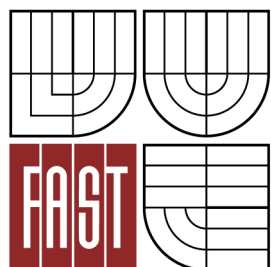




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV STAVEBNÍ MECHANIKY

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF STRUCTURAL MECHANICS

STATICKÁ ANALÝZA OBLOUKOVÉ MOSTNÍ KONSTRUKCE

STATIC ANALYSIS OF ARCH BRIDGE STRUCTURE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ZUZANA FARKASOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. PETR HRADIL, Ph.D.

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

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

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Zuzana Farkasová
Název	Statická analýza obloukové mostní konstrukce
Vedoucí bakalářské práce	Ing. Petr Hradil, Ph.D.
Datum zadání bakalářské práce	30. 11. 2011
Datum odevzdání bakalářské práce	25. 5. 2012
V Brně dne 30. 11. 2011	


prof. Ing. Drahomír Novák, DrSc.
Vedoucí ústavu




prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

ČSN EN 1991-1 Zatížení konstrukcí

ČSN EN 1992-1 Navrhování betonových konstrukcí

ČSN EN 1993-1 Navrhování ocelových konstrukcí

ANSYS, Inc., Theory, Release 13.0, 2010

Hughes T.J.R. The finite element method, linear statics and dynamic finite element analysis.

Prentice-Hall International. ISBN 0-13-317017-9

Zásady pro vypracování

Zásady pro vypracování

Studium zadané literatury, podkladů. Seznámení se s prostředím programu ANSYS. Sestavení výpočtových modelů mostní konstrukce. Provedení výpočtů a vyhodnocení výsledků.

Předepsané přílohy

Licenční smlouva o zveřejňování vysokoškolských kvalifikačních prací



Ing. Petr Hradil, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

Abstrakt

Cílem bakalářské práce je provést statický výpočet obloukové mostní konstrukce o dvou polích s mostovkou zavěšenou na táhlech. Mým úkolem bylo sestavení výpočtového modelu mostní konstrukce, provedení výpočtu zatížení a vyhodnocení výsledků. Při zpracování této práce jsem se seznámila s výpočtovým programem ANSYS, konkrétně s jeho pracovním prostředím WORKBENCH.

Klíčová slova

Statická analýza, mostovka, táhla, výpočtový model, ANSYS, WORKBENCH, okrajové podmínky, APDL systém, metoda konečných prvků

Abstract

The main task of the Bachelor's thesis is to do a static analysis of arch bridge construction with two span and bridge deck hanged on pulled cables. My task was to construct numerical model of bridge construction, to make load solution and to evaluate results. I have learned about ANSYS programme during processing this thesis, especially about its working environment WORKBENCH.

Keywords

Static analysis, bridge deck, pulled cables, numerical model, ANSYS, WORKBENCH, boundary conditions, APDL system, finite element method

Bibliografická citace VŠKP

FARKASOVÁ, Zuzana. *Statická analýza obloukové mostní konstrukce*. Brno, 2011. 53 s., 0 s. příl. Bakalářské práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební mechaniky. Vedoucí práce Ing. Petr Hradil, Ph.D..

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval(a) samostatně, a že jsem uvedl(a) všechny použité, informační zdroje.

V Brně dne 20.5.2012

Forťasová

.....
podpis autora

Poděkování:

Děkuji svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Petru Hradilovi, PhD. za odbornou pomoc a podporu, kterou mi věnoval v průběhu vypracování, a také jeho kolegům z ústavu stavební mechaniky, kteří nás v zimním semestru seznámili se základy práce v programu ANSYS.

Obsah:

1. Úvod	10
2. Model	11
2.1. Popis řešené konstrukce	11
2.2. Volba modelu konstrukce	12
3. Systém ANSYS	13
3.1. Princip systému	13
3.2. Pracovní prostředí WORKBENCH	13
3.3. Cíl práce	14
3.4. Použité typy konečných prvků	14
3.4.1. BEAM188	14
3.4.2. LINK10	14
3.4.3. BEAM44	15
4. Okrajové podmínky	16
5. Zatížení	17
5.1. Příprava modelu před zatížením	17
5.2. Vlastní tíha	18
5.2.1. Geometrické charakteristiky	18
5.2.2. Materiálové charakteristiky	20
5.3. Užitná zatížení	26
5.3.1. Zatížení chodci	26
5.3.2. Zatížení větrem	26
5.3.3. Zatížení námrazou	30
6. Vyhodnocení zatěžovacích stavů	32
6.1. Zatěžovací stav vlastní tíha	32
6.2. Zatěžovací stav chodci	34
6.3. Zatěžovací stav vítr	36
6.4. Zatěžovací stav námraza	38
6.5. Přehled vyhodnocení zatěžovacích stavů	40
7. Kombinace zatížení	42

7.1. Porovnání kombinací	42
8. Závěr	47
Seznam použitých zdrojů	49
Seznam použitých symbolů	50
Seznam obrázků a tabulek	52

Kapitola 1

Úvod

Vytváření modelů a jejich numerická analýza je dnes běžným postupem řešení konstrukcí. Analýzu i poměrně tvarově komplikovaných konstrukcí lze provádět za pomoci výpočtových programů založených na principu metody konečných prvků.

V této práci se zabývám statickou analýzou obloukové mostní konstrukce, lávky pro pěší. Zmíněná stavba se své realizace nedočkala, protože návrh v této podobě byl nakonec definitivně zamítnut.

Pro statickou analýzu je v první řadě důležitá volba výpočtového modelu a s tím související idealizace konstrukce. Mým úkolem bylo idealizovanou a staticky podepřenou konstrukci zatížit vlastní tíhou, větrem, námrazou a užitným účinkem zatížení chodci, provést výpočet a následně vyhodnotit výsledky. Do výpočtu jsou zahrnuty pouze statické účinky zmíněných zatížení.

Při zpracování této práce jsem se seznámila s výpočtovým programem ANSYS, zejména pak s jeho pracovním prostředím WORKBENCH.

Kapitola 2

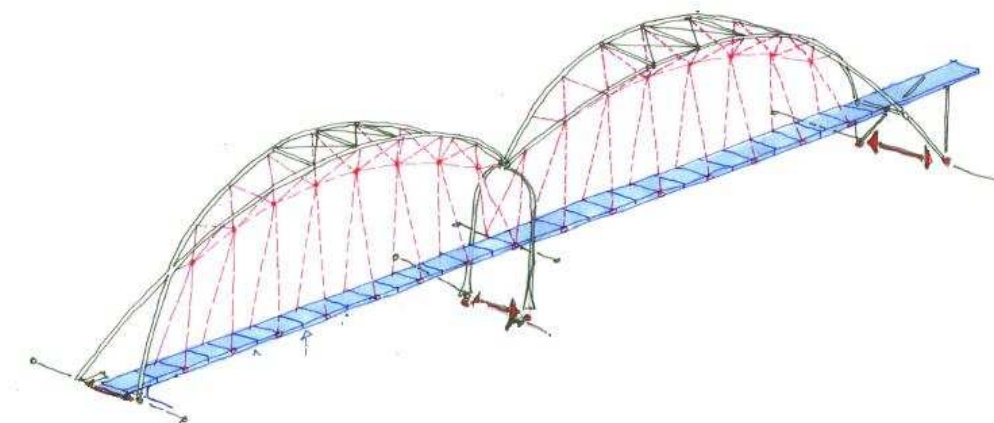
Model

2.1 Popis řešené konstrukce

Parametry konstrukce jsou převzaty z původního návrhu lávky pro pěší dle dispozice prostoru původně zamýšleného pro její výstavbu. Jedná se o obloukovou mostní konstrukci o dvou polích, kde výška oblouků dosahuje 33 metrů a rozpětí každého oblouku je 97,065 metru. Rozpětí prvního pole mostovky odpovídá rozpětí oblouku, tedy 97,065 metru, druhé pole je vedeno výše nad úroveň terénu a jeho rozpětí je tedy menší, délky 88,180 metru. Část mostovky je v délce 25,010 metru ještě prodloužena a zavedena do vnitřních prostor nákupního centra. V těchto místech je také mostovka půdorysně zakřivena. Její celková délka je tedy 210,255 metrů. Mostovka je vedena ve výšce od 1 metru do přibližně 12 metrů nad úroveň terénu. Volná šířka je 4,60 m.

Každý oblouk tvoří dvojice skloněných, vzájemně se křížících ocelových trubek Ø 560 mm. V místě křížení jsou trubky spojeny. Ve vrcholu oblouku jsou obě trubky vzájemně propojeny soustavou prvků zajišťujících stabilitu oblouku a spolupůsobení obou trubek. V dolní části mezi základem a mostovkou jsou ocelové trubky vyplněny betonem. Oba oblouky se stýkají cca v polovině rozpětí lávky a jsou vetknuty do centrální podpěry, kterou představuje ocelový oblouk šikmo překračující mostovku. V místě centrální podpěry je vytvořen pevný bod celé konstrukce lávky.

Na oblouky je mostovka zavěšena v každém pomocí 10 párů ocelových táhel kruhového průřezu Ø 40–60 mm. Táhla jsou k mostovce připevněna v úrovni spřažené desky, prostřednictvím příčných výztuh prodloužených mimo obrys mostovky. Z důvodů vyložení mostovky za účelem jejího napojení na vstup do nákupního centra je v přilehlém poli uvažován jeden pár tažených lan pro zavěšení mostovky navíc.

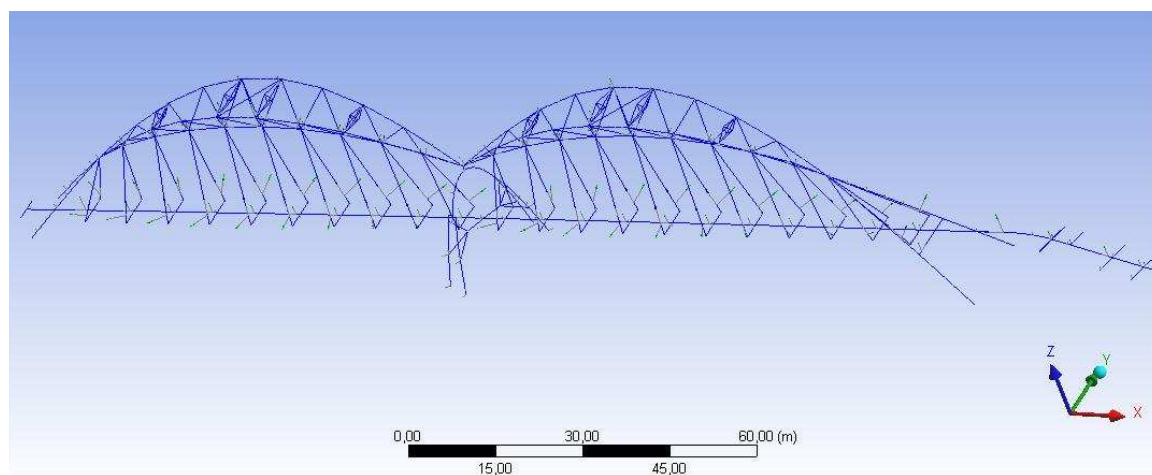


Obr. 2.1. *Architektonické schéma obloukové mostní konstrukce*

Konstrukce je převážně ocelová, jako betonová část se uvažuje pouze horní povrch mostovky, který vzniká zalitím ocelové konstrukce. Kromě toho je beton využit jako vyztužující prvek dutých ocelových průřezů spodní části středového oblouku.

2.2 Volba modelu konstrukce

Podle výkresové dokumentace byl s ohledem na rozměry jednotlivých prvků i celkové rozměry konstrukce vytvořen prutový výpočtový model. Model byl sestaven v programovém systému ANSYS při použití výhradně prutových konečných prvků. Výsledný výpočtový model je uveden na obr. 2.2. Tento prutový model je vytvořen z 678 prvků a 1410 uzlů.



