VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ
INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

NELINEÁRNÍ ANALÝZA ZTRÁTY STABILITY SPALINOVÉHO POTRUBÍ
NONLINEAR BUCKLING ANALYSIS OF A FLUE GAS PIPE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE — **Bc. Jan Jelínek**
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — **Ing. Tomáš Létal, Ph.D.**
SUPERVISOR

BRNO 2016

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav procesního inženýrství
Student:	**Bc. Jan Jelínek**
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Procesní inženýrství
Vedoucí práce:	**Ing. Tomáš Létal, Ph.D.**
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:

Nelineární analýza ztráty stability spalinového potrubí

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Spalinová 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 nelineární analýzy s předpokladem velkých deformací a elastoplastickým materiálem, která do jisté míry umožňuje simulovat průběh ztráty stability a s nejvyšší mírou přesnosti určit mezní zatížení. Úkolem studenta je provést hodnocení odolnosti spalinového 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 spalinového potrubí pro analýzy metodou konečných prvků.
3. Hodnocení náchylnosti spalinového 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 27. 11. 2015

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ DĚKANÁT

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.	doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
ředitel ústavu	děkan

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá nelineární analýzou ztráty stability spalinového potrubí, které je součástí odsiřovací linky. Popisuje tvorbu zjednodušeného MKP modelu. Dále zmiňuje nastavování okrajových podmínek modelu pro několik zátěžných stavů. Tyto zátěžné stavy se odlišují upřednostněním jednoho ze zatížení jako dominantní. Následně jsou provedeny návrhy několika variant vyztužení lehkými výztuhami. Práce je zakončena srovnáním odolností proti ztrátě stability navrhovaných variant vyztužení a nevyztuženého modelu spalinového potrubí.

KLÍČOVÁ SLOVA

Ztráta stability, nelineární analýza, boulení, spalinová potrubí, skořepiny, mezní stav, zatížení, MKP, Eurokódy

ABSTRACT

This thesis deals with the nonlinear analysis of stability loss of flue gas pipe. This pipe is a part of desulphurization line. The thesis describes the creating of a simplified FEM model. It also describes the setting of the boundary conditions of the model for few loading cases. These cases differ by preference for one of the load as dominant. There are proposed several variants of stiffening by light ring stiffener. The work is finished by comparing the resistance to the stability loss of the reinforced variants and unreinforced model of flue gas pipe.

KEYWORDS

Stability loss, nonlinear analyses, buckling, flue gas pipes, shell, limit states, loading, FEM, Eurocodes

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

JELÍNEK, J. *Nelineární analýza ztráty stability spalinového potrubí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 104 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Tomáš Létal, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Nelineární analýza ztráty stability spalinového potrubí* vypracoval samostatně, za použití uvedené literatury pod odborným vedením Ing. Tomáše Létala, Ph.D.

V Brně 23. května 2016 ….....

PODĚKOVÁNÍ:

Tímto chci poděkovat všem, kteří mi pomáhali při vypracování této práce.

Zejména děkuji panu Ing. Tomáši Létalovi, Ph.D. za odborné vedení, připomínky a dobré rady. A mé rodině za podporu během celého studia.

Obsah

1 SEZNAM SYMBOLŮ 10
2 ÚVOD 12
3 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ 13
3.1 POTRUBÍ 13
3.2 PŘÍHRADOVÉ KONSTRUKCE 13
3.3 SKOŘEPINY 14
3.3.1 Skořepinové prvky 14
3.3.2 Membránový stav napjatosti 15
3.3.3 Momentový stav napjatosti 15
3.3.4 Zatížení skořepin 16
3.3.5 Nedokonalosti skořepin 16
3.3.6 Vyztužování skořepin 18
3.4 EUROKÓDY 19
3.4.1 Ocelové konstrukce 19
3.4.2 Skořepiny, zatížení, odolnost a stabilita (potrubí, nádrže a tanky) 21
3.5 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ – MKP 27
3.5.1 Základy a principy modelování v ANSYS Mechanical APDL 27
4 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE 30
4.1 ANALÝZA PROBLÉMU 30
4.2 CÍL PRÁCE 30
4.3 POPIS KONSTRUKCE 30
4.3.1 Části konstrukce 32
4.3.2 Použité elementy pro MKP 34
4.3.3 Okrajové podmínky modelu 36
5 VÝPOČTOVÁ ČÁST 38
5.1 Materiálové vlastnosti 38
5.1.1 Materiálové vlastnosti pro lineární část analýzy LA, LBA 38
5.1.2 Materiálové vlastnosti pro nelineární část analýzy GMNA,GMNIA 38
5.2 Nastavení lineární analýzy 40
5.3 Nastavení zatížení modelu 40
5.4 Implementace imperfekcí 40
5.5 Nastavení nelineární analýzy GMNA, GMNIA 41

5.5.1 Vyhodnocení odolnosti proti ztrátě stability. 44
5.6 Návrh vyztužených variant 49
5.6.1 Předběžný návrh vyztužení 50
5.7 Srovnání navržených variant vyztužení 54
6 DISKUZE 57
7 ZÁVĚR 58
8 POUŽITÉ ZDROJE 59
9 SEZNAM OBRÁZKŮ 62
10 SEZNAM TABULEK 63
11 SEZNAM GRAFŮ 64
12 SEZNAM ROVNIC 65
13 SEZNAM PŘÍLOH 66

1 SEZNAM SYMBOLŮ

SYMBOL	VÝZNAM	JEDNOTKA
d_{max}	vnější průměr válcové skořepiny	mm
d_{min}	vnitřní průměr válcové skořepiny	mm
d_{nom}	střednicový průměr válcové skořepiny	mm
E	Youngův modul pružnosti	MPa
E_T	tečný modul pružnosti	MPa
g	tíhové zrychlení	N/kg
l	délka válcové skořepiny	mm
l_{gx}	ovlivněná délka v meridionálním směru pro měření nedokonalostí	mm
$l_{g\theta}$	délka měřená v obvodovém směru pro měření nedokonalostí	mm
l_m	ovlivněná délka v oblasti výztuhy	mm
P	dynamický tlak větru	MPa
r	rádius střednicové plochy válcové stěny skořepiny	mm
t	tloušťka válcové stěny	mm
U_r	tolerance ovality	-
v	korigovaná rychlost větru	m/s

Symboly řecké abecedy

SYMBOL	VÝZNAM	JEDNOTKA
Δw_{eq}	ekvivalentní amplituda imperfekcí	mm
ε	poměrné prodloužení	-
ν	Poissonova konstanta	-
ρ	hustota vzduchu za normálních podmínek	kg/m^3
ρ_s	hustota materiálu oceli	kg/m^3
σ	napětí	MPa

Symboly využité při vyhodnocení analýz

SYMBOL	VÝZNAM	JEDNOTKA
f_u	mez pevnosti	MPa
f_y	mez kluzu	MPa
k_{GMNIA}	kalibrační součinitel	-
$r_{R,GMNA}$	faktor elasto – plastické únosnosti při boulení	-
$r_{R,GMNIA}$	faktor elasto – plastické únosnosti při boulení (včetně imperfekcí)	-
r_{Rcr}	faktor elastické kritické únosnosti	-
r_{Rd}	faktor návrhové únosnosti při boulení	-
r_{Rk}	faktor referenční charakteristické únosnosti	-
r_{Rpl}	faktor plastické referenční únosnosti	-
S_Y	obvodová membránová napětí	MPa
S_{YZ}	smyková napětí	MPa
S_Z	podélná membránová napětí	MPa
$T_{, ARC}$	čas ukončení analýzy dosažením minimální délky oblouku	-
$T_{,BIF_L}$	čas ukončení analýzy dosažením prvního bifurkačního bodu	-
$T_{,BIF_ROT}$	čas ukončení analýzy dosažením natočení 0,1 radiánu	-
T_{GMNA}	čas ukončení nelineární analýzy GMNA	-
t_{GMNA}	čas ukončení nelineární analýzy GMNA, korigovaný	-
T_{GMNIA}	čas ukončení nelineární analýzy GMNIA	-
t_{GMNIA}	čas ukončení nelineární analýzy GMNIA, korigovaný	-
α_x	redukční součinitel pružné imperfekce při boulení	-
γ_{M1}	součinitel únosnosti při boulení	-
Δ_{wk}	charakteristická amplituda imperfekce	-
$\bar{\lambda}$	poměrná štíhlost skořepiny	-
$\bar{\lambda}_{ov}$	celková poměrná štíhlost skořepiny	-
χ	součinitel boulení pro elasto-plastické účinky při boulení	-

2 ÚVOD

Bez ohledu na oblast průmyslu, či obchodu jedním z hlavních trendů této doby je maximalizovat výtěžnost a zisky a minimalizovat investiční náklady s ohledem na zatížení životního prostředí.

Tento trend se vztahuje také na oblast strojírenského průmyslu. V této oblasti je snaha minimalizovat výrobní náklady i energetickou náročnost výroby se setrvávajícím zájmem zachování funkčnosti, pevnosti a odolnosti výrobků. To se často uplatňuje ve velkokapacitních provozech, kde se může malá úspora materiálu projevit jako výrazná úspora nákladů.

V případě rozměrných tenkostěnných skořepin, jako jsou kouřovody elektráren, je možné tyto postupy dobře aplikovat přímo při výstavbě a nebo retrofitu zařízení. Tato zařízení ovšem musejí splňovat požadavky na zatížení, dané jejich vlastním provozem, a dále musí splňovat kritéria stanovená normami a předpisy. U rozměrných konstrukcí hraje významnou roli jejich vlastní hmotnost, která výrazně komplikuje a prodražuje manipulaci a transport z místa výroby do lokality konečné působnosti. S narůstajícími rozměry konstrukcí se zvyšuje namáhání konstrukce vlastní tíhou a zvyšuje se účinnost klimatických vlivů, jako jsou poryvy větru, zatížení sněhovou pokrývkou či námrazou. Rozměrné kouřovody bývají konstruovány z ocelových plechů o tloušťce v řádech jednotek milimetrů. Při zeštíhlení stěny jejich konstrukce, třeba jen o jeden milimetr, je možné snížit jejich hmotnost o několik tun. Vlivem zeštíhlení stěn dochází také k částečnému snížení jejich tuhosti a odolnosti vůči ztrátě stability. Ztrátě tuhosti a odolnosti lze předejít vyztužením konstrukce.

Možnosti realizace takovýchto konstrukčních úprav je nutné prověřit pomocí pevnostních analýz. Analýzy se zaměřují na různé mezní stavy a zatížení, které by mohly danou konstrukci ohrozit.

Ve většině případů se uplatňují lineární analýzy s deformacemi v elastické oblasti materiálu. Lineární analýzy vycházejí ze zjednodušených modelů. Jsou léty prověřené a pohybují se na konzervativní straně s vyšší bezpečnostní rezervou. Vedle lineárních analýz se také uplatňují nelineární analýzy ztráty stability. Tento typ analýz je náročnější na vytvoření výpočtového modelu, který přesněji popisuje reálný stav zkoumané součásti a poskytuje reálnější popis při zatížení. Přesnější popis modelu je dosažen při zohlednění nedokonalostí (imperfekcí) zahrnutých do geometrie modelu.

Nelineární analýzy uvažují s nedokonalostmi konstrukce způsobených při výrobě a dostávají se do oblasti elastoplastických deformací materiálu. Tím je možné analyzovat zatížení konstrukce téměř až do bodu jejího zhroucení a zjistit skutečnou únosnost konstrukce.

3 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

Spalinová potrubí, spalinovody a nebo také kouřovody jsou potrubí využívána pro sběr a odvod spalin ze spalovací jednotky k dalšímu zařízení nebo do komína. Spalinovody pracují za nízkých teplot a tlaků. Pracovní teplota se pohybuje v rozmezí od 50 °C do 200 °C. Pracovní přetlak spalinovodů se pohybuje v rozsahu -1 kPa až +5 kPa. Proto je možné konstrukce spalinovodů provádět z tenkých plechů. Rizikem u spalinovodů je ztráta stability vlastní konstrukce. Dalším nebezpečím je zatížení potrubí vlivem vlastní tíhy, vlivem větru, sněhu, případně seismicitou. Tyto aspekty je třeba brát v úvahu při návrhu a kontrole zařízení. Pro uložení spalinovodů a potrubních tras se využívají podpěry a nosné příhradové konstrukce.

3.1 POTRUBÍ

Potrubí je technické zařízení realizující vazby mezi jednotlivými prvky v systému. Slouží pro dopravu kapalin, plynů, pevných látek nebo směsí tvořených jednotlivými fázemi. Potrubí lze rozdělit do několika základních skupin:

a) dle druhu tekutiny: vodovody, vzduchovody, spalinovody
b) dle tlaku: podtlaková, nízkotlaká a vysokotlaká
c) dle materiálu: ocelová, litinová, z neželezných kovů, plastová a další
d) dle druhu spojů: svařované, šroubované, pájené, přírubové, hrdlové
e) dle typu umístění: vnitřní, venkovní, nadzemní, podzemní

Součástí potrubí jsou různé tvarovky, potrubní spoje, kompenzátory, uzavírací armatury a upevňovací prvky v podobě podpěr, příhradových konstrukcí, závěsů a kotvení. [1], [2]

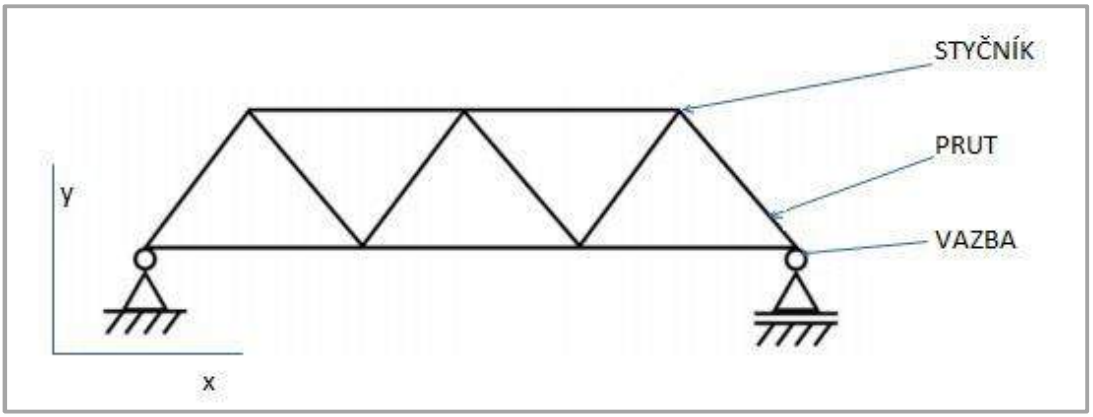
3.2 PŘÍHRADOVÉ KONSTRUKCE

Příhradová konstrukce je tvořena prutovou soustavou složenou z prutů a styčníků. Obvyklým předpokladem styčníků je plnění funkce kloubového spoje mezi pruty. Tento předpoklad se využívá i u prutových soustav s pevným spojením prutů, důvodem jsou malé odchylky a značné zjednodušení výpočtu.

Názorné zobrazení prutové soustavy je uvedeno na Obr. 3-1. Prutové soustavy se využívají nejen při návrhu konstrukcí mostů, jeřábů, nebo nosných konstrukcí spalinovodů a nádrží, ale i v automobilovém průmyslu, architektuře a podobně. Prutové soustavy jsou jedním z nejjednodušších modelů pro výpočet příhradových konstrukcí a musí splňovat prutové předpoklady: [3]

a) Geometrické:
   prut má spojitou střednici a definovaný příčný průřez
b) Vazebné:
   vazby omezují posuv a úhel natočení střednice prutu

c) Deformační:
střednice při deformaci zůstává hladká a spojitá, příčný průřez zůstává kolmý na střednici v přijatelných mezích
d) Napěťové:
napjatost v prutu je určena normálovým a smykovým napětím

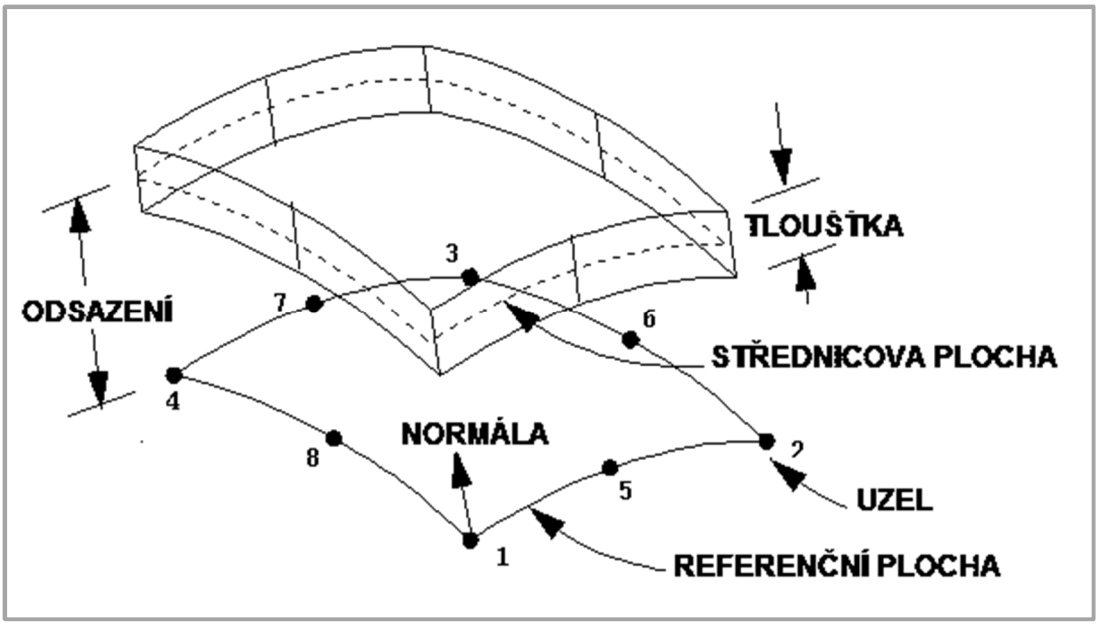


Obr. 3-1 Prutová konstrukce

3.3 SKOŘEPINY

3.3.1 Skořepinové prvky

Skořepina je těleso definované obecně zakřivenou střednicovou plochou a její tloušťka je mnohonásobně menší než ostatní rozměry. Skořepiny jsou schopné přenášet membránová a momentová napětí. Stručný popis skořepinového elementu je uveden na Obr. 3-2. [4]



Obr. 3-2 Skořepinový prvek [5]

3.3.2 Membránový stav napjatosti

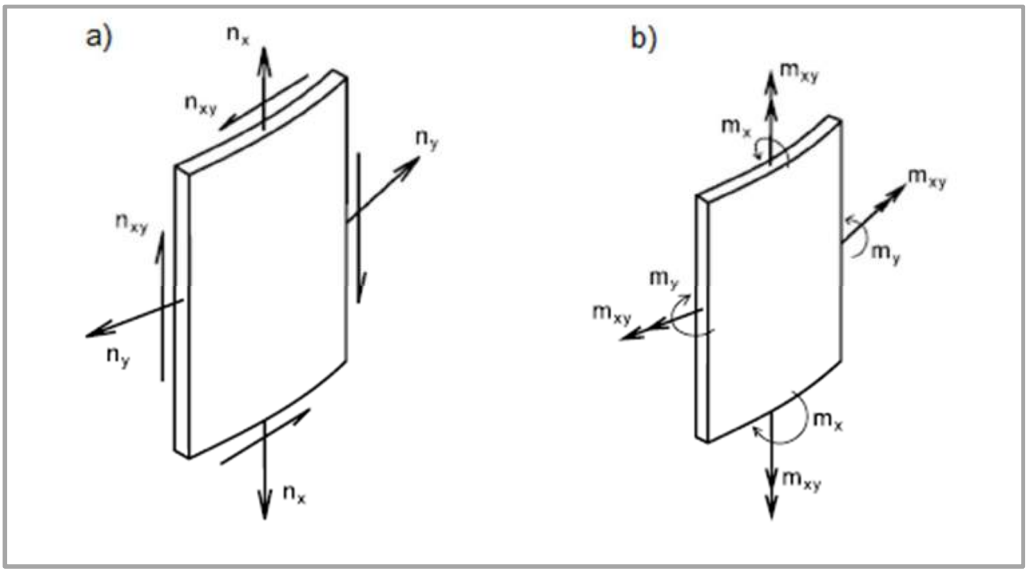
Membránový stav napjatosti vzniká u tenkostěnných rotačních skořepin (válec, koule, anuloid), které jsou schopny přenášet jen tahová napětí např. vyvolaná vnitřním přetlakem. Tahová napětí jsou rovnoměrně rozložena po celé tloušťce stěny. Hlavní směry membránových napětí jsou obvodové a podélné. Napětí v radiálním směru se zanedbává. Vlivem tvaru skořepiny a charakterem zatížení se v některých případech zanedbává vliv ohybových momentů na skořepině, protože jsou nulové, nebo zanedbatelné velikosti. Pro zachování membránového stavu napjatosti musí platit následující podmínky: [2], [4]

a) Normálové zatížení k povrchu musí být spojité
b) Osamělé síly musejí být tečné ke střednicové ploše
c) Střednicová plocha musí být hladká bez skokových změn
d) Tloušťka stěny skořepiny se nesmí měnit skokově

3.3.3 Momentový stav napjatosti

Při porušení podmínek membránového stavu napjatosti vzniká momentový stav napjatosti zahrnující ohyb a krut. Vzniká v místech podepření skořepin a v místech náhlé změny křivosti střednicových ploch nebo v místech změny tloušťky skořepiny. Vyvolává účinky, které se projevují v nejbližším okolí místa vzniku v tzv. ovlivněné oblasti. [2], [4]

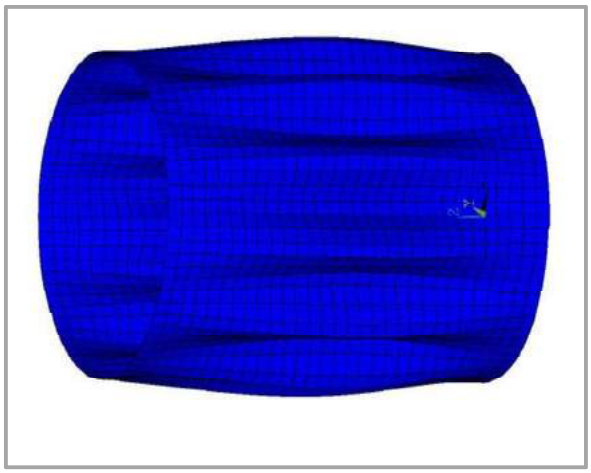
Na Obr. 3-3 je znázorněno zatížení presentující a) membránový stav napjatosti a b) momentový stav napjatosti.



Obr. 3-3 Stavy napjatosti [6]

3.3.4 Zatížení skořepin

Vlivem nadměrného vnějšího obecného zatížení skořepin vzniká v jejich plášti tlakové napětí, které může v důsledku vyvolat mezní stavy a ztrátu stability. Příkladem ztráty stability je boulení, kdy dochází k přerozdělení rovnováhy tlakového napětí na rovnováhu tlakového a ohybového napětí. Vznikají výrazné deformace pláště, v podobě vln, snižující únosnost skořepiny. Ztráta stability má často za následek neopravitelné poškození pláště a nese s sebou ztrátu v podobě nákladů na opravu, nebo nový aparát včetně ušlých zisků vlivem odstavení aparátu. [7], [8]



Obr. 3-4 Deformace pláště [8]

Zatížení skořepin je možné rozdělit do dvou skupin na zatížení způsobující primární a sekundární napětí. Primární napětí zůstává konstantní a nesnižuje se při tvorbě deformací, kterou způsobí. Sekundární napětí je tzv. samo-omezující napětí, které se při rozvinutí deformace sníží nebo úplně zanikne. [2]

Primární napětí jsou způsobena zatíženími trvalými a občasnými. Mezi trvalá zatížení patří vlastní tíha potrubí včetně hmotnosti izolace a protékajícího média. Dále tlak v potrubí za provozních podmínek. A zatížení od zapojení potrubí jako tlak vlnovcových kompenzátorů a sedlových podpěr. Mezi občasná zatížení se zahrnují klimatická zatížení větrem a sněhem, kombinovaná s dynamickými jevy jako je hydrodynamický ráz. [2]

Sekundární napětí jsou způsobena teplotním zatížení, pohyby podpěr, nebo následky seismických zatížení. Teplotní zatížení vzniká zejména při náběhu a ukončení provozu a je doprovázeno tepelnou dilatací. Pohyb podpěr může vniknout při sedání zeminy, výbuchu, či zemětřesení v blízkosti zařízení. [2]

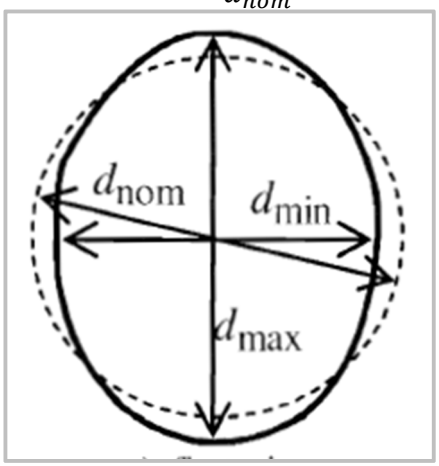
3.3.5 Nedokonalosti skořepin

Na hodnotu kritického napětí má významný vliv geometrie skořepiny, použitý materiál, výrobní imperfekce a okrajové podmínky popisující zatížení a uložení skořepiny. Z dokonalé konstrukce při návrhu se při výrobě stává konstrukce s implementovanými nedokonalostmi v mikroskopickém i makroskopickém měřítku.

V mikroskopickém měřítku se jedná o rozptyl vlastností materiálu a jeho strukturu. V makroskopickém měřítku se mohou objevit změny vlastností základního materiálu ve svarových spojích, nebo vady v geometrii skořepinové konstrukce v podobě nerovností povrchu, ovalita, pozvolné změny tloušťky stěny, či zvlnění její střednice. [8]

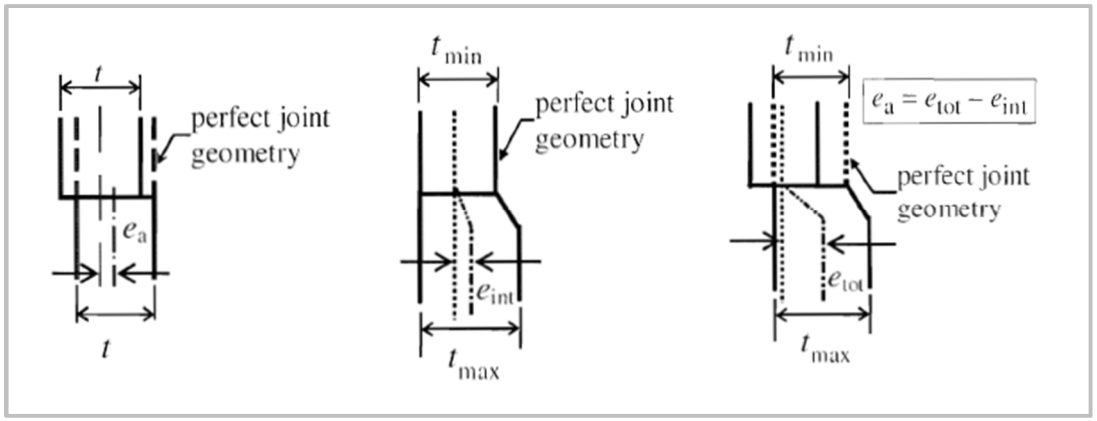
Ovalita průřezu má velký vliv na změnu stavu napětí a deformace válcové skořepiny. Základní předpoklad je elipsový tvar průřezu, který je znázorněn na Obr. 3-5. Ovalita závisí na průměru nedeformované skořepiny, dále na maximálním a minimálním průměru deformované skořepiny. Výpočet ovality lze provést dle vztahu (3-1). [9]

$$Ur = \frac{d_{max} - d_{min}}{d_{nom}} \tag{3-1}$$



Obr. 3-5 Ovalita válcové skořepiny [9]

Další vadou skořepin při výrobě je skoková změna střednice, či tloušťky skořepiny zobrazená na Obr. 3-6. Skoková změna střednice bývá způsobená vyosením lubů v místech spojů. Skoková změna tloušťky bývá způsobena spojením navazujících lubů různé tloušťky, případně nestejnoměrnou korozí materiálu vlivem agresivního prostředí. Nejhorší variantou je kombinace excentricity a změny tloušťky. [9]



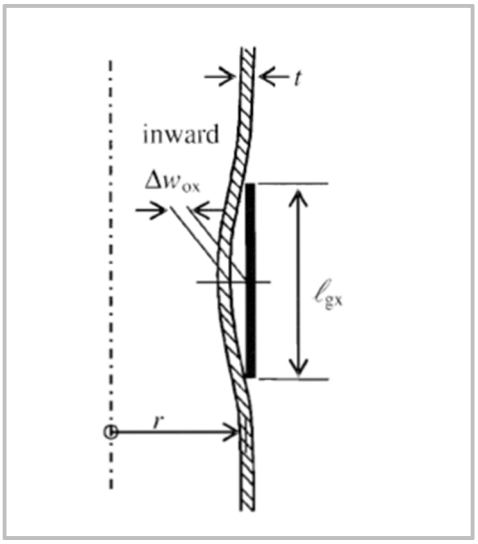
Obr. 3-6 Změna střednice a tloušťky skořepiny [9]

Další častou imperfekcí ve skořepinách bývá zvlnění střednice. To bývá způsobeno zatížením nevyztužené skořepiny a dochází tak k lokálnímu zvlnění spojité střednice.

Zvlnění má výrazný vliv na ztrátu stability skořepiny. Velikost lokální oblasti pro případ válcové skořepiny zatížené tlakovým napětím v meridiánovém směru lze stanovit dle vztahu (3-3). V obvodovém směru pak dle vztahu (3-2) [9]

$$l_{g\theta} = 2{,}3 \cdot (l^2 rt)^{0{,}25} \tag{3-2}$$

$$l_{gx} = 4\sqrt{rt} \tag{3-3}$$

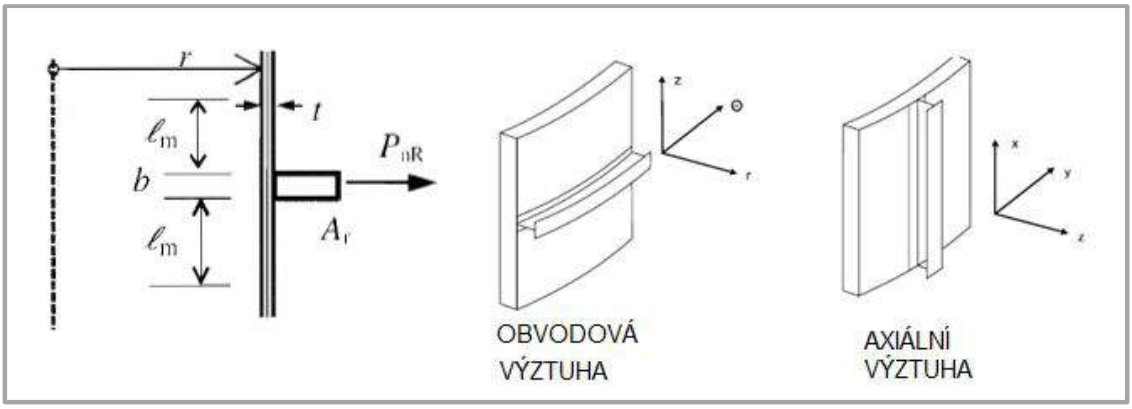


Obr. 3-7 Zvlnění střednice [9]

3.3.6 Vyztužování skořepin

Vyztužování skořepin se provádí pro zesílení odolnosti skořepiny proti ztrátě stability a je realizováno pomocí obvodových výztuh po délce skořepiny, případě pomocí axiálních výztuh. Případ vyztužení je názorně zakreslen na Obr. 3-8. Vyztužení má vliv na lokální změnu tuhosti skořepiny. Tato lokální změna působí v ovlivněné oblasti. Délka ovlivněné oblasti se stanovuje výpočtem dle vztahu (3-4). [9]

$$l_m = 0{,}975\sqrt{rt} \tag{3-4}$$



Obr. 3-8 Výztuhy skořepin [9], [6]

3.4 EUROKÓDY

Pro vyhodnocení stavu napjatosti a odolnosti konstrukce je možné využít několik typů norem. Volba typu normy je závislá na požadavcích zákazníka, případně na destinaci kde bude zařízení (aparát, konstrukce) provozováno. S ohledem na fakt, že v tomto případě bude spalinovod provozován v ČR, bude kontrolován dle evropských standardů tzv. Eurokódů. Soubor norem EN1990 je základním dokumentem soustavy Eurokódů.

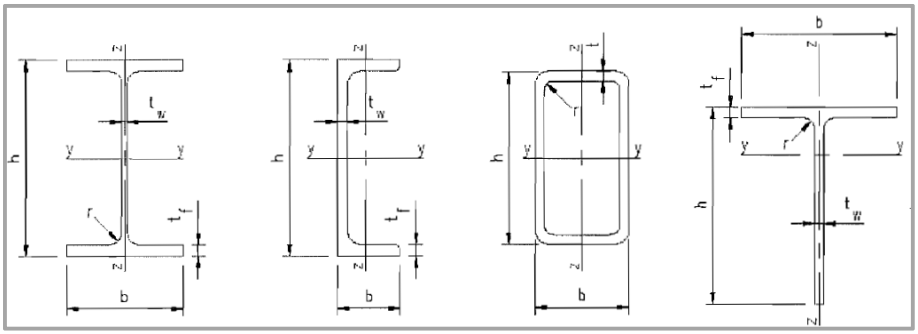
- EN 1990 - Zásady navrhování konstrukcí
- EN 1991- Zatížení konstrukcí
- EN 1992 - Navrhování betonových konstrukcí
- EN 1993 - Navrhování ocelových konstrukcí
- EN 1994 - Navrhování spřažených ocelobetonových konstrukcí
- EN 1995 - Navrhování dřevěných konstrukcí
- EN 1990 - Navrhování zděných konstrukcí
- EN 1990 - Navrhování geotechnických konstrukcí
- EN 1998 - Navrhování konstrukcí odolných proti zemětřesení
- EN 1999 - Navrhování hliníkových konstrukcí

Poskytuje informace o návrhu a kontrole konstrukcí s ohledem na jejich stabilitu, bezpečnost, funkčnost a životnost. Je používán společně s Eurokódy 1-9 pro návrh pozemních a inženýrských staveb. [9], [10]

Pro návrh a kontrolu ocelových konstrukcí je využíván EN 1993- Navrhování ocelových konstrukcí, část 3 a 4, které zahrnují jak návrh a kontrolu prutových konstrukcí, tak i návrh skořepinových prvků.

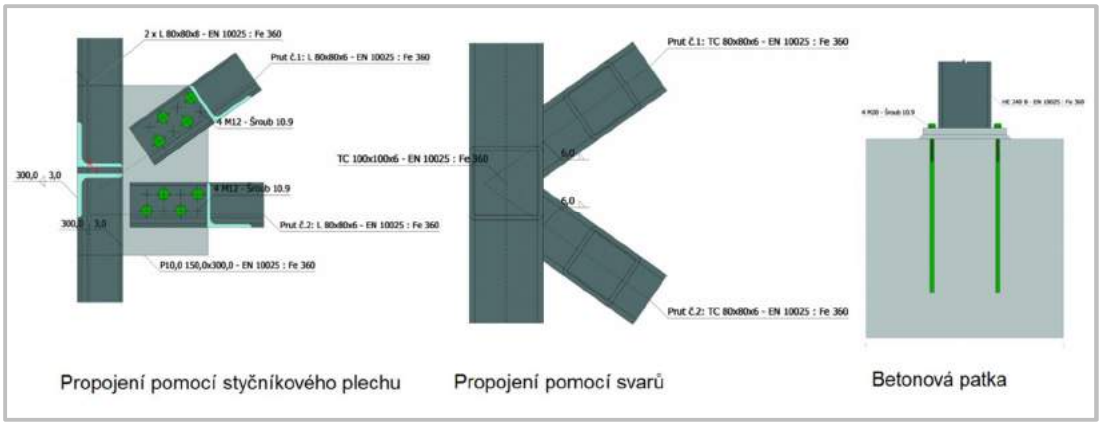
3.4.1 Ocelové konstrukce

Jak již je zmíněno v kapitole 3.2. příhradové konstrukce jsou složeny z prutů a styčníků. V ideálním případě jsou pruty zatíženy pouze tahem a tlakem, styčníky fungují jako kloubová vazba nepřenášející momenty ohybu a krutu. Pro ocelové pruty lze využít různé tvary profilů (kruhové, obdélníkové, L, T, I, U), které jsou charakterizovány nejen hlavními rozměry, ale i průřezovými moduly. Tyto moduly mají pak výrazný vliv na samotnou tuhost nosníků při určitých stavech zatěžování. Názorná ilustrace nejčastěji používaných profilů je uvedena na Obr. 3-9.



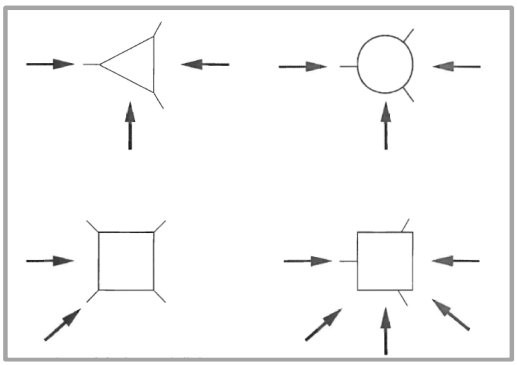
Obr. 3-9 Příčné průřezy profilů [11]

Dalším důležitým prvkem jsou spoje nosníků tzv. styčníky, které je možné realizovat několika způsoby tak, aby přenášely osové síly v prutech. Lze je realizovat pomocí svarových, nýtových, nebo šroubových spojů. Oblíbenými typy styčníků u příhradových konstrukcí je připojení profilových prutů k pásům příhradových nosníků pomocí styčníkového plechu, nebo svařované styky prutů. Typy spojů jsou uvedeny na Obr. 3-10. Zvláštním typem styčníku je patka, která slouží k ukotvení celé konstrukce k podkladové desce. V tomto případě k ocelovým styčníkům tedy přibývá i betonová část základu. Ke kotvení se používají kotevní šrouby s hákem, či kotevní hlavou, nebo šrouby zalepené v předvrtaných otvorech. [12]



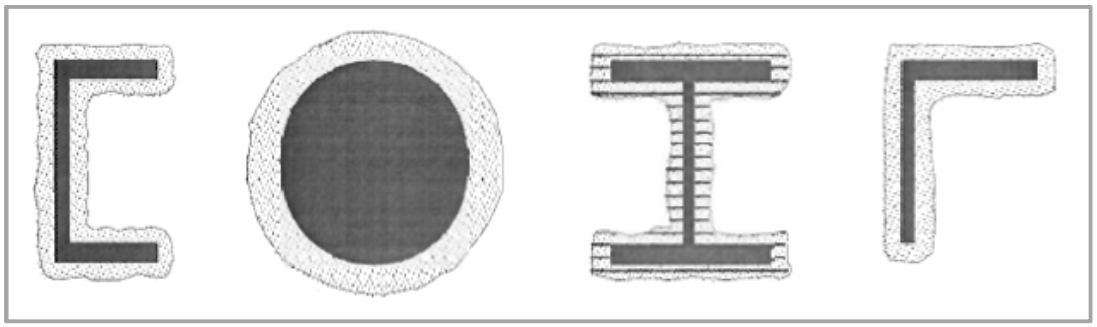
Obr. 3-10 Realizace styčníkových spojů [12]

Prutové konstrukce věžového a stožárového charakteru je třeba navrhovat a kontrolovat na odolnost proti vibracím způsobených poryvy větru. U věží skládaných z kruhových nebo hranolových prutů mohou vznikat vibrace kolmé na směr působení větru. Zmíněné vibrace podporují ztrátu stability celé konstrukce vlivem cyklické únavy materiálu. Směr větru udává celkové nejzávažnější zatížení věže, z toho důvodu je třeba zvážit možné varianty zatížení větrem. Možné směry zatížení větrem, pro různé tvary věžových konstrukcí, jsou znázorněny na Obr. 3-11. Pokud se u příhradových konstrukcí předpokládá, že budou podléhat větrným vibracím, je možné tyto konstrukce opatřit tlumícím zařízením, případně větrnými rozrážeči. U věžových konstrukcí podléhajících únavovému zatížení je nutné stanovit životnost konstrukce a počet cyklů pro dané vibrační amplitudy. [11]



Obr. 3-11 Kombinace směrů zatížení větrem [11]

Se směrem větru souvisí i zatížení ledem a sněhem, které způsobuje asymetrické usazování a nárůst hmotné ledové vrstvy na prutech. Enormní ledová vrstva může v určitých případech způsobit průhyb ovlivněných prutů, a tím značně snížit celkovou odolnost konstrukce proti ztrátě stability. Při odhadu hmotnosti ledu vznikajícího na konstrukci závisí na třídě ledu určené normou ISO 12494 a dále se uvažuje vznik rovnoměrné vrstvy ledu kolem celého obvodu prutu, jak je znázorněno na Obr. 3-12. Při kombinaci zatížení větrem a ledem, kdy je dominantní zatížení větrem, je možné dle EN 1991-1-4 zohlednit charakteristické zatížení pomocí korekčních faktorů. [11]



Obr. 3-12 Zatížení ledovou vrstvou [11]

3.4.2 Skořepiny, zatížení, odolnost a stabilita (potrubí, nádrže a tanky)

Zatěžování skořepin

Zatěžování skořepin je rozsáhlou problematikou. Je možné je rozdělit do několika základních skupin jako zatížení tlakem, teplotou, vlastní váhou potrubí a klimatická zatížení.

Zatížení tlakem

Tlak média způsobuje primární napětí ve skořepině. Jde o hlavní napětí v obvodovém směru skořepiny. V závislosti na charakteru tlakového zatížení je konstrukce více či méně náchylná na boulení pláště. [13]

Zatížení teplotou

Skořepiny a potrubí jsou navrhovány na minimální dovolenou návrhovou teplotu, jedná se o teplotu vnějšího i vnitřního prostředí skořepiny. S vlivem teploty se projevují i vlivy tepelné dilatace materiálů, které způsobují značné napětí v plášti skořepiny. Tepelná dilatace způsobuje sekundární napětí v podélném směru skořepiny. Z tohoto důvodu je nutné již při návrhu potrubí či skořepin zvážit správnou variantu uložení. U vodorovných potrubí velkých rozměrů je vhodné použít sedlové podpěry umožňující axiální pohyb. [13]

Zatížení od hmotnosti potrubí

Toto zatížení je definováno hustotou konstrukčního materiálu a rozměrem konstrukce. Hmotnost potrubí je udávána v jednotkách kg/m a určuje se z rozměru potrubí a hustoty použitého materiálu. V případě použití izolačních materiálů je nutné

uvažovat i s hmotností izolace a následným oplechováním izolace na ochranu proti vnějším vlivům.

Při počítání objemové hmotnosti izolace je třeba zahrnout i stlačení izolace při montáži formou korekčních součinitelů.

