

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta stavební

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2017

Bc. Markéta Součková



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV STAVEBNÍ MECHANIKY

INSTITUTE OF STRUCTURAL MECHANICS

**POSOUZENÍ MOSTNÍ KONSTRUKCE NA ÚČINKY
DYNAMICKÉHO ZATÍŽENÁ**

AN ASSESSMENT OF A BRIDGE CONSTRUCTION ON A DYNAMIC LOAD

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

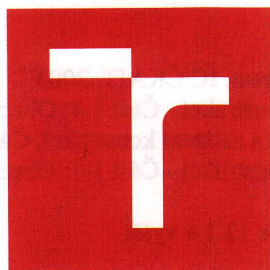
Bc. Markéta Součková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Vlastislav Salajka, CSc.

BRNO 2017



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

STUDIJNÍ PROGRAM	N3607 Stavební inženýrství
TYP STUDIJNÍHO PROGRAMU	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
STUDIJNÍ OBOR	3607T009 Konstrukce a dopravní stavby
PRACOVISŤE	Ústav stavební mechaniky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

DIPLOMANT	Bc. Markéta Součková
NÁZEV	Posouzení mostní konstrukce na účinky dynamického zatížení
VEDOUcí DIPLOMOVÉ PRÁCE	doc. Ing. Vlastislav Salajka, CSc.
DATUM ZADÁNÍ	31. 3. 2016
DATUM ODEVZDÁNÍ	13. 1. 2017

V Brně dne 31. 3. 2016


.....
prof. Ing. Drahomír Novák, DrSc.

Vedoucí ústavu




.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA

Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

- [1] Pirner, M., Fischer, O. Zatížení staveb větrem. IC ČKAIT, 2003
- [2] ČSN EN 1991-1-4 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-4: Obecná zatížení - Zatížení větrem
- [3] ČSN P ENV 1991-2-4 Zásady navrhování a zatížení konstrukcí, Část 2-4: Zatížení větrem.
- [4] ČSN EN 1991-1-1 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-1: Obecná zatížení - Objemové tíhy, vlastní tíha a užité zatížení pozemních staveb
- [5] Dokumentace k programu ANSYS Release 12.1 a vyšší
- [6] Výkresová dokumentace mostu
- [7] Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L. Finite Element Method (5th Edition): Volume 1-3, Elsevier, 2000

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ (ZADÁNÍ, CÍLE PRÁCE, POŽADOVANÉ VÝSTUPY)

Prostudujte problematiku modelování větru s ohledem na užití ČSN EN 1991. V programovém systému ANSYS sestavte metodou konečných prvků funkční model mostní konstrukce. Vyčíslete vlastní frekvence a tvary kmitu mostu a vybraných prvků s cílem určit možnost vzniku vírových rezonancí. Stanovte účinky větru na konstrukci. Věnujte pozornost návrhu průřezu vybraných prvků mostu a výběru typu zábradlí. Proveďte dynamickou odezvu na vírové buzení. Na základě analýzy výsledků proveďte posouzení na únavu.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ/DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).


.....
doc. Ing. Vlastislav Salajka, CSc.

Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Diplomová práce se věnuje statické a dynamické analýze ocelové obloukové lávky pro pěší. V programu ANSYS 12.1 byl vytvořen výpočtový model konstrukce a následně na něj byla provedena statická a modální analýza. Na základě výsledků modální analýzy bylo na konstrukci aplikováno dynamické zatížení od větru dle norem ČSN EN. Na účinky tohoto zatížení byl uskutečněn výpočet ustálené odezvy při rezonanci pomocí harmonické analýzy dle ČSN P EN 1991-2-4. Pro posudek dle ČSN EN 1991-1-4 byla konstrukce zatížena náhradními kvazistatickými silami odpovídajícím zatížením konstrukce větrem a vyhodnocení bylo provedeno pomocí statické analýzy.

KLÍČOVÁ SLOVA

Lávka pro pěší, ANSYS, působení větru, vírová rezonance, statická analýza, modální analýza, harmonická analýza

ABSTRACT

Diploma thesis deals with static and dynamic analysis of a steel arch footbridge. The footbridge structure 3D model was created in program ANSYS 12.1 and afterwards were made static and modal analysis on this computational model. Based on the results of modal analysis was applied to design of dynamic wind loading on the model according to norms ČSN EN. The effects of this burden has been calculated steady response at resonance from harmonic analysis according to ČSN P EN 1991-2-4. To report according to ČSN EN 1991-1-4 was designed substitute quasistatic forces corresponding loads of wind on the construction and for evaluation was used static analysis.

KEYWORDS

Footbridge, ANSYS, dynamic wind load, vortex shedding, static analysis, modal analysis, harmonic analysis

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Bc. Markéta Součková *Posouzení mostní konstrukce na účinky dynamického zatížení*. Brno, 2017. 74 s., 85 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební mechaniky. Vedoucí práce doc. Ing. Vlastislav Salajka, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 13. 1. 2017

Bc. Markéta Součková
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych touto cestou poděkovala vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Vlastislavu Salajkovi, CSc. za odborné vedení, velkou trpělivost, osobní toleranci, věnovaný čas a vstřícný přístup během celého řešení práce.

OBSAH

1	Konstrukce lávky	14
2	Prostorový výpočtový model	17
2.1	Použité konečné prvky	19
2.1.1	LINK180	19
2.1.2	BEAM188	19
2.1.3	SHELL181	20
2.1.4	SURF154	21
2.1.5	COMBIN14	21
2.2	Popis prvků konstrukce lávky	22
2.2.1	Piloty a opěry	22
2.2.2	Trámy	23
2.2.3	Deska mostovky	23
2.2.4	Příčnice	24
2.2.5	Oblouky	24
2.2.6	Příčle	25
2.2.7	Závěsy	25
2.3	Materiálové charakteristiky modelu	26
2.4	Podloží	26
3	Statická analýza	28
3.1	Teorie statické analýzy	28
3.2	Výpočet statické analýzy	29
4	Výpočet vlastních frekvencí a vlastních tvarů kmitu konstrukce	30
4.1	Teorie modální analýzy	30
4.2	Výpočet vlastních tvarů kmitu a vlastních frekvencí	31
5	Výpočet harmonické odezvy konstrukce	33
5.1	Teorie harmonické analýzy	34
5.2	Tlumení konstrukce	35
5.3	Odtrhávání vírů	35
5.4	Zatížení při odtrhávání vírů dle ČSN P ENV 1991-2-4	36
5.4.1	Výpočet zatížení na konstrukci	38
5.4.2	Výpočet odezvy lávky	39
5.5	Posouzení konstrukce na odezvu	58
5.6	Zatížení při odtrhávání vírů dle ČSN EN 1991-1-4	58

5.6.1	Výpočet zatížení na konstrukci	60
5.6.2	Výpočet odezvy lávky	61
6	Posouzení na únavu	63
6.1	Počet zatěžovacích cyklů	63
6.2	Posouzení ocelových prvků na únavu	65
7	Závěr	68
	Literatura	69
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	71
	Seznam příloh	74
A	Vlastní tvary konstrukce	75
B	Podklady pro výpočet integrálů a zatížení	83

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Rozměry lávky [1]	14
1.2	Pohled a půdorys lávky [1]	15
1.3	Řezy lávkou [1]	16
2.1	Model konstrukce	17
2.2	Boční pohled na model	18
2.3	Pohled na ocelovou konstrukci lávky	18
2.4	Link180 [2]	19
2.5	BEAM188 [2]	20
2.6	SHELL181 [2]	20
2.7	SURF154 [2]	21
2.8	COMBIN14 [2]	22
2.9	Průřezy pilot	23
2.10	Průřez trámu	23
2.11	Průřezy příčnicku	24
2.12	Průřezy oblouku	25
2.13	Průřez příčlí	25
3.1	Vlastní tíha - posunutí u_z	29
5.1	Obecné tvary konstrukce [3]	34
5.2	Výpočet V1: Tvar kmitu, zatížení a odezva - amplituda posunutí u_z a u_y	42
5.3	Výpočet V2: Tvar kmitu, zatížení a odezva - amplituda posunutí u_z a u_y	43
5.4	Výpočet V3: Tvar kmitu, zatížení a odezva - amplituda posunutí u_z a u_y	44
5.5	Výpočet V4: Tvar kmitu, zatížení a odezva - amplituda posunutí u_z a u_y	45
5.6	Výpočet Z1: Tvar kmitu, zatížení a odezva - amplituda posunutí u_z a u_y	46
5.7	Výpočet O1: Tvar kmitu, zatížení a odezva - amplituda posunutí u_z a u_y	47
5.8	Výpočet O2: Tvar kmitu, zatížení a odezva - amplituda posunutí u_z a u_y	48
5.9	Výpočet O3: Tvar kmitu, zatížení a odezva - amplituda posunutí u_z a u_y	49
5.10	Výpočet O4: Tvar kmitu, zatížení a odezva - amplituda posunutí u_z a u_y	50

5.11 Výpočet O5: Tvar kmitu, zatížení a odezva - amplituda posunutí u_z a u_y	51
5.12 Výpočet O6: Tvar kmitu, zatížení a odezva - amplituda posunutí u_z a u_y	52
5.13 Výpočet O7: Tvar kmitu, zatížení a odezva - amplituda posunutí u_z a u_y	53
5.14 Výpočet O8: Tvar kmitu, zatížení a odezva - amplituda posunutí u_z a u_y	54
5.15 Výpočet O9: Tvar kmitu, zatížení a odezva - amplituda posunutí u_z a u_y	55
5.16 Výpočet O10: Tvar kmitu, zatížení a odezva - amplituda posunutí u_z a u_y	56
5.17 Výpočet O11: Tvar kmitu, zatížení a odezva - amplituda posunutí u_z a u_y	57
5.18 Zatížení modelu	61
5.19 Posuny u_z [m] od zatížení kvazistatických sil	62
6.1 Amplitudy napětí $\sigma_{ampl,i}$ [Pa] ve styčnicku příčle a oblouku pro výpočet Z1	67
A.1 První vlastní tvar kmitu při frekvenci 1,407	75
A.2 Druhý vlastní tvar kmitu při frekvenci 2,489 Hz	75
A.3 Třetí vlastní tvar kmitu při frekvenci 2,602 Hz	76
A.4 Čtvrtý vlastní tvar kmitu při frekvenci 2,679 Hz	76
A.5 Pátý vlastní tvar kmitu při frekvenci 3,254 Hz	77
A.6 Šestý vlastní tvar kmitu při frekvenci 3,825 Hz	77
A.7 Sedmý vlastní tvar kmitu při frekvenci 3,943 Hz	78
A.8 Osmý vlastní tvar kmitu při frekvenci 4,468 Hz	78
A.9 Devátý vlastní tvar kmitu při frekvenci 4,738 Hz	79
A.10 Desátý vlastní tvar kmitu při frekvenci 5,124 Hz	79
A.11 Jedenáctý vlastní tvar kmitu při frekvenci 5,155 Hz	80
A.12 Dvanáctý vlastní tvar kmitu při frekvenci 5,249 Hz	80
A.13 Třináctý vlastní tvar kmitu při frekvenci 5,543 Hz	81
A.14 Čtrnáctý vlastní tvar kmitu při frekvenci 6,665 Hz	81
A.15 Patnáctý vlastní tvar kmitu při frekvenci 6,676 Hz	82

SEZNAM TABULEK

2.1	Použití konečných prvků v modelu	26
2.2	Materiálové charakteristiky modelu	27
2.3	Popis vlastností vrstev podloží [1]	27
4.1	Vlastní frekvence modelu	32
5.1	Výpočet harmonického zatížení mostovky bez zábradlí	38
5.2	Výpočet harmonického zatížení mostovky se zábradlím	38
5.3	Výpočet harmonického zatížení oblouku	39
5.4	Odezva v amplitudách posunutí, rychlost a zrychlení pro mostovku bez zábradlí	40
5.5	Odezva v amplitudách posunutí, rychlost a zrychlení pro mostovku se zábradlím	40
5.6	Odezva v amplitudách posunutí, rychlost a zrychlení pro mostovku při zatížení oblouku	41
5.7	Odezva v amplitudách posunutí, rychlost a zrychlení pro oblouk při zatížení oblouku	41
5.8	Vstupní parametry	60
6.1	Vstupní parametry pro výpočet počtu zatěžovacích cyklů	64
6.2	Počet cyklů napětí N	64
6.3	Vstupní parametry pro posouzení ocelových prvků na únavu	66
6.4	Výpočet dílčích poškození únavou	67

ÚVOD

Diplomová práce má úkol analyzovat chování obloukové mostní konstrukce, která je vystavená vírovému buzení za ustáleného větru. Pro vytvoření prostorového modelu v programu ANSYS byla použita výkresová dokumentace lávky pro pěší a cyklisty přes řeku Svatku.

Lávka pro pěší je tvořena obloukem, který je jako jeden z hlavních nosných prvků převážně tlačný, a vynáší spodní mostovku, která je tvořena dvěma ocelovými trámy a betonovou deskou.

Dynamické zatížení hraje významnou roli pro posuzování štíhlých konstrukcí jako je tato, proto je nutno provést korektní stanovení odezvy konstrukce na zatížení větrem, které je v čase proměnné. U lávek se běžně posuzují dynamické účinky od pohybů chodců. Ty však v této práci nebudou vyšetřovány, protože práce má za úkol vyhodnocení chování konstrukce na zatížení větrem dle norem ČSN EN 1991-1-4 a ČSN P EN 1991-2-4.

Je nutno provést korektně řešené dynamické odezvy konstrukce na zatížení větrem kolmo ke směru větru, neboť může dojít k ustálenému kmitání konstrukce s rezonančním charakterem, pokud je konstrukce zatížena větrem. Zároveň může být i snížen komfort pro pohyb na lávce a další nepříznivé fyziologické účinky mohou působit na chodce.

Tato práce obsahuje popis prostorového výpočtového modelu a postupy při výpočtech jednotlivých analýz zkoumajících chování konstrukce lávky při dynamických zatíženích od větru. Dále zde popsáno posouzení konstrukce na únavu dle ČSN EN 1993-1-9. Výsledky jednotlivých výpočtů jsou pak shrnuty do tabulek a obrázků.

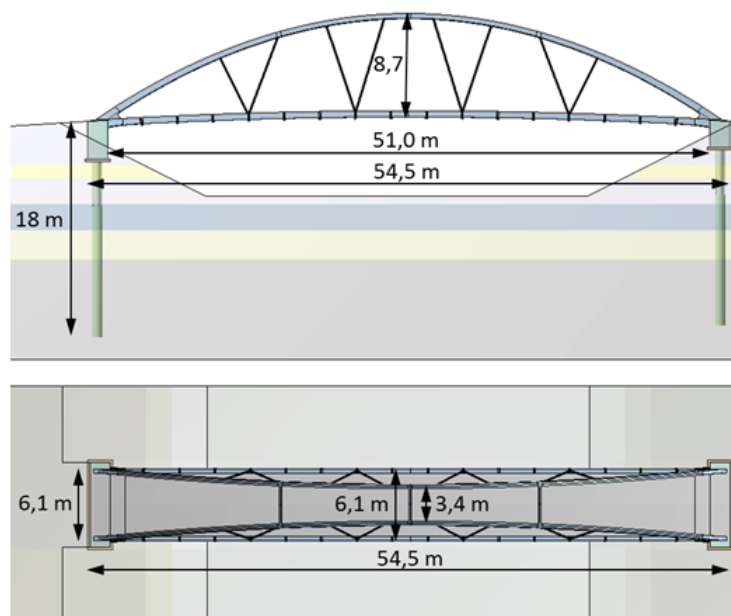
1 KONSTRUKCE LÁVKY

Posuzovaná lávka se nachází v jižní části města Brna. Spojuje nákupní zónu Brno jih a ulici Bernáčkova. Lávka vede přes zdejší řeku Svatku a je určena pro pěší a cyklisty. Měla by nahradit stávající konstrukci.

Lávka byla vyprojektována jako obloukový spřažený most, který není pře-depnutý. Jedná se o most o jednom poli s dolní mostovkou, která je navrhnutá ve svislém oblouku o malé křivosti. Na obou stranách je však mostovka uložena ve stejné výškové úrovni. Tvoří ji dva ocelové trámy uzavřeného průřezu, které jsou svařované. V příčném směru jsou trámy spojeny ocelovými příčnicí. Prostor mezi trámy a příčnicí je vyplněn spřaženou monolitickou betonovou deskou. Trámy i deska jsou následně vetknuty na stranách do betonových opěr. Každá opěra je založena na trojici hlubinných pilot. Oblouk lávky je vytvořen ocelovým uzavřeným svařovaným průřezem o proměnné výšce. Ve třech bodech jsou oblouky mostu spojeny mezi sebou příčlemi a s mostovkou je pojí táhla, která jsou přede-pnuta jen vlastní tíhou konstrukce.

Most je symetrický vzhledem k podélné a příčné rovině, které procházejí osou lávky. To platí i pro spodní stavbu.

Pro lepší přehled rozměrů konstrukce jsou připojeny následující obrázky (1.1) a (1.3). Geometrie jednotlivých prvků lávky i s průřezy je popsána v následující podkapitole 2.2.



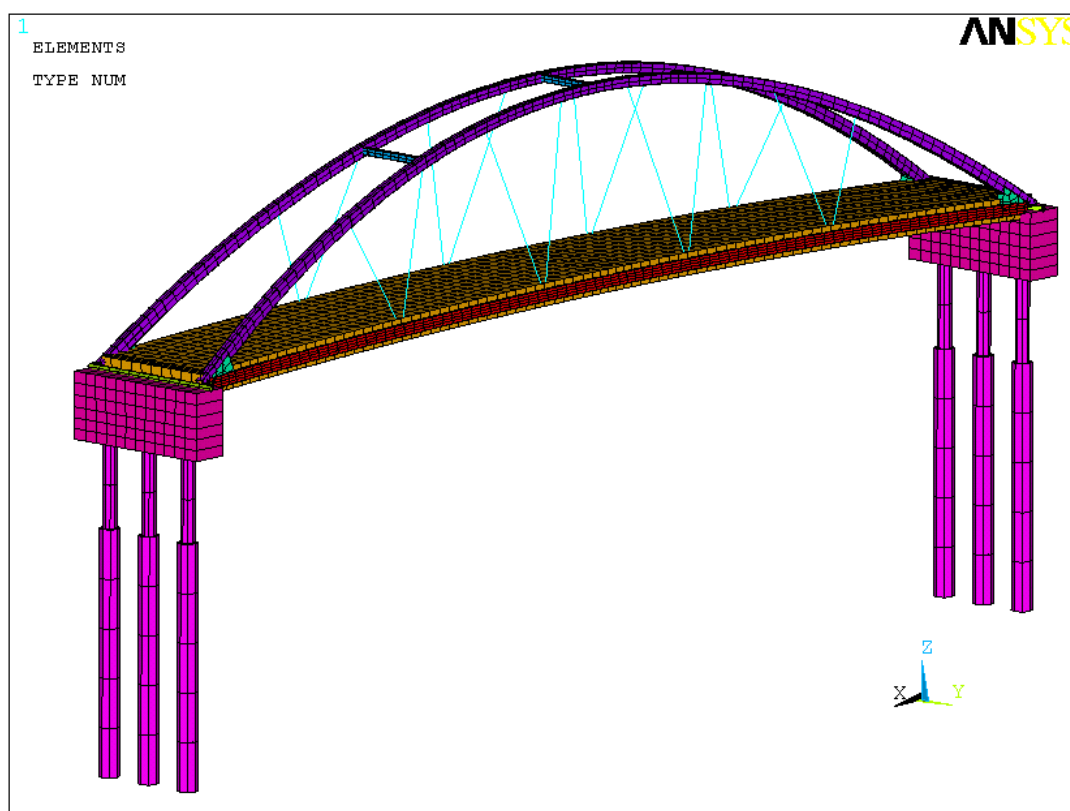
Obr. 1.1: Rozměry lávky [1]

2 PROSTOROVÝ VÝPOČTOVÝ MODEL

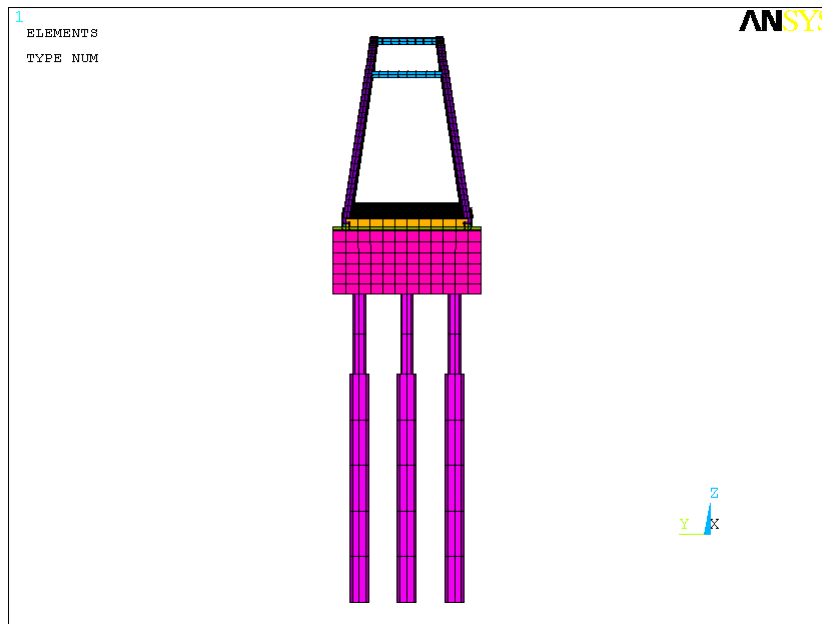
Geometrie výpočtového modelu byla sestavena dle projektové dokumentace v programu ANSYS 12.1. Pro model konstrukce mostu byly využity prutové, stěnodeskové a pružinové prvky. Prutovými prvky byly modelovány trámy, oblouk, příčle, příčníky a piloty. Stěnodeskové prvky byly využity k vytvoření opěr a desky mostovky. Pružinové prvky byly použity k modelování příčné tuhosti zeminy v závislosti na jednotlivých mocnostech vrstev zeminy.

Jednotlivé prvky byly vytvářeny bez i s excentricitami v jejich vlastních těžištních osách v závislosti na projektové dokumentaci. Přídavné nemodelované hmotnosti byly rovnoměrně rozprostřeny do povrchových prvků, případně byla navýšena objemová hmotnost prvků.

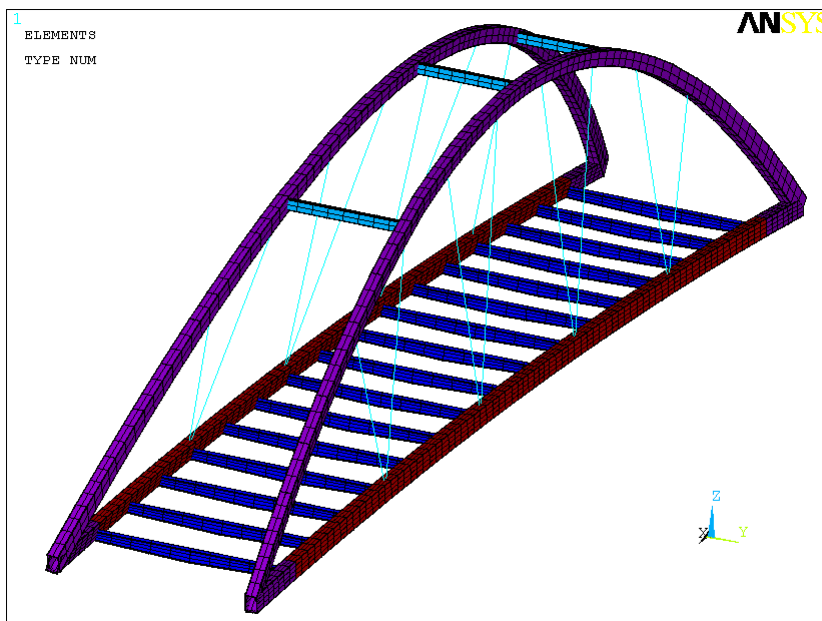
Vzhledem ke globálnímu souřadnému systému je model umístěn tak, že osa X souhlasí s osou mostovky, osa Y je v příčném směru na osu mostovky a kladná poloosa Z je orientovaná směrem vzhůru od mostovky k oblouku.



Obr. 2.1: Model konstrukce



Obr. 2.2: Boční pohled na model

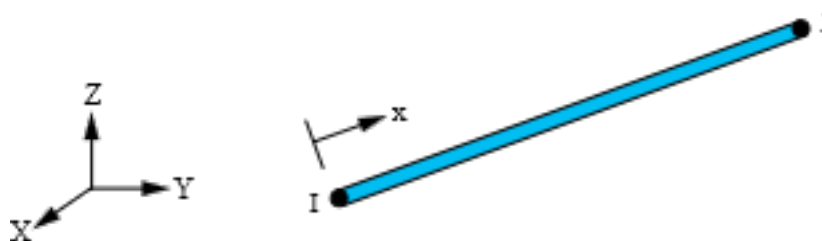


Obr. 2.3: Pohled na ocelovou konstrukci lávky

2.1 Použité konečné prvky

2.1.1 LINK180

Tento 3D prvek se používá pro modelování částí, které jsou namáhány jednoosým tahem nebo tlakem. Má tři stupně volnosti a u_x , u_y a u_z , které korespondují s posuny uzlů. Existuje ve dvou nastaveních - tažený prvek (táhl) nebo tlačný prvek (vzpěra). K deformacím prvku dochází ve směru osy prvku. Ohybové zatížení není tímto typem prvku přenášeno.

