VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV BETONOVÝCH A ZDĚNÝCH KONSTRUKCÍ
INSTITUTE OF CONCRETE AND MASONRY STRUCTURES

OBLOUKOVÝ SILNIČNÍ MOST
HIGHWAY ARCH BRIDGE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE Bc. Lukáš Vavřička
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. JAN KOLÁČEK, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2022

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ

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

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Lukáš Vavřička
Název	Obloukový silniční most
Vedoucí práce	Ing. Jan Koláček, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2021
Datum odevzdání	14. 1. 2022

V Brně dne 31. 3. 2021

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

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

PODKLADY A LITERATURA

Podklady:
Situace, příčný a podélný řez, geotechnické poměry.
Základní normy:
ČSN 736201: Projektování mostních objektů.
ČSN EN 1990 včetně změny A1: Zásady navrhování konstrukcí.
ČSN EN 1991-2: Zatížení mostů dopravou.
ČSN EN 1992-1-1: Navrhování betonových konstrukcí. Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby.
ČSN EN 1992-2: Betonové mosty - Navrhování a konstrukční zásady.
ČSN 73 6214: Navrhování betonových mostních konstrukcí
Literatura doporučená vedoucím diplomové práce.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Pro zadaný problém navrhněte dvě až tři varianty řešení a zhodnoťte je. Podrobný návrh nosné konstrukce vybrané varianty mostu proveďte včetně zohlednění vlivu výstavby mostu na jeho návrh. Nosnou konstrukci můžete zkrátit na konci a případně i na začátku mostu. S ohledem na velký poloměr směrového oblouku můžete most napřímit. Ostatní úpravy provádějte podle pokynů vedoucího diplomové práce.
Požadované výstupy:
Textová část (obsahuje zprávu a ostatní náležitosti podle níže uvedených směrnic)
Přílohy textové části:
P1. Použité podklady a varianty řešení
P2. Výkresy - přehledné, podrobné a detaily (v rozsahu určeném vedoucím diplomové práce).
P3. Stavební postup a vizualizace
P4. Statický výpočet (v rozsahu určeném vedoucím diplomové práce)
Diplomová práce bude odevzdána pro ÚBZK 1x na CD.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

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

Ing. Jan Koláček, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Cílem diplomové práce byl návrh železobetonového předepjatého obloukového silničního mostu. V počátku byli navrženy dvě varianty provedení, komorový a dvoutrámový průřez mostovky, z niž právě varianta dvoutrámového průřezu v kombinaci s komorovým obloukem byla zvolena k podrobnému zpracování. Základem řešení byla správná volba rozměrů jednotlivých prvků nosného systému a geometrie konstrukce. Následně byl vytvořen globální prutový model, který sloužil k navržení předpětí a posouzení mezních stavů pilířů, oblouku a mostovky během fází výstavby, provozní životnosti a na konci životnosti konstrukce. K podrobnému posouzení byla použita lineární a nelineární analýza v programu Midas Civil. Pro posouzení příčného směru mostovky byl vytvořen deskový model pomocí softwarového rozhraní Scia Engineer.

KLÍČOVÁ SLOVA

obloukový most, předepjatý beton, komorový průřez, dvoutrámová mostovka, lineární a nelineární analýza, prutový model

ABSTRACT

The aim of the master thesis was a design of arch highway bridge made of prestressed reinforced concrete. In the beginning two versions of construction were designed, with box-girder and double-girder cross section of bridge deck, from which the variant of double-girder cross section in combination with box-girder arch were chosen for further detail postprocessing. The basics of the solution laid in right choice of dimensions of elements creating load-bearing system and construction geometry. Subsequently global beam model was created, which was used to prestress design and structural assessment of ultimate and serviceability limit states of pillars, arches and bridge deck during the building phases, service lifetime and in the end of lifetime of construction. For detail assessment, linear and nonlinear analysis was created using Midas Civil. To check the cross-sectional direction of bridge deck, slab model was made using Scia Engineer software.

KEYWORDS

Arch bridge, prestressed concrete, box-girder cross section, double-girder bridge deck, linear and nonlinear analysis, beam model

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. Lukáš Vavřička *Obloukový silniční most.* Brno, 2022. !!XX!! s., !!YY!! s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav betonových a zděných konstrukcí. Vedoucí práce Ing. Jan Koláček, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Obloukový silniční most* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 14. 1. 2022

Bc. Lukáš Vavřička
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Obloukový silniční most* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 14. 1. 2022

Bc. Lukáš Vavřička
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Janu Koláčkovi Ph.D. za odbornou pomoc, věcné rady a vstřícný přístup při řešení této práce. Speciální poděkování patří mé rodině, která mě bezpodmínečně podporovala po celou dobu studia. V neposlední řade bych rád poděkoval všem blízkým, kteří mě podporovali během studia.

OBSAH

Obsah 1
Úvod 2
Studie tvaru a konstrukčního uspořádání 3
Varianta řešení 1 5
Varianta řešení 2 6
Porovnání variant 7
Konstrukční řešení vybrané varianty 7
Statické řešení 9
Prutový model 9
Deskový model 10
Výpočet tvaru oblouku 11
Fáze výstavby 12
Statické posouzení konstrukce 14
Mezní stav použitelnosti. 14
Mezní stav únosnosti 14
Nelierání analýza konstrukce 15
Určení vzpěrných délek 15
Závěr 17
Seznam obrázků 18
Seznam použité literatury 19
Software 20
Seznam příloh 21

ÚVOD

Úkolem diplomové práce je navrhnout silniční obloukový most, tak aby vyhověl normovým předpisům a nebyly překročeny meze použitelnosti a únosnosti, jak během výstavby, tak i během provozní životnosti konstrukce. Zároveň je snahou navrhnout architektonicky zajímavou a konstrukčně jednoduchou konstrukci, která by svým vzhledem zapadala do okolního prostředí.

Podkladem této práce byl podélný profil terénu hlubokého údolí se skalnatým terénem. Jak tvarem, tak i vlastnostmi je vhodnou volbou pro daný typ území právě obloukový most s horní mostovkou, který z architektonického hlediska nenarušuje charakter krajiny a zároveň obloukové konstrukce vykazuje možnost elegantního překlenutí velkých rozpětí při poměrně malých rozměrech průřezu, použitelných i pro dálniční mosty. Inspirací této práce byly již stávající konstrukce, které svým konstrukčním uspořádáním a vzhledem dokázaly nenuceně zapadnout do okolního prostředí a vytvořit, tak jedinečná díla. Z nejznámějších betonových konstrukcích lze zmínit třeba The Hoover Dam Bridge, nebo Arrábida Bridge v Portu.

Cílem práce bylo zejména pochopení problematiky a prohloubení znalostí mostního inženýrství, jak po návrhové, statické stránce pomocí modelů, tak po konstrukční stránce, při ověřování způsobu využití dnešních technologií, aby navržená konstrukce splňovala normové a etické požadavky.

Pro daný problém bude vytvořeno několik pracovních modelů, pomocí kterých se získá představa o statickém chování konstrukce i o finálním vzhledu stavby jako celku. Z těchto poznatků pak budou vytvořené dvě varianty řešení mostu, po porovnání bude jedna zpracována podrobněji.

