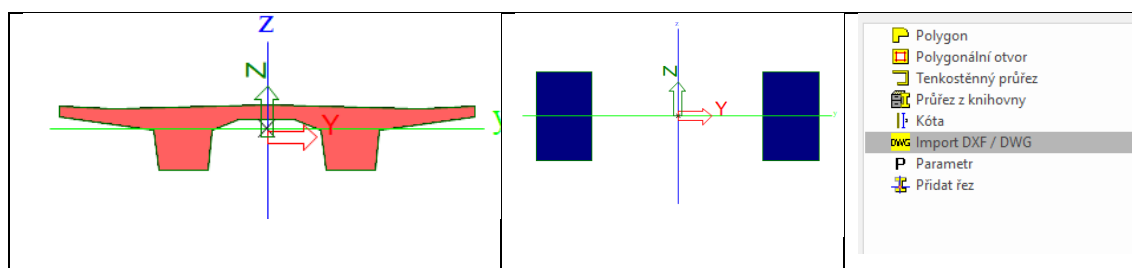
Obrázek 41. Definice pilíř 1,3.

4.1.3 Výpočetní modely

V původním návrhu byl most navržen ve směrovém řešení v oblouku o poloměru $R = 110$ m. V rámci posouzení různých výpočetních metod byl most narovnan do přímé a posouzen v jednotlivých programech a ručním výpočtem pomocí zjednodušené deformační metody. Současně byl vytvořen stejný model v Allplanu, který odpovídá původnímu směrovému řešení.

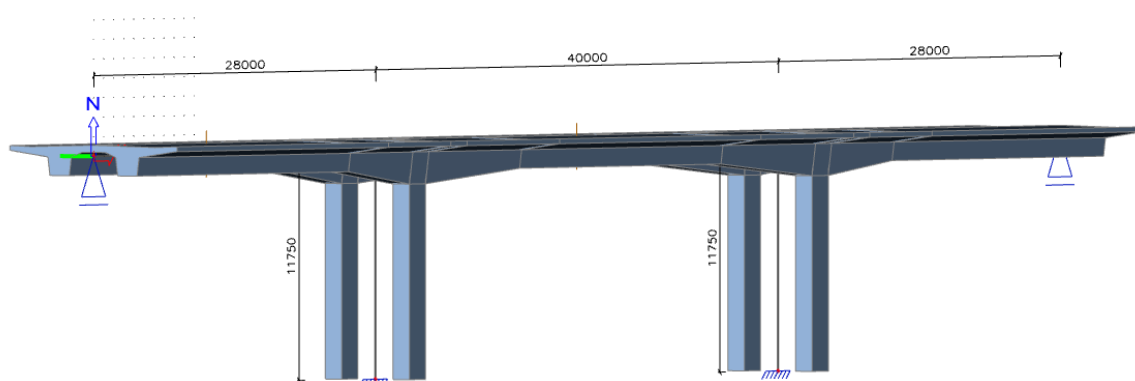
4.1.3.1 SCIA engineer 2019

Konstrukce byla zadána pomocí standardních postupů SCIA Engineer. V knihovnách byly definovány nové průřezy dílce, které později sloužily k vytvoření konstrukce mostovky. Pilíře byly zadány jako sloup, také s nově nahraným průřezem. Vytvoření nových průřezů proběhlo v záložce vytvoření obecných průřezů pomocí importu z DXF /DWG.



Obrázek 42. Import SCIA

Most je na stranách podepřen opěrami, které byly definovány ve výpočtových datech jako posuvné klouby s tuhostí pouze ve směru osy z. Pilíře byly pevně spojeny s mostovkou a dole byly uloženy do základových desek, které jsou uvažovány jako



Obrázek 43. Model statického schématu viz. SCIA Engineer

vetknutí s tuhostí ve všech směrech. Založení bylo provedeno pomocí plochého základu, které podírají plošné základy. Ve výpočetním modelu nebyly řešeny.

4.1.3.2 Allplan Bridge 2020

Druhý výpočetní model byl proveden v programu Allplan Bridge 2020. Prvky mostu jsou rozděleny na mostovku a 4 samostatné pilíře. Statické působení je zajištěno napojením jednotlivých prvků přes model structural connections, který spojuje jednotlivé prvky konstrukce a zároveň zadává vlastnosti výpočetního modelu. Analytické prvky byly zadávány ručně ve 3D modelu, ale je možné je upravovat v jeho tabulkovém

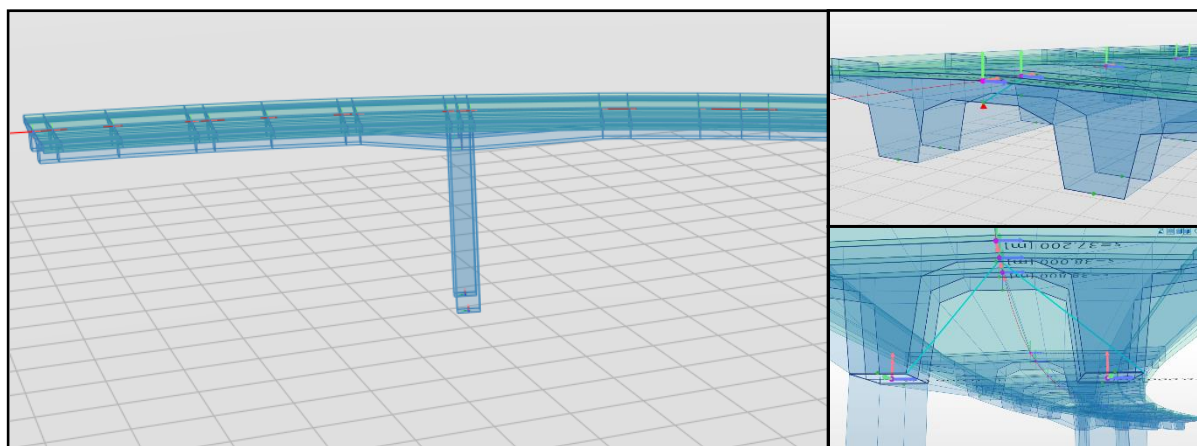
Type	From					To				
	Structural Member	Global Station [m]	Side	Structural Unit	Node	Structural Member	Global Station [m]	Side	Structural Unit	
RIGID	Pier 1	0.00000	BACK		1301	Girder 1	38.00000	BACK		
RIGID	Pier 2	0.00000	BACK		2201	Girder 1	38.00000	BACK		
RIGID	Pier 3	0.00000	BACK		3201	Girder 1	78.00000	BACK		
RIGID	Pier 4	0.00000	BACK		4201	Girder 1	78.00000	BACK		
RIGID	Support 1		FRONT		1200	Pier 1	-11.75000	FRONT		
RIGID	Support 2		FRONT		2100	Pier 2	-11.75000	FRONT		
RIGID	Support 3		FRONT		3100	Pier 3	-11.75000	FRONT		
RIGID	Support 4		FRONT		4100	Pier 4	-11.75000	FRONT		
RIGID	Podpora		FRONT		1101	Girder 1	11.20000	BACK		
RIGID	Podpora 2		FRONT		5101	Girder 1	106.00000	BACK		

+ Click here to add a new row

Obrázek 44. Structural connections

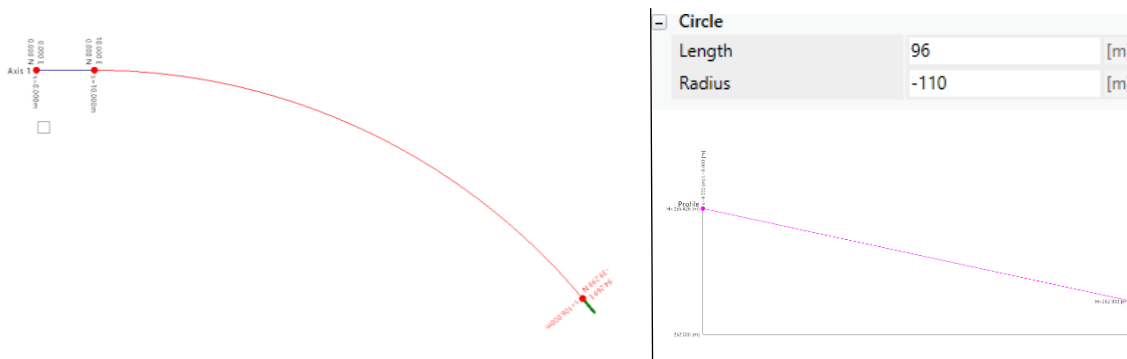
výpisu.

Opěry byly v modelu definovány jako posuvné klouby pomocí funkce soil support. Funkcí bylo určeno uvolnění jednotlivých směrů a tuhost byla zajištěna pouze v ose x. Vetknutí bylo modelováno pomocí pevného spojení mostovky a pilířů, které zajišťuje funkce rigid connections. Pilíře do země byly uloženy opět funkcí structural connection, v tomto případě šlo o tuhost ve všech směrech.



Obrázek 45. 3D výpočetní model

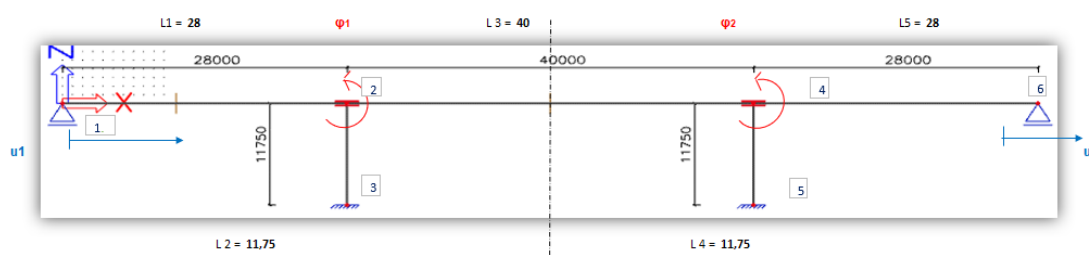
Rozdílné směrové řešení bylo prováděno změnou osy ve 3D modelu. V průběhu výpočtu byly modely exportovány do tcl. formátu a byly z nich exportovány výsledky pro porovnání.



Obrázek 46. Axis Allplan Bridge

4.1.3.3 Zjednodušená deformační metoda

Model pro zjednodušenou deformační metodu byl uvažován stejný jako ve SCIA Engineer. Podle teorie zjednodušené deformační metody vznikaly na konstrukci 3 neznámé veličiny a 3 momentové rovnice. Označení styčníků bylo provedeno zleva doprava stejně jako označení neznámých veličin.



Obrázek 47. Zjednodušená deformační metoda

I když je konstrukce na první pohled symetrická, byla řešena jako celá konstrukce z důvodu jednodušší řešitelnosti. Na mostovce byl průřez zredukován na pouhý průřez v poli bez náběhů nad podporami. Styčníky s označením 3 a 5 byly uvažovány se stejnými průřezy a tuhostí jako pilíře ve výpočetních programech. Tudiž tuhost (EI) jednotlivých prvků konstrukce odpovídá tuhosti konstrukce ve výpočetních programech. Rozdíl ve vnitřních silách byl předpokládán z důvodu nižší tuhosti v místě připojení pilířů z hlediska absence náběhů. Byly tedy předpokládány větší momenty v poli a nižší nad podporou. Při výpočtu byla uvažována patrová rovnice s neznámou u , protože ve výpočetních modelech z ní vyplývají momenty na stojinách. V deformační metodě je nulová, protože v tomto směru nepůsobí žádné zatížení.

4.2 Zatížení

4.2.1 Stálé zatížení

4.2.1.1 Vlastní tíha konstrukce g_0

Objemová tíha betonu pro výpočet byla uvažována 25 kN/m^3 . Pro předpětí byla uvažována o jedno vyšší $26,0 \text{ kN/m}^3$. Výpočet byl proveden v programu SCIA Engineer. (19)

4.2.1.2 Ostatní stálé zatížení

Ostatní stálé zatížení zahrnuje tíhu příslušenství mostu, které neplní nosnou funkci. Spadají do něho římsy, zábradlí, svodidla a konstrukce vozovky. Tíha těchto prvků byla stanovena pomocí jejich nominálního objemu a charakteristické tíhy prvku. (19)

- ŽB římsy

ŽB římsy:	$A_{\text{ř1}}$	ρ_b		
$(g-g_0)_{\text{ř}}$	0,38	25	$(g-g_0)_{\text{ř}}=$	9,5 kN/m
$\Sigma(g-g_0)_{\text{ř}}$			$\Sigma(g-g_0)_{\text{ř}}=$	19 kN/m

- Konstrukce vozovky

Konstrukce vozovky:				
$(g-g_0)_v$	ρ	tl.	W	
Obrusná vrstva ACO 16	25	0,050	7,5	$(g-g_0)_{\text{ACO}}=$ 9,375 kN/m
Ložná vrstva MA	25	0,045	7,5	$(g-g_0)_{\text{MA}}=$ 8,4375 kN/m
Vodotěsná izolace NAIP	23	0,005	10,1	$(g-g_0)_{\text{NAIP}}=$ 1,1615 kN/m
$\Sigma(g-g_0)_v$				$\Sigma(g-g_0)_v=$ 18,974 kN/m

- Vybavení mostu

Vybavení mostu:			
Svodidla: 2x			
	kN/		kN/
(g-g ₀) _s =	1 m	(g-g ₀) _s =	2 m
Ocelové zábradlí: 2x			
	kN/		kN/
(g-g ₀) _z =	0,5 m	(g-g ₀) _z =	1 m

- Celkem

Celkové ostatní stálé zatížení: $\Sigma(g-g_0)$	$\Sigma(g-g_0)_{v=}$	40,974	kN/m
---	--	---------------	-------------

1) Střední charakteristická hodnota

$$\Sigma(g-g_0)_{k,m} = 40,974 \text{ kN/m}$$

2) Dolní charakteristická hodnota

$$\Sigma(g-g_0)_{k,inf} = 19 + 0,8 * (29,4275) + 2 + 1$$

$$\Sigma(g-g_0)_{k,inf} = 37,179 \text{ kN/m}$$

3) Horní charakteristická hodnota

$$\Sigma(g-g_0)_{k,sup} = 19 + 1,4 * (29,4275) + 2 + 1$$

$$\Sigma(g-g_0)_{k,sup} = 48,564 \text{ kN/m}$$

4.2.2 Proměnné zatížení

4.2.2.1 Zatížení dopravou

Pro posouzení na zatížení dopravou byly využity zatěžovací modely LM1, LM3, LM4. Dané uvedené modely zahrnují i dynamické zvětšení účinků zátěžových vozidel. Modely zatížení LM1-3 se běžně uvažují pro všechny návrhové situace, na rozdíl pro LM4, který se využívá pro velké davy lidí. (19)

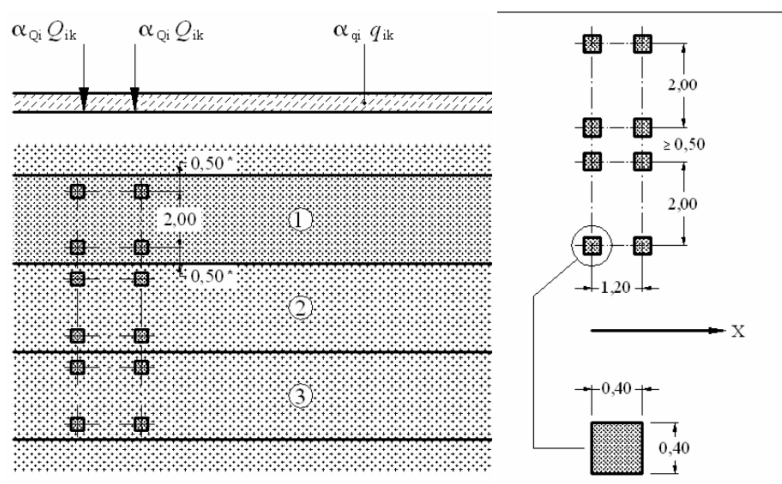
4.2.2.2 Rozdělení na zatěžovací pruhy

V případě řešené konstrukce je vozovka na mostě o šířce $w=7,5$ m. Z tohoto důvodu byla vozovka rozdělena na tři zatěžovací pruhy. Dva pruhy o šířce 3,0 m a zbývající pruh o šířce 1,5 m. (19)

4.2.2.3 Model zatížení LM1

Model se skládá ze dvou dílčích soustav:

- 1) Soustředěné zatížení od dvounápravy (TS), skládá se ze síly $\alpha_Q Q_k$, a α_Q regulačního součinitele
- 2) Rovnoměrné zatížení (UDL) o tíže $\alpha_q q_k$ na čtverečný metr nepříznivě působících příčkových ploch, kde α_q je regulační součinitel.



Obrázek 48. Model zatížení 1.

Regulační součinitelé:

Tabulka 1 - Regulační součinitelé

Skupina	α_{Q1}	α_{Q2}	α_{Q3}	α_{q1}	α_{q2}	α_{qr} a $\alpha_{qi}(i<2)$
1	1	1	1	1	2,4	1,2
2	0,8	0,8	0,8	0,45	1,6	1,6

Vnitřní síly:

Umístění zatížení se předpokládalo na celou šířku vozovky w , aby bylo možné získat maximální hodnoty ohybových momentů a posouvajících sil v podélném směru.

Model LM1, poté zahrnuje:

Umístění	Dvojnáprava nápravové síly Q_{ik} (kN) TS	Rovnoměrné zatížení q_{ik} (kNm ²) UDL
Pruh č.1	300	9
Pruh č.2	200	6
Zbývající pruh	0	3

Tabulka 2
 Nápravové síly

- TS nápravové síly v zatěžovacích pruzích 1,2.:

$$" \alpha_{Qi} * Q_{ik} " = \alpha_{Q1} * Q_{1k} + \alpha_{Q2} * Q_{2k} = 1,0 * 300,0 + 1,0 * 200,0 = 500,0 \text{ kN}$$

Obě nápravové hodnoty:

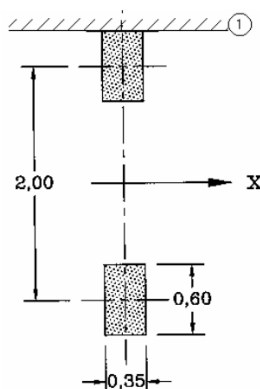
$$\sum (\alpha_{Qi} * Q_{ik}) = 2 * 500,0 = 1000 \text{ kN}$$

- UDL rovnoměrné zatížení v jednotlivých zatěžovacích pruzích:

$$\sum \alpha_{qi} * q_{ik} = \alpha_{q1} * q_{1k} * w_1 + \alpha_{q2} * q_{2k} * w_2 + \alpha_{qr} * q_{rk} * w_r = 1 * 9 * 3 + 2,4 * 2,5 * 3 + 1,2 * 2,5 * 1,5 = 49,5 \text{ kN/m}$$

4.2.2.4 Model zatížení LM2

Model LM2 tvořen jednou nápravou o síle $\beta_Q Q_{ka}$, kde $Q_{ka} = 400 \text{ kN}$ (zahrnuje dynamický přírůstek). V případě potřeby se uvažuje pouze jedno kolo o poloviční nápravové síle. Dotyková plocha se pro výpočet uvažuje: $0,35 \text{ m} \times 0,60 \text{ m}$. (20)



Obrázek 49. Model zatížení LM2

- Model zatížení LM2 má význam pro lokální ověření. V bakalářské práci nebyl uvažován.

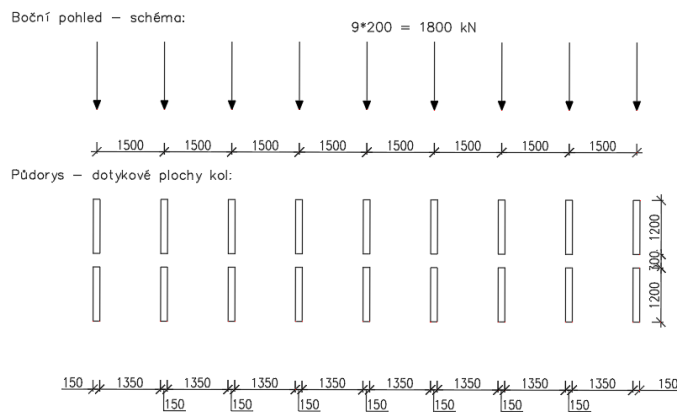
4.2.2.5 Model zatížení LM3

Modely zatížení LM3 se uvažují pro ověření souboru modelů zvláštních vozidel, které se mohou na komunikaci na mostě vyskytnout. Na uvedených komunikacích byly uvažovány dvě varianty: (20)

- 1) Vozidlo LM3: 1800/200, které se uvažuje společně s LM1. (20)

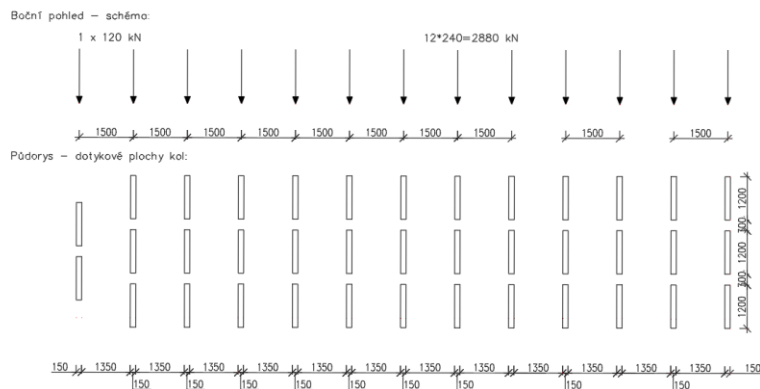
U komunikace s7,5 se uvažuje čistá šířka pruhů 6 m, v tom případě se mohou uvažovat dva zatěžovací pruhy. Pruh číslo 1 obsahuje vozidlo 1800/200. Pruh číslo 2 obsahuje rovnoměrné zatížení UDL, bez TS s odpovídající

- $LM3 = 9 \cdot 200 = 1\,800,0 \text{ kN}$
- $LM1 = \sum \alpha_{qi} \cdot q_{ik} = \alpha_{q2} \cdot q_{2k} \cdot w_2 = 2,4 \cdot 6,0 \cdot 3,0 = 43,2 \text{ kN/m}$



- 2) Vozidlo LM3: 3000/240, které se uvažuje jako jediné vozidlo na mostě. (20)

- $LM3 = 1 \cdot 120,0 + 12 \cdot 240 = 3000 \text{ kN}$



4.2.2.6 Model zatížení LM4

Model LM4 uvažoval dynamické účinky působící na most způsobené davem lidí. Byl modelováno jako zatížení 5kN/m^2 . Zatížení se využívá pro celkové ověření konstrukce pouze v případech ověření dočasných návrhových situací. (20)

- $q_k = 5 * 10,1 = 50,5 \text{ kN/m}$

4.2.2.7 Brzdné a rozjezdové síly

Brzdné síly Q_{kl} působí v podélném směru v úrovni povrchu vozovky. Výpočet byl proveden podle ČSN EN 1991-2 podle následujících vztahů:

e) $Q_{kl} = 0,6 \alpha_{Q1} (2Q_{k1}) + 0,1 \alpha_{q1} q_{k1} * w_L$

f) $180 * \alpha_{Q1} \text{ (kN)} \leq Q_{k1} \leq 900 \text{ (kN)}$

L – délka nosné konstrukce mostu

w – šířka zatěžovacího pruhu

- $Q_{kl} = 0,6 * 1,0 * (2 * 300) + 0,1 * 1,0 * 9 * 3 = 362,7 \text{ kN}$
- $180 < 362,7 < 900 \text{ (kN)}$

Síly se umísťují do osy libovolného zatěžovacího pruhu, popřípadě není-li excentricita příliš velká, uvažuje se působení sil v ose vozovky a rovnoměrně se rozloží po délce. V opačném směru se poté uvažovaly rozjezdové síly. (20)

4.2.2.8 Odstředivé síly

Odstředivé síly Q_{kt} působí v příčném směru v úrovni povrchu vozovky radiálně k její ose. Jednotlivé hodnoty dynamických účinků jsou uvedeny v tabulce:

Tabulka 3 Odstředivé síly

$Q_{kt} = 0,2 Q_v \text{ (kN)}$	pro $r < 200 \text{ m}$
$Q_{kt} = 40 Q_v / r \text{ (kN)}$	pro $200 \leq r \leq 1500 \text{ m}$
$Q_{kt} = 0$	pro $r > 1500 \text{ m}$

- g) r je poloměr vozovky ve vodorovné rovině
- h) Q_v je celková maximální tíha svislého soustředěného zatížení
- i) v některých případech se uvažují příčné brzdné síly jako 25 % podélných brzdných sil. (20)

- Uvažujeme 25 % podélných br. sil $\rightarrow Q_{kt} = 0,25 * Q_{kl} = 90,675 \text{ kN}$

4.2.2.9 Staveništní zatížení

Během výstavby bylo uvažováno zatížení nosné konstrukce $q_{ca} = 1,0 \text{ kN/m}^2$, které zahrnuje účinky tíhy osob + příslušenství.

- $q_{ca,k} = 1,0 * 10,1 = 10,1 \text{ kN/m}$

4.2.2.10 Zatížení chodníků

Při zatížení chodníků se uvažovalo spojitě rovnoměrné zatížení $q_{fk} = 5 \text{ kN/m}$ na jednu stranu chodníku. Zatížení se převedlo na 1m délky mostu.

- $q_k = 2 * 0,75 * 5 = 7,5 \text{ kN/m}$

4.2.2.11 Zatížení teplotou

Pro účel stanovení teplotních účinků se most zařadil do odpovídající kategorie. Stavba odpovídá typu 3: betonová nosná konstrukce. Při výpočtu zatížení teplotou byly zjištěny lineární i nelineární účinky teplot.