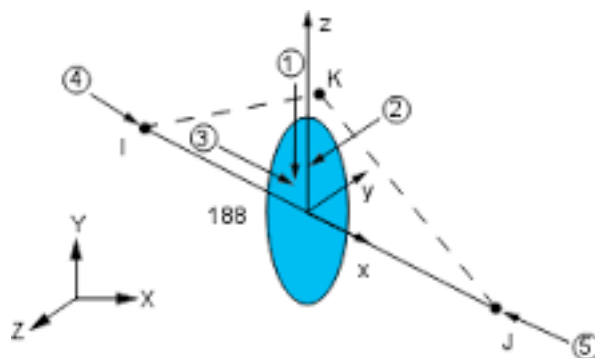


Obr. 2.4: Link180 [2]

Shrnutí:	uzly	J, K
	stupně volnosti	UX, UY, UZ
	prvkové konstanty	AREA, ADDMAS, TENSKEY
	materiálové vlastnosti	DENS, EX

2.1.2 BEAM188

Prvek BEAM188 se používá pro analýzu štíhlých až středně tlustých prutových konstrukcí. Je založen na Timošenkově teorii ohybu nosníku, která zahrnuje do výpočtu smykové deformační účinky. Jedná se o dvouuzlový prvek ve 3D, který má šest nebo sedm stupňů volnosti v uzlu. Jsou to 3 posunutí ve směrech os x, y, z. 3 pootočení kolem os x, y, z. Sedmý stupeň volnosti je volitelný. Jde o nastavení velikosti deformace. Prvek je vhodný pro použití u lineárních úloh velkého natočení nebo nelineárních úloh s velkými napjatostmi. BEAM188 umožňuje použití plastických, elastických a dalších nelineárních materiálů. Průřez, který je definován pro daný prut, může být tvořen více materiály.

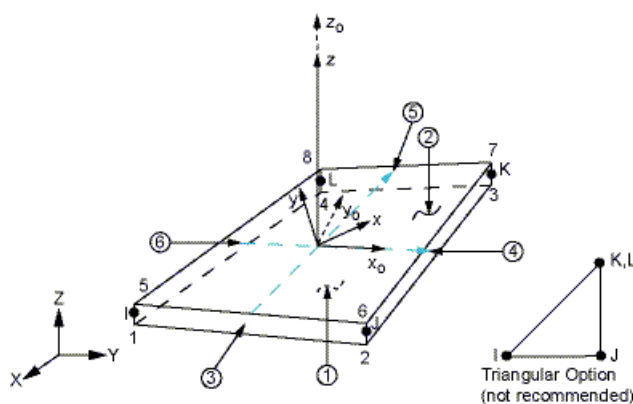


Obr. 2.5: BEAM188 [2]

Shrnutí: uzly	I, J, K
stupně volnosti	UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ
průřez	TXZ, TXY, ADDMAS
materiálové vlastnosti	EX, (PRXY nebo NUXY), GXY, GXZ ALPX, DENS, DAMP

2.1.3 SHELL181

Jedná se o čtyřuzlový prvek, který je vhodný k modelování tenkých až středně tlustých skořepinových struktur. Shell181 má 6 v každém uzlu stupňů volnosti: 3 posuvy ve směrech x , y , z a 3 pootočení kolem os x , y , z . U použití membránového nastavení má prvek pouze translační stupně volnosti. Uplatňuje se především u popisu ohybového a membránového chování skořepin. Je vhodný pro výpočty lineárních úloh, které mají velké rotace, ale i pro nelineární úlohy s velkými přetvořeními. Prvek může být využit pro modelaci kompozitních skořepin či tzv. sendvičových konstrukcí.

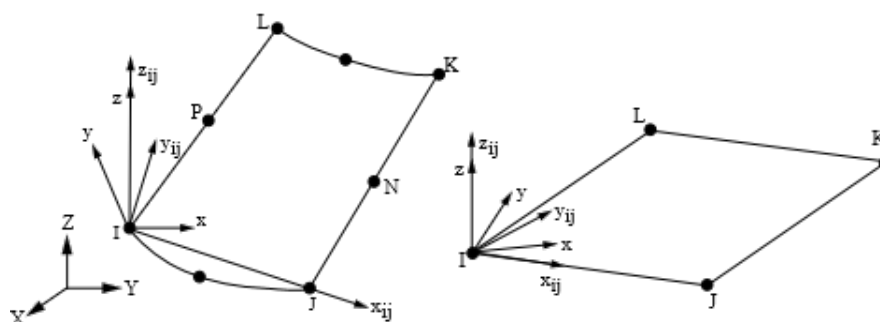


Obr. 2.6: SHELL181 [2]

Shrnutí: uzly	I, J, K, L
stupně volnosti	UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ
prvkové konstanty	TK(I), TK(J), TK(K), TK(L), THETA, ADMSUA E11, E22, E12, DRILL, MEMBRANE, BENDING
materiálové vlastnosti	EX, EY, EZ, PRXY, PRYZ, PRXZ, nebo NUXY, NUYZ, NUXZ, ALPX, ALPY, ALPZ, DENS, GXY, GYZ, GXZ

2.1.4 SURF154

Tento prvek se především používá pro různá zatížení a povrchové účinky ve 3D úlohách. Prvek překrývá plochy jiných prvků a tím do výpočtu vnáší potřebná zatížení. U tohoto typu prvku lze nastavit více typů zatížení zároveň. Dle nastavení může být prvek osmi nebo čtyřuzlový.



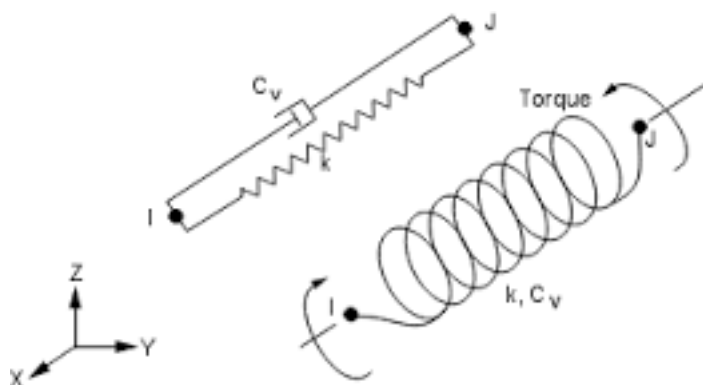
Obr. 2.7: SURF154 [2]

Shrnutí: uzly	I, J, K, L
stupně volnosti	UX, UY, UZ
prvkové konstanty	EFS, SURT, ADMSUA, TKI, TKJ, TKK, TKL
materiálové vlastnosti	DENS, VISC, DAMP

2.1.5 COMBIN14

Tento prvek se používá u 1D, 2D i 3D modelech. Lze ho definovat jako kombinaci podélné či torzní pružiny a tlumiče. Podélná varianta pružinového tlumiče je určena jednoosým napětím a má 3 stupně volnosti – posunutí ve směru s x, y a z. V této variantě není obsažen krut a ohyb. Torzní varianta je naopak jen rotační.

Na rozdíl od podélné varianty jsou u torzní 3 stupně volnosti rotace okolo os x, y a z. Ani jedna z variant nepočítá s hmotností prvku. Ta může být však dodána pomocí tzv. přidané hmotnosti.



Obr. 2.8: COMBIN14 [2]

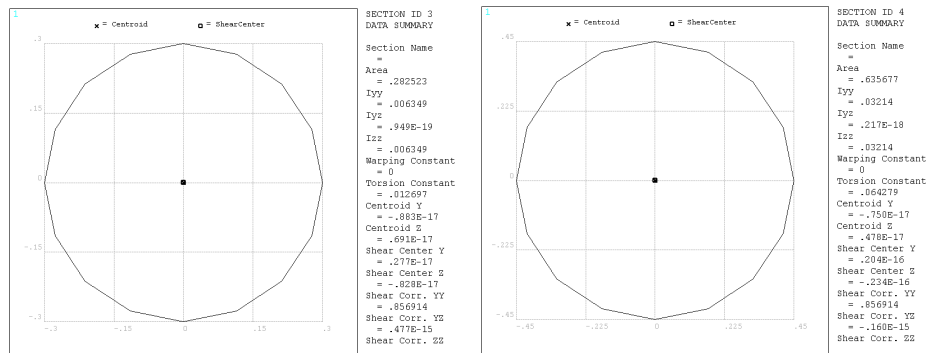
Shrnutí:	uzly	I, J
	stupně volnosti	UX, UY, UZ
	prvkové konstanty	K, CV1, CV2, ILENGTH, IFORCE
	materiálové vlastnosti	DAMP

2.2 Popis prvků konstrukce lávky

2.2.1 Piloty a opěry

Lávka je pomocí pilot a opěr ukotvena do okolního podloží. Piloty mají kruhové půdorysy a po délce konstantní průřezy. Ve své spodní části mají průřezy o průměru 0,9 m a horní část je pak o průměru 0,6 m. Sahají do hloubky cca 18 metrů a k jejich zúžení dochází v hloubce 6,3 m. Jsou navrženy z betonu C25/30 stejně jako opěry a modelovány pomocí prvku BEAM188.

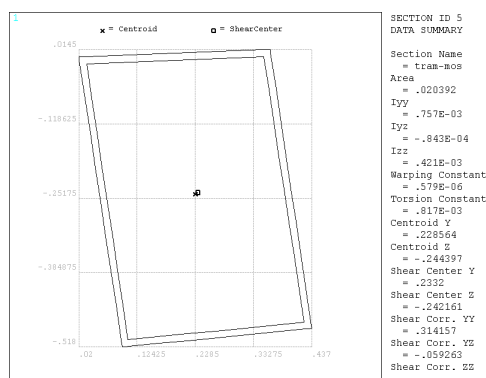
Trámy i deska mostovky jsou vetknuty do krajních železobetonových opěr. Sahajících do hloubky cca 3,3 m, kde na ně navazují piloty. Tloušťka opěr je 1,8 m, šířka 7,1 m. Jsou modelovány pomocí prvku SHELL181.



Obr. 2.9: Průřezy pilot

2.2.2 Trámy

Trámy lávky jsou tvořeny uzavřenými průřezy, které byly v rámci modelu zjednodušeny do podoby na obrázku 2.8. Spojují je příčné příčníky. Jejich osová vzdálenost je 5,7 m a dosahují délky 52,2 m. Vzhledem k tomu, že je mostovka lávky ve svislém oblouku o malé křivosti, oba trámy zachovávají ve své geometrii tuto křivost. Po celé jejich délce mají vnější rozměry stejné. U pat oblouků lávky dochází ke změně tloušťky stěny průřezu z 12 mm na 20 mm. V této oblasti jsou vnitřní prostory trámů vybetonovány. U trámu byl pro modelování zvolen prvek BEAM188.



Obr. 2.10: Průřez trámu

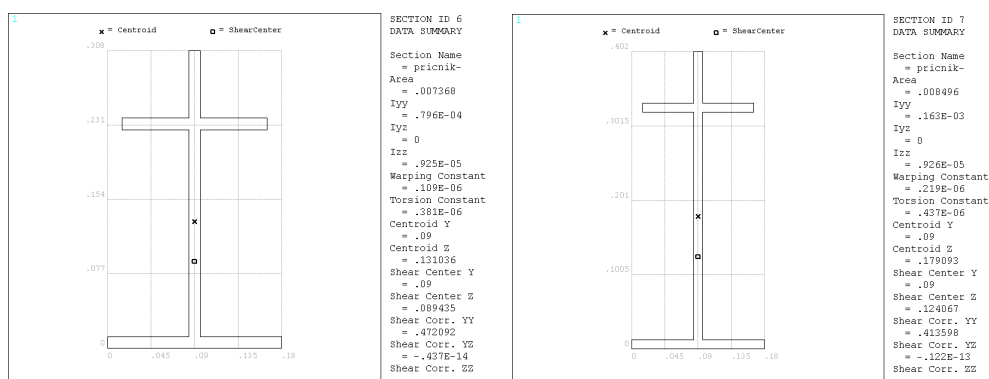
2.2.3 Deska mostovky

Monolitická betonová deska mostovky má tloušťku 0,2 m a sřažuje trámy a příčníky lávky. Vzhledem k tomu, že je mostovka lávky ve svislém oblouku o malé

křivosti je i deska modelována touto křivostí. Není předjatá. Je navrhnutá z betonu C30/37. V modelu je pro ni použit prvek SHELL181. Do modelu bylo nutno zahrnout 1/4 užitého zatížení, které bylo přidáno pomocí prvku SURF154 na povrch desky mostovky.

2.2.4 Příčníky

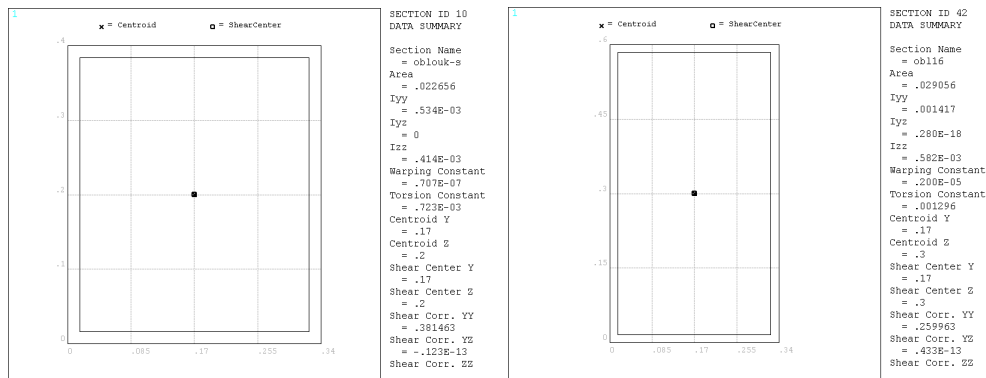
Lávka je příčně spojena 16 příčníky, které jsou od sebe ve vzdálenosti 3,0 m a jejich délka je rovna osově vzdálenosti trámů - 5,7 m. Průřez příčníku má tvar I profilu. Pro lepší spřažení s železobetonovou deskou mostovky je pak vrchní část prodloužena. Výška průřezu příčníku je proměnná. Své maximální hodnoty dosahuje v příčném středu mostovky. Příčníky jsou modelovány pomocí prvku BEAM188.



Obr. 2.11: Průřezy příčníku

2.2.5 Oblouky

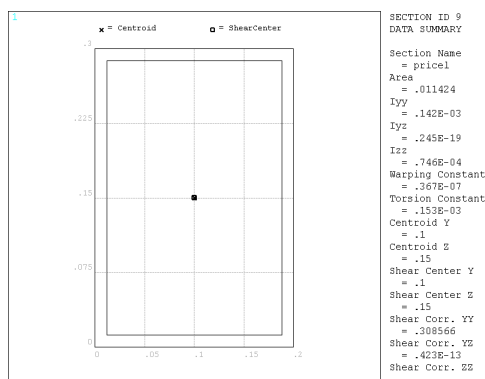
Oblouky jsou tvořeny ocelovými svařovanými profily, které jsou uzavřeny a mají po výšce proměnný průřez, který byl pro potřeby modelování lávky zjednodušen do podoby na obr. 2.10. Nejmenší hodnota výšky průřezu je 0,4 m - jedná se o místo ve středu oblouků. Směrem k patě oblouku se výška postupně zvyšuje až na hodnotu 0,6 m. V patě je také pak tloušťka stěny průřezu zvýšena z 16 mm na 20 mm. Stejně jako u trámů dochází v patě oblouku k vybetonování vnitřních částí. Oblouky jsou příčně ve třech místech spojeny příčlemi. Oblouky jsou modelovány prvky BEAM188.



Obr. 2.12: Průřezy oblouku

2.2.6 Příčle

V konstrukci se celkem nachází 3 ocelové příčle, které mají za úkol příčně spojit oblouk lávky. Jsou tvořeny uzavřeným svařovaným profilem, který je po své šířce i výšce neměnný. Délka příčle je závislá na osové vzdálenosti průřezů oblouků. Pro modelování příčlí byl zvolen prvek BEAM188.



Obr. 2.13: Průřez příčlí

2.2.7 Závěsy

Ocelové závěsy mají za úkol spojit oblouk s trámy mostovky. Jsou předepnuty pouze vlastní hmotností konstrukce. Jejich průřez je kruhový o průměru 39 mm. Pro jejich modelování byl použit prvek LINK180.

Tab. 2.1: Použití konečných prvků v modelu

Konstrukční prvky	Konečné prvky
Piloty	BEAM188
Opěry	SHELL181
Beton v patě oblouku	SHELL181
Oblouky	BEAM188
Příčle	BEAM188
Trámy	BEAM188
Příčníky	BEAM188
Závěsy	LINK180
1/4 užitého zatížení	SURF154
Podloží	COMBIN14

2.3 Materiálové charakteristiky modelu

Konstrukce se skládá ze dvou základních typů materiálu - ocel a beton. Všechny konstrukční prvky byly modelovány jako izotropní, lineárně pružné. Velikost pružnostních konstant a specifických hmotností byly převzaty z projektové dokumentace [1]. Hodnota specifické hmotnosti oceli byla zvýšena z důvodu zahrnutí hmotnosti nemodelovaných částí do výpočtu. U specifické hmotnosti betonové desky mostovky byla její hodnota navýšena o velikost hmotnosti nemodelované izolace. U trámy byla k jeho hmotnosti přičtena hmotnost zábradlí, které nebylo modelováno.

Pro lepší přehlednost byla sestavena tabulka 2.2, kde jsou uvedeny jednotlivé modelované části konstrukce s příslušným popisem materiálu.

2.4 Podloží

Pro přehlednost jednotlivých vrstev podloží byla sestavena tabulka 2.3, kde lze nalézt popis vlastností. Zemina byla modelována pomocí pružinových prvků COMBIN14, kterým byla v rámci reálných konstant zadávána tuhost materiálu, kterou lze taktéž najít v této tabulce. Charakteristiky zeminy byly stanoveny na základě geologického průzkumu.

Tab. 2.2: Materiálové charakteristiky modelu

Konstrukční prvky	Materiál	Modul pružnosti [GPa]	Součinitel příčné kontrakce [-]	Specifická hmotnost [kg/m ³]
Piloty	beton C25/30	31,0	0,2	2500
Opěry	beton C25/30	31,0	0,2	2500
Beton v patě oblouku	beton C30/37	32,0	0,2	2500
Deska mostovky	beton C30/37	32,0	0,2	2600
Oblouk	ocel S355	210,0	0,3	8650
Příčle	ocel S355	210,0	0,3	8400
Trámy	ocel S355	210,0	0,3	16000
Příčníky	ocel S355	210,0	0,3	8400
Závěsy	Macalloy S460	210,0	0,3	7850

Tab. 2.3: Popis vlastností vrstev podloží [1]

Hloubka		Mocnost	Popis	Modul tuhosti	Tuhost pružin
od	do	[m]		[MPa]	[MN·m ⁻¹]
0,0	0,8	0,8	Y-navážka	3,0	3,33
0,8	3,5	2,7	F5-ML tuhá až pevná	5,0	3,33
3,5	4,6	1,1	F5-ML měkká až tuhá	3,0	2,00
4,6	6,8	2,2	F4-CS měkká až tuhá	5,0	3,33
6,8	9,0	2,2	G3-GF zvodnělá	95,0	66,00
9,0	10,0	1	F4-CS tuhá až pevná	6,0	4,00
10,0	11,5	1,5	F4-CS tuhá až pevná	6,0	4,00
11,5	15,0	3,5	F4-CS pevný	7,0	4,67

3 STATICKÁ ANALÝZA

3.1 Teorie statické analýzy

Pro lineární statickou analýzu metodou konečných prvků má obecná rovnice rovnováhy tvar:

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

nebo

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

přičemž $[K]$ je matice tuhosti konstrukce, $\{u\}$ vektor zobecněných posunutí, $\{F^a\}$ celkový zatěžovací vektor, $\{F^r\}$ vektor reakcí.

Celková matice tuhosti konstrukce je definována jako součet matic tuhosti jednotlivých konečných prvků:

$$[K] = \sum_{m=1}^N [K_e], \quad (3.3)$$

kde N je celkový počet prvků a $[K_e]$ vyjadřuje matici tuhosti jednotlivých prvků (může zahrnovat i matici počátečních napětí).

Celkový zatěžovací vektor se pak následně určí:

$$\{F^a\} = \{F^nd\} + \{F^ac\} + \sum_{m=1}^N (\{F_e^{th}\} + \{F_e^{pr}\}), \quad (3.4)$$

kde $\{F^nd\}$ je vektor zatížení uzlů, $\{F^ac\}$ vektor zatížení od tíhového zrychlení, $\{F_e^{th}\}$ vektor zatížení prvku od teplotního zatížení, $\{F_e^{pr}\}$ vektor zatížení tlaku na prvky.

Dle druhého Newtonova zákon se vektor zatížení od tíhového zrychlení vypočte:

$$\{F^ac\} = -[M]\{a_c\}, \quad (3.5)$$

kde $[M]$ je matice hmotnosti konstrukce a $\{a_c\}$ vektor tíhového zrychlení.

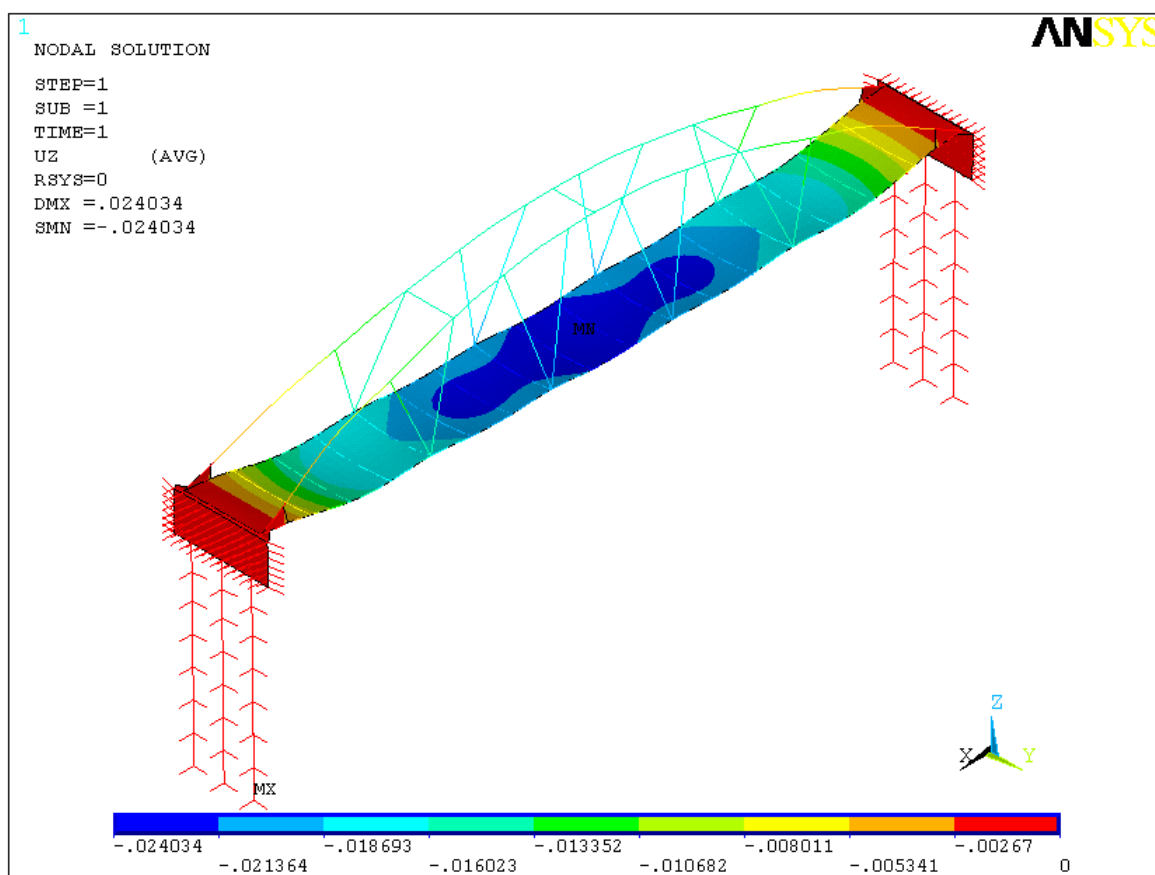
Celková matice hmotnosti konstrukce je formulovaná jako součet matic hmotnosti jednotlivých konečných prvků:

$$[M] = \sum_{m=1}^N [M_e], \quad (3.6)$$

kde N je celkový počet prvků a $[M_e]$ vyjadřuje matici hmotnosti jednotlivých prvků.

3.2 Výpočet statické analýzy

Statická analýza byla provedena z důvodu kontroly spojitosti a kvality modelu. Pro výpočet statické analýzy byl model zatížen vlastní tíhou tzn. tíhovým zrychlením $g = 9,81 \text{ m/s}^{-2}$. Byl proveden lineární výpočet, při němž extrémní průhybu lávky je 24 mm. Velikost tohoto průhybu u_z odpovídá 1/2000 rozpětí lávky.