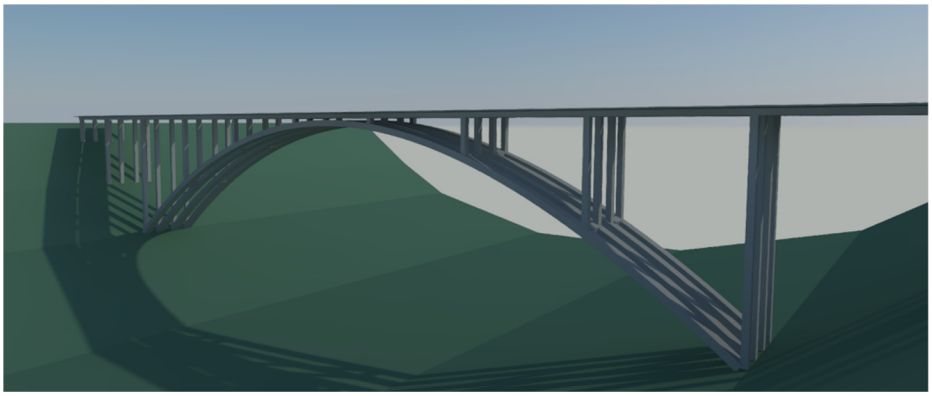
Pro statickou a časově závislou analýzu konstrukce bude vytvořen prutový model v programu Midas Civil a pro deskový model bude využit software Scia Engineer. Posouzení jednotlivých částí konstrukce na mezní stavy použitelnosti i únosnosti proběhne jak za použití analytických výpočtů pomocí platných norem a předpisů, tak také v programu Idea Statica.

STUDIE TVARU A KONSTRUKČNÍHO USPOŘÁDÁNÍ

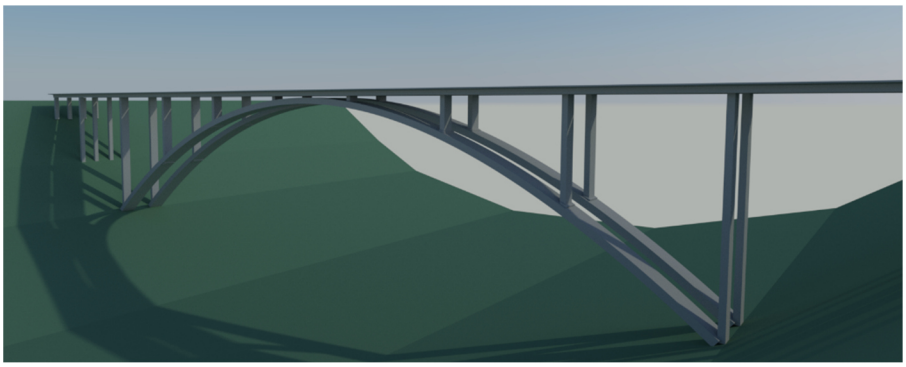
Základní parametry konstrukce vychází z výškového a směrového řešení komunikace, kde vozovka klesá se sklonem 1.0 % ve směru staničení. Směrově je most v přímé.

Celková délka údolí je přibližně 370 metrů a největší hloubka dosahuje 92 m od nivelety komunikace. Vzhledem k poměrně velkému sklonu svahů bylo rozhodnuto, že oblouková část konstrukce překlene přibližně 2/3 rozpětí údolí. Což vedlo ke zvolenému teoretickému rozpětí oblouku 245 m a vzepětí 50 m. Parametr vzepětí se pak dále měnily v závislosti na zvoleném konstrukčním systému. Pro obloukový most, lze zvolit několik možností uložení mostovky na oblouk. Stěžejní je pak vyřešení přechodu mostovky v polovině rozpětí oblouku, kdy lze mostovku vést nad obloukem nebo ji vetknout do oblouku.

V prvních krocích byla snaha udělat poměrně štíhlou konstrukci. Je celkem esteticky přijatelné, aby stojky podpírající mostovku nad obloukem netvořily zbytečně rušivý element. Proto se při prvních návrzích konstrukčního řešení vytvořilo několik 3D modelů, pomocí kterých byla snaha zhodnotit vzhled konstrukce, při různém uspořádání stojek a průřezu oblouku.



Obr. 1. Pracovní vizualizace - 2 průřezy oblouku a dvě stojky pro jeden most



Obr. 2. Pracovní vizualizace spojené průřezy pilířů a stojek

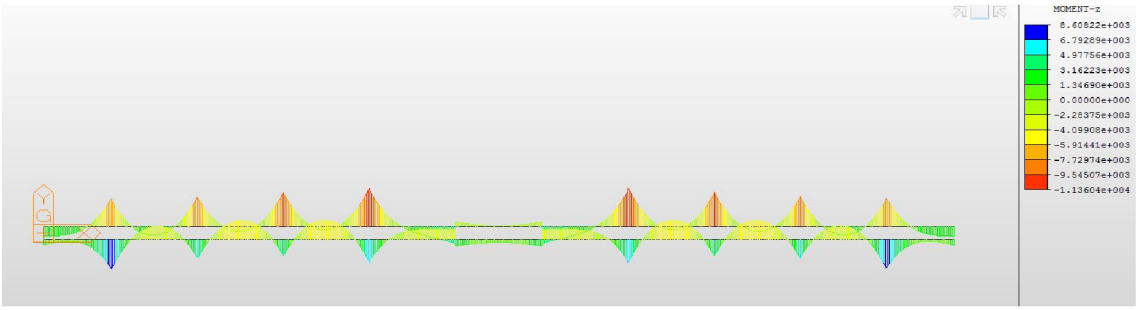
Jak je vidět na obrázku 1. při použití dvojce průřezů pilířů a oblouku se vytvoří husté pole, které není příliš vábné. Spojením průřezů jsme dosáhli lepší varianty vzhledu, ale ze statického hlediska je tato varianta vhodná spíše pro mostovku tvořenou z několika trámů spojených příčníky tzv. roštovou konstrukci.

Alternativou je udělat stojky rozšiřující se od paty k vrcholu, které by vhodně podepíraly konstrukci a zároveň splňují estetické hledisko.

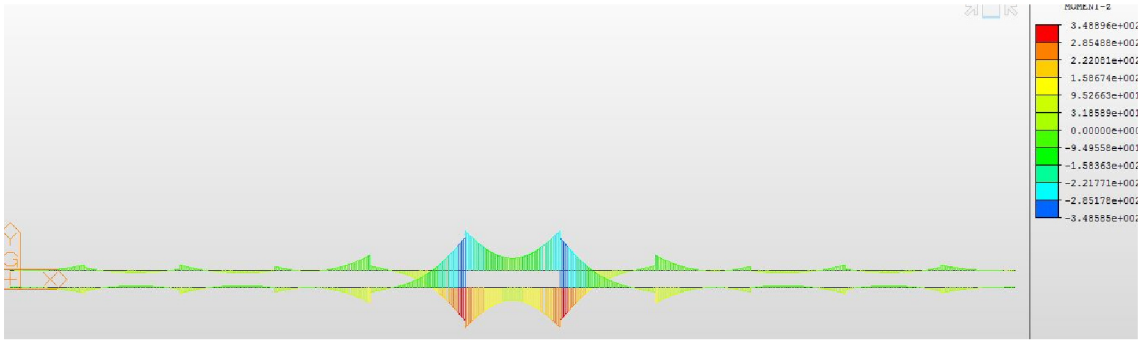
Obr. 3. Pracovní vizualizace řešení Y-lon

Vznikne tak řešení, které je vhodné pro podepření dvoutrámové nebo komorové konstrukce a vznikne, tak zajímavý architektonický prvek, jak je vidět na obrázku 3.

Vzhledem ke statickému působení vrcholu pilíře, kdy se stojky pod tíhou trámu ve vrchní části roztahují, vznikají v mostovce příčné tahové síly. Tyto síly lze redukovat přidáním příčníků v mostovce, které lze dodatečně předpnout nebo alternativně zesílit místo rozdvojení pilíře buď ocelovými prvky nebo příčným předpětím. Ověření tohoto předpokladu bylo provedeno na roštovém modelu při zatížení vlastní tíhou.