- Rovnoměrná složka teploty

Teploty vzduchu jsou rovny hodnotám $T_{min} = -35 \text{ °C}$ a $T_{max} = 40,0 \text{ °C}$. Teplota mostu potom náleží hodnotám podle příslušných vzorců

$$T_{e, min} = T_{min} + 8 \text{ °C} = -27 \text{ °C}; T_{e, max} = T_{max} + 2,0 \text{ °C} = 42,0 \text{ °C}.$$

- Nerovnoměrná složka teploty

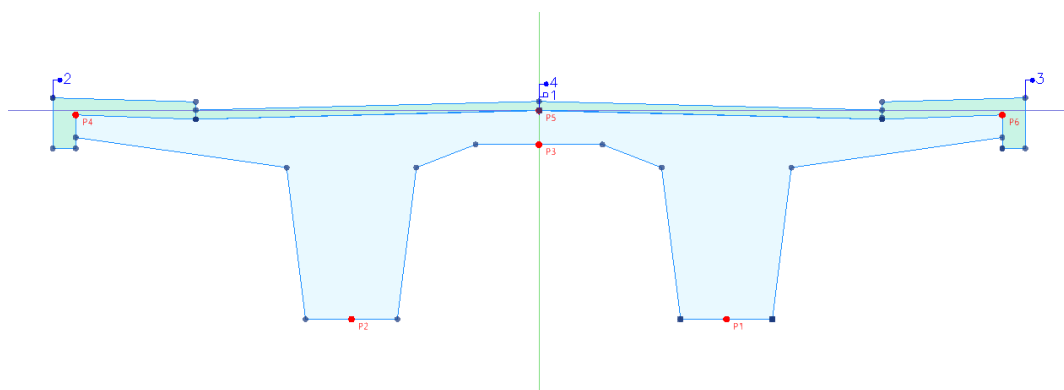
Rozdíly teplot mezi dolním a horním povrchem nosné konstrukce se uvažují pomocí daných složek teplot $\Delta T_{M,heat} = 15 \text{ °C}$; $\Delta T_{M,cool} = -8 \text{ °C}$. účinky teplot byly určeny pomocí normy ČSN 1991-1-1-5.

4.2.2.12 Zatížení větrem

V příkladu byly posuzovány pouze svislé statické a dynamické účinky, tudíž účinky větrem nebyly uvažovány.

4.2.3 Definice zatížení Allplan Bridge

Zatížení bylo definováno v několika krocích. Zatížení vlastní tíhy program spočetl sám po řádném zadání geometrických a materiálových charakteristik. Pro zadání ostatního stálého zatížení šlo využít rozlišení konstrukčních prvků. V příčném řezu může být vytvořen řez zahrnující všechny prvky související s mostovkou a rozdělí se na Beam a Load, tedy nosnou část a přídavné zatížení. Poté v části construction bylo definováno spolu s ostatním zatížením.



Obrázek 50. Příčný řez

4.2.3.1 Fáze výstavby a zatížení (Construction)

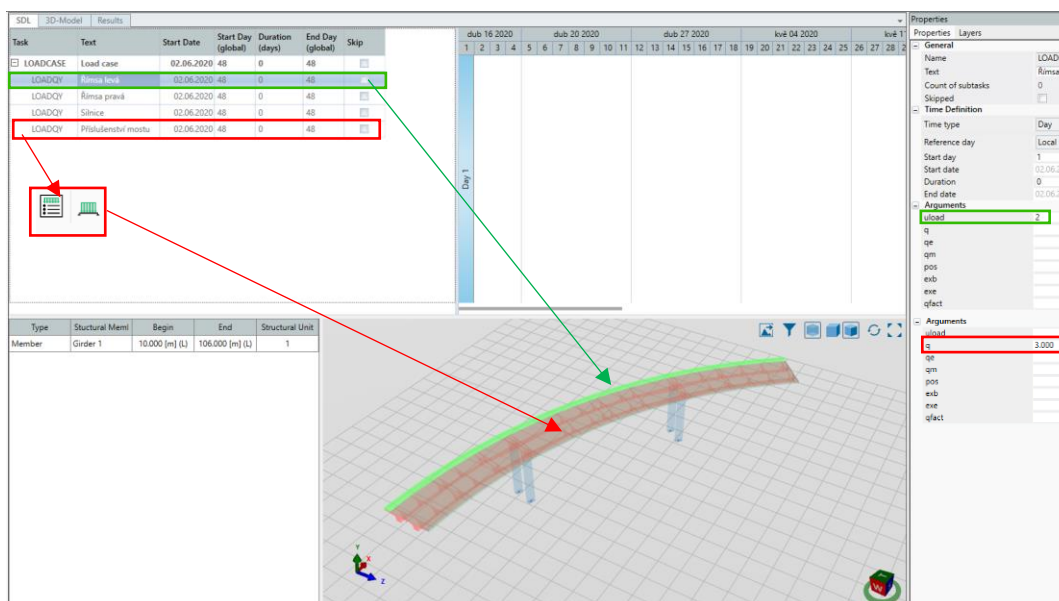
Fáze výstavby spolu se zatížením byly nedefinovány pomocí výpočtového 4D modelu, který je propojen s výsledky vnitřních sil a kombinace jednotlivých prvků pomocí příkazů spadající pod superposition. Ač byly využito zadání ve fázích byly všechny zatížení zadány ve stejném čase, aby bylo zamezeno změně v dotvarování pro porovnání výpočetních metod.

- 1. a 2. fáze

V prvních dvou fázích bylo nastaveno vybetonování a zatvrdnutí nosné konstrukce. Prvky byly rozděleny do skupin pilíře a mostovka, ale doba vybetonování a čas výstavby byly nastaveny stejně na 28 dní. Nastavení stejných parametrů výstavby bylo z důvodu možnosti ověření výsledků ze SCIA Engineer a skriptových postupů v druhé metodě. S nastavením vybetonování souvisí i aktivace konstrukčních prvků zajišťující možnosti statického výpočtu. Při pilířích bylo nastaveno vetknutí do zeminy a při vybetonování mostovky opěry na obou stranách. Všechny statické prvky začaly působit v čase 28 dní po zatuhnutí betonu.

- 3. Fáze

Ve třetí fázi proběhlo definování ostatního stálého zatížení. Pomocí označení jednotlivých prvků konstrukce, které jsou vidět na obrázku 51., bylo určeno jednotlivé zatížení vozovky a říms. Zábradlí a svodidla bylo provedeno jako příslušenství mostu o síle 3 kN/m působící v ose nosníku jako ve SCIA Engineer. Příslušenství bylo zadáno zatížením LOADQY: vertical line load.



Obrázek 51. Zatížení SDL

- 4. Fáze

Ve čtvrté fázi byl definován pokles podpor. Byly definovány 4 zatěžovací stavy. V prvním poklesla krajním opěra, v druhém 1. a 2. pilíř, ve třetí 3. a 4. pilíř a na závěr 2. opěra. V kombinacích potom byly prozkoumány nejhorší možné stavy zatížení. Zadání proběhlo pomocí příkazu LOADSETTLE: settlement pokles o 5 mm v každé podpoře.

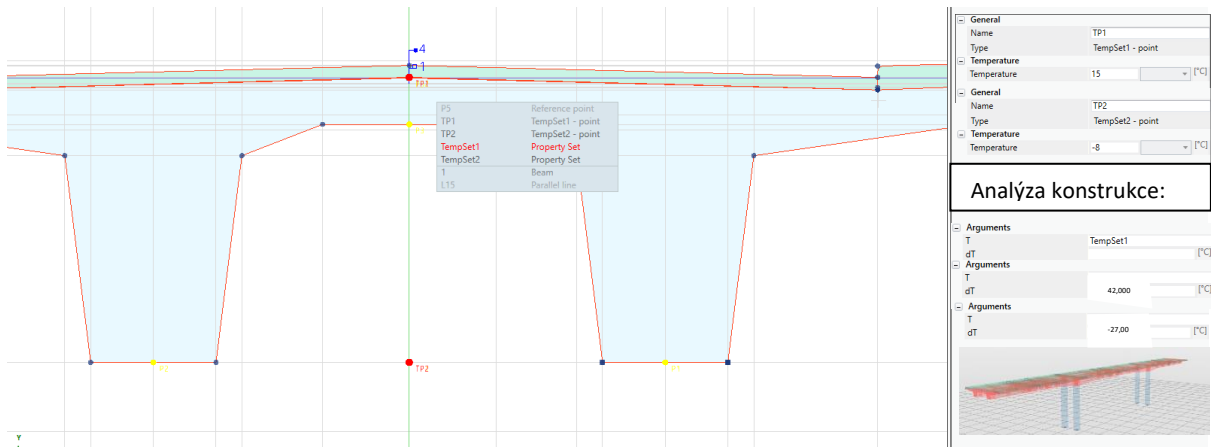
- 5. Fáze

Pátá fáze se zabývala oteplením konstrukce.

Nerovnoměrné zatížení bylo zadáno v příčném řezu funkcí Tempset1,2. V první řadě bylo zadáno oteplení horního povrchu o 15° C a v druhém případě ochlazení o 8° C. Zadání v příčném řezu se vytvořilo pomocí referenčních bodů odpovídající každý

zatěžovacím stavu. Do kapitoly construction proběhlo zadání přes kódové označení, které se shodovalo s příčným řezem.

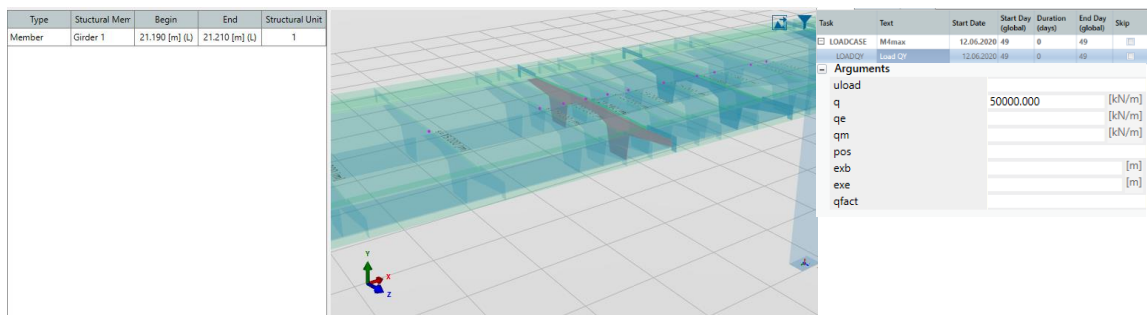
Rovnoměrné zatížení bylo přímo zadáno v kapitole construction, kde bylo zadáno celkové oteplení mostovky. Nejprve o $-27\text{ }^{\circ}\text{C}$ a poté o $42\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pro posuzování konstrukce byla uvažována pouze teplota nerovnoměrná. Kombinace pro teplotní zatížení nebyly uvažovány, byla vytvořena pouze obálka momentů.



Obrázek 52. Oteplení konstrukce

- 6. Fáze

V šesté fázi bylo určeno zatížení LM1 – TS a LM1-UDL. Bohužel v dosavadní verzi Allplanu Bridge 2020 nebylo možné zadávat dopravní zatížení pomocí přímo určené funkce, tak byla použita stejná sestava zatížení ve SCIA Engineer. Při zadání TS osamělých sil došlo k problému, protože Allplan nebyl schopný započíst sílu působící v jednom bodě na konstrukci. Proto bylo vytvořeno spojitě zatížení o velikosti $50\,000\text{ kN/m}^2$, které působilo na plochu $0,02\text{ m}$, jejíž výslednice potom vznikla v požadovaném bodu.



Obrázek 53. Zadání LM1 – Allplan

Zadání UDL a TS proběhlo každé ve svém vlastním zatěžovacím stavu.

- Superposition / superpozice

V záložce superpozice lze vzájemně překrývat zatěžovací stavy a jejich obálky. Pravidla superpozice byly definovány pomocí parametrů `ilc` a `env`. Výsledky zatěžovacích stavů byly posuzovány jednotlivě pro každou složku síly (nebo posunutí) a jsou překrývány hodnotami příslušných minimálních a maximálních superpozičních komponentů obálky. Při zadávání lze na jejich hodnoty aplikovat příznivé a nepříznivé faktory. Pro správné fungování je nezbytné, aby se parametr `env` a názvy superpozic v příkazu `SUPTREE` shodovaly s názvy obálek v záložce `Envelopes`.

V kapitole výsledků („results“) jsou potom zatěžovací stavy a obálky („envelopes“) vykreslovány zvlášť.

The image displays several screenshots from the Allplan Bridge software interface:

- Top Left:** A table showing task definitions for superposition. The 'Text' column includes 'Settlement', 'Settl 1-3', 'Settl 2-4', 'Temperature', and 'Braking'. The 'env' parameter is highlighted in red.
- Top Right:** The 'Time Definition' dialog box, showing 'env' set to 'Braking' in the 'Arguments' section.
- Middle Left:** A tree view of construction elements. A red box highlights a 'Settlement' task, which is linked to a list of 'Add' and 'And' operations involving 'Settlement-Abut1', 'Settlement-Pier-12', 'Settlement-Pier-34', and 'Settlement-Abut2'.
- Middle Right:** The 'Analysis Results Geometry' dialog box, showing 'env' set to 'Braking' in the 'Arguments' section.
- Bottom Left:** A tree view of temperature load cases. A red box highlights a 'Nerovnoměrná teplota' task, which is linked to a list of 'Add' and 'Or' operations involving 'Rovnoměrná teplota' and 'Nerovnoměrná tep'.
- Bottom Right:** Two task lists. The top one shows 'LOADCASE' and 'LOADSETT' tasks for 'Braking 4_xd_-' with 'env' set to 'Braking'. The bottom one shows 'LOADCASE' and 'LOADSETT' tasks for 'Settlement' with 'env' set to 'Settlement'.

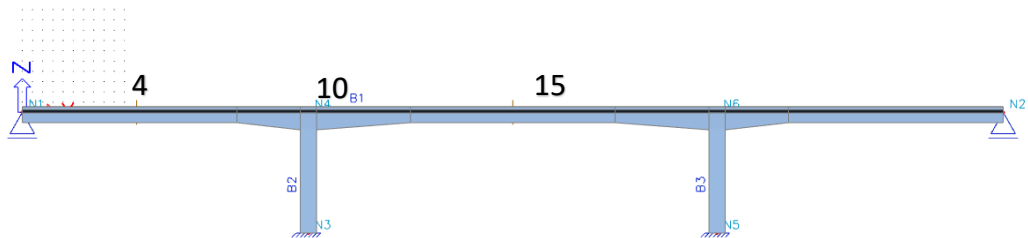
Kombinace výsledných sil byly provedeny pomocí excelu. Envelops v Allplan Bridge byly pouze využity pro vykreslení obálek zatěžovacích stavů. Zelené vodící šipky obsahují příkaz `AddLc`, kterým se zadává dané zatížení do skupiny zatížení. Pokud však nemá být zatížení kombinováno, je pro obálku skupiny zatížení nutno využít pro ostatní zatížení vodící šipky s černou barvou, které obsahují příkaz `AndLc`. Tento příkaz je schopen přidávat další zatížení.

4.3 Vnitřní síly

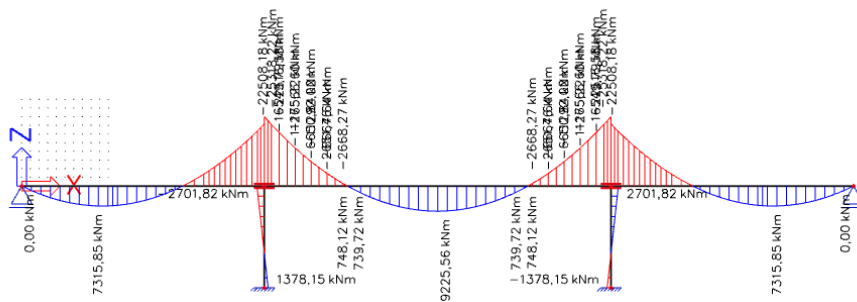
Vnitřní síly byly zkoumány ve 3 kritických průřezech, kde se ukázalo největší možné zatížení průřezu. Kritické průřezy byly zjišťovány zatěžováním konstrukce jednotkovou silou po 5% vzdálenosti mostu. Kritické průřezy vyšly ve 40ti % procentech krajního pole, nad vnitřní podporou a v polovině rozpětí prostředního pole. Průřezy byly označeny 4, 10, 15 podle vzdálenosti rozpětí. Zatížení bylo sestaveno pro zjištění maximálních účinků na konstrukci.

4.3.1 Vnitřní síly od stálého zatížení, SCIA engineer

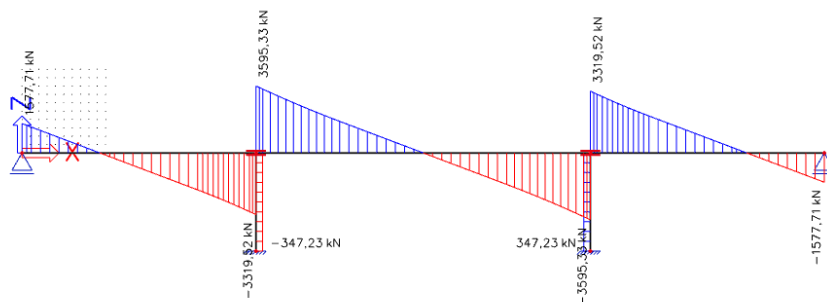
4.3.1.1 Vlastní tíha nosné konstrukce (kN/m)



Obrázek 54. Vlastní tíha

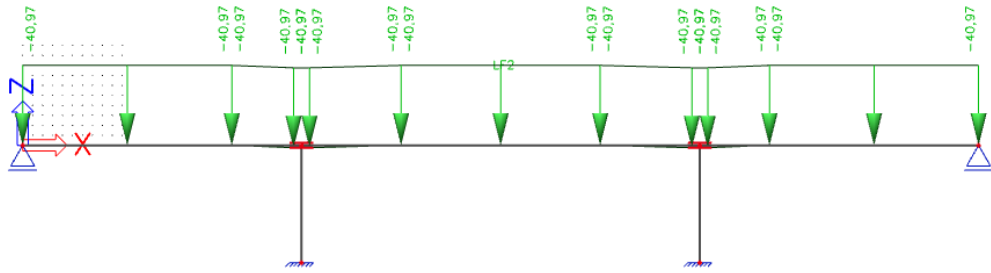


Obrázek 55. M_y , Vlastní tíha

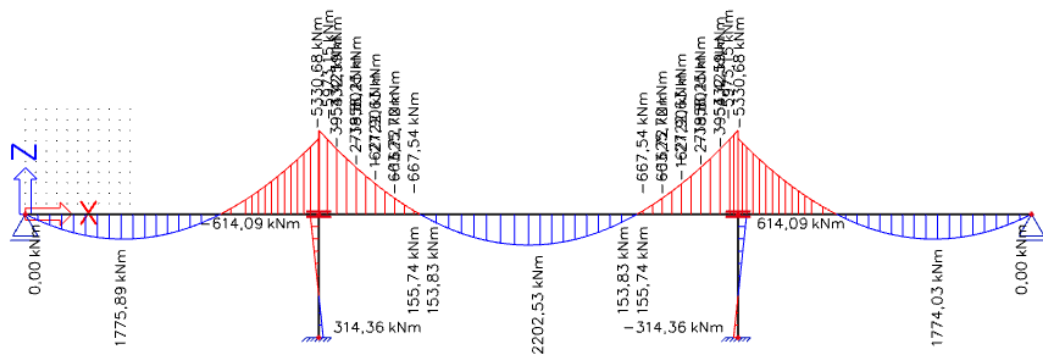


Obrázek 56. V_z , Vlastní tíha

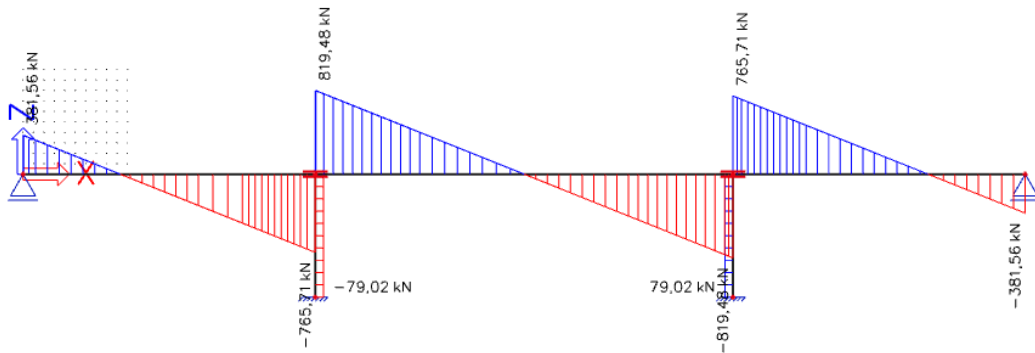
4.3.1.2 Ostatní stálé zatížení střední hodnota



Obrázek 57 Ostatní stálé zatížení



Obrázek 58 Ostatní stálé SCIA Mmax



Obrázek 59 Ostatní stálé SCIA Vmax

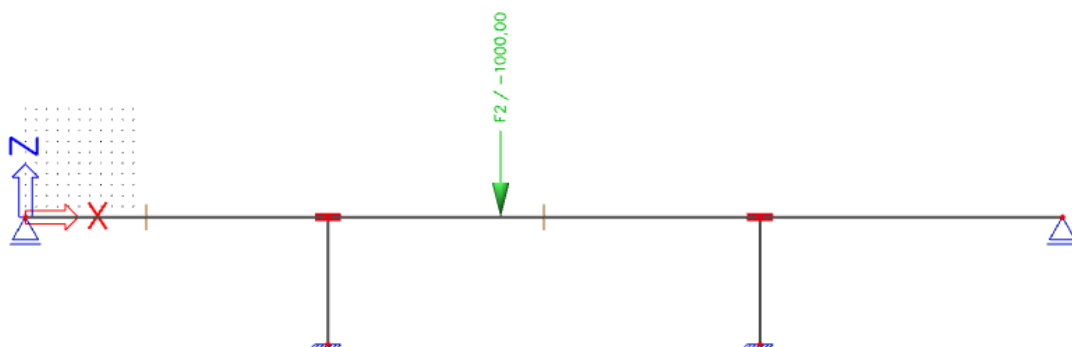
4.3.2 Vnitřní síly od proměnného zatížení, SCIA Engineer

4.3.2.1 Sestavy zatížení TS

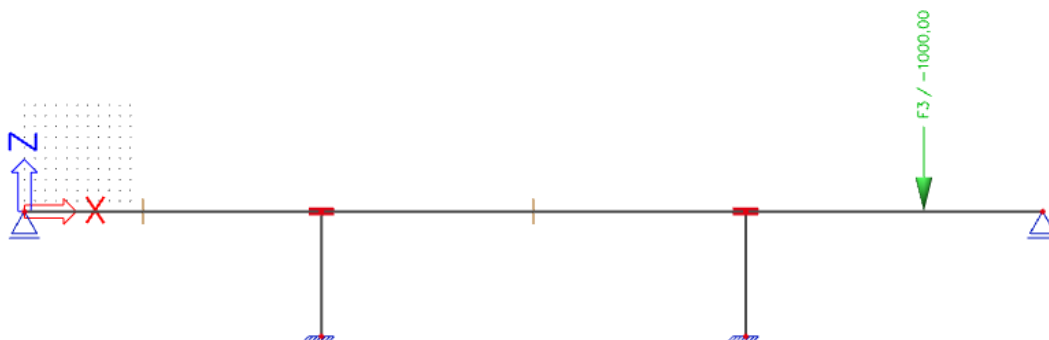
Sestavy nápravového zatížení byly sestaveny na mostovku s výslednou silou 1000 kN označenou v schématech. Síla odpovídá výslednici z nápravových 200 kN. TS a UDL je uspořádáno pro vyvolání maximálních vnitřních sil v posuzovaných průřezech.