Hodnoty objemové hustoty nejčastěji používaných matriálů v různých odvětvích průmyslu jsou uvedeny v Tab. 3.1 [13]

Tab. 3.1 Hustota používaných materiálů potrubí [13]

Č.	Materiál	Hustota materiálu [kg/m^3]
1	Šedá litina LLG	7300
2	Tvárná litina LKG	7200
3	Nízkolegovaná ocel	7850
4	Korozivzdorná ocel	7930
5	Měď a její slitiny	8400 - 8700
6	Hliník a jeho slitiny	2700
7	slitina titanu Ti6A14V Grade 5	4430
8	Polyethylen PE-100	950
9	Polypropylen PP-H,PP-B,PP-R	915
10	Polyvinylchlorid PVC-c, PVC-U	1380
11	Laminát (FRP) váhový podíl skla 60 %	1800
12	Sklo boritokřemičité 3.3 Simax	2230
13	Kameninová keramika	2200
14	Beton C40/50	2400

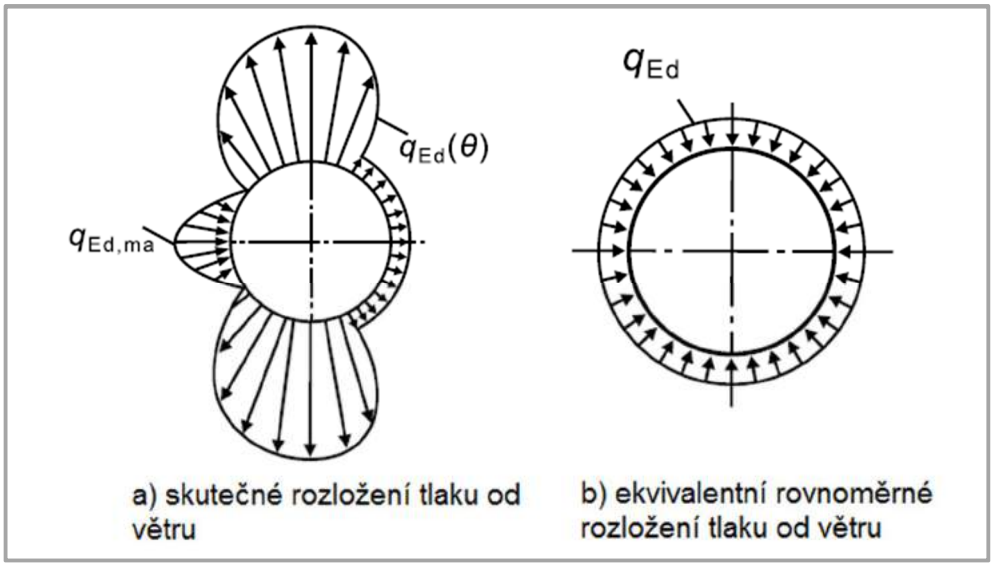
Klimatická zatížení skořepin

Mezi klimatická zatížení skořepin se zahrnují zatížení větrem a sněhem. Pro zatížení větrem je rozhodující výška nad terénem, ve které je samotná skořepina umístěna. Dále záleží na typu geografické lokality umístění skořepiny. Podle lokality se určuje větrná oblast (I, II, III). Velký vliv na zatížení větrem má samotná rychlost větru, která se koriguje pomocí různých součinitelů dle typu větrné lokality, zástavby terénu, zalesnění terénu atp. Korigovaná rychlost je následně přepočítána na zátěžný tlak pomocí rovnice (3-5). [14]

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \tag{3-5}$$

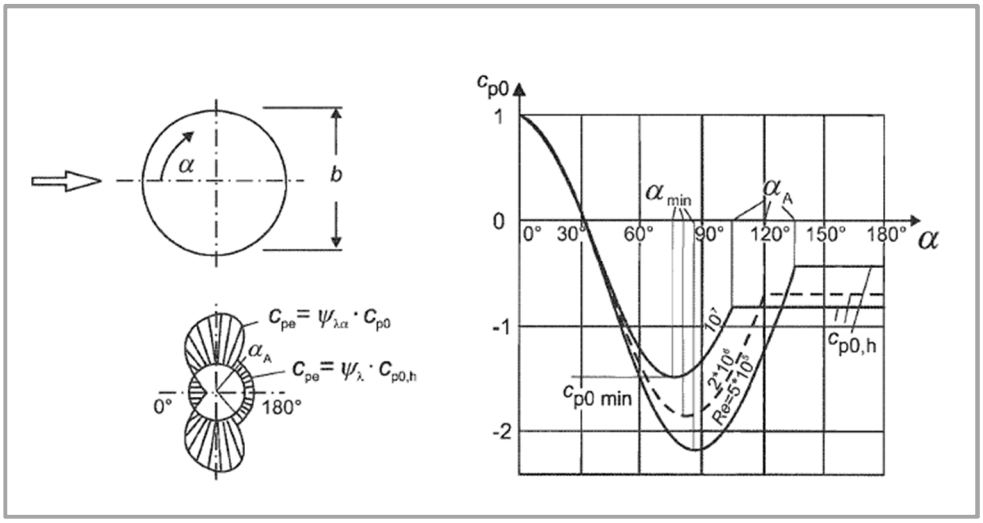
P- dynamický tlak větru [Pa], ρ - hustota vzduchu za normálních podmínek [kg/m^3], v – korigovaná rychlost větru [m/s]

V případě nestejnoměrného rozložení tlaku vyplývajícího z vnějšího působení větru je možné toto zatížení nahradit, za účelem zjištění boulení skořepiny dle literatury [6] , ekvivalentním rovnoměrným zatížením. Jak je uvedeno na Obr. 3-13.



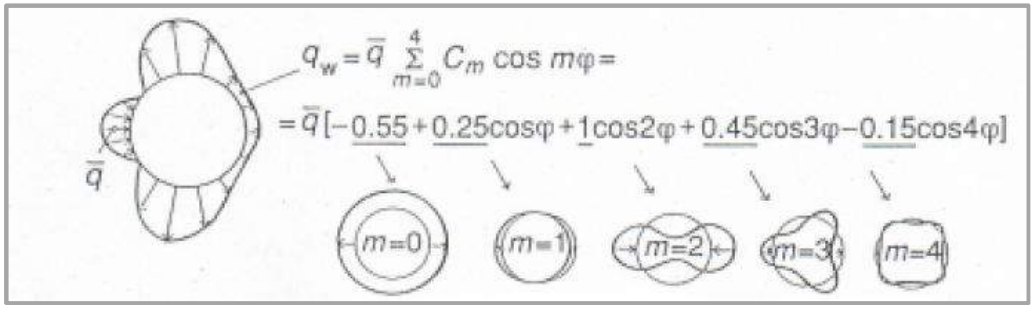
Obr. 3-13 Ekvivalentní nahrazení tlakového napětí pro výpočet [6]

Průběh závislosti koeficientu externího tlaku c_{p0} na válcovou skořepinu pro různá Reynoldsová čísla v závislosti na úhlu pootočení skořepiny od směru větru, který má vliv na velikost vnějšího tlaku, je uvedena na Obr. 3-14.



Obr. 3-14 Obvodové rozložení tlaku větru [15]

Pomocí experimentálních dat byla vyvinuta Fourierova řada Kosinových sérií, která blíže popisuje skutečné rozložení působení vnějšího tlaku větru na válcové skořepině, jak je zobrazeno na Obr. 3-15. [16]

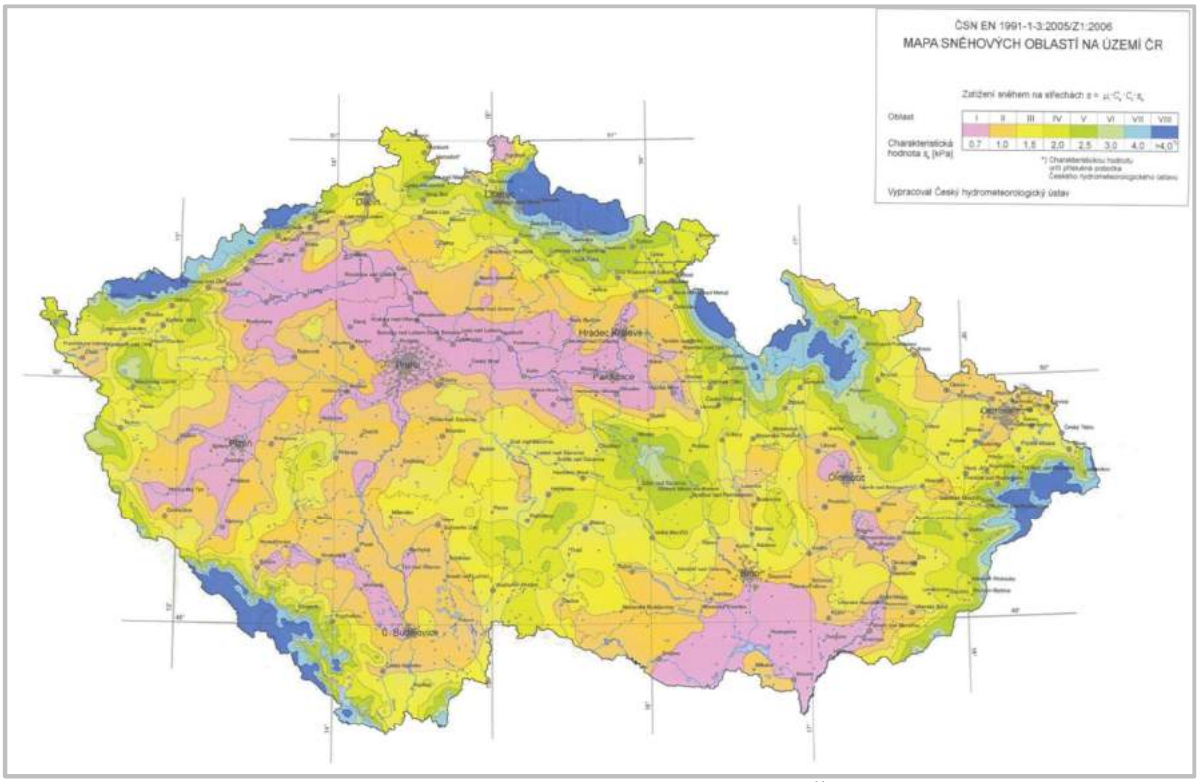


Obr. 3-15 Bližší rozložení tlaku větru [16]

Kde: q_w-vnější tlak větru, $\bar{q}$- specifický tlak v určité výšce, m- počet period funkce na obvodu, φ=α- úhel odklonu od směru větru

Zatížení sněhem

Toto zatížení se neuvažuje, je-li teplota vnějšího povrchu izolace trvale vyšší než 0 °C, nebo je-li potrubí pod střechou. Zatížení sněhem se rozděluje do skupin I až VIII a je definováno sněhovou oblastí, podobně jako u zatížení větrem dle geografické lokality. Jeho charakteristické hodnoty jsou udávány v jednotkách kPa. Zatížení sněhem dle sněhové oblasti je znázorněno na Obr. 3-16.



Obr. 3-16 Mapa sněhových oblastí v ČR [17]

Analýzy používané při hodnocení odolnosti skořepin vůči ztrátě stability

Vyhodnocení skořepin proti ztrátě stability lze podle EN 1993-1-6 [9] rozdělit do několika skupin závislých na předpokladech materiálu, zatížení, deformací a vad skořepin dle typu analýzy. [9]

Lineární elastická analýza (LA)

Analýza se využívá za předpokladů malých deformací geometrie v elastické oblasti s lineární závislostí mezi napětím a deformací materiálu. [9]

Lineární elastická bifurkační analýza (LBA)

Za předpokladu splnění materiálových a deformačních podmínek LA je možné využít bifurkační analýzu k získání nejnižší limitní hodnoty napětí, při které se skořepina dostává do vlastních tvarů. Za předpokladu, že nedochází ke změně geometrie, směru zatížení a materiálové degradaci, lze touto cestou zjistit kritické hodnoty odolnosti při elastickém boulení stěny. [9]

Geometricky nelineární elastická analýza (GNA)

Tato analýza se využívá za podmínek trvalé změny geometrie vlivem zatížení, kde dominují v určitých částech pláště smyková napětí. Analýza poskytuje informace o elastickém boulení a degradaci konstrukce vlivem zatížení, která jsou podstatná při vyhodnocování mezních stavů. [9]

Materiálově nelineární analýza (MNA)

U nelineární analýzy je uvažován nelineární model materiálu. Výsledkem MNA analýzy je plastické limitní zatížení, které může být interpretováno jako zesilující faktor odporu plastického zatížení pro návrhovou hodnotu komplexního zatížení. Analýza je používána pro plastické deformace, způsobené během jednoho zátěžového cyklu pro ověření mezního stavu. [9]

Geometricky a materiálově nelineární analýza (GMNA)

Výsledkem GMNA je provozní nelineární plastické zatížení u geometricky dokonalé konstrukce. Uvažuje se zde nelineární model materiálu. S její pomocí se stanovuje limitní zatížení elasticko-plastického boulení pláště. Využívá se v případě dominujících smykových napětí v některých částech pláště. [9]

Geometricky nelineární elastická analýza se zahrnutím imperfekcí (GNIA)

Využívá se v případech dominujícího smykového napětí ve skořepině s geometrickými vadami. Výsledkem je mezní zatížení elastického boulení stěn, využitelné pro kontrolu mezních stavů. [9]

Geometricky a materiálově nelineární elastická analýza se zahrnutím imperfekcí (GMNIA)

Podobně jako GNIA je využívána u skořepin s dominantním smykovým napětím s geometrickými imperfekcemi. Je zde využíván nelineární model materiálu. Poskytuje téměř reálná limitní zatížení elasticko-plastického boulení. [9]

Používané materiály

Materiály konstrukcí vystavených účinkům tlaku musejí mít vhodné vlastnosti za všech provozních a zkušebních podmínek. Mezi vhodné vlastnosti se řadí tažnost, houževnatost, odolnost proti vzniku křehkého lomu, chemická odolnost, odolnost proti stárnutí, svařitelnost a jiné. Jedním z nejčastěji používaných materiálů pro konstrukci procesních zařízení je ocel. Ocel je slitina železa a uhlíku a legujících prvků. Vyznačuje se dobrou tvárností a houževnatostí. Oceli je možné rozdělit do několika skupin, nejčastěji se dělí podle chemického složení na oceli nelegované, nízko-legované a korozivzdorné. Mechanické vlastnosti ocelí je možné modifikovat tepelným, tepelně-mechanickým, nebo tepelně chemickým zpracováním.

Samotnou ocelovou konstrukci skořepiny nebo potrubí je nutné v některých případech izolovat od vnějšího prostředí. Důvodem je zabránění ztrát tepla, chladu nebo zajištění bezpečí pro obsluhu. Tepelnou izolací je třeba opatřit potrubí s povrchovou teplotou nad 50 °C, tak aby teplota povrchu izolace nepřekročila 50 °C po celé délce, při okolní teplotě vzduchu 25 °C. [18] Vlastnosti nejčastěji používaných izolací uvádí Tab. 3.2.

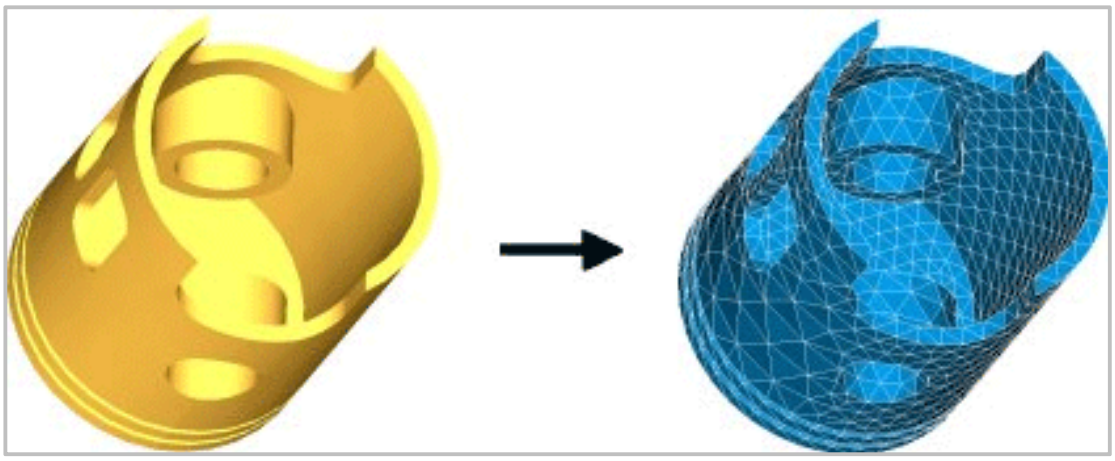
Tab. 3.2 Vlastnosti izolačních materiálů [19]

Materiál izolace	Hustota ρ [kg/m^3]	Součinitel tepelné vodivosti λ [W/(m·K)]	Měrná tepelná kapacita c [kJ/(kg·K)]
Strusková vlna - rohože	80	0,046	0,074
Čedičová vata - rohože	80 – 100	0,046	0,074
Skelná vata - rohože	100	0,056	0,880
Polyuretan stříkaný	35	0,034	2,060
Polystyrén	20	0,044	1,270

3.5 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ – MKP

Metoda konečných prvků se řadí k dominantním a progresivním numerickým metodám pro analýzy v různých odvětvích inženýrství. Ve světě je známá jako FEM (Finite Element Method) a je využívána pro řešení problémů pružnosti a dynamiky konstrukce. Její nástavby umožňují řešení proudění kapalin a plynů, vedení tepla, vibrace atp. Název metody poukazuje na fakt, že je založena na řešení problému pomoci konečného počtu prvků (elementů). Metoda nahradí těleso sítí jednoduchých elementů, na kterých je schopná provést analytický výpočet odezvy systému na zadané okrajové podmínky. Pro každý typ elementu je kromě dimenze a tvaru charakteristický počet a poloha uzlů. Uzly jsou body, u kterých hledáme neznámé parametry řešení (deformace a napětí).

Velikost a topologie prvků (hustota sítě) zásadně ovlivňuje kvalitu a přesnost výsledků, a také potřebnou kapacitu hardwaru pro uskutečnění výpočtu. [19]



Obr. 3-17 Princip rozdělení na konečný počet elementů [20]

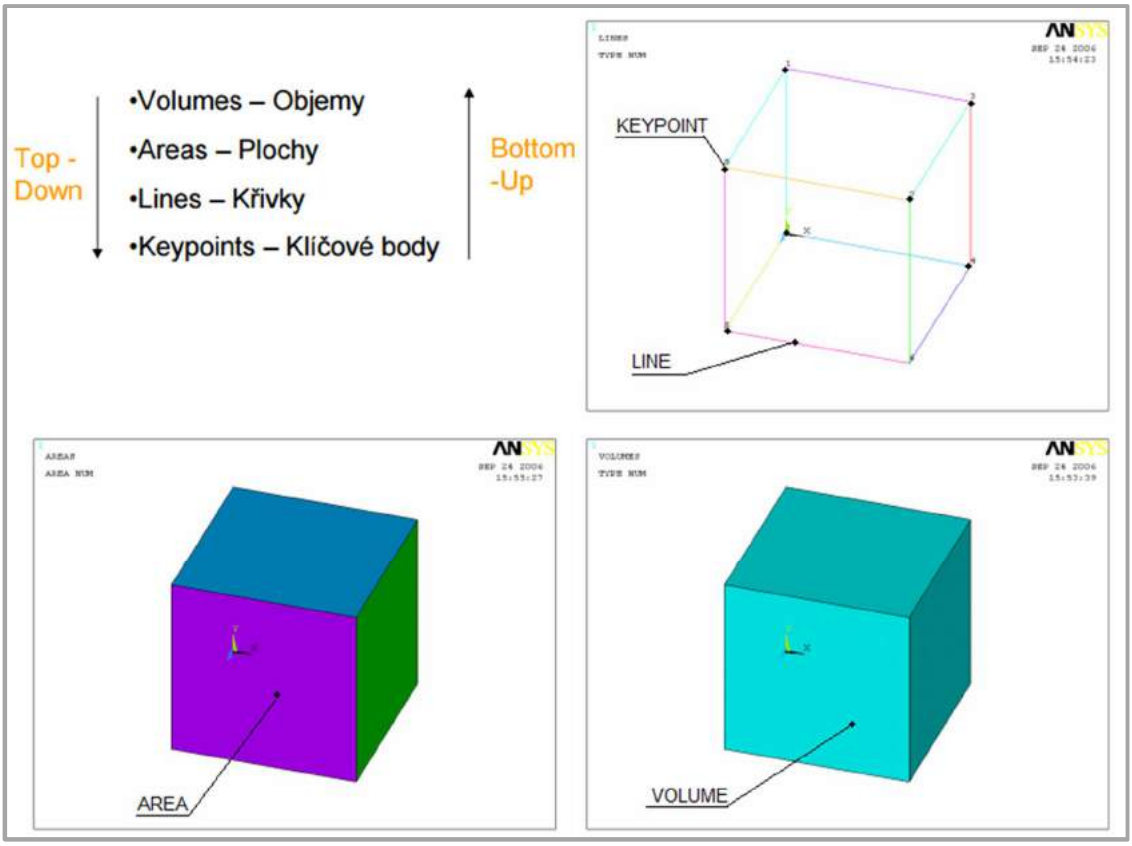
3.5.1 Základy a principy modelování v ANSYS Mechanical APDL

Výhodou numerických metod je, že umožňují řešit i problémy u složitějších těles. Naopak u analytického přístupu, lze řešit jen elementární tělesa. Podstatně omezujícím faktorem u metod MKP jsou především nároky na výpočetní čas i výkon.

Základem pro provedení analýzy je model geometrie, který je následně rozdělen na konečný počet elementů.

K dosažení modelu existují dva způsoby. Jedním z nich je tvorba modelu postupem „bottom-up“, která je založena na postupném vytváření geometrie z hierarchicky odstupňovaných entit. Mezi tyto entity patří klíčové body, křivky, plochy a objemy. Celá geometrie je tvořena body, které jsou propojeny křivkami. Pomocí křivek jsou definovány plochy, které dávají základ pro vytvoření konečného objemového modelu.

Druhým způsobem vytvoření modelu je metoda „top-down“, kde se využívá importování již existujícího 3D objemového modelu, vytvořeného pomocí jiného softwaru. S tímto modelem se automaticky přiřadí i podřízené entity (plochy, křivky a klíčové body). Ilustrace postupu tvorby modelu je znázorněna na Obr. 3-18. [19]

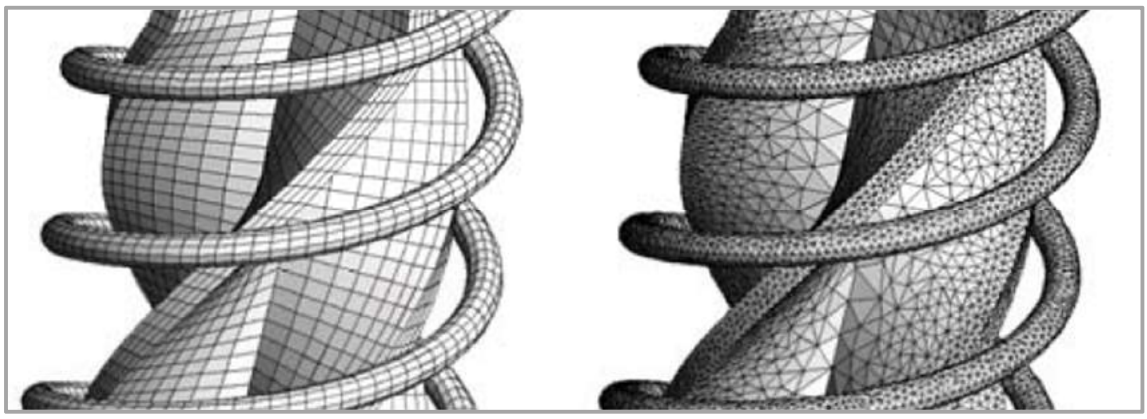


Obr. 3-18 Tvorba modelu MKP [19]

Po dosažení objemového modelu následuje další podstatný krok, který má výrazný vliv na přesnost a rychlost analýzy. Tímto krokem je tvorba sítě. Před samotným vytvořením sítě je nutné nadefinovat typy prvků, které se na daném objektu vytvoří. Tyto typy je možné rozdělit do skupin podle návaznosti na entity. Mezi objemové patří prvky Solid, mezi plošné patří prvky typu Shell a mezi prutové prvky patří typ Link a Beam. Další přehled a vlastnosti prvků jsou také popsány v rozsáhlé nápovědě programu Ansys MAPDL. [19]

Vytvořením sítě je model rozdělen na konečný počet prvků a hlavně výpočetních uzlů. Největší vliv na přesnost výpočtu má hustota sítě, a proto je nutné věnovat pozornost její tvorbě. V předpokládaných místech, kde bude docházet ke změně napětí nebo deformací, je dobré vytvořit lokální jemnější síť. Při tvorbě sítě je možné vybírat mezi mapovanou a volnou sítí. Mapovaná síť je tvořena pomocí pravidelných prvků, podle určených pravidel a parametrů modelu. Její tvorba je náročnější na přípravu, ale o to více snižuje nároky na výpočtový výkon a čas. Naopak volná síť poskytuje výhodu rychlého vytvoření sítě s automatickou volbou tvaru a velikosti elementů.

Nejčastěji používaným tvarem elementu jsou šestistěny objemových modelů a čtyřúhelníky v případě skořepinových (plošných) modelů. Na Obr. 3-19 je znázorněn rozdíl mezi mapovanou sítí (vlevo) a volnou sítí (vpravo).



Obr. 3-19 Typy sítě MKP [21]

4 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

4.1 ANALÝZA PROBLÉMU

Vyhodnocení zadané konstrukce bude řešeno podle již zmíněných norem. Bude zde využit přístup GMNIA (Geometricky a materiálově nelineární analýza zahrnující imperfekce).

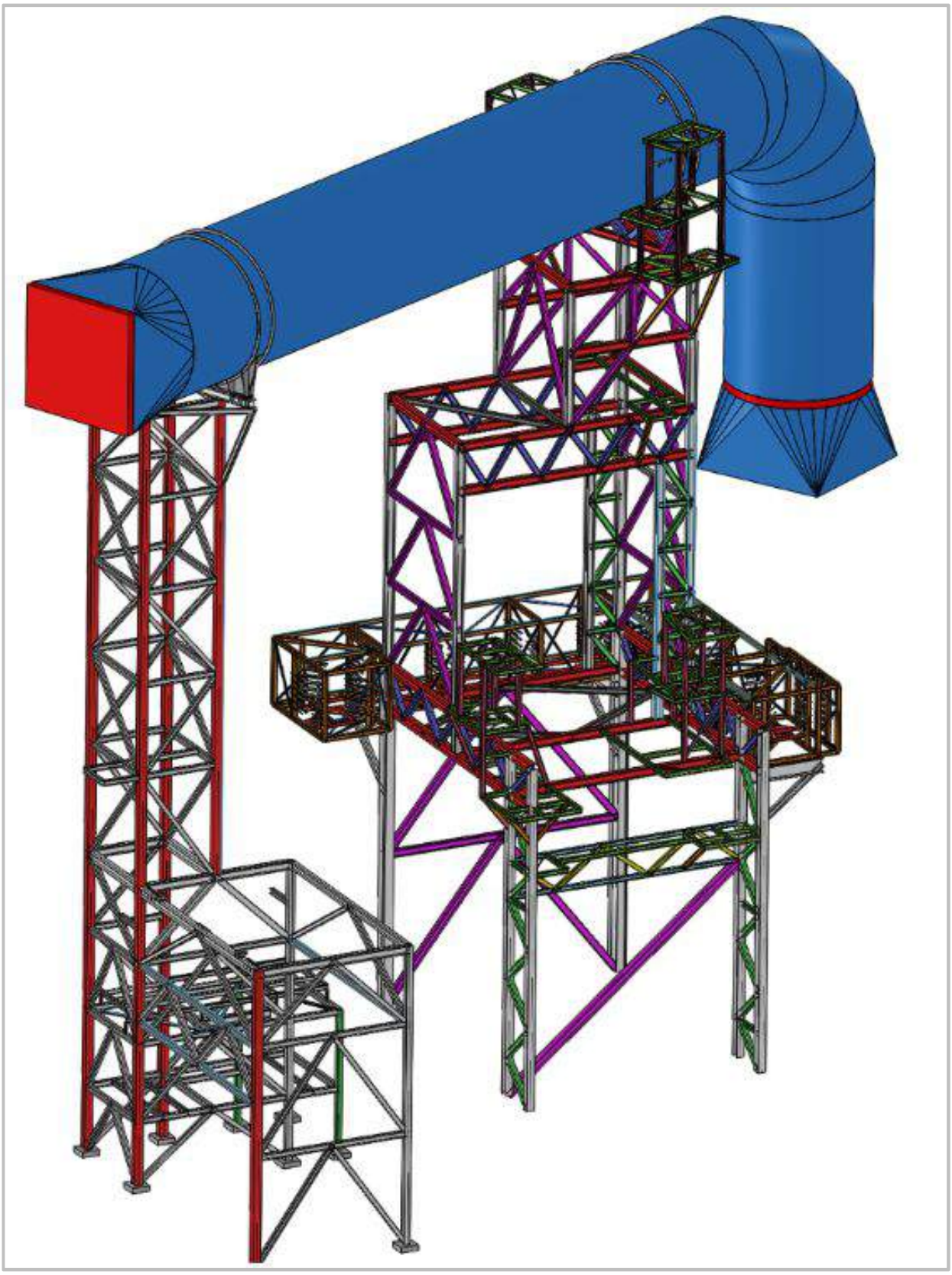
4.2 CÍL PRÁCE

Cílem této práce bude hodnocení náchylnosti nevyztuženého spalinového potrubí ke ztrátě stability za pomoci nelineární analýzy. Na základě těchto výsledků bude navrženo několik variant vyztužení, které budou vyhodnoceny ke ztrátě stability a dále porovnány s výchozím nevyztuženým potrubím. Vyhodnocení ztráty stability budou prováděna dle Eurokódů pomocí analýz prováděných na modelech za pomoci metody konečných prvků. Na základě těchto analýz budou vyhodnoceny nejvhodnější varianty vyztužení.

4.3 POPIS KONSTRUKCE

Jedná se o část odsiřovací linky tvořenou kouřovodem, který propojuje absorbér se stávajícím kouřovodem napojeným na komín. Kouřovod je uložen na sedlových podpěrách s prstencovými výztuhami a umístěn na dvou prutových konstrukcích. Aby byly umožněny teplotní dilatace, je kouřovod uložen na jednom konci v sedlové podpěře s kluznými patkami, které umožňují pohyb v ose potrubí. Jedná se o kouřovod vyčištěných spalin s průtokem 1 130 000 $_{N}m^{3}$/hod o provozní teplotě 63–70 °C a s provozním tlakem -1 až 5 kPa.

Ilustrativní zobrazení kouřovodu je uvedeno na Obr. 4-1.

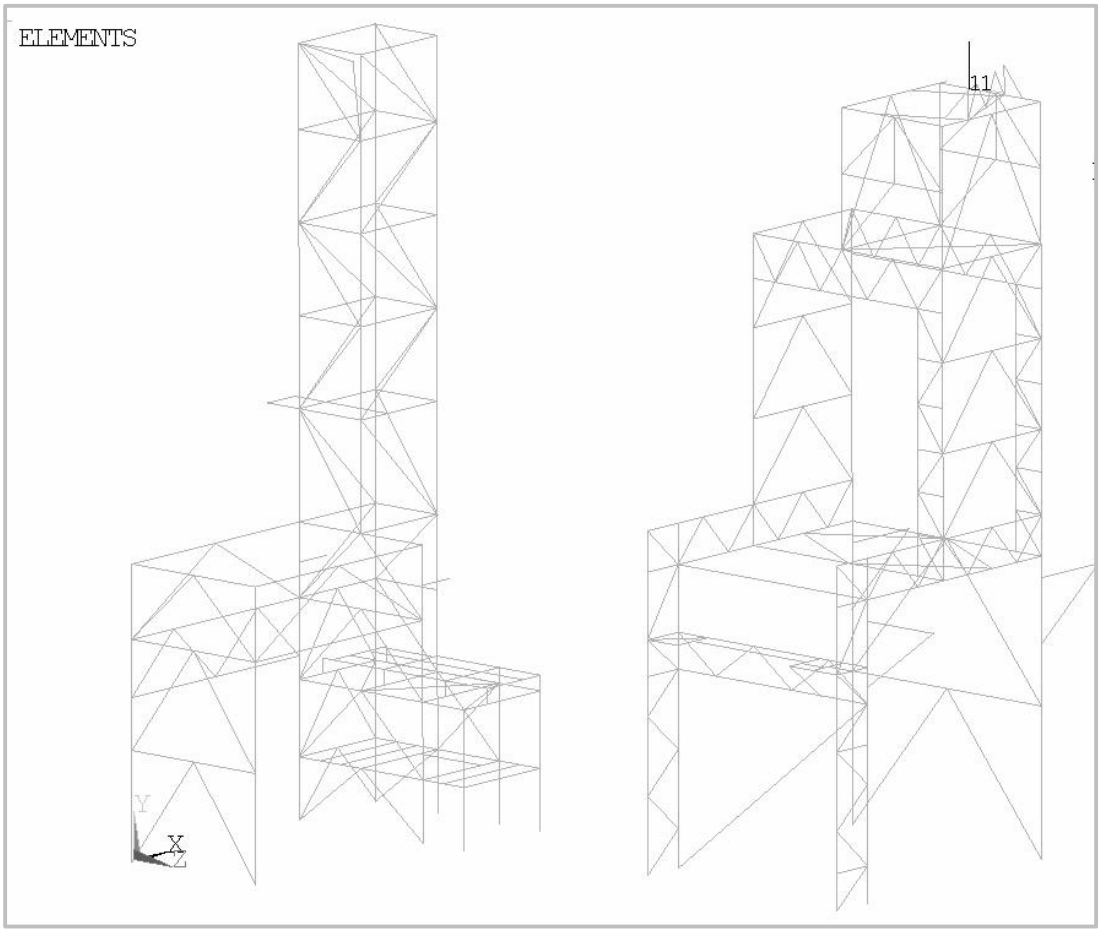


Obr. 4-1 Kouřovod odsiřovací linky

4.3.1 Části konstrukce

Nosné prutové konstrukce

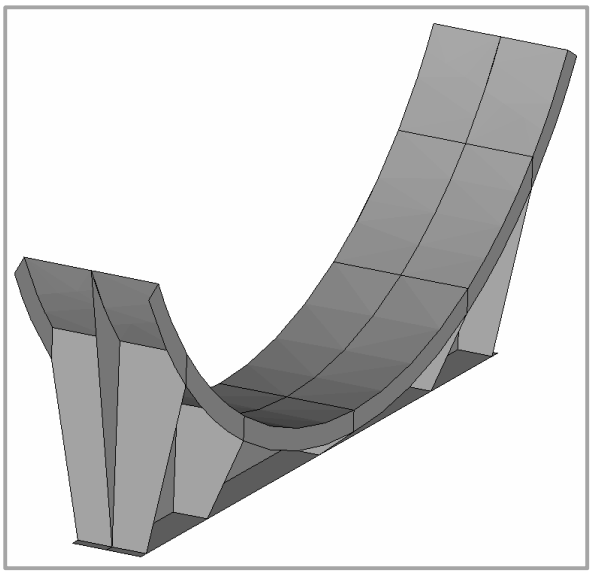
Celá potrubní část kouřovodu je umístěna na dvou prutových věžích o celkové výšce 29 m. Svařované konstrukce věží jsou tvořeny I-profily (HEB160, HEB200, HEA300) z konstrukční oceli S235JR. Pro MKP analýzu byla konstrukce vymodelována jako zjednodušený liniový model. Jednotlivé příčné průřezy profilů konstrukce byly přiřazeny dle výkresové dokumentace s požadovanou velikostí a orientací s přiřazenými prvky BEAM 189 pro vytvoření sítě modelu.



Obr. 4-2 Zjednodušený liniový MKP model prutových konstrukcí

Sedlové podpěry

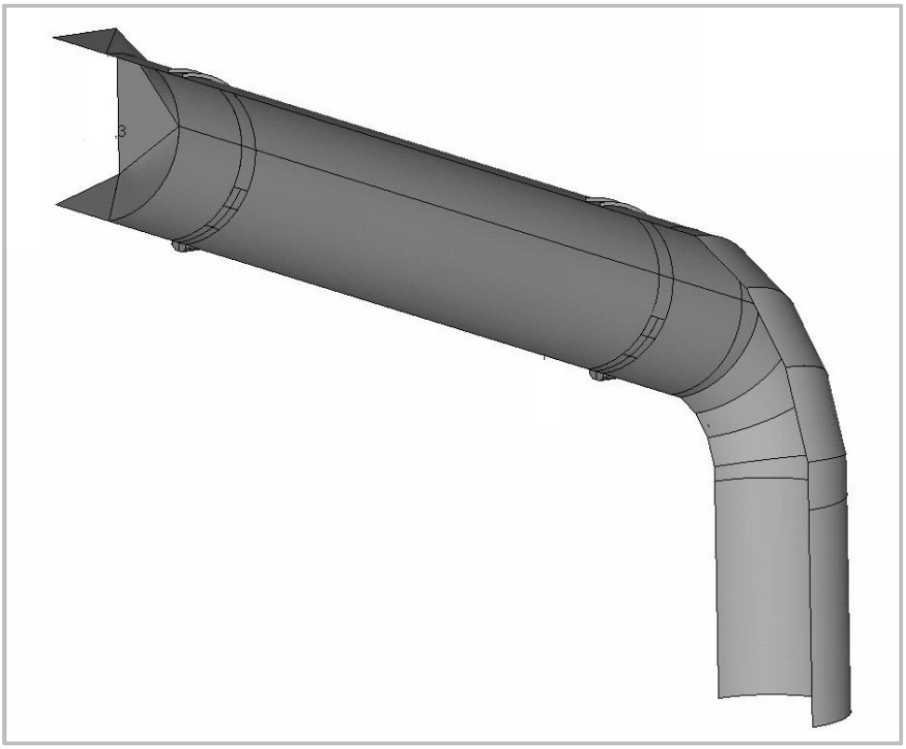
Pro usazení potrubí na prutové konstrukce jsou užity sedlové podpěry s prstencovými výztuhami (pevná a kluzná). Tyto podpěry jsou tvořeny jako svarek z plechů o tloušťkách 6, 15 a 20 mm. Pro MKP analýzu byly tyto podpěry modelovány jako zjednodušené plošné modely, definované střednicovou plochou a přiřazenou tloušťkou. K vytvoření sítě modelu byly využity prvky SHELL 281.



Obr. 4-3 Model sedlové podpěry s výztuhami

Potrubí

Potrubí o délce 31 m a průměru 5,3 m se segmentovým kolenem je tvořeno plechem o tloušťce 6 mm z oceli S235JR. Potrubí je obaleno izolační vrstvou z minerální vlny o tloušťce 240 mm. Vnitřní strana potrubí je ošetřena proti korozi vrstvou stěrkovací hmoty. Model pro MKP analýzu byl vytvořen jako zjednodušený skořepinový model definovaný střednicovou plochou potrubí s přiřazením tloušťky dle dokumentace. Pro analýzu byla přepočítána objemová hustota všech vrstev na potrubí (minerální izolace, ocel, stěrkovací hmota) a vztažena na tloušťku samotného plechu, čímž bylo zjednodušeno zadávání zatížení od vlastní tíhy potrubí pro následné analýzy.



Obr. 4-4 Zjednodušený model potrubí

4.3.2 Použité elementy pro MKP

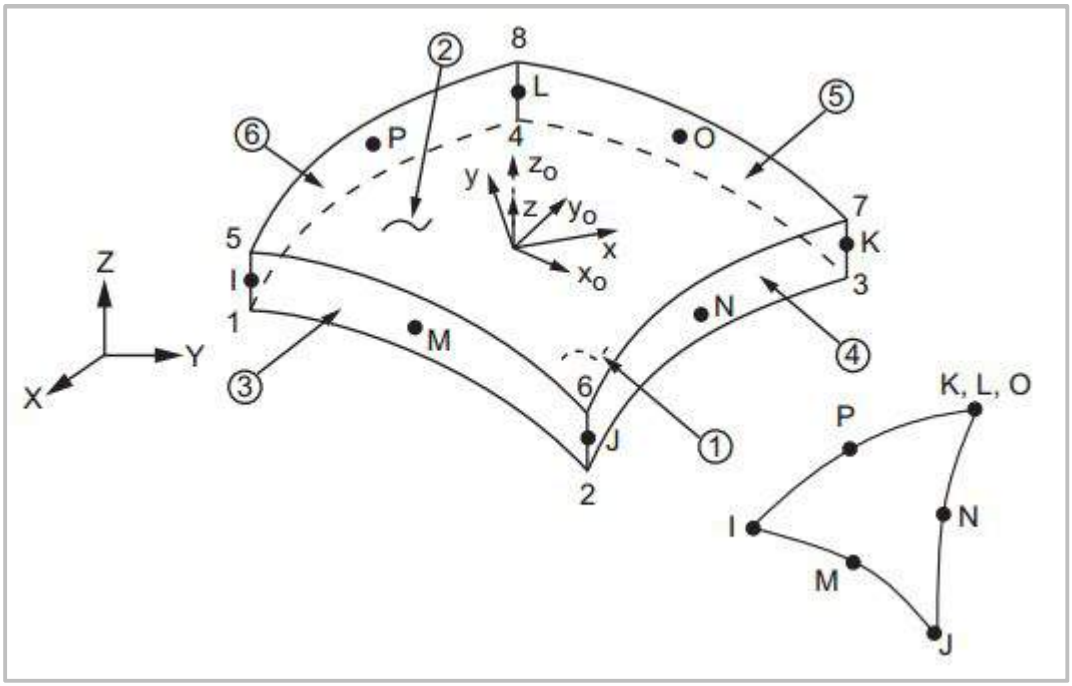
SHELL 281

SHELL281 je vhodný pro analýzu tenkých až středně tlustých skořepinových konstrukcí. Prvek má osm uzlů se šesti stupni volnosti v každém uzlu: translace podél os X, Y a Z a rotace kolem X, Y a Z os. Při použití volby membránové teorie má prvek pouze translační stupně volnosti.

SHELL281 je vhodný pro lineární anebo pro nelineární úlohy s velkými deformacemi. Změna tloušťky skořepiny je zahrnuta do nelineárních analýz. Prvek odpovídá za distribuci (tuhosti zátěže) účinků rozdělených tlaků.

SHELL281 mohou být také využívány pro modelování kompozitních skořepin nebo sendvičovou konstrukci. Přesnost modelování kompozitních skořepin je řízena teorií smykové deformace (Mindlin-Reissnerova teorie[1]). [5]

Formulace prvku vychází z logaritmických napětí a skutečného rozložení napětí. Prvek je definován osmi uzly (I, J, K, L, M, N, O, P). Elementy s trojúhelníkovým tvarem jsou definovány pomocí shodného čísla uzlu pro uzly K, L a O, jak je uvedeno na Obr. 4-5.



Obr. 4-5 Popis elementu SHELL281 [5]

[1] Mindlin-Reissnerova teorie desek zohledňuje vliv příčných deformací ve smyku přes tloušťku stěny tlustých desek.

Kirchhoffova teorie desek se využívá jako dvourozměrný matematický model pro určení napětí a deformací tenkých desek.

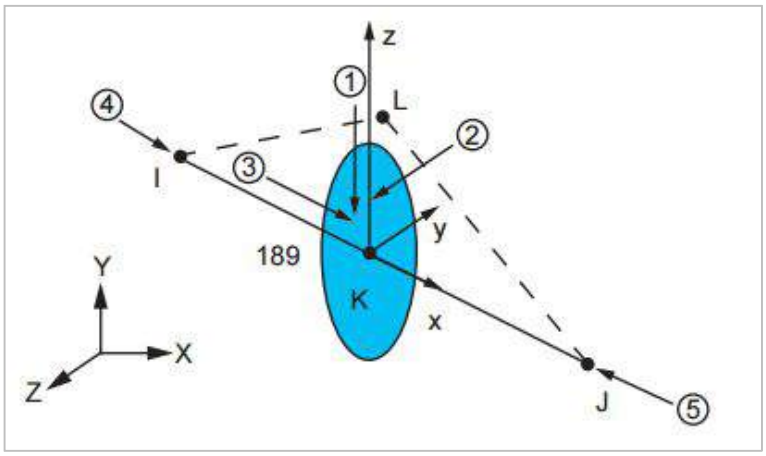
BEAM 189

BEAM 189 prvek je vhodný pro analýzu štíhlé až středně tlusté příhradové konstrukce. Prvek je založen na Timoshenkově[2] teorii ohybu nosníku, který zahrnuje smykové účinky deformace.

BEAM 189 je kvadratický tříuzlový prvek se šesti stupni volnosti (translacemi a rotacemi podél os X, Y, Z). Je velmi vhodný pro lineární anebo nelineární aplikace s velkými deformacemi.

BEAM 189 je definován třemi uzly (I, J, L), přičemž uzly I, J definují umístění prvku v prostoru a uzel L definuje orientaci příčného průřezu.