Obr. 4. Průběh příčných ohybových momentů v mostovce bez příčníků



Obr. 5. Průběh příčných ohybových momentů v mostovce při zesílení příčníkem

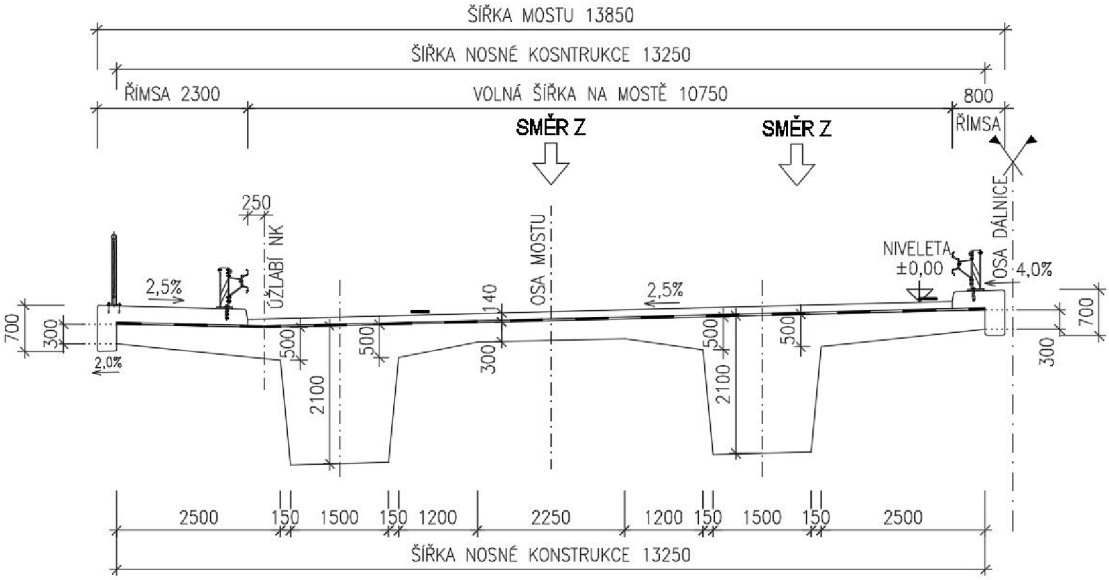
Vzhledem ke značné redukci hodnoty ohybových momentů, kdy z hodnoty přibližně 10 000 kN.m se přidáním příčníků hodnota snížila na 350 kN.m, což můžeme vidět na obrázcích 4 a 5, bylo rozhodnuto, že je konstrukční uspořádání s rozdvojením pilíře realizovatelné a uvažovalo se sním při dalších krocích. Posouzení příčníku na příčný tah nebylo v rozsahu práce podrobněji posouzeno. Předpokládá se, že se příčný tah bude redukovat příčným předpětím. Z konstrukčního hlediska by mělo být proveditelné příčné předpětí u dolní hrany příčníku, protože podélné předpětí nad podporou je vedeno při horním povrchu.

Při volbě průřezu oblouku se nejdříve uvažovalo s plným průřezem, který při výsledcích na předběžných výpočetních modelech nevyhověl statickým předpokladům. Z tohoto důvodu se hledala optimálnější alternativa řešení. Při další studiích stávajících konstrukcí a podkladů z literatury, bylo využito doporučení pro oblouky s rozpětím 80~300 m a poměrným vzepětím l/f v intervalu 3~6 pro zvolení komorového průřezu.

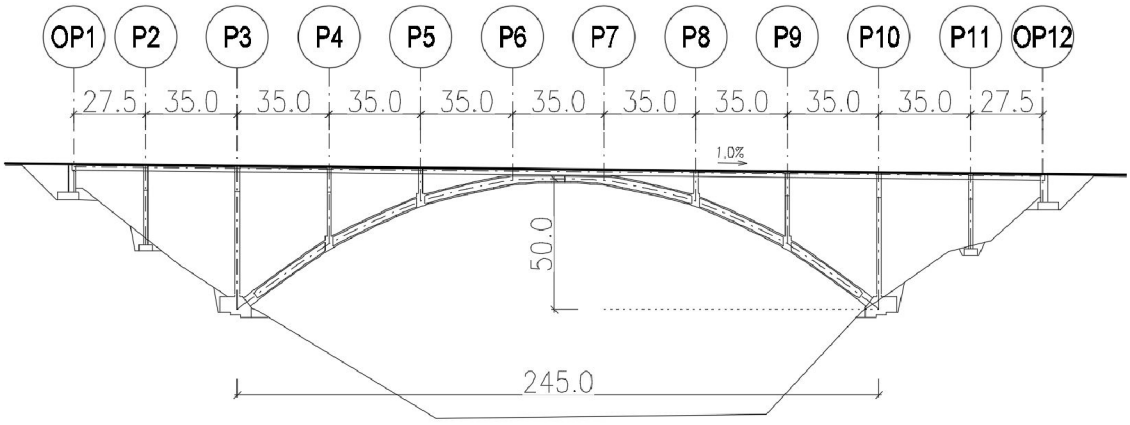
Zvolení průřezů stojek a pilířů bylo zvoleno z inženýrské zkušenosti. Další varianty řešení se liší pouze ve volbě průřezu a geometrie mostovky. Oblouk je v patách vetknutý do základů. Pilíře jsou navrženy jako kyvné stojky a na krajních opěrách se uvažují posuvná ložiska.

Varianta řešení 1

První byla zvolena varianta s průřezem mostovky jako dvoutrám o konstantní výšce 2,1 m s optimálním rozpětím polí 35 m. Mostovka je uprostřed rozpětí vetknuta do oblouku. Celkový počet polí je včetně monolitického spojení 11. Krajní pole mají délku 27,5 m a předpolí oblouku jsou navržena o délce 35 m stejně jako 7 polí nad obloukem. Vzepětí oblouku je uvažováno jako 50 m. Schéma příčného řezu je znázorněno na obrázku 6 a podélného řezu na obrázku 7.



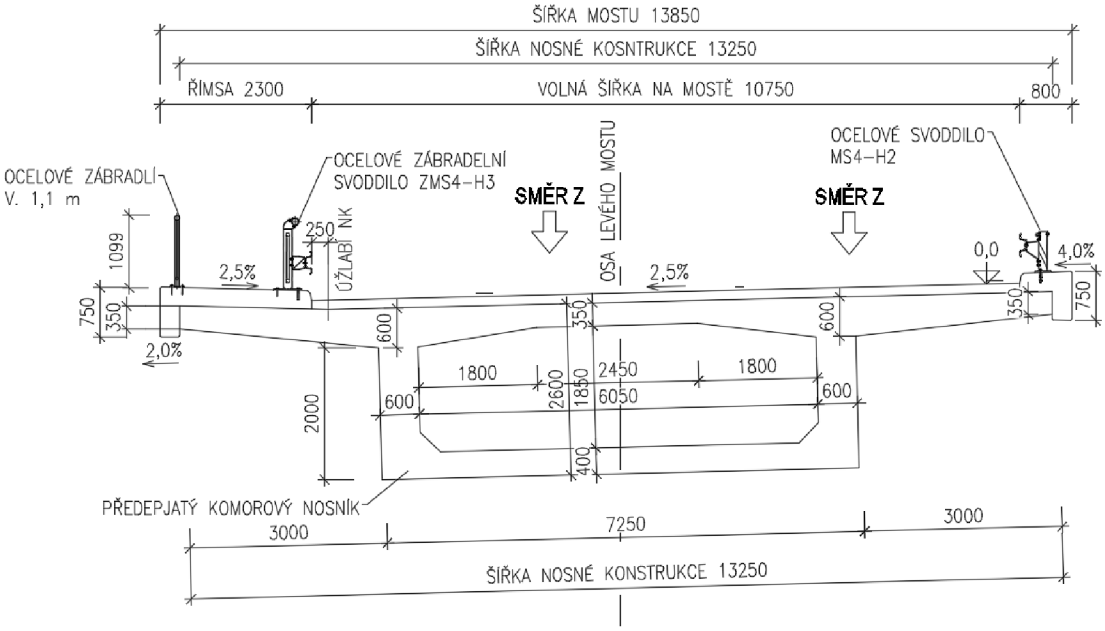
Obr. 6. Příčný řez mostovkou – varianta 1