Obr. 3.1: Vlastní tíha - posunutí u_z

4 VÝPOČET VLASTNÍCH FREVENCÍ A VLASTNÍCH TVARŮ KMITU KONSTRUKCE

K určení hlavních charakteristik volného netlumeného kmitání se využívá modální analýzy, při nichž je kmitavý děj rozdělen na dílčí (modální) příspěvky. Jednotlivé tvary jsou následně popsány vlastní frekvencí a vlastním tvarem kmitu (tzv. vlastní hodnoty). Výsledky modální analýzy jsou důležité pro popis dynamického chování konstrukce.

4.1 Teorie modální analýzy

Pohybovou rovnici pro volné kmitání s vyolučením útlumu, která vychází z druhého Newtonova zákona, lze vyjádřit ve tvaru:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{0\}, \quad (4.1)$$

kde $[M]$ je matice hmotnosti konstrukce, $[K]$ matice tuhosti konstrukce, $\{u\}$ vektor přemístění, $\{\ddot{u}\}$ vektor zrychlení (jde o druhou derivaci vektoru přemístění $\{u\}$ podle času t), $\{0\}$ nulový vektor.

V matici tuhosti $[K]$ může být obsažen i „prestress“ efekt. Z toho vyplývá, že k počáteční matici tuhosti $[K]$ se přičte matice počátečního napětí - geometrické tuhosti $[S]$. Tímto krokem se změní tuhost konstrukce a následně jsou i změněny vlastní hodnoty konstrukce. Matici geometrických tuhostí $[S]$ je možné získat při statické analýze.

V lineární soustavě se hledá řešení v harmonickém tvaru:

$$\{u\} = \{\phi\}_i \cos(\omega_i t). \quad (4.2)$$

Dvojitým derivováním podle času lze dostat tvar pro zrychlení:

$$\{\ddot{u}\} = -\omega_i^2 \{\phi\}_i \cos(\omega_i t), \quad (4.3)$$

kde $\{\phi\}_i$ je vlastní vektor soustavy tvořící vlastní tvar i -té vlastní frekvence, ω_i vlastní úhlová frekvence, t představuje čas. Počáteční rovnici (4.1) je možno

upravit na tvar:

$$(-\omega_i^2[M] + [K])\{\phi\} = \{0\}. \quad (4.4)$$

Rovnice je splněna pokud $\{\phi\}_i = \{0\}$ nebo determinant matice $[[K] - \omega_i^2[M]]$ je roven nule. První varianta reprezentuje triviální řešení - nepodstatné řešení. Druhou variantu lze upravit do tvaru:

$$|[K] - \omega_i^2[M]| = 0. \quad (4.5)$$

Pokud má soustava n počet stupňů volnosti, lze získat dle základní věty algebry n vlastních úhlových frekvencí. Pokud se dosadí jednotlivé vlastní frekvence do rovnice (4.4) dostane se n vlastních vektorů soustavy.

Získané vlastní úhlové frekvence a jejich tvary jsou následně řazeny dle velikosti od nejmenší po největší.

Vlastní úhlová frekvence f_i je pak vypočtena ze vztahu:

$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi}. \quad (4.6)$$

4.2 Výpočet vlastních tvarů kmitu a vlastních frekvencí

Jako metoda výpočtu byla zvolena Lanczsova metoda. Bylo určeno 15 nižších vlastních frekvencí a tvarů kmitu, které následně sloužily jako podklady pro výpočet odezvy konstrukce na vírové buzení za ustáleného větru.

Frekvenční spektrum, které bylo získáno z modální analýzy, je uvedeno v tabulce 4.1. Pro následné řešení odezvy na působení větru podle norem ČSN EN 1991-1-4 a ČSN P ENV 1991-2-4 je tento výčet frekvencí dostačující.

Vlastní tvary kmitů jsou pak uvedeny v příloze A.

Tab. 4.1: Vlastní frekvence modelu

<i>i</i>	Frekvence [Hz]	<i>i</i>	Frekvence [Hz]
1	1,407	9	4,738
2	2,489	10	5,124
3	2,602	11	5,155
4	2,679	12	5,248
5	3,254	13	5,543
6	3,825	14	6,665
7	3,943	15	6,676
8	4,468		

5 VÝPOČET HARMONICKÉ ODEZVY KONSTRUKCE

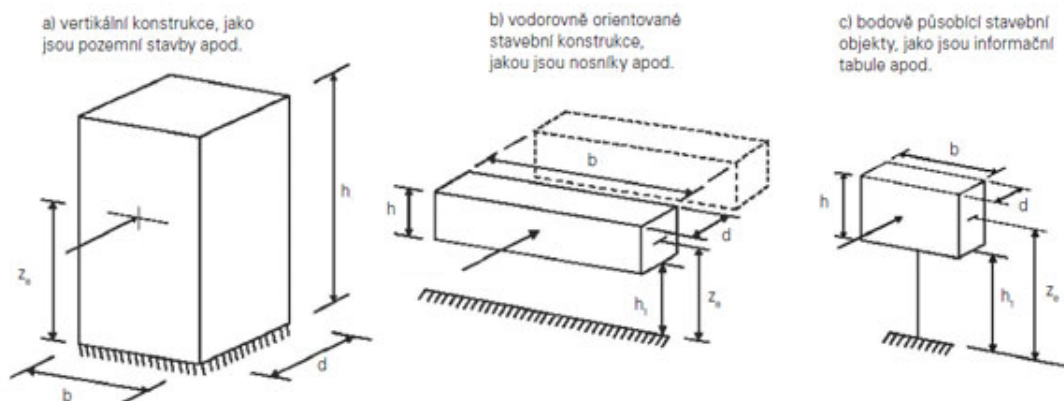
Harmonická analýza se používá k výpočtu ustálené odezvy konstrukce na harmonické buzení. Díky ní je možno určit, zda v konstrukci nedojde ke stavu rezonance, či stanovit životnost konstrukce s přihlédnutím k možnosti únavy materiálu.

Při posuzování mostních konstrukcí harmonickou analýzou se na konstrukci aplikuje dynamické zatížení od větru a zatížení od chodců. Tato diplomová práce se zabývá posouzením konstrukce pouze na zatížení od větru, nicméně mezi sebou porovnává výsledky od zatížení dle norem ČSN P ENV 1991-2-4 a ČSN EN 1991-1-4.

Autoři norem ČSN zavedli velmi účinné nástroje pro navrhování staveb zatížených větrem. Řešení explicitně uvedená v nových normách EN naopak od metodiky přesnějších dynamických výpočtů ustupují. Norma ČSN EN 1991-1-4 používá kvazistatickou metodu pro stanovení odezvy na zatížení větrem. Konstrukce je zatěžována maximálním zatížením větrem násobeným tzv. součinitelem konstrukce $c_s c_d$. Tento součinitel zohledňuje vliv současnosti výskytu maximálních hodnot flukтуаční složky zatížení větrem a zároveň vliv kmitání konstrukce. Součinitel již není proměnný s ohledem na výšku konstrukce a je uvažován jednou konstantní hodnotou. Protože zatížení ekvivalentními setrvačnými silami má odlišné rozložení oproti maximálnímu zatížení větrem, přináší obecně použití konstantního součinitele větší nepřesnost, případně větší omezení pro použití této metody oproti kvazistatickému výpočtu s proměnným součinitelem po výšce. Je zřejmé, že nedosahuje přesnosti ani dynamického výpočtu pomocí rozkladu do vlastních tvarů kmitání.

Použití kvazistatické metody dle ČSN EN 1991-1-4 je omezeno na konstrukce, které odpovídají jednomu z obecných tvarů uvedených na obr. 5.1 a současně na konstrukce, u nichž je významné kmitání pouze v základním tvaru, přičemž výchylky v tomto tvaru mají stejné znaménko.

Odezvu konstrukcí, které leží mimo obor platnosti uvedených metod, nelze pomocí norem ČSN EN stanovit. Jedná se například o konstrukce s výrazně nerovnoměrně rozmístěnou návětrnou plochou, konstrukce sestavené z průřezů výrazně odlišných tuhostí (například z různých materiálů) a dále o štíhlé komíny, štíhlé lávky a další. Normy ČSN EN se v takovýchto případech odkazují na přesnější dynamické metody, například spektrální analýzu. Podrobnosti ovšem neuvádějí. [13]



Obr. 5.1: Obecné tvary konstrukce [3]

5.1 Teorie harmonické analýzy

Pro řešení harmonické odezvy lze vyjádřit pohybovou rovnicí v tomto tvaru:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F^a\}, \quad (5.1)$$

kde $[M]$, $\{\ddot{u}\}$, $[K]$ a $\{u\}$ byly popsány již v předchozích kapitolách. $[C]$ vyjadřuje matici tlumení, $\{\dot{u}\}$ je vektor uzlových rychlostí a $\{F^a\}$ představuje vektor zatížení.

Pokud je konstrukce zatížena harmonickým zatížením, kmitají všechny její části, při ustálené odezvě, shodnou frekvencí. Všeobecně body konstrukce kmitají s odlišnou fází. Tlumení konstrukce způsobuje tzv. fázový posun.

Vektor uzlových posunů má tvar:

$$\{u\} = \{u_{max} e^{i\phi}\} e^{i\Omega t}, \quad (5.2)$$

kde u_{max} vyjadřuje amplitudu posunů, ϕ fázový posun, ω úhlová frekvence, t čas, i představuje komplexní číslo. Neznámé veličiny jsou v této situaci fázový posun a amplituda. Tento vztah je možno upravit pomocí Eulerova vztahu do následujícího vzorce:

$$\{u\} = \{u_{max}(\cos\phi + i\sin\phi)\} e^{i\Omega t}. \quad (5.3)$$

Příznivější pro výpočet je převedení vzorce do tvaru, který je formulován pomocí reálné a imaginární části posunů:

$$\{u\} = \{\{u_1\} + i\{u_2\}\} e^{i\Omega t}. \quad (5.4)$$

kde $\{u_1\}$ popisuje vektor reálných posunů a $\{u_2\}$ vyjadřuje vektor imaginárních posunů. Díky tomu je možno amplitudu formulovat jako:

$$\{u_{max}\} = \sqrt{u_1^2 + u_2^2}. \quad (5.5)$$

Fázový posun pak:

$$\phi = \tan^{-1} \frac{u_2}{u_1}. \quad (5.6)$$

Zatěžovací vektor je možno upravit analogicky podobně jako vektor posunů:

$$\{F\} = \{F_{max} e^{i\psi}\} e^{i\Omega t}, \quad (5.7)$$

$$\{F\} = \{F_{max} (\cos\psi + i\sin\psi)\} e^{i\Omega t}, \quad (5.8)$$

$$\{F\} = \{\{F_1\} + i\{F_2\}\} e^{i\Omega t}, \quad (5.9)$$

kde F_{max} vyjadřuje amplitudu sil, F_1 vektor reálných sil, F_2 vektor imaginárních sil, ψ fázový posun sil.

Pokud je zderivován vztah (5.4) podle času t , následně dosazen do rovnice (5.1) a člen $e^{i\Omega t}$ je vykrácen, dostane se rovnice ve tvaru [2][7]:

$$([K] - \Omega^2[M] + i\Omega[C])\{\{u_1\} + i\{u_2\}\} = \{\{F_1\} + i\{F_2\}\}. \quad (5.10)$$

5.2 Tlumení konstrukce

Hodnota poměrného útlumu použitého pro výpočty je u obou variant výpočtu stejná. Je možno tuto hodnotu určit odhadem nebo dle dostupných zdrojů. Konstrukce mostu se nachází v pásmu velmi malého tlumení. Jako nejlepší varianta stanovení útlumu je most postavit a následně uskutečnit měření. Jelikož se však jedná o posudek návrhu mostu, není v tomto případě možné tento čin uskutečnit, a proto byl poměrný útlum konstrukce převzat ze zdroje [9].

Poměrný útlum mostní konstrukce s betonovou mostovkou $\zeta=0,006$. Tato hodnota vychází z hodnot již realizovaných konstrukcí. Útlum konstrukce je jedním ze vstupních parametrů harmonické analýzy.

Logaritmický dekrement útlumu se pak následně vyjádří jako:

$$\delta = 2\pi\zeta \quad (5.11)$$

5.3 Odtrhávání vírů

Při obtékání některých těles (profilů) se vytvářejí víry, které se za vhodných podmínek oddělují střídavě po obou stranách, takže vzniklá periodická síla má snahu těleso rozkmitat v rovině kolmé ke směru větru. Jev pozoroval a popsal koncem 19. století na napjatých strunách Čeněk Strouhal, počátkem 20. století jej pro případ obtékání válce odvodil Theodor von Kármán.

Síly, kterými oddělované víry působí na obtékané těleso, nejsou velké, ale mají svou frekvenci, a při rovnoměrném větru působí delší dobu. Svou vlastní frekvenci má i štíhlý konstrukční prvek; jsou-li si obě blízké, nastane při malém tlumení vlivem rezonance kmitání se značnou amplitudou. [7]

K analýze tohoto jevu využívá platný eurokód [3] náhradní zatížení sil. Ty se vypočtou jako statická zatížení, která se následně aplikují na model konstrukce. Výsledky jsou pak rovny výchytkám při náhradním kmitání.

5.4 Zatížení při odtrhávání vírů dle ČSN P ENV 1991-2-4

Kritická rychlost větru, při které se frekvence odtrhávání vírů rovná vlastní frekvenci, je definována vztahem:

$$v_{crit,i} = \frac{bn_i}{St}, \quad (5.12)$$

kde b vyjadřuje referenční šířku průřezu, n_i představuje vlastní frekvenční konstrukce v rovině, která je kolmá ke směru větru v i -tém tvaru a St znázorňuje Strouhalovo číslo. Toto číslo je závislé na tvaru průřezu a lze ho určit z tabulky C.1. v příloze C normy ČSN P ENV 1991-2-4 [5].

Posudek není nutno provádět podle ČSN 73 0035 čl. 160, pokud je dodržena jedna z následujících podmínek:

a. Redukovaný logaritmický dekrement útlumu δ_{red} splňuje:

$$\delta_{red} = \frac{2m\delta}{\rho d^2} \geq 80, \quad (5.13)$$

příčemž $\rho=1,25\text{kg/m}^3$ znázorňuje objemovou hmotnost vzduchu, d výška průřezu, m hmotnost konstrukce na jednotku délky a δ logaritmický dekrement útlumu.

b. Velikost kritické rychlosti větru je $v_{crit,i} < 3 \text{ m/s}$ nebo $v_{crit,i} > 25 \text{ m/s}$

První podmínka není splněna při posuzování této mostní lávky. Bude se brát tedy v úvahu druhá z podmínek, kde je kritická rychlost větru, kterou je nutno posuzovat, dána intervalem. Konstrukce se nachází v lokalitě větrné mapy, kde je horní hodnota pro kritickou rychlost snížena na 20 m/s. Díky tomu je možno interval posuzování zkrátit.

Náhradní dynamické zatížení při rezonančním kmitání konstrukce v i -tém tvaru kolmo ke směru větru se vypočte ze vztahu:

$$w_i = \frac{v_{crit,i}^2}{1,6 \cdot 10^3} t c_{lat,0} b, \quad (5.14)$$

kde b je šířka mostovky a $c_{lat,0}$ představuje součinitel aerodynamické síly.

Efektivní korelační délka je definována funkcí amplitudy dle tabulky C.3 popsané v ČSN P ENV 1991-2-4 [5]. Její hodnota je v tomto případě dána vzorcem:

$$L_j = 6b. \quad (5.15)$$

Svislá amplituda harmonické síly F se rovná výslednici dynamického tlaku na korelační délce L_j :

$$F = L_j w. \quad (5.16)$$

Hodnoty Strouhalova čísla St a součinitele aerodynamické budící síly $c_{lat,0}$ jsou pro mostovku uvažovány podle tabulky C.1 popsané v ČSN P ENV 1991-2-4 [5] následovně:

Pro $d/b \leq 5$:

$$St = 0,145 \text{ a } c_{lat,0} = 0,12d/b$$

Pro $5 \leq d/b \leq 10$:

$$St = 1/(1,1d/b + 1) \text{ a } c_{lat,0} = 0,50b/d/(1,1d/b + 1)^2$$

Pro $10 \leq d/b$:

$$St = 0,083 \text{ a } c_{lat,0} = 0,035b/d$$

Pro oblouk lávky je nutno Strouhalovo číslo St a součinitele aerodynamické budící síly $c_{lat,0}$ odvodit z následujícího předpisu, protože pro průřez oblouku platí jiné kritérium. Je však taktéž součástí tabulky C.1:

Pro $5 \leq d/b \leq 10$:

$$c_{lat,0} = 1,1$$

Pro $d/b \leq 1,0$:

$$St = 0,12$$

Hodnoty náhradního dynamického zatížení jsou přehledně uvedeny v následujících tabulkách pro každý posuzovaný případ zvlášť. Jedná se o posudky zatížení mostovky se zábradlím, mostovky bez zábradlí a oblouku konstrukce.

5.4.1 Výpočet zatížení na konstrukci

V následujících tabulkách 5.1, 5.2 a 5.3 jsou uvedeny výpočty náhradního dynamického zatížení, kterými je konstrukce buzena, pro jednotlivé nosné prvky lávky. Hodnoty svislých sil F_i se od sebe liší v závislosti na vlastní frekvenci tvaru kmitu.

Tab. 5.1: Výpočet harmonického zatížení mostovky bez zábradlí

	b	d	d/b	St	n_i	v_{crit}		v_{lim}	$c_{lat,0}$	w_i	L_j	F_i	
i	[m]	[m]	[-]	[-]	[Hz]	[m/s]		[m/s]	[-]	[N·m]	[m]	[N]	Výp.
1	6,1	0,52	11,73	0,083	1,40	8,81	<	20	0,41	10,36	3,21	32,33	V1
2	6,1	0,52	11,73	0,083	2,48	15,59	<	20	0,41	32,44	3,21	101,21	V2
3	6,1	0,52	11,73	0,083	2,60	16,30	<	20	0,41	35,46	3,21	110,64	V3
4	6,1	0,52	11,73	0,083	2,67	16,79	<	20	0,41	37,60	3,21	117,32	V4
5	6,1	0,52	11,73	0,083	3,25	20,39	>	20	0,41	55,46	3,21	173,05	-
6	6,1	0,52	11,73	0,083	3,82	23,96	>	20	0,41	76,61	3,21	239,02	-
7	6,1	0,52	11,73	0,083	3,94	24,71	>	20	0,41	81,45	3,21	254,12	-
8	6,1	0,52	11,73	0,083	4,46	27,99	>	20	0,41	104,57	3,21	362,28	-
9	6,1	0,52	11,73	0,083	4,73	29,69	>	20	0,41	117,60	3,21	366,91	-
10	6,1	0,52	11,73	0,083	5,12	32,10	>	20	0,41	137,54	3,21	429,11	-

Náhradní dynamické zatížení bylo na konstrukci nastaveno tak, že výslednice budící síly F_i byla umístěna do uzlu mostovky nebo trámů v místě nejvyšší výchylky u_z vlastního tvaru kmitu pro danou vlastní frekvenci.

Tab. 5.2: Výpočet harmonického zatížení mostovky se zábradlím

	b	d	d/b	St	n_i	v_{crit}		v_{lim}	$c_{lat,0}$	w_i	L_j	F_i	
i	[m]	[m]	[-]	[-]	[Hz]	[m/s]		[m/s]	[-]	[N·m]	[m]	[N]	Výp.
1	6,1	1,8	3,39	0,154	1,40	16,44	<	20	0,406	123,64	10,8	1335,36	Z1
2	6,1	1,8	3,39	0,154	2,48	29,09	>	20	0,406	387,11	10,8	4180,84	-
3	6,1	1,8	3,39	0,154	2,60	30,41	>	20	0,406	423,16	10,8	4570,18	-
4	6,1	1,8	3,39	0,154	2,67	31,32	>	20	0,406	448,71	10,8	4846,11	-
5	6,1	1,8	3,39	0,154	3,25	38,04	>	20	0,406	661,88	10,8	7148,37	-

Průřezy oblouků jsou tvořeny uzavřenými ocelovými profily, které mají proměnou výšku předepsanou dle zadavatele. Ve středu lávky je profil o rozměrech 340 x 400 mm a následně se plynule mění do velikosti 340 x 600 mm. Uvažovaná výška průřezu oblouku do výpočtu zatížení je brána podle polohy nejvyšší výchylky u_z vlastního tvaru kmitu dané vlastní frekvence.

Tab. 5.3: Výpočet harmonického zatížení oblouku

	b	d	d/b	St	n_i	v_{crit}		v_{lim}	$c_{lat,0}$	w_i	L_j	F_i	
i	[m]	[m]	[-]	[-]	[Hz]	[m/s]		[m/s]	[-]	[N·m]	[m]	[N]	Výp.
1	0,34	0,461	0,82	0,12	1,40	4,88	<	20	1,1	6,80	2,50	16,97	O1
2	0,34	0,495	0,69	0,12	2,48	10,27	<	20	1,1	35,87	2,97	106,52	O2
3	0,34	0,427	0,80	0,12	2,60	9,26	<	20	1,1	25,17	2,56	64,47	O3
4	0,34	0,463	0,73	0,12	2,67	10,34	<	20	1,1	34,02	2,78	94,51	O4
5	0,34	0,412	0,83	0,12	3,25	11,17	<	20	1,1	35,36	2,47	87,41	O5
6	0,34	0,469	0,72	0,12	3,82	14,95	<	20	1,1	72,04	2,81	202,72	O6
7	0,34	0,507	0,67	0,12	3,94	16,66	<	20	1,1	96,76	3,04	294,35	O7
8	0,34	0,437	0,78	0,12	4,46	16,27	<	20	1,1	79,55	2,62	208,59	O8
9	0,34	0,457	0,74	0,12	4,73	18,05	<	20	1,1	120,32	2,74	280,55	O9
10	0,34	0,500	0,68	0,12	5,12	21,35	>	20	1,1	156,71	3,00	470,14	-
11	0,34	0,422	0,81	0,12	5,15	18,13	<	20	1,1	95,35	2,53	241,44	O10
12	0,34	0,437	0,78	0,12	5,24	19,11	<	20	1,1	109,76	2,62	287,80	O11
13	0,34	0,506	0,67	0,12	5,54	23,37	>	20	1,1	190,02	3,04	576,89	-
14	0,34	0,427	0,80	0,12	6,66	23,72	>	20	1,1	165,11	2,56	423,01	-
15	0,34	0,576	0,59	0,12	6,67	32,04	>	20	1,1	406,64	3,46	1405,3	-

Zatížení F_i bylo aplikováno na oblouku do uzlů, ve kterých byla dosažena maximální výchylka u_z ve vlastním tvaru kmitu pro příslušnou vlastní frekvenci konstrukce.

K odtrhávání vírů dochází u každého oblouku zvlášť. Z čehož plyne, že oblouk je zatížen minimálně párem spojitého náhradního zatížení, které se rovná výslednici sil F_i . Zatížení oblouku se vždy uvažuje ve stejné výšce průřezu oblouku – stejná úroveň kritické rychlosti v_{crit} .

5.4.2 Výpočet odezvy lávky

Pomocí modální analýzy byla nalezena frekvenční oblast, pro kterou byly stanoveny rezonanční frekvence n_i a následně byla pomocí tzv. "plné" metody prove-

dena harmonická analýza konstrukce.

Výsledky maximálních amplitud posunutí, rychlostí a zrychlení jednotlivých výpočtů jsou přehledně shrnuty do následujících tabulek (5.4) až (5.7). Výsledné hodnoty se rovnají maximálním hodnotám amplitud na mostovce lávky vždy pro danou frekvenci ustáleného kmitání, která odpovídá frekvenci buzení. Při zatížení oblouku konstrukce jsou pak vyhodnoceny tyto maximální amplitudy posunutí, rychlostí a zrychlení i pro oblouk.