Obr. 2.2. *Výpočtový prutový model*

Kapitola 3

System ANSYS

3.1 Princip systému

Programový systém ANSYS je založen na řešení numerického modelu pomocí metody konečných prvků. Zohledňuje interakci normálových sil a ohybových momentů. V tomto systému je výsledným výstupem řešení úlohy průběh napětí, z něhož jsou následně dopočítány vnitřní síly. Princip práce v systému ANSYS je následující. V první řadě je vytvořen geometrický model, který je následně pokryt sítí konečných prvků. Typů sítí a jejich prvků je celá řada. Správná volba sítě konečných prvků závisí na požadovaném tvaru sítě a také např. na způsobu zatížení modelu konstrukce. Následuje samotný výpočet a jeho řešení. Program ANSYS umožňuje vygenerování výsledků jak v grafickém, tak i textovém formátu s podrobným popisem postupu.

3.2 Pracovní prostředí WORKBENCH

Pracovní prostředí WORKBENCH se skládá z preprocesoru a postprocesoru. Jako řešič je využíván systém APDL, tedy klasické prostředí programu ANSYS. Pracovní prostředí WORKBENCH je graficky velmi přehledné s celkově jednodušším zpracováním uspořádání ovládacích panelů. Během práce se však bezpochyby setkáte s určitými problémy tohoto pracovního prostředí. Některé funkce bohužel nejsou v tomto prostředí podporovány, je tedy nutné vytvoření příkazů zpracovaných v APDL systému. Jindy se může stát, že jste programem vedeni například k výběru metody řešení úlohy, ale okno s roletkou pro výběr metody se nerozvine a tudíž nemáte šanci výběr uskutečnit a pak musíte daný příkaz obejít jiným způsobem. Zkrátka pracovní prostředí WORKBENCH nabízí jednodušší a přehlednější členění systému, ale bohužel narazíte na chyby, které jsou převážně během vytváření numerického modelu nepříjemnou záležitostí. Nenajdete-li podobně jako já některé možnosti úprav či výběru je často jednodušší využít příkazů zpracovaných v APDL systému.

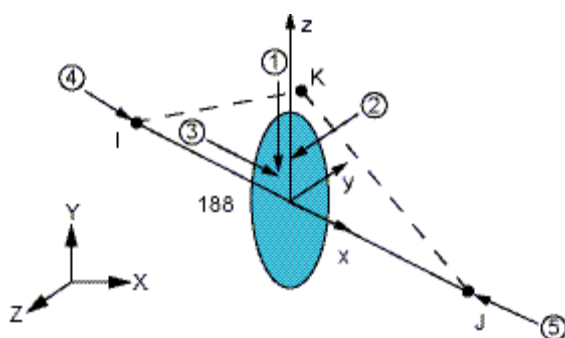
3.3 Cíl práce

Cílem práce je namodelovat a vyřešit působení statických zatížení na obloukovou mostní konstrukci lávky pro pěší, způsobených vlastní tíhou, pohybem chodců po lávce, námrazou a působením větru. Geometrie modelu vychází přímo z geometrie lávky. Model byl s ohledem na rozměry zmíněného návrhu vytvořen z liniových, prutových prvků. Podepření konstrukce bylo taktéž vytvořeno podle původního návrhu. Pro vytvoření modelu byly použity některé typy konečných prvků.

3.4 Použité typy konečných prvků

3.4.1 BEAM 188

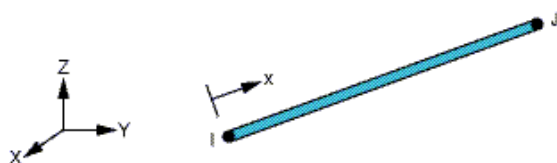
Konečný prvek BEAM188 se používá pro analýzu štíhlých až středně tlustých prutových konstrukcí. Prvek je založen na Timoshenkově prutové teorii. Prvek je lineární, kvadratický nebo kubický dvouuzlový prutový prvek ve 3D. Beam188 má šest nebo sedm stupňů volnosti v každém uzlu, což zahrnuje posuny ve směru x , y , z a rotace kolem osy x , y , z . Sedmým stupněm volnosti je velikost deformace, tento stupeň volnosti je však volitelný. Tento prvek je vhodný pro lineární výpočty, velké rotace nebo výpočty nelineárních deformací.



Obr. 3.4.1. Konečný prvek BEAM188

3.4.2 LINK10

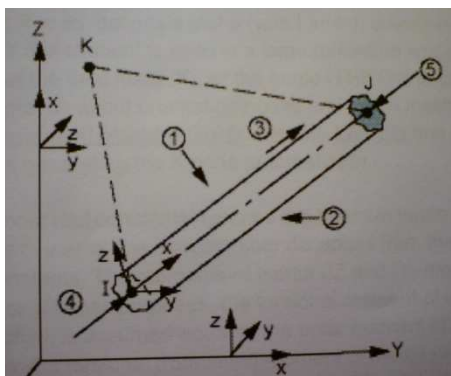
LINK10 je dvouuzlový prvek, který může být využit různými způsoby. Prvek může být použit na model osově namáhaných prvků. Tento 3D prutový prvek je namáhaný v jednoosém tlaku nebo tahu. V každém uzlu má tři stupně volnosti – posuny ve směru lokálních souřadnicových os x , y , z viz obr. 3.4.2. Uvažuje se možnost zplastizování, dotvarování, rotace, velkých deformací.



Obr. 3.4.2. Konečný prvek LINK10

3.4.3 BEAM44

BEAM 44 je jednoosý prvek s možností namáhání tahem, tlakem, kroucením a ohybem. Prvek má šest stupňů volnosti v každém uzlu, posuny ve směru x , y , z a pootočení kolem os x , y , z . Tento prvek umožňuje použití nesymetrické geometrie na každém konci a dovoluje zavést excentricitu od osy definované uzly. Tento prvek je poměrně univerzální, ANSYS proto nabízí i prvky s obdobnými možnostmi, které však mají omezené některé zmíněné vlastnosti. Prvek je do výpočtu zadáván padesáti čtyřmi parametry zadanými buď ručně nebo spočítaných dle zadaného průřezu.



Obr. 3.4.3. Konečný prvek BEAM44

Kapitola 4

Okrajové podmínky

Okrajové podmínky byly převzaty z původního návrhu konstrukce. Tyto podmínky zajišťují statickou neurčitost a tedy stabilitu konstrukce.

Uložení obloukových mostních konstrukcí na terénu je zohledněno pomocí vetknutí. Vnitřní části oblouku jsou nesený středovým obloukem, který je také vetknut do terénu.

Mostovka v podélném směru funguje jako spojitý nosník. V místě jejího vyložení z důvodu napojení na vstup do nákupního centra, jsou uvažovány dvě kluzné podpory a na opačném konci mostu ještě jedna kluzná podpora. Pevná podpora je uvažována v místě uložení mostovky na pomocná ramena vycházející ze středového oblouku. Ramena byla zřízena za účelem uložení mostovky. Mostovka je také zajištěna pomocí táhel.

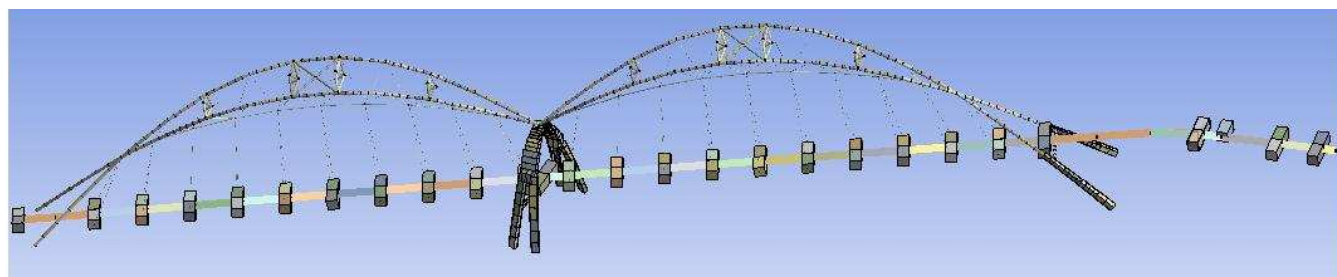
S ohledem na délku mostu a jeho případné zatížení teplotou bylo nutné uvažovat také možnost dilataci mostovky. Dilatační styk je navržen tak, aby zajistil spojitost konstrukce v příčném směru a přenos svislého zatížení a zároveň umožnil podélnou dilataci lávky bez dopadu na konstrukci obchodního centra. Pomocí příkazu, řešeného APDL systémem, bylo zabráněno vzájemným pootočením a posunům jednotlivých konců, umožněn byl pouze vzájemný posun jednotlivých konců ve směru rozpětí mostovky. Z důvodu dilatace byla mostovka ve směru jejího vyložení zajištěna jednostranným vetknutím.

Kapitola 5

Zatížení

5.1 Příprava modelu před zatížením

Před umístěním zatížení na konstrukci je nutné spolu s vytvořením modelu vytvořit také síť konečných prvků. V tomto případě nebylo nutné pozměňovat nastavení generace sítě, síť tedy byla vygenerována automaticky. Úpravy generované sítě byly provedeny pouze v případě krátkých závěsných lan a tažených lan. Hustota dělení jejich sítě byla pozměněna podle počtu dílů na jeden. Pro zajištění kompaktnosti prvků a především kompaktnosti jejich sítě byly prvky uspořádány do skupin dle funkčnosti. Tím je zajištěno společné vytvoření sítě v rámci jedné skupiny a zamezeno vzniku nespojitosti sítě.



Obr. 5.1. Vygenerovaná síť

5.2 Vlastní tíha

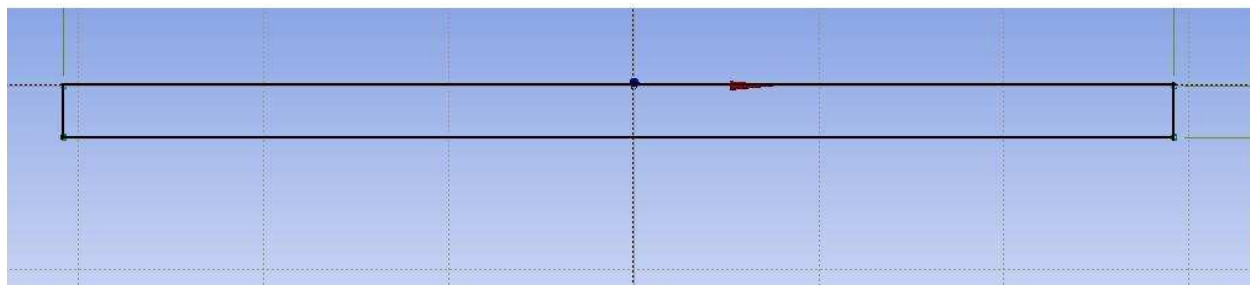
Vlastní tíha byla definována pomocí zrychlení ve směru osy z. Jelikož byl výpočtový model vytvořen výhradně z prutových prvků, bylo pro zavedení účinků vlastní tíhy nutné přiřadit každému prvku jeho geometrické i materiálové charakteristiky. Všechny parametry byly převzaty z původního návrhu.