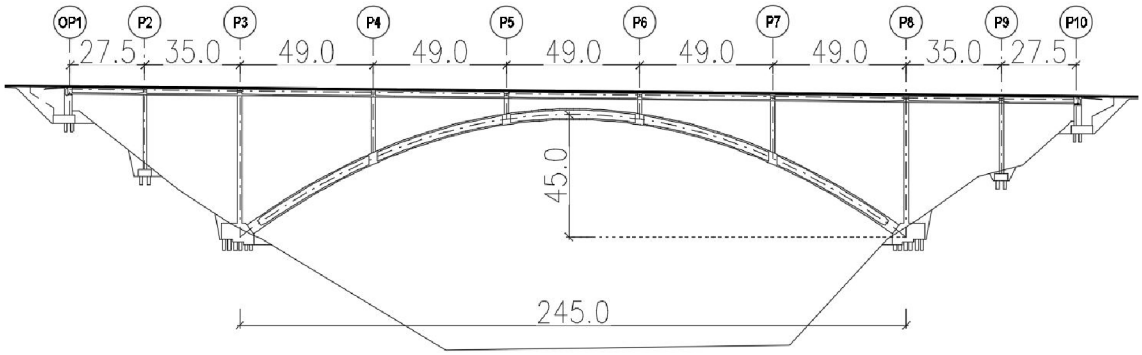
Obr. 7. Podélné schéma – varianta 1

Varianta řešení 2

Druhou variantou byl zvolen komorový průřez mostovky s výškou komory 2,6 m. Předpolí oblouku má stejné rozpětí jak u varianty 1. Nad obloukem je navrženo 5 polí o rozpětí 49 m. Mostovka je vedena nad obloukem, což oproti variantě 1 vede ke snížení vzepětí oblouku o 5 m na 45 m. Schéma příčného a podélného řezu variantou 2 můžeme vidět na obrázku 8 a 9.



Obr. 8. Příčný řez – varianta 2



Obr. 9. Podélné schéma – Varianta 2

Porovnání variant

Obě varianty mají obdobné konstrukční řešení. Jeden z hlavních rozdílů je způsob zatížení oblouku, kde u varianty 1 je více pilířů podpíráno obloukem, a navíc prostřední pole je monoliticky spojené s obloukem. Tím si oblouk zachová pravidelnější tvar, ale v místě napojení bude vlivem posunu střednice průřezu vznikat větší ohybové namáhání. Oproti tomu ve variantě 2, bude zatížení oblouku ve 4 místech při hledání optimálního tvaru vést na tvar více připomínající lomenou čáru. Navíc vedení mostovky nad obloukem vede k menšímu vzepětí, a to k větší obloukové síle která vyvodí větší namáhání základů oblouku.

Pro další zpracování byla zvolena vhodnější varianta 1, vzhledem k svému uspořádání, které vede k menšímu namáhání oblouku. Navíc bylo výhodnější spojení dvoutrámu a komorového průřezu oblouku a zajímavé řešení rozdvojení pilířů ve vrchní části.

Konstrukční řešení vybrané varianty

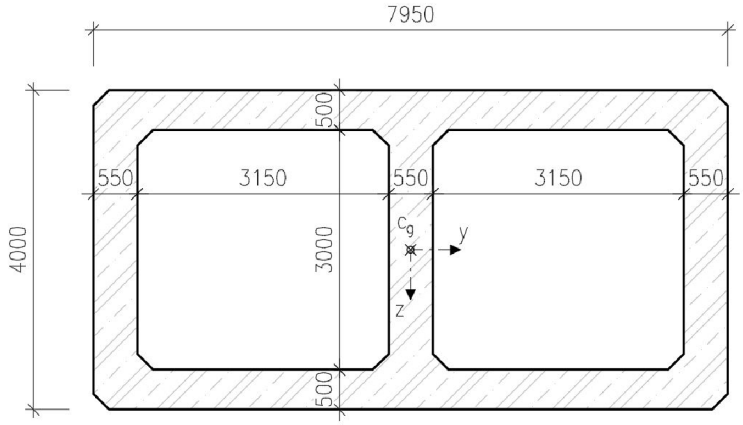
V projektu se předpokládají, vzhledem ke směrově rozdělené komunikaci, dva souběžné mosty, každý s vlastním konstrukčním systém. Rozpětí jednotlivých polí je 27.5 + 9x35+27.5 m.

Uložení mostů bude realizováno pomocí vrtaných pilot Ø 900 a 1200 mm do který bude vetknut základ. Základ oblouku má na základové spáře udělané 2 odskoky pro lepší zachycení účinků obloukové síly. Oblouk je do základu pevně vetknut a v patě oblouku je vytvořen příčník o délce 4 m.

Dále jsou příčníky umístěny v místě napojení stojek, kde jsou zanechány průlezné otvory pro revizi a kontrolu komorového průřezu. Základní rozměry oblouku jsou 7.95 x 4.0 m stěny mají tloušťku 0.55 m a spodní a horní deska je navržena tloušťky 0.50 m. V místě spojení mostovky s obloukem, se krajní stěny oblouku rozšiřují na 0.75 m. Zmíněné rozměry je vidět na obrázku 10.

Opěry na konci mostu jsou navrženy jako masivní železobetonové, na kterých jsou uložena hrncová ložiska. Na vnitřní hraně mostu jsou uvažována jako podélně pohyblivá a na vnější straně mostů všesměrná. Mezilehlé pilíře jsou navrženy jako kyvné stojky, s jedním vrubovým kloubem v patě a dvěma vrubovými klouby na konci rozdvojení.

Pilíře jsou masivního průřezu 1.5 x 3.0 m. Pilíře v patě oblouku jsou vzhledem k délce dosahující téměř 50 m navrženy s rozměry 1.75 x 3.5 m.



Obr. 10. Průřez oblouku

Průřez mostovky je navržen jako dvoutrám o šířce trámu 1.5 m a výšce 2.1 m. Vyložení konzol na konci trámu je 2.5 m. Tloušťka konzoly je navržena proměnná 0.35~0.5 m a dvoutrám je podélně předepnut pomocí 6-ti kabelů o 19 lanech. Předpětí je do trámů vnášeno postupně dle fází výstavby.

Na vnějších římsách je navržen chodník šířky 1.5 m. Odvodnění je realizováno pomocí příčného a podélného sklonu. Na konstrukci se uvažuje umístění mostních odvodňovačů a drenážního proužku pro odvodnění izolace.

Použité materiály

Beton	C45/55 XC4, XD3, XF4 (Mostovka, pilíře, oblouk)
Betonářská ocel	B 500B
Předpínací výztuž	Y1860-S7 -15.3

STATICKÉ ŘEŠENÍ

Oblouk je vetknutý do základů a ve středu rozpětí je monoliticky spojen s mostovkou. Pilíře jsou navrženy jako kyvné. Na opěrách jsou umístěna ložiska. Oblouková síla je přenášena z oblouku do podloží.

Prutový model

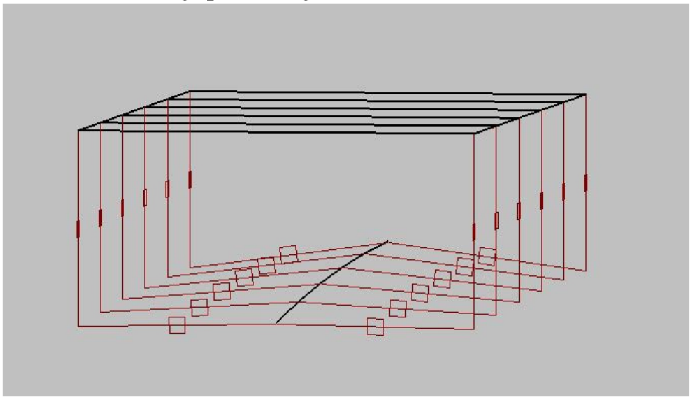
Pro posouzení konstrukce byl vytvořen výpočetní model v programu Midas Civil, který je vidět na obrázku 10. Konstrukce byla modelována jako prutová. Do modelu byly importovány průřezy z aplikace AutoCad. Vzhledem k předpokladu únosného podloží se v modelu uvažovalo působení základů jen v místě vetknutí oblouku, kde byl vymodelován prvek základu jako prut s tuhým podepřením. Pilíře mimo oblouk byly modelovány také s tuhým vetknutím, ale během fází výstavby bylo toto podepření změněno, tím že se uvolnilo pootočení ve směru Y, tedy pootočení v podélném směru konstrukce. Tím bylo dosaženo, aby se pilíře chovaly jako kyvné stojky a během výstavby, kdy nespolupůsobí s mostovkou byly staticky určité, a také je tím lépe vystiženo skutečné chování konstrukce. Na konci a na začátku mostu bylo podepření mostovky realizováno pomocí kloubových posuvných podpor, které byly za pomoci příčníku a tuhého ramena spojeny s těžištěm mostovky.