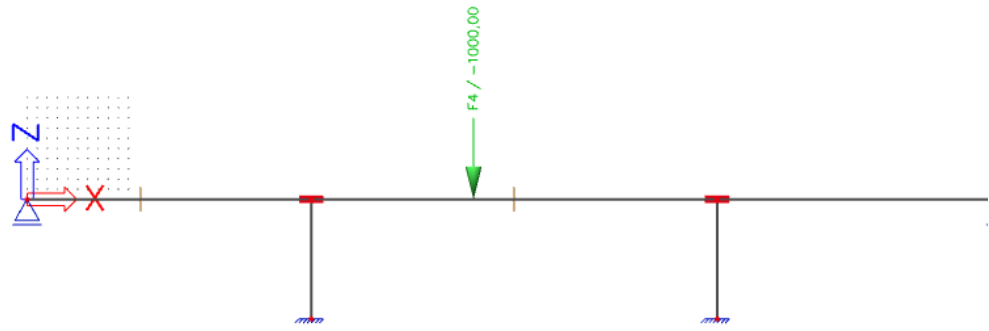
Obrázek 60. TS, M4 max



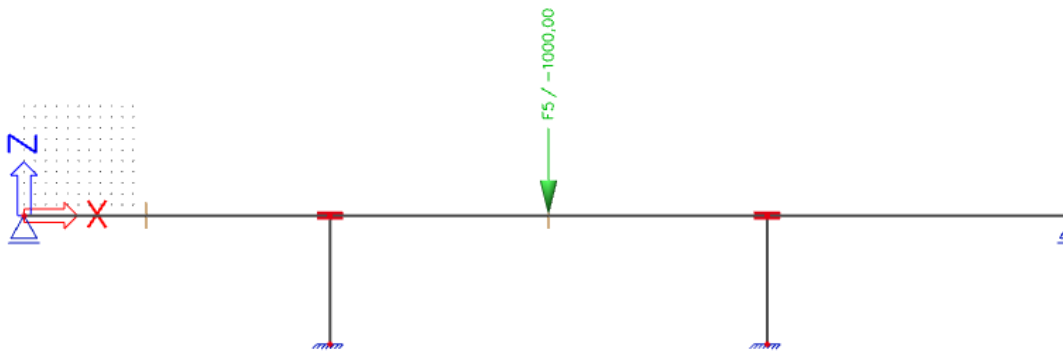
Obrázek 61. TS, M4 min



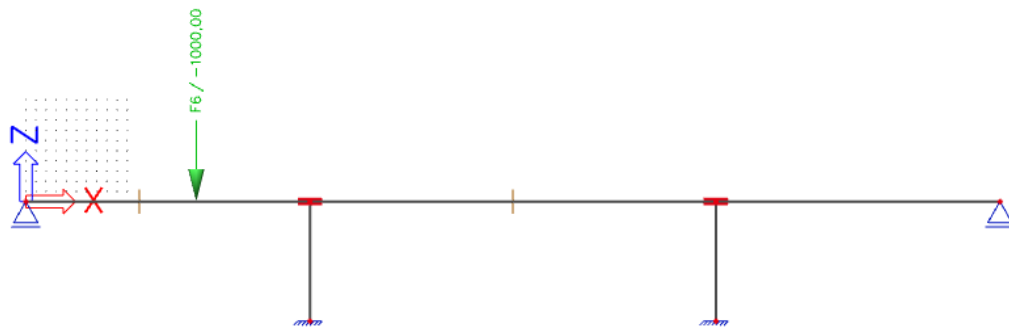
Obrázek 62. TS, M10 max



Obrázek 63. TS, M10 min



Obrázek 64. TS, M15 max



Obrázek 65. TS, M15 min



Obrázek 66. TS, V0



Obrázek 67. TS, V10, I



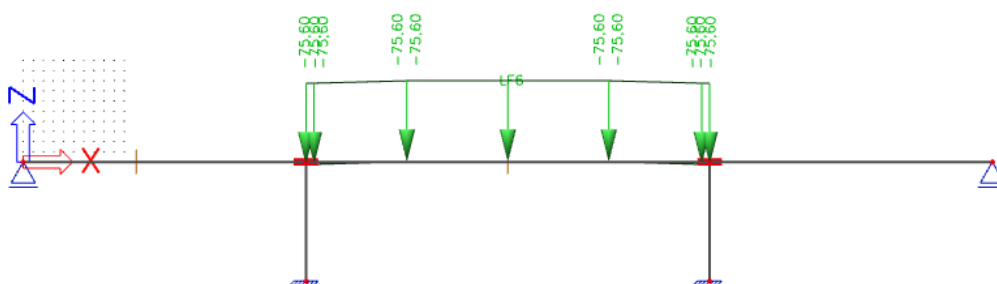
Obrázek 68. TS, V10, p

4.3.2.2 Sestavy zatížení UDL

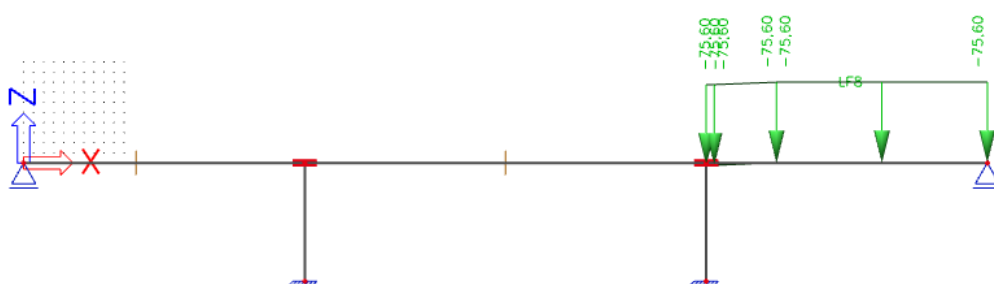
Sestavy zatížení UDL byly uspořádány pro zjištění maximální zatžitelnosti průřezů.



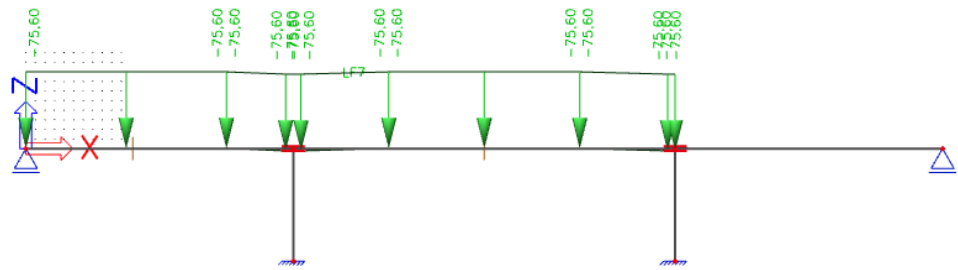
Obrázek 69. UDL, M4 max



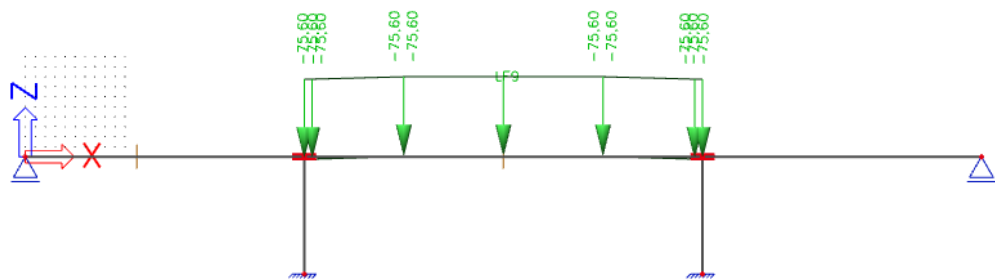
Obrázek 70. UDL, M4 min



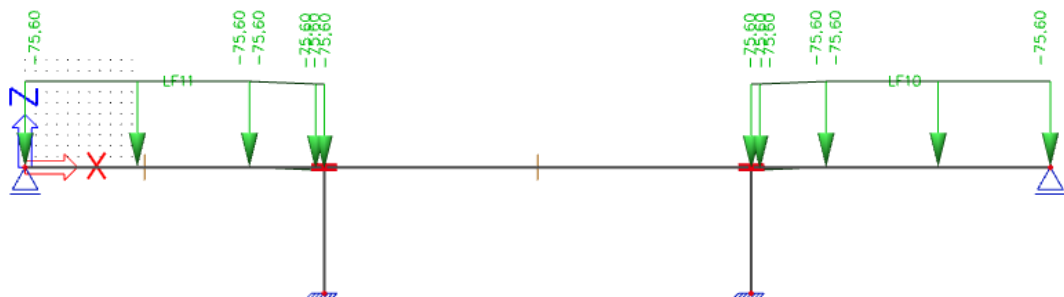
Obrázek 71. UDL, M10 max



Obrázek 72. UDL, M10 min



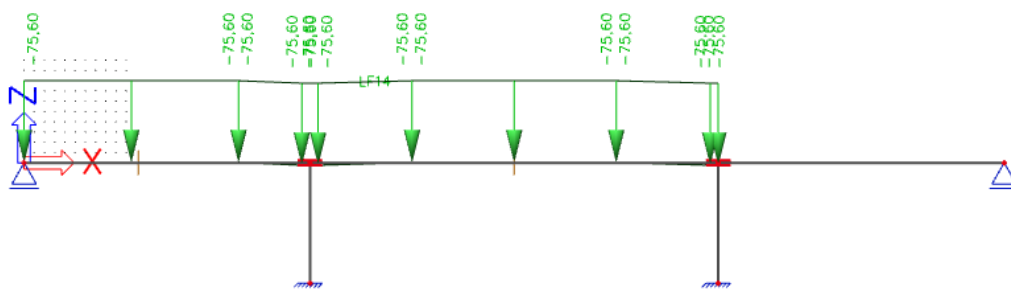
Obrázek 73. UDL, M15 max



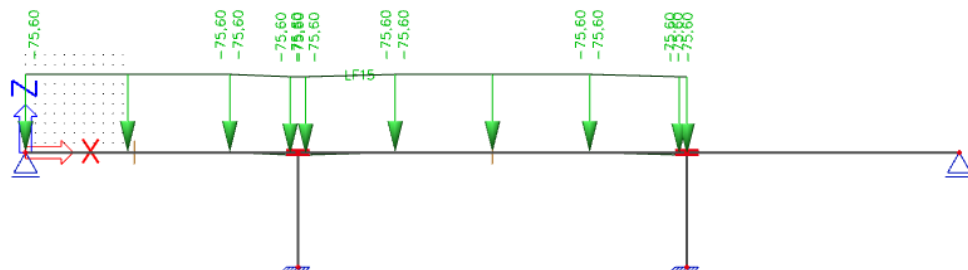
Obrázek 74. UDL, M15 min



Obrázek 75. UDL, V0



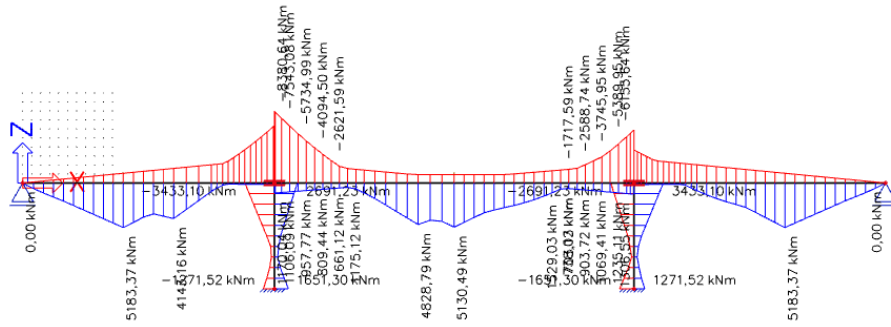
Obrázek 76. UDL, V10, l



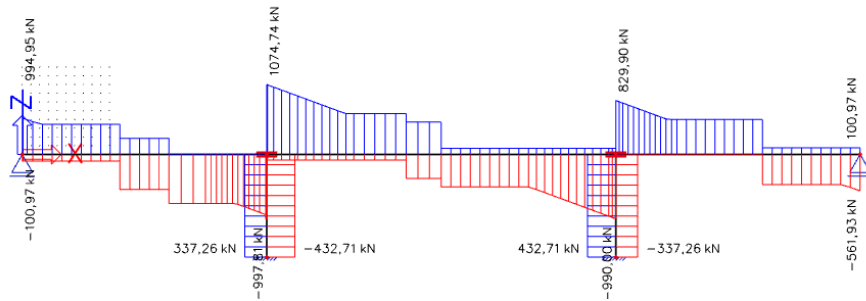
Obrázek 77. UDL, V10, p

4.3.3 Vykreslení vnitřních sil od proměnného zatížení

4.3.3.1 Model zatížení 1

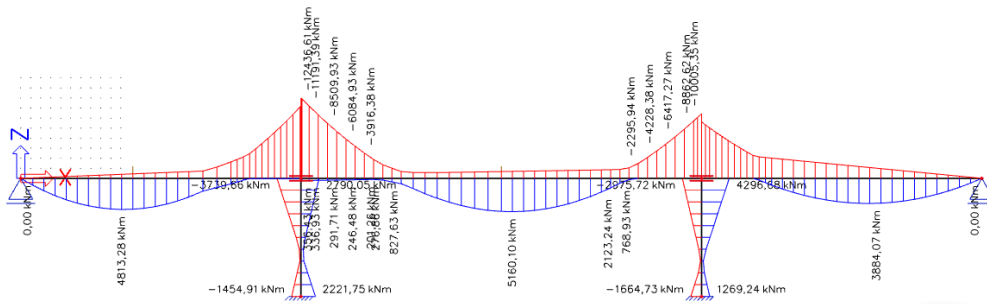


Obrázek 78 LM1 SCIA obálka Mmax

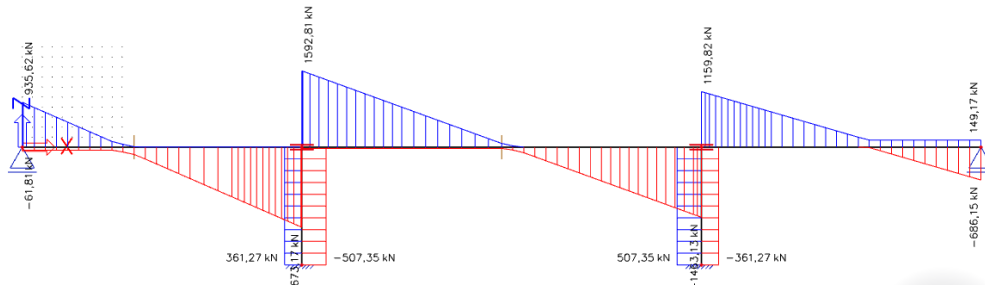


Obrázek 79 LM1 SCIA obálka Vmax

4.3.3.1.1 Model zatížení 4

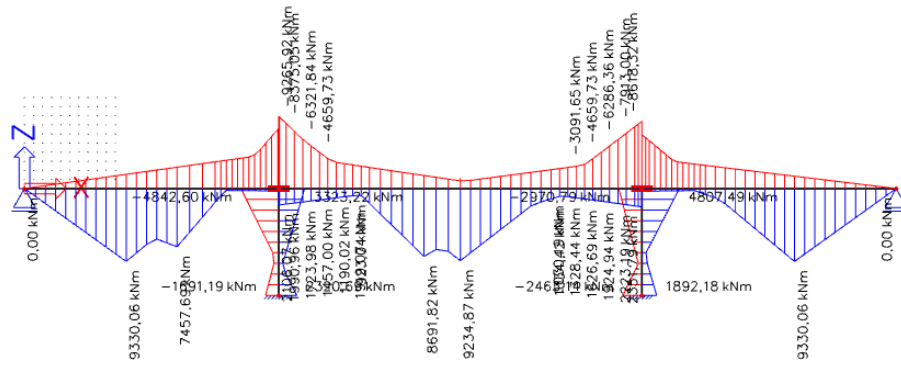


Obrázek 80 LM4 SCIA obálka Mmax

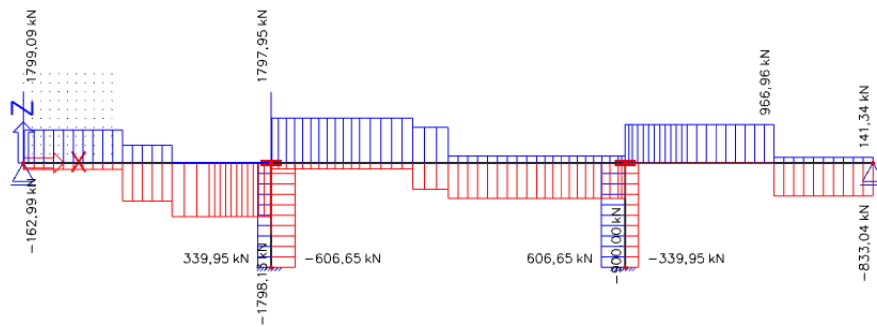


Obrázek 81 LM4 SCIA obálka Vmax

4.3.3.2 Model zatížení 3 1800/200 + LM1

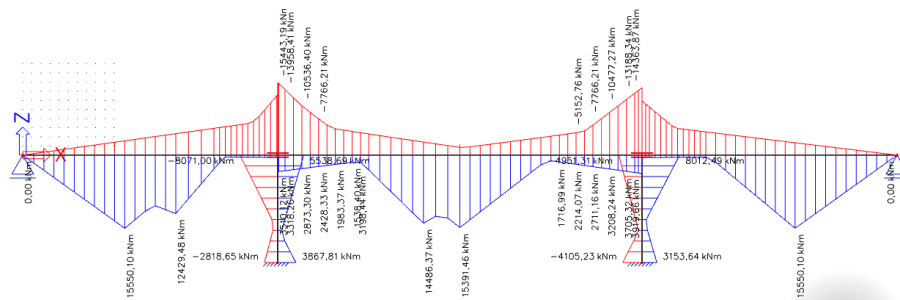


Obrázek 82 LM3+LM1 obálka Mmax

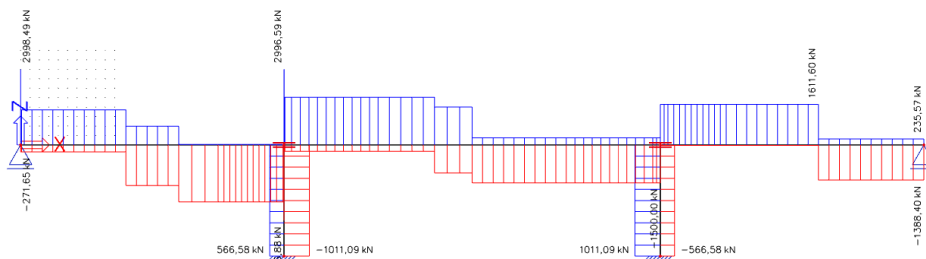


Obrázek 83 LM3+LM1 obálka Mmax

4.3.3.3 Model zatížení 3 3000/240

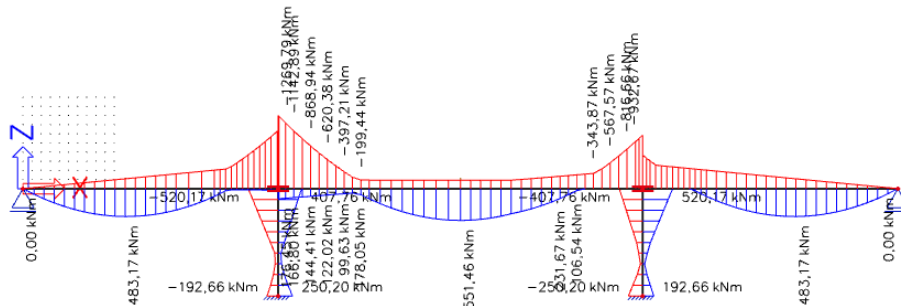


Obrázek 84 LM3 obálka Mmax

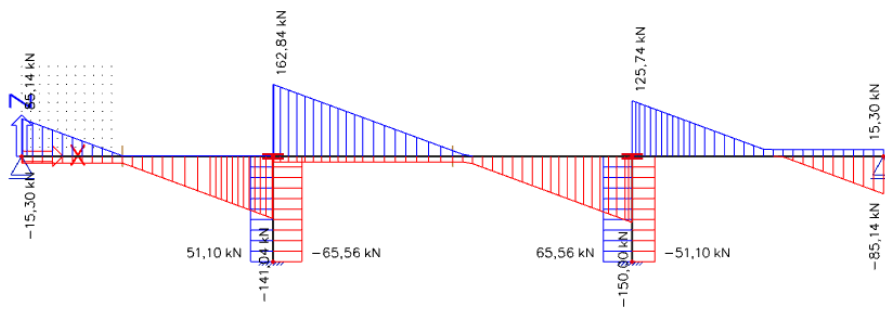


Obrázek 85 LM3 obálka Vmax

4.3.3.4 Zatížení chodníků

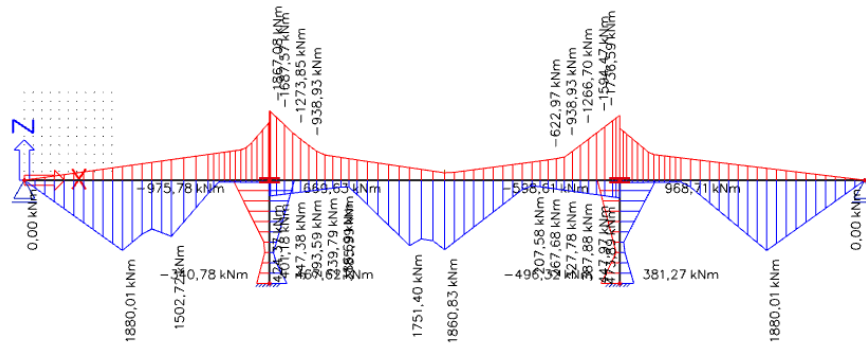


Obrázek 86 Zatížení chodníků Mmax

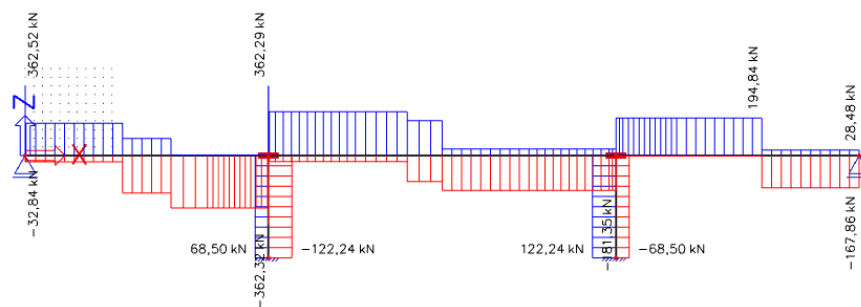


Obrázek 87 Zatížení chodníků Vmax

4.3.3.5 Brzdné síly



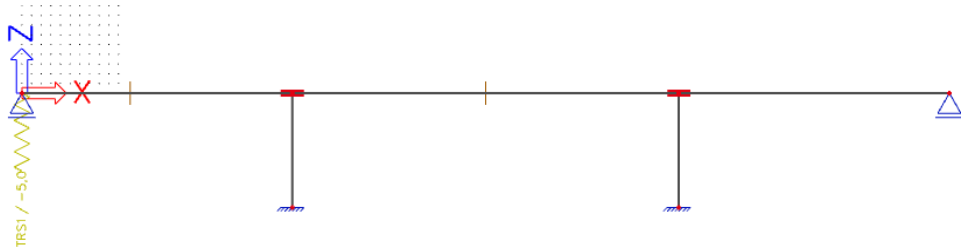
Obrázek 88 Brzdné síly Mmax



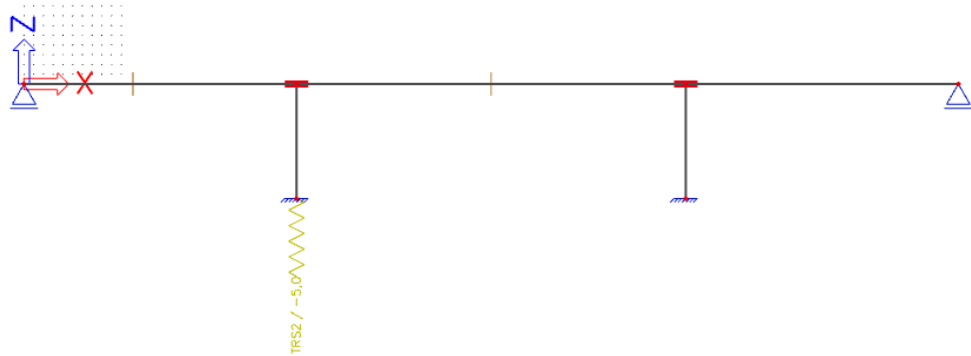
Obrázek 89 Brzdné síly Vmax

4.3.3.6 Vyvolané zatížení od poklesu podpor

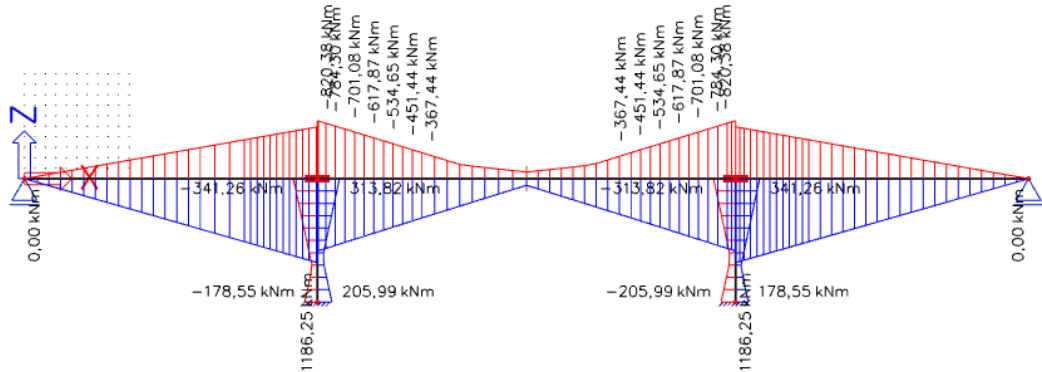
Zatížení poklesem podpor bylo provedeno symetricky 5 mm, tak jak je to naznačené na levé polovině konstrukce.



