

Optimalizace tvaru podzemních horizontálních rotačně odlévaných plastových nádob z hlediska jejich stabilitní únosnosti

Bc. Hana Stupňánková

Diplomová práce
2013/2014



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Hana Stupňánková**
Osobní číslo: **T12679**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Optimalizace tvaru podzemních horizontálních
rotačně odlévaných plastových nádob s hlediska
jejich stabilní únosnosti**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární studii na dané téma.
2. Vypracujte FEM modely horizontálních podzemních nádob, vyráběných technologií rotačního odlévání.
3. Vypracujte parametrickou studii vlivu doby zatížení a změny geometrických parametrů nádoby na úroveň stabilní odolnosti při zatížení vnějším tlakem obsypu, případně tlakem spodní vody.
4. Získané výsledky vyhodnoťte s hlediska praktických aplikací.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Dle pokynů vedoucího diplomové práce.

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Oldřich Šuba, CSc.

Ústav výrobního inženýrství

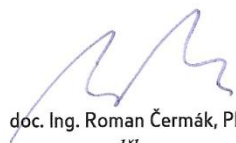
Datum zadání diplomové práce:

10. února 2014

Termín odevzdání diplomové práce:

12. května 2014

Ve Zlíně dne 10. února 2014



doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan



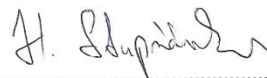
prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považuji se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně dne 8. 5. 2014


.....

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

MOTTO

„Proste a bude vám dáno, hledejte a naleznete, tlučte a bude vám otevřeno. Každý, kdo prosí, dostává, kdo hledá, nalézá a tomu, kdo tluče, bude otevřeno.“

(Bible, Lk 11; 9 – 10)

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych těmito řádky poděkovala mému vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Oldřichu Šubovi, CSc. za věnovaný čas, odborné rady a profesionální přístup při vedení.

Další dík patří mé rodině, která mě při studiu vždy podporovala. Zvláštní poděkování bych ráda věnovala své mamince, která mě i přes velkou ztrátu v naší rodině dokázala podpořit v magisterském studiu.

V neposlední řadě bych chtěla poděkovat doc. PhDr. Kateřině Ivanové, Ph.D., přednostce ústavu sociálního lékařství Univerzity Palackého za růst v duchovním životě, morální a psychickou podporu.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

ABSTRAKT

Diplomová práce je zaměřena na studii stabilitního chování podzemních horizontálních rotačně odlévaných nádob.

V teoretické části je popsáno mechanické chování tenkostěnných konstrukcí, stabilita tenkostěnných výrobků, teorie mezních stavů tenkostěnných konstrukcí a technologie rotomouldingu, neboli rotační odlévání.

Pro praktickou část jsou sestaveny FEM modely nádob, které jsme vystavili dvěma případy zatížení. Na závěr jsou výsledky parametrické studie jednotlivých případů zatížení detailně popsány a okomentovány.

Klíčová slova:

Stabilitní únosnost, mezní stav zatížení, geometrie nádob, rotační odlévání, termoplast

ABSTRACT

This master thesis is focused on study of the stability behavior of underground horizontal rotational moulded containers.

Mechanical behavior of thin-walled construction, stability of thin-walled products, theory of limit states of thin-walled structures and technology rotomoulding are presented in theoretical part.

For practical part are prepared FEM models of containers that we presented two cases of load. Results of parametric study of individual load cases are described in detail and commented.

Keywords:

Stability bearing capacity, limit state of load, geometry containers rotary molding, thermoplastic

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 MECHANICKÉ CHOVÁNÍ TENKOSTĚNNÝCH KONSTRUKCÍ	12
1.1 ROVINNÁ NAPJATOST	12
1.2 ROVINNÁ DEFORMACE	14
1.3 ELASTICITA V DVOUOSÉ NAPJATOSTI	14
1.3.1 Rovnice elasticity pro dvouosou napjatost.....	14
1.3.2 Deformace plošného izotropního prvku při čistém smyku	16
1.4 MEMBRÁNOVÁ NAPJATOST A JEJÍ DEFORMACE PRO TENKÉ DESKY A SKOŘEPINY	17
1.4.1 Řešení membránové napjatosti a deformace stěny	17
1.4.2 Kirchhoffova teorie ohybu – případ desky.....	19
1.5 ROTAČNÍ SYMETRIE SKOŘEPIN	21
1.5.1 Působení sil a napětí v případech rotační symetrie	21
1.5.2 Ohyb okrajů válcových skořepin	23
2 STABILITA TENKOSTĚNNÝCH VÝROBKŮ	27
2.1 JEDNOOSE TLAČENÁ IDEÁLNĚ ROVNÁ DESKA S VOLNÝMI BOČNÍMI OKRAJI.....	27
2.2 VÁLCOVÁ SKOŘEPINA ZATÍŽENÁ OSOVÝM TLAKEM	30
2.3 STABILITA VÁLCOVÝCH SKOŘEPIN	31
2.3.1 Dlouhá válcová skořepina, její stabilita při zatížení vnějším přetlakem.....	31
2.3.2 Vyztužení dlouhé válcové skořepiny.	34
2.3.3 Krátká válcová skořepina	34
2.4 MEZNÍ STAVY ÚNOSNOSTI	36
2.5 MEZNÍ STAVY ZPŮSOBILOSTI.....	36
3 ROTAČNÍ ODLÉVÁNÍ	37
3.1 PRINCIP ROTAČNÍHO ODLÉVÁNÍ.....	37
3.2 VÝHODY ROTAČNÍHO ODLÉVÁNÍ.....	38
3.3 NEVÝHODY ROTAČNÍHO ODLÉVÁNÍ.....	38
II PRAKTICKÁ ČÁST	39
4 GEOMETRICKÉ PARAMETRY NÁDOB TĚTO STUDIE	40
4.1 ZÁKLADNÍ GEOMETRIE	40
4.2 GEOMETRIE VYZTUŽENÁ ŽEBRY	40
5 PŘÍPADY ZATÍŽENÍ HORIZONTÁLNÍCH ROTAČNĚ ODLÉVANÝCH NÁDOB	42
5.1 PŘÍPAD ZATÍŽENÍ 1 – NÁDOBA ZAPUŠTĚNÁ V ZEMI, ZCELA PRÁZDNÁ – ZATÍŽENÍ POUZE TLAKEM OBSYPU	42
5.1.1 Provozní podmínky:	42
5.1.2 Uvažované stavy zatížení a okrajové podmínky konstrukce:	42
5.1.3 Příklad zatížení 1 – krátkodobý stav zatížení.....	43
5.1.3.1 Materiálové parametry konstrukce (nádoby):.....	43
5.1.3.2 Dovolená výpočtová namáhání pro kontrolu pevnosti podle EN 1778, čl. 4.1.1.....	43