Oblouk je modelován jako prut, který byl ve vrcholu náběhovaný a spojen s mostovkou pomocí dvou tuhých ramen, aby bylo vystiženo společné působení ve vetknutí. Spojení ve výpočetním prostředí je znázorněno na obrázku 11.

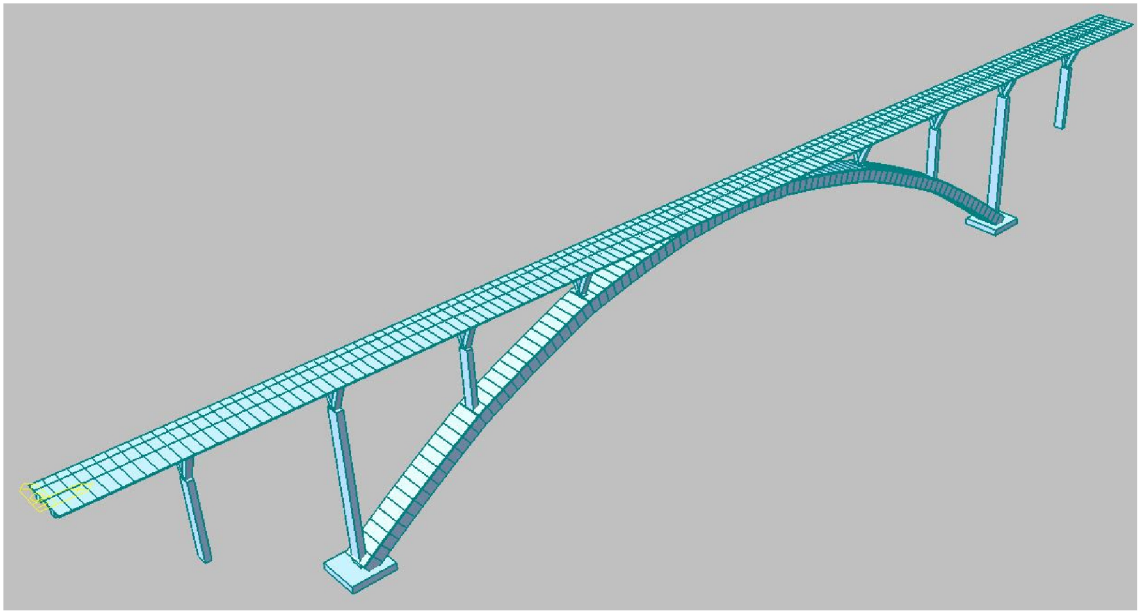
Pilíře a šikmé stojky jsou modelovány s klouby na koncích, tedy v patě pilíře a ve vrcholu stojek, které jsou uvolňovány postupně v daných fázích výstavby.

Mostovka je modelována jako rošt. Aby bylo zajištěno spolupůsobení dvou trámu, byly napříč tuze spojeny prutem, kterému byla přiřazena nulová hmotnost a průřezové charakteristiky desky o tloušťce 409 mm. To odpovídá průměrné tloušťce desky trámu. V místě podpory jsou prutu spojeny příčníkem, který je přes tuhé rameno spojen buď s podporou nebo se stojkou.

Zatížení konstrukce bylo vkládáno jako liniové s excentricitou vůči ose prutu, tím byli vyvozeny kroutící momenty pro daný trám i od stálého zatížení.



Obr. 11. Prutový model Midas Civil

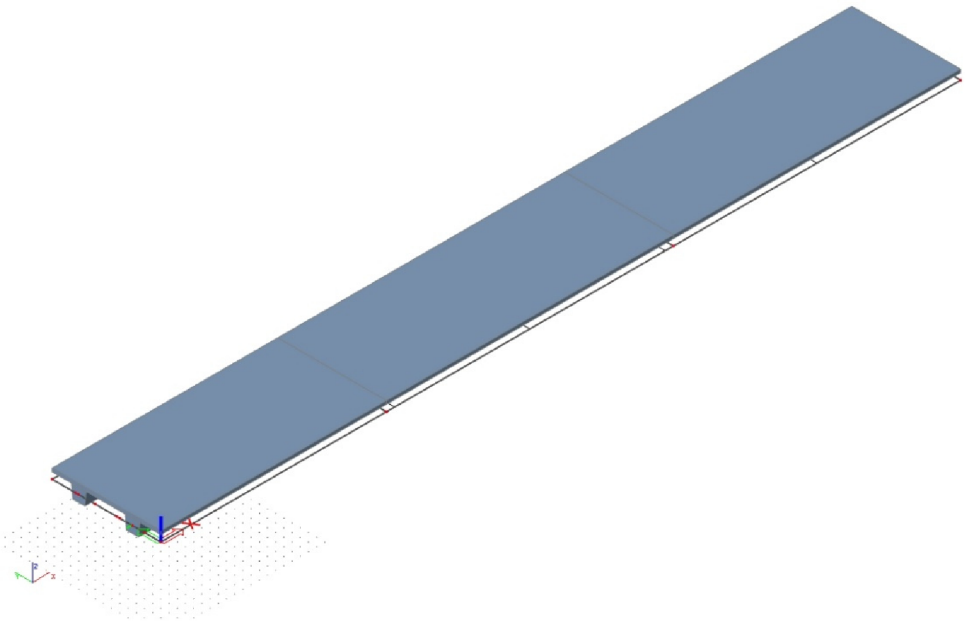


Obr. 12. Vykreslení spojení mostovky s obloukem pomocí tuhých ramen

Na prutovém modelu byla provedena většina výpočtů. V modelu byly zohledněny i časově závislé charakteristiky materiálů. Při posouzení vzpěru bylo využito nelineárních výpočtů a výpočtu vlastních tvarů pro určení vzpěrných délek pilířů a oblouku.

Deskový model

Deskový model byl vytvořen v softwaru Scia Engineer, pro posouzení mostovky na příčný směr. Průřez mostovky byl zjednodušen na desku o průměrné tloušťce desky reálné konstrukce a dva pruty v modelování nahradili trámy. Tyto prvky spolu tvořily prvek zvaný žebro. Výpočetní model je znázorněn na obrázku 13.



Obr. 13. Axonometrický pohled na deskový model

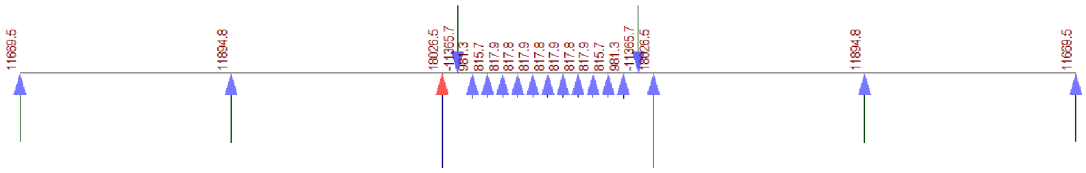
Pro získání vnitřních sil byla vytvořena jen 3 pole reprezentující část mostu. Pole byla podepřena na kloubových a posuvných podporách. Zatížení bylo na model vkládáno plošně jak stálé složky zatížení, tak pohyblivé složky zatížení, u kterých byl spočítán roznos na střednici.