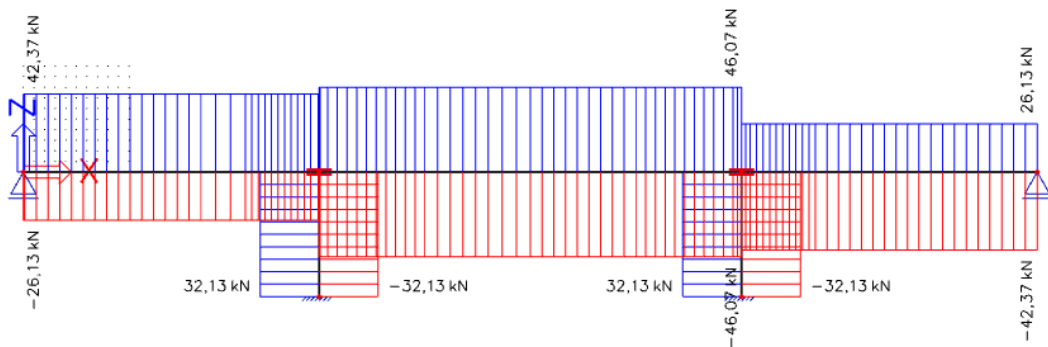
Obrázek 90 Zatížení pokles podpor SCIA 1



Obrázek 91 Zatížení pokles podpor SCIA 2

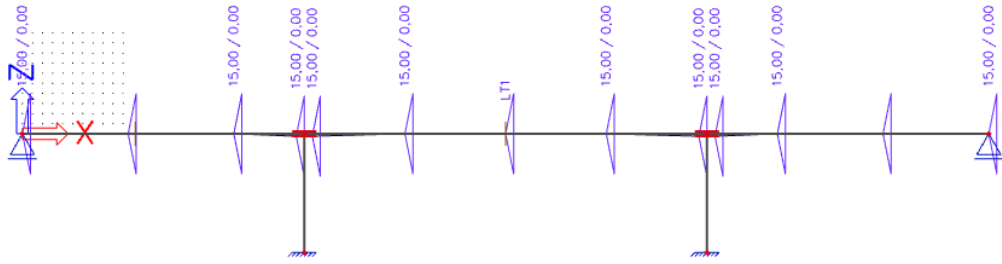


Obrázek 92 Pokles podpor SCIA obálka Mmax

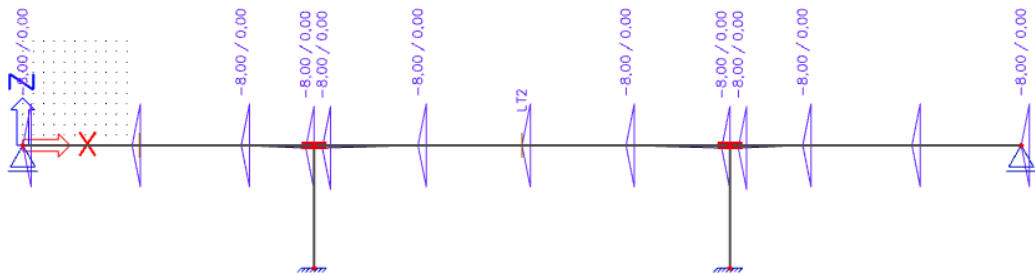


Obrázek 93 Pokles podpor SCIA obálka Vmax

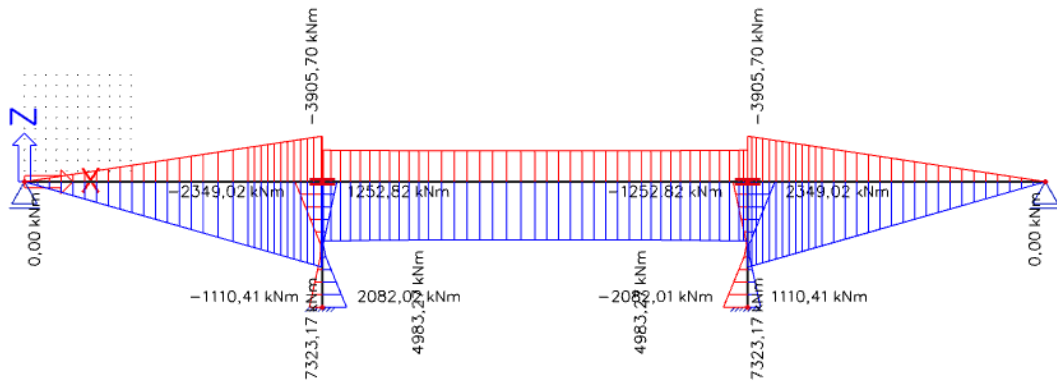
4.3.3.7 Teplotní účinky nerovnoměrné oteplení



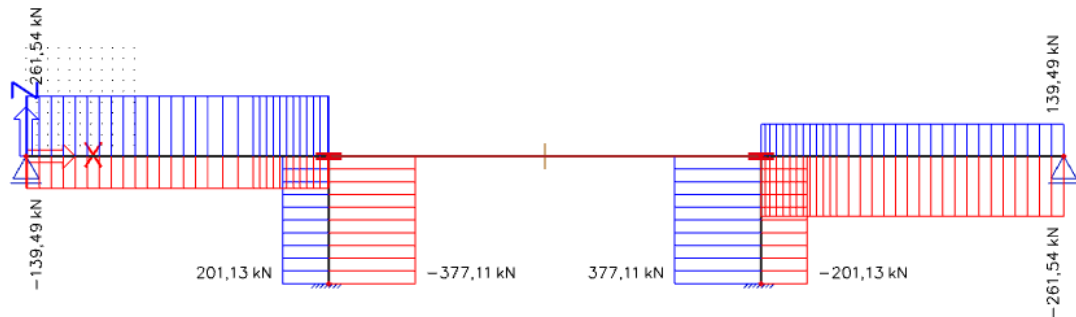
Obrázek 94 Zatížení teplotou SCIA 1



Obrázek 95 Zatížení teplotou SCIA 2



Obrázek 96 Nerovnoměrné zatížení teplotou SCIA obálka Mmax



Obrázek 97 Nerovnoměrné zatížení teplotou SCIA obálka Vmax

4.3.3.8 Přehled extrémů vnitřních sil

Přehled rozhodujících vnitřních sil:

Zatížení	M ₄ [MNm]		M ₁₀ [MNm]		M ₁₅ [MNm]		V _{0,k} [MN]	V _{10,L,k} [MN]	V _{10,P,k} [MN]	
	max	min	max	min	max	min				
g ₀	7,026		-25,318		9,226		1,578	-3,3195	3,5953	
(g-g ₀) _{k,inf}	1,546		-5,422		1,999		0,3464	-0,695	0,7439	
(g-g ₀) _m	1,704		-5,793		2,203		0,382	-0,766	0,8195	
(g-g ₀) _{k,sup}	2,019		-7,079		2,611		0,452	-0,907	0,9713	
g=g ₀ +(g-g ₀) _m	8,73		-31,111		11,429		1,96	-4,0855	4,4148	
LM1	TS	5,183	-1,014	1,17	-5,148	5,131	-0,548	0,994	-0,997	0,997
	UDL	3,189	-1,13	1,165	-8,381	3,64	-0,979	0,5619	-0,931	1,074
	Σ	8,372	-2,144	2,335	-13,529	8,771	-1,527	1,5559	-1,928	2,071
LM3 3000/240	15,55	-3,042	3,51	-15,443	15,392	-1,644	2,998	-2,996	2,996	
LM3	LM3	9,33	-1,826	2,106	-9,266	9,235	-0,987	1,799	-1,798	1,797
1800/ 200+ LM1	LM1	2,783	-0,987	1,016	-7,314	3,176	-0,854	0,49	-0,812	0,938
	Σ	12,113	-2,813	3,122	-16,58	12,411	-1,841	4,797	-4,794	4,793
LM4	3,253	-1,154	1,188	-8,549	3,713	-0,998	0,573	-0,95	1,096	
Nerovnom. Teplota	2,929	-1,563	7,323	-3,905	4,974	-2,653	0,261	-0,139	0	
Staveništní zatížení	0,651	-0,23	0,238	-1,71	0,743	-0,2	0,115	-0,19	0,219	
zatížení chodníků	0,483	-0,171	0,177	-1,269	0,551	-0,148	0,085	-0,141	0,163	
Brzdné síly	1,88	-0,367	0,424	-1,867	1,86	-0,198	-0,0018	0,0038	-0,0041	
Odstředivé síly	0,47	0,09175	0,106	0,46675	0,465	0,0495	0,00045	0,00095	-0,00103	
Pokles podpor	0,428	-0,293	1,186	-0,82	0,093	-0,093	0,042	0,042	-0,046	

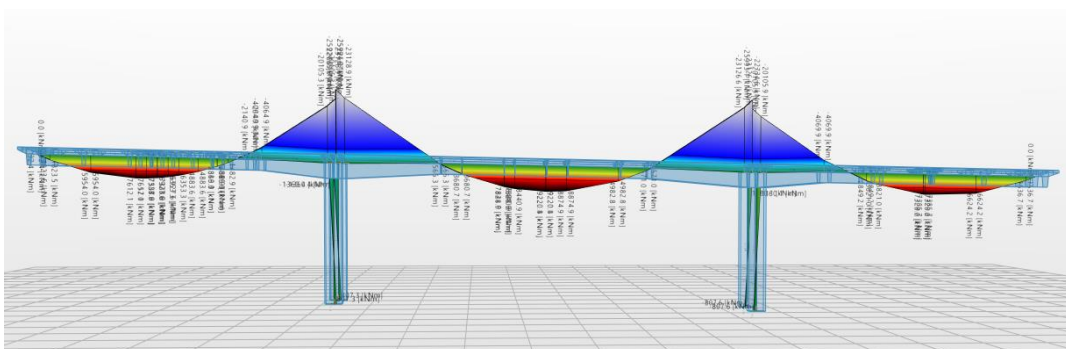
Tabulka 4. Rozhodující vnitřní síly

* Model zatížení LM 3 900/180 nebyl zohledněn, protože se nejedná o komunikaci III. třídy.

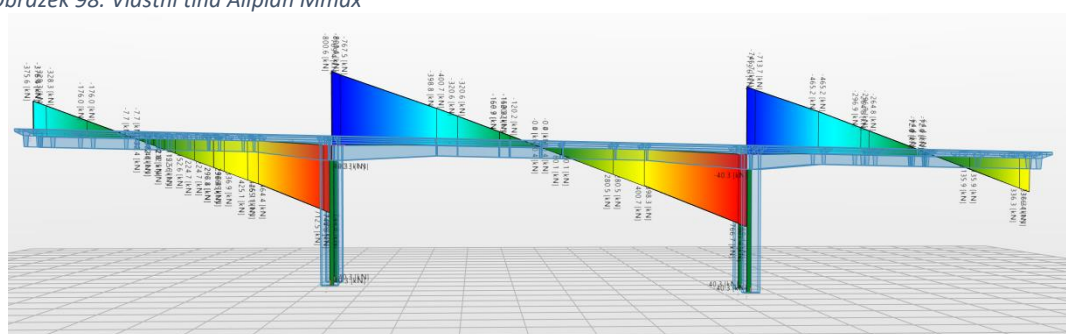
Sestavy zatížení ze SCIA Engineer byly uvažovány jako vzorové, proto také byly využity pro výpočet kombinací. Zatížení větrem se uvažuje pouze nelineární, protože ve všech stavech bylo rozhodující. Současně i pro zjednodušení výpočtu.

4.3.4 Přehled vnitřních sil Allplan Bridge 2020

4.3.4.1 Vlastní tíha a ostatní stálé zatížení

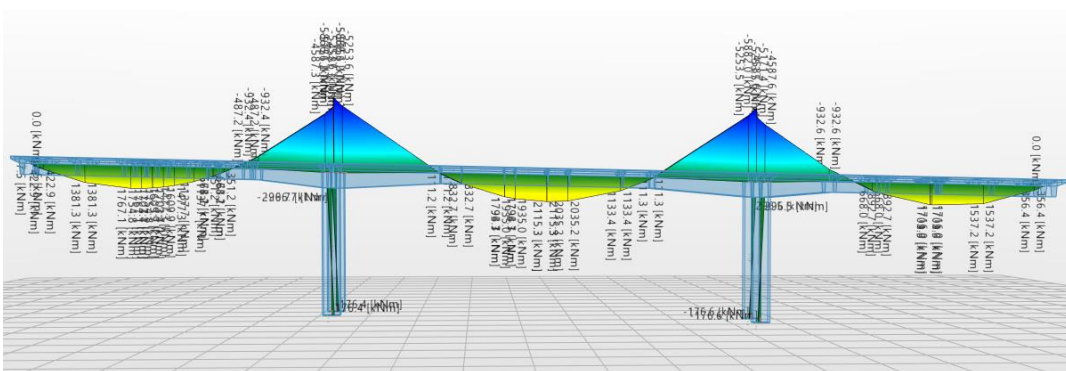


Obrázek 98. Vlastní tíha Allplan Mmax

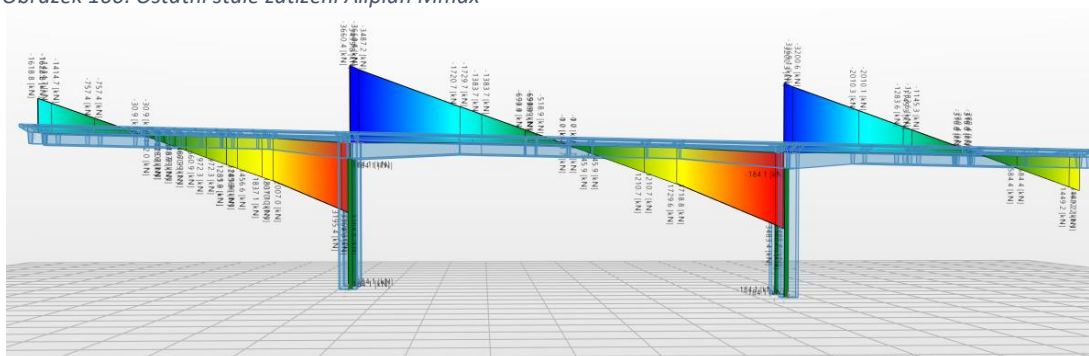


Obrázek 99. Vlastní tíha Allplan Vmax

4.3.4.2 Ostatní stálé zatížení

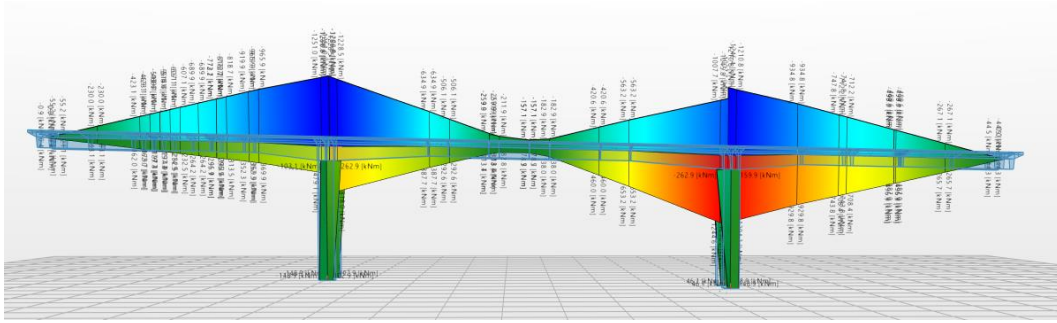


Obrázek 100. Ostatní stálé zatížení Allplan Mmax

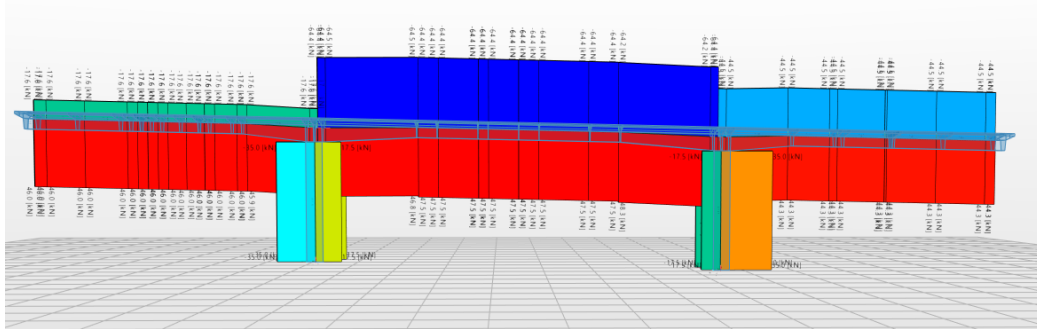


Obrázek 101. Ostatní stálé zatížení Allplan Vmax

4.3.4.3 Pokles podpor

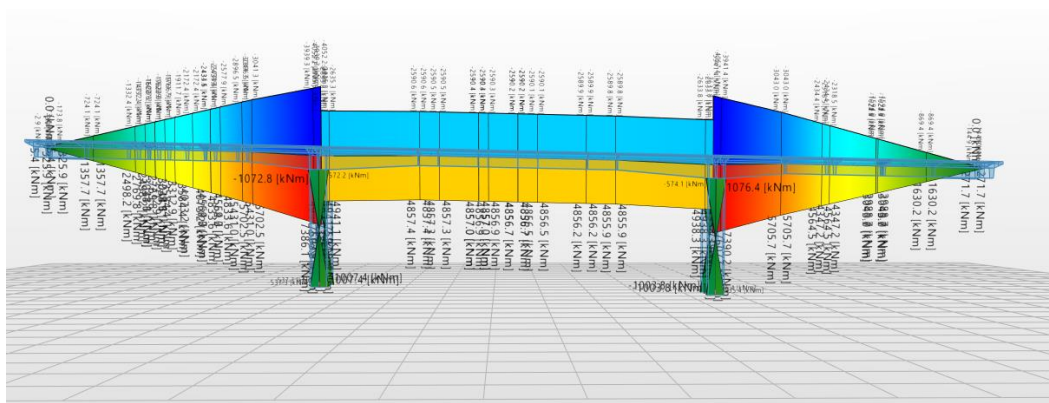


Obrázek 102. Pokles podpor Allplan obálka Mmax

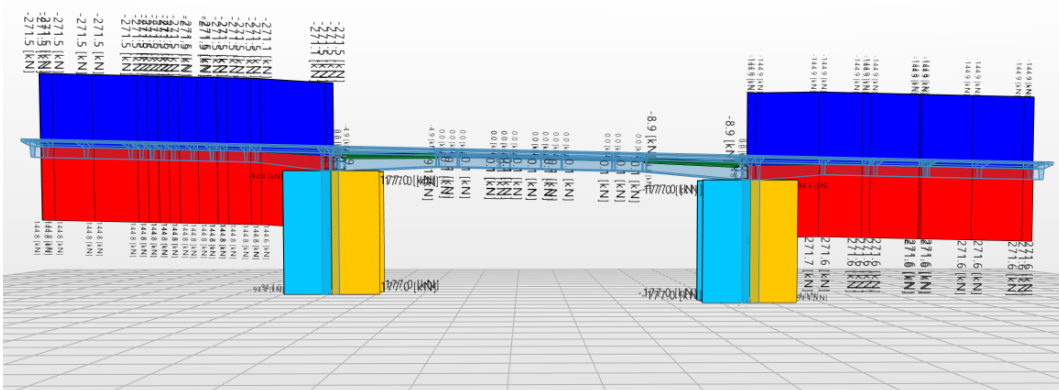


Obrázek 103. Pokles podpor Allplan obálka Vmax

4.3.4.4 Nerovnoměrné oteplení

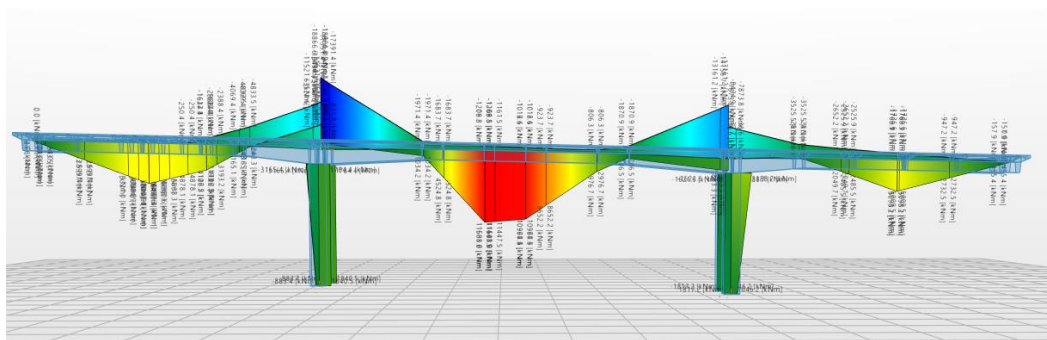


Obrázek 104. Nerovnoměrné oteplení Allplan obálka Mmax

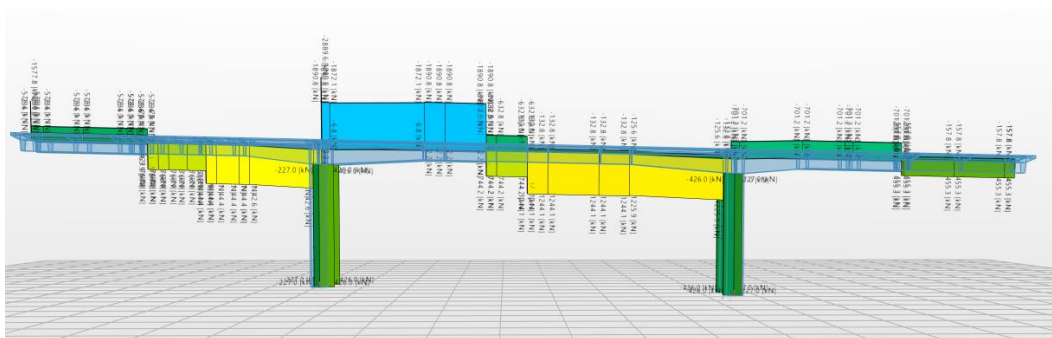


Obrázek 105. Nerovnoměrné oteplení Allplan obálka Vmax

4.3.4.5 LM1 TS

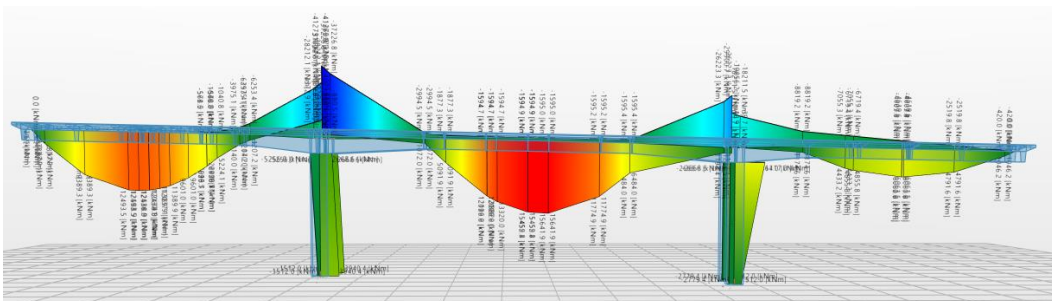


Obrázek 106 LM1 TS Allplan obálka Mmax

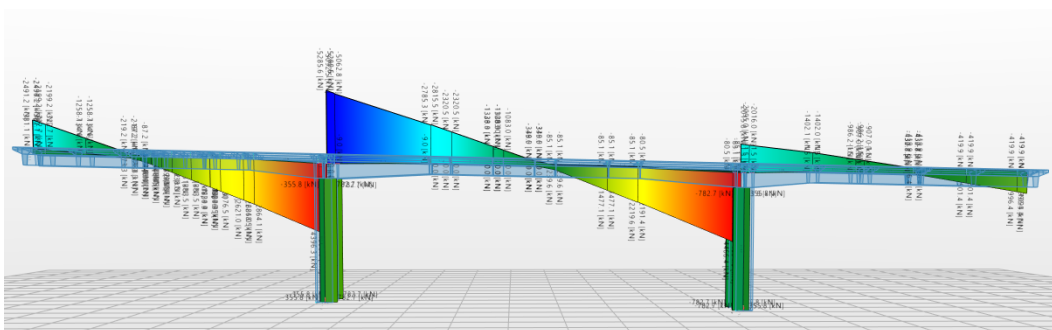


Obrázek 107 LM1 TS Allplan obálka Vmax

4.3.4.6 LM1 UDL



Obrázek 108 LM1 UDL Allplan obálka Mmax

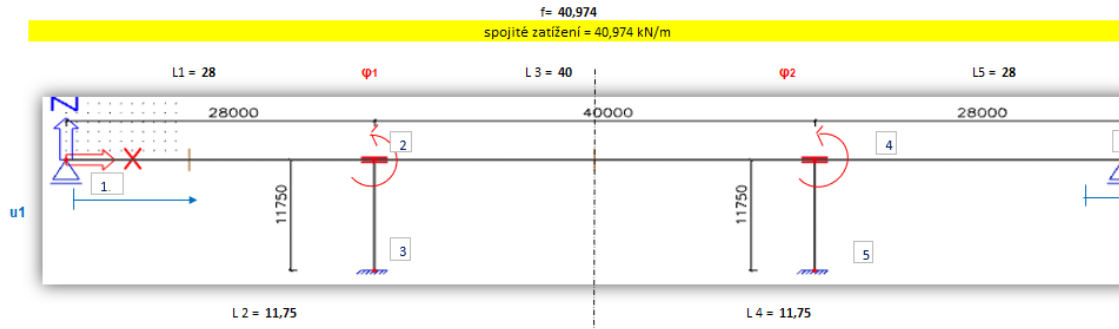


Obrázek 109 LM1 UDL obálka Vmax

Sestavy zatížení TS a UDL byly zadány se stejnou geometrií jako ve SCIA Engineer.