5.1.4	Případ zatížení 1 – dlouhodobý stav zatížení	44
5.1.4.1	Materiálové parametry konstrukce (nádoby):	44
5.1.4.2	Dovolená výpočtová namáhání pro kontrolu pevnosti podle EN 1778, čl. 4.1.1	44
5.2	PROVOZNÍ PŘÍPAD ZATÍŽENÍ 2 – NÁDOBA ZAPUŠTĚNÁ V ZEMI, ZAPLNĚNÁ VODOU DO PŘEDEPSANÉ VÝŠKY – H – ZATÍŽENÍ HYDROSTATICKÝM TLAKEM A TLAKEM OBSYPU	44
5.2.1	Provozní podmínky:	45
5.2.2	Krátkodobý stav zatížení	45
5.2.3	Dlouhodobý stav zatížení	46
6	VÝSLEDKY A DISKUZE	47
6.1	PŘÍPAD ZATÍŽENÍ 1 – NÁDOBA ZAPUŠTĚNÁ V ZEMI, ZCELA PRÁZDNÁ – ZATÍŽENÍ POUZE TLAKEM OBSYPU	47
6.1.1	Krátkodobý případ zatížení 1	47
6.1.2	Dlouhodobý případ zatížení 1	51
6.1.3	Vliv změny modulu tečení na koeficient bezpečnosti mezního stavu ztráty stability pláště nádoby a tloušťku stěny nádoby	55
6.2	PŘÍPAD ZATÍŽENÍ 2 – PROVOZNÍ STAV – NÁDOBA ZAPUŠTĚNÁ V ZEMI, ZAPLNĚNÁ VODOU DO PŘEDEPSANÉ VÝŠKY – H – ZATÍŽENÍ HYDROSTATICKÝM TLAKEM A TLAKEM OBSYPU	59
6.2.1	Dlouhodobý provozní stav zatížení 2	59
6.2.2	Krátkodobý provozní stav zatížení 2	63
6.2.3	Vliv změny modulu tečení na koeficient bezpečnosti mezního stavu ztráty stability pláště nádoby a tloušťku stěny nádoby	67
6.3	PŘÍPAD ZATÍŽENÍ 2 – ZVLÁŠTNÍ PŘÍPAD PROVOZNIHO ZATÍŽENÍ – NÁDOBA ZAPUŠTĚNÁ V ZEMI, ZCELA ZAPLNĚNÁ VODOU – PŮSOBENÍ HYDROSTATICKÉHO TLAKU A TLAKU OBSYPU	71
6.4	ÚPRAVA KONSTRUKCE NÁDOBY (VYZTUŽENÍM ŽEBRY), VLIV ŽEBER NA STABILITNÍ ÚNOSNOST	73
6.5	IMPERFEKCE A JEJICH VLIV NA STABILITNÍ ÚNOSNOST NÁDOBY	74
7	MATERIÁLOVÉ PARAMETRY	75
8	SOUHRN VÝSLEDKŮ	76
	ZÁVĚR	77
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	79
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	80
	SEZNAM OBRÁZKŮ	83
	SEZNAM TABULEK	85
	SEZNAM GRAFŮ	86
	SEZNAM PŘÍLOH	87

ÚVOD

Pro dnešní technickou praxi, kde se snažíme, co nejvíce snížit náklady výroby jsou výrobky z levných a recyklovatelných polymerních materiálů více než žádané. Z tohoto důvodu se ve všech možných odvětvích, jako je potravinářský průmysl (pet-lahve, kelímky), lékařství, automobilový průmysl, elektrotechnika aj., setkáváme s polymerními materiály.

Ovšem od původně používaných materiálů se polymery chováním poněkud liší. Proto je potřeba, se při konstruování a dimenzování takových výrobků, držet pravidel, která jsou pro konstrukci polymerních a kompozitních výrobků specifická

Zvláštním případem jsou tenkostěnné výrobky, u kterých je předpoklad nízké tuhosti a s ní spojené časové závislosti, po kterou si materiál udrží své mechanické vlastnosti. Pokles modulu tečení a následně způsobená deformace právě vlivem stejné velikosti zatížení, ale poklesu modulu tečení materiálu, jsou základními nositeli pro destrukci tenkostěnných výrobků.

Dalším aspektem je způsob aplikace (montáže) tenkostěnných výrobků. Pokud vezmeme konkrétní případ, jako jsou tenkostěnné rotačně odlévané nádoby (např. čističky odpadních vod, ...), zjistíme, že v praxi se setkáme s nedodržením normou stanovených montážních předpisů, jako je například zasypání nádob zeminou namísto šterkem. V takovémto případě je pak nádoba zatížena tlaky, na které nabyla dimenzována a dochází k předčasnému vybočení pláště nádoby a následné totální destrukci.

Cílem této práce, je tedy navrhnout případně upravit geometrii konkrétního typu nádoby, nalézt optimální tloušťku stěny, dále navrhnout optimální vyztužení podzemní horizontální rotačně odlévané nádoby, která by vyhovovala všem bezpečnostním parametrům danými normami.