BEAM 189 umožňuje analyzovat problémy ohybu, vybočení a torze nosníku ke ztrátě stability. Podporuje elastické, plastické a creep nelineární materiálové modely. Příčné průřezy spojené s tímto typem prvku mohou být odkazovány na více než jeden typ materiálu. [5]



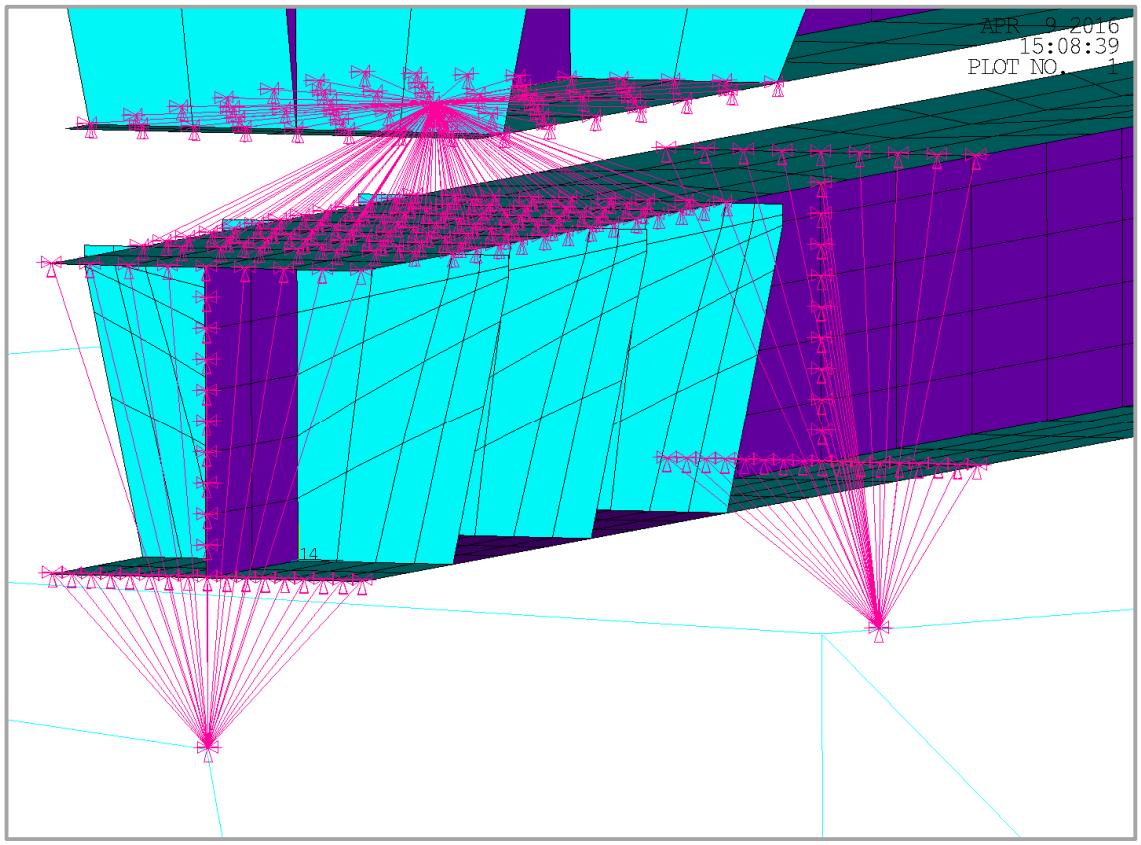
Obr. 4-6 Popis prvku BEAM 189 [5]

Propojení konstrukcí -RBE3 :

K propojení vícetělových konstrukcí je možné využít příkaz RBE3, který umožňuje propojení pomocí silově distribuovaných vazeb. Tyto vazby jsou ve výpočtovém modelu reprezentovány lineárními rovnicemi. Rovnice spojují stupně volnosti jednotlivých uzlů se skupinami podřízených uzlů, které mají spolu propojené stupně volnosti. Tento typ propojení byl aplikován pro spojení kluzné prstencové podpěry s příhradovou konstrukcí. Skupina uzlů na jedné ploše měla prostřednictvím hlavního uzlu propojena všechny stupně volnosti a skupina uzlů na druhé ploše jen vybrané stupně volnosti. [22]

[2] Timoshenkova teorie ohybu nosníku umožňuje přibližně popsat ohyb nosníku za předpokladu zachování rozměrů příčného průřezu a zachování rovinnosti příčného průřezu během deformace.

Na Obr. 4-7 je detail modelu vazby posuvného uložení se znázorněným propojením uzlů.



Obr. 4-7 Lineární vazba posuvného uložení prstencové podpěry

4.3.3 Okrajové podmínky modelu

Omezení stupňů volnosti

U celého modelu je nutné omezení některých stupňů volnosti. Tak, aby bylo uložení konstrukce plně definováno v prostoru, a co nejvíce odpovídalo realitě, tedy bylo nadefinováno zamezení všech posuvů a rotací v místech ukotvení prutových konstrukcí k zemi. Dále byly omezeny některé směry posuvů u kluzné prstencové podpěry.

Zatížení vlastní tíhou

Při výpočtech takto rozměrné konstrukce je třeba vzít v úvahu i její vlastní tíhu. Pro tyto účely bylo užito tíhové zrychlení 9.81 m/s^{-2} a u všech ocelových materiálů, kromě materiálu potrubí, byla uvažována hustota 7850 kg/m^3. U potrubí byla využita přepočítaná hustota materiálu a to 14 260 kg/m^3 .

Zatížení tlakem

Dle zadávacích parametrů je potrubí zatěžováno vnitřním přetlakem spalin v rozsahu -1 až do +5 kPa.

Zatížení větrem

Pro značnou výšku umístění potrubí je uvažováno zatížení větrem o rychlosti 25 m/s ve výšce 10 m nad terénem. Toto zatížení bylo přepočítáno dle [15] na ekvivalentní tlak od větru o velikosti 0,667 kPa.

Zatížení sněhem

Dle lokality je uvažováno charakteristické zatížené od sněhu 0,75 kN/m^2 , které bylo přepočítáno dle EN 1991-1-3 s ohledem na tvar pláště na zatížení o velikosti 1,2 kN/m^2.

Zatížení seismicitou

Pro uvažovanou geografickou oblast je předpokládané zatížení od seismicity v podobě zrychlení v rozsahu 0,02·g až 0,04·g

Zatížení teplotou

U kouřovodu je uvažováno tepelné zatížení vnitřní stěny potrubí provozní teplotou o velikosti 170 °C. Návrhová teplota kouřovodu je 200 °C.

5 VÝPOČTOVÁ ČÁST

Pro samotné vyhodnocení ztráty stability je nutné provést nastavení veškerých parametrů pro lineární i nelineární analýzu. Mezi tyto parametry se zahrnují materiálové vlastnosti, geometrické imperfekce a podobné. S ohledem na metodu GMNIA využitou pro hodnocení ztráty stability je nutné provést lineární analýzu ztráty stability tvaru, její výsledky dále částečně definují nelineární analýzu.

5.1 Materiálové vlastnosti

Materiálem využitým na konstrukcích a potrubní části je konstrukční ocel S235JR s mezí kluzu 235 MPa a nárazovou prací pro V-vrub 27 J. [23]

5.1.1 Materiálové vlastnosti pro lineární část analýzy LA, LBA

Pro lineární část analýzy byl zvolen model ideálně elastického materiálu, na základě literatury [9]. Tento model je charakterizovaný modulem pružnosti (E), Poissonovým číslem (ν) a hustotou materiálu (ρ_s), jejichž hodnoty jsou uvedeny v Tab. 5.1.

Tab. 5.1. Charakteristika lineárního materiálu [3]

E	$2 \cdot 10^5$	MPa
ν	0,3	-
ρ_s	7850,0	kg/m^3

5.1.2 Materiálové vlastnosti pro nelineární část analýzy GMNA,GMNIA

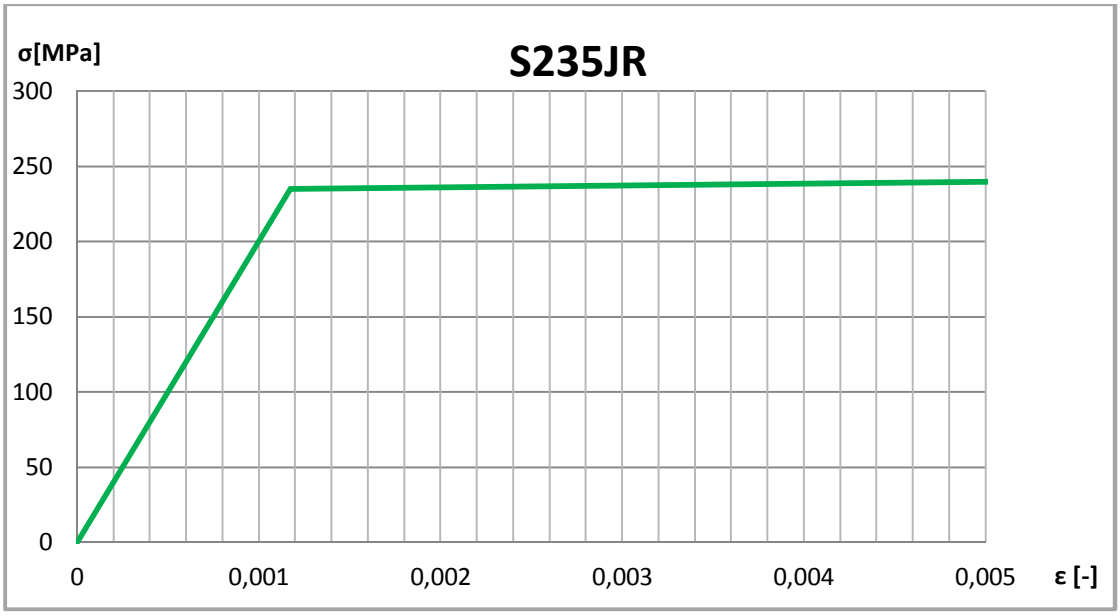
Pro nelineární část analýzy byl zvolen bilineární model materiálu na základě doporučení uvedených v literatuře [24]. Jedná se o elastoplastický model materiálu se zpevněním. Tento model je definován elastickou a plastickou částí a zaručuje přesnější popis reálného materiálu se zachováním jisté rezervy na konzervativní straně. Je jednodušeji definovaný proti sofistikovanějším modelům s přijatelnými odchylkami od reálného modelu materiálu. Typickým příkladem sofistikovaného modelu materiálu je typ Ramberg-Osgood. Tento model se při větších deformacích mírně odchyluje od charakteru reálného materiálu. Hodnoty pro charakteristiky reálného modelu a modelu Ramberg-Osgood byly získány z literatury [25].

U bilineárního modelu je elastická část definována modulem pružnosti (E) a Poissonovým číslem stejně jako v kapitole 5.1.1. Plastická část se zpevněním je definována pomocí násobku modulu pružnosti jako tečný modul pružnosti (E_T) [24]. Tečný modul pružnosti byl stanoven z rovnice (5-1) uvedené v literatuře [26] .

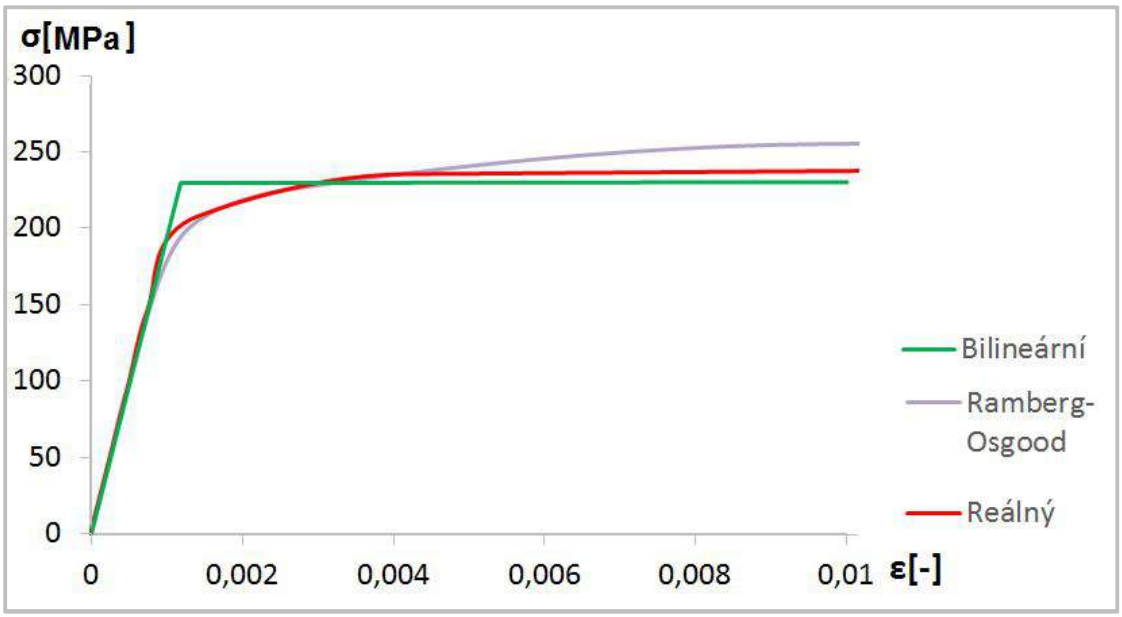
$$E_T = \frac{E}{100} \tag{5-1}$$

[3] Charakteristika lineárního materiálu se vztahuje i na parametry materiálu využitého v nelineárních analýzách.

Graf. 5-1 vykresluje charakteristiku bilineárního elastoplastického modelu materiálu použitého pro nelineární část analýzy. Srovnání závislosti napětí a poměrného prodloužení pro různé modely materiálu znázorňuje Graf. 5-2.



Graf. 5-1 Bilineární charakteristika materiálu



Graf. 5-2 Srovnání modelů materiálu

5.2 Nastavení lineární analýzy

Lineární bifurkační analýza (LBA) umožňuje numericky určit kritické zatížení konstrukce, které způsobí bifurkaci, tedy rozdvojení rovnováhy konstrukce, až do okamžiku ztráty stability, přičemž je konstrukce zatěžována membránovými složkami napětí. Stanoví rovněž charakteristický tvar vybočení (vyboulení) střednicové plochy, k němuž při ztrátě stability dojde. Přívlastek „lineární“ u této analýzy vyjadřuje skutečnost, že až do okamžiku bifurkace je úloha lineární, ale ke ztrátě stability dochází náhlým skokem. [27]

Pro lineární analýzu byla využita metoda Block-Lanczos. Tato metoda využívá řešič „řídkých matic“ (sparse matrix solver). Bližší popis metody je uveden v literatuře [5]. Pro analýzu byl nastaven počet 25 vlastních tvarů (módů) a jejím výsledkem je zisk vlastních tvarů. Velikost složek obvodových, podélných a smykových napětí v místech s největší deformací jsou získávány Lineární statickou analýzou (LA).

Nastavení nelineární analýzy bylo provedeno ve spolupráci s Bc. Janem Jančíkem.

5.3 Nastavení zatížení modelu

Hodnoty zatížení konstrukce vycházejí z okrajových podmínek modelu (kapitola 4.3.3). Z důvodu výskytu několika typů zatížení byly stanoveny čtyři zátěžné stavy modelu, které se vzájemně liší dominujícím typem zatížení. Tato dominance je zajištěna formou koeficientů uvedených v Tab. 5.2. Hodnoty koeficientů byly stanoveny na základě doporučení z literatury [22], [24], [28].

Tab. 5.2 Zátěžné stavy modelu

č. stavu	Název stavu	Typ zatížení				
		Tlak	Vítr	Sníh	Seismicita	Teplota
1	zatížení větrem	1,35x	**1,50x**	1,35x	1,35x	1x
2	zatížení sněhem	1,35x	1,35x	**1,50x**	1,35x	1x
3	zatížení seismicitou	1,35x	1,35x	1,35x	**1,50x**	1x
4	zatížení podtlakem	**1,50x**	1,35x	1,35x	1,35x	1x

5.4 Implementace imperfekcí

Nelineární analýzy je nutno řešit po krocích (přírůstcích). Problematická je nutnost realistického zadání imperfekcí (tvaru, zatížení, vazeb), které mají vliv na výsledky analýzy. Nelineární analýza typu GMNIA, tedy analýza zahrnující geometricky nedokonalý model konstrukce, vyžaduje model s implementovanými vadami. Imperfekce pro nelineární analýzu vycházejí z módů deformovaných vlastních tvarů konstrukce nalezených lineární bifurkační analýzou. Pomocí stanovené velikosti násobku deformovaných tvarů jsou do modelu zaneseny imperfekce. Velikost násobku musí být stanovena tak, aby nebyla překročena tolerance ovality v normě [9].

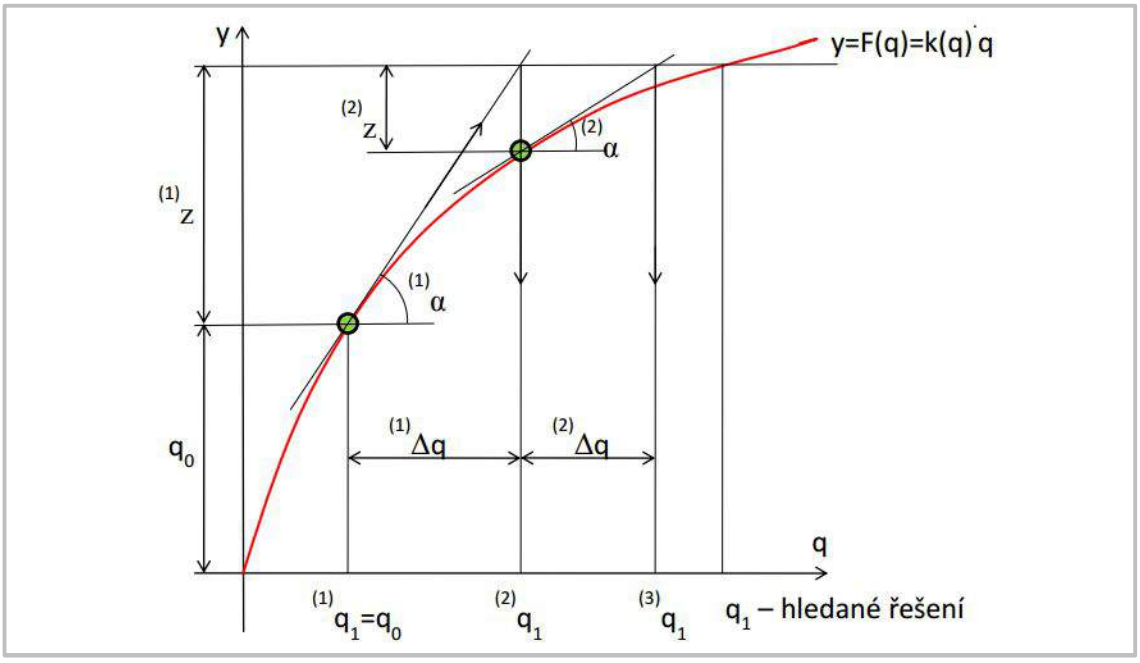
Pro implementaci vad byly vybrány a zvoleny vlastní tvary s dominantní deformací na válcových částech pláště. Implementace byla následně provedena pomocí sekvence příkazů (makra), které postupně kumulovaly deformaci ze všech čtyř zátěžných stavů a jednotlivých vlastních tvarů pro dané zátěžné stavy. Po vložení imperfekcí proběhla kontrola rozměrů na jednotlivých segmentech pláště, aby bylo vyloučeno překročení dovolené tolerance ovality, a zároveň aby byla dodržena amplituda ekvivalentních imperfekcí (Δw_{eq}) uvedených v literatuře [9]. Velikost amplitudy ekvivalentních imperfekcí byla určena pomocí vztahu (5-2).

$$\Delta w_{eq} = l_{g\theta} \cdot 0{,}025 \tag{5-2}$$

5.5 Nastavení nelineární analýzy GMNA, GMNIA

Program ANSYS nabízí několik přístupů pro řešení nelineárních analýz. Jednou z nich je Newton-Raphsonova metoda (NR) nebo metoda délky oblouku (Arc-lenght).

Newton-Raphsonova metoda je základní metoda pro řešení nelineárních problémů. Tato metoda využívá rozdělení celkového zatížení do kroků (přírůstků), které jsou aplikovány v průběhu zatěžování. Pro každý iterační krok NR metoda vyhodnotí vektor zatížení a stanoví matici tuhostí. Následně dojde k lineárnímu řešení a hodnocení konvergence pro zvolený přírůstek. Pokud nedojde ke konvergenci, je přehodnocena velikost přírůstku i matice tuhostí. Tento iterační postup je opakován, až dojde ke konvergenci řešení. [5], [29]. Grafické znázornění postupu Newton-Raphsonovy metody je uvedeno na Obr. 5-1.



Obr. 5-1 Grafická interpretace metody Newton-Raphson [29]

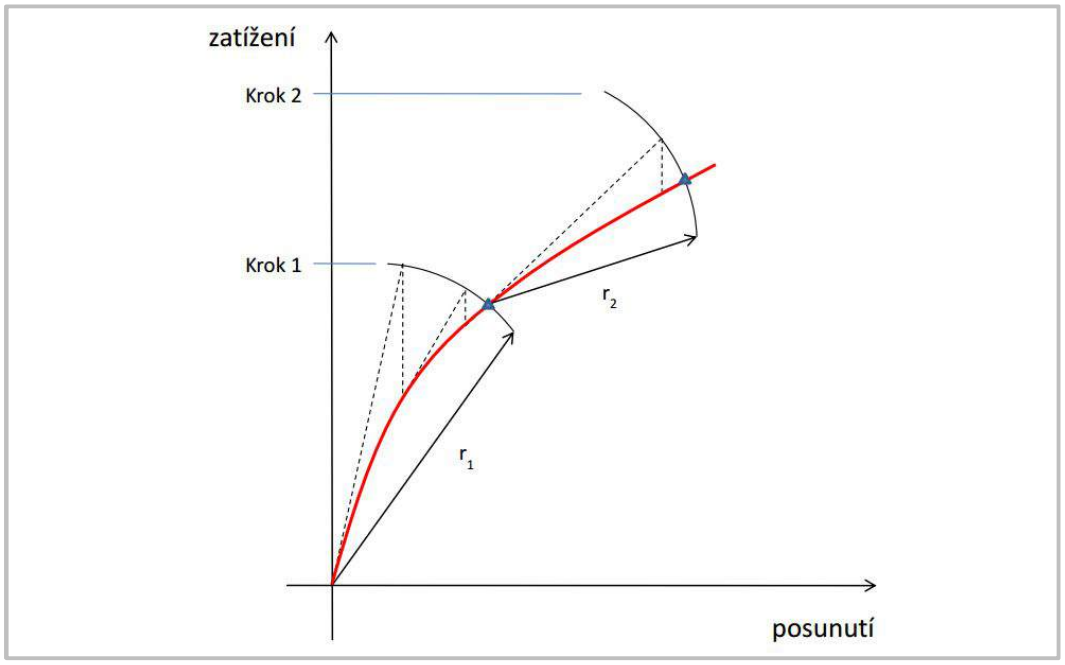
Arc-lenght metoda neboli metoda délky oblouku je další často používanou metodou pro řešení nelineárních problémů. Metoda je poměrně robustní a vhodná pro řešení problémů spojených s vyhledáváním limitních zatížení, která nejsou monotónně rostoucí. Při vyšetřování nelineární stability se mohou na zatěžovací dráze objevit limitní nebo bifurkační body.

Na rozdíl od NR metody, u které je řešení řízeno velikostí přírůstku zatížení, zavádí metoda oblouku další parametr představující určité omezení hodnoty přírůstku zatížení v daném výpočtovém kroku. Hodnota délky výpočtového kroku tedy záleží na průběhu iterace a je přímo závislá na zvolené délce oblouku.

Základ této metody je v předpokladu proporcionálního zatěžování. Grafické znázornění metody délky oblouku je uvedeno na Obr. 5-2.

Referenční poloměr oblouku je vypočten ze zatížení a stanoveného počtu kroků pro první iteraci. Přírůstek pro první iteraci je určen podle vztahu (5-3). [5], [29], [30]

$$Referenční\ poloměr = \frac{celkové\ zatížení}{počet\ kroků} \tag{5-3}$$



Obr. 5-2 Grafická interpretace Arc-lenght metody [29]

Pro řešení nelineární analýzy ztráty stability kouřovodu byla zvolena Arc-lenght metoda. Nastavení dílčích parametrů analýzy bylo provedeno pomocí sekvence příkazů (makra). Tento přístup byl zvolen z důvodu efektivního a přehledného zadávání parametrů případně změnu jednotlivých parametrů tak, aby bylo vyloučeno co největší množství chyb zapříčiněných lidským faktorem.

Metoda délky oblouku je využívána pro statické analýzy. Před jejím spuštěním je nutné vhodně nastavit její parametry, mezi které patří zahrnutí velkých deformací pozvolné změny zatížení (ramped – loads). [5]

Další pokročilé parametry pro optimální nastavení analýzy jsou:

- konečný čas pro dosažení celkového zatížení
- celkový počet kroků rozdělující velikost zatížení
- zahrnutí změn tuhosti systému vlivem předpětí
- nastavení minimální a maximální násobku pro stanovení délky oblouku
- nastavení extrapolace lineárních výsledků mezi uzly
- počet zkonvergovaných kroků pro zápis do výsledkového souboru
- nastavení konvergenčních hodnot a rozsahů tolerancí
- maximální počet rovnovážných iterací jako omezující podmínka ukončení
- nastavení limitů pro ukončení výpočtu (posunutí, natočení, síla, moment)

Podrobné nastavení hodnot pro nelineární analýzu je uvedeno v Tab. 5.3, seřazení příkazů v tabulce odpovídá pořadí zadávání vyžadované programem ANSYS.

Tab. 5.3 Parametry nastavení nelineární analýzy

PŘÍKAZ	HODNOTA	POPIS
TB	BISO	nastavení bilineárních isotrop. vlastností materiálu se zpevněním
TBDATA	235, 2000	nastavení vlastností materiálu, mez kluzu a tečný modul pružnosti
TBTEMP	0	nastavení vlastností materiálů pro různé teplotní body
ARCLEN	1	zapnutí metody Arc-lenght
ANTYPE	STAT, NEW	nastavení nové statické analýzy
NLGEOM	ON	uvažování vlivu velkých deformací
TIME	100	stanovení časového rozsahu pro dosažení celkového zatížení
ATOTS	OFF	vypnutí automatického stanovení velikosti časových kroků
NSUBST	10, 1000, 1	stanovení počtu kroků, počáteční, maximální, minimální
TIMINT	ON, ALL	uvažování vlivů setrvačnosti
LUMPM	OFF	použití výchozí formulace prvkově závislé matice tuhostí
EQSLV	SPARSE, $1\cdot10^{-5}$	iterativní řešič (řídké matice), tolerance řešiče
KBC	0	lineárně interpolované zvyšování zatížení (ramped – loads)
ARCLEN	ON, 5, $1\cdot10^{-7}$	nastavení metody oblouku, maximální a minimální rádius metody
ARCTRM	OFF	nastavení parametrů metody oblouku pro ukončení výpočtu
NCNV	2, $1\cdot10^{6}$	nastavení přerušení analýzy při překročení limitů deformace
CNVTOL	F, $1\cdot10^{-5}$, 1, $1\cdot10^{-2}$	nastavení konvergentních hodnot nelineární analýzy pro síly
CNVTOL	M, $1\cdot10^{-5}$, 1, $1\cdot10^{-2}$	nastavení konvergentních hodnot nelineární analýzy pro momenty
NEQIT	15	nastavení ukončení analýzy při dosažení počtu rovnovážných iterací
OUTRES	ERASE	vymazání výsledků předchozí analýzy
OUTRES	ALL, ALL	zápis všech dostupných výsledků pro všechny konvergované kroky
ERESX	DEFA	nastavení extrapolace výsledků v uzlech

Dále byly provedeny analýzy se stejným nastavením, ale jinými kritérii pro ukončení analýzy. Těmito kritérii bylo dosažení prvního bodu bifurkace, a další kritérium bylo maximální natočení elementů o 0,1 radiánu kolem os X, Y, Z.

Pro tyto další analýzy byl upraven příkaz ARCTRM jak je uvedeno v Tab. 5.4.

Tab. 5.4 Ukončení dalších nelineárních analýz

PŘÍKAZ	HODNOTA	POPIS
ARCTRM	L	ukončení metody oblouku při dosažení prvního bifurkačního bodu
	U, , 0.1, ROTX	ukončení metody oblouku při dosažení max. natočení kolem osy X
ARCTRM	U, , 0.1, ROTY	ukončení metody oblouku při dosažení max. natočení kolem osy Y
	U, , 0.1, ROTZ	ukončení metody oblouku při dosažení max. natočení kolem osy Z

U nelineárních analýz je uvažován desetinásobek původních zatížení uvedených v Tab. 5.2 Toto opatření bylo zavedeno z důvodu zajištění předčasného kolapsu konstrukce. Vlivem zavedení tohoto opatření bude následně nutné aproximovat výsledné časy kolapsu vyplývající z nelineárních analýz.

5.5.1 Vyhodnocení odolnosti proti ztrátě stability.

Vyhodnocení odolnosti modelu vůči ztrátě stability bylo provedeno v souladu s normou EN 1993-1-6 dále uvedené jako norma [9]. Stručný přehled výpočtu a vyhodnocení pro první nevyztuženou variantu konstrukce je uveden níže.

Ověření únosnosti podle numerických analýz LA a LBA

Výsledkem LA a LBA analýzy je zjištění faktoru zatížení, a polohy uzlů s největším posunutím (deformací) ve všech 25 módech boulení. Z těchto uzlů byla následně pro každý mód zapsána obvodová napětí (S_Y), podélná napětí (S_Z) a smyková napětí (S_{YZ}), včetně čísel uzlů, a čísel lokálních souřadných systémů. Číslo souřadného systému (CSYS) je určeno k rychlé identifikaci segmentu potrubí, kde se nachází uzel s největší deformací. Dále byly zaznamenány faktory kritického zatížení při boulení (r_{Rcr}). Vzorové hodnoty pro první zátěžný stav a první mód boulení nevyztužené konstrukce, využité ve vzorovém výpočtu, jsou uvedeny v Tab. 5.5.

S ohledem na obrácenou konvenci znamének v [9] pro tahová a tlaková napětí (tlak je značen kladně), byly hodnoty zapsaných napětí uvažovány ve výpočtu s opačným znaménkem.

Tab. 5.5 Vzorové hodnoty napětí

r_{Rcr}	CSYS	Č. uzlu	S_Z [MPa]	S_Y [MPa]	S_{YZ} [MPa]
1,66	24	86732	-67,48	-76,13	-2,62

Následovalo stanovení faktoru referenční plastické únosnosti dle rovnice (5-4).

$$r_{Rpl} = \frac{t \cdot f_y}{\sqrt{S_Z^2 - S_Z \cdot S_Y + S_Y^2 + 3 \cdot S_{ZY}^2}} \tag{5-4}$$

$$r_{Rpl} = \frac{5 \cdot 235}{\sqrt{64{,}48^2 - 64{,}48 \cdot 76{,}13 + 76{,}13^2 + 3 \cdot 2{,}62^2}} = 0{,}225 \tag{5-5}$$

V dalším kroku byla stanovena celková poměrná štíhlost dle rovnice (5-6) a celkový součinitel vzpěrnosti dle vztahu (5-12).

$$\bar{\lambda}_{ov} = \sqrt{\frac{r_{Rcr}}{r_{Rpl}}} \tag{5-6}$$

$$\bar{\lambda}_{ov} = \sqrt{\frac{1{,}66}{0{,}225}} = 0{,}368 \tag{5-7}$$

Pro stanovení celkového součinitele vzpěrnosti je nutné stanovit charakteristickou amplitudu imperfekce dle vztahu (5-8) a redukční součinitel imperfekce při elastickém boulení dle vztahu (5-10). Hodnota součinitele Q byla stanovena na základě doporučení z přílohy – D literatury [9].

$$\Delta_{wk} = \frac{1}{Q} \cdot \sqrt{\frac{r}{t}} \cdot t \tag{5-8}$$

$$\Delta_{wk} = \frac{1}{16} \cdot \sqrt{\frac{2653}{5}} \cdot 5 = 7{,}198\ mm \tag{5-9}$$

$$\alpha_x = \frac{0{,}62}{1 + 1{,}91 \cdot \left(\frac{\Delta_{wk}}{t}\right)^{1{,}44}} \tag{5-10}$$

$$\alpha_x = \frac{0{,}62}{1 + 1{,}91 \left(\frac{7{,}198}{5}\right)^{1{,}44}} = 0{,}146 \tag{5-11}$$

$$\chi = \frac{\alpha_x}{\bar{\lambda}_{ov}^{\ 2}} \tag{5-12}$$

$$\chi = \frac{0{,}146}{0{,}368^2} = 1{,}078 \tag{5-13}$$

Dále byl stanoven faktor referenční charakteristické únosnosti při boulení dle vztahu (5-14). Pomocí součinitele únosnosti při boulení (γ_{M1}) byl tento faktor korigován a následně byl stanoven faktor návrhové únosnosti při boulení (r_{Rd}) dle vztahu (5-16).

$$r_{Rk} = \chi \cdot r_{Rpl} \tag{5-14}$$

$$r_{Rk} = 1{,}078 \cdot 0{,}225 = 0{,}243 \tag{5-15}$$

$$r_{Rd} = \frac{r_{Rk}}{\gamma_{M1}} \tag{5-16}$$

$$r_{Rd} = \frac{0{,}243}{1{,}1} = 0{,}221 \tag{5-17}$$

Poté bylo přistoupeno k ověření únosnosti při boulení dle podmínky (5-18). V případě splnění podmínky u všech 25 módů boulení může být konstrukce shledána jako vyhovující. V případě že kritérium (5-18) není splněno, konstrukce je v nevyhovujícím stavu a je třeba navrhnout vhodné opatření v podobě obvodových výztuh.

$$r_{Rd} \geq 1 \tag{5-18}$$

$$0{,}221 \geq 1 \cdots nevyhovuje \tag{5-19}$$

V tomto vzorovém výpočtu není splněna podmínka únosnosti při boulení z hlediska LA a LBA analýzy a bylo by nutné v tomto případě přikročit k návrhu obvodových výztuh kouřovodu.

Ověření únosnosti pro GMNA a GMNIA analýzu

Pro ověření únosnosti u nelineárních analýz, dle doporučení literatury [9] a [24], byly využity předcházející výsledky napětí z LA analýzy, které byly zahrnuty již v části nastavení nelineárních analýz. Výsledkem nelineárních analýz bylo zjištění času kolapsu konstrukce, který přímo odpovídá násobku celkového zatížení konstrukce. Na základě informací z [9] a [24] budou porovnávány výsledky z obou analýz GMNA i GMNIA, aby bylo možné porovnat nepříznivý účinek imperfekcí na dané konstrukci.

Výsledné hodnoty nelineárních analýz nevyztužené konstrukce pro vzorový výpočet jsou uvedeny v Tab. 5.6.

Tab. 5.6 Vzorové hodnoty výsledků nelineárních analýz

TYP ANALÝZY	GMNA	GMNIA	
ZP. UKONČENÍ ANALÝZY	ČAS T_{GMNA}	ČAS T_{GMNIA}	JED.
ARC	12,6096	12,5911	s
BIF_L	12,5351	7,5653	s
BIF_ROT	4,9762	4,9765	s

ARC	ukončení analýzy dosažením minimální hodnoty délky oblouku
BIF_L	ukončení analýzy dosažením prvního bodu bifurkace
BIF_ROT	ukončení analýzy dosažením max. natočení 0.1 °rad

Spolehlivost numericky vypočítané hodnoty faktoru elasto – plastické únosnosti při boulení ($r_{R,GMNIA}$) má být korigována kalibračním faktorem (k_{GMNIA}), který je stanoven dle vztahu (5-20), kde ($r_{R,test,known,check}$) je hodnota parametru únosnosti známé konstrukce. Tato hodnota by měla být získána z odborných publikací boulení skořepin, zabývajících se zásadně podobnými případy zatížení skořepin s velmi podobnými předpoklady a okrajovými podmínkami, nebo z výsledků zkoušek na reálné konstrukci. [9]

S ohledem na specifické zadávací parametry nebyly nalezeny odborné publikace, které by bylo možné využít pro stanovení kalibračního faktoru. Proto byl tento faktor stanoven v doporučeném rozsahu z literatury [9], jak uvádí vztahy (5-21) a (5-22).

$$k_{GMNIA} = \frac{r_{R,test,known,check}}{r_{R,GMNIA}} \tag{5-20}$$

$$0{,}8 < k_{GMNIA} < 1{,}2 \tag{5-21}$$

$$k_{GMNIA} = 1 \tag{5-22}$$

V následujících krocích byly zpracovány výsledné časy z jednotlivých nelineárních analýz (GMNA) ukončených dle různých kritérií viz Tab. 5.6. Tyto časy byly přepočítány na ekvivalentní faktor zatížení odpovídající původnímu zatížení jako u LA a LBA analýzy, tento přepočet byl uskutečněn dle vztahu (5-23) pomocí času na dosažení celkového zatížení (TIME) a desetinásobku původního zatížení. Dle totožných kritérií byly přepočítány časy pro analýzu GMNIA.

$$t_{GMNA} = \frac{T_{GMNA}}{TIME} \cdot 10 \tag{5-23}$$

$$t_{GMNA} = \frac{4{,}9762}{100} \cdot 10 = 0{,}49762 \tag{5-24}$$

Z těchto časů byla pro další zpracování využita minimální hodnota. Tato hodnota byla následně korigována korekčním faktorem dle vztahu (5-27).

$$r_{R,GMNA} = min\{t_{GMNA}\} \tag{5-25}$$

$$r_{R,GMNA} = 0{,}49762 \tag{5-26}$$

$$r_{Rk,GMNA} = r_{R,GMNA} \cdot k_{GMNIA} \tag{5-27}$$

$$r_{Rk,GMNA} = 0{,}49762 \cdot 1 = 0{,}49762 \tag{5-28}$$

Následně byl stanoven návrhový faktor únosnosti při boulení ($r_{Rd,GMNA}$) dle vztahu (5-29) a bylo ověřeno splnění podmínky únosnosti dané vztahem (5-31).

$$r_{Rd,GMNA} = \frac{r_{Rk,GMNA}}{\gamma_{M1}} \tag{5-29}$$

$$r_{Rd,GMNA} = \frac{0{,}49762}{1{,}1} = 0{,}4523 \tag{5-30}$$

$$r_{Rd,GMNA} \geq 1 \tag{5-31}$$

$$0{,}4523 \geq 1 \cdots nesplněno \tag{5-32}$$

Dle stejných kritérií byly vyhodnoceny i výsledky GMNIA analýzy, jak je uvedeno v rovnicích (5-33) až (5-40).

$$r_{R,GMNIA} = min\{t_{GMNIA}\} \tag{5-33}$$

$$r_{R,GMNIA} = 0{,}49765 \tag{5-34}$$

$$r_{Rk,GMNIA} = r_{R,GMNIA} \cdot k_{GMNIA} \tag{5-35}$$

$$r_{Rk,GMNIA} = 0{,}49765 \cdot 1{,}0 = 0{,}49765 \tag{5-36}$$

$$r_{Rd,GMNIA} = \frac{r_{Rk,GMNIA}}{\gamma_{M1}} \tag{5-37}$$

$$r_{Rd,GMNA} = \frac{0{,}49765}{1{,}1} = 0{,}4524 \tag{5-38}$$

V posledním kroku bylo ověřeno splnění podmínky faktoru únosnosti při boulení pro geometricky a materiálově nelineární analýzu zahrnující imperfekce dle vztahu (5-39).

$$r_{Rd,GMNIA} \geq 1 \tag{5-39}$$

$$0{,}4524 \geq 1 \cdots nesplněno \tag{5-40}$$

Shrnutí výsledků ze vzorového výpočtu uvádí Tab. 5.7

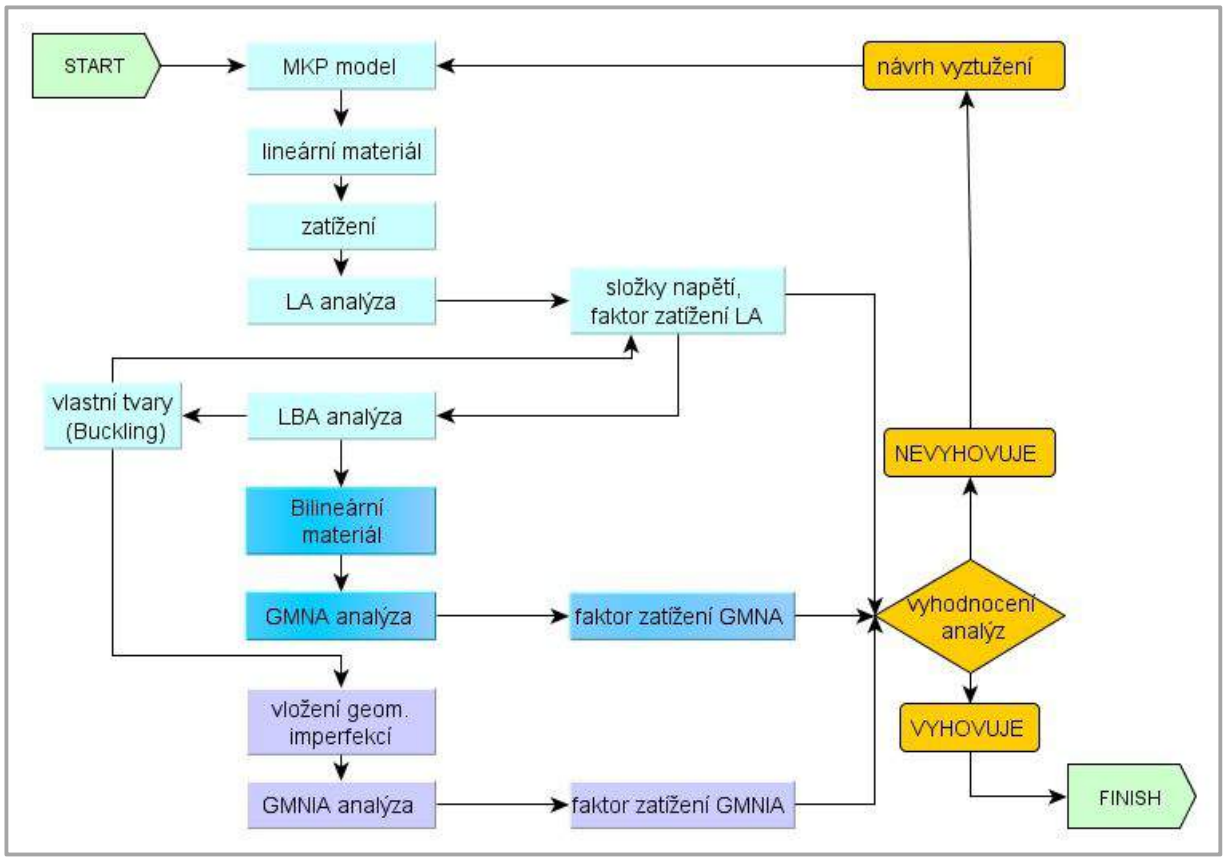
Tab. 5.7 Shrnutí výsledků vzorového vyhodnocení analýz

	Typ analýzy		
	LA+LBA	GMNA	GMNIA
Podmínka		$r_{Rd} \geq 1$	
r_{Rd}	0,2207	0,4523	0,4524
Splnění podmínky	NE	NE	NE

Dle výše uvedený výsledků ze vzorového výpočtu vyplývá, že původní navržená geometrie nedokáže odolat zadaným zatížením. Z toho důvodu je nutné navrhnout

vhodné opatření pro úpravu stávající geometrie, aby konstrukce odolala zatížením a vyhověla kritériím udávaných normou. Popis při postupu navržení úprav je uveden v následující kapitole 5.6.

Obr. 5-3 graficky znázorňuje a stručně shrnuje postup aplikovaný při přípravě modelů na analýzy a jejich vyhodnocení.



Obr. 5-3 Postup vyhodnocení analýz

5.6 Návrh vyztužených variant

Z důvodu nesplnění kritérií odolnosti vůči ztrátě stability při boulení požadovaných normou u nevyztužené konstrukce, bylo nutné přistoupit k navržení vhodného vyztužení.

V praxi je často využíváno obvodových výztuh s rovnoměrným rozestupem výztuh na válcové ploše. S ohledem na největší příspěvek k celkovému kvadratickému momentu průřezu, byly na vyztužení využity normalizované profily L 100x100x10 a T 100x100x10.

5.6.1 Předběžný návrh vyztužení

Předběžný návrh vyztužení konstrukce byl proveden dle normy pro návrh tlakových nádob EN 13345–3 [31]. Tato norma umožňuje stanovit kritický vnější tlak skořepiny při ztrátě stability s ohledem na zadané rozměry, materiál a předpokládaný počet obvodových vln skořepiny. Z hodnoty kritického vnějšího tlaku je následně stanovena minimální nevyztužená délka skořepiny.

Pro stanovení minimální nevyztužené délky skořepiny bylo třeba přepočítat jednotlivé vlivy zatížení (vítr, sníh, tlak, vlastní hmotnost) na ekvivalentní zatížení konstrukčním tlakem. Tento výpočet byl proveden pro jednotlivá zatížení a následně pomocí principu superpozice byly tyto dílčí výsledky sloučeny pro stanovení požadovaného vnějšího konstrukčního tlaku. Dále byly provedeny výpočty návrhu lehkých výztuh, viz [31]. Tento výpočet byl automatizován pomocí výpočetního programu MAPLE, který vyžadoval časovou investici, ale poskytl vhodné výsledky pro počáteční návrh rozestupu výztuh. Na tvorbě automatizovaného výpočtu se také podílel Bc. Jan Jančík.

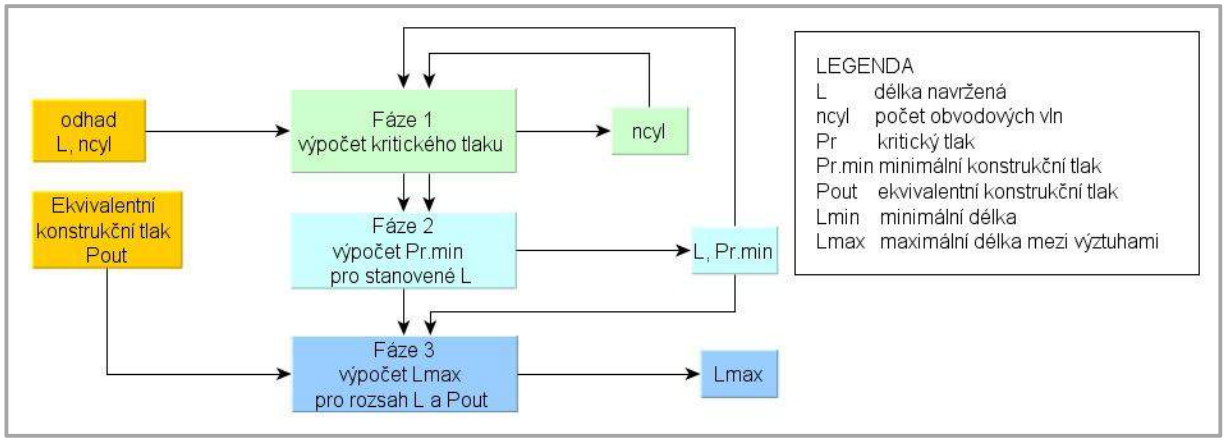
Výpočet byl proveden ve třech fázích. V první fázi byl proveden iterační výpočet pro stanovení dolní meze tlaku při zborcení s odhadnutými vstupními hodnotami pro počet obvodových vln a délky mezi výztuhami. V této fázi byl hledán minimální konstrukční tlak v závislosti na počtu obvodových vln.