4.3.5 Zjednodušená deformační metoda

4.3.5.1 Výpočet vnitřních sil od ostatního stálého zatížení



Mostovka

E	34 000 N/mm ² = 34 000 000 Kpa
I _y	43,5444 m ⁴ >
EI	1480509600 kN/m ²

Pilíř (2 sloupy)

E	34 000 000 Kpa	
I _y	0,1333 Σ =	0,2666
EI	9064400 kN/m ²	
A =	6,9202 Σ =	13,8404

Momentové rovnice

1. $M_{21} + M_{23} = M_{24}$

$$\overset{\prime}{M}_{21} = -f \cdot L^2 / 8 \quad -4015,5 \text{ kNm}$$

$$\overset{\prime}{M}_{23} = -f \cdot L^2 / 12 \quad 0 \text{ kNm}$$

$$\overset{\prime}{M}_{24} = f \cdot L^2 / 12 \quad 5463,2 \text{ kNm}$$

- $M_{21} = \overset{\prime}{M}_{21} + 3 \cdot 2 \cdot EI / 2 \cdot 28 (\varphi_1)$

- $M_{23} = \overset{\prime}{M}_{23} + 2 \cdot EI / 11,75 \cdot (2 \cdot \varphi_1 + 3 \cdot u_1 / L)$

- $M_{24} = \overset{\prime}{M}_{24} + 2 \cdot EI / L (2 \cdot \varphi_1 + \varphi_2)$

2. $M_{46} + M_{45} = M_{42}$

$$\overset{\prime}{M}_{46} = f \cdot L^2 / 8 \quad 4015,452 \text{ kNm}$$

$$\overset{\prime}{M}_{45} = -f \cdot L^2 / 12 \quad 0 \text{ kNm}$$

$$\overset{\prime}{M}_{42} = f \cdot L^2 / 12 \quad -5463,2 \text{ kNm}$$

- $M_{46} = \overset{\prime}{M}_{46} + 3 \cdot 2 \cdot EI / 2 \cdot 28 (\varphi_2)$

- $M_{45} = \overset{\prime}{M}_{45} + 2 \cdot EI / 11,75 \cdot (2 \cdot \varphi_2 + 3 \cdot u_2 / L)$

- $M_{42} = \overset{\prime}{M}_{42} + 2 \cdot EI / L (2 \cdot \varphi_2 + \varphi_1)$

$\varphi_2 = -\varphi_1$

$u_1 = u_2$

3. $Z_{23} + Z_{45} = 0$

$$Z_{23} = 3 \cdot 2 \cdot EI / 11,75^2 \cdot (\varphi_1 + 2 \cdot u_1 / L)$$

$$Z_{45} = 3 \cdot 2 \cdot EI / 11,75^2 \cdot (\varphi_2 + 2 \cdot u_2 / L)$$

Upravení rovnic:

Styčnick 1.

$$M_{21} = \overset{\prime}{M}_{21} + 3 \cdot 2 \cdot EI / 2 \cdot 28 (\varphi_1)$$

$$M_{23} = \overset{\prime}{M}_{23} + 2 \cdot EI / 11,75 \cdot (2 \cdot \varphi_1 + 3 \cdot u_1 / L)$$

$$M_{24} = \overset{\prime}{M}_{24} + 2 \cdot EI / L (\varphi_1)$$

Styčnick 2.

$$M_{46} = \overset{\prime}{M}_{46} - 3 \cdot 2 \cdot EI / 2 \cdot 28 (\varphi_1)$$

$$M_{45} = \overset{\prime}{M}_{45} + 2 \cdot EI / 11,75 \cdot (-2 \cdot \varphi_1 + 3 \cdot u_1 / L)$$

$$M_{42} = \overset{\prime}{M}_{42} + 2 \cdot EI / L (-\varphi_1)$$

Patrová rovnice

$$Z_{23} = 3 \cdot 2 \cdot EI / 11,75^2 \cdot (\varphi_1 + 2 \cdot u_1 / L)$$

$$Z_{45} = 3 \cdot 2 \cdot EI / 11,75^2 \cdot (-\varphi_1 + 2 \cdot u_1 / L)$$

Dopočet neznámých:

φ_1	$\overset{\prime}{+}$	u_1	$\overset{\prime}{=}$	Pravá strana
1,24363E+11	+	0	=	-4015,45
3085753,191	+	393925,9	=	0
74025480	+	0	=	5463,2
-1,24363E+11	+	0	=	4015,452
-3085753,191	+	393925,9	=	0
-74025480	+	0	=	-5463,2
0	+	787851,9	=	0
0	+	787851,9	=	0

→ $u_1 = 0$

1,2444E+11	=	1447,748
φ_1	=	1,16341E-08
φ_2	=	-1,16341E-08

Hodnoty vnitřních sil:

$$\begin{aligned}M_{21} &= -5462,3 \\Z_{12} &= \tilde{Z}_{12} (-3*f*L/8) - 2*3*EI/2*L* (\varphi_1) \\ \tilde{Z}_{12} &= -430,227 \\Z_{12} &= -432,072 \\ \tilde{Z}_{12} &= -717,045 \\Z_{21} &= -715,2 \\M_{24} &= -5461,97 \\M_{23} &= 0,0359 \\M_{32} &= 0,01795\end{aligned}$$

Dopočet extrémů:

$$\begin{aligned}M_4 &= z_1*x - q*x^2/2 && (x = 11,20 \text{ m}) > \text{viz. schwedlerova věta} \\M_4 &= 2250,13 \text{ MNm} && X=11,2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}X_{ab} &= -E*A/L * (u_1) \\X_{ab} &= 0 \\Z_{32} &= 0,00458 \text{ MN}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}M_{15} &= Z_{24}*20 - 5461,97 - f*20^2/2 = \\M_{15} &= 2,7316 \text{ MNm} \\Z_{23} &= -0,01719247 \text{ MN}\end{aligned}$$

Jako neznámé byly uvažovány φ_1 , φ_2 a u_1 . Patrová rovnice byla vyznačena, protože ve výpočtu ve výpočetních modelech vznikají zatížení na pilíř a tím pádem má neznáma u_1 reálné hodnoty. Výpočet deformační metod sloužil pouze jako okrajové porovnání výpočetních metod

4.4 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ A VÝPOČETNÍCH METOD

Porovnání výsledků bylo provedeno pomocí tabulek vnitřních sil a reakcí. Pod tabulkami byly uvedeny sumy z absolutních hodnot výsledkům pro zjištění procentuálního rozdílu vnitřních sil. Z nich byly poté v grafu vykresleny jejich odchylky od výchozího stavu.

4.4.1 Vnitřní síly

4.4.1.1 Vlastní tíha

Porovnání výsledků vlastní tíhy posloužilo jako základní výstup pro posouzení rozdílnosti jednotlivých programů. Důvodem bylo, že oba programy počítaly vlastní tíhu podle svého naprogramování bez jakéhokoliv zadání uživatelem. Rozdíly tedy spadají pouze na rozdílnosti řešení programů.

Vlastní tíha - g0

Tabulka 5 Extrémy vnitřních sil od vlastní tíhy

		SCIA Engineer	Allplan Bridge (v přímé)	Allplan Bridge (v oblouku)
M ₄ [MNm]	max	7,026	7,3288	7,2357
	min			
M ₁₀ [MNm]	max	-25,318	-25,9943	-26,1271
	min			
M ₁₅ [MNm]	max	9,226	9,2205	9,1386
	min			
V ₀ [MN]		1,578	1,623	1,6174
V _{10,l} [MN]		-3,3195	-3,3712	-3,3765
V _{10,p} [MN]		3,5953	3,6653	3,6646

Σ absolutní hodnot	50,0628	51,2031	51,1599
Procenta	100,00%	102,28%	102,19%

Z tabulek výsledných hodnot a procentuální sumy bylo zřejmé, že výsledky na mostu v přímé z Allplan Bridge mají větší odchylku než u mostu v oblouku. Zároveň program sám rozlišuje zakřivení mostu bez podrobnějšího zadání.

4.4.1.2 Ostatní stálé zatížení

Porovnání ostatního stálého zatížení bylo rozšířeno o porovnání s ručním výpočtem za užití deformační metody. U konstrukce užívané při deformační metodě nebyly uvažovány změny tuhosti v místě náběhu, proto vyšly větší momenty v poli a nižší nad podporou.

Tabulka 6 Extrémy vnitřních sil od ostatního stálého zatížení

		SCIA Engineer	Allplan Bridge (v přímé)	Allplan Bridge (v oblouku)
M ₄ [MNm]	max	1,704	1,7024	1,6724
	min			
M ₁₀ [MNm]	max	-5,793	-5,8821	-5,9278
	min			
M ₁₅ [MNm]	max	2,203	2,1153	2,0857
	min			
V ₀ [MN]		0,382	0,3764	0,3745
V _{10,l} [MN]		-0,766	-0,7456	-0,7472
V _{10,p} [MN]		0,8195	0,8014	0,801
Σ absolutních hodnot		11,6675	11,6232	11,6086
Procenta		100,00%	99,62%	99,50%

4.4.1.3 Pokles podpor

Porovnání vnitřních sil od poklesu podpor vyšlo s největším procentuálním rozdílem. Vyplývá z toho, že největší rozdíly vznikají z rozdílné tuhosti konstrukce.

Tabulka 7 Extrémy vnitřních sil od poklesu podpor

		SCIA Engineer	Allplan Bridge (v přímé)	Allplan Bridge (v oblouku)
M ₄ [MNm]	max	0,428	0,5151	0,5044
	min	-0,293	-0,3179	-0,312
M ₁₀ [MNm]	max	1,186	1,2878	1,0089
	min	-0,82	-0,7946	-0,8402
M ₁₅ [MNm]	max	0,093	0,0828	0,087
	min	-0,093	-0,0786	-0,0781
V ₀ [MN]		0,042	0,044	0,0452
V _{10,l} [MN]		0,042	0,044	0,0452
V _{10,p} [MN]		-0,046	-0,0475	-0,0469
Σ absolutních hodnot		3,043	3,2123	2,9679
Procenta		100,00%	105,56%	97,53%

4.4.1.4 Zatížení nerovnoměrným oteplením

Zatížení nerovnoměrným oteplením proběhlo se stejnými hodnotami, ale různým zadáváním. Ve Scie proběhlo rozdílem teplot při površích v 3D modelu, zatímco v Allplan Bridge byl zadán rozdíl teplot v příčném řezu, kde se teplota sama pomocí programu roznesla na celý most. Odchytky jsou minimální.

Tabulka 8 Extrémy vnitřních sil od nerovnoměrného oteplení

		SCIA Engineer	Allplan Bridge (v přímé)	Allplan Bridge (v oblouku)
M ₄ [MNm]	max	2,929	3,0413	2,9406
	min	-1,563	-1,622	-1,5683
M ₁₀ [MNm]	max	7,323	7,6033	7,2851
	min	-3,905	-4,0551	-3,8854
M ₁₅ [MNm]	max	4,974	4,8567	4,7748
	min	-2,653	-2,5902	-2,5466
V ₀ [MN]		0,261	0,2715	0,263
V _{10,i} [MN]		-0,139	-0,1448	-0,2629
V _{10,p} [MN]		0	0	-0,0002
Suma abs Σ		23,747	24,1849	23,5269
Procenta		100,00%	101,84%	99,07%

4.4.1.5 LM1 – TS

Nápravové síly TS byly zadané stejnou geometrií i zatížením.

Tabulka 9 Extrémy vnitřních sil od zatížení LM1-TS

		SCIA Engineer	Allplan Bridge (v přímé)	Allplan Bridge (v oblouku)
M ₄ [MNm]	max	5,183	5,1139	5,1095
	min	-1,014	-0,866	-0,8962
M ₁₀ [MNm]	max	1,17	1,2615	1,2942
	min	-5,148	-5,3107	-5,3347
M ₁₅ [MNm]	max	5,131	4,9769	4,9768
	min	-0,548	-0,2234	-0,2304
V ₀ [MN]		0,994	0,9994	0,9994
V _{10,i} [MN]		-0,997	-0,9988	-0,9989
V _{10,p} [MN]		0,997	0,9988	0,9988
poměrový rozdíl Σ		21,182	20,7494	20,8389
		100,00%	97,96%	98,38%

4.4.1.6 LM1 – UDL

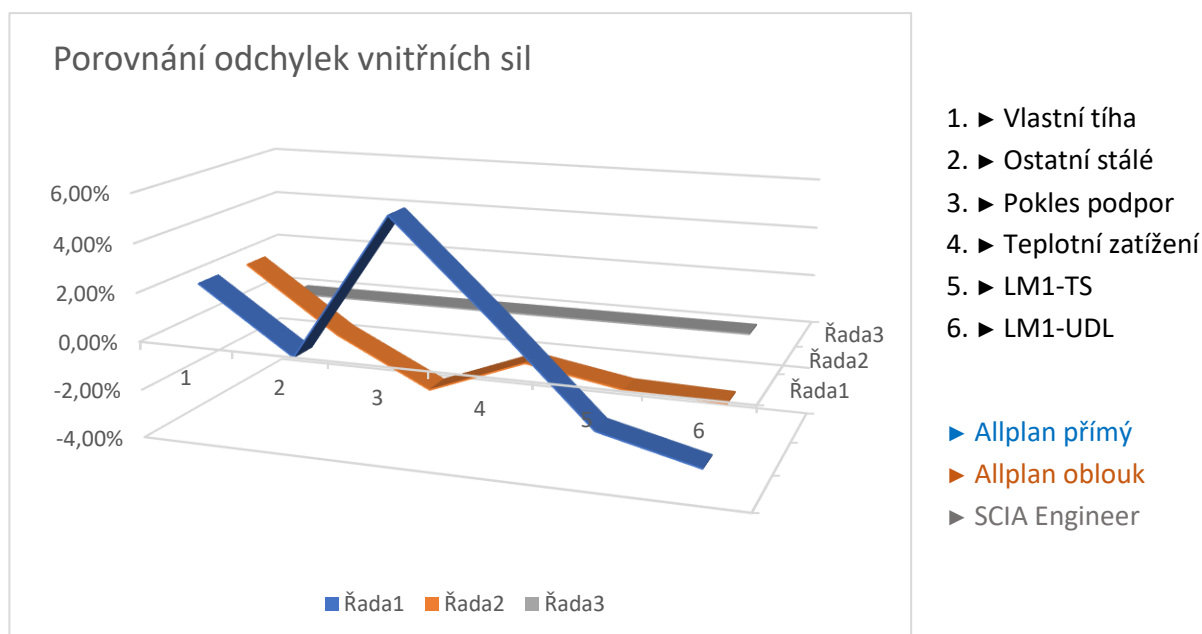
Zatížení spojitým zatížením proběhlo ve stejných sestavách a rozměrech ve všech programech.

Tabulka 10 Extrémy vnitřních sil od zatížení LM1 - UDL

		SCIA Engineer	Allplan Bridge (v přímé)	Allplan Bridge (v oblouku)
M ₄ [MNm]	max	3,189	3,0278	3,0477
	min	-1,13	-0,845	-0,968
M ₁₀ [MNm]	max	1,165	1,2627	1,289
	min	-8,381	-8,5287	-8,5929
M ₁₅ [MNm]	max	3,64	3,4105	3,4144
	min	-0,979	-0,7974	-0,8247
V ₀ [MN]		0,5619	0,5477	0,5499
V _{10,l} [MN]		-0,931	-0,9196	-0,9226
V _{10,p} [MN]		1,074	1,0751	1,0766
poměrový rozdíl Σ		21,0509	20,4145	20,6858
		100,00%	96,98%	98,27%

4.4.1.7 Porovnání odchylek vnitřních sil

Graf slouží k porovnání procentuálních odchylek sumy absolutních hodnot v příslušných zatěžovacích stavech. Z grafu je zřejmé, že největší odchylky vyšly ve výpočtu poklesu podpory. Bylo odhadnuto, že rozdílnost výsledků je z důvodu rozdílné tuhosti modelu, které program využívá při výpočtu.



4.4.1.8 Reakce - vlastní tíha

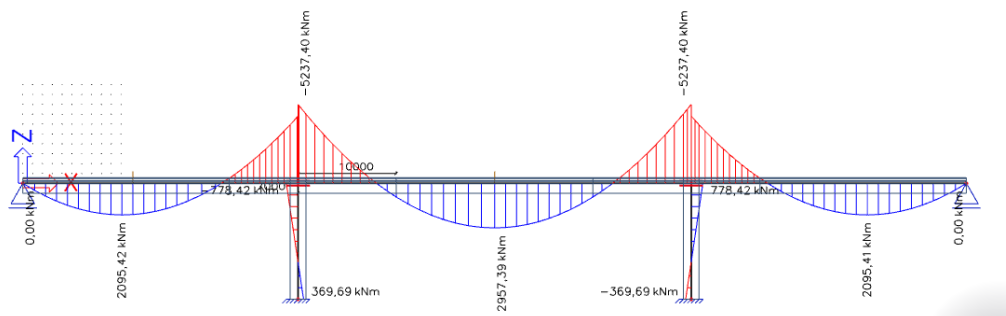
Pro úplnost byly posouzeny reakce při zatížení vlastní tíhou. Reakce se v jednotlivých programech shodují s minimální odchylkou. Větší rozdíly byly vidět při porovnání momentu u pilířů ve vetknutí v přímém modelu a ve SCIA Engineer.

Tabulka 11 Extrémní reakce od zatížení vlastní tíhou

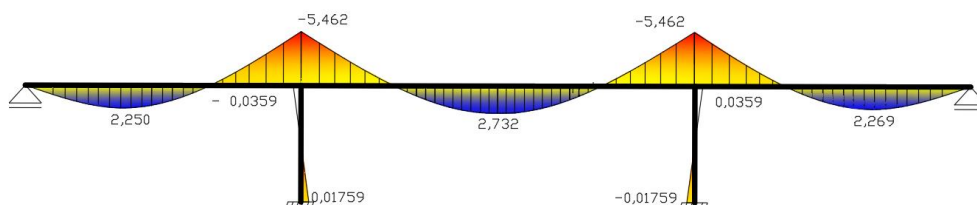
		SCIA Engineer	Allplan Bridge (v přímé)	Allplan Bridge (v oblouku)
Rz	Opěra 1	1,608	1,619	1,64174
	Opěra 2	1,608	1,619	1,64174
Rz	P1	7,989	7,9702	7,0302
	P2	7,989	7,9702	7,0446
Rx	P1	0,3539	0,368	0,3472
	P2	-0,3539	-0,368	-0,3471
My	P1	1,404	1,614	1,4802
	P2	-1,404	-1,614	-1,4802

4.4.2 Porovnání výpočetních metod s ručním výpočtem

Porovnání výpočetních metod s ručním výpočtem bylo provedeno na modelu bez náběhů ve všech výpočetních programech. Porovnány byly výsledky pro ostatní stálé zatížení pro zjednodušení výpočtu.



Obrázek 110. Obrázek vykreslení SCIA od ostatního stálého bez náběhů



Obrázek 111. Momenty vykreslení v Autocad pomocí ZDM od ostatního stálého zatížení

4.4.2.1 Ověření vnitřních sil:

Z porovnání výsledků s deformační metodou byly zjištěny maximální odchylky přibližně 0,2 MNm. Důvod vzniku odchylky byl usouzen v uvažování zjednodušeného modelu pro výpočet konstrukce, kde nevznikaly momenty na pilířích.

Tabulka 12 Ověření vnitřních sil ZDM

		SCIA Engineer	Allplan Bridge (v přímé)	Allplan Bridge (v oblouku)	Ruční výpočet
M ₄ [MNm]	max	2,095	2,045	2,013	2,269
	min				
M ₁₀ [MNm]	max	-5,237	-5,150	-5,218	-5,462
	min				
M ₁₅ [MNm]	max	2,957	2,865	2,824	2,732
	min				
V ₀ [MN]		0,414	0,407	0,404	0,432
V _{10,l} [MN]		-0,732	-0,714	-0,717	-0,715
V _{10,p} [MN]		0,819	0,801	0,801	0,819

4.5 Kombinace zatížení

4.5.1 Kombinace na MSÚ (kromě ověření na únavu)

V tomto případě bylo uvažováno s mezním stavem pevnosti nebo nadměrných deformací průřezů nebo prvků. V tomto mezním stavu musí být splněna podmínka:

$$E_d < R_d, \text{ kde:}$$

E_d - je návrhová hodnota účinku zatížení

R_d - je návrhová hodnota příslušné únosnosti

4.5.1.1 Kombinace pro trvalé a dočasné návrhové situace-základní kombinace:

- 6.10

$$\sum \gamma_{G,j} G_{k,j} "+" \gamma_P P "+" \gamma_{Q,1} Q_{k,1} "+" \sum \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

nebo alternativně pro mezní stavy STR a GEO jako méně příznivá kombinace z následujících dvou výrazů:

- výraz 6.10a

$$\sum \gamma_{G,j} G_{k,j} "+" \gamma_P P "+" \gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1} "+" \sum \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

- výraz 6.10b

$$\sum \xi_j \gamma_{G,j} G_{k,j} "+" \gamma_P P "+" \gamma_{Q,1} Q_{k,1} "+" \sum \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

- Kombinace pro mimořádné návrhové situace:

$$\sum G_{k,j} "+" P "+" A_d "+" (\psi_{1,1} \text{ nebo } \psi_{2,1}) Q_{k,1} "+" \sum \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

- Kombinace pro seismické návrhové situace:

$$\sum G_{k,j} "+" P "+" A_{Ed} "+" \sum \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

4.5.2 Kombinace na mezní stav použitelnosti

Při ověřování mezních stavů použitelnosti se ověřuje podmínka:

$E_d < C_d$, kde:

E_d je návrhová hodnota účinku zatížení stanovená v kritériu použitelnosti určená na základě příslušné kombinace

C_d je návrhová hodnota příslušného kritéria použitelnosti

4.5.2.1 Kombinace

- Charakteristická kombinace:

$$\sum G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

- Častá kombinace:

$$\sum G_{k,j} + P + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

- Kvazistálá kombinace:

$$\sum G_{k,j} + P + \sum \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

- Občasná kombinace:

$$\sum G_{k,j} + P_k + \psi_{1,infq} Q_{k,1} + \sum \psi_{1,i} Q_{k,i}$$

4.5.3 Sestavy zatížení

Při sestavování kombinací zatížení bylo uvažováno jak zatížení dopravou, tak zatížení teplotními účinky a poklesem podpor. Z hlediska zatížení dopravou byly použity sestavy gr1a, gr4 a gr5. Účinky zvláštních vozidel byly přenásobeny dynamickým součinitelem a účinky teplotních změn byly přenásobeny součinitelem k_{sur} . (19)

4.5.4 Kombinace výpočet

4.5.4.1 Příklad analogického výpočtu provedeného v programu excel. .

M4, max

6.10

$$\sum \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} =$$

$$1,35 \cdot 7,026 + 1,35 \cdot 2,019 + 1,2 \cdot 0,142 + 1,35 \cdot (5,183 + 4,87 + 0,6 \cdot 0,483) + 1,5 \cdot 0,6 \cdot 0,79 \cdot 1,953 = + 27,733 \text{ MNm}$$

6.10a

$$\sum \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1} + \sum \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} = 1,35 \cdot 7,03 + 1 \cdot 1,35 \cdot 2,019 + 1 \cdot 1,2 \cdot 0,14 + 1,35(0,75 \cdot 5,18 + 0,4 \cdot 4,87 + 0,4 \cdot 0,6 \cdot 0,48) + 1,5 \cdot 0,6 \cdot 0,79 \cdot 1,95 \cdot 1,39 = 21,80 \text{ MNm}$$

6.10b

$$\sum \xi_j \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} = 0,85 \cdot 1,35 \cdot 7,03 + 0,85 \cdot 1,35 \cdot 2,019 + 0,85 \cdot 1,2 \cdot 0,14 + 1,35 \cdot (5,18 + 4,87 + 0,6 \cdot 0,48) + 1,5 \cdot 0,6 \cdot 0,79 \cdot 1,95 \cdot 1,39 = 25,88 \text{ MNm}$$

M4, min

6.10

$$1 \cdot 7,026 + 1 \cdot 2,019 - 1,2 \cdot 0,087 - 1,35 \cdot (1,014 + 1,727 + 1 \cdot 0,6 \cdot 0,171) - 1,5 \cdot 0,6 \cdot 1 \cdot 2,832 \cdot 0,749 = 4,353 \text{ MNm}$$

6.10a

$$1 \cdot 7,026 + 1 \cdot 2,019 - 1,2 \cdot 0,087 - 1,35 \cdot (0,75 \cdot 1,014 + 0,4 \cdot 1,727 + 0,4 \cdot 0,6 \cdot 0,171) - 1,5 \cdot 0,6 \cdot 0,832 \cdot 0,749 = 6,177 \text{ MNm}$$

6.10b

$$0,85 \cdot 7,026 + 0,85 \cdot 2,019 - 0,85 \cdot 1,2 \cdot 0,087 - 1,35 \cdot (1,014 + 1,727 + 1 \cdot 0,6 \cdot 0,171) - 1,5 \cdot 0,6 \cdot 1 \cdot 2,832 \cdot 0,749 = 3,012 \text{ MNm}$$

4.5.4.2 Výsledky MSÚ pro určené sestavy zatížení

Tabulka 13 Výsledky MSÚ

Použitá sestava zatížení	Rovnice	M4,d		M10,d		M15,d		V0,d	V10,l,d	V10,p,d
		max	min	max	min	max	min			
		[MNm]	[MNm]	[MNm]	[MNm]	[MNm]	[MNm]			
LM1 + Stálé zatížení	(6.10)	25,463	5,159	-25,203	-65,164	30,658	7,984	5,349	-8,899	9,769
	(6.10a)	20,896	6,500	-26,628	-56,021	25,710	9,034	4,853	-8,077	8,767
	(6.10b)	23,606	3,818	-20,408	-58,564	28,256	6,214	4,891	-6,754	8,611
gr4	(6.10)	25,072	5,297	-25,346	-64,136	30,212	8,104	5,281	-8,785	7,137
	(6.10a)	13,770	8,192	-28,499	-45,872	18,371	10,165	3,180	-6,182	6,841
	(6.10b)	23,215	3,956	-20,551	-57,536	27,810	6,333	4,822	-6,640	6,111
gr5-1	(6.10)	35,812	3,880	-23,523	-67,763	40,189	7,835	7,430	-10,429	11,088
	(6.10a)	13,770	8,192	-28,499	-45,872	18,371	3,180	3,180	-6,182	6,841
	(6.10b)	33,955	-5,061	-18,728	-23,763	37,787	6,971	6,971	-4,090	10,062
gr5-2	(6.10)	30,752	4,271	-24,142	-68,881	35,749	7,613	6,270	-9,706	10,534
	(6.10a)	15,273	7,659	-27,950	-49,822	20,086	9,704	3,445	-6,621	7,348
	(6.10b)	28,895	-4,670	-19,346	-62,281	33,347	5,843	5,812	-7,561	9,507
gr5-3	(6.10)	26,995	5,603	-25,513	-59,007	31,462	8,766	5,609	-8,609	9,267
	(6.10a)	13,770	8,192	-28,499	-45,872	18,371	10,165	3,180	-6,182	6,841
	(6.10b)	25,138	4,262	-20,718	-52,407	29,060	6,996	5,150	-6,464	8,241
Stavební stav	(6.10)	13,269	7,913	-26,804	-39,817	18,080	9,665	2,553	-4,541	5,188
	(6.10a)	13,269	7,913	-26,804	-39,817	18,080	9,665	2,553	-4,541	5,188
	(6.10b)	11,820	6,505	-21,742	-34,651	16,206	7,801	2,231	-3,867	4,459

Jako hlavní proměnné zatížení bylo uvažováno zatížení dopravou, které se zohlednilo v použitých sestavách zatížení. Zatížení teplotou nebylo v rámci bakalářské práce uvažováno jako hlavní proměnné zatížení.