I. TEORETICKÁ ČÁST

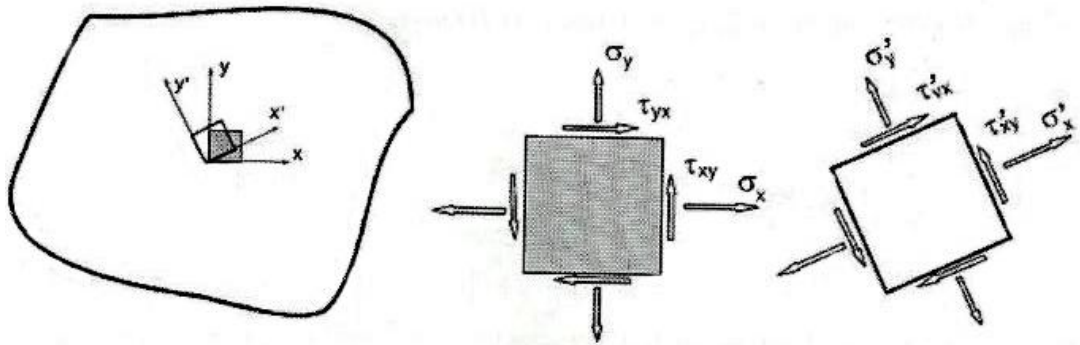
1 MECHANICKÉ CHOVÁNÍ TENKOSTĚNNÝCH KONSTRUKCÍ

V úvodu této kapitoly je třeba zmínit, že v případě řešení mechanického chování tenkostěnných konstrukcí, jak bude dále detailněji popsáno, se jedná o dvouosou napjatost. Z tohoto důvodu je třeba nejprve zabrousit do základů rovinné napjatosti a deformace a přiblížit tuto problematiku pro další aplikaci v mechanickém chování skořepin a tenkých desek.

1.1 Rovinná napjatost

Rovinná napjatost jinak řečeno také dvouosá napjatost je dána tím, že její vnitřní síly v průřezech leží pouze v rovině střednice a ve směru kolmém jsou složky napjatosti nulové.

Jako příklad vezměme element jednotkových rozměrů (1x1 mm) viz obr 1. Na tento vyňatý element působí složky normálových a smykových napětí, tak že musí být v rovnováze. „Složky napětí nahrazují účinek odstraněného okolí elementu.“ Jak je znázorněno na obrázku a dáno podmínkou rovnováhy, silové složky rovnováhy ve směru x, y jsou shodné. Pro splnění momentové podmínky rovnováhy platí, že smykové složky napětí jsou sdružené, tj. mají stejnou velikost a směřují ke stejné hraně elementu. Pokud by momentová podmínka rovnováhy neplatila, element by rotoval kolem své osy. [3]

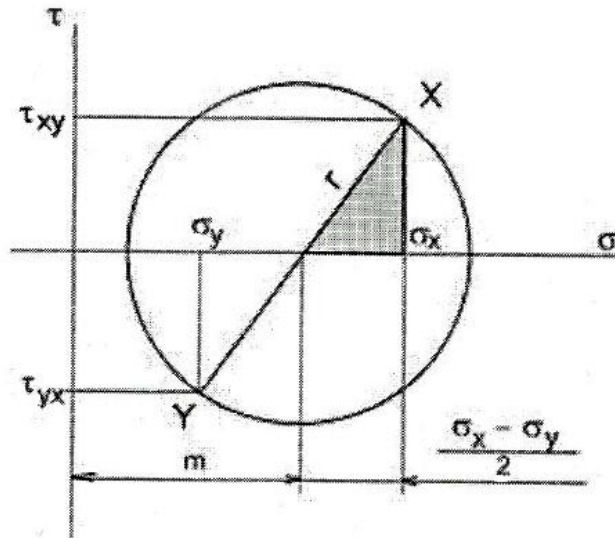


Obrázek 1 Element 1x1 mm dvouosé napjatosti. [3]

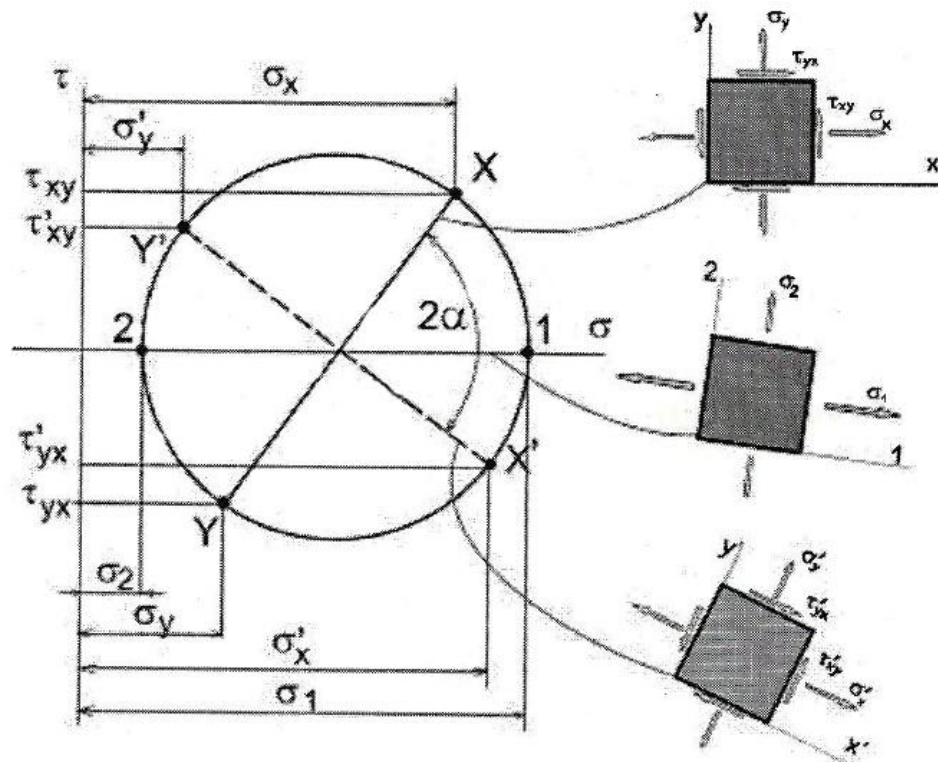
„Stav napětí v místě (bodě) rovinného tělesa je tedy v určitém lokálním souřadném systému popsán třemi navzájem nezávislými hodnotami – velikostmi složek σ_x , σ_y , τ_{xy} .“

V případě pootočení elementu o určitý úhel φ působí na takto pootočený element jiné hodnoty normálových a smykových složek napětí, existuje však transformační vztah. Veličiny, které se mohou transformovat, nazýváme tenzorové. [3]

Složky rovinné napjatosti i pootočeného souřadného systému lze vyobrazit na tzv. Mohrově kružnici obrázek 2 a 3.