5.2.1 Geometrické charakteristiky

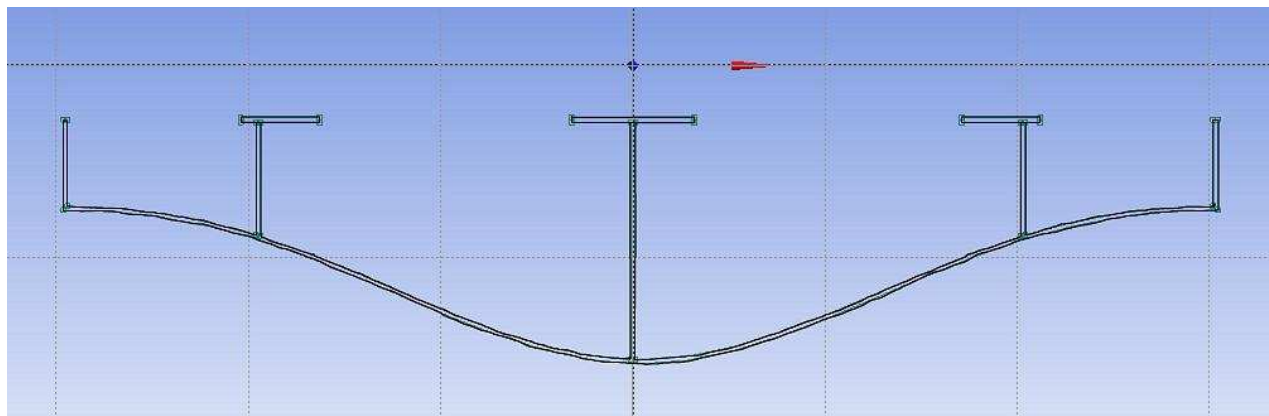
Z důvodu zavedení účinků zatížení od vlastní tíhy, byl každému prutovému prvku přidělen jeho průřez podle původního návrhu. Všechny průřezy byly vytvořeny v pracovním prostředí WORKBENCH programu ANSYS. Většina prvků je tvořena dutými kruhovými nebo obdélníkovými profily s různými tloušťkami stěn. Pracovní prostředí WORKBENCH v sekci geometrie nabízí funkci průřezy, v níž jsou automaticky předdefinované některé profily, plné, duté nebo jiné obvyklé profily prvků jako například I profil. Takto vytvořené průřezy je možno následně definovat už jen pomocí číselných parametrů. Pomocí předdefinovaných průřezů byla vytvořena většina profilů. V sekci geometrie je možné přiřazení pouze jednoho průřezu ke každému prvku. Z tohoto důvodu byly průřezy prvků spodní části středového oblouku, u nichž byl jako vyztužující prvek dutých ocelových průřezů využit beton, přepočítány na ideální průřez, uvažovaný jako ocelový.

Funkce průřezy umožňuje také vytvoření průřezů definovaných uživatelem pomocí geometrie průřezu nebo jeho parametrů. Z důvodu nepravidelného tvaru profilu mostovky, bylo využito vytvoření průřezu pomocí definované geometrie. Bylo však nutné vytvořit zvlášť definovaný průřez pro ocelovou část mostovky a pro její betonovou část. Ocelová část mostovky je definována poměrně složitou geometrií a betonová část mostovky je definována jako betonová deska šířky 6 metrů a výšky 0,28 metru. Jelikož není možné přiřadit jednomu prvku dva různé průřezy, bylo nutné vytvoření spojení ocelové a betonové části průřezu pomocí tak, aby bylo zajištěno spolupůsobení obou částí. Jejich vzájemné propojení a přiřazení obou průřezů ke všem prvkům mostovky bylo vyřešeno pomocí ručně zadaného příkazu zpracovaného v APDL systému. Kromě propojení obou částí byly příkazem zadány pomocné prvky, které jsou připojeny k ocelové části mostovky a přenáší kroucení mostovky a celkově zajišťují její tuhost. V modelu je tuhost mostovky nasimulována také

spojnicemi táhel s mostovkou (tuhá ramena), kterým je přiřazen velmi velký průřez tak, aby byla zajištěna reálná tuhost mostovky v poli.



Obr. 5.2.1.a Průřez betonové části mostovky



Obr. 5.2.1.b Průřez ocelové části mostovky

5.2.2 Materiálové charakteristiky

Materiály použité při výpočtu vlastní tíhy byly převzaty z původního návrhu materiálů. Většina prvků byla navržena z oceli, hlavním použitým materiálem je tedy ocel. Jediným dalším použitým materiálem je beton, který byl využit pouze na průřez betonové desky mostovky. S ohledem na potřeby výpočtu vlastní tíhy a úvahu postupného zatěžování během výstavby byly parametry materiálů některých prvků upraveny. Z toho důvodu bylo nutné vytvořit více typů materiálových charakteristik oceli. Konkrétně byly vytvořeny tři typy ocelového materiálu a u betonového materiálu byly také pozměněny parametry.

První materiálové charakteristiky oceli byly ponechány dle původního nastavení. Tento materiál byl přiřazen většině prvků – táhlům, obloukům, příhradovinám, ztužidlům .

ρ [kgm ⁻³]	7850
α [K ⁻¹]	1,2E-5
E [Pa]	2E11
ν [-]	0,3

Tab. 5.2.2.a První materiálové charakteristiky oceli

Druhé materiálové charakteristiky oceli byly přiřazeny spojnicím táhel s mostovkou (tuhá ramena), které simulují reálnou tuhost mostovky v poli. Pro nasimulování tuhosti jim byl tedy přiřazen velmi velký průřez. Na prostorovém modelu se však tyto prvky nevyskytují, protože mostovka je přímo zavěšena na táhlech. Tyto prvky tedy v prutovém modelu plní pouze funkci simulace tuhosti a reálně se v konstrukci nevyskytují. Proto byly nadefinovány z materiálu, ve kterém není uvažována vlastní tíha.

ρ [kgm ⁻³]	1E-11
α [K ⁻¹]	1,2E-5
E [Pa]	2E11
ν [-]	0,3

Tab. 5.2.2.b Druhé materiálové charakteristiky oceli

Třetí ocelový materiál je přiřazen výhradně prvkům mostovky. Objemová hmotnost tohoto materiálu je zvětšena o objemovou hmotnost betonu. Tato úprava byla vytvořena z důvodu uvažování postupné výstavby mostu. Bylo tak zajištěno skutečné zatížení, kdy je již osazená ocelová část mostovky zatížena plošně litím čerstvého betonu, ten je přitom únosný až po uplynutí doby zrání betonu.

ρ [kgm ⁻³]	26940
α [K ⁻¹]	1,2E-5
E [Pa]	2E11
ν [-]	0,3

Tab. 5.2.2.c Třetí materiálové charakteristiky oceli

Betonový materiál je přiřazen prvkům mostovky. Jeho parametry byly pozměněny tak, aby bylo zajištěno skutečné zatížení při uvažování postupné výstavby mostu. S ohledem na tuto skutečnost není pro betonový materiál uvažována vlastní tíha, tedy objemová hmotnost tohoto materiálu je blízká nule.

ρ [kgm ⁻³]	2,5E-12
α [K ⁻¹]	1,4E-5
E [Pa]	3E10
ν [-]	0,18

Tab. 5.2.2.d Materiálové charakteristiky betonu

	Popis	Typ prvku	Průřezové charakteristiky,				
			A [m ²]	I _y [m ⁴]	I _z [m ⁴]	I _k [m ⁴]	[mm]
1	Oblouk TR559/55 + beton , část 1	BEAM188	0.2270 2	0.13360E- 01	0.13360E- 01	0.21676E- 02	1060
2	Oblouk TR559/55 + beton, část 2	BEAM188	0.2116 4	0.11281E- 01	0.11281E- 01	0.19240E- 02	977
3	Oblouk TR559/55 + beton, část 3	BEAM188	0.1966 7	0.92287E- 02	0.92287E- 02	0.16900E- 02	893
4	Oblouk TR559/55 + beton, část 4	BEAM188	0.1816 4	0.74920E- 02	0.74920E- 02	0.71850E- 02	810
5	Oblouk TR559/55 + beton	BEAM188	0.1126 3	0.31144E- 02	0.31144E- 02	0.55850E- 02	559
6	Příčník TR 420/22	BEAM188	0.0274 8	0.54520E- 03	0.54520E- 03	0.10904E- 02	420
7	Oblouk TR 559/45 + beton	BEAM188	0.1005 6	0.27968E- 02	0.27968E- 02	0.48263E- 02	559
8	Oblouk TR 559/45	BEAM188	0.0726 0	0.24131E- 02	0.24131E- 02	0.48263E- 02	559
9	Oblouk TR559/32	BEAM188	0.0529 3	0.18422E- 02	0.18422E- 02	0.36844E- 02	559

1 0	Oblouk TR559/22	BEAM188	0.0370 ₈	0.13373E- ₀₂	0.13373E- ₀₂	0.26746E- ₀₂	559
1 1	Střední oblouk ocel, dva oblouky, část 1, TR1400/815/16/16	BEAM188	0.0698 ₅	0.19316E- ₀₁	0.84312E- ₀₂	0.18154E- ₀₁	1400x815
1 2	Střední oblouk ocel, dva oblouky, část 2, TR1400/855/16/16	BEAM188	0.0711 ₃	0.19929E- ₀₁	0.93714E- ₀₂	0.19653E- ₀₁	1400x855
1 3	Střední oblouk ocel, dva oblouky, část 3, TR1400/915/16/16	BEAM188	0.0730 ₅	0.20849E- ₀₁	0.10889E- ₀₁	0.21966E- ₀₁	1400x915
1 4	Střední oblouk ocel, jeden oblouk, část 1, TR2852/1020/16/1 6	BEAM188	0.1228 ₈	0.12543	0.25573E- ₀₁	0.68072E- ₀₁	2852x1020
1 5	Střední oblouk ocel, jeden oblouk, část 2, TR2705/1237/16/1 6	BEAM188	0.1112 ₃	0.80232E- ₀₁	0.31775E- ₀₁	0.70402E- ₀₁	2705x1237
1 6	Střední oblouk ocel, jeden oblouk, část 3, TR1772/1685/16/1 6	BEAM188	0.1096 ₂	0.55651E- ₀₁	0.51545E- ₀₁	0.80972E- ₀₁	1772x1685
1 7	Ramena (přip. mostovky a středního oblouku) TR400/400/22/22	BEAM188	0.0332 ₆	0.79483E- ₀₃	0.79483E- ₀₃	0.12365E- ₀₂	400x4 00
1 8	Střední oblouk beton, dva oblouky, část 1, 1368x783	BEAM188	1.0711	0.16705	0.54726E- ₀₁	0.14310	1368x783
1 9	Střední oblouk beton, dva oblouky, část 2, 1368x783	BEAM188	1.1259	0.17558	0.63548E- ₀₁	0.16160	1386x823
2 0	Střední oblouk beton, , část 3, 1368x783	BEAM188	1.2079	0.18838	0.78485E- ₀₁	0.19130	1368x883
2 1	Závěs krajní (ve směru oblouku), φ74 mm	LINK10	0.0043008				74

2 2	Závěs krajní, ϕ 58 mm	LINK10	0.00264212	58
2 3	Závěs střední ϕ 40 mm	LINK10	0.0012566	40
2 4	Závěs střední ϕ 40 mm	LINK10	0.0012566	40
2 5	Závěs střední ϕ 40 mm	LINK10	0.0012566	40
2 6	Závěs střední ϕ 40 mm	LINK10	0.0012566	40
2 7	Závěs střední ϕ 40 mm	LINK10	0.0012566	40
2 8	Závěs střední ϕ 40 mm	LINK10	0.0012566	40
2 9	Závěs střední ϕ 40 mm	LINK10	0.0012566	40
3 0	Závěs krajní, ϕ 40 mm	LINK10	0.0012566	40
3 1	Závěs střední ϕ 40 mm	LINK10	0.0012566	40
3 2	Závěs střední ϕ 40 mm	LINK10	0.0012566	40
3 3	Závěs střední ϕ 40 mm	LINK10	0.0012566	40
3 4	Závěs střední ϕ 40 mm	LINK10	0.0012566	40
3 5	Závěs střední ϕ 40 mm	LINK10	0.0012566	40
3 6	Závěs střední ϕ 40 mm	LINK10	0.0012566	40

3 7	Závěs střední $\phi 40$ mm	LINK10	0.0012566				40
3 8	Závěs střední $\phi 40$ mm	LINK10	0.0012566				40
3 9	Závěs střední $\phi 40$ mm	LINK10	0.0012566				40
4 0	Závěs střední $\phi 40$ mm	LINK10	0.0012566				40
4 1	Závěs krajní, $\phi 58$ mm	LINK10	0.00264212				58
4 2	Pátevní lano, $\phi 40$ mm	LINK10	0.0012566				40
4 3	Závěs krátké $\phi 40$ mm	LINK10	0.0012566				40
4 4	Připojí příčných ztužidel k obloukům, $\phi 3 \times 100$ mm	BEAM188	0.070 6	0.39679E- 03	0.39679E- 03	0.79357E-03	3x50
4 5	Příčná ztužidla, $\phi 3 \times 100$ mm	BEAM188	0.00784	0.48986E-05	0.48986E-05	0.97972E-05	100
4 6	Příčná ztužidla, $\phi 3 \times 100$ mm	BEAM188	0.00784	0.48986E-05	0.48986E-05	0.97972E-05	100
4 7	Tuhá ramena	BEAM188					
4 9	Ztužidla oblouku (kříž), $\phi 60$ mm	BEAM188	0.0028274				
5 1	Mostovka ocelový průřez	BEAM44	0.19270	0.22914E-01	0.62275	0.25704E-04	6090x1518
5 2	Mostovka betonový průřez	BEAM44	1.6537	0.31244E-01	6.5900	0.37235E-01	6052x687
5 3	Mostovka prvky v kroucení	BEAM44	0.000 1	1E-7	1E-7	0.121521	

Tab.5.2.2.e Použité průřezy

5.3 Užitná zatížení

Ve výpočtu byla uvažována užitná zatížení chodci, větrem a námrazou. Výpočet účinků těchto zatížení vychází z normy ČSN EN 1991-1 Zatížení konstrukcí a normy ČSN 73 0035 Zatížení konstrukcí z roku 1986. Do výpočtu byly zahrnuty pouze statické účinky zmíněných zatížení. Po domluvě s vedoucím práce nebylo zatížení teplotou uvažováno.

