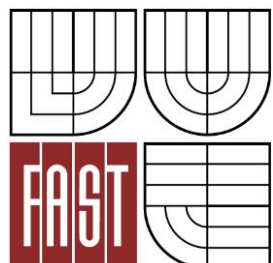




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV STAVEBNÍ MECHANIKY

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF STRUCTURAL MECHANICS

ANALÝZA OCELOVÉ KONSTRUKCE MOSTU METODOU KONEČNÝCH PRVKŮ NA ÚČINKY STATICKÝCH ZATÍŽENÍ

ANALYSIS OF THE STEEL STRUCTURE OF THE BRIDGE BY FEM TO THE ACTION OF STATIC LOAD

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ONDŘEJ SKORUNKA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. VLASTISLAV SALAJKA, CSc.



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 Ondřej Skorunka

Název Analýza ocelové konstrukce mostu metodou konečných prvků na účinky statických zatížení

Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Vlastislav Salajka, CSc.

Datum zadání bakalářské práce 30. 11. 2013

Datum odevzdání bakalářské práce 30. 5. 2014

V Brně dne 30. 11. 2013

.....
prof. Ing. Drahomír Novák, DrSc.
Vedoucí ústavu

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

Podklady a literatura

- [1] M. L. Bucelem, K. J. Bathe, The Mechanics of Solids and Structures – Hierarchical Modeling and the Finite Element Solution, Springer, 2011
- [2] Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L. Finite Element Method (5th Edition): Volume 1-3, Elsevier, 2000
- [3] Bathe, K., J. and Wilson, Numerical Methods in Finite Element Analysis Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1976
- [4] Dokumentace k programu ANSYS Release 14.5
- [5] Eurokód 1: Zatížení konstrukcí. Část 2: Zatížení mostů dopravou, ČSN EN 1991-2, červenec 2005
- [6] Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla pro pozemní stavby, ČSN EN 1993-1-1, prosinec 2006
- [7] Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-9: Únava, ČSN EN 1993-1-9, září 2006
- [8] Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 2: Ocelové mosty, ČSN EN 1993-2, leden 2008
- [9] Výkresová dokumentace

Zásady pro vypracování

V souladu s výkresovou dokumentací sestavte metodou konečných prvků výpočtový model pro statickou analýzu ocelové mostní konstrukce. Při analýze uvažujte statická zatížení v souladu s platnými normami. Statickou odezvu řešte s vlivem napjatosti a jako geometricky nelineární soustavu. Vyhodnocení proveďte na základě vybraných kombinací zatížení. Pro výpočty použijte programový systém ANSYS.

Předepsané přílohy

.....
doc. Ing. Vlastislav Salajka, CSc.
Vedoucí bakalářské práce

Abstrakt

Mostní konstrukce patří mezi nejnáročnější inženýrská díla. Plní důležitou společenskou a ekonomickou funkci při rozvoji daného území. Z tohoto hlediska je nutné věnovat značnou pozornost procesu návrhu, analýzy, realizace a také provozu. Tato práce se zabývá statickou analýzou prostorově zakřivené, nesymetrické a zavěšené lávky pro pěší a cyklisty. První část je věnována analýze deformací konstrukce, zatímco druhá část je zaměřena na analýzu vybraných částí konstrukce z hlediska jejich namáhání.

Klíčová slova

lávka, velké deformace, zatížení, mezní stavy

Abstract

The structures of bridges are one of the most demanding engineering structures. They fulfill an important social and economic role in the development of the given territory. From this perspective, it is necessary to pay close attention to the process of design, analysis, realization and service. This thesis deals with the static analysis of spatially curved and asymmetrical suspended foot bridge for pedestrians and cyclists. The first part is devoted to the analysis of structural deformation, while the second part is focused on the analysis of selected parts of the structure in terms of its stress.

Keywords

footbridge, large deformations, loads, limit states

...

Bibliografická citace VŠKP

Ondřej Skorunka *Analýza ocelové konstrukce mostu metodou konečných prvků na účinky statických zatížení*. Brno, 2014. 86 s., 47 s. příl.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební mechaniky. Vedoucí práce doc. Ing. Vlastislav Salajka, CSc.

Prohlášení:

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

V Brně dne 30.5.2014

.....
podpis autora
Ondřej Skorunka

Poděkování:

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Vlastislavu Salajkovi, CSc. za příkladné vedení, věnovaný čas při konzultacích, rady, trpělivost a vstřícný přístup v průběhu celého řešení této práce.

Děkuji také Ing. Petrovi Hradilovi, Ph.D. za poskytnuté konzultace a věnovaný čas.

V neposlední řadě děkuji svým blízkým za toleranci a podporu, bez které bych tuto práci nemohl vypracovat.

OBSAH

1 Popis konstrukce	2
1.1 Popis nosnosných částí lávky	2
1.2 Fáze výstavby	5
2 Výpočtový model konstrukce	7
2.1 Konečné prvky modelu	7
2.2 Vlastnosti modelu	12
3 Statická analýza konstrukce	18
3.1 Teorie výpočtu	18
3.2 Zatěžovací stavy	20
3.3 Vyhodnocení mezního stavu použitelnosti	24
3.4 Vyhodnocení mezního stavu únosnosti	31
4 Závěr	34
5 Seznam použitých zdrojů	36
6 Seznam tabulek	37
7 Seznam grafů	37
8 Seznam obrázků	38
9 Seznam použitých zkratk a symbolů	38
10 Přílohy	40

1 POPIS KONSTRUKCE

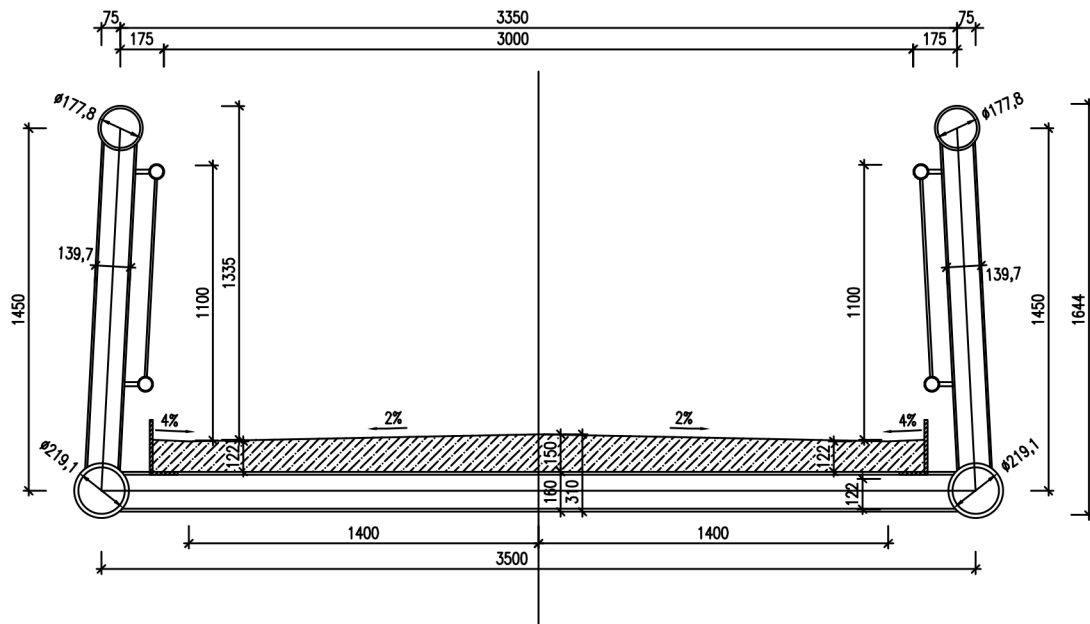
Zkoumaná lávka pro pěší a cyklisty je řešena jako zavěšená ocelová mostní konstrukce s prefabrikovanou železobetonovou mostovkou. Konstrukce má celkem čtyři pole s rozpětími 12,054 m, 90,405 m, 14,063 m a 16,072 m. Celková délka lávky je tedy 132,594 m. Směrově je lávka v 1. poli a přibližně ze tří čtvrtin 2. pole v přímé, zbytek 2. pole, 3. a 4. pole je v pravotočivém oblouku o poloměru 118,4 m. Výškově je lávka ve vrcholovém oblouku s poloměrem zaoblení 325 m a navazujících těčnách o sklonech přibližně 8,3 % a 7,7 %.

1.1 Popis nosných částí lávky

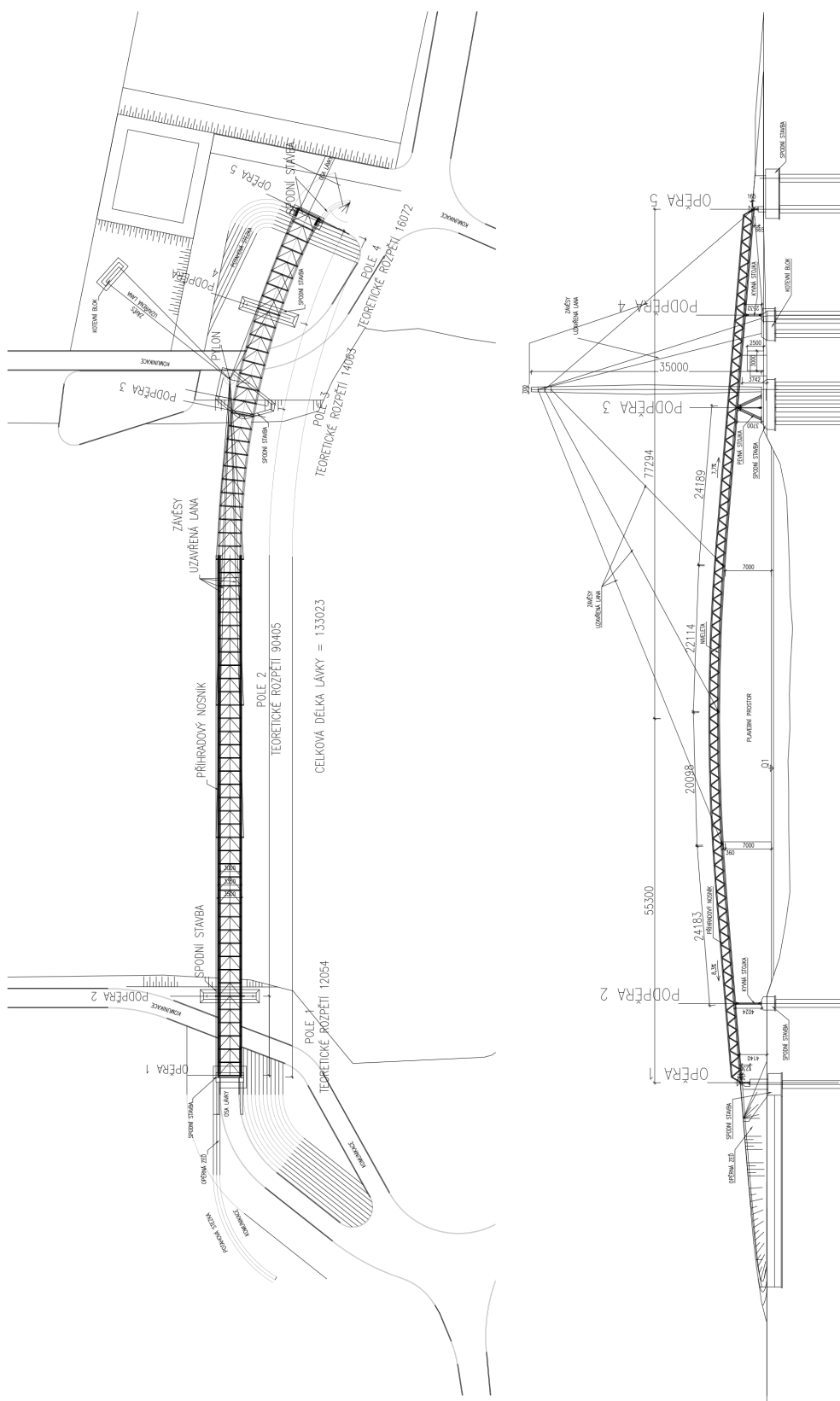
Lávka má světlou šířku 3 m. Z konstrukčního hlediska se jedná o dolní mostovku, použitý materiál je ocel S355. Hlavní nosníky jsou příhradové, svařené z ocelových trubek a jsou ukloněny k sobě. V úrovni dolních pasů jsou od sebe osově vzdáleny 3,5 m a v úrovni horních pasů 3,35 m, výška nosníků je 1644 mm. Mezi hlavními nosíky je uložena mostovka z železobetonových prefabrikovaných panelů o rozměrech 3,09 m x 2,00 m proměnné tloušťky 122-150 mm (příčný sklon 2%) z betonu C35/45. Panely jsou uloženy do nasazených podélníků svařovaného profilu L. Podélníky jsou uloženy na ocelový rošt tvořený příčníky z I profilů s osovou vzdáleností přibližně 2 m. Mezi příčníky je z trubek provedeno vodorovné ztužidlo, které zachytává vodorovné složky ze zakřivené části lávky. Hlavní nosníky jsou v 2. poli zavěšeny třemi páry lan na pylon, který se nachází v ose přímé části na vnější straně směrového oblouku. Pylon je dále kotven párem lan do opěry 5 a párem lan mimo osu lávky. Lana mají charakteristickou pevnost 1860 MPa. Výška pylonu je 35 m, jeho vrchol se nachází 28 m nad nejvyšší bodem nivelety lávky. Trouba pylonu je proměnného průřezu. Na dolním a horním konci má trouba průměr 700 mm, odkud lineárně nabíhá do středu, kde má trouba průměr 1500 mm. Závěsy jsou na vrcholu pylonu připojeny po vzdálenostech 1 m.

Uložení hlavních nosníků je v opěře 1 a 5 provedeno z kloubově podepřených trubek, které jsou kloubově připojeny k hlavním nosníkům. Příčnému posunu je bráněno vetknutou zarážkou z uzavřené svařované profilu. Podpěra 2 a 4 je podélně posuvná, provedena je z dvojice trubek a dvojice táhel. Podpěra 3 je neposuvná, provedena je ze čtveřice trubek a dvojice táhel. Pylon je uložen kloubově. Založení všech podpor je provedeno na vrтанých pilotách.

PŘÍČNÝ ŘEZ – V POLI



Obr 1.1 Příčný řez v poli

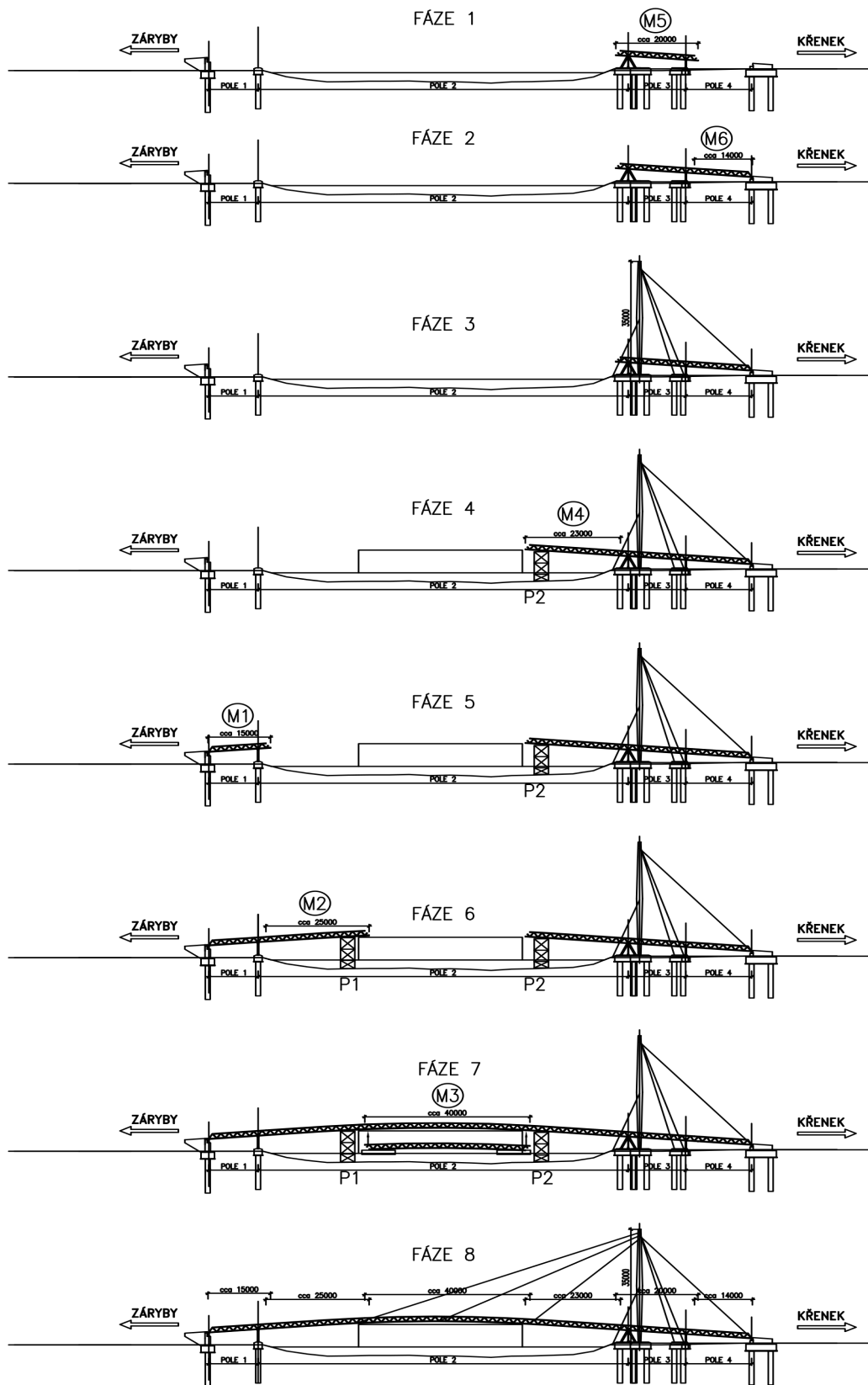


Obr 1.2 Půdorys a podélný řez lávkou

1.2 Fáze výstavby

Postup výstavby je určený projektovou dokumentací. Montáž hlavního pole mostu nad řekou je prováděno na dočasných bárkách. Výhodou tohoto postupu je možnost rozčlenit konstrukci na dostatečně malé díly, které jsou snadno dopravitelné a nejsou technologicky náročné na montáž. Nevýhodou je omezení dopravy na toku. Schéma výstavby je na obrázku 1.1. Postup výstavby probíhal následovně:

1. Montáž dílce třetího pole
2. Montáž dílce čtvrtého pole
3. Montáž pylonu, protitáhel, závěsů páté opěry
4. Vybudování levé dočasné podpěry, montáž třetího dílce druhého pole
5. Montáž dílce prvního pole
6. Vybudování levé dočasné podpěry, montáž prvního dílce druhého pole
7. Montáž druhého dílce druhého pole
8. Osazení a aktivace táhel, demontáž dočasných podpěr



Obr 1.3 Schéma montáže lávky

2 VÝPOČTOVÝ MODEL KONSTRUKCE

V programovém systému ANSYS byl podle výkresové dokumentace vytvořen prostorový model konstrukce z prutových a skořepinových prvků. V příloze 1. jsou zobrazeny ukázky vytvořeného výpočtového modelu.

2.1 Konečné prvky modelu

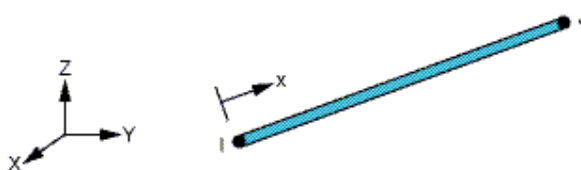
Konečné prvky byly vybrány s ohledem na účel modelu, kterým je analýza deformací a namáhání nosné konstrukce mostu. Jednotlivé konstrukční části jsou modelovány jednoduchými prvky, které přitom dostatečně vystihují chování konstrukce. V modelu byly použity tyto typy prvků (tabulka 2.1).

Konečný prvek	Počet uzlů	Stupně volnosti v uzlu	Použití v modelu
LINK180	2	u_x, u_y, u_z	závěsy, táhla a stojky opěr
BEAM188	2	$u_x, u_y, u_z, rot_x, rot_y, rot_z$	pylon, příhradová konstrukce
SHELL181	4	$u_x, u_y, u_z, rot_x, rot_y, rot_z$	panely mostovky
SURF154	4	u_x, u_y, u_z	překrytí SHELL181
SURF156	2	u_x, u_y, u_z	překrytí BEAM188

Tabulka 2.1 Přehled použitých konečných prvků

LINK180

LINK180 je 3D prutový prvek přenášející pouze osové síly, neumí přenášet ohybové zatížení. Prvek umí také fungovat jako tahový (pokud přejde do tlaku je jeho tuhost odstraněna), nebo jako tlakový. Tento element je tedy také vhodný pro modelování lan a táhel. Je definován dvěma uzly I, J (obr. 2.1). V každém uzlu má tři stupně volnosti: posunutí ve směrech lokálních uzlových souřadnic x , y a z . Lokální osa prvku x je orientována po délce od uzlu I směrem k uzlu J. Prvek dále podporuje nelineární materiálové modely, zpevnění stavem napětí, velké deformace a další.



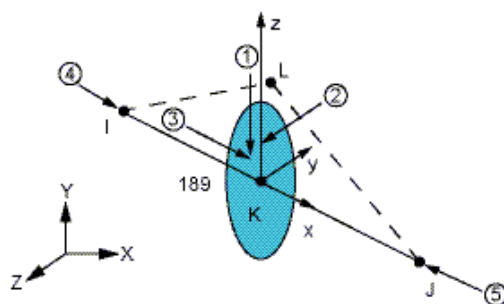
Obr. 2.1 LINK180

Vstupními parametry prvku je poloha uzlů I a J, plocha příčného řezu, která je zadávána pomocí příkazu REAL a materiálové charakteristiky. Zatížení může být zadáno uzlovým zatížením: uzlové přemístění nebo uzlové síly.

Výstupními parametry prvku jsou přemístění uzlů a odvozené výstupy prvku. Mezi hlavní odvozené výstupy patří osová pružná a nepružná přetvoření, osová napětí a osová síly. Jelikož má prvek lineární tvarové funkce, jsou tyto výstupy po délce konstantní.

BEAM188

BEAM188 je dvouuzlový 3D nosníkový prvek, má osvou, ohybovou a torzní tuhost. V každém uzlu má šest stupňů volnosti: posunutí ve směru lokálních uzlových souřadnicových os x , y , z a pootočení kolem os x , y a z . Tento prvek umožňuje zadání nesymetrických průřezů s rozdílnou geometrií v uzlech prvků, čímž se hodí pro modelování proměnného průřezu pylonu. Podporuje nelineární materialové modely, umožňuje zahrnout vliv zpevnění stavem napětí, velké deformace a další. Při nastavení prvku je možné vybrat použité tvarové funkce: lineární, kvadratické a kubické. Pro všechny prvky tohoto typu byla zvolena kubická tvarová funkce.



Obr. 2.2 BEAM188

Prvek je definován koncovými uzly I a J. Lokální kartézský souřadný systém prvku má osu x definovanou uzly I a J, orientace os y a z může být určena třetím uzlem K, který definuje rovinu x - z a tím orientaci osy y jako normálu této roviny. Pokud není uzel K definován, je orientace osy y programem zvolena tak, aby tato osa byla rovnoběžná s rovinou x - y globálního kartézského systému.

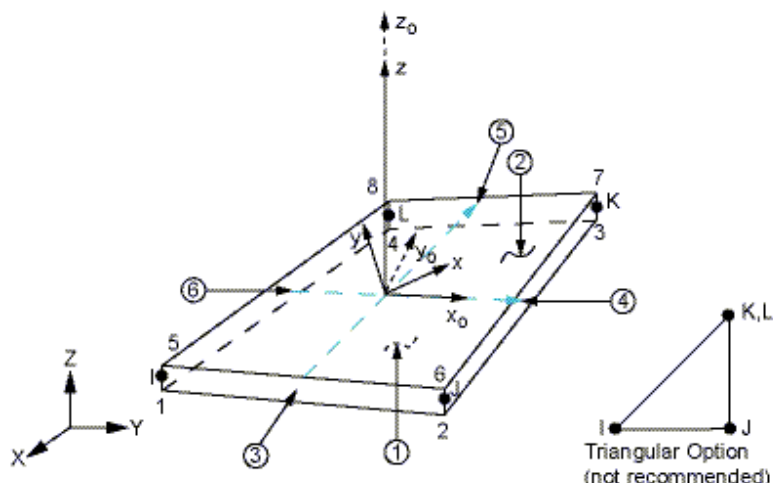
Vstupními parametry prvku jsou uzly I a J (popřípadě K), materiálové charakteristiky a průřezové charakteristiky. Průřez nosníku je definován geometrií pomocí příkazů SECTYPE a SECDATA. Je možnost si vybrat z několika předdefinovaných geometrií průřezů, nebo je možné zadat průřez numericky, popřípadě lze vytvořit libovolnou geometrii průřezu. Geometrie průřezu definuje jeho průřezové charakteristiky. Zatížení může být zadáno jako liniové zatížení nebo jako síly v uzlech, tak jak je vyznačeno na obrázku 2.2 pomocí čísel v kroužku.

Výstupními parametry prvku jsou přemístění, pootočení uzlů a odvozené výstupy prvku. Mezi hlavní odvozené výstupy patří osová napětí kterých je v každém řezu pět: osová složka v těžišti, dvě ohybové složky napětí v rovině x-z pro horní a dolní vlákna a dvě složky v rovině x-y. Tyto složky pak slouží k výpočtu maximálních a minimálních normálových napětí. Dalšími výstupy jsou: osová síla, posouvající síly (V_y , V_z), ohybové momenty (M_y , M_z), kroutící moment (M_T), pružná a nepružná přetvoření a další.

SHELL181

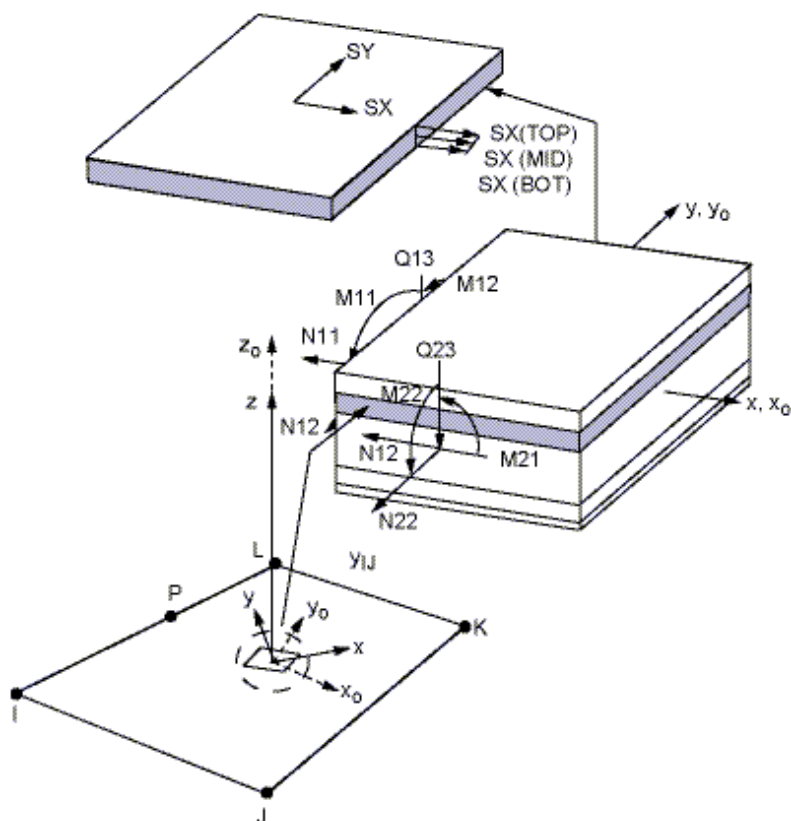
SHELL181 je skořepinový čtyřuzlový prvek s šesti stupni volnosti v každém uzlu: posunutí ve směru lokálních uzlových souřadnicových os x , y , z a pootočení kolem os x , y a z . Prvek lze přepnout na membránové chování, čímž jsou z řešení vypuštěny rotační stupně volnosti. Je možná i tříuzlová varianta (obr. 2.3). Je odvozen na teorii tlustých desek, čímž je do výpočtu zahrnuta smyková tuhost. Podporuje nelineární materiálové modely, umožňuje zahrnout vliv zpevnění stavem napětí, velké deformace a další.

Vstupními parametry prvku je poloha uzlů, materiálové charakteristiky, tloušťka, která je zadána pomocí příkazů SECTYPE a SECDATA. Jelikož prvek podporuje i výpočet vrstvených skořepin, je možné zadat několik vrstev s různou tloušťkou a materiálovými charakteristikami. V tomto modelu bude vždy uvažována pouze jedna vrstva. Zatížení může být zadáno jako plošné na plochu prvku nebo jako liniové na hraně prvku, tak jak je vyznačeno na obrázku 2.3 pomocí čísel v kroužku.



Obr. 2.3 SHELL181

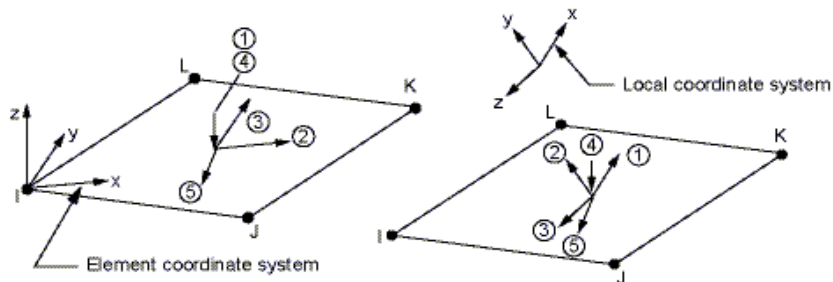
Výstupními parametry prvku jsou přemístění, pootočení uzlů a odvozené výstupy prvku. Hlavní odvozené výstupní hodnoty jsou vykresleny na obrázku 2.4. Normálová napětí jsou přes tloušťku vrstvy lineární, smykové napětí je konstatní.



Obr. 2.4 Vnitřní síly na prvku SHELL181

SURF154

SURF154 je 3D plošný čtyřuzlový nebo osmiuzlový plošný prvek. Nemá žádný nosný význam. Umožňuje zadání zatížení na plochu prvků v libovolném směru. Prvek se používá tak, že se jím překryje prvek s nosnou funkcí tak, že sdílí uzly. Podporuje velké deformace. Zatížení může být zadáno jako plošné na plochu prvku, tak jak je vyznačeno na obrázku 2.5 pomocí čísel v kroužku.

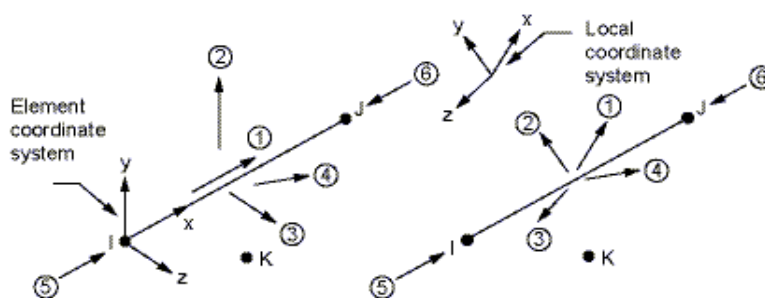


Obr. 2.5 SURF154

V modelu jsou tímto prvkem překryty prvky SHELL181, které jsou použity na modelování panelů mostovky: slouží k zatížení mostovky chodci.

SURF156

SURF156 je 3D liniový dvouuzlový nebo tříuzlový prvek. Nemá žádný nosný význam. Umožňuje zadání zatížení na liniové prvky v libovolném směru. Prvek se používá tak, že se jím překryje prvek s nosnou funkcí tak, že sdílí uzly. Podporuje velké deformace. Zatížení může být zadáno jako liniové zatížení, tak jak je vyznačeno na 2.6 pomocí čísel v kroužku.



Obr. 2.6 SUFR156

V modelu jsou tímto prvkem překryty prvky BEAM188 příhradových nosníků lávky a pylon: slouží k zadání zatížení konstrukce větrem.

2.2 Vlastnosti modelu

Dílčím částem nosné konstrukce bylo ve výpočtovém modelu přiřazeno jednotlivých konečných prvků dle tabulky 2.2

Konstrukční prvek	Konečný prvek	Vlastnosti prvku			
	ENAME	TYPE	MAT	SECNUM	REAL
Dolní pás u podpěry 3	BEAM188	1	1	1	50
Horní pás	BEAM188	2	1	2	50
Horní pás nad podpěrou 2	BEAM188	3	1	3	50
Dolní pás	BEAM188	4	1	4	50
Dolní pás zesílený	BEAM188	5	1	5	50
Dolní pás nad opěrou 5, podpěrou 3	BEAM188	6	1	6	50
Diagonály	BEAM188	7	1	7	50
Ztužení v přímé	BEAM188	8	1	8	50
Ztužení v oblouku	BEAM188	9	1	9	50
Stojka podpěry 2 a 4	LINK180	10	1	10	10
Stojka podpěry 3	LINK180	11	1	11	11
Stojka opěry 1	LINK180	12	1	12	12
Stojka opěry 5	LINK180	13	1	13	13
Příčník střední část	BEAM188	16	1	16	50
Příčník krajní část	BEAM188	17	1	17	50
Příčník zesílený	BEAM188	18	1	18	50
Podélník	BEAM188	19	1	19	50
Příčník nad opěrou 5	BEAM188	20	1	20	50
Příčník krabicový	BEAM188	21	1	21	50
Pylon dolní část	BEAM188	22	1	22	50
Pylon horní část	BEAM188	23	1	23	50
Příčná zarážka	BEAM188	24	1	24	50
Táhlo podpěry 2 a 4	LINK180	25	1	25	25
Táhlo podpěry 3	LINK180	26	1	26	26
Závěsy druhého pole	LINK180	27	3	27	27
Kotvení pylonu do opěry 5	LINK180	28	3	28	28
Kotvení pylonu	LINK180	29	3	29	29
Panely mostovky	SHELL181	30	2	30	50
Překrytí líniové	SURF156	32	50	50	50
Překrytí plošné	SURF154	33	50	50	50

Tabulka 2.2 Přiřazení konečných prvků v modelu

Nastavení vlastností konečných prvků (KEYOPT)

Tato nastavení byla mimo dále vyjmenovaných ponechána na hodnotách přednastavených programovým systémem ANSYS.

LINK180 - K2 = 1 Průřez není škálován vlivem napjatosti.

BEAM188 - K2 = 1 Průřez není škálován vlivem napjatosti.

- K3 = 3 Kubické tvarové funkce.

SURF154 - K11 = 2 Tlak definovaný vektorem je aplikován na celou plochu prvku včetně tečných složek.

SURF156 - K5 = 1 Prvek nemá orientační uzel K.

Materiálové charakteristiky konečných prvků (MAT)

V modelu byly uvažovány pouze lineární isotropní materiálové modely. Přehled materiálových charakteristik je uveden v tabulce 2.3, kde EX je modul pružnosti, PRXY je součinitel příčné kontrakce, DENS je hustota materiálu a ALPX je sečný součinitel teplotní délkové roztažnosti.

MAT	EX [Pa]	PRXY [-]	DENS [kg·m ³]	ALPX [K ⁻¹]
1	2,10E+11	0,3	7850	1,20E-05
2	3,40E+10	0,2	2500	1,00E-05
3	1,60E+11	0,3	7850	1,20E-05

Tabulka 2.3 Materiálové modely

Přehled použitých reálných konstant (REAL)

V tabulce 2.4 je výpis reálných konstant přiřazených prvkům LINK180. Ostatní prvky neumožňují zadání vlastností pomocí těchto konstant.