Tab. 5.4: Odezva v amplitudách posunutí, rychlost a zrychlení pro mostovku bez zábradlí

		Posuny [mm]		Rychlost [mm/s]		Zrychlení [m/s ²]	
Výp	n_i	u_y	u_z	v_y	v_z	a_y	a_z
V 1	1,40	0,009	0,009	0,079	0,079	0,000	0,000
V 2	2,48	0,000	0,570	0,000	8,911	0,000	0,139
V 3	2,60	0,061	0,021	0,997	0,343	0,016	0,006
V 4	2,67	0,045	0,116	0,754	1,951	0,013	0,033

Tab. 5.5: Odezva v amplitudách posunutí, rychlost a zrychlení pro mostovku se zábradlím

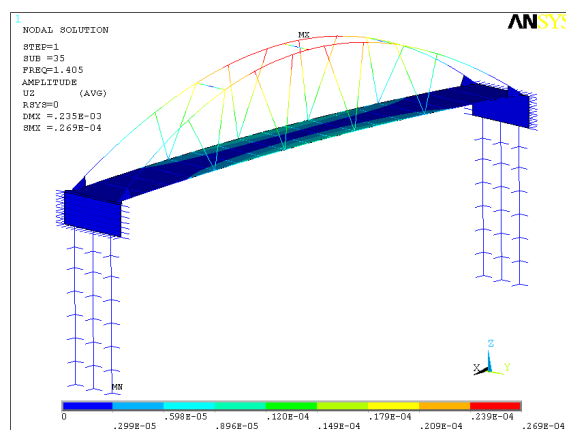
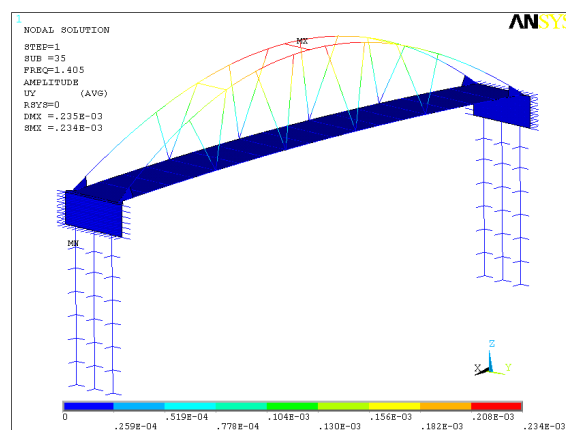
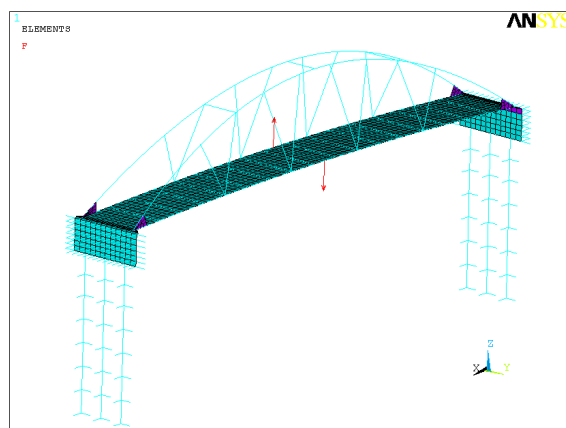
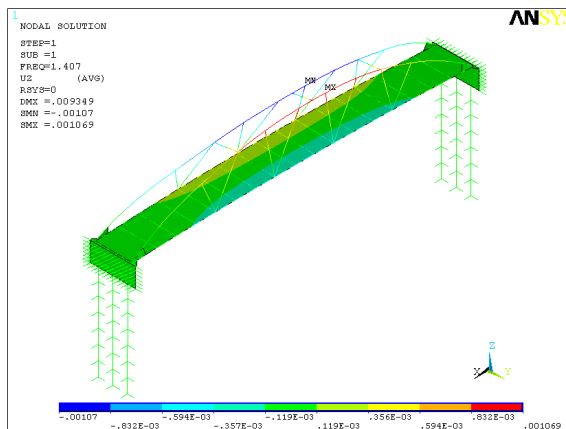
		Posuny [mm]		Rychlost [mm/s]		Zrychlení [m/s ²]	
Výp	n_i	u_y	u_z	v_y	v_z	a_y	a_z
Z 1	1,40	0,349	0,386	3,083	3,083	0,027	0,027

Tab. 5.6: Odezva v amplitudách posunutí, rychlost a zrychlení pro mostovku při zatížení oblouku

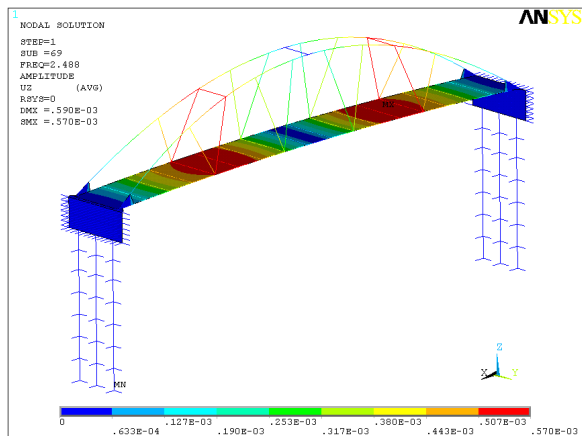
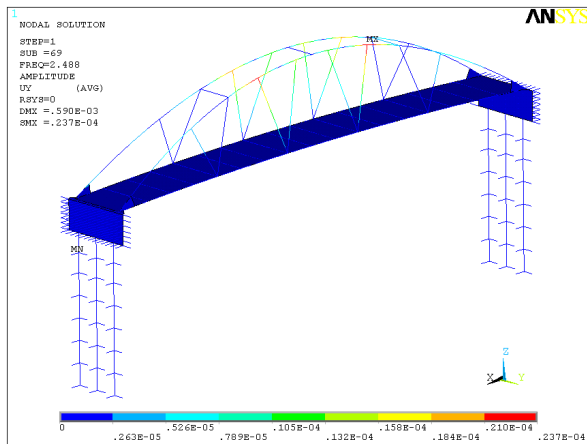
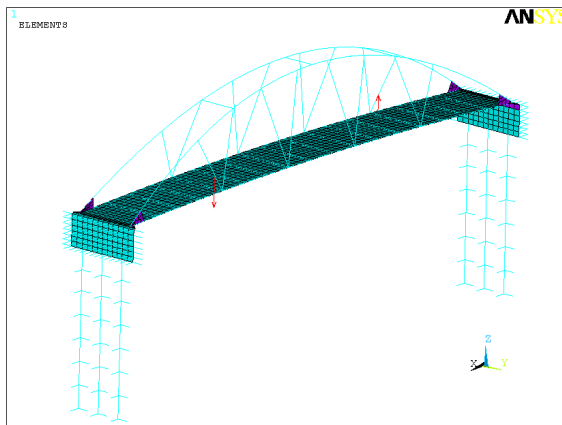
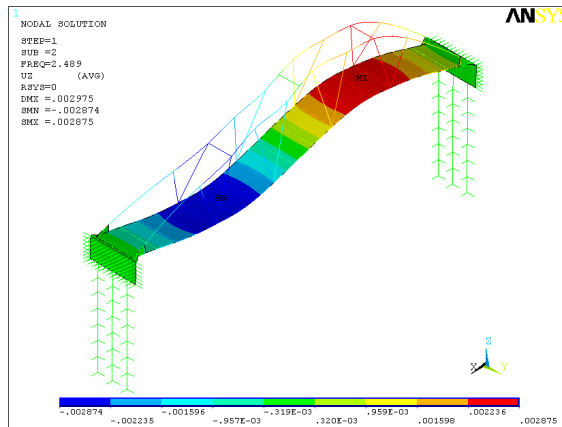
		Posuny [mm]		Rychlost [mm/s]		Zrychlení [m/s ²]	
Výp	n_i	u_y	u_z	v_y	v_z	a_y	a_z
O 1	1,40	0,015	0,014	0,130	0,123	0,001	0,001
O 2	2,48	0,002	1,096	0,028	17,133	0,000	0,268
O 3	2,60	0,085	0,016	1,390	0,263	0,023	0,004
O 4	2,67	0,022	0,057	0,367	0,952	0,006	0,016
O 5	3,25	0,000	0,434	0,000	8,873	0,000	0,181
O 6	3,82	0,040	0,016	0,961	0,394	0,023	0,009
O 7	3,94	0,002	1,229	0,057	30,448	0,001	0,754
O 8	4,46	0,000	0,508	0,000	14,262	0,000	0,400
O 9	4,73	0,098	0,277	2,909	8,246	0,087	0,245
O10	5,15	0,104	0,341	3,359	11,045	0,109	0,358
O11	5,24	0,094	0,100	3,100	3,297	0,102	0,109

Tab. 5.7: Odezva v amplitudách posunutí, rychlost a zrychlení pro oblouk při zatížení oblouku

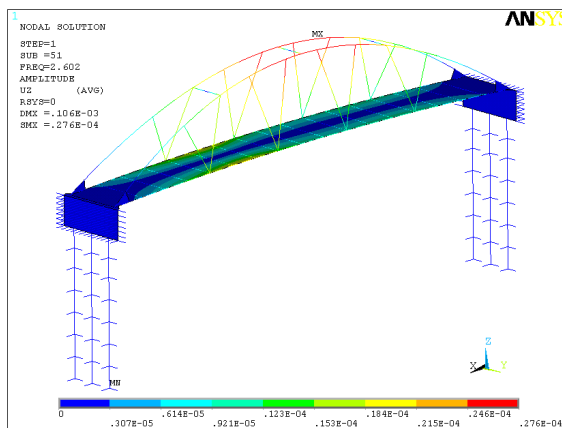
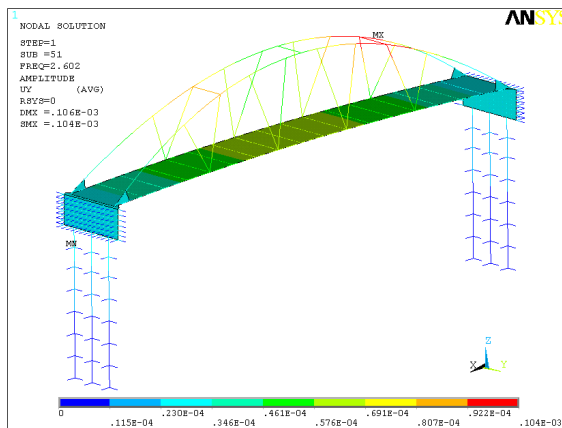
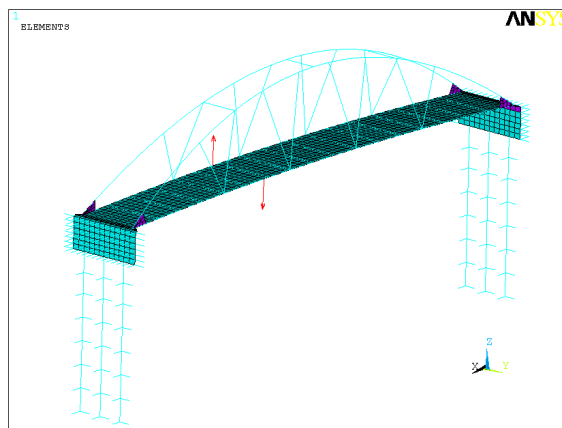
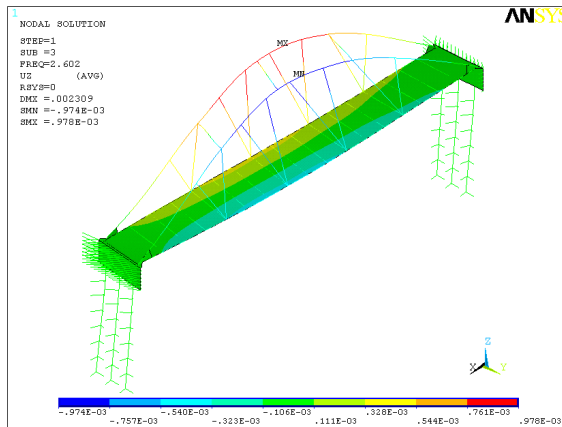
		Posuny [mm]		Rychlost [mm/s]		Zrychlení [m/s ²]	
Výp	n_i	u_y	u_z	v_y	v_z	a_y	a_z
O 1	1,40	0,359	0,041	3,171	0,362	0,028	0,003
O 2	2,48	0,045	1,000	0,703	15,633	0,011	0,244
O 3	2,60	0,082	0,038	1,341	0,621	0,022	0,010
O 4	2,67	0,557	0,039	9,372	0,655	0,158	0,011
O 5	3,25	0,018	0,292	0,368	5,970	0,008	0,122
O 6	3,82	0,041	0,017	0,973	0,408	0,023	0,010
O 7	3,94	0,072	0,829	1,784	20,538	0,044	0,509
O 8	4,46	0,053	0,314	1,496	8,815	0,042	0,247
O 9	4,73	1,124	0,160	33,461	4,863	0,996	0,142
O10	5,15	0,489	0,299	15,839	9,685	0,513	0,314
O11	5,24	0,018	0,040	0,594	1,312	0,020	0,043



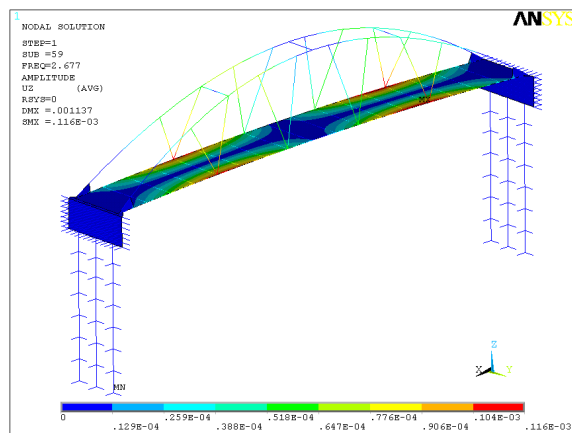
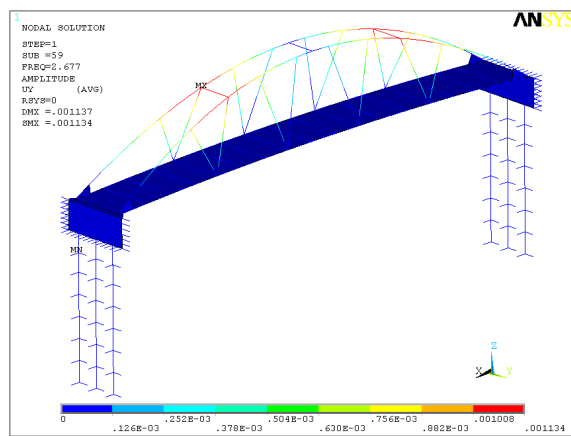
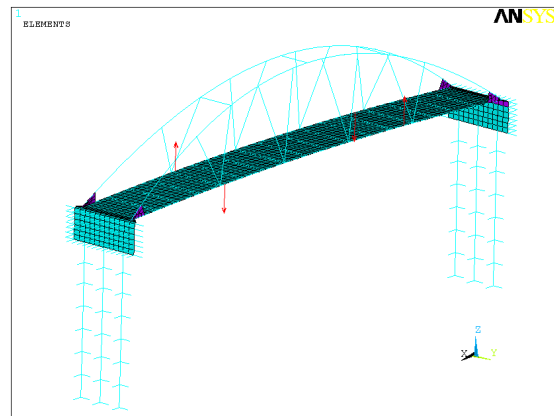
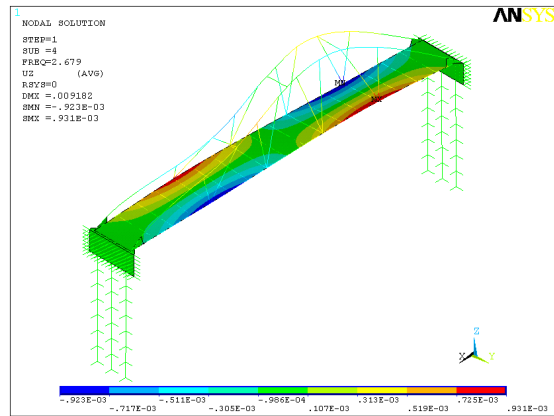
Obr. 5.2: Výpočet V1: Tvar kmitu, zatížení a odezva - amplituda posunutí u_z a u_y



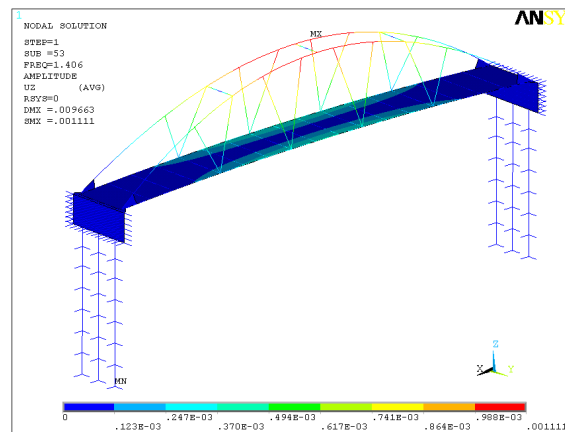
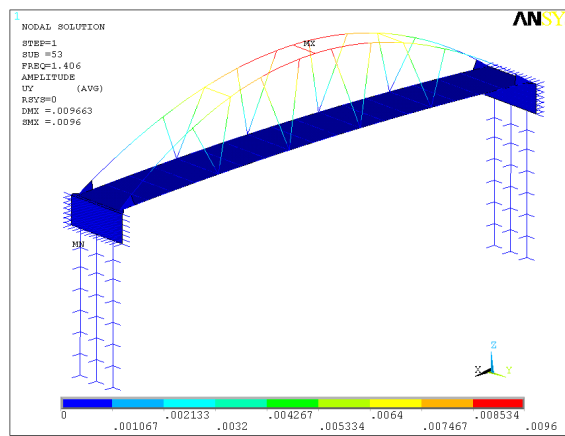
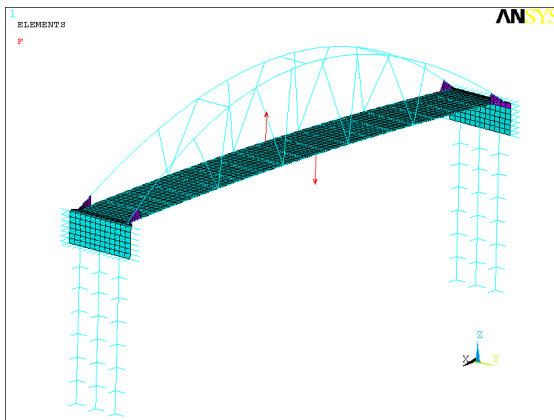
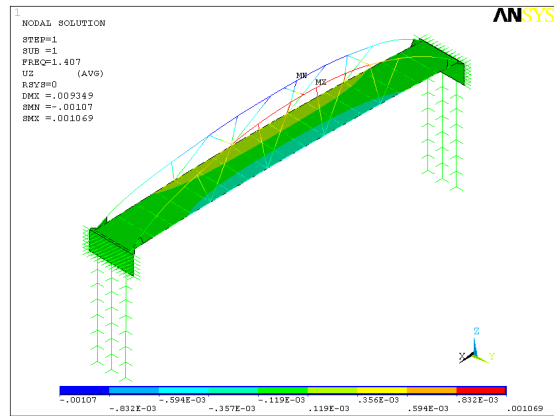
Obr. 5.3: Výpočet V2: Tvar kmitu, zatížení a odezva - amplituda posunutí u_z a u_y



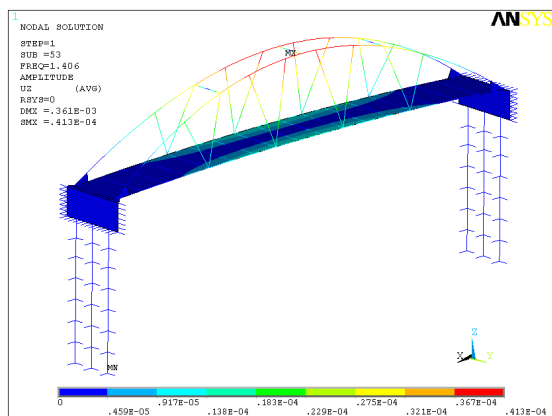
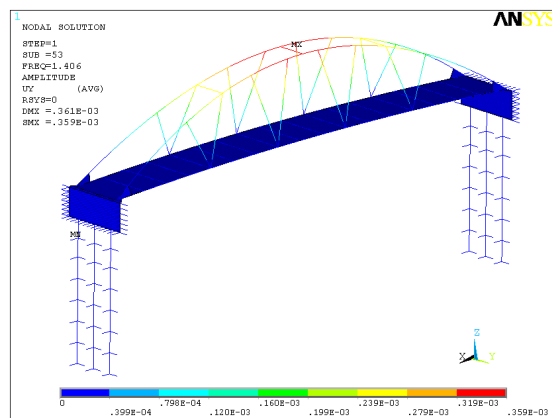
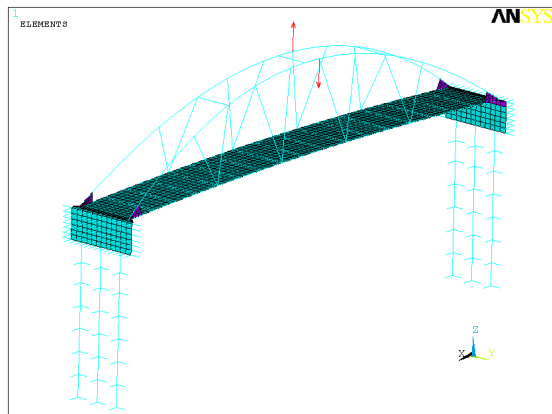
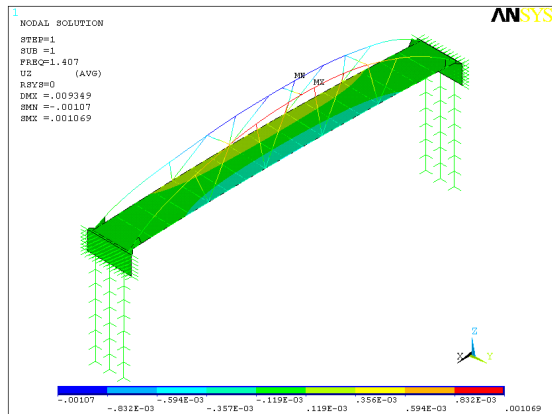
Obr. 5.4: Výpočet V3: Tvar kmitu, zatížení a odezva - amplituda posunutí u_z a u_y



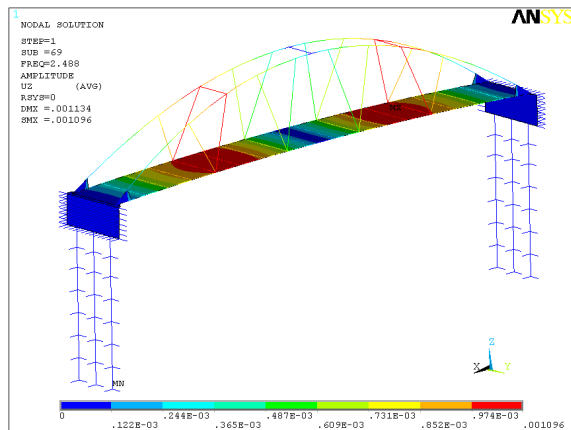
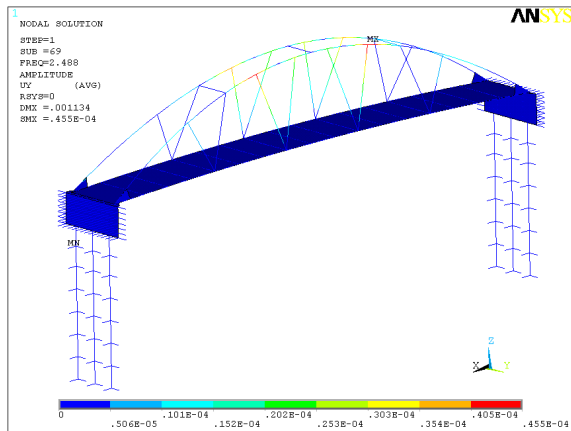
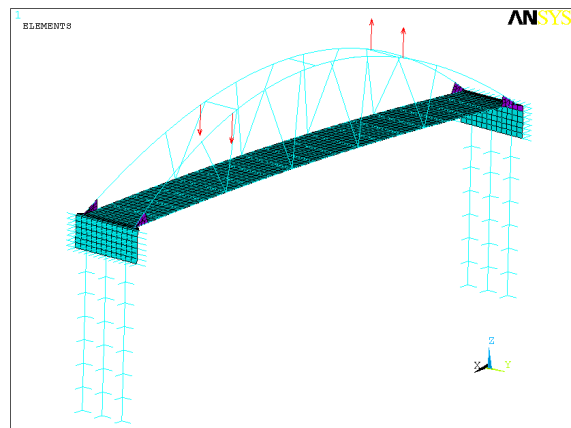
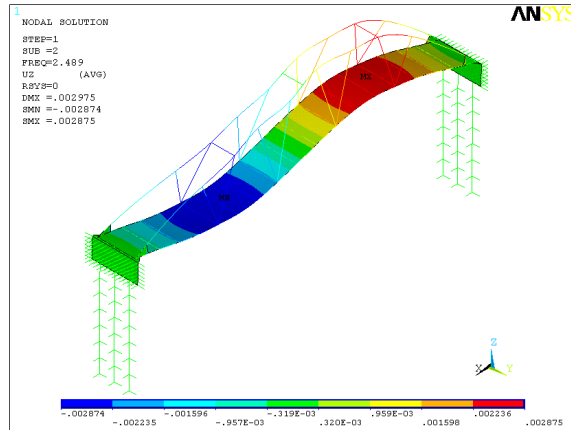
Obr. 5.5: Výpočet V4: Tvar kmitu, zatížení a odezva - amplituda posunutí u_z a u_y