Ve druhé fázi byl proveden iterační výpočet pro stanovení minimálního konstrukčního tlaku při boulení pro vypočítanou délku mezi výztuhami.

Ve třetí fázi byl proveden iterační výpočet pro stanovení maximální délky mezi výztuhami. Tento výpočet byl proveden pro zadaný vnější konstrukční tlak a rozsah maximálních a minimálních hodnot délky mezi výztuhami.

Výslednou hodnotou všech tří iteračních fází bylo stanovení minimální nevyztužené délky, tedy stanovení maximální vzdálenosti mezi výztuhami, aby skořepina odolala konstrukčnímu tlaku.

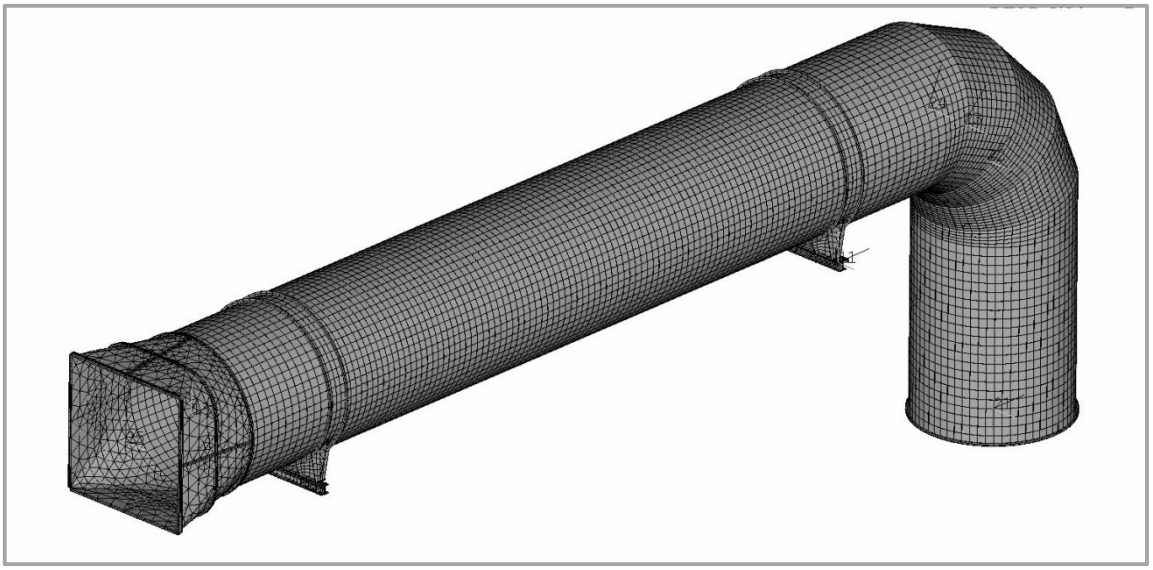
Maximální vzdálenost mezi výztuhami byla stanovena na 7000 mm.



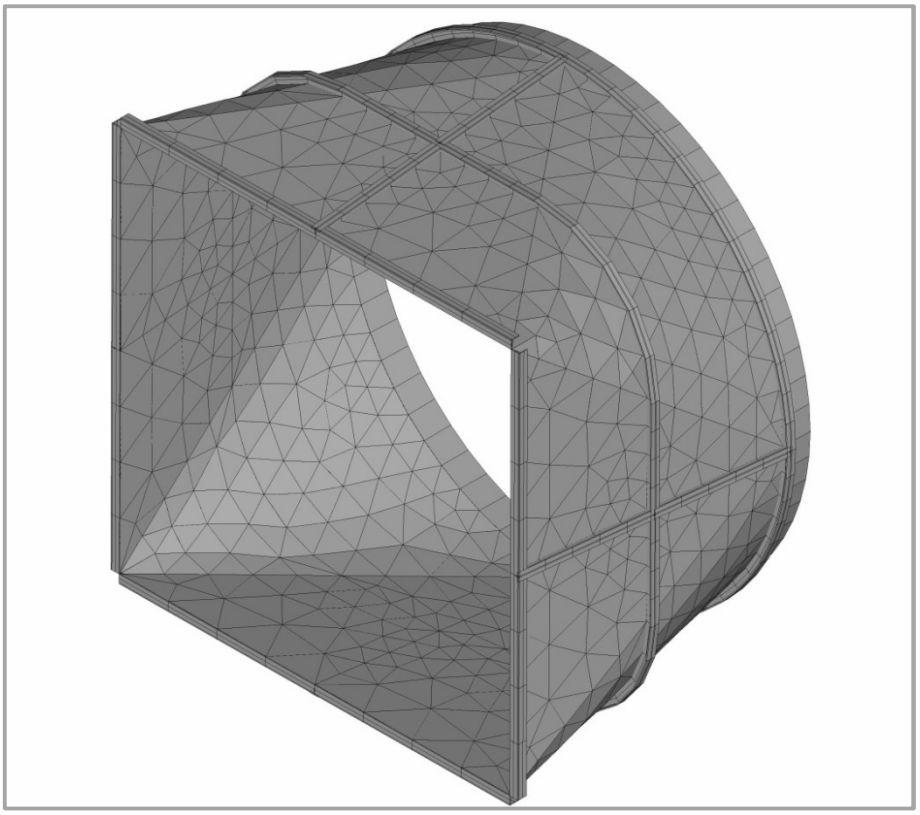
Obr. 5-4 Postup iterací pro stanovení nevyztužené délky Lmax

Nevyztužená varianta

Z důvodu předčasného kolapsu a velkých deformací konstrukce v oblasti redukce u nelineárních analýz byla upravena původní geometrie. Úprava spočívala ve vyztužení konstrukce podélnými výztuhami na rovných plochách redukce a přidáním obvodové výztuhy na redukci. Vyztužení bylo provedeno kombinací profilů L a T, jak je uvedeno na Obr. 5-5 a Obr. 5-6. Redukce nebyla předmětem hodnocení ztráty stability dle normy [9].



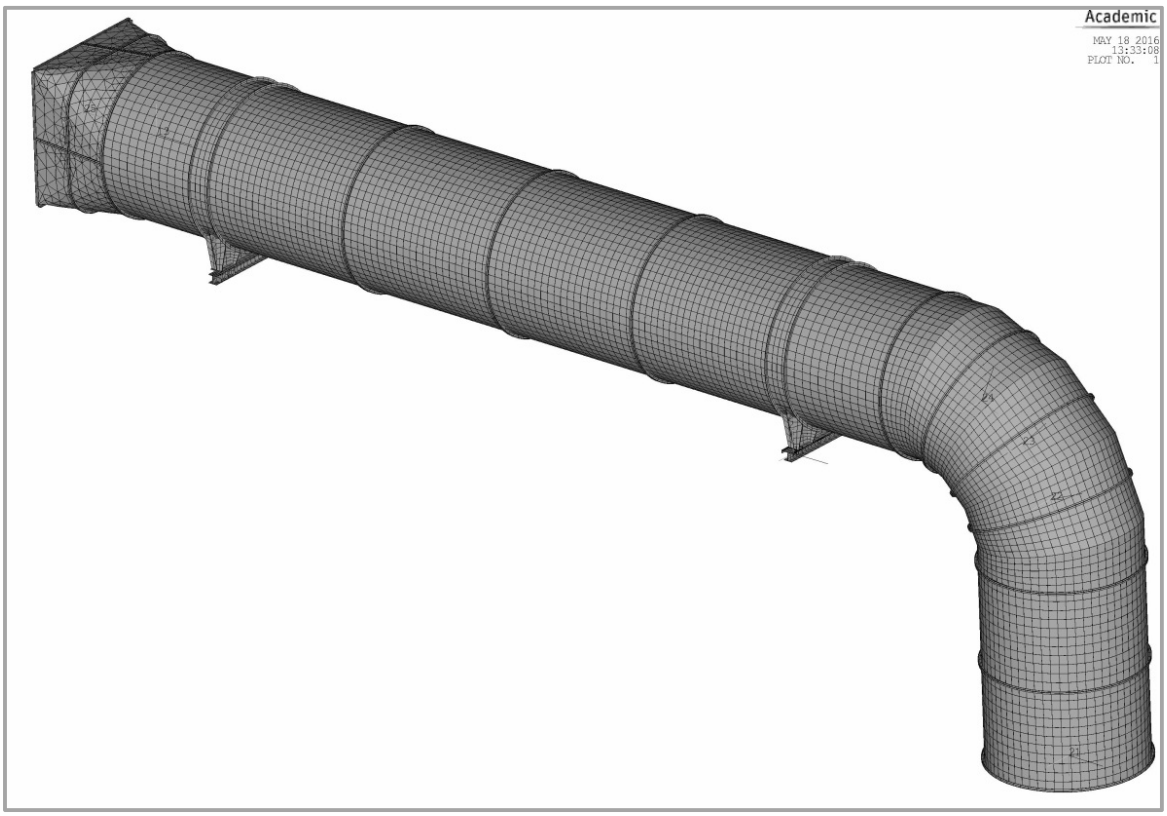
Obr. 5-5 Náhled nevyztužené varianty



Obr. 5-6 Detail vyztužení redukce

Návrh vyztužení 1

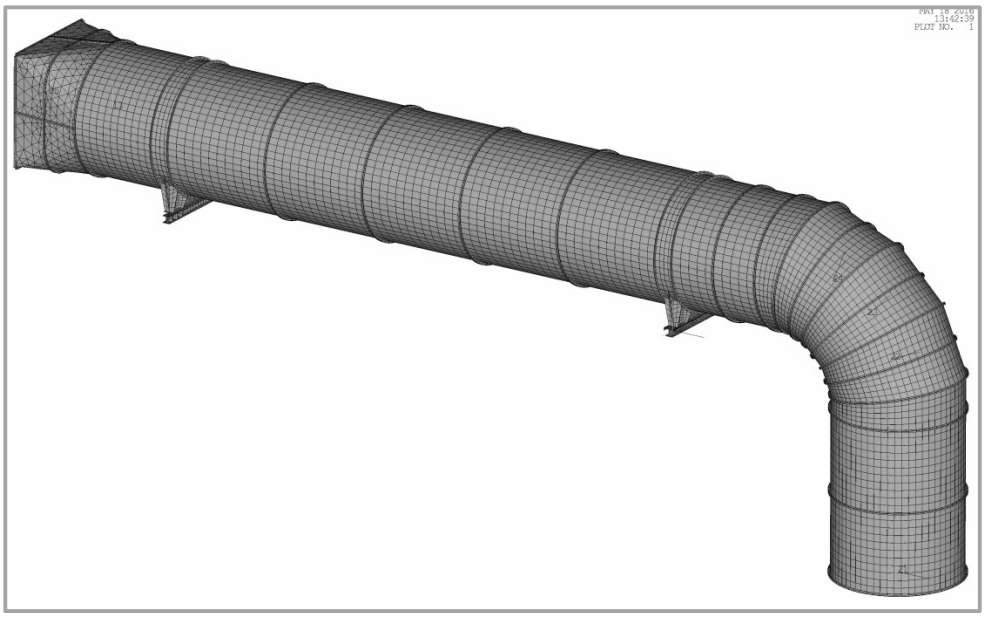
První návrh vyztužení byl proveden přidáním obvodových výztuh na válcových segmentech potrubí. Toto vyztužení bylo zvoleno s ohledem na charakter deformací při zatěžování nevyztužené varianty. Na této variantě bylo využito 13 obvodových výztuh s rozestupem 5900 mm. Na nejdelší části potrubí byly umístěny tři obvodové výztuhy s rovnoměrným rozestupem mezi sedlovými podpěrami. Dále bylo vyztuženo segmentové koleno a svislá část válcového potrubí, jak uvádí Obr. 5-7.



Obr. 5-7 Náhled varianty vyztužení 1

Návrh vyztužení 2

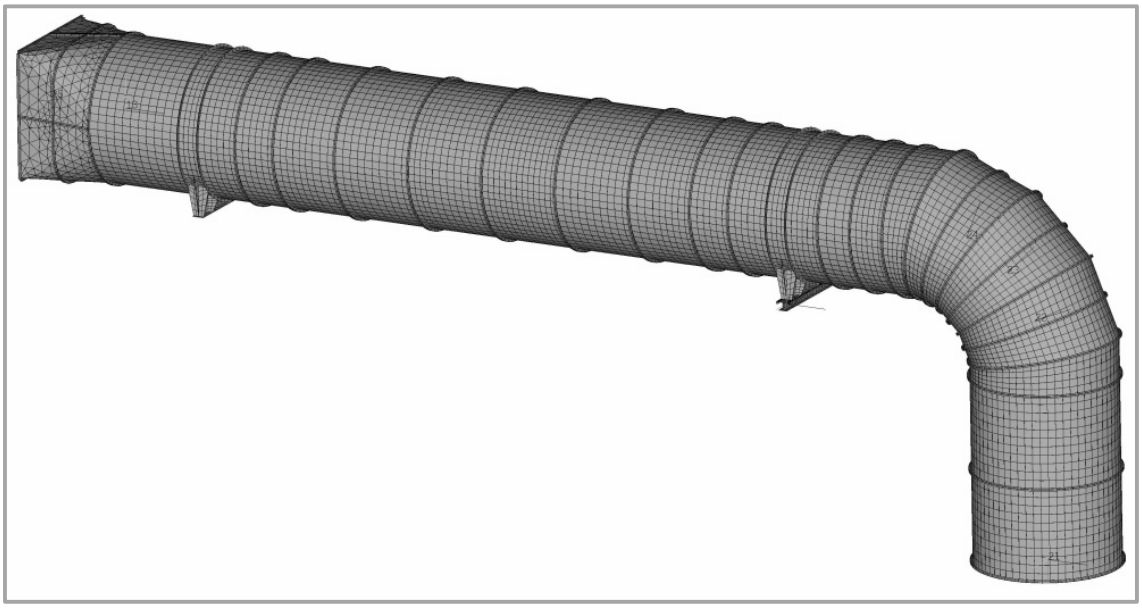
Druhý návrh vyztužení byl proveden přidáním výztuh na segmentovém koleni a na svislém konci potrubí. Na horizontální části byly využity čtyři obvodové výztuhy s rovnoměrným rozestupem 4500 mm mezi sedlovými podpěrami. Na této variantě bylo využito celkem 19 obvodových výztuh. Druhý návrh vyztužení je zobrazen na Obr. 5-8.



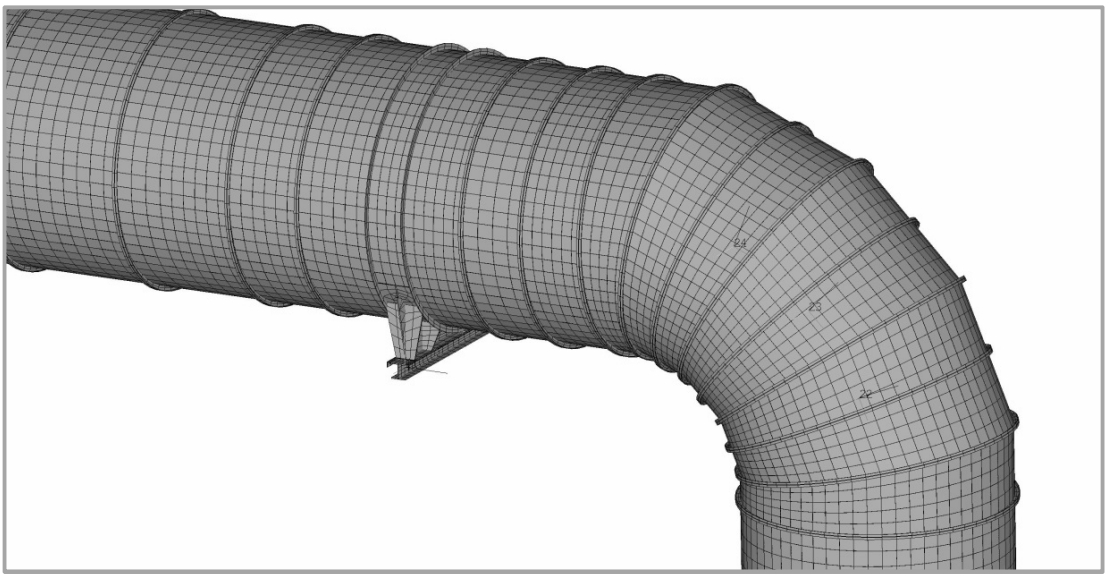
Obr. 5-8 Náhled vyztužení varianty 2

Návrh vyztužení 3

Z důvodu předčasného kolapsu konstrukce s druhým návrhem vyztužení muselo být přistoupeno ke třetímu návrhu. Tento návrh vyplývá z dodatečného vyztužení návrhu č. 2 s doplněním obvodových výztuh v horizontální části a v oblasti sedlových podpěr. S ohledem na komplikace způsobené ztrátou stability v místech prutové konstrukce, byla tato prutová konstrukce nahrazena vazbami s ekvivalentním omezením posuvů. Hodnoty posuvů byly získány z výsledků předchozích analýz. Celkový počet výztuh u této varianty je 25 kusů s rozestupem 2900 mm. Náhled na třetí variantu vyztužení poskytuje Obr. 5-9 a Obr. 5-10.



Obr. 5-9 Náhled varianty vyztužení 3



Obr. 5-10 Detail varianty vyztužení 3

5.7 Srovnání navržených variant vyztužení

Rychlé a přehledné shrnutí výsledků veškerých nelineárních analýz je uvedeno v Tab. 5.8 až Tab. 5.11. V těchto tabulkách jsou zaznamenány koncové časy ukončení analýzy dle nastavených kritérií. Dále jsou zaznamenány hodnoty z vyhodnocování analýz, faktor elasto – plastické únosnosti při boulení, faktor referenční charakteristické únosnosti, faktor návrhové únosnosti při boulení. V posledním řádku každé tabulky je uvedeno splnění podmínky únosnosti. Tabulky uvádějí hodnoty pro všechny vyztužené varianty se všemi zátěžnými stavy.

Tab. 5.8 Porovnání výsledků nevyztužené konstrukce

Zp. Vyztužení	**Varianta 0**							
Zátěžný s.	**S1**		**S2**		**S3**		**S4**	
Typ analýzy	**GMNA**	**GMNIA**	**GMNA**	**GMNIA**	**GMNA**	**GMNIA**	**GMNA**	**GMNIA**
$T_{, ARC}$	12,60964	12,59111	12,59840	12,58557	12,58483	12,57182	12,59651	12,58299
$T_{,BIF_L}$	12,53507	7,56532	12,53285	7,53937	12,51981	7,54393	12,53029	7,53216
$T_{,BIF_ROT}$	4,97615	4,97650	4,97654	4,97693	4,97662	4,97701	4,97523	4,97568
$t_{,GMNA}$	4,97615	4,97650	4,97654	4,97693	4,97662	4,97701	4,97523	4,97568
r_R	0,49762	0,49765	0,49765	0,49769	0,49766	0,49770	0,49752	0,49757
r_{Rk}	0,49762	0,49765	0,49765	0,49769	0,49766	0,49770	0,49752	0,49757
r_{Rd}	**0,45238**	**0,45241**	**0,45241**	**0,45245**	**0,45242**	**0,45246**	**0,45229**	**0,45233**
r_{Rd} >1	**ne**	**ne**	**ne**	**ne**	**ne**	**ne**	**ne**	**ne**

Tab. 5.9 Porovnání výsledků varianty vyztužení 1

Zp. Vyztužení	Varianta 1							
Zátěžný s.	**S1**		**S2**		**S3**		**S4**	
Typ analýzy	**GMNA**	**GMNIA**	**GMNA**	**GMNIA**	**GMNA**	**GMNIA**	**GMNA**	**GMNIA**
$T_{,ARC}$	30,89488	30,88999	30,27386	31,57175	30,30316	31,56173	30,36668	31,62892
$T_{,BIF_L}$	30,81133	18,58800	30,26084	31,55937	30,25241	31,54852	30,31475	31,61536
$T_{,BIF_ROT}$	9,87648	9,87278	9,85484	9,85052	9,85336	9,84890	9,85234	9,84782
$t_{,GMNA}$	9,87648	9,87278	9,85484	9,85052	9,85336	9,84890	9,85234	9,84782
r_R	0,98765	0,98728	0,98548	0,98505	0,98534	0,98489	0,98523	0,98478
r_{Rk}	0,98765	0,98728	0,98548	0,98505	0,98534	0,98489	0,98523	0,98478
r_{Rd}	**0,89786**	**0,89753**	**0,89589**	**0,89550**	**0,89576**	**0,89535**	**0,89567**	**0,89526**
r_{Rd} >1	**ne**	**ne**	**ne**	**ne**	**ne**	**ne**	**ne**	**ne**

Tab. 5.10 Porovnání výsledků varianty vyztužení 2

Zp. Vyztužení	Varianta 2							
Zátěžný s.	**S1**		**S2**		**S3**		**S4**	
Typ analýzy	**GMNA**	**GMNIA**	**GMNA**	**GMNIA**	**GMNA**	**GMNIA**	**GMNA**	**GMNIA**
$T_{,ARC}$	45,27477	45,26176	44,69601	44,68114	45,27477	44,59911	44,71623	44,70070
$T_{,BIF_L}$	43,90870	43,90462	43,38420	43,37927	43,29672	43,29120	43,40564	43,40073
$T_{,BIF_ROT}$	9,91528	9,92798	9,90407	9,90119	9,90189	9,89892	9,90110	9,89806
$t_{,GMNA}$	9,91528	9,92798	9,90407	9,90119	9,90189	9,89892	9,90110	9,89806
r_R	0,99153	0,99280	0,99041	0,99012	0,99019	0,98989	0,99011	0,98981
r_{Rk}	0,99153	0,99280	0,99041	0,99012	0,99019	0,98989	0,99011	0,98981
r_{Rd}	**0,90139**	**0,90254**	**0,90037**	**0,90011**	**0,90017**	**0,89990**	**0,90010**	**0,89982**
r_{Rd} >1	**ne**	**ne**	**ne**	**ne**	**ne**	**ne**	**ne**	**ne**

Tab. 5.11 Porovnání výsledků varianty vyztužení 3

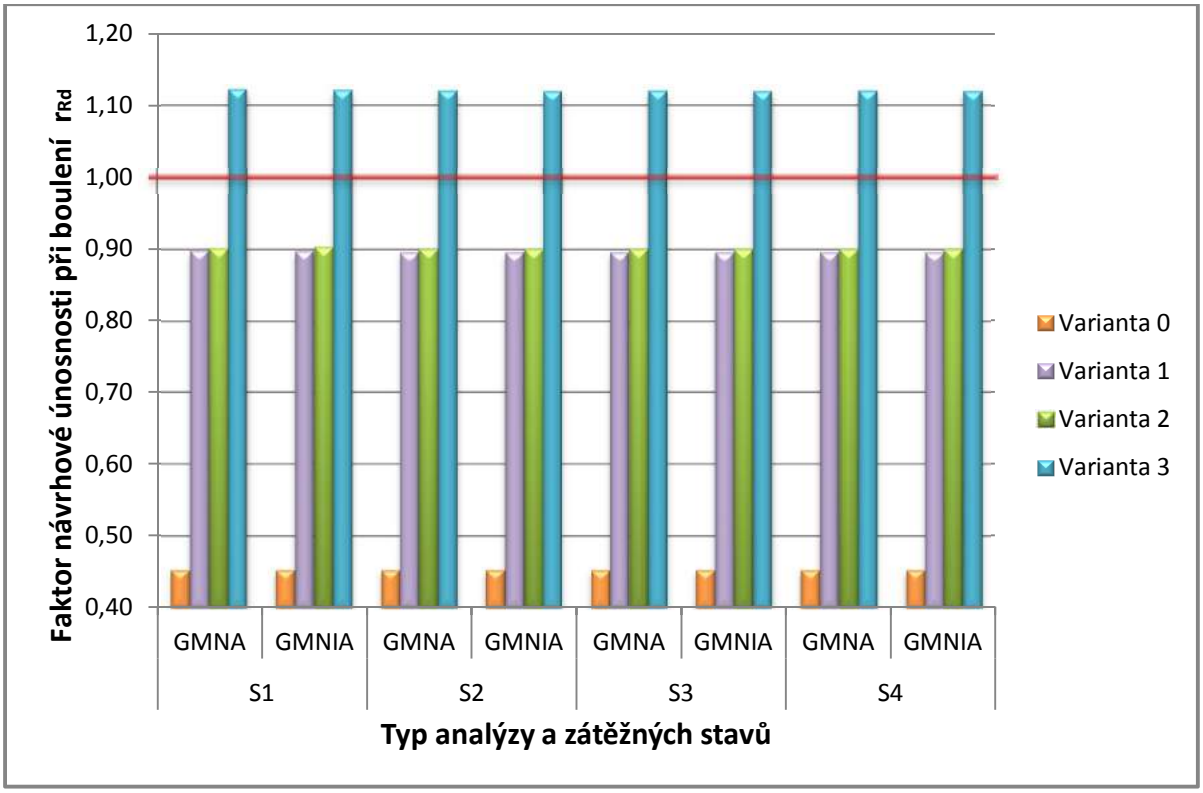
Zp. Vyztužení	Varianta 3							
Zátěžný s.	**S1**		**S2**		**S3**		**S4**	
Typ analýzy	**GMNA**	**GMNIA**	**GMNA**	**GMNIA**	**GMNA**	**GMNIA**	**GMNA**	**GMNIA**
$T_{,ARC}$	46,43664	46,50363	46,49654	46,57064	46,72270	46,78790	46,59625	46,68036
$T_{,BIF_L}$	43,49979	43,54107	43,52808	43,57760	43,69901	43,74632	43,53711	43,58276
$T_{,BIF_ROT}$	12,33714	12,32860	12,31796	12,30795	12,31651	12,30617	12,31468	12,30456
$t_{,GMNA}$	12,33714	12,32860	12,31796	12,30795	12,31651	12,30617	12,31468	12,30456
r_R	1,23371	1,23286	1,23180	1,23079	1,23165	1,23062	1,23147	1,23046
r_{Rk}	1,23371	1,23286	1,23180	1,23079	1,23165	1,23062	1,23147	1,23046
r_{Rd}	**1,12156**	**1,12078**	**1,11981**	**1,11890**	**1,11968**	**1,11874**	**1,11952**	**1,11860**
r_{Rd} >1	**ano**	**ano**	**ano**	**ano**	**ano**	**ano**	**ano**	**ano**

Varianta vyztužení 3 vykazuje odolnost vůči všem kombinacím zatížení. Splnila kritéria požadovaná normou.

Srovnáním jednotlivých výsledků z GMNA[4] a GMNIA[5] analýz vyplývá jistý vliv imperfekcí na výslednou odolnost spalinového potrubí vůči ztrátě stability. Z hlediska minimálního dopadu imperfekcí na výslednou odolnost proti ztrátě stability lze usoudit, že implementované imperfekce mají zanedbatelný význam pro tuto konstrukci a zátěžné stavy.

Nejvíce devastující vliv u všech konstrukcí vykazuje zátěžný stav S4 – zatížení pod tlakem, dále to pak jsou zátěžné stavy S2 a S3. Nejméně devastující vliv vykazuje zátěžný stav S1 – zatížení dominantním větrem.

Grafické srovnání jednotlivých výsledků v porovnání s limitní hodnotou faktoru návrhové únosnosti při boulení (r_{Rd}) znázorňuje Graf. 5-3.



Graf. 5-3 Srovnání jednotlivých variant vyztužení

[4] GMNA – Geometricky a materiálově nelineární analýza

[5] GMNIA – Geometricky a materiálově nelineární analýza zahrnující geometrické imperfekce

6 DISKUZE

Při zpětném pohledu do kapitoly Srovnání navržených variant vyztužení je zřejmé, že odolnost konstrukce spalinového potrubí proti ztrátě stability je závislá na způsobu vyztužení.

Pro počáteční model bylo nutné provézt vyztužení redukce potrubí. Důvodem byla velmi nízká únosnost rovných částí plechů. Tyto části byly vyztuženy kombinací obvodových a podélných lehkých výztuh z profilů L a T. Takto upravená geometrie byla následně testována a považována za geometrii bez výztuh.

Z výsledků předchozí kapitoly byl vyvozen závěr, že samotné vyztužení redukce bylo nedostatečné a docházelo ke ztrátě stability v oblastech segmentového kolene i svislého konce potrubí. Z toho důvodu bylo přistoupeno k variantě vyztužení č. 1 a 2. První varianta vyztužení vycházela z koncepce prvního návrhu a byla doplněna o obvodové výztuhy v oblastech kolene a válcových částí potrubí. Rozestup mezi výztuhami na válcových částech potrubí byl vyvozen z výpočtu minimální nevyztužené délky pro tlakové nádoby.

Druhá varianta vyztužení byla doplněna o další obvodové výztuhy zejména v oblastech spojů segmentového kolene a v horizontální válcové části potrubí. Z výsledků analýz prvního modelu bylo vyvozeno nedostatečné vyztužení a bylo zjištěno zvýšené napětí v oblasti segmentového kolene. Výsledkem analýzy druhého modelu byl zjištěn přechod kritických uzlů z válcové skořepiny na prutovou konstrukci, která nese kluznou sedlovou podpěru, a také zvýšené napětí v oblasti pevné sedlové podpěry.

Z tohoto důvodu bylo přistoupeno ke třetí variantě modelu, kde byla upravena geometrie modelu a zmíněná prutová konstrukce byla nahrazena vazbami ekvivalentních posuvů. Dále byla tato varianta obohacena o výztuhy na horizontální části potrubí v oblastech sedlových podpěr. Z výsledků analýzy třetího modelu vyztužení bylo zjištěno dostatečné vyztužení spalinového potrubí, které splňuje požadavky kladené normou.

Při srovnání výsledných faktorů návrhové únosnosti uvedených v tabulkách Tab. 5.8 až Tab. 5.11, které graficky znázorňuje Graf. 5-3, lze vyvodit závěr, že výsledná třetí varianta vyztužení je v porovnání s nevyztuženou variantou téměř 2,5 násobně odolnější vůči ztrátě stability.

S dodatečným ohledem na srovnání zátěžných stavů, které jsou definovány kombinací zatížení vyvolaných provozem či klimatem, lze z výsledkových tabulek vyvodit, že největší vliv na ztrátu stability spalinového potrubí má zátěžný stav S4: Zatížení dominantním podtlakem. Toto zatížení je nejvíce pravděpodobné z hlediska výskytu při provozu zařízení.

Dalším zátěžným stavem, který se s velkou pravděpodobností bude vyskytovat při provozu zařízení je S1: Zatížení dominantním větrem. Tento zátěžný stav vykazuje ze všech čtyř stavů nejnižší vliv na ztrátu stability spalinového potrubí.

7 ZÁVĚR

Hlavním cílem této diplomové práce bylo provedení nelineárních analýz ztráty stability spalinového potrubí. Dále bylo nutné navrhnout několik variant pro vyztužení a provést jejich vyhodnocení a srovnání s původní nevyztuženou geometrií.

K dosažení hlavního cíle bylo nutné provést několik zásadních kroků. Prvním krokem byla tvorba zjednodušeného modelu pro MKP analýzy, který věrně popisuje reálnou konstrukci. Tento model byl vytvořen dle poskytnuté výkresové dokumentace v programu ANSYS MAPDL.

Dalším krokem bylo vytvoření automatizovaného zadávání okrajových podmínek pro zátěžné stavy a výpočet modelu. Pro výpočet modelu byly využity celkem čtyři zátěžné stavy kombinující zatížení způsobená provozem a klimatem. Tento krok vyžadoval časovou investici, která byla přínosem pro další výpočty, a zajistil konzistentní okrajové podmínky pro všechny hodnocené situace. Automatizace byla zajištěna sekvencí příkazů v programovacím jazyku ANSYS MAPDL.

Ve třetím kroku byl proveden předběžný výpočet pro stanovení maximálního rozestupu lehkých obvodových výztuh. Výpočet byl proveden pomocí automatizovaného algoritmu založeného na třech fázích výpočtu. Tento algoritmus byl proveden v programovacím jazyku MAPLE.

Čtvrtým krokem bylo nastavení lineárních a nelineárních analýz pro výpočet. Tento krok byl uskutečněn dalšími sekvencemi příkazů v jazyku ANSYS MAPDL, kde tyto příkazy definovaly přesné nastavení materiálových vlastností jako modul pružnosti, hustotu a další. Neopomenutelným bodem tohoto kroku bylo nastavení materiálu pro nelineární části analýz, kdy byl využit bilineární elasticky – plastický materiál se zpevněním v plastické oblasti. V tomto kroku také proběhl přepočet hustoty použitých materiálů na potrubí. Jednalo se o sloučení všech vrstev materiálů (izolace, potrubí, stěrkovací hmota) do jedné vrstvy, vztažené na tloušťku oceli ochuzené o korozní přídavky. Přepočet měl zásadní vliv na zatížení konstrukce vlastní tíhou.

V pátém kroku proběhlo vyhodnocení jednotlivých výsledků analýzy nevyztuženého modelu. V návaznosti na zjištěné výsledky bylo postupně navrženo a vyhodnoceno několik dalších variant modelů s vyztužením. Výsledky z analýz jednotlivých variant byly vyhodnoceny dle [9] a porovnány mezi sebou. Dále byla stanovena vhodná varianta pro vyztužení spalinového potrubí a byl zjištěn zátěžný stav s největším vlivem na ztrátu stability spalinového potrubí.

8 POUŽITÉ ZDROJE

[1] PAVLOK, B. *POTRUBNÍ SYSTÉMY A ARMATURY: Studijní opora část 1* [online]. ostrava, 2011 [cit. 24.1.2016]. Dostupné z: www.338.vsb.cz/PDF/Dil1_Pav.pdf

[2] IPOTRUBÍ. In: *Pevnostní výpočty potrubí* [online]. 2013 [cit. 2016-01-21]. Dostupné z: http://www.ipotrubi.cz/clanky/4.-pevnostni-vypocty-potrubi/

[3] JANÍČEK, P. *Mechanika těles: pružnost a pevnost I*. 3., přeprac. vyd., V Akademickém nakladatelství CERM 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, 287 s. ISBN 80-214-2592-X.

[4] PETRUŠKA, J. *MKP v inženýrských výpočtech* [online]. Brno, 2011 [cit. 21.1.2016]. Dostupné z: http://www.umt.fme.vutbr.cz/img/fckeditor/file/opory/RIV/MKP2011. pdf

[5] *ANSYS Inc. PDF Documentation: Release 15.0* [online]. 2013 [cit. 25.1.2016]. Dostupné z: http://148.204.81.206/Ansys/readme.html

[6] EN 1993-4-2. *Eurocode 3 Design of steel structures: Part 4-2: Tanks*. Brussels: CEN, 2007. Dostupné také z: https://law.resource.org/pub/eu/eurocode/en.1993.4.2.2007.pdf

[7] MICKA, M. ČVUT. *Skořepiny: Teorie Konstrukcí* [online]. Praha, 2013, 38 s. [cit. 25.1.2016]. Dostupné z: http://mech.fd.cvut.cz/members/micka/teorie-konstrukci-bakalari/prednaska-5/TK%20Predn5_skorepiny.pdf

[8] LÉTAL, T. *TechSoft Engineering & SVS FEM: Stabilita v procesním průmyslu*. Brno, 2009. Dostupné také z: http://www.ansys.stuba.sk/Ansys2009/prednasky/PRISPEVKY/VUT_Letal.pdf

[9] EN1993-1-6. *Eurocode 3: Design of steel structures : Part 1-6: Strength and stability of shell structures*. . Brussels: CEN, 2007. Dostupné také z: https://law.resource.org/pub/eu/eurocode/en.1993.1.6.2007.pdf

[10] *KONSTRUKCE: ODBORNÝ ČASOPIS PRO STAVEBNICTVÍ A STROJÍRENSTVÍ*. Ostrava: KONSTRUKCE Media, s.r.o., 2005, (1). ISSN 1803-8433. Dostupné také z: http://www.konstrukce.cz/clanek/zasady-a-pravidla-navrhovani-podle-eurokodu/

[11] EN 1993-3-1. *Eurocode 3: Design of steel structures: Part 3-1: Towers, masts and chimneys – Towers and masts*. . Brussels: CEN, 2004. Dostupné také z: https://law.resource.org/pub/eu/eurocode/en.1993.3.1.2006.pdf

[12] STARÝ, J. Konstrukce: Odborný časopis pro stavebnictví a strojírenství. *Navrhování styčníků ocelových konstrukcí podle EN 1993-1-8* [online]. 2012 [cit. 8.2.2016]. Dostupné z: http://www.konstrukce.cz/clanek/navrhovani-stycniku-ocelovych-konstrukci-podle-en-1993-1-8

[13] *IPotrubí: Pevnostní výpočty potrubí, zatížení potrubí vlastní hmotností* [online]. 2013 [cit. 2016-02-18]. Dostupné z: http://www.ipotrubi.cz/clanky/4.-pevnostni-vypocty-potrubi/3.-zatizeni-potrubi/

[14] IPotrubí: KLIMATICKÁ ZATÍŽENÍ. In: *IPotrubí: KLIMATICKÁ ZATÍŽENÍ* [online]. 2013 [cit. 2016-02-18]. Dostupné z: http://www.ipotrubi.cz/clanky/4.-pevnostni-vypocty-potrubi/3.-zatizeni-potrubi/klimaticka-zatizeni.html

[15] EN 1991-1-4. *Eurocode 1: Actions on structures: Part 1-4: General actions - Wind actions*. Brussels: CEN, 2010. Dostupné také z: https://law.resource.org/pub/eu/eurocode/en.1991.1.4.2005.pdf

[16] GODOY, L.A a G. PORTELA A REVIEW OF WIND-TUNNEL RESULTS OF PRESSURES ON TANK MODELS. . nedatováno, (1), 1-19. Dostupné také z: http://www.efn.unc.edu.ar/investigacion/e-learning/tanques/documentos/pub/oureachreviewwind.pdf

[17] Sníh na střeše: Mapa sněhových oblastí. *Sníh na střeše* [online]. 2006 [cit. 2016-02-19]. Dostupné z: http://www.snihnastrese.cz/mapa-snehovych-oblasti/

[18] IPotrubí: Projektování potrubí, potrubní izolace. *IPOTRUBÍ: Projektování potrubí* [online]. 2013 [cit. 2016-02-20]. Dostupné z: http://www.ipotrubi.cz/clanky/3.-projektovani-potrubi/8.-izolace-a-natery-potrubi/potrubni-izolace.html

[19] VRBKA, M. a M. VAVERKA VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. *Metoda konečných prvků: 1. přednáška – Úvod* [pdf]. Brno, 2007 [cit. 15.2.2016]. Dostupné z: http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/MKP/prednaska1_mkp.pdf

[20] AEROINVENT: Was ist eine FEM-Analyse?. *AEROINVENT: Finite Elemente Berechnungen / FEM Simulationen* [online]. 2015 [cit. 2016-02-15]. Dostupné z: http://www.aeroinvent.de/dienstleistungen/fem_berechnungen.html

[21] PEČENKA, L. *Pevnostní výpočet akumulačního zásobníku na odpad z čistírny odpadních vod*. Brno, 2007. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=6427. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. FRANTIŠEK PROKEŠ.

[22] LÉTAL, T. a Z. JEGLA All for Power: Návrh vyztužení kouřovodů. *All for Power*. 2015, (5), 86-88. ISSN 1802-8535.

[23] FÜRBACHER, I. *Lexikon ocelí: materiálové listy se zahraničními materiály*. 38. Praha: Dashöfer, 2006-2015, ^^^svazků (na volných listech). ISBN 1802-3029.

[24] ROTTER, J.M. a H. SCHMIDT *Buckling of steel shells: European design recommendations*. 5th edition. Brussels: ECCS - European Convention for Constructional Steelwork, 2008, ix, 398 stran. European Convention for Constructional Steelwork. ISBN 92-9417-00092.

[25] ÓLAFSSON, Á. *Structural and Stress Analysis of a High Temperature Geothermal Wellhead*. Reykjavik, Iceland, 2011. Dostupné také z: http://skemman.is/stream/get/1946/10164/25392/1/Structural_and_Stress_Analysis_of_a_High_Temperature_Geothermal_Wellhead.pdf. Master's thesis. Faculty of Industrial Engineering, Mechanical Engineering and Computer Science, University of Iceland.

[26] EN 1993-1-5. *Eurocode 3: Design of steel structures: Part 1-5: General rules - Plated structural elements*. . Brussels: CEN, 2011. Dostupné také z: https://law.resource.org/pub/eu/eurocode/en.1993.1.5.2006.pdf

[27] VAVERKA, M. a M. VRBKA *Výpočtové nadstavby pro CAD*. 1. Brno: -, 2002. Dostupné také z: http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/ZVN/prednaska2_zvn.pdf

[28] EN 1990. *Eurocode Basis of structural design*. . Brussels: CEN, 2002. Dostupné také z: https://law.resource.org/pub/eu/eurocode/en.1990.2002.pdf

[29] FUSEK, M. a R. HALAMA *MKP a MHP: Matematika pro inženýry 21. století* [online]. 1. Ostrava: ., 2011 [cit. 2016-05-14]. ISBN neuvedeno. CZ.1.07/2.2.00/07.0332. Dostupné z: http://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/metoda_konecnych_prvku_a_hranicnich_prvku.pdf

[30] *Fine Civil engineering software: Online nápověda GEO5* [online]. Brno. [cit. 2016-05-14]. Dostupné z: http://www.fine.cz/napoveda/geo5/cs/nastaveni-delky-oblouku-01/

[31] ČSN EN 13445-3. *Netopené tlakové nádoby: Část 3: Konstrukce a výpočet*. . Praha: UNMZ, 2010.