Výpočet tvaru oblouku

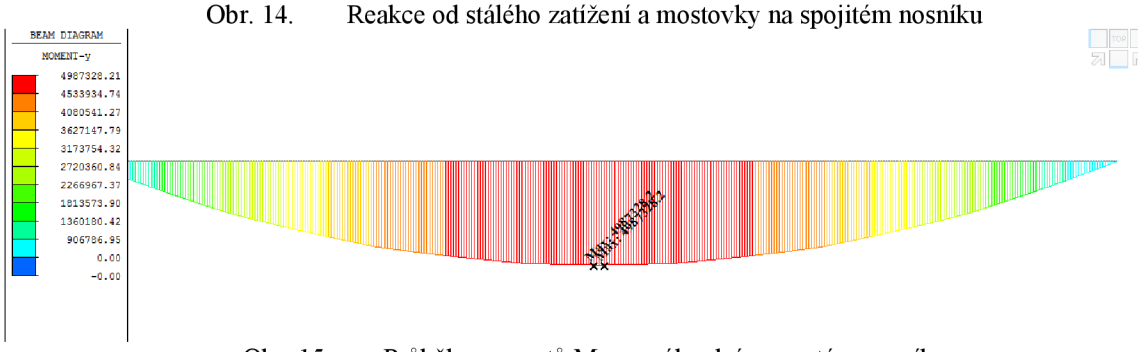
Abychom plně využili potenciál betonu je vhodné navrhnout konstrukci, tak aby v ní byl nejlépe trvalý tlak. K dosažení tlačeného oblouku, je nutno zvolit správně geometrii , tedy najít takový tvar oblouku, který pro stálá zatížení bude vykazovat minimální ohybové momenty. Tvar střednice, která způsobuje tlakové síly od zatížení se nazývá tlaková čára. Tvaru střednice tlakové čáry můžeme dosáhnout i za pomoci náhradního nosníku o rozpětí pole, které se rovná rozpětí oblouku. Náhradní nosník zatížíme námi zvoleným zatížením. Pro náš případ jsou to všechny síly od vlastní tíhy a složky stálého zatížení. Výpočtem získáme průběh ohybových momentů na náhradním nosníku. Dále platí vztah $\frac{f_{max}}{M_{max}} = \frac{f(x)}{M(x)}$,

kde f_{max} je maximální vzepětí a M_{max} je maximální ohybový moment na náhradním prostém nosníku. Z rovnice lze jednoduše dopočítat $f(x)$, které představuje výškovou souřadnici oblouku v bodě x.

Pro získání reakcí od stojek k zatížení oblouku byl vytvořen jednoduchý model spojitého nosníku prostě podepřeného a zatíženého tíhou mostovky a ostatního stálého zatížení. V místě spojení mostovky s obloukem byla vytvořena řada podpor, která vytvořila simulaci liniového uložení. Těmito reakcemi s opačným smyslem a s připočtením tíhy jednotlivých pilířů a vlastní tíhou mostovky, která byla odvozena ze tvaru paraboly 2°, byl zatížen náhradní prostý nosník, ze kterého jsem získal průběh ohybových momentů. Tento postup byl opakován celkem 2krát, kdy podruhé už s novým tvarem bylo zohledněno zkrácení, respektive prodloužení pilířů a změna tvaru oblouku, což má vliv na průběh vnitřních sil.



Obr. 14. Reakce od stálého zatížení a mostovky na spojitém nosníku

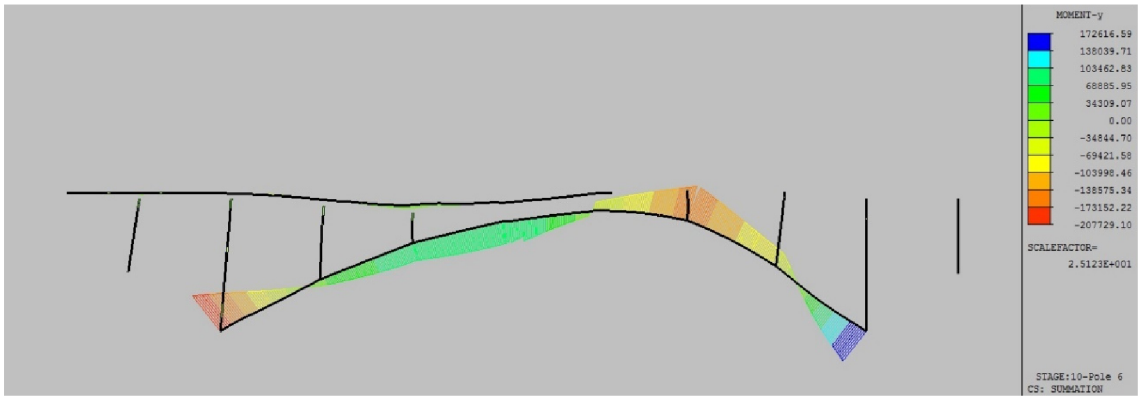


Obr. 15. Průběh momentů My na náhradním prostém nosníku

FÁZE VÝSTAVBY

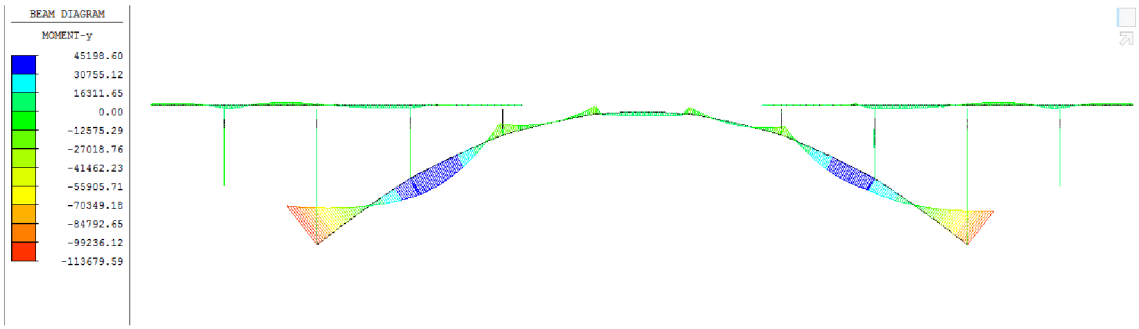
Fáze výstavby byly, vzhledem k rozsahu práce, částečně zjednodušeny tím, že se pro výstavbu oblouku uvažuje pevná skruž. V reálném provedení by se most takového rozsahu nejspíš postupně vyvěšoval pomocí závěsů a v průběhu stavby rektifikoval, tak aby v něm bylo dosaženo co nejmenšího namáhání. Vyvěšování by se nejspíš uskutečňovalo za pomocí montážní nástavby pilířů, ve kterých by se pomocí zakotvených montážních lan do základů předchozích podpěr vyrovnávalo podélné namáhání od vyvěšení oblouku.

Při fázování výstavby bylo zohledněno několik možností postupu prací. Jedním z klasických postupů je výstavba z jedné strany na druhou, kde se buď za pomoci pevné nebo posuvné skruže postupně budují a přepínají jednotlivá pole mostovky, což vede k nesymetrickému zatěžování oblouku. Nesymetrické zatížení má značný vliv na namáhání oblouku. Pokud by byl most vyvěšován, bylo by možné částečně tyto síly z oblouku v montážní stavu pomocí závěsů redukovat. Pro případ diplomové práce byla provedena analýza chování konstrukce při postupném budování polí z leva doprava včetně zohlednění vlivu předpětí. Mělo to za následek vznik velkého ohybového namáhání, jak je vidět na obrázku 16, kde je hodnota charakteristického ohybového momentu až 200 MkN. Je nutno podotknout, že oblouk se uvažuje od začátku výstavby bez podepření.