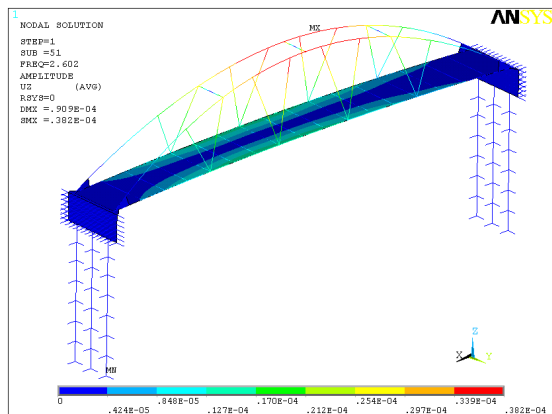
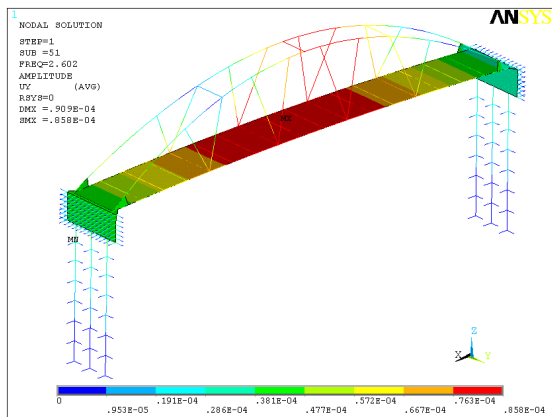
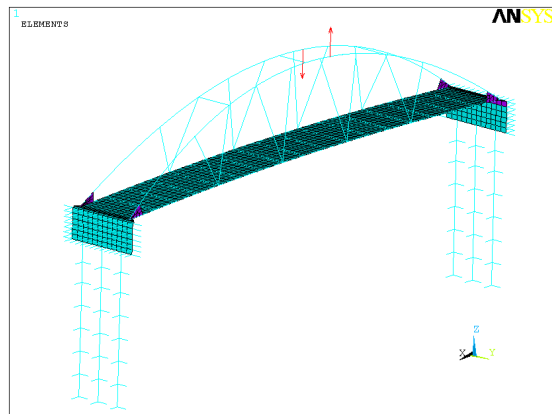
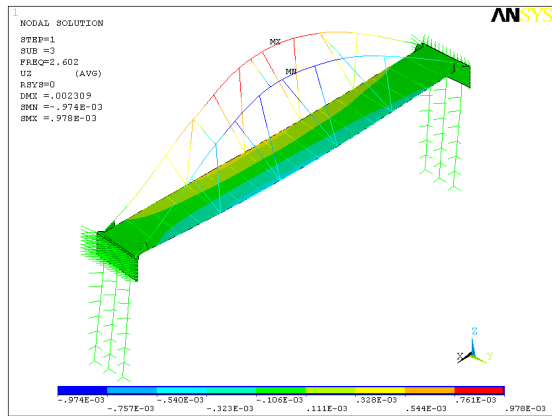
Obr. 5.6: Výpočet Z1: Tvar kmitu, zatížení a odezva - amplituda posunutí u_z a u_y



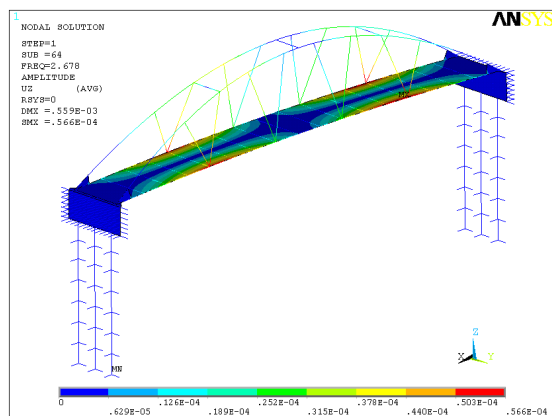
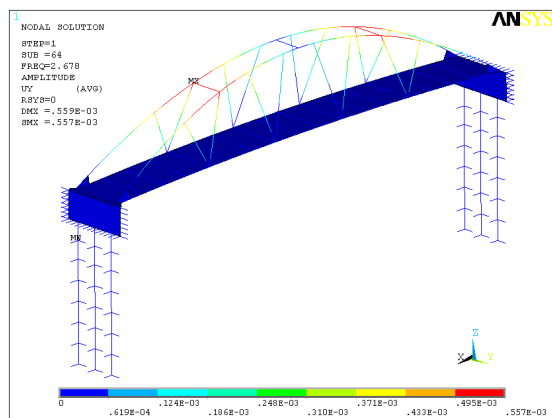
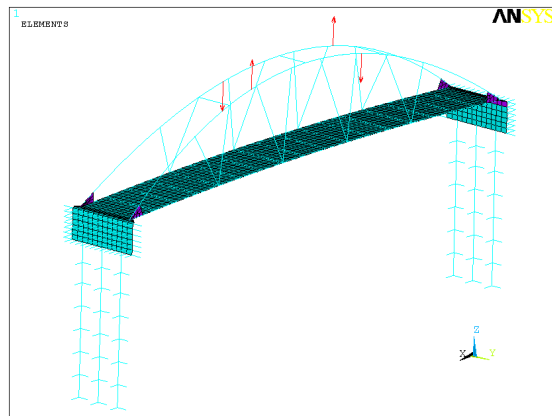
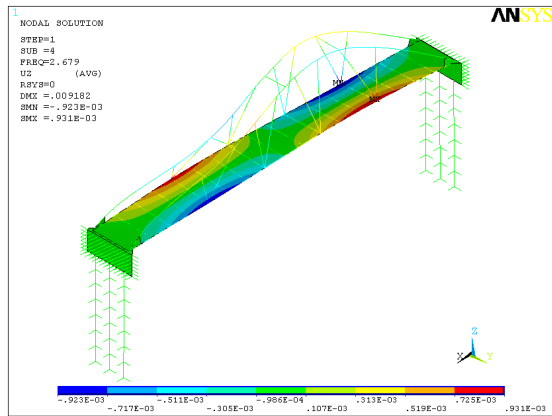
Obr. 5.7: Výpočet O1: Tvar kmitu, zatížení a odezva - amplituda posunutí u_z a u_y



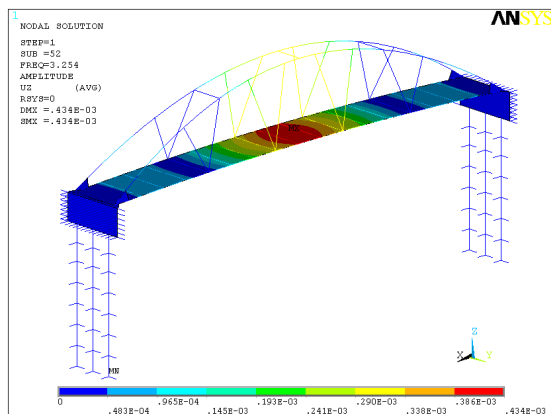
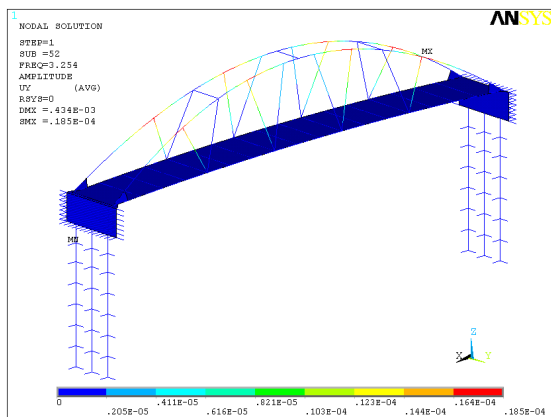
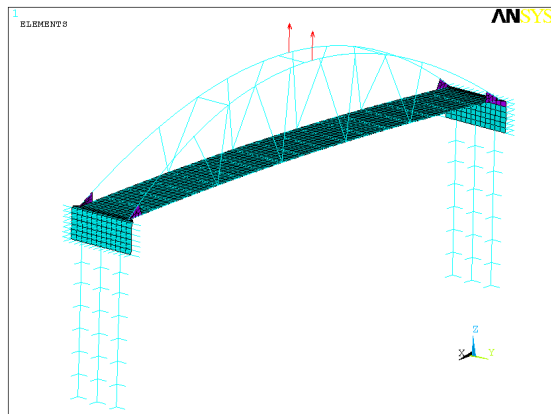
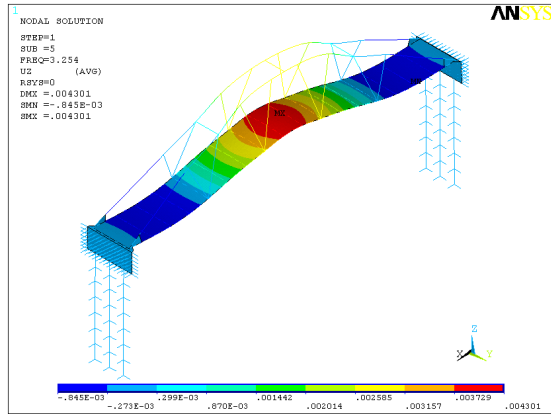
Obr. 5.8: Výpočet O2: Tvar kmitu, zatížení a odezva - amplituda posunutí u_z a u_y



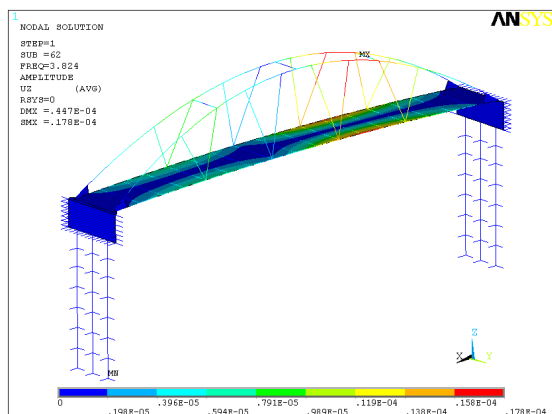
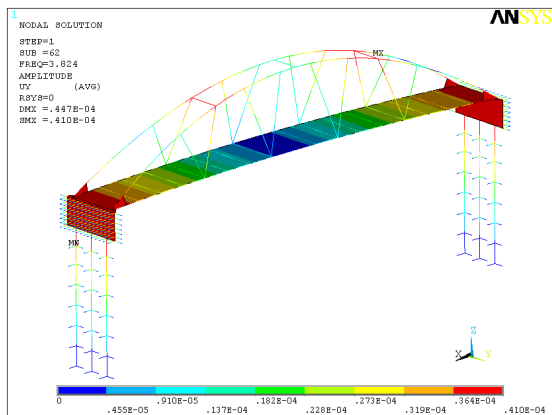
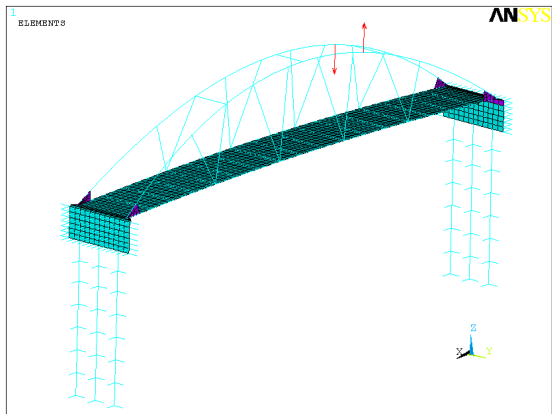
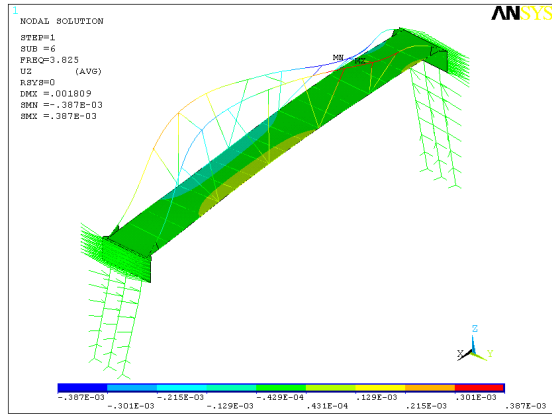
Obr. 5.9: Výpočet O3: Tvar kmitu, zatížení a odezva - amplituda posunutí u_z a u_y



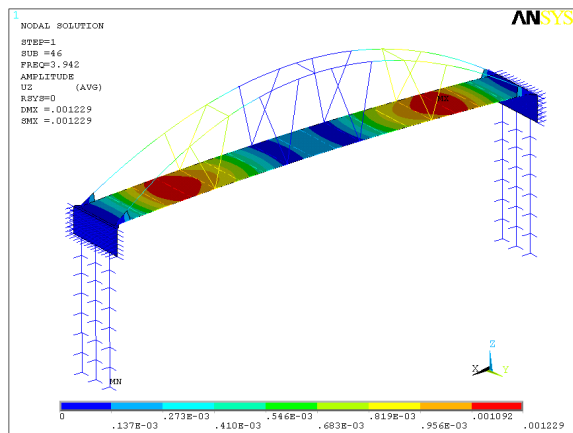
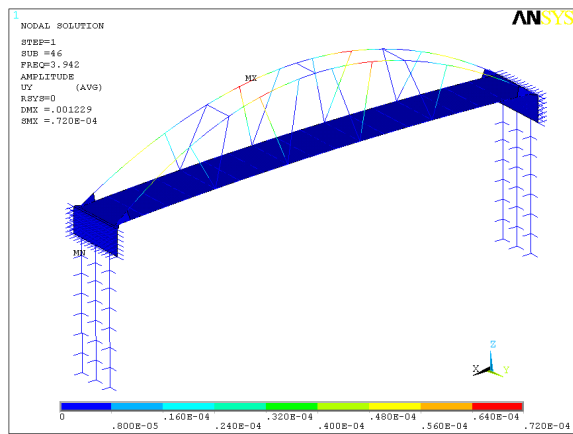
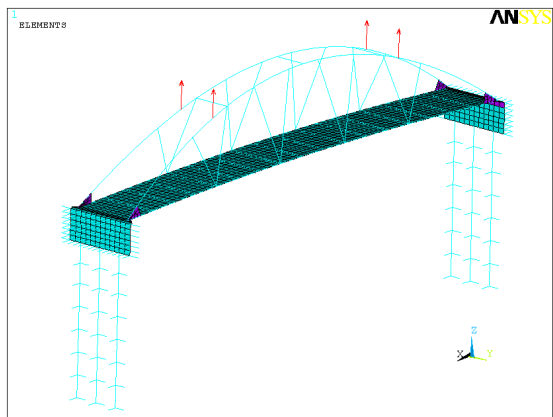
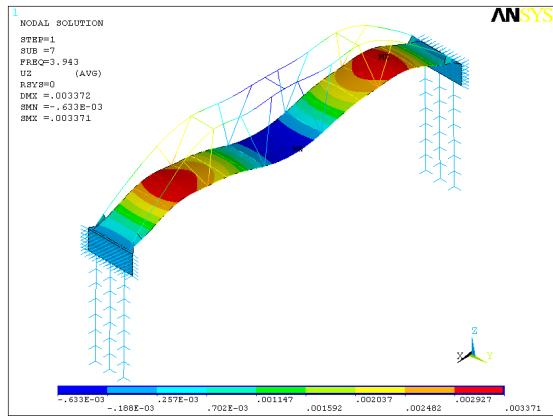
Obr. 5.10: Výpočet O4: Tvar kmitu, zatížení a odezva - amplituda posunutí u_z a u_y



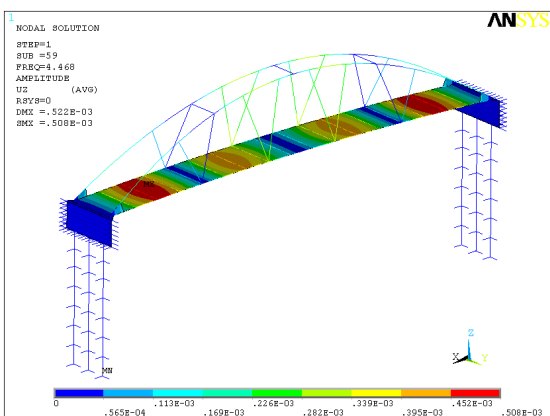
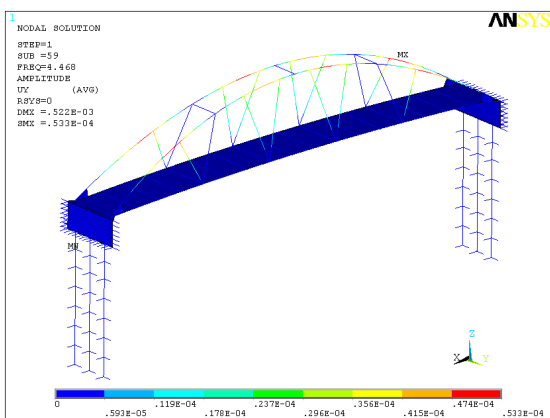
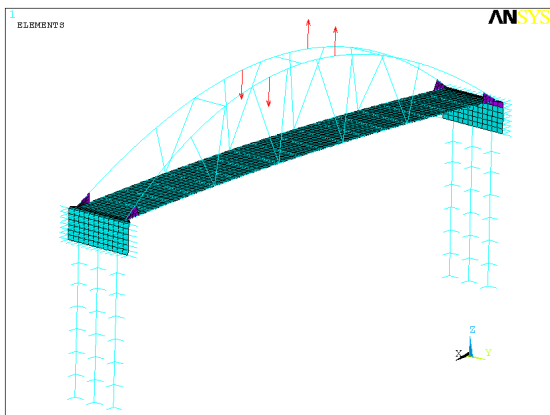
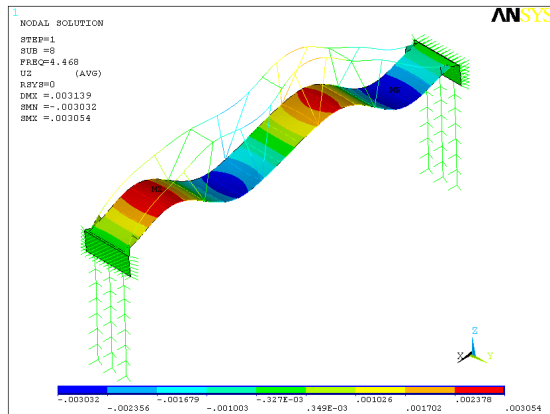
Obr. 5.11: Výpočet O5: Tvar kmitu, zatížení a odezva - amplituda posunutí u_z a u_y



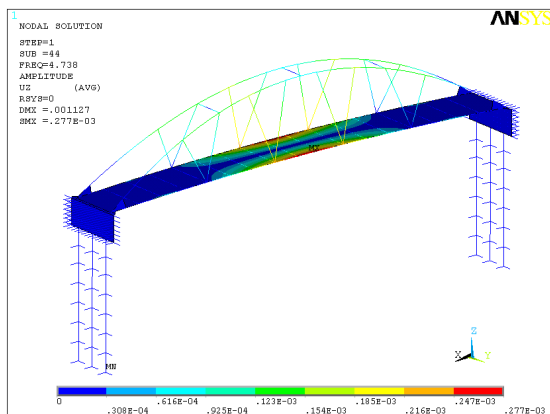
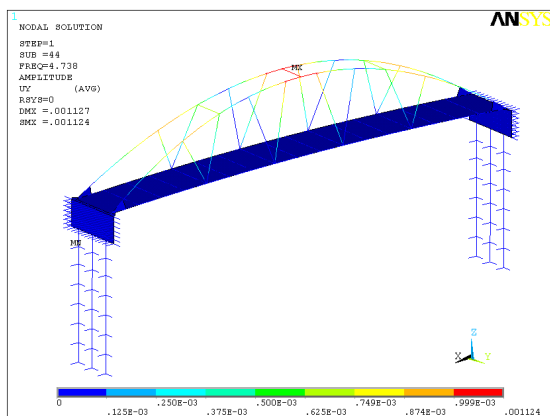
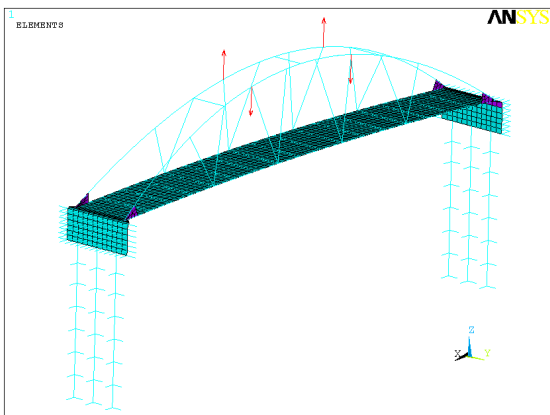
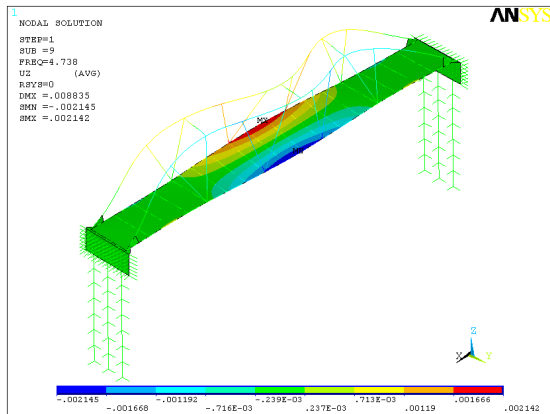
Obr. 5.12: Výpočet O6: Tvar kmitu, zatížení a odezva - amplituda posunutí u_z a u_y



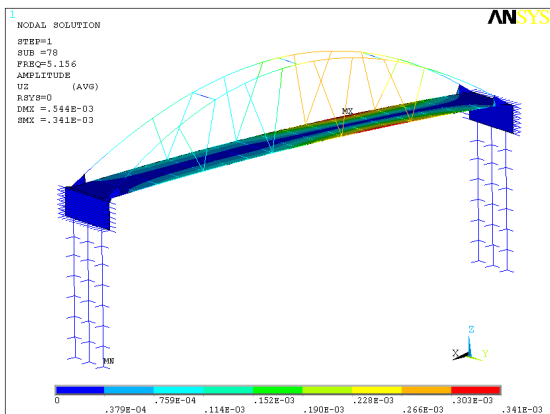
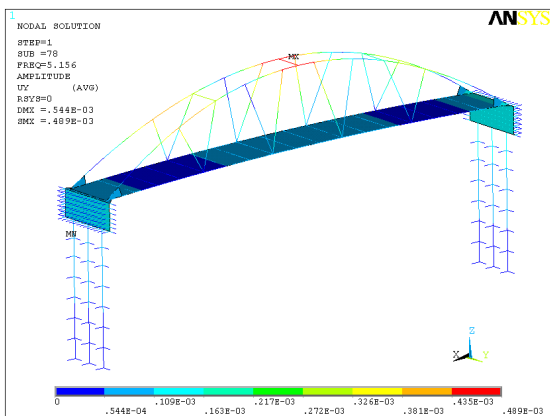
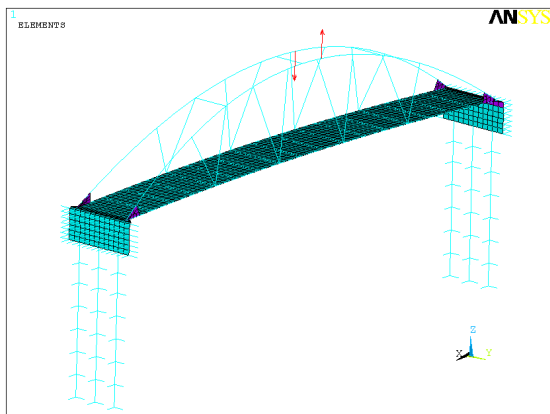
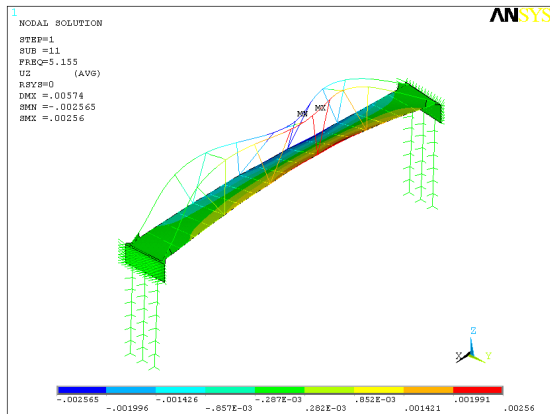
Obr. 5.13: Výpočet O7: Tvar kmitu, zatížení a odezva - amplituda posunutí u_z a u_y



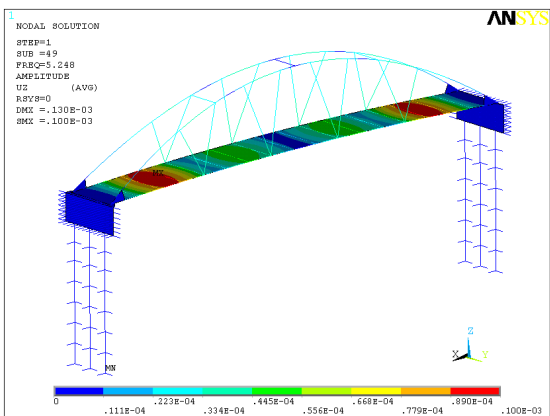
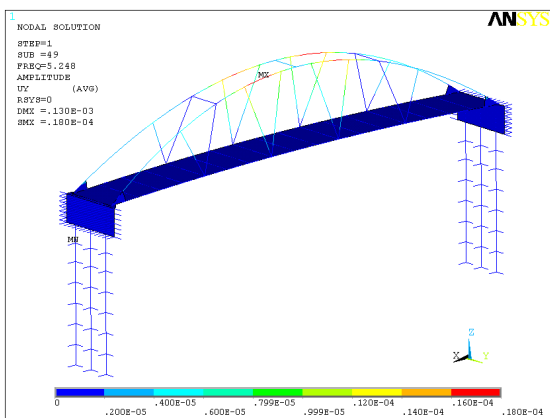
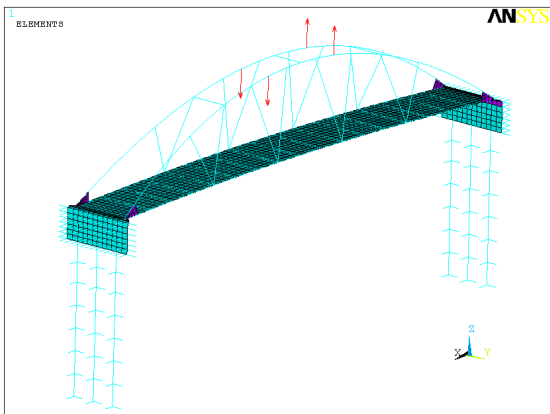
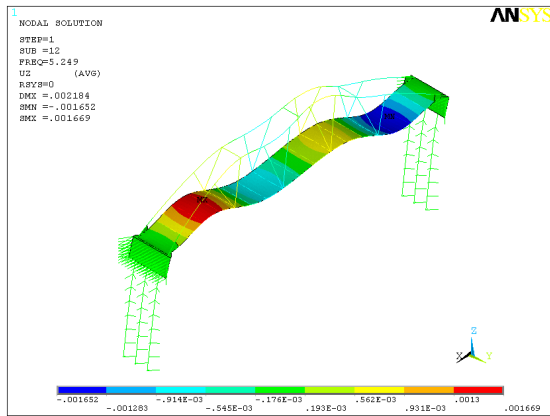
Obr. 5.14: Výpočet O8: Tvar kmitu, zatížení a odezva - amplituda posunutí u_z a u_y



Obr. 5.15: Výpočet O9: Tvar kmitu, zatížení a odezva - amplituda posunutí u_z a u_y



Obr. 5.16: Výpočet O10:Tvar kmitu, zatížení a odezva - amplituda posunutí u_z a u_y



Obr. 5.17: Výpočet O11:Tvar kmitu, zatížení a odezva - amplituda posunutí u_z a u_y

5.5 Posouzení konstrukce na odezvu

Dle §14 Nařízení vlády [15] se hygienický limit celkových vibrací po dobu 10 minut nebo kratší rovná 131 dB nebo $3,55 \text{ m/s}^2$. Pro posouzení lávky je směrodatná druhá varianta. Tato limitní hodnota byla uvažována pro posudek lávky. Nejvyšší hodnota amplitudy výchylky zrychlení při vynucením kmitání při odtrhávání vírů a_z je u výpočtu O7:

$$a_{z,max} = 0,76 \leq a_{z,lim} = 3,55 \text{ m/s}^2$$

V posudku je uvažování svislé zrychlení jako celkové, protože při této frekvenci jsou vodorovné složky pohybu v oblastech maximálních svislých amplitud nepodstatné. Nicméně se na lávce mohou vyskytnout místa, kde amplitudy výchylek příčného zrychlení a_y budou mít vyšší hodnoty. Nejvyšší hodnota $a_y=1 \text{ m/s}^2$ byla zjištěna u výpočtu O9. Vzhledem k tomu, že oblouk není v kontaktu s lidmi během běžného provozu, není posuzován dle hygienického předpisu.