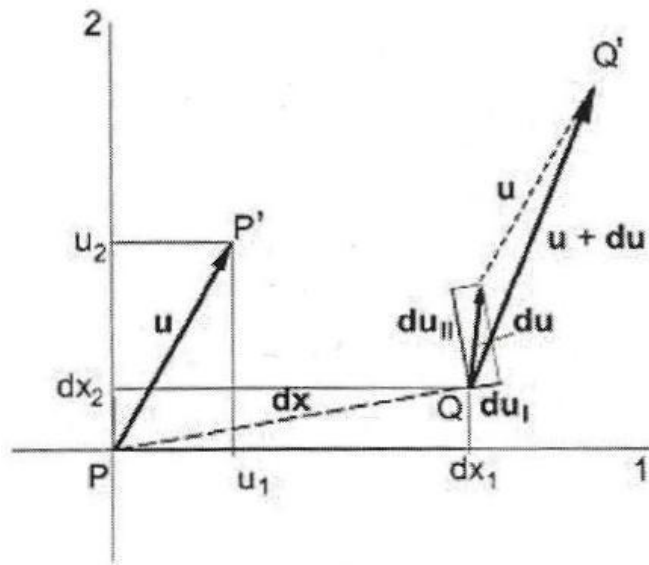
Obrázek 2 Mohrova kružnice rovinné napjatosti. [3]



Obrázek 3 Mohrova kružnice – pootočení souřadného systému, hlavní složky napětí. [3]

1.2 Rovinná deformace

Pro přiblížení představy rovinné deformace je vyobrazen obrázek č. 4. „Přetvořením tělesa se obecně změní polohy jeho jednotlivých bodů. Bod P se přesune do polohy P' . Vektor u , se pak nazývá posuvem v bodě P . K bodu P souměrný (tj. konečně blízký) bod Q má posuv $(u+du)$.“ [3]



Obrázek 4 Rovinná deformace – přetvoření tělesa. [3]

Analogicky k Mohrově kružnici napětí, lze sestavit Mohrovu kružnici pro deformace.

1.3 Elasticita v dvousé napjatosti

V předchozích podkapitolách 1.1 rovinné napjatosti a 1.2 rovinné deformace nebyl zahrnut vliv mechanického chování tělesa. Daný typ chování materiálu byl popsán pro oblast malých deformací. V oblasti malých deformací platí Hookeův zákon – čili úměrnost mezi deformací a zatížením. [3]

1.3.1 Rovnice elasticity pro dvousou napjatost

Pokud namáháme plošný element normálovým napětím v ose x , pak deformace v tomto směru je rovna:

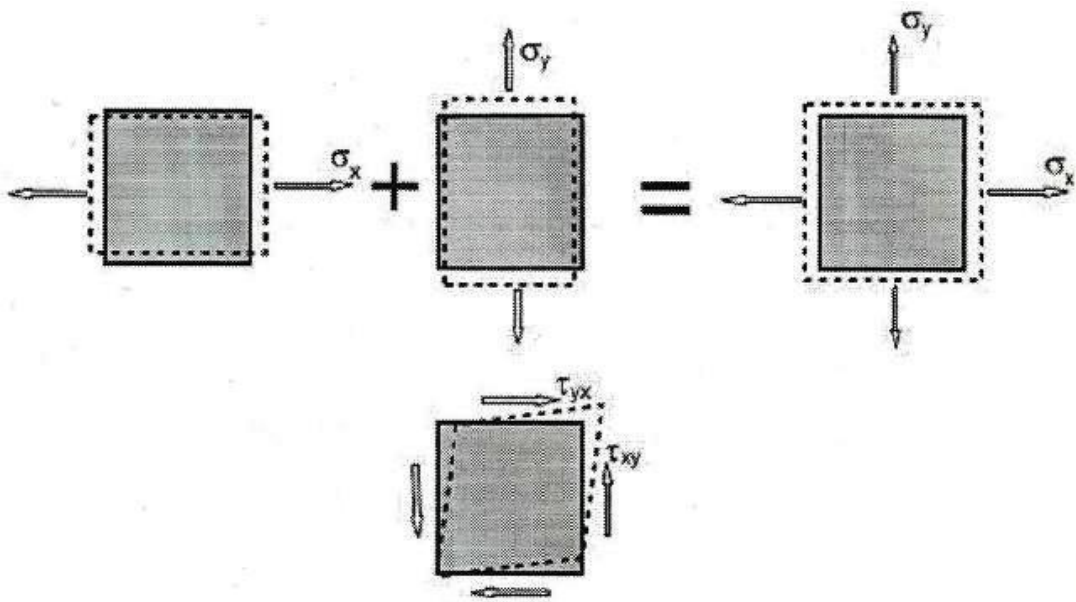
$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} \sigma_x \quad (1)$$

A ve směru y pak

$$\varepsilon_y = -\nu\varepsilon_x = -\frac{\nu}{E}\sigma_x \quad (2)$$

V případě že by napětí působilo v směru y, by pak deformace elementu byla rovna:

$$\varepsilon_x = -\nu\varepsilon_y = -\frac{\nu}{E}\sigma_y, \quad \varepsilon_y = \frac{1}{E}\sigma_y \quad (3, 4)$$



Obrázek 5 Normálové a smykové složky napětí – dvouosá napjatost. [3]

Při předpokladu malých deformací a z něho vyplývajících chování materiálu dle lineární elasticity platí princip superpozice. Deformace prvku při dvouosé napjatosti σ_x a σ_y jsou:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu\sigma_y), \quad \varepsilon_y = \frac{1}{E}(\sigma_y - \nu\sigma_x) \quad (4, 5)$$