5.3.1 Zatížení chodci

Užitné zatížení chodci se na lávkách pro pěší dle ČSN EN 1991-1 uvažuje jako typ zatížení LM4, davem lidí, působící na mostovku. Tento typ zatížení je dán přímo hodnotou 5000 Nm^{-2} . Jelikož je zatěžován prutový model konstrukce bylo provedeno přenásobení zatížení davem lidí šířkou mostovky, která je po její délce konstantní. Hodnota zatížení působícího na prut znázorňující mostovku je tedy $30\,000 \text{ Nm}^{-1}$. Zatížení působí záporně ve směru z.

5.3.2 Zatížení větrem

Působení zatížení větrem se uvažuje ve směru příčném na rozpětí mostu, ve směru y. Tímto způsobem budou nejvíce namáhány obloukové mostní konstrukce a mostovka. Účinky zatížení větrem jsou uvažovány dle ČSN EN 1991-1.

Zatížení větrem se pro výpočet obecně vyjadřuje pomocí referenční plochy příslušného průřezu prvku a výšky nad terénem. Pro mostovku je uvažováno konstantní zatížení. Výška konstrukce nad terénem je tedy stejně jako plocha průřezu mostovky jednotná. Výška nad terénem je uvažována dle polohy mostovky tak, aby byl vyvozen maximální účinek větru. Referenční plocha mostovky odpovídá ploše průřezu mostovky, která je ploch ocelové a betonové části průřezu viz. obr. 5.2.1.a, 5.2.1.b.

$$A_{\text{ref}} = 2 \text{ m}^2$$

$$v_{b,0} = 23 \text{ ms}^{-1}$$

$$K_r = 0,19 \cdot (z_0/z_{0II})^{0,07} = 0,19 \cdot (1/0,05)^{0,07} = 0,234$$

$$\sigma_v = K_r \cdot v_{b,0} \cdot K_I = 0,234 \cdot 23 \cdot 1 = 5,382 \text{ ms}^{-1}$$

$$\rho_v = 1,25 \text{ kgm}^{-3}$$

$$q_b = 0,5 \cdot \rho \cdot v_{b,0}^2 = 0,5 \cdot 1,25 \cdot 23^2 = 330,625 \text{ Nm}^{-2}$$

$$z = 12 \text{ m}$$

$$C_r = K_r \cdot \ln(z/z_0) = 0,234 \cdot \ln(12/1) = 0,581$$

$$v_m = C_r \cdot C_0 \cdot v_{b,0} = 0,581 \cdot 1 \cdot 23 = 13,363 \text{ ms}^{-1}$$

$$l_v = \sigma_v / v_m = 5,382 / 13,363 = 0,403$$

$$q_p = [1 + 7 \cdot l_v] \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot v_m^2 = [1 + 7 \cdot 0,403] \cdot 0,5 \cdot 1,25 \cdot 13,363^2 = 426,45 \text{ Nm}^{-2}$$

$$C_e = q_p / q_b = 426,45 / 330,625 = 1,29$$

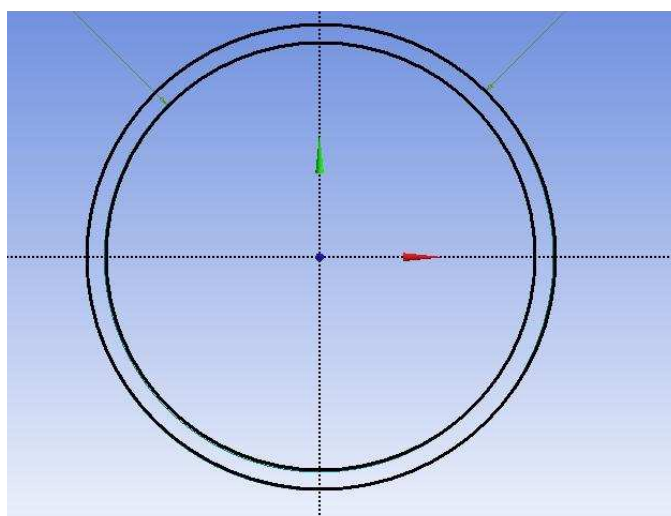
$$C_{f,y} = 1,98$$

$$C = C_e \cdot C_{f,y} = 1,29 \cdot 1,98 = 2,55$$

$$F_w = 0,5 \cdot \rho \cdot v_{b,0}^2 \cdot C \cdot A_{\text{ref}} = 0,5 \cdot 1,25 \cdot 23^2 \cdot 2,55 \cdot 2 = 1687 \text{ Nm}^{-1}$$

Hodnoty $v_{b,0}$, K_I , z_0 , z_{0II} , ρ_v , C_0 , C_{fy} byly uvažovány dle tabulek ČSN EN 1991-1.

Zatížení větrem, působící na obloukové konstrukce je zjednodušeně také uvažováno jako konstantní. Referenční plocha je dána průřezem, který se nachází nejvýše nad terénem a podle něj je také uvažována výška konstrukce nad terénem. Směrem k okrajům obloukových konstrukcí se sice zvětšuje referenční plocha průřezu, ale zároveň se snižuje výška konstrukce nad terénem a ta se ve výpočtu objevuje ve druhé mocnině. Zmíněná kombinace tedy vyvodí na konstrukci nejhorší účinek.



vnější poloměr $R_o = 0,2795 \text{ m}$

vnitřní poloměr $R_i = 0,2575 \text{ m}$

tloušťka stěny $t = 0,011 \text{ m}$

Obr. 5.3.2. Průřez obloukové mostní konstrukce

$$A_{\text{ref}} = 37,115 \text{E-3 m}^2$$

$$v_{b,0} = 23 \text{ ms}^{-1}$$

$$K_r = 0,19 \cdot (z_0/z_{0II})^{0,07} = 0,19 \cdot (1/0,05)^{0,07} = 0,234$$

$$\sigma_v = K_r \cdot v_{b,0} \cdot K_I = 0,234 \cdot 23 \cdot 1 = 5,382 \text{ ms}^{-1}$$

$$\rho_v = 1,25 \text{ kgm}^{-3}$$

$$q_b = 0,5 \cdot \rho \cdot v_{b,0}^2 = 0,5 \cdot 1,25 \cdot 23^2 = 330,625 \text{ Nm}^{-2}$$

$$z = 33 \text{ m}$$

$$C_r = K_r \cdot \ln(z/z_0) = 0,234 \cdot \ln(33/1) = 0,818$$

$$v_m = C_r \cdot C_0 \cdot v_{b,0} = 0,818 \cdot 1 \cdot 23 = 18,814 \text{ ms}^{-1}$$

$$l_v = \sigma_v / v_m = 5,382 / 18,814 = 0,286$$

$$q_p = [1 + 7 \cdot l_v] \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot v_m^2 = [1 + 7 \cdot 0,286] \cdot 0,5 \cdot 1,25 \cdot 18,814^2 = 664,13 \text{ Nm}^{-2}$$

$$C_e = q_p / q_b = 664,13 / 330,625 = 2,009$$

$$C_{f,y} = 2,4$$

$$C = C_e \cdot C_{f,y} = 2,009 \cdot 2,4 = 4,822$$

$$F_w = 0,5 \cdot \rho \cdot v_{b,0}^2 \cdot C \cdot A_{\text{ref}} = 0,5 \cdot 1,25 \cdot 23^2 \cdot 4,822 \cdot 37,115 \text{E-3} = 60 \text{ Nm}^{-1}$$

Hodnoty $v_{b,0}$, K_I , z_0 , z_{0II} , ρ_v , C_0 , C_{fy} byly uvažovány dle tabulek ČSN EN 1991-1.

5.3.3 Zatížení námrazou

Zatížení námrazou působí vždy zároveň s účinky větru. Působení zatížení námrazou se uvažuje ve směru y. Výpočet účinků zatížení námrazou je uvažován dle ČSN 73 0035. Hodnota účinků námrazy je dána tvarem průřezu, ale také uvažovanou oblastí výstavby konstrukce. Jako lokalita výstavby konstrukce byla uvažována Ostrava. Námrazou byly zatíženy obloukové mostní konstrukce a mostovka.

Výpočet namáhání mostovky námrazou se uvažuje podle způsobu výpočtu uzavřeného, jiného než kruhového průřezu.

$$t_{g1} = 0,01 \text{ m}$$

$$\chi_{g1} = 1,433$$

$$\mu_{g1} = 0,7$$

$$\gamma_{g1} = 1,3$$

$$\rho_{g1} = 9000 \text{ Nm}^{-3}$$

$$h = 2,2 \text{ m}$$

$$v_{g1} = \chi_{g1} * t_{g1} * \gamma_{g1} * \mu_{g1} = 1,433 * 0,01 * 1,3 * 0,7 = 0,013 \text{ m}$$

$$q_1 = v_{g1} * \rho_{g1} * h = 0,013 * 9000 * 2,2 = 259 \text{ Nm}^{-1}$$

Hodnoty t_{g1} , χ_{g1} , μ_{g1} , γ_{g1} , ρ_{g1} byly uvažovány dle tabulek ČSN 73 0035.

Výpočet namáhání obloukové mostní konstrukce se uvažuje podle způsobu výpočtu kruhového průřezu.

$$t_{g1} = 0,01 \text{ m}$$

$$\chi_{g1} = 1,433$$

$$\mu_{g1} = 0,6$$

$$\gamma_{g1} = 1,3$$

$$\rho_{g1} = 9000 \text{ Nm}^{-3}$$

$$d = 0,599 \text{ m}$$

$$v_{g1} = \pi * \chi_{g1} * t_{g1} * \mu_{g1} * (d + \chi_{g1} * t_{g1} * \mu_{g1}) * \gamma_{g1} =$$

$$= \pi * 1,433 * 0,01 * 0,6 * (0,559 + 1,433 * 0,01 * 0,6) * 1,3 = 0,02 \text{ m}^2$$

$$q_1 = v_{g1} * \rho_{g1} = 0,02 * 9000 * 2,2 = 193 \text{ Nm}^{-1}$$

Hodnoty t_{g1} , χ_{g1} , μ_{g1} , γ_{g1} , ρ_{g1} byly uvažovány dle tabulek ČSN 73 0035.