5.6 Zatížení při odtrhávání vírů dle ČSN EN 1991-1-4

Účinky kmitání odtrhávání převádí tato norma na účinky setrvačných sil, které se vztahují na jednotku délky $F_w(z)$. Síly působí kolmo ke směru větru ve stanoveném místě s :

$$F_w(z) = m(z)(2\pi n_{i,y})^2 \phi_{i,y}(z) y_{F,max}, \quad (5.17)$$

kde je $m(z)$ kmitající hmotnost konstrukce, $n_{i,y}$ vlastní frekvence konstrukce, $\phi_{i,y}$ tvar kmitu konstrukce, který je normovaný na jednotku v bodě maximální výchylky. $y_{F,max}$ představuje maximální výchylku - amplitudu kmitání, kterou je možno stanovit jako:

$$\frac{y_{F,max}}{b} = K_w K_{c_{lat,0}} \frac{1}{St^2} \frac{1}{S_c}, \quad (5.18)$$

kde St představuje Strouhalovo číslo, S_c Scrutonovo číslo, $c_{lat,0}$ součinitel příčné síly, K_w součinitel účinné korelační délky a K součinitel vlastního tvaru kmitu.

Součinitel účinné korelační délky lze vypočítat ze vztahu:

$$K_w = \frac{\sum_{j=1}^n \int_{L_j} |\phi_{i,y}(s)| ds}{\sum_{j=1}^m \int_{l_j} |\phi_{i,y}(s)| ds} = \frac{A}{B}, \quad (5.19)$$

přičemž $\phi_{i,y}(s)$ znázorňuje i -tý vlastní tvar, L_j korelační déka, l_j délka konstrukce mostovky, n počet oblastí, kde dochází k odtrhávání vírů, m počet kmiten kmitající konstrukce, z souřadnice na konstrukci.

Součinitel vlastního tvaru lze vyjádřit vztahem:

$$K = \frac{\sum_{j=1}^m \int_{l_j} |\phi_{i,y}(s)| ds}{4\pi \sum_{j=1}^m \int_{l_j} |\phi_{i,y}^2(s)| ds} = \frac{B}{4\pi C}, \quad (5.20)$$

Součinitel aerodynamické budící síly $c_{lat,0}$ a Strouhaovo číslo St byly převzaty z normy ČSN P ENV 1991-2-4 [5] dle tabulky C.1 viz kapitola 5.4.

Scrutonovo číslo vyjadřuje, jak velké sklony má konstrukce k vibracím. To vše je podmíněno konstrukčním tlumením a poměrem hmoty konstrukce ke hmotě tekutiny. Pro jeho stanovení se používá vzorec:

$$S_C = \frac{2\delta_s m_{i,e}}{\rho b^2}, \quad (5.21)$$

kde δ_s logaritmický dekrement útlumu konstrukce, $m_{i,e}$ ekvivalentní hmotnost m_e na jednotku délky pro i -tý tvar kmitání, ρ měrná hmotnost vzduchu za podmínek při odtrhávání vírů.

Jednotkovou hmotnost lze pak stanovit ze vzorce:

$$m_e = \frac{\int_0^l m(s) \phi_1^2(s) ds}{\int_0^l \phi_1^2(s) ds} = \frac{D}{C}, \quad (5.22)$$

kde m představuje hmotnost na jednotku délky, l rozpětí konstrukce, i číslo normované na jedničku vlastního tvaru kmitu.

Určení korelační délky L_j jako funkce amplitudy kmitání $y_f(z)$ je možno z tabulky E.4. přílohy E eurokódu [3]:

$$L_j = 6b, \quad (5.23)$$

kde b je výška posuzovaného průřezu.

Kritická rychlost větru pro i -tý ohybový tvar je definována vztahem:

$$v_{crit,i} = \frac{bn_i}{St}, \quad (5.24)$$

kde b vyjadřuje referenční šířku průřezu, na kterém vzniká rezonanční odtrhávání vírů, n_i představuje vlastní frekvenční konstrukce v rovině, která je kolmá ke směru větru v i -tém tvaru a St znázorňuje Strouhalovo číslo [3].

5.6.1 Výpočet zatížení na konstrukci

Pro výpočet byl dle normy ČSN EN 1991-1-4 byl zvolen druhý vlastní tvar kmitu lávky. Jedná se o ohybový tvar při frekvenci 2,48 Hz. Vzhledem k přechozímu posudku kritické rychlosti je uvažována jen varianta mostovky bez zábradlí.

Pro snazší orientaci byly vstupní parametry výpočtu hrnuty do tabulky (5.8). Vzhledem k poloze lávky jsou uvažovány ve výpočty hodnoty pro terén kategorie II.

Tab. 5.8: Vstupní parametry

Kinematická viskozita vzduchu	$v = 15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
Objemová hmotnost vzduchu	$\rho = 1,25 \text{ kg}/\text{m}^3$
Šířka mostovky	$b = 6,1 \text{ m}$
Výška mostovky bez zábradlí	$d = 0,52 \text{ m}$
Poměrný útlum	$\zeta = 0,006$
Logaritmický dekrement útlumu	$\delta = 0,0376$

Pomocí tzv. lichoběžníkové metody, která se používá k numerickým výpočtům integrálů, byly stanoveny hodnoty výrazů A, B, C a D, pro součinitele součinitelů K (5.21), K_w (5.21) a ekvivalentní hmotnost m_e (5.23). Podrobnější popis jednotlivých bodů integrálů je v příloze B - Podklady pro výpočet integrálů.

Stanovení přibližné výchylky pro 2. tvar kmitu s frekvencí 2,48 Hz je následující:

$$K_w = \frac{A}{B} = \frac{4,77}{31,32} = 0,152$$

$$K = \frac{B}{4\pi \cdot C} = \frac{31,32}{4\pi \cdot 24,55} = 0,102$$

$$m_e = \frac{D}{C} = \frac{93031,6}{24,55} = 3788,99 \text{ kg}/\text{m}$$

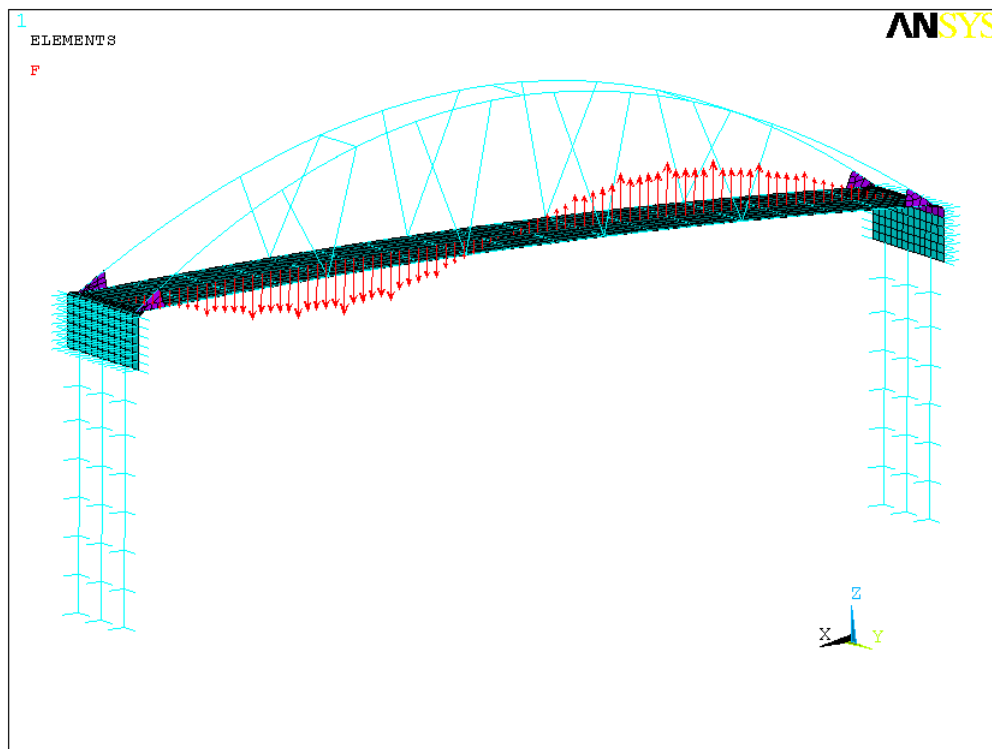
$$S_c = \frac{2\delta_s m_{i,e}}{\rho b^2} = \frac{2 \cdot 0,0376 \cdot 3839,67}{1,25 \cdot 0,52^2} = 844,787$$

$$y_{F,max} = K_w K_{clat,0} b \frac{1}{St^2} \frac{1}{S_c} = 0,152 \cdot 0,102 \cdot 0,52 \frac{1}{0,083^2} \cdot \frac{1}{856,093} = 0,0005 \text{ m}$$

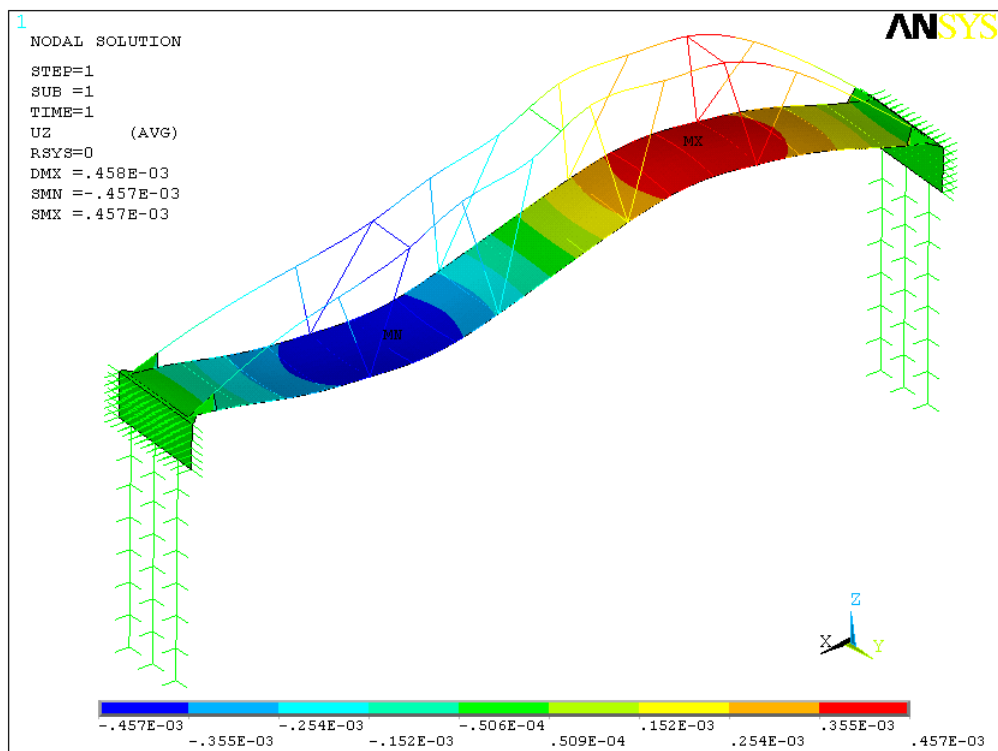
Pomocí předběžné největší výchylky byl stanoven účinek setrvačných sil (5.18). Hodnoty pro každý bod lze vyčíst v příloze B - Podklady pro výpočet integrálů a zatížení.

5.6.2 Výpočet odezvy lávky

Pro řešení odezvy lávky byly stanoveny dle (5.18) kvazistické síly, kterými byl model následně zatížen viz obr. (5.18) a byla provedena statická analýza konstrukce. Výsledky maximálních výchylek posunutí ve směrech z a y jsou zobrazeny na obr. (5.19).



Obr. 5.18: Zatížení modelu



Obr. 5.19: Posuny u_z [m] od zatížení kvazistatických sil

Hodnota předběžné výchylky konstrukce $y_{F,max}$ byla stanovena na 0,5 mm. Z výsledku statické analýzy viz obr. (5.19) lze odečíst maximální výchylku konstrukce ve směru u_z 0,45 mm, což přibližně odpovídá hodnotě předběžné výchylky a i amplitudě výchylky posunutí $u_z=0,57$ mm, která byla vypočtena ve výpočtu V2 dle normy ČSN P ENV 1991-2-4.

6 POSOUZENÍ NA ÚNAVU

Posouzení lávky na únavu je provedeno dle ČSN EN 1993-1-9 [16]. Obecně je u konstrukcí lávek uvažována návrhová doba únavového života 100 let.

6.1 Počet zatěžovacích cyklů

Počet cyklů napětí N způsobených při vírové rezonanci je možno stanovit dle [5]:

$$N = 6,3 \cdot 10^7 n_{i,y} \epsilon_0 \left(\frac{v_{crit,i}}{v_0} \right)^2 e^{-\left(\frac{v_{crit,i}}{v_0} \right)^2}, \quad (6.1)$$

kde $n_{i,y}$ je vlastní frekvence kmitání, $v_{crit,i}$ kritická rychlost větru, v_0 $\sqrt{2}$ násobek hodnoty módu rozdělení pravděpodobnosti rychlosti větru, ϵ_0 součinitel šířky pásma. Hodnota v_0 může být stanovena jako:

$$v_0 = v_m \frac{1}{5}. \quad (6.2)$$

Střední rychlost větru:

$$v_m(z) = c_r(z) c_t(z) v_{ref}, \quad (6.3)$$

kde $c_r(z)$ je součinitel drsnosti terénu, $c_t(z)$ součinitel topografie a v_{ref} referenční rychlost větru.

Součinitel drsnosti vyjadřuje změnu střední rychlosti v místě konstrukce a pro posouzení konstrukce lávky je pro tento případ dle kritéria $z_{min} \leq z \leq 200 \text{ m}$ vyjádřen:

$$c_r(z) = k_t \ln \left(\frac{z}{z_0} \right), \quad (6.4)$$

kde z_0 je třecí výška a k_t součinitel terénu, který je závislý na parametru z_0 a stanoví se ze vztahu:

$$k_t = 0,19 \left(\frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07}. \quad (6.5)$$

Vstupní informace pro výpočet jsou pro lepší orientaci uvedeny v tabulce (7.1)

Určení střední rychlosti větru pro mostovku a oblouk:

$$v_m(z = 4,8) = 0,87 \cdot 1,0 \cdot 25 = 21,75 \text{ m/s}$$

$$v_m(z = 13) = 1,06 \cdot 1,0 \cdot 25 = 26,50 \text{ m/s}$$

Tab. 6.1: Vstupní parametry pro výpočet počtu zatěžovacích cyklů

Referenční rychlost větru	$v_{ref} = 25 \text{ m/s}$
Součinitel šířky pásma	$\epsilon_0 = 0,3$
Minimální výška	$z_{min} = 4 \text{ m}$
Maximální výška	$z_{max} = 200 \text{ m}$
Třecí výška	$z_0 = 0,05 \text{ m}$
Součinitel terénu	$k_t = 0,19 \text{ m}$
Součinitel topografie	$c_t(z) = 1$
Výška mostovky nad hladinou řeky	$z = 4,8 \text{ m}$
Výška oblouku nad hladinou řeky	$z = 13 \text{ m}$
Objemová hmotnost vzduchu	$\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$
Šířka mostovky	$b = 6,1 \text{ m}$
Výška mostovky bez zábradlí	$d = 0,52 \text{ m}$

Tab. 6.2: Počet cyklů napětí N

	n_i	$v_{crit,i}$	v_m	v_o	N
Výp.	[Hz]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[-]
V1	1,40	8,81	21,75	4,35	$18,01 \cdot 10^6$
V2	2,48	15,59	21,75	4,35	$15,91 \cdot 10^3$
V3	2,60	16,30	21,75	4,35	$54,96 \cdot 10^2$
V4	2,67	16,79	21,75	4,35	$25,70 \cdot 10^2$
Z1	1,40	16,44	21,75	4,35	$23,80 \cdot 10^2$
O1	1,40	4,88	26,50	5,30	$96,51 \cdot 10^6$
O2	2,48	10,27	26,50	5,30	$41,42 \cdot 10^6$
O3	2,60	9,26	26,50	5,30	$70,94 \cdot 10^6$
O4	2,67	10,34	26,50	5,30	$42,89 \cdot 10^6$
O5	3,25	11,17	26,50	5,30	$32,11 \cdot 10^6$
O6	3,82	14,95	26,50	5,30	$20,19 \cdot 10^5$
O7	3,94	16,66	26,50	5,30	$37,61 \cdot 10^4$
O8	4,46	16,27	26,50	5,30	$23,73 \cdot 10^4$
O9	4,73	18,05	26,50	5,30	$64,13 \cdot 10^4$
O10	5,15	18,13	26,50	5,30	$95,82 \cdot 10^3$
O11	5,24	19,11	26,50	5,30	$28,98 \cdot 10^3$

Konečné výsledky počtu cyklů napětí jsou přehledně shrnuty do tabulky (6.2). Nejvyšší hodnota celkového počtu cyklů při návrhové době 100 let je u stavu O1 s počtem $96,51 \cdot 10^6$ cyklů. Naopak lze z výsledků vyčíst, že na účinky ze zatěžovacích stavů V3 až Z1 bude konstrukce vystavena jen výjimečně za svoji životnost. Počet cyklů napětí pro každý výpočetní stav je jeden ze vstupních parametrů pro posouzení únavy konstrukce.

6.2 Posouzení ocelových prvků na únavu

Posouzení lávky na únavu bylo vypracováno dle ČSN EN 1993-1-9 [16]. Byl proveden posudek pro spektrum rozkmitů napětí, který poukazuje na nejvíce namáhaná místa v konstrukci. Pro posouzení jednotlivých detailů konstrukce na únavu lze využít tzv. křivky únavové pevnosti.

Podmínka spolehlivosti konstrukčního detailu a únavu je dána:

$$D_d \leq 1,0, \quad (6.6)$$

kde D_d vyjadřuje celové poškození konstrukce únavou a lze ho vyjádřit jako součet:

$$D_d = \Sigma(D_{Ri}). \quad (6.7)$$

D_{Ri} je tzv. dílčí poškození únavou vlivem reonančního kmitání s frekvencí f_i za dobu $T_{r,i}$ a lze ho stanovit ze vztahu:

$$D_{Ri} = \frac{n_{Ei}}{N_{Ri}}, \quad (6.8)$$

kde n_{Ei} vyjadřuje počet počet cyklů napětí, které bylo určeno dle (6.1), a N_{Ri} je počet cyklů napětí s rozkmitem $\Delta\sigma$, při kterých dochází k kritickém místě k porušení konstrukce. Lze ho určit pomocí následujících kritérií:

Pro $\Delta\sigma_i \geq \Delta\sigma_D \cdot \gamma$:

$$N_{Ri} = 5 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{\Delta\sigma_D \cdot \gamma}{\Delta\sigma_i}\right)^3 \quad (6.9)$$

Pro $\sigma_D \cdot \gamma \geq \Delta\sigma_i \geq \sigma_L \cdot \gamma$:

$$N_{Ri} = 5 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{\Delta\sigma_D \cdot \gamma}{\Delta\sigma_i}\right)^5 \quad (6.10)$$

Pro $\sigma_L \cdot \gamma \geq \Delta\sigma_i$:

$$N_{Ri} \geq 100 \cdot 10^6 \quad (6.11)$$

kde $\Delta\sigma_i$ představuje rozkmit normálového napětí v kritickém místě, γ náhradní celkový součinitel, $\Delta\sigma_D$ mez únavy při $N = 5 \cdot 10^6$ cyklů a $\Delta\sigma_L$ prahový rozkmit napětí při $N = 100 \cdot 10^6$. Tyto veličiny jsou popsány následujícími vztahy:

$$\gamma = \frac{k_s}{k_i}, \quad (6.12)$$

$$\Delta\sigma_D = 0,737 \cdot \Delta\sigma_c, \quad (6.13)$$

$$\Delta\sigma_L = 0,549 \cdot \Delta\sigma_c, \quad (6.14)$$

$$\Delta\sigma_i = \frac{2\sigma_{ampl,i}}{k_i}, \quad (6.15)$$

přičemž $\Delta\sigma_c$ je referenční únavová pevnost při $N = 2 \cdot 10^6$ cyklech, k_i součinitel koncentrace.

Hodnoty výsledných amplitud napětí $\sigma_{ampl,i}$ byly pro každý výpočet odečteny z modelu lávky v místech koncentrátů napětí. Jsou spolu s dalšími veličinami popsány v tabulce (6.4), kde je také zaznamenán průběh výpočtu únavy konstrukce.

Tab. 6.3: Vstupní parametry pro posouzení ocelových prvků na únavu

Dílčí součinitel spolehlivosti pro ekvivalentní konstantní rozkmit napětí	$\gamma_{Ft} = 1,00$
Dílčí součinitel spolehlivosti únavové pevnosti	$\gamma_{Mf} = 1,15$
Součinitel vlivu tloušťky materiálu	$k_s = 1,0$

Z výpočtu viz tabulka (6.4) je patrné, že u dvou stavů (Z1 a O7) hodnota je rozkmitu napětí $\Delta\sigma_i$ vyšší než u únavové pevnosti prahového rozkmitu. U obou těchto případů je nejvíce zatížen styčnický příčle s obloukem viz obr.(6.1)

Posouzení konstrukce:

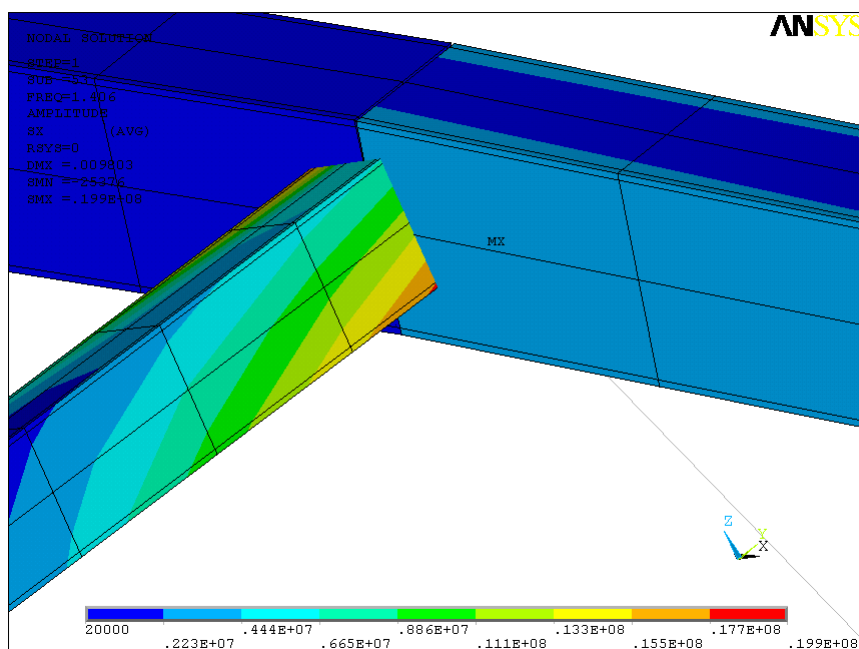
$$D_d = \Sigma(D_{Ri}) = 0,0020 + 0,222 = 0,224$$

$$D_d = 0,224 \leq 1,0$$

Styčnický příčle splňuje podmínku únavové spolehlivosti a tedy vyhovuje. Ostatní výpočty v tabulce (6.4) automaticky také vyhovují na neomezenou životnost.