9 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 3-1 Prutová konstrukce....14
Obr. 3-2 Skořepinový prvek [5]....14
Obr. 3-3 Stavy napjatosti [6]....15
Obr. 3-4 Deformace pláště [8]....16
Obr. 3-5 Ovalita válcové skořepiny [9]....17
Obr. 3-6 Změna střednice a tloušťky skořepiny [9]....17
Obr. 3-7 Zvlnění střednice [9]....18
Obr. 3-8 Výztuhy skořepin [9], [6]....18
Obr. 3-9 Příčné průřezy profilů [11]....19
Obr. 3-10 Realizace styčníkových spojů [12]....20
Obr. 3-11 Kombinace směrů zatížení větrem [11]....20
Obr. 3-12 Zatížení ledovou vrstvou [11]....21
Obr. 3-13 Ekvivalentní nahrazení tlakového napětí pro výpočet [6]....23
Obr. 3-14 Obvodové rozložení tlaku větru [15]....23
Obr. 3-15 Bližší rozložení tlaku větru [16]....24
Obr. 3-16 Mapa sněhových oblastí v ČR [17]....24
Obr. 3-17 Princip rozdělení na konečný počet elementů [20]....27
Obr. 3-18 Tvorba modelu MKP [19]....28
Obr. 3-19 Typy sítě MKP [21]....29
Obr. 4-1 Kouřovod odsiřovací linky....31
Obr. 4-2 Zjednodušený liniový MKP model prutových konstrukcí....32
Obr. 4-3 Model sedlové podpěry s výztuhami....33
Obr. 4-4 Zjednodušený model potrubí....33
Obr. 4-5 Popis elementu SHELL281 [5]....34
Obr. 4-6 Popis prvku BEAM 189 [5]....35
Obr. 4-7 Lineární vazba posuvného uložení prstencové podpěry....36
Obr. 5-1 Grafická interpretace metody Newton-Raphson [29]....41
Obr. 5-2 Grafická interpretace Arc-lenght metody [29]....42
Obr. 5-3 Postup vyhodnocení analýz....49
Obr. 5-4 Postup iterací pro stanovení nevyztužené délky Lmax....50
Obr. 5-5 Náhled nevyztužené varianty....51
Obr. 5-6 Detail vyztužení redukce....51
Obr. 5-7 Náhled varianty vyztužení 1....52
Obr. 5-8 Náhled vyztužení varianty 2....53
Obr. 5-9 Náhled varianty vyztužení 3....53
Obr. 5-10 Detail varianty vyztužení 3....54

10 SEZNAM TABULEK

Tab. 3.1 Hustota používaných materiálů potrubí [13] 22
Tab. 3.2 Vlastnosti izolačních materiálů [19] 26
Tab. 5.1. Charakteristika lineárního materiálu 38
Tab. 5.2 Zátěžné stavy modelu 40
Tab. 5.3 Parametry nastavení nelineární analýzy 43
Tab. 5.4 Ukončení dalších nelineárních analýz 44
Tab. 5.5 Vzorové hodnoty napětí 44
Tab. 5.6 Vzorové hodnoty výsledků nelineárních analýz 46
Tab. 5.7 Shrnutí výsledků vzorového vyhodnocení analýz 48
Tab. 5.8 Porovnání výsledků nevyztužené konstrukce 54
Tab. 5.9 Porovnání výsledků varianty vyztužení 1 55
Tab. 5.10 Porovnání výsledků varianty vyztužení 2 55
Tab. 5.11 Porovnání výsledků varianty vyztužení 3 55

11 SEZNAM GRAFŮ

Graf. 5-1 Bilineární charakteristika materiálu 39
Graf. 5-2 Srovnání modelů materiálu 39
Graf. 5-3 Srovnání jednotlivých variant vyztužení 56

12 SEZNAM ROVNIC

(3-1) 17
(3-2) 18
(3-3) 18
(3-4) 18
(3-5) 22
(5-1) 38
(5-2) 41
(5-3) 42
(5-4) 45
(5-5) 45
(5-6) 45
(5-7) 45
(5-8) 45
(5-9) 45
(5-10) 45
(5-11) 45
(5-12) 45
(5-13) 45
(5-14) 46
(5-15) 46
(5-16) 46
(5-17) 46
(5-18) 46
(5-19) 46
(5-20) 47
(5-21) 47
(5-22) 47
(5-23) 47
(5-24) 47
(5-25) 47
(5-26) 47
(5-27) 47
(5-28) 47
(5-29) 48
(5-30) 48
(5-31) 48
(5-32) 48
(5-33) 48
(5-34) 48
(5-35) 48
(5-36) 48
(5-37) 48
(5-38) 48
(5-39) 48
(5-40) 48

13 SEZNAM PŘÍLOH

A- PŘÍLOHA GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ VÝSLEDKŮ 67
A1. Nevyztužená varianta potrubí 67
A1.1. Nevyztužená varianta potrubí výsledky GMNA.....67
A1.2. Nevyztužená varianta potrubí výsledky GMNIA 71
A2. Vyztužení potrubí – varianta 3.....76
A2.1. Vyztužení potrubí varianta 3 – výsledky GMNA 76
A2.2. Vyztužení potrubí varianta 3, výsledky GMNIA 82
B- PŘÍLOHA TABULKOVÉ VÝSLEDKY ANALÝZ.....88
B1. Výsledky analýz nevyztuženého modelu 89
B2. Výsledky analýz návrhu vyztužení – varianta 1 93
B3. Výsledky analýz návrhu vyztužení – varianta 2 97
B4. Výsledky analýz návrhu vyztužení – varianta 3 101
C- PŘÍLOHA MKP MODELY ..... DISK DVD

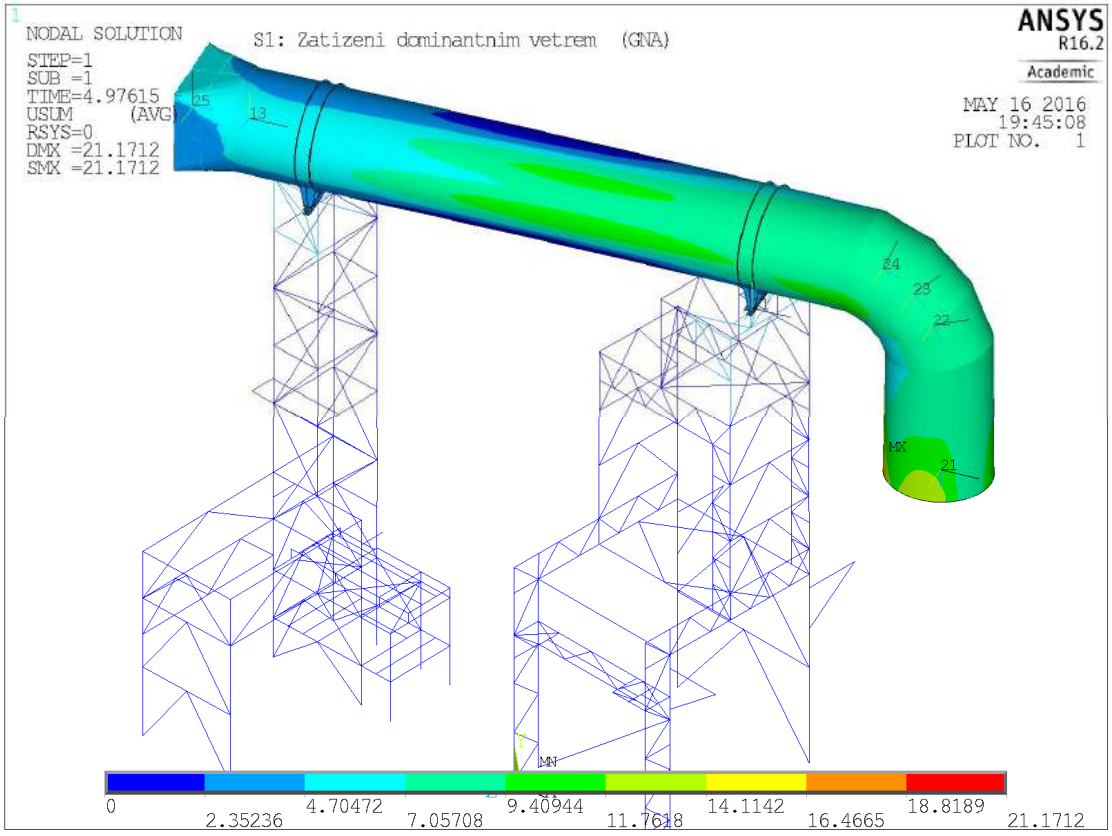
A- PŘÍLOHA GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ VÝSLEDKŮ

Následující přílohy uvádějí grafické znázornění výsledků z nelineárních analýz pro nevyztuženou variantu modelu (Varianta 0) a variantu vyztužení č.3. Snímky zahrnují rozdíly mezi jednotlivými zátěžnými stavy a rozdíly mezi GMNA a GMNIA analýzami. Grafické výsledky v jednotlivých stavech znázorňují deformaci, intenzitu napětí a velikost plastického přetvoření u jednotlivých modelů.

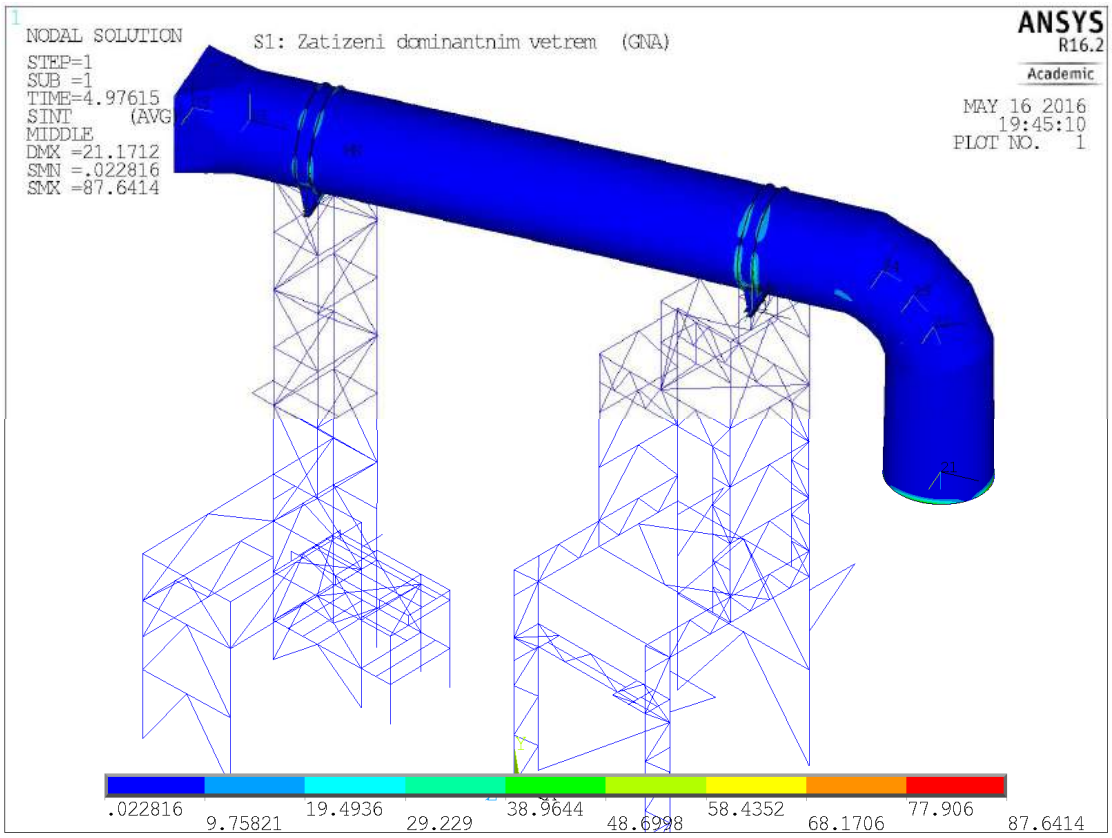
Hodnoty uváděné v grafických výsledcích pro intenzitu napějí jsou uváděny v jednotkách MPa. Pro grafická vyjádření velikosti deformací jsou uváděna v mm. Na veškerých obrázcích je vykreslovaná **deformace 10 zvětšená**.

A1. Nevyztužená varianta potrubí

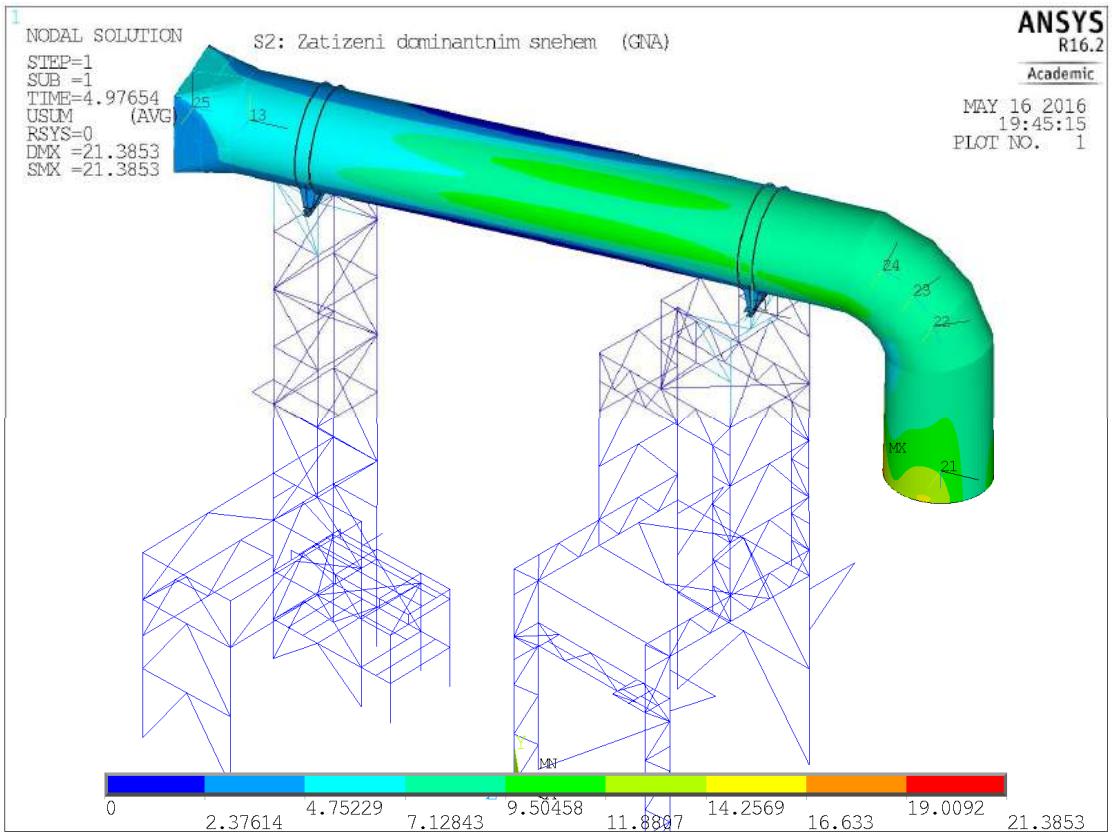
A1.1. Nevyztužená varianta potrubí – výsledky GMNA



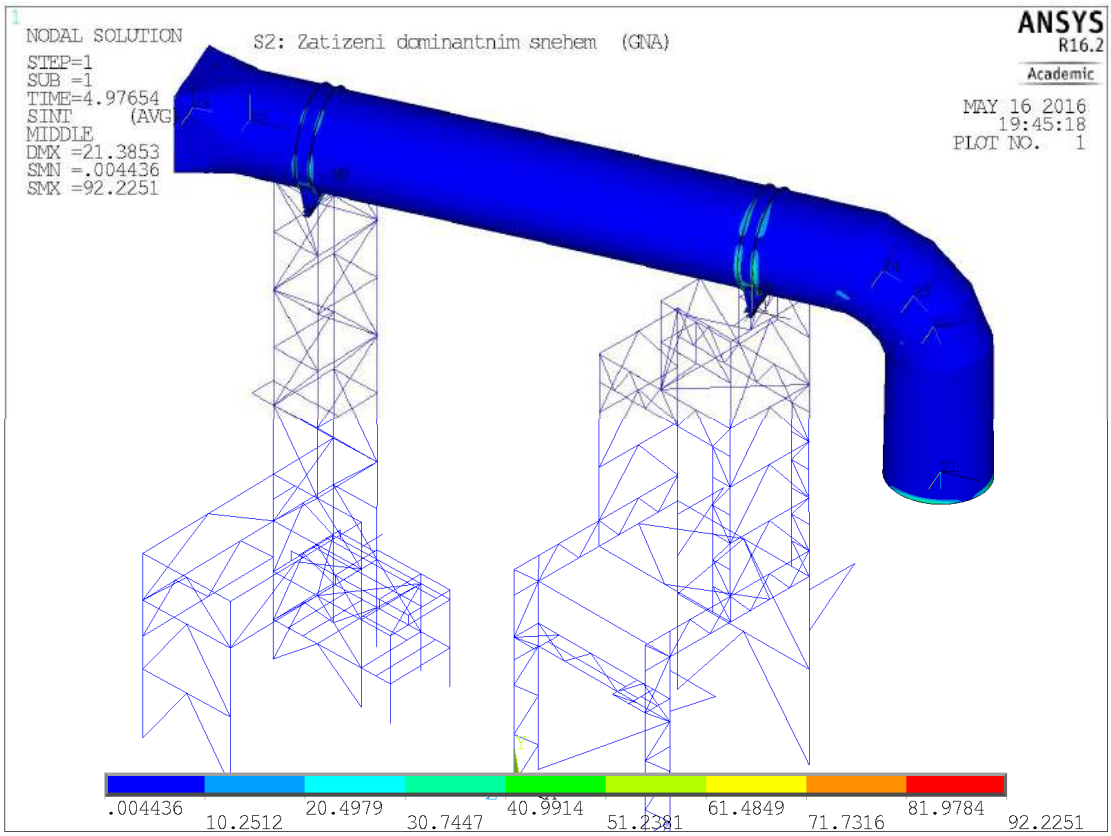
Obr. A-1Varianta 0, stav 1, GMNA, deformace v [mm] 10x zvětšená deformace



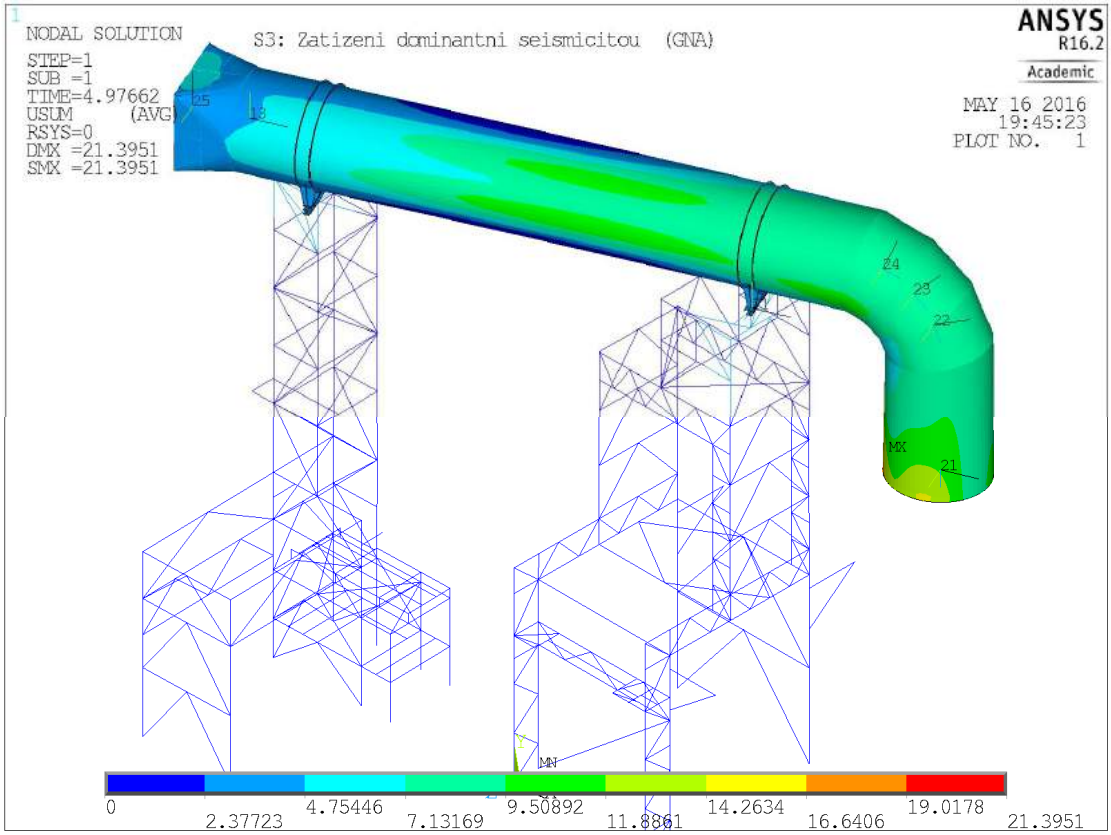
Obr. A-2 Varianta 0, stav 1, GMNA, intenzita napětí v [MPa] 10x zvětšená deformace



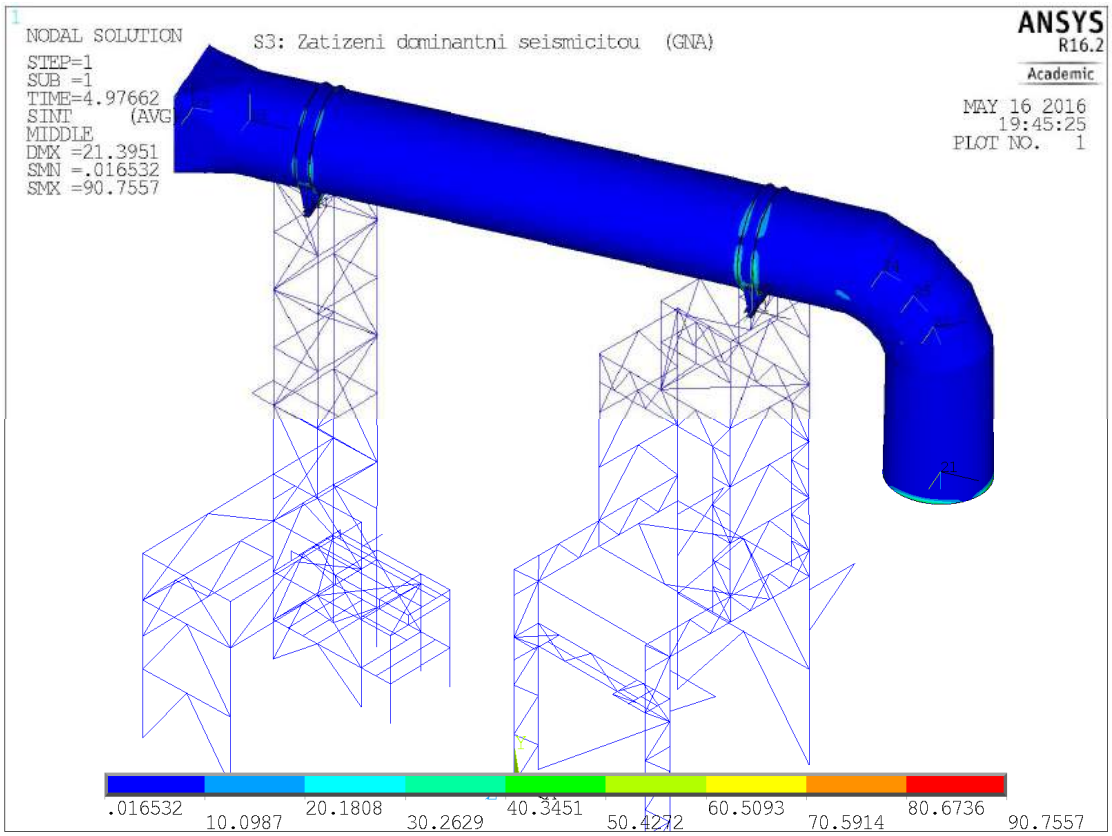
Obr. A-3 Varianta 0, stav 2, GMNA, deformace v [mm] 10x zvětšená deformace



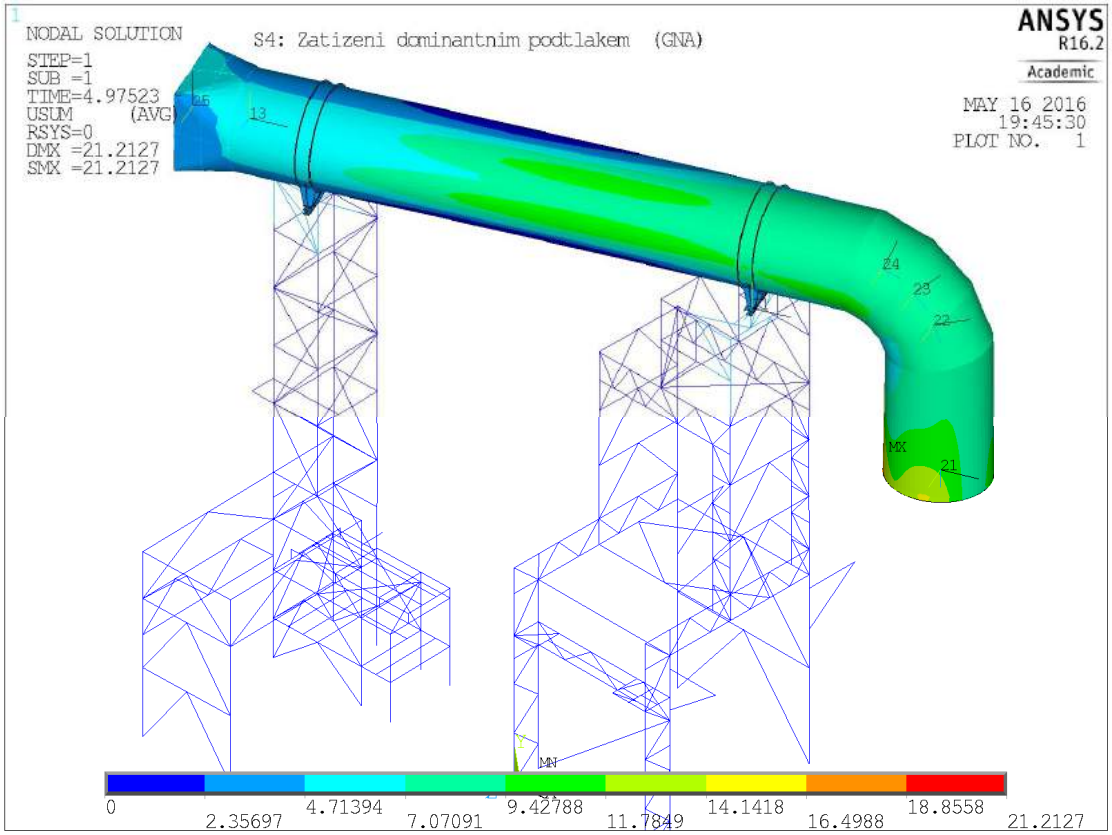
Obr. A-4 Varianta 0, stav 2, GMNA, intenzita napětí v [MPa] 10x zvětšená deformace



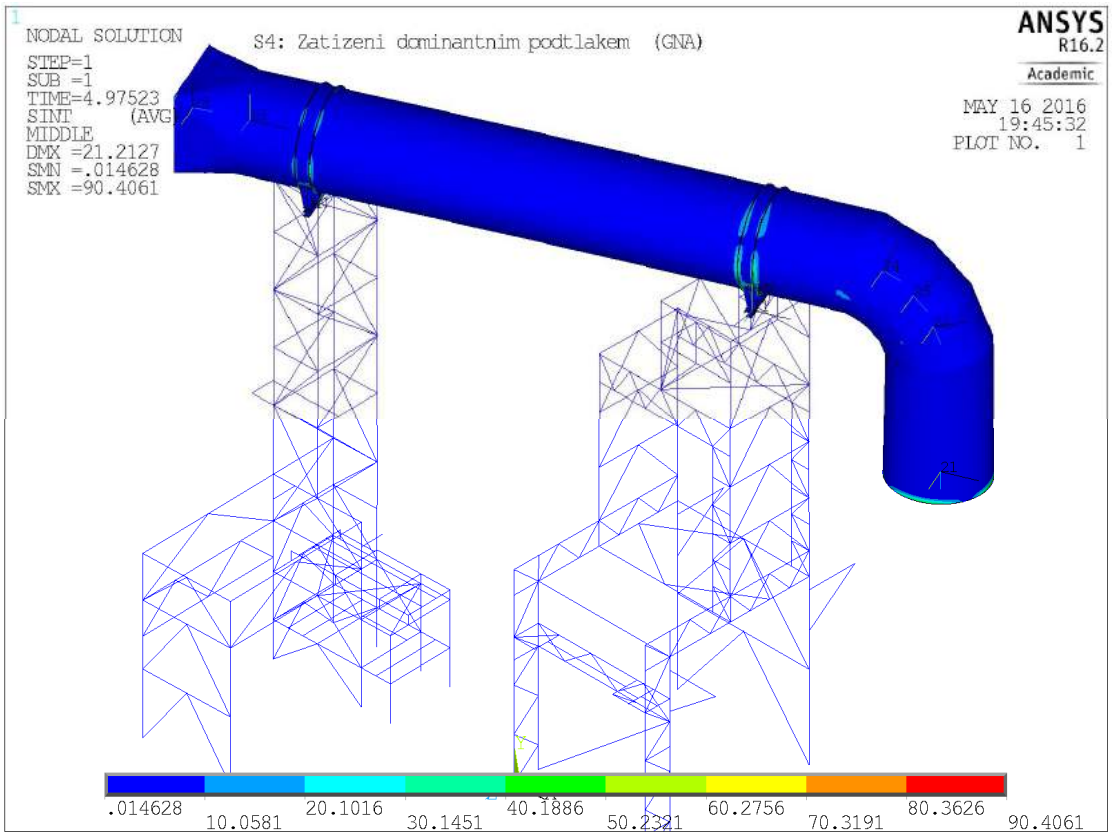
Obr. A-5 Varianta 0, stav 3, GMNA, deformace v [mm] 10x zvětšená deformace



Obr. A-6 Varianta 0, stav 3, GMNA, intenzita napětí v [MPa] 10x zvětšená deformace

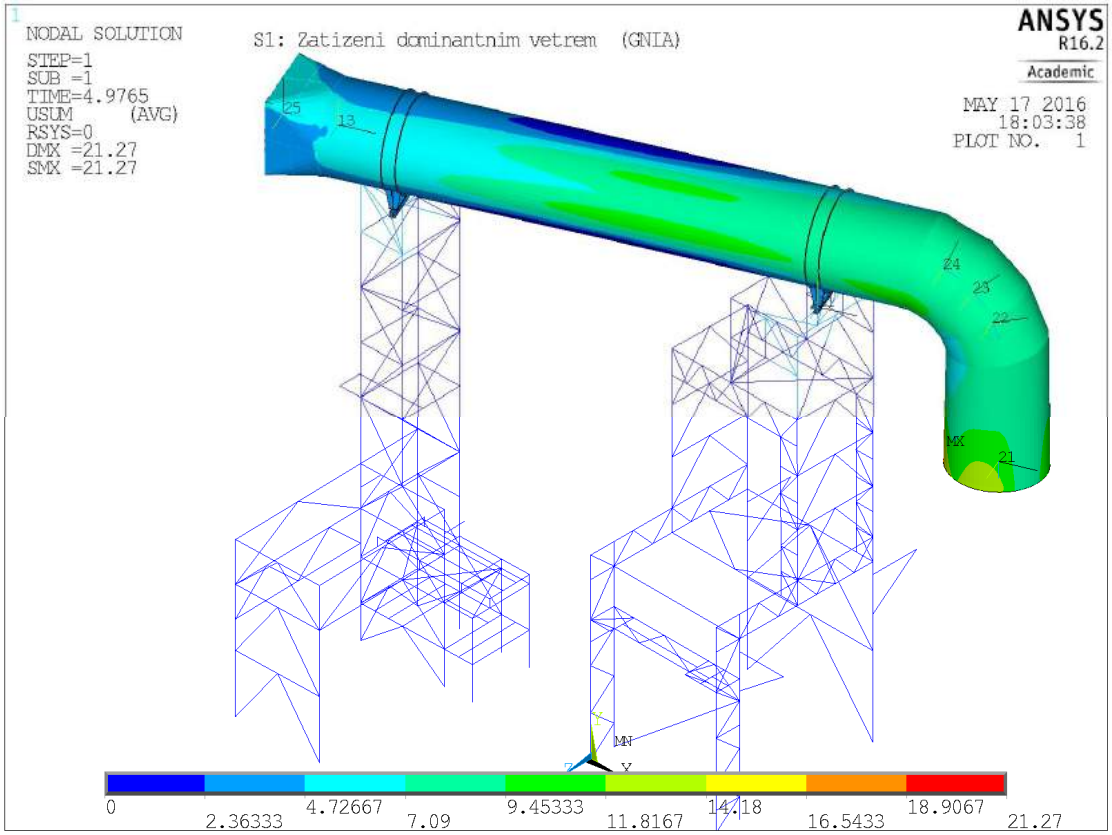


Obr. A-7 Varianta 0, stav 4, GMNA, deformace v [mm] 10x zvětšená deformace

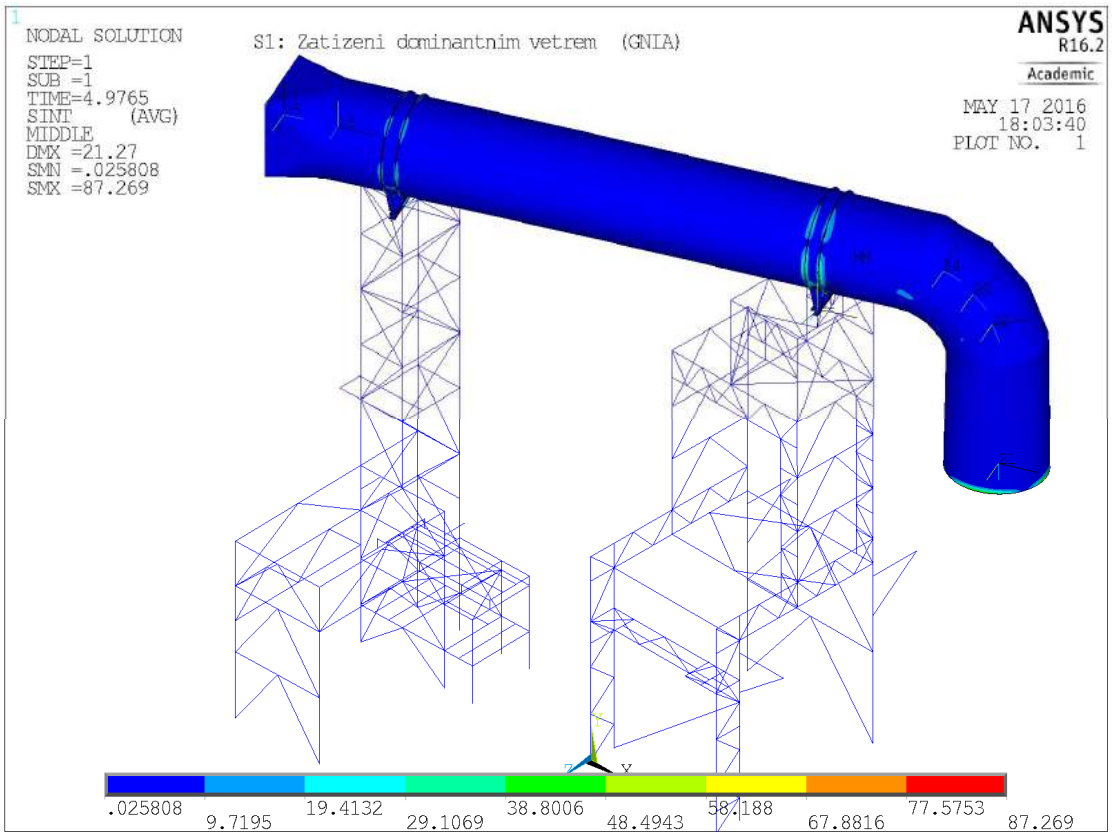


Obr. A-8 Varianta 0, stav 4, GMNA, intenzita napětí v [MPa] 10x zvětšená deformace

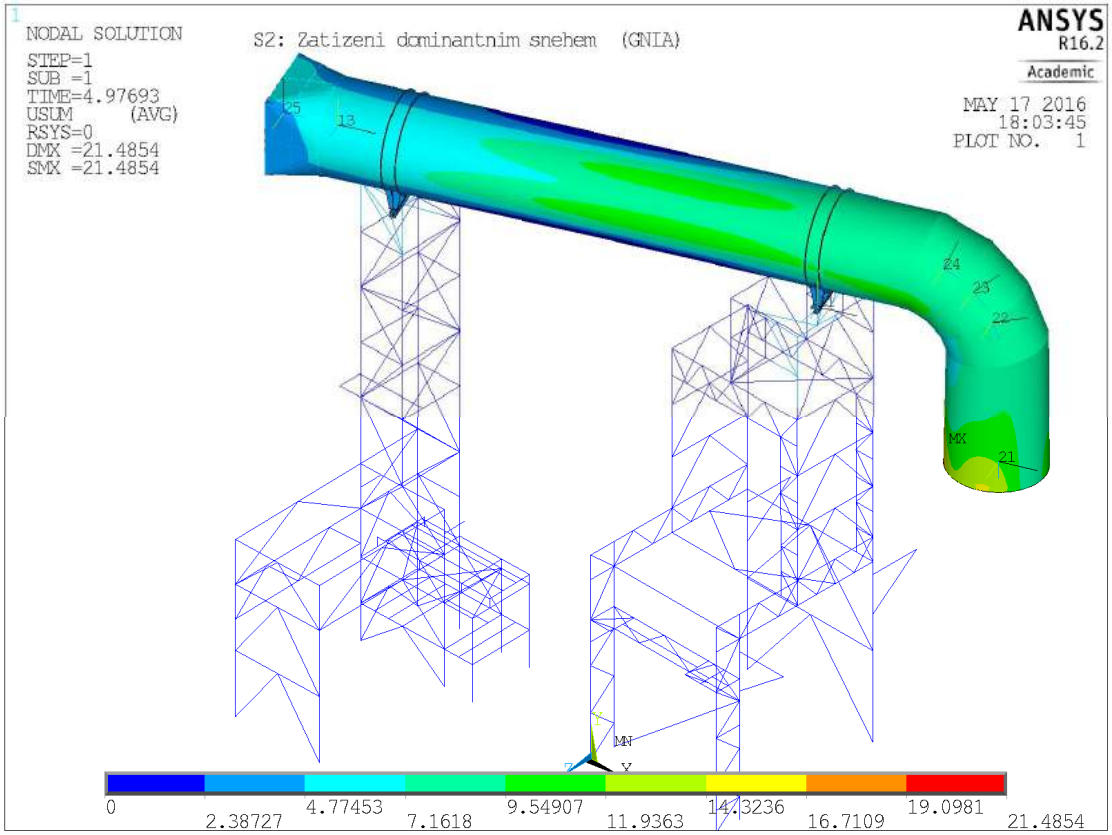
A1.2. Nevyztužená varianta potrubí – výsledky GMNIA



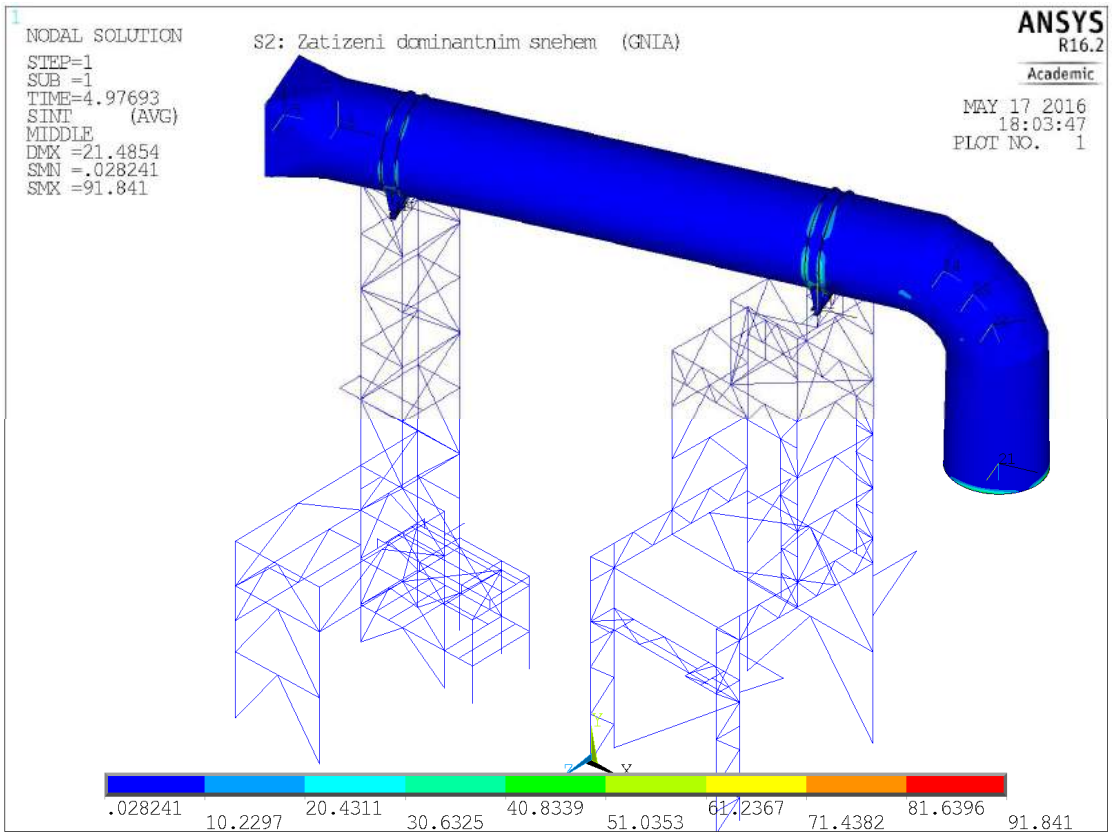
Obr. A-9 Varianta 0, stav 1, GMNIA, deformace v [mm] 10x zvětšená deformace



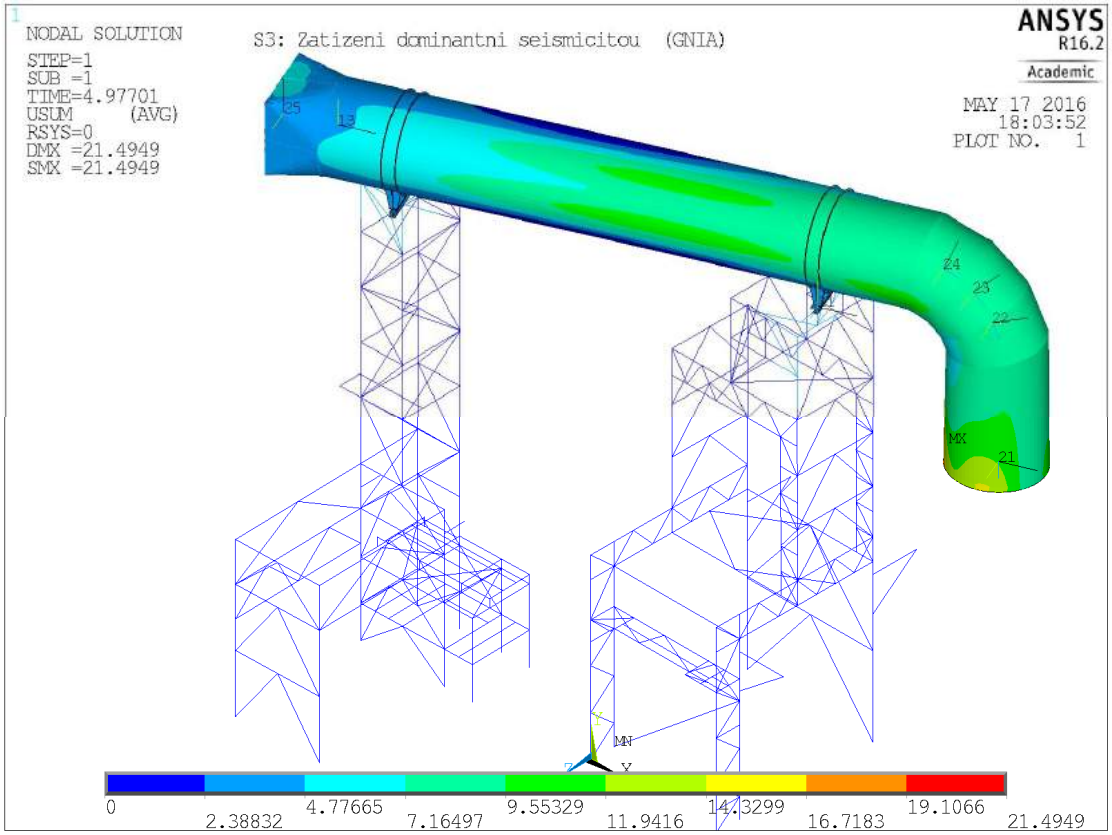
Obr. A-10 Varianta 0, stav 1, GMNIA, intenzita napětí v [MPa] 10x zvětšená deformace



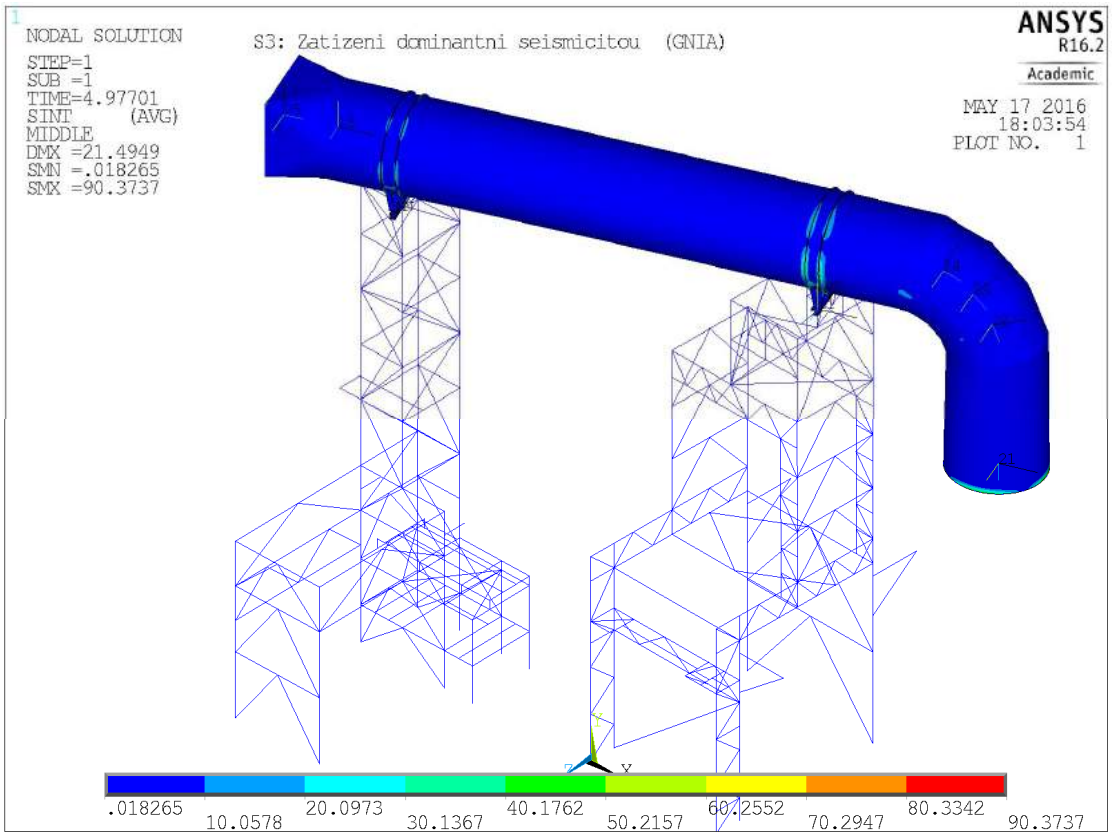
Obr. A-11 Varianta 0, stav 2, GMNIA, deformace v [mm] 10x zvětšená deformace