„Působí-li kromě normálových napětí i smykové (sdružené) složky $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ způsobí smykovou deformaci – změnu pravého úhlu elementu.“ [3]

$$2\varepsilon_{xy} = \frac{1}{G}\tau_{xy} \quad (6)$$

kde G je smykový modul pružnosti. [3]

Při maticovém zápisu pak:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ 2\varepsilon_{xy} = \gamma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{1}{E} & 0 \\ -\frac{1}{E} & \frac{1}{E} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} \quad (7)$$

symbolicky matici můžeme zapsat ve tvaru

$$(\varepsilon) = [C](\sigma), \quad (8)$$

kde [C] nazýváme maticí poddajnosti. Inverzí rovnic z matice dostáváme vztah pro vyjádření složek napětí v závislosti na složkách deformace.

$$(\sigma) = [C]^{-1}(\varepsilon) = [S](\varepsilon) \quad (9)$$

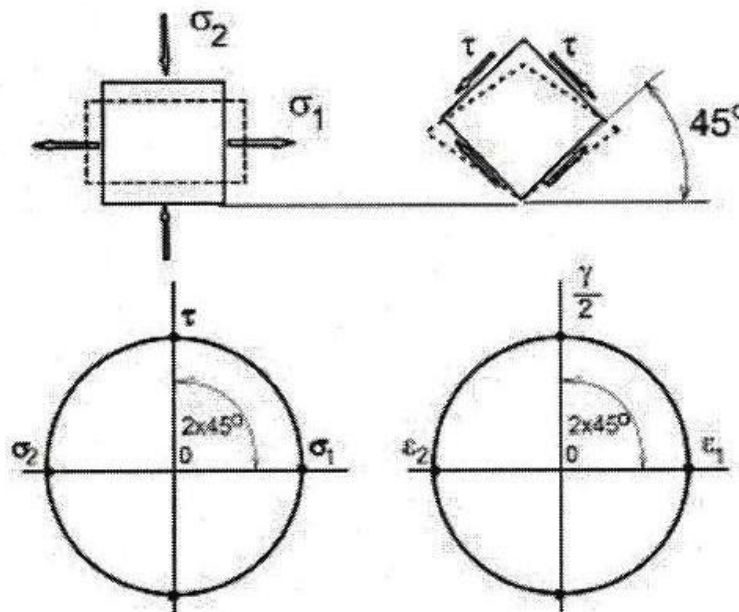
$$[S] = \begin{bmatrix} E^{**} & \nu E^{**} & 0 \\ \nu E^{**} & E^{**} & 0 \\ 0 & 0 & G \end{bmatrix} \quad (10)$$

s označením

$$E^{**} = \frac{E}{1 - \nu^2} \quad (11)$$

je matice tuhosti izotropního materiálu v rovině. [3]

1.3.2 Deformace plošného izotropního prvku při čistém smyku



Obrázek 6 Mohrovy kružnice napětí a deformace – čistý smyk. [3]

Z předchozího vztahu (rovnice č. 11) je normálová deformace ve směru hlavní osy rovna

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E}(\sigma_1 - \nu\sigma_2) \quad (12)$$

pokud pootočíme prvek o 45° jsou jeho normálové deformace nulové a jeho smyková deformace dle rovnice 6 je:

$$\gamma = \frac{1}{G}\tau \quad (13)$$

Z Mohrovy kružnice deformace a Mohrovy kružnice napětí víme, že:

$$\varepsilon_1 = \frac{\gamma}{2}, \quad \sigma_1 = \tau, \quad \sigma_2 = -\tau \quad (14)$$

po dosazení:

$$\gamma/2 = \frac{1}{E}[\tau - \nu(-\tau)] = \frac{\tau}{E}(1 + \nu) \quad (15)$$

při srovnání s rovnicí 13 se pak

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (16)$$

G je modul pružnosti ve smyku izotropního materiálu. [3]

1.4 Membránová napjatost a její deformace pro tenké desky a skořepiny

Pokud uvážíme, že těleso má jeden rozměr zanedbatelný oproti zbylým dvěma, můžeme složky napětí ve směru normály ke střední ploše zanedbat. Příkladem jsou tenkostěnné výrobky tj. desky a skořepiny. Za výše zmíněného předpokladu lze tvrdit, že u tenkostěnných výrobků existuje pouze dvouosá napjatost. [3]

1.4.1 Řešení membránové napjatosti a deformace stěny

Jako příklad si představme element desky jednotkových rozměrů (1×1 mm), viz obr 1. Tento element je po bočních plochách namáhám pouze normálovými tahovými silami N_x, N_y . Velikost těchto sil, které připadají na jednotkovou šířku průřezu desky je n_x, n_y a jsou výslednicemi elementárních sil v průřezech daného elementu $\sigma_x dS, \sigma_y dS$. [3]

Výpočet síly N_i je dán vztahem:

$$N_i = \int_S \sigma_i^M dS = \sigma_i^M dS, \quad i = x, z \quad (17)$$

$$\sigma_i^M = \frac{n_i}{s}, \quad n_i = \frac{N_i}{b}, \quad i = x, y \quad (18, 19)$$

Každá vrstva elementární tloušťky dy je namáhána dvousou napjatostí, což označujeme jako „membránovou napjatost“. Pokud pootočíme souřadný systém, změní se složky membránové napjatosti podle transformačních vztahů, které jsou uvedeny v předchozích podkapitolách.