Kapitola 6

Vyhodnocení zatěžovacích stavů

Každý typ zatížení zmíněný v předchozí kapitole byl při výpočtu uvažován jako samostatný zatěžovací stav. Pro každý zatěžovací stav byl proveden výpočet a jeho výsledkem byly hodnoty přetvoření konstrukce, sledované v příslušném směru zatěžování

6.1 Zatěžovací stav vlastní tíha

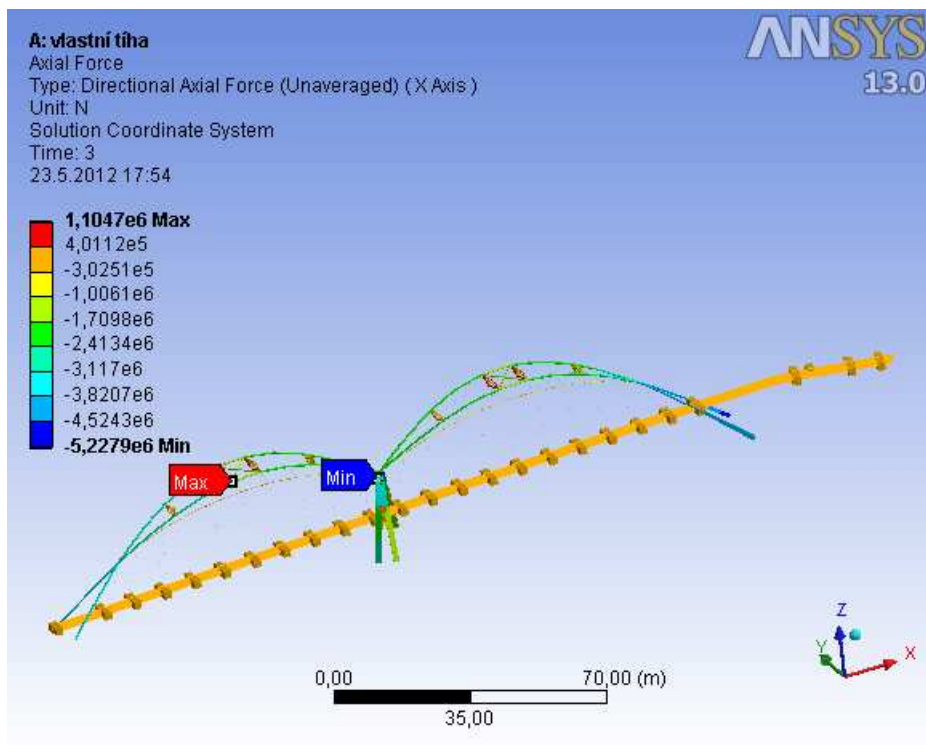
Vlastní tíha vytváří v konstrukci převážně tlak. Největší hodnota tlaku se objevuje na vrcholcích obloukových konstrukcí, v místě vrcholových ztužidel je tato hodnota zmenšena. Největší tah v konstrukci vykazují příhradoviny na vrcholu oblouku. Hodnota napětí v mostovce se pohybuje kolem nuly.

Osové síly jsou po délce mostovky konstantní, zatímco po délce oblouku se mění. V blízkosti vetknutí dosahují maximálních záporných hodnot a jsou záporné po celé délce oblouku. Maximálních kladných hodnot je dosaženo v prutech vrcholových příhradovin.

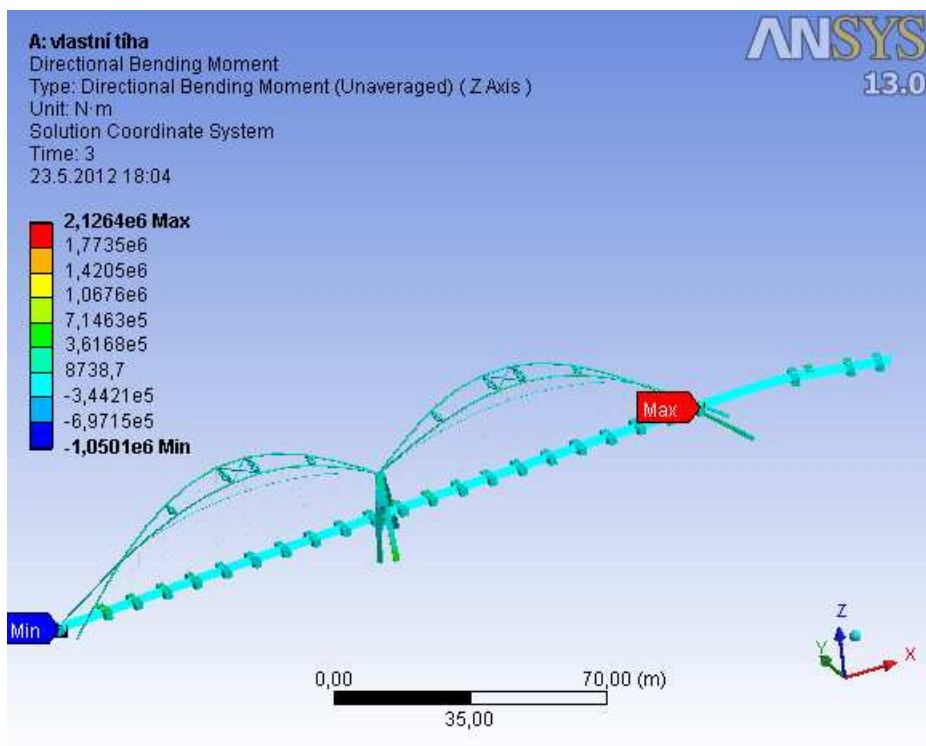
Velikost posouvajících sil ve směru osy z se v konstrukci pohybuje kolem nulové hodnoty. Maximální záporná i kladná hodnota posouvajících sil jsou přibližně stejné. Obě tyto hodnoty se nacházejí v oblasti vrcholu centrálního oblouku.

Obdobně jako u posouvajících sil se i velikost ohybového momentu ve směru osy z pohybuje kolem nulové hodnoty. Maximální záporná hodnota ohybového momentu se nachází v blízkosti podpory na začátku mostu a maximální kladná hodnota v místě spojení obloukové konstrukce s mostovkou.

Největší posuny v konstrukci byly zaznamenány v polovině rozpětí polí, kde byla zjištěna maximální záporná hodnota ve směru osy z . Maximální kladná hodnota byla zjištěna v oblasti křížení oblouků. Velká přetvoření se objevila také v oblasti vrcholu oblouku. Nejmenší přetvoření byla zjištěna v oblastech vetknutí.



Obr. 6.1.a Osově síly



Obr. 6.1.b Ohybové momenty ve směru osy z

6.2 Zatěžovací stav chodci

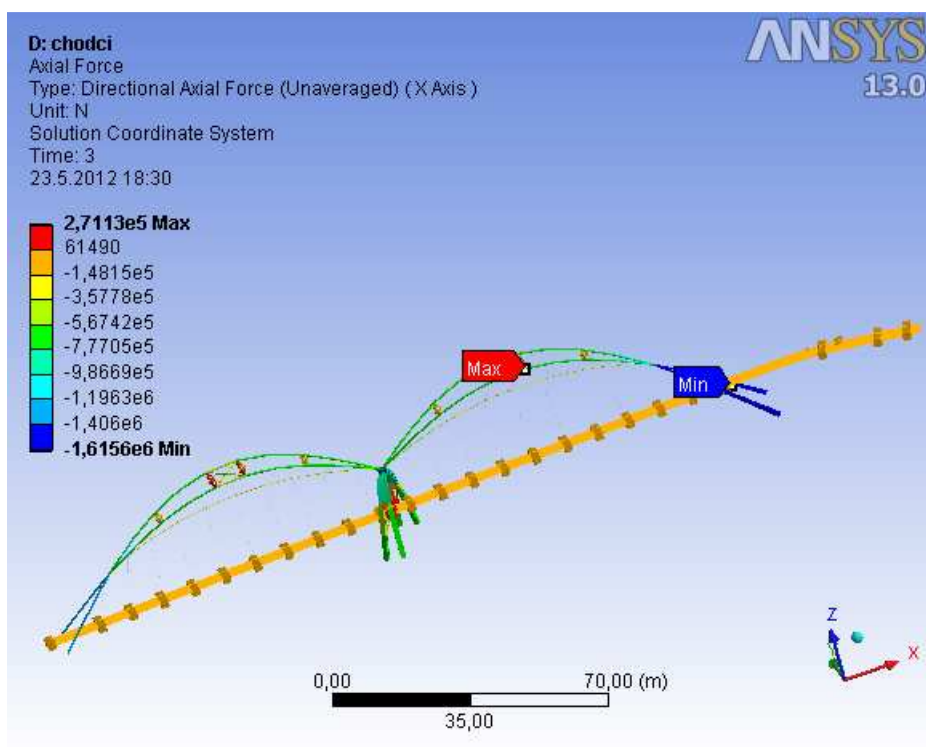
Zatížení chodci vytváří v konstrukci převážně tlak. Největší hodnota tlaku se objevuje na vrcholcích obloukových konstrukcí, v místě vrcholových ztužidel je tato hodnota zmenšena. Největší tah v konstrukci vykazují příhradoviny na vrcholu oblouku. Hodnota napětí v mostovce se pohybuje kolem nuly.

Osové síly jsou po délce mostovky konstantní, zatímco po délce oblouku se mění. V blízkosti vetknutí dosahují maximálních záporných hodnot a jsou záporné po celé délce oblouku. Maximálních kladných hodnot je dosaženo v prutech vrcholových.

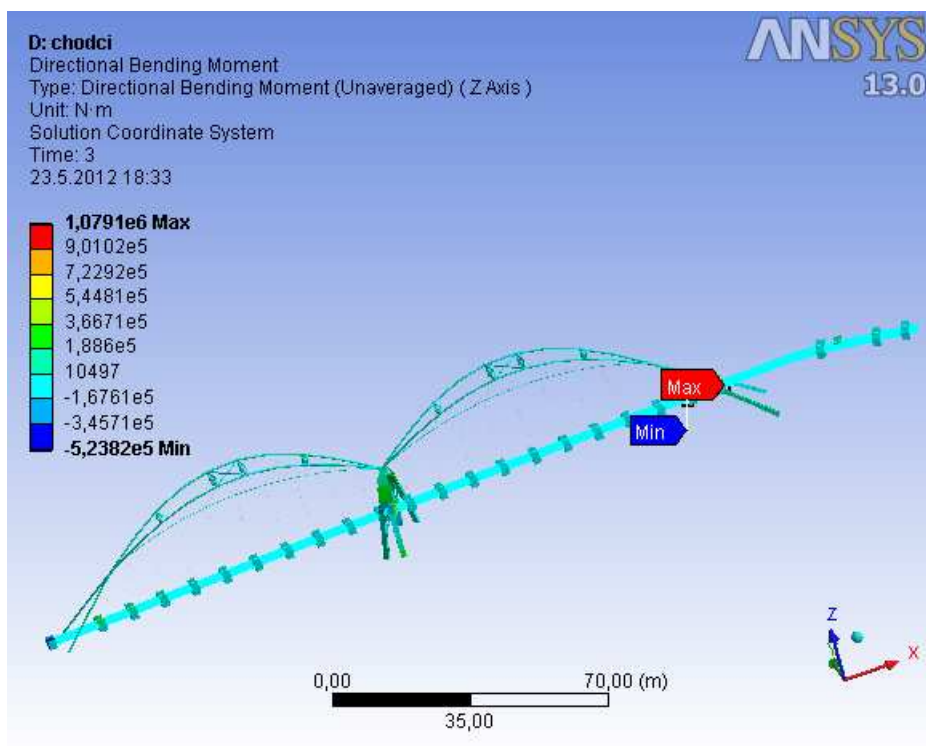
Velikost posouvajících sil ve směru osy z se v konstrukci pohybuje kolem nulové hodnoty. Maximální záporná i kladná hodnota posouvajících sil jsou přibližně stejné. Maximální záporná hodnota se nachází na vrcholku centrálního oblouku, maximální kladná hodnota pak v místě vetknutí vyložené části mostovky.

Obdobně jako u posouvajících sil se i velikost ohybového momentu ve směru osy z pohybuje kolem nulové hodnoty. Maximální kladná hodnota ohybového momentu se nachází v místě spojení obloukové konstrukce a mostovkou a maximální záporná hodnota na mostovce, v bezprostřední blízkosti spojení obloukové konstrukce s mostovkou.

