



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

LINEÁRNÍ ANALÝZA ZTRÁTY STABILITY SPALINOVÉHO POTRUBÍ

LINEAR BUCKLING ANALYSIS OF A FLUE GAS PIPE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Jančík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Nad'

BRNO 2016

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav procesního inženýrství
Student:	Bc. Jan Jančík
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Procesní inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Martin Nad'
Akademický rok:	2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Lineární analýza ztráty stability spalínového potrubí

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Spalínová potrubí obvykle pracují za nízkých tlaků, proto je lze konstruovat ekonomicky z tenkých plechů. Úskalím tohoto řešení je však zvýšené riziko ztráty stability, která může vést ke značným škodám a je třeba jí předcházet. Obzvláště nebezpečná jsou zejména zatížení větrem, sněhem, podtlakem a jejich kombinace. K hodnocení náchylnosti ke ztrátě stability lze využít například normu EN 1993-1-6, která nabízí 3 různé metody. V této práci bude použita metoda využívající lineární strukturní analýzy a analýzy vlastních tvarů. Úkolem studenta je provést hodnocení odolnosti spalínového potrubí vůči ztrátě stability, a to nevyztužené verzi a několik vyztužených verzí.

Cíle diplomové práce:

1. Seznámení se s metodami pro hodnocení ztráty stability podle Eurokódu.
2. Tvorba výpočtového modelu spalínového potrubí pro analýzy metodou konečných prvků.
3. Hodnocení náchylnosti spalínového potrubí ke ztrátě stability.
4. Návrh několika variant vyztužení.
5. Hodnocení stability vyztužených variant.

Seznam literatury:

EN 1993-1-6 (2007): Design of steel structures – Strength and Stability of Shell Structures. European Comitee for Standardization.

EN 1991-1-3 (2003): Actions on structures – General actions – Snow loads. European Comitee for Standardization.

EN 1991-1-4 (2010): Actions on structures – General actions – Wind actions. European Comitee for Standardization.

Rotter, J. M., Schmidt H. (2013): Buckling of steel shells: European design recommendations. ISBN 978-92-9147-116-4.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Diplomová práce se věnuje problematice ztráty stability tenkostěnného spalínového potrubí v uhelné elektrárně. Problémem tenkostěnných konstrukcí je jejich náchylnost ke ztrátě stability vlivem mimořádných podmínek, jako je například podtlak, působení větru, sněhu a zemětřesení. Cílem je provést vhodné vyztužení tak, aby model vyhovoval požadavkům normy ČSN EN 1993-1-6. To si vyžádalo hodnocení nevyztužené verze modelu pro nalezení slabých míst a následně dalších konfigurací pro aplikaci výztuh. V práci je pro určování odolnosti spalínového potrubí vůči ztrátě stability využito především přístup lineární bifurkační analýzy vycházející z lineární analýzy, případně materiálově-nelineární analýzy. Výsledkem práce je návrh vyztužení potrubí, které na základě požadavků normy u posledního modelu vyhovuje s rezervou přibližně 20 %.

Klíčová slova

Skověřinový model, spalínové potrubí, ztráta stability, lineární bifurkační analýza, metoda konečných prvků

Abstract

The diploma thesis deals with the loss of stability of thin-walled flue pipe at coal power plant. The problem of thin-walled structures is their propensity to the loss of stability due to abnormal conditions, for example a vacuum, effect of wind, snow and earthquake. The purpose is to find the optimal deployment of reinforcements so that the model meets the requirements of EN 1993-1-6. This required an evaluation of unreinforced version of the model to identify weaknesses and subsequently other configurations for the application of reinforcement. For determining the resistance the flue pipe to the loss of stability used primarily to access linear bifurcation analysis based on linear analysis, possibly materially nonlinear analysis. The result of work is a design of reinforcement of pipeline which under the requirements of the standard meets the latest model with a reserve of approximately 20 %.

Keywords

Shell model, flue gas pipe, buckling, linear bifurcation analysis, finite elements analysis

Bibliografická citace

JANČÍK, J. *Lineární analýza ztráty stability spalínového potrubí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 88 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Nadř.

Prohlášení o původnosti práce

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně s využitím uvedených zdrojů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Brně dne 27. května 2016

.....
Bc. Jan Jančík

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Martinu Naďovi a dále také Ing. Tomáši Létalovi, Ph.D. za vstřícnost, ochotnou pomoc, čas věnovaný konzultacím a užitečné rady při zpracování této práce. Dále bych rád také poděkoval svým blízkým a rodině za všestrannou pomoc a podporu během celého studia, v neposlední řadě také Denise Mouderové DiS., za ochotnou pomoc při korektuře textu.

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	10
1. Úvod	12
2. Potrubní systémy	13
2.1 Základní parametry	13
2.2 Rozdělení potrubí	13
2.3 Části potrubí	13
2.4 Materiály	14
2.4.1 Konstrukční ocel S235/S355	15
2.5 Spaliny	15
3. Skořepinové konstrukce	17
3.1 Membránový a momentový stav napjatosti	18
3.2 Typy zatížení skořepin	19
3.3 Ztráta stability	20
3.3.1 Lineární přístup hodnocení ztráty stability	21
3.3.2 Nelineární přístup hodnocení ztráty stability	21
4. Metoda konečných prvků	22
4.1 Ansys Mechanical APDL	23
5. Postup řešení praktické části	24
6. Numerické analýzy	25
6.1 Tvorba modelu	25
6.2 Průběh výpočtu	28
6.2.1 Okrajové podmínky	28
6.2.2 Výpočtové cykly a export výsledků	31
7. Výsledky výpočtu a hodnocení dle ČSN EN 1993-1-6	32
7.1 Hodnocení modelu č.1	33
7.1.1 Dílčí závěr modelu č.1	38
7.2 Hodnocení modelu č.2	39
7.2.1 Dílčí závěr modelu č.2	44
7.3 Hodnocení modelu č.3	44
7.3.1 Dílčí závěr modelu č.3	45
7.4 Hodnocení modelu č.4	47
7.4.1 Dílčí závěr modelu č.4	48

7.5	Shrnutí a porovnání výsledků.....	50
8.	Závěr.....	51
	Seznam použité literatury.....	53
	Seznam obrázků a tabulek.....	56
	Seznam příloh.....	58
	Příloha 1a.....	59
	Příloha 1b.....	63
	Příloha 1c.....	67
	Příloha 1d.....	71
	Příloha 2.....	75
	Příloha 3.....	77
	Příloha 4.....	82
	Příloha 5.....	85

Seznam použitých symbolů a zkratek

latinská písmena

<i>symbol</i>	<i>význam</i>	<i>jednotka</i>
E	modul pružnosti v tahu	MPa
L	nevzdušená délka skořepiny	mm
M	ohybový moment	$N \cdot m$
n	membránová vnitřní síla	N/mm
N	síla	N
n_{cyl}	počet obvodových vln	–
P	výpočtový tlak	MPa
P_m	teoretický tlak při elastické ztrátě stability	MPa
P_r	výpočtová dolní mez tlaku při zborcení	MPa
P_y	teoretický tlak obvodového napětí při mezi kluzu	MPa
Q	příčná smyková síla; součinitel vlivu jakosti	N ; -
R	poloměr skořepiny	mm
r_{Rcr}	faktor pružné kritické únosnosti při boulení	–
r_{Rd}	faktor návrhové únosnosti při boulení	–
R_e, f_y	mez kluzu materiálu v tahu	MPa
R_{eH}	výrazná horní mez kluzu materiálu v tahu	MPa
r_{Rk}	faktor charakteristické únosnosti při boulení	–
R_m	mez pevnosti materiálu v tahu	MPa
$R_{p0,2}$	smluvní mez kluzu materiálu v tahu	MPa
r_{Rpl}	faktor referenční plastické únosnosti	–
S	součinitel bezpečnosti pro konstrukční podmínky	–
t	tloušťka skořepiny	mm
Z	charakteristický poměr délky skořepiny	–

řecká písmena

<i>symbol</i>	<i>význam</i>	<i>jednotka</i>
α	součinitel imperfekce v pružném stavu	–
β	součinitel rozsahu plastické oblasti	–
γ_{M1}	dílčí součinitel při boulení	–
Δw_k	charakteristická amplituda imperfekce	mm
ε	poměrná deformace; střední deformace při zborcení	mm
η	interakční exponent	–
θ	obvodová souřadnice	rad
λ_0	poměrná štíhlost při stlačení	–
λ_{ov}	celková poměrná štíhlost	–
λ_p	mezní relativní štíhlost v plastické oblasti	–

μ	<i>Poissonovo číslo</i>	–
σ	<i>obecné napětí</i>	<i>MPa</i>
σ_e	<i>dovolená elastická hodnota</i>	<i>MPa</i>
χ_{ov}	<i>celkový součinitel vzpěrnosti při boulení</i>	–
<hr/>		
<i>dolní index</i>	<i>význam</i>	
x	<i>v podélném směru; ve směru osy x</i>	
xy	<i>ve směru roviny xy</i>	
$x\theta$	<i>ve smyku</i>	
y	<i>ve směru osy y</i>	
θ	<i>v obvodovém směru</i>	
<hr/>		
<i>zkratky</i>	<i>význam</i>	
<i>DN</i>	<i>diametre nominal (jmenovitá světlost)</i>	
<i>FEM</i>	<i>finite elements method</i>	
<i>J_s</i>	<i>jmenovitá světlost (starší označení)</i>	
<i>J_t</i>	<i>jmenovitý tlak (starší označení)</i>	
<i>KP</i>	<i>klíčový bod</i>	
<i>LA</i>	<i>linear analysis (lineární analýza)</i>	
<i>LBA</i>	<i>linear bifurcation analysis (lineární bifurkační analýza)</i>	
<i>MNA</i>	<i>material nonlinear analysis (materiálově nelineární analýza)</i>	
<i>MKP</i>	<i>metoda konečných prvků</i>	
<i>PN</i>	<i>pressure nominal (jmenovitý tlak)</i>	
<i>SS</i>	<i>souřadný systém</i>	

1. Úvod

Potrubí obecně je nezbytným procesním prvkem, na které je možné narazit v objektech i mimo ně. Primárně zajišťuje transport různých látek z jednoho místa na místo jiné. V podobě trubek (tepelné výměníky, procesní pece a jiné) je možné je využít například i jako prostředek pro přenos tepelné energie z jednoho média na druhé nebo pro přenos tlakové energie (hydraulika). Většina nejen průmyslových zařízení se neobejde bez potrubních systémů a rozvodů, které mnohdy činí velkou část investičních nákladů při realizaci projektů. Jedná se o významný spojovací prvek, proto je důležité se problematikou konstrukce potrubí zabývat a co nejlépe ji optimalizovat tak, aby vznikl produkt vyvážený z hlediska ceny, funkčnosti a především bezpečnosti.

Obecně je poptávka po elektřině i teple celosvětově vysoká a každým rokem stoupá. Tyto formy energie obstarávají zejména neobnovitelné zdroje. Jsou jimi ropa, zemní plyn a především uhlí, které je potřeba spalovat pro získání nutné energie. Při spalování je získáváno teplo, které je z části obsaženo i ve vytvořených spalínách. Ty jsou pro další využití vedeny na jiná místa a právě i zde se uplatňuje význam potrubí, konkrétně části zajišťující odvod/přívod spalín. Každé médium, v tomto případě spaliny, kladou na transportní systém své specifické požadavky, se kterými se počítá a jsou zahrnovány při návrhu. Jedná se jak o požadavky tlakové související s typem proudění a jeho rychlostí, tak i tepelné a chemické, které způsobují postupnou degradaci materiálu. Z pohledu vnějšího zatížení je pak nutné zabývat se působením od uchycení potrubí, vlastní váhy a také meteorologickými vlivy, pokud se jedná o jeho venkovní umístění.

Tenkostěnné skořepinové konstrukce jsou využívány jak ve strojírenství, kde jsou uplatňovány například v podobě tlakových nádob a potrubí o velkých průměrech, tak i v ostatních oborech průmyslu. Tyto zařízení jsou velmi náchylné na ztrátu stability vlivem určitých provozních i mimořádných zatěžujících podmínek, pokud tyto jevy nejsou predikovány. Ztráta stability se projeví změnou tvaru (vytvořením vln) nebo v krajní mezi zhroutilím celé konstrukce, což může mít fatální následky jak pro ni samotnou, tak i pro okolí. Hodnotu limitního zatížení, které je schopné skořepina přenést značně ovlivňují počáteční imperfekce, jež jsou součástí reálných zařízení. Přes všechna úskalí spojená se skořepinami je jejich výhodou zejména relativně vysoká únosnost při specifických zatíženích a zachování nízké hmotnosti, se kterou souvisí i investiční náklady na použitý materiál.

2. Potrubní systémy

Potrubí a potrubní soustavy jsou důležitou součástí každého průmyslového provozu. Pro celý proces výroby je jejich správné navržení stejně důležité jako funkčnost aparátů samotných. Jsou spojovacím prvkem mezi jednotlivými zařízeními a zajišťují především kontinuálnost transportu médií. Dle nařízení vlády č. 26/2003 Sb. [1] jsou definovány jako tlaková zařízení kam patří současně nádoby, hrdla, příruby a veškeré jiné součásti vystavené dovolenému přetlaku většímu než 0,5 bar vztaženému k tlaku atmosférickému.

2.1 Základní parametry

Z ekonomických i praktických důvodů jsou potrubí a jejich části vyráběny v normalizovaných rozměrech. Tento faktor snižuje cenu výroby a usnadňuje i proces navrhování. Obecně jsou označovány jmenovitou světlostí DN (dříve Js) a jmenovitým tlakem PN (dříve Jt), případně jsou doplněny o pracovní stupeň. Tato označení jsou pouze orientační vzhledem k volbě potrubí a ne vždy udávají skutečnou hodnotu, nemělo by se tedy s nimi přímo operovat ve výpočtech, pokud to výslovně norma neuvádí. DN udává přibližný vnitřní průměr, který se mění dle potřeby tloušťky stěny pro působení maximálního pracovního přetlaku uvedeného hodnotou PN. Jelikož s hodnotou teploty dopravovaného média se mění i pevnost materiálu, uvádí se společně s jmenovitým tlakem i pracovní stupeň. Ten se označuje římskou číslicí, pokud se jedná o teploty nad 0 °C a velkým písmenem pokud jsou teploty pod touto hodnotou. [2]

2.2 Rozdělení potrubí

Potrubí lze rozdělit do skupin, které je blíže charakterizují nebo na ně lze nahlížet z různých hledisek. Tato rozdělení pak snadněji definují pole působnosti a tím i lepší orientaci k jakému účelu potrubí slouží. Nejčastěji je možné se setkat s rozlišením podle druhu dopravované látky. Jedná se o parovody, vodovody, plynovody, kondenzátní potrubí a jiné. Důležitou hodnotou proudícího média je pracovní tlak, podle kterého se potrubí rozděluje na nízkotlaká, středotlaká a vysokotlaká. Dalším způsobem dělení lze narazit na potrubí dle místa působení, tedy vnitřní nebo venkovní. Možné je i posouzení podle použitého materiálu nebo účelu, ke kterému bylo potrubí navrženo. [2]

2.3 Části potrubí

Potrubní systémy se neskládají pouze z rovných úseků, ale součástí jsou i přídavné komponenty, bez kterých se provoz neobejde. Tyto části můžeme rozdělit na hlavní a doplňující. K první kategorii patří jak samotné trubky, tak jejich spoje realizované většinou přírubami nebo přivařením, dle toho, zda se jedná o spoj rozebíratelný nebo nerozebíratelný. Ten je definovaný jako spoj, jenž nelze oddělit jinak než destruktivně. Dále sem patří komponenty určené k přerušení proudu média (uzavírky), části zajišťující změnu směru proudění (tvarovky), dilatační kompenzátory vyrovnávající změnu tvaru vlivem tepla a další

jiná uložení a upevnění. Mezi doplňující prvky lze zahrnout části, bez kterých se systém obejde, ale jejich použití zajišťuje regulaci, řízení, měření nebo ochranu. Jsou jimi tedy různé filtry, ventily, měřící jednotky a izolace. [2]

2.4 Materiály

Volba materiálu závisí na aplikaci konkrétního potrubního systému. V průmyslu a především v procesním odvětví jsou využívány zejména kovové materiály z důvodu jejich příznivých vlastností a požadovaných pevnostních charakteristik. Musí tedy snášet vnitřní/vnější přetlak, vydržet požadované vysoké/nízké teploty, odolávat korozi, únavě a dalším faktorům snižující životnost a bezpečnost potrubí. Tyto požadavky lze rozdělit do tří skupin dle požadovaných vlastností. Jsou jimi:

- Fyzikální a mechanické vlastnosti materiálu potrubí, které ovlivňují pevnostní a tepelné výpočty. Patří sem například charakteristiky vycházející z konkrétního namáhání jako je mez pevnosti v tahu R_m , mez kluzu v tahu R_e , smluvní mez kluzu v tahu $R_{p0,2}$, houževnatost, tvrdost, hustota, teplená roztažnost, tepelná vodivost a jiné. Hodnoty jsou zjišťovány experimentálně pomocí zkoušek a většinu z nich lze najít v materiálových listech.
- Technologické vlastnosti materiálu ovlivňující postup výroby a montáž potrubí. Jsou jimi svařitelnost, tvárnost, obrobitelnost, odolnost proti opotřebení a schopnost tepelného zpracování.
- Chemické vlastnosti odvíjející se především od typu dopravovaného média a prostředí, ve kterém je potrubí uloženo. Interakcí materiálu s těmito dvěma vlivy dochází ke korozi a jiným chemickým reakcím ovlivňující funkci potrubí.

Na volbu materiálu, který bude použit, se nahlíží z různých hledisek. Snahou je zvolit neoptimalnější řešení. Jedná se tedy o rozsáhlou problematiku řešící vyváženost mezi požadovanými vlastnostmi a cenou, která je spojena s konkurenceschopností na trhu a hraje jednu z nejdůležitějších rolí při výběru materiálu. [3]

Nejvhodnější mechanické vlastnosti pro konstrukční účely vykazuje právě ocel, proto je hojně využívaným materiálem v oboru strojírenství. Dle výše zmíněných požadavků jsou vyráběny například žárovevné a žáruvzdorné oceli vyznačující se velmi dobrými vlastnostmi při zvýšených teplotách, korozivzdorné odolávající korozním vlivům a jiné modifikace uzpůsobené pro specifické použití. Tyto vlastnosti jsou docíleny přidáním vhodných legujících prvků do oceli. [3]

2.4.1 Konstrukční ocel S235/S355

V práci je řešeno potrubí o velkém průměru a přilehlá konstrukce. Obě tyto části jsou vyrobeny ze základní neušlechtilé konstrukční oceli válcované za tepla. Tato ocel, označená dle české technické normy ČSN EN 10025 [4] jako S235 JR (pro konstrukci S235 J2), se vyznačuje běžnou jakostí. Je vhodná ke svařování, lisování a dobře se tváří. Využití nachází jako materiál pro nosné části svařovaných konstrukcí namáhané staticky i dynamicky, tlakově namáhané zařízení pracující za normálních a zvýšených teplot a výrobu ohýbaných profilů a trubek. Dle zadání bylo možné použít i ocel s jakostí běžnou-pevnější S355 JR (pro konstrukci S355 J2) mající obdobné vlastnosti. Označení J udává hodnotu nárazové práce a R zkušební teplotu. Porovnání jednotlivých materiálů dle obsahu prvků a meze pevnosti jsou uvedeny v tabulce 2.1. a 2.2. [4]

Tabulka 2.1. Hodnota R_m [MPa] pro jednotlivé tloušťky plechů [mm] [5]

Označení	≥ 3	>100	>150
	≤ 100	≤ 150	≤ 250
S235JR / S235J2	360-510	350-500	340-490
S355JR / S355J2	470-630	450-600	450-600

Tabulka 2.2. Hodnota R_{eH} [MPa] pro jednotlivé tloušťky plechů [mm] [5]

Označení	≤ 16	>16	>40	>63	>80	>100
		≤ 40	≤ 63	≤ 80	≤ 100	≤ 150
S235JR / S235J2	235	225	215	215	215	195
S355JR / S355J2	355	345	335	325	315	295

2.5 Spaliny

Jak již bylo zmíněno v úvodu, potrubí slouží především k dopravě, kdy transportním prvkem může být plynné, kapalně nebo i pevné médium, je tedy různorodého charakteru a záleží na účelu potrubí. V elektrárnách a jiných průmyslových provozech, kdy je energie získávána spalováním je potřeba manipulovat se vzniklými plyny, ať už se jedná o páru, která je vedena na turbínu nebo spaliny předávající energii právě vodě (páře). Tyto fáze se vyznačují velkými objemy, které je potřeba přesunout z místa vzniku dále do procesu pro další využití.

V případě vznikajících spalin a jejich množství je určující především typ paliva a přebytek přiváděného vzduchu. Tento přebytek zajišťuje dostatečné množství kyslíku, který je pro proces důležitý a zajišťuje potřebné spálení veškerého paliva. Obecně surovina ke spálení zahrnuje hořlavé prvky, které jsou nositeli energie, popeloviny a vodu. Pokud je spalován zemní plyn, který obsahuje především metan, tak zjednodušeně lze říci, že množství vzniklých spalin bude přibližně 10x větší než množství spotřebovaného plynu. To znamená, že pro přenos takového objemu bude zapotřebí potrubí s dostatečně velkým průměrem. Hoření zemního plynu (pro zjednodušení uvažován pouze metan) se zanedbáním dusíku

a inertních plynů obsažených ve vzduchu, je řízeno jednoduchou chemickou rovnicí (viz vztah 2.1.). [6] Při spalování jiných typů paliv platí složitější rovnice stejného principu, záleží tedy na prvcích obsažených ve spalované látce.



Zpracováním fosilních paliv, které jsou jako surovina využívány pro výrobu tepelné a elektrické energie, vznikají především produkty oxid uhličitý a voda. Jelikož součástí paliva jsou i jiné prvky, mohou vzniklé spaliny obsahovat sloučeniny, jako jsou například oxidy dusíku a síry nebo také nespalitelné zbytky ve formě popílku. Některé z těchto látek jsou nebezpečné a jejich přítomnost ve vzduchu je z hlediska životního prostředí nežádoucí, proto je nutné se jich před vypuštěním do atmosféry zbavit. Odstranění probíhá s určitou účinností v zařízeních k tomu určených. Pevné částice jsou čištěny na bázi různých fyzikálních principů, ať už za pomoci filtrů, cyklónů nebo elektrostatických odlučovačů. V dalších krocích se zbavuje sirnatých látek za pomoci chemických reakcí nebo absorpcí. Snahou je i snížit obsah uhlíkatých a dusíkatých látek. Cílem těchto procesů je splnění požadovaných emisních limitů, které jsou striktně definovány v příslušných zákonech a vyhláškách. [7]

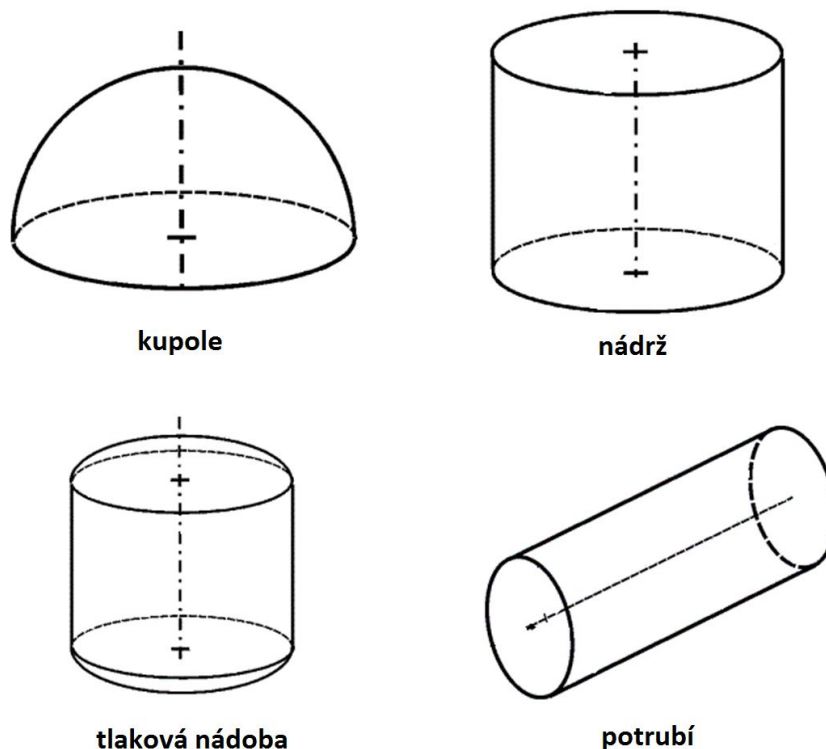
V práci je řešeno potrubí odsiřovací linky vedoucí z absorberu do stávajícího kouřovodu. To znamená, že v potrubním celku se vyskytují poměrně chladné spaliny (63 °C) zbavené značného podílu sirnatých látek (především SO₂) mající vliv na materiál potrubí. Vnitřní plocha potrubí je pokryta ochrannou vrstvou (stěrkovací hmotou), která má chránit použitou ocel před vlivem spalin.

Z hlediska látky, která je dopravována potrubím, je potřeba volit i správný materiál. Jedná se o jedno z hledisek popsané v kapitole 2.4. Použitý materiál obecně by měl co nejméně reagovat s proudící látkou, která jej může ovlivnit natolik, že zapříčiní snížení mechanických vlastností a tím nefunkčnost nebo havárii. V opačném případě může dojít k ovlivnění proudící látky materiálem a tím změně její chemických vlastností, což je například v potravinářském průmyslu zcela nepřijatelné. Ve většině případů k těmto interakcím více či méně dochází a proto je nutné tento fakt zahrnout do návrhu za pomoci přidání takzvané korozní vrstvy. Tento přírůstek (navýšení tloušťky) má v určitém časovém úseku jistit požadované mechanické vlastnosti materiálu, volí se na základě míry agresivity prostředí, tedy na chemickém složení a teplotě spalin. [3]

3. Skořepinové konstrukce

Skořepinové konstrukce se vyznačují mnohonásobně menší velikostí jednoho rozměru vůči zbývajícím dvěma. Obecně se jedná právě o tloušťku, která je menší než délka či šířka, u rotačních prvků je pak menší než jednotlivé poloměry křivosti. Tvar skořepiny je tvořen střednicovou plochou, která u rotačně symetrických těles vzniká otáčením meridiánu kolem osy rotace. Skořepiny lze využít ve strojírenské praxi jako samostatné konstrukce mající vlastní objem, jedná se o nádrže nebo tlakové nádoby konstruované z plechů. Využití nachází také v podobě nosných částí konstrukcí ohraničující nějaký objem. Toho je využíváno například ve stavebnictví, kdy se jedná o různé střechy, báně nebo tunely. Jelikož potrubní komponenty jsou rotačně symetrická tělesa je možné u nich využívat teorii skořepin. To přináší především úsporu materiálu, se kterou souvisí další aspekty. [8]

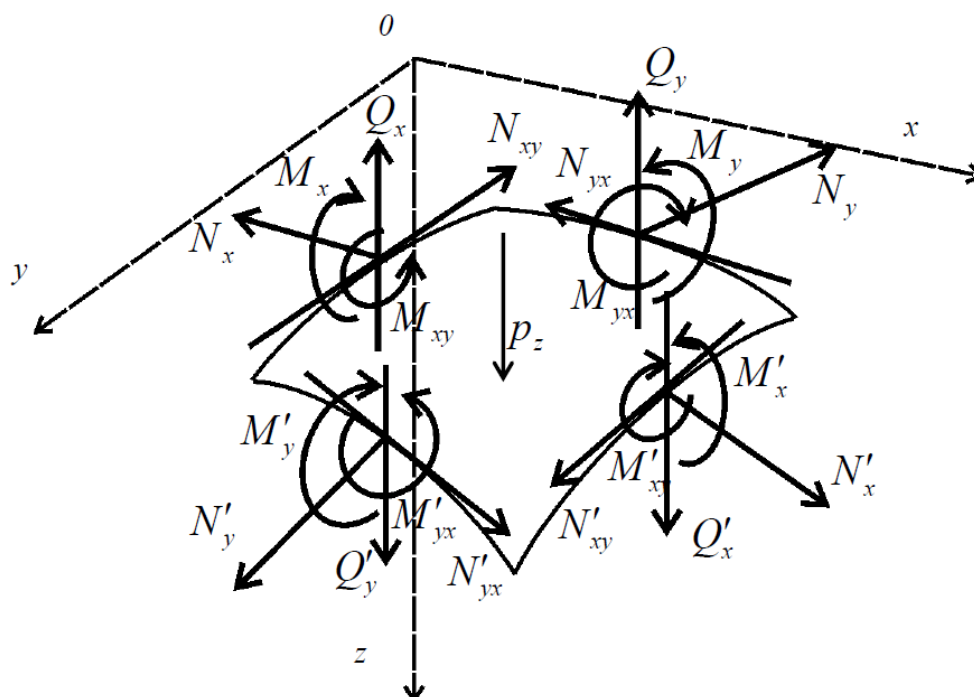
Dle tvaru je možné skořepiny rozlišovat jako obecné, rovinné a rotačně symetrické. Dále je lze rozdělit z pohledu tloušťky, která má také vliv na velikost a typ působících napětí. U většiny aplikací je snahou využívat základní geometrické tvary jako je koule, válec, kužel nebo jejich kombinace (viz obr. 3.1.), u kterých se rozložení sil při zatížení lépe a snáze vyhodnocuje. [8], [9]



Obr. 3.1. Využití základních geometrických tvarů v podobě skořepin [8]

3.1 Membránový a momentový stav napjatosti

Při tlakovém zatížení vznikají po tloušťce skořepiny napětí, kdy jejich integrací lze vyjádřit vnitřní síly vztahované k referenční střednicové ploše, ke které se vztahují prováděné výpočty. Jedná se o normálové síly (N_x , N_y), smykové síly (N_{xy} , N_{yx}) a ohybové momenty (M_x , M_y) či krouticí momenty (M_{xy} , M_{yx}) vyvolané těmito silami (viz obr. 3.2.). Čím je pak tloušťka skořepiny menší tím se vliv momentů zmenšuje. [8], [9]



Obr. 3.2. Rozložení sil a momentů na ploše skořepiny [8]

Na existenci a velikost vnitřních sil a momentů má vliv především:

- typ a velikost vnějšího zatížení,
- geometrické vlastnosti skořepiny (tvar střednicové plochy),
- způsob uložení skořepiny.

Stanovení hodnot sil a deformací vyžaduje vyjádření matematických závislostí, což vede ke složitosti výpočtu. Proto je snaha zavádět zjednodušení, kdy lze zanedbat ohybové účinky za předpokladu:

- spojitého zatížení skořepiny,
- spojitosti střednicové plochy,
- ne příliš skokové změny tloušťky,
- vnějším zatížení okraje směrem tečným k meridiánu.