REAL	Konstanta	Hodnota	Význam
10	AREA	8,7637E-03	plocha průřezu
	TENSKEY	both	působení prvku ¹⁾
11	AREA	1,2916E-02	plocha průřezu
	TENSKEY	both	působení prvku ¹⁾
12	AREA	5,2708E-03	plocha průřezu
	TENSKEY	both	působení prvku ¹⁾
13	AREA	1,0207E-02	plocha průřezu
	TENSKEY	both	působení prvku ¹⁾
25	AREA	1,1946E-03	plocha průřezu
	TENSKEY	tension only	působení prvku ¹⁾
26	AREA	2,8274E-03	plocha průřezu
	TENSKEY	tension only	působení prvku ¹⁾
27	AREA	1,6475E-03	plocha průřezu
	TENSKEY	tension only	působení prvku ¹⁾
28	AREA	3,8925E-03	plocha průřezu
	TENSKEY	tension only	působení prvku ¹⁾
29	AREA	2,4894E-03	plocha průřezu
	TENSKEY	tension only	působení prvku ¹⁾

¹⁾ both – účinnost v tlaku i v tahu, tension only – účinnost jen v tahu

Tabulka 2.4 Nastavení reálných konstant

Přehled průřezů použitých v modelu (SECNUM)

Pro prvky BEAM188 byl průřezy nosníků definovány pomocí příkazu SECTYPE a SECDATA. Byly použity jak předefinované průřezy, tak průřezy uživatelsky vytvořené. V tabulce 2.5 je výpis použitých průřezů.

SECNUM	Typ průřezu	Přidaná hmota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$]
1	Uživatelský průřez	15,0
2	Trubka	15,0
3	Trubka	15,0
4	Trubka	15,0
5	Trubka	15,0
6	Trubka	15,0
7	Trubka	0
8	Trubka	0
9	Trubka	0
16	I profil	5,5
17	I profil	0
18	I profil	5,5
19	Úhelník	0
20	Uživatelský průřez	0
21	Uživatelský průřez	0
22	Trubka – náběh	0
23	Trubka – náběh	0
24	Uživatelský průřez	0
30	Deska	0

Tabulka 2.5 Typy průřezů

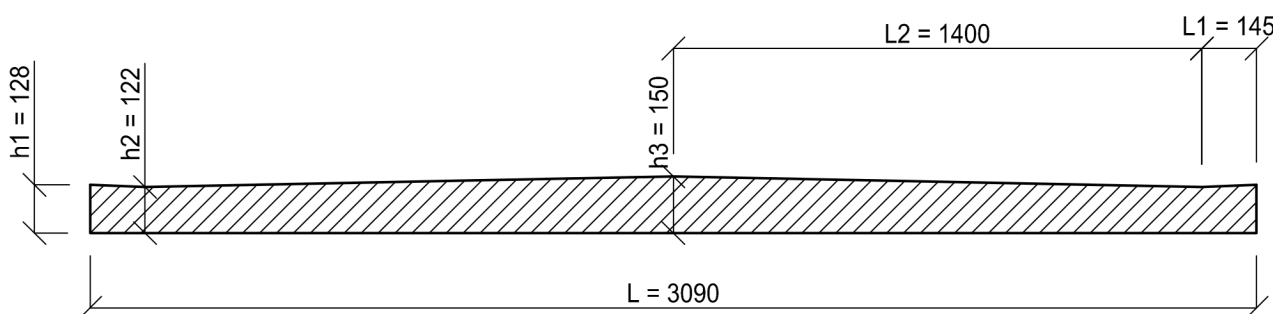
Přidaná hmota u průřezů 1-6, což jsou horní a dolní pasy hlavních příhradových nosníků, nahrazuje zatížení zábradlím, které má hmotnost 30 kg na metr délky. Přidaná hmota u profilu 16 a 18, což jsou příčníky, nahrazuje zatížení plechy (70 x 10 mm), které oddělují jednotlivé prefabrikované panely.

Geometrie a příslušné průřezové charakteristiky jednotlivých průřezů použitých v modelu jsou uvedeny v příloze 1.

Náhradní tloušťka panelu

Průřez panelu (Obr. 2.7) s proměnnou tloušťkou po šířce byl nahrazen panelem s průměrnou tloušťkou $h_{PRŮM}$, tak aby byla správně vystihnuta hmotnost panelu. Rozdíl ohybové tuhosti panelu s ohledem na jeho uložení a působení není pro tento model významný.

$$h_{PRŮM} = \frac{(h_1 + h_2) \cdot L_1 + (h_2 + h_3) \cdot L_2}{L} = \frac{(128 + 122) \cdot 145 + (128 + 150) \cdot 1400}{3090} = 134,967 \text{ mm} \quad (2.1)$$



Obr. 2.7 Průřez panelu

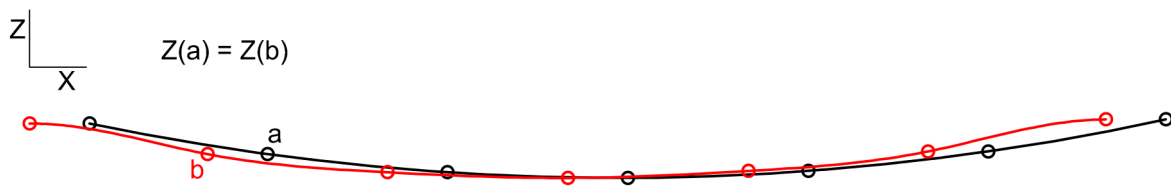
Geometrické okrajové podmínky modelu

Okrajové podmínky byly zvoleny dle zadání projektu. Uložení všech stojek opěr, podpěr, táhel a kotevních závěsů je prosté kloubové, kdy je zamezeno všem posunům (u_x, u_y, u_z). Podepření pylonu je prosté kloubové se zamezením rotace vetknutím kolem jeho svislé osy vetknutím (u_x, u_y, u_z, rot_z). Příčným zarážkám opěr jsou v uložení odebrány všechny stupně volnosti ($u_x, u_y, u_z, rot_x, rot_y, rot_z$). Sedání a tuhost podpor, které závisí na geotechnických charakteristikách podloží a způsobu založení, není uvažováno, není předmětem této práce.

Mezi další okrajové podmínky lze zahrnout vázané stupně volnosti uzlů. Byly použity na modelování spojení nasazených podélníků s příčníky. Jelikož podle dokumentace nebyly známy parametry a přesný způsob připojení, bylo zvoleno svázání jen posuvů (u_x, u_y, u_z). Do této vazby byly zahrnuty také stupně volnosti přiléhajících rohů panelů. Uložení panelů na podélníky bylo

rovněž provedeno pomocí vázaných stupňů volnosti a to pouze na posuny ve svislém směru (u_z). Příčné zarážky opěr byly svázány s příčnicí pouze v příčném směru, což vystihuje provedení tohoto spoje.

Jednou z nevýhodou řešení připojení vázanými stupni volnosti, je jejich nekonečná tuhost, stupně volnosti jsou napevno svázány. Další nevýhodou je v případě uložení desky na podélníky (Obr. 2.8), kdy dochází pouze ke svázání uzlů prvků (navíc v poloze, která si nemusí odpovídat), ale rozdílný charakter působení podélníků a panelů způsobuje protínání hran prvků mezi uzly bez jakékoliv interakce. Modelování tohoto spojení by bylo výstižnější řešením jako kontaktní úloha. Přes výše uvedené nevýhody, je pro účely tohoto modelu, tento způsob uložení brán jako dostačující. Panely nejsou předmětem posudku, slouží k vystižení tuhosti konstrukce ve vodorovném směru.



Obr. 2.8 Uložení panelů na podélníky vázanými stupni volnosti

3 STATICKÁ ANALÝZA KONSTRUKCE

Analýzou konstrukce na statické účinky se rozumí taková analýza konstrukce, která je pod vlivem časově neproměnných zatížení a konstrukce na zatížení reaguje rovněž časově neproměnnou odezvou. Z toho plyne, že se při působení statických zatížení neuplatňují setrvačné síly. Předpokladem pro výstižnou analýzu reálných konstrukcí tímto přístupem jsou tedy pouze pomalu narůstající zatížení. Skutečností však je, že naprostá většina zatížení působící na mostní konstrukce je dynamického charakteru. Do statických zatěžovacích modelů je vliv dynamických účinků zaveden pouze zvětšujícími dynamickými součiniteli.

Jelikož se jedná o konstrukci poměrně štíhlou, zavěšenou a s předpětím, u které dochází k velkým deformacím, je nutné provést výpočet geometricky nelineární, při němž dochází k sestavování podmínek rovnováhy na deformovaném modelu.

Podstatnou součástí výpočtu u konstrukcí tohoto charakteru je zahrnutí vlivů napjatosti konstrukce z montážních stávů. V případě montáže této konstrukce však nedochází k podstatným změnám okrajových podmínek, vliv počáteční napjatosti je v modelu tedy zanedbán.

3.1 Teorie výpočtu

Dále použité značení je v souladu s literaturou [1]. Rovnice rovnováhy pro statickou analýzu je možné v maticové formě zapsat jako

$$[K] \cdot \{u\} = [F] \quad (3.1)$$

nebo

$$[K] \cdot \{u\} = [F^a] + [F^r] \quad (3.2)$$

kde $[K]$ je celková matice tuhosti, $\{u\}$ vektor uzlových parametrů přemístění a $\{F\}$ celkový zatěžovací vektor, který lze rozepsat na vektor zatěžovací $\{F^a\}$ a vektor reakcí $\{F^r\}$.

Při analýze geometricky nelineární úlohy je nutno zahrnout vliv změny tuhosti konstrukce v závislosti na změně její geometrie. Matice tuhosti $[K]$ se tím pádem stává funkcí neznámých parametrů přemístění $\{u\}$ a soustava (3.1) se stává soustavou nelineárních rovnic. Celková matice tuhosti je

$$[K]=[K_0]+[S] \quad (3.3)$$

kde $[K_0]$ je materiálová matice tuhosti a $[S]$ geometrická matice tuhosti. Řešení soustavy rovnic (3.1) probíhá iteračním způsobem. Pro výpočet byla zvolena Newton-Raphsonova iterační metoda. Nastavení řešiče a konvergenční kritéria byla ponechána na hodnotách přednastavených programovým systémem ANSYS.

3.2 Zatěžovací stavy

Zatížení a zatěžovací stavy byly určeny dle norem [2],[3],[4],[5],[6].

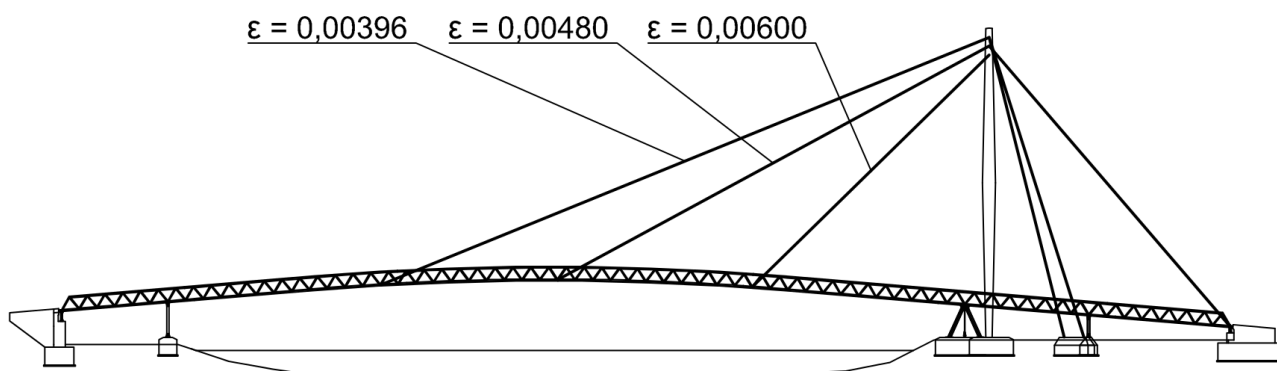
Vybrané zatěžovací stavy v charakteristických hodnotách

ZS1 – Vlastní tíha

Vlastní tíha konstrukce je v programovém systému ANSYS generována automaticky podle zadaných hustot (DENS) jednotlivých materiálových modelů a na základě geometrických charakteristik zadaných u jednotlivých konečných prvků včetně zadaných přidaných hmot (viz. Kapitola 2.2). Do účinnosti je zavedena zadáním globálního zrychlení ve směru osy z ($9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$).

ZS2 – Předpětí

Podle zadání projektu byla na závěsná lana 2.pole zadána předpětí dle obrázku 3.1. Zavedení do modelu bylo v programovém systému ANSYS pomocí příkazu INISTATE jako poměrné zkrácení na konečných prvcích závěsů.



Obr. 3.1 Předpětí závěsů druhého pole

ZS3 – Zatížení dopravou

Zatížení chodci a cyklisty bylo dle normy [4] určeno pro druhé pole dle (5.3.2.1), na zbytku konstrukce je uvažováno zatížení 5 kN/m^2 .

- 2.pole: -svislé zatížení: $q_{fk,2} = 2 + 120 / (L_{S,2} + 30) = 2 + 120 / (90 + 30) = 3 \text{ kN/m}^2$

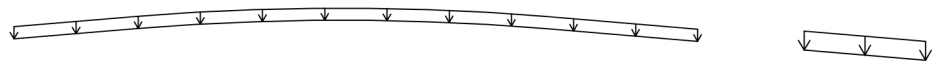
-vodorovné zatížení: $Q_{fk,2} = 0,1 \cdot q_{fk,2} = 0,1 \cdot 3 = 0,3 \text{ kN/m}^2$

- zbylá pole: -svislé zatížení: $q_{fk} = 5 \text{ kN/m}^2$

-vodorovné zatížení: $Q_{fk} = 0,1 \cdot 5 = 0,5 \text{ kN/m}^2$

Jelikož se jedná o nesymetrickou konstrukci jsou uvažovány dva směry působení vodorovné složky zatížení. Z hlediska podélného rozmístění byly vybrány tři konfigurace (Obr. 3.2).

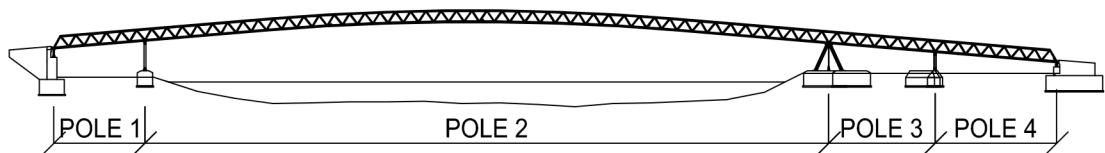
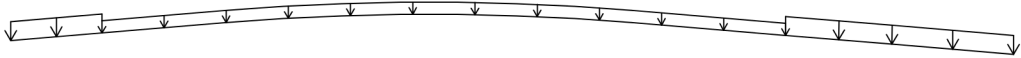
Konfigurace 3:



Konfigurace 2:



Konfigurace 1:



Obr 3.2 Podélná konfigurace zatížení dopravou

ZS4 – Vítr

Statické zatížení větrem bylo určeno podle normy [5]. Byl uvažován pouze příčný vítr kolmo na přímou čás lávky. Zatížení bylo určeno následovně:

- větrová oblast s rychlostí větru $v_b = 22,5$ m/s
 - kategorie terénu II
 - výška konstrukce nad terénem 9,5 m
 - výška NK a chodců je 310 + 1750 = 2060 mm
 - šířka nosné konstrukce 3670 mm
 - součinitel sil $c_{f,x} = 1,97$ -podle obr. 8.3
 - součinitel expozice $c_e(z) = 2,32$ -podle obr. 4.2
 - součinitel zatížení větrem $C = c_e \cdot c_{f,x} = 2,32 \cdot 1,97 = 4,57$
 - charakteristická hodnota tlaku větru na konstrukci a chodce
- $$q = 0,5 \cdot \rho \cdot v_b^2 \cdot C = 0,5 \cdot 1,25 \cdot 22,5^2 \cdot 4,57 = 1,45 \text{ kN/m}^2$$
- charakteristická hodnota tlaku větru na pylon
- $$f_w = 0,66 \text{ kNm}^2$$

Při zatížení příčným větrem jsou zatěžovány boční plochy prvního příhradového nosníku a pás chodců na mostovce o výšce 1,75 m. V zakřivené části lávky je zatížení přepočítáno na průmět podle úhlu zakřivení. Zatížení pásu chodců bylo zadáno prostřednictvím sil a ohybových momentů na uzly konečných prvků panelů v ose mostovky.

ZS5 - Teplota

Zatížení teplotou bylo určeno podle normy [6]. Zatížení bylo řešeno pouze pro jednu montážní teplotu a to 10 °C, která byla v programovém systému ANSYS zadána pomocí příkazu TREF. Jedná se o rovnoměrné zatížení teplotou zadáno je pomocí příkazu TUNIF. Extrémní teploty byly určeny následovně:

- maximální teplota vzduchu ve stínu pro místo stavby $T_{max} = +39 \text{ °C}$
- minimální teplota vzduchu ve stínu pro místo stavby $T_{min} = -31 \text{ °C}$
- maximální teplota NK $T_{e,max} = T_{max} + 16 = 39 + 16 = +55 \text{ °C}$
- minimální teplota NK $T_{e,min} = T_{min} - 3 = -31 - 3 = -34 \text{ °C}$

Kombinace zatěžovacích stavů

Kombinace zatěžovacích stavů byly určeny podle normy [2]. Pro mezní stav únosnosti byly použita kombinační pravidla 6.10a a 6.10b s tím, že kombinační pravidlo 6.10a, které navyšuje stálé zatížení, bylo vypuštěno. Dominantním zatížením na této konstrukci je zatížení proměnné, které navyšuje použité kombinační pravidlo 6.10b:

$$\sum_{j \geq 1} \xi_j Y_{G,j} G_{k,j} + Y_p P + Y_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} Y_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (6.10b)$$

Pro mezní stav použitelnosti bylo použito charakteristické kombinační pravidlo:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (6.14b)$$

V tabulce 3.1 jsou uvedeny kombinační součinitele jednotlivých zatěžovacích stavů.

Zatížení	Y_G	Y_Q	ξ	ψ_0
Vlastní tíha	1,35	-	0,85	-
Předpětí	1,00	-	-	-
Doprava	-	1,35	-	0,40
Vítr	-	1,50	-	0,30
Teplota	-	1,50	-	0,60

Tabulka 3.1 kombinační součinitele

3.3 Vyhodnocení mezního stavu použitelnosti

Na základě vypočtených kombinací zatěžovacích stavů bylo provedeno zhodnocení deformací hlavního nosníku a vrcholu pylonu.

Vybrané kombinace zatěžovacích stavů pro mezní stav použitelnosti

V následující tabulce 3.2 je seznam vybraných zatěžovacích stavů pro posouzení mezního stavu použitelnosti.

Kombinace	Vlastní tíha	Předpětí	Doprava	Vítr	Teplota	Poznámka
KZ0	1,00	1,00	-	-	-	
KZ1	1,00	1,00	1,00	-	-	Konfigurace 1+ ¹⁾
KZ2	1,00	1,00	1,00	-	-	Konfigurace 2+ ¹⁾
KZ3	1,00	1,00	1,00	-	-	Konfigurace 3+ ¹⁾
KZ4	1,00	1,00	-	1,00	-	Y+ ²⁾
KZ5	1,00	1,00	-	1,00	-	Y- ²⁾
KZ6	1,00	1,00	-	-	1,00	T+ ³⁾
KZ7	1,00	1,00	-	-	1,00	T- ³⁾
KZ8	1,00	1,00	1,00	0,30	-	Konfigurace 2+, Y+
KZ9	1,00	1,00	1,00	0,30	-	Konfigurace 3+, Y-
KZ10	1,00	1,00	1,00	0,30	0,60	Konfigurace 2+, Y+, T-
KZ11	1,00	1,00	1,00	0,30	0,60	Konfigurace 3+, Y-, T+

¹⁾ Číslo konfigurace viz zatížení; + značí vodorovné zatížení ve směru staničení, - proti směru

²⁾ Y+ značí směr větru ve globální osy Y, Y- proti směru.

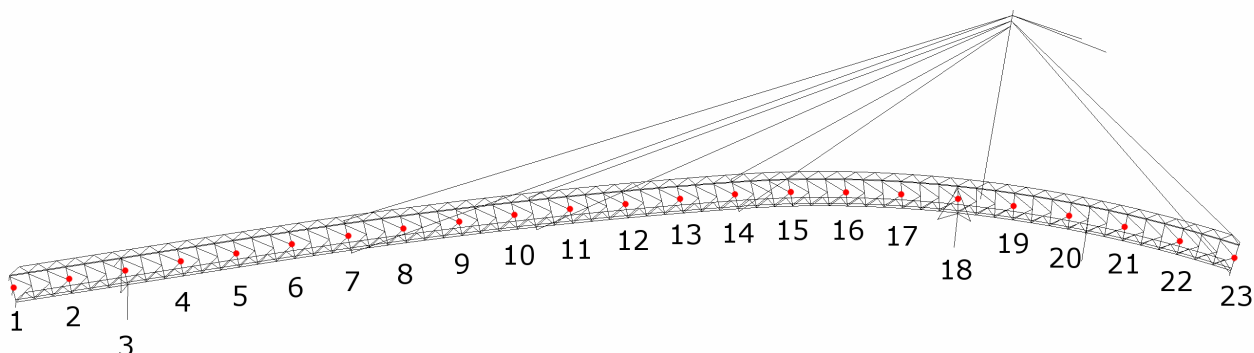
³⁾ T+ značí zatížení kladnou teplotou, T- zápornou teplotou.

Tabulka 3.2 Kombinace zatěžovacích stavů pro mezní stav použitelnosti

V příloze 2. jsou vykresleny deformace z jednotlivých zatěžovacích stavů.

Posouzení deformací hlavního nosníku

Posouzení deformací hlavních nosníků bylo provedeno na základě posunů uzlů rovnoměrně rozmístěných po dolní straně příhradového roštu (obr 3.3, tabulka 3.3). Výsledky ve v rovině x - y byly vzhledem k zakřivení konstrukce natočeny kolmo k ose komunikace.

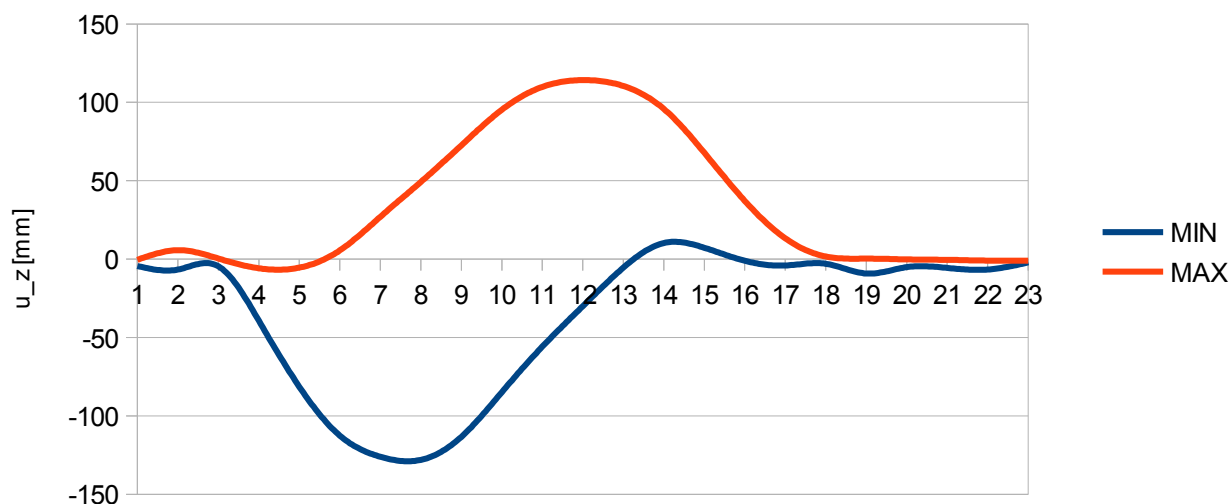


Obr. 3.3 body pro posouzení deformací hlavních nosníků

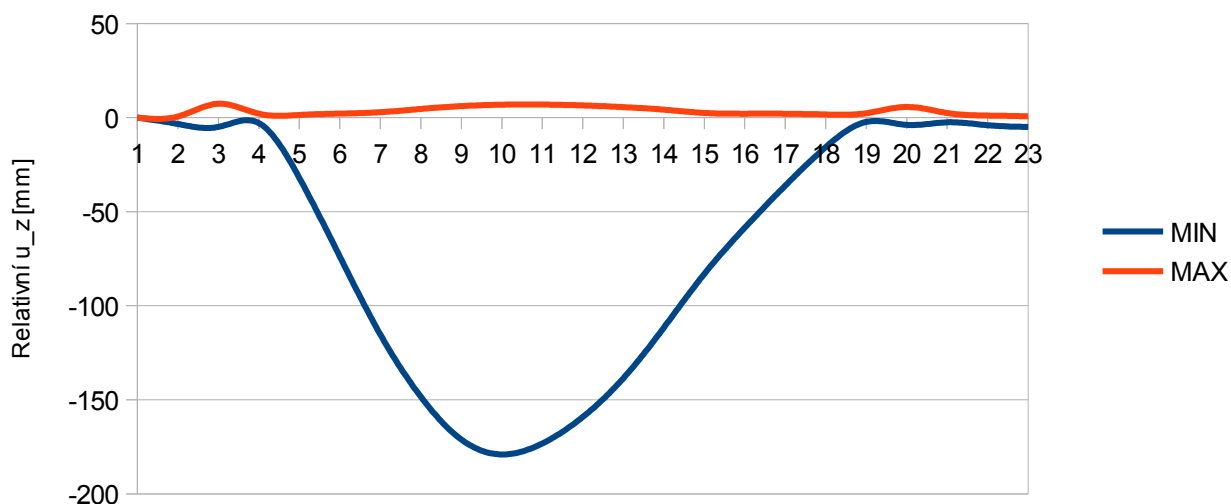
Bod	Poloha			Natočení bodu	Bod	Poloha			Natočení bodu
	X [m]	Y [m]	Z [m]	β [°]		X [m]	Y [m]	Z [m]	β [°]
1	0,00	0,00	0,00	0,0	13	72,33	0,00	3,07	0,0
2	6,03	0,00	0,50	0,0	14	78,36	0,00	2,73	0,0
3	12,06	0,00	1,00	0,0	15	84,38	-0,13	2,30	2,7
4	18,08	0,00	1,51	0,0	16	90,40	-0,55	1,81	5,6
5	24,11	0,00	2,01	0,0	17	96,38	-1,29	1,32	8,5
6	30,14	0,00	2,50	0,0	18	102,31	-2,33	0,83	11,4
7	36,17	0,00	2,89	0,0	19	108,19	-3,67	0,34	14,3
8	42,19	0,00	3,18	0,0	20	113,99	-5,31	-0,13	17,3
9	48,22	0,00	3,36	0,0	21	119,70	-7,24	-0,60	20,2
10	54,25	0,00	3,45	0,0	22	125,30	-9,46	-1,06	23,1
11	60,28	0,00	3,42	0,0	23	130,78	-11,97	-1,51	26,0
12	66,30	0,00	3,30	0,0					

Tabulka 3.3 poloha a natočení bodů pro vyhodnocení posunů

V následujících grafech jsou zobrazeny minimální a maximální obálky posunů ve svislém směru u_z vytvořené ze všech výše uvedených kombinací zatěžovacích stavů prověřovaných bodů. V grafu 3.1 jsou zobrazeny celkové posuny u_z . V grafu 3.2 jsou zobrazeny posuny u_z relativně ke kombinaci KZ0, která je výchozí pro posouzení deformací.



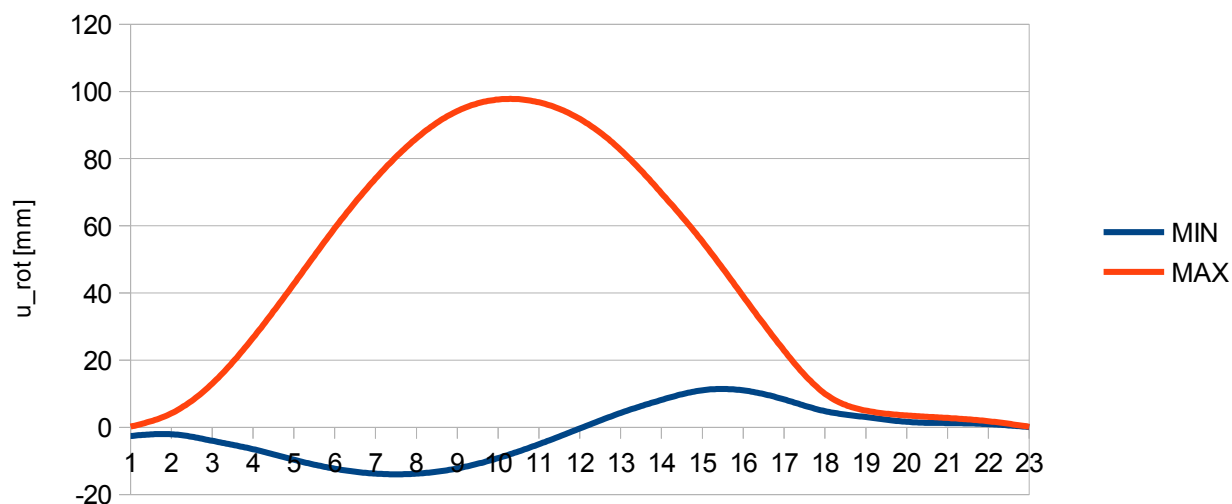
Graf 3.1 Obálky celkových posunů u_z



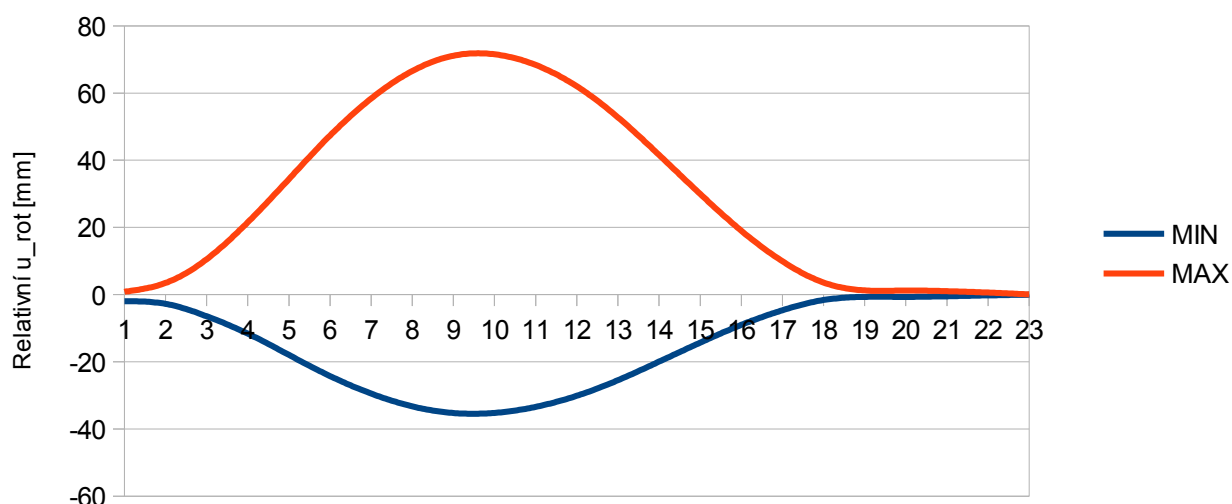
Graf 3.2 Obálky posunů u_z relativně k posunům kombinace KZ0

V následujících grafech jsou zobrazeny minimální a maximální obálky posunů u_{ROT} kolmo k ose lávky. V grafu 3.3 jsou zobrazeny celkové posuny u_{ROT} . V grafu 3.4 jsou zobrazeny posuny relativně ke kombinaci KZ0, která je výchozí pro posouzení deformací. Kde u_{ROT} je:

$$u_{ROT} = u_x \cdot \sin \beta + u_y \cdot \cos \beta \quad (3.4)$$



Graf 3.3 Obálky celkových posunů u_{ROT}

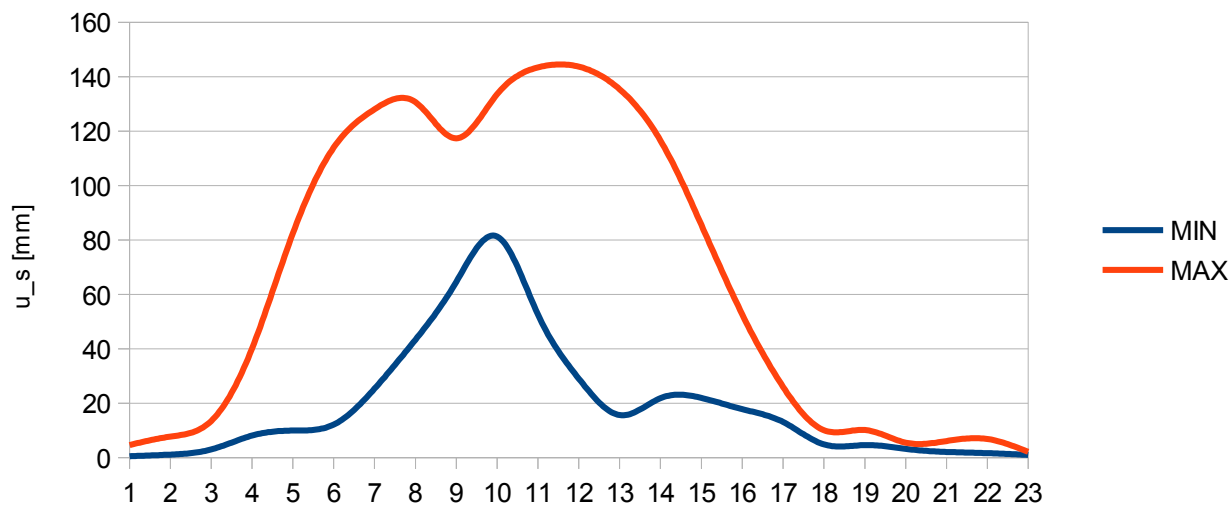


Graf 3.4 Obálky posunů u_{ROT} relativně k posunům kombinace KZ0

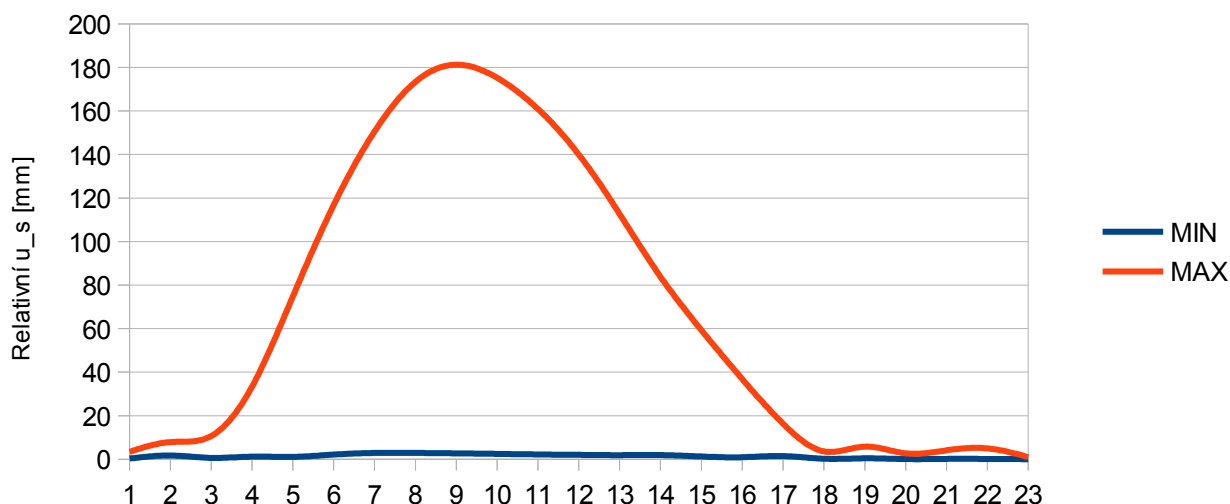
V následujících grafech jsou zobrazeny minimální a maximální obálky posunů u_S kolmo k ose lávky. V grafu 3.5 jsou zobrazeny celkové posuny u_S . V grafu 3.6 jsou zobrazeny posuny $u_{S,REL}$ relativně ke kombinaci KZ0. Přičemž:

$$u_S = \sqrt{u_{ROT}^2 + u_Z^2} \quad (3.5)$$

$$u_{S,REL} = \sqrt{u_{ROT,REL}^2 + u_{Z,REL}^2} \quad (3.6)$$



Graf 3.5 Obálky celkových posunů u_s



Graf 3.4 Obálky posunů $u_{S,REL}$ relativně k posunům kombinace KZ0

Vyhodnocením dat posunů bylo určeno, že největší posun hlavních nosníků vzhledem deformovanému stavu z výchozí kombinace KZ0 je z kombinace KZ11. Tato kombinace byla úmyslně sestavena na základě charakteru deformací z kombinací KZ1-KZ7. Maximální posun vznikl v 2.poli:

$$u_{S,REL,MAX} = 181,22 \text{ mm}$$

kde při rozpětí 2.pole 90450 mm je limitní průhyb:

$$u_{LIM} = \frac{L}{250} = \frac{90450}{250} = 361,8 \text{ mm} \quad (3.7)$$

Z čehož vyplývá:

$$u_{S,REL,MAX} \leq u_{LIM}$$

$$181,22 \text{ mm} \leq 361,8 \text{ mm}$$

Hlavní nosník vyhovuje na mezní stav použitelnosti.