Při posuzování konstrukce na MSÚ byly uvažovány pouze hodnoty z kombinací 6.10a, 6.10b. V kombinacích 6.10 vycházely největší hodnoty vnitřních sil, ale jednalo by se o nevhodný návrh mostní konstrukce. V rámci bakalářské práce nebyly kombinace 6.10 uvažovány. (19)

4.5.4.3 Výsledky MSP pro určené sestavy zatížení

Tabulka 14 Výsledky MSP

Použitá sestava zatížení	Rovnice	M4,d		M10,d		M15,d		V0,d	V10,l,d	V10,p,d
		max	min	max	min	max	Min			
		[MNm]	[MNm]	[MNm]	[MNm]	[MNm]	[MNm]	[MN]	[MN]	[MN]
gr1a	charakt.	18,775	6,317	-27,286	-47,893	22,538	9,331	3,732	-6,165	6,740
	častá	15,237	7,376	-28,727	-40,956	18,611	10,252	3,102	-5,320	5,788
	kvazi.	9,958	8,629	-30,113	-33,438	13,175	11,090	2,111	-4,166	4,572
gr4	charakt.	13,366	7,410	-28,539	-42,152	17,150	9,948	2,698	-5,102	5,668
	kvazi.	9,958	8,629	-30,113	-33,438	13,175	11,090	-4,166	-4,166	4,572
gr5-1	charakt.	26,440	5,370	-26,041	-49,818	29,598	9,220	5,273	-7,298	7,717
	kvazi.	9,958	8,629	-30,113	-49,654	13,175	11,090	2,111	-4,166	4,572
gr5-2	charakt.	22,365	5,701	-26,554	-50,549	26,007	9,063	4,439	-6,803	7,354
	kvazi.	9,958	8,629	-30,113	-41,118	13,175	11,090	2,111	-4,166	4,572
gr5-3	charakt.	19,443	6,738	-27,621	-42,869	22,672	9,959	3,924	-5,950	6,369
	kvazi.	9,958	8,629	-30,113	-33,438	13,175	11,090	2,111	-4,166	4,572
Stavební stav	charakt.	18,107	4,477	-20,292	-37,585	20,841	7,138	3,593	-5,243	5,627
	kvazi.	7,939	6,610	-23,034	-28,155	10,564	8,479	1,659	-3,259	3,600

4.6 Návrh předpětí

4.6.1 Parametry předpětí:

4.6.1.1 Materiálové charakteristiky

Průměr:	$\varnothing = 15,7 \text{ mm}$
Plocha jednoho lana:	$A_{p,01} = 150 \text{ mm}^2$
Charakteristická pevnost v tahu:	$f_{pk} = 1860 \text{ MPa}$ $f_{p0,1k} = 0,88 * f_{pk} = 0,88 * 1860 = 1636,8 \text{ Mpa}$
Modul pružnosti:	$E_p = 195 \text{ Gpa}$
Návrhová hodnota napětí v předpínací oceli:	$f_{pd} = f_{p0,1k} / \gamma_s = 1636,8 / 1,15 = 1423,304 \text{ Mpa}$
Duktilita:	$f_{pk} / f_{p0,1k} > 1,1 \quad 1,136 > 1,1$
Relaxace:	2. třída s nízkou relaxací

4.6.1.2 Krycí vrstva

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev}$$

$$\text{kde } c_{min} = \max \{ c_{minb}; c_{min,dur} + \Delta c_{dur,\gamma} - \Delta c_{dur,st} - \Delta c_{dur,add}; 10\text{mm} \}$$

$$c_{minb} = 80 \text{ mm}$$

$$c_{min,dur} = 50 \text{ mm}$$

$$\Delta c_{dur,\gamma}; \Delta c_{dur,st}; \Delta c_{dur,add} = 0$$

$$c_{min} = \max \{ 80; 50 + 0 - 0 - 0; 10\text{mm} \} = 80 \text{ mm}$$

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev} = 80 + 10 = 90 \text{ mm}$$

4.6.1.3 Kabely

Celkový počet kabelů v průřezu	12
Počet lan v kabelu	19
Počet lan v průřezu celkem	228
Plocha kabelu $150 * 19 = 2850 \text{ mm}^2$	
Plocha předpínací výztuže	<u>0,034200</u> m^2
Průměr kanálků	80 mm

4.6.2 Předběžný návrh předpínací výztuže

Návrh byl proveden vyrovnání zatížení při nejnepříznivějších účincích podle metody omezení trhlin.

- Hodnoty momentů MSP pro kvazistálou kombinaci:

$$M_{4,kvazi,k} = 9,958 \text{ MNm}$$

$$M_{10,kvazi,k} = -30,113 \text{ MNm}$$

$$M_{15,kvazi,k} = 13,175 \text{ MNm}$$

$$- \Delta M_p = \text{cca } (0,1/0,15) * M_{10,min} = 3,011 / 4,517 = \underline{3,7 \text{ MNm}}$$

Momenty pro předběžný návrh předpětí:

$$M_{4,kvazi,k} = 9,958 + 3,7 * 0,4 = 11,438 \text{ MNm}$$

$$M_{10,kvazi,k} = -30,113 + 3,7 = -26,413 \text{ MNm}$$

$$M_{15,kvazi,k} = 13,175 + 3,7 = 16,875 \text{ MNm}$$

- Návrh kabelů

Průměr lana $A_p = 150 \text{ mm}^2$

Celkový počet kabelů v průřezu 12

Počet lan v kabelu 19

Celková plocha předpínací výztuže $A_{pc} = (12 * 19 * 150) / 1000000 = 0,0342 \text{ m}^2$

Střední hodnota napětí v předp. výztuži $0,75 * f_{pk} = 0,75 * 1860 = 1395 \text{ MPa}$

- Předpínací síla a napětí

Maximální napětí v předpínací výztuži: $\sigma_{p,max} = \min (0,8 * 1860 ; 0,9 * 1636,8) = \min (1488 ; 1473,1) = 1473,1 \text{ MPa}$

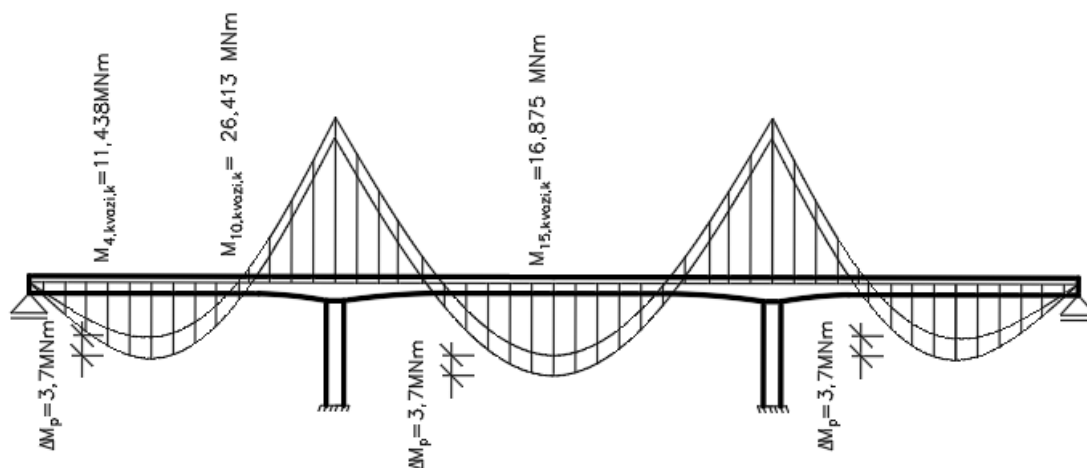
Maximální síla v předpínací výztuži: $N_{p,max} = 0,0342 * 1473,1 = 50,381 \text{ MN}$

Síla po zakotvení: $N_{p,0} = 0,95 * 50,381 = 47,862 \text{ MN}$

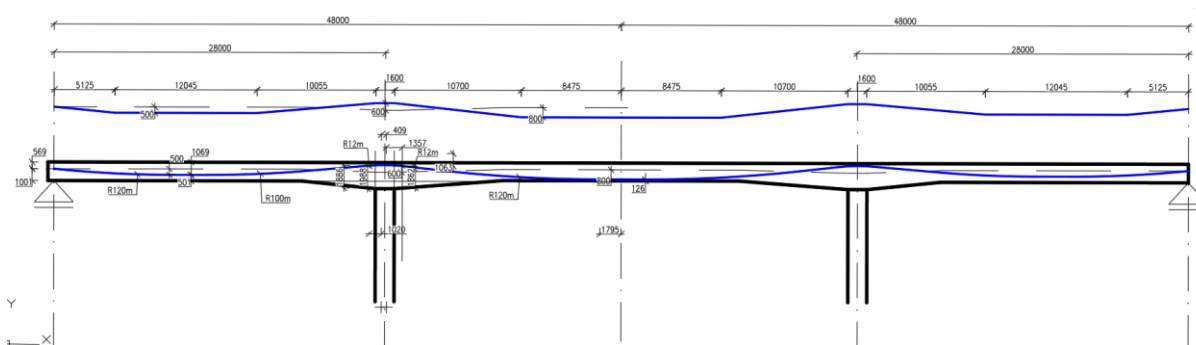
Síla na konci životnosti: $N_{p,kZ} = 0,75 * 50,381 = 37,786 \text{ MN}$

4.6.2.1 Předběžný návrh vedení kabelů

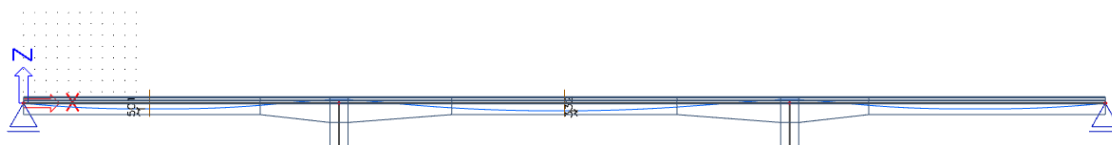
Předběžný návrh vedení předpínací výztuže byl proveden podle obálky kvazistálých momentů. Byly naznačeny osy kabelů, které byly poté vneseny do výpočetních programů.



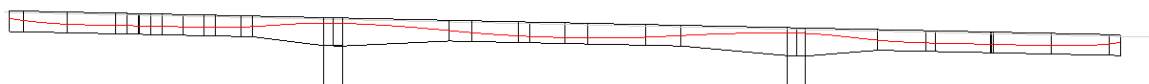
Obrázek 112. Kvazistálé momenty



Obrázek 113. Schéma vedení Autocad 2019



Obrázek 114. Vedení SCIA



Obrázek 115. Vedení Allplan

Po vypracování předpětí a určení výsledných účinků bylo zjištěno, že největší riziko vychází v průřezích 4 a 15 při posouzení MSP a průřezu 10 při posouzení MSÚ. Tyto údaje byly zohledněny při podrobném návrhu předpínací výztuže.

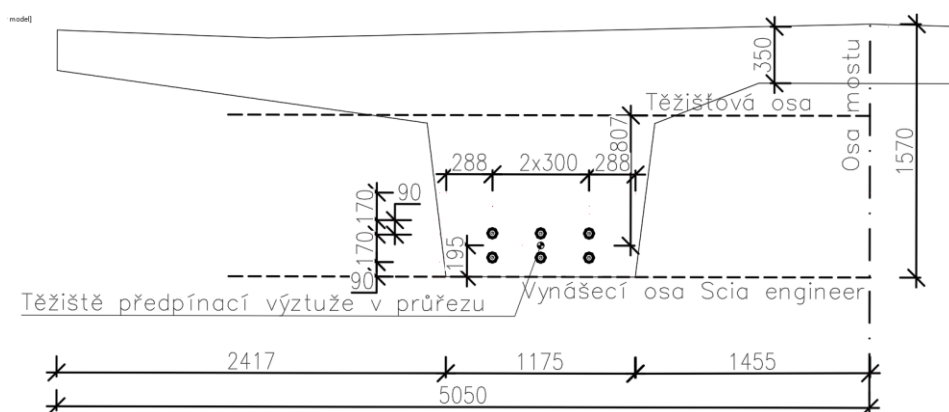
4.6.3 Podrobný návrh předpínací výztuže

Během podrobného návrhu předpětí byly zachovány materiálové charakteristiky předpínacích kabelů a byla měněna pouze geometrie, která měla zásadní vliv na výsledné hodnoty.

4.6.3.1 Návrh průřezů

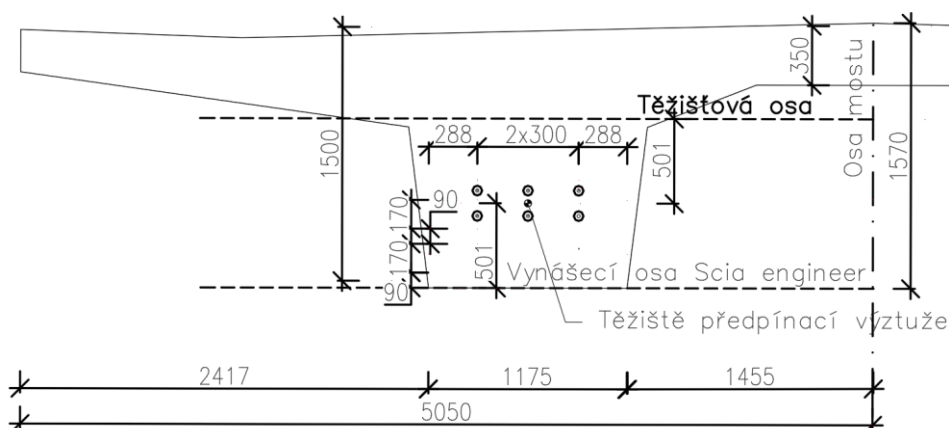
Kabely byly voleny s uspořádáním dvou kabelů ve svislé rovině a třemi kabely ve vodorovné rovině. Jejich excentricity jsou ve všech průřezech mostu stejné a mění se pouze výškové uspořádání. Vedení kabelů bylo navrženo na omezení napětí MSP a únosnost ohybového momentu při MSÚ. Při návrhu byla dodržena minimální krycí vrstva předpínací výztuže.

- **Průřez 15 v poli**



Obrázek 116. Řez 15

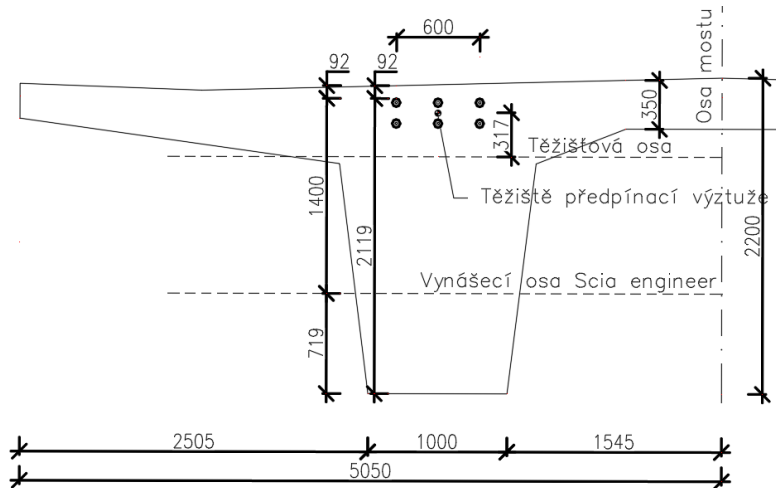
- **Průřez 4 v poli**



Obrázek 117. Řez 4

- **Průřez 10 nad podporou**

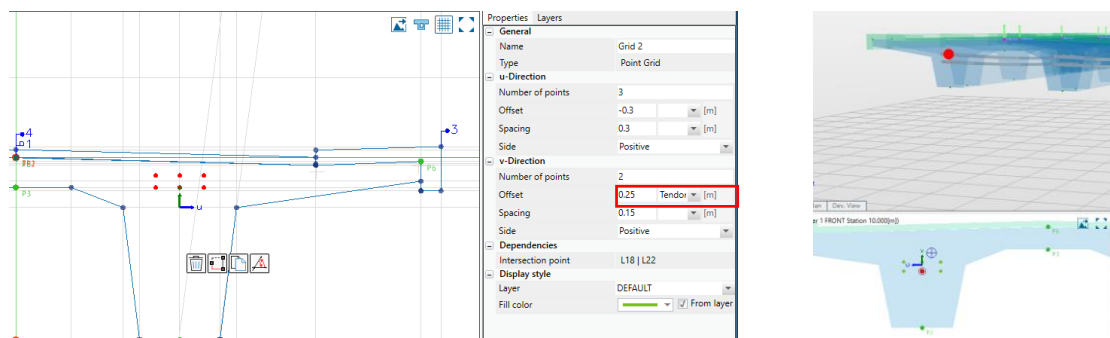
V průřezu nad podporou nebyly uvažovány příložky při horním povrchu. Veškeré momenty při MSÚ přebírá předpínací výztuž s betonářskou výztuží.



Obrázek 118. Řez 10

- **Definování průřezu Allplan Bridge**

Definování geometrie v Allplan Bridge v příčném řezu proběhlo se stejnou geometrií jako ve SCIA Engineer. Definováno bylo 12 kabelů, 6 na každé straně. Každých 6 kabelů náleželo své skupině prvků „gird 1, gird 2“, které byly poté definovány geometrické vlastnosti jak v příčném, tak podélném směru. Po vytvoření parametrů v příčném řezu neboli MG-BOX (mein girder box/ hlavní příčný řez se všemi parametry), byla určena geometrie v podélném směru, kde byly i přiřazeny materiálové charakteristiky. Kabely byly poté výškově vedeny v dalším zadávání funkcí „TendonHs“, jejíž přiřazení je vidět v červeném rámečku.

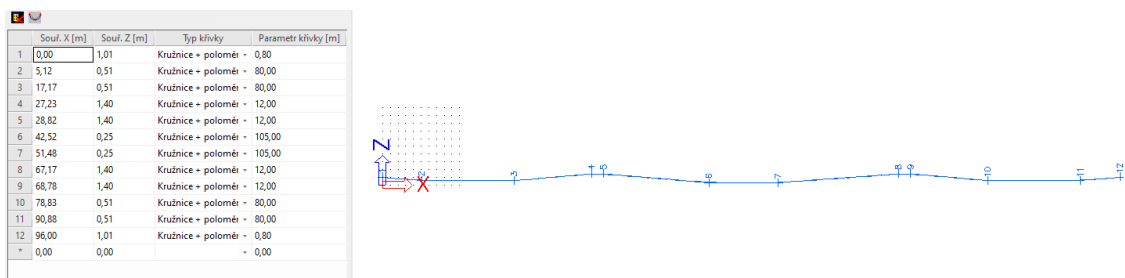


Obrázek 119. Předpětí příčn. řez Allplan

4.6.3.2 Podrobné vedení kabelů

- Vedení kabelů SCIA Engineer

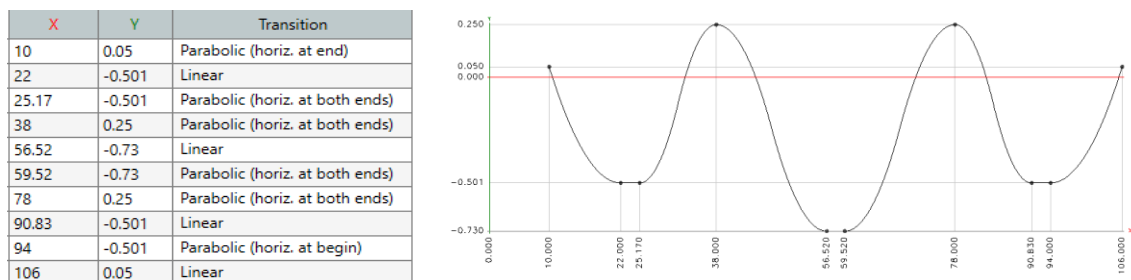
Vedení kabelů bylo provedeno pomocí kružnic a poměrů. Excentricity výšky byly zadávány od výchozí roviny, která odpovídala nejnižšímu bodu řezu v poli. Osa byla naznačena v příčných řezech. Poloměry zakřivení kabelů a vzdálenosti intervalů mezi čísly 1-12 bylo odvozeny z předběžného návrhu výztuže z Autocadu podle kvazistálých momentů. Zároveň výztuž byla upravována pro výsledné hodnoty v posouzení a pro dosažení plynulosti výztuže.



Obrázek 120. Vedení kabelů SCIA Engineer

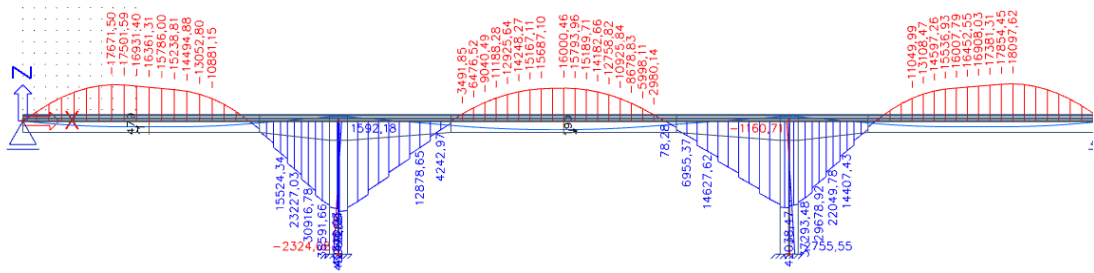
- Vedení kabelů Allplan Bridge

Na rozdíl od SCIA Engineer byly kabely vedeny pouze podle vzdáleností a excentricit. Definování poloměrů nebylo možné, protože výpočetní program prováděl zaoblení sám pouze podle příkazů zaoblení na konci, na začátku nebo na obou koncích. Vzdálenosti si tedy neodpovídají, protože v postupné analýze předpětí byly upravovány pro shodnost vedení kabelů a pro odpovídající výsledky vnitřních sil. Allplan začíná na staničení 10 m pouze z důvodů snazšího provedení geometrie, tento rozdíl neměl vliv na výpočet.

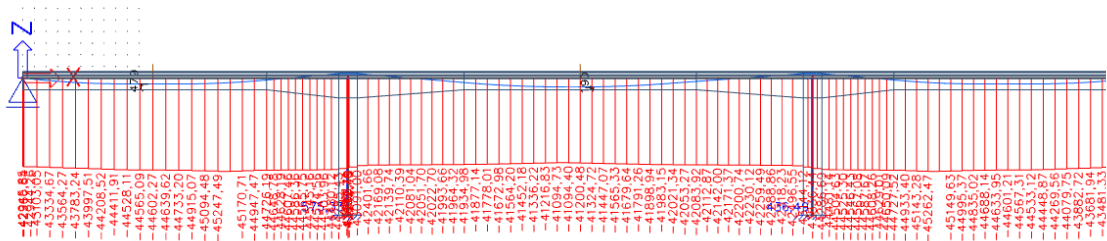


Obrázek 121. Vedení kabelů Allplan Bridge

4.6.3.3 Výsledky předpětí SCIA Engineer

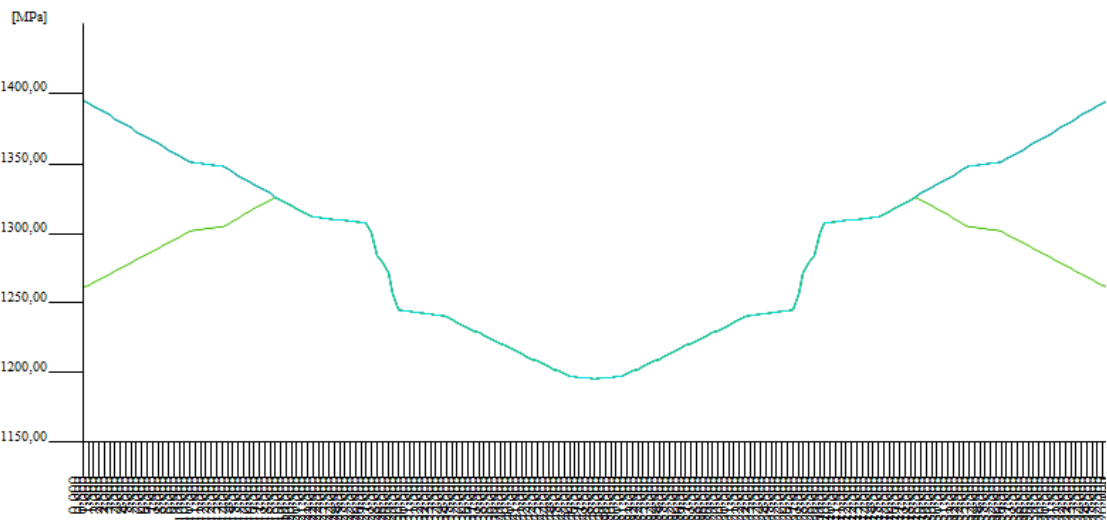


Obrázek 122. M předpětí SCIA



Obrázek 123. N předpětí SCIA

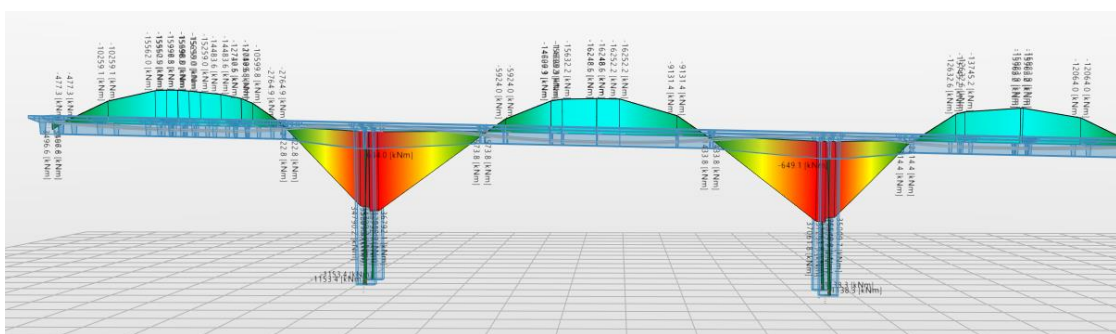
- Ztráty předpětí



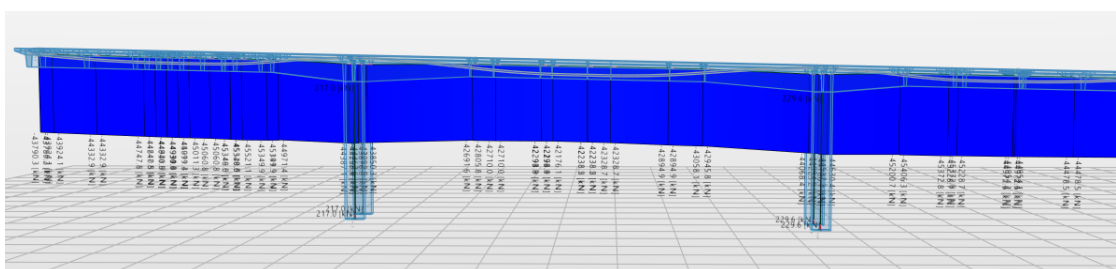
Obrázek 124 Export ztrát předpětí SCIA

Ztráty předpětí byly znázorněny v Mpa. Modrá čára grafu značila ztráty třením a zelená čára značí ztrátu pokluzem. Součinitel tření byl uvažován 0,25 a pokluz byl na začátku i na konci 6 mm. Počáteční napětí bylo 1395 MPa. Skoky viditelné v grafu jsou především způsobeny tuhým připojením pilířů.