Při splnění těchto předpokladů je rozložení napětí po tloušťce skořepiny téměř konstantní. Napjatost je udávána hlavně vnitřními silami s konstantním průběhem po tloušťce stěny, tedy normálovými silami, případně smykovými. Vzhledem k malé nerovnoměrnosti rozdělení napětí mají momenty zanedbatelné hodnoty. Z rovnováhy na element vymizí i příčné smykové síly (Q_x , Q_y) a napjatost je určována složkami sil působící rovnoběžně se střednicovou plochou. Jedná se tedy o převedení 3D problému na 2D. Tato aplikace je nazývána membránová teorie. Nesplněním výše uvedených podmínek dochází k poruchám membránového stavu a vzniká složitější problém, kde se vyskytují již zmíněné ohyby a krut. Tento stav je nazýván momentovým. [9], [10]

3.2 Typy zatížení skořepin

Obecně navrhování konstrukcí a aparátů vychází ze zatěžujících podmínek, které lze rozdělit do čtyř skupin:

- a) **Trvalé zatížení** – způsobují například vnitřní tlak související s prouděním tekutiny. Toto zatížení bývá označováno někdy jako živé. Naopak zatížení vlivem hmotnosti média nebo hmotnosti samotného potrubí a izolace spadající do této kategorie je označováno jako mrtvé. Patří sem také axiální síly tvořené kompenzátory. Tyto typy zatěžujících stavů způsobují primární napětí v potrubních celcích. [11]
- b) **Zatížení teplotní dilatací** – způsobuje pohyby vlastního potrubí, hrdel aparátů, navazujících zařízení a podpěr, na kterých je potrubí uloženo. Jelikož jednotlivé části mohou být konstruovány z odlišných materiálů, tak i tepelná dilatace je různá a tím vzniká napětí. Tepelná dilatace způsobuje sekundární napětí výhradně ve směru osovém a to v případě zabráněné i nezabráněné dilatace. [11]
- c) **Příležitostná zatížení** – patří sem především vliv klimatických jevů jako je vítr, sníh a seismicita na potrubní celky. Do této kategorie patří i silové projevy dynamických jevů uskutečňujících se nahodile. Jedná se například o hydrodynamický ráz, silové projevy odpouštění bezpečnostní armatury nebo výbuch. Tento typ zatěžujících stavů způsobuje primární napětí. [11]
- d) **Zatížení od jednoho neopakujícího se pohybu** – mezi, které spadá například pohyb podpěry zapříčiněný sedáním zeminy. Způsobuje sekundární napětí. [11]

Výše vypsané typy zatížení způsobují v materiálu primární nebo sekundární napětí. Pokud se v materiálu rozvine deformace způsobená primárním zatížením, jeho hodnota se pro další působení nesnižuje. Naopak sekundární napětí je samo omezující. To znamená, že pokud se vlivem tohoto napětí rozvine deformace, hodnota napětí klesá nebo jde o napětí, které způsobila nucená deformace. [11]

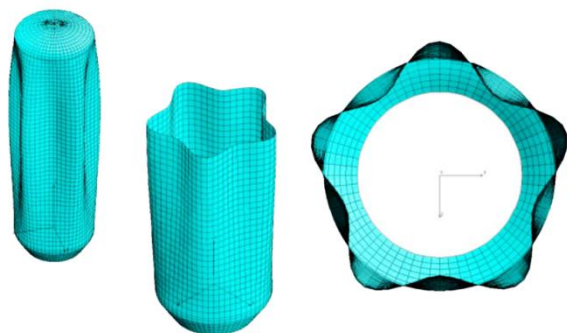
3.3 Ztráta stability

Ztráta stability je jedním z mezních stavů, se kterým je nutno počítat při návrhu tenkostěnných tlakových zařízení. Tento jev se problematicky vyhodnocuje a jeho následky mohou být značné ať už z hlediska ekonomického, kdy při nefunkčnosti zařízení dochází ke ztrátě zisků, nebo v horším případě z hlediska bezpečnostního. Zařízení postihnutá ztrátou stability jsou ve většině případů neopravitelné. Skořepinové konstrukce, jako například tlakové nádoby, zásobníky nebo potrubí o velkých průměrech, jsou na tento mezní stav velice náchylné. [12]

V české verzi evropské normy ČSN EN 1993-1-3 (Eurokód 3: navrhování ocelových konstrukcí – část 1-6: Pevnost a stabilita skořepinových konstrukcí) je tento mezní stav definován následovně:

„Jako mezní stav boulení se má uvažovat stav, při kterém v celé konstrukci nebo v části konstrukce náhle vzniknou velká posunutí ve směru kolmém k plášti skořepiny v důsledku ztráty stability při působení tlakových nebo smykových membránových napětí ve stěně skořepiny, takže skořepina již není schopná přenášet další vnitřní síly nebo může nastat její celkové zhroucení.“ [13]

Vlivem nadměrného tlakového působení u tenkostěnných konstrukcí může docházet ke ztrátě stability, kdy je v konkrétním okamžiku zatěžování materiál nucen snášet nejen membránová (tlaková) zatížení ale zároveň i ohybová. Dojde tak náhle k přerozdělení rovnováhy pouze v tlaku na působení v tlaku a zároveň i v ohybu. Z tohoto důvodu se výchozí konstrukce stává labilní a přechod do nové stabilní konfigurace je doprovázen velkými deformacemi v podobě zvlnění (boulení) stěn nebo jejich zborcením, které zamezuje bezpečný provoz (viz obr. 3.3. a obr. 3.4.). V technické praxi jsou problémy stability řešeny pomocí výpočtů z normy, ty ovšem nedávají přesné výsledky, jejich použití je značně omezeno na jednoduché tvarové prvky a nelze dle nich odvodit charakteristické chování po ztrátě stability. Toto chování lze do jisté míry předpovídat pomocí analýz využívající metodu konečných prvků, na které je založeno mnoho výpočetních programů. Ztrátu stability lze vyšetřovat dvěma způsoby lišící se od sebe svým průběhem, jenž je popsán v následující kapitole 3.3.1 a 3.3.2. [12], [14]



Obr. 3.3. Počítačový model boulení vertikální nádrže s počtem 5 obvodových vln [15]



Obr. 3.4. Boulení stěny vertikální nádrže (pohled zespuď nahoru) [15]

3.3.1 Lineární přístup hodnocení ztráty stability

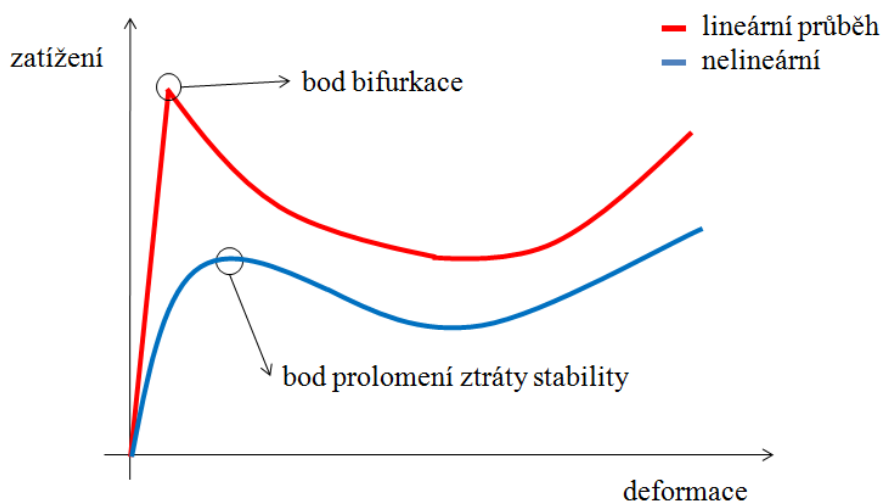
Lineární analýza ztráty stability vychází z předpokladu, že skořepina je od počátku zatěžována pouze membránovými složkami, což vede k lineárnímu nárůstu napětí až do kritického bodu, kdy se skořepina náhlým skokem deformuje a další průběh je nelineární. Tento bod je nazýván bifurkací a dochází v něm k rozdělení rovnováhy, tedy jak již bylo zmíněno v kapitole 3.3 k membránovým napětím se přidávají i ohybová, které skořepina již není schopná přenášet. Dochází k deformacím a vzniká nový tvar odpovídající kritickému zatížení. [14]

Tato analýza je idealizovaná a pracuje s mnoha zjednodušenými. Neodpovídá přesně skutečnému průběhu, jelikož vychází z dokonalé geometrie zatěžovaných částí bez tvarových nedokonalostí (obecně imperfekcí), se kterými se v běžné praxi není možné setkat. Imperfekce mají značný vliv na průběh ztráty stability, kdy již nepatrné vychýlení od ideální geometrie může zapříčinit snížení hodnoty kritického napětí a tím dřívějšímu zhroucení. Z toho důvodu je napětí korigováno různými redukčními součiniteli. [14]

3.3.2 Nelineární přístup hodnocení ztráty stability

Nelineární analýza ztráty stability zahrnuje výše zmíněné nedokonalosti tvaru a předpokládá vznik velkých deformací. Naopak od lineární teorie se již od počátku uvažuje s účinky ohybového namáhání. Křivka závislosti poměrné deformace na zatížení je hladká a nelineární, nedochází tak k jejímu rozdělení, tedy bifurkaci (viz obr. 3.5.). Tento případ je nutné řešit s postupnými přírůstky zatížení. [16]

Analýza je náročnější jak z pohledu přípravné fáze, tak i výpočtového času, ovšem její výsledky odpovídají ve větší míře skutečnému průběhu a lépe se vyhodnocují. Problémem je zde odhadnutí a zadání správných (reálných) počátečních podmínek výpočtu, které mají značný vliv na výsledky. [14]



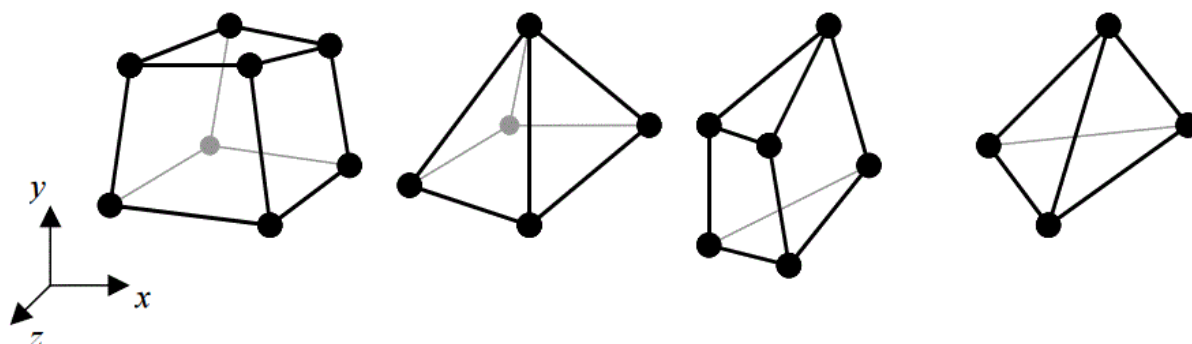
Obr. 3.5. Ilustrační průběh ztráty stability prvku zatěžovaném tlakem v ose [17]

4. Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků (MKP) je rozsáhlá numerická aplikace využívaná pro řešení inženýrských problémů. V mnoha případech u technických úloh nelze použít analytických metod, proto je v dnešní době, kdy je potřeba řešit čím dál složitější a detailnější problémy, velký rozmach právě numerických postupů jako je MKP. Vznik metody je datován zhruba do 50. let minulého století a s rozmachem výpočetní techniky v průběhu let sílil její rozvoj do mnoha oblastí. V dnešní době má mezi numerickými postupy zcela zásadní postavení a na jejím základě pracuje mnoho inženýrských výpočetních programů jako je Ansys Mechanical APDL [18], jehož charakteristika je popsána níže. Z matematického hlediska vychází MKP z variačních principů, tedy při řešení problému se hledá stav, kdy určitá forma energie vyšetřovaného tělesa dosahuje stacionární hodnoty. [19]

Na rozdíl od klasického pohledu na pružnost tělesa, která vychází z představy rovnováhy na nekonečně malém elementu, tak jak již název naznačuje základní stavební jednotkou MKP je prvek konečných rozměrů. Celá geometrie zkoumaného tělesa je rozdělena na konečný počet elementů tvořící výpočtovou síť. Každý jednotlivý prvek je pak charakterizován jak dimenzí, tvarem a polohou, tak i počtem výpočtových uzlů. Tyto uzly jsou místa, která sousedící prvky společně sdílí a navzájem si tak předávají informace o hledaných neznámých parametrech (viz obr. 4.1.). [19]

Předností numerických metod je možnost aplikovat řešení na složitější problémy u těles jakýchkoliv tvarů. Tento fakt nelze využít u řešení analytických, kdy metody vychází z předpokladu použití elementárních tvarů, což vede k omezenému poli působnosti. Relativním omezením MKP jsou pak nároky na časovou délku výpočtu spojené s kapacitou dostupného hardwaru, jenž s vývojem techniky je v poslední době čím dál menší problém. Naopak výhodou analytických metod je získání výsledků a závislostí mezi vstupními a výstupními veličinami na celém objemu zkoumaného tělesa. Na rozdíl od MKP, kde na kvalitu výsledků má vliv jemnost použité sítě, tedy počet prvků a jejich topologie, a také správnost zadaných okrajových podmínek. [19]



Obr. 4.1. Základní typy prvků s výpočtovými uzly [19]

4.1 Ansys Mechanical APDL

V této diplomové práci je pro výpočet strukturálních analýz využíván program Ansys Mechanical APDL pracující v klasickém rozhraní staršího typu. Výhodou této verze je možnost nastavení parametrů a tím kontrolovat celý proces výpočtu. To je přínosné především pro zkušené uživatele. Nevýhodou pak je uživatelsky méně přívětivé pracovní prostředí a omezenost grafického vykreslování.

Ansys Mechanical APDL je celosvětově rozšířený a hojně využívaný výpočtový program od stejnojmenné firmy zaměřující se na inženýrské simulace. Společnost Ansys, Inc. se svými produkty disponuje na trhu od roku 1970. Její výpočtový program využívá metodiku konečných prvků a nachází uplatnění v mnoha oborech, jakými jsou klasické strojírenství, automobilový, energetický, stavební či procesní průmysl. Výjimkou není ani využití ve specifických oborech jako je biomechanika a mikroelektronika. Software lze charakterizovat následovně:

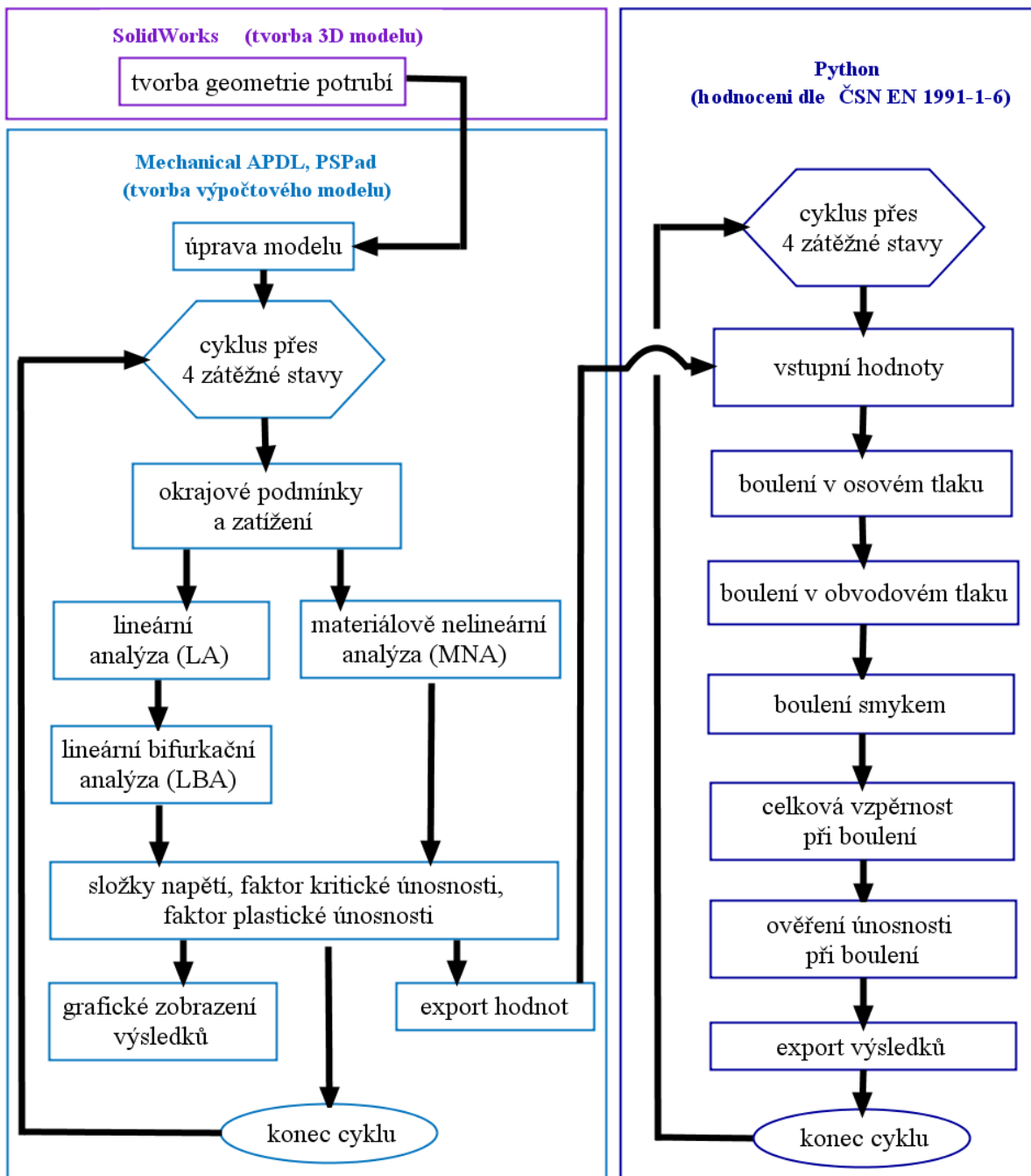
„Ansys Mechanical APDL je obecně nelineární, multifyzikální program zahrnující strukturální a termodynamickou analýzu, analýzu proudění kontinua, analýzu elektrostatických a elektromagnetických polí a akustické analýzy. Veškeré tyto analýzy lze jednak provádět jednotlivě, ale díky multifyzikálnímu pojetí programu ANSYS je lze také zahrnout do jediné, společné koncepce. ANSYS umožňuje nejen kontrolní výpočty, ale díky parametrizovaným výpočtovým modelům i citlivostní a optimalizační analýzy a rovněž výpočty spolehlivosti.“ [20]

Díky těmto možnostem patří k základním výpočtovým pomůckám napomáhající ke zlepšení procesu návrhu zařízení a ve svém důsledku ke zlepšení kvality a konkurenceschopnosti nových výrobků. [20]

Jak již bylo zmíněno, produkty firmy Ansys dokážou zpracovávat široké spektrum analýz v oblasti inženýrských simulací. Díky jejich propojení pomocí uživatelského rozhraní Workbench je možné provádět různé kombinace výpočtů. Lze například využít CFD analýzu proudění tekutiny okolo lopatek turbíny s jejich pevnostní analýzou a získat tak reálnou představu o chování lopatek a účinnosti turbíny. Prostředí Workbench tedy umožňuje sdílení dat a výsledků mezi jednotlivými programy. [21]

5. Postup řešení praktické části

Praktická část je tvořena ze tří dílů, které jsou detailně popsány v následujících kapitolách. Zjednodušený postup v rámci jednoho ze čtyř modelů znázorňuje vývojový diagram (viz obr. 5.1.). Nejprve byl vytvořen výchozí 3D model potrubí, který poté byl doplněn o přidavné komponenty v podobě podpurných konstrukcí a sedlových podpěr (v dalších modelech i vyztužení). Na připraveném modelu byla vytvořena výpočtová síť a následně aplikována zatížení, okrajové podmínky a byly provedeny konkrétní numerické analýzy. Tato část je dále rozebrána v kapitole 6. Výsledky analýz byly poté zhodnoceny v souladu s normou ČSN EN 1993-1-6 [13]. Tato část je blíže rozebrána v kapitole 7.

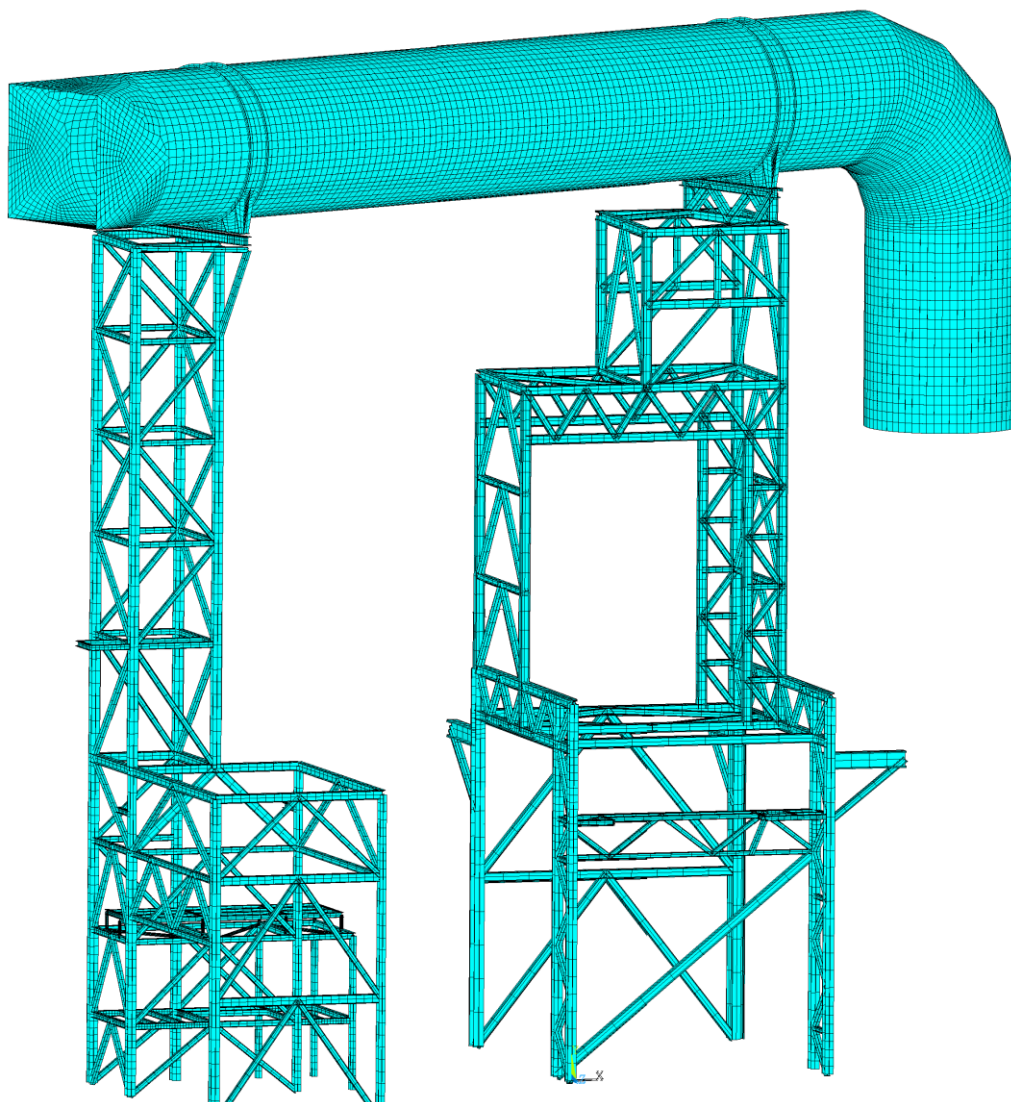


Obr. 5.1. Algoritmus řešení praktické části práce

6. Numerické analýzy

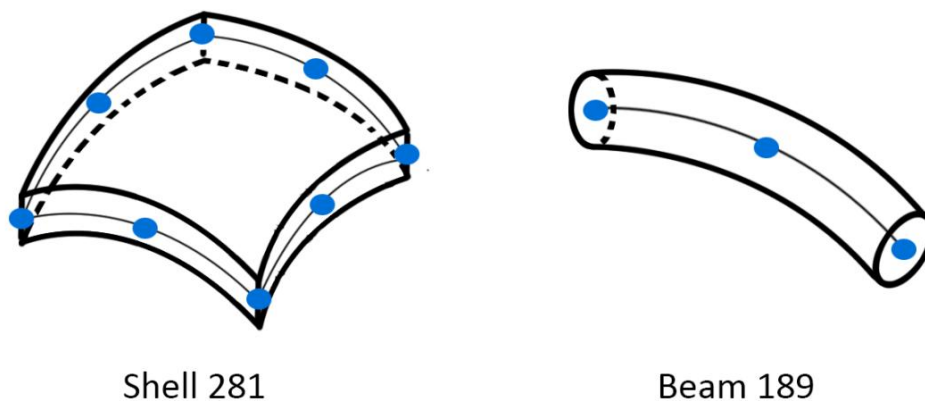
6.1 Tvorba modelu

Před samotným výpočtem bylo nutné vytvořit model potrubní části s doprovodnými komponenty v podobě podpůrných konstrukcí a sedlových uložení do stavu, kdy je možné je zatížit a hodnotit (viz obr. 6.1.). Geometrie tvořená dle dostupné výkresové dokumentace byla součástí zadání práce. V rámci optimalizace typu modelu se zvolila vhodná kombinace zjednodušení, kdy model byl tvořen prutovými a skořepinovými prvky. První část modelování probíhala v programu Ansys Mechanical APDL [18], kde byly vytvořeny obě podpůrné konstrukce. Druhá část zahrnovala tvorbu potrubí a sedlových podpěr v programu SolidWorks [22] a následný import zpět do prostředí Ansys. Modelování probíhalo ve dvou programech z důvodu snadnější tvorby, kdy se prutové prvky konstrukcí lépe tvořili v prostředí Ansys, plošné prvky byly naopak lépe tvořeny s využitím 3D CAD softwaru SolidWorks.



Obr. 6.1. Celkový model potrubí s přilehlými částmi

V rámci zjednodušení byl vytvořen kombinovaný model. Sestava se tedy skládala z idealizovaných prutových prvků (beam 189) a plošných prvků (shell 281). Prutové prvky reprezentují tvarové profily konstrukce a plošné prvky (shell 281) nahrazující objemové části sedlových podpor a samotné potrubí. Tyto konkrétní elementy, ze kterých je tvořena výpočtová síť, mají 3 uzly pro beam prvek a 8 pro shell prvek (viz obr. 6.2.). Dále pak z celkového reálného zařízení nebyly do modelu přeneseny části sloužící pro umožnění pohybu osob v podobě žebříků a plošin, most pro vedení potřebných kabelů a další drobné prvky, které mají zanedbatelný vliv na kvalitu výsledků zkoumaného potrubí. Materiálové vlastnosti pro konstrukční ocel S235 JR byly definovány pomocí lineárně elastického, izotropického modelu s hodnotami konstant modulu pružnosti v tahu 200 GPa a Poissonovým číslem 0,3 pro lineární analýzu. V rámci materiálově nelineární analýzy byl přidán ještě bilineární model bez zpevnění s hodnotou meze kluzu 235 MPa. Dalším krokem byla nutnost přepočtu hustoty materiálu z důvodu uvažování pouze ocelového potrubí, které bylo modelováno pomocí střednicové plochy. Ve skutečnosti má potrubní celek 3 vrstvy (ocelové potrubí, izolace a stěrkovací hmota), což má vliv na výslednou hmotnost celku. Bylo tedy potřeba zahrnout hustoty všech tří materiálů do jednoho, který bude použit při výpočtu. Přepočtená hustota potrubí se rovnala $14\,260\text{ kg/m}^3$.

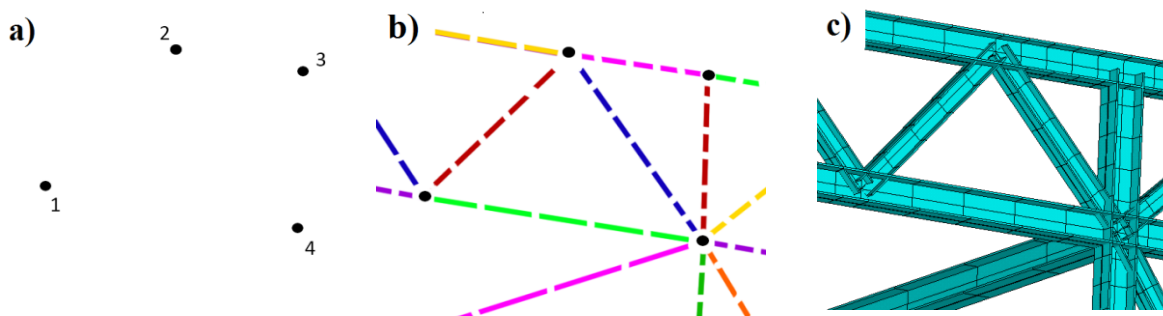


Obr. 6.2. Typy použitých elementů s výpočtovými uzly

6.1.1 Podpůrné konstrukce

Podpůrné konstrukce nesoucí váhu celého potrubí jsou tvořeny svařením tvarových profilů (především I profily) různých velikostí, které v modelu reprezentují prutové prvky, mající přiřazenou konkrétní průřezovou charakteristiku. Tyto prvky se používají v případech, kdy jsou průřezové rozměry části výrazně menší než jejich délka. Nejdříve bylo nutné vytvořit klíčové body (Key Points, dále jen KP), které tvoří místa styku více profilů najednou. Tyto KP jsou výchozími body pro propojení úsečkami tvořící osu nosného profilu. Každé čáře byl přiřazen konkrétní prvek typu beam s charakteristickým průřezem reprezentující velikost a vlastnosti. Na závěr bylo potřeba zvolit orientaci profilu pomocí třetího KP. Jelikož v tomto případě prutové prvky slouží pouze jako simulace reálného uložení a nejsou předmětem zkoumání, je pro výpočtovou síť zvolený počet 5-10 elementů v rámci každé úsečky dostačující. Postup je naznačen na obrázku Obr. 6.3. Zvláštností pak byla nutnost tvorby

vlastního profilu jedné ze stojných noh konstrukce, který program Ansys ve svých předefinovaných sekcích nenabízel. Jednalo se o specifický profil skládající se z klasického I profilu, na který přiléhal v podélné ose navařený T profil. Součástí konstrukcí byly i prvky typu shell sloužící jako nosná plocha pro sedlové podpěry.