Posouzení deformací pylonu

Posouzení deformací vrcholu pylonu bylo provedeno na základě posunů uzlu na jeho vrcholu v rovině x-y. V tabulce 3.4 jsou celkové posuny u_{x-y} vrcholu pylonu. V tabulce 3.5 jsou celkové posuny $u_{x-y,REL}$ vrcholu pylonu relativně k posunu pylonu z výchozí kombinace KZ0. Přičemž

$$u_{x-y} = \sqrt{u_x^2 + u_y^2} \quad (3.8)$$

$$u_{x,REL} = u_{x,n} - u_{x,0} \quad (3.9)$$

$$u_{y,REL} = u_{y,n} - u_{y,0} \quad (3.10)$$

kde n značí číslo kombinace

$$u_{x-y,REL} = \sqrt{u_{x,REL}^2 + u_{y,REL}^2} \quad (3.11)$$

Kombinace	Posuny [mm]		
	u_x	u_y	u_{x-y}
KZ0	-156,91	-31,8	160,10
KZ1	-207,17	-43,19	211,62
KZ2	-155,69	-31,68	158,88
KZ3	-208,33	-43,3	212,78
KZ4	-155,79	-27,03	158,12
KZ5	-157,03	-31,36	160,13
KZ6	-160,57	-44,57	166,64
KZ7	-152,82	-19,65	154,08
KZ8	-154,58	-26,95	156,91
KZ9	-208,45	-42,97	212,83
KZ10	-152,09	-19,58	153,34
KZ11	-210,74	-50,56	216,72
		Maximum	216,72

Tabulka 3.4 Posuny vrcholu pylonu v rovině x-y

Kombinace	Posuny [mm]		
	$u_{X,REL}$	$u_{Y,REL}$	$u_{X-Y,REL}$
KZ1	-50,26	-11,39	51,53
KZ2	1,22	0,12	1,23
KZ3	-51,42	-11,49	52,69
KZ4	1,12	4,77	4,90
KZ5	-0,12	0,45	0,46
KZ6	-3,66	-12,77	13,28
KZ7	4,09	12,15	12,82
KZ8	2,33	4,85	5,38
KZ9	-51,54	-11,17	52,74
KZ10	4,82	12,23	13,14
KZ11	-53,83	-18,76	57,00
		Maximum	57,00

Tabulka 3.5 Relativní posuny vrcholu pylonu v rovině x-y

K největšímu posunu vrcholu pylonu vzhledem k deformovanému stavu z výchozí kombinace KZ0 došlo v kombinaci KZ11.

$$u_{X-Y,REL,MAX} = 57,0 \text{ mm}$$

kde při výšce pylonu 35000 mm je limitní posun:

$$u_{LIM} = \frac{L}{250} = \frac{35000}{250} = 140,0 \text{ mm}$$

Z čehož vyplývá:

$$u_{X-Y,REL,MAX} \leq u_{LIM}$$

$$57 \text{ mm} \leq 140 \text{ mm}$$

Pylon vyhovuje na mezní stav použitelnosti.

3.4 Vyhodnocení mezního stavu únosnosti

Na základě vybraných kombinací zatěžovacích stavů bylo provedeno vyhodnocení namáhání ocelových prutů.

Vybrané kombinace zatěžovacích stavů pro mezní stav použitelnosti

V následující tabulce 3.6 je seznam vybraných zatěžovacích stavů pro posouzení mezního stavu únosnosti.

Kombinace	Vlastní tíha	Předpětí	Doprava	Vítr	Teplota	Poznámka
KZ1	1,15	1,00	1,35	0,45	-	Konfigurace 1+,Y-
KZ2	1,15	1,00	1,35	0,45	-	Konfigurace 1-,Y+
KZ3	1,15	1,00	1,35	0,45	-	Konfigurace 3+,Y-
KZ4	1,15	1,00	1,35	0,45	-	Konfigurace 2+,Y+
KZ5	1,15	1,00	0,45	1,50	-	Konfigurace 3-,Y+
KZ6	1,15	1,00	0,45	1,50	-	Konfigurace 3+,Y-
KZ7	1,15	1,00	1,35	0,45	0,90	Konfigurace 1+,Y-,T+
KZ8	1,15	1,00	1,35	0,45	0,90	Konfigurace 1-,Y+,T-
KZ9	1,15	1,00	1,35	0,45	0,90	Konfigurace 3+,Y-,T+
KZ10	1,15	1,00	1,35	0,45	0,90	Konfigurace 2+,Y+,T-
KZ11	1,15	1,00	0,45	1,50	0,90	Konfigurace 3-,Y+,T+
KZ12	1,15	1,00	0,45	1,50	0,90	Konfigurace 3+,Y-,T-

¹⁾ číslo konfigurace viz zatížení; + značí vodorovné zatížení ve směru staničení, - proti směru

²⁾ Y+ značí směr větru ve globální osy Y, Y- proti směru.

²⁾ T+ značí zatížení kladnou teplotou, T- zápornou teplotou.

Tabulka 3.6 Kombinace zatěžovacích stavů pro mezní stav únosnosti

Posouzení stabilitních problémů ocelových prutů se zahrnutím vlivů velkých deformací se může podle normy [7] (5.2.2) uvažovat pouze na kritickou délku rovnou jejich systémové délce. Dále budou z hlediska posouzení probrány skupiny konstrukcí podobného charakteru.

Hlavní nosník

Jedná se o příhradovou svařovanou konstrukci. Veškeré průřezy jsou první třídy což znamená, že umožňují plastický výpočet. Až na obyčejné příčníky a podélníky se jedná o uzavřené profily, které nepodléhají vlivům klopení. Příčníky profilu nesymetrického I jsou stabilizovány příčným ztužidlem,

tudíž je jejich kritická délka pro posouzení stability pouze 1,45 m. Podélníky profilu L jsou po délce stabilizovány panely, tudíž u nich není nutné stabilitní problémy uvažovat. Součinitel vzpěru nejštíhlejšího prvku, což je trubka příčného ztužidla je:

Trubka 114,3x6

$$A = 2040 \text{ mm}^2 \quad I = 3,0\text{e}+6 \text{ mm}^4 \quad a = 0,21$$

$$f_Y = 355 \text{ MPa} \quad E = 210000 \text{ MPa}$$

$$L = 2500 \text{ mm}$$

$$L_{CR} = 0,75 \cdot 2500 = 1750 \text{ mm}$$

$$N_{CR} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L_{CR}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 3,0\text{e}+6}{1750^2} = 2,03\text{e}6 \text{ N}$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_Y}{N_{CR}}} = \sqrt{\frac{2040 \cdot 355}{2,03\text{e}+6}} = 0,597$$

$$\phi = \frac{1}{2} (1 + \alpha (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2) = \frac{1}{2} (1 + 0,21 \cdot (0,597 - 0,2) + 0,597^2) = 0,720$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{0,720 + \sqrt{0,720^2 - 0,597^2}} = 0,891$$

Na základě výše uvedených důvodů bylo rozhodnuto, že celá tato část konstrukce bude posouzena podle Von Misesovy podmínky plasticity která bude porovnána s mezí kluzu materiálu. Toto rozhodnutí bylo učiněno na základě malých vlivů stabilitních problémů, které budou kompenzovány výpočtem napětí přes elastické průřezové charakteristiky oproti plastickým, které jsou pro všechny průřezy této části konstrukce dostupné. Výsledky Von Misesova napětí z jednotlivých kombinací na této části konstrukce jsou zobrazeny v příloze 3.

Stojky a táhla

Stojky a táhla opěr budou v příloze 4. posouzeny podle normy [7] na vzpěr a tah z výběru maximálních hodnot působících sil.

Závěsy

Závěsy budou posouzeny v příloze 4. na maximální tahové síly podle normy [8].

Pylon

Proměnný průřez pylonu bude v příloze 4. zjednodušeně posouzen podle normy [7].

4 ZÁVĚR

Z provedené analýzy konstrukce na vybrané zatěžovací stavy a kombinace zatěžovacích stavů, provedené v rámci této bakalářské práce, lze vyvodit následující závěry.

Navržená konstrukce byla s velkou pravděpodobností projektována s podobnými idealizacemi jako v modelu vytvořeném v této práci. Výsledky geometricky nelineární statické analýzy ukazují, že pro takto velkou konstrukci s předepnutým zavěšením, je tento způsob výpočtu neodmyslitelný. Na složitosti chování konstrukce přispívá její nesymetricky zakřivený tvar, který klade větší nároky na volbu a rozmístění zatížení než u konstrukcí pravidelných a symetrických.

Z charakteru deformací a napjatosti lze usoudit, že velice důležitým krokem při návrhu podobných konstrukcí je volba a nalazení předpětí závěsných lan. Při špatném návrhu lze dosáhnout nevyhovění požadavkům mezních stavů. Podle vyhodnocených výsledků lze ze statického hlediska usoudit, že tato fáze proběhla u této konstrukce kvalitně.

Podle výsledků lze dále usoudit, že projekční fázi projektu ovlivnila složitost konstrukce z hlediska náročnosti na výrobu. Tento jev se projevuje symetrií jednotlivých dílů. Tyto díly jsou však vzhledem ke tvaru a uspořádání konstrukce namáhány nesymetrickým způsobem. Tento jev je nejvíce patrný z porovnání účinku zatížení příčným větrem.

Ze zhodnocení výsledků v mezním stavu únosnosti a v mezním stavu použitelnosti, lze dojít k závěru, že konstrukce je více zatížena ze strany mezního stavu únosnosti. Tento závěr ale může být ovlivněný počtem a návrhem jednotlivých kombinací zatížení, který je v této práci omezený. Dalším neopomenutelným faktorem je možný vliv návrhu konstrukce na dynamické zatížení, které není předmětem této práce.

Výše uvedená zhodnocení jsou motivací pro další studium, zejména ze strany dynamického chování konstrukcí. Toto studium by umožnilo kvalitnější analýzu konstrukce, popřípadě i její optimalizaci.

5 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Dokumentace k programu ANSYS Release 15.0
- [2] Eurokód 0: Zásady navrhování konstrukcí, ČSN EN 1990, březen 2004
- [3] Eurokód 1: Zatížení konstrukcí. Část 1-1: Obecná zatížení - Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb, ČSN EN 1991-1-1, březen 2004
- [4] Eurokód 1: Zatížení konstrukcí. Část 2: Zatížení mostů dopravou, ČSN EN 1991-2, červenec 2005
- [5] Eurokód 1: Zatížení konstrukcí. Část 1-4: Obecná zatížení - Zatížení větrem, ČSN EN 1991-1-4, duben 2007
- [6] Eurokód 1: Zatížení konstrukcí. Část 1-5: Obecná zatížení - Zatížení teplotou, ČSN EN 1991-1-5, květen 2005
- [7] Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla pro pozemní stavby, ČSN EN 1993-1-1, prosinec 2006
- [8] Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-11: Navrhování ocelových tažených prvků ČSN EN 1993-1-11, leden 2008
- [9] Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 2: Ocelové mosty, ČSN EN 1993-2, leden 2008
- [10] M. L. Bucelem, K. J. Bathe, The Mechanics of Solids and Structures – Hierarchical Modeling and the Finite Element Solution, Springer, 2011
- [11] Kadlčák, Jaroslav a Kytýr, Jiří. Statika stavebních konstrukcí: Základy stavební mechaniky, staticky neurčité prutové konstrukce. Brno: Nakladatelství VUTIUM, 2001. 978-80-214-1877-6
- [12] Kadlčák, Jaroslav a Kytýr, Jiří. Statika stavebních konstrukcí: Staticky určité prutové konstrukce. Brno: Nakladatelství VUTIUM, 2007. 978-80-214-3428-8.
- [13] KOLÁŘ, Vladimír, Viktor KANICKÝ a Ivan NĚMEC. FEM Principy a praxe metody konečných prvků. Vyd. 1. Praha: Computer Press, 1997, 401 s. ISBN 80-722-6021-9.

6 SEZNAM TABULEK

Tabulka 2.1	Přehled použitých konečných prvků	.....	7
Tabulka 2.2	Přiřazení konečných prvků v modelu	.....	12
Tabulka 2.3	Materiálové modely	.....	13
Tabulka 2.4	Nastavení reálných konstant	.....	14
Tabulka 2.5	Typy průřezů	.....	15
Tabulka 3.1	Kombinační součinitele	.....	23
Tabulka 3.2	Kombinace zatěžovacích stavů pro mezní stav použitelnosti	.....	24
Tabulka 3.3	Poloha a natočení bodů pro vyhodnocení posunů	.....	25
Tabulka 3.4	Posuny vrcholu pylonu v rovině x-y	.....	29
Tabulka 3.5	Relativní posuny vrcholu pylonu v rovině x-y	.....	30
Tabulka 3.6	Kombinace zatěžovacích stavů pro mezní stav únosnosti	.....	31

7 SEZNAM GRAFŮ

Graf 3.1	Obálky celkových posunů u_Z	.....	26
Graf 3.2	Obálky posunů u_Z relativně k posunům kombinace KZ0	.....	26
Graf 3.3	Obálky celkových posunů u_{ROT}	.....	27
Graf 3.4	Obálky posunů u_{ROT} relativně k posunům kombinace KZ0	.....	27
Graf 3.5	Obálky celkových posunů u_S	.....	28
Graf 3.4	Obálky posunů $u_{S,REL}$ relativně k posunům kombinace KZ0	.....	28

8 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1	Příčný řez v poli	.....	3
Obr. 1.2	Půdorys a podélný řez lávkou	.....	4
Obr. 1.3	Schéma montáže lávky	.....	6
Obr. 2.1	LINK180	.....	7
Obr. 2.2	BEAM188	.....	8
Obr. 2.3	SHELL181	.....	10
Obr. 2.4	Vnitřní síly na prvku SHELL181	.....	10
Obr. 2.5	SURF154	.....	11
Obr. 2.6	SUFR156	.....	11
Obr. 2.7	Průřez panelu	.....	16
Obr. 2.8	Uložení panelů na podelníky vázanými stupni volnosti	.....	17
Obr. 3.1	Předpětí závěsů druhého pole	.....	20
Obr. 3.2	Podélná konfigurace zatížení dopravou	.....	21
Obr. 3.3	Body pro posouzení deformací hlavních nosníků	.....	25

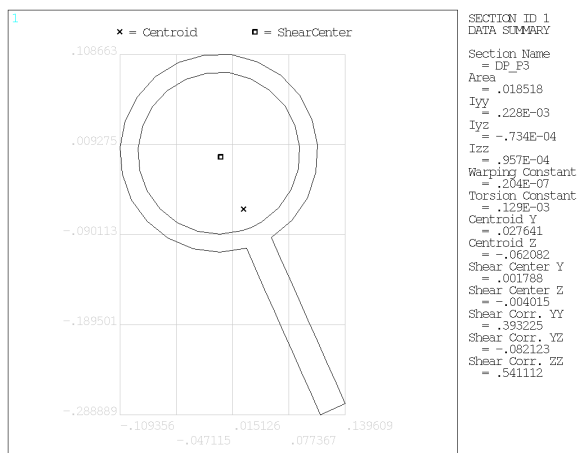
9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

f_Y	mez kluzu
$h_{PRŮM}$	průměrná výška desky
h_1, h_2, h_3	dílčí výšky desky
rot_x, rot_y, rot_z	složky rotací
u	vektor neznámých uzlových deformací
U_{ROT}	vodorovný posun kolmo k ose lávky
$U_{ROT,REL}$	relativní vodorovný posun kolmo k ose lávky

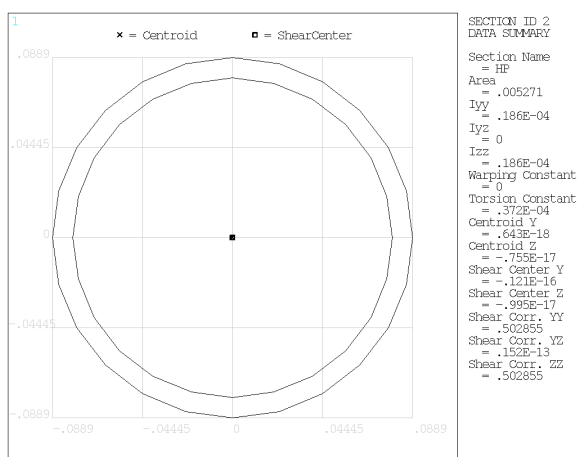
U_S	celkový posun kolmo k ose lávky
$U_{S,REL}$	relativní celkový posun kolmo k ose lávky
$U_{S,REL,MAX}$	maximální relativní celkový posun kolmo k ose lávky
U_X, U_Y, U_Z	složky posunů
U_{X-Y}	celkový posun ve vodorovné rovině
$U_{X-Y,REL}$	relativní celkový posun ve vodorovné rovině
$U_{X-Y,REL,MAX}$	maximální relativní celkový posun ve vodorovné rovině
A	průřezová plocha
E	modul pružnosti
F	celkový zatěžovací vektor
F^a	zatěžovací vektor
F^r	vektor reakcí
I	kvadratický moment setrvačnosti
K	matice tuhosti
K_0	materiálová matice tuhosti
L_1, L_2, L_D	dílčí šířky desky
L	délka
L_{CR}	vzpěrná délka prutu
M	moment síly
N	normálová síla
N_{CR}	pružná kritická síla
S	geometrická matice tuhosti
V	posouvající síla
ε	poměrné přetvoření
σ_M	napětí Von Mises
λ	poměrná štíhlost
χ	součinitel vzpěrnosti

10 PŘÍLOHY

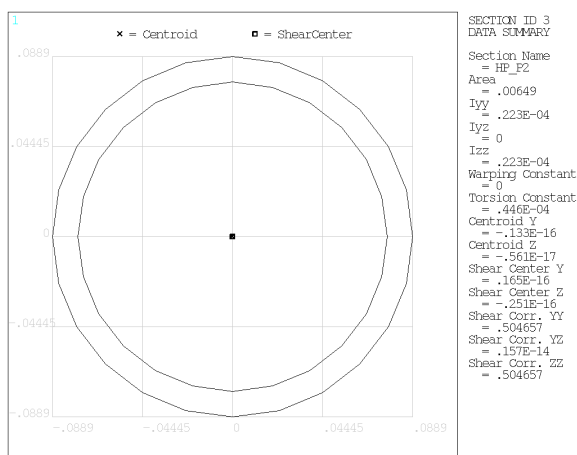
Příloha 1 – Charakteristiky modelu



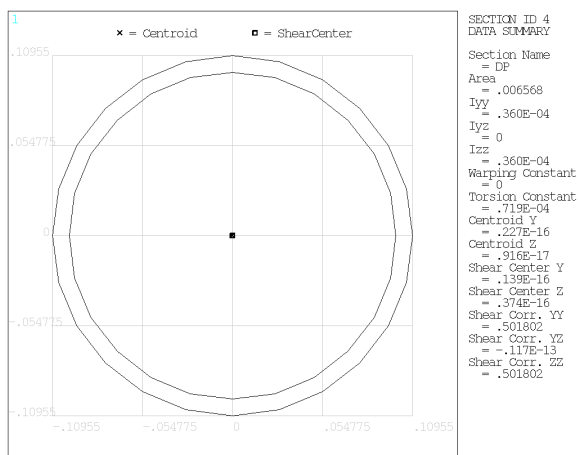
Dolní pás u opěry 3



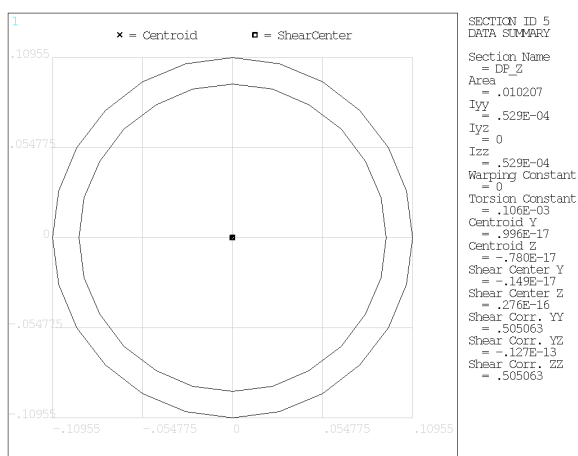
Horní pás



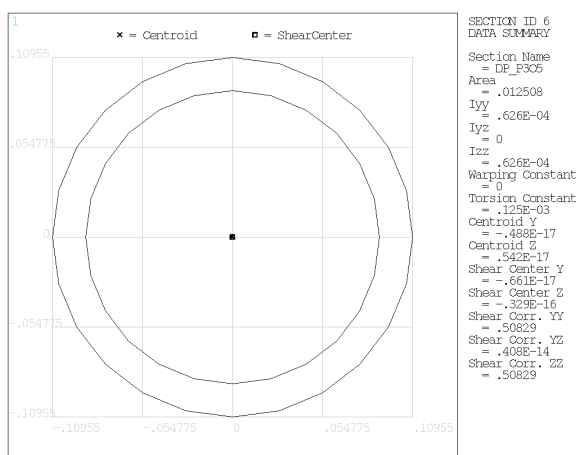
Horní pás nad podpěrou 2



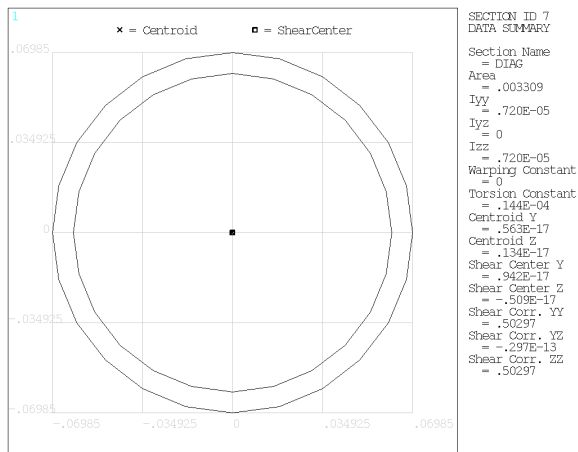
Dolní pás



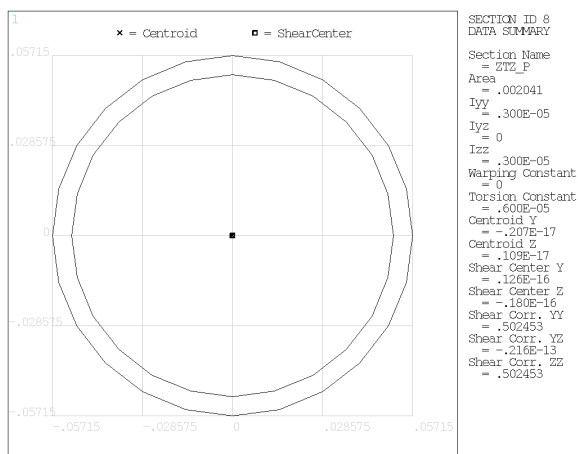
Dolní pás zesílený



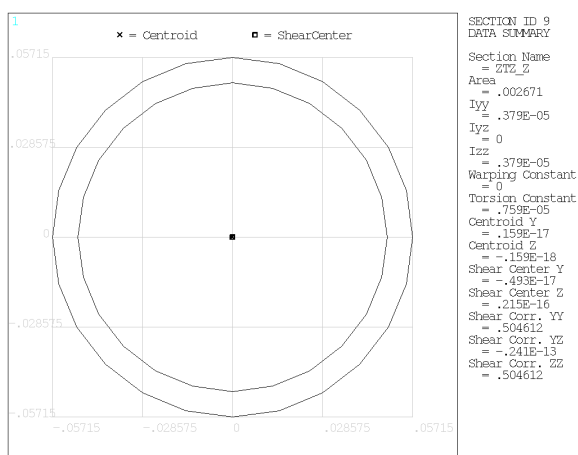
Dolní pás nad opěrou 5, podpěrou 3



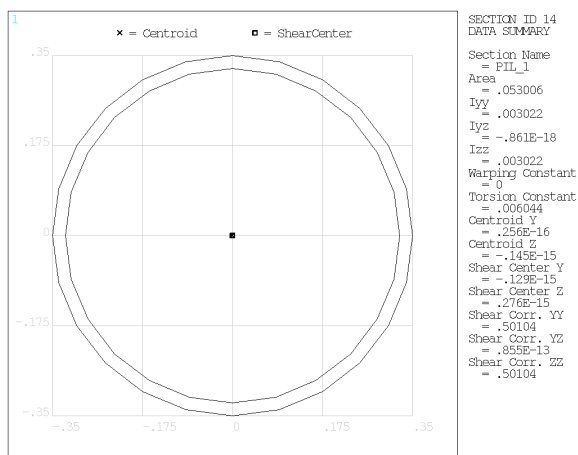
Diagonály



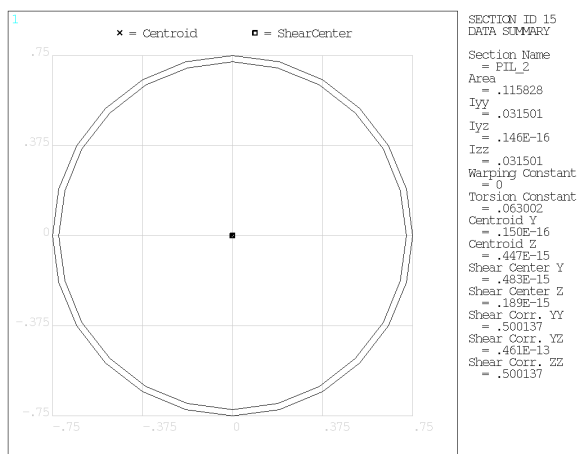
Ztužení v přímé



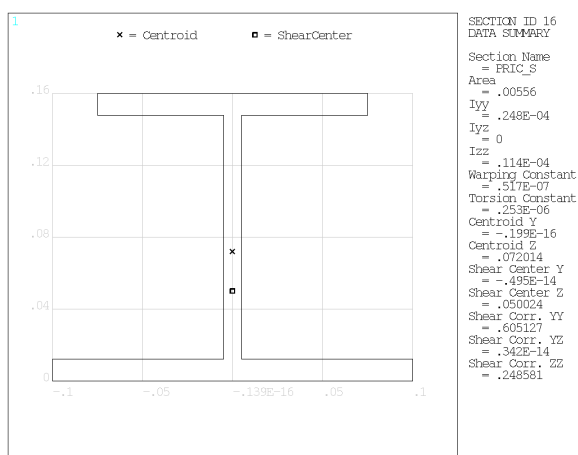
Ztužení v oblouku



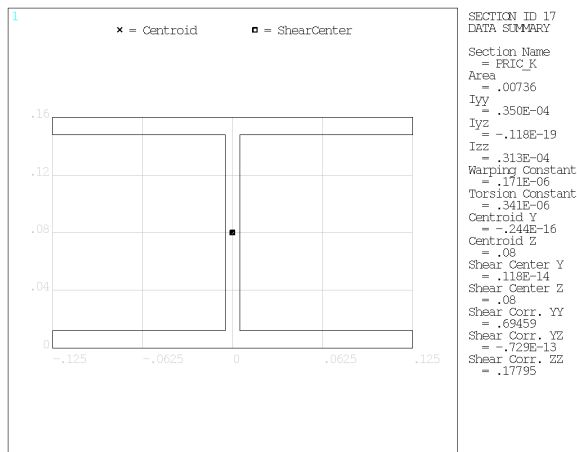
Pylon dolní část



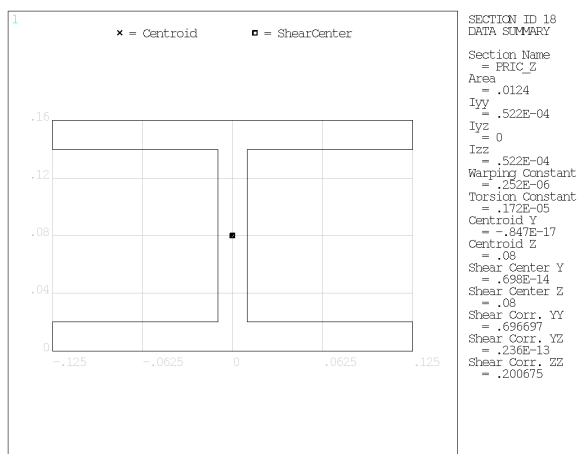
Pylon střední část



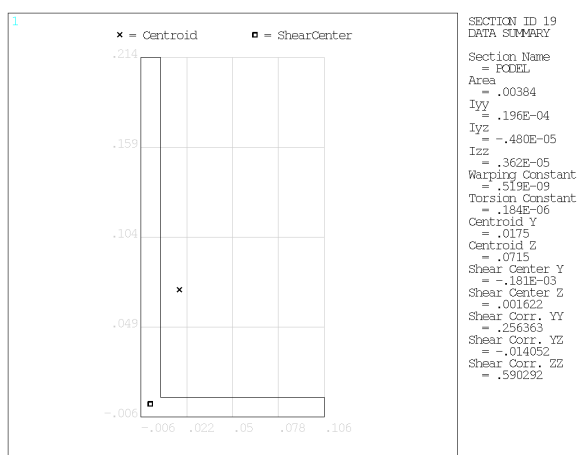
Příčník střední část



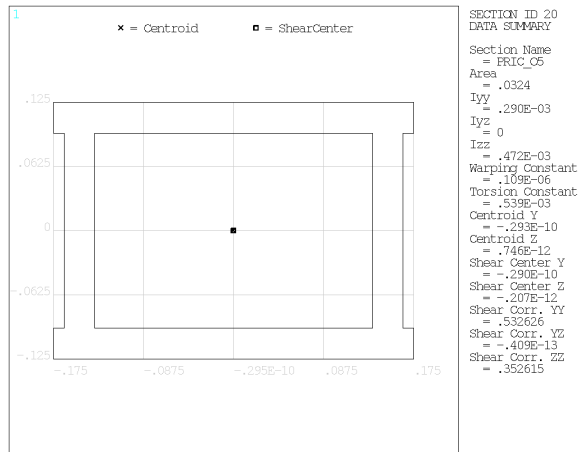
Příčná krajní část



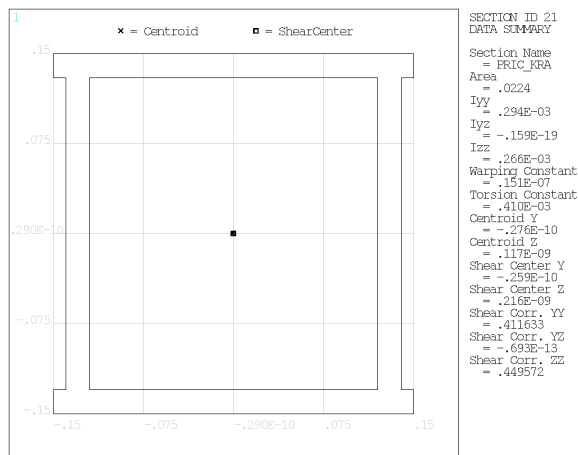
Příčník zesílený



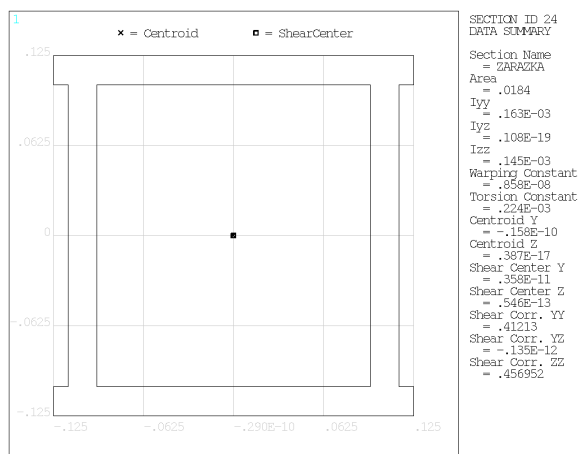
Podélník



Příčník nad opěrou 5

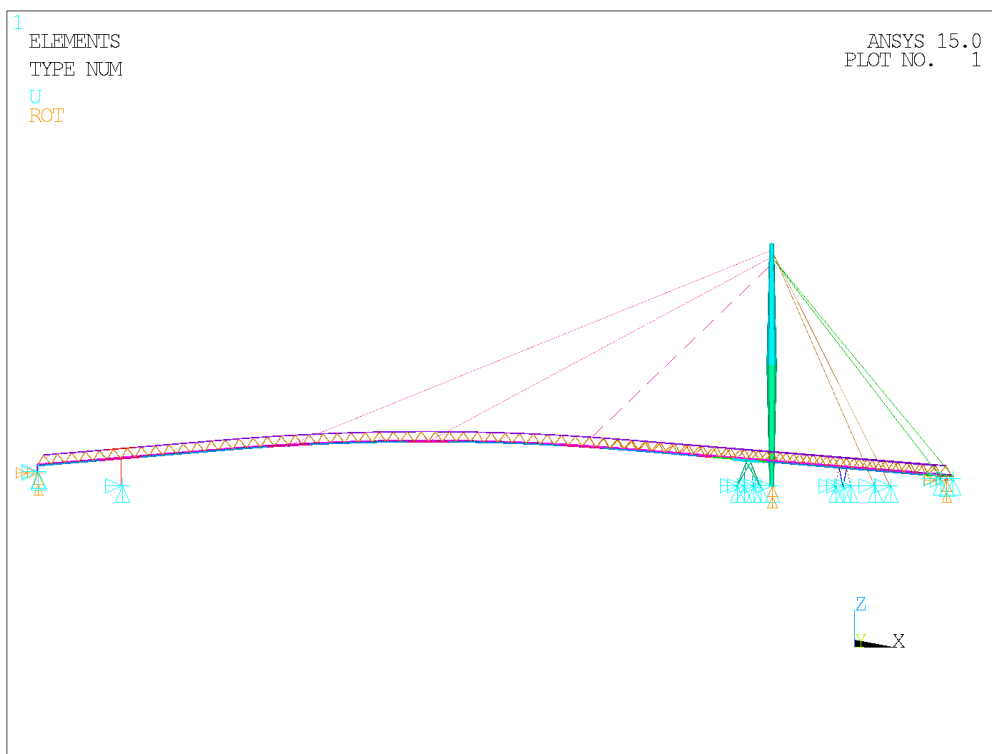


Příčník krabicový

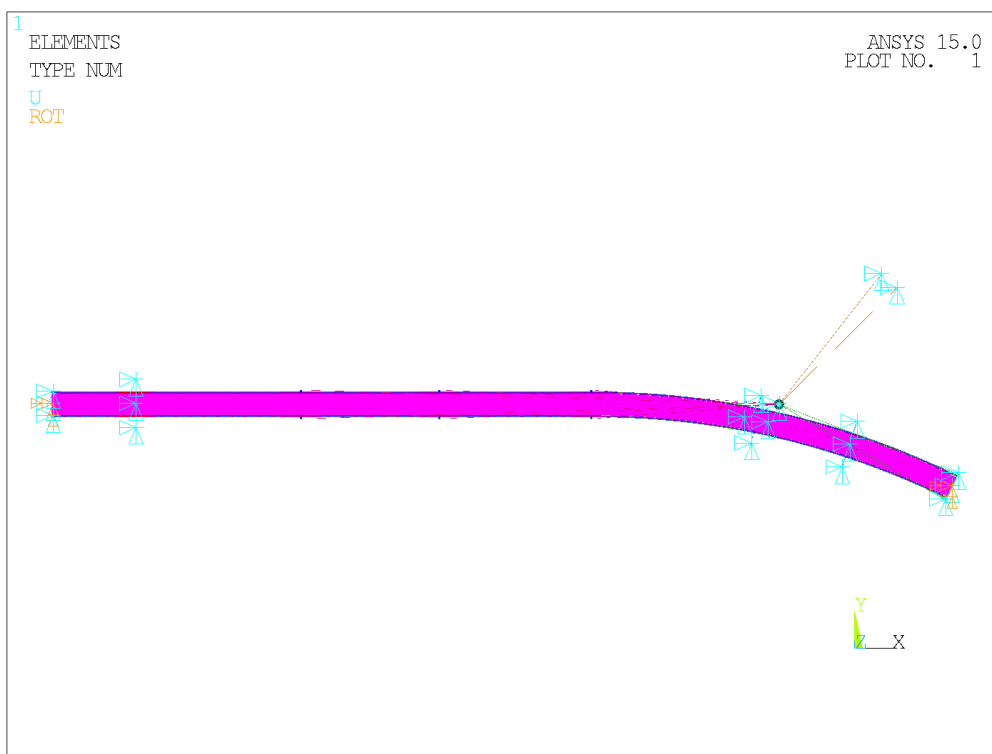


Příčná zarážka

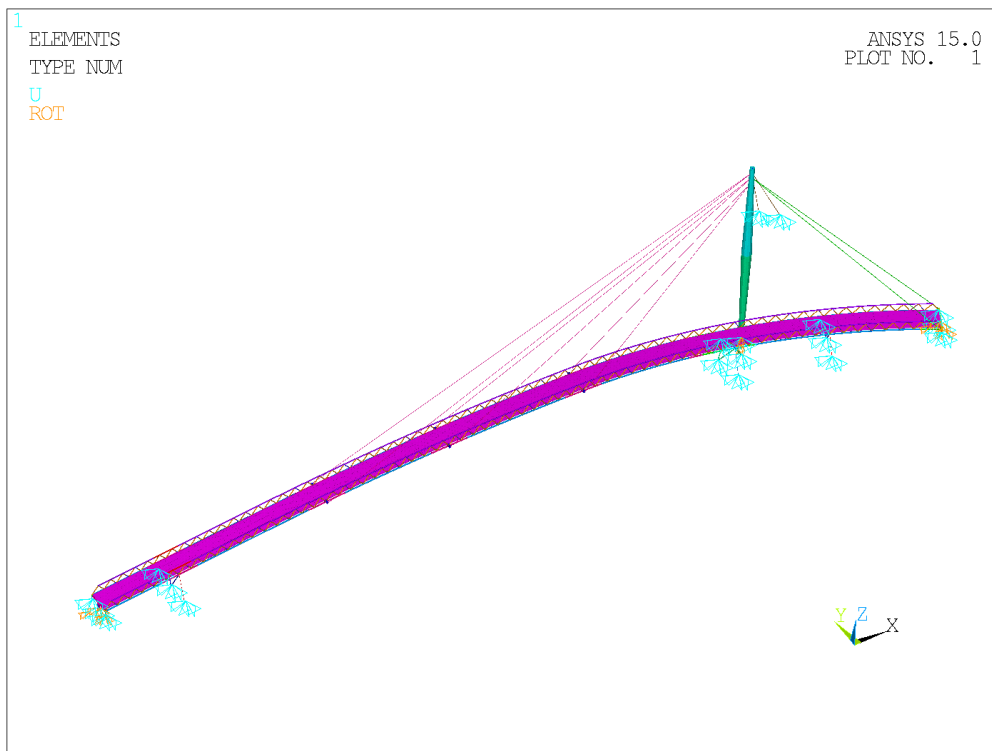
Výpočtový model konstrukce:



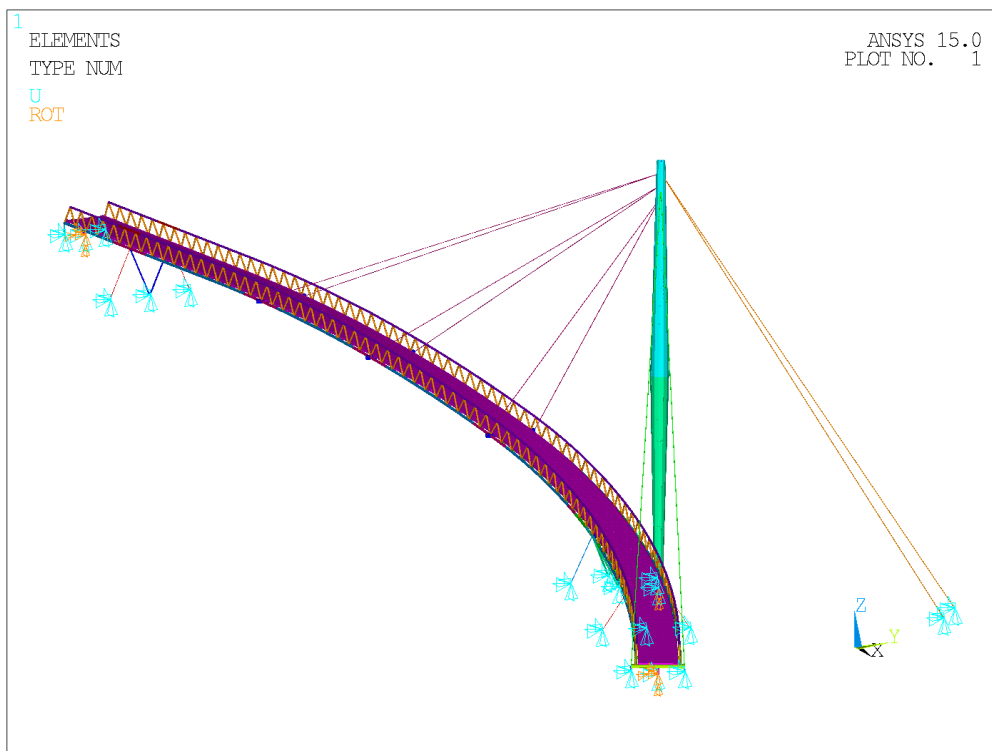
Boční pohled



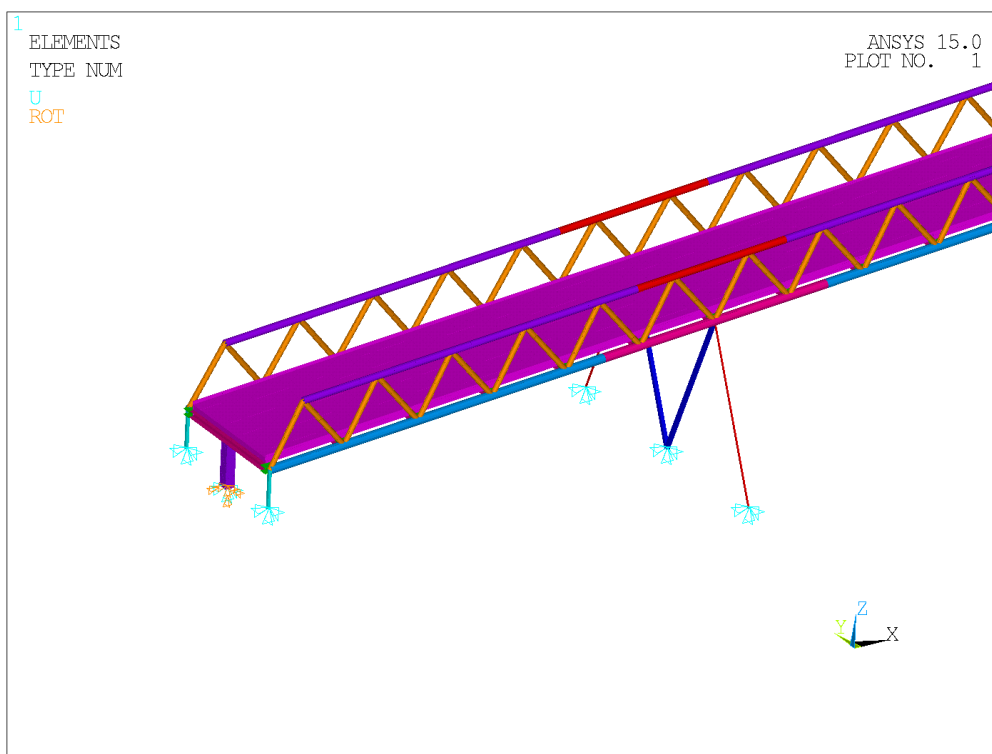
Pohled shora



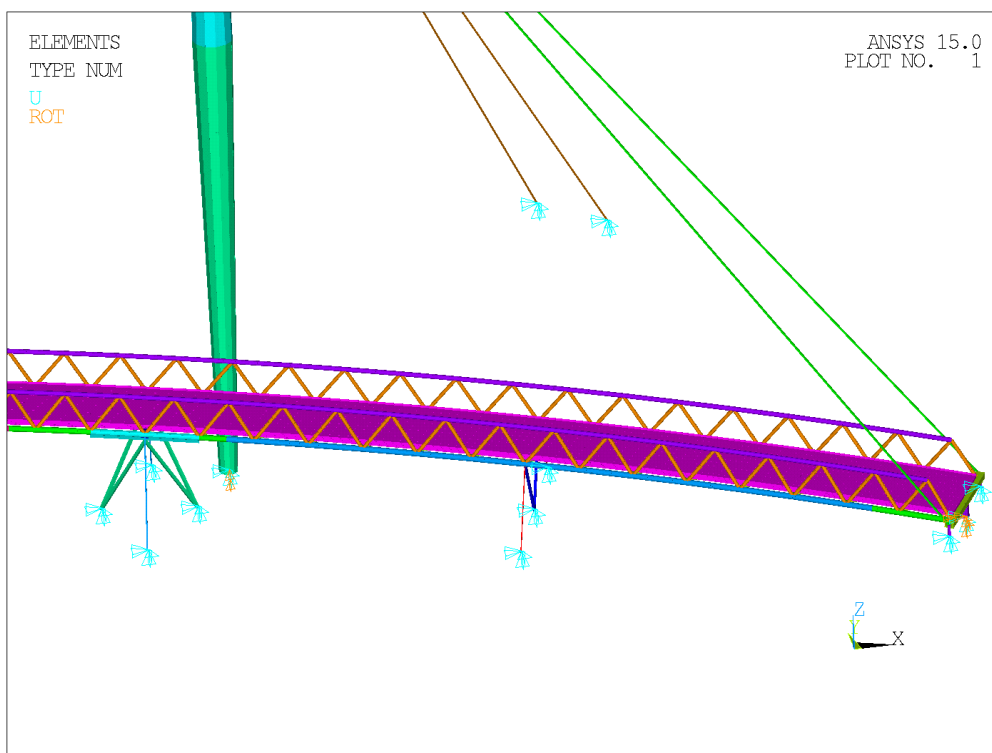
Pohled na model



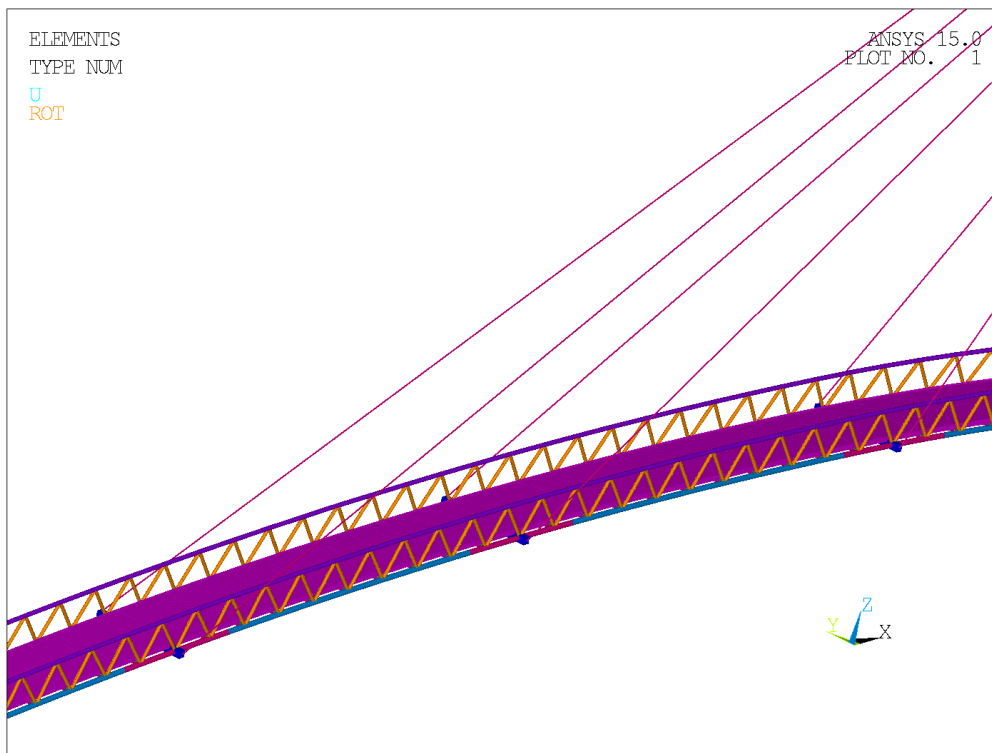
Pohled z pravého břehu



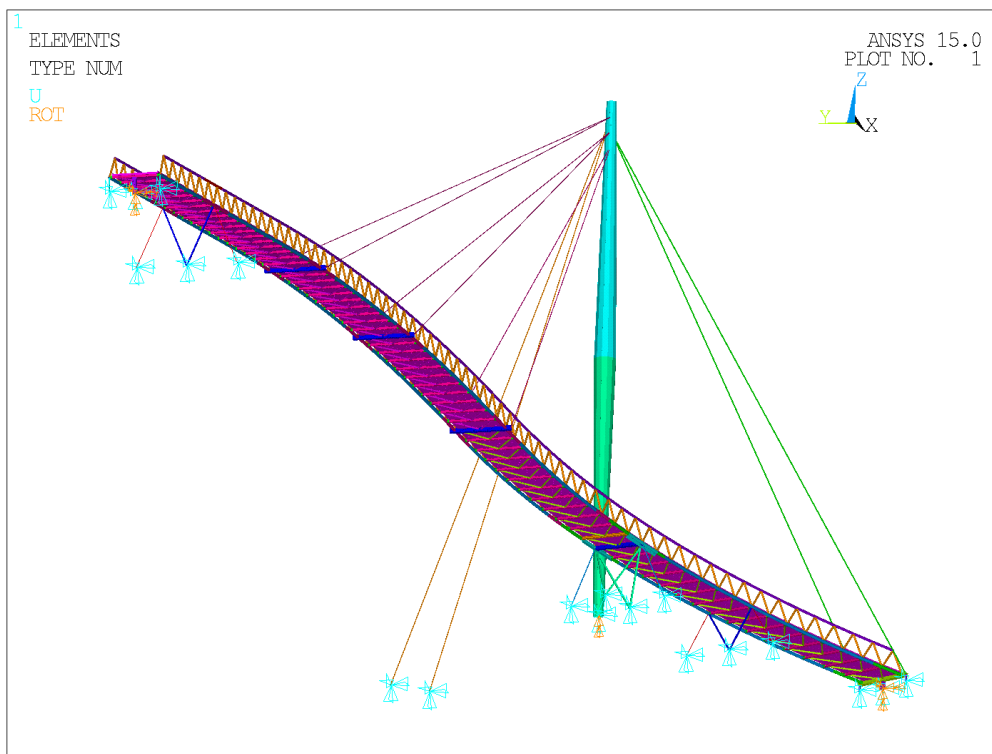
Okrajové podmínky na levém břehu



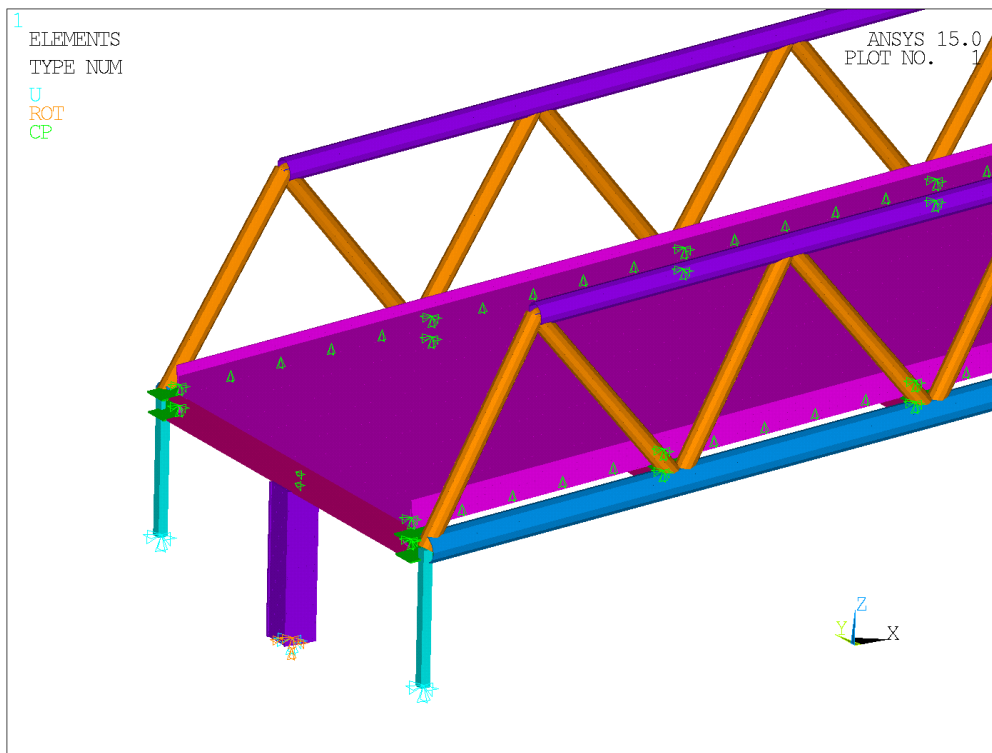
Okrajové podmínky na pravém břehu



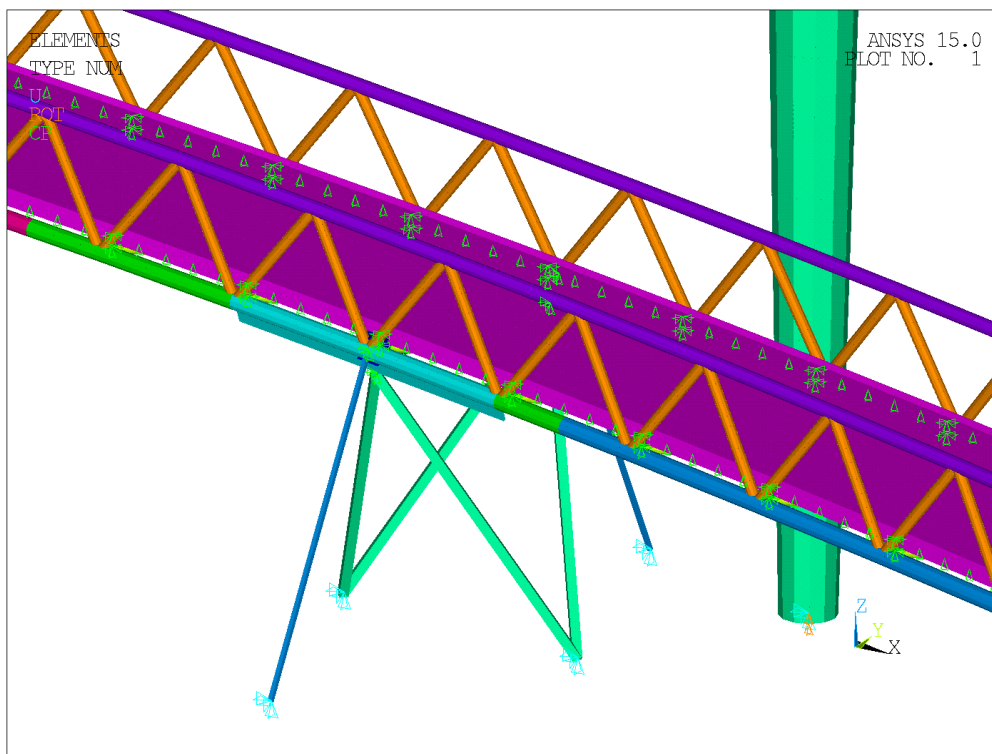
Detail uchycení závěsů



Pohled na podmostkovkové ztužidlo

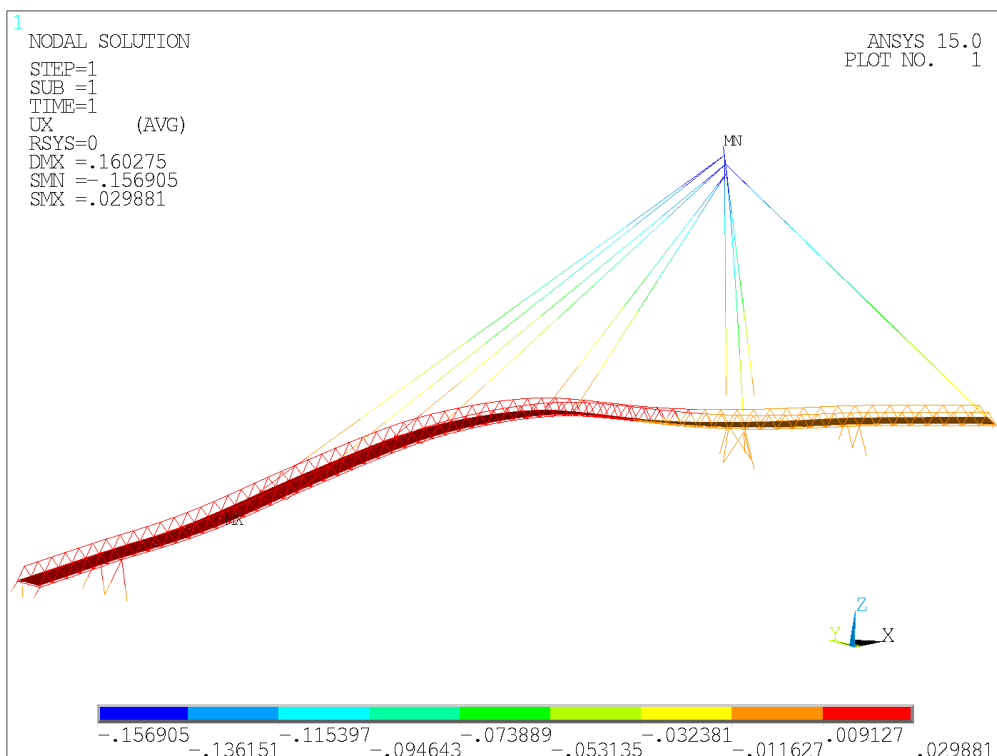


Vázané stupně volnosti u opěry 1

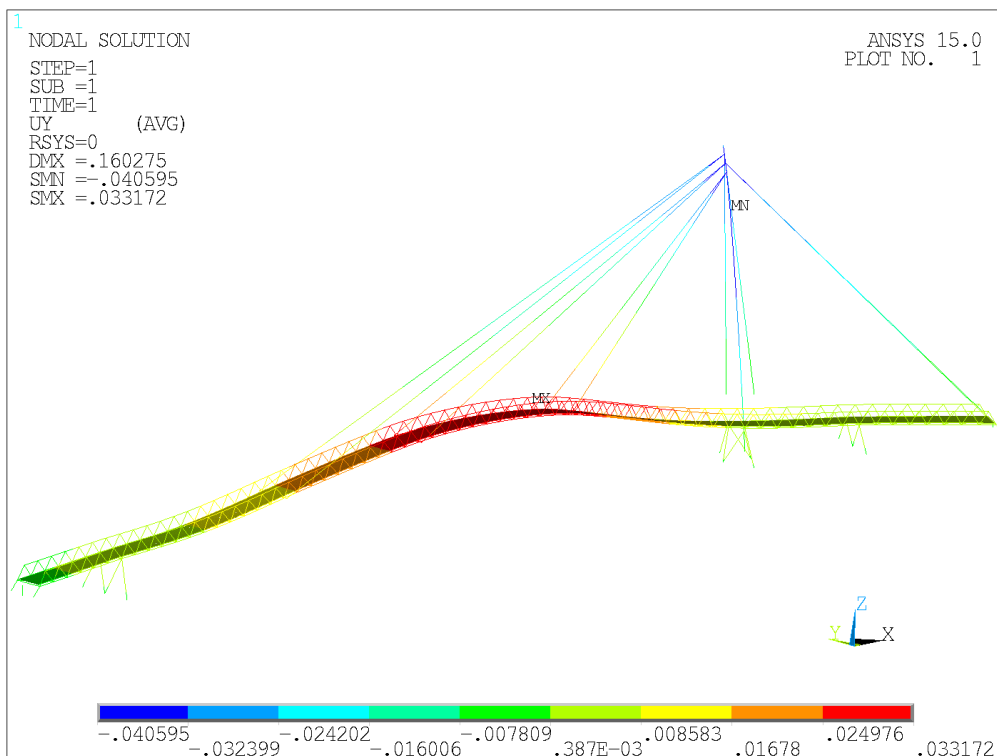


Vázané stupně volnosti u podpěry 3

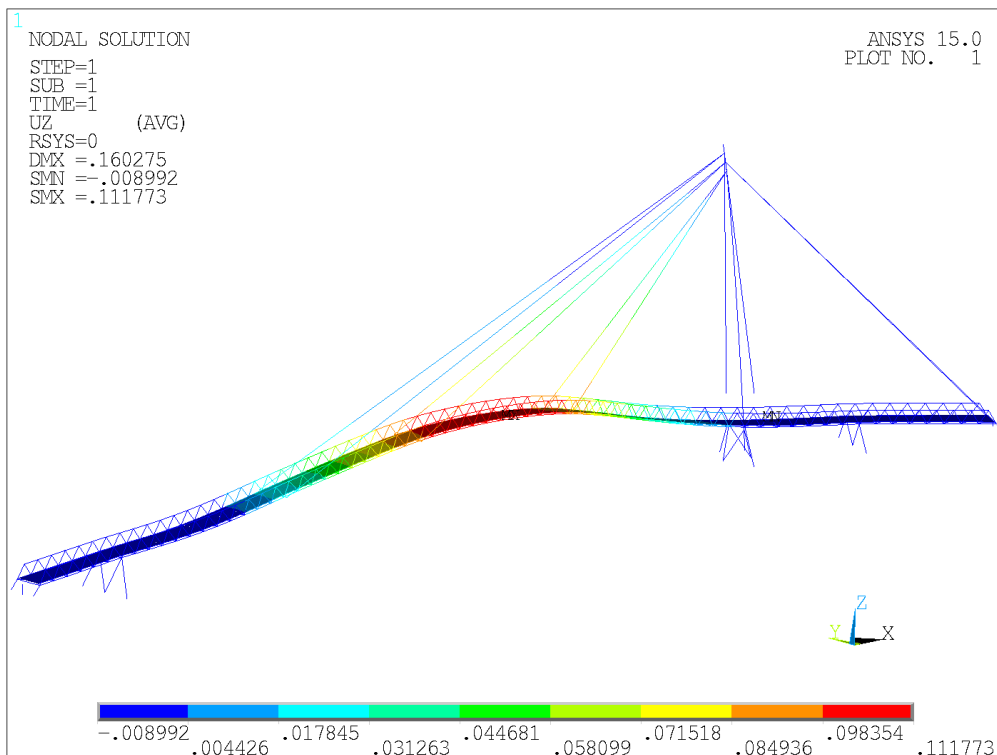
Příloha 2 – Výsledky mezního stavu použitelnosti