Obr. 16. Průběh ohybových momentů při jednostranné montáži mostovky

Další z možností výstavby, které byly brány v úvahu, bylo symetrické budování z obou konců najednou. Tím by se docílilo symetrického zatížení a polovičních hodnot ohybových momentů, jak je patrné z obrázku 17. I přesto, že se tato varianta zdá dosti výhodná, nese s sebou velká úskalí, hlavně s ohledem na technologii provedení, kdy by bylo během výstavby potřeba mít k dispozici všechna zařízení i vybavení a pracovní sílu dvakrát. Dalším otazníkem při symetrické výstavbě, je řešení dopnutí ve středu rozpětí oblouku, kdy neleze jednoduše provést předpínání a kotvení, která by neměla negativní vliv na konstrukci. Pokud bychom vynechali ve vrcholu oblouku dvě pracovní spáry, ze kterých bychom následně předepínali konstrukci vždy opačným směrem, vznikaly by na tomto úseku tahové síly, které by se musely z redukovat. Další možností by bylo kabely překřížit a zakotvit do střeny trámu zevnitř. Sice by to bylo celkem elegantní řešení problémů, ale mělo by za následek příčné radiální síly, které by sice v globálním měřítku měly malý vliv, protože síly z levého a pravého trámu by se navzájem redukovaly, lokálně by vznikalo velké namáhání.



Obr. 17. Průběh ohybových momentů při symetrické montáži mostovky

Poslední alternativou, která by sice řešila dva předchozí problémy, symetrické zatěžování oblouku a vyloučení vzniku konstrukčního problému předpětí, by bylo uvažovat montáž symetricky ze středu oblouku. Tato možnost sice elegantně řeší předchozí úskalí, ale bylo by hodně složité a pracné před začátkem výstavby mostovky všechna technologická zařízení transportovat k vrcholu oblouku.

V rámci diplomové práce byla řešena varianta výstavby mostovky symetricky, s tím že se uvažuje překřížení kabelů a dopnutí z boku trámu. Při modelování předpětí se zjednodušeně uvažovalo napnutí kabelů poslední fáze ve stejném místě s opačným směrem. Bez půdorysného zakřivení tím v konečném úseku nevznikalo přídavné namáhání.

Celkový stavební postup je rozdělen do 13ti fází F0 až F12, kde v první fázi se uvažuje příprava staveniště a výkopové práce. V druhé fázi se přepokládá vrtání a betonáž pilot a základů. Navazující fází je výstavba oblouku na pevné skruži, která se po betonáži mostních pilířů a šikmých stojek odstraní. Skruž se uvažuje jako ocelová příhrada. Po betonáži oblouku se pak dále budou betonovat jednotlivá pole v úsecích po 35 m na posuvné skruži. Předpětí mostovky se v dané fázi aplikuje poloviční a při další fázích se dopne druhá polovina kabelů. Po výstavbě mostovky se uvažují už jen dokončovací práce, výstavba křídel a závěrných zídek, osazení mostních závěrů a montáž mostního zařízení.

STATICKÉ POSOUZENÍ KONSTRUKCE

Statické posudky jednotlivých částí jsou podrobně popsány v příloze P4.

Konstrukce byla posouzena na mezní stavy použitelnosti a únosnosti, jak během výstavby, tak během provozní životnosti. Vnitřní síly byly převzaty z výpočetních modelů.

Mezní stav použitelnosti.

Mezní stav použitelnosti se ověřoval pomocí ověření mezních napětí. Pro tyto účely byly vytvořeny charakteristické, časté a kvazistálé kombinace z vnitřních sil. Toto ověření se provedlo pro průřez oblouku a mostovky. Jednotlivé posudky byly posouzeny ručním výpočtem a porovnány s výsledky z výpočetního modelu.

Mezní stav únosnosti

Pro mezní stav únosnosti byly vytvořeny kombinace 6.10a a 6.10b.

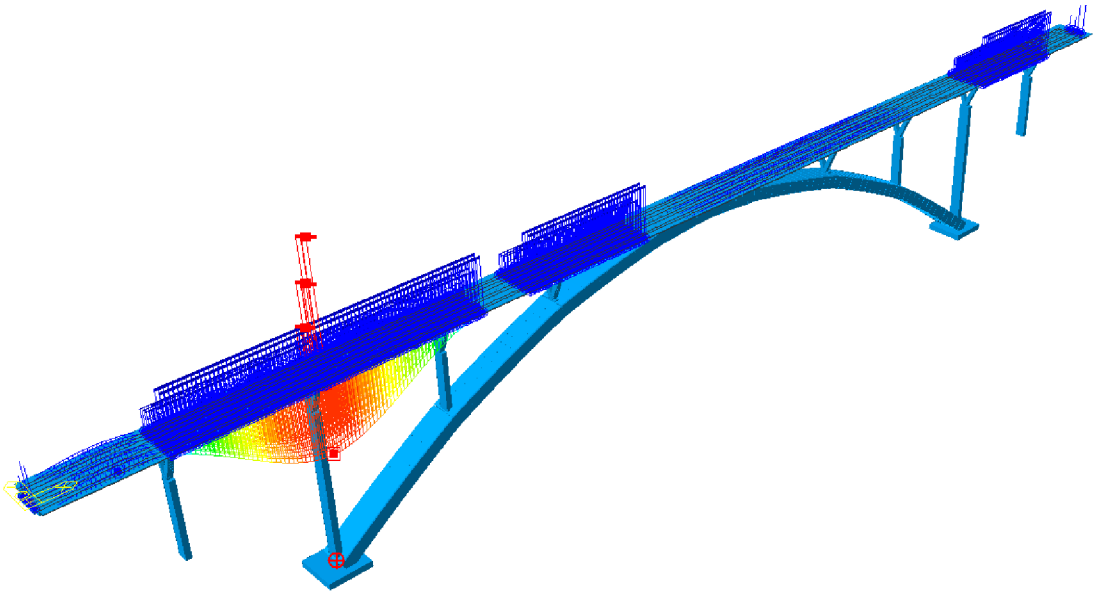
Posouzení bylo realizováno pro mostovku v řezech uprostřed rozpětí pole na ohyb a u podpory na ohyb a smyk.

Dále byl proveden posudek pilíře P3. Včetně započítání účinků druhého řádu, které bylo realizováno pomocí nelineárního výpočtu. Posudek byl proveden pomocí interakčního diagramu N-M, kde se posuzovalo namáhání na ohyb v příčném směru.

V neposlední řadě byl posouzen průřez oblouku, za pomoci programu IDEA Statica. Pro tento posudek byly spočítány účinky druhého řádu pomocí nelineárního výpočtu. Průřez byl posouzen na dvouosí ohyb.

NELIERÁNÍ ANALÝZA KONSTRUKCE

V rámci diplomové práce bylo provedeno několik nelineárních analýz konstrukce pro získání účinků druhého řádu. Tyto analýzy se prováděly na globálním prutovém modelu, vždy pro maximální složku namáhání v kombinaci stálého a proměnného zatížení.



Obr. 18. Umístění zatížení dopravou pro maximální normálovou sílu v pilíři

Proměnné zatížení, které představovalo zatížení dopravou bylo do nelineárního modelu vkládáno jako samostatné zatěžovací stavy.

Určení vzpěrných délek

Pro určení vzpěrných délek byla provedena v programu Midas Civil takzvaná P-delta analýza, kde program hledá vlastní tvary konstrukce pro dané zatížení a vypočítává n-faktor což vyjadřuje hodnotu násobku daného zatížení, které vede ke ztrátě stability. Pře násobením zatížení n-faktorem získáme hodnotu Eulerovi kritické sily $N_{cr.}$ Pomocí které ze vztahu

$$N_{cr} = \pi^2 \cdot \frac{E \cdot I}{L_{cr}}$$

získáme vzpěrnou délku prvku. P-delta analýza byla provedena pro maximální normálovou sílu v pilíři P3 a v patě oblouku. Tvar zdeformované konstrukce byl dále pak vyexportován a na tomto modelu byla provedena finální nelineární analýza.