Největší posuny v konstrukci byly zaznamenány v oblasti vyložení mostovky, kde byla zjištěna maximální záporná hodnota ve směru osy z . Maximální kladná hodnota byla zjištěna v oblasti křížení oblouků. Nejmenší přetvoření byla zjištěna v oblastech vetknutí.



Obr. 6.2.a Osové síly



Obr. 6.2.b Ohybové momenty ve směru osy z

6.3 Zatěžovací stav vítr

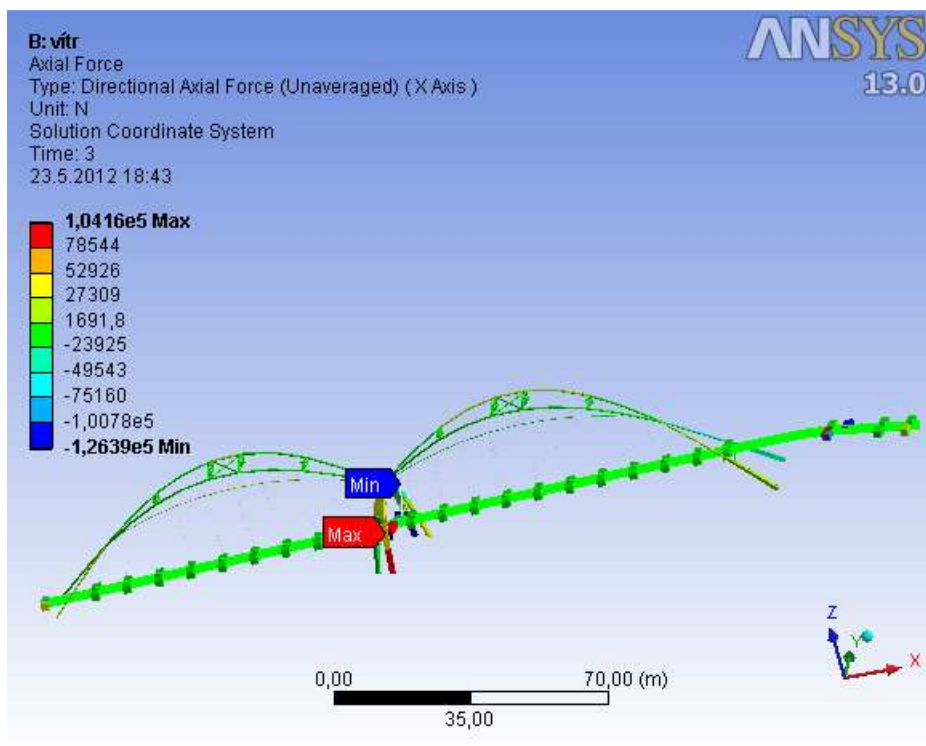
Hodnota napětí vyvozeného větrem se ve většině konstrukce pohybuje kolem nuly. Maximálních kladných i záporných hodnot je dosaženo v pomocných ramenech podpírajících mostovku, umístěných na centrálním oblouku. Maximální kladná hodnota se objevuje v části centrální opěry vystavené působení větru a maximální záporná hodnota v části centrální opěry, která působení větru vystavena nebyla.

Osové síly jsou ve většině konstrukce konstantní. V blízkosti vetknutím jejich hodnota mění. Maximálních kladných hodnot je dosaženo ve vetknutí centrálního oblouku, které bylo vystaveno účinkům větru. Maximální záporná hodnota pak byla zjištěna ve vetknutí centrálního oblouku, které nebylo vystaveno účinkům větru.

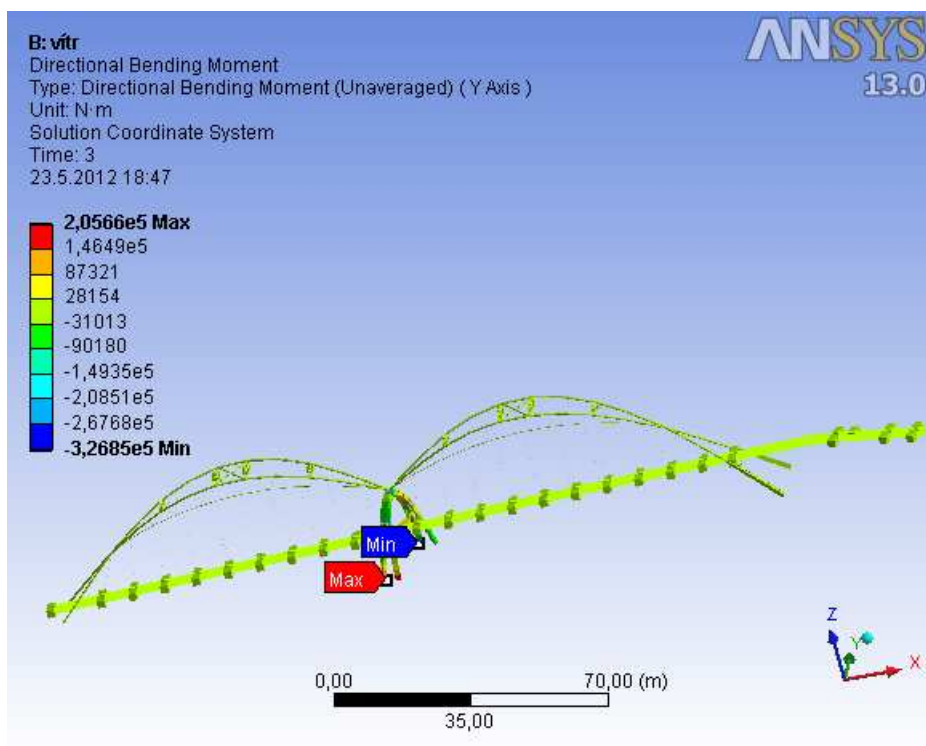
Velikost posouvajících sil ve směru osy y je ve většině konstrukce stejná a dosahuje maximální kladné hodnoty. Maximální záporná posouvajících sil se nachází na začátku mostu.

Velikost ohybového momentu ve směru osy y se pohybuje kolem nulové hodnoty. Maximální kladná i záporná hodnota ohybového momentu se nachází ve vetknutí centrálního oblouku. Maximální kladná hodnota byla zjištěna ve vetknutí, které bylo vystaveno účinkům větru, maximální záporná hodnota pak ve vetknutí, které účinkům větru vystaveno nebylo.

Největší posuny v konstrukci byly zaznamenány v polovině rozpětí polí, kde byla zjištěna maximální záporná hodnota ve směru osy z . Maximální kladná hodnota byla zjištěna v oblasti křížení oblouků. Velká přetvoření se objevila také v oblasti vrcholu oblouku. Nejmenší přetvoření byla zjištěna v oblastech vetknutí.



Obr. 6.3.a Osově síly



Obr. 6.3.b Ohybové momenty ve směru osy y

6.4 Zatěžovací stav námraza

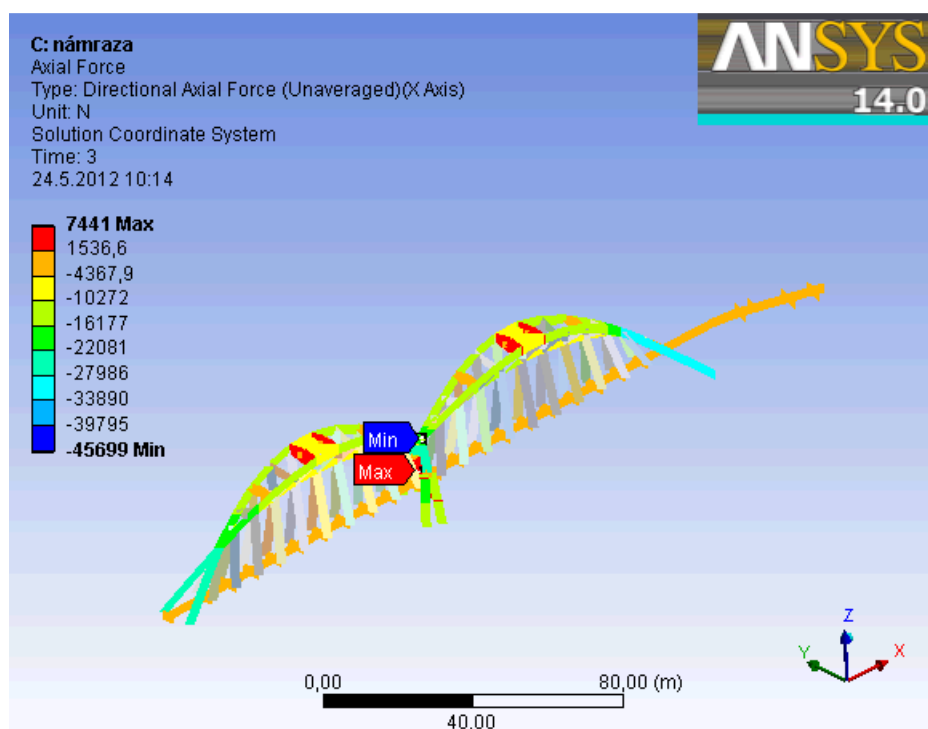
Zatížení námrazou vytváří v konstrukci převážně tlak. Největší hodnota tlaku se objevuje na vrcholcích obloukových konstrukcí, v místě vrcholových ztužidel je tato hodnota zmenšena. Největší tah v konstrukci vykazují příhradoviny na vrcholu konstrukce.

Osové síly jsou po délce mostovky konstantní, zatímco po délce oblouku se mění. V blízkosti vetknutí dosahují maximálních záporných hodnot a jsou záporné po celé délce oblouku. Maximálních kladných hodnot je dosaženo v prutech vrcholových.

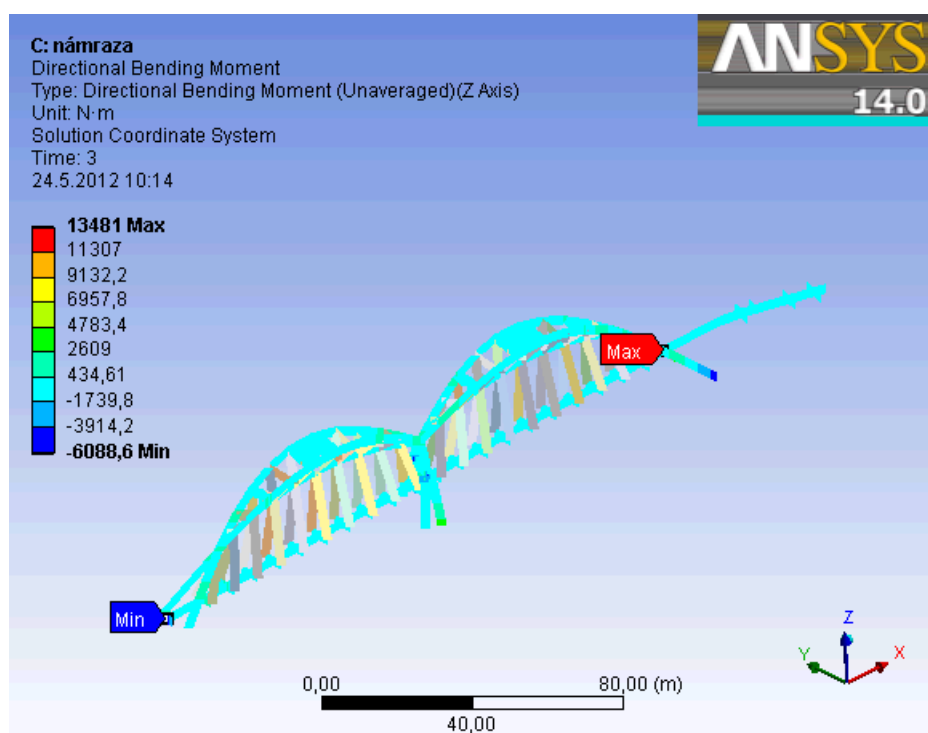
Velikost posouvajících sil ve směru osy z se v konstrukci pohybuje kolem nulové hodnoty. Maximální záporná i kladná hodnota posouvajících sil jsou přibližně stejné. Obě tyto hodnoty se nacházejí v oblasti vrcholu centrálního oblouku.