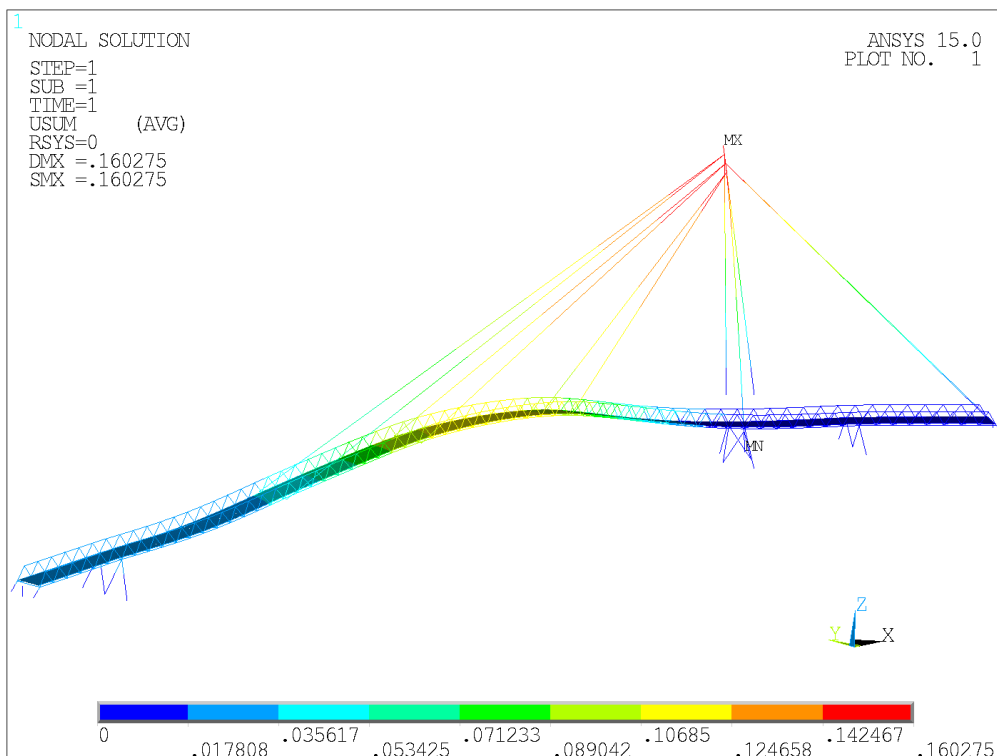
KZ0 – Pole posunutí u_x



KZ0 – Pole posunutí u_y

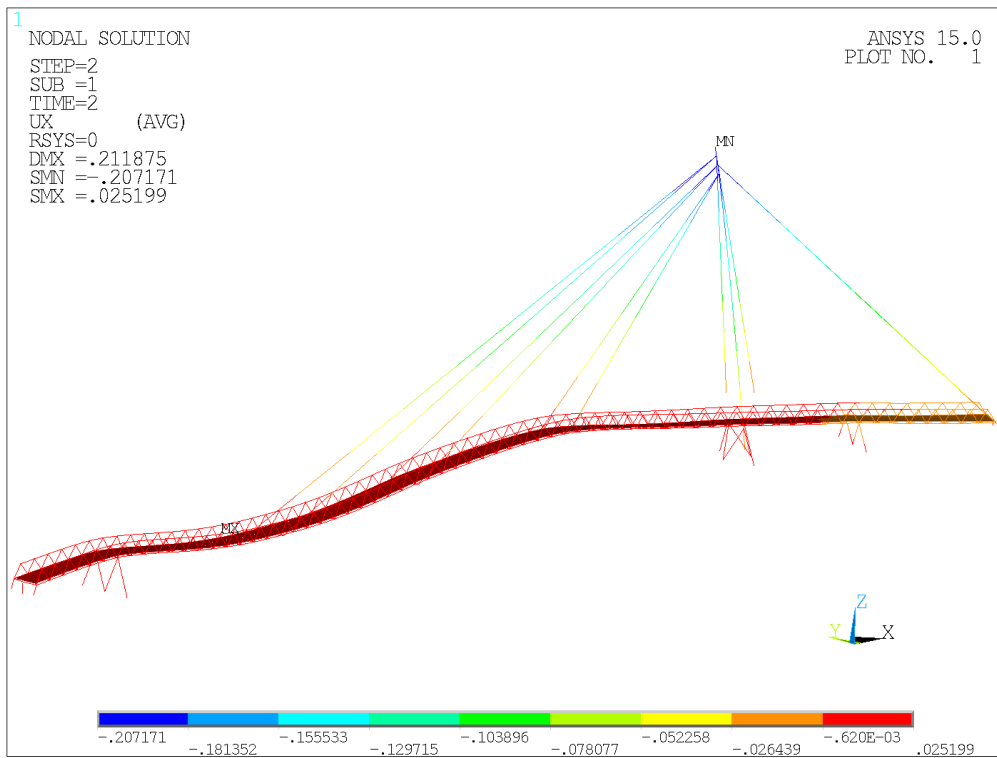


KZ0 – Pole posunutí u_z

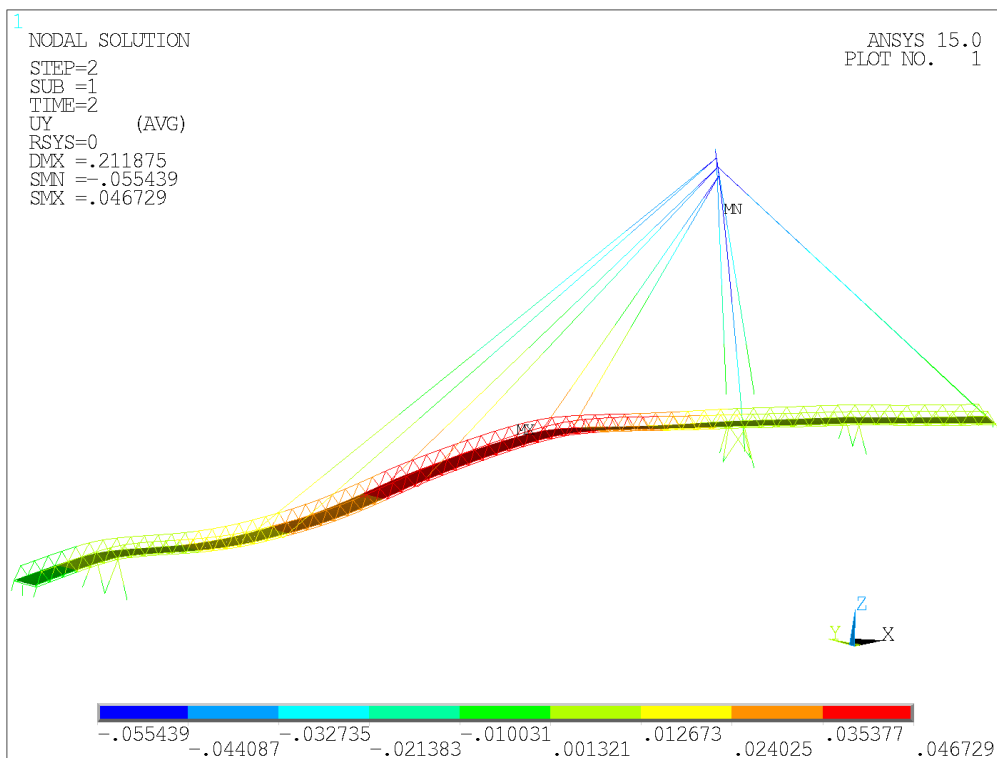


KZ0 – Pole posunutí u_{sum}

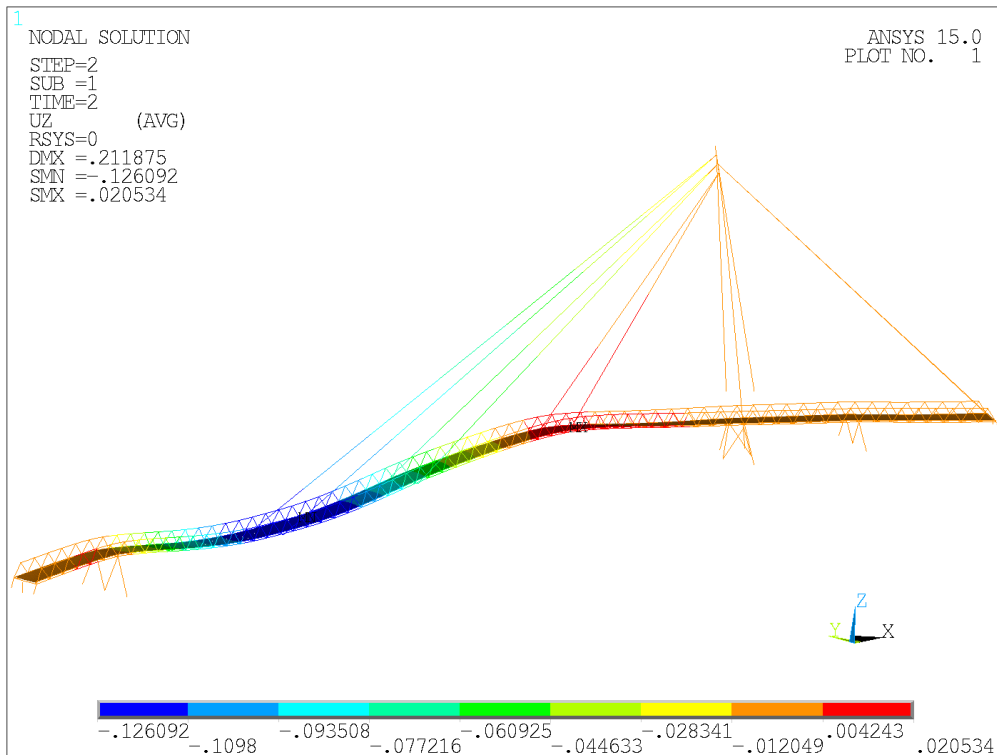
KZ1



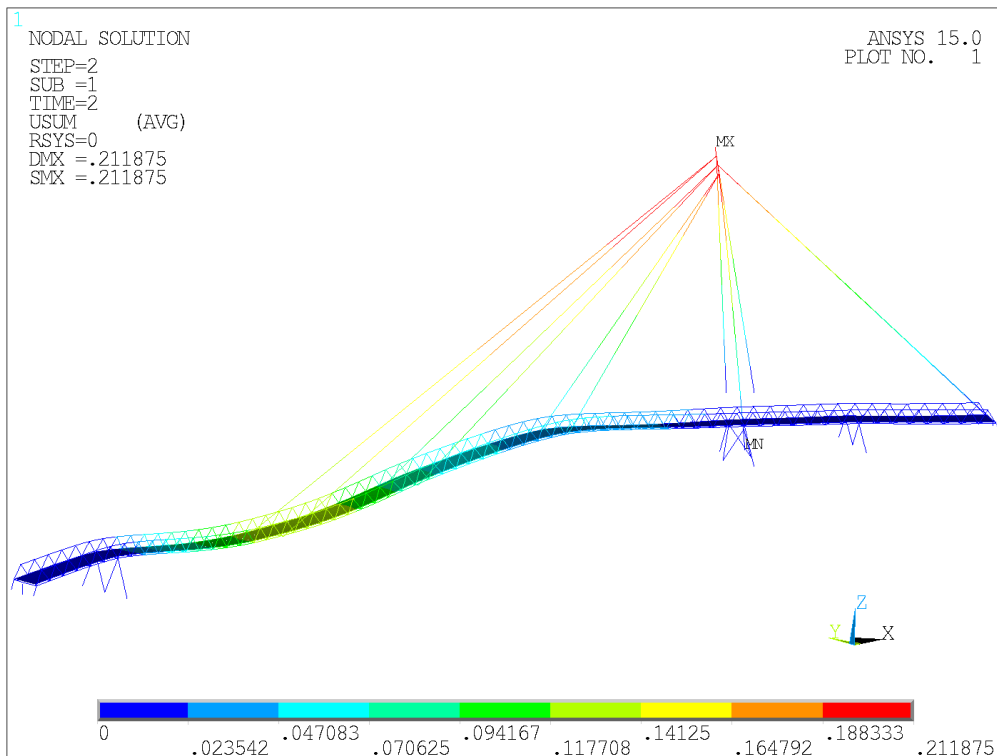
KZ1 – Pole posunutí u_x



KZ1 – Pole posunutí u_y

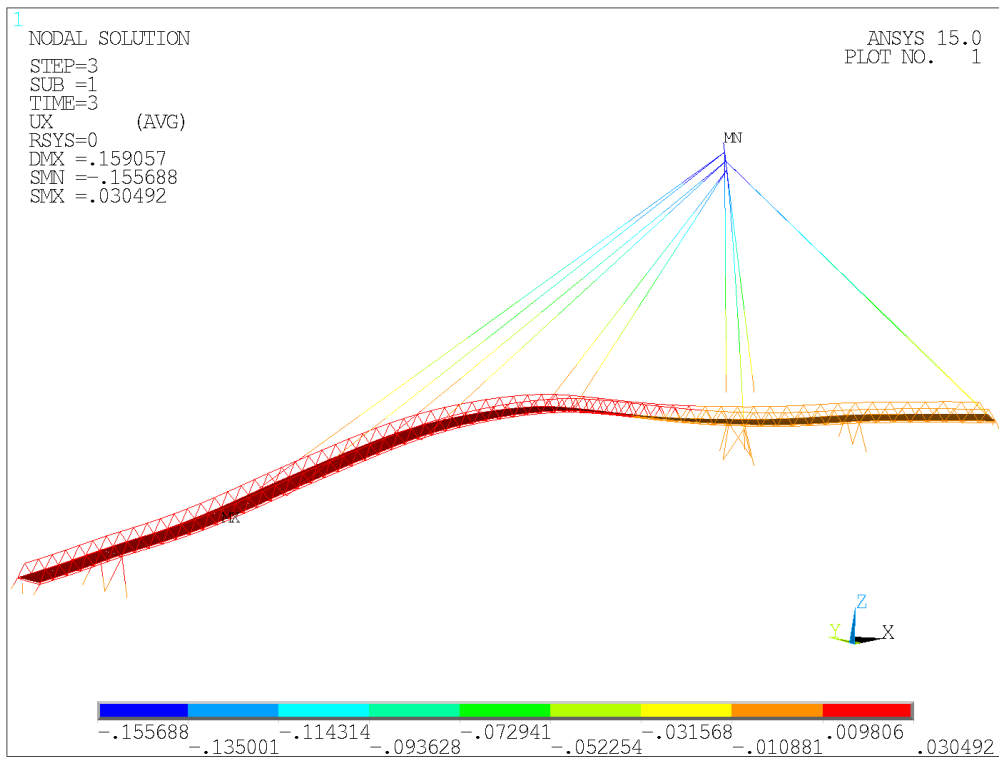


KZ1 – Pole posunutí u_z

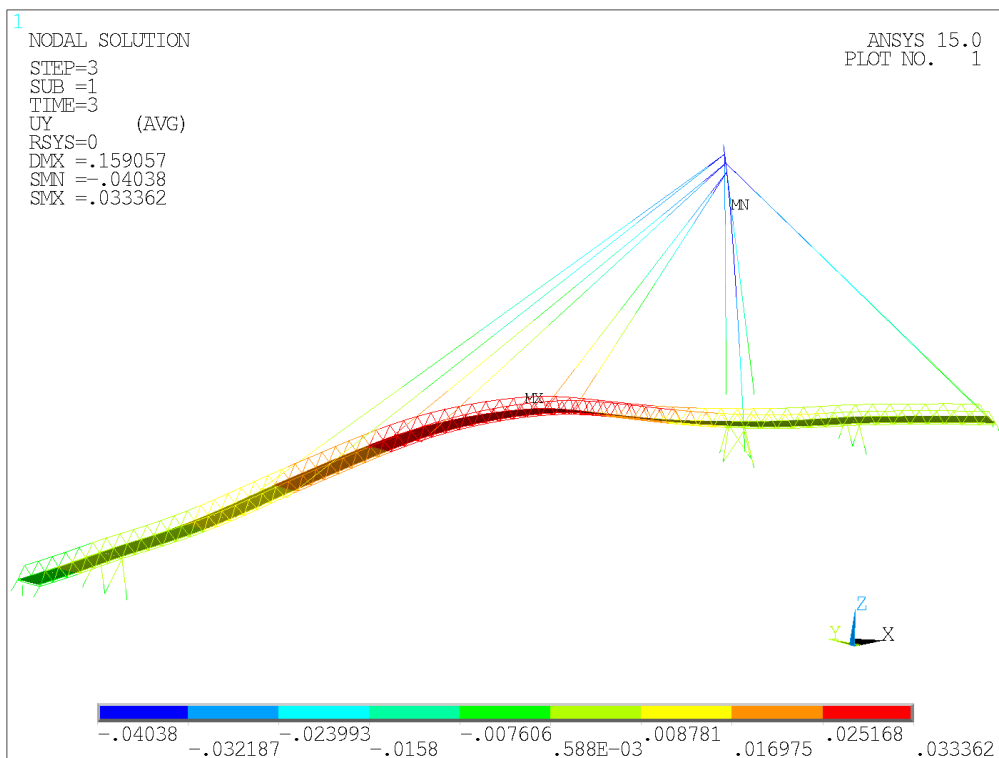


KZ1 – Pole posunutí u_{SUM}

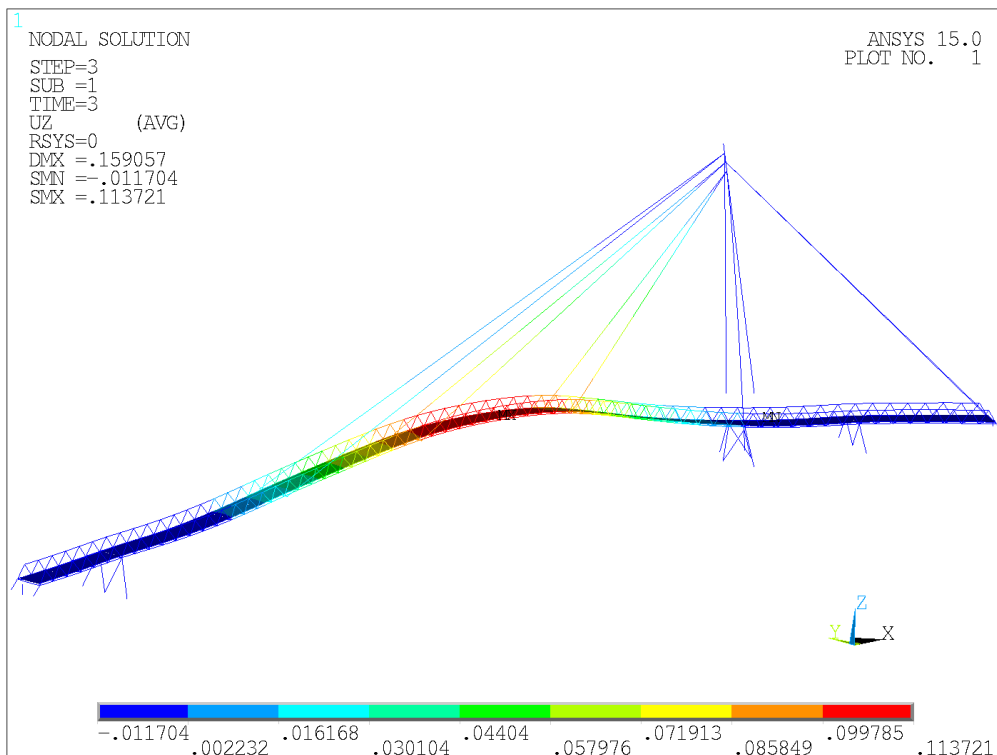
KZ2



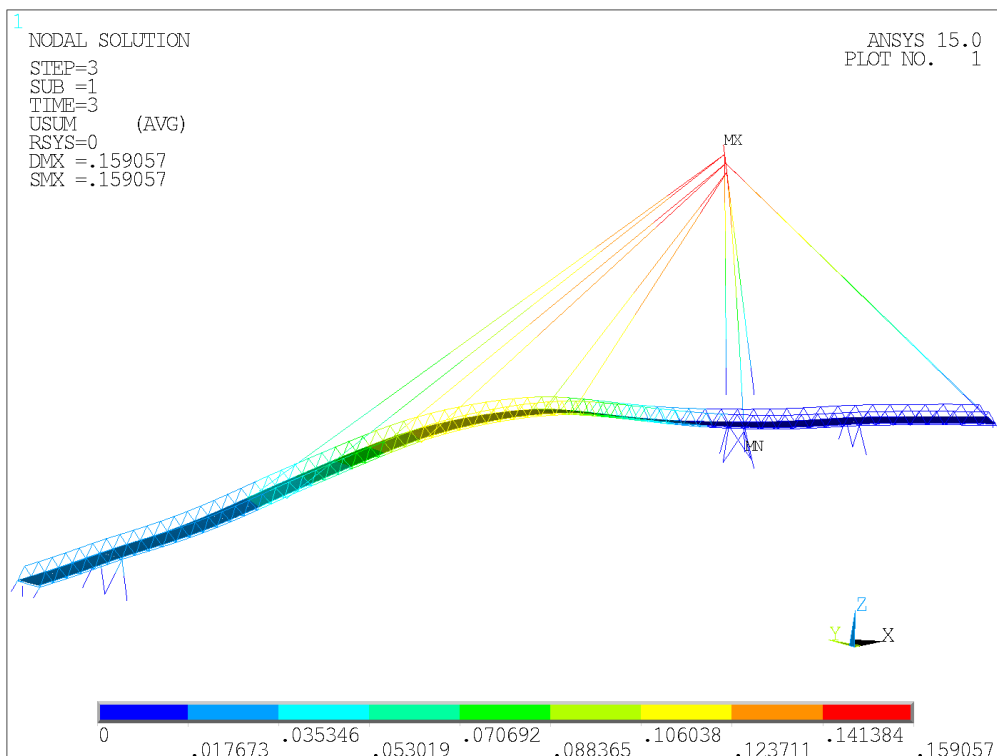
KZ2 – Pole posunutí u_x



KZ2 – Pole posunutí u_y

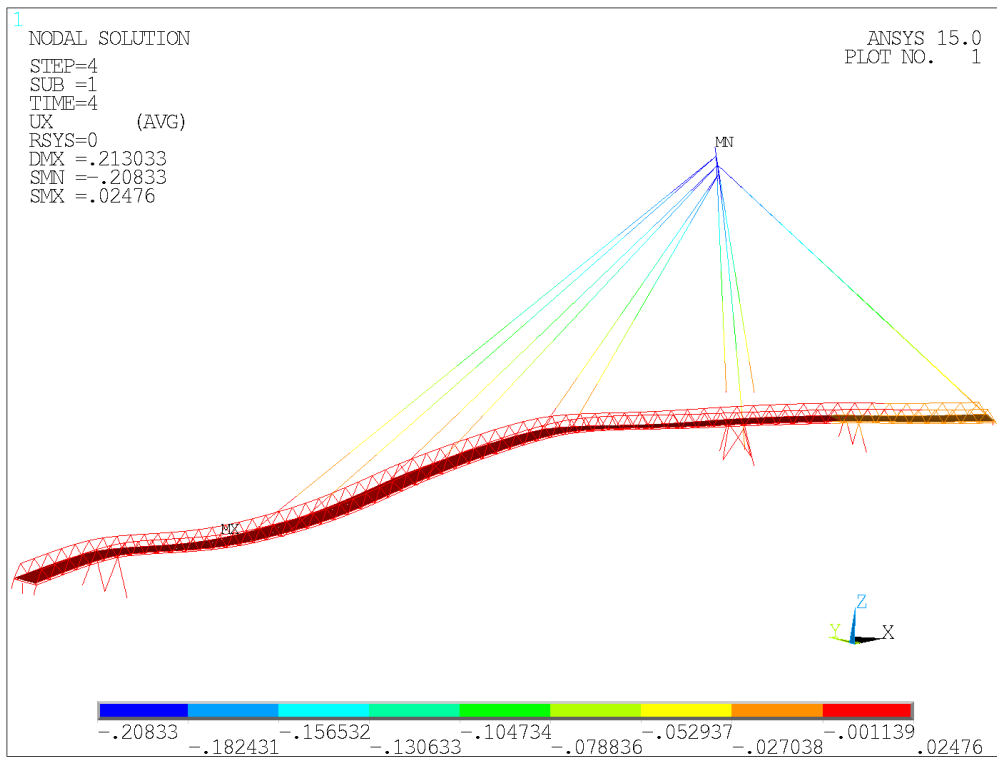


KZ2 – Pole posunutí u_z

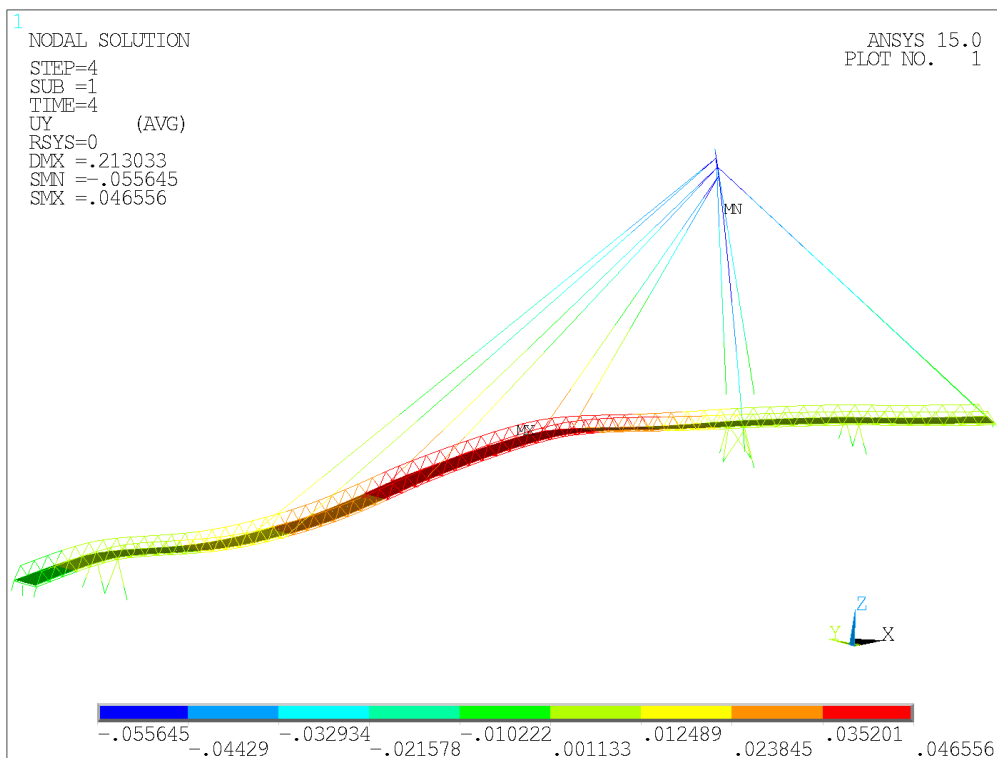


KZ2 – Pole posunutí U_{SUM}

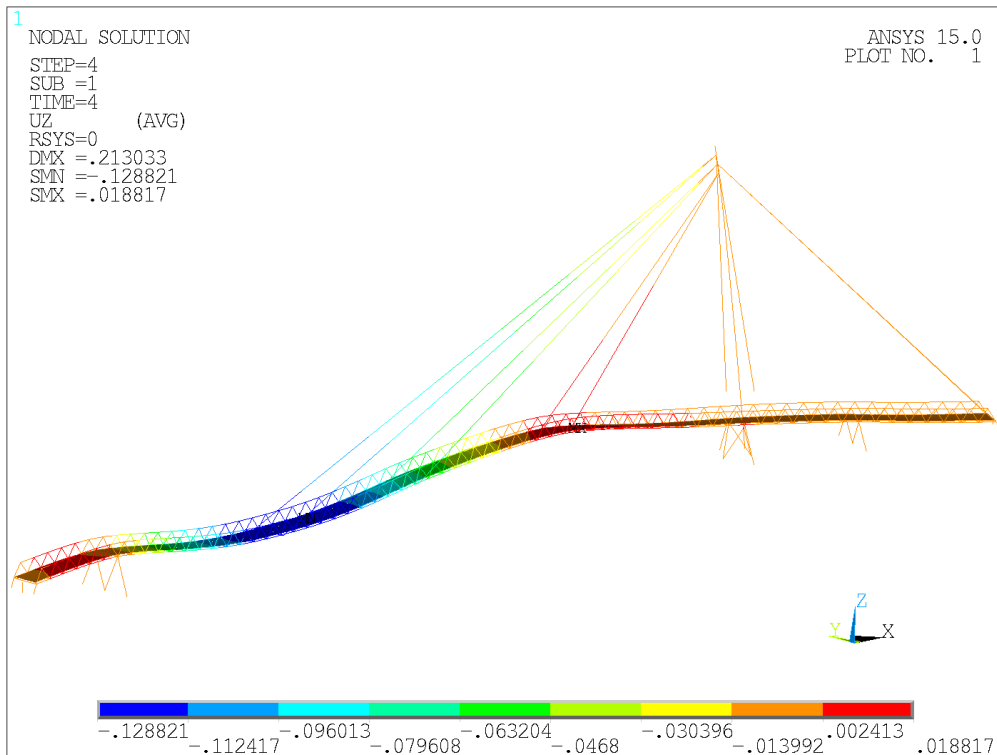
KZ3



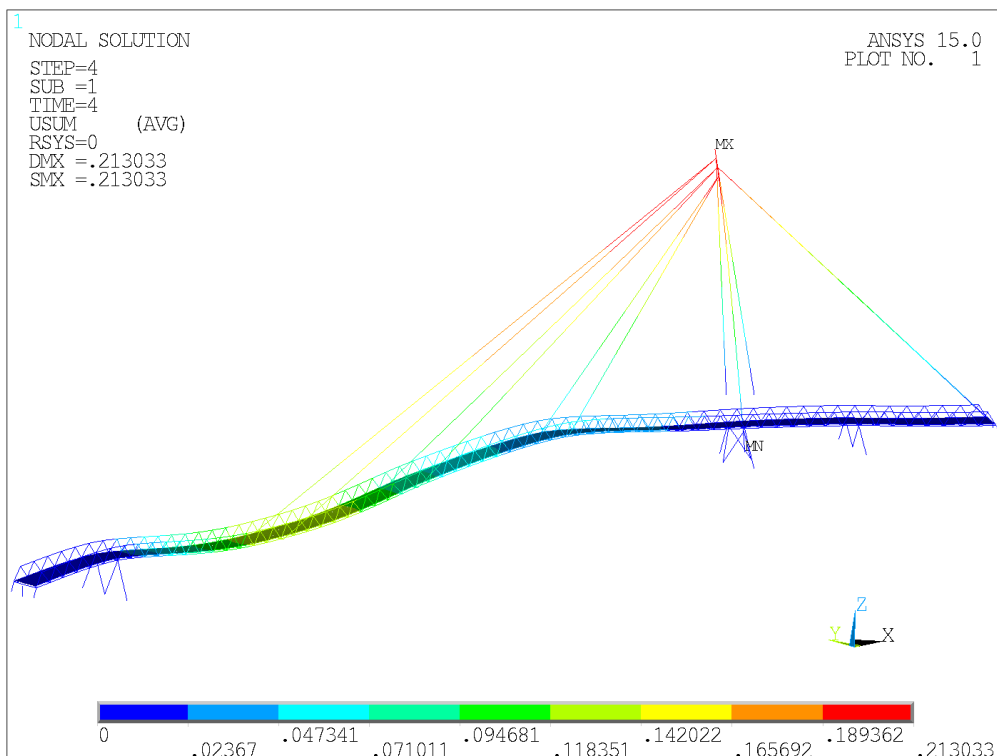
KZ3 – Pole posunutí u_x



KZ3 – Pole posunutí u_y

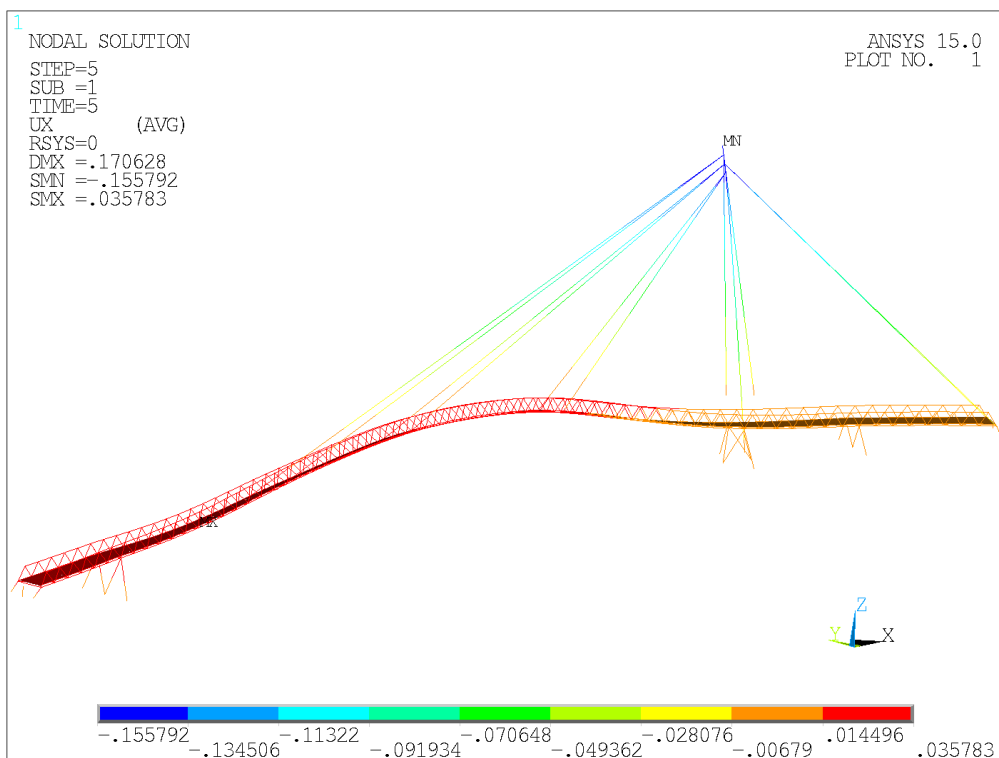


KZ3 – Pole posunutí u_z

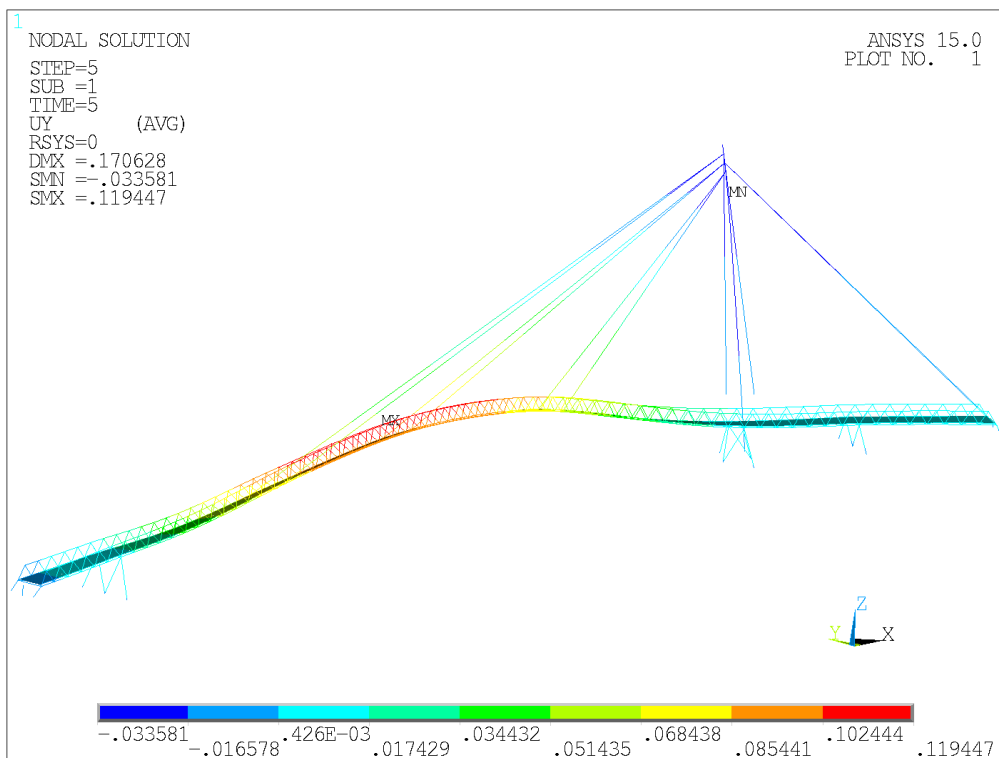


KZ3 – Pole posunutí U_{SUM}

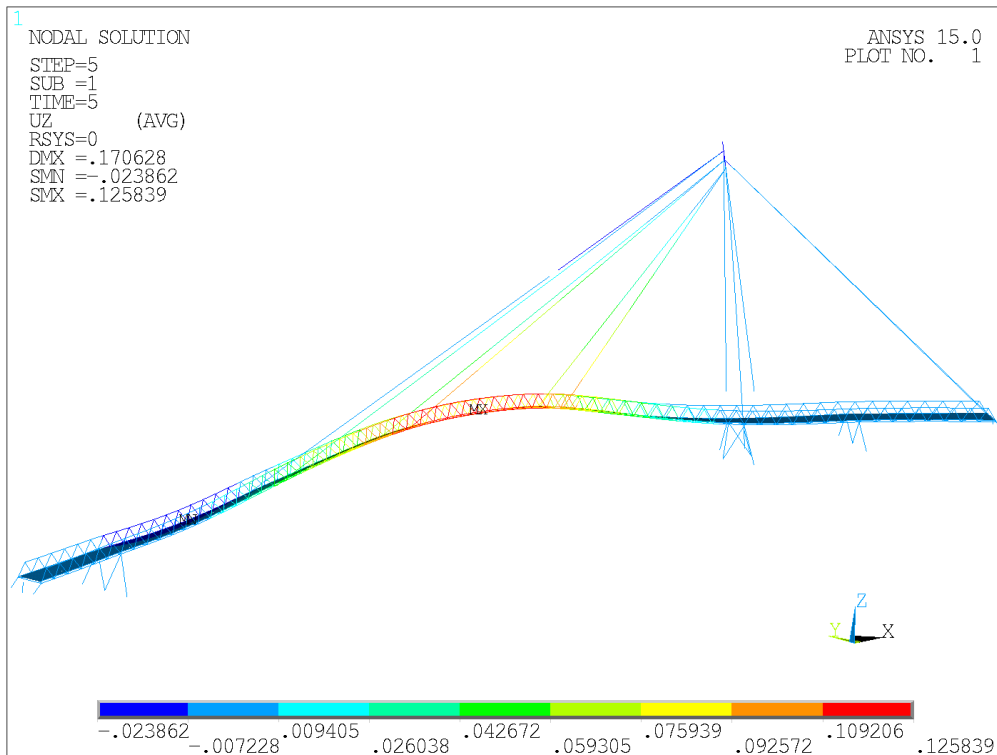
KZ4