Tedy z rovnic elasticity pak bude:

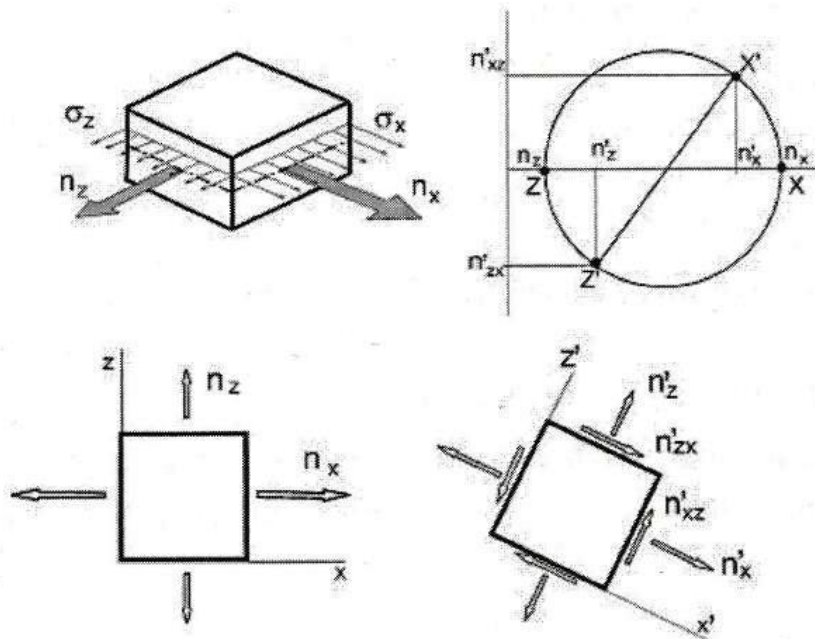
$$\varepsilon_i^M = \frac{1}{E} (\sigma_i^M - \nu \sigma_j^M), \quad i, j = x, y \quad (20)$$

$$\sigma_i^M = E^{**} (\varepsilon_i^M + \nu \varepsilon_j^M), \quad i, j = x, z \quad (21)$$

Po dosazení:

$$(\varepsilon_i^M + \nu \varepsilon_j^M) = \frac{n_i}{E^{**} s}, \quad i, j = x, z \quad (22)$$

E^{**} . s je membránová tuhost stěny desky/skořepiny. [3]

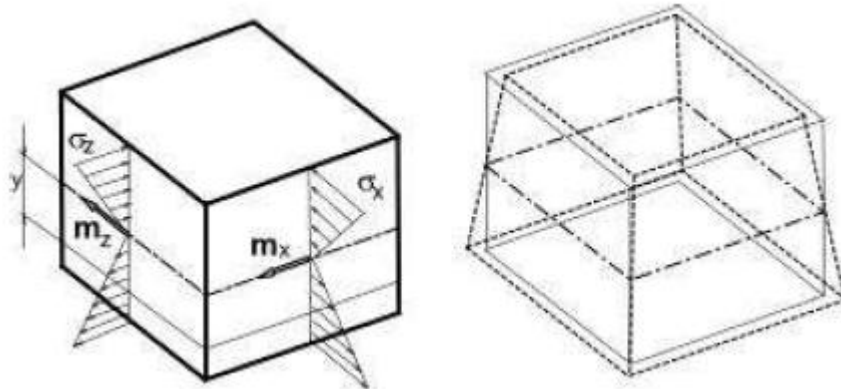


Obrázek 7 Složky membránové napjatosti – element 1x1 mm. [3]

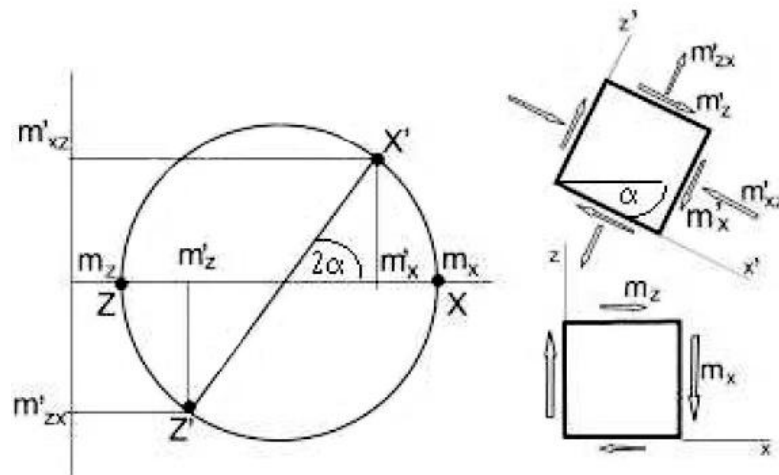
1.4.2 Kirchhoffova teorie ohybu – případ desky

Kirchhoffova teorie ohybu desek je založena na předpokladech:

- 1) Normály ke střední ploše desky zůstávají přímé a kolmé k této ploše i po deformaci
- 2) Střední plocha se při ohybu desky plošně nedeformuje



Obrázek 8 Složky ohybových momentů a napětí při čistém Kirchhoffově ohybu desky. [3]



Obrázek 9 Mohrova kružnice – pootočení souřadného systému. [3]

Element desky má pak v myšlené vrstvě složky poměrné deformace vzdáleny o hodnotu y od střední plochy

$$\varepsilon_i(y) = \frac{1}{r_i} y, \quad i = x, z \tag{23}$$

Podle výše zmíněných předpokladů se boční stěny elementu pootácejí kolem své neutrální osy (průsečnice boční stěny se střední plochou) a zůstávají rovinné. [3]

Za použití inverze rovnic elasticity jsou složky napjatosti rovny:

$$\sigma_i = E^{**}(\varepsilon_i + \nu\varepsilon_j), \quad i, j = x, z \quad (24)$$

„Ohybové momenty m_x, m_z jsou vyvažovány v průřezech stěny vnitřními elementárními normálovými silami podle rovnic rovnováhy.“

$$m_i = \int_{(S)} \sigma_i(y) dy \cdot y, \quad i, j = x, z \quad (25)$$

Spojením předchozích dvou rovnic č. 24 a 25 je pak:

$$\frac{1}{r_i} + \nu \frac{1}{r_j} = \frac{m_i}{D}, \quad i, j = x, z \quad (26)$$

$$D = E^{**} j, \quad E^{**} = \frac{E}{(1 - \nu^2)}, \quad j = \frac{s^3}{12} \quad (27, 28, 29)$$

kde D je válcová (cylindrická) ohybová tuhost stěny desky, skořepiny a j je kvadratický moment plochy průřezu desky o šířce 1×1 mm. [3]