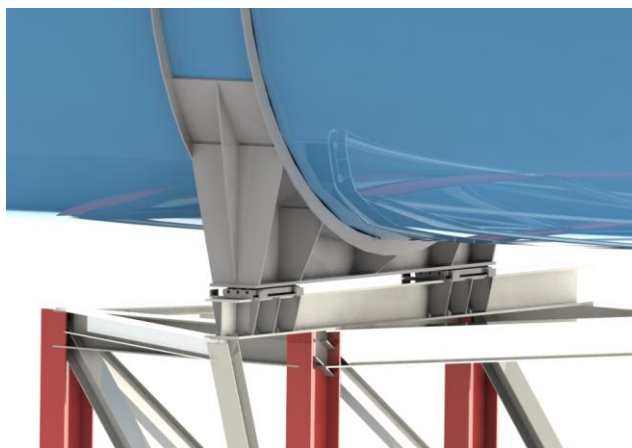
Obr. 6.3. a) tvorba KP, b) propojení KP úsečkami, c) přiřazení elementů úsečkám

6.1.2 Sedlové podpěry a potrubí

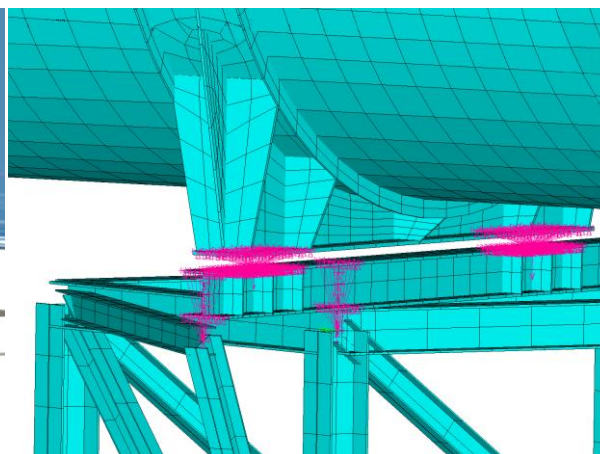
Sedlové podpěry slouží k uchycení potrubí k podpůrným konstrukcím. Podpěra blíže ke kolenu potrubí je pevná, druhá pak je kluzného charakteru z důvodu možných teplotních dilatací. Ve skutečném provedení je kluzná podpěra řešena pomocí válečků, které jsou v modelu nahrazené distribucí silových vazeb. V rámci zjednodušení lze uvažovat obě podpěry jako geometricky identické a díky vertikální symetrii byla modelována jen polovina součásti. Poté proběhl export sedlové podpěry z programu SolidWorks do programu Ansys, ve kterém byly provedeny nutné korekce v podobě odstranění zdvojených ploch a čar, jež vznikly při přenosu geometrie. Před vytvořením sítě se přiřadil plochám podpěry element typu shell s konkrétními tloušťkami. Samostatné potrubí bylo modelováno stejným způsobem jako sedlové podpěry s výjimkou nutnosti přidání jiného typu materiálu z důvodu uvedeném v kapitole 6.1.

Celá sestava se skládala ze dvou odlišných podpůrných konstrukcí, dvou identických sedlových podpěr a samotného spalínového potrubí. Po sloučení a správném rozmístění všech komponentů v rámci sestavy proběhla korekce pomocí příkazu `nummrg, all` sjednocující identické entity, které se vyskytují na stejném místě.

Jelikož je sestava tvořena elementy typu shell a beam, které spolu nekooperují, bylo potřeba je propojit. To zajistil prvek RBE3, který slouží k distribuci sil a momentů z jednoho uzlu (master) na více uzlů (slaves) ploch nebo čar. Tento prvek byl využitý u obou konstrukcí pro propojení prutových uzlů s plošnými uzly nosného profilu a také jako náhrada kluzného spojení sedlové podpěry (viz obr 6.4a a 6.4b). V případě kluzného uložení, prvek RBE3 přenáší síly a momenty ve všech směrech kromě směru v ose potrubí, u pevného pak přenáší vše.



Obr. 6.4a Kluzné uložení potrubí



Obr. 6.4b Náhrada kluzného uložení pomocí prvku RBE3

6.2 Průběh výpočtu

Po vytvoření modelu následovala část, kdy bylo třeba aplikovat jednotlivé zatěžující podmínky a tím postupně získávat dílčí hodnoty k posouzení. Z důvodu náročnosti výpočtu, v podobě mnoha kombinací stavů, byl průběh zatěžování a export výsledků potřebných pro následné hodnocení zautomatizován pomocí makra, které bylo tvořeno společně s Bc. Janem Jelínkem (viz příloha 3). To sdružuje jednotlivé příkazy, které lze i zadávat přímo do příkazového řádku v prostředí Ansys Mechanical APDL [18]. Přes počáteční časovou náročnost byl zvolený způsob zadávání uživatelsky přívětivý především z hlediska opakované aplikace lišící se pouze v některých ohledech. V této diplomové práci byl měnícím se faktorem typ modelu, u kterého se hledal optimální rozestup výztuh v rámci několika zvolených návrhů. Ke tvorbě výpočetního makra lze použít jakýkoliv textový editor, v tomto případě byl zvolen volně šiřitelný program PSPad umožňující zvýraznění grafické syntaxe jednotlivých složek příkazů APDL a tím lepší orientaci. Makro se skládalo z aplikace okrajových podmínek a spuštění výpočtových cyklů, které zahrnují export výsledků, tedy ze dvou hlavních částí, jež jsou popsány v kapitolách níže.

6.2.1 Okrajové podmínky

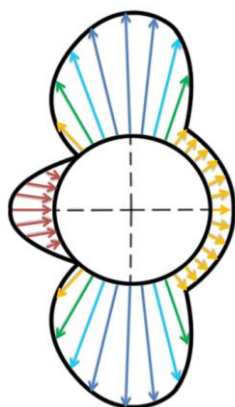
V diplomové práci je řešeno potrubí náchylné ke ztrátě stability vlivem provozního zatížení a klimatických podmínek v podobě působení sil od větru, sněhu a případné seizmicity. Všechny tyto faktory byly na zkoumané potrubí aplikovány současně, čímž vznikl charakterizující zatěžující stav. V rámci jednoho modelu byly spočítány a hodnoceny celkem 4 různé zatěžovací stavy lišící se pouze dominantností jedné ze složek (viz tabulka 6.1.). Dominantnost složek, označená v tabulce tučně, byla určena vynásobením její nominální hodnoty přídatným součinitelem zatížení nabývajícím hodnoty 1,5, ostatní složky v rámci zatěžujícího stavu pak byly vynásobeny součinitelem s hodnotou 1,35. Tyto hodnoty součinitelů určuje norma ČSN EN 1990 s upřesněním v národních přílohách. [23] Záležitost kombinací zatížení je rozsáhlejší problém a dalo by se jím zabývat podrobněji, není ovšem předmětem této práce a proto kombinace byly zvoleny na základě doporučení vedoucího práce.

Tabulka 6.1. Hodnoty zatěžujících složek

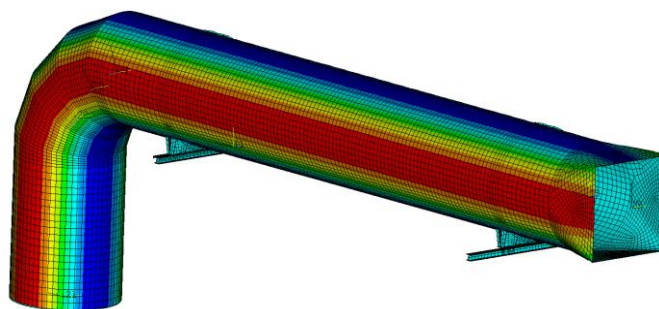
stav	vítr [kPa]	sníh [kPa]	seizmicita [-]	podtlak [kPa]
zatěžující stav č.1	1,016	1,620	0,054	1,350
zatěžující stav č.2	0,911	1,800	0,054	1,350
zatěžující stav č.3	0,911	1,620	0,060	1,350
zatěžující stav č.4	0,911	1,620	0,054	1,500

a) Zatížení větrem

Zatížení větrem je proměnné v čase a působí přímo jako tlak na vnější povrchy uzavřených konstrukcí. V tomto případě byla brána hodnota zatížení větrem jako hodnota statická. Zatěžující tlak od složky větru vycházel z normy ČSN 1991-1-4 [24], kdy výsledná hodnota se odvíjela především od typu terénu okolí, konkrétní geografické poloze a nadmořské výšce zkoumaného zařízení. Její hodnota je uvedena v tabulce zatížení 6.1. a měnila se v závislosti na obvodové souřadnici pláště potrubí, kdy průběh je znázorněn na obr. 6.5. a obr. 6.6. Z tohoto důvodu bylo nutné vytvořit i odpovídající souřadný systém pro jednotlivé segmenty pláště. Průběh aplikace zatížení je řízen vztahem 6.1. podle Greniera [25], jenž je vyjádřen periodickými funkcemi cosinus.



Obr. 6.5. Ilustrační rozložení tlaku větru po obvodu pláště v řezu [13]



Obr. 6.6. Zatížení od větru na potrubí v programu Ansys

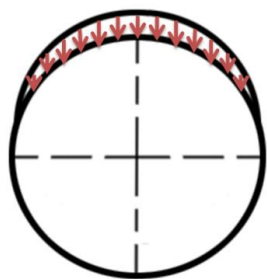
$$C_s = -0,55 + 0,25 \cdot \cos \theta + 1,0 \cdot \cos 2\theta + 0,45 \cdot \cos 3\theta - 0,15 \cdot \cos 4\theta \quad 6.1.$$

b) Zatížení seizmicitou

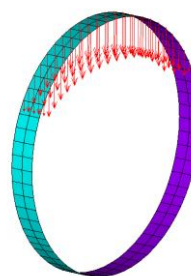
Vliv seizmicity byl vyjádřen jako násobek gravitačního zrychlení ve třech základních směrech. Dle normy ČSN EN 1998-1 [26] je hodnota násobku 0,04 a vychází opět ze specifických oblastí výskytu zemětřesení. V programu Ansys je zatížení aplikováno do těžiště modelu jako výsledný vektor přetížení.

c) Zatížení sněhem

Zatížení sněhem bylo vypočteno dle normy ČSN 1991-1-3 [27]. Norma poskytuje návod pro stanovení zatížení, která mají být použita pro konstrukční návrh pozemních a inženýrských staveb s lokalitou, kde nadmořská výška dosahuje maximálně 1500 m nad hladinou moře. Hodnota se odvíjí od tvarového typu zařízení a také lokality provozu. V případě zkoumaného potrubí, které lze definovat jako válcovou střechu, byla hodnota rovna 1,2 kPa (viz tabulka 6.1.). Aplikace zatížení sněhem se odvíjela také od sklonu plochy, kdy tlak nebyl použit pro plochy mající úhel odklonu větší než 60° od vodorovné roviny, jelikož by se sníh na těchto plochách neudržel. Pro ověření zda zatížení bude platné, tedy sníh nebude odtávat kvůli provozní teplotě uvnitř potrubí, byla vypočtena hodnota teploty vyskytující se na povrchu izolace. Výpočtem prostupu tepla bylo ověřeno, že teplota na povrchu izolace se liší o $0,31^\circ\text{C}$ od teploty okolí, sníh by pravděpodobně neodtával. Aplikace v prostředí Mechanical APDL je znázorněna na obr. 6.8, ilustračně pak na obr. 6.7.



Obr. 6.7. Ilustrační rozložení tlaku sněhu po obvodu pláště v řezu

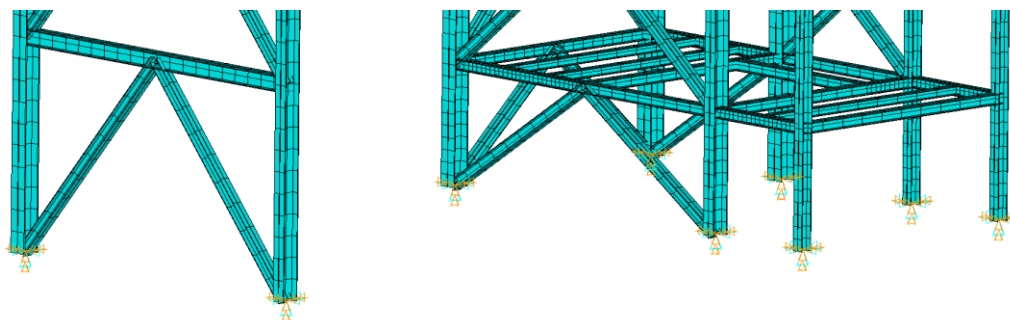


Obr. 6.8. Zatížení od sněhu na potrubí v řezu v programu Ansys

d) Provozní zatížení

Provozním zatížením jsou myšleny projevy účinků tlaku a teploty uvnitř zkoumaného potrubí, které se odvíjí od způsobu provozu. Dle dostupných dokumentů je potrubí provozováno v tlakovém rozmezí -1 kPa až 5 kPa a teplotě 70°C . Jelikož potrubní celek je hodnocen na ztrátu stability byl brán v úvahu pouze podtlak jako horší ze způsobů zatížení. Přetlak by totiž působil proti vnějšímu zatížení a tím by se ve výsledku celkový zatěžující stav zmírňoval. S tím souvisí i nutnost aplikace sil na koncích, které simulují vliv zařízení, které jsou na potrubí napojeny.

Okrajové podmínky v podobě zamezení posuvů byly použity pro koncové prvky prutových konstrukcí, které suplují ukotvení celého modelu (viz obr. 6.9.).



Obr. 6.9. Ukotvení prutových konstrukcí

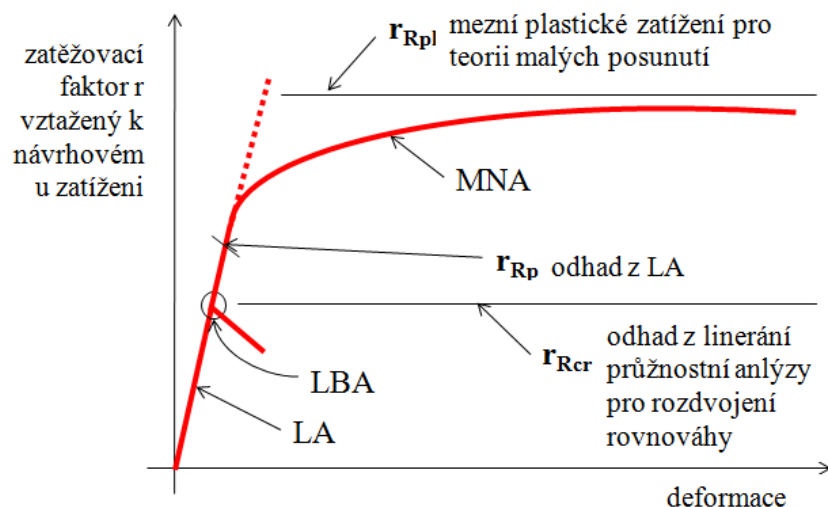
6.2.2 Výpočtové cykly a export výsledků

Po aplikaci všech potřebných okrajových podmínek bylo možné spustit výpočtovou část makra pro první model, který neobsahoval žádné vyztužení, pouze L profily na obou koncích potrubí sloužící k připojení jiných zařízení. Na základě zjištění problematických míst z výsledku bylo provedeno vyztužení modelu a tím proběhl výpočet znovu. Výpočtový cyklus byl proveden přes všechny 4 zatěžující stavy uvedené v tabulce 6.1. Skládal se z lineární statické analýzy (LA), materiálově nelineární analýzy (MNA) a analýzy lineárního boulení (LBA) s účinky předpětí vypočtené v prvně jmenovaném rozboru. [13]

Za pomoci statické analýzy (LA) byl pro každý mód nalezen uzel s největší deformací, u kterého byly zjištěny obvodové (σ_θ), podélné (σ_x) a smykové ($\sigma_{\theta x}$) složky napětí v rámci příslušného souřadného systému. Tyto hodnoty slouží jako podklad pro výpočet faktoru referenční plastické únosnosti r_{Rpl} potřebné pro ověřování a hodnocení dle ČSN EN 1993-1-6 (viz obr. 6.10.). Hodnocení se zaměřuje pouze na válcové skořepiny, z tohoto důvodu byly posuzovány pouze uzly ležící na válcových částech potrubí, jiné uzly ležící na podpůrných konstrukcích nebyly na ztrátu stability posuzovány. [13]

Výstupem bifurkační analýzy (LBA) byl faktor pružné kritické únosnosti při boulení r_{Rcr} , tedy násobek nominálního zatížení, při kterém vznikne ztráta stability odpovídající nejnižšímu vlastnímu číslu a příslušný tvar deformace skořepiny při kritickém zatížení odpovídající nejnižšímu vlastnímu tvaru. Pro výpočet vlastních čísel byla použita bloková Lanczosova metoda, která je vhodná pro nalezení více tvarů, v tomto případě 25 tvarů (módů) pro každý zatěžující stav. [13]

Výstupem materiálově-nelineární analýzy (MNA) je hodnota faktoru referenční plastické únosnosti r_{Rpl} , který udává násobek nominálního zatížení při ztrátě plastické únosnosti modelu. Tato analýza byla použita pro dílčí ověření zmíněného r_{Rpl} s hodnotou vypočtenou ze vzorce pomocí napětí z lineární analýzy. MNA využívá pro výpočet nelineární elastoplastický model bez zpevňujících účinků. Výpočtovou podstatou analýzy je postupné přidávání zatížení až do času ztráty integrity modelu, jenž v přepočtu odpovídá hledanému faktoru plastické únosnosti, tedy násobku nominálního zatížení. [13]



Obr. 6.10. Definice referenčních faktorů v globální analýze MNA a LBA [13]

7. Výsledky výpočtu a hodnocení dle ČSN EN 1993-1-6

Pro vyhodnocení numerických dat získaných výpočtem v programu Ansys Mechanical APDL [18] byla využita norma ČSN EN 1993, Navrhování ocelových konstrukcí - část 1-6: Pevnost a stabilita skořepinových konstrukcí [13], která udává pravidla pro návrh ocelových konstrukcí tvaru rotační skořepiny. Norma uvádí tři základní možnosti hodnocení boulení. První metoda je na základě návrhu pomocí napětí. Jedná se o jednoduchý postup s velice konzervativními výsledky. Druhá metoda (návrh pomocí LBA s předpětím z LA) vychází z lineárních analýz MKP, což je z hlediska náročnosti výpočtu přívětivé, výsledky jsou přesnější a méně konzervativnější. V poslední metodě (GMNIA – geometricky materiálově nelineární analýza) jsou brány v potaz i imperfekce, příprava modelu je složitější ale hodnocení je jednodušší a umožňuje sledování přesného průběhu ztráty stability, jelikož je časově náročná používá se jen výjimečně. [13]

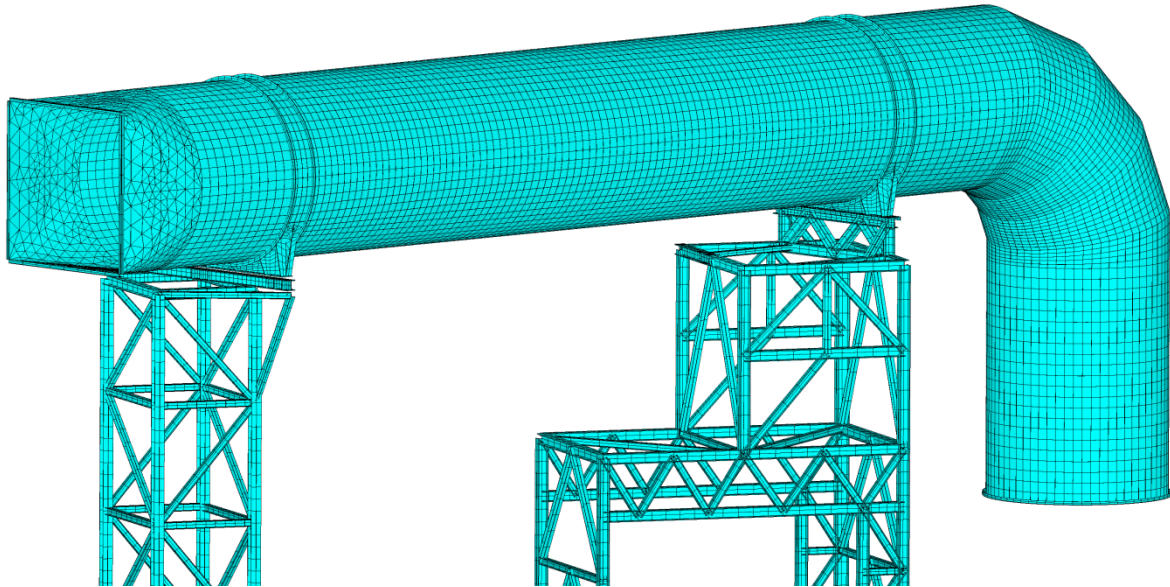
Pro ověření náchylnosti ke ztrátě stability a tím i účinnosti vyztužení (pro modely s výtuhami) byl využit postup z normy (kapitola 8.6), který uvádí návrh pomocí globální numerické analýzy MNA a LBA. Postup je nastíněn v kapitole 7.1 této práce a mimo jiné vyžaduje určení referenční plastické únosnosti r_{Rpl} , kterou lze získat ze složek napětí lineární analýzy nebo přímo provedením materiálově-nelineární analýzy. [13]

Ze stejných důvodů uvedených v kapitole 6.2 bylo posouzení dle normy zautomatizováno pomocí výpočetního softwaru s využitím programovacího jazyka Python (viz příloha 4).[28] Výchozím subjektem pro hodnocení byl exportovaný soubor s potřebnými hodnotami složek napětí a faktoru kritické únosnosti při boulení. Program vyžadoval opět aplikaci cyklů přes všech 25 módů s integrovanými podmínkami rozhodování, které vyžaduje postup v normě. Jelikož výchozí soubor obsahoval i uzly s největší deformací ležící mimo zkoumané válcové části potrubí, bylo nutné tento fakt zohlednit v programu a nezahrnovat je tak do hodnocení.

Výpočet v rámci analýzy MNA byl zautomatizován stejným způsobem jako v případě předchozího odstavce s tím, že r_{Rpl} získané ze složek lineární analýzy (viz vztah 7.4.) bylo nahrazené hodnotou z MNA. [13]

7.1 Hodnocení modelu č.1

První hodnocený model zobrazený na obr. 7.1. neobsahoval žádné vyztužující prvky kromě konců potrubí, kde L profily fungující jako připojení pro jiné zařízení. Tento model sloužil jako výchozí model, na kterém je demonstrován postup ověření náchylnosti ke ztrátě stability v souladu s normou [13]. Ukázkový výpočet byl proveden na jednom z vybraných vlastních tvarů (mód 1) zatěžujícího stavu č.1, který udává složky napětí a kritickou únosnost při boulení (viz příloha 1a).



Obr. 7.1. Výpočtový model č.1

Ověření probíhalo následujícím postupem dle normy [13].

Znamé materiálové charakteristiky:

$$f_y = 235 \text{ MPa} - \text{mez kluzu}$$

$$R = 2653 \text{ mm} - \text{poloměr skořepiny}$$

$$t = 5 \text{ mm} - \text{tloušťka skořepiny}$$

Znamé hodnoty z výsledků MKP:

$$r_{RCR} \cong 1,656 - \text{faktor kritické únosnosti při boulení}$$

$$\sigma_x \cong 67,498 \text{ MPa} - \text{podélné napětí}$$

$$\sigma_\theta \cong 76,190 \text{ MPa} - \text{obvodové napětí}$$

$$\sigma_{x\theta} \cong 2,607 \text{ MPa} - \text{smykové napětí}$$

Pro mezní stav boulení se mají tlaková napětí i vnitřní síly ve směru meridiánu i v obvodovém směru brát kladně, tudíž bylo počítáno s opačnými hodnotami složek napětí, ze kterých vychází membránové vnitřní síly (viz vztah 7.1, 7.2, 7.3).

$$n_x = \sigma_x \cdot t = 67,498 \cdot 5 \cong 337,490 \text{ N/mm} \quad (7.1.)$$

$$n_\theta = \sigma_\theta \cdot t = 76,190 \cdot 5 \cong 380,950 \text{ N/mm} \quad (7.2.)$$

$$n_{x\theta} = \sigma_{x\theta} \cdot t = 2,6 \cdot 5 \cong 13,035 \text{ N/mm} \quad (7.3.)$$

Faktor referenční plastické únosnosti r_{Rpl} (vztah 7.4.) lze konzervativně určit z lineární analýzy LA s použitím návrhových hodnot posuzované kombinace zatížení, tedy z výsledků statické MKP analýzy.

$$r_{Rpl} = \frac{f_y \cdot t}{\sqrt{n_x^2 - n_x \cdot n_\theta + n_\theta^2 + 3 \cdot n_{x\theta}^2}} \quad (7.4.)$$

$$r_{Rpl} = \frac{235 \cdot 5}{\sqrt{(337,490)^2 - 337,490 \cdot 380,950 + 380,950^2 + 3 \cdot 13,035^2}}$$

$$r_{Rpl} \cong 3,247$$

Celková poměrná štíhlost λ_{ov} byla stanovena ze vztahu 7.5.

$$\lambda_{ov} = \sqrt{\frac{r_{Rpl}}{r_{Rcr}}} = \sqrt{\frac{3,247}{1,656}} \cong 1,400 \quad (7.5.)$$

Parametry boulení při osovém tlaku:

$$\eta_x = 1 - \text{interakční exponent}$$

$$\beta_x = 0,6 - \text{součinitel rozsahu plastické oblasti}$$

$$\lambda_{0,x} = 0,2 - \text{osová poměrná štíhlost}$$

$$Q_x = 16 - \text{součinitel vlivu jakosti}$$

Charakteristická amplituda imperfekce Δw_k v rámci boulení při osovém tlaku se vypočte ze vztahu 7.6.

$$\Delta w_k = \frac{1}{Q_x} \cdot \sqrt{\frac{\bar{r}}{t}} \cdot t = \frac{1}{16} \cdot \sqrt{\frac{2653}{5}} \cdot 5 \cong 7,2 \text{ mm} \quad (7.6.)$$

Osový součinitel imperfekce v pružném stavu α_x u boulení v osovém tlaku se určí pomocí vztahu 7.7.

$$\alpha_x = \frac{0,62}{1 + 1,91 \cdot \left(\frac{\Delta W_k}{t}\right)^{1,44}} = \frac{0,62}{1 + 1,91 \cdot \left(\frac{7,2}{5}\right)^{1,44}} \cong 0,147 \quad (7.7.)$$

Hodnota mezní relativní štíhlosti v plastické oblasti se určí ze vztahu 7.8.

$$\lambda_{p,x} = \sqrt{\frac{\alpha_x}{1 - \beta_x}} = \sqrt{\frac{0,147}{1 - 0,6}} \cong 0,606 \quad (7.8.)$$

Celkový součinitel vzpěrnosti při boulení $\chi_{ov,x}$ se při splnění podmínky stanoví ze vztahu 7.9, 7.10. nebo 7.11.

$$\chi_{ov,x} = 1 \quad \text{pokud} \quad \lambda_{ov} \leq \lambda_{0,x} \quad (7.9.)$$

$$\chi_{ov,x} = 1 - \beta_x \cdot \left(\frac{\lambda_{ov} - \lambda_{0,x}}{\lambda_{p,x} - \lambda_{0,x}}\right)^{\eta_x} \quad \text{pokud} \quad \lambda_{0,x} \leq \lambda_{ov} \leq \lambda_{p,x} \quad (7.10.)$$

$$\chi_{ov,x} = \frac{\alpha_x}{\lambda_{ov}^2} \quad \text{pokud} \quad \lambda_{p,x} \leq \lambda_{ov} \quad (7.11.)$$

V tomto případě platí vztah 7.11, kdy:

$$\lambda_{p,x} \leq \lambda_{ov}$$

$$0,606 \leq 1,400$$

$$\chi_{ov,x} = \frac{\alpha_x}{\lambda_{ov}^2} = \frac{0,147}{1,400^2} \cong 0,075$$

Parametry boulení při obvodovém tlaku:

$$\eta_\theta = 1 - \text{interakční součinitel}$$

$$\beta_\theta = 0,6 - \text{součinitel rozsahu plastické oblasti}$$

$$\lambda_{0,\theta} = 0,4 - \text{mezní obvodová poměrná štíhlost při stlačení}$$

$$\alpha_\theta = 0,5 - \text{obvodový součinitel imperfekce v pružném stavu}$$

Hodnota mezní relativní štíhlosti v plastické oblasti se určí ze vztahu 7.12.

$$\lambda_{p,\theta} = \sqrt{\frac{\alpha_\theta}{1 - \beta_\theta}} = \sqrt{\frac{0,5}{1 - 0,6}} \cong 1,118 \quad (7.12.)$$

Celkový součinitel vzpěrnosti při boulení $\chi_{ov,\theta}$ se při splnění podmínky stanoví ze vztahu 7.13, 7.14. nebo 7.15.

$$\chi_{ov,\theta} = 1 \quad \text{pokud} \quad \lambda_{ov} \leq \lambda_{0,\theta} \quad (7.13.)$$

$$\chi_{ov,\theta} = 1 - \beta_\theta \cdot \left(\frac{\lambda_{ov} - \lambda_{0,\theta}}{\lambda_{p,\theta} - \lambda_{0,\theta}} \right)^{\eta_\theta} \quad \text{pokud} \quad \lambda_{0,\theta} \leq \lambda_{ov} \leq \lambda_{p,\theta} \quad (7.14.)$$

$$\chi_{ov,\theta} = \frac{\alpha_\theta}{\lambda_{ov}^2} \quad \text{pokud} \quad \lambda_{p,\theta} \leq \lambda_{ov} \quad (7.15.)$$

V tomto případě platí vztah 7.15, kdy:

$$\begin{aligned} \lambda_{p,\theta} &\leq \lambda_{ov} \\ 1,118 &\leq 1,400 \\ \chi_{ov,\theta} &= \frac{\alpha_\theta}{\lambda_{ov}^2} = \frac{0,5}{1,400^2} \cong 0,255 \end{aligned}$$

Parametry boulení při smyku:

(dle normy [27] je výpočet parametrů při boulení smykem totožný s parametry při boulení v obvodovém tlaku)

$$\eta_{x\theta} = 1 - \text{interakční exponent}$$

$$\beta_{x\theta} = 0,6 - \text{součinitel rozsahu plastické oblasti}$$

$$\lambda_{0,x\theta} = 0,4 - \text{mezní smyková poměrná štíhlost při stlačení}$$

$$\alpha_{x\theta} = 0,5 - \text{obvodový součinitel imperfekce v pružném stavu}$$

Hodnota mezní relativní štíhlosti v plastické oblasti se určí ze vztahu 7.16.

$$\lambda_{p,x\theta} = \sqrt{\frac{\alpha_{x\theta}}{1 - \beta_{x\theta}}} = \sqrt{\frac{0,5}{1 - 0,6}} \cong 1,118 \quad (7.16.)$$

Celkový součinitel vzpěrnosti při boulení $\chi_{ov,x\theta}$ se při splnění podmínky stanoví ze vztahu 7.17, 7.18. nebo 7.19.

$$\chi_{ov,x\theta} = 1 \quad \text{pokud} \quad \lambda_{ov} \leq \lambda_{0,x\theta} \quad (7.17.)$$

$$\chi_{ov,x\theta} = 1 - \beta_{x\theta} \cdot \left(\frac{\lambda_{ov} - \lambda_{0,x\theta}}{\lambda_{p,x\theta} - \lambda_{0,x\theta}} \right)^{\eta_{x\theta}} \quad \text{pokud} \quad \lambda_{0,x\theta} \leq \lambda_{ov} \leq \lambda_{p,x\theta} \quad (7.18.)$$

$$\chi_{ov,x\theta} = \frac{\alpha_{x\theta}}{\lambda_{ov}^2} \quad \text{pokud} \quad \lambda_{p,x\theta} \leq \lambda_{ov} \quad (7.19.)$$

V tomto případě platí vztah 7.19, kdy:

$$\lambda_{p,x\theta} \leq \lambda_{ov}$$

$$1,118 \leq 1,400$$

$$\chi_{ov,x\theta} = \frac{\alpha_{x\theta}}{\lambda_{ov}^2} = \frac{0,5}{1,400^2} \cong 0,255$$

Celkový součinitel vzpěrnosti při boulení χ_{ov} byl brán jako nejmenší hodnota při ověření boulení v osovém tlaku, obvodovém tlaku a boulení smykem. Jeho hodnota je tedy:

$$\chi_{ov} = \min\{\chi_{ov,x}; \chi_{ov,\theta}; \chi_{ov,x\theta}\} = \min\{0,075; 0,255; 0,255\} = 0,075$$

Faktor charakteristické únosnosti při boulení r_{Rk} je určen vztahem 7.20.

$$r_{Rk} = \chi_{ov} \cdot r_{Rpl} = 0,075 \cdot 3,247 \cong 0,244 \quad (7.20.)$$

Faktor návrhové únosnosti při boulení r_{Rd} je určen vztahem 7.21.

$$\gamma_{M1} = 1,1 - \text{dílní součinitel při boulení}$$

$$r_{Rd} = \frac{r_{Rk}}{\gamma_{M1}} = \frac{0,244}{1,1} \cong 0,222 \quad (7.21.)$$

Má být splněna podmínka ověření únosnosti při boulení (vztah 7.22).