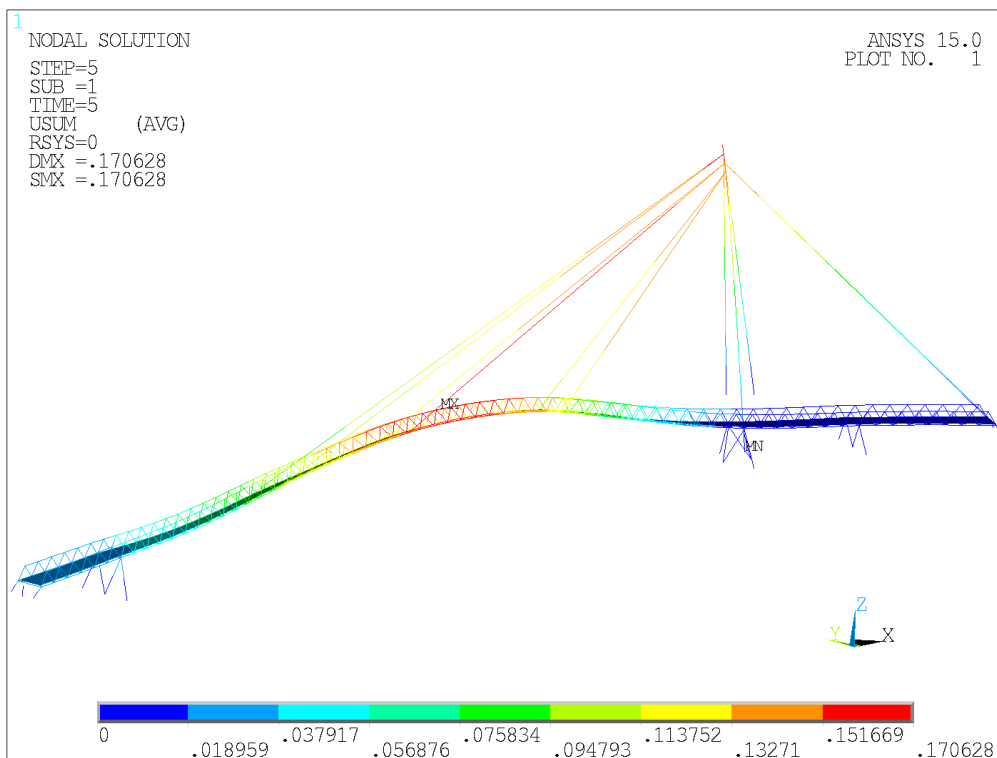
KZ4 – Pole posunutí u_x



KZ4 – Pole posunutí u_y

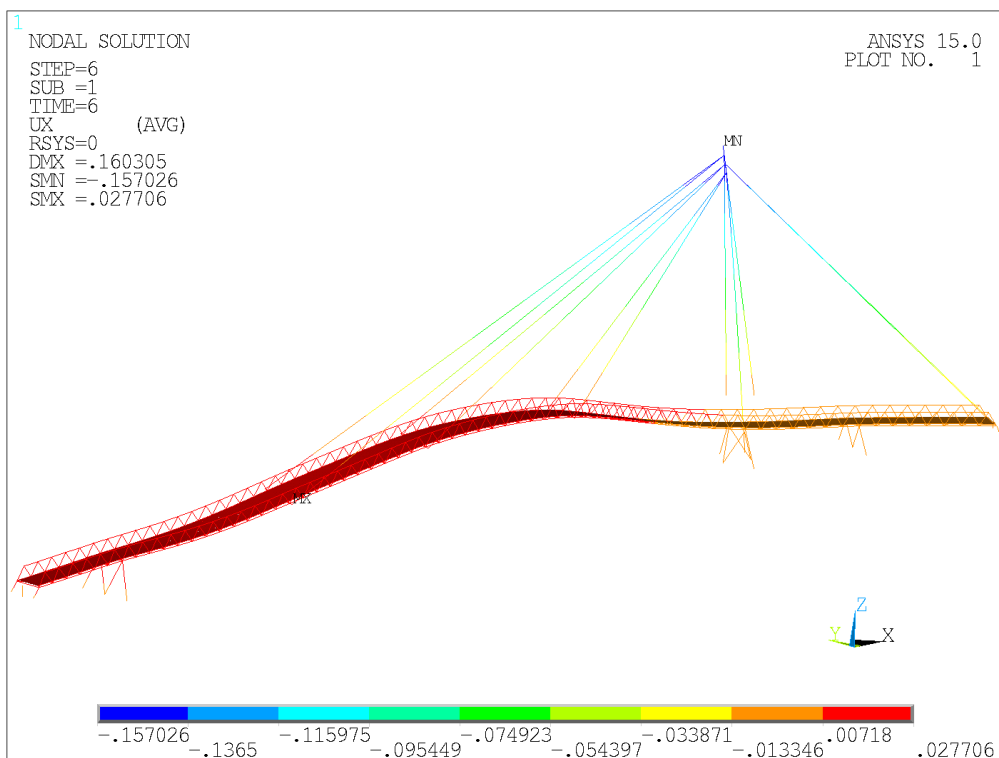


KZ4 – Pole posunutí u_z

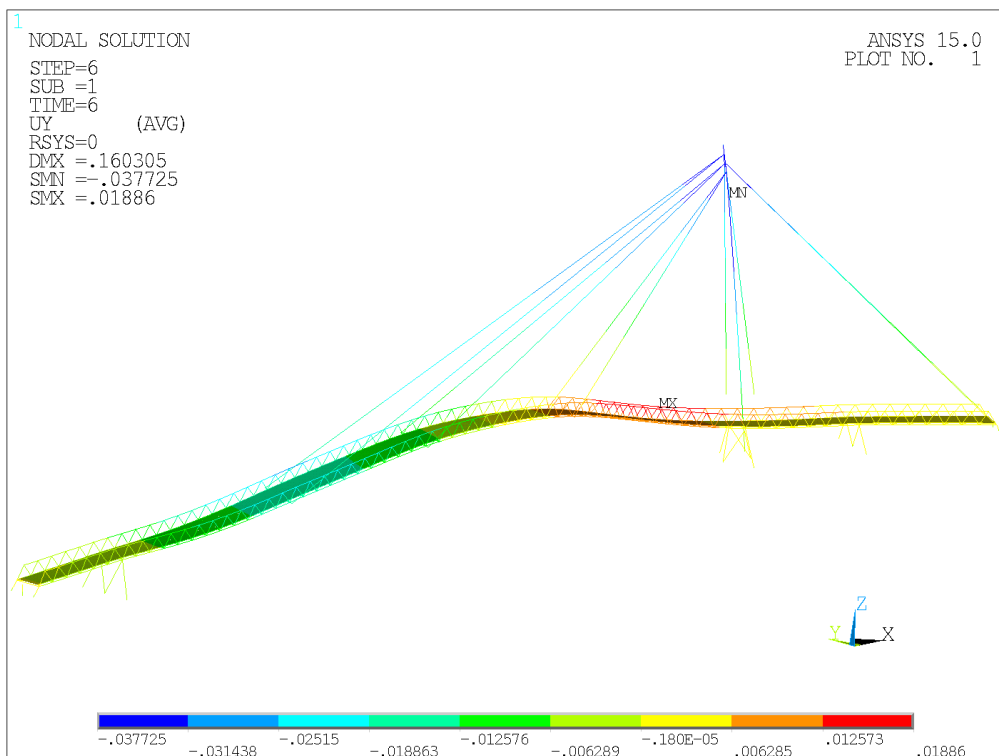


KZ4 – Pole posunutí U_{SUM}

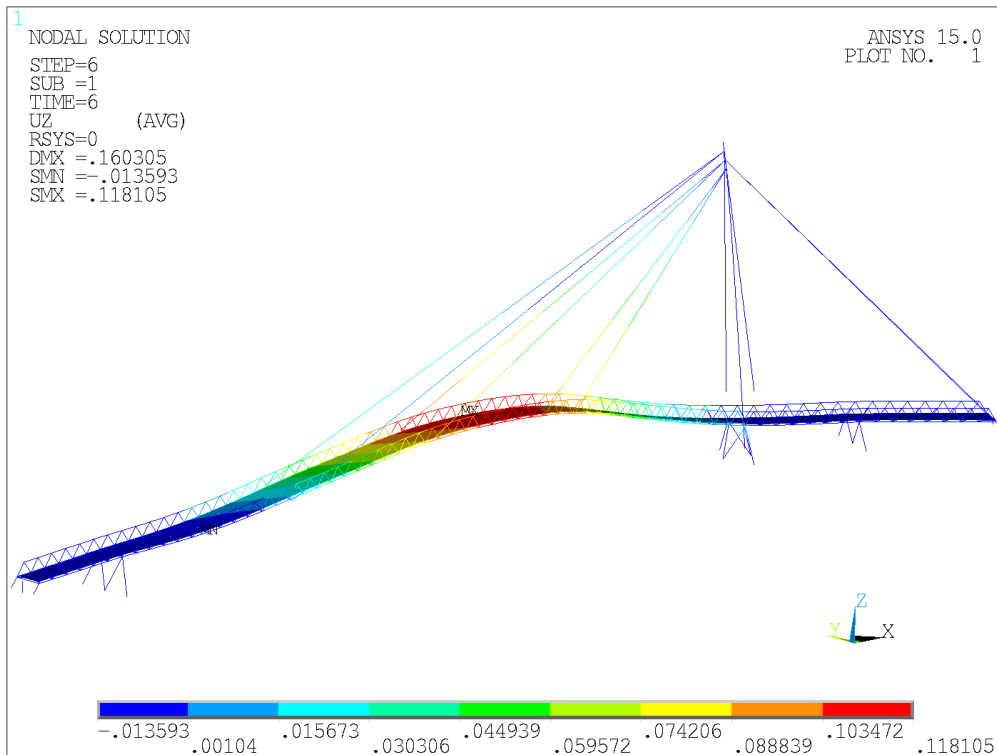
KZ5



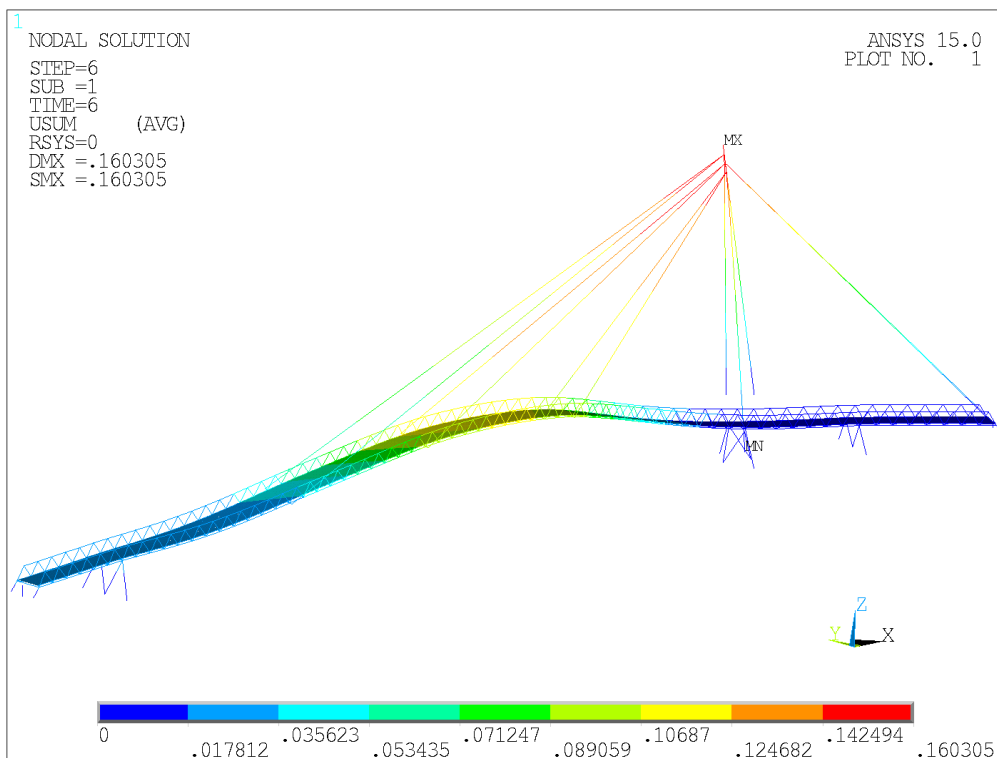
KZ5 – Pole posunutí u_x



KZ5 – Pole posunutí u_y

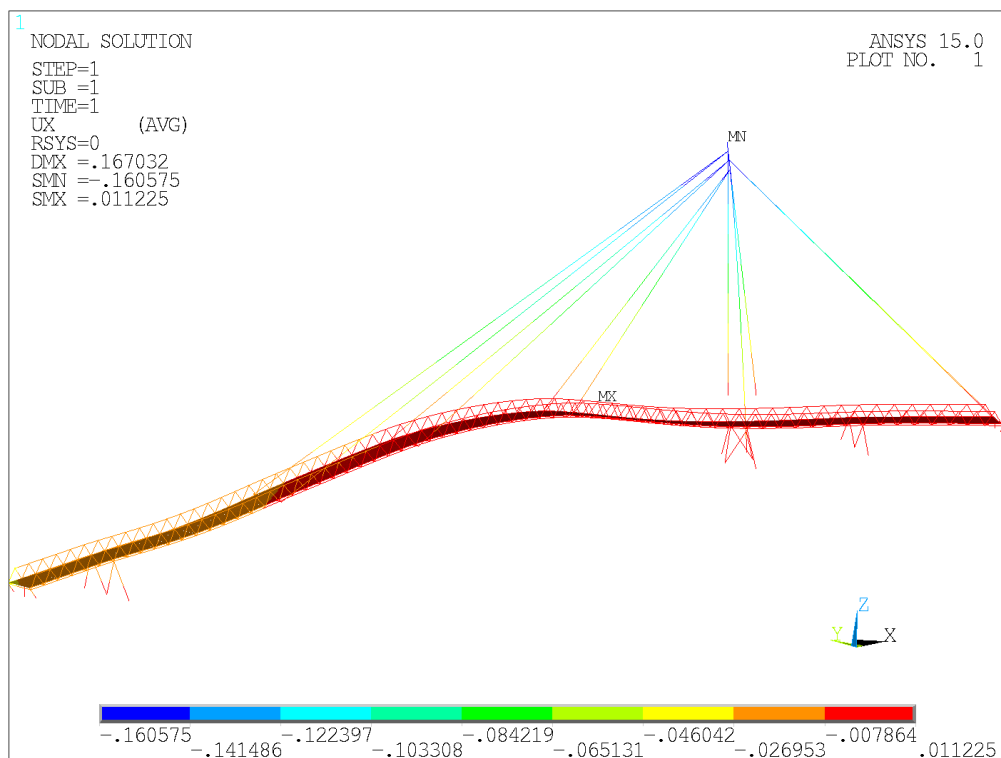


KZ5 – Pole posunutí u_z

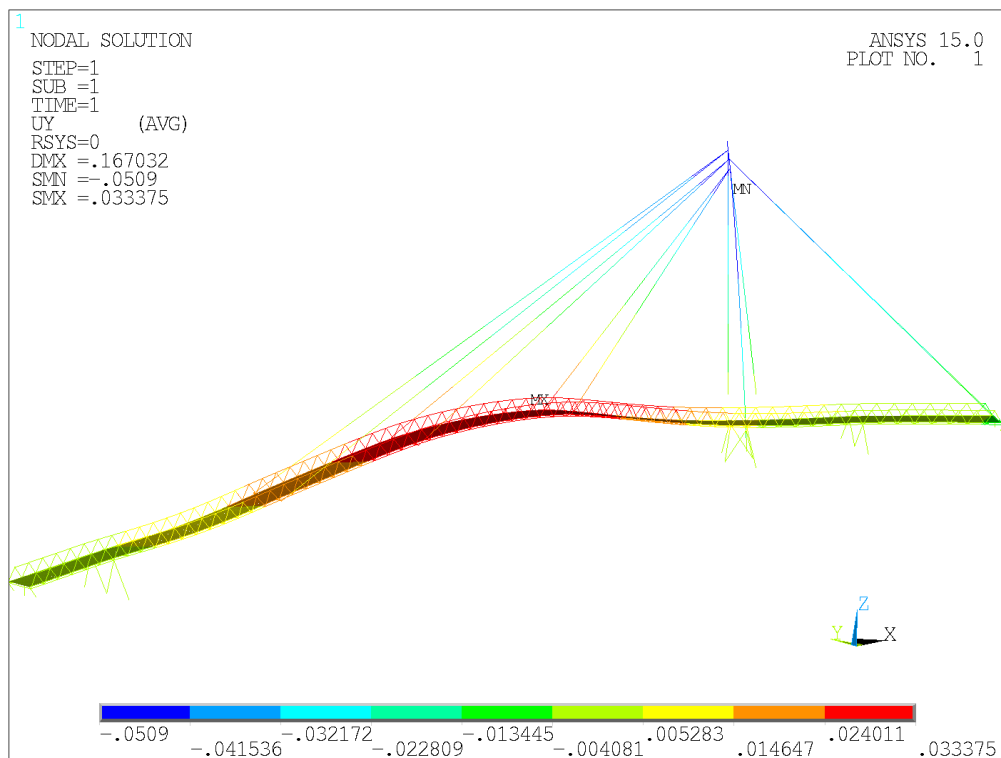


KZ5 – Pole posunutí U_{SUM}

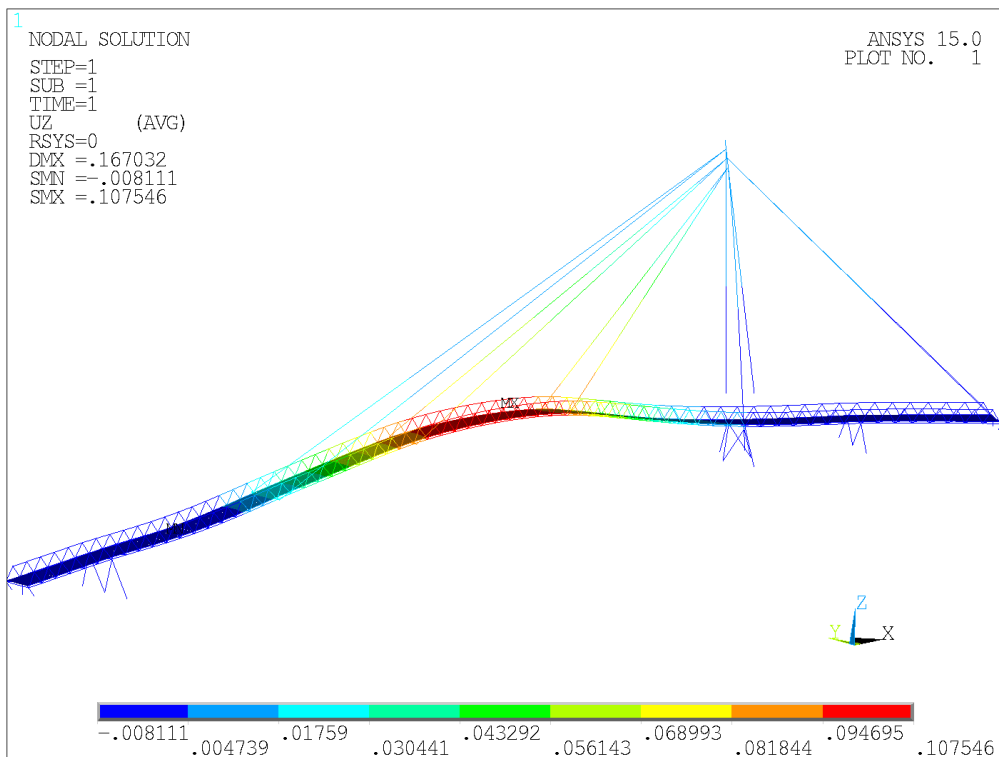
KZ6



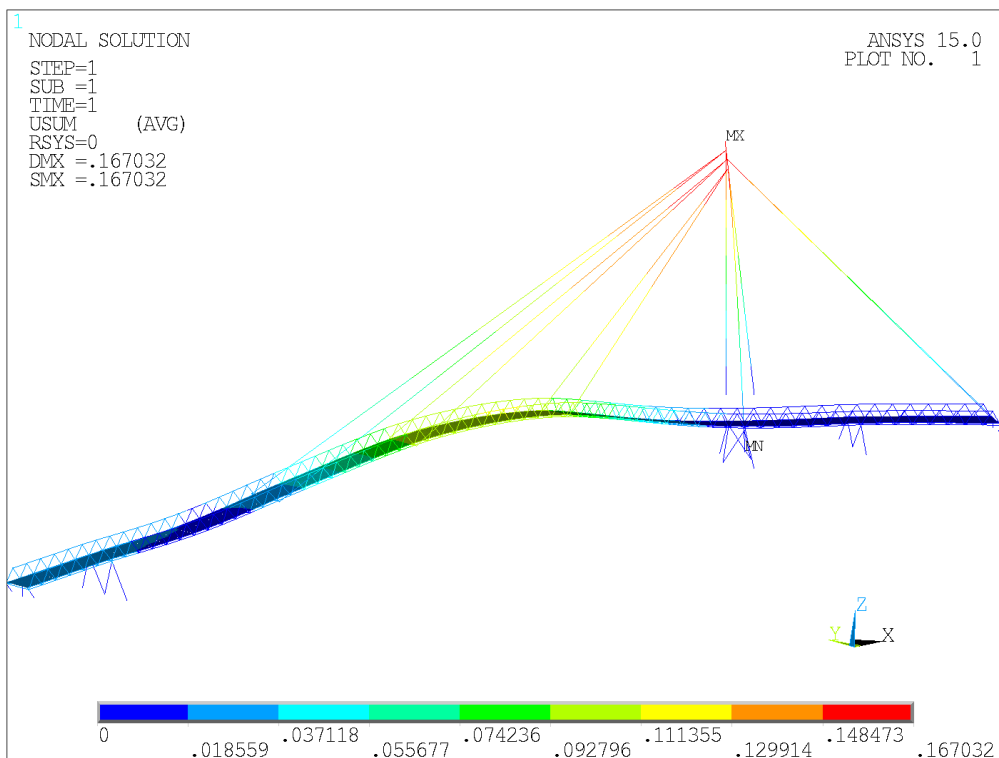
KZ6 – Pole posunutí u_x



KZ6 – Pole posunutí u_y

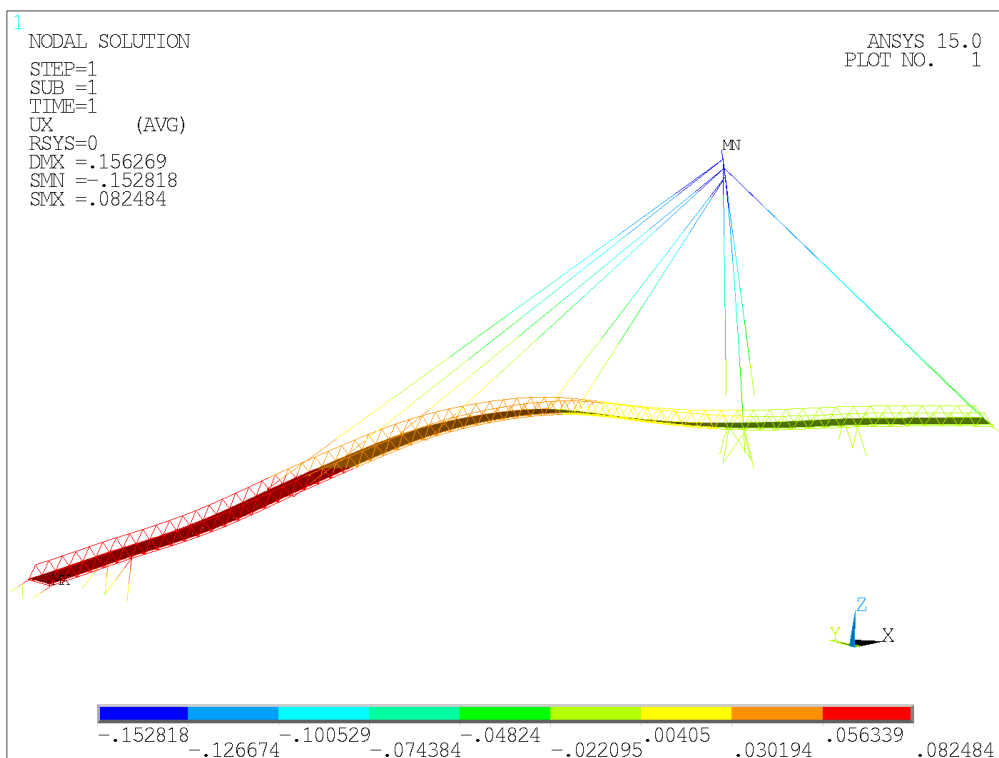


KZ6 – Pole posunutí u_z

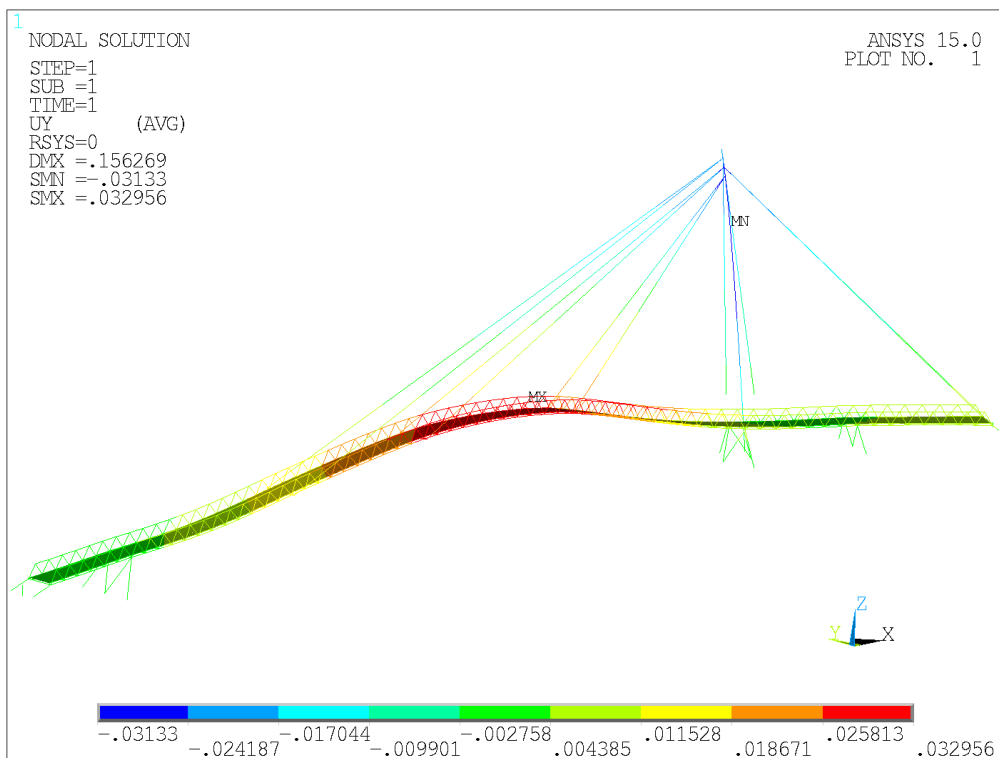


KZ6 – Pole posunutí u_{SUM}

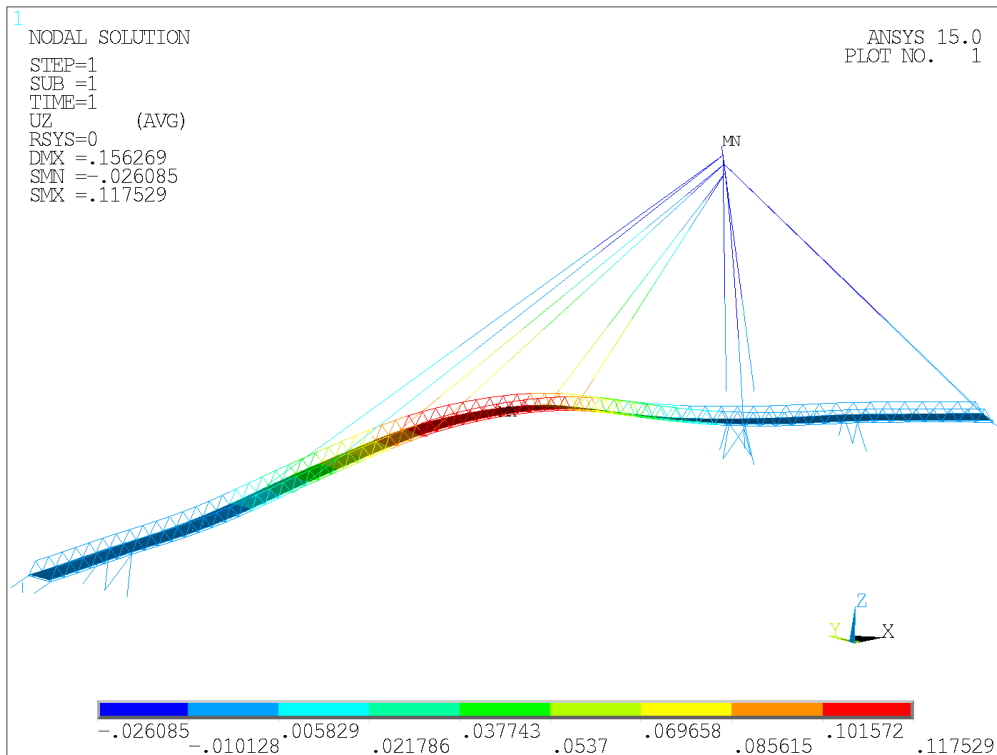
KZ7



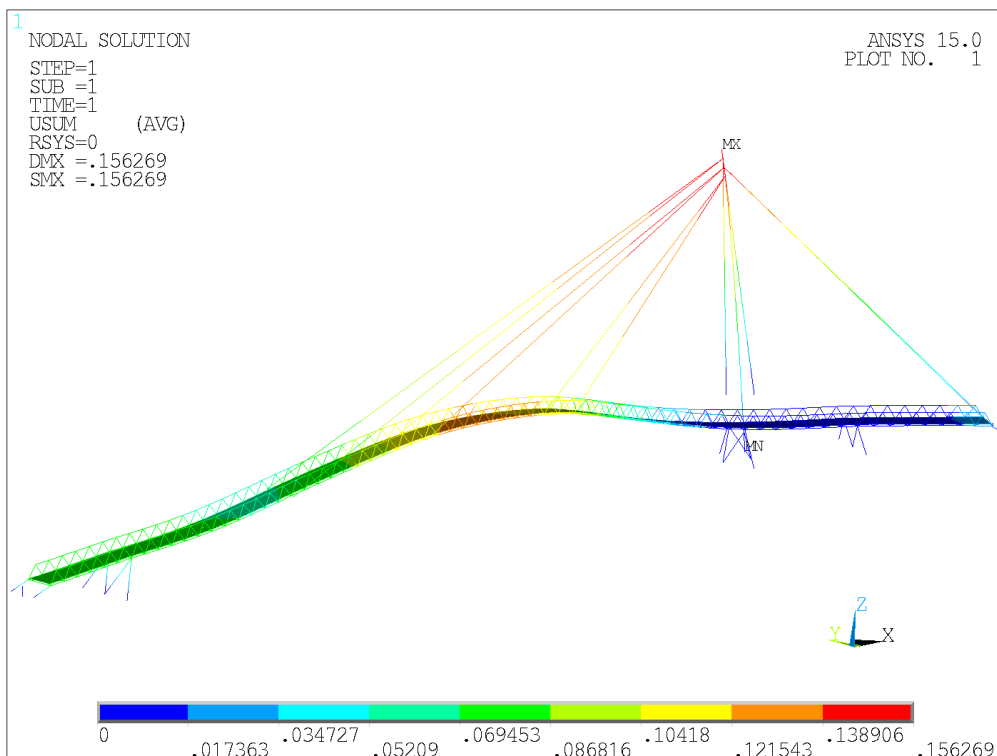
KZ7 – Pole posunutí u_x



KZ7 – Pole posunutí u_y

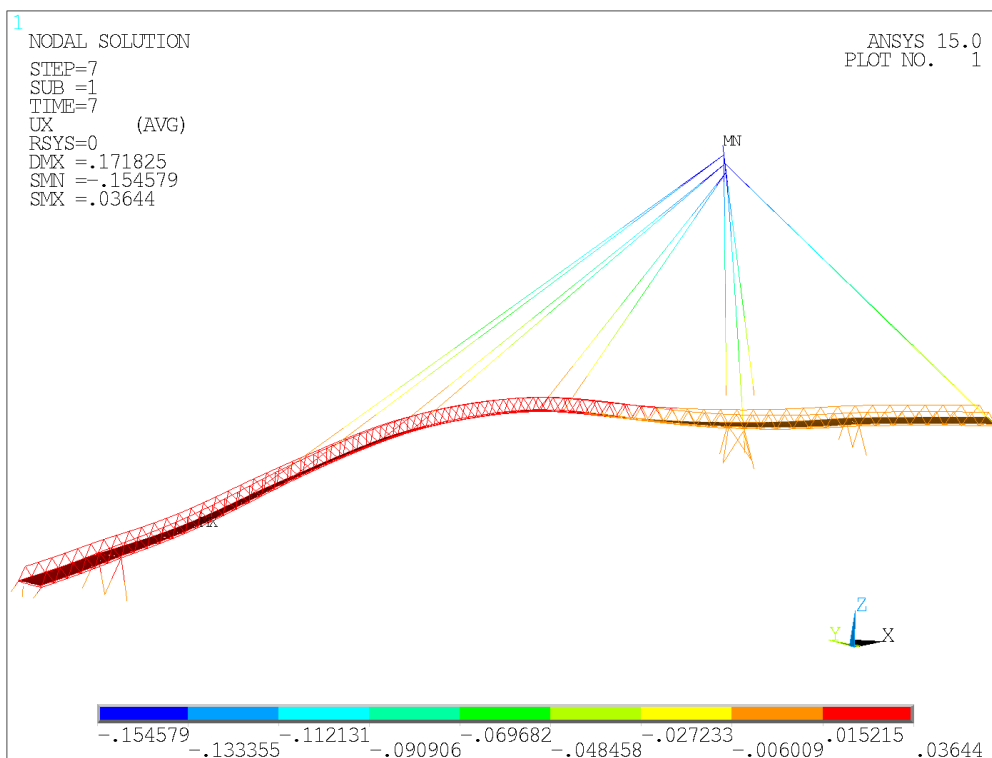


KZ7 – Pole posunutí u_z

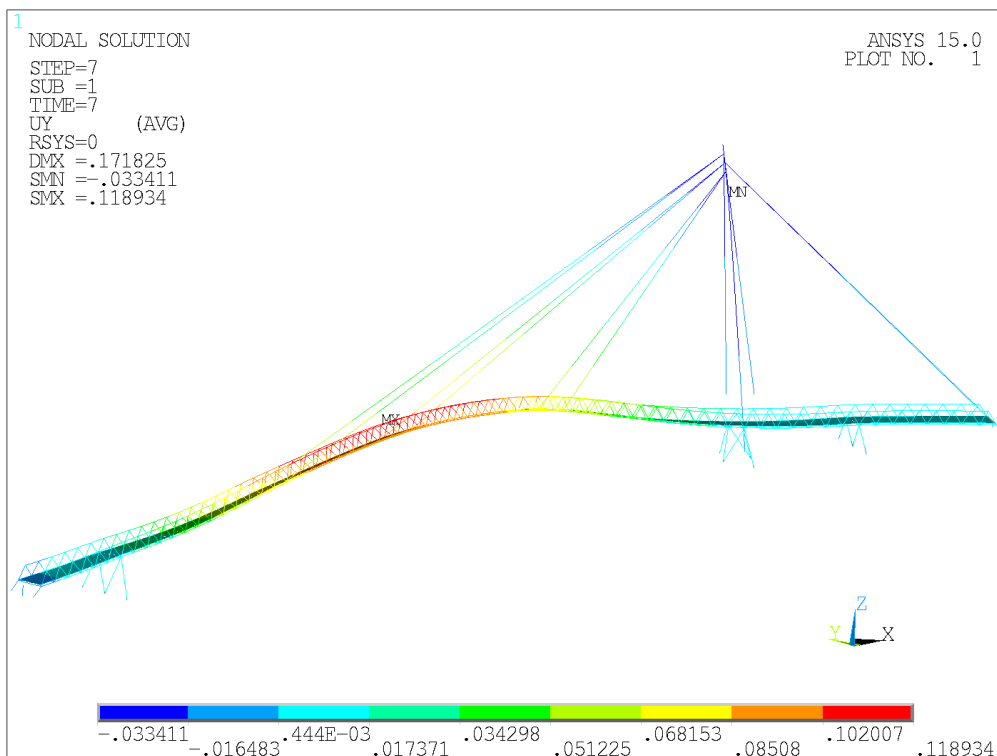


KZ7 – Pole posunutí u_{SUM}

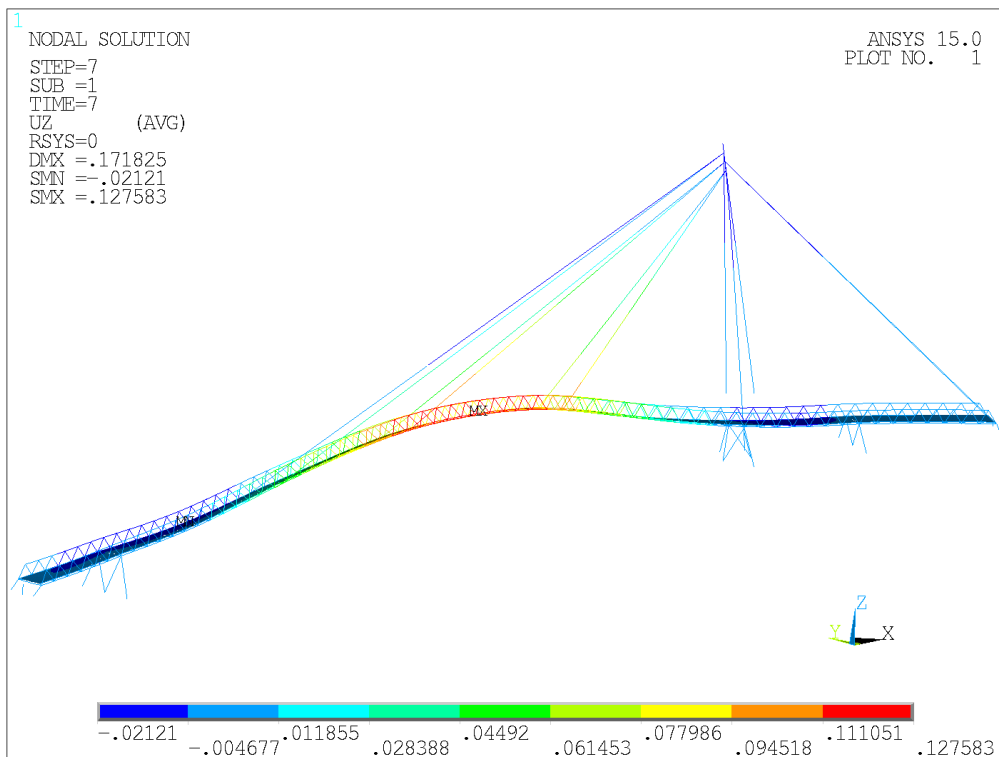
KZ8



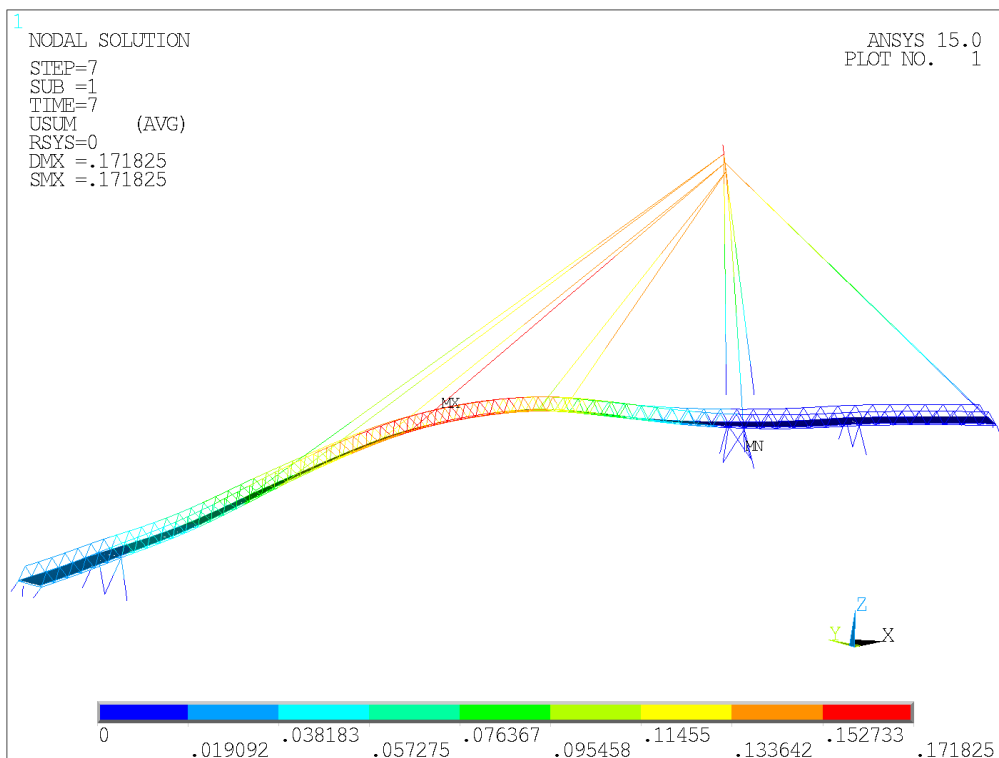