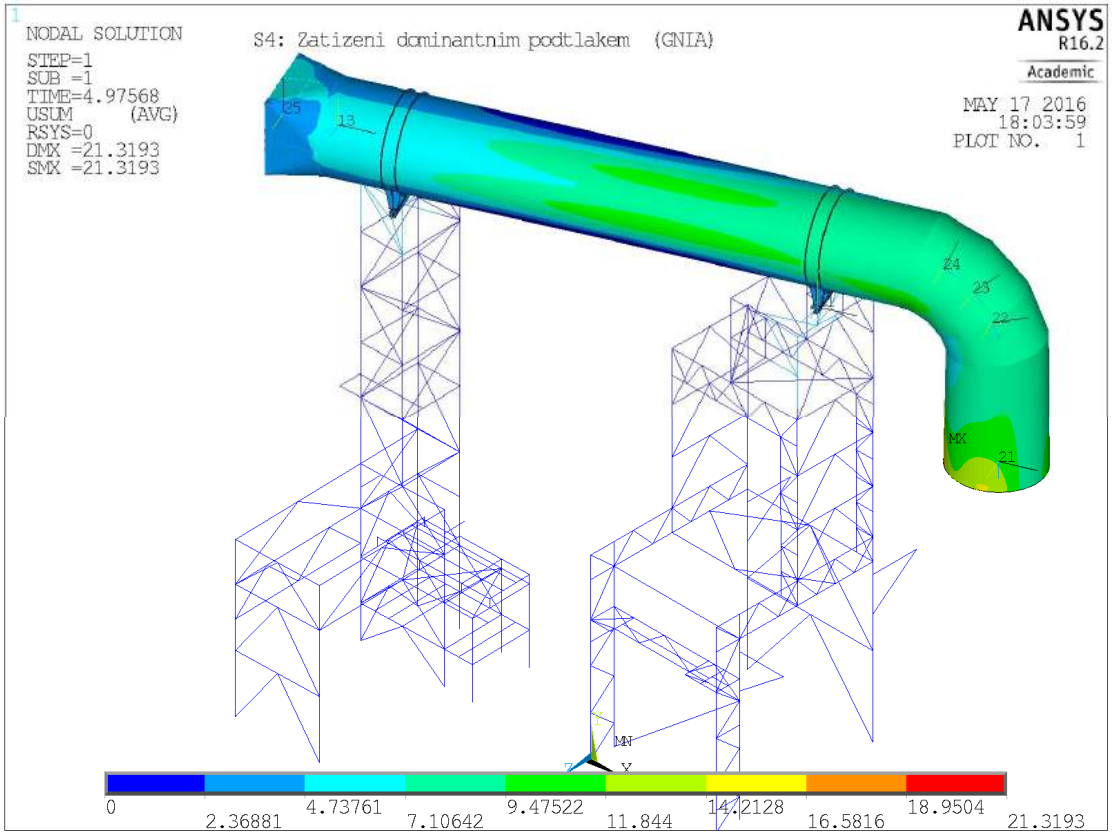
Obr. A-12 Varianta 0, stav 2, GMNIA, intenzita napětí v [MPa] 10x zvětšená deformace



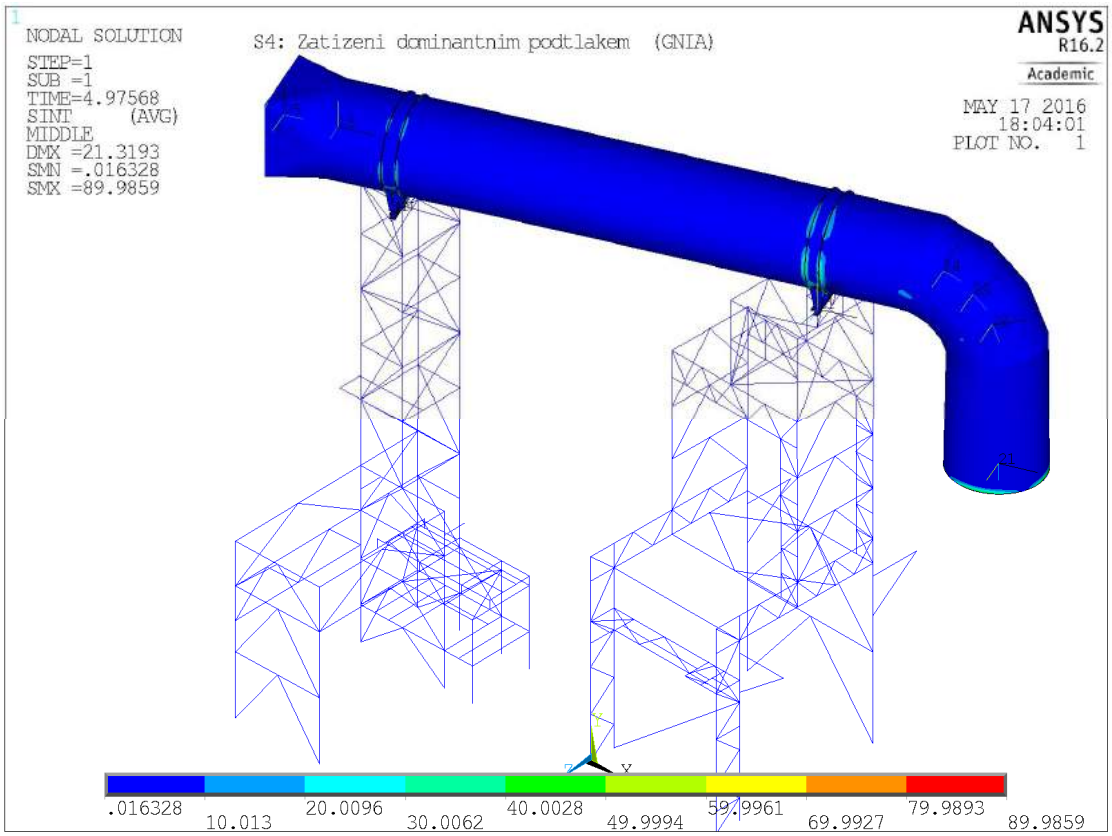
Obr. A-13 Varianta 0, stav 3, GMNIA, deformace v [mm] 10x zvětšená deformace



Obr. A-14 Varianta 0, stav 3, GMNIA, intenzita napětí v [MPa] 10x zvětšená deformace



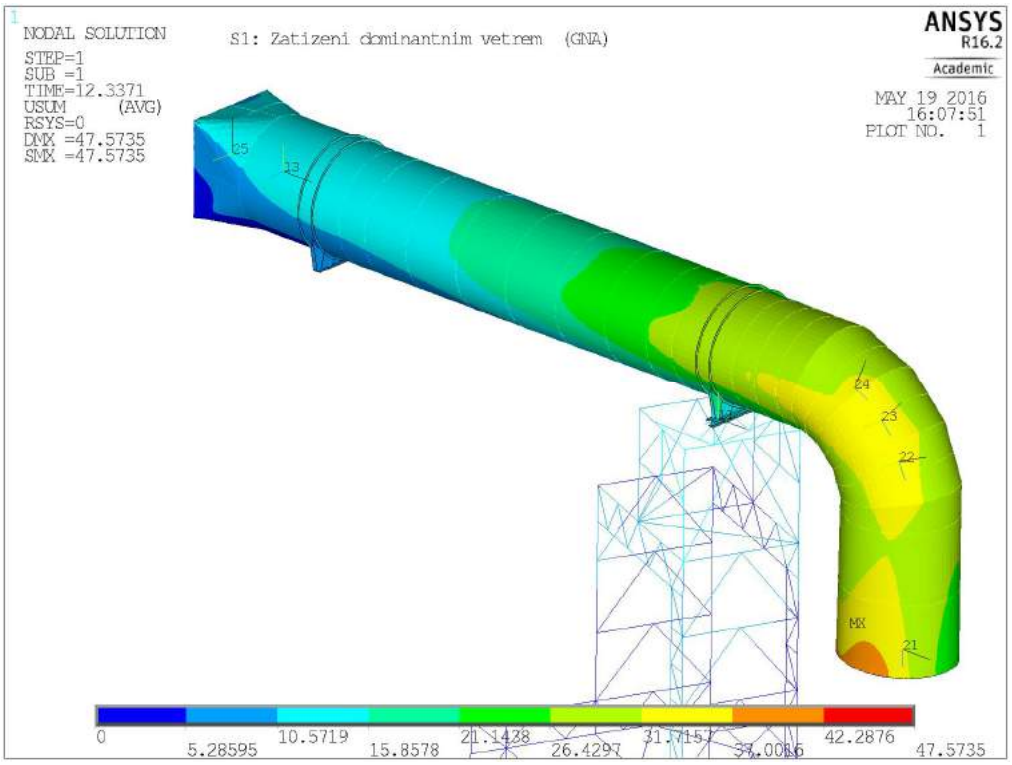
Obr. A-15 Varianta 0, stav 4, GMNIA, deformace v [mm] 10x zvětšená deformace



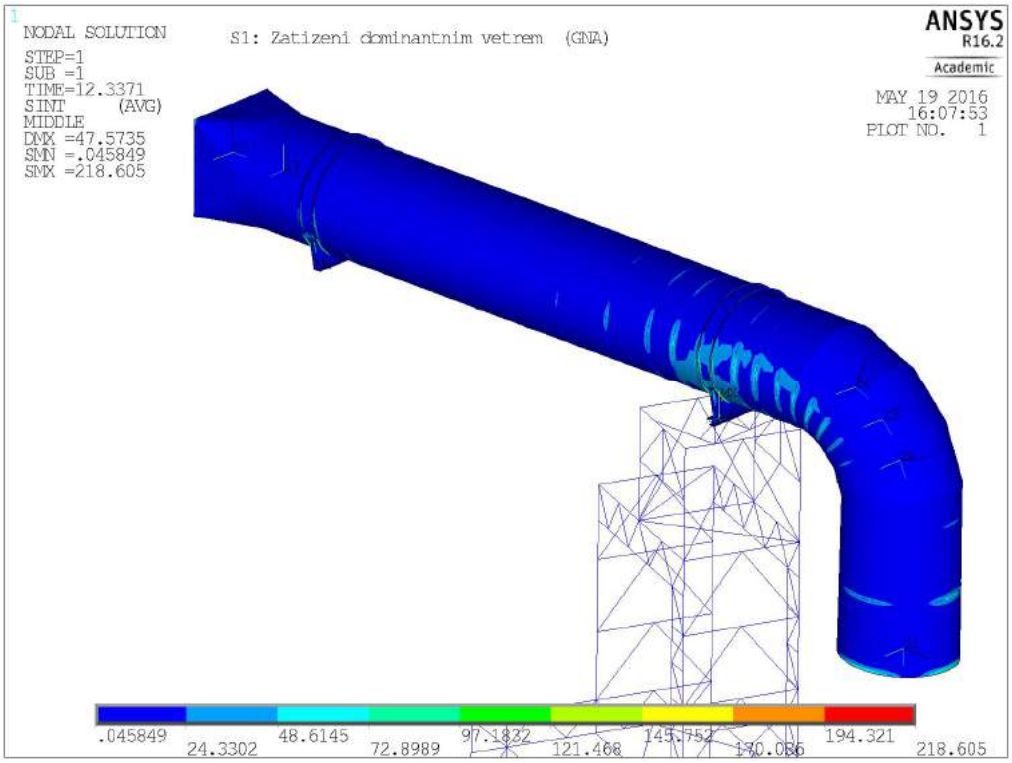
Obr. A-16 Varianta 0, stav 4, GMNIA, intenzita napětí v [MPa] 10x zvětšená deformace

A2. Vyztužení potrubí – varianta 3

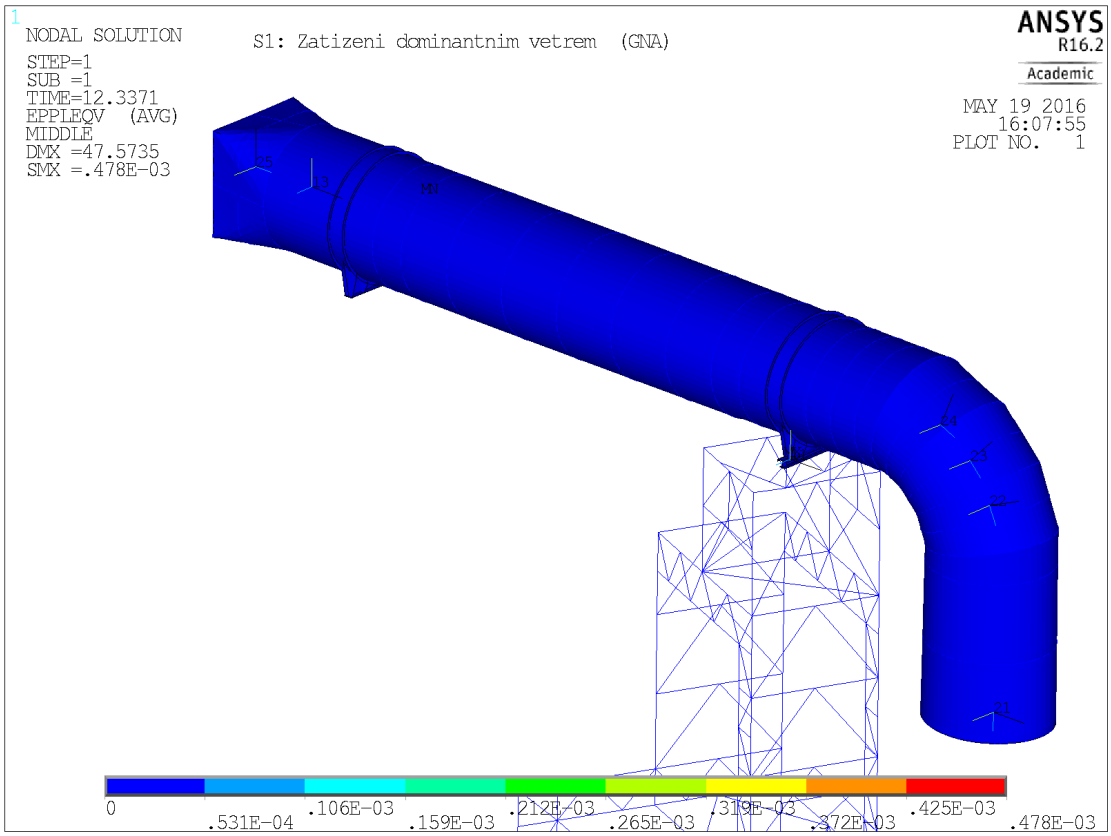
A2.1. Vyztužení potrubí varianta 3 – výsledky GMNA



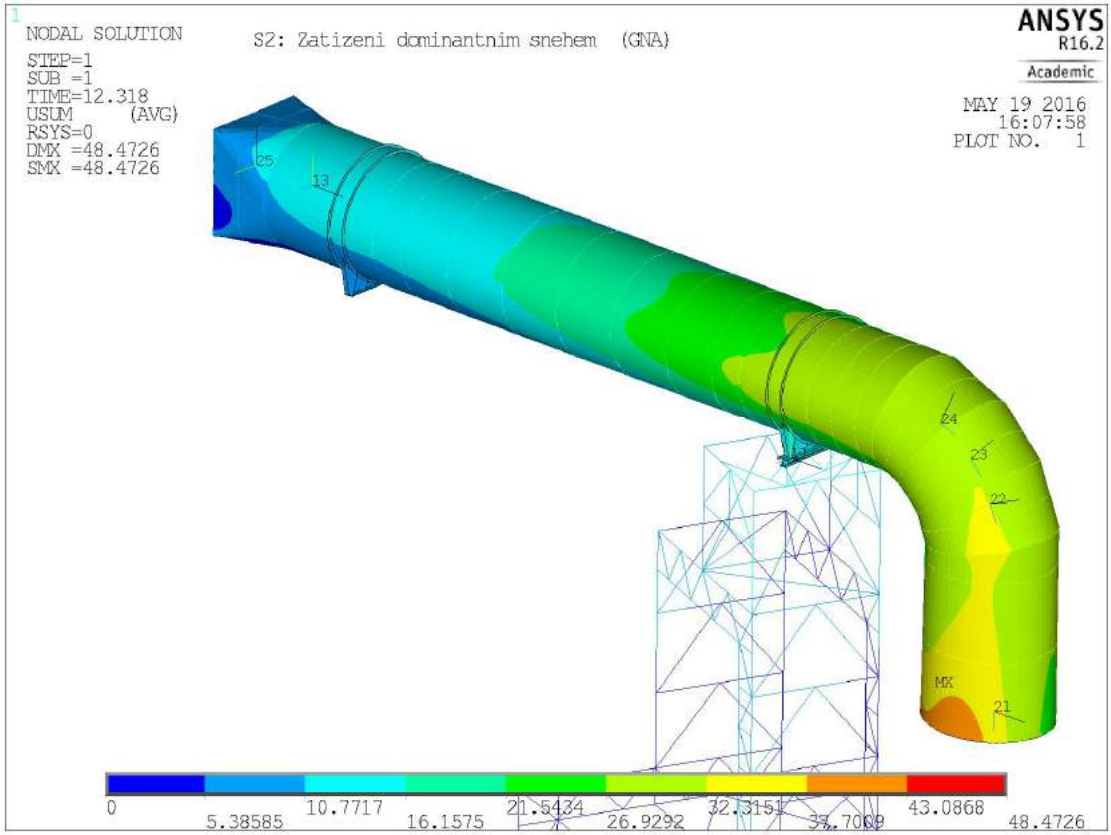
Obr. A-17 Varianta 3, stav 1, GMNA, deformace v [mm] 10x zvětšená deformace



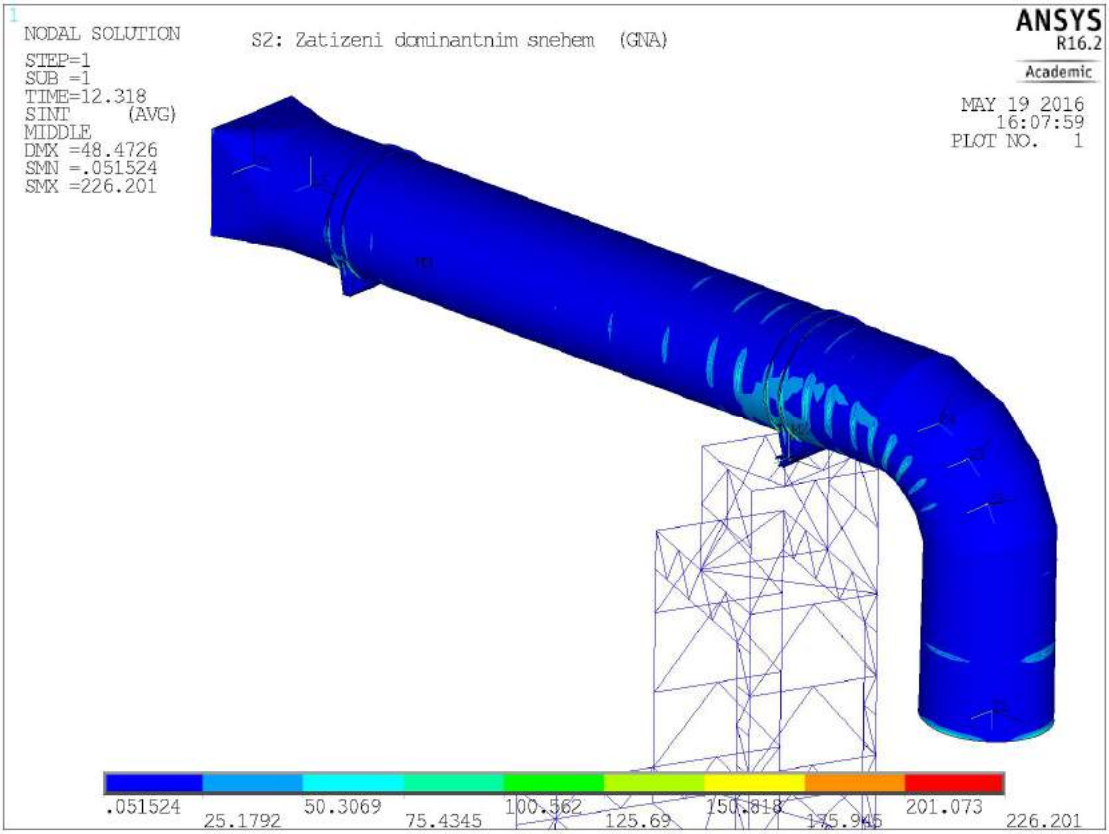
Obr. A-18 Varianta 3, stav 1, GMNA, intenzita napětí v [MPa] 10x zvětšená deformace



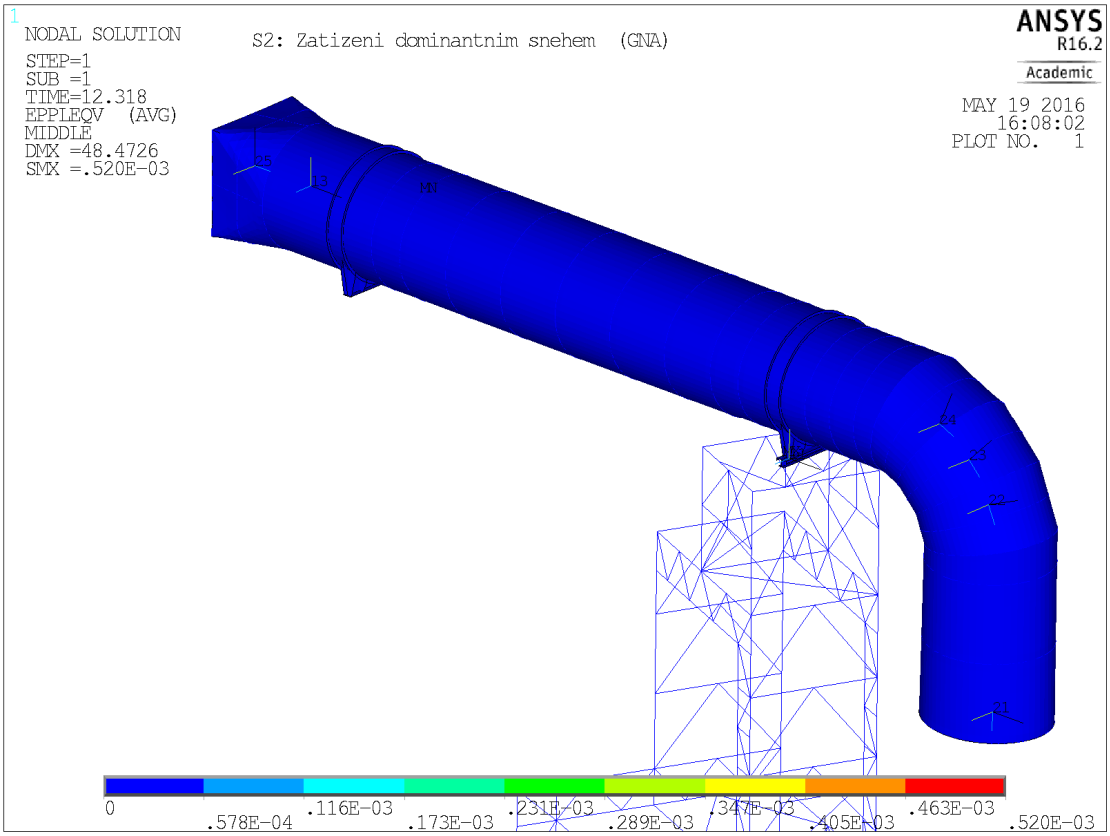
Obr. A-19 Varianta 3, stav 1, GMNA, plastické přetvoření v [-] 10x zvětšená deformace



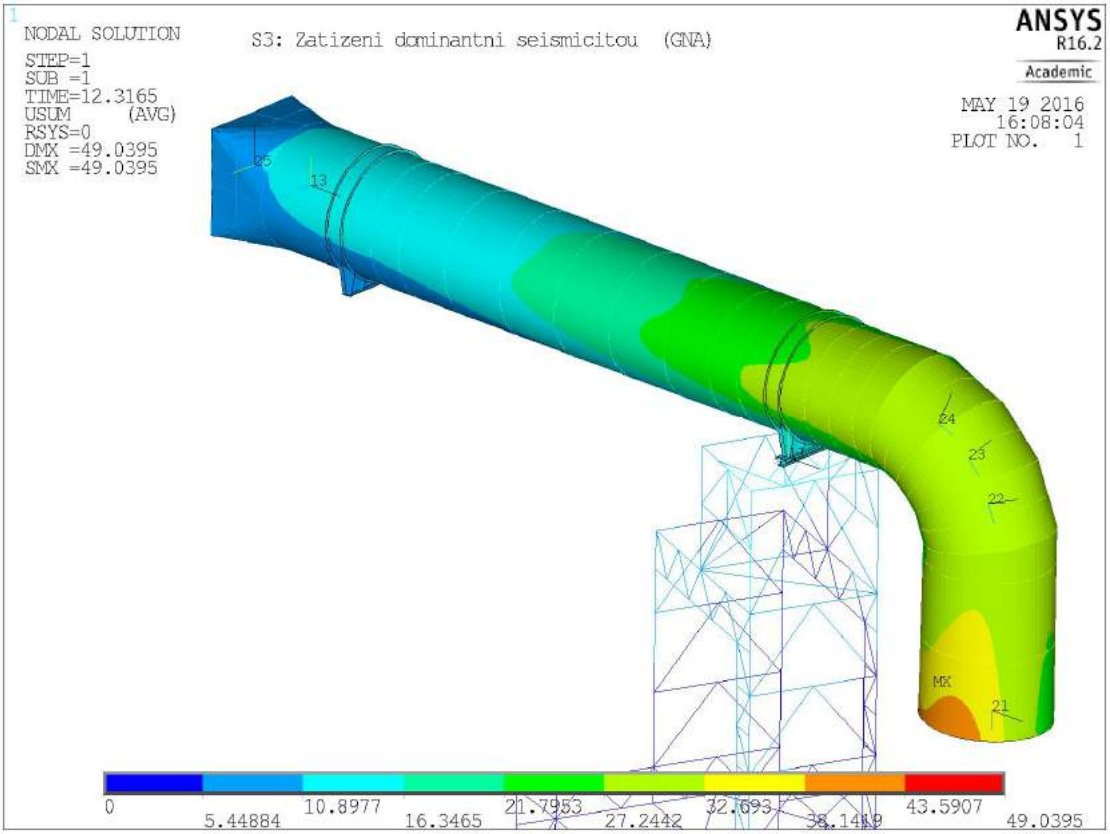
Obr. A-20 Varianta 3, stav 2, GMNA, deformace v [mm] 10x zvětšená deformace



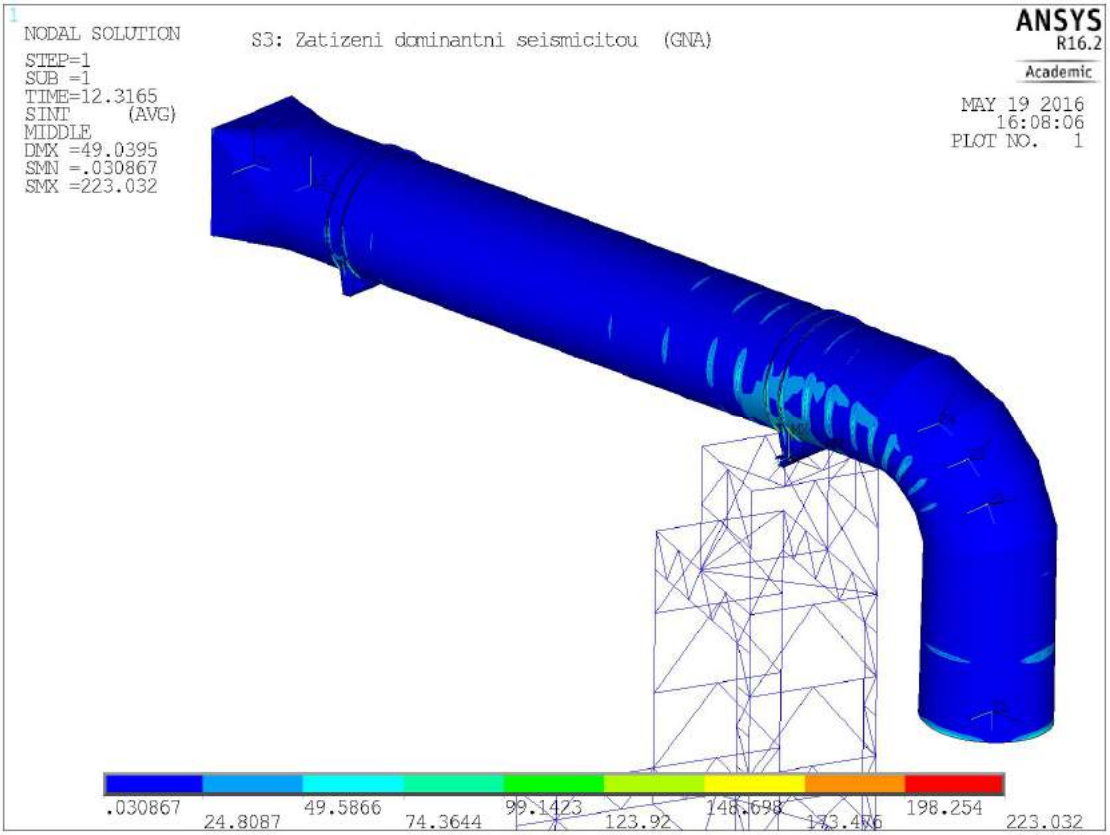
Obr. A-21 Varianta 3, stav 2, GMNA, intenzita napětí v [MPa] 10x zvětšená deformace



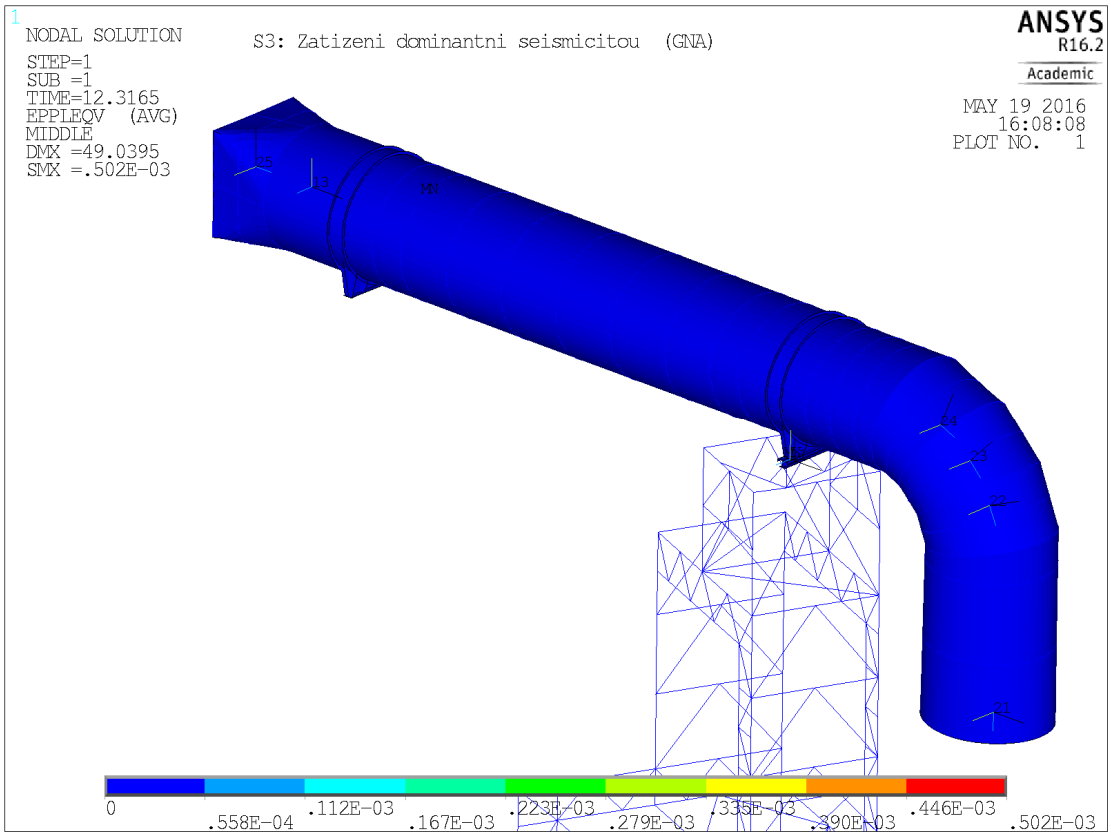
Obr. A-22 Varianta 3, stav 2, GMNA, plastické přetvoření v [-] 10x zvětšená deformace



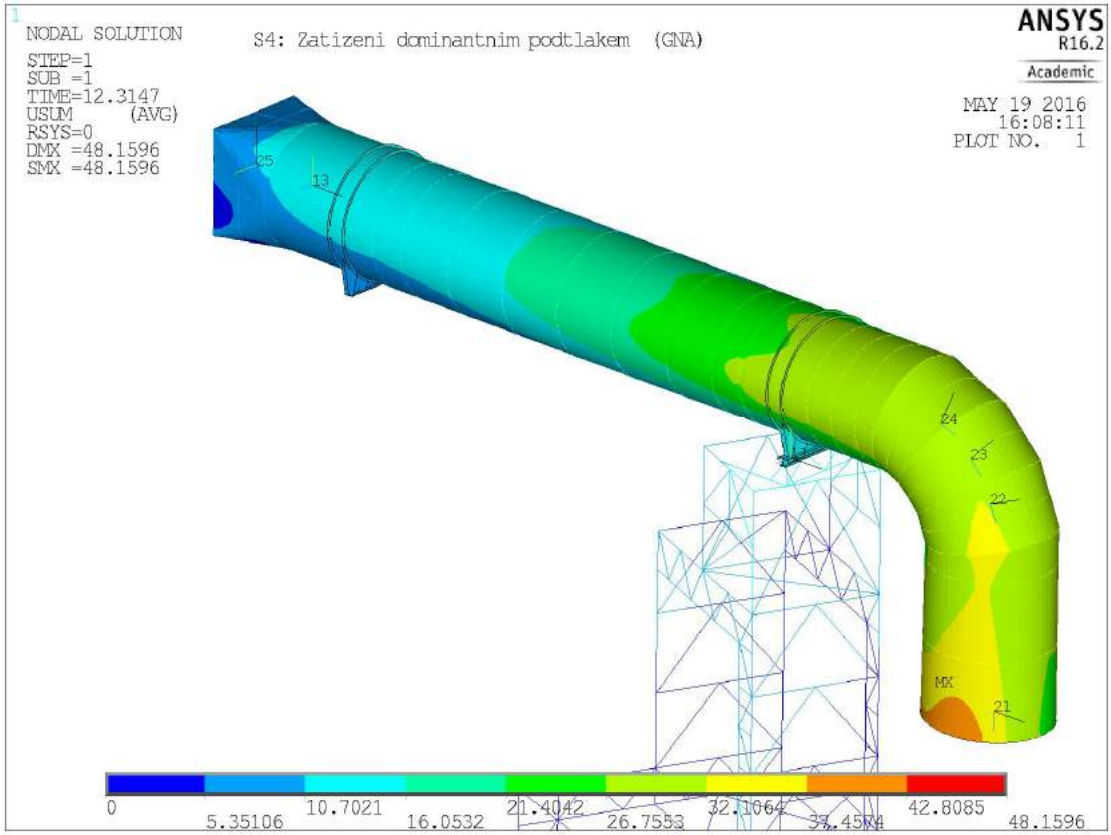
Obr. A-23 Varianta 3, stav 3, GMNA, deformace v [mm] 10x zvětšená deformace



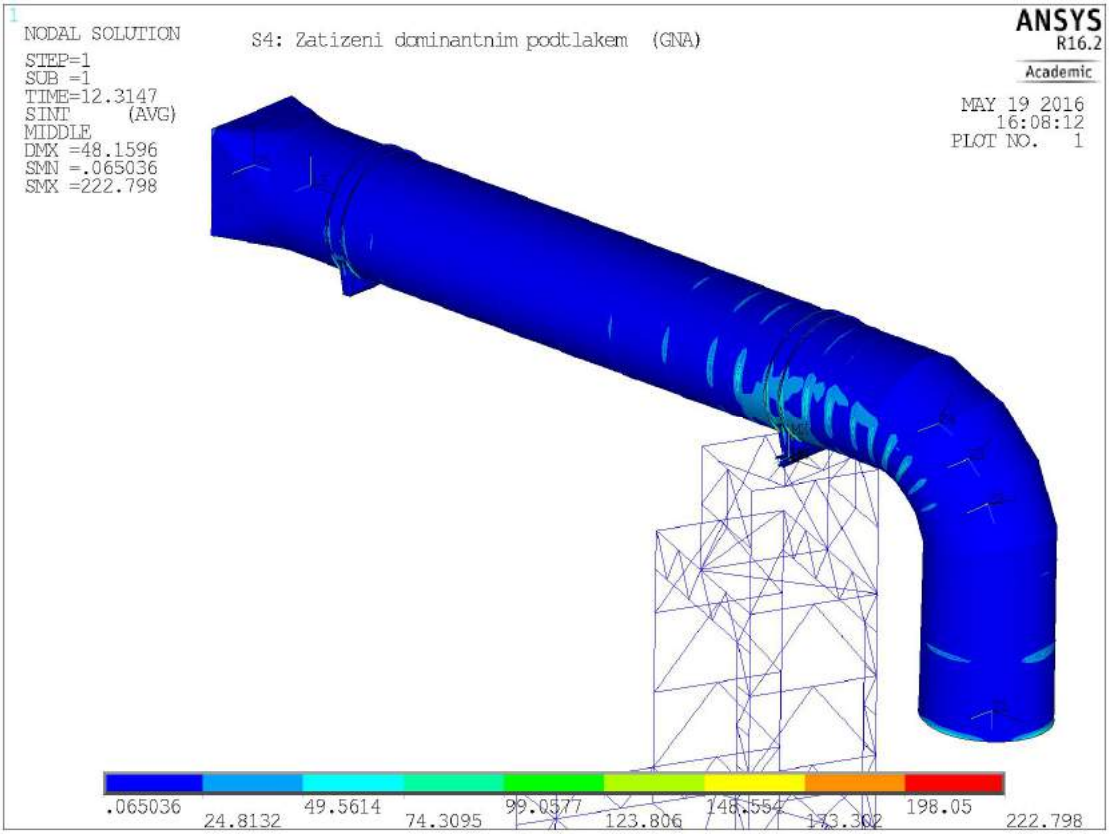
Obr. A-24 Varianta 3, stav 3, GMNA, intenzita napětí v [MPa] 10x zvětšená deformace



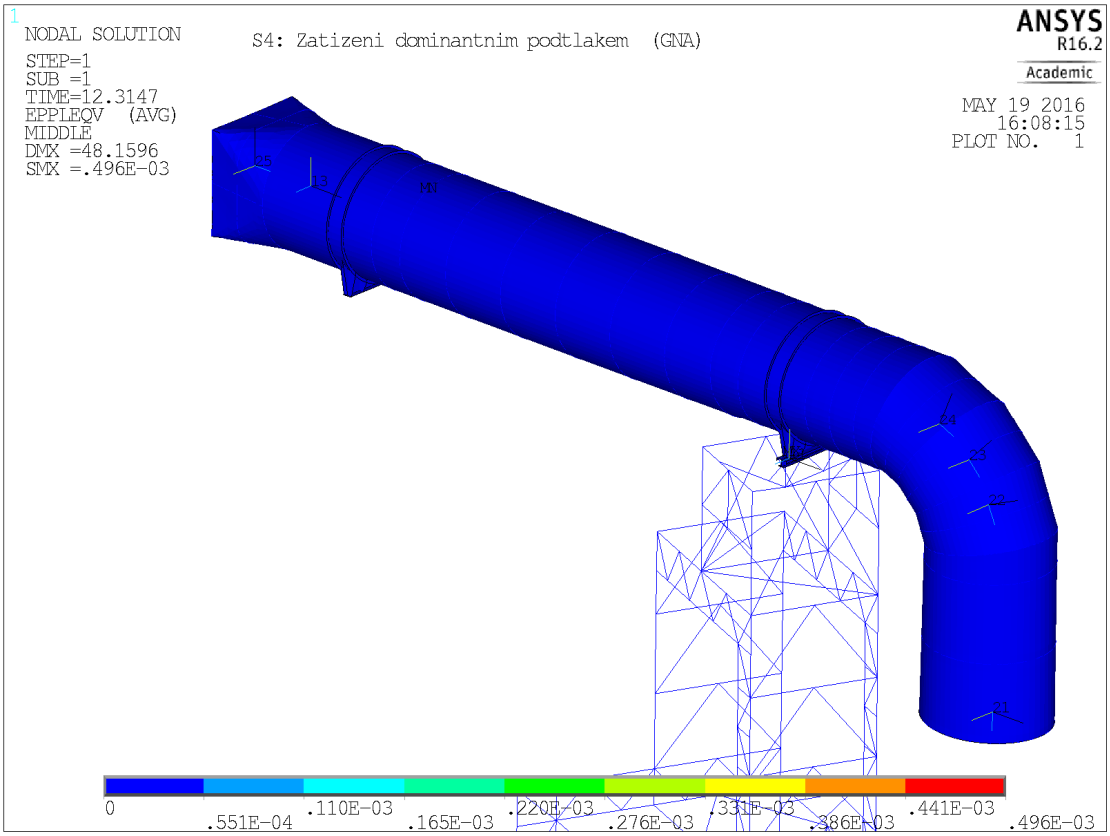
Obr. A-25 Varianta 3, stav 3, GMNA, plastické přetvoření v [-] 10x zvětšená deformace



Obr. A-26 Varianta 3, stav 4, GMNA, deformace v [mm] 10x zvětšená deformace

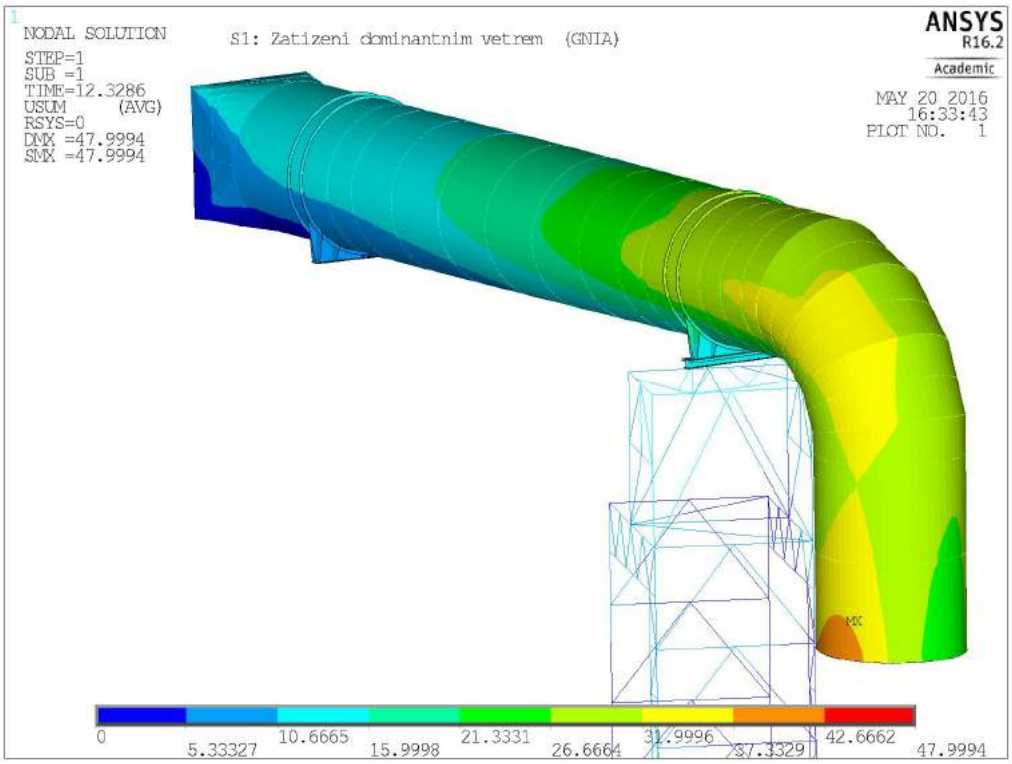


Obr. A-27 Varianta 3, stav 4, GMNA, intenzita napětí v [MPa] 10x zvětšená deformace