Tab. 6.4: Výpočet dílčích poškození únavou

	n_i	$\sigma_{ampl,i}$	k_i	$\Delta\sigma_i$		$\Delta\sigma_{L\gamma}$	N_{Ri}	n_{ei}	D_{Ri}
Výp.	[Hz]	[MPa]	[-]	[MPa]		[MPa]	[-]	[-]	[-]
V1	1,40	0,48	1,5	0,65	<	12,67	neomez.	$18,01 \cdot 10^6$	0
V2	2,48	2,27	1,5	3,03	<	12,67	neomez.	$15,91 \cdot 10^3$	0
V3	2,60	0,33	1,5	0,44	<	12,67	neomez.	$5,49 \cdot 10^3$	0
V4	2,67	2,13	1,5	2,84	<	12,67	neomez.	$25,70 \cdot 10^2$	0
Z1	1,40	19,90	1,5	26,53	>	12,67	$13,12 \cdot 10^5$	$23,80 \cdot 10^2$	0,002
O1	1,40	0,72	1,5	0,97	<	12,67	neomez.	$96,51 \cdot 10^6$	0
O2	2,48	4,00	1,5	5,33	<	12,67	neomez.	$41,42 \cdot 10^6$	0
O3	2,60	0,43	1,5	0,57	<	12,67	neomez.	$70,94 \cdot 10^6$	0
O4	2,67	1,65	1,5	2,200	<	12,67	neomez.	$42,89 \cdot 10^6$	0
O5	3,25	1,19	1,5	1,59	<	12,67	neomez.	$32,11 \cdot 10^6$	0
O6	3,82	0,21	1,5	0,27	<	12,67	neomez.	$20,19 \cdot 10^5$	0
O7	3,94	18,30	1,5	24,40	>	12,67	$16,88 \cdot 10^5$	$0,37,61 \cdot 10^4$	0,222
O8	4,46	9,2	1,5	12,27	<	12,67	neomez.	$23,73 \cdot 10^4$	0
O9	4,73	3,61	1,5	4,81	<	12,67	neomez.	$64,13 \cdot 10^4$	0
O10	5,15	3,35	1,5	4,47	<	12,67	neomez.	$95,82 \cdot 10^3$	0
O11	5,24	0,411	1,5	0,55	<	12,67	neomez.	$28,98 \cdot 10^3$	0



Obr. 6.1: Amplitudy napětí $\sigma_{ampl,i}$ [Pa] ve styčnicku příčle a oblouku pro výpočet Z1

7 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo analyzování chování obloukové mostní konstrukce, která je vystavena vírovému buzení za ustáleného větru. Vypočtené hodnoty jsou shrnuty do tabulek a obrázků.

V programovém systému ANSYS 12.1 byl sestaven metodou konečných prvků prostorový model lávky pro pěší. Geometrie modelu vycházela z výkresové dokumentace mostu přes řeku Svratka, který spojuje nákupní zónu Brno jih s ulicí Bernáčkova. Model konstrukce je pruto-stěnodeskový a pro modelování zeminy byly použity pružinové prvky.

Pro kontrolu modelu byla použita statická analýza a následně byla provedena modální analýza za účelem stanovení vlastních tvarů kmitů a vlastních frekvencí konstrukce. Frekvenční spektrum bylo nalezeno v rozsahu od 1,40 Hz do 6,67 Hz pro prvních 15 nejnižších frekvencí. Teoreticky nejvýznamnější z vlastních tvarů byly uvažovány při řešení a posouzení dynamických odezev lávky na vítr.

Byly uvažovány dva postupy vyhodnocování odezvy konstrukce při vírovém buzení za ustáleného větru dle ČSN EN 1991-1-4 a ČSN P ENV 1991-2-4. Vírová rezonance lávky za ustáleného větru se analyzovala pro řadu případů mostovky bez i se zábradlím a oblouku. Výsledné amplitudy posunutí, rychlosti a zrychlení byly přehledně zapsány do tabulek.

Doba působení na člověka celkovými vibracemi $3,55 \text{ m/s}^2$ a vyššími nesmí překročit 10 minut. Nařízení vlády [15] platí i pro posuzování mostních konstrukcí. Toto kritérium je u lávky splněno, neboť nejnepříznivější případ zatížení větrem při frekvenci 3,94 Hz s amplitudou zrychlení $u_z=0,76 \text{ m/s}^2$. Kritérium hygienického limitu je tedy splněno. Doporučená mez efektivní rychlosti kmitání pro komfortní pohyb po lávce je 24 mm/s. Tato hodnota je u konstrukce překročena jedenkrát, nicméně chůze při této rychlosti je obtížná i po volném prostranství. V dalších případech vírové rezonance při buzení mostovky a oblouku je zaručen komfortní pohyb po lávce.

Byl proveden výpočet na únavu na základě výsledků dynamických výpočtů. Posudek pro spektrum rozkmitů napětí byl realizován dle ČSN EN 1993-1-9 pro vybrané ocelové konstrukční detaily na základě kumulativního únavového poškození za daných případů rezonančního kmitání vlivem odtrhávání vírů. Návrhová doba únavového života lávky je obecně stanovena 100 let.

Účelem této diplomové práce byla analýza chování konstrukce, která je vystavena vírovému buzení za ustáleného větru. Výsledky ukazují, že lávka splňuje požadavky norem a nařízení vlády.

LITERATURA

- [1] Výkresová dokumentace mostu
- [2] Dokumentace k programu ANSYS Release 12.1 vyšší
- [3] ČSN EN 1991-1-4. *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-4. Obecné zatížení - Zatížení větrem* Praha: Český normalizační institut, 2007
- [4] ČSN EN 1991-1-1. *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-1. Obecné zatížení - Objemové tíhy, vlastní tíhy a užité zatížení pozemních staveb* Praha: Český normalizační institut, 2004
- [5] ČSN P EN 1991-2-4. *Zásady navrhování a zatížení konstrukcí, Část 2-4. Zatížení konstrukcí - Zatížení větrem* Praha: Český normalizační institut, 1996
- [6] ČSN 73 0035. *Zatížení staveb konstrukcí*. Praha: Vydavatelství úřadu pro normalizaci a měření, 1986
- [7] PIRNER, Miloš a Ondřej FISCHER. *Zatížení staveb větrem. 1. vyd.* Praha: Informační centrum ČKAIT, 2003, 256 s. ISBN 80-86769-10-0
- [8] Salajka V. *Dynamika stavebních konstrukcí*. Rukopis přednáškových materiálů pro kurzy Stavební dynamika. Nebylo oficiálně vydáno
- [9] SÉTRA. *Footbridges: Assessment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading*. France: Sétra, 2006. Dostupné z www.setra.equipement.gouv.fr
- [10] KRÁL, Jaromír. *Navrhování konstrukcí na zatížení větrem: příručka k ČSN EN 1991-1-4. 1. vyd.* Praha: Pro Ministerstvo pro místní rozvoj a Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě vydalo Informační centrum ČKAIT, 2010, 112 s. Technická knihnice (ČKAIT). ISBN 978-80-87438-05-3.
- [11] PIRNER, Miroš a Ondřej FISCHER. *Dynamika ve stavební praxi. 1. vyd.* Praha: ČKAIT, 2010, 310 s. ISBN 978-80-87438-18-3.
- [12] ZIENKIEWICZ, C. Olgierd, Robert L. TAYLOR. *The Finite Element method (5th Edition): Volume 1-3* Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000, 780 s., ISBN-10: 1856176339

- [13] LAHODNÝ, Jiří, Vladimír JANATA a Stanislav POSPÍŠIL. *Zatížení stíhlých konstrukcí větrem podle evropských norem*. Časopis stavebnictví: [online]. 2010, roč. 2010, 03/10 [cit. 2016-12-27]. Dostupné z: http://www.casopisstavebnictvi.cz/zatizeni-stihlych-konstrukci-vetrem-podle-evropskych-norem_N3236
- [14] ČSN EN 1990 ed.2. *Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí* Evropský výbor pro normalizaci, 2011
- [15] Sbírka zákonů č. 272/2011. *Nařízení vlády: o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací*. Praha: 2011. [cit. 2016-12-28]. Dostupné z: https://portal.gov.cz/app/zakony/zakonPar.jsp?idBiblio=74904nr=272_2F2011rpp=15local-content
- [16] ČSN EN 1993-1-9. *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí na únavu* Praha: Český normalizační institut, 2006

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

a_c	vektor zrychlení
b	šířka mostovky
C_{dir}	součinitel směru větru
C_f	součinitel síly
C_{lat}	součinitel aerodynamické budící síly
C_{season}	součinitel období
C_r	součinitel drsnosti
C_0	součinitel orografie
d	výška mostovky
f	frekvence
f_i	i-tá vlastní frekvence
g	gravitační zrychlení
k_I	součinitel turbulence
k_f	součinitel koncentrace
k_r	součinitel terénu
m_{ADD}	přidaná hmota
n	vlastní frekvence
$q_{w,x}$	zatížení od větru ve směru X
$q_{w,y}$	zatížení od větru ve směru Y
q_p	dynamický tlak větru
t	čas]
u	vektor uzlových posunů
\dot{u}	vektor uzlových rychlostí
\ddot{u}	vektor uzlových rychlostí

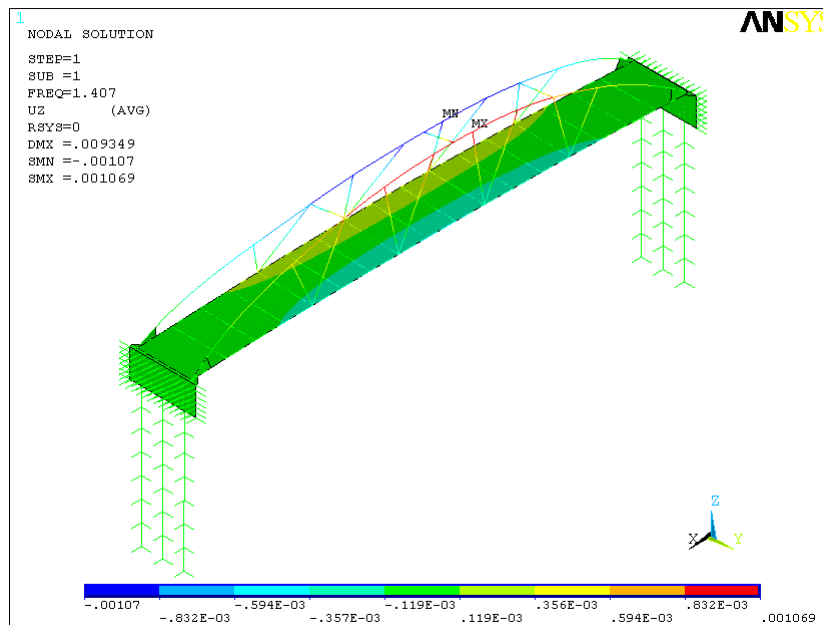
u_{max}	amplituda posunu
$v_{b,0}$	základní rychlost větru v 10 m
v_b	základní rychlost větru
v_m	střední rychlost větru
v_0	rozdělení rychlosti větru
w	dynamické zatížení
z	výška
z_{max}	maximální výška
z_{min}	minimální výška
z_0	parametr drsnosti
$z_{0,II}$	parametr drsnosti, oblast II
C	matice tlumení
D_d	celkové poškození konstrukce únavou
D_{Ri}	díličí poškození konstrukce únavou vlivem rezonančního kmitání
F	zatěžovací vektor
F^a	celkový zatěžovací vektor
F_c^a	vektor zatížení od tíhového zatížení
F_d^n	vektor zatížení uzlů
F_e^{th}	vektor zatížení prvku od teploty
F_e^{pr}	vektor zatížení od tlaků na prvek
F^r	vektor reakcí
K	matice tuhosti
K_e	matice tuhosti prvku
L	délka konstrukce

M	matice hmotnosti
M_e	matice hmotnosti prvku
MKP	metoda konečných prvků
MSÚ	mezní stav únostnosti
MSP	mezní stav použitelnosti
N	počet zatěžovacích cyklů
N_{Ri}	počet zatěžovacích cyklů napětí s rozkmitem $\Delta\sigma_D$
S	matice napjatosti
S_c	Scrutonovo čísto
S_t	Strouhalovo čísto
T	životnost konstrukce
X,Y,Z	osy globálního souřadného systému
δ	logaritmický delkrement
γ	dílčí součinitel spolehlivosti
γ_{Ft}	dílčí součinitel spolehlivosti pro ekvivalentní konstatní rozkit napětí $\Delta\sigma_E$
γ_{Mf}	dílčí součinitel spolehlivosti únavové pevnosi $\Delta\sigma_c$
ϕ_i	vlastní vektor
ψ	fázový posun
$\Delta\sigma_D$	rozkmit napětí (normálové napětí)
ρ	objemová hmotnost
ω_i	vlastní úhlová rychlost
ζ	poměrný útlum

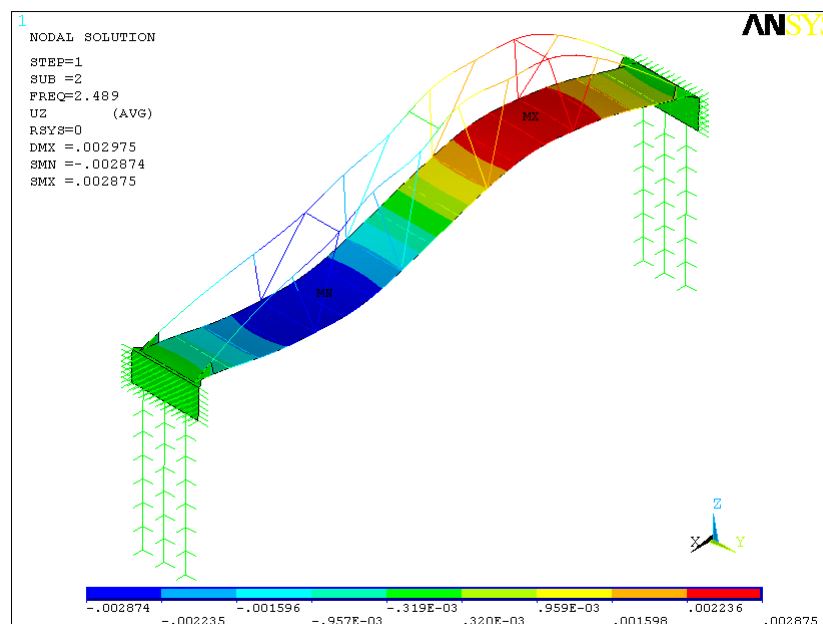
SEZNAM PŘÍLOH

A	Vlastní tvary konstrukce	75
B	Podklady pro výpočet integrálů a zatížení	83

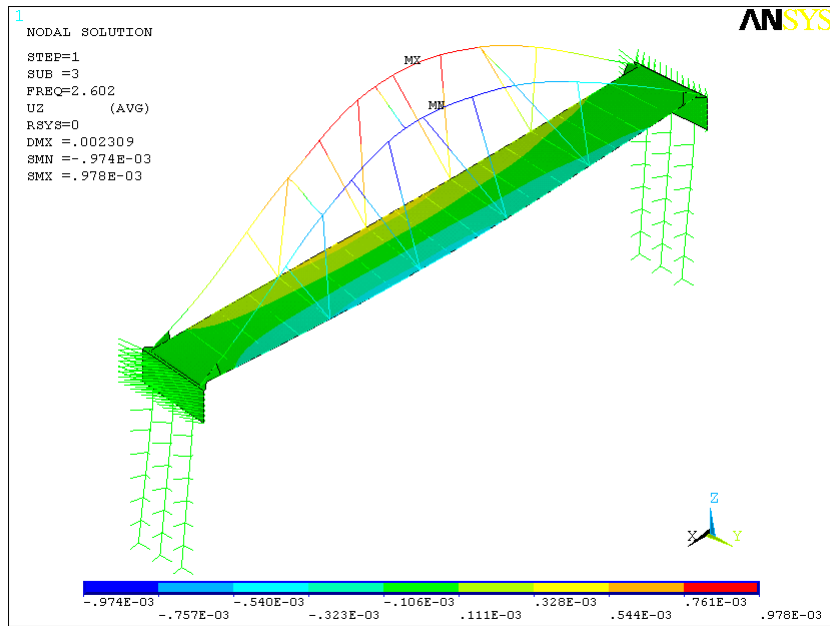
A VLASTNÍ TVARY KONSTRUKCE



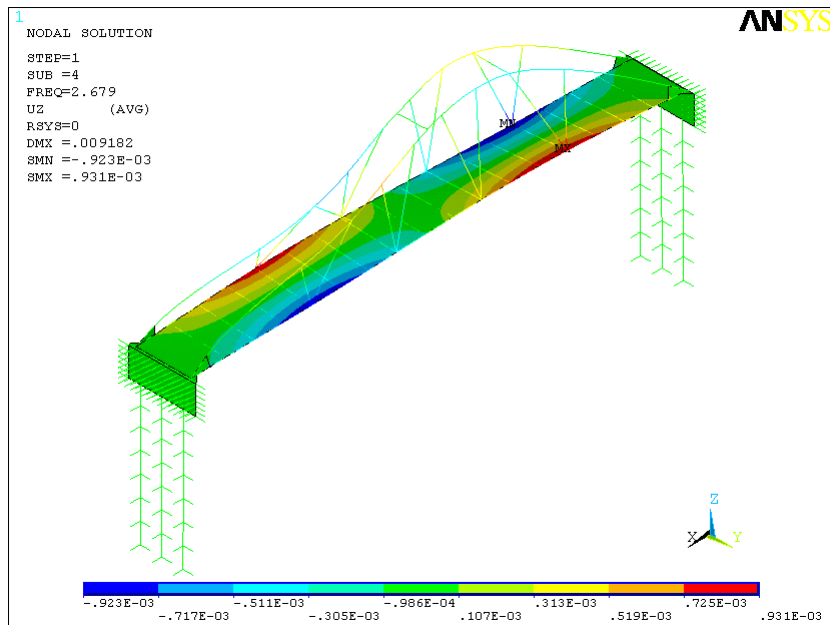
Obr. A.1: První vlastní tvar kmitu při frekvenci 1,407



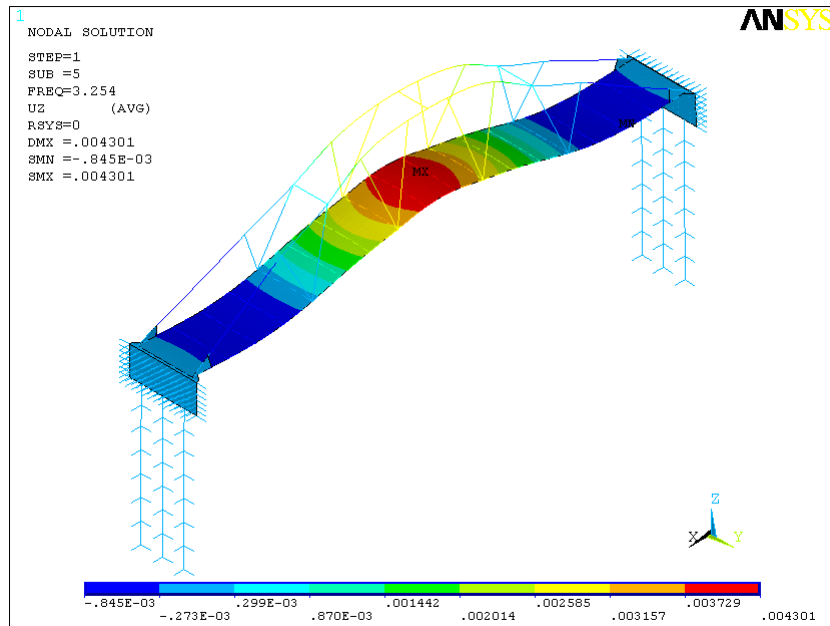
Obr. A.2: Druhý vlastní tvar kmitu při frekvenci 2,489 Hz



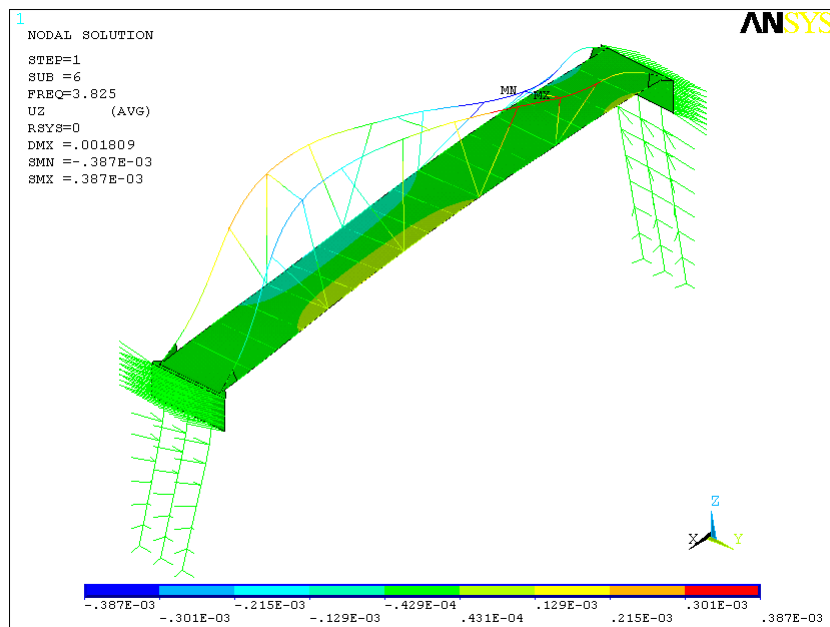
Obr. A.3: Třetí vlastní tvar kmitu při frekvenci 2,602 Hz



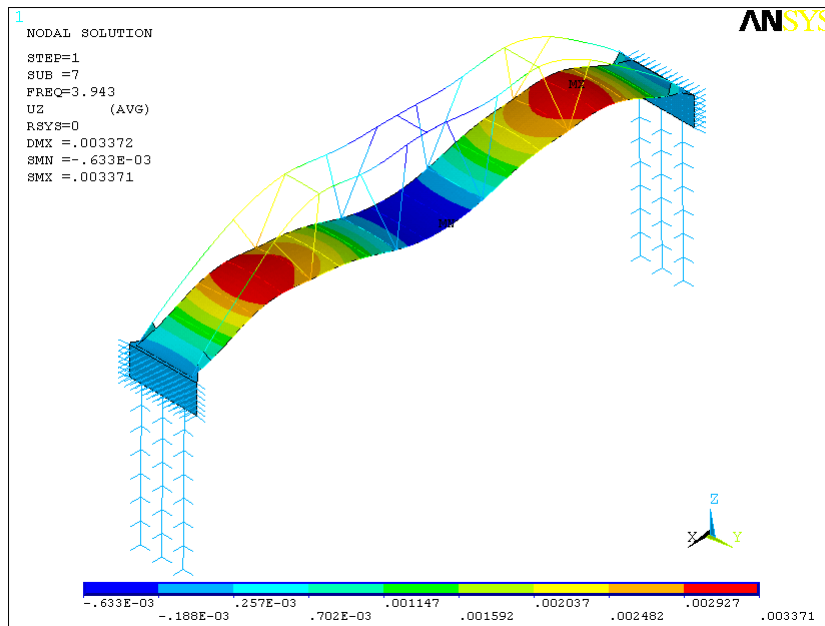
Obr. A.4: Čtvrtý vlastní tvar kmitu při frekvenci 2,679 Hz



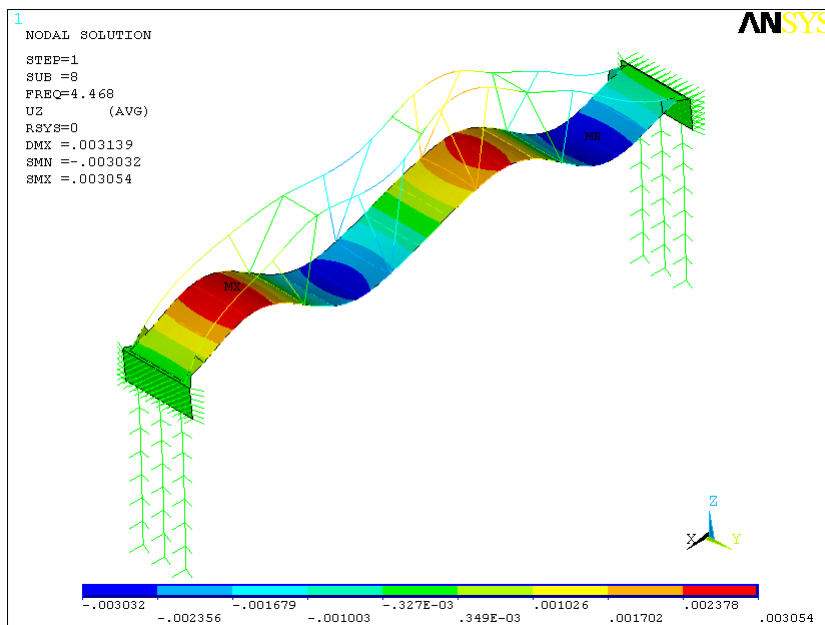
Obr. A.5: Pátý vlastní tvar kmitu při frekvenci 3,254 Hz