4.6.3.4 Výsledky předpětí Allplan Bridge

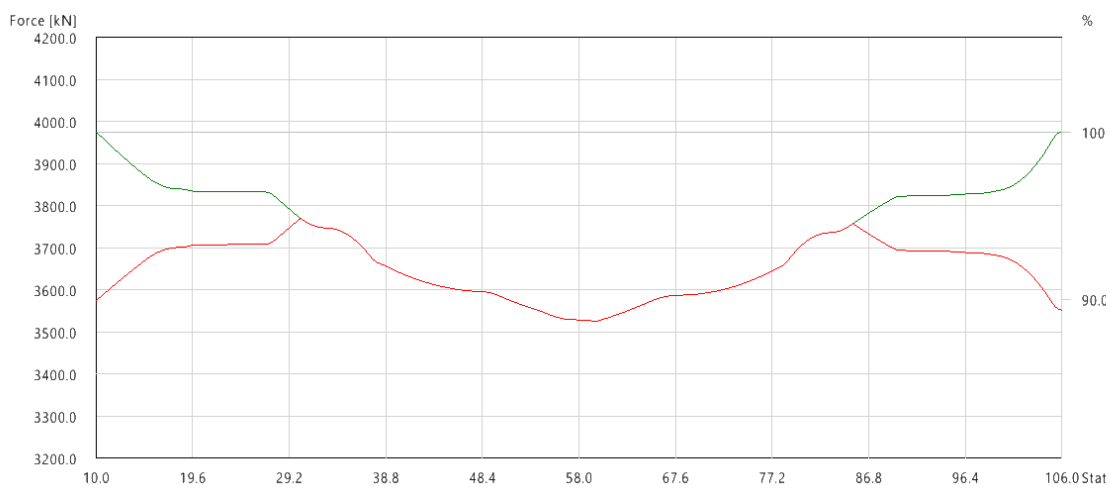


Obrázek 125. M předpětí Allplan



Obrázek 126. N předpětí Allplan

- Ztráty předpětí



Obrázek 127 Export ztrát předpětí Allplan

V případě Allplanu byly oba součinitele uvažovány se stejnými hodnotami jako ve SCIA Engineer. Rozdíl v zobrazení je, že zde byly zobrazeny ztráty pomocí předpínací síly, která na počátku představuje hodnotu 4198 kN. Při podělení plochou jednoho kabelu 2,850 m² odpovídá počáteční napětí stejné hodnotě jako ve SCIA Engineer. $\sigma_{p,m,0} = 3975,75/2,85 = 1395$ MPa. $\sigma_{p,m,15} = 3540/2,85 = 1242,11$ MPa.

4.6.3.5 Porovnání výsledků předpětí

Vstupní údaje

General		
Name	Y1860S7-15,7	
Description		
Group	Prestressing steel	
Foreign name		
Basic material values		
E	195 000	[N/mm ²]
G	84 783	[N/mm ²]
v	0.1	
α-T	0.000010	[1/°C]
γ	77.0	[kN/m ²]
f _{pk}	1860	[N/mm ²]
σ _{pm0}	1395	[N/mm ²]
Relaxation class	2	

Materiál	Y1860S7-15,7
Počet prvků v kabelu (ns)	19
Počet kabelů ve skupině (ng)	12
Plocha [mm ²]	34200
Průměr kanálku [mm]	100,00
Zatěžovací stav	Předpětí
Předpínání	
Typ napínání	Type 3
Předpínání z	Oba konce, ko
Součinitel tření v oblouku [-]	0,3
Nezamýšlená změna směru kabelu na jednotku dé...	0,003
Pokluz - začátek [mm]	6,00
Pokluz - konec [mm]	6,00
Napětí v průběhu podržení napětí - začátek [MPa]	1395,00
Napětí v průběhu podržení napětí - konec [MPa]	1395,00
Trvání podržení napětí [s]	300,00
Počáteční napětí - začátek [MPa]	1395,00
Počáteční napětí - konec [MPa]	1395,00

Action	Side	From Group			Tendon	
		Force Value [kN]	Factor	Length [mm]	Force Value [kN]	Factor
Stress	Both		1.000		3975.75	1.000
Wedge Slip	Both			6.00		6.00
Release	Both		1.000		3975.75	1.000

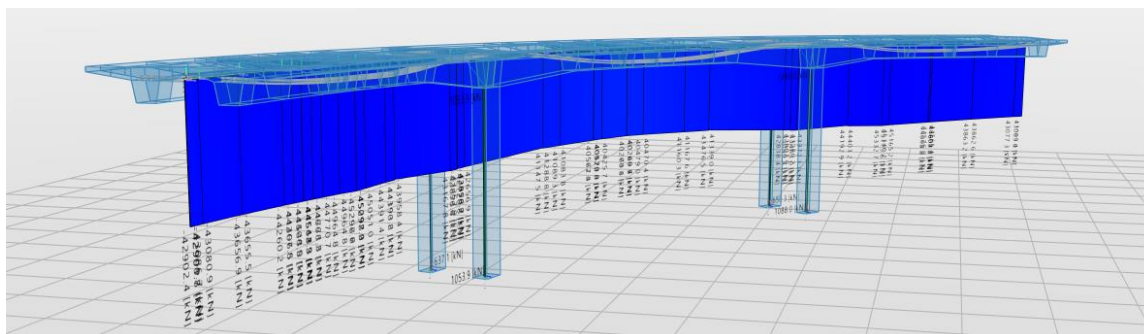
Obrázek 128. Návrhové prvky předpětí

Vnitřní síly

V tabulce byly sepsány výsledky předpětí z jednotlivých výpočetních modelů. Rozdílnost byla nejspíš zapříčiněna rozdílným zadáváním geometrie a rozdílným výpočetním postupem jednotlivých programů.

Tabulka 15 Vnitřní síly předpětí

Řez	SCIA Engineer		Allplan Bridge Přímá		Allplan Bridge Oblouk	
	M _P [MNm]	N _P [MN]	M _P [MNm]	N _P [MN]	M _P [MNm]	N _P [MN]
4	-16,361	-44,602	-16,248	-44,936	-16,036	-44,563
10	42,432	-43,653	36,792	-44,455	-34,86	-43,167
15	-16,000	-41,200	-15,896	-42,328	-15,257	-40,269



Obrázek 129. Znáornění předpětí v oblouku, Allplan Bridge, vnitřní síly Nx

4.7 Posouzení konstrukce

4.7.1 MSP – Omezení napětí

Tlakové napětí v betonu bylo omezeno, aby zabránilo vzniku podélných trhlin, rozvoji mikrotrhlin a nadměrnému dotvarování. Na charakteristickou kombinaci zatížení bylo napětí omezeno na $0,6 \cdot f_{ck}$. Při kvazistálé kombinaci bylo omezeno napětí na $0,45 \cdot f_{ck}$, aby mohlo být předpokládáno lineární dotvarování.

4.7.1.1 Vstupní údaje

Na konci životnosti limitní hodnoty napětí odpovídají hodnotám:

- Charakteristická kombinace: $0,6 \cdot f_{ck} = 0,6 \cdot 35 = \underline{21,0 \text{ MPa}}$ / $f_{ctm} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3} = \underline{2,28 \text{ MPa}}$
- Kvazistálá kombinace: $0,45 \cdot f_{ck} = 0,45 \cdot 35 = 15,75 \text{ MPa}$ / $f_{ctm} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3} = \underline{1,89 \text{ MPa}}$

Napětí bylo posuzováno podle následujícího vztahu:

$$\sigma_{c,i,0}^{h;d} = N_{p,0} / A_c \text{ "+" } M_{max} / W_h \text{ "+" } M_{p0} / W_h$$

Čas vnesení předpětí byl uvažován v čase 7 dní, z toho byly odvozené nově uvažované hodnoty: $f_{ck}(7) = f_{cm}(7) - 8,0 = 35,205 - 8,0 = 27,205 \text{ MPa}$ viz. materiály str. 31.

- Kvazistálá kombinace: $0,45 \cdot f_{ck}(7) = 12,242 \text{ MPa}$ / $f_{ctm} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3} = \underline{1,59 \text{ MPa}}$
- Charakteristická kombinace: $0,6 \cdot f_{ck}(7) = 0,6 \cdot 27,205 = 16,323 \text{ MPa}$

4.7.1.2 Výpočet napětí

Výpočet průřezových charakteristik proběhlo v programu Autocad 2019 pomocí „hmotv“. Krátkodobé ztráty předpětí byly odhadnuty v čase vnesení na 5 % a na konci životnosti na 15 %. Dlouhodobé ztráty byly zohledněny ve výpočetních programech.

Průřez	A	I _y	z _T	h	W ^h = I _y / (z _T - h)	W ^d = I _y / z _T
V poli	6,92020	1,29000	1,022	1,57	-2,3540	1,2622
Nad podporou	8,41100	3,59000	1,459	2,2	-4,8448	2,4606

Tabulka 16 Účinky předpětí

Řez	Počáteční účinky		Vnesení předpětí			Konec životnosti		
	M _P [MNm]	N _P [MN]	ΔP [%]	M _{P,0} [MNm]	N _{P,0} [MN]	ΔP [%]	M _{P,kž} [MNm]	N _{P,kž} [MN]
4	-16,361	-44,602	5,00	-15,543	-42,372	15,00	-13,907	-37,912
10	42,432	-43,653	5,00	40,310	-41,470	15,00	36,067	-37,105
15	-16,000	-41,200	5,00	-15,200	-39,140	15,00	-13,600	-35,020

Tabulka 17 MSP omezení napětí

Zatížení/ kombinace	Čas	M	Vlákna	Napětí [MPa] v řezu					
				4			10		
				σ	σ_{lim}	OK ?	σ	σ_{lim}	OK ?
Kvazistálá	t0 - vnesení	max	h	-8,210	-12,2	ANO	-7,406	-12,2	ANO
			d	-10,015	-12,2	ANO	-0,057	-12,2	ANO
	předpětí	min	h	-9,270	-12,2	ANO	-6,076	-12,2	ANO
			d	-11,992	-12,2	ANO	-2,675	-12,2	ANO
	kŽ	max	h	-6,870	-15,8	ANO	-6,011	-15,8	ANO
			d	-8,075	-15,8	ANO	-1,262	-15,8	ANO
		min	h	-7,930	-15,8	ANO	-4,681	-15,8	ANO
			d	-10,051	-15,8	ANO	-3,880	-15,8	ANO
Charakteristická	t0 vnesení	max	h	-4,716	-16,3	ANO	-9,473	-16,3	ANO
			d	-3,498	-16,3	ANO	-2,675	-16,3	ANO
	předpětí	min	h	-10,277	-16,3	ANO	-5,191	-16,3	ANO
			d	-13,870	-16,3	ANO	-4,418	-16,3	ANO
	kŽ	max	h	-3,093	-21	ANO	-6,634	-21	ANO
			d	-1,029	-21	ANO	-0,035	-21	ANO
		min	h	-8,937	-21	ANO	-1,668	-21	ANO
			d	-11,929	-21	ANO	-9,813	-21	ANO
Zatížení/ kombinace	Čas	M	Vlákna	Napětí [MPa] v řezu					
				15					
				Σ	σ_{lim}	OK ?			
Kvazistálá	t0 - vnesení	max	h	-5,101	-12,2	ANO			
			d	-6,690	-12,2	ANO			
	předpětí	min	h	-5,656	-12,2	ANO			
			d	-9,224	-12,2	ANO			
	kŽ	max	h	-5,186	-15,8	ANO			
			d	-4,827	-15,8	ANO			
min		h	-3,827	-15,8	ANO				
		d	-7,361	-15,8	ANO				
Charakteristická	t0 vnesení	max	h	-8,414	-16,3	ANO			
			d	-0,513	-16,3	ANO			
	předpětí	min	h	-2,036	-16,3	ANO			
			d	-12,407	-16,3	ANO			
	kŽ	max	h	-9,219	-21	ANO			
			d	2,695	-21	ANO			
min		h	-3,052	-21	ANO				
		d	-8,807	-21	ANO				

< 3,2

Příklad výpočtu (čas vnesení předpětí kvazistálá kombinace Mmax):

- Mmax – kvazistálá kombinace

$$\sigma_{c,4^h} = \frac{-42,372}{6,92020} + \frac{10,630}{2,35401} + \frac{-15,543}{2,354015} = -8,210 \text{ MPa OK}$$

$$\sigma_{c,4^d} = \frac{-42,3719}{6,9202} + \frac{10,630}{1,26223} + \frac{-15,543}{1,262231} = -10,015 \text{ MPa OK}$$

$$\sigma_{c,10^h} = \frac{-41,470}{8,41100} + \frac{-28,318}{-4,8448} + \frac{40,310}{-4,8448} = -7,406 \text{ MPa OK}$$

$$\sigma_{c,10^d} = \frac{-41,47035}{8,411} + \frac{-28,3184}{2,46059} + \frac{40,3104}{2,460589} = -0,057 \text{ MPa OK}$$

$$\sigma_{c,15^h} = \frac{-39,140}{6,92020} + \frac{13,895}{-2,35401} + \frac{-15,200}{-2,35401} = -5,101 \text{ MPa OK}$$

$$\sigma_{c,15^d} = \frac{-39,14}{6,9202} + \frac{13,89473}{1,26223} + \frac{-15,200}{1,262231} = -6,690 \text{ MPa OK}$$

Zbytek výpočtu napětí je přiložen v příloze č.2.

4.7.1.3 Závěr

Tlakové napětí v betonu bylo omezeno na požadované hodnoty v obou časech i pro oba zatěžovací stavy. Tím pádem u kvazistálé kombinace můžeme uvažovat lineární dotvarování. V červeně označených buňkách v charakteristické kombinaci vznikl na konci životnosti při dolních vláknech tah v betonu. Velikost tahového napětí nepřesahuje tahovou pevnost betonu na konci životnosti $\sigma_{ct} \leq 1,0 * f_{ctm} = 1 * 3,2 = 3,2 \text{ MPa}$.

Současně v kvazistálé kombinaci byla červeně označena buňka, která se svojí hodnotou blížila k překročení omezení napětí.

► $f_{ctm}(7)$; f_{ctm} viz. Materiály str. 31

4.7.2 MSÚ – Posouzení mostovky

Při výpočtu byl uvažován zjednodušený postup výpočtu MSÚ předpjatého železobetonového průřezu, kde bylo uvažováno plné plastické chování betonu a výztuž na mezi pevnosti. Průřez byl počítán bez uvážení tlakových trhlin. V průřezu byla uvažována pouze předpínací výztuž, pokud nedošlo k překročení podmínky rovnováhy, poté bylo uvažována i betonářská výztuž.

4.7.2.1 Předpoklady

- Rovinné průřezy zůstávají rovinné
- Poměrné přetvoření předpínací i betonářské výztuže v tahu a tlaku je stejné jako poměrné přetvoření působícího betonu
- Tahová pevnost betonu se zanedbává
- Napětí v prvcích průřezu jsou odvozena z pracovních diagramů

4.7.2.2 Zjednodušení průřezu v poli

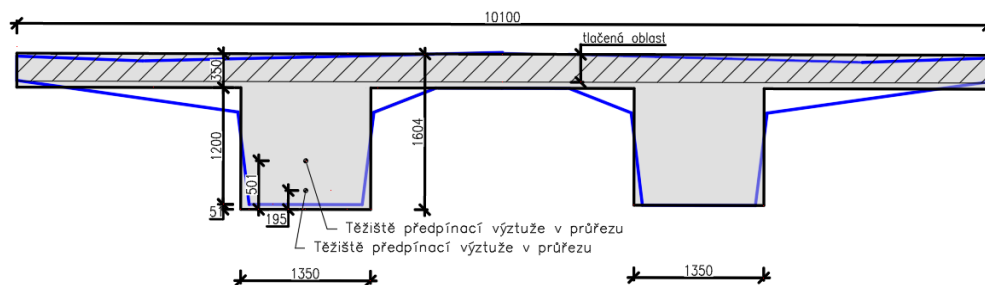
Bylo uvažováno plné zplastizování průřezu. Z hlediska posouzení na mezní stav únosnosti na ohyb, musí průřez vyhovět na podmínku rovnováhy kde platí:

$M_{Rd} \geq M_{Ed}$, kde: M_{Rd} - je návrhová hodnota momentu únosnosti daného průřezu.

M_{Ed} - je návrhová hodnota účinků zatížení působících na daný průřez.

Při posouzení MSÚ byly momenty posuzovány na návrhový moment M_{ed} , který odpovídá největší hodnotě vnitřních sil z kombinací 6.10a, 6.10b.

$$M_{ed_{15}} = M_{15,6.10b} = 39,0324 \text{ MN} \quad M_{ed_4} = M_{4,6.10a} = 34,94034 \text{ MN}$$



Obrázek 130. Průřez v pol zjednodušený model

- **Zjednodušení průřezu v poli**

$$b = 10,1 \text{ m}$$

$$\text{tloušťka horní desky } h_d = 0,35 \text{ m}$$

$$\text{šířka žebra} = 1,35 \text{ m} \qquad \Sigma h_{\text{,nov}} = 1,60378$$

$$\text{výška žebra} = 1,25378 \text{ m}$$

Kontrola plochy = $2 \cdot 1,35 \cdot 1,25378 + 0,35 \cdot 10,1 = 6,9202$ ► Odpovídá ploše ze vstupních údajů.

4.7.2.3 Posouzení řezu 15

- **Síla v předpínací výztuži**

$$A_p = 0,0342 \text{ m}^2$$

$$f_{pd} = 1423,3 \text{ MPa}$$

$$f_{cd} = 21 \text{ MPa}$$

$$N_{pd} = 1423,3 \cdot 0,0342 = 48,677$$

$$\text{Rovnováha sil: } N_{cd} = N_{pd}$$

$$x = 0,28688 \quad b \cdot x_u \cdot \mu \cdot f_{cd} = N_{pd}$$

$$x_u = 0,8 \cdot x = 0,2295$$

- **Podmínka rovnováhy**

$$M_{Rd} > M_{Ed}$$

$$e = 0,195$$

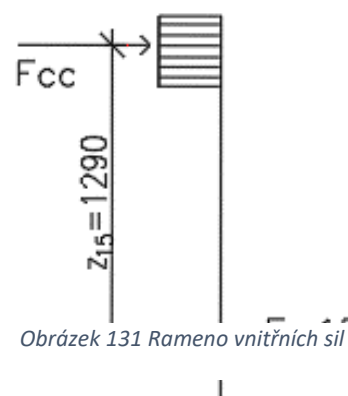
$$z = 1,603778 - 0,195 - 0,2295/2 = 1,294028$$

$$M_{RD} = 1,294028 \cdot 48,677 = 62,98938 \text{ MNm}$$

$$M_{ED,15} = M_{15} + M_{p,zv} = 39,03249 + 13,60 = 52,6325 \text{ MNm}$$

$$\begin{array}{ccc} M_{ed,15} & & M_{rd} \\ 52,6325 & < & 62,98938 \end{array}$$

...VYHOVUJE



4.7.2.4 Posouzení řezu 4

- **Síla v předpínací výztuži**

$$N_{pd} = 1423,3 * 0,0342 = 48,67 \text{ MN}$$

- **Síla v betonářské výztuži**

$N_{sd} = A_s * f_{yd}$	Ocel: B500B
	$f_{yd} = 434,7826$
$N_{sd} = A_s * f_{yd}$	$d = 12$
	$a' = 250$
	$A_{s1} = 235,5$
	$n = 80,8$
	$A_s = 19028,4$

$$N_{sd} = 8,273217 \text{ MN}$$

- **Výpočet polohy neutrální osy:**

$$A_{cc, nut} = N_{steel} / f_{pd} = 2,711915 \text{ m}^2 > \text{tlak jen v desce}$$

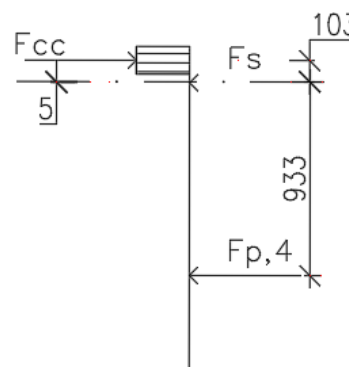
$$A_{deska} = 7,07 \text{ m}^2$$

$$x_u = 2,711915 / (10,1) = 0,134253 \text{ m}$$

$$x = 0,134253 / 0,8 = 0,167817 \text{ m}$$

$$N_{cd} = 0,134253 * 10,1 * 21 = 56,95021 \text{ MN}$$

$h_1 = 0,007183$	$M_{sd} = 0,05943$
$h_2 = 0,934961$	$M_{pd} = 45,5111$
$h_3 = 0,10069$	$M_{cd} = 5,734312$



Obrázek 132. M4 rovnováha

- **Výpočet momentu únosnosti:**

$$M_{Rd} = M_{sd} + M_{pd} + M_{cd} = 51,30484 \text{ MNm}$$

$$M_{Ed} = 34,96034 + 13,907 = 48,84719 \text{ MNm}$$

M_{Ed}	<	M_{Rd}
48,84719		51,30484

...VYHOVUJE

4.7.2.5 Zjednodušení průřezu nad podporou

Bylo uvažováno plné zplastizování průřezu. Z hlediska posouzení na mezní stav únosnosti na ohyb, musí průřez vyhovět na podmínku rovnováhy kde platí:

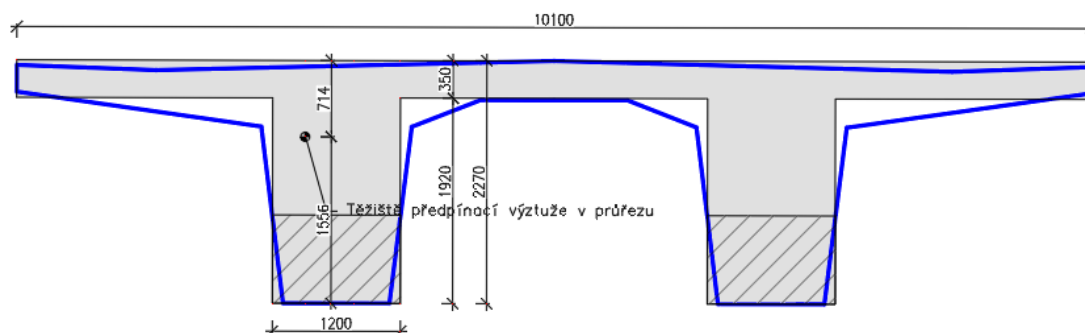
$M_{Rd} \geq M_{Ed}$, kde: M_{Rd} - je návrhová hodnota momentu únosnosti daného průřezu.

M_{Ed} - je návrhová hodnota účinků zatížení působících na daný průřez.

Hodnoty návrhových momentů:

$$M_{ed_{15}} = M_{15,6.10b} + M_{ed,vz} = 64,5349 + 36,0672 \text{ MNm}$$

- Zjednodušení průřezu v poli



Obrázek 133. Průřez nad podporou

$b = 10,1 \text{ m}$

tloušťka horní desky $h_d = 0,35 \text{ m}$

šířka žebra = $1,20 \text{ m}$

$$\Sigma h_{,nov} = 1,60378$$

výška žebra = $2,04444444 \text{ m}$

Kontrola plochy = $2 * 1,20 * 2,044 + 0,35 * 10,1 = 8,4416$ ► Odpovídá ploše ze vstupních údajů.