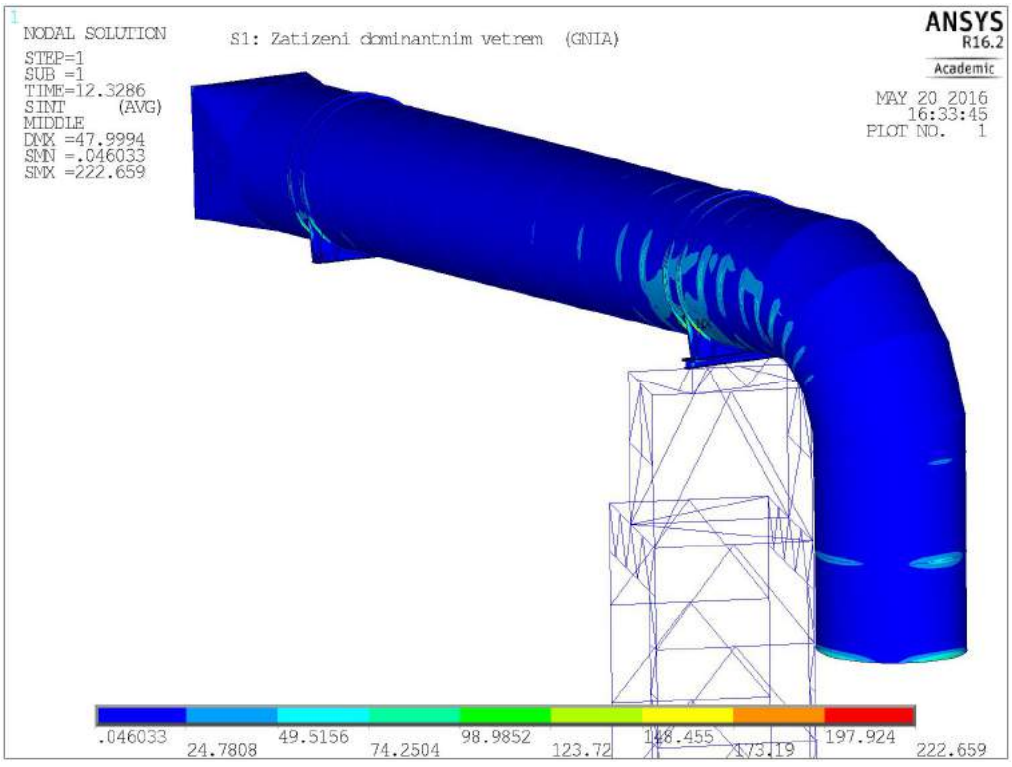


Obr. A-28 Varianta 3, stav 4, GMNA, plastické přetvoření v [-] 10x zvětšená deformace

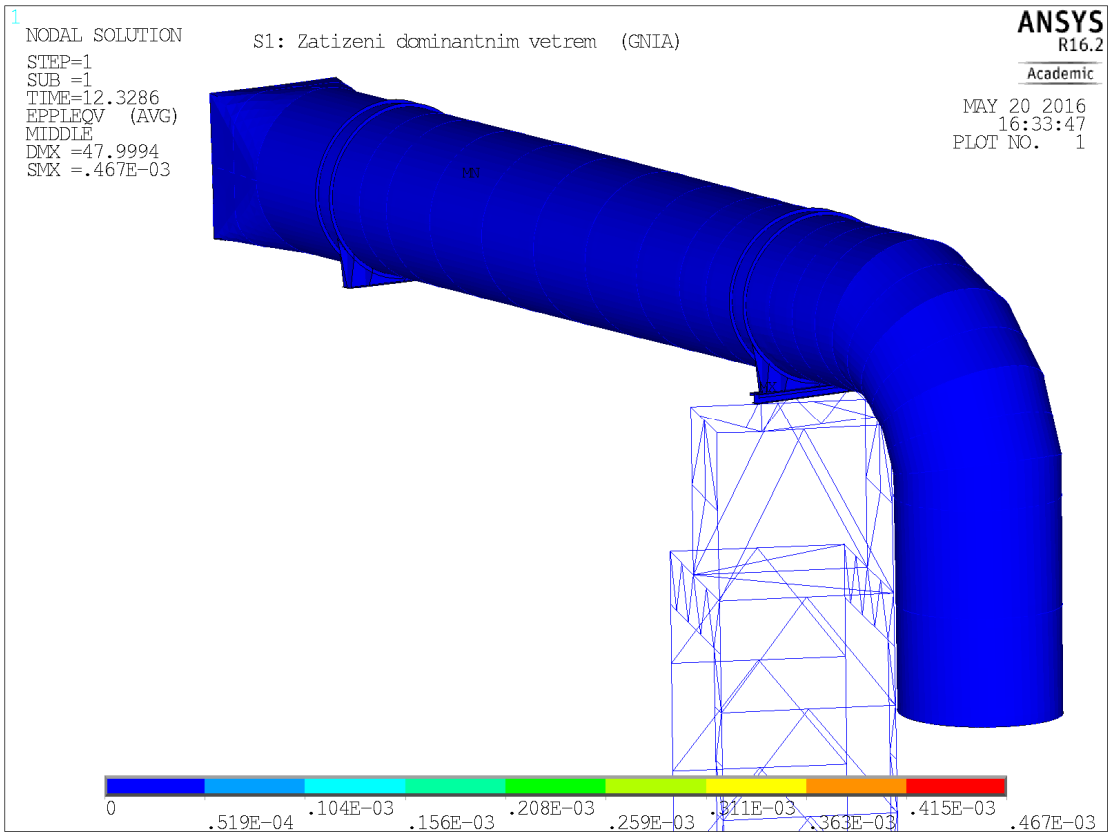
A2.2. Vyztužení potrubí varianta 3 – výsledky GMNIA



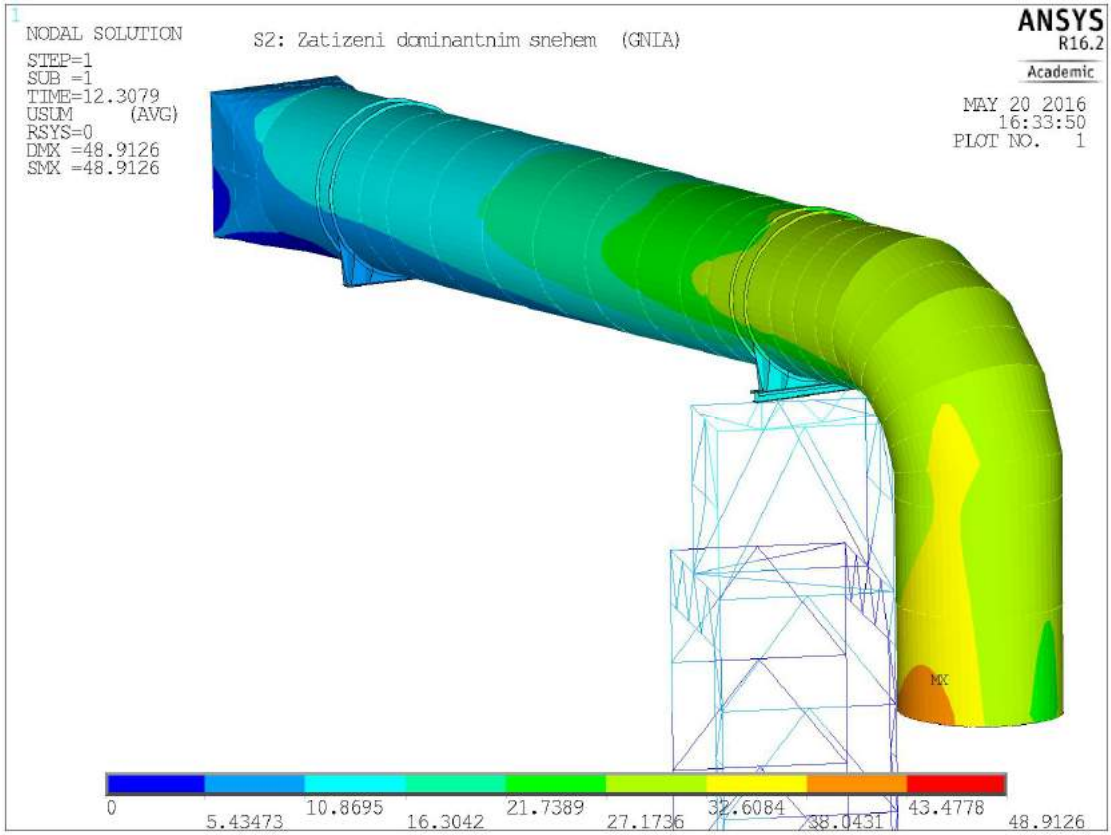
Obr. A-29 Varianta 3, stav 1, GMNIA, deformace v [mm] 10x zvětšená deformace



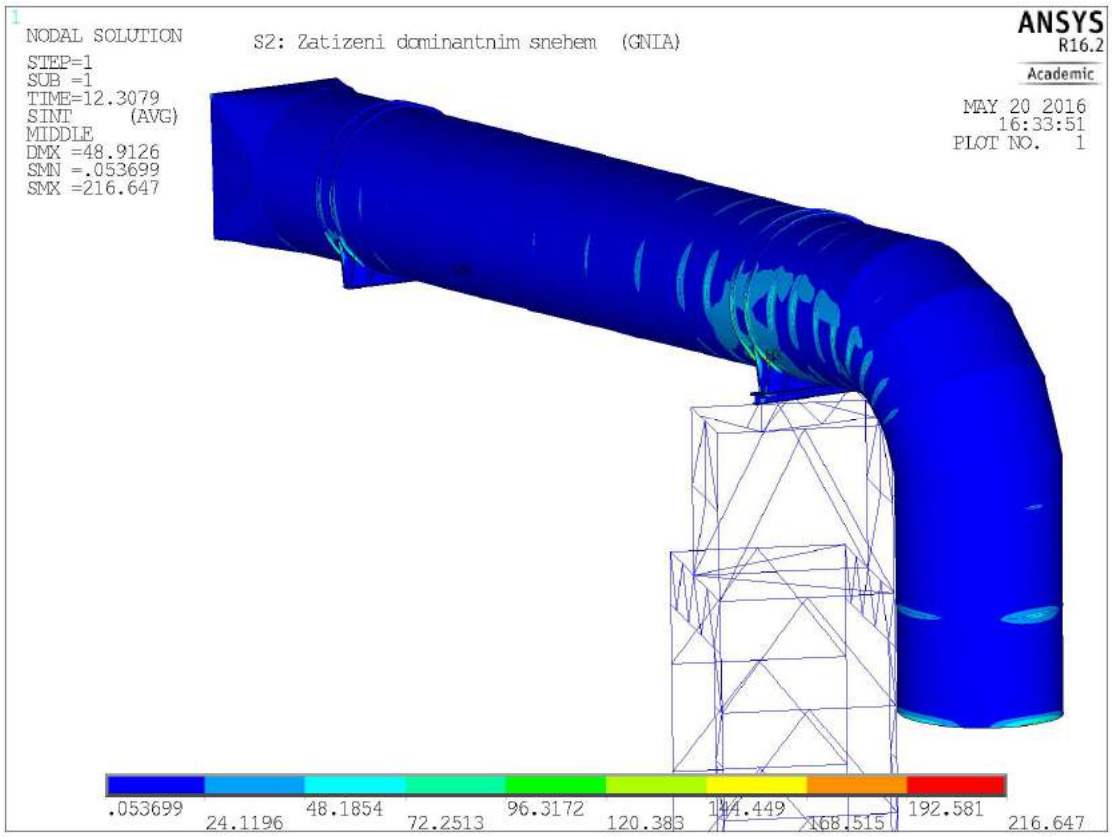
Obr. A-30 Varianta 3, stav 1, GMNIA, intenzita napětí v [MPa] 10x zvětšená deformace



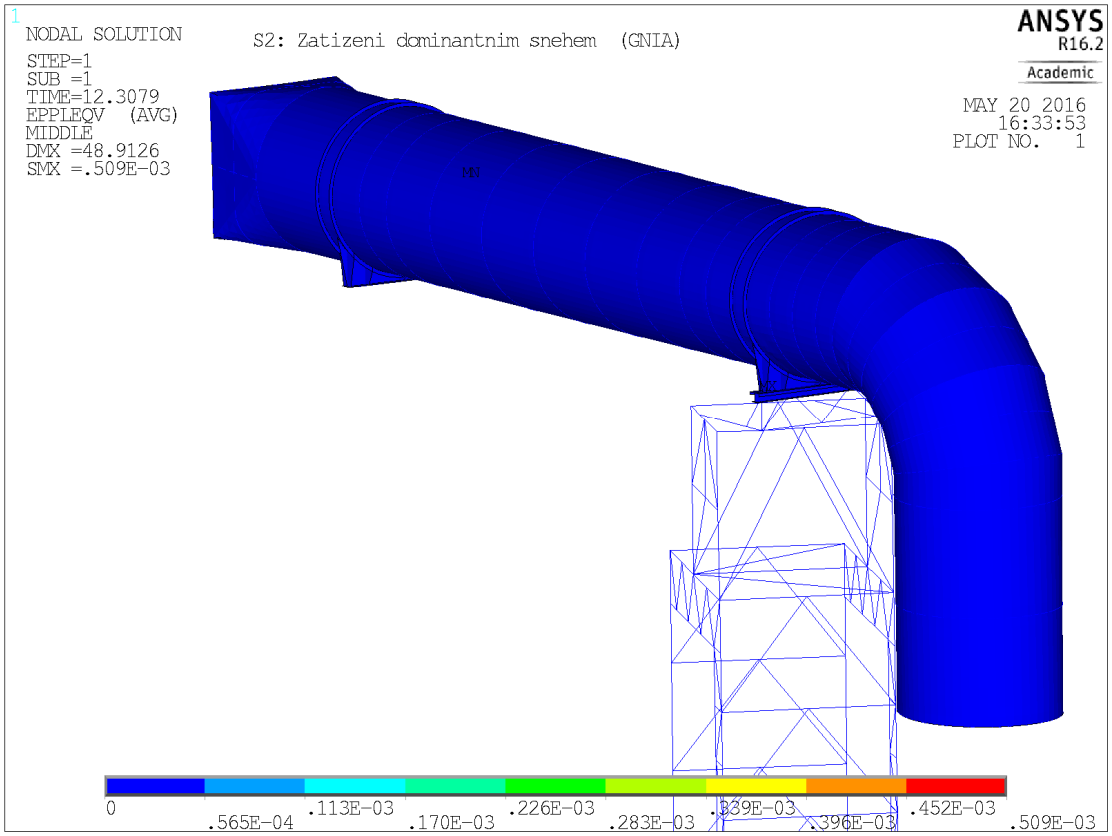
Obr. A-31 Varianta 3, stav 1, GMNIA, plastické přetvoření v [-] 10x zvětšená deformace



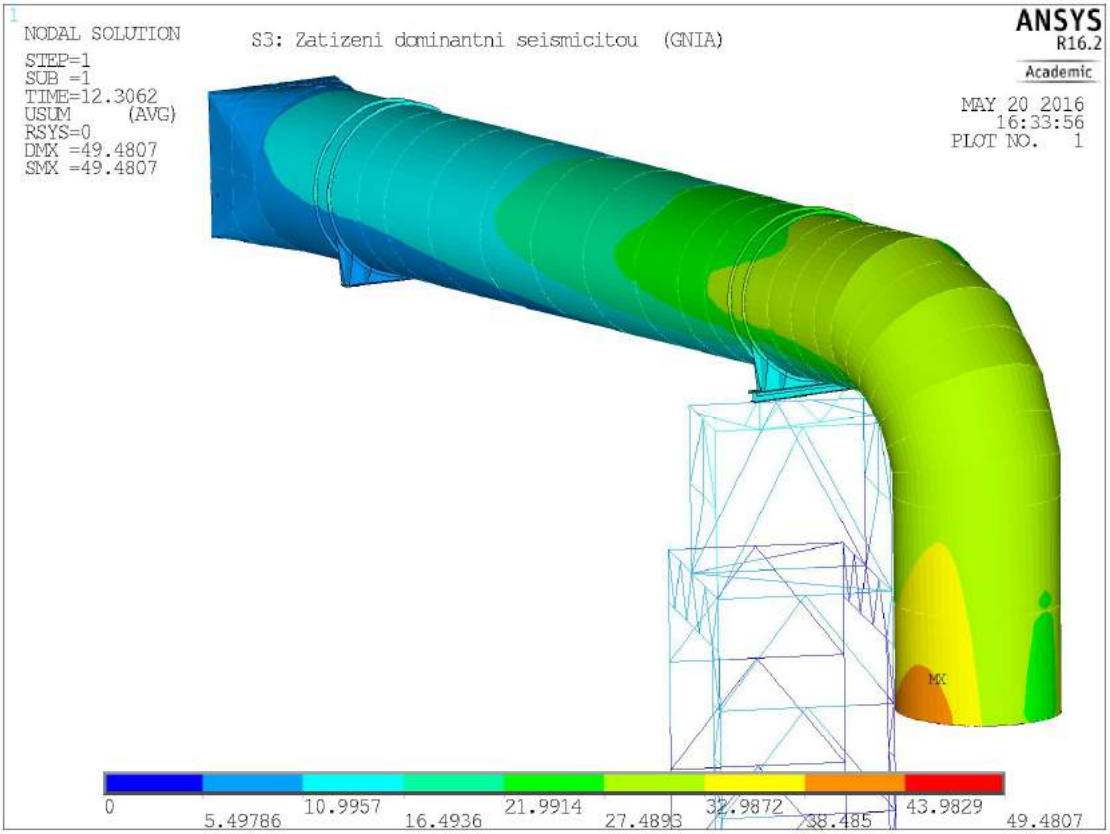
Obr. A-32 Varianta 3, stav 2, GMNIA, deformace v [mm] 10x zvětšená deformace



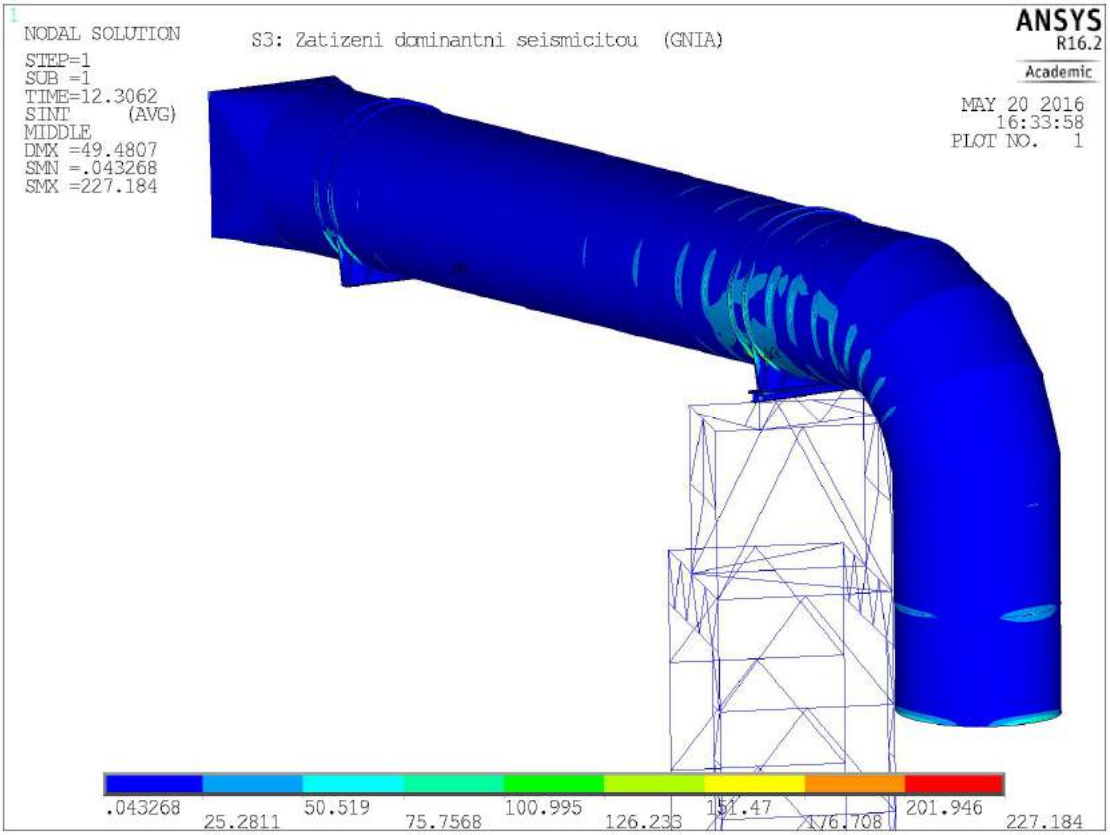
Obr. A-33 Varianta 3, stav 2, GMNIA, intenzita napětí v [MPa] 10x zvětšená deformace



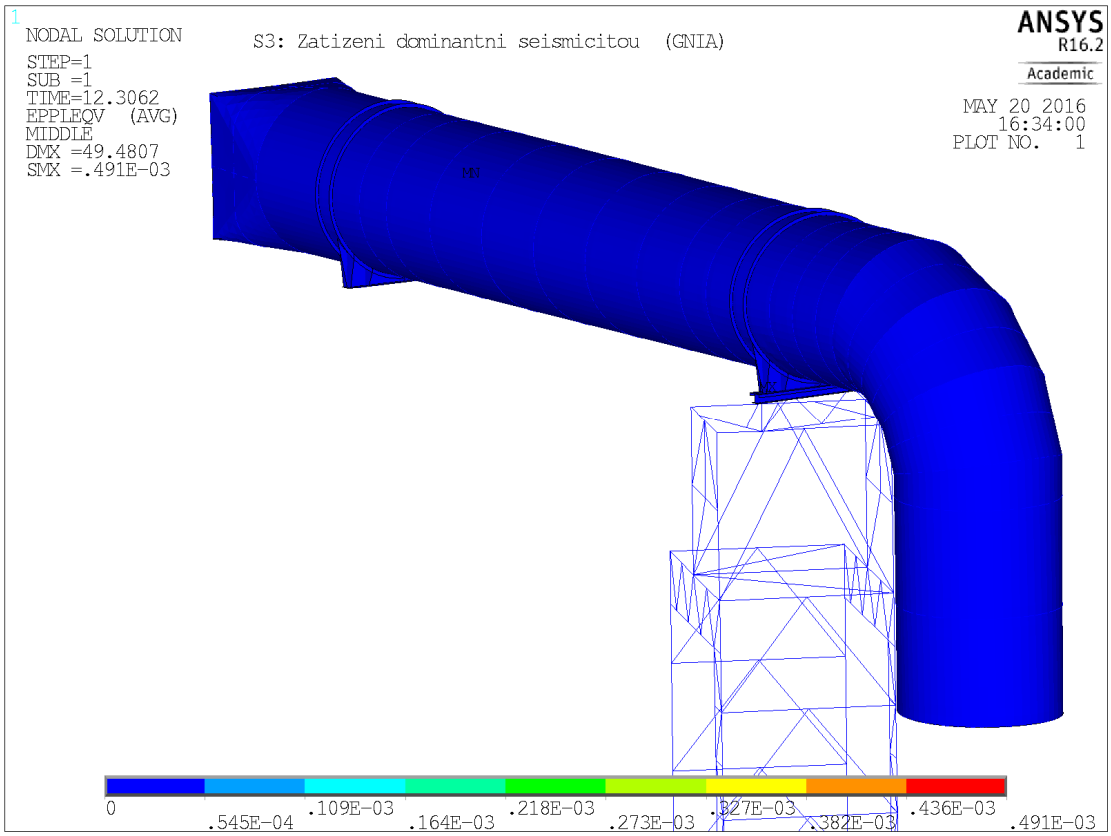
Obr. A-34 Varianta 3, stav 2, GMNIA, plastické přetvoření v [-] 10x zvětšená deformace



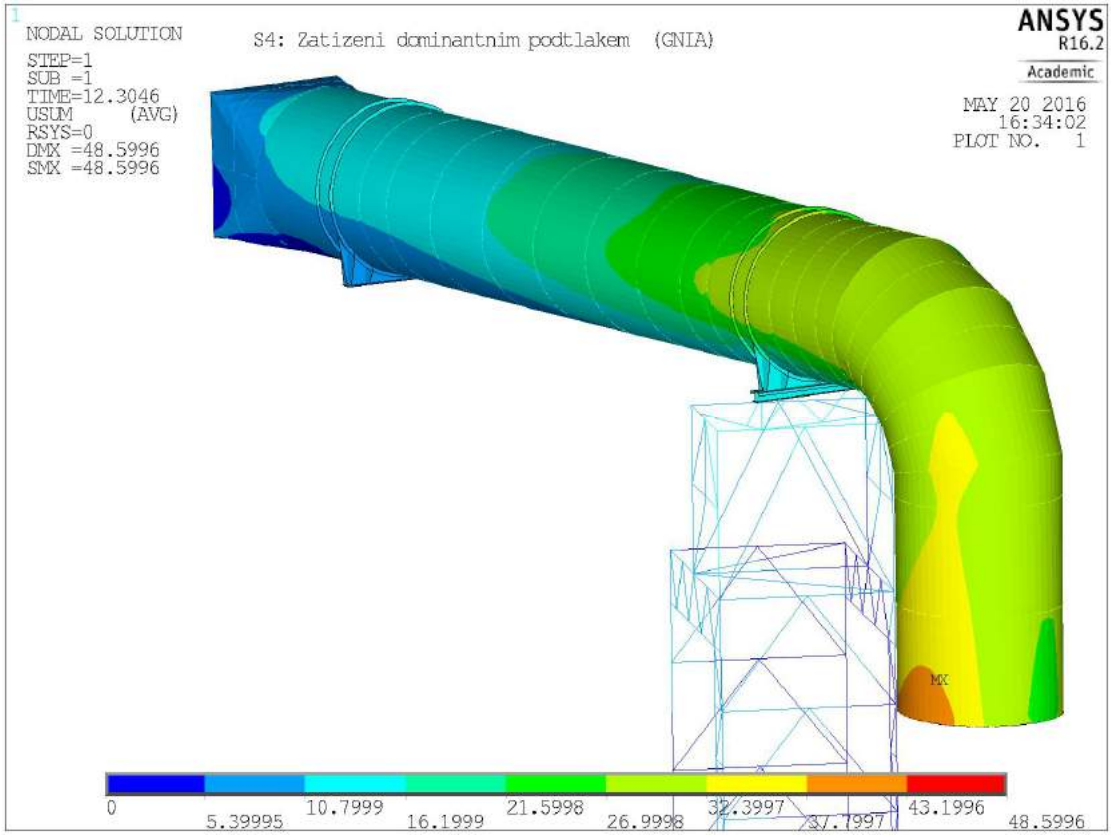
Obr. A-35 Varianta 3, stav 3, GMNIA, deformace v [mm] 10x zvětšená deformace



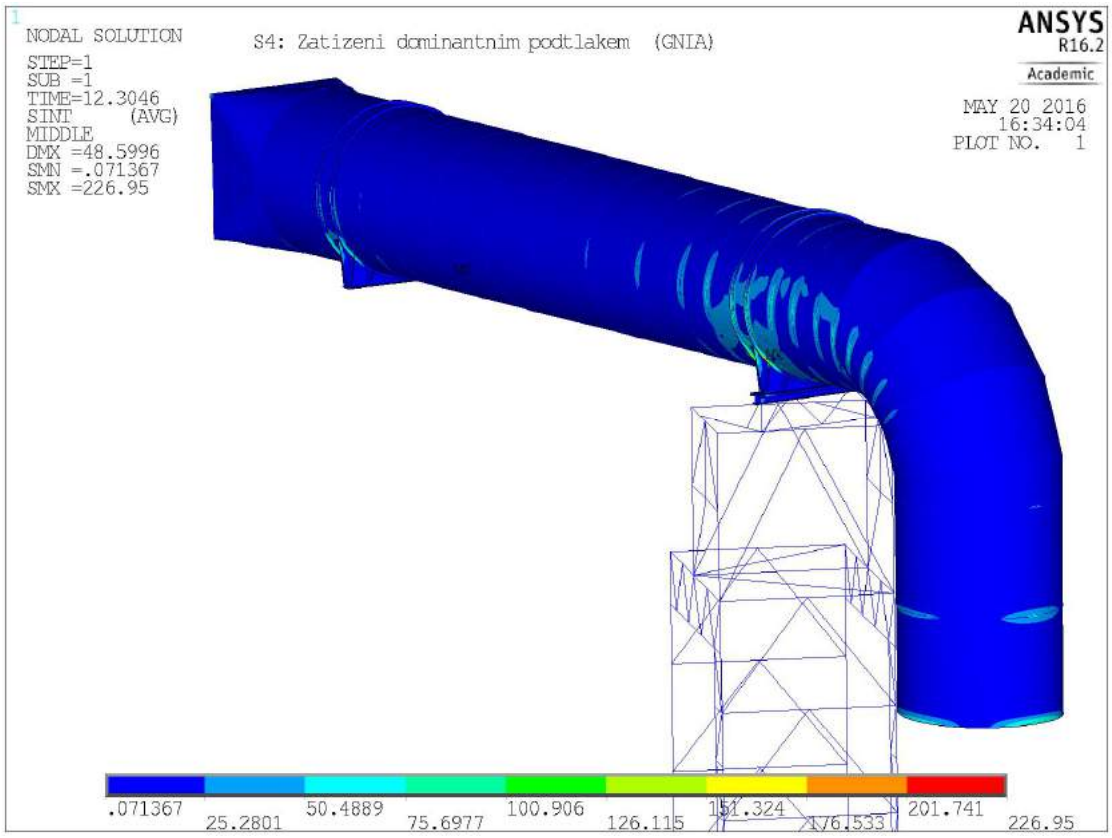
Obr. A-36 Varianta 3, stav 3, GMNIA, intenzita napětí v [MPa] 10x zvětšená deformace



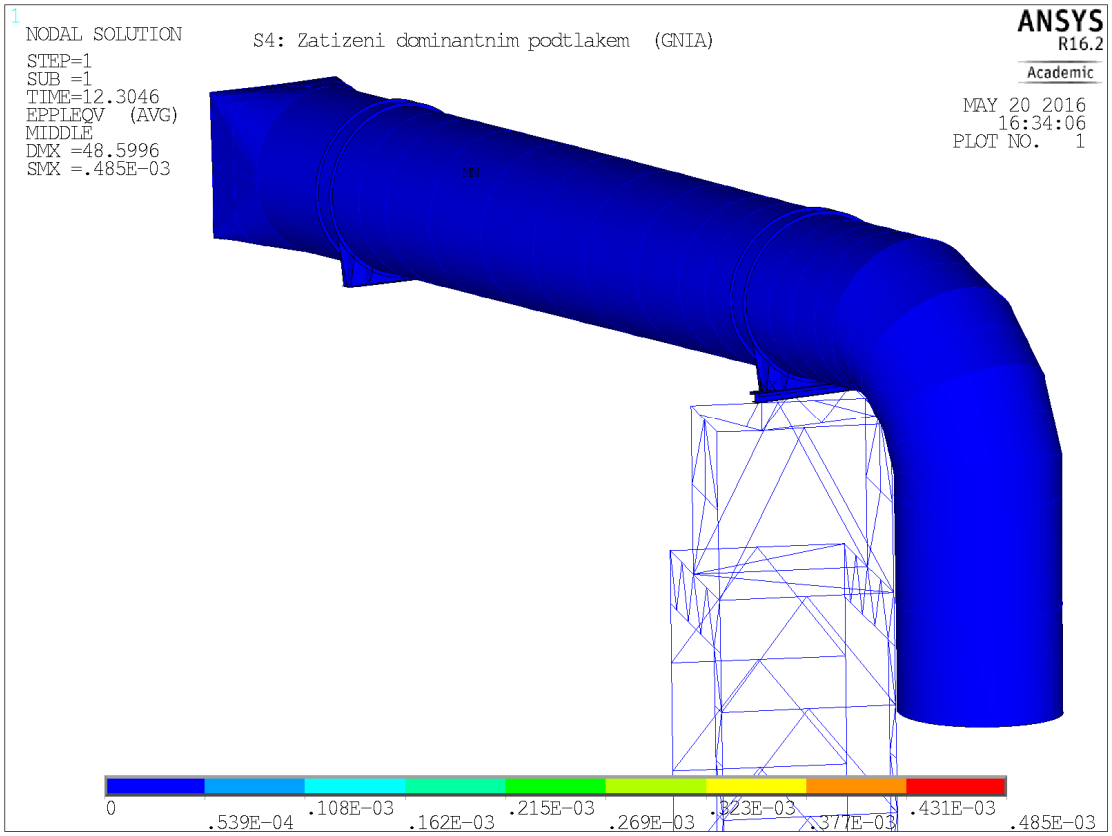
Obr. A-37 Varianta 3, stav 3, GMNIA, plastické přetvoření v [-] 10x zvětšená deformace



Obr. A-38 Varianta 3, stav 4, GMNIA, deformace v [mm] 10x zvětšená deformace



Obr. A-39 Varianta 3, stav 4, GMNIA, intenzita napětí v [MPa] 10x zvětšená deformace



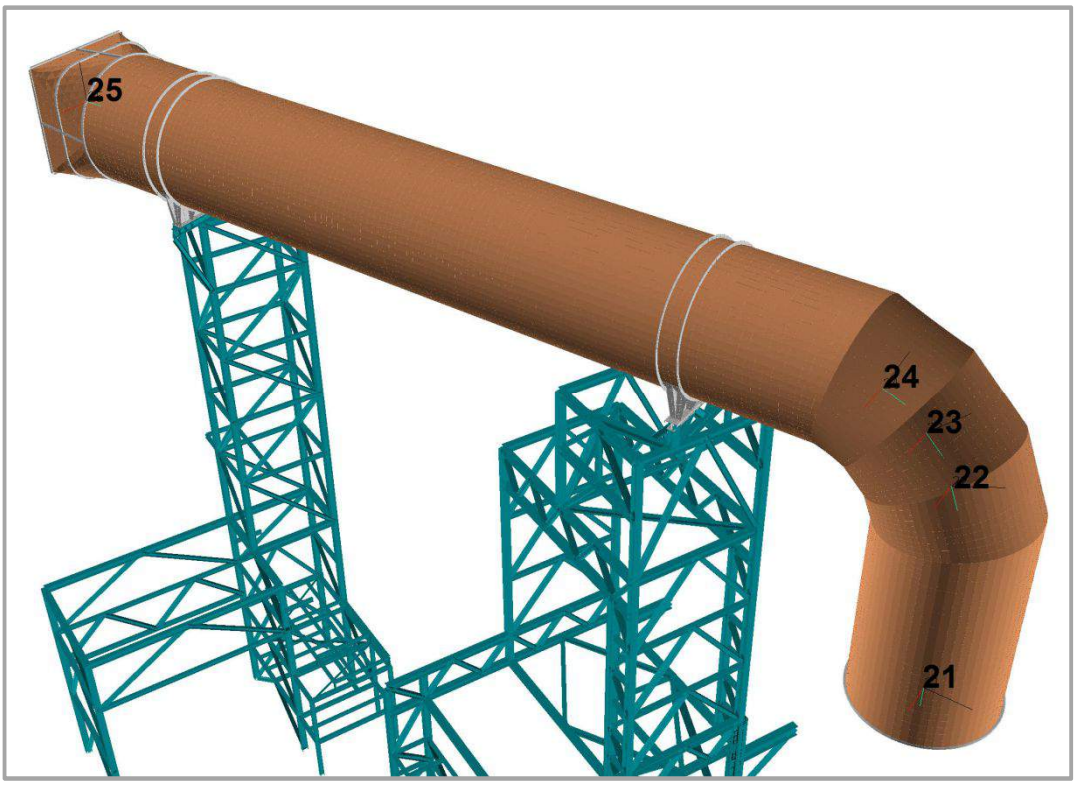
Obr. A-40 Varianta 3, stav 4, GMNIA, plastické přetvoření v [-] 10x zvětšená deformace

B- PŘÍLOHA TABULKOVÉ VÝSLEDKY ANALÝZ

Následující přílohy obsahují výsledky jednotlivých analýz (LA, LBA, GMNA, GMNIA) zpracovaných do tabulek. Jednotlivé tabulky srovnávají výsledky analýz pro každý hodnocený model a jednotlivé zátěžné stavy.

Tabulky vyhodnocení jsou rozděleny do několika sektorů dle typu analýzy. Pro analýzy LA a LBA je v prvním sloupci tabulky informace o klíčovém uzlu, zdali se nachází na válcovém plášti, nebo na prutové konstrukci. (0 – uzel leží na válcovém plášti, 1 – uzel leží na prutové konstrukci). V případě že uzel leží na prutové konstrukci, se s těmito hodnotami ve vyhodnocení analýzy neuvažuje. V tabulce jsou proto zaznačeny šedým textem. Sloupec „**mod**“ udává číslo módu vlastního tvaru. „Sloupec „**CSYS**“ udává hodnotu lokálního souřadného systému na potrubí. Sloupce „**SY**“, „**SZ**“, „**SYZ**“ udávají hodnoty obvodových podélných a smykových napětí ve skořepině. Sloupce s označením „**rRcr**“, „**rRpl**“, „**rRk**“, „**rRd**“ udávají hodnoty vypočítaných faktorů únosnosti. Ve sloupci „**rRd>1**“ jsou uvedeny výsledky splnění podmínek únosnosti pro LA a LBA analýzy (OK – podmínka splněna, NOT – podmínka nesplněna)

Pro analýzy GMNA a GMNIA jsou v levé části sektorů uvedeny hodnoty časů ($T_{,ARC}$, $T_{,BIF_L}$, $T_{,BIF_ROT}$), kdy došlo k ukončení analýzy dle nastavených kritérií. V pravé části jsou uvedeny hodnoty faktorů únosnosti pro dané analýzy a splnění podmínky únosnosti „**rRd>1**“ pro danou analýzu (OK – podmínka splněna, NOT – podmínka nesplněna).



Obr. B-1 Označení segmentů potrubí (CSYS)

B1. Výsledky analýz nevyztuženého modelu

Varianta 0, Stav 1														
	LA			LBA							GMNA			
	mod	rRcr	CSYS	SZ	SY	SYZ	rRpl	rRk	rRd	rRd>1	TIME			
0	1	1,655	24	-67,49	-76,13	-2,63	0,23	0,24	0,22	NOT	$T_{, ARC}$	12,610	$r_{R,GMNA}$	0,4976
0	2	1,959	21	0,09	-165,60	1,75	0,04	0,29	0,26	NOT	$T_{,BIF_L}$	12,535	r_{Rk}	0,4976
1	3	2,103	25	-0,62	-5,17	0,35	48,91	0,31	0,28	NOT	$T_{,BIF_ROT}$	4,976	$r_{Rd\ GMNA}$	0,4524
1	4	2,307	25	-1,12	-5,48	-0,60	46,05	0,34	0,31	NOT	$t_{,GMNA}$	4,976	**rRd>1**	**NOT**
1	5	2,402	25	-1,12	-5,48	-0,60	46,05	0,35	0,32	NOT				
0	6	2,501	25	-6,08	-1,18	1,66	34,60	0,37	0,33	NOT				
0	7	2,539	25	-16,05	-1,27	2,37	4,81	0,37	0,34	NOT				
0	8	2,744	21	-0,31	-77,39	-4,80	0,20	0,40	0,37	NOT				
1	9	2,762	25	-2,02	-1,97	0,52	275,54	0,41	0,37	NOT				
0	10	3,236	21	-30,98	-18,65	1,91	1,60	0,47	0,43	NOT				
0	11	3,337	25	-7,56	-0,91	-0,66	22,78	0,49	0,44	NOT				
0	12	3,365	25	-21,23	-1,14	4,92	2,60	0,49	0,45	NOT	GMNIA			
0	13	3,428	25	-8,35	-0,90	-0,35	18,61	0,50	0,46	NOT	TIME			
0	14	3,465	25	-4,10	-0,88	-1,26	75,56	0,51	0,46	NOT	$T_{, ARC}$	12,591	$r_{R,GMNIA}$	0,4977
1	15	3,492	25	-0,06	-5,21	1,10	41,82	0,51	0,47	NOT	$T_{,BIF_L}$	7,565	r_{Rk}	0,4977
0	16	3,604	23	-56,14	-38,41	4,74	0,47	0,53	0,48	NOT	$T_{,BIF_ROT}$	4,977	$r_{Rd\ GMNIA}$	0,4524
1	17	3,649	25	2,90	-4,81	-1,80	24,09	0,54	0,49	NOT	$t_{,GMNIA}$	4,977	**rRd>1**	**NOT**
1	18	3,658	25	2,90	-4,81	-1,80	24,09	0,54	0,49	NOT				
0	19	3,902	25	-21,05	-0,80	6,73	2,49	0,57	0,52	NOT				
0	20	3,908	25	-24,17	-1,15	3,58	2,06	0,57	0,52	NOT				
0	21	4,272	22	29,24	-13,41	-8,63	0,78	0,63	0,57	NOT				
0	22	4,359	25	-22,70	-1,22	2,92	2,36	0,64	0,58	NOT				
0	23	4,379	25	-13,96	-1,27	2,53	6,34	0,64	0,58	NOT				
0	24	4,440	21	-0,03	-132,65	4,20	0,07	0,65	0,59	NOT				
0	25	4,474	22	29,24	-13,41	-8,63	0,78	0,66	0,60	NOT				

Varianta 0, Stav 2

	LA			LBA							GMNA			
	mod	rRcr	CSYS	SZ	SY	SYZ	rRpl	rRk	rRd	**rRd>1**	TIME			
0	1	1,564	24	-69,60	-72,95	-4,28	0,23	0,23	0,21	NOT	$T_{, ARC}$	12,598	$r_{R,GMNA}$	0,4977
0	2	1,789	21	0,07	-150,91	0,35	0,05	0,26	0,24	NOT	$T_{,BIF_L}$	12,533	r_{Rk}	0,4977
0	3	2,219	22	-73,28	-60,95	2,53	0,25	0,33	0,30	NOT	$T_{,BIF_ROT}$	4,977	$r_{Rd\ GMNA}$	0,4524
1	4	2,249	25	-0,50	-4,88	0,30	54,08	0,33	0,30	NOT	$t_{,GMNA}$	4,977	**rRd>1**	**NOT**
1	5	2,377	25	-0,95	-5,13	-0,54	51,97	0,35	0,32	NOT				
1	6	2,477	25	-0,95	-5,13	-0,54	51,97	0,36	0,33	NOT				
0	7	2,555	25	-9,55	-1,21	2,15	13,70	0,37	0,34	NOT				
1	8	2,612	25	-0,95	-5,13	-0,54	51,97	0,38	0,35	NOT				
1	9	2,790	25	-1,75	-1,95	0,47	319,77	0,41	0,37	NOT				
0	10	2,902	21	-36,02	-24,16	1,98	1,16	0,43	0,39	NOT				
0	11	3,044	23	-64,43	-47,90	4,68	0,35	0,45	0,41	NOT				
0	12	3,266	25	-6,01	-0,94	-0,66	36,90	0,48	0,44	NOT	**GMNIA**			
0	13	3,287	25	-0,73	-0,85	-1,50	407,77	0,48	0,44	NOT	TIME			
0	14	3,346	22	-73,28	-60,95	2,53	0,25	0,49	0,45	NOT	$T_{, ARC}$	12,586	$r_{R,GMNIA}$	0,4977
0	15	3,488	25	-22,52	-0,90	5,47	2,27	0,51	0,47	NOT	$T_{,BIF_L}$	7,539	r_{Rk}	0,4977
0	16	3,495	25	-18,91	-1,10	5,29	3,21	0,51	0,47	NOT	$T_{,BIF_ROT}$	4,977	$r_{Rd\ GMNIA}$	0,4524
1	17	3,687	25	-0,03	-4,92	0,96	46,94	0,54	0,49	NOT	$t_{,GMNIA}$	4,977	**rRd>1**	**NOT**
1	18	3,865	25	2,61	-4,54	-1,58	28,19	0,57	0,52	NOT				
0	19	3,931	21	0,07	-150,91	0,35	0,05	0,58	0,52	NOT				
0	20	4,028	21	-0,15	-93,94	4,65	0,13	0,59	0,54	NOT				
0	21	4,037	25	-21,59	-0,89	6,33	2,41	0,59	0,54	NOT				
0	22	4,062	25	-20,18	-0,77	6,66	2,69	0,60	0,54	NOT				
0	23	4,224	22	4,46	22,57	3,97	2,64	0,62	0,56	NOT				
0	24	4,438	24	-39,88	-33,89	3,24	0,84	0,65	0,59	NOT				
0	25	4,521	25	-4,90	-1,06	2,33	46,31	0,66	0,60	NOT				