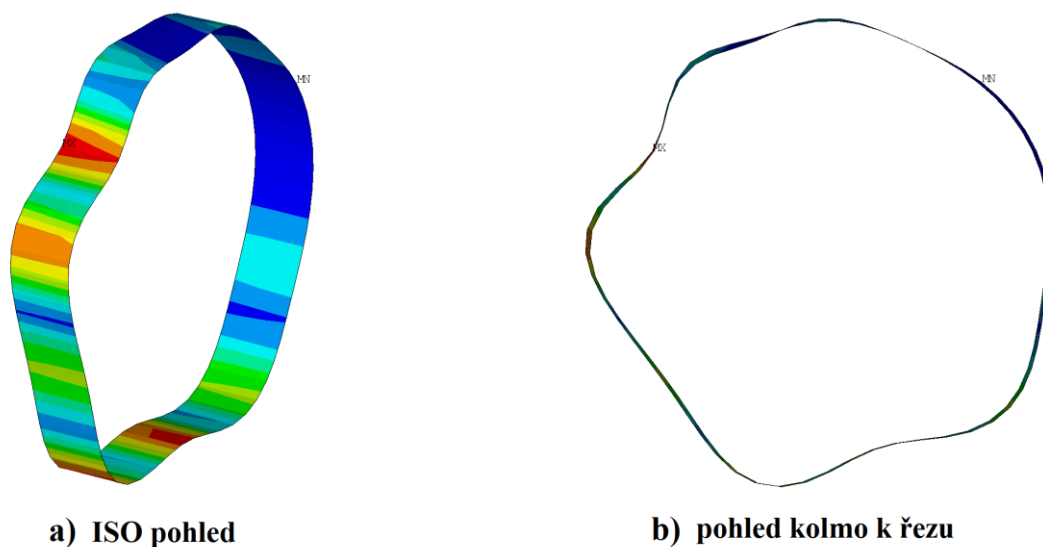
$$r_{Rd} \geq 1 \quad (7.22.)$$

$$0,222 \not\geq 1$$

7.1.1 Dílčí závěr modelu č.1

Pokud není splněna podmínka ze vztahu 7.22. pro všechny hodnocené vlastní tvary v rámci všech čtyř zatěžujících stavů, nevyhovuje ani zkoumaný model, což znamená nutnost použití výztuh, případně optimalizace jejich rozmístění. V tomto ukázkovém výpočtu byly brány zaokrouhlené hodnoty na tři desetinná místa, proto se jednotlivé výsledky mohou mírně lišit od hodnot vypočtených pomocí zautomatizovaného výpočtu, kde je počítáno s hodnotami nezaokrouhlenými. Kritické body z jednotlivých vlastních tvarů (módů) se nacházely po celém potrubí. Na obr. 7.3. lze vidět vlastní tvar, kde nejkritičtější místo, tedy místo s největší deformací, bylo na nejdelší nevyztužené části potrubí. Model č.1 na základě zhodnocení vycházejícího z LA ani MNA nevyhovuje požadavkům normy, proto musí být vyztužen. Dle podmínky model nevyhovuje téměř pětinasobně.

Pro vlastní tvar 12 byl proveden řez středovou částí potrubí. Z řezu (viz obr. 7.2) je patrné, že tento konkrétní mód se ve středové nevyztužené části o délce 23 618 mm zdeformoval do 5-6 obvodových vln. Deformace v podobě počtu vln odpovídají teoretickému ověření jednoho z iteračních výpočtů uvedenému v následující kapitole 7.2 pro stejnou délku, který udává 5 vln. Na tomto ověření lze vidět, že teoretický výpočet počtu vln téměř odpovídá praktickým výsledkům dosažených MKP analýzou. Mírnou odchylku v podobě počtu vln způsobuje nesymetrické zatížení po obvodu, naopak u teoretického výpočtu je uvažováno se zatížením symetrickým.



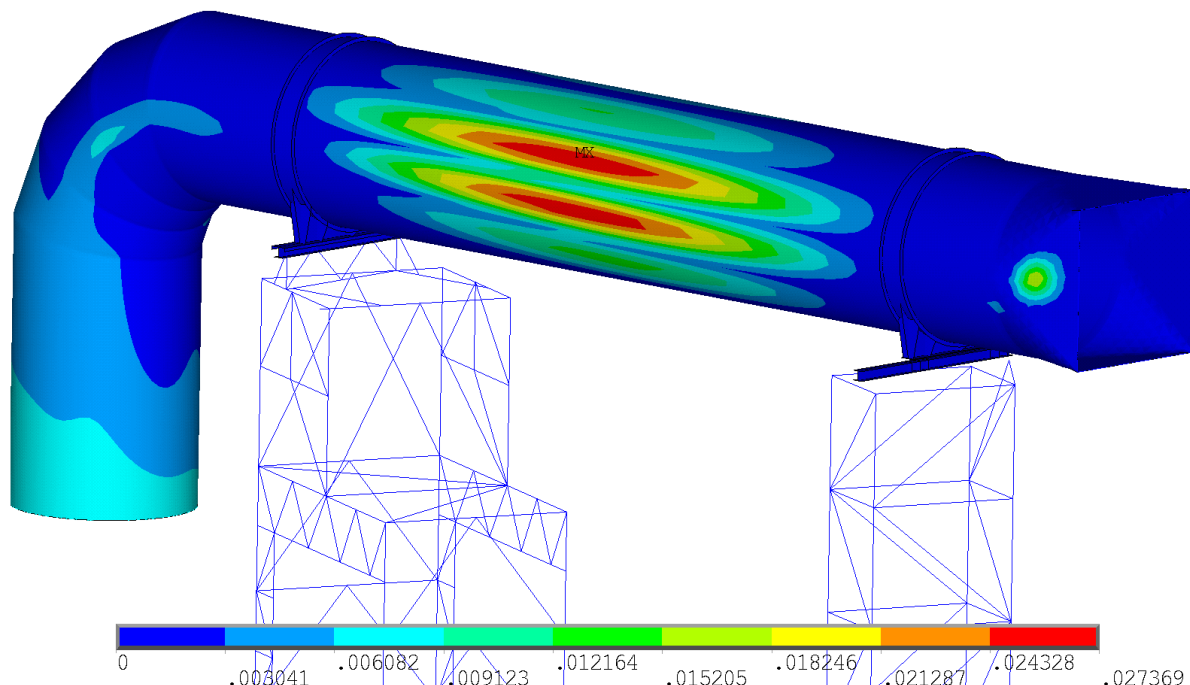
Obr. 7.2. Zvětšená deformace středové části potrubí ve tvaru 5-6 obvodových vln

NODAL SOLUTION
 SUB =6
 FACT=2.50253
 USUM (AVG)
 RSYS=0
 DMX =.027369
 SMX =.027369

ANSYS
 R16.2

Academic

MAY 4 2016
 18:24:17
 PLOT NO. 1

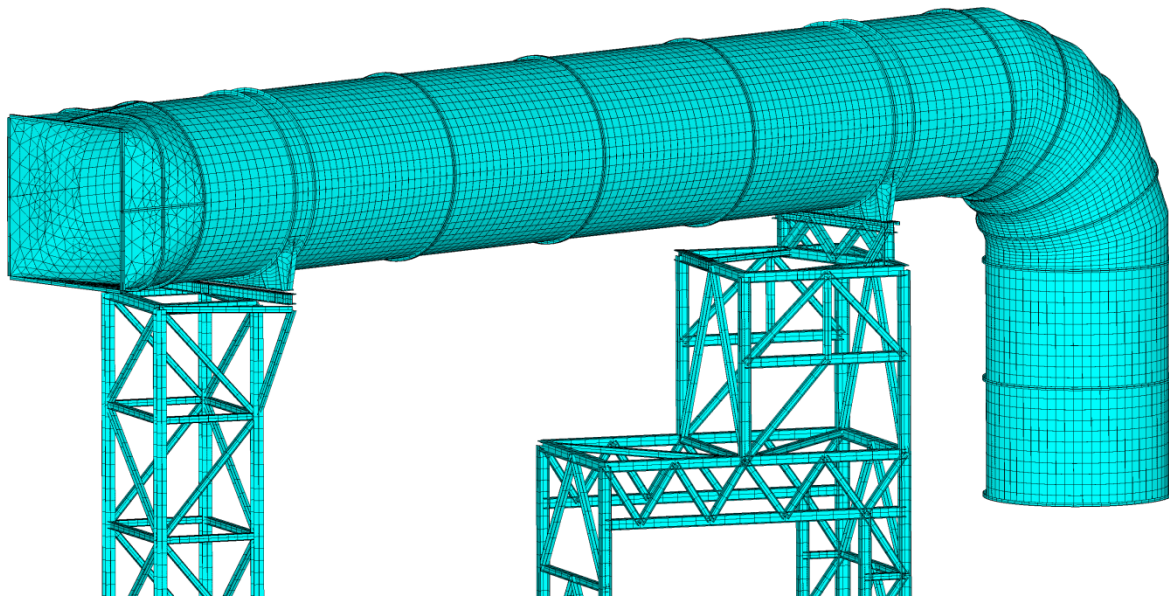


Obr. 7.3. Výsledné deformace [mm] modelu č.1 a zatěžujícího stavu č.1 pro mód 6

7.2 Hodnocení modelu č.2

Model č.1 nevyhovoval požadavkům normy, proto bylo potřeba použít vyztužení, které náchylnost ke ztrátě stability snižuje. Jako zmírňující prvky byly zvoleny tvarové profily T a L o rozměrech 100x100x11mm použité především po obvodu potrubí. Vyztužující prvek s charakteristickým průřezem ve tvaru L byl použit pro konce potrubí, tak jako v předchozím modelu, prvek ve tvaru T pak na všechna ostatní vyztužení (viz obr. 7.4.).

První návrh rozmístění výztuh byl vypočten pomocí normy ČSN 13 445 – 3 [29], která udává maximální nevyztuženou délku pro válcové skořepiny. Výpočet dle normy byl proveden pouze z informativního důvodu tak, aby odhad rozestupu pro model č.2 byl podložen hodnotou a neodvihal se pouze od náhodného zvolení. Výpočet probíhal v rámci kapitoly 8.5.2.2 následujícím postupem za pomoci programu Maple a ve spolupráci s Bc. Janem Jelínkem (viz příloha 5). [30]



Obr. 7.4. Výpočtový model č.2

Znamé charakteristiky:

$$\sigma_e = 235 \text{ MPa} - \text{dovolená elastická hodnota}$$

$$R = 2653 \text{ mm} - \text{poloměr skořepiny}$$

$$t = 5 \text{ mm} - \text{tloušťka skořepiny}$$

$$E = 200\,000 \text{ MPa} - \text{modul pružnosti v tahu}$$

$$\mu = 0,3 - \text{Poissonovo číslo}$$

$$P = 0,00358 \text{ MPa} - \text{výpočtové zatížení skořepiny}$$

Ze známých hodnot byl vypočten teoretický tlak P_y , při kterém střední obvodové napětí ve středu pole mezi výtuhami na válcovém plášti dosáhne meze kluzu (viz vztah 7.23.).

$$P_y = \frac{\sigma_e \cdot t}{R} = \frac{235 \cdot 5}{2653} \cong 0,443 \text{ MPa} \quad (7.23.)$$

Následně se vypočte hodnota Z , která uvádí charakteristický poměr délky skořepiny (viz vztah 7.24.). Jako počáteční hodnota iteračního výpočtu byla zvolena délka skořepiny 10 000 mm, která je hledaným výchozím parametrem nevyztužené délky.

$$Z = \frac{\pi \cdot R}{L} = \frac{\pi \cdot 2653}{10\,000} \cong 0,83 \quad (7.24.)$$

Vypočte se střední hodnota elastické poměrné deformace při zborcení ε ze vztahu 7.25, kde n_{cyl} je rovno 2 a jedná se o počáteční nástřel parametru počtu obvodových vln, který se mění iteračně spolu s délkou.

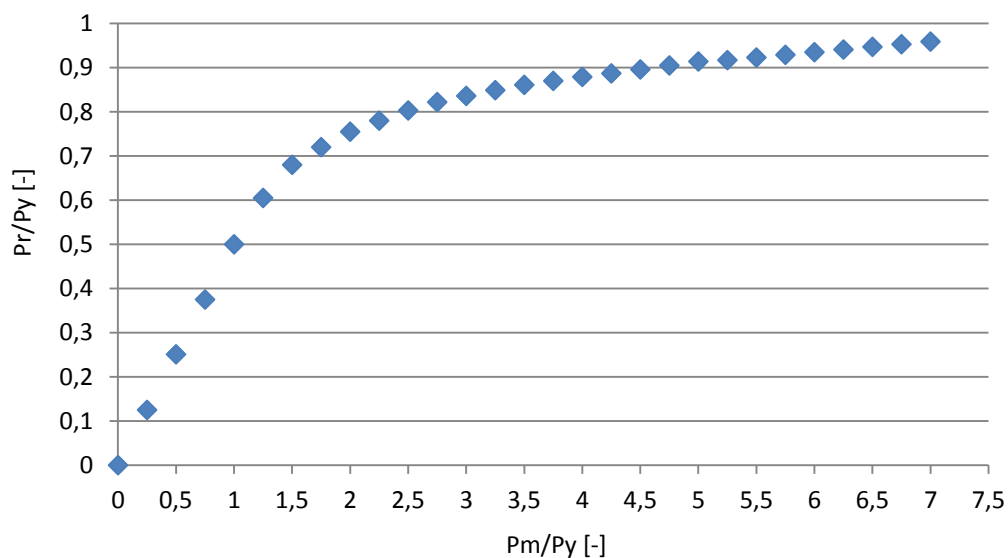
$$\varepsilon = \frac{1}{n_{cyl}^2 - 1 + \frac{Z^2}{2}} \cdot \left(\frac{1}{\left(\frac{n_{cyl}^2}{Z^2} + 1\right)^2} + \frac{t^2}{12 \cdot R^2 \cdot (1 - \mu^2)} \cdot (n_{cyl}^2 - 1 + Z^2)^2 \right) \quad (7.25.)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2^2 - 1 + \frac{0,83^2}{2}} \cdot \left(\frac{1}{\left(\frac{2^2}{0,83^2} + 1\right)^2} + \frac{5^2}{12 \cdot 2653^2 \cdot (1 - 0,3^2)} \cdot (2^2 - 1 + 0,83^2)^2 \right)$$

$$\varepsilon \cong 0,0072$$

Vypočte se hodnota teoretického tlaku P_m při elastické ztrátě stability válcového pláště bez imperfekcí (viz vztah 7.26.).

$$P_m = \frac{E \cdot t \cdot \varepsilon}{R} = \frac{200\,000 \cdot 5 \cdot 0,0072}{2653} \cong 2,71 \text{ MPa} \quad (7.26.)$$



Obr. 7.5. Závislost hodnot P_r/P_y na P_m/P_y

Dle obr. 7.5. vycházejícího z normy [29], lze aproximací hodnot získat poměr P_r/P_y , ze kterého vychází výpočtová dolní mez tlaku při zborcení P_r .

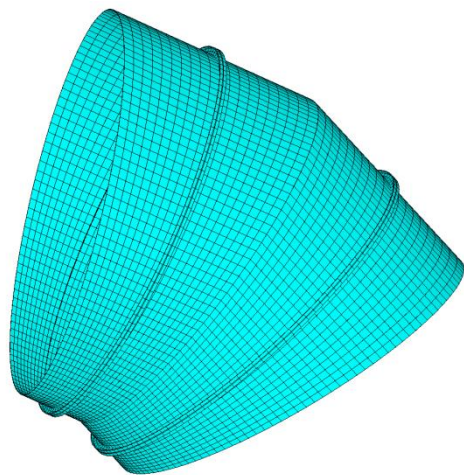
$$\frac{P_r}{P_y} \cong 0,925$$

$$P_r = 0,925 \cdot P_y \cong 0,41 \text{ MPa}$$

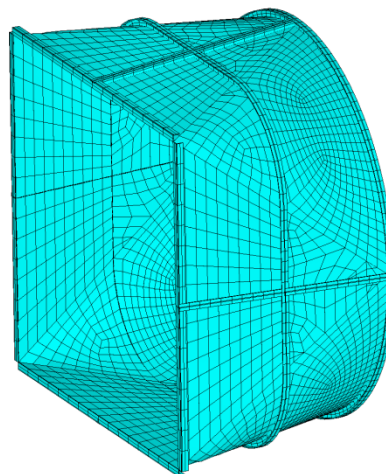
Jelikož hodnota P_r se mění v závislosti na počtu vln n_{cyl} bylo za potřeby iteračního výpočtu pro nalezení nejmenší hodnoty dolní meze tlaku pro konkrétní zvolenou délku L . Tato nejnižší hodnota se poté porovnávala se vztahem 7.27. a dle výsledku porovnání se zpětně měnila a dohledávala optimální hodnota nevyztužené délky. Součinitel bezpečnosti S pro konstrukční podmínky roven hodnotě 1,5. [29]

$$\frac{P_r}{S} \cong P \quad (7.27.)$$

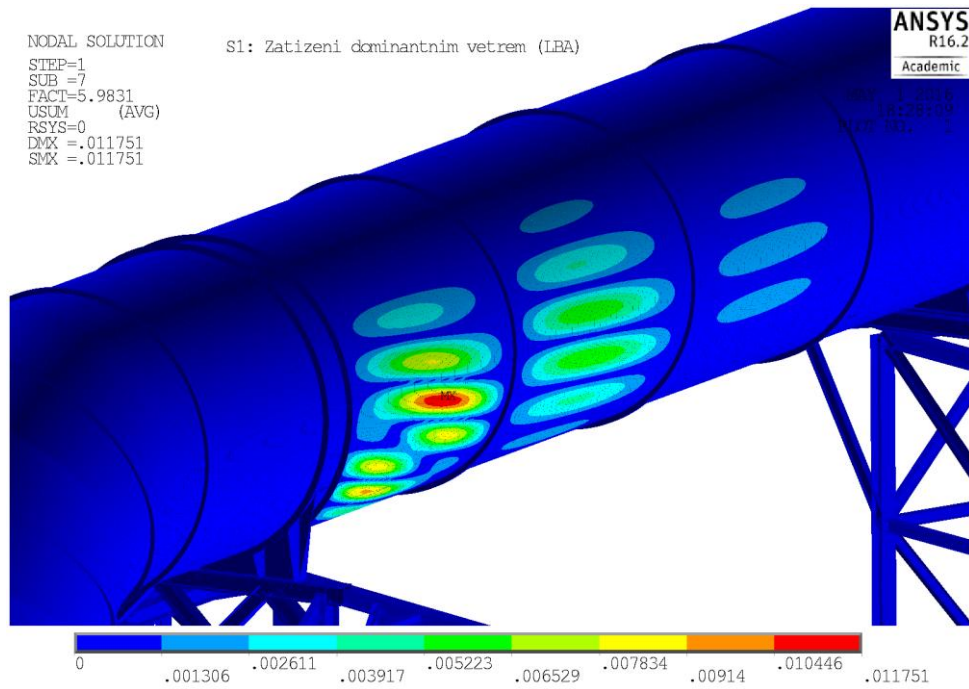
Pro zadané podmínky byla nalezena optimální hodnota nevyztužené délky rovna 7 000 mm, od které se odvíjelo rozmístění výztuh na rovných úsecích potrubí v rámci modelu č.2. Vypočtené rozmístění, vzhledem ke geometrii potrubí, nebylo optimální, proto se tato délka upravila na 5 900 mm tak, aby vyztužení odpovídalo rovnoměrnému rozmístění po plášti (viz obr. 7.4.). Na zaoblený úsek potrubí se aplikovala jedna obvodová výztuha pro každý segment kolena (viz obr. 7.6.). Poslední dílčím členem byla redukce, u které vyztužení proběhlo jak obvodově, tak podélně z důvodu specifického tvaru (viz obr. 7.7.).



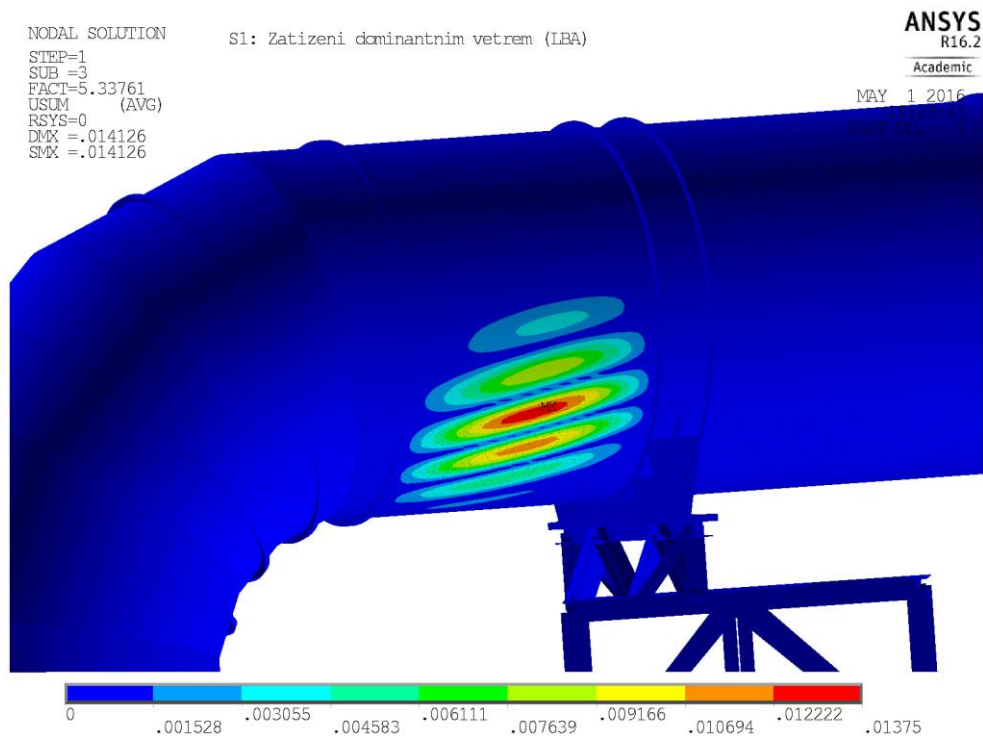
Obr. 7.6. Rozmístění výztuh na dvou segmentech kolena



Obr. 7.7. Rozmístění výztuh na redukci



Obr. 7.8. Výsledné deformace [mm] modelu č.2 a zatěžujícího stavu č.1 pro mód 7



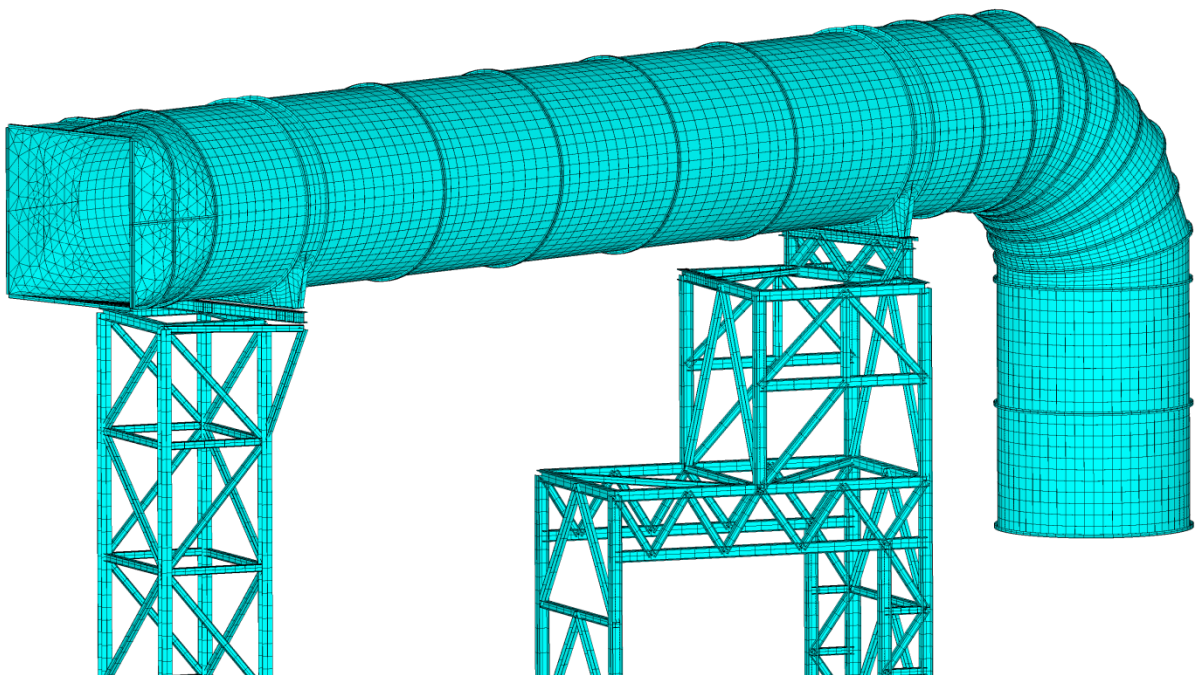
Obr. 7.9. Výsledné deformace [mm] modelu č.2 a zatěžujícího stavu č.1 pro mód 3

7.2.1 Dílčí závěr modelu č.2

Model č.2 při použití r_{Rpl} z LA i MNA vycházel lépe oproti předchozímu modelu, přesto opět nevyhovoval požadavkům normy (viz příloha 1b) a proto musel být více vyztužen. Kritická místa prvních módů vycházela do míst na vodorovném úseku potrubí v blízkosti sedlové podpěry, jak lze vidět na obrázku 7.8. a 7.9. Tento úsek je nejvíce náchylný ke ztrátě stability především z toho důvodu, že sedlová podpěra nese celou váhu zaobleného konce potrubí a tím vznikají v její blízkosti místa s větší deformací. Při snaze vyztužit model tak, aby splnil podmínky normy, se vyskytnul problém v podobě vlastních tvarů, které se při zatížení potrubí objevily na podpůrné konstrukci dále od kolena. Řešení tohoto problému je objasněno v kapitole 7.4.

7.3 Hodnocení modelu č.3

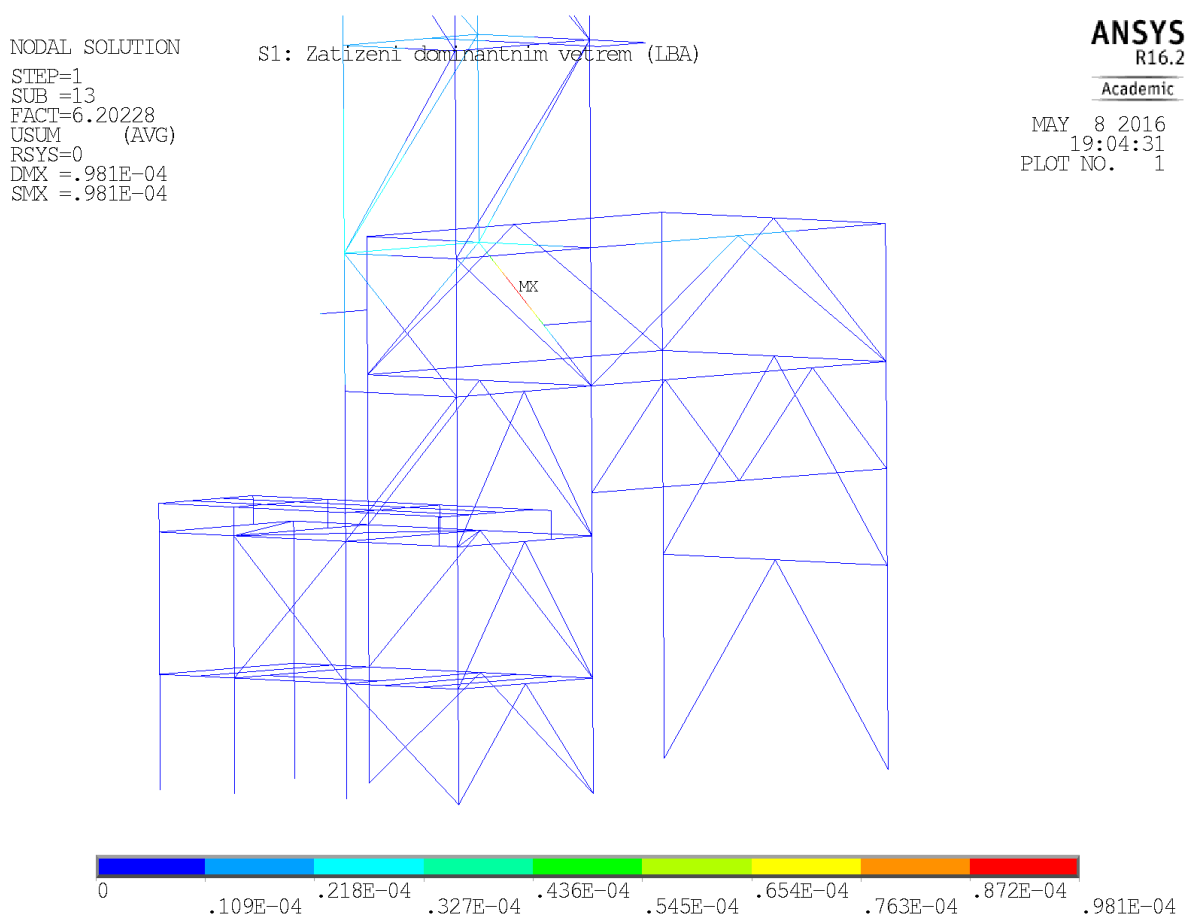
V případě modelu č.3 byly výztuhy v oblasti kolene zdvojeny. Změněn byl počet výztuh (4 místo 3) a tím i rozestup ve vodorovné části potrubí mezi sedlovými podpěrami. Přidána byla i jedna obvodová výztuha v části mezi sedlovou podpěrou a segmentovým kolenem (viz obr. 7.10.) tak, aby byly posíleny místa, jenž v předchozích modelech byla nejvíce náchylná ke ztrátě stability.