Při ohybu do válcové plochy, platí že $1/r_z = 0$ ($m_z = \nu \cdot m_x$) dostáváme rovnici:

$$\frac{1}{r_x} = \frac{m_x}{D} \quad (30)$$

Zvláštním případem je pak ohyb do kulové plochy, kde platí, že $m_x = m_z$, z rovnice

$$\frac{1}{r_x} = \frac{1}{r_z} = \frac{1}{r} \quad (31)$$

vzniká deformační plocha střednice, která je rovna:

$$\frac{1}{r} = \frac{m}{E^* j}, \quad E^* = \frac{E}{(1 - \nu)} \quad (32, 33)$$

a ohybová napětí v desce pak budou nabývat hodnot dle vztahu:

$$\sigma_i(y) = \frac{m_i}{j} y, \quad i = x, z \quad (34)$$

Vhledem ke kvadratickému momentu průřezu desky o šířce 1×1 mm napětí v krajních plochách desky je:

$$\sigma_i = \frac{6m_i}{s^2}, \quad i = x, z \quad (35)$$

Za předpokladu, že v průřezech působí pouze ohybové momenty m_x, m_z v daném globálním souřadnicovém systému x, z , jsou σ_x, σ_z hlavními napětími, avšak při obecném ohybu desky nepůsobí pouze tyto ohybové momenty, ale i smyková napětí, jejichž výslednicemi jsou krouticí momenty $m_{xz} = m_{zx}$.

„Rovnice představují (až na zvláštní případ ohybu do válcové plochy, kdy $m_z = \nu m_x$) deformační plochu nerozvinutelnou, což odporuje výchozímu předpokladu o nulové deformaci střední – neutrální plochy. Ve skutečnosti vznikají při dvousém ohybu desky kromě napětí ohybových také napětí membránová.“ V případě, že tato napětí způsobují pouze malý průhyb desky, lze jejich působení zanedbat.

Pokud klesá (při zatížení a daných okrajových podmínkách) ohybová tuhost, což může zapříčinit např. snížení tloušťky nebo modulu pružnosti, narůstá podíl membránových napětí. Díky tomu roste chyba v určení napjatosti a deformace při ohybu desky podle Kirchhoffovy teorie. V oblasti tenkých desek, kde nelze velikost membránových napětí vůči ohybovým zanedbat, není možné Kirchhoffovu teorii ohybu desek aplikovat. Dalším případem jsou tzv. membrány, kde zcela převažují membránová napětí nad ohybovými. U takového případu mají stěny prvku zanedbatelnou ohybovou tuhost. [3]

1.5 Rotační symetrie skořepin

1.5.1 Působení sil a napětí v případech rotační symetrie

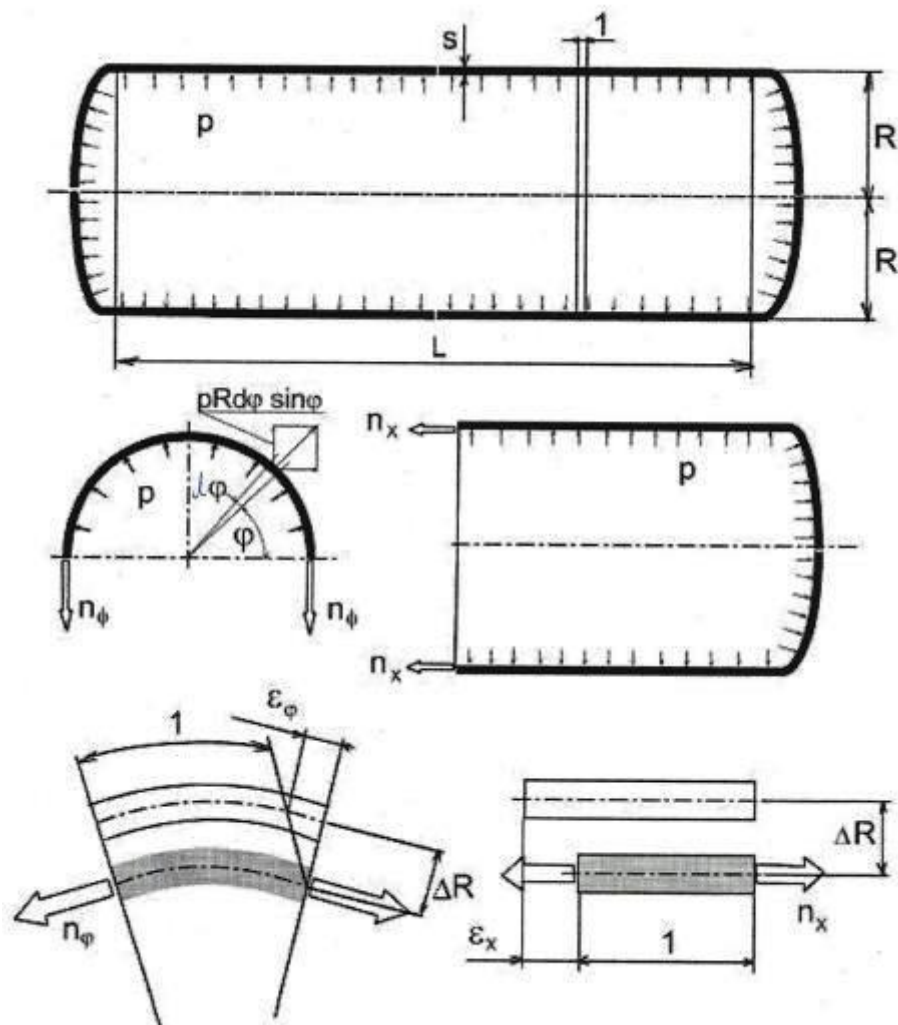
Nejčastějším typem souměrné skořepiny je plášť válcové tenkostěnné nádoby, která je zatížena vnitřním přetlakem. Při výpočtu membránové napjatosti a deformace lze využít symetrie a to tak, že uvolníme část nádoby řezem kolmým k ose. Pak bude rovnice rovnováhy v ose nádoby nejspíše:

$$\pi R^2 p = \sigma_x 2\pi R s \quad (36)$$

„Bez ohledu na tvar dna, je osová výslednice sil rovna součinu průmětu plochy dna do osy nádoby a působícího tlaku.“ [3]