Varianta 0, Stav 3

	LA			LBA							GMNA			
	mod	rRcr	CSYS	SZ	SY	SYZ	rRpl	rRk	rRd	**rRd>1**	TIME			
0	1	1,563	24	-69,44	-72,30	-4,40	0,23	0,23	0,21	NOT	$T_{, ARC}$	12,585	$r_{R,GMNA}$	0,4977
0	2	1,784	21	0,07	-150,53	0,34	0,05	0,26	0,24	NOT	$T_{,BIF_L}$	12,520	r_{Rk}	0,4977
1	3	2,208	25	-0,51	-4,96	0,35	52,28	0,32	0,29	NOT	$T_{,BIF_ROT}$	4,977	$r_{Rd\ GMNA}$	0,4524
0	4	2,217	22	-72,04	-61,02	2,30	0,26	0,33	0,30	NOT	$t_{,GMNA}$	4,977	**rRd>1**	**NOT**
1	5	2,369	25	-0,99	-5,19	-0,52	50,96	0,35	0,32	NOT				
1	6	2,455	25	-0,99	-5,19	-0,52	50,96	0,36	0,33	NOT				
0	7	2,563	25	-10,19	-1,20	2,14	12,04	0,38	0,34	NOT				
1	8	2,605	25	-0,99	-5,19	-0,52	50,96	0,38	0,35	NOT				
1	9	2,811	25	-1,78	-1,94	0,46	317,69	0,41	0,37	NOT				
0	10	2,901	21	-36,39	-25,13	1,91	1,12	0,43	0,39	NOT				
0	11	3,037	23	-63,66	-48,21	4,51	0,35	0,45	0,40	NOT				
0	12	3,291	25	-5,91	-0,93	-0,70	38,17	0,48	0,44	NOT	**GMNIA**			
0	13	3,311	25	-1,05	-0,85	-1,59	338,72	0,49	0,44	NOT	TIME			
0	14	3,354	25	-6,04	-0,85	0,15	36,70	0,49	0,45	NOT	$T_{, ARC}$	12,572	$r_{R,GMNIA}$	0,4977
0	15	3,491	25	-22,69	-0,90	5,46	2,24	0,51	0,47	NOT	$T_{,BIF_L}$	7,544	r_{Rk}	0,4977
0	16	3,497	25	-19,60	-1,09	5,16	3,01	0,51	0,47	NOT	$T_{,BIF_ROT}$	4,977	$r_{Rd\ GMNIA}$	0,4525
1	17	3,631	25	0,00	-5,00	1,02	45,15	0,53	0,48	NOT	$t_{,GMNIA}$	4,977	**rRd>1**	**NOT**
1	18	3,820	25	2,60	-4,61	-1,60	27,59	0,56	0,51	NOT				
0	19	3,931	21	0,07	-150,53	0,34	0,05	0,58	0,52	NOT				
0	20	4,029	21	-0,15	-93,96	4,64	0,13	0,59	0,54	NOT				
0	21	4,037	25	-21,75	-0,89	6,32	2,38	0,59	0,54	NOT				
0	22	4,061	25	-20,24	-0,77	6,66	2,68	0,60	0,54	NOT				
0	23	4,232	22	4,08	21,86	3,93	2,79	0,62	0,56	NOT				
0	24	4,449	24	-39,50	-34,16	3,05	0,85	0,65	0,59	NOT				
0	25	4,522	25	-5,26	-1,06	2,37	40,78	0,66	0,60	NOT				

Varianta 0, Stav 4

	LA			LBA							GMNA			
	mod	rRcr	CSYS	SZ	SY	SYZ	rRpl	rRk	rRd	**rRd>1**	TIME			
0	1	1,555	24	-68,97	-72,62	-4,14	0,23	0,23	0,21	NOT	$T_{, ARC}$	12,597	$r_{R,GMNA}$	0,4975
0	2	1,779	21	0,03	-150,86	0,36	0,05	0,26	0,24	NOT	$T_{,BIF_L}$	12,530	r_{Rk}	0,4975
1	3	2,007	25	-0,60	-5,44	0,34	43,87	0,29	0,27	NOT	$T_{,BIF_ROT}$	4,975	$r_{Rd\ GMNA}$	0,4523
1	4	2,182	25	1,15	-5,36	-1,44	30,66	0,32	0,29	NOT	$t_{,GMNA}$	4,975	**rRd>1**	**NOT**
1	5	2,233	25	1,15	-5,36	-1,44	30,66	0,33	0,30	NOT				
1	6	2,348	25	1,15	-5,36	-1,44	30,66	0,34	0,31	NOT				
0	7	2,393	25	-10,12	-1,28	2,14	12,28	0,35	0,32	NOT				
0	8	2,468	22	-35,83	-35,13	-3,44	0,92	0,36	0,33	NOT				
1	9	2,693	25	-1,88	-1,46	0,42	379,49	0,39	0,36	NOT				
0	10	2,866	21	-35,35	-23,77	1,94	1,20	0,42	0,38	NOT				
0	11	3,009	25	-6,98	-1,00	-0,37	27,36	0,44	0,40	NOT				
0	12	3,038	25	-3,08	-0,97	-1,26	130,48	0,45	0,40	NOT	**GMNIA**			
0	13	3,073	25	-0,07	-0,87	-1,56	375,91	0,45	0,41	NOT	TIME			
1	14	3,297	25	-0,13	-5,50	1,09	38,27	0,48	0,44	NOT	$T_{, ARC}$	12,583	$r_{R,GMNIA}$	0,4976
1	15	3,323	25	-0,13	-5,50	1,09	38,27	0,49	0,44	NOT	$T_{,BIF_L}$	7,532	r_{Rk}	0,4976
0	16	3,332	25	-21,53	-0,87	4,93	2,50	0,49	0,44	NOT	$T_{,BIF_ROT}$	4,976	$r_{Rd\ GMNIA}$	0,4523
0	17	3,375	22	-71,96	-59,95	2,47	0,26	0,49	0,45	NOT	$t_{,GMNIA}$	4,976	**rRd>1**	**NOT**
1	18	3,460	25	2,48	-5,10	-1,71	24,60	0,51	0,46	NOT				
0	19	3,872	25	-20,32	-0,85	6,50	2,68	0,57	0,52	NOT				
0	20	3,892	25	-19,96	-1,10	6,52	2,80	0,57	0,52	NOT				
0	21	3,948	21	0,01	-147,78	1,49	0,05	0,58	0,53	NOT				
0	22	4,039	24	-39,20	-33,26	3,25	0,87	0,59	0,54	NOT				
0	23	4,209	22	4,33	22,00	3,90	2,78	0,62	0,56	NOT				
1	24	4,313	25	-1,87	-2,03	-0,48	290,77	0,63	0,58	NOT				
0	25	4,329	25	15,97	-0,57	-0,47	4,44	0,63	0,58	NOT				

B2. Výsledky analýz návrhu vyztužení – varianta 1

Varianta 1, Stav 1

	LA			LBA							GMNA			
	mod	rRcr	CSYS	SZ	SY	SYZ	rRpl	rRk	rRd	**rRd>1**	TIME			
0	1,00	4,82	25	-1,87	-0,93	8,38	16,14	0,71	0,64	NOT	$T_{, ARC}$	30,895	$r_{R,GMNA}$	0,9876
0	2,00	4,82	25	-4,60	-0,78	8,75	12,39	0,71	0,64	NOT	$T_{,BIF_L}$	30,811	r_{Rk}	0,9876
0	3,00	5,21	25	-12,33	-0,69	-9,82	4,89	0,76	0,69	NOT	$T_{,BIF_ROT}$	9,876	$r_{Rd\ GMNA}$	0,8979
0	4,00	5,22	25	-15,08	-0,56	-9,80	3,73	0,77	0,70	NOT	$t_{,GMNA}$	9,876	**rRd>1**	**NOT**
0	5,00	5,70	25	-3,52	-0,47	-7,72	16,66	0,84	0,76	NOT				
0	6,00	5,70	25	-6,73	-0,44	-7,52	11,85	0,84	0,76	NOT				
0	7,00	6,04	25	-1,21	-1,06	7,26	21,75	0,89	0,80	NOT				
0	8,00	6,04	25	-3,07	-0,94	7,72	17,51	0,89	0,81	NOT				
0	9,00	6,19	25	-13,54	-0,54	8,09	4,86	0,91	0,83	NOT				
0	10,00	6,20	25	-10,19	-0,47	8,08	7,15	0,91	0,83	NOT				
1	11,00	6,48	25	-0,58	-4,76	1,55	51,90	0,95	0,86	NOT				
1	12,00	6,49	25	-0,58	-4,76	1,55	51,90	0,95	0,86	NOT	**GMNIA**			
1	13,00	6,49	25	-0,58	-4,76	1,55	51,90	0,95	0,87	NOT	TIME			
1	14,00	6,49	25	-0,58	-4,76	1,55	51,90	0,95	0,87	NOT	$T_{, ARC}$	30,890	$r_{R,GMNIA}$	0,9873
1	15,00	6,50	25	-0,58	-4,76	1,55	51,90	0,95	0,87	NOT	$T_{,BIF_L}$	18,588	r_{Rk}	0,9873
1	16,00	6,50	25	-0,58	-4,76	1,55	51,90	0,95	0,87	NOT	$T_{,BIF_ROT}$	9,873	$r_{Rd\ GMNIA}$	0,8975
1	17,00	6,50	25	-0,58	-4,76	1,55	51,90	0,95	0,87	NOT	$t_{,GMNIA}$	9,873	**rRd>1**	**NOT**
1	18,00	6,51	25	-0,58	-4,76	1,55	51,90	0,95	0,87	NOT				
1	19,00	6,51	25	-0,58	-4,76	1,55	51,90	0,95	0,87	NOT				
1	20,00	6,51	25	-0,58	-4,76	1,55	51,90	0,96	0,87	NOT				
1	21,00	6,52	25	-0,58	-4,76	1,55	51,90	0,96	0,87	NOT				
0	22,00	6,52	25	-8,06	-1,12	3,25	17,35	0,96	0,87	NOT				
0	23,00	6,52	25	-8,20	-1,18	2,87	17,46	0,96	0,87	NOT				
0	24,00	6,52	25	-8,24	-1,12	3,14	16,82	0,96	0,87	NOT				
0	25,00	6,52	25	-8,06	-1,12	3,25	17,35	0,96	0,87	NOT				

Varianta 1, Stav 2

			LA							LBA
	mod	rRcr	CSYS	SZ	SY	SYZ	rRpl	rRk	rRd	**rRd>1**
0	1,00	4,81	25	-1,63	-0,94	8,418	16,12	0,96	0,87	NOT
0	2,00	4,81	25	-4,42	-0,78	8,797	12,49	0,96	0,87	NOT
0	3,00	5,21	25	-12,37	-0,69	-9,816	4,87	1,04	0,94	NOT
0	4,00	5,22	25	-15,07	-0,56	-9,794	3,73	1,04	0,95	NOT
0	5,00	5,68	25	-3,48	-0,47	-7,778	16,50	1,13	1,03	OK
0	6,00	5,68	25	-6,76	-0,44	-7,568	11,73	1,13	1,03	OK
0	7,00	6,03	25	-0,95	-1,06	7,301	21,63	1,20	1,09	OK
0	8,00	6,03	25	-2,85	-0,94	7,767	17,63	1,20	1,09	OK
0	9,00	6,17	25	-13,68	-0,54	8,130	4,77	1,23	1,12	OK
0	10,00	6,18	25	-10,32	-0,47	8,138	6,99	1,23	1,12	OK
1	11,00	6,34	25	-0,56	-5,00	1,554	47,07	1,26	1,15	OK
1	12,00	6,35	25	-0,56	-5,00	1,554	47,07	1,27	1,15	OK
1	13,00	6,35	25	-0,56	-5,00	1,554	47,07	1,27	1,15	OK
1	14,00	6,36	25	-0,56	-5,00	1,554	47,07	1,27	1,15	OK
1	15,00	6,36	25	-0,56	-5,00	1,554	47,07	1,27	1,15	OK
1	16,00	6,36	25	-0,56	-5,00	1,554	47,07	1,27	1,15	OK
1	17,00	6,37	25	-0,56	-5,00	1,554	47,07	1,27	1,15	OK
1	18,00	6,37	25	-0,56	-5,00	1,554	47,07	1,27	1,15	OK
1	19,00	6,37	25	-0,56	-5,00	1,554	47,07	1,27	1,16	OK
1	20,00	6,38	25	-0,56	-5,00	1,554	47,07	1,27	1,16	OK
1	21,00	6,38	25	-0,56	-5,00	1,554	47,07	1,27	1,16	OK
1	22,00	6,38	25	-0,56	-5,00	1,554	47,07	1,27	1,16	OK
1	23,00	6,38	25	-0,56	-5,00	1,554	47,07	1,27	1,16	OK
1	24,00	6,39	25	-0,56	-5,00	1,554	47,07	1,27	1,16	OK
1	25,00	6,39	25	-0,56	-5,00	1,554	47,07	1,27	1,16	OK

GMNA

TIME			
$T_{, ARC}$	30,274	$r_{R,GMNA}$	0,9855
$T_{,BIF_L}$	30,261	r_{Rk}	0,9855
$T_{,BIF_ROT}$	9,855	$r_{Rd\ GMNA}$	0,8959
$t_{,GMNA}$	9,855	**rRd>1**	**NOT**

GMNIA

TIME			
$T_{, ARC}$	31,572	$r_{R,GMNIA}$	0,9851
$T_{,BIF_L}$	31,559	r_{Rk}	0,9851
$T_{,BIF_ROT}$	9,851	$r_{Rd\ GMNIA}$	0,8955
$t_{,GMNIA}$	9,851	**rRd>1**	**NOT**

Varianta 1, Stav 3

			LA							LBA
	mod	rRcr	CSYS	SZ	SY	SYZ	rRpl	rRk	rRd	**rRd>1**
0	1	4,816	25	-1,87	-0,93	8,38	16,14	0,96	0,87	NOT
0	2	4,818	25	-4,60	-0,78	8,75	12,39	0,96	0,87	NOT
0	3	5,212	25	-12,33	-0,69	-9,82	4,89	1,04	0,94	NOT
0	4	5,220	25	-15,08	-0,56	-9,80	3,73	1,04	0,95	NOT
0	5	5,698	25	-3,52	-0,47	-7,72	16,66	1,14	1,03	OK
0	6	5,700	25	-6,73	-0,44	-7,52	11,85	1,14	1,03	OK
0	7	6,038	25	-1,21	-1,06	7,26	21,75	1,20	1,09	OK
0	8	6,042	25	-3,07	-0,94	7,72	17,51	1,20	1,10	OK
0	9	6,193	25	-13,54	-0,54	8,09	4,86	1,23	1,12	OK
0	10	6,205	25	-10,19	-0,47	8,08	7,15	1,24	1,12	OK
1	11	6,480	25	-0,58	-4,76	1,55	51,90	1,29	1,17	OK
1	12	6,486	25	-0,58	-4,76	1,55	51,90	1,29	1,18	OK
1	13	6,489	25	-0,58	-4,76	1,55	51,90	1,29	1,18	OK
1	14	6,494	25	-0,58	-4,76	1,55	51,90	1,29	1,18	OK
1	15	6,497	25	-0,58	-4,76	1,55	51,90	1,30	1,18	OK
1	16	6,501	25	-0,58	-4,76	1,55	51,90	1,30	1,18	OK
1	17	6,504	25	-0,58	-4,76	1,55	51,90	1,30	1,18	OK
1	18	6,508	25	-0,58	-4,76	1,55	51,90	1,30	1,18	OK
1	19	6,511	25	-0,58	-4,76	1,55	51,90	1,30	1,18	OK
1	20	6,514	25	-0,58	-4,76	1,55	51,90	1,30	1,18	OK
1	21	6,517	25	-0,58	-4,76	1,55	51,90	1,30	1,18	OK
0	22	6,520	25	-8,06	-1,12	3,25	17,35	1,30	1,18	OK
0	23	6,522	25	-8,20	-1,18	2,87	17,46	1,30	1,18	OK
0	24	6,523	25	-8,24	-1,12	3,14	16,82	1,30	1,18	OK
0	25	6,523	25	-8,06	-1,12	3,25	17,35	1,30	1,18	OK

GMNA

TIME			
$T_{, ARC}$	30,303	$r_{R,GMNA}$	0,9853
$T_{,BIF_L}$	30,252	r_{Rk}	0,9853
$T_{,BIF_ROT}$	9,853	$r_{Rd\ GMNA}$	0,8958
$t_{,GMNA}$	9,853	**rRd>1**	**NOT**

GMNIA

TIME			
$T_{, ARC}$	31,562	$r_{R,GMNIA}$	0,9849
$T_{,BIF_L}$	31,549	r_{Rk}	0,9849
$T_{,BIF_ROT}$	9,849	$r_{Rd\ GMNIA}$	0,8954
$t_{,GMNIA}$	9,849	**rRd>1**	**NOT**

Varianta 1, Stav 4

			LA						LBA	GMNA			
	mod	rRcr	CSYS	SZ	SY	SYZ	rRpl	rRk	rRd	**rRd>1**	TIME			
0	1	4,728	25	-1,74	-1,02	8,33	16,41	0,94	0,86	NOT	$T_{, ARC}$	30,367	$r_{R,GMNA}$	0,9852
0	2	4,730	25	-4,43	-0,86	8,72	12,69	0,94	0,86	NOT	$T_{,BIF_L}$	30,315	r_{Rk}	0,9852
0	3	5,174	25	-12,36	-0,75	-9,48	5,02	1,03	0,94	NOT	$T_{,BIF_ROT}$	9,852	$r_{Rd\ GMNA}$	0,8957
0	4	5,181	25	-14,88	-0,64	-9,71	3,83	1,03	0,94	NOT	$t_{,GMNA}$	9,852	**rRd>1**	**NOT**
0	5	5,572	25	-3,53	-0,55	-7,63	17,03	1,11	1,01	OK				
0	6	5,574	25	-6,79	-0,52	-7,50	11,85	1,11	1,01	OK				
0	7	5,914	25	-1,15	-1,14	7,20	22,12	1,18	1,07	OK				
0	8	5,917	25	-3,00	-1,02	7,67	17,84	1,18	1,07	OK				
0	9	6,115	25	-13,53	-0,62	8,04	4,90	1,22	1,11	OK				
0	10	6,127	25	-10,21	-0,55	8,04	7,19	1,22	1,11	OK				
0	11	6,249	25	-8,22	-1,26	2,85	17,54	1,25	1,13	OK				
0	12	6,250	25	-8,27	-1,20	3,13	16,86	1,25	1,13	OK	**GMNIA**			
1	13	6,396	25	-0,66	-5,18	1,69	43,98	1,28	1,16	OK	TIME			
1	14	6,401	25	-0,66	-5,18	1,69	43,98	1,28	1,16	OK	$T_{, ARC}$	31,629	$r_{R,GMNIA}$	0,9848
1	15	6,405	25	-0,66	-5,18	1,69	43,98	1,28	1,16	OK	$T_{,BIF_L}$	31,615	r_{Rk}	0,9848
1	16	6,409	25	-0,66	-5,18	1,69	43,98	1,28	1,16	OK	$T_{,BIF_ROT}$	9,848	$r_{Rd\ GMNIA}$	0,8953
1	17	6,412	25	-0,66	-5,18	1,69	43,98	1,28	1,16	OK	$t_{,GMNIA}$	9,848	**rRd>1**	**NOT**
1	18	6,416	25	-0,66	-5,18	1,69	43,98	1,28	1,16	OK				
1	19	6,419	25	-0,66	-5,18	1,69	43,98	1,28	1,16	OK				
1	20	6,423	25	-0,66	-5,18	1,69	43,98	1,28	1,16	OK				
1	21	6,425	25	-0,66	-5,18	1,69	43,98	1,28	1,16	OK				
1	22	6,429	25	-0,66	-5,18	1,69	43,98	1,28	1,17	OK				
1	23	6,431	25	-0,66	-5,18	1,69	43,98	1,28	1,17	OK				
1	24	6,434	25	-0,66	-5,18	1,69	43,98	1,28	1,17	OK				
1	25	6,437	25	-0,66	-5,18	1,69	43,98	1,28	1,17	OK				

B3. Výsledky analýz návrhu vyztužení – varianta 2

Varianta 2, Stav 1

			LA							LBA	GMNA			
	mod	rRcr	CSYS	SZ	SY	SYZ	rRpl	rRk	rRd	**rRd>1**	TIME			
0	1	5,448	25	-4,38	-0,66	9,10	11,81	0,80	0,73	NOT	$T_{, ARC}$	45,275	$r_{R,GMNA}$	0,9915
0	2	5,454	25	-1,45	-0,79	8,90	14,56	0,80	0,73	NOT	$T_{,BIF_L}$	43,909	r_{Rk}	0,9915
0	3	6,203	25	-8,55	-0,42	-7,68	9,14	0,91	0,83	NOT	$T_{,BIF_ROT}$	9,915	$r_{Rd\ GMNA}$	0,9014
0	4	6,210	25	-5,36	-0,41	-8,01	12,94	0,91	0,83	NOT	$t_{,GMNA}$	9,915	**rRd>1**	**NOT**
1	5	6,484	25	-0,78	-5,31	1,17	45,12	0,95	0,86	NOT				
1	6	6,490	25	-0,78	-5,31	1,17	45,12	0,95	0,87	NOT				
1	7	6,493	25	-0,78	-5,31	1,17	45,12	0,95	0,87	NOT				
1	8	6,498	25	-0,78	-5,31	1,17	45,12	0,95	0,87	NOT				
1	9	6,501	25	-0,78	-5,31	1,17	45,12	0,95	0,87	NOT				
1	10	6,505	25	-0,78	-5,31	1,17	45,12	0,95	0,87	NOT				
1	11	6,508	25	-0,78	-5,31	1,17	45,12	0,95	0,87	NOT				
1	12	6,512	25	-0,78	-5,31	1,17	45,12	0,95	0,87	NOT	**GMNIA**			
1	13	6,515	25	-0,78	-5,31	1,17	45,12	0,96	0,87	NOT	TIME			
1	14	6,518	25	-0,78	-5,31	1,17	45,12	0,96	0,87	NOT	$T_{, ARC}$	45,262	$r_{R,GMNIA}$	0,9928
1	15	6,521	25	-0,78	-5,31	1,17	45,12	0,96	0,87	NOT	$T_{,BIF_L}$	43,905	r_{Rk}	0,9928
1	16	6,524	25	-0,78	-5,31	1,17	45,12	0,96	0,87	NOT	$T_{,BIF_ROT}$	9,928	$r_{Rd\ GMNIA}$	0,9025
1	17	6,527	25	-0,78	-5,31	1,17	45,12	0,96	0,87	NOT	$t_{,GMNIA}$	9,928	**rRd>1**	**NOT**
1	18	6,530	25	-0,78	-5,31	1,17	45,12	0,96	0,87	NOT				
1	19	6,533	25	-0,78	-5,31	1,17	45,12	0,96	0,87	NOT				
1	20	6,537	25	-0,78	-5,31	1,17	45,12	0,96	0,87	NOT				
1	21	6,540	25	-0,78	-5,31	1,17	45,12	0,96	0,87	NOT				
1	22	6,544	25	-0,78	-5,31	1,17	45,12	0,96	0,87	NOT				
1	23	6,548	25	-0,78	-5,31	1,17	45,12	0,96	0,87	NOT				
1	24	6,827	25	-0,78	-5,31	1,17	45,12	1,00	0,91	NOT				
1	25	6,833	25	-0,78	-5,31	1,17	45,12	1,00	0,91	NOT				

Varianta 2, Stav 2

			LA							LBA
	mod	rRcr	CSYS	SZ	SY	SYZ	rRpl	rRk	rRd	**rRd>1**
0	1	5,473	25	-5,30	-0,65	9,00	11,08	0,80	0,73	NOT
0	2	5,479	25	-2,12	-0,76	8,93	14,12	0,80	0,73	NOT
0	3	6,244	25	-8,50	-0,44	-7,63	9,26	0,92	0,83	NOT
0	4	6,252	25	-5,17	-0,43	-8,01	13,22	0,92	0,83	NOT
1	5	6,756	25	-0,75	-6,09	1,12	34,20	0,99	0,90	NOT
1	6	6,762	25	-0,75	-6,09	1,12	34,20	0,99	0,90	NOT
1	7	6,766	25	-0,75	-6,09	1,12	34,20	0,99	0,90	NOT
1	8	6,770	25	-0,75	-6,09	1,12	34,20	0,99	0,90	NOT
1	9	6,774	25	-0,75	-6,09	1,12	34,20	0,99	0,90	NOT
1	10	6,778	25	-0,75	-6,09	1,12	34,20	0,99	0,90	NOT
1	11	6,782	25	-0,75	-6,09	1,12	34,20	0,99	0,90	NOT
1	12	6,786	25	-0,75	-6,09	1,12	34,20	1,00	0,90	NOT
1	13	6,789	25	-0,75	-6,09	1,12	34,20	1,00	0,91	NOT
1	14	6,793	25	-0,75	-6,09	1,12	34,20	1,00	0,91	NOT
1	15	6,795	25	-0,75	-6,09	1,12	34,20	1,00	0,91	NOT
1	16	6,799	25	-0,75	-6,09	1,12	34,20	1,00	0,91	NOT
1	17	6,802	25	-0,75	-6,09	1,12	34,20	1,00	0,91	NOT
1	18	6,806	25	-0,75	-6,09	1,12	34,20	1,00	0,91	NOT
1	19	6,809	25	-0,75	-6,09	1,12	34,20	1,00	0,91	NOT
1	20	6,813	25	-0,75	-6,09	1,12	34,20	1,00	0,91	NOT
1	21	6,816	25	-0,75	-6,09	1,12	34,20	1,00	0,91	NOT
1	22	6,821	25	-0,75	-6,09	1,12	34,20	1,00	0,91	NOT
1	23	6,825	25	-0,75	-6,09	1,12	34,20	1,00	0,91	NOT
1	24	7,126	25	-0,75	-6,09	1,12	34,20	1,04	0,95	NOT
1	25	7,132	25	-0,75	-6,09	1,12	34,20	1,05	0,95	NOT

GMNA			
TIME			
$T_{, ARC}$	44,696	$r_{R,GMNA}$	0,9904
$T_{,BIF_L}$	43,384	r_{Rk}	0,9904
$T_{,BIF_ROT}$	9,904	$r_{Rd\ GMNA}$	0,9004
$t_{,GMNA}$	9,904	**rRd>1**	**NOT**

GMNIA			
TIME			
$T_{, ARC}$	44,681	$r_{R,GMNIA}$	0,9901
$T_{,BIF_L}$	43,379	r_{Rk}	0,9901
$T_{,BIF_ROT}$	9,901	$r_{Rd\ GMNIA}$	0,9001
$t_{,GMNIA}$	9,901	**rRd>1**	**NOT**

Varianta 2, Stav 3

			LA							LBA
	mod	rRcr	CSYS	SZ	SY	SYZ	rRpl	rRk	rRd	**rRd>1**
0	1	5,468	25	-5,43	-0,65	9,00	10,94	0,80	0,73	NOT
0	2	5,474	25	-2,28	-0,76	8,95	13,97	0,80	0,73	NOT
0	3	6,250	25	-8,39	-0,44	-7,63	9,40	0,92	0,83	NOT
0	4	6,258	25	-5,07	-0,43	-8,01	13,36	0,92	0,83	NOT
1	5	6,870	25	-0,75	-5,74	1,16	38,46	1,01	0,92	NOT
1	6	6,876	25	-0,75	-5,74	1,16	38,46	1,01	0,92	NOT
1	7	6,880	25	-0,75	-5,74	1,16	38,46	1,01	0,92	NOT
1	8	6,884	25	-0,75	-5,74	1,16	38,46	1,01	0,92	NOT
1	9	6,888	25	-0,75	-5,74	1,16	38,46	1,01	0,92	NOT
1	10	6,893	25	-0,75	-5,74	1,16	38,46	1,01	0,92	NOT
1	11	6,896	25	-0,75	-5,74	1,16	38,46	1,01	0,92	NOT
1	12	6,900	25	-0,75	-5,74	1,16	38,46	1,01	0,92	NOT
1	13	6,904	25	-0,75	-5,74	1,16	38,46	1,01	0,92	NOT
1	14	6,908	25	-0,75	-5,74	1,16	38,46	1,01	0,92	NOT
1	15	6,911	25	-0,75	-5,74	1,16	38,46	1,01	0,92	NOT
1	16	6,914	25	-0,75	-5,74	1,16	38,46	1,01	0,92	NOT
1	17	6,917	25	-0,75	-5,74	1,16	38,46	1,01	0,92	NOT
1	18	6,921	25	-0,75	-5,74	1,16	38,46	1,01	0,92	NOT
1	19	6,924	25	-0,75	-5,74	1,16	38,46	1,02	0,92	NOT
1	20	6,929	25	-0,75	-5,74	1,16	38,46	1,02	0,92	NOT
1	21	6,932	25	-0,75	-5,74	1,16	38,46	1,02	0,92	NOT
1	22	6,937	25	-0,75	-5,74	1,16	38,46	1,02	0,92	NOT
1	23	6,941	25	-0,75	-5,74	1,16	38,46	1,02	0,93	NOT
0	24	7,255	25	-6,92	-1,04	3,97	20,41	1,06	0,97	NOT
0	25	7,262	25	2,08	-1,05	7,25	19,52	1,06	0,97	NOT

GMNA

TIME			
$T_{, ARC}$	45,275	$r_{R,GMNA}$	0,9902
$T_{,BIF_L}$	43,297	r_{Rk}	0,9902
$T_{,BIF_ROT}$	9,902	$r_{Rd\ GMNA}$	0,9002
$t_{,GMNA}$	9,902	**rRd>1**	**NOT**

GMNIA

TIME			
$T_{, ARC}$	44,599	$r_{R,GMNIA}$	0,9899
$T_{,BIF_L}$	43,291	r_{Rk}	0,9899
$T_{,BIF_ROT}$	9,899	$r_{Rd\ GMNIA}$	0,8999
$t_{,GMNIA}$	9,899	**rRd>1**	**NOT**

Varianta 2, Stav 4														
			LA							LBA	GMNA			
	mod	rRcr	CSYS	SZ	SY	SYZ	rRpl	rRk	rRd	rRd>1	TIME			
0	1	5,375	25	-5,26	-0,73	8,98	11,18	0,79	0,72	NOT	$T_{, ARC}$	44,716	$r_{R,GMNA}$	0,9901
0	2	5,380	25	-2,11	-0,84	8,91	14,21	0,79	0,72	NOT	$T_{,BIF_L}$	43,406	r_{Rk}	0,9901
0	3	6,119	25	-8,48	-0,52	-7,61	9,35	0,90	0,82	NOT	$T_{,BIF_ROT}$	9,901	$r_{Rd\ GMNA}$	0,9001
0	4	6,127	25	-5,17	-0,51	-7,99	13,32	0,90	0,82	NOT	$t_{,GMNA}$	9,901	**rRd>1**	**NOT**
1	5	6,776	25	-0,83	-6,14	1,31	33,56	0,99	0,90	NOT				
1	6	6,782	25	-0,83	-6,14	1,31	33,56	0,99	0,90	NOT				
1	7	6,785	25	-0,83	-6,14	1,31	33,56	1,00	0,90	NOT				
1	8	6,790	25	-0,83	-6,14	1,31	33,56	1,00	0,91	NOT				
1	9	6,794	25	-0,83	-6,14	1,31	33,56	1,00	0,91	NOT				
1	10	6,798	25	-0,83	-6,14	1,31	33,56	1,00	0,91	NOT				
1	11	6,801	25	-0,83	-6,14	1,31	33,56	1,00	0,91	NOT				
1	12	6,806	25	-0,83	-6,14	1,31	33,56	1,00	0,91	NOT	GMNIA			
1	13	6,809	25	-0,83	-6,14	1,31	33,56	1,00	0,91	NOT	TIME			
1	14	6,812	25	-0,83	-6,14	1,31	33,56	1,00	0,91	NOT	$T_{, ARC}$	44,701	$r_{R,GMNIA}$	0,9898
1	15	6,815	25	-0,83	-6,14	1,31	33,56	1,00	0,91	NOT	$T_{,BIF_L}$	43,401	r_{Rk}	0,9898
1	16	6,819	25	-0,83	-6,14	1,31	33,56	1,00	0,91	NOT	$T_{,BIF_ROT}$	9,898	$r_{Rd\ GMNIA}$	0,8998
1	17	6,822	25	-0,83	-6,14	1,31	33,56	1,00	0,91	NOT	$t_{,GMNIA}$	9,898	**rRd>1**	**NOT**
1	18	6,826	25	-0,83	-6,14	1,31	33,56	1,00	0,91	NOT				
1	19	6,829	25	-0,83	-6,14	1,31	33,56	1,00	0,91	NOT				
1	20	6,833	25	-0,83	-6,14	1,31	33,56	1,00	0,91	NOT				
1	21	6,836	25	-0,83	-6,14	1,31	33,56	1,00	0,91	NOT				
1	22	6,841	25	-0,83	-6,14	1,31	33,56	1,00	0,91	NOT				
1	23	6,845	25	-0,83	-6,14	1,31	33,56	1,00	0,91	NOT				
0	24	7,063	25	-6,96	-1,13	3,95	20,47	1,04	0,94	NOT				
0	25	7,068	25	-6,74	-1,03	4,17	20,62	1,04	0,94	NOT				

B4. Výsledky analýz návrhu vyztužení – varianta 3

Varianta 3, Stav 1														
			LA							LBA	GMNA			
	mod	rRcr	CSYS	SZ	SY	SYZ	rRpl	rRk	rRd	rRd>1	TIME			
0	1	5,286	25	-4,92	-0,67	9,37	10,76	0,78	0,70	NOT	$T_{, ARC}$	46,437	$r_{R,GMNA}$	1,2337
0	2	5,292	25	-1,54	-0,80	9,06	14,00	0,78	0,71	NOT	$T_{,BIF_L}$	43,500	r_{Rk}	1,2337
0	3	6,168	25	-8,60	-0,43	-7,73	9,03	0,90	0,82	NOT	$T_{,BIF_ROT}$	12,337	$r_{Rd\ GMNA}$	1,1216
0	4	6,176	25	-5,24	-0,42	-8,02	13,10	0,91	0,82	NOT	$t_{,GMNA}$	12,337	**rRd>1**	**OK**
0	5	6,987	25	-8,35	-1,09	3,98	15,13	1,02	0,93	NOT				
0	6	6,991	25	-8,29	-0,99	4,24	14,78	1,03	0,93	NOT				
0	7	7,283	25	-8,35	-1,09	3,98	15,13	1,07	0,97	NOT				
0	8	7,286	25	-8,40	-1,19	3,49	15,84	1,07	0,97	NOT				
0	9	8,057	25	-11,99	-1,19	1,48	8,84	1,18	1,07	ok				
0	10	8,058	25	-10,85	-1,25	1,44	10,91	1,18	1,07	ok				
0	11	8,279	25	-4,71	-0,44	-7,80	14,48	1,21	1,10	ok				
0	12	8,298	25	1,32	-0,49	-7,36	20,69	1,22	1,11	ok	GMNIA			
0	13	8,768	25	-13,20	-0,05	-10,48	4,15	1,29	1,17	ok	TIME			
0	14	8,835	25	-15,66	0,10	-9,41	3,50	1,30	1,18	ok	$T_{, ARC}$	46,504	$r_{R,GMNIA}$	1,2329
0	15	8,992	25	-8,93	-1,28	0,53	16,71	1,32	1,20	ok	$T_{,BIF_L}$	43,541	r_{Rk}	1,2329
0	16	8,993	25	-10,03	-1,23	0,29	13,07	1,32	1,20	ok	$T_{,BIF_ROT}$	12,329	$r_{Rd\ GMNIA}$	1,1208
0	17	9,193	25	4,52	-1,19	5,78	19,38	1,35	1,23	ok	$t_{,GMNIA}$	12,329	**rRd>1**	**OK**
0	18	9,201	25	0,59	-1,10	6,73	24,72	1,35	1,23	ok				
0	19	9,379	24	-20,47	-9,63	-5,60	3,40	1,38	1,25	ok				
0	20	9,458	24	-19,43	-6,51	-5,47	3,63	1,39	1,26	ok				
0	21	9,510	25	-5,99	-0,46	-3,76	24,75	1,39	1,27	ok				
0	22	9,510	25	-5,39	-0,45	-3,97	27,57	1,39	1,27	ok				
0	23	9,651	25	-6,11	-1,27	2,66	30,65	1,42	1,29	ok				
0	24	9,656	25	-7,54	-1,25	3,13	20,00	1,42	1,29	ok				
0	25	9,734	25	-15,18	0,48	8,19	3,85	1,43	1,30	ok				

Varianta 3, Stav 2														
			LA						LBA	GMNA				
	mod	rRcr	CSYS	SZ	SY	SYZ	rRpl	rRk	rRd	rRd>1	TIME			
0	1	8,583	25	-13,29	-0,78	-15,12	2,97	1,26	1,14	ok	$T_{, ARC}$	46,497	$r_{R,GMNA}$	1,2318
0	2	8,612	25	-19,95	-0,33	-13,42	2,06	1,26	1,15	ok	$T_{,BIF_L}$	43,528	r_{Rk}	1,2318
0	3	9,254	25	-13,89	-0,45	10,82	3,87	1,36	1,23	ok	$T_{,BIF_ROT}$	12,318	$r_{Rd\ GMNA}$	1,1198
0	4	9,310	25	-29,94	-0,94	6,57	1,29	1,37	1,24	ok	$t_{,GMNA}$	12,318	**rRd>1**	**OK**
0	5	9,324	25	-9,70	-0,74	12,59	4,78	1,37	1,24	ok				
0	6	9,469	25	-22,07	-0,35	10,04	2,02	1,39	1,26	ok				
0	7	9,599	25	-16,60	-0,60	-8,60	3,46	1,41	1,28	ok				
0	8	9,611	24	-19,71	-9,73	-5,58	3,64	1,41	1,28	ok				
0	9	9,687	25	-12,69	-0,77	-11,12	4,26	1,42	1,29	ok				
0	10	9,687	24	-19,72	-7,07	-5,50	3,57	1,42	1,29	ok				
0	11	9,703	25	-28,67	0,05	-5,90	1,37	1,42	1,29	ok				
0	12	9,732	25	-26,03	-0,20	6,15	1,65	1,43	1,30	ok	GMNIA			
0	13	10,106	25	-3,10	-0,94	6,06	26,56	1,48	1,35	ok	TIME			
0	14	10,109	25	-2,58	-1,04	5,83	30,12	1,48	1,35	ok	$T_{, ARC}$	46,571	$r_{R,GMNIA}$	1,2308
0	15	10,272	25	-32,40	0,92	-10,29	0,99	1,51	1,37	ok	$T_{,BIF_L}$	43,578	r_{Rk}	1,2308
0	16	10,568	25	-27,99	-0,38	1,84	1,51	1,55	1,41	ok	$T_{,BIF_ROT}$	12,308	$r_{Rd\ GMNIA}$	1,1189
0	17	10,601	25	-5,44	-1,05	3,83	29,61	1,55	1,41	ok	$t_{,GMNIA}$	12,308	**rRd>1**	**OK**
0	18	10,604	25	-4,47	-1,17	3,54	40,93	1,56	1,41	ok				
0	19	11,155	25	-32,40	0,92	-10,29	0,99	1,64	1,49	ok				
0	20	11,314	25	-29,69	-1,56	2,59	1,39	1,66	1,51	ok				
0	21	11,398	24	-15,59	-8,34	5,13	5,63	1,67	1,52	ok				
0	22	11,428	24	-17,20	-6,59	5,02	4,68	1,68	1,52	ok				
0	23	11,509	25	-28,55	-0,51	-10,47	1,29	1,69	1,53	ok				
0	24	11,535	25	-7,09	-1,05	2,35	23,79	1,69	1,54	ok				
0	25	11,535	25	-7,56	-1,13	2,15	21,55	1,69	1,54	ok				

Varianta 3, Stav 3														
			LA						LBA	GMNA				
	mod	rRcr	CSYS	SZ	SY	SYZ	rRpl	rRk	rRd	rRd>1	TIME			
0	1	8,535	25	-13,26	-0,78	-15,22	2,95	1,25	1,14	ok	$T_{, ARC}$	46,723	$r_{R,GMNA}$	1,2317
0	2	8,564	25	-20,10	-0,33	-13,53	2,02	1,26	1,14	ok	$T_{,BIF_L}$	43,699	r_{Rk}	1,2317
0	3	9,342	25	-13,66	-0,45	10,67	3,99	1,37	1,25	ok	$T_{,BIF_ROT}$	12,317	$r_{Rd\ GMNA}$	1,1197
0	4	9,371	25	-29,68	-0,92	6,62	1,31	1,37	1,25	ok	$t_{,GMNA}$	12,317	**rRd>1**	**OK**
0	5	9,412	25	-9,66	-0,73	12,42	4,88	1,38	1,25	ok				
0	6	9,518	25	-21,88	-0,35	10,04	2,05	1,40	1,27	ok				
0	7	9,581	25	-29,09	0,08	-5,91	1,33	1,41	1,28	ok				
0	8	9,590	24	-19,75	-9,78	-5,59	3,63	1,41	1,28	ok				
0	9	9,655	25	-16,41	-0,59	-8,61	3,52	1,42	1,29	ok				
0	10	9,665	24	-19,81	-7,13	-5,51	3,54	1,42	1,29	ok				
0	11	9,742	25	-12,53	-0,76	-11,09	4,34	1,43	1,30	ok				
0	12	9,799	25	-25,82	-0,21	6,21	1,68	1,44	1,31	ok	GMNIA			
0	13	10,122	25	-3,18	-0,94	6,02	26,54	1,48	1,35	ok	TIME			
0	14	10,125	25	-2,68	-1,04	5,79	30,08	1,48	1,35	ok	$T_{, ARC}$	46,788	$r_{R,GMNIA}$	1,2306
0	15	10,154	25	-32,77	0,87	-10,36	0,97	1,49	1,35	ok	$T_{,BIF_L}$	43,746	r_{Rk}	1,2306
0	16	10,613	25	-5,55	-1,05	3,81	28,92	1,56	1,41	ok	$T_{,BIF_ROT}$	12,306	$r_{Rd\ GMNIA}$	1,1187
0	17	10,616	25	-5,23	-0,94	3,97	30,01	1,56	1,42	ok	$t_{,GMNIA}$	12,306	**rRd>1**	**OK**
0	18	10,643	25	-27,78	-0,38	1,94	1,54	1,56	1,42	ok				
0	19	11,029	25	-32,77	0,87	-10,36	0,97	1,62	1,47	ok				
0	20	11,347	24	-15,72	-8,37	5,13	5,54	1,66	1,51	ok				
0	21	11,358	25	-28,88	-0,46	-10,54	1,26	1,67	1,51	ok				
0	22	11,380	24	-17,27	-6,59	5,02	4,64	1,67	1,52	ok				
0	23	11,410	25	-29,46	-1,55	2,68	1,41	1,67	1,52	ok				
0	24	11,523	25	-7,20	-1,05	2,34	23,07	1,69	1,54	ok				
0	25	11,523	25	-7,59	-1,13	2,23	21,25	1,69	1,54	ok				

Varianta 3, Stav 4														
			LA							LBA	GMNA			
	mod	rRcr	CSYS	SZ	SY	SYZ	rRpl	rRk	rRd	rRd>1	TIME			
0	1	8,604	25	-13,10	-0,86	-15,01	3,04	1,26	1,15	ok	$T_{, ARC}$	46,596	$r_{R,GMNA}$	1,2315
0	2	8,632	25	-19,72	-0,41	-13,36	2,10	1,27	1,15	ok	$T_{,BIF_L}$	43,537	r_{Rk}	1,2315
0	3	9,265	25	-13,66	-0,52	10,77	3,98	1,36	1,24	ok	$T_{,BIF_ROT}$	12,315	$r_{Rd\ GMNA}$	1,1195
0	4	9,333	25	-9,54	-0,81	12,48	4,91	1,37	1,24	ok	$t_{,GMNA}$	12,315	**rRd>1**	**OK**
0	5	9,370	25	-29,64	-1,00	6,56	1,32	1,37	1,25	ok				
0	6	9,507	25	-21,85	-0,43	9,97	2,07	1,39	1,27	ok				
0	7	9,608	25	-16,42	-0,68	-8,56	3,54	1,41	1,28	ok				
0	8	9,615	24	-19,67	-9,78	-5,54	3,66	1,41	1,28	ok				
0	9	9,692	24	-19,62	-7,11	-5,46	3,61	1,42	1,29	ok				
0	10	9,693	25	-12,55	-0,84	-11,03	4,36	1,42	1,29	ok				
0	11	9,783	25	-28,45	-0,02	-5,95	1,39	1,43	1,30	ok				
0	12	9,797	25	-25,78	-0,28	6,14	1,69	1,44	1,31	ok	GMNIA			
0	13	9,856	25	-3,22	-1,02	6,01	26,59	1,45	1,31	ok	TIME			
0	14	9,859	25	-5,31	-1,02	3,96	29,71	1,45	1,31	ok	$T_{, ARC}$	46,680	$r_{R,GMNIA}$	1,2305
0	15	10,327	25	-5,61	-1,13	3,80	28,75	1,51	1,38	ok	$T_{,BIF_L}$	43,583	r_{Rk}	1,2305
0	16	10,329	25	-3,41	-0,90	6,16	24,85	1,51	1,38	ok	$T_{,BIF_ROT}$	12,305	$r_{Rd\ GMNIA}$	1,1186
0	17	10,343	25	-32,04	0,81	-10,28	1,01	1,52	1,38	ok	$t_{,GMNIA}$	12,305	**rRd>1**	**OK**
0	18	10,649	25	-27,74	-0,46	1,89	1,54	1,56	1,42	ok				
0	19	11,080	25	-7,58	-1,26	2,16	21,70	1,62	1,48	ok				
0	20	11,081	25	-7,25	-1,28	1,98	24,04	1,62	1,48	ok				
0	21	11,210	25	-32,04	0,81	-10,28	1,01	1,64	1,49	ok				
0	22	11,412	25	-29,42	-1,62	2,62	1,42	1,67	1,52	ok				
0	23	11,417	24	-15,54	-8,39	5,09	5,67	1,67	1,52	ok				
0	24	11,448	24	-17,10	-6,64	4,98	4,74	1,68	1,53	ok				
0	25	11,588	25	-28,25	-0,57	-10,46	1,32	1,70	1,54	ok				