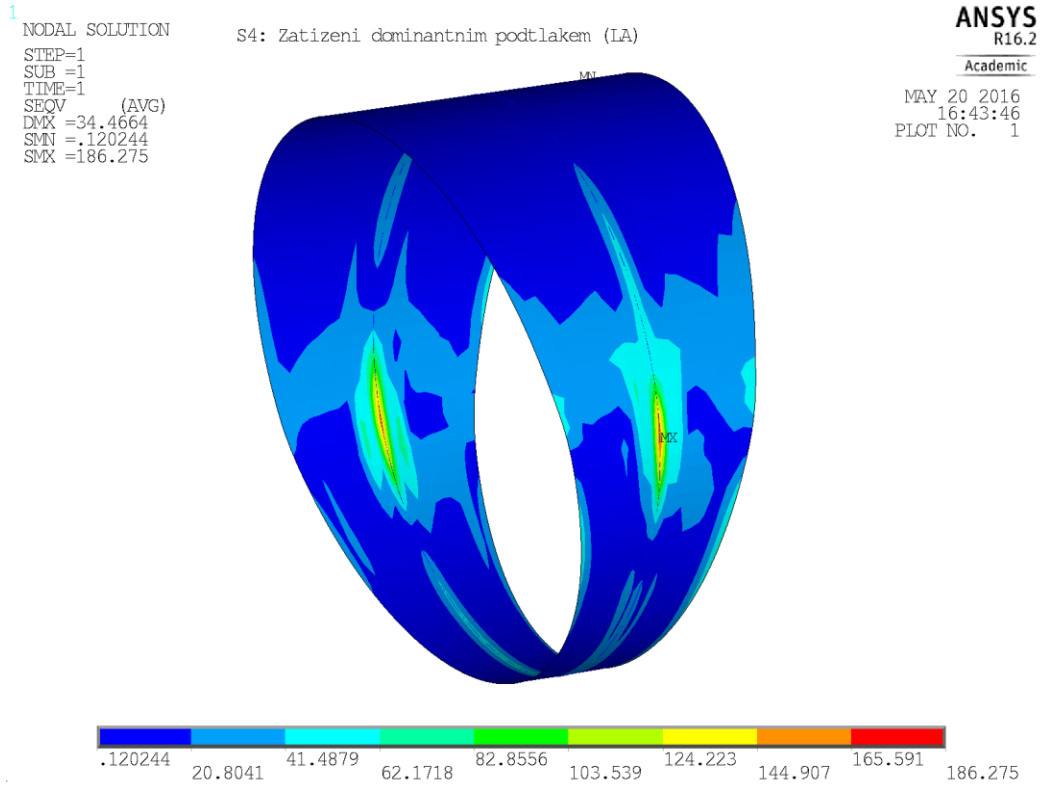
Obr. 7.10. Výpočtový model č.3

7.3.1 Dílčí závěr modelu č.3

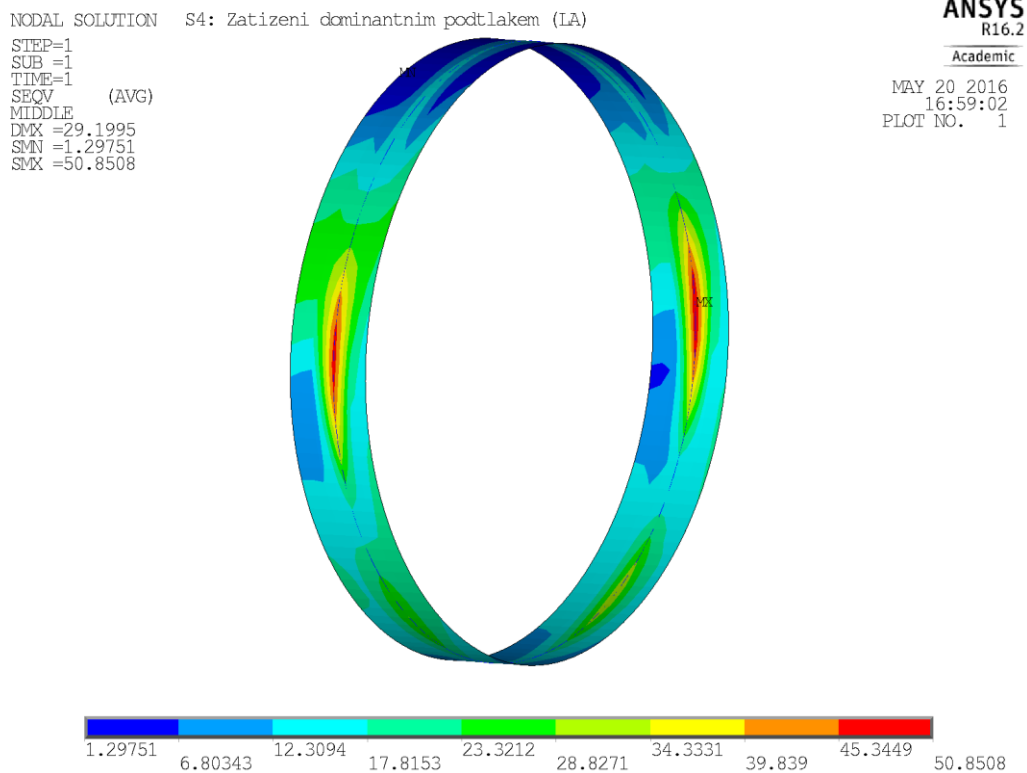
Hodnoty faktoru návrhové únosnosti při boulení modelu č.3 se příliš nelišily od předchozího. Dle výsledků hodnocení model opět nevyhovuje a vyztužení je nedostačující (viz příloha 1c). Kritická místa v rámci potrubí se vyskytovali na stejných místech jako v předchozím modelu (viz obr. 7.8.). Z důvodu výskytu čím dál většího počtu kritických míst na konstrukci (viz obr. 7.11.) ubýval počet míst na potrubí, které lze hodnotit a jsou předmětem této práce. Přestože špičky napětí byly v místech vyztužení (viz obr. 7.12. a obr. 7.13.), ztráta stability vzniká v místech s největšími posuvy.



Obr. 7.11. Místo s největší deformací [mm]vyskytující se na prutové konstrukci v rámci módu



Obr. 7.12. Rozložení napětí [MPa] v řezu u vyztuženého segmentu kolene (model č.3)

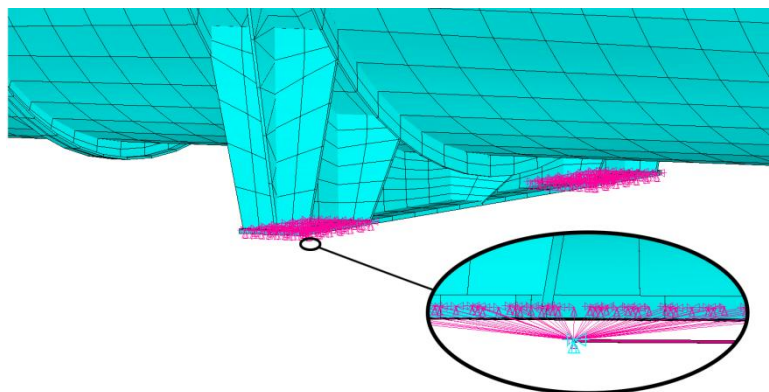


Obr. 7.13. Rozložení napětí [MPa] v řezu středové části potrubí s výztuhou (model č.3)

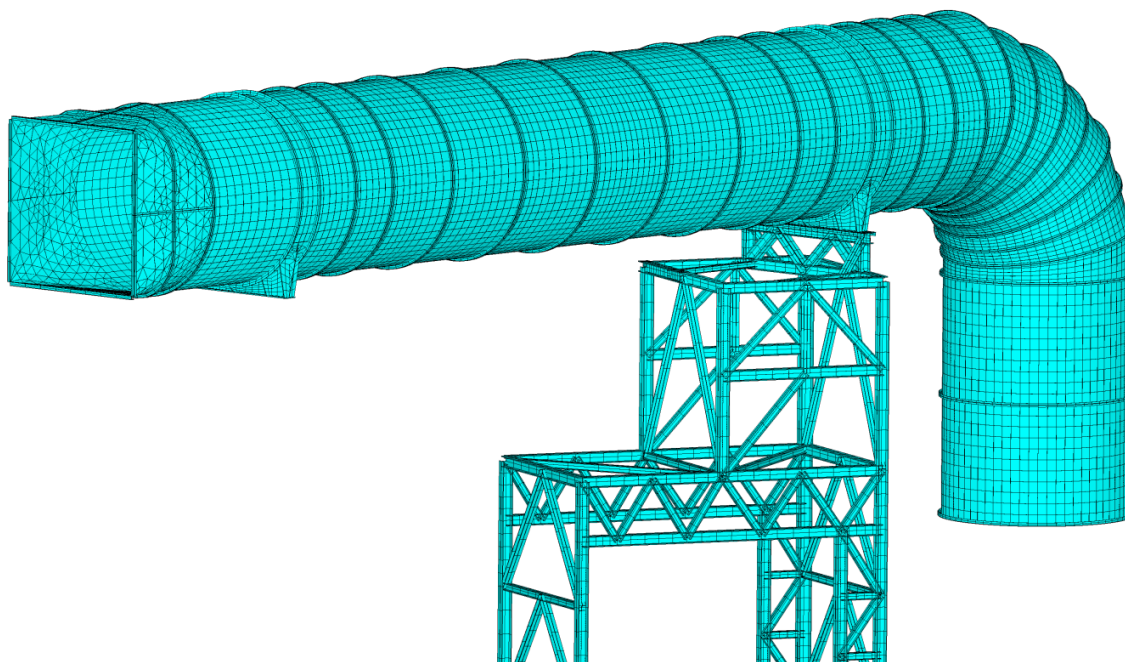
7.4 Hodnocení modelu č.4

Četnost kritických uzlů na prutové konstrukci je z hlediska hodnocení nežádoucí, proto byla zavedena opatření tak, aby se výskyt těchto uzlů přesunul na potrubí. Nejdříve byly zjištěny posuvy a rotace ve dvou master uzlech pomocného RBE3 prvku, jenž přenáší stupně volnosti. Hodnoty byly zjištěny ve všech třech směrech lokálního souřadného systému vázaného na osu potrubí u jednotlivých zatěžujících stavů. Poté byla prutová konstrukce, na které je umístěna posuvná vazba odstraněna a do master uzlů aplikovány zjištěné posuvy a rotace (viz obr. 7.14.). Tato náhrada zajišťuje stejnou simulaci průběhu zatěžování jako v případě, kdy by konstrukce zůstala na svém místě.

Změna vyztužení od předchozího modelu proběhla pouze ve vodorovné části válcového potrubí. V oblasti mezi kolenem a sedlovou podpěrou byly použity dvě obvodové výztuhy místo jedné původní. V nejdelší vodorovné oblasti mezi oběma sedlovými podpěrami bylo aplikováno sedm výztuh o stejném rozestupu, navíc byly přidány dvě výztuhy do kritických míst na začátku a konci tohoto úseku (viz obr. 7.15.).



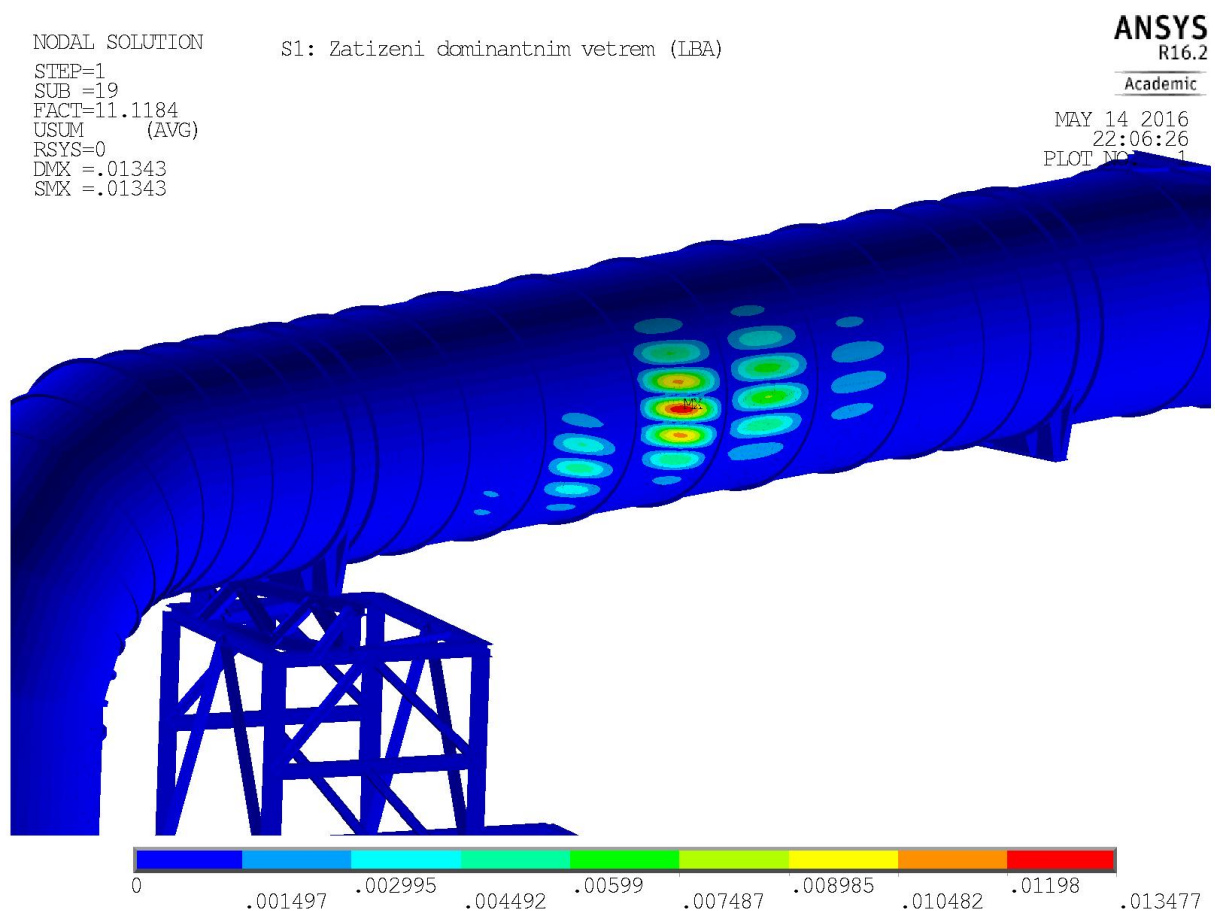
Obr. 7.14. Detail RBE3 prvku kluzné části podpěry



Obr. 7.15. Výpočtový model č.4

7.4.1 Dílčí závěr modelu č.4

Z hlediska podmínky ze vztahu 7.22 bylo provedené vyztužení dostačující. Hodnoty faktoru návrhové únosnosti při boulení jak při hodnocení za pomoci výsledků LA, tak i MNA analýzy se pohybovaly u všech módů v rámci každého zatěžujícího stavu nad limitní hodnotou 1 (viz příloha 1d), to znamená, že poslední model č.4 již vyhovuje požadavkům normy. Všechna kritická místa, díky opatřením uvedené v předchozí kapitole 7.4, se nacházela již na potrubí a bylo je možné posuzovat. Jednalo se především o tři oblasti, ve kterých byl výskyt kritických míst nejčtenější. Tak jako v předchozích modelech se jednalo o oblasti sedlové podpěry nacházející se blíže ke kolenu (viz obr. 7.17.), oblasti střední vodorovné části (viz obr. 7.16.) a také místa přímo na segmentovém kolenu (viz obr. 7.18.).



Obr. 7.16. Výsledné deformace [mm] modelu č.4 a zatěžujícího stavu č.1 pro mód 19

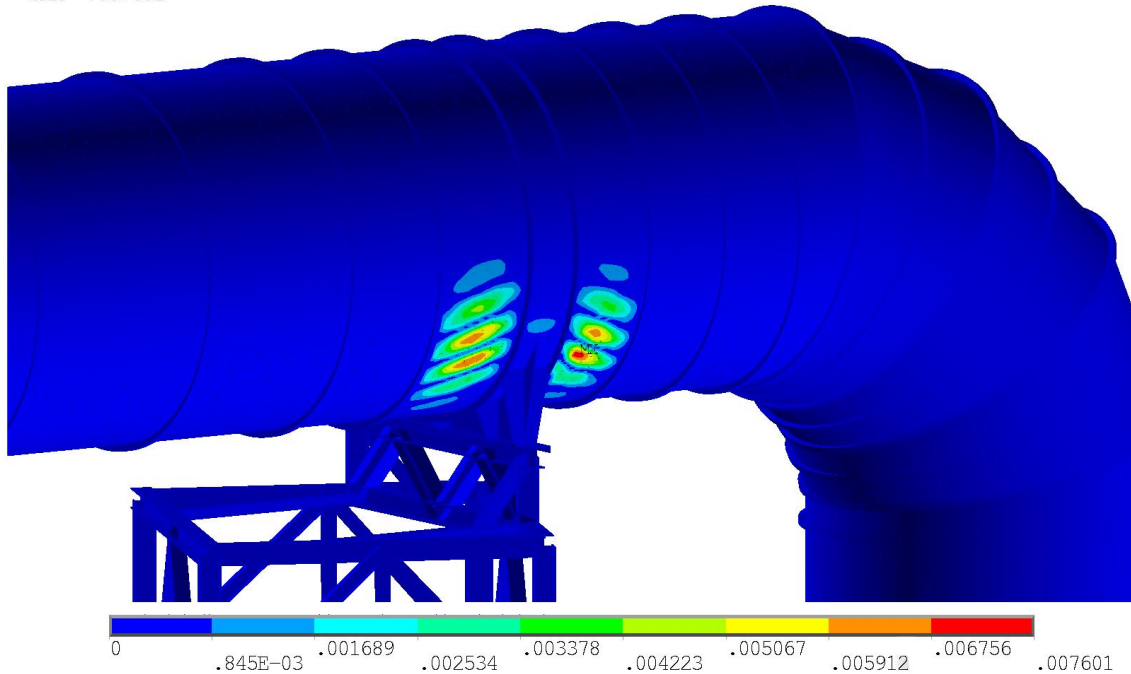
NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =8
 FACT=9.68879
 USUM (AVG)
 RSYS=0
 DMX =.007601
 SMX =.007601

S1: Zatizeni dominantnim vetrem (LBA)

ANSYS
 R16.2

Academic

MAY 14 2016
 22:22:59
 PLOT NO. 1



Obr. 7.17. Výsledné deformace [mm] modelu č.4 a zatěžujícího stavu č.1 pro mód 8

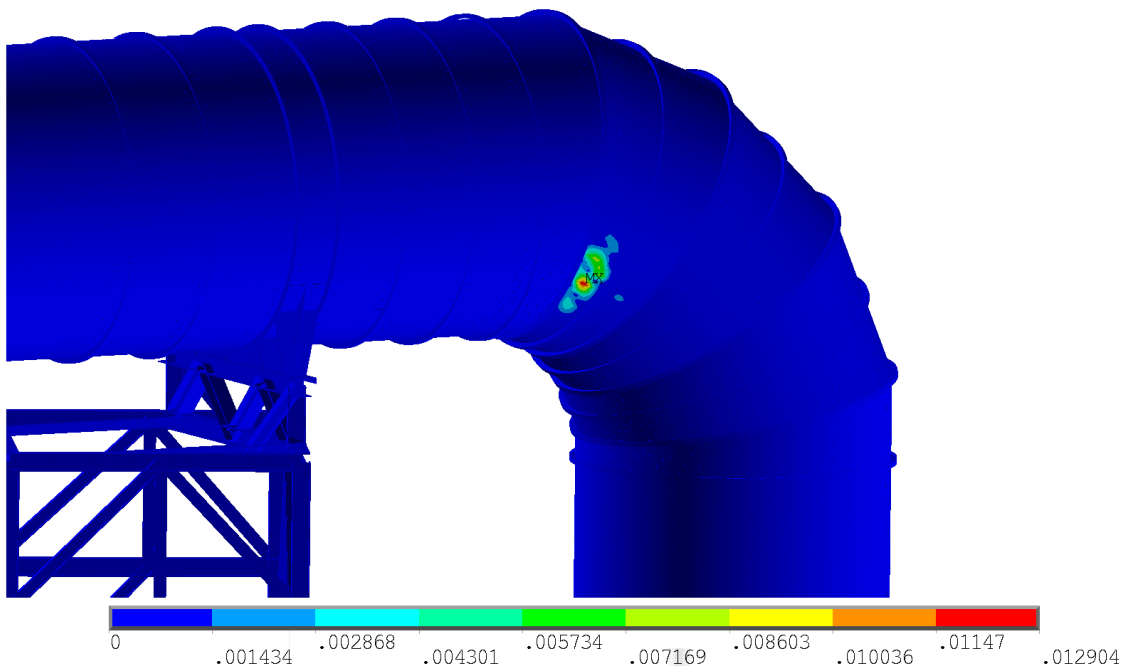
NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =23
 FACT=11.7866
 USUM (AVG)
 RSYS=0
 DMX =.012904
 SMX =.012904

S1: Zatizeni dominantnim vetrem (LBA)

ANSYS
 R16.2

Academic

MAY 14 2016
 22:17:41
 PLOT NO. 1



Obr. 7.18 Výsledné deformace [mm] modelu č.4 a zatěžujícího stavu č.1 pro mód 23

7.5 Shrnutí a porovnání výsledků

Všechny čtyři modely byly podrobeny identickému rozboru a posouzeny normou ČSN EN 1993 [13], jejíž kapitola 8.6 hodnotí odolnost zkoumané skořepinové konstrukce vůči ztrátě stability. Úvodní model č.1 sloužil jako výchozí předloha pro následující verze a dle jeho výsledků byla vybírána místa k vyztužení. První model neobsahoval žádné vyztužující prvky a podle výsledků (viz příloha 1a) nevyhovoval požadavkům normy ani jeden mód u žádného ze čtyř zatěžujících stavů. Nejnižší hodnoty faktoru návrhové únosnosti při boulení r_{Rd} nabývaly zaokrouhleně hodnot 0,21-0,22 (viz tabulka 7.1.) jak při uvážení r_{Rpl} z LA, tak i z MNA, což dle požadavků finální podmínky (viz vztah 7.22.) nevyhovuje téměř pětinásobně. Nejhorší vliv měl v tomto případě stav č.4, kde dominantní složkou je podtlak. Hodnoty napětí v rámci kritických uzlů, které byly použity k výpočtu plastické únosnosti, se pohybovali v rozkmitu 200 MPa. Rozložení napětí po celém potrubí je pak znázorněno na obrázku viz příloha 2.

Vyztužení vodorovné a svislé části modelu č.2 proběhlo dle výsledků výpočtu nejdelší možné nevyztužené délky za pomoci normy ČSN 13 445 – 3 [29]. Segmenty kolena byly vyztuženy obvodově, redukce pak specificky. Dle výsledků (viz příloha 1b) opět nevyhovoval potřebám normy ani jeden mód u všech zatěžujících stavů. Nejmenší hodnoty r_{Rd} nabývaly velikosti 0,63-0,64 (LA i MNA), což dle požadavků finální podmínky stále nevyhovuje. Jako nejhorší stav vycházel opět dominantní podtlak. Hodnoty napětí se pohybovali v rozmezí 20 MPa a od předchozího modelu se řádově snížily.

U modelu č.3 bylo posíleno vyztužení v oblasti kolene a přidána jedna výztuha navíc do vodorovné části. Z důvodu výskytu velkého množství kritických uzlů na podpůrných konstrukcích byly hodnoceny pouze čtyři módy, které se nacházely na potrubí. Dle výsledků (viz příloha 1c) potrubí znovu jako celek nevyhovovalo požadavkům normy a vyztužení bylo stále nedostačující. Velikosti napětí se řádově neměnily ale hodnoty r_{Rd} se díky aplikaci vyztužení zvyšovaly a vycházely v rozmezí 0,69-0,70 (LA i MNA). Jako nejhorší stav se jevil dominantní podtlak, nicméně rozdíl oproti jiným stavům byl minimální.

Poslední model č.4 byl vyztužen ve vodorovné části více než předešlé verze, lišil se také v odstraněné podpůrné konstrukci, jež byla nahrazena posuvy. Tyto změny byly provedeny tak, aby neovlivňovaly hodnocení a porovnání s předešlými modely. Hodnoty r_{Rd} již splňují zmíněnou podmínku (viz příloha 1d). Nejmenší z nich se pohybovaly v rozmezí 1,11-1,18 dle konkrétního zatěžujícího stavu. V této verzi modelu byl vyhodnocen jako nejkritičtější stav ten, jež měl jako dominantní složku seizmicitu. Rozpětí hodnot napětí se opět neměnilo.

Tabulka 7.1. Minimální r_{Rd} v rámci zatěžujícího stavu pro každý model

stav	dominantní složka	min r_{Rd}			
		model č.1	model č.2	model č.3	model č.4
1	vítr	0,221	0,639	0,704	1,179
2	sníh	0,209	0,641	0,703	1,115
3	seizmicita	0,208	0,642	0,705	1,106
4	podtlak	0,207	0,630	0,694	1,134

8. Závěr

Práce se věnuje problematice tenkostěnného potrubí z pohledu ztráty stability, která je řešena lineárním přístupem. Mezní stav ztráty stability v podobě boulení pláště je obecně těžko předvídatelný a složitě řešitelný problém, u kterého se obtížně předvídá limitní zatížení tohoto meznímu stavu. Boulení lze zmírnit nebo přímo zamezit aplikací vyztužujících prvků. Ty byly v rámci několika modelů použity po obvodu pláště a následně vyhodnoceny normou.

Teoretická část práce obecně shrnuje poznatky o potrubních systémech. Věnuje se základním pojmům a parametrům spojeným s těmito procesními celky. Popsány jsou použité materiály a hlediska při jejich výběru. Okrajově se věnuje spalínám, které jsou potrubím dopravovány. Následovně jsou popsány skořepinové konstrukce, tedy tenkostěnné prvky, které jsou využívány pro svou relativně velkou únosnost při specifickém zatížení v poměru k množství použitého materiálu. Vysvětlena je také membránová teorie uplatňující se u těchto tenkostěnných konstrukcí. V neposlední řadě je rozebrán pojem ztráty stability a metody konečných prvků, jakožto nástroje pro analyzování zkoumaného modelu, jenž je předmětem práce.

Praktická část je věnována hodnocení odolnosti spalínového potrubí vůči ztrátě stability, a to jedné nevyztužené a tří vyztužených verzí modelu. Rozmístění výztuh u první vyztužené verze modelu bylo odhadnuto dle normy ČSN 13 445 – 3 [29], která zohledňuje pouze zatížení vnějším tlakem. Praktická část je rozdělena na dvě hlavní kapitoly. První je věnována numerickým analýzám. Ty zahrnují tvorbu 3D návrhu celé sestavy skládající se ze zkoumaného potrubí a přilehlých konstrukcí, které jsou z důvodu zjednodušení tvořeny prutovými nebo skořepinovými prvky. Kapitola také popisuje vytvoření výchozího výpočtového modelu, který se skládal z aplikace okrajových podmínek v podobě čtyř různých zatěžujících stavů v rámci jednoho modelu. Z důvodu nutnosti aplikace těchto zatěžujících stavů na každý ze čtyř zkoumaných modelů byl průběh zatěžování a následný export výsledků zautomatizován pomocí výpočtového makra. Následující kapitola je věnována hodnocení jednotlivých výpočtových modelů dle postupu v normě ČSN EN 1993-1-6 [13], kdy jsou posouzeny módy (kritická místa) získané z lineární bifurkační analýzy pro každý zatěžující stav v rámci jednotlivých modelů. Z hlediska pracnosti a časové náročnosti byla opět nutná automatizace. Nakonec jsou všechny výsledky shrnuty a modely porovnány mezi sebou.

Při posouzení výsledků práce lze říci, že aplikace vyztužení má zásadní vliv na odolnost tenkostěnného modelu potrubí vůči ztrátě stability, které způsobují zatížení v podobě klimatických jevů a nestandardních provozních podmínek. S rostoucím počtem těchto prvků se zvyšuje i faktor kritické únosnosti při boulení. Tento faktor představuje násobek nominálního zatížení mající vliv na návrhovou únosnost při boulení, dle kterého je posuzováno, zda potrubí vyhovuje či nevyhovuje. Na základě výsledků bylo zjištěno, že nejkritičtější místa na potrubí jsou především v oblasti sedlové podpěry blíže ke kolenu, to je

nejspíše způsobeno vlivem hmotnosti zaobleného konce potrubí spolu s ostatními vlivy. Nicméně výsledky jsou poměrně konzervativní, počítáno je s maximálními hodnotami všech složek, které jsou vynásobeny součiniteli zatížení, dále pak také norma uvažuje se součinitelem únosnosti, což vede k příklonu k bezpečné straně hodnocení. V posledním modelu již bylo nalezeno prakticky využitelné vyztužení, které splňuje požadavky normy přibližně 1,1 násobně (dle zatěžujícího stavu).

Předmětem dalšího zkoumání by mohlo být nalezení optimálnějšího vyztužení v rámci většího počtu návrhů, pro které v této práci již není prostor. Zkoumán by mohl být i vliv různých typů profilů vyztužení a jejich tuhostí na celkovou odolnost proti boulení.