KZ8 – Pole posunutí u_x



KZ8 – Pole posunutí u_y

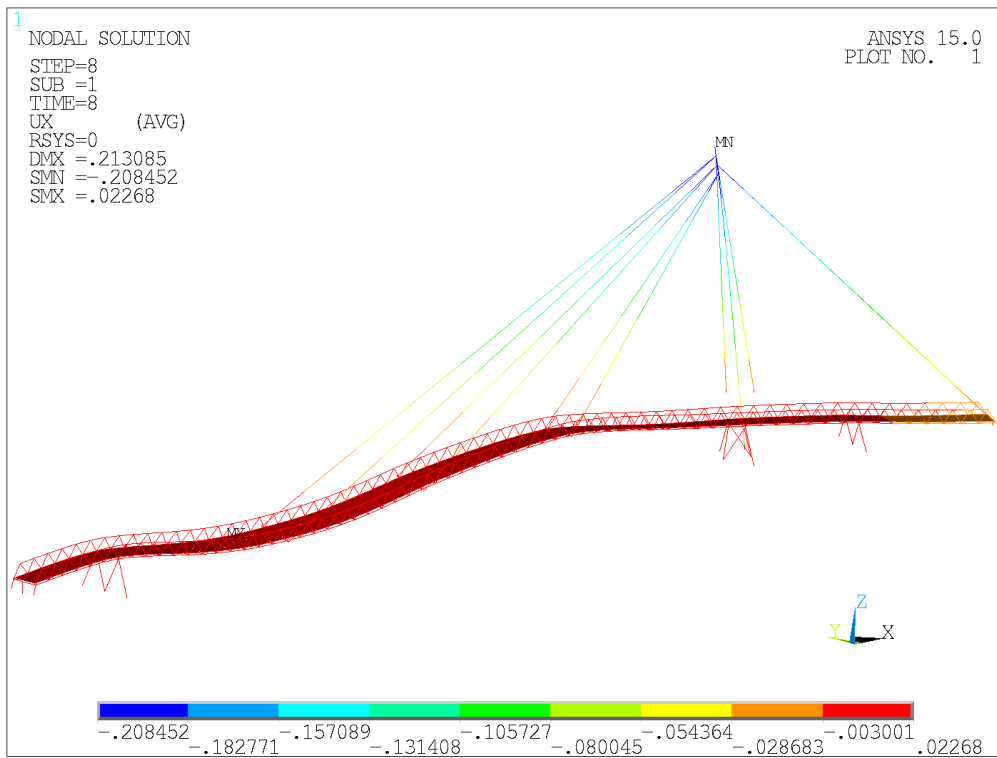


KZ8 – Pole posunutí u_z

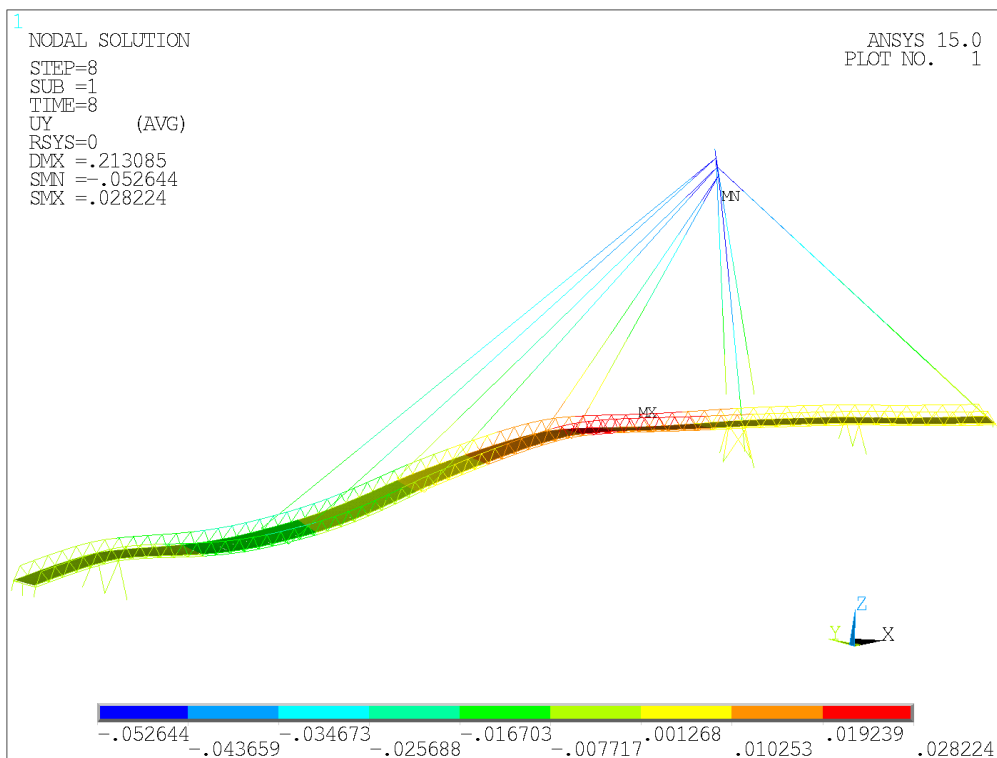


KZ8 – Pole posunutí u_{SUM}

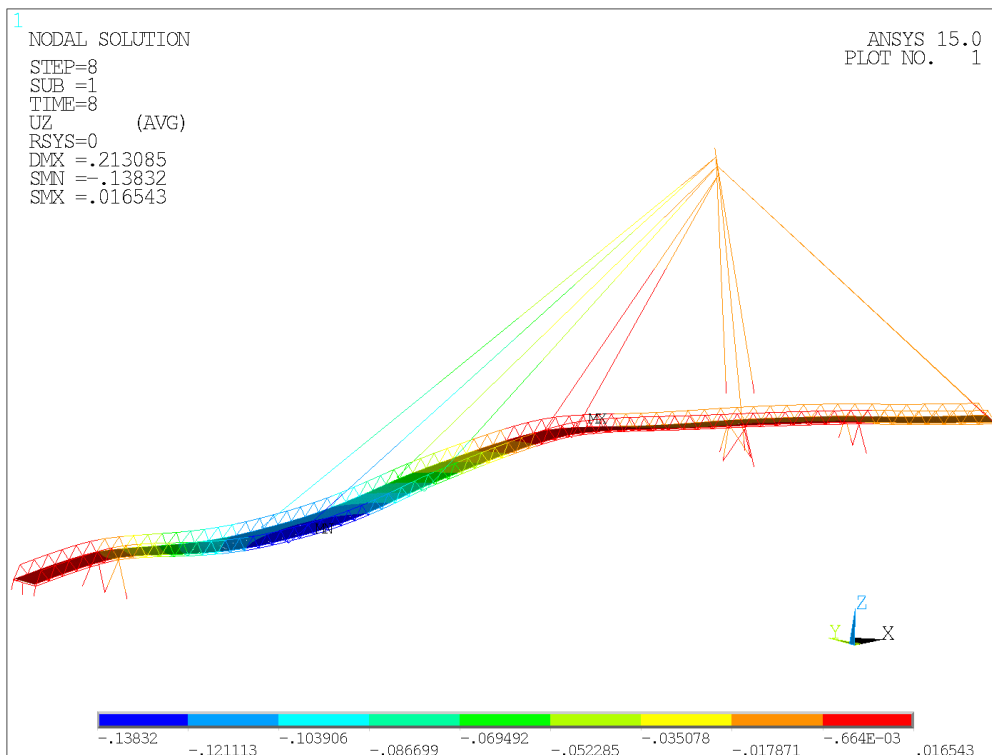
KZ9



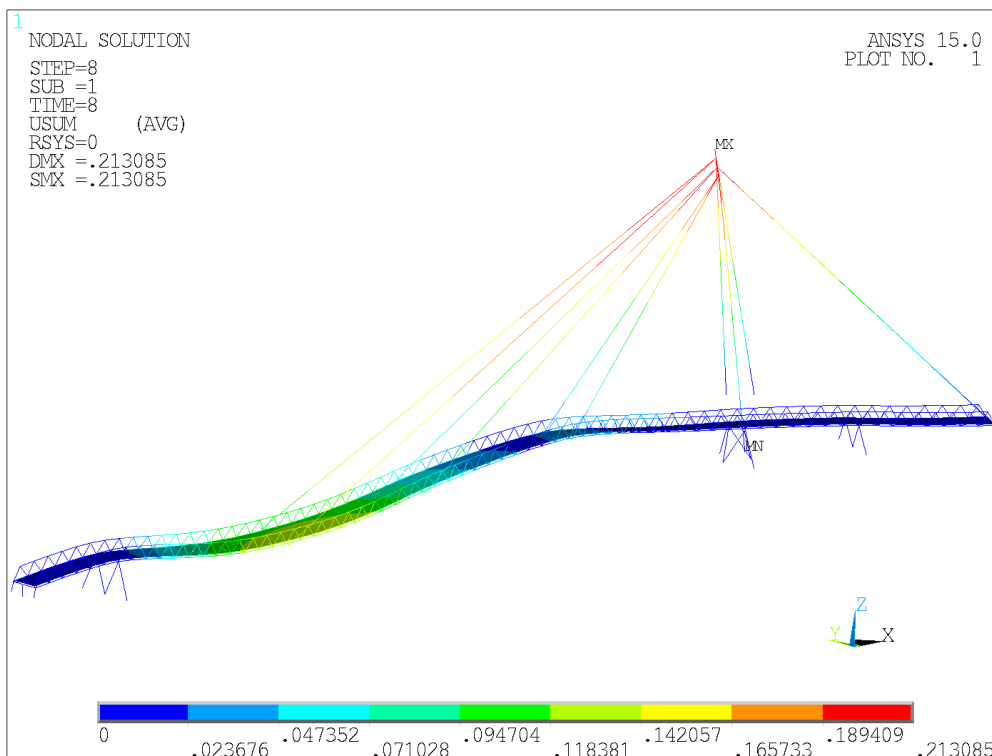
KZ9 – Pole posunutí u_x



KZ9 – Pole posunutí u_y

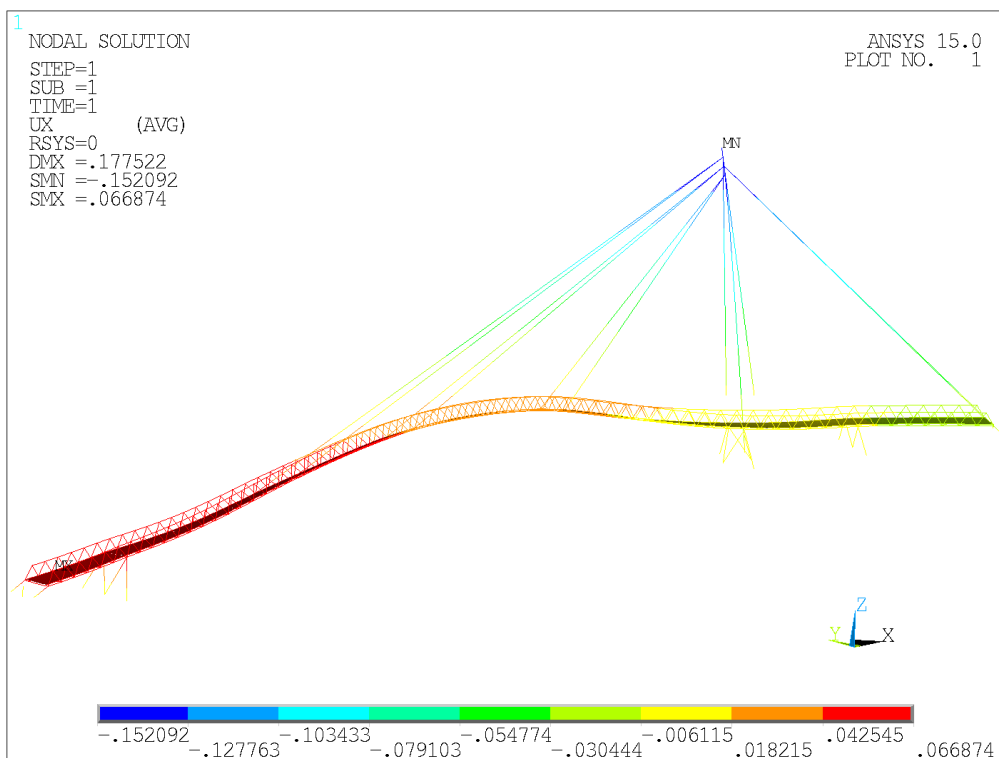


KZ9 – Pole posunutí u_z

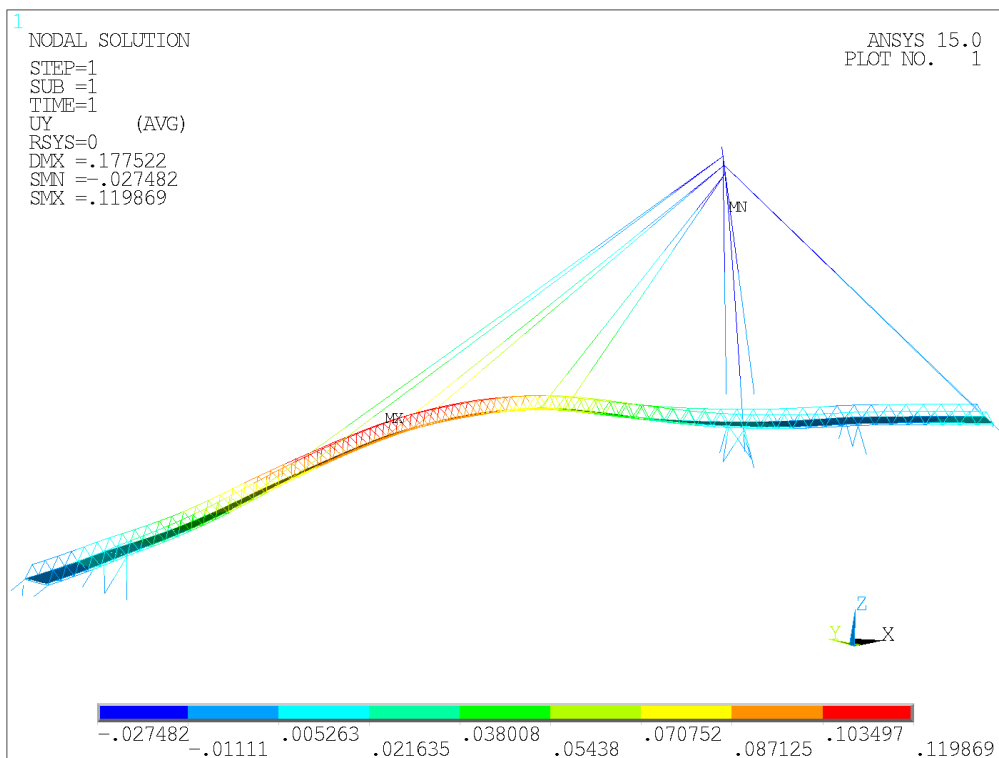


KZ9 – Pole posunutí u_{SUM}

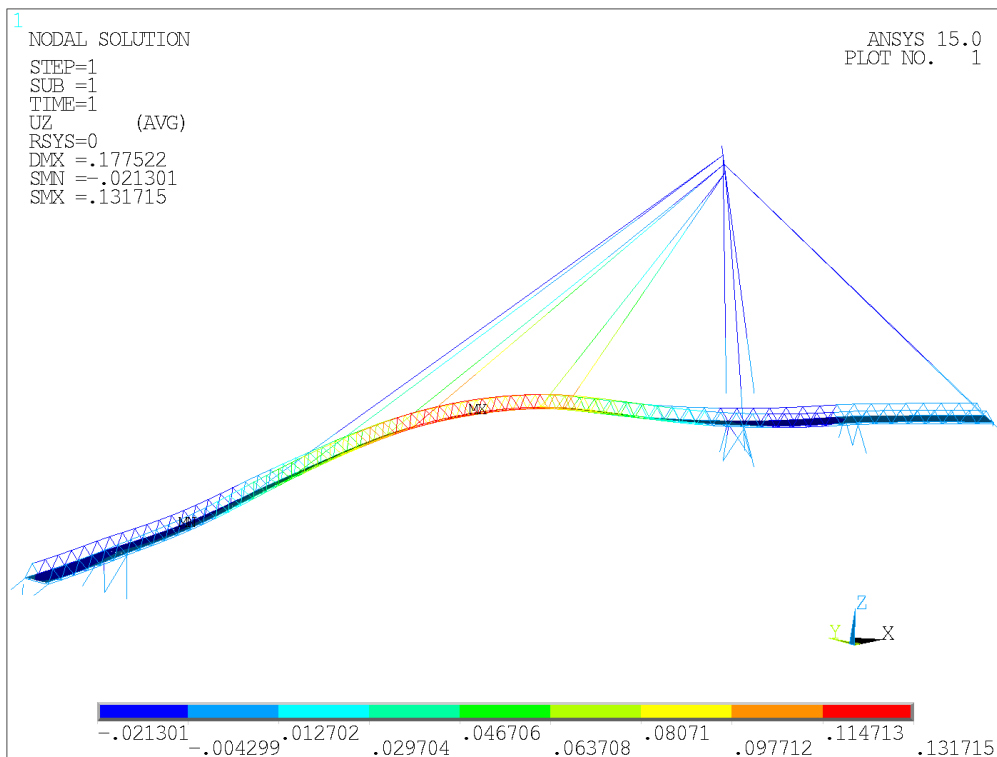
KZ10



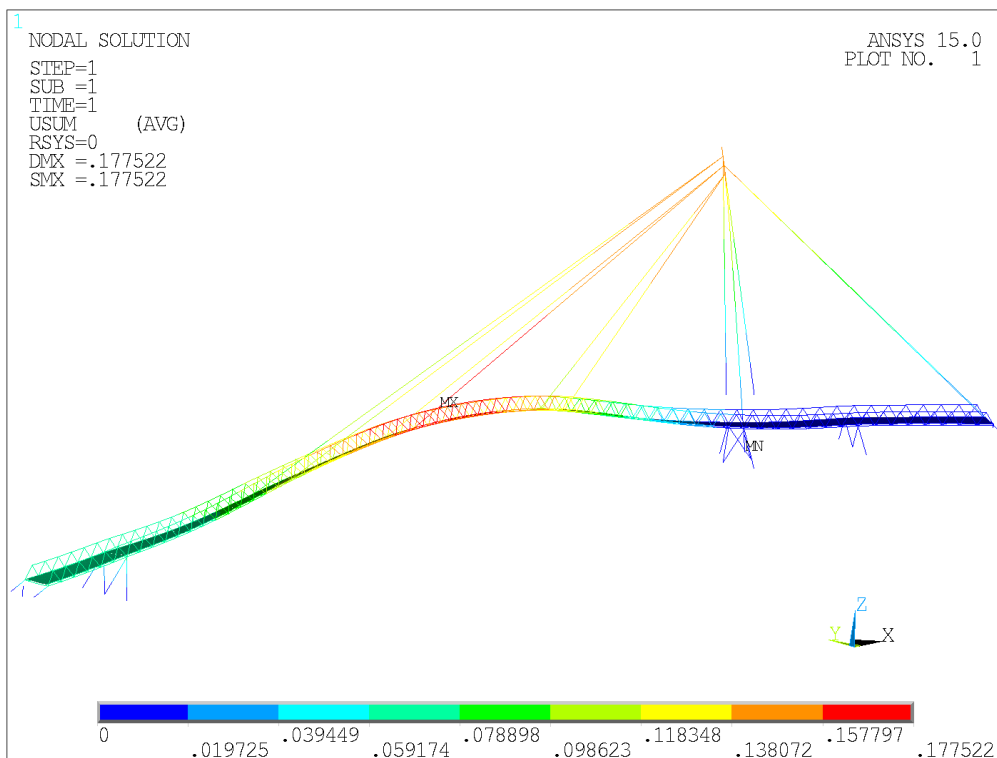
KZ10 – Pole posunutí u_x



KZ10 – Pole posunutí u_y

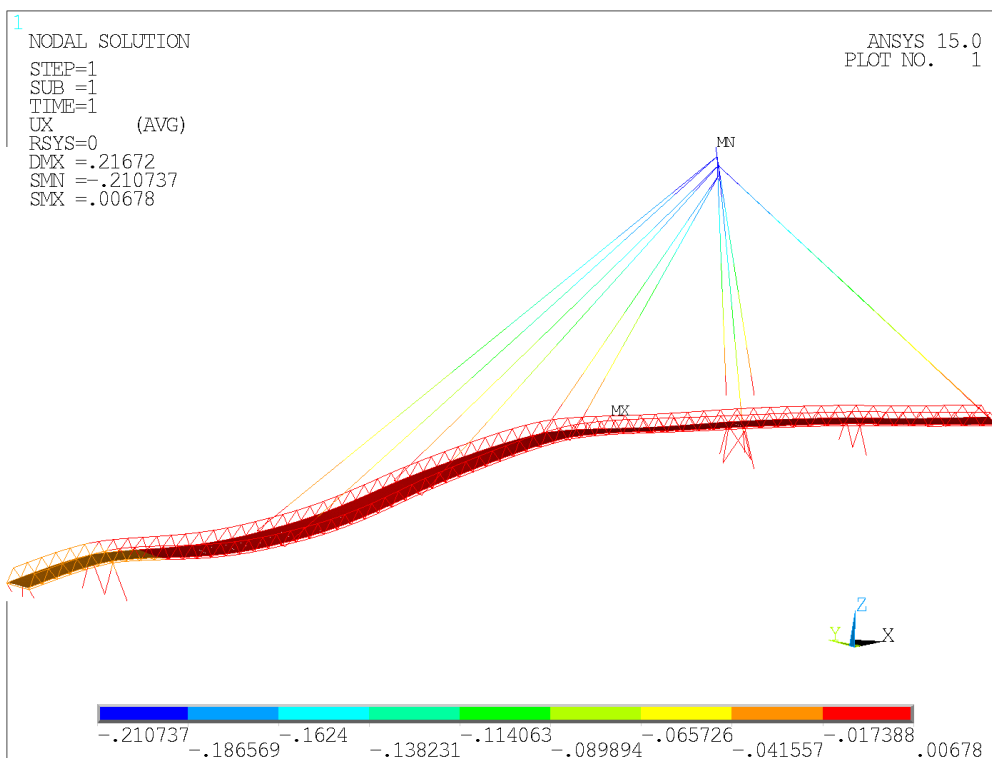


KZ10 – Pole posunutí u_z

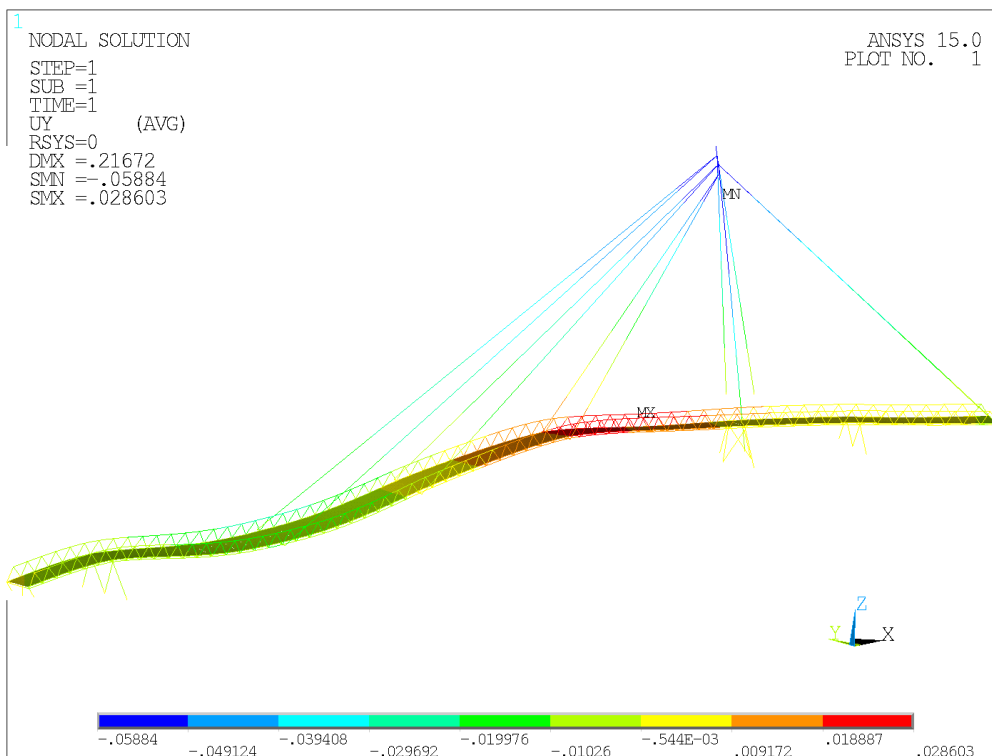


KZ10 – Pole posunutí u_{SUM}

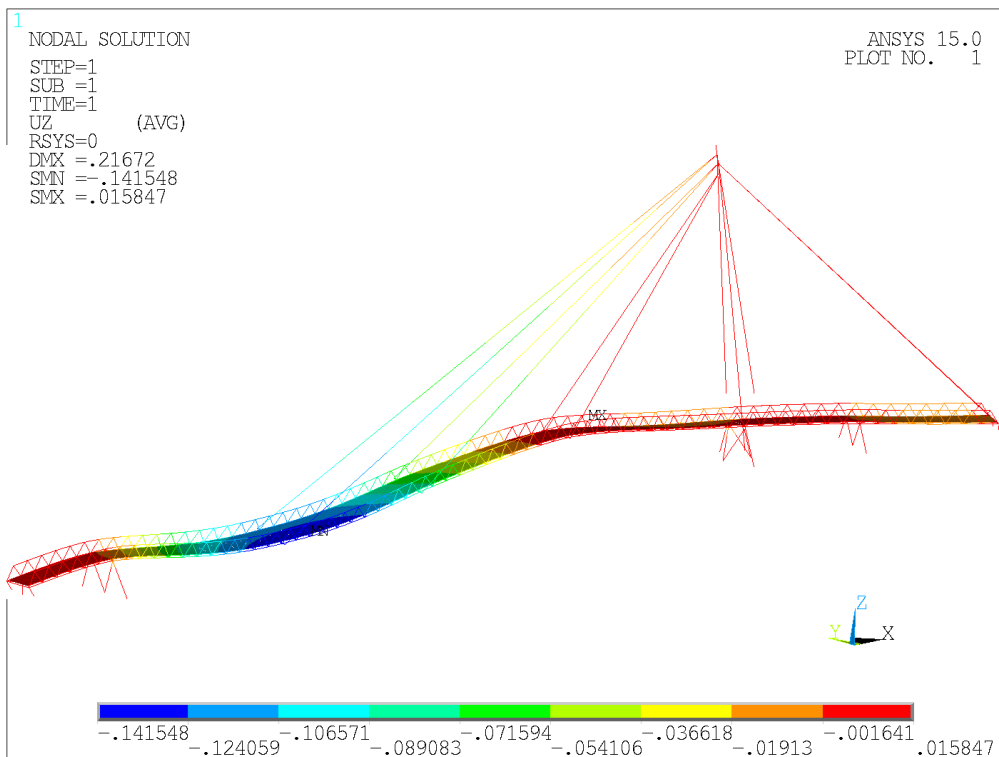
KZ11



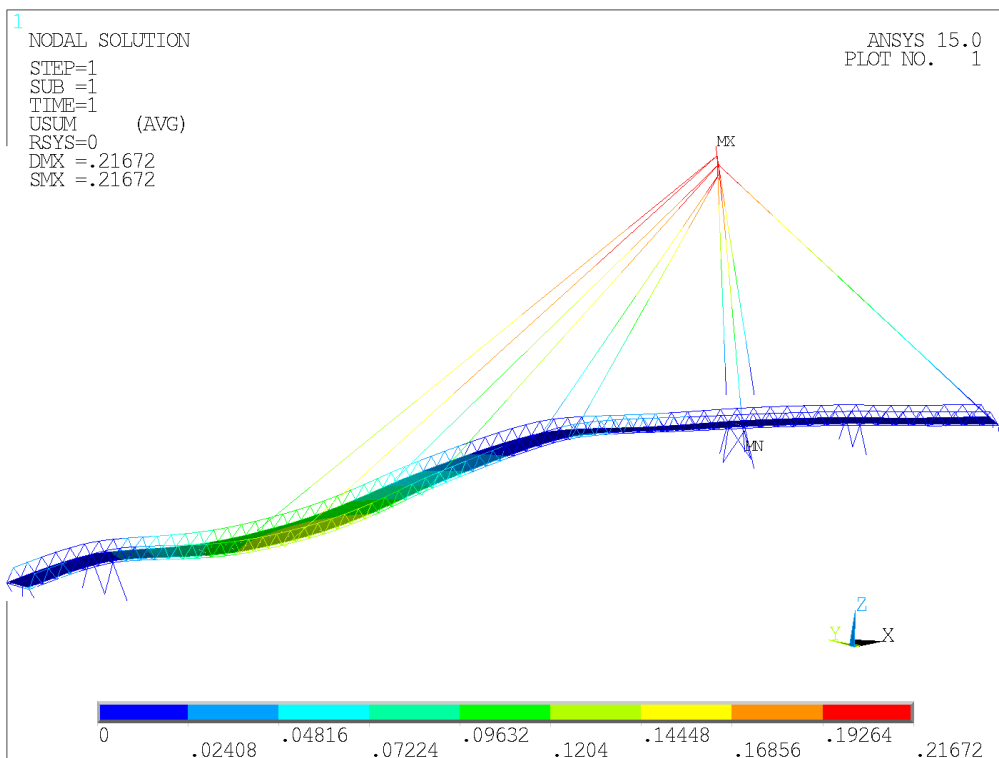
KZ11 – Pole posunutí u_x



KZ11 – Pole posunutí u_y

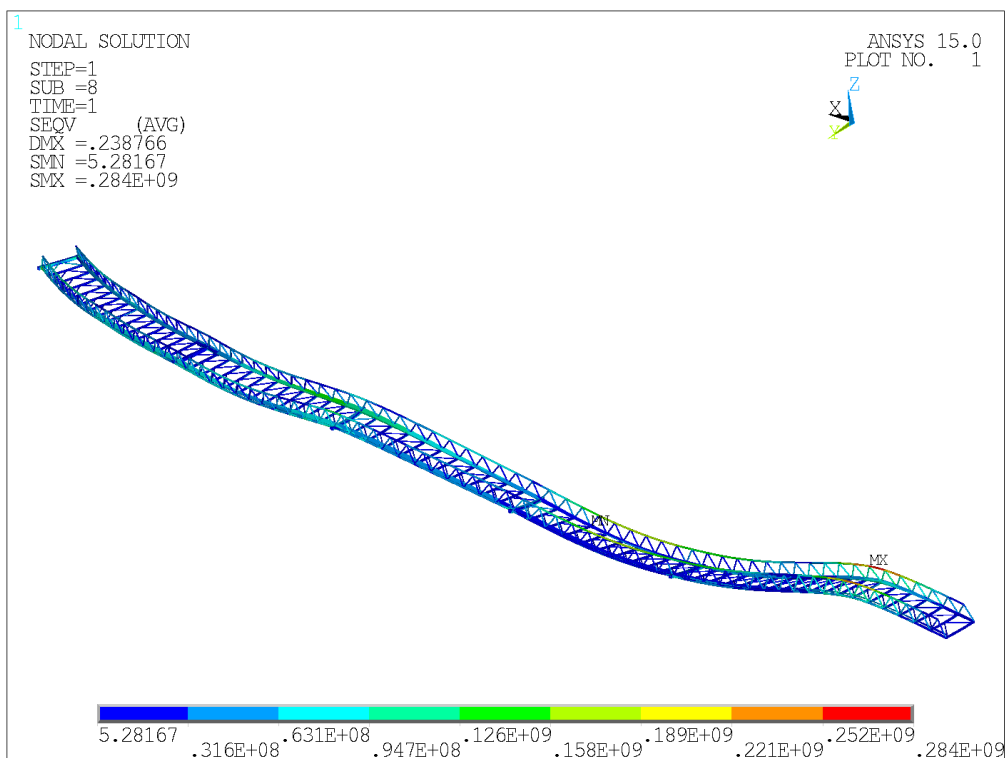


KZ11 – Pole posunutí u_z

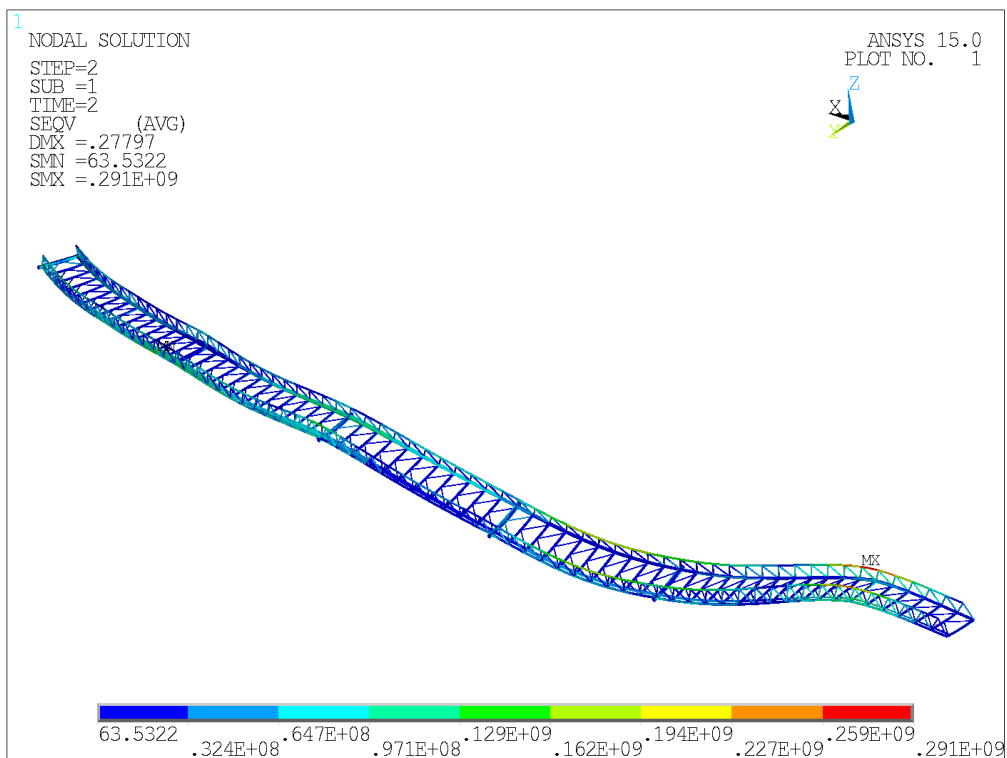


KZ11 – Pole posunutí U_{SUM}

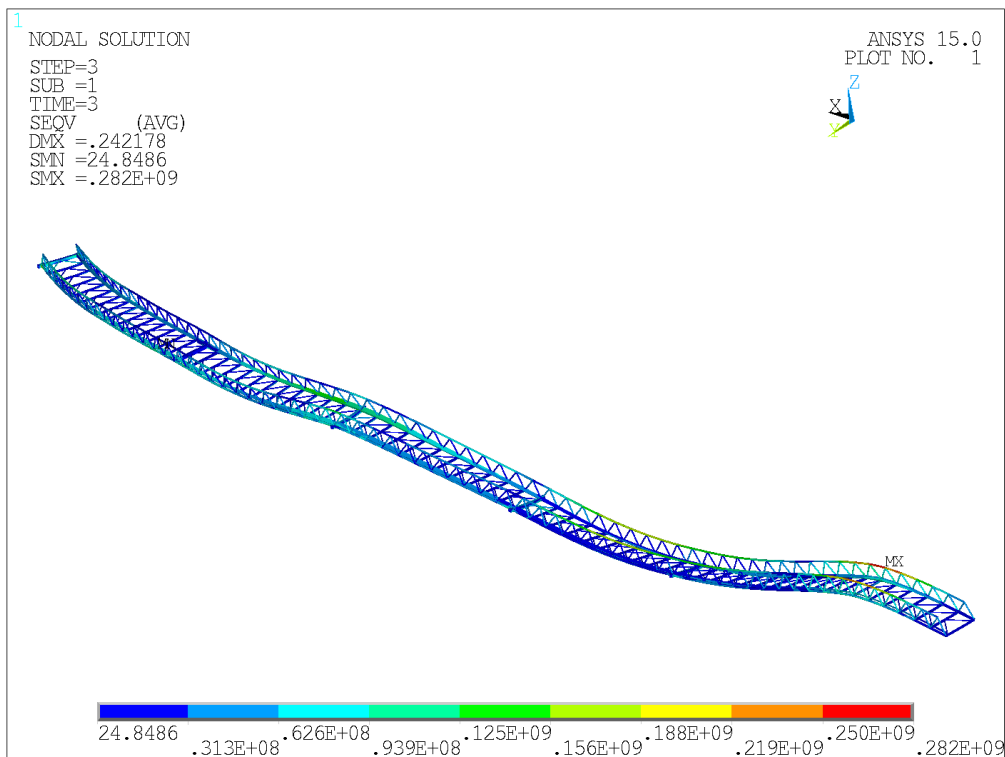
Příloha 3 – Výsledky mezního stavu únosnosti