Obdobně jako u posouvajících sil se i velikost ohybového momentu ve směru osy z pohybuje kolem nulové hodnoty. Maximální záporná hodnota ohybového momentu se nachází v blízkosti podpory na začátku mostu a maximální kladná hodnota v místě spojení obloukové konstrukce s mostovkou.

Největší posuny v konstrukci byly zaznamenány v oblasti křížení oblouků, kde byla zjištěna maximální záporná hodnota ve směru osy z . Maximální kladná hodnota byla zjištěna v oblasti centrálního oblouku. Tato hodnota byla velice blízká nule. Nejmenší přetvoření byla zjištěna v oblastech vetknutí.



Obr. 6.4.a Osové síly



Obr. 6.4.b Ohybové momenty ve směru osy z

6.5 Přehled vyhodnocení zatěžovacích stavů

Zatěžovací stav	Napětí Max [MPa]	oblast	Napětí Min [MPa]	oblast
Vlastní tíha	16,33	Vrcholová příhradovina	-65,33	Vrchol oblouku mimo oblast ztužení
Chodci	7,96	Vrcholová příhradovina	-19,81	Vrchol oblouku mimo oblast ztužení
Vítr	2,07	Centrální opěra zat. větrem	-3,80	Centrální opěra zat. větrem
Námraza	0,11	Vrcholová příhradovina	-0,41	Vrchol oblouku mimo oblast ztužení

Tab. 6.5.a Vyhodnocení napětí

Zatěžovací stav	Osová síla Max [kN]	oblast	Osová síla Min [kN]	oblast
Vlastní tíha	1105	Vrcholová příhradovina	-5228	Styk oblouků
Chodci	271	Vrcholová příhradovina	-1616	Styk oblouků
Vítr	104	Vetknutí centr. opěry zat. větrem	-126	Vetknutí centr. opěry zat. větrem
Námraza	7	Vrcholová příhradovina	-46	Styk oblouků

Obr. 6.5.b Vyhodnocení osových sil

Zatěžovací stav (směr)	Ohybový moment Max [kNm]	oblast	Ohybový moment Min [kNm]	oblast
Vlastní tíha (z)	2126	Propojení oblouků s mostovkou	-1050	Začátek mostu
Chodci (z)	1079	Propojení oblouků s mostovkou	-524	Bezprostředně u propojení oblouků s mostovkou
Vítr (y)	206	Vetknutí centr. opěry zat. větrem	-327	Vetknutí centr. opěry zat. větrem
Námraza (z)	13	Propojení oblouku s mostovkou	-6	Začátek mostu

Obr. 6.5.c Vyhodnocení ohybových momentů

Zatěžovací stav (směr)	Posun Max [m]	oblast	Posun Min [m]	oblast
Vlastní tíha (z)	0,038	Křížení oblouků	-0,078	½ rozpětí pole
Chodci (z)	0,012	Křížení oblouků	-0,034	Vyložení mostovky
Vítr (y)	0,015	Vrchol oblouku	-7E-4	Vetknutí
Námraza (z)	2E-5	Vetknutí	-3E-4	Krajní táhla

Obr. 6.5.d Vyhodnocení posunů

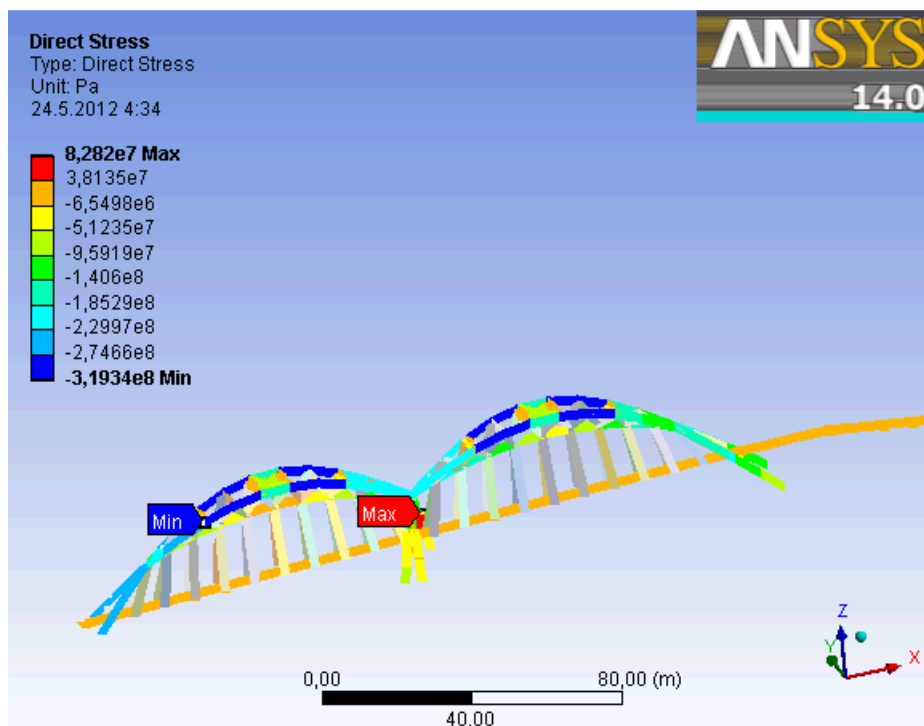
Kapitola 7

Kombinace zatížení

Po výpočtu jednotlivých zatěžovacích stavů byly provedeny jejich kombinace. Byly vytvořeny čtyři kombinace zatěžovacích stavů. Ve dvou kombinacích byly uvažovány všechny zatěžovací stavy, v jednom případě bylo jako hlavní užité zatížení definováno zatížení chodci, v druhém případě zatížení větrem. Další dvě kombinace byly vytvořeny tak, aby vznikly maximální účinky ve směru osy y a ve směru osy z . Do kombinace uvažující maximální účinky ve směru osy y byla uvažována pouze vlastní tíha a zatížení větrem, do kombinace uvažující maximální účinky ve směru osy z byla uvažována zatížení vlastní tíhou a zatížení chodci. Jednotlivým zatěžovacím stavům byly přiřazeny příslušné kombinační součinitele.

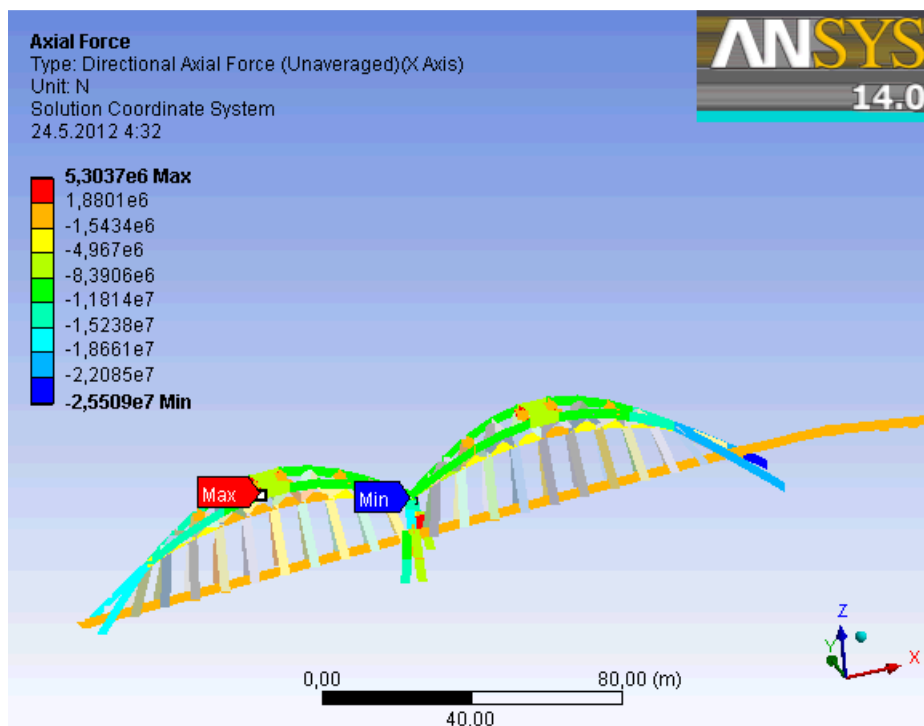
7.1 Porovnání kombinací

Napětí vyvozená kombinacemi uvažujícími jako hlavní zatížení chodci i větrem dosahovala kladných hodnot v případě mostovky, největších kladných hodnot v oblasti příhradovin na vrcholu oblouku a záporných hodnot po délce oblouku, maximálních záporných hodnot pak v oblasti vrcholu oblouku. Tytéž výsledky byly zjištěny u kombinace uvažující maximální účinek ve směru osy z . V těchto třech případech byly i hodnoty napětí velmi podobné. V případě kombinace uvažující maximální účinky ve směru osy y byl průběh napětí obdobný, ale hodnoty byly přibližně poloviční.



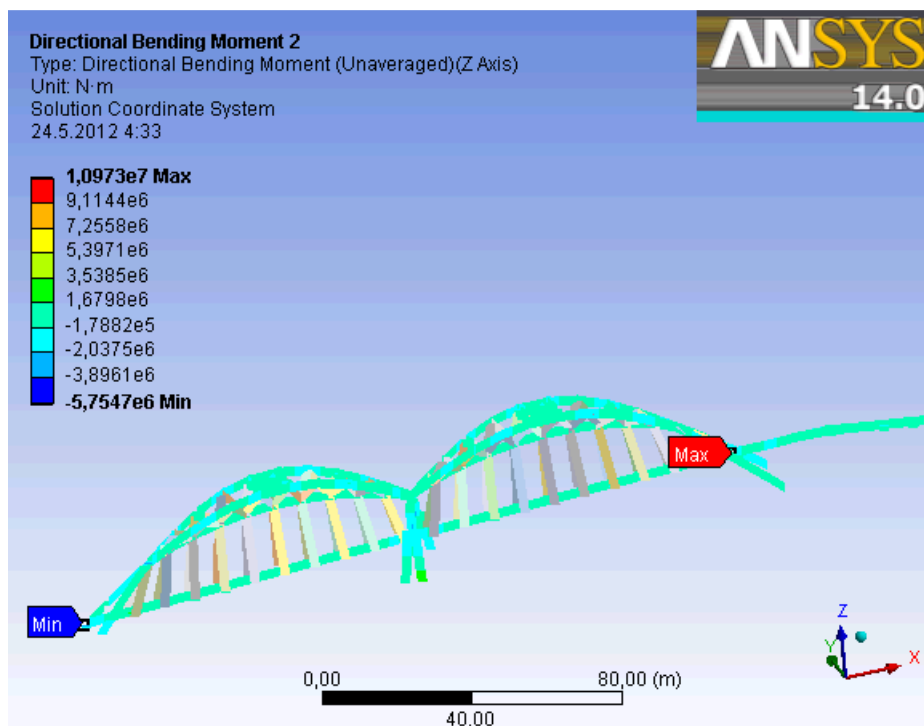
Obr. 7.1.a Průběh napětí

Osové síly vyvozené kombinacemi uvažujícími jako hlavní zatížení chodci i větrem dosahovaly kladných hodnot v případě mostovky, největších kladných hodnot v oblasti příhradovin na vrcholu oblouku a vrcholových příhradovin a záporných hodnot po délce oblouku, maximálních záporných hodnot pak v oblasti vetknutí a na styku oblouků. Tytéž výsledky byly zjištěny u kombinace uvažující maximální účinek ve směru osy z. V těchto třech případech byly i hodnoty osových sil velmi podobné. V případě kombinace uvažující maximální účinky ve směru osy y byl průběh osových sil obdobný, ale hodnoty byly asi o 40% menší.