Seznam použité literatury

- [1] ČESKÁ REPUBLIKA. Nařízení vlády, kterým se stanoví technické požadavky na tlaková zařízení. In: Č. 26/2003 Sb. 2002. Dostupné také z: <http://www.unmz.cz/urad/tlakova-zarizeni>
- [2] WILDA, Vladimír a KOLEKTIV AUTORŮ. *Projektování průmyslových potrubí a potrubních rozvodů*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1968, 239, [1] s. Řada strojírenské literatury.
- [3] PAVLOK, Bohuslav. *Potrubní systémy a armatury: Studijní opora* [online]. Ostrava, 2011 [cit. 2016-02-10]. Dostupné z: http://www.338.vsb.cz/PDF/Dil1_Pav.pdf
- [4] Ocelové plechy válcované za tepla z běžných konstrukčních ocelí. *Nypro: Dodavatel hutního materiálu* [online]. b.r. [cit. 2016-02-10]. Dostupné z: <http://nyprohutni.cz/valcovane-za-tepla>
- [5] Skladový sortiment ocelových plechů. *Karla: Steel fo future* [online]. b.r. [cit. 2016-02-10]. Dostupné z: <http://www.karla.cz/category.php?seo=ocelove-plechy-sklad&id=46&CheckCookies>
- [6] BAUKAL, C.E. *Oxygen-Enhanced Combustion*. USA: CRC Press, 1998. ISBN 0-8493-1695-2.
- [7] SKÁLA, Zdeněk. *Ekologie v energetice*. 1. vydání. Brno: PC DIR, 1994, 141 s. ISBN 80-214-0477-9.
- [8] MICKA, Michal. *Teorie konstrukcí: Skořepiny* [online]. b.r. [cit. 2015-12-27]. Dostupné z: http://mech.fd.cvut.cz/members/micka/teorie-konstrukci-bakalari/prednaska-5/TK%20Predn5_skorepiny.pdf
- [9] PLACÁK, Václav a Josef KUNC. *Výpočet napjatosti skořepin*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1966, 312 s.
- [10] Membránový stav napjatosti. *IPotrubí.cz* [online]. b.r. [cit. 2015-12-27]. Dostupné z: <http://www.ipotrubí.cz/clanky/4.-pevnostni-vypocty-potrubí/4.-tenkostonne-potrubni-komponenty-a-membranovy-stav-napeti/1.-membranovy-stav-napjatosti-a-jine-vztahy.html>
- [11] Zatížení potrubí: Rozdělení zatížení a jejich kombinace. *IPotrubí.cz* [online]. b.r. [cit. 2016-02-13]. Dostupné z: <http://www.ipotrubí.cz/clanky/4.-pevnostni-vypocty-potrubí/3.-zatizeni-potrubí/>
- [12] LÉTAL, Tomáš. *Stabilita v procesním průmyslu* [online]. In: . b.r. [cit. 2016-02-19]. Dostupné z: http://www.ansys.stuba.sk/Ansys2009/prednasky/PRISPEVKY/VUT_Letal.pdf
- [13] ČSN EN 1993-1-6. *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - část 1-6: Pevnost a stabilita skořepinových konstrukcí*. Český normalizační institut, 2008.
- [14] PETRUŠKA, Jindřich. *Řešení stability konstrukcí pomocí MKP: Studijní opora* [online]. Brno, 2003 [cit. 2016-02-19]. Dostupné z: <http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/ZVN/stabilita/stabilita%20MKP.doc>

- [15] *AK-Mechanika: Analýzy a konstrukce strojních zařízení* [online]. b.r. [cit. 2016-02-19]. Dostupné z: <http://www.ak-mechanika.com/cze/potravinarsky-prumysl.html>
- [16] Stabilita potrubí: Vzpěr potrubí. *IPotrubí.cz* [online]. b.r. [cit. 2016-02-19]. Dostupné z: <http://www.ipotrubí.cz/clanky/4.-pevnostni-vypocty-potrubí/6.-stabilita-potrubí/2.1.-stabilita-steny-potrubí-mezi-podperami---vseobecne-udaje.html>
- [17] ROTTER, J.M a H SCHMIDT. *Buckling of steel shells: European design recommendations*. 5th edition. Editor John Michael Rotter, Herbert Schmidt. Brussels: ECCS - European Convention for Constructional Steelwork, 2013, ix, 398 stran. European Convention for Constructional Steelwork. ISBN 978-92-9147-116-4.
- [18] ANSYS, . *Ansys Mechanical APDL 16.2*. [software]. [přístup 19.5. 2016], b.r.. Dostupné také z: <http://www.ansys.com/Products/Academic/ANSYS-Student>
- [19] VRBKA, Martin a Michal VEVERKA. *Metoda konečných prvků: řednášky z předmětu Termomechanika* [online]. b.r. [cit. 2016-03-04]. Dostupné z: http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/MKP/prednaska1_mkp.pdf
- [20] Produkty firmy ANSYS Inc.. *SVS FEM: Your partner in computing* [online]. b.r. [cit. 2016-03-03]. Dostupné z: <https://www.svsfem.cz/content/produkty-firmy-ansys-inc>
- [21] Ansys. *Techsoft: Ansys channel partner* [online]. b.r. [cit. 2016-03-03]. Dostupné z: <http://www.techsoft-eng.cz/produkty/ansys/>
- [22] SOLIDWORKS CORPORATION, . *SolidWorks 2015*. [software]. [přístup 19.5. 2016], b.r.. Dostupné také z: <https://www.solidworks.com/sw/support/downloads.htm>
- [23] ČSN EN 1990. *Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí*. Český normalizační institut, 2004.
- [24] ČSN EN 1991-1-4. *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - část 1-4: Obecná zatížení - Zatížení větrem*. Český normalizační institut, 2007.
- [25] *A review of wind-tunnel results of pressures on tank models* [online]. In: GODOY, Luis A. a Genoc PORTELA. University of Puerto Rico Mayagüez campus department of civil engineering, b.r. [cit. 2016-05-01].
- [26] ČSN EN 1998-1. *Eurokód 8: Navrhování konstrukcí odolných proti zemětřesení - část 1: Obecná pravidla, seizmická zatížení a pravidla pro pozemní stavby*. Český normalizační institut, 2006.
- [27] ČSN EN 1991-1-3. *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - část 1-3: Obecná zatížení - Zatížení sněhem*. Český normalizační institut, 2005.
- [28] PYTHON SOFTWARE FOUNDATION, . *Python 2.7.11*. [software]. [přístup 19.5. 2016], b.r.. Dostupné také z: <https://www.python.org/downloads/>

[29] ČSN EN 13445-3 *Netopené tlakové nádoby: Část 3: Konstrukce a výpočet*. 2010.

[30] MAPLESOFT, . *Maple 17*. [software]. [přístup 19.5. 2016], b.r.. Dostupné také z:
<http://www.maplesoft.com/downloads/SelectPlatform.aspx?hash=D6D02E94B9A4C0CF7D7A59CAF440D3BD>

Seznam obrázků a tabulek

- Obr. 3.1. – Využití základních geometrických tvarů v podobě skořepin
- Obr. 3.2. – Rozložení sil a momentů na ploše skořepiny
- Obr. 3.3. – Počítačový model boulení vertikální nádrže s počtem 5 obvodových vln
- Obr. 3.4. – Boulení stěny vertikální nádrže
- Obr. 3.5. – Ilustrační průběh ztráty stability prvku zatěžovaném tlakem v ose
- Obr. 4.1. – Základní typy prvků s výpočtovými uzly
- Obr. 5.1. – Algoritmus řešení praktické části práce
- Obr. 6.1. – Celkový model potrubí s přilehlými částmi
- Obr. 6.2. – Typy použitých elementů s výpočtovými uzly
- Obr. 6.3. – a) tvorba KP, b) propojení KP úsečkami, c) přiřazení elementů úsečkám
- Obr. 6.4a – Kluzné uložení potrubí
- Obr. 6.4b – Náhrada kluzného uložení pomocí prvku RBE3
- Obr. 6.5. – Ilustrační rozložení tlaku větru po obvodu pláště v řezu
- Obr. 6.6. – Zatížení od větru na potrubí v programu Ansys
- Obr. 6.7. – Ilustrační rozložení tlaku sněhu po obvodu pláště v řezu
- Obr. 6.8. – Zatížení od sněhu na potrubí v řezu v programu Ansys
- Obr. 6.9. – Ukotvení prutových konstrukcí
- Obr. 6.10. – Definice referenčních faktorů v globální analýze MNA a LBA
- Obr. 7.1. – Výpočtový model č.1
- Obr. 7.2. – Zvětšená deformace středové části potrubí ve tvaru 5-6 obvodových vln
- Obr. 7.3. – Výsledné deformace [mm] modelu č.1 a zatěžujícího stavu č.1 pro mód 6
- Obr. 7.4. – Výpočtový model č.2
- Obr. 7.5. – Závislost hodnot P_r/P_y na P_m/P_y
- Obr. 7.6. – Rozmístění výztuh na dvou segmentech kolena
- Obr. 7.7. – Rozmístění výztuh na redukci
- Obr. 7.8. – Výsledné deformace [mm] modelu č.2 a zatěžujícího stavu č.1 pro mód 7
- Obr. 7.9. – Výsledné deformace [mm] modelu č.2 a zatěžujícího stavu č.1 pro mód 3
- Obr. 7.10. – Výpočtový model č.3
- Obr. 7.11. – Místo s největší deformací [mm] vyskytující se na prutové konstrukci
- Obr. 7.12. – Rozložení napětí [MPa] v řezu u vyztuženého segmentu kolene
- Obr. 7.13. – Rozložení napětí [MPa] v řezu středové části potrubí s výztuhou
- Obr. 7.14. – Detail RBE3 prvku kluzné části podpěry
- Obr. 7.15. – Výpočtový model č.4

- Obr. 7.16. – Výsledné deformace [mm] modelu č.4 a zatěžujícího stavu č.1 pro mód 19
- Obr. 7.17. – Výsledné deformace [mm] modelu č.4 a zatěžujícího stavu č.1 pro mód 8
- Obr. 7.18. – Výsledné deformace [mm] modelu č.4 a zatěžujícího stavu č.1 pro mód 23

- Tabulka 2.1. – Hodnota R_m [MPa] pro jednotlivé tloušťky plechů [mm]
- Tabulka 2.2. – Hodnota R_{eH} [MPa] pro jednotlivé tloušťky plechů [mm]
- Tabulka 6.1. – Hodnoty zatěžujících složek
- Tabulka 7.1. – Minimální r_{Rd} v rámci zatěžujícího stavu pro každý model

Seznam příloh

- příloha 1a – výsledné hodnoty výpočtového modelu č.1 pro stavy 1-4
- příloha 1b – výsledné hodnoty výpočtového modelu č.2 pro stavy 1-4
- příloha 1c – výsledné hodnoty výpočtového modelu č.3 pro stavy 1-4
- příloha 1d – výsledné hodnoty výpočtového modelu č.4 pro stavy 1-4
- příloha 2 – výsledné rozložení napětí pro výpočtové modely č.1-4
- příloha 3 – zatěžující a výpočtové makro
- příloha 3 – makro s hodnocením dle normy ČSN EN 1993-1-6 [13]
- příloha 5 – výpočtový cyklus nevyztužené délky dle normy ČSN EN 13445-3 [29]

příloha 1a

hodnoty a výsledky stavu č.1 (dominantní vítr) pro model č.1										
hodnoty z MKP analýzy							výsledky hodnocení			
mód	uzel	Γ_{Rcr} (LBA)	σ_x (LA)	σ_θ (LA)	$\sigma_{\theta x}$ (LA)	Γ_{Rpl} (MNA)	Γ_{Rd} (LA+LBA)	Γ_{Rd} (MNA+LBA)		stav
1	86732	1,66	-67,50	-76,19	-2,61	4,11	0,22	0,22	< 1	nevyhovuje
2	80790	1,96	0,09	-165,62	1,75	4,11	0,26	0,26	< 1	nevyhovuje
3	109767	2,10	-0,62	-5,16	0,36	4,11				nehodnoceno
4	109760	2,31	-1,11	-5,47	-0,60	4,11				nehodnoceno
5	109760	2,40	-1,11	-5,47	-0,60	4,11				nehodnoceno
6	94015	2,50	-6,12	-1,18	1,65	4,11	0,33	0,33	< 1	nevyhovuje
7	94011	2,54	-16,09	-1,27	2,36	4,11	0,34	0,34	< 1	nevyhovuje
8	81302	2,74	-0,31	-77,39	-4,80	4,11	0,37	0,37	< 1	nevyhovuje
9	109995	2,76	-2,02	-1,97	0,52	4,11				nehodnoceno
10	78407	3,24	-31,13	-18,88	1,89	4,11	0,43	0,43	< 1	nevyhovuje
11	93106	3,34	-7,56	-0,91	-0,66	4,11	0,45	0,45	< 1	nevyhovuje
12	92081	3,37	-21,31	-1,14	4,91	4,11	0,45	0,45	< 1	nevyhovuje
13	93104	3,43	-8,34	-0,90	-0,35	4,11	0,46	0,46	< 1	nevyhovuje
14	93110	3,47	-4,09	-0,88	-1,26	4,11	0,46	0,46	< 1	nevyhovuje
15	109785	3,49	-0,06	-5,21	1,10	4,11				nehodnoceno
16	84667	3,61	-56,07	-38,38	4,73	4,11	0,48	0,48	< 1	nevyhovuje
17	109748	3,65	2,90	-4,81	-1,80	4,11				nehodnoceno
18	109748	3,66	2,90	-4,81	-1,80	4,11				nehodnoceno
19	98508	3,91	-21,07	-0,80	6,70	4,11	0,52	0,52	< 1	nevyhovuje
20	94684	3,91	-24,22	-1,15	3,56	4,11	0,52	0,52	< 1	nevyhovuje
21	77244	4,27	29,28	-13,40	-8,65	4,11	0,57	0,57	< 1	nevyhovuje
22	93188	4,37	-22,74	-1,22	2,91	4,11	0,58	0,58	< 1	nevyhovuje
23	93753	4,39	-14,02	-1,27	2,53	4,11	0,58	0,58	< 1	nevyhovuje
24	80786	4,44	-0,03	-132,67	4,20	4,11	0,21	0,59	< 1	nevyhovuje
25	77244	4,47	29,28	-13,40	-8,65	4,11	0,60	0,60	< 1	nevyhovuje

hodnoty a výsledky stavu č.2 (dominantní sníh) pro model č.1

mod	uzel	hodnoty z MKP analýzy						výsledky hodnocení			stav
		Γ_{Rcr} (LBA)	σ_x (LA)	σ_θ (LA)	$\sigma_{\theta x}$ (LA)	Γ_{Rpl} (MNA)	Γ_{Rd} (LA+LBA)	Γ_{Rd} (MNA+LBA)			
1	86732	1,56	-69,63	-73,02	-4,26	3,99	0,21	0,21	< 1	nevyhovuje	
2	80792	1,79	0,07	-150,92	0,35	3,99	0,24	0,24	< 1	nevyhovuje	
3	77935	2,22	-73,29	-60,96	2,51	3,99	0,30	0,30	< 1	nevyhovuje	
4	109767	2,25	-0,50	-4,88	0,30	3,99				nehodnoceno	
5	109760	2,38	-0,95	-5,12	-0,54	3,99				nehodnoceno	
6	109760	2,48	-0,95	-5,12	-0,54	3,99				nehodnoceno	
7	94099	2,56	-9,60	-1,21	2,14	3,99	0,34	0,34	< 1	nevyhovuje	
8	109760	2,62	-0,95	-5,12	-0,54	3,99				nehodnoceno	
9	109995	2,79	-1,75	-1,95	0,47	3,99				nehodnoceno	
10	78407	2,90	-36,19	-24,40	1,96	3,99	0,39	0,39	< 1	nevyhovuje	
11	84667	3,04	-64,37	-47,88	4,68	3,99	0,41	0,41	< 1	nevyhovuje	
12	93149	3,27	-6,01	-0,94	-0,66	3,99	0,44	0,44	< 1	nevyhovuje	
13	93155	3,29	-0,73	-0,85	-1,50	3,99	0,44	0,44	< 1	nevyhovuje	
14	77935	3,34	-73,29	-60,96	2,51	3,99	0,45	0,45	< 1	nevyhovuje	
15	98454	3,49	-22,56	-0,90	5,45	3,99	0,47	0,47	< 1	nevyhovuje	
16	98322	3,50	-19,01	-1,10	5,27	3,99	0,47	0,47	< 1	nevyhovuje	
17	109785	3,69	-0,03	-4,92	0,96	3,99				nehodnoceno	
18	109748	3,87	2,61	-4,53	-1,58	3,99				nehodnoceno	
19	80792	3,93	0,07	-150,92	0,35	3,99	0,18	0,52	< 1	nevyhovuje	
20	80784	4,03	-0,15	-93,96	4,65	3,99	0,49	0,54	< 1	nevyhovuje	
21	98442	4,04	-21,66	-0,89	6,31	3,99	0,54	0,54	< 1	nevyhovuje	
22	98504	4,07	-20,21	-0,77	6,63	3,99	0,54	0,54	< 1	nevyhovuje	
23	77939	4,22	4,48	22,60	3,97	3,99	0,56	0,56	< 1	nevyhovuje	
24	87208	4,44	-39,69	-33,80	3,22	3,99	0,59	0,59	< 1	nevyhovuje	
25	103112	4,53	-4,90	-1,06	2,33	3,99	0,60	0,60	< 1	nevyhovuje	

hodnoty a výsledky stavu č.3 (dominantní seizmicita) pro model č.1

mod	uzel	hodnoty z MKP analýzy						výsledky hodnocení			stav
		Γ_{Rcr} (LBA)	σ_x (LA)	σ_θ (LA)	$\sigma_{\theta x}$ (LA)	Γ_{Rpl} (MNA)	Γ_{Rd} (LA+LBA)	Γ_{Rd} (MNA+LBA)	< 1		
1	86732	1,56	-69,46	-72,38	-4,38	4,11	0,21	0,21	< 1	nevyhovuje	
2	80792	1,78	0,07	-150,55	0,34	4,11	0,24	0,24	< 1	nevyhovuje	
3	109767	2,21	-0,51	-4,96	0,35	4,11				nehodnoceno	
4	109767	2,22	-0,51	-4,96	0,35	4,11				nehodnoceno	
5	109760	2,37	-0,99	-5,18	-0,52	4,11				nehodnoceno	
6	109760	2,46	-0,99	-5,18	-0,52	4,11				nehodnoceno	
7	94099	2,56	-10,23	-1,20	2,14	4,11	0,34	0,34	< 1	nevyhovuje	
8	109760	2,61	-0,99	-5,18	-0,52	4,11				nehodnoceno	
9	109995	2,81	-1,78	-1,94	0,46	4,11				nehodnoceno	
10	78407	2,90	-36,56	-25,37	1,89	4,11	0,39	0,39	< 1	nevyhovuje	
11	84667	3,04	-63,61	-48,18	4,50	4,11	0,40	0,40	< 1	nevyhovuje	
12	93106	3,29	-5,90	-0,93	-0,70	4,11	0,44	0,44	< 1	nevyhovuje	
13	93112	3,31	-1,05	-0,85	-1,59	4,11	0,44	0,44	< 1	nevyhovuje	
14	93100	3,35	-6,03	-0,85	0,15	4,11	0,45	0,45	< 1	nevyhovuje	
15	98454	3,50	-22,73	-0,90	5,44	4,11	0,47	0,47	< 1	nevyhovuje	
16	98324	3,50	-19,70	-1,09	5,15	4,11	0,47	0,47	< 1	nevyhovuje	
17	109785	3,63	0,00	-4,99	1,02	4,11				nehodnoceno	
18	109748	3,83	2,61	-4,60	-1,60	4,11				nehodnoceno	
19	80792	3,93	0,07	-150,55	0,34	4,11	0,18	0,52	< 1	nevyhovuje	
20	80784	4,03	-0,15	-93,98	4,64	4,11	0,49	0,54	< 1	nevyhovuje	
21	98442	4,04	-21,82	-0,89	6,30	4,11	0,54	0,54	< 1	nevyhovuje	
22	98504	4,07	-20,27	-0,76	6,63	4,11	0,54	0,54	< 1	nevyhovuje	
23	77939	4,23	4,10	21,89	3,92	4,11	0,56	0,56	< 1	nevyhovuje	
24	87208	4,45	-39,32	-34,07	3,03	4,11	0,59	0,59	< 1	nevyhovuje	
25	103112	4,53	-5,26	-1,06	2,37	4,11	0,60	0,60	< 1	nevyhovuje	

hodnoty a výsledky stavu č.4 (dominantní podtlak) pro model č.1

mod	uzel	hodnoty z MKP analýzy						výsledky hodnocení			stav
		Γ_{Rcr} (LBA)	σ_x (LA)	σ_θ (LA)	$\sigma_{\theta x}$ (LA)	Γ_{Rpl} (MNA)	Γ_{Rd} (LA+LBA)	Γ_{Rd} (MNA+LBA)	< 1		
1	86732	1,56	-69,02	-72,72	-4,12	4,11	0,21	0,21	< 1	nevyhovuje	
2	80792	1,78	0,03	-150,88	0,36	4,11	0,24	0,24	< 1	nevyhovuje	
3	109767	2,01	-0,61	-5,43	0,34	4,11				nehodnoceno	
4	109742	2,18	1,16	-5,35	-1,44	4,11				nehodnoceno	
5	109742	2,23	1,16	-5,35	-1,44	4,11				nehodnoceno	
6	109742	2,35	1,16	-5,35	-1,44	4,11				nehodnoceno	
7	94099	2,39	-10,17	-1,28	2,14	4,11	0,32	0,32	< 1	nevyhovuje	
8	77707	2,47	-35,76	-34,94	-3,47	4,11	0,33	0,33	< 1	nevyhovuje	
9	109997	2,69	-1,88	-1,46	0,41	4,11				nehodnoceno	
10	78407	2,87	-35,55	-24,06	1,91	4,11	0,38	0,38	< 1	nevyhovuje	
11	93104	3,01	-6,98	-1,00	-0,37	4,11	0,40	0,40	< 1	nevyhovuje	
12	93153	3,04	-3,07	-0,97	-1,26	4,11	0,41	0,41	< 1	nevyhovuje	
13	91809	3,07	-0,07	-0,87	-1,55	4,11	0,41	0,41	< 1	nevyhovuje	
14	109785	3,30	-0,13	-5,49	1,09	4,11				nehodnoceno	
15	109785	3,33	-0,13	-5,49	1,09	4,11				nehodnoceno	
16	94264	3,34	-21,51	-0,86	4,90	4,11	0,44	0,44	< 1	nevyhovuje	
17	77935	3,37	-71,99	-59,97	2,46	4,11	0,45	0,45	< 1	nevyhovuje	
18	109748	3,47	2,49	-5,09	-1,70	4,11				nehodnoceno	
19	98506	3,88	-20,35	-0,85	6,47	4,11	0,52	0,52	< 1	nevyhovuje	
20	98372	3,90	-20,09	-1,10	6,50	4,11	0,52	0,52	< 1	nevyhovuje	
21	80790	3,95	0,01	-147,80	1,49	4,11	0,19	0,53	< 1	nevyhovuje	
22	87208	4,04	-39,00	-33,16	3,23	4,11	0,54	0,54	< 1	nevyhovuje	
23	77939	4,21	4,35	22,04	3,89	4,11	0,56	0,56	< 1	nevyhovuje	
24	109968	4,32	-1,86	-2,04	-0,48	4,11				nehodnoceno	
25	102567	4,33	15,96	-0,57	-0,47	4,11	0,58	0,58	< 1	nevyhovuje	

příloha 1b

hodnoty a výsledky stavu č.1 (dominantní vítr) pro model č.2

mod	uzel	hodnoty z MKP analýzy					výsledky hodnocení			
		Γ_{Rcr} (LBA)	σ_x (LA)	σ_θ (LA)	$\sigma_{\theta x}$ (LA)	Γ_{Rpl} (MNA)	Γ_{Rd} (LA+LBA)	Γ_{Rd} (MNA+LBA)		stav
1	98434	4,79	-1,58	-0,97	8,24	5,22	0,64	0,64	< 1	nevyhovuje
2	98496	4,79	-3,93	-0,81	8,75	5,22	0,64	0,64	< 1	nevyhovuje
3	89130	5,34	-11,62	-0,69	-9,28	5,22	0,71	0,71	< 1	nevyhovuje
4	89086	5,35	-13,98	-0,56	-9,64	5,22	0,71	0,71	< 1	nevyhovuje
5	99839	5,68	-3,95	-0,45	-7,65	5,22	0,76	0,76	< 1	nevyhovuje
6	99837	5,68	-7,02	-0,42	-7,50	5,22	0,76	0,76	< 1	nevyhovuje
7	98378	5,98	-1,50	-1,10	7,00	5,22	0,80	0,80	< 1	nevyhovuje
8	98442	5,99	-3,19	-0,98	7,55	5,22	0,80	0,80	< 1	nevyhovuje
9	112136	6,13	-0,62	-4,53	1,53	5,22				nehodnoceno
10	112136	6,14	-0,62	-4,53	1,53	5,22				nehodnoceno
11	112136	6,14	-0,62	-4,53	1,53	5,22				nehodnoceno
12	112136	6,14	-0,62	-4,53	1,53	5,22				nehodnoceno
13	112136	6,15	-0,62	-4,53	1,53	5,22				nehodnoceno
14	112136	6,15	-0,62	-4,53	1,53	5,22				nehodnoceno
15	112136	6,15	-0,62	-4,53	1,53	5,22				nehodnoceno
16	112136	6,15	-0,62	-4,53	1,53	5,22				nehodnoceno
17	112136	6,16	-0,62	-4,53	1,53	5,22				nehodnoceno
18	112136	6,16	-0,62	-4,53	1,53	5,22				nehodnoceno
19	112136	6,16	-0,62	-4,53	1,53	5,22				nehodnoceno
20	112136	6,17	-0,62	-4,53	1,53	5,22				nehodnoceno
21	112136	6,17	-0,62	-4,53	1,53	5,22				nehodnoceno
22	112136	6,17	-0,62	-4,53	1,53	5,22				nehodnoceno
23	112136	6,17	-0,62	-4,53	1,53	5,22				nehodnoceno
24	112136	6,18	-0,62	-4,53	1,53	5,22				nehodnoceno
25	112136	6,18	-0,62	-4,53	1,53	5,22				nehodnoceno

hodnoty a výsledky stavu č.2 (dominantní sníh) pro model č.2

		hodnoty z MKP analýzy					výsledky hodnocení			
mod	uzel	Γ_{Rcr} (LBA)	σ_x (LA)	σ_θ (LA)	$\sigma_{\theta x}$ (LA)	Γ_{Rpl} (MNA)	Γ_{Rd} (LA+LBA)	Γ_{Rd} (MNA+LBA)		stav
1	98434	4,81	-1,63	-0,94	8,42	4,98	0,64	0,64	< 1	nevyhovuje
2	98496	4,81	-4,42	-0,78	8,80	4,98	0,64	0,64	< 1	nevyhovuje
3	89084	5,21	-12,37	-0,69	-9,82	4,98	0,69	0,69	< 1	nevyhovuje
4	89086	5,22	-15,07	-0,56	-9,79	4,98	0,70	0,70	< 1	nevyhovuje
5	99839	5,68	-3,48	-0,47	-7,78	4,98	0,76	0,76	< 1	nevyhovuje
6	99837	5,68	-6,76	-0,44	-7,57	4,98	0,76	0,76	< 1	nevyhovuje
7	98378	6,03	-0,95	-1,06	7,30	4,98	0,80	0,80	< 1	nevyhovuje
8	98442	6,03	-2,85	-0,94	7,77	4,98	0,80	0,80	< 1	nevyhovuje
9	89761	6,17	-13,68	-0,54	8,13	4,98	0,82	0,82	< 1	nevyhovuje
10	89795	6,18	-10,32	-0,47	8,14	4,98	0,82	0,82	< 1	nevyhovuje
11	112136	6,34	-0,56	-5,00	1,55	4,98				nehodnoceno
12	112136	6,35	-0,56	-5,00	1,55	4,98				nehodnoceno
13	112136	6,35	-0,56	-5,00	1,55	4,98				nehodnoceno
14	112136	6,35	-0,56	-5,00	1,55	4,98				nehodnoceno
15	112136	6,36	-0,56	-5,00	1,55	4,98				nehodnoceno
16	112136	6,36	-0,56	-5,00	1,55	4,98				nehodnoceno
17	112136	6,36	-0,56	-5,00	1,55	4,98				nehodnoceno
18	112136	6,37	-0,56	-5,00	1,55	4,98				nehodnoceno
19	112136	6,37	-0,56	-5,00	1,55	4,98				nehodnoceno
20	112136	6,37	-0,56	-5,00	1,55	4,98				nehodnoceno
21	112136	6,38	-0,56	-5,00	1,55	4,98				nehodnoceno
22	112136	6,38	-0,56	-5,00	1,55	4,98				nehodnoceno
23	112136	6,38	-0,56	-5,00	1,55	4,98				nehodnoceno
24	112136	6,39	-0,56	-5,00	1,55	4,98				nehodnoceno
25	112136	6,39	-0,56	-5,00	1,55	4,98				nehodnoceno

hodnoty a výsledky stavu č.3 (dominantní seizmicita) pro model č.2

mod	uzel	hodnoty z MKP analýzy					výsledky hodnocení			
		Γ_{Rcr} (LBA)	σ_x (LA)	σ_θ (LA)	$\sigma_{\theta x}$ (LA)	Γ_{Rpl} (MNA)	Γ_{Rd} (LA+LBA)	Γ_{Rd} (MNA+LBA)	stav	
1	98434	4,82	-1,87	-0,93	8,38	5,01	0,64	0,64	< 1	nevyhovuje
2	98496	4,82	-4,60	-0,78	8,75	5,01	0,64	0,64	< 1	nevyhovuje
3	89084	5,21	-12,33	-0,69	-9,82	5,01	0,69	0,69	< 1	nevyhovuje
4	89086	5,22	-15,08	-0,56	-9,80	5,01	0,70	0,70	< 1	nevyhovuje
5	99839	5,70	-3,52	-0,47	-7,72	5,01	0,76	0,76	< 1	nevyhovuje
6	99837	5,70	-6,73	-0,44	-7,52	5,01	0,76	0,76	< 1	nevyhovuje
7	98378	6,04	-1,21	-1,06	7,26	5,01	0,80	0,80	< 1	nevyhovuje
8	98442	6,04	-3,07	-0,94	7,72	5,01	0,81	0,81	< 1	nevyhovuje
9	89761	6,19	-13,54	-0,54	8,09	5,01	0,83	0,83	< 1	nevyhovuje
10	89795	6,20	-10,19	-0,47	8,08	5,01	0,83	0,83	< 1	nevyhovuje
11	112136	6,48	-0,58	-4,76	1,55	5,01				nehodnoceno
12	112136	6,48	-0,58	-4,76	1,55	5,01				nehodnoceno
13	112136	6,49	-0,58	-4,76	1,55	5,01				nehodnoceno
14	112136	6,49	-0,58	-4,76	1,55	5,01				nehodnoceno
15	112136	6,49	-0,58	-4,76	1,55	5,01				nehodnoceno
16	112136	6,50	-0,58	-4,76	1,55	5,01				nehodnoceno
17	112136	6,50	-0,58	-4,76	1,55	5,01				nehodnoceno
18	112136	6,51	-0,58	-4,76	1,55	5,01				nehodnoceno
19	112136	6,51	-0,58	-4,76	1,55	5,01				nehodnoceno
20	112136	6,51	-0,58	-4,76	1,55	5,01				nehodnoceno
21	112136	6,51	-0,58	-4,76	1,55	5,01				nehodnoceno
22	94638	6,52	-8,06	-1,12	3,25	5,01				nehodnoceno
23	94638	6,52	-8,06	-1,12	3,25	5,01				nehodnoceno
24	93196	6,52	-8,20	-1,18	2,87	5,01				nehodnoceno
25	94638	6,52	-8,06	-1,12	3,25	5,01				nehodnoceno