Axiální membránové napětí v plášti nádoby pak je:

$$\sigma_x = \frac{pR}{2s} \quad (37)$$



Obrázek 10 Metoda řezu rotačně symetrické válcové tenkostěnné nádoby. [3]

„Oddělíme-li myšleně dvěma řezy kolnými k ose válce z pláště prstenec jednotkové šířky, platí pro jeho polovinu rovnice rovnováhy.“

$$2\sigma_{\varphi}s = \int_0^{\pi} pr \sin \varphi d\varphi = 2pR \quad (38)$$

Z čehož pak obvodové napětí je rovno:

$$\sigma_{\varphi} = \frac{pR}{s} \quad (39)$$

kde \mathbf{p} je hodnota vnitřního přetlaku, \mathbf{R} je poloměr nádoby a \mathbf{s} je tloušťka stěny skořepiny. [3]

Jak již bylo uvedeno, v plášti tenkostěnné válcové nádoby působí dvouosá membránová napjatost. Tato napjatost s normálovými složkami napětí působí ve směru osovém

(axiálním) a obvodovém. Pro obvodové napětí platí, že je dvakrát větší než osově. „Poněvadž v osovém ani v obvodovém řezu nepůsobí napětí smyková, jsou to hlavní řezy, a σ_φ , σ_x jsou hlavní napětí membránové napjatosti válcové stěny.“ [3]

Deformace pláště válcové nádoby lze odvodit z rovnic elasticity. Z čehož vyplývá, že:

$$\varepsilon_x^M = \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu\sigma_\varphi), \quad \varepsilon_\varphi^M = \frac{1}{E}(\sigma_\varphi - \nu\sigma_x) \quad (40, 41)$$

po dosazení pak

$$\varepsilon_x^M = \frac{pR}{ES}(0,5 - \nu), \quad \varepsilon_\varphi^M = \frac{pR}{ES}\left(1 - \frac{\nu}{2}\right) \quad (42, 43)$$

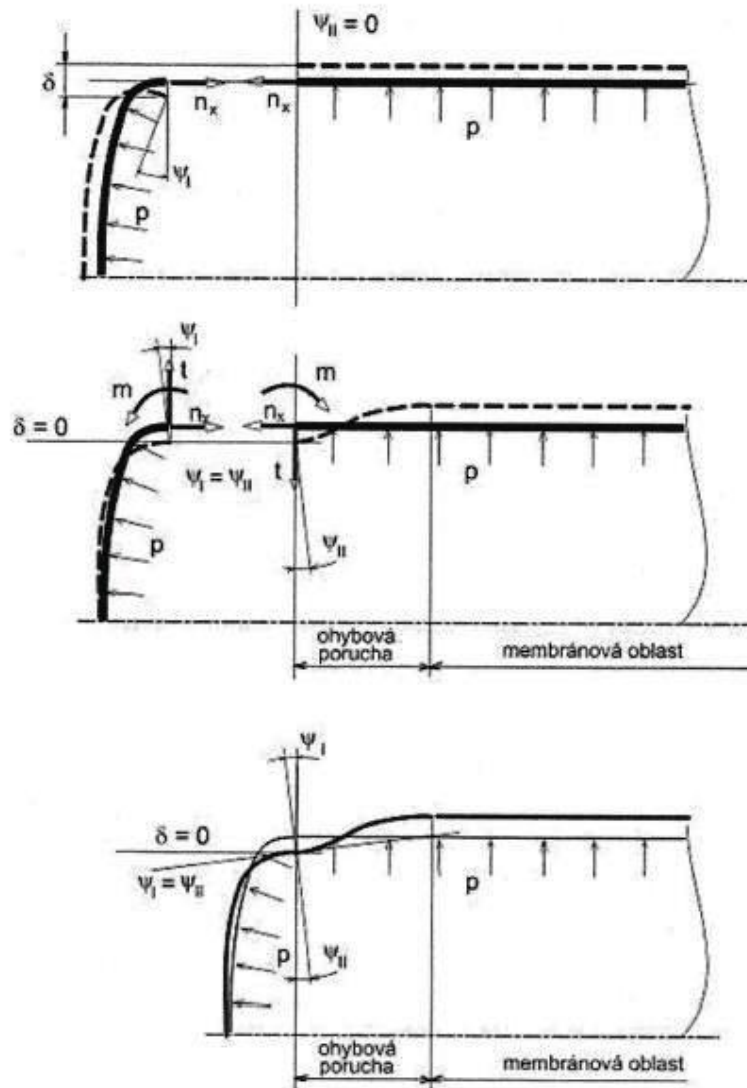
Z předchozí rovnice je následně změna poloměru pláště při vlivu vnitřního přetlaku rovna:

$$\Delta R = \sigma_\varphi^M r = \frac{pR^2}{ES}\left(1 - \frac{\nu}{2}\right) \quad (44)$$

1.5.2 Ohyb okrajů válcových skořepin

U válcových skořepin, je v některých místech zabráněno volné membránové deformaci. Tato místa jsou konkrétně okraje válcových skořepin, které jsou v praxi řešeny jako dna víka, listy přírub, apod.

Pokud oddělíme dno nádoby od jejího pláště, obě tyto oddělené části se budou chovat jinak. Pro správné řešení nestačí pouze zavést membránové osově síly, ale nutné kvůli natočení přidat ještě sílu t a ohybový moment m . Takového vnitřní silové účinky nám představují vzájemné působení dna a válcového pláště skořepiny. Hodnoty vnitřních silových účinků dostáváme z deformačních podmínek. „Zřejmě platí rovnost natočení $\psi_I = \psi_{II}$ a podmínka nulového rozdílu radiálních posuvů okrajů válcové skořepiny a dna.“ [3]



Obrázek 11 Chování okrajů válcových skořepin. [3]

Jako příklad výpočtu je dána válcová skořepina zatížená na svém volném okraji ohybovým momentem m a příčnou silou t . Rozbor ohybu okraje lze uvažovat jako myšlený podélný pásek jednotkové šířky. Průhyb pásku, v místě vzdáleném o vzdálenost x od okraje, je označen jako $y(x)$. Změna poloměru střední plochy je pak rovna:

$$\Delta R(x) = -y(x) \quad (45)$$