Tab. 1. Tabulka pro výpočet vzpěrné délky pilíře

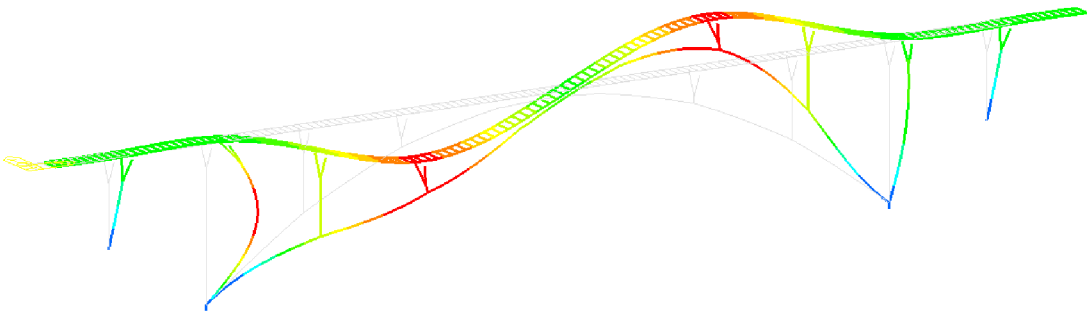
N_{nelin}	n faktor	N_{cr}	EI_y	EI_z	L	l_{0y}	β_y	l_{0z}	β_z
[kN]	[-]	[kN]	[kN.m^2]	[kN.m^2]	[m]	[m]	[-]	[m]	[-]
25 147	11.12	279 738.57	2.25E+08	5.63E+07	44	89.12	**2.025**	44.56	**1.013**

Určení vzpěrné délky pilíře podle P – delta analýzy potvrdilo předpoklad, chování pilíře v podélném směru, jako dvoukloubově podepřeného a v příčném směru jako konzola s volným koncem.

Stejný posudek byl proveden i pro oblouk, kde se předpokládalo chování oboustranně vetnutého prvku. V tomto případě se hodnoty součinitele vzpěrné délky β oproti normovým hodnotám lišila, tak že vybočení ve směru oblouku má menší hodnotu součinitele β, kde normová hodnota je 0.35 a pro vybočení kolmo na směr oblouku je normová hodnota uvažována 0.5. Výsledkem analýzy byla hodnota 0.569

Tab. 2. Tabulka výpočtu vzpěrné délky oblouku

N_k	n faktor	N_{cr}	EI_y	EI_z	L	l_{0y}	βy	l_{0z}	β_z
[kN]	[-]	[kN]	[kN.m^2]	[kN.m^2]	[m]	[m]	[-]	[m]	[-]
105 297	12.42	1 307 788.74	1.02E+09	3.13E+09	270	87.57	**0.324**	153.62	**0.569**



Obr. 19. První vlastní tvar konstrukce

Po zhodnocení výpočtu vzpěrných délek bylo usouzeno, že chování modelu je správné, a že lze uvažovat nelineární hodnoty z modelu pro posudek částí konstrukce.

Celkové zatížení pro posudky bylo uvažováno jako

$M_{ed} = F_{ed,o} \cdot e_o + M_{ed,II}$,

kde, e_o je excentricita vlivem imperfekcí, F_{ed} návrhová síla z lineárního výpočtu a $M_{ed,II}$ návrhová hodnota nelineárního momentu.

ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývala návrhem betonového obloukového mostu. V rámci práce bylo provedena předběžná studie s větším důrazem architektonické hledisko spojené s konstrukčním řešením.

Dále byly vytvořeny dvě varianty možného řešení, z nichž varianta dvou trámu byla vybrána pro podrobné posouzení.

Posouzení se skládalo z normových posudků na MSP a MSÚ. V posudcích byl zohledněn vliv výstavby a vliv nelineárního chování konstrukce. Všechny provedené posudky konstrukce vyhoví na posouzení dle platných norem.

Během řešení diplomové práce bylo zjištěno několik složitých konstrukčních problémů, které vzhledem k časové tísni, nebylo už možno podrobně zpracovat a vyřešit.

Seznam obrázků

Obr. 1. Pracovní vizualizace - 2 průřezy oblouku a dvě stojky pro jeden most 3
Obr. 2. Pracovní vizualizace spojené průřezy pilířů a stojek 3
Obr. 3. Pracovní vizualizace řešení Y-lon 4
Obr. 4. Průběh příčných ohybových momentů v mostovce bez příčníků 4
Obr. 5. Průběh příčných ohybových momentů v mostovce při zesílení příčníkem 4
Obr. 6. Příčný řez mostovkou – varianta 1 5
Obr. 7. Podélné schéma – varianta 1 6
Obr. 8. Příčný řez – varianta 2 6
Obr. 9. Podélné schéma – Varianta 2 7
Obr. 10. Průřez oblouku 8
Obr. 11. Prutový model Midas Civil 9
Obr. 12. Vykreslení spojení mostovky s obloukem pomocí tuhých ramen 10
Obr. 13. Axonometrický pohled na deskový model 10
Obr. 14. Reakce od stálého zatížení a mostovky na spojitém nosníku 11
Obr. 15. Průběh momentů My na náhradním prostém nosníku 11
Obr. 16. Průběh ohybových momentů při jednostranné montáži mostovky 12
Obr. 17. Průběh ohybových momentů při symetrické montáží mostovky 13
Obr. 18. Umístění zatížení dopravou pro maximální normálovou sílu v pilíři 15
Obr. 19. První vlastní tvar konstrukce 16

Seznam použité literatury

[1] ČSN EN 1992-1-1. Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – část 1-1: Obecná pravidla a pravidlo pro pozemní stavby

[2] ČSN 73 6101 Projektování silnic a dálnic

[3] ČSN 73 6201 Projektování mostních objektů

[4] ČSN EN 1991-1-5 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – část 1-5: Obecná zatížení – Zatížení teplotou

[5] ČSN EN 1991-2 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – část 2: Zatížení mostů dopravou

[6] ČSN EN 1992-2 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí-část 2: Betonové mosty - Navrhování a konstrukční zásady

[7] ČSN 73 6214 – Navrhování betonových mostních konstrukcí

[8] NAVRÁTIL, Jaroslav a Miloš ZICH. Předpjatý beton: Průvodce předmětem BL11. Skriptum VUT, Brno, 2006.

[9] STRÁSKÝ, Jiří a Radim NEČAS. Betonové mosty I: Základní principy navrhování. Brno, 2006.

[10] NEČAS, Radim, Jan KOLÁČEK a Josef PANÁČEK. BL12 – Betonové mosty I: zásady navrhování. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2014. Studijní opory pro studijní programy s prezenční formou studia. ISBN 978-802-1449-794.

[11] BECHYNĚ, Stanislav. Betonové mosty obloukové: mosty pro zvláštní účely : určeno statikům a projektantům mostních staveb a posluchačům vys. škol. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1962. Dostupné také z: https://dnnt.mzk.cz/uuid/uuid:60e87be0-122b-11e4-8e0d-005056827e51

Software

[1] Autodesk AutoCAD 2016, Autodesk, Inc.

[2] Midas Civil 2020, Midas software s.r.o.

[3] Epic Games Twinmotion, Epic Games, Inc.

[4] Risa Scia Engineer, Risa, Inc

[5] Microsoft office WORD, Microsof Corporation

[6] Microsoft office EXCEL, Microsof Corporation

Seznam příloh

P1 – POUŽITÉ PODKLADY A VARIANTY

01- PŮDORYS A PODÉLNÝ ŘEZ VARIANTY 1

02- PŘÍČNÝ ŘEZ VARIANTY 1

03- PODÉLNÝ ŘEZ VARIANTY 2

04- PŘÍČNÝ ŘEZ VARIANTY 2

P2 – VÝKRESOVÁ DOKUMENTACE

01- BETONÁŘSKÁ VÝZTUŽ MOSTOVKY

02- BETONÁŽSKÁ VÝZTUŽ OBLOUKU

03- PŘEDPÍNACÍ VÝZTUŽ DVOUTRÁMU – ČÁST 1

04- PŘEDPÍNACÍ VÝZTUŽ DVOUTRÁMU – ČÁST 2

P3 – STAVEBNÍ POSTUP A VIZUALIZACE

01- POSTUP VÝSTAVBY

02- VIZUALIZACE

P4 – STATICKÝ VÝPOČET