hodnoty a výsledky stavu č.4 (dominantní podtlak) pro model č.2

		hodnoty z MKP analýzy					výsledky hodnocení			
mod	uzel	Γ_{Rcr} (LBA)	σ_x (LA)	σ_θ (LA)	$\sigma_{\theta x}$ (LA)	Γ_{Rpl} (MNA)	Γ_{Rd} (LA+LBA)	Γ_{Rd} (MNA+LBA)		stav
1	98434	4,73	-1,74	-1,02	8,33	5,16	0,63	0,63	< 1	nevyhovuje
2	98496	4,73	-4,43	-0,86	8,72	5,16	0,63	0,63	< 1	nevyhovuje
3	89130	5,17	-12,36	-0,75	-9,48	5,16	0,69	0,69	< 1	nevyhovuje
4	89086	5,18	-14,88	-0,64	-9,71	5,16	0,69	0,69	< 1	nevyhovuje
5	99793	5,57	-3,53	-0,55	-7,63	5,16	0,74	0,74	< 1	nevyhovuje
6	99837	5,57	-6,79	-0,52	-7,50	5,16	0,74	0,74	< 1	nevyhovuje
7	98378	5,91	-1,15	-1,14	7,20	5,16	0,79	0,79	< 1	nevyhovuje
8	98442	5,92	-3,00	-1,02	7,67	5,16	0,79	0,79	< 1	nevyhovuje
9	89761	6,11	-13,53	-0,62	8,04	5,16	0,82	0,82	< 1	nevyhovuje
10	89795	6,13	-10,20	-0,55	8,04	5,16	0,82	0,82	< 1	nevyhovuje
11	93196	6,25	-8,22	-1,26	2,85	5,16	0,83	0,83	< 1	nevyhovuje
12	94684	6,25	-8,27	-1,20	3,13	5,16	0,83	0,83	< 1	nevyhovuje
13	112136	6,39	-0,66	-5,18	1,69	5,16				nehodnoceno
14	112136	6,40	-0,66	-5,18	1,69	5,16				nehodnoceno
15	112136	6,40	-0,66	-5,18	1,69	5,16				nehodnoceno
16	112136	6,41	-0,66	-5,18	1,69	5,16				nehodnoceno
17	112136	6,41	-0,66	-5,18	1,69	5,16				nehodnoceno
18	112136	6,41	-0,66	-5,18	1,69	5,16				nehodnoceno
19	112136	6,42	-0,66	-5,18	1,69	5,16				nehodnoceno
20	112136	6,42	-0,66	-5,18	1,69	5,16				nehodnoceno
21	112136	6,42	-0,66	-5,18	1,69	5,16				nehodnoceno
22	112136	6,43	-0,66	-5,18	1,69	5,16				nehodnoceno
23	112136	6,43	-0,66	-5,18	1,69	5,16				nehodnoceno
24	112136	6,43	-0,66	-5,18	1,69	5,16				nehodnoceno
25	112136	6,43	-0,66	-5,18	1,69	5,16				nehodnoceno

příloha 1c

hodnoty a výsledky stavu č.1 (dominantní vítr) pro model č.3										
hodnoty z MKP analýzy							výsledky hodnocení			
mod	uzel	Γ_{Rcr} (LBA)	σ_x (LA)	σ_θ (LA)	$\sigma_{\theta x}$ (LA)	Γ_{Rpl} (MNA)	Γ_{Rd} (LA+LBA)	Γ_{Rd} (MNA+LBA)		stav
1	120422	5,28	-4,74	-0,67	9,52	7,09	0,70	0,70	< 1	nevyhovuje
2	120388	5,28	-1,35	-0,79	9,47	7,09	0,70	0,70	< 1	nevyhovuje
3	119332	6,02	-8,73	-0,42	-7,25	7,09	0,80	0,80	< 1	nevyhovuje
4	119428	6,03	-5,12	-0,41	-8,52	7,09	0,80	0,80	< 1	nevyhovuje
5	112136	6,17	-0,63	-4,61	1,48	7,09				nehodnoceno
6	112136	6,18	-0,63	-4,61	1,48	7,09				nehodnoceno
7	112136	6,18	-0,63	-4,61	1,48	7,09				nehodnoceno
8	112136	6,19	-0,63	-4,61	1,48	7,09				nehodnoceno
9	112136	6,19	-0,63	-4,61	1,48	7,09				nehodnoceno
10	112136	6,19	-0,63	-4,61	1,48	7,09				nehodnoceno
11	112136	6,20	-0,63	-4,61	1,48	7,09				nehodnoceno
12	112136	6,20	-0,63	-4,61	1,48	7,09				nehodnoceno
13	112136	6,20	-0,63	-4,61	1,48	7,09				nehodnoceno
14	112136	6,21	-0,63	-4,61	1,48	7,09				nehodnoceno
15	112136	6,21	-0,63	-4,61	1,48	7,09				nehodnoceno
16	112136	6,21	-0,63	-4,61	1,48	7,09				nehodnoceno
17	112136	6,21	-0,63	-4,61	1,48	7,09				nehodnoceno
18	112136	6,22	-0,63	-4,61	1,48	7,09				nehodnoceno
19	112136	6,22	-0,63	-4,61	1,48	7,09				nehodnoceno
20	112136	6,22	-0,63	-4,61	1,48	7,09				nehodnoceno
21	112136	6,22	-0,63	-4,61	1,48	7,09				nehodnoceno
22	112136	6,23	-0,63	-4,61	1,48	7,09				nehodnoceno
23	112136	6,23	-0,63	-4,61	1,48	7,09				nehodnoceno
24	112136	6,49	-0,63	-4,61	1,48	7,09				nehodnoceno
25	112136	6,50	-0,63	-4,61	1,48	7,09				nehodnoceno

hodnoty a výsledky stavu č.2 (dominantní sníh) pro model č.3

		hodnoty z MKP analýzy						výsledky hodnocení		
mod	uzel	Γ_{Rcr} (LBA)	σ_x (LA)	σ_θ (LA)	$\sigma_{\theta x}$ (LA)	Γ_{Rpl} (MNA)	Γ_{Rd} (LA+LBA)	Γ_{Rd} (MNA+LBA)		stav
1	120422	5,28	-5,70	-0,66	9,47	6,81	0,70	0,70	< 1	nevyhovuje
2	120388	5,28	-2,01	-0,76	9,56	6,81	0,70	0,70	< 1	nevyhovuje
3	119332	6,03	-8,60	-0,43	-7,17	6,81	0,80	0,80	< 1	nevyhovuje
4	119428	6,04	-4,90	-0,42	-8,58	6,81	0,80	0,80	< 1	nevyhovuje
5	112136	6,39	-0,58	-5,32	1,46	6,81				nehodnoceno
6	112136	6,39	-0,58	-5,32	1,46	6,81				nehodnoceno
7	112136	6,39	-0,58	-5,32	1,46	6,81				nehodnoceno
8	112136	6,40	-0,58	-5,32	1,46	6,81				nehodnoceno
9	112136	6,40	-0,58	-5,32	1,46	6,81				nehodnoceno
10	112136	6,41	-0,58	-5,32	1,46	6,81				nehodnoceno
11	112136	6,41	-0,58	-5,32	1,46	6,81				nehodnoceno
12	112136	6,41	-0,58	-5,32	1,46	6,81				nehodnoceno
13	112136	6,41	-0,58	-5,32	1,46	6,81				nehodnoceno
14	112136	6,42	-0,58	-5,32	1,46	6,81				nehodnoceno
15	112136	6,42	-0,58	-5,32	1,46	6,81				nehodnoceno
16	112136	6,42	-0,58	-5,32	1,46	6,81				nehodnoceno
17	112136	6,43	-0,58	-5,32	1,46	6,81				nehodnoceno
18	112136	6,43	-0,58	-5,32	1,46	6,81				nehodnoceno
19	112136	6,43	-0,58	-5,32	1,46	6,81				nehodnoceno
20	112136	6,44	-0,58	-5,32	1,46	6,81				nehodnoceno
21	112136	6,44	-0,58	-5,32	1,46	6,81				nehodnoceno
22	112136	6,44	-0,58	-5,32	1,46	6,81				nehodnoceno
23	112136	6,45	-0,58	-5,32	1,46	6,81				nehodnoceno
24	112136	6,72	-0,58	-5,32	1,46	6,81				nehodnoceno
25	112136	6,73	-0,58	-5,32	1,46	6,81				nehodnoceno

hodnoty a výsledky stavu č.3 (dominantní seizmicita) pro model č.3

		hodnoty z MKP analýzy						výsledky hodnocení		
mod	uzel	Γ_{Rcr} (LBA)	σ_x (LA)	σ_θ (LA)	$\sigma_{\theta x}$ (LA)	Γ_{Rpl} (MNA)	Γ_{Rd} (LA+LBA)	Γ_{Rd} (MNA+LBA)	< 1	stav
1	120422	5,29	-5,80	-0,65	9,42	6,77	0,70	0,71	< 1	nevyhovuje
2	120388	5,29	-2,18	-0,76	9,52	6,77	0,70	0,71	< 1	nevyhovuje
3	119332	6,06	-8,49	-0,43	-7,15	6,77	0,80	0,81	< 1	nevyhovuje
4	119428	6,07	-4,83	-0,42	-8,53	6,77	0,80	0,81	< 1	nevyhovuje
5	112136	6,52	-0,59	-5,04	1,47	6,77				nehodnoceno
6	112136	6,53	-0,59	-5,04	1,47	6,77				nehodnoceno
7	112136	6,53	-0,59	-5,04	1,47	6,77				nehodnoceno
8	112136	6,54	-0,59	-5,04	1,47	6,77				nehodnoceno
9	112136	6,54	-0,59	-5,04	1,47	6,77				nehodnoceno
10	112136	6,54	-0,59	-5,04	1,47	6,77				nehodnoceno
11	112136	6,55	-0,59	-5,04	1,47	6,77				nehodnoceno
12	112136	6,55	-0,59	-5,04	1,47	6,77				nehodnoceno
13	112136	6,55	-0,59	-5,04	1,47	6,77				nehodnoceno
14	112136	6,56	-0,59	-5,04	1,47	6,77				nehodnoceno
15	112136	6,56	-0,59	-5,04	1,47	6,77				nehodnoceno
16	112136	6,56	-0,59	-5,04	1,47	6,77				nehodnoceno
17	112136	6,57	-0,59	-5,04	1,47	6,77				nehodnoceno
18	112136	6,57	-0,59	-5,04	1,47	6,77				nehodnoceno
19	112136	6,57	-0,59	-5,04	1,47	6,77				nehodnoceno
20	112136	6,58	-0,59	-5,04	1,47	6,77				nehodnoceno
21	112136	6,58	-0,59	-5,04	1,47	6,77				nehodnoceno
22	112136	6,58	-0,59	-5,04	1,47	6,77				nehodnoceno
23	112136	6,59	-0,59	-5,04	1,47	6,77				nehodnoceno
24	112136	6,90	-0,59	-5,04	1,47	6,77				nehodnoceno
25	112136	6,90	-0,59	-5,04	1,47	6,77				nehodnoceno

hodnoty a výsledky stavu č.4 (dominantní podtlak) pro model č.3

		hodnoty z MKP analýzy						výsledky hodnocení		
mod	uzel	Γ_{Rcr} (LBA)	σ_x (LA)	σ_θ (LA)	$\sigma_{\theta x}$ (LA)	Γ_{Rpl} (MNA)	Γ_{Rd} (LA+LBA)	Γ_{Rd} (MNA+LBA)		stav
1	120422	5,20	-5,63	-0,74	9,40	6,73	0,69	0,69	< 1	nevyhovuje
2	120388	5,21	-2,01	-0,84	9,48	6,73	0,69	0,69	< 1	nevyhovuje
3	119426	5,93	-8,67	-0,52	-7,97	6,73	0,79	0,79	< 1	nevyhovuje
4	119428	5,94	-4,92	-0,50	-8,50	6,73	0,79	0,79	< 1	nevyhovuje
5	112136	6,44	-0,67	-5,44	1,62	6,73				nehodnoceno
6	112136	6,44	-0,67	-5,44	1,62	6,73				nehodnoceno
7	112136	6,45	-0,67	-5,44	1,62	6,73				nehodnoceno
8	112136	6,45	-0,67	-5,44	1,62	6,73				nehodnoceno
9	112136	6,45	-0,67	-5,44	1,62	6,73				nehodnoceno
10	112136	6,46	-0,67	-5,44	1,62	6,73				nehodnoceno
11	112136	6,46	-0,67	-5,44	1,62	6,73				nehodnoceno
12	112136	6,47	-0,67	-5,44	1,62	6,73				nehodnoceno
13	112136	6,47	-0,67	-5,44	1,62	6,73				nehodnoceno
14	112136	6,47	-0,67	-5,44	1,62	6,73				nehodnoceno
15	112136	6,47	-0,67	-5,44	1,62	6,73				nehodnoceno
16	112136	6,48	-0,67	-5,44	1,62	6,73				nehodnoceno
17	112136	6,48	-0,67	-5,44	1,62	6,73				nehodnoceno
18	112136	6,48	-0,67	-5,44	1,62	6,73				nehodnoceno
19	112136	6,49	-0,67	-5,44	1,62	6,73				nehodnoceno
20	112136	6,49	-0,67	-5,44	1,62	6,73				nehodnoceno
21	112136	6,49	-0,67	-5,44	1,62	6,73				nehodnoceno
22	112136	6,50	-0,67	-5,44	1,62	6,73				nehodnoceno
23	112136	6,50	-0,67	-5,44	1,62	6,73				nehodnoceno
24	112136	6,78	-0,67	-5,44	1,62	6,73				nehodnoceno
25	112136	6,78	-0,67	-5,44	1,62	6,73				nehodnoceno

příloha 1d

hodnoty a výsledky stavu č.1 (dominantní vítr) pro model č.4

mod	uzel	hodnoty z MKP analýzy					výsledky hodnocení			stav
		Γ_{Rcr} (LBA)	σ_x (LA)	σ_θ (LA)	$\sigma_{\theta x}$ (LA)	Γ_{Rpl} (MNA)	Γ_{Rd} (LA+LBA)	Γ_{Rd} (MNA+LBA)		
1	138154	8,84	-11,89	-0,77	-14,83	7,59	1,18	1,18	> 1	vyhovuje
2	138156	8,87	-18,39	-0,32	-13,45	7,59	1,18	1,18	> 1	vyhovuje
3	133029	9,46	-12,34	-0,41	11,13	7,59	1,26	1,26	> 1	vyhovuje
4	138492	9,50	-29,41	-0,89	6,45	7,59	1,27	1,27	> 1	vyhovuje
5	133013	9,53	-8,29	-0,71	12,58	7,59	1,27	1,27	> 1	vyhovuje
6	86871	9,60	-20,03	-9,56	-5,43	7,59	1,28	1,28	> 1	vyhovuje
7	86873	9,68	-19,23	-6,63	-5,39	7,59	1,29	1,29	> 1	vyhovuje
8	138490	9,69	-24,71	-1,44	10,59	7,59	1,29	1,29	> 1	vyhovuje
9	133323	9,70	-16,15	-0,59	-8,67	7,59	1,29	1,29	> 1	vyhovuje
10	133325	9,78	-12,38	-0,75	-11,06	7,59	1,30	1,30	> 1	vyhovuje
11	146476	9,91	-5,59	-1,18	3,79	7,59	1,32	1,32	> 1	vyhovuje
12	146388	9,91	-5,94	-0,99	3,97	7,59	1,32	1,32	> 1	vyhovuje
13	138446	9,93	-25,61	-0,19	6,04	7,59	1,32	1,32	> 1	vyhovuje
14	138114	10,24	-27,27	0,12	-6,57	7,59	1,36	1,36	> 1	vyhovuje
15	133707	10,37	-3,63	-0,69	6,33	7,59	1,38	1,38	> 1	vyhovuje
16	133709	10,38	-3,63	-0,85	6,22	7,59	1,38	1,38	> 1	vyhovuje
17	138448	10,75	-25,57	-0,35	1,74	7,59	1,43	1,43	> 1	vyhovuje
18	138066	10,75	-30,16	0,79	-10,62	7,59	1,28	1,43	> 1	vyhovuje
19	144013	11,12	-8,47	-1,23	2,05	7,59	1,48	1,48	> 1	vyhovuje
20	148047	11,12	-8,34	-1,18	2,28	7,59	1,48	1,48	> 1	vyhovuje
21	138540	11,48	-29,25	-1,53	2,58	7,59	1,53	1,53	> 1	vyhovuje
22	138066	11,57	-30,16	0,79	-10,62	7,59	1,18	1,54	> 1	vyhovuje
23	87282	11,79	-15,22	-8,05	4,96	7,59	1,57	1,55	> 1	vyhovuje
24	87280	11,83	-16,46	-6,24	4,91	7,59	1,58	1,54	> 1	vyhovuje
25	86919	11,85	-19,29	-16,04	-1,92	7,59	1,58	1,54	> 1	vyhovuje

hodnoty a výsledky stavu č.2 (dominantní sníh) pro model č.4

		hodnoty z MKP analýzy					výsledky hodnocení			
mod	uzel	Γ_{Rcr} (LBA)	σ_x (LA)	σ_θ (LA)	$\sigma_{\theta x}$ (LA)	Γ_{Rpl} (MNA)	Γ_{Rd} (LA+LBA)	Γ_{Rd} (MNA+LBA)		stav
1	138154	8,58	-13,30	-0,78	-15,13	7,35	1,14	1,14	> 1	vyhovuje
2	138156	8,61	-19,97	-0,33	-13,43	7,35	1,15	1,15	> 1	vyhovuje
3	133029	9,25	-13,88	-0,45	10,82	7,35	1,23	1,23	> 1	vyhovuje
4	138492	9,32	-29,92	-0,94	6,57	7,35	1,24	1,24	> 1	vyhovuje
5	133013	9,32	-9,70	-0,74	12,58	7,35	1,24	1,24	> 1	vyhovuje
6	138444	9,47	-22,06	-0,35	10,03	7,35	1,26	1,26	> 1	vyhovuje
7	133323	9,60	-16,60	-0,60	-8,60	7,35	1,28	1,28	> 1	vyhovuje
8	86871	9,61	-19,71	-9,74	-5,58	7,35	1,28	1,28	> 1	vyhovuje
9	86873	9,69	-19,72	-7,07	-5,50	7,35	1,29	1,29	> 1	vyhovuje
10	133325	9,69	-12,68	-0,77	-11,13	7,35	1,29	1,29	> 1	vyhovuje
11	138114	9,69	-28,71	0,05	-5,90	7,35	1,29	1,29	> 1	vyhovuje
12	138446	9,74	-26,01	-0,20	6,15	7,35	1,30	1,30	> 1	vyhovuje
13	133711	10,11	-3,09	-0,94	6,06	7,35	1,35	1,35	> 1	vyhovuje
14	133713	10,11	-2,58	-1,04	5,83	7,35	1,35	1,35	> 1	vyhovuje
15	138066	10,26	-32,43	0,92	-10,30	7,35	1,22	1,37	> 1	vyhovuje
16	138494	10,58	-27,96	-0,38	1,84	7,35	1,41	1,41	> 1	vyhovuje
17	146386	10,60	-5,44	-1,05	3,83	7,35	1,41	1,41	> 1	vyhovuje
18	145453	10,60	-4,47	-1,17	3,54	7,35	1,41	1,41	> 1	vyhovuje
19	138066	11,14	-32,43	0,92	-10,30	7,35	1,12	1,49	> 1	vyhovuje
20	138540	11,32	-29,66	-1,55	2,59	7,35	1,51	1,51	> 1	vyhovuje
21	87282	11,40	-15,59	-8,34	5,13	7,35	1,52	1,50	> 1	vyhovuje
22	87280	11,43	-17,20	-6,59	5,02	7,35	1,52	1,50	> 1	vyhovuje
23	138112	11,50	-28,58	-0,51	-10,47	7,35	1,34	1,49	> 1	vyhovuje
24	148091	11,53	-7,08	-1,05	2,35	7,35	1,54	1,48	> 1	vyhovuje
25	148139	11,53	-7,56	-1,13	2,15	7,35	1,54	1,48	> 1	vyhovuje

hodnoty a výsledky stavu č.3 (dominantní seizmicita) pro model č.4

		hodnoty z MKP analýzy				výsledky hodnocení					
mod	uzel	Γ_{Rcr} (LBA)	σ_x (LA)	σ_θ (LA)	$\sigma_{\theta x}$ (LA)	Γ_{Rpl} (MNA)	Γ_{Rd} (LA+LBA)	Γ_{Rd} (MNA+LBA)		stav	
1	138154	8,52	-13,31	-0,79	-15,23	7,21	1,14	1,14	> 1	vyhovuje	
2	138156	8,55	-20,16	-0,33	-13,54	7,21	1,14	1,14	> 1	vyhovuje	
3	133029	9,32	-13,73	-0,45	10,68	7,21	1,24	1,24	> 1	vyhovuje	
4	138492	9,39	-29,62	-0,92	6,63	7,21	1,25	1,25	> 1	vyhovuje	
5	133013	9,39	-9,72	-0,73	12,43	7,21	1,25	1,25	> 1	vyhovuje	
6	138444	9,53	-21,82	-0,35	10,04	7,21	1,27	1,27	> 1	vyhovuje	
7	138114	9,56	-29,14	0,08	-5,90	7,21	1,27	1,27	> 1	vyhovuje	
8	86871	9,59	-19,73	-9,78	-5,59	7,21	1,28	1,28	> 1	vyhovuje	
9	86873	9,67	-19,81	-7,14	-5,52	7,21	1,29	1,29	> 1	vyhovuje	
10	133323	9,68	-16,34	-0,59	-8,60	7,21	1,29	1,29	> 1	vyhovuje	
11	133325	9,77	-12,47	-0,76	-11,07	7,21	1,30	1,30	> 1	vyhovuje	
12	138446	9,82	-25,76	-0,21	6,21	7,21	1,31	1,31	> 1	vyhovuje	
13	133711	10,10	-3,20	-0,94	6,03	7,21	1,35	1,35	> 1	vyhovuje	
14	133713	10,11	-2,70	-1,04	5,80	7,21	1,35	1,35	> 1	vyhovuje	
15	138066	10,14	-32,84	0,88	-10,35	7,21	1,21	1,35	> 1	vyhovuje	
16	146386	10,59	-5,56	-1,05	3,82	7,21	1,41	1,41	> 1	vyhovuje	
17	146388	10,60	-5,25	-0,94	3,98	7,21	1,41	1,41	> 1	vyhovuje	
18	138494	10,66	-27,72	-0,38	1,96	7,21	1,42	1,42	> 1	vyhovuje	
19	138066	11,01	-32,84	0,88	-10,35	7,21	1,11	1,47	> 1	vyhovuje	
20	138112	11,34	-28,94	-0,47	-10,54	7,21	1,33	1,45	> 1	vyhovuje	
21	87282	11,35	-15,73	-8,37	5,13	7,21	1,51	1,45	> 1	vyhovuje	
22	87280	11,38	-17,27	-6,58	5,01	7,21	1,52	1,44	> 1	vyhovuje	
23	138540	11,44	-29,40	-1,54	2,69	7,21	1,52	1,44	> 1	vyhovuje	
24	148091	11,51	-7,21	-1,05	2,35	7,21	1,53	1,43	> 1	vyhovuje	
25	148093	11,51	-7,60	-1,13	2,24	7,21	1,53	1,43	> 1	vyhovuje	

hodnoty a výsledky stavu č.4 (dominantní podtlak) pro model č.4

		hodnoty z MKP analýzy					výsledky hodnocení				
mod	uzel	Γ_{Rcr} (LBA)	σ_x (LA)	σ_θ (LA)	$\sigma_{\theta x}$ (LA)	Γ_{Rpl} (MNA)	Γ_{Rd} (LA+LBA)	Γ_{Rd} (MNA+LBA)	> 1	stav	
1	138154	8,60	-13,10	-0,86	-15,01	7,73	1,15	1,15	> 1	vyhovuje	
2	138156	8,63	-19,72	-0,41	-13,36	7,73	1,15	1,15	> 1	vyhovuje	
3	133029	9,26	-13,66	-0,52	10,77	7,73	1,24	1,24	> 1	vyhovuje	
4	133013	9,33	-9,54	-0,81	12,48	7,73	1,24	1,24	> 1	vyhovuje	
5	138492	9,37	-29,64	-1,00	6,56	7,73	1,25	1,25	> 1	vyhovuje	
6	138444	9,51	-21,85	-0,43	9,97	7,73	1,27	1,27	> 1	vyhovuje	
7	133323	9,61	-16,42	-0,68	-8,56	7,73	1,28	1,28	> 1	vyhovuje	
8	86871	9,61	-19,67	-9,78	-5,54	7,73	1,28	1,28	> 1	vyhovuje	
9	86873	9,69	-19,62	-7,11	-5,46	7,73	1,29	1,29	> 1	vyhovuje	
10	133325	9,69	-12,55	-0,84	-11,03	7,73	1,29	1,29	> 1	vyhovuje	
11	138114	9,78	-28,45	-0,02	-5,95	7,73	1,30	1,30	> 1	vyhovuje	
12	138446	9,80	-25,78	-0,28	6,14	7,73	1,31	1,31	> 1	vyhovuje	
13	133711	9,86	-3,22	-1,02	6,01	7,73	1,31	1,31	> 1	vyhovuje	
14	146388	9,86	-5,31	-1,02	3,96	7,73	1,31	1,31	> 1	vyhovuje	
15	146386	10,33	-5,61	-1,13	3,80	7,73	1,38	1,38	> 1	vyhovuje	
16	133709	10,33	-3,41	-0,90	6,16	7,73	1,38	1,38	> 1	vyhovuje	
17	138066	10,34	-32,04	0,81	-10,28	7,73	1,23	1,38	> 1	vyhovuje	
18	138494	10,65	-27,74	-0,46	1,89	7,73	1,42	1,42	> 1	vyhovuje	
19	144015	11,08	-7,58	-1,26	2,16	7,73	1,48	1,48	> 1	vyhovuje	
20	144180	11,08	-7,25	-1,28	1,98	7,73	1,48	1,48	> 1	vyhovuje	
21	138066	11,21	-32,04	0,81	-10,28	7,73	1,13	1,49	> 1	vyhovuje	
22	138540	11,41	-29,42	-1,62	2,62	7,73	1,52	1,52	> 1	vyhovuje	
23	87282	11,42	-15,54	-8,39	5,09	7,73	1,52	1,52	> 1	vyhovuje	
24	87280	11,45	-17,10	-6,64	4,98	7,73	1,53	1,53	> 1	vyhovuje	
25	138112	11,59	-28,25	-0,57	-10,46	7,73	1,36	1,54	> 1	vyhovuje	

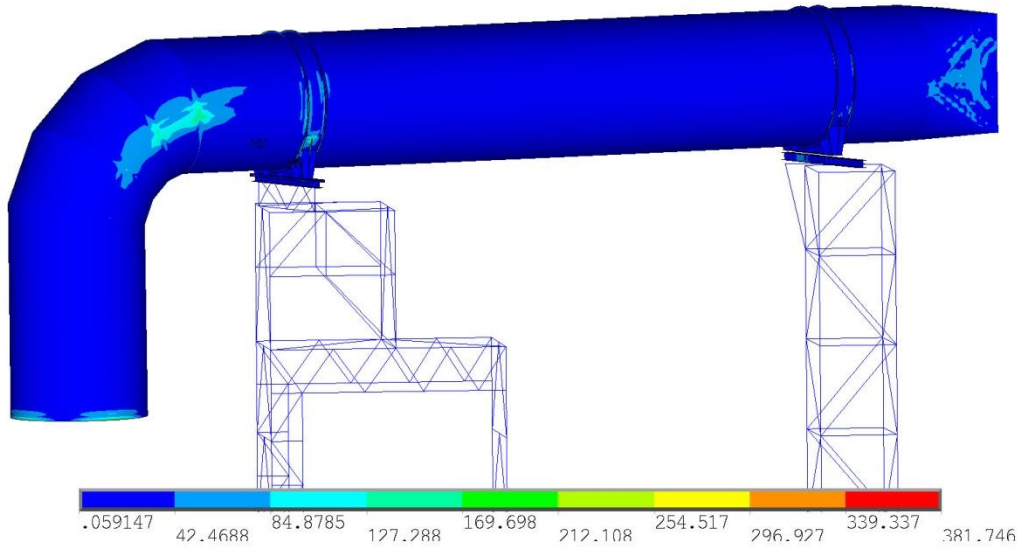
příloha 2

1
NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
SEQV (AVG)
DMX =113.225
SMN =.059147
SMX =381.746

S1: Zatizení dominantním větrem (LA)