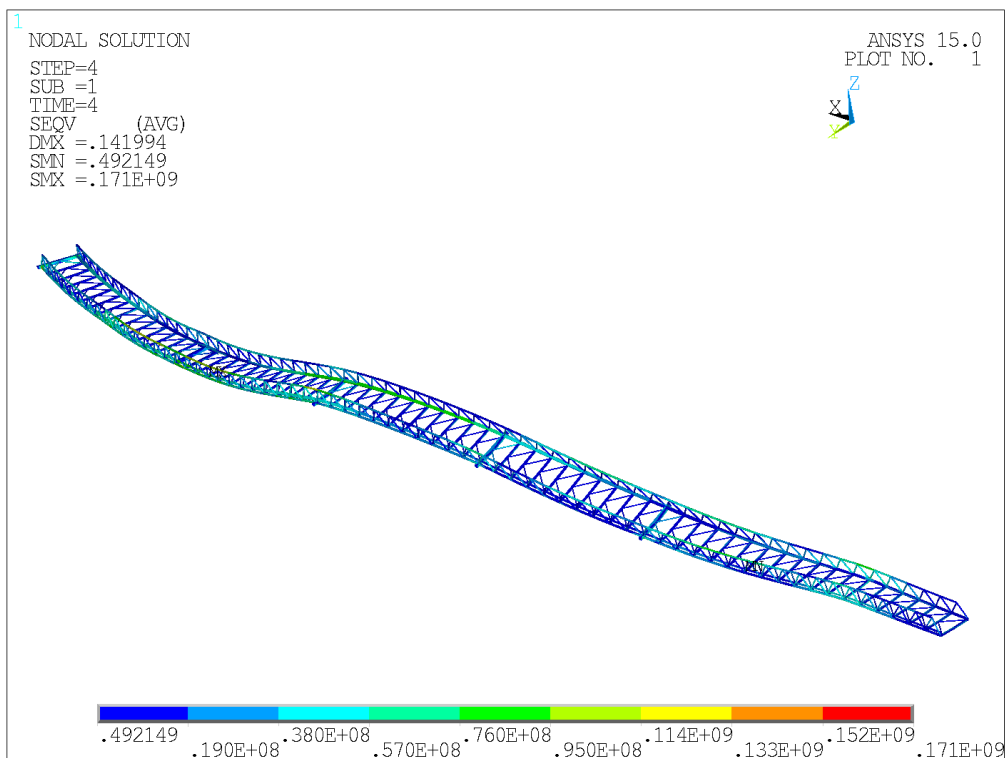
KZ1 – Srovnávací napětí Von Mises σ_M



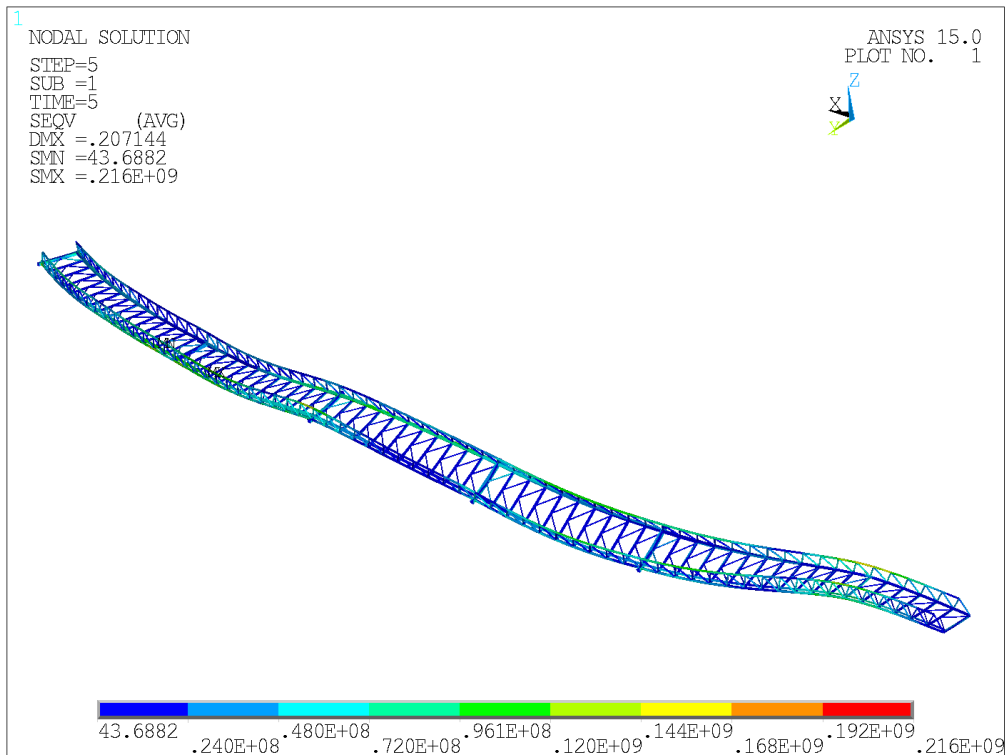
KZ2 – Srovnávací napětí Von Mises σ_M



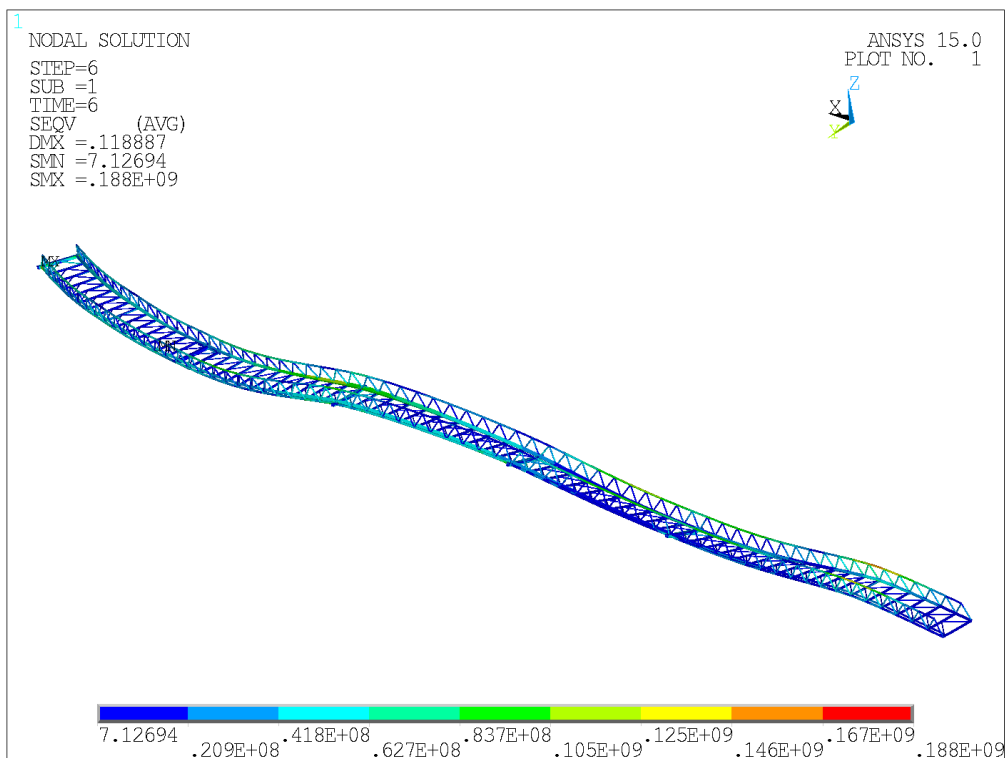
KZ3 – Srovnávací napětí Von Mises σ_M



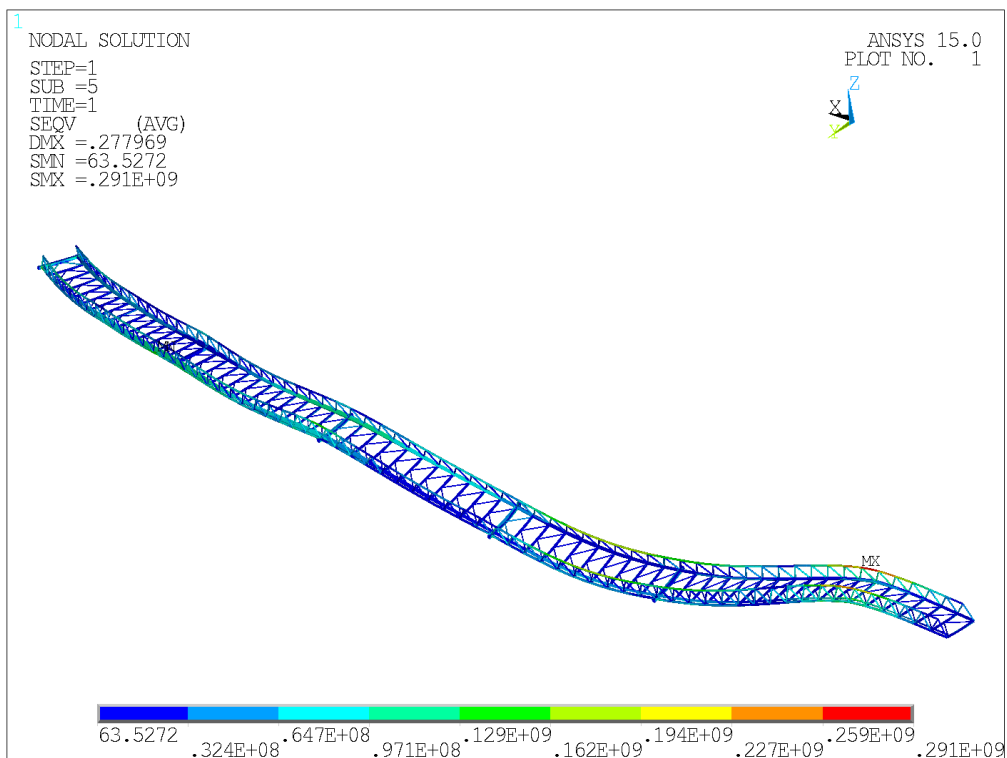
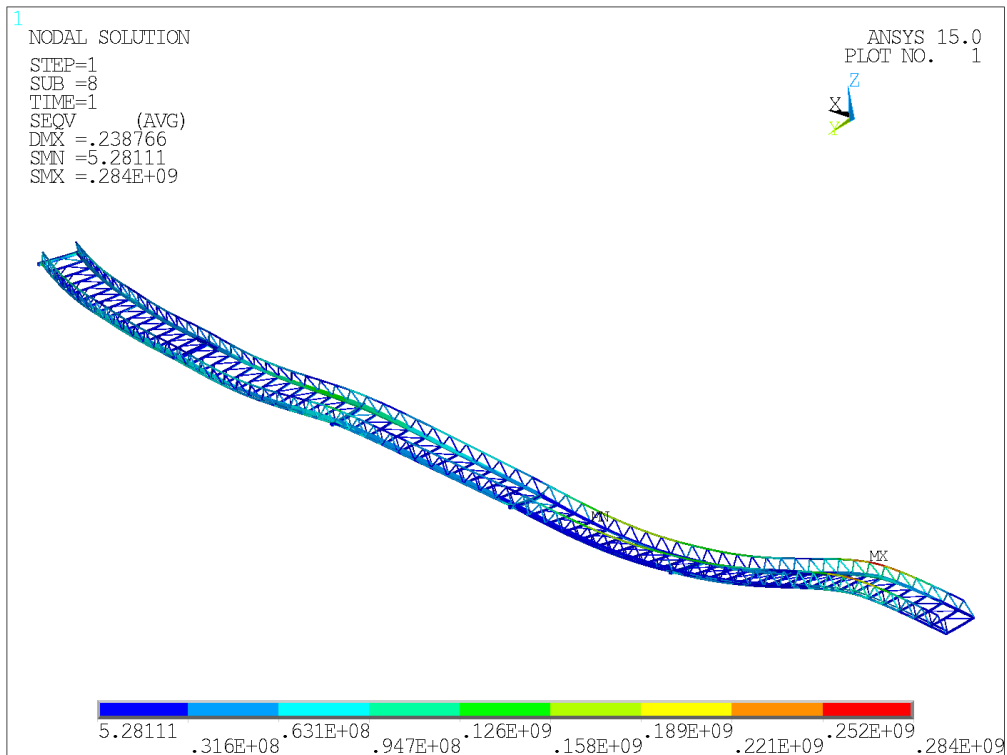
KZ4 – Srovnávací napětí Von Mises σ_M

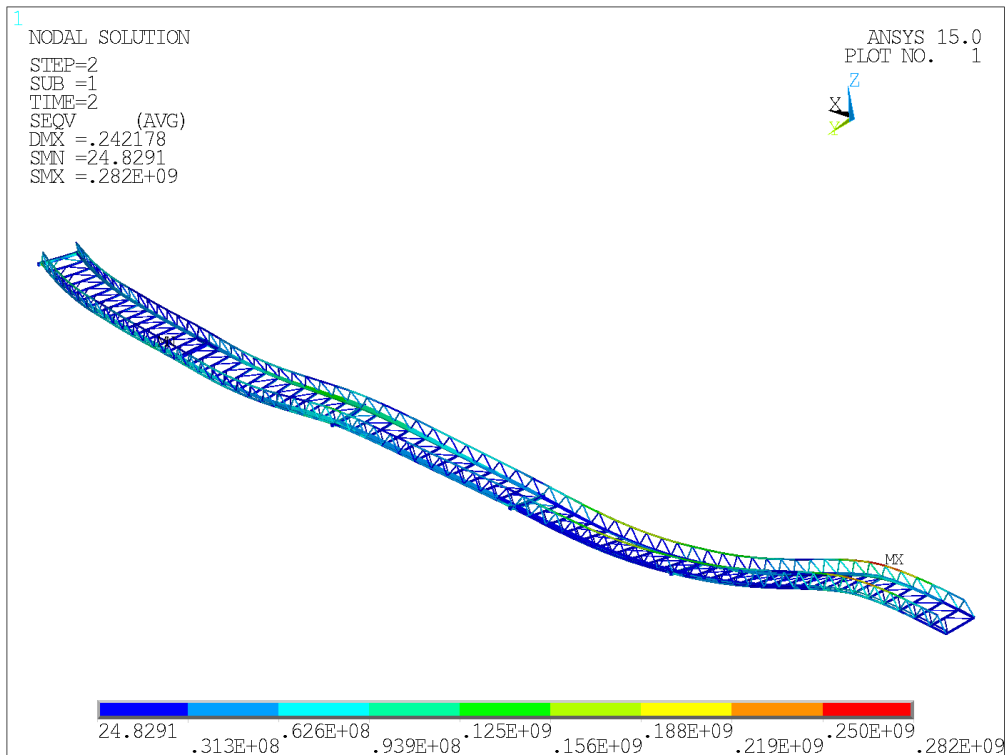


KZ5 – Srovnávací napětí Von Mises σ_M

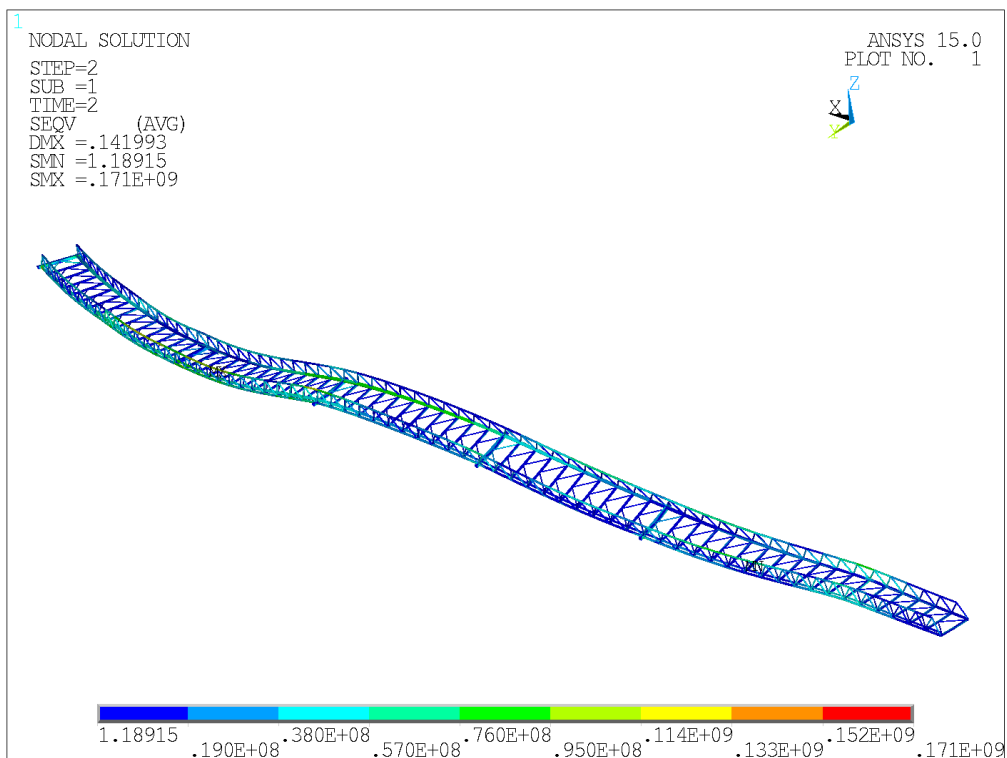


KZ6 – Srovnávací napětí Von Mises σ_M

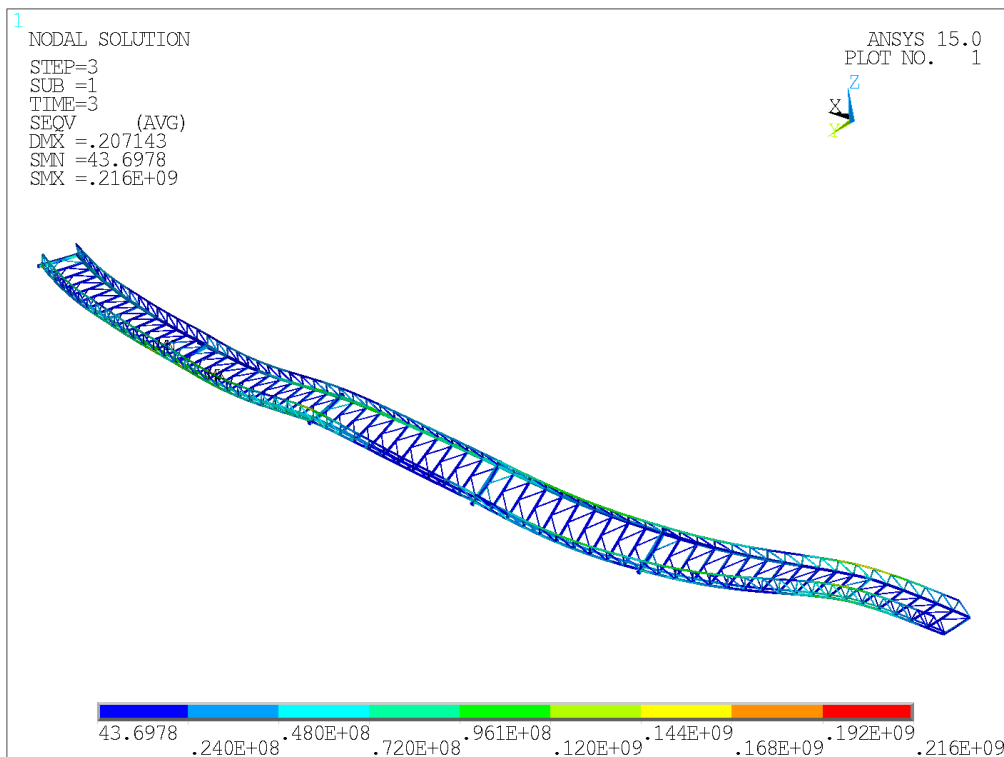




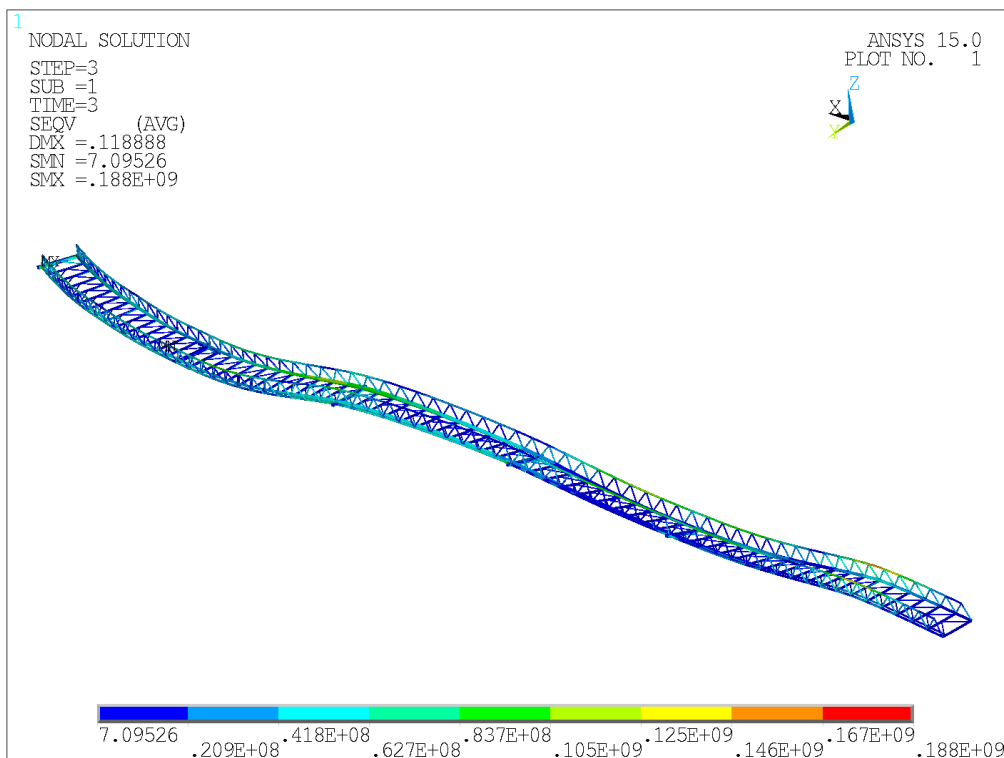
KZ9 – Srovnávací napětí Von Mises σ_M



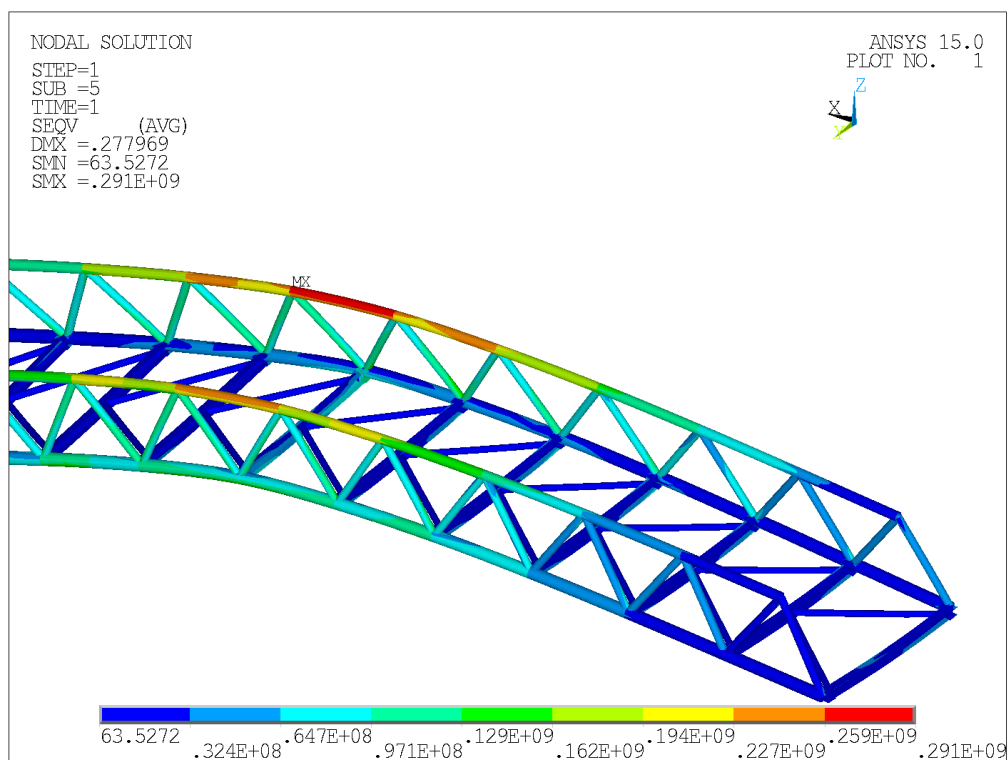
KZ10 – Srovnávací napětí Von Mises σ_M



KZ11 – Srovnávací napětí Von Mises σ_M



KZ12 – Srovnávací napětí Von Mises σ_M



KZ8 – Extrém srovnávacího napětí Von Mises σ_M

Příloha 4 – Posouzení ocelových prvků

Hlavní nosník

$$\frac{\sigma_M}{f_Y} = \frac{291}{355} = 0,820 \leq 1,0$$

VYHOVUJE

Stojky opěr:

Materiál prvků:

Ocel S355

$f_Y = 355$ MPa

$E = 210000$ MPa

Opěra 1 a 5:

Trubka 177,8/10

1.Třída průřezu

$\alpha = 0,21$

$A = 5270$ mm²

$I = 1,862e+7$ mm⁴

$N_{ED} = +996,2$ kN

(KZ5)

$$N_{T, RD} = \frac{A \cdot f_Y}{\gamma_{M0}} = \frac{5270 \cdot 355}{1,0} = 1,871e+6 \text{ N} = 1870,9 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{ED}}{N_{T, RD}} = \frac{996,2}{1870,9} = 0,532 \leq 1,0$$

VYHOVUJE

Podpěra 2,4:

Trubka 244,5/12,5

1.Třída průřezu

$\alpha = 0,21$

$A = 9110$ mm²

$I = 6,147e+7$ mm⁴

$L = 4393$ mm

$N_{ED} = -1108,9$ kN

(KZ5)

$$N_{CR} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L_{CR}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 6,147e+7}{4393^2} = 6,602e+6 \text{ N}$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_Y}{N_{CR}}} = \sqrt{\frac{9110 \cdot 355}{6,602e+6}} = 0,700$$

$$\phi = \frac{1}{2} (1 + \alpha (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2) = \frac{1}{2} (1 + 0,21 \cdot (0,7 - 0,2) + 0,7^2) = 0,798$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{0,798 + \sqrt{0,798^2 - 0,700^2}} = 0,847$$

$$N_{B, RD} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_Y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,847 \cdot 355 \cdot 9110}{1,1} = 2,490e+6 \text{ N} = 2490,2 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{ED}}{N_{B, RD}} = \frac{1108,9}{2490,2} = 0,445 \leq 1,0$$

VYHOVUJE

Podpěra 3:

Trubka 273/16	1. Třída průřezu	$\alpha = 0,21$
$A = 12900 \text{ mm}^2$	$I = 1,071\text{e}+8 \text{ mm}^4$	$L = 4250 \text{ mm}$
$N_{ED} = -981,3 \text{ kN}$		(KZ7)

$$N_{CR} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L_{CR}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 1,071\text{e}+8}{4250^2} = 1,229\text{e}+7 \text{ N}$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_Y}{N_{CR}}} = \sqrt{\frac{12900 \cdot 355}{1,229\text{e}+7}} = 0,610$$

$$\phi = \frac{1}{2} (1 + \alpha (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2) = \frac{1}{2} (1 + 0,21 \cdot (0,610 - 0,2) + 0,610^2) = 0,729$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{0,729 + \sqrt{0,729^2 - 0,610^2}} = 0,887$$

$$N_{B, RD} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_Y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,887 \cdot 355 \cdot 12900}{1,1} = 3,692\text{e}+6 \text{ N} = 3692,7 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{ED}}{N_{B, RD}} = \frac{981,3}{3692,7} = 0,265 \leq 1,0 \quad \underline{\text{VYHOVUJE}}$$

Táhla podpěr:

Materiál prvků:

Ocel S690	$f_Y = 690 \text{ MPa}$	$E = 210000 \text{ MPa}$
-----------	-------------------------	--------------------------

Podpěra 2,4:

Kulatina 39

$A = 1196,4 \text{ mm}^2$

$N_{ED} = +698,6 \text{ kN}$ (KZ11)

$$N_{T, RD} = \frac{A \cdot f_Y}{\gamma_{M0}} = \frac{1196,4 \cdot 690}{1,0} = 8,255\text{e}+5 \text{ N} = 825,5 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{ED}}{N_{T, RD}} = \frac{698,6}{825,5} = 0,846 \leq 1,0 \quad \underline{\text{VYHOVUJE}}$$

Podpěra 3:

Kulatina 60

$$A = 2827,4 \text{ mm}^2$$

$$N_{ED} = +1198,9 \text{ kN} \quad (\text{KZ5})$$

$$N_{T, RD} = \frac{A \cdot f_Y}{\gamma_{M0}} = \frac{2827,4 \cdot 690}{1,0} = 1,951 \text{e}+6 \text{ N} = 1950,9 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{ED}}{N_{T, RD}} = \frac{1198,9}{1950,9} = 0,615 \leq 1,0 \quad \underline{\text{VYHOVUJE}}$$

Závěsy:

Materiál prvků:

Lana skupiny C $f_{uk} = 1860 \text{ MPa}$ $E = 160000 \text{ MPa}$

Závěsy druhého pole:

$$A_M = 1647,48 \text{ mm}^2$$

$$F_{ED} = 681,7 \text{ kN} \quad (\text{KZ2})$$

$$F_{UK} = A_M \cdot f_{UK} = 1647,48 \cdot 1860 = 3,064 \text{e}+6 \text{ N} = 3064,3 \text{ kN}$$

$$F_{RD} = \frac{F_{uk}}{1,5 \cdot \gamma_R} = \frac{3064,3}{1,5 \cdot 1,0} = 2042,8 \text{ kN}$$

$$\frac{F_{ED}}{F_{RD}} = \frac{681,7}{2042,8} = 0,334 \leq 1,0 \quad \underline{\text{VYHOVUJE}}$$

Závěsy opěry 5:

$$A_M = 3892,56 \text{ mm}^2$$

$$F_{ED} = 1715,0 \text{ kN} \quad (\text{KZ8})$$

$$F_{UK} = A_M \cdot f_{UK} = 3892,56 \cdot 1860 = 7,240 \text{e}+6 \text{ N} = 7240,2 \text{ kN}$$

$$F_{RD} = \frac{F_{uk}}{1,5 \cdot \gamma_R} = \frac{7240,2}{1,5 \cdot 1,0} = 4826,8 \text{ kN}$$

$$\frac{F_{ED}}{F_{RD}} = \frac{1715,0}{4826,8} = 0,355 \leq 1,0 \quad \underline{\text{VYHOVUJE}}$$

Kotevní závěsy (protilana):

$$A_M = 2489,47 \text{ mm}^2$$

$$F_{ED} = 1042,8 \text{ kN} \quad (\text{KZ3})$$

$$F_{UK} = A_M \cdot f_{UK} = 3892,56 \cdot 1860 = 4,630 \text{e}+6 \text{ N} = 4630,4 \text{ kN}$$

$$F_{RD} = \frac{F_{uk}}{1,5 \cdot \gamma_R} = \frac{4630,2}{1,5 \cdot 1,0} = 3086,9 \text{ kN}$$

$$\frac{F_{ED}}{F_{RD}} = \frac{1042,8}{3086,9} = 0,338 \leq 1,0 \quad \underline{\text{VYHOVUJE}}$$

Pylon:

Materiál prvku:

Ocel S355 $f_Y = 355 \text{ MPa}$ $E = 210000 \text{ MPa}$

Uvažován průměrný průřez

Trouba 1100/25 $2.$ Třída průřezu $\alpha = 0,21$

$A = 84430,3 \text{ mm}^2$ $I = 1,220 \text{e}+10 \text{ mm}^4$ $W_{PL} = 2,890 \text{e}+7 \text{ mm}^3$

$L = 32000 \text{ mm}$

$N_{ED} = -5933,8 \text{ kN}$ (KZ2)

$M_{Y,ED} = 1022,18 \text{ kNm}$ $M_{Z,ED} = 0 \text{ kNm}$

$$N_{CR} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L_{CR}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 1,220 \text{e}+10}{32000^2} = 2,469 \text{e}+7 \text{ N}$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_Y}{N_{CR}}} = \sqrt{\frac{84430,3 \cdot 355}{2,469 \text{e}+7}} = 1,102$$

$$\phi = \frac{1}{2} (1 + \alpha (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2) = \frac{1}{2} (1 + 0,21 \cdot (1,102 - 0,2) + 1,102^2) = 1,201$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{1,201 + \sqrt{1,201^2 - 1,102^2}} = 0,595$$

$N_{RK} = A \cdot f_Y = 84430,3 \cdot 355 = 2,997 \text{e}+7 \text{ N} = 29972,7 \text{ kN}$

$M_{Y,RK} = W_{PL} \cdot f_Y = 2,890 \text{e}+7 \cdot 355 = 1,026 \text{e}+10 \text{ Nmm} = 10259,5 \text{ kNm}$

$N_{RK} = A \cdot f_Y = 84430,3 \cdot 355 = 2,997 \text{e}+7 \text{ N} = 29972,7 \text{ kN}$

$C_{my} = 0,6$

$$k_{yy} = C_{my} \cdot \left(1 + 0,8 \frac{N_{ED}}{\frac{\chi \cdot N_{RK}}{\gamma_{M1}}} \right) = 0,6 \cdot \left(1 + 0,8 \frac{5933,8}{\frac{0,595 \cdot 29972,7}{1,1}} \right) = 0,776$$

$$\frac{N_{ED}}{\frac{\chi \cdot N_{RK}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{Y,ED}}{\frac{M_{Y,RK}}{\gamma_{M1}}} = \frac{5933,8}{\frac{0,595 \cdot 29972,7}{1,1}} + 0,776 \frac{1022,18}{\frac{10259,5}{1,1}} = 0,451 \leq 1,0 \quad \underline{\text{VYHOVUJE}}$$