4.7.2.6 Posouzení průřezu 10

- **Síla v předpínací výztuži**

$$N_{pd} = 1423,3 * 0,0342 = 48,67 \text{ MN}$$

- **Síla v betonářské výztuži**

$$N_{sd} = A_s * f_{yd}$$

Ocel: B500B

$f_{yd} = 434,7826$

$$N_{sd} = A_s * f_{yd}$$

$d = 25$

$a' = 150$

$A_{s1} = 490,625$

$n = 134,667$

$A_s = 66070,83$

$$N_{sd} = 28,72645 \text{ MN}$$

- **Výpočet polohy neutrální osy:**

$$A_{cc,nut} = N_{steel} / f_{pd} = 3,685878 \text{ m}^2 > \text{tlak jen v žebrech}$$

$$A_{žeb} = 4,906656 \text{ m}^2$$

$$x_u = 4,906656 / (1,2 * 2) = 1,535783 \text{ m}$$

$$x = 1,535783 / 0,8 = 1,919728 \text{ m}$$

$$N_{cd} = 1,535783 * 1,2 * 2 * 21 = 77,4035 \text{ MN}$$

$$h_1 = 0,299712$$

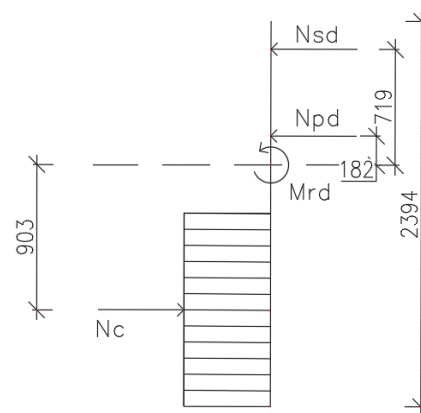
$$M_{sd} = 8,609652$$

$$h_2 = 0,219712$$

$$M_{pd} = 10,6949$$

$$h_3 = 1,151837$$

$$M_{cd} = 89,15615$$



Obrázek 134. Podmínka rovnováhy M10

- **Výpočet momentu únosnosti:**

$$M_{Rd} = M_{sd} + M_{pd} + M_{cd} = 108,4607 \text{ MNm}$$

$$M_{Ed} = 36,0672 + 64,5349 = 100,6021 \text{ MNm}$$

$$\begin{matrix} M_{Ed} & & M_{Rd} \\ 100,6021 & < & 108,4607 \end{matrix}$$

...VYHOVUJE

4.7.3 MSÚ - Posouzení založení

4.7.3.1 Posouzení mezního stavu únosnosti

Byla posuzována hodnota únosnosti, při jejíž překročení by došlo k porušení základové půdy, tím pádem k vytvoření smykové plochy a propadnutí základu.

Výpočtové parametry zemin:

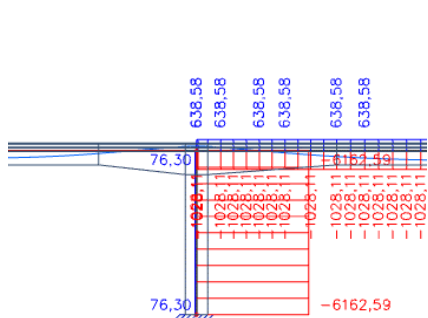
Výpočtové parametry zemin byly zvoleny podle vlastností podloží v oblasti obce Sánsy podle geologického průřezu z blízkého mostu Kanín. Podle vrtu 8 provedené v okolí bylo zjištěno šterky jílové G5 až do hloubky 2 m pod zem. Podle těchto dat byly určeny návrhové parametry:

$$\begin{aligned}\gamma_g &= 19,5 \text{ kN/m}^3 \\ c_d &= 6,4 \text{ kPa} \\ \varphi_d &= 24,79^\circ \\ \gamma_c &= 25 \text{ kN/m}^3\end{aligned}$$

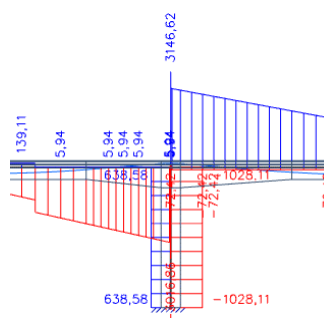
γ_g – zeminy, γ_c – betonu

Reakce z výpočetního programu:

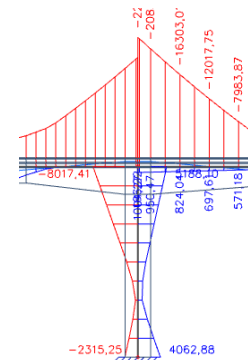
Reakce byly vyexportovány z programu SCIA Enginner pro kombinaci zatížení LM3+LM1, neboli GR5-2.



Obrázek 135. N_x



Obrázek 136. V_z



Obrázek 137. M_y

Reakce:

$$V_d = 6162,59 \text{ kN}$$

$$H_d = 1028,11 \text{ kN}$$

$$M_d = 4062,88 \text{ kNm}$$

Rozměry základu:

$$B = 6 \text{ m}$$

$$L = 7 \text{ m}$$

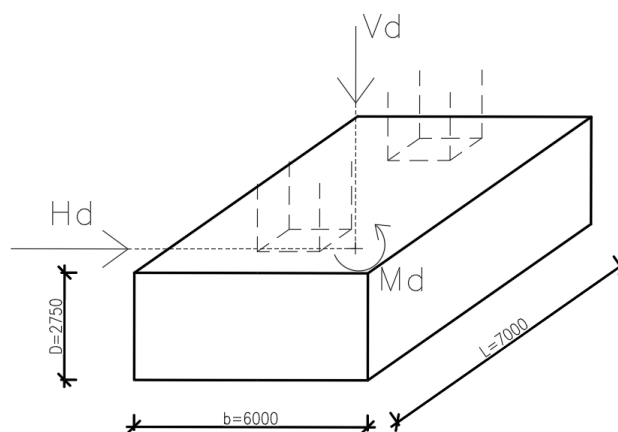
$$D = 2,75 \text{ m}$$

$$m = \frac{2 + \left(\frac{b_{ef}}{l_{ef}}\right)}{1 + \left(\frac{b_{ef}}{l_{ef}}\right)} = 1,593$$

- Efektivní plocha:

$$B' = 4,807 \text{ m}$$

$$A' = 33,65 \text{ m}$$



Obrázek 138. Skica základu

- Vlastní tíha

$$G_p = 6 * 7 * 2,75 * 25 = 2888 \text{ kN}$$

$$G_z = 6 * 7 * 18,5 = 777 \text{ kN}$$

$$e = 0,596 \text{ m}$$

Podmínka stability základové konstrukce

Výpočet byl proveden podle 2. geotechnické kategorie.

$$\sigma_{de} \leq R_d,$$

kde R_d je výpočtová hodnota základové půdy v kPa:

$$R_d = c_d * N_c * s_c * d_c * i_c + \gamma_1 * d * N_d * s_d * d_d * i_d + \gamma_2 * \frac{b}{2} * N_b * s_b * d_b * i_b$$

a σ_{de} je napětí v základové spáře:

$$\Sigma = \frac{Vd + G_p + G_z}{B' + L} = \frac{6163 + 1575 + 666}{5,981 + 6} = 327,14 \text{ kPa}$$

Součinitelé únosnosti:

$$N_c = (N_d - 1) * \cotg(\varphi_d) = 20,4182 \quad (\phi_d = \varphi_d)$$

$$N_d = \text{tg}^2\left(45 + \frac{\phi_d}{2}\right) e^{\pi \text{tg}(\varphi_d)} = 10,4307$$

$$N_b = 1,5 * (N_d - 1) \text{tg}(\varphi_d) = 8,71175$$

Součinitel tvaru základu:

$$S_c = 1 + 0,2 (b_{ef}/L_{ef}) = 1,3664$$

$$S_d = 1 + (b_{ef}/L_{ef}) * \sin(\varphi) = 1,31126$$

$$S_b = 1 - 0,3 (b_{ef}/L_{ef}) = 0,763$$

Součinitel vlivu hloubky založení:

$$d_c = 1 + 0,1 * \sqrt{\frac{d}{b}} = 1,021007$$

$$d_d = 1 + 0,1 * \sqrt{\frac{d}{b}} * \sin^2(\varphi_d) = 0,996122$$

$$d_b = 1$$

Součinitel vlivu šikmosti zatížení:

$$i_c = i_b - \frac{1 - i_b}{N \cot \phi} = 0,74183 \quad \delta \text{ značí odklon sil od centrického zatížení}$$

$$i_b = \left[1 - \frac{H}{V + A_{ef} * C_{ef} * \cot \phi_{ef}} \right]^m = 0,64638$$

$$i_d = \left[1 - \frac{H}{V + A_{ef} * C_{ef} * \cot \phi_{ef}} \right]^{m+1} = 0,76658$$

Posouzení únosnosti:

Svislá únosnost:

$$R_d/A' = 895,507 > 327,140 \text{ [kPa]}$$

...VYHOVUJE

Vodorovná únosnost:

$$H_d = 1028,11 < 1225,890 \text{ [kN]}$$

...VYHOVUJE

5 ZÁVĚR

Práce se zabývala návrhem konstrukce s využitím BIM nástrojů a porovnávala výpočetní varianty. Rešerše byla věnována otázce zavádění BIM, možnostmi modelování a jeho využití ve stavebním procesu. V dalších krocích už bylo provedeno porovnání variant v komentovaném statickém výpočtu.

Prvním krokem byla práce se samotným modelem, zadání zatížení a výsledky vnitřních sil. Cílem bylo vyzkoušet maximální funkčnost BIM softwaru, což mělo být využito při definování statického modelu. Bohužel definování ložisek na opěry přímo v geometrickém modelu se neobešlo bez pár komplikací, hlavně ve starších verzích. Pro zajištění funkčnosti výpočetního programu, bylo nuceno provedení zjednodušeného výpočetního modelu, než by bylo možné vytvořit ve SCIA Engineer. Z tohoto důvodu byl statický model určen pouze funkcí rigid connections ve všech uzlech a byly uvolněny pouze některé vazby pro vytvoření správného statického modelu. Poté byly spočteny vnitřní síly a porovnány výsledky z obou výpočetních programů. V závěru proběhl kontrolní ruční výpočet a bylo dosaženo dobré shody.

Po získání vnitřních sil byly provedeny kombinace v excelu a poté návrh předpětí v obou výpočetních programech. Poté porovnání výsledků předpětí, které vyšlo velmi podobně. Při kompletním posouzení v jednom výpočetním modelu by bylo dosaženo pravděpodobně velmi podobného návrhu mostní konstrukce. Na závěr byly prvky konstrukce posouzeny na MSÚ i MSP.

Hlavním účelem BIM softwarů má být výpomoc s modelováním a propojení konstrukčního modelu s výkresy, fázemi výstavby a výpočetním modelem. Během bakalářské práce byly vyzkoušeny tři verze výpočetního programu včetně aktuální verze, která vyšla na konci března. S každou aktualizací docházelo k pokroku jak v přidávaných funkcích, tak v minimalizaci chyb a chybových hlášení. Dalo by se říct, že se vývoj BIM softwarů ubírá správným směrem.

ZDROJE

1. **Mapy.cz.** *Mapy.cz.* [Online] Praha: Seznam.cz. [Citace: 30. Února 2020.] <https://mapy.cz/zakladni?x=15.2377615&y=50.1291230&z=16&source=pubt&id=15212774>.
2. **Koncepce zavádění metody BIM v ČR schválena vládou.** [Online] Praha: 2017. [Citace: 8. březen 2020.] <https://www.mpo.cz/cz/stavebnictvi-a-suroviny/bim/koncepce-zavadeni-metody-bim-v-cr-schvalena-vladou--232136/>.
3. **Bimfo.cz.** *Co je BIM - informačné modely budov.* [Online] Kunratice: CAD Studio s.r.o., [Citace: 4. Březen 2020.] www.bimfo.cz/Co-je.BIM.apsx.
4. **Ing.ŠNAJDR, Roman.** *cklop.cz. BIM.* [Online] Praha: LOP - česká komora lehkých obkladových plášťů , 03. leden 2018. [Citace: 16. Březen 2020.] <https://www.cklop.cz/clanek/144-cz-bim>.
5. **BIM koncepce 2020.** *koncepcebim.cz.* [Online] Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2020. [Citace: 10. Březen 2020.] <https://www.koncepcebim.cz/294-5-4-obsah-dokumentace-bim>.
6. **Technické předpisy a metodiky .** *sfdi.cz.* [Online] Praha: 2019. [Citace: 11. Březen 2020.] <https://www.sfdi.cz/bim-informacni-modelovani-staveb/technicke-predpisy-a-metodiky-expertni-vykonny-tym/>.
7. **Metodika BIM protokolu.** *sfdi.cz/soubroy.* [Online] Praha: 2019. [Citace: 11. Březen 2020.] https://www.sfdi.cz/soubory/bim/2019_09_bim_protokol.pdf.
8. **BIM v dopravním stavitelství.** *zpravy.ckait.cz.* [Online] Praha: Skanska a.s., 9. Zář 2017. [Citace: 12. Březen 2020.] <http://zpravy.ckait.cz/vydani/2017-04/bim-v-dopravnim-stavitelstvi/>.
9. **3D model nebo 3D model BIM?** *BIM4all.* [Online] Rijssen: 2020. [Citace: 14. Březen 2020.] <https://www.bim4all.com/blog/3d-model-of-3d-bim-model>.
10. **Allplan bridge.** *Allplan products.* [Online] Praha: 2020. [Citace: 16. Březen 2020.] https://www.allplan.com/fileadmin/user_upload/countries/czech-republic/pdfs/products/Brochure_Allplan_Bridge_II_CZ.pdf.

11. MICHALAGE, Alexendr. *villagebim.cz. BIM village*. [Online] Náchod: Autodesk BIM 360, LIEN s.r.o 2016. listopad 2016. [Citace: 17. březen 2020.] <https://villagebim.typepad.com/villagebim/2016/11/bim-360-team-impression.html>.
12. Společné datové prostředí. *sfdi BIM metodiky/soubory*. [Online] Praha: 2019. [Citace: 13. Březen 2020.] https://www.sfdi.cz/soubory/bim/metodiky/cde_v19_grafika_pdf_n.pdf.
13. clipdealer.com. *ClipDealer*. [Online] Mnichov: ClipDelar/ Royalty Free Media. [Citace: 23. Březen 2020.] <https://en.clipdealer.com/photo/media/A:116819455>.
14. BIMx. *Cegra*. [Online] Praha: Centrum podpory počítačové grafiky, 2020. [Citace: 16. Březen 2020.] <http://www.cegra.cz/produkty/software/bimx/funkce/>.
15. Co je a co není IFC. *bimfo*. [Online] Praha: CAD Studio s.r.o., 2020. [Citace: 16. Březen 2020.] <https://www.bimfo.cz/Aktuality/Myty-o-BIM-Co-je-a-co-neni-IFC.aspx>.
16. Autodesk.com. *Civil 3D*. [Online] San Rafael: Autodesk. [Citace: 28. Březen 2020.] <https://www.autodesk.com/products/civil-3d/overview?plc=CIV3D&term=1-YEAR&support=ADVANCED&quantity=1>.
17. Co je Civil 3D. *CAD studio*. [Online] San Rafael: Autodesk, 2017. [Citace: 16. Březen 2020.] <https://www.cadstudio.cz/civil3d>.
18. Allplan.com. *NEW ALLPLAN FEATURES*. [Online] Praha: Allplan, 2020. [Citace: 28. Březen 2020.] https://www.allplan.com/uk_en/products/allplan-bridge-2020-features/.
19. Ing. ŠAFÁŘ, Roman, Ph.D. *Betonové mosty 2 - Cvičení/ Návrh předpjatého mostu podle Eurokódů*. Praha : Česká technika - nakladatelství ČVUT, výroba, Zikova 4, 166 36 Praha 6, 2015.
20. docplayer.cz. *docplayer*. [Online] Praha: 2020. [Citace: 24. Březen 2020.] <https://docplayer.cz/5744899-Vii-zatizeni-mostu-silnicni-dopravou.html>.

21. -. hilti.cz. *hilti BIM služby*. [Online] HILTI. [Citace: 20. Březen 2020.]
<https://www.hilti.cz/content/hilti/EE/CZ/cs/engineering/engineering-services/bim-services.html>.

Seznam obrázků

Obrázek 1 Řešení směrového vedení	14
Obrázek 2 Podélná profil var. A, B	15
Obrázek 3 Podélný profil var. C	15
Obrázek 4 Model povrchu	15
Obrázek 5 Podélný řez var. A	16
Obrázek 6 Příčný řez var. A	16
Obrázek 7 Podélný řez var. B	17
Obrázek 8 Příčný řez var. B	17
Obrázek 9 Příčný řez var. C	18
Obrázek 10 Podélný řez var. C	19
Obrázek 11 Půdorys var. C	19
Obrázek 12 Procesy využití BIM (3)	21
Obrázek 13. Kombinace užívání dat (4)	23
Obrázek 14. Propojení BIM s totální stanicí (20)	25
Obrázek 15. BIM workflow řešerše (9)	26
Obrázek 16. Vliv digitalizace (10)	27
Obrázek 17. BIM výkres-model. (12)	29
Obrázek 18. Civil 3D model + výstupy (15)	31
Obrázek 19. Civil funkce Dynamo (16)	32
Obrázek 20. Civil BIM tech tools (16)	32
Obrázek 21. Směrové řešení (17)	33
Obrázek 22. Definovaný průřez (17)	33
Obrázek 23. Parametrické modelování (17)	33
Obrázek 24. Návrh a definování předpětí (17)	34
Obrázek 25. Přidání ostatního zatížení (17)	34

Obrázek 26. Definování statického modelu (17)	34
Obrázek 27. Závěr (17).....	34
Obrázek 28. Překrývání (17)	35
Obrázek 29. Výkresy (9)	35
Obrázek 30. Řez v poli Allplan.....	38
Obrázek 31. Řez v poli SCIA.....	38
Obrázek 32. Nad podporou Allplan	38
Obrázek 33. Nad podporou SCIA	38
Obrázek 34. Allplan náběhy	39
Obrázek 35. Pilíře - Allplan bridge	39
Obrázek 36. Materiály C35/45.....	43
Obrázek 37. Materiály B 500B	43
Obrázek 38. Materiály C30/37.....	43
Obrázek 39. Materiály Vozovka	43
Obrázek 40. Definice mostovka	43
Obrázek 41. Definice pilíř 1,3.....	43
<i>Obrázek 42. Import SCIA</i>	<i>44</i>
Obrázek 43. Model statického schématu viz. Scia engineer	44
Obrázek 44. Structural connections	45
Obrázek 45. 3D výpočetní model.....	45
Obrázek 46. Axis Allplan Bridge	46
Obrázek 47. Zjednodušená deformační metoda	46
Obrázek 48. Model zatížení 1.	49
Obrázek 49. Model zatížení LM2	50
Obrázek 50. Příčný řez	54
Obrázek 51. Zatížení SDL.....	55
Obrázek 52. Oteplení konstrukce	56
Obrázek 53. Zadání LM1 – Allplan	56
Obrázek 54. Vlastní tíha	58
Obrázek 55. My, Vlastní tíha.....	58
Obrázek 56. Vz, Vlastní tíha	58

Obrázek 57 Ostatní stálé zatížení	59
Obrázek 58 Ostatní stálé Scia Mmax	59
Obrázek 59 Ostatní stálé Scia Vmax	59
Obrázek 60. TS, M4 max	60
Obrázek 61. TS, M4 min	60
Obrázek 62. TS, M10 max	60
Obrázek 63. TS, M10 min	61
Obrázek 64. TS, M15 max	61
Obrázek 65. TS, M15 min	61
Obrázek 66. TS, V0	62
Obrázek 67. TS, V10, l	62
Obrázek 68. TS, V10, p	62
Obrázek 69. UDL, M4 max	63
Obrázek 70. UDL, M4 min	63
Obrázek 71. UDL, M10 max	63
Obrázek 72. UDL, M10 min	64
Obrázek 73. UDL, M15 max	64
Obrázek 74. UDL, M15 min	64
Obrázek 75. UDL, V0	65
Obrázek 76. UDL, V10, l	65
Obrázek 77. UDL, V10, p	65
Obrázek 78 LM1 SCIA obálka Mmax	66
Obrázek 79 LM1 SCIA obálka Vmax	66
Obrázek 80 LM4 SCIA obálka Mmax	66
Obrázek 81 LM4 SCIA obálka Vmax	66
Obrázek 82 LM3+LM1 obálka Mmax	67
Obrázek 83 LM3+LM1 obálka Mmax	67
Obrázek 84 LM3 obálka Mmax	67
Obrázek 85LM3 obálka Vmax	67
Obrázek 86 Zatížení chodníků Mmax.....	68
Obrázek 87 Zatížení chodníků Vmax.....	68

Obrázek 88 Brzdné síly M_{max}	68
Obrázek 89 Brzdné síly V_{max}	68
Obrázek 90 Zatížení pokles podpor Scia 1	69
Obrázek 91 Zatížení pokles podpor SCIA 2	69
Obrázek 92 Pokles podpor Scia obálka M_{max}	69
Obrázek 93 Pokles podpor Scia obálka V_{max}	69
Obrázek 94 Zatížení teplotou SCIA 1	70
Obrázek 95 Zatížení teplotou SCIA 2	70
Obrázek 96 Nerovnoměrné zatížení teplotou SCIA obálka M_{max}	70
Obrázek 97 Nerovnoměrné zatížení teplotou SCIA obálka V_{max}	70
Obrázek 98. Vlastní tíha Allplan M_{max}	72
Obrázek 99. Vlastní tíha Allplan V_{max}	72
Obrázek 100. Ostatní stálé zatížení Allplan M_{max}	72
Obrázek 101. Ostatní stálé zatížení Allplan V_{max}	72
Obrázek 102. Pokles podpor Allplan obálka M_{max}	73
Obrázek 103. Pokles podpor Allplan obálka V_{max}	73
Obrázek 104. Nerovnoměrné oteplení Allplan obálka M_{max}	73
Obrázek 105. Nerovnoměrné oteplení Allplan obálka V_{max}	73
Obrázek 106 LM1 TS Allplan obálka M_{max}	74
Obrázek 107 LM1 TS Allplan obálka V_{max}	74
Obrázek 108 LM1 UDL Allplan obálka M_{max}	74
Obrázek 109 LM1 UDL obálka V_{max}	74
Obrázek 110. Obrázek vykreslení SCIA od ostatního stálého bez náběhů	83
Obrázek 111. Momenty vykreslení v Autocad pomocí ZDM od ostatního stálého zatížení	83
Obrázek 112. Kvazistálé momenty	91
Obrázek 113. Schéma vedení Autocad 2019	91
Obrázek 114. Vedení SCIA.....	91
Obrázek 115. Vedení Allplan.....	91
Obrázek 116. Řez 15	92
Obrázek 117. Řez 4	92

Obrázek 118. Řez 10	93
Obrázek 119. Předpětí příčn. řez Allplan	93
Obrázek 120. Vedení kabelů SCIA Engineer.....	94
Obrázek 121. Vedení kabelů Allplan Bridge	94
Obrázek 122. M předpětí SCIA.....	95
Obrázek 123. N předpětí SCIA	95
Obrázek 124 Export ztát předpětí SCI.....	95
Obrázek 125. M předpětí Allplan.....	96
Obrázek 126. N předpětí Allplan.....	96
Obrázek 127 Export ztát předpětí Allplan	96
Obrázek 128. Návrhové prvky předpětí.....	97
Obrázek 129. Znázornění předpětí v oblouku, Allplan Bridge, vnitřní síly Nx	97
Obrázek 130. Průřez v pol zjednodušený model i	101
Obrázek 131 Rameno vnitřních sil	102
Obrázek 132. M4 rovnováha	103
Obrázek 133. Průřez nad podporou.....	104
Obrázek 134. Podmínka rovnováhy M10	105
Obrázek 135. Nx.....	106
Obrázek 136. Vz	106
Obrázek 137. My.....	106
Obrázek 138. Skica základu.....	107

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Regulační součinitelé.....	49
<i>Tabulka 2 Nápravové síly</i>	<i>50</i>
<i>Tabulka 3 Odstředivé síly</i>	<i>52</i>
<i>Tabulka 4. Rozhodující vnitřní síly.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabulka 5 Extrémy vnitřních sil od vlastní tíhy.....</i>	<i>78</i>
<i>Tabulka 6 Extrémy vnitřních sil od ostatního stálého zatížení.....</i>	<i>79</i>
<i>Tabulka 7 Extrémy vnitřních sil od poklesu podpor</i>	<i>79</i>
Tabulka 8 Extrémy vnitřních sil od nerovnoměrného oteplení.....	80
Tabulka 9 Extrémy vnitřních sil od zatížení LM1-TS	80
Tabulka 10 Extrémy vnitřních sil od zatížení LM1 - UDL.....	81
Tabulka 11 Extrémní reakce od zatížení vlastní tíhou	82
Tabulka 12 Ověření vnitřních sil ZDM.....	83
Tabulka 13 Výsledky MSÚ	87
Tabulka 14 Výsledky MSP	88
Tabulka 15 Vnitřní síly předpětí.....	97
Tabulka 16 Účinky předpětí	98
Tabulka 17 MSP omezení napětí	99

Přílohy

Příloha 1 – Půdorys nový stav M 1:200

Příloha 2 – Podélný řez M 1:200

Příloha 3 – Vzorový příčný řez M 1:50

Příloha 4 – Charakteristický řez C-C´ M 1:100