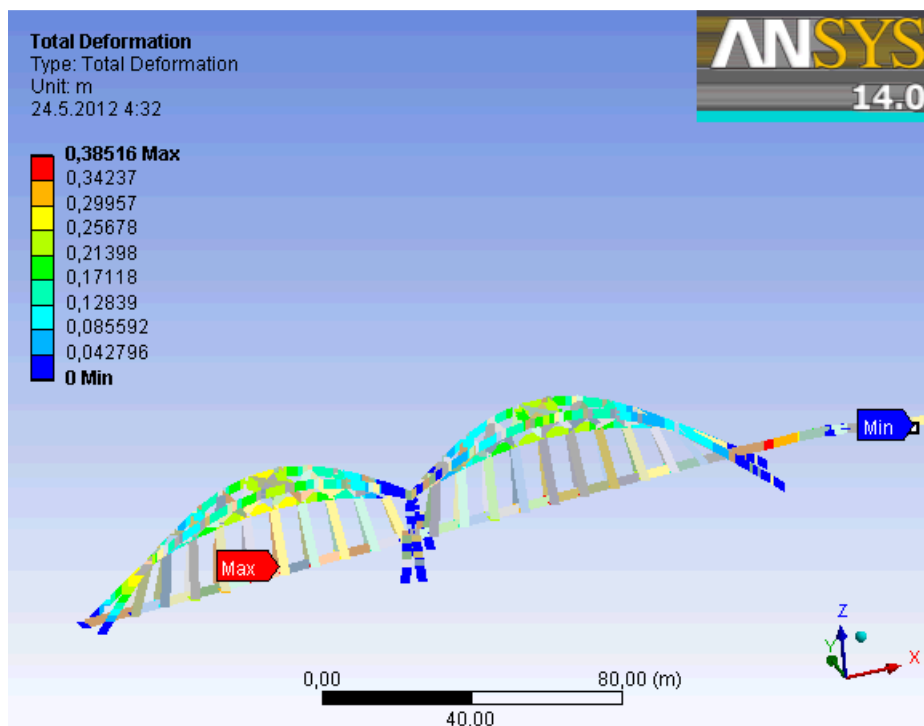
Obr. 7.1.b Průběh osových sil

Ohybové momenty ve směru osy z vyvozené kombinacemi uvažujícími jako hlavní zatížení chodci i větrem dosahovaly záporných hodnot na většině konstrukce, maximální záporné hodnoty byly zjištěny na začátku mostu a kladných hodnot v místě spojení oblouků s mostovkou. Tytéž výsledky byly zjištěny u kombinace uvažující maximální účinek ve směru osy z. V těchto třech případech byly i hodnoty ohybových momentů velmi podobné. V případě kombinace uvažující maximální účinky ve směru osy y byl průběh ohybových momentů obdobný, ale hodnoty byly menší.



Obr. 7.1.c Průběh ohybových momentů

Celkové posuny vyvozené kombinacemi uvažujícími jako hlavní zatížení chodci i větrem dosahovaly maximálních hodnot v polovině rozpětí pole. Tytéž výsledky byly zjištěny u kombinace uvažující maximální účinek ve směru osy z. V těchto třech případech byly i hodnoty posunů velmi podobné. V případě kombinace uvažující maximální účinky ve směru osy y byl průběh celkových posunů obdobný, ale hodnoty byly přibližně poloviční. Ve směru osy y byla zjištěna maximální hodnota posunu u vrcholu oblouku a nejmenší hodnota u křížení oblouků a v místě vetknutí.



Obr. 7.1.d Průběh celkových posunů

Ze získaných hodnot je patrné, že největší účinek ve všech kombinacích má zatížení vlastní tíhou a že se kombinace uvažující jako hlavní zatížení chodci a větrem vzájemně výrazně neliší.

Kapitola 8

Závěr

V bakalářské práci byl proveden statický výpočet obloukové mostní konstrukce o dvou polích s mostovkou zavěšenou na táhlech. Byl vytvořen geometrický model konstrukce, každému prvku byl přiřazen příslušný průřez a materiál, na kterém byla automaticky vygenerována síť konečných prvků, čímž vznikl model výpočtový. Následně byla definována zatížení působící na konstrukci, byl proveden výpočet, kombinace a vyhodnocení výsledků.

Geometrický model konstrukce byl volen s ohledem na dimenze prvků jako prutový. Rozměry konstrukce byly převzaty z náčrtu. Každému prvku geometrie byl přiřazen průřez a také materiálové charakteristiky. Byly použity celkem čtyři typy materiálů s různými parametry, tři ocelové a jeden betonový. Po vygenerování sítě konečných prvků vznikl numerický model. Síť byla vygenerována automaticky, byly provedeny jen malé úpravy sítě týkající se dělení lanových prvků.

Byly definovány celkem čtyři zatěžovací stavy, vlastní tíha, chodci, vítr a námraza. Vlastní tíha byla definována průřezy prvků, materiálovými charakteristikami a hodnotou tíhového zrychlení. Užitným zatížením chodci byla zatížena pouze mostovka ve směru osy z. Hodnota tohoto zatížení byla uvažována $-30\,000\text{ Nm}^{-1}$. Zatížení od větru se uvažovalo ve směru osy y. Větrém byly zatíženy pouze konstrukce oblouků a mostovka. Na mostovku působil vítr o síle 1687 Nm^{-1} a na obloukové konstrukce 60 Nm^{-1} . Námraza působila ve směru osy z. Zatížení námrazou bylo definováno opět jen na mostovku a na obloukové konstrukce. Na mostovku byla vyvozena síla -259 Nm^{-1} , na oblouky pak síla -193 Nm^{-1} .

Napětí v konstrukci vzniklá od zatěžovacích stavů působících ve směru osy z měla vždy maximální kladnou hodnotu v oblasti příhradovin na vrcholu oblouku a maximální zápornou hodnotu na vrcholku oblouků, v místě ztužení oblouku byla však tato hodnota snížena. Největší hodnoty napětí byly vyvozeny vlastní tíhou, nejmenší pak zatížením od námrazy. Zatížení větrem působící ve směru osy y, vyvolalo maximální záporné i kladné napětí v oblasti pomocných ramen, podle toho jak ramena byla či nebyla vystavena působení větru.

Osové síly v konstrukci vzniklé od zatěžovacích stavů působících ve směru osy z měly vždy maximální kladnou hodnotu v prutech vrcholové příhradoviny a maximální zápornou hodnotu na styku oblouků. Největší hodnoty osových sil byly vyvozeny vlastní tíhou, nejmenší pak zatížením od námrazy. Zatížení větrem působící ve směru osy y, vyvodilo maximální záporné i kladné osové síly ve vetknutí centrální opěry, podle toho jak vetknutí byla či nebyla vystavena působení větru.

Ohybové momenty ve směru osy z v konstrukci vzniklé od zatěžovacích stavů působících ve směru osy z měly vždy maximální kladnou hodnotu v oblasti spojení oblouku s mostovkou a maximální zápornou hodnotu na začátku mostu a v oblasti bezprostředně u spojení oblouku s mostovkou. Největší hodnoty ohybových momentů byly vyvozeny vlastní tíhou, nejmenší pak zatížením od námrazy. Zatížení větrem působící ve směru osy y, vyvodilo maximální záporné i kladné ohybové momenty ve směru osy y ve vetknutí centrální opěry, podle toho jak vetknutí byla či nebyla vystavena působení větru.

Posuny v konstrukci vzniklé od zatížení chodci a vlastní tíhou měla maximální kladnou hodnotu v oblasti křížení oblouků. Maximální záporná hodnota byla zjištěna v případě vlastní tíhy v polovině rozpětí pole a v případě chodci v místě vyložení mostovky. Zatížení námrazou vyvodilo na konstrukci jen velmi malé posuny, největší kladná hodnota byla zjištěna v oblasti vetknutí, největší záporná pak v krajních táhlech. Největší hodnoty deformací byly vyvozeny vlastní tíhou, nejmenší pak zatížením od námrazy. Zatížení větrem působící ve směru osy y, vyvodilo maximální záporné posuny v oblasti vetknutí a maximální kladné deformace na vrcholu oblouků.

V konstrukci byly definovány celkem čtyři typy kombinací. Dvě kombinace uvažovaly ve výpočtu všechny zatěžovací stavy, lišily se ale definicí hlavního užitého zatížení. Další dva zatěžovací stavy byly sestaveny tak, aby vyvozovaly maximální účinky ve směru osy z a ve směru osy y. Nejhorší účinek měly kombinace uvažující všechny zatěžovací stavy, přičemž rozdíl mezi jednotlivými kombinacemi není nijak výrazný, protože největší účinek zatížení prakticky ve všech kombinacích měla vlastní tíha.

Seznam použitých zdrojů

- [1] ČSN EN 1991 – 1 Zatížení konstrukcí
- [2] ČSN EN 1992 – 1 Navrhování betonových konstrukcí
- [3] ČSN EN 1993 – 1 Navrhování ocelových konstrukcí
- [4] ČSN 73 0035 Zásady navrhování a zatížení konstrukcí
- [5] ANSYS, Inc., Theory, Release 13.0, 2010
- [6] Hughes T.J.R. The finite element method, linear statics and dynamic finite element analysis, Prentice – Hall International, ISBN 0-13-317017-9

Seznam použitých symbolů

ρ	objemová hmotnost
α	součinitel tepelné roztažnosti
E	Youngův modul pružnosti
ν	Poissonův součinitel
A_{ref}	referenční plocha průřezu
$v_{b,0}$	základní rychlost větru
K_r	součinitel terénu
σ_v	směrodatná odchylka turbulence
ρ_v	měrná hmotnost vzduchu
q_b	základní dynamický tlak větru
z	výška konstrukce nad terénem
C_r	součinitel drsnosti terénu
v_m	střední rychlost větru
l_v	intenzita turbulence
q_p	maximální dynamický tlak
C	součinitel zatížení větrem
C_e	součinitel expozice
$C_{f,y}$	součinitel sil ve směru y
K_I	součinitel turbulence
C_0	součinitel orografie
z_0	parametr drsnosti terénu
z_{0II}	parametr drsnosti terénu pro kategorii II

F_w	zatížení mostu větrem
tg_1	základní tloušťka námrazy
χg_1	součinitel výšky
μg_1	součinitel tvaru
γg_1	součinitel zatížení námrazou
ρg_1	měrná hmotnost námrazy
h	výška průřezu konstrukce
vg_1	normové zatížení námrazou
q_1	účinek zatížení námrazou
d	průměr kruhového profilu

Seznam obrázků a tabulek

Obr. 2.1.	Architektonické schéma obloukové mostní konstrukce	11
Obr. 2.2.	Výpočtový prutový model	12
Obr. 3.4.1.	Konečný prvek BEAM188	14
Obr. 3.4.2.	Konečný prvek LINK10	15
Obr. 3.4.3.	Konečný prvek BEAM44	15
Obr. 5.1.	Vygenerovaná síť	17
Obr. 5.2.1.a	Průřez betonové části mostovky	19
Obr. 5.2.1.b	Průřez ocelové části mostovky	19
Tab. 5.2.2.a	První materiálové charakteristiky oceli	20
Tab. 5.2.2.b	Druhé materiálové charakteristiky oceli	21
Tab. 5.2.2.c	Třetí materiálové charakteristiky oceli	21
Tab. 5.2.2.d	Materiálové charakteristiky betonu	22
Tab. 5.2.2.e	Použité průřezy	22
Obr. 5.3.2.	Průřez obloukové mostní konstrukce	28
Obr. 6.1.a	Osové síly	33
Obr. 6.1.b	Ohybové momenty ve směru osy z	33
Obr. 6.2.a	Osové síly	35
Obr. 6.2.b	Ohybové momenty ve směru osy z	35
Obr. 6.3.a	Osové síly	37

Obr. 6.3.b	Ohybové momenty ve směru osy y	37
Obr. 6.4.a	Osové síly	39
Obr. 6.4.b	Ohybové momenty ve směru osy z	39
Tab. 6.5.a	Vyhodnocení napětí	40
Tab. 6.5.b	Vyhodnocení osových sil	40
Tab. 6.5.c	Vyhodnocení ohybových momentů	41
Tab. 6.5.d	Vyhodnocení posunů	41
Obr. 7.1.a	Průběh napětí	43
Obr. 7.1.b	Průběh osových sil	44
Obr. 7.1.c	Průběh ohybových momentů	45
Obr. 7.1.d	Průběh celkových posunů	46