ANSYS
R16.2
Academic

MAY 20 2016
13:42:03
PLOT NO. 1



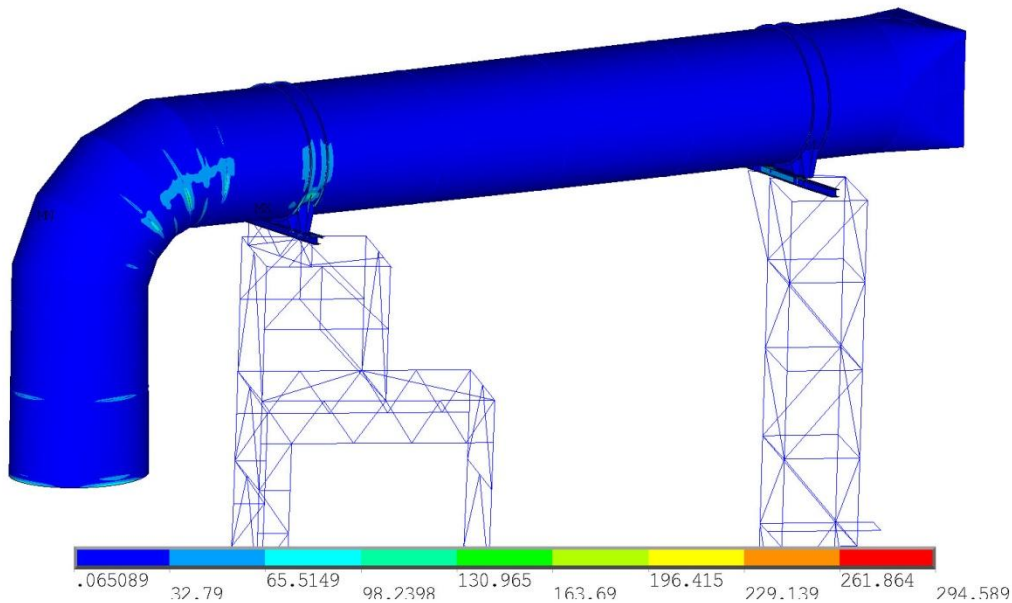
Rozložení napětí [MPa] u modelu č.1

1
NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
SEQV (AVG)
DMX =51.6218
SMN =.065089
SMX =294.589

S4: Zatizení dominantním podtlakem (LA)

ANSYS
R16.2
Academic

MAY 20 2016
16:38:11
PLOT NO. 1



Rozložení napětí [MPa] u modelu č.2

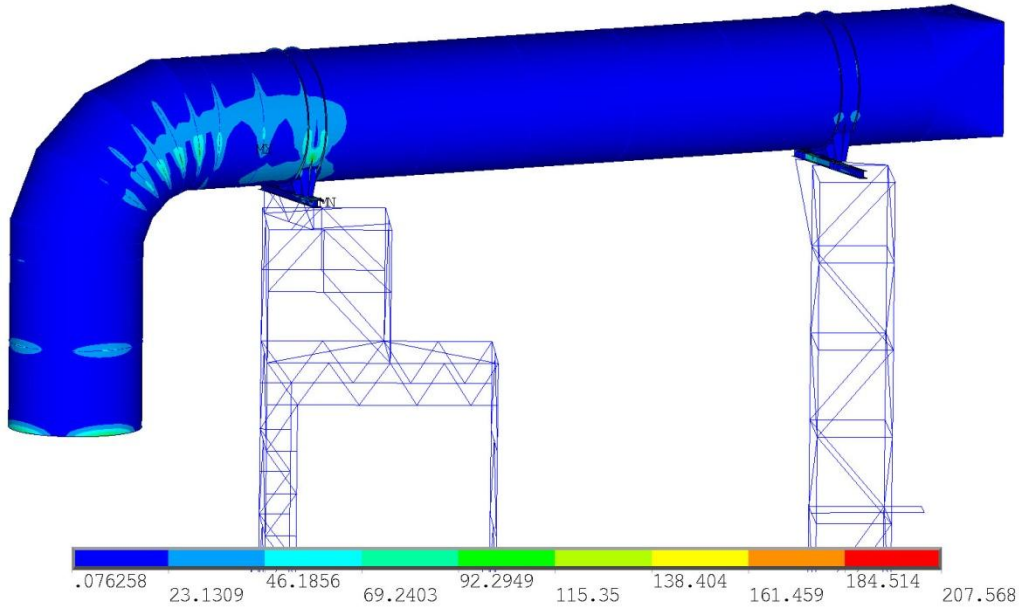
1 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =1
 TIME=1
 SEQV (AVG)
 DMX =41.255
 SMN =.076258
 SMX =207.568

S1: Zatizeni dominantnim vetrem (IA)

ANSYS
 R16.2

Academic

MAY 20 2016
 13:57:21
 PLOT NO. 1



Rozložení napětí [MPa] u modelu č.3

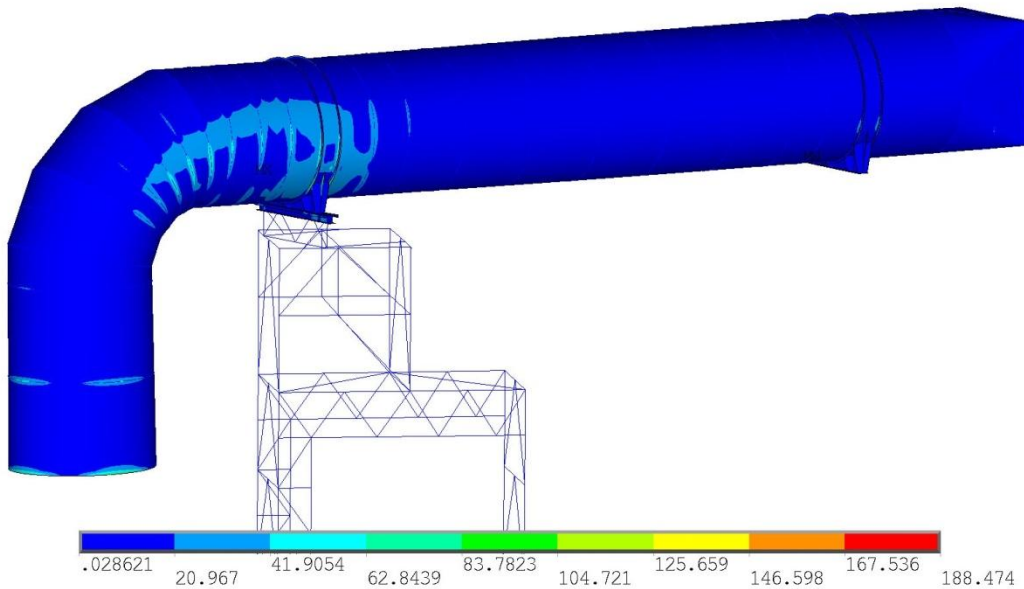
1 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =1
 TIME=1
 SEQV (AVG)
 MIDDLE
 DMX =38.9247
 SMN =.028621
 SMX =188.474

S1: Zatizeni dominantnim vetrem (IA)

ANSYS
 R16.2

Academic

MAY 20 2016
 16:57:52
 PLOT NO. 1



Rozložení napětí [MPa] u modelu č.4

příloha 3

```

! _____ hLavní macro
pi = 0.005 !MPa
po = 0.001 !MPa
qp = 0.000667651584035369 !MPa
ps = 0.0012 !MPa
g = 9.810 !N/kg
fi = 23.5/180*acos(-1) !rad
gs = 0.04*g !
gx = gs*cos(fi) !mm/(s**2)
gz = gs*sin(fi) !mm/(s**2)
t = 70 !°C

*DEL,nazvy_stavu,,NOPR
*DIM,nazvy_stavu,STRING,80,6
*DEL,b,,NOPR
*DIM,b,array,8,4

nazvy_stavu(1,1) = 'S1: Zatizeni dominantnim vetrem'
b(1,1) =1, -(1.35*po), -1.5*qp, 1.35*ps, 1.35*gz, g+1.35*gs, 1.35*gx, t,

nazvy_stavu(1,2) = 'S2: Zatizeni dominantnim snehem'
b(1,2) =2, -(1.35*po), -1.35*qp, 1.5*ps, 1.35*gz, g+1.35*gs, 1.35*gx, t,

nazvy_stavu(1,3) = 'S3: Zatizeni dominantni seismicitou'
b(1,3) =3, -(1.35*po), -1.35*qp, 1.35*ps, 1.5*gz, g+1.5*gs, 1.5*gx, t,

nazvy_stavu(1,4) = 'S4: Zatizeni dominantnim podtlakem'
b(1,4) =4, -(1.5*po), -1.35*qp, 1.35*ps, 1.35*gz, g+1.35*gs, 1.35*gx, t,

*ABBR,OBRAZEK,'ULOZ_OBR'
*ABBR,ZOBRAZENI,'ZOBRAZENI'
*ABBR,SMAZANI,'SMAZANI'
*ABBR,HROM_VYP,'HROM_VYP'
*ABBR,PREDCHOZI,'JINY_SET,1'
*ABBR,DALSI,'JINY_SET,0'

*ABBR,VYSLEDKY_1_LA,'VYSLEDKY,1,0'
*ABBR,VYSLEDKY_1_LBA,'VYSLEDKY,1,1'
*ABBR,VYSLEDKY_2_LA,'VYSLEDKY,2,0'
*ABBR,VYSLEDKY_2_LBA,'VYSLEDKY,2,1'
*ABBR,VYSLEDKY_3_LA,'VYSLEDKY,3,0'
*ABBR,VYSLEDKY_3_LBA,'VYSLEDKY,3,1'
*ABBR,VYSLEDKY_4_LA,'VYSLEDKY,4,0'
*ABBR,VYSLEDKY_4_LBA,'VYSLEDKY,4,1'

```

```

! _____ hromadný výpočet

*ABSET, 'Hromadne vypocty', BOTH

*GET, nazev, ACTIVE, , JOBNAM
  *DO, zs, 1, 4
    *ABCHECK, (zs-1)*20, 'Stav %zs% static structural'
    /SOLU
    ANTYPE, 0
    ZTEZ, b(1, zs), b(2, zs), b(3, zs), b(4, zs), b(5, zs), b(6, zs), b(7, zs), b(8, zs)
    /SOLU
    PSTRES, 1
    SOLVE
    FINISH
    /COPY, %nazev%, rst, , %nazev%_stav%zs%_static, rst

    *ABCHECK, (zs-1)*20+5, 'Stav %zs% eigen buckling'
    /SOLU
    ANTYPE, 1
    BUCOPT, LANB, 25, 0, 0, RANGE
    PSTRES, 1
    SOLVE
    FINISH
    /COPY, %nazev%, rst, , %nazev%_stav%zs%_buckling, rst
    EXPORT_STABILITA, zs
    /COM, _return = %_return%
  *ENDDO
*ABFINI
! _____ smazání zatížení
  /PREP7
  LSCLEAR, all
! _____ kotvení do zemi
  /PREP7
  CMSEL, , K_pevne
  NSLK
  D, ALL, ALL
  ALLS
! _____ zatížení sněhem
*IF, ARG4, NE, 0, THEN
  /PREP7
  ALLS
  CMSEL, , A_snih
  CSYS
  ESLA
  NSLE, , CORNER
  CM, N_snih, NODE
  *GET, Nmin, NODE, , NUM, MIN
  *GET, pocetN, NODE, , COUNT
  aktualN = Nmin
  *DO, i, 0, pocetN-1
    NSEL, , , aktualN
    ESLA
    ESLN, R
    CM, E_aktual, ELEM
    *GET, Emin, ELEM, , NUM, MIN
    *GET, pocetE, ELEM, , COUNT
    pa = 0
    aktualeE = Emin
  *DO, j, 0, pocetE-1

```

```

*GET,paj,ELEM,aktualE,APROJ,Y
*GET,aj,ELEM,aktualE,AREA
*IF,paj/aj,LT,cos(acos(-1)/3),THEN
  paj = 0
*ENDIF
ESEL,, ,aktualE
NSLE,,CORNER
*GET,pocetEN,NODE,,COUNT
pa = pa+paj/pocetEN
CMSEL,,E_aktual
aktualE = ELNEXT(aktualE)
*ENDDO
F,aktualN,FY,-pa/pocetE*ARG4
CMSEL,,N_snih
aktualN = NDNEXT(aktualN)
*ENDDO
ALLS
*ENDIF
! _____ zatížení větrem a podtlakem
*IF,ARG3,EQ,0,THEN
  *IF,ARG2,GT,0,THEN
    ALLS,ALL
    CMSEL,,A_PLAST_T
    ESLA
    SFE,ALL,1,PRES,,ARG2
  *ELSEIF,ARG2,LT,0
    ALLS,ALL
    CMSEL,,A_PLAST_T
    ESLA
    SFE,ALL,2,PRES,,ARG2
  *ENDIF
*ELSE
  /COM,Zatizeni realnym vetrem
  /PREP7
*DO,i,1,5!
  ALLS
  CMSEL,,A_plast%i%
  ESLA
  CSYS,20+i
  *GET,Emin,ELEM,,NUM,MIN
  *GET,pocetE,ELEM,,COUNT
  aktualE = Emin
*DO,j,0,pocetE-1
  uhe11 = (90+NY(NELEM(aktualE,1)))*acos(-1)/180
  uhe12 = (90+NY(NELEM(aktualE,2)))*acos(-1)/180
  uhe13 = (90+NY(NELEM(aktualE,3)))*acos(-1)/180
  uhe14 = (90+NY(NELEM(aktualE,4)))*acos(-1)/180
  p_local1 = -ARG2-ARG3*(-.55+.25*cos(uhe11)+1*cos(2*uhe11)+.45*cos(3*uhe11)-
.15*cos(4*uhe11))
  p_local2 = -ARG2-ARG3*(-.55+.25*cos(uhe12)+1*cos(2*uhe12)+.45*cos(3*uhe12)-
.15*cos(4*uhe12))
  p_local3 = -ARG2-ARG3*(-.55+.25*cos(uhe13)+1*cos(2*uhe13)+.45*cos(3*uhe13)-
.15*cos(4*uhe13))
  p_local4 = -ARG2-ARG3*(-.55+.25*cos(uhe14)+1*cos(2*uhe14)+.45*cos(3*uhe14)-
.15*cos(4*uhe14))
  SFE,aktualE,2,PRES,,p_local1,p_local2,p_local3,p_local4
  aktualE = ELNEXT(aktualE)
*ENDDO

```

```

*ENDDO
ALLS
*ENDIF
!_____ zatížení teplotou
  ALLS,ALL
  CMSEL,,A_PLAST_T
  LSLA
  ESLA
  ESLL,A
  NSLE
  CSYS
  BFE,ALL,TEMP,1,ARG8  !
!_____ přetížení
  ACEL, ARG7, ARG6, ARG5
  ALLS,ALL
!_____ síly na koncích potrubí
/COM,Sily od tlaku
ALLS,ALL
CMSEL,,A_plast_T
ESLA
!      dolní vstup
NSLE,,CORNER
CMSEL,,L_inlet
NSLL,R,1
*GET,pocetN,NODE,,COUNT
F,ALL,FY,-ARG2*22111814/pocetN
!      horní výstup
CSYS,13
NSLE,,CORNER
CMSEL,,L_outlet
NSLL,R,1
CM,N_outlet, NODE
*GET,pocetN,NODE,,COUNT
NROTAT, N_outlet
F,ALL,FX,-ARG2*4726*4626/pocetN
CSYS
ALLS
!_____ export stability
*DEL,uzlyMaxUSUM,,NOPR
*DIM,uzlyMaxUSUM,array,4,25
/COM
/COM
/COM, _____EXPORT STABILITA_____
/OUTPUT,%navez%_nasobky_a_slozky_%ARG1%,csv
/COM, Nasobky a slozky napeti
/COM, ; rRcr; system z %maxSP%; cislo uzlu; SZ; SY; SYZ
/OUTPUT
ALLS
/POST1
/COM, Nasobky modu
FILE,'%navez%_stav%ARG1%_buckling','rst','.'
SET,FIRST
*DO,AR20,1,25
  /COM, -> mod %AR20%

  *GET,nasobek,ACTIVE,0,SET,FREQ
  CMSEL,,A_plast
  ESLA
  ESEL,R,ENAME,,SHELL281

```

```

NSLE,,CORNER
NSORT,U,SUM,0,1,,SELECT
*GET,nodeMaxUSUM, SORT,0,IMAX
NSEL,,,,nodeMaxUSUM
CMSEL,,A_plast
CMSEL,U,A_plastRovne
NSLA,R,1
*IF,NSEL(nodeMaxUSUM),EQ,1,THEN
    poziceMaxUSUM = 0

    *DO,AR21,1,5
        NSEL,,,,nodeMaxUSUM
        CMSEL,,A_plast%AR21%
        NSLA,R,1
        *IF,NSEL(nodeMaxUSUM),EQ,1,THEN
            systemMaxUSUM = AR21
            *EXIT
        *ENDIF
    *ENDDO
*ELSE
    poziceMaxUSUM = 1
    *DO,AR21,5,5
        NSEL,,,,nodeMaxUSUM
        CMSEL,,A_plast%AR21%
        NSLA,R,1
        *IF,NSEL(nodeMaxUSUM),EQ,1,THEN
            systemMaxUSUM = AR21
            *EXIT
        *ENDIF
    *ENDDO
    uzlyMaxUSUM(1,AR20) = nasobek, systemMaxUSUM, nodeMaxUSUM, poziceMaxUSUM
    SET,NEXT
*ENDDO

/COM, Slozky napeti
FILE,%navez%_stav%ARG1%_static','rst','.'
SET,FIRST
SHELL,MID
CMSEL,,A_plast
ESLA
ESEL,R,ENAME,,SHELL281
NSLA,,1
*DO,AR20,1,25
    /COM, -> mod %AR20%
    AR21 = uzlyMaxUSUM(1,AR20)
    AR22 = 20+uzlyMaxUSUM(2,AR20)
    uze1 = uzlyMaxUSUM(3,AR20)
    RSYS,AR22
    CSYS,AR22
    *GET,S_pode1,NODE,uze1,S,Z
    *GET,S_obvod,NODE,uze1,S,Y
    *GET,S_smyk,NODE,uze1,S,YZ
    AR23 = uzlyMaxUSUM(4,AR20)
    /OUTPUT,%navez%_nasobky_a_slozky_%ARG1%,csv,,APPEND
    /COM, %AR23%;%AR21%;%AR22%;%uze1%;%S_pode1%;%S_obvod%;%S_smyk%
    /OUTPUT
*ENDDO

```

příloha 4

```

# !usrbinenv python
# -- coding utf-8 --
from __future__ import division
import numpy
from math import pi

from numpy import *

print('*****hodnoceni stavu Y')

data = genfromtxt('sestava_nasobky_a_slozky_Y.txt')
print('-----')

soubor = file('vysledky_Y_LA_LBA.txt', 'a')

soubor.write('mod,rRcr, rRpl, lambda_ov, rRd\n')

for i in range(25):
#----- data z Ansysu
    plast = data[i, 0]
    rRcr = data[i, 1]
    sourad_system = data[i, 2]
    cislo_nodu = data[i, 3]
    sigma_podel = data[i, 4]
    sigma_obvod = data[i, 5]
    sigma_smyk = data[i, 6]
#----- hodnoty
    fy = 235 #mez kluzu
    R = 2653 #polomer
    t = 5 #tloustka
#----- vycet dle EN 1993-1-6
    if plast == 0:
        print('_____pro mod:', i+1)
        print('hodnoceno - uzal je na plasti')
        sila_podel = -1*(sigma_podel * t)
        sila_obvod = -1*(sigma_obvod * t)
        sila_smyk = -1*(sigma_smyk * t)

        rRpl = (fy*t)/(sqrt((sila_podel**2-
            sila_podel*sila_obvod+sila_obvod**2+3*sila_smyk**2)))
        print("rRpl = {0:.5g}".format(rRpl))
        lambda_ov = sqrt(rRpl/rRcr)
        print("lambda_ov = {0:.5g}".format(lambda_ov))
#----- parametry pri bouleni v osovem tlaku X
    lambda_x0 = 0.2
    beta_x = 0.6
    ny_x = 1
    Q_x = 16
    delta_wk_x = (1/Q_x)*sqrt(R/t)*t
    alfa_x = 0.62/(1+1.91*(delta_wk_x/t)**1.44)

    lambda_p_x = sqrt(alfa_x/(1-beta_x))

```

```

if lambda_ov <= lambda_x0:
    X_ov_x = 1
elif lambda_x0 <= lambda_ov <= lambda_p_x:
    X_ov_x = (1-beta_x)*((lambda_ov-lambda_x0)/(lambda_p_x-
        lambda_x0))**ny_x
elif lambda_p_x <= lambda_ov:
    X_ov_x = alfa_x/(lambda_ov**2)

yM1 = 1.1
rRk_x = X_ov_x*rRpl
rRd_x = rRk_x/yM1

if rRd_x >= 1:
    print('podminka pro podelne(X) _____OK')
else:
    print('podminka pro podelne(X) _____nesplnena')

# ----- parametry pri bouleni v obvodovem tlaku 0
lambda_O0 = 0.4
beta_O = 0.6
ny_O = 1
alfa_O = 0.5

lambda_p_O = sqrt(alfa_O/(1 - beta_O))

if lambda_ov <= lambda_O0:
    X_ov_O = 1
elif lambda_O0 <= lambda_ov <= lambda_p_O:
    X_ov_O = (1 - beta_O) * ((lambda_ov - lambda_O0) /
        (lambda_p_O - lambda_O0)) ** ny_O
elif lambda_p_O <= lambda_ov:
    X_ov_O = alfa_O / (lambda_ov ** 2)

yM1 = 1.1
rRk_O = X_ov_O * rRpl
rRd_O = rRk_O / yM1

if rRd_O >= 1:
    print('podminka pro obvodove(O) _____OK')
else:
    print('podminka pro obvodove(O) _____nesplnena')

# ----- parametry pri bouleni ve smyku Ox

lambda_Ox0 = 0.4
beta_Ox = 0.6
ny_Ox = 1
alfa_Ox = 0.5

lambda_p_Ox = sqrt(alfa_Ox / (1 - beta_Ox))

if lambda_ov <= lambda_Ox0:
    X_ov_Ox = 1
elif lambda_Ox0 <= lambda_ov <= lambda_p_Ox:
    X_ov_Ox = (1 - beta_Ox) * ((lambda_ov - lambda_Ox0) /
        (lambda_p_Ox - lambda_Ox0)) ** ny_Ox
elif lambda_p_Ox <= lambda_ov:
    X_ov_Ox = alfa_Ox / (lambda_ov ** 2)

```

```

yM1 = 1.1
rRk_Ox = X_ov_Ox * rRp1
rRd_Ox = rRk_Ox / yM1

# ----- hodnocení unosnosti při boulení

rRd = min(rRd_x, rRd_O, rRd_Ox)

if rRd_Ox >= 1:
    print('podminka pro smyk(Ox) _____OK')
else:
    print('podminka pro smyk (Ox) _____nesplnena\n')

if rRd >= 1:
    soubor = file('vysledky_Y_LA_LBA.txt', 'a')
    vysledky = [i + 1, rRcr, rRp1, lambda_ov, rRd]
    for cislo in vysledky:
        cisloText = str(cislo)
        soubor.write(cisloText + ',')
    soubor.write(' vetsi jak 1 - podminka splnena')
    soubor.write('\n')
    soubor.close()
else:
    soubor = file('vysledky_Y_LA_LBA.txt', 'a')

    vysledky = [i + 1, rRcr, rRp1, lambda_ov, rRd]
    for cislo in vysledky:
        cisloText = str(cislo)
        soubor.write(cisloText + ',')
    soubor.write(' mensi jak 1 - podminka nesplnena')
    soubor.write('\n')
    soubor.close()

else:
    print('_____pro mod:', i+1)
    print('nehodnoceno - uzal nelezi na plasti\n')

    soubor = file('vysledky_Y_LA_LBA.txt', 'a')
    vysledky = [i+1]
    for cislo in vysledky:
        cisloText = str(cislo)
        soubor.write(cisloText + ',')
    soubor.write('nehodnoceno\n')
    soubor.close()

```

Poznámka: hodnota „Y“ v přiloženém kódu značí číslo zatěžujícího stavu, jenž nabýval hodnot 1-4

příloha 5

```

> restart;
rozměry skorepiny
> ea:=5; #[mm]
  R:=2653;#[mm]

                                ea := 5
                                R := 2653

materialove vlastnosti
> E:=2e5;#[MPa]
  Rp02:=235;#[MPa]
  nu:=0.3; #poisonova konstanta
  sigma_e:=Rp02; #[Mpa]

                                E := 2. 105
                                Rp02 := 235
                                v := 0.3
                                sigma_e := 235

vypočet tlaku Py
> Py:=evalf(sigma_e*ea/R);

                                Py := 0.4428948360

> ncyl:=2;
  L:=23000;# rucni zmena delky
  Z:=(Pi*R/L);
  epsilon:=(1/((ncyl^2)-1+(Z^2)/2))*((1/(ncyl^2/Z^2+1)^2)+(ea^2/(12*R^2*(1-
nu^2)))*(ncyl^2-1+Z^2)^2);
  Pm:=evalf(E*ea*epsilon/R);

                                ncyl := 2
                                L := 23000
                                Z :=  $\frac{2653}{23000} \pi$ 
                                
$$\epsilon := \frac{1}{\left(\frac{2116000000}{7038409\pi^2} + 1\right)^2} + 3.252691467 \cdot 10^{-7} \left(\frac{7038409}{529000000} \pi^2 + 3\right)^2}$$

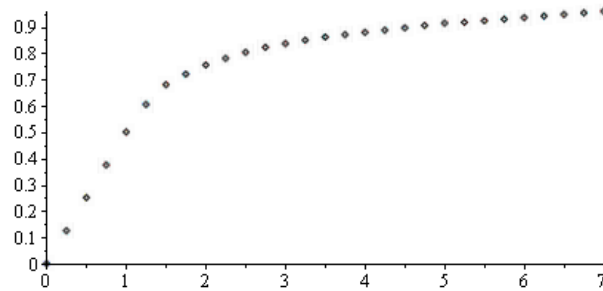
                                Pm := 0.1246143545

> PmPy:=Pm/Py;

                                PmPy := 0.2813633043

>
# Definice polí pro graf 8.5.5.
APMPY := [0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.25, 1.5, 1.75, 2, 2.25, 2.5,
2.75, 3, 3.25, 3.5, 3.75, 4, 4.25, 4.5, 4.75, 5, 5.25, 5.5,
5.75, 6, 6.25, 6.5, 6.75, 7]:
APRPY := [0, 0.125, 0.251, 0.375, 0.5, 0.605, 0.68, 0.72, 0.755,
0.78, 0.803, 0.822, 0.836, 0.849, 0.861, 0.87, 0.879, 0.887,
0.896, 0.905, 0.914, 0.917, 0.923, 0.929, 0.935, 0.941,
0.947, 0.953, 0.959]:
with(plots):
pointplot(APMPY, APRPY);

```



```

> #ziskani hodnoty PrPy pro zadanou hodnotu PmPy
with(CurveFitting);
PrPy:=CurveFitting:-ArrayInterpolation(APMPY, APRPY, PmPy);
      [ArrayInterpolation,BSpline,BSplineCurve,Interactive,LeastSquares,
      PolynomialInterpolation,RationalInterpolation,Spline,ThieleInterpolation]

      PrPy := 0.140807105367200

> Pr := PrPy·Py;
      Pr := 0.0623627398392408

> #zadání zadani pocatecnich hodnot (odhad pro iteraci)
> Pr0 := 10;
      Pr0 := 10

while Pr < Pr0 do
  Pr0 := Pr;

  ncy1 := ncy1 + 1;

  Z := (Pi * R / L) :

  epsilon := (1 / ((ncy1^2) - 1 + (Z^2) / 2)) * ((1 / (ncy1^2 / Z^2 + 1))^2
    + (ea^2 / (12 * R^2 * (1 - nu^2))) * (ncy1^2 - 1 + Z^2)^2) :

  Pm := evalf(E * ea * epsilon / R) :

  PmPy := Pm / Py :

  APMPY := [0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.25, 1.5, 1.75, 2, 2.25, 2.5,
    2.75, 3, 3.25, 3.5, 3.75, 4, 4.25, 4.5, 4.75, 5, 5.25, 5.5,
    5.75, 6, 6.25, 6.5, 6.75, 7]:
  APRPY := [0, 0.125, 0.251, 0.375, 0.5, 0.605, 0.68, 0.72, 0.755,
    0.78, 0.803, 0.822, 0.836, 0.849, 0.861, 0.87, 0.879, 0.887,
    0.896, 0.905, 0.914, 0.917, 0.923, 0.929, 0.935, 0.941,
    0.947, 0.953, 0.959]:
  with(CurveFitting) :
  PrPy := CurveFitting:-ArrayInterpolation(APMPY, APRPY, PmPy) :

  Pr := PrPy·Py;
  printf("\n");
  printf("-----oddelovac iteraci-----");
  printf("\n");
  printf("\n");
end do;

```

$$Pr0 := 0.0623627398392408$$

$$ncyl := 3$$

$$Z := \frac{2653}{23000} \pi$$

$$\varepsilon := \frac{\frac{1}{\left(\frac{4761000000}{7038409 \pi^2} + 1\right)^2} + 3.252691467 \cdot 10^{-7} \left(\frac{7038409}{529000000} \pi^2 + 8\right)^2}{8 + \frac{7038409}{1058000000} \pi^2}$$

$$Pm := 0.01066985952$$

$$PmPy := 0.02409118069$$

$$PrPy := 0.0120455903450000$$

$$Pr := 0.00533492976037196$$

-----oddelovac iteraci-----

$$Pr0 := 0.00533492976037196$$

$$ncyl := 4$$

$$Z := \frac{2653}{23000} \pi$$

$$\varepsilon := \frac{\frac{1}{\left(\frac{8464000000}{7038409 \pi^2} + 1\right)^2} + 3.252691467 \cdot 10^{-7} \left(\frac{7038409}{529000000} \pi^2 + 15\right)^2}{15 + \frac{7038409}{1058000000} \pi^2}$$

$$Pm := 0.003521201994$$

$$PmPy := 0.007950424588$$

$$PrPy := 0.00397521229400000$$

$$Pr := 0.00176060099701631$$

-----oddelovac iteraci-----

$$Pr0 := 0.00176060099701631$$

$$ncyl := 5$$

$$Z := \frac{2653}{23000} \pi$$

$$\varepsilon := \frac{\frac{1}{\left(\frac{13225000000}{7038409 \pi^2} + 1\right)^2} + 3.252691467 \cdot 10^{-7} \left(\frac{7038409}{529000000} \pi^2 + 24\right)^2}{24 + \frac{7038409}{1058000000} \pi^2}$$

$$Pm := 0.003394307979$$

$$PmPy := 0.007663914101$$

$$PrPy := 0.00383195705050000$$

$$Pr := 0.00169715398944024$$

-----oddelovac iteraci-----

$$Pr0 := 0.00169715398944024$$

$$ncyl := 6$$

$$Z := \frac{2653}{23000} \pi$$

$$\varepsilon := \frac{\frac{1}{\left(\frac{19044000000}{7038409 \pi^2} + 1\right)^2} + 3.252691467 \cdot 10^{-7} \left(\frac{7038409}{529000000} \pi^2 + 35\right)^2}{35 + \frac{7038409}{1058000000} \pi^2}$$

$$Pm := 0.004457302246$$

$$PmPy := 0.01006401945$$

$$PrPy := 0.00503200972500000$$

$$Pr := 0.00222865112190428$$

-----oddelovac iteraci-----