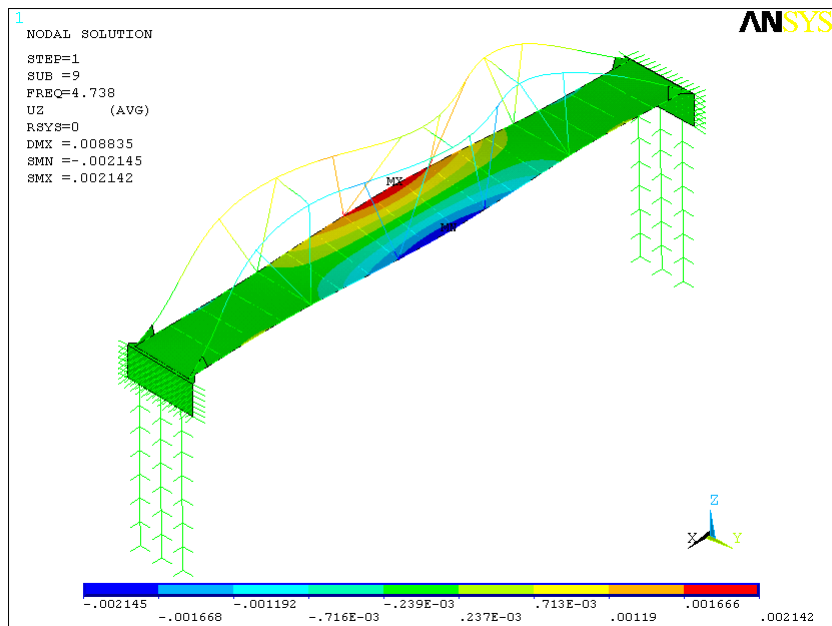
Obr. A.6: Šestý vlastní tvar kmitu při frekvenci 3,825 Hz



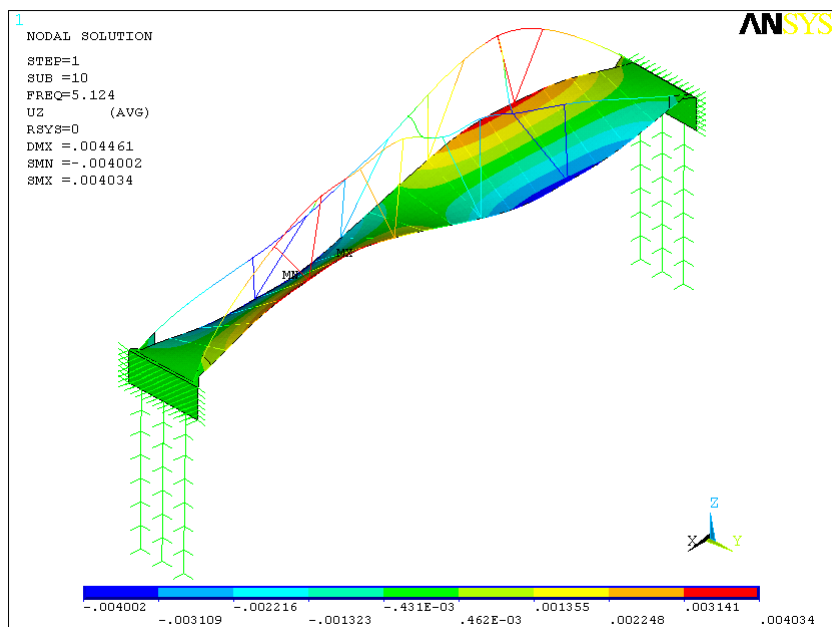
Obr. A.7: Sedmý vlastní tvar kmitu při frekvenci 3,943 Hz



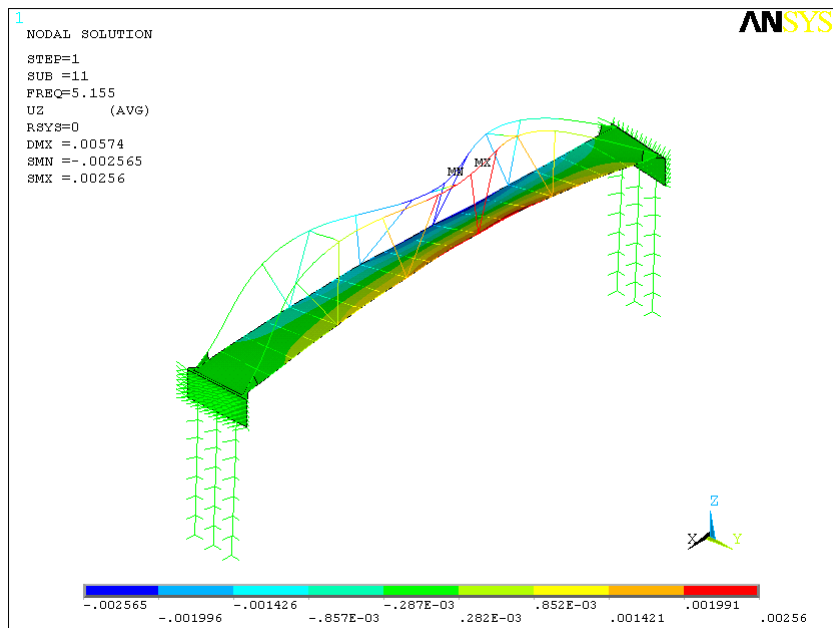
Obr. A.8: Osmý vlastní tvar kmitu při frekvenci 4,468 Hz



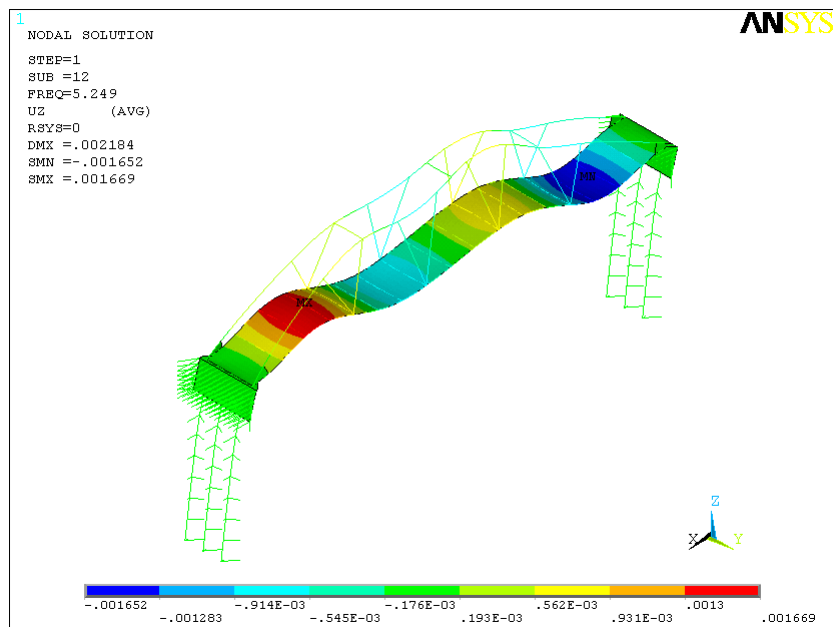
Obr. A.9: Devátý vlastní tvar kmitu při frekvenci 4,738 Hz



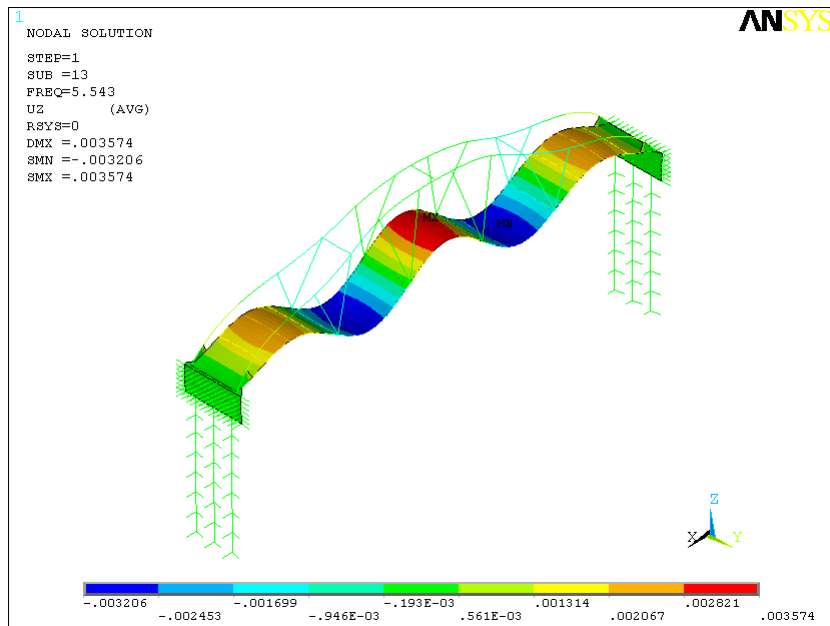
Obr. A.10: Desátý vlastní tvar kmitu při frekvenci 5,124 Hz



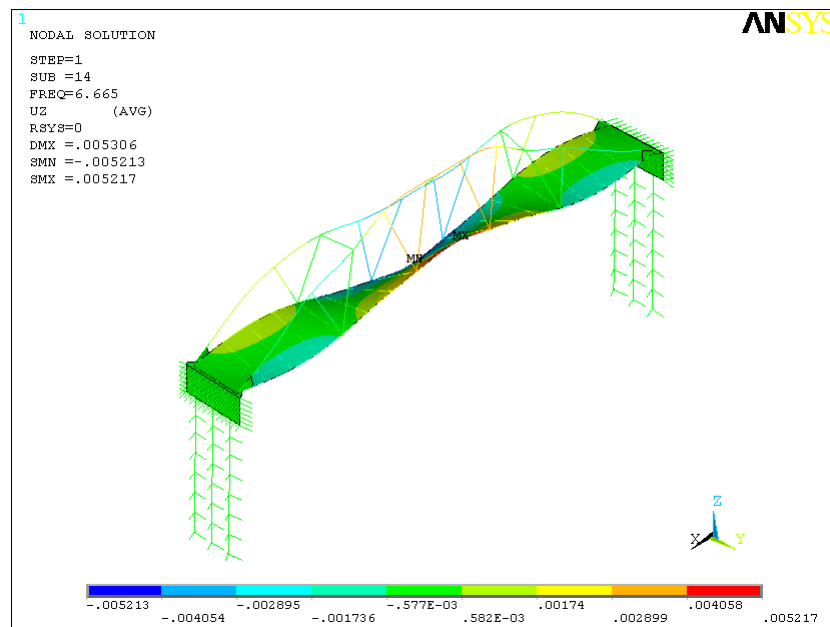
Obr. A.11: Jedenáctý vlastní tvar kmitu při frekvenci 5,155 Hz



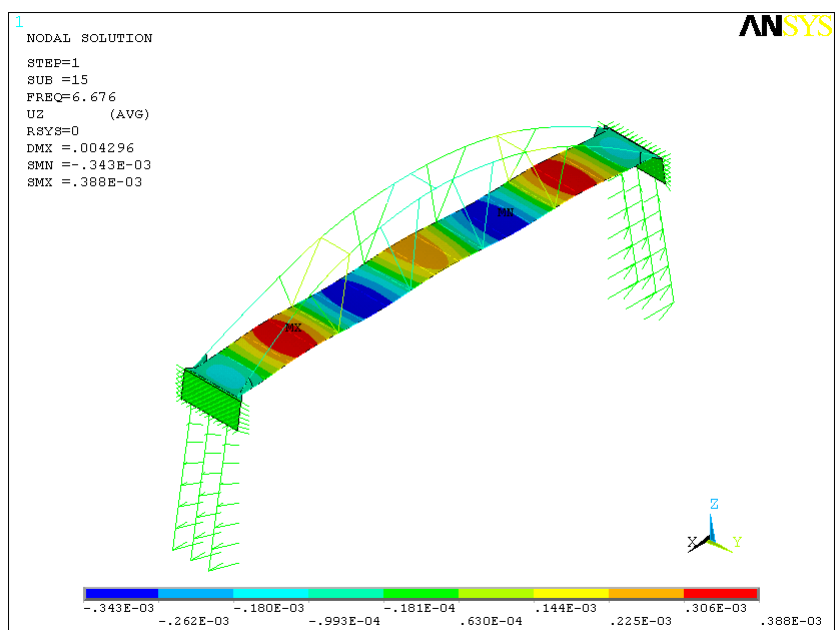
Obr. A.12: Dvanáctý vlastní tvar kmitu při frekvenci 5,249 Hz



Obr. A.13: Třináctý vlastní tvar kmitu při frekvenci 5,543 Hz



Obr. A.14: Čtrnáctý vlastní tvar kmitu při frekvenci 6,665 Hz



Obr. A.15: Patnáctý vlastní tvar kmitu při frekvenci 6,676 Hz

B PODKLADY PRO VÝPOČET INTEGRÁLŮ A ZATÍŽENÍ

Uze l	Souřa dnice	Dife- rence	Hmotnos t mos		Vlastní tvar	Normov aný vlastní tvar				Zatíže ní na bm mosto vky	Síla
	x	dx	m	D	n_i,y	$\Phi_{i,y}$	B	A	C		F
	[m]	[m]								[N.m ⁻¹]	[N]
723	0,00				0,00001	0,00278	0,00278		0,00001		
717	0,60	0,60	4045,11	2,36	0,00007	0,02414	0,02414		0,00058	13,54	8,11
718	1,07	0,47	4045,11	10,57	0,00015	0,05111	0,05111		0,00261	28,66	13,36
719	1,53	0,47	4045,11	29,26	0,00024	0,08505	0,08505		0,00723	47,70	22,23
702	2,00	0,47	4045,11	62,34	0,00036	0,12414	0,12414		0,01541	69,61	32,44
703	2,53	0,53	4045,11	121,33	0,00050	0,17319	0,17319		0,03000	97,12	51,77
704	3,06	0,53	4045,11	205,46	0,00065	0,22537	0,22537		0,05079	126,38	67,36
144	3,60	0,53	4765,01	372,12	0,00080	0,27945	0,27945		0,07809	184,60	98,41
748	4,20	0,60	3658,16	426,70	0,00098	0,34153	0,34153		0,11664	173,20	103,92
749	4,80	0,60	3658,16	596,99	0,00116	0,40397	0,40397		0,16319	204,86	122,92
750	5,40	0,60	3658,16	793,27	0,00134	0,46567	0,46567		0,21685	236,15	141,69
751	6,00	0,60	3658,16	1011,25	0,00151	0,52577	0,52577		0,27644	266,63	159,98
158	6,60	0,60	4297,79	1463,14	0,00168	0,58347	0,58347		0,34044	347,63	208,58
768	7,20	0,60	3658,16	1490,04	0,00184	0,63822	0,63822		0,40732	323,65	194,19
769	7,80	0,60	3658,16	1737,28	0,00198	0,68913	0,68913		0,47491	349,47	209,68
770	8,40	0,60	3658,16	1978,90	0,00211	0,73550	0,73550		0,54096	372,99	223,79
771	9,00	0,60	3658,16	2209,27	0,00223	0,77713	0,77713		0,60393	394,10	236,46
168	9,60	0,60	4297,79	2850,35	0,00234	0,81438	0,81438		0,66321	485,20	291,12
788	10,20	0,60	3658,16	2629,15	0,00244	0,84777	0,84777		0,71871	429,92	257,82
789	10,80	0,60	3658,16	2816,39	0,00252	0,87743	0,87743		0,76989	444,97	266,98
790	11,40	0,60	3658,16	2985,87	0,00260	0,90345	0,90345		0,81622	458,16	274,90
791	12,00	0,60	3658,16	3139,29	0,00266	0,92637	0,92637		0,85816	469,78	281,87
177	12,60	0,60	4297,79	3855,11	0,00272	0,94710	0,94710		0,89700	564,27	338,56
912	13,20	0,60	3658,16	3414,02	0,00278	0,96605	0,96605		0,93326	489,91	293,94
913	13,80	0,60	3658,16	3528,54	0,00282	0,98212	0,98212	0,98212	0,96457	498,06	298,83
914	14,40	0,60	3658,16	3613,26	0,00286	0,99384	0,99384	0,99384	0,98773	504,00	302,40
915	15,00	0,60	3658,16	3658,16	0,00288	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	507,12	304,27
187	15,60	0,60	4297,79	4296,60	0,00287	0,99986	0,99986	0,99986	0,99972	595,71	357,43
932	16,20	0,60	3658,16	3607,19	0,00286	0,99301	0,99301	0,99301	0,98607	503,58	302,15

Uzel	Souřadnice	Diference	Hmotnost		Vlastní tvar	Normovaný vlastní tvar				Zatížení na bm mostovky	Síla
	x	dx	m	D	$n_{i,y}$	$\Phi_{i,y}$	B	A	C		F
	[m]	[m]								[N.m ⁻¹]	[N]
933	16,80	0,60	3658,16	3500,85	0,00281	0,97826	0,97826		0,95700	496,10	297,66
934	17,40	0,60	3658,16	3335,32	0,00275	0,95486	0,95486		0,91175	484,23	290,54
935	18,00	0,60	3658,16	3114,12	0,00265	0,92265	0,92265		0,85128	467,89	280,74
197	18,60	0,60	4297,79	3345,40	0,00254	0,88227	0,88227		0,77840	525,65	315,39
952	19,20	0,60	3658,16	2547,82	0,00240	0,83455	0,83455		0,69647	423,22	253,93
953	19,80	0,60	3658,16	2225,12	0,00224	0,77991	0,77991		0,60826	395,51	237,31
954	20,40	0,60	3658,16	1891,18	0,00207	0,71901	0,71901		0,51698	364,63	218,78
955	21,00	0,60	3658,16	1559,36	0,00188	0,65289	0,65289		0,42627	331,10	198,66
206	21,60	0,60	4297,49	1460,42	0,00168	0,58295	0,58295		0,33983	347,29	208,38
972	22,20	0,60	3658,16	952,98	0,00147	0,51040	0,51040		0,26051	258,83	155,30
973	22,80	0,60	3658,16	693,97	0,00125	0,43555	0,43555		0,18971	220,88	132,53
974	23,40	0,60	3658,16	470,65	0,00103	0,35869	0,35869		0,12866	181,90	109,14
975	24,00	0,60	3658,16	287,06	0,00081	0,28013	0,28013		0,07847	142,06	85,23
216	24,60	0,60	4297,79	172,55	0,00058	0,20037	0,20037		0,04015	119,38	71,63
898	25,10	0,50	3658,16	65,01	0,00038	0,13331	0,13331		0,01777	67,60	33,80
899	25,60	0,50	3658,16	15,86	0,00019	0,06584	0,06584		0,00433	33,39	16,69
897	26,10	0,50	3658,16	0,01	-0,00001	-0,00181	0,00181		0,00000	-0,92	-0,46
992	26,60	0,50	3658,16	17,64	-0,00020	-0,06943	0,06943		0,00482	-35,21	-17,61
993	27,10	0,50	3658,16	68,52	-0,00039	-0,13686	0,13686		0,01873	-69,40	-34,70
305	27,60	0,50	4425,72	183,90	-0,00059	-0,20385	0,20385		0,04155	-125,07	-62,53
1089	28,20	0,60	3658,16	293,96	-0,00082	-0,28348	0,28348		0,08036	-143,76	-86,25
1088	28,80	0,60	3658,16	479,08	-0,00104	-0,36189	0,36189		0,13096	-183,52	-110,11
1087	29,40	0,60	3658,16	703,43	-0,00126	-0,43851	0,43851		0,19229	-222,38	-133,43
1086	30,00	0,60	3658,16	963,27	-0,00148	-0,51315	0,51315		0,26332	-260,23	-156,14
327	30,60	0,60	4297,79	1473,10	-0,00168	-0,58545	0,58545		0,34276	-348,81	-209,29
1125	31,20	0,60	3658,16	1570,02	-0,00188	-0,65512	0,65512		0,42918	-332,23	-199,34
1124	31,80	0,60	3658,16	1901,63	-0,00207	-0,72099	0,72099		0,51983	-365,63	-219,38
1123	32,40	0,60	3658,16	2234,65	-0,00225	-0,78158	0,78158		0,61087	-396,36	-237,81
1122	33,00	0,60	3658,16	2556,11	-0,00240	-0,83591	0,83591		0,69874	-423,91	-254,34
345	33,60	0,60	4297,79	3353,31	-0,00254	-0,88331	0,88331		0,78024	-526,27	-315,76
1161	34,20	0,60	3658,16	3119,05	-0,00265	-0,92338	0,92338		0,85263	-468,27	-280,96

Uzel	Souřadnice	Diference	Hmotnost		Vlastní tvar	Normovaný vlastní tvar				Zatížení na bm mostovky	Síla
	x	dx	m	D	$n_i.y$	$\Phi_i.y$	B	A	C		F
	[m]	[m]								[N.m ⁻¹]	[N]
1160	34,80	0,60	3658,16	3338,24	-0,00275	-0,95527	0,95527		0,91255	-484,44	-290,66
1159	35,40	0,60	3658,16	3501,84	-0,00281	-0,97840	0,97840	0,97840	0,95727	-496,17	-297,70
1158	36,00	0,60	3658,16	3605,93	-0,00285	-0,99284	0,99284	0,99284	0,98572	-503,49	-302,09
359	36,60	0,60	4297,79	4292,71	-0,00287	-0,99941	0,99941	0,99941	0,99882	-595,44	-357,26
1197	37,20	0,60	3658,16	3652,82	-0,00287	-0,99927	0,99927	0,99927	0,99854	-506,75	-304,05
1196	37,80	0,60	3658,16	3606,18	-0,00285	-0,99287	0,99287	0,99287	0,98579	-503,51	-302,10
1195	38,40	0,60	3658,16	3520,04	-0,00282	-0,98094	0,98094		0,96224	-497,46	-298,47
1194	39,00	0,60	3658,16	3404,19	-0,00277	-0,96466	0,96466		0,93058	-489,20	-293,52
378	39,60	0,60	4297,79	3842,66	-0,00272	-0,94557	0,94557		0,89410	-563,36	-338,02
1233	40,20	0,60	3658,16	3128,22	-0,00266	-0,92474	0,92474		0,85514	-468,95	-281,37
1232	40,80	0,60	3658,16	2974,16	-0,00259	-0,90168	0,90168		0,81302	-457,26	-274,36
1231	41,40	0,60	3658,16	2804,57	-0,00252	-0,87559	0,87559		0,76666	-444,03	-266,42
1230	42,00	0,60	3658,16	2617,73	-0,00243	-0,84592	0,84592		0,71559	-428,99	-257,39
395	42,60	0,60	4297,79	2837,46	-0,00234	-0,81253	0,81253		0,66021	-484,10	-290,46
1269	43,20	0,60	3658,16	2199,19	-0,00223	-0,77535	0,77535		0,60118	-393,20	-235,92
1268	43,80	0,60	3658,16	1969,55	-0,00211	-0,73376	0,73376		0,53840	-372,10	-223,26
1267	44,40	0,60	3658,16	1728,88	-0,00198	-0,68747	0,68747		0,47261	-348,63	-209,18
1266	45,00	0,60	3658,16	1482,74	-0,00183	-0,63665	0,63665		0,40532	-322,86	-193,72
414	45,60	0,60	4297,79	1456,17	-0,00167	-0,58208	0,58208		0,33882	-346,80	-208,08
1289	46,20	0,60	3658,16	1006,30	-0,00151	-0,52449	0,52449		0,27508	-265,98	-159,59
1288	46,80	0,60	3658,16	789,37	-0,00134	-0,46452	0,46452		0,21578	-235,57	-141,34
1287	47,40	0,60	3658,16	594,01	-0,00116	-0,40296	0,40296		0,16238	-204,35	-122,61
1286	48,00	0,60	3658,16	424,60	-0,00098	-0,34069	0,34069		0,11607	-172,77	-103,66
438	48,60	0,60	4684,74	364,04	-0,00080	-0,27876	0,27876		0,07771	-181,04	-108,62
1324	49,13	0,53	4045,11	204,43	-0,00065	-0,22481	0,22481		0,05054	-126,06	-67,19
1323	49,66	0,53	4045,11	120,71	-0,00050	-0,17275	0,17275		0,02984	-96,87	-51,63
1322	50,20	0,53	4045,11	62,01	-0,00036	-0,12381	0,12381		0,01533	-69,43	-37,01
1402	50,66	0,47	4045,11	29,11	-0,00024	-0,08483	0,08483		0,00720	-47,57	-22,17
1401	51,13	0,47	4045,11	10,51	-0,00015	-0,05097	0,05097		0,00260	-28,58	-13,35
1365	51,59	0,47	4045,11	2,34	-0,00007	-0,02408	0,02408		0,00058	-13,50	-6,28
1370	52,19	0,60	4045,11	0,03	-0,00001	-0,00278	0,00278		0,00001	-1,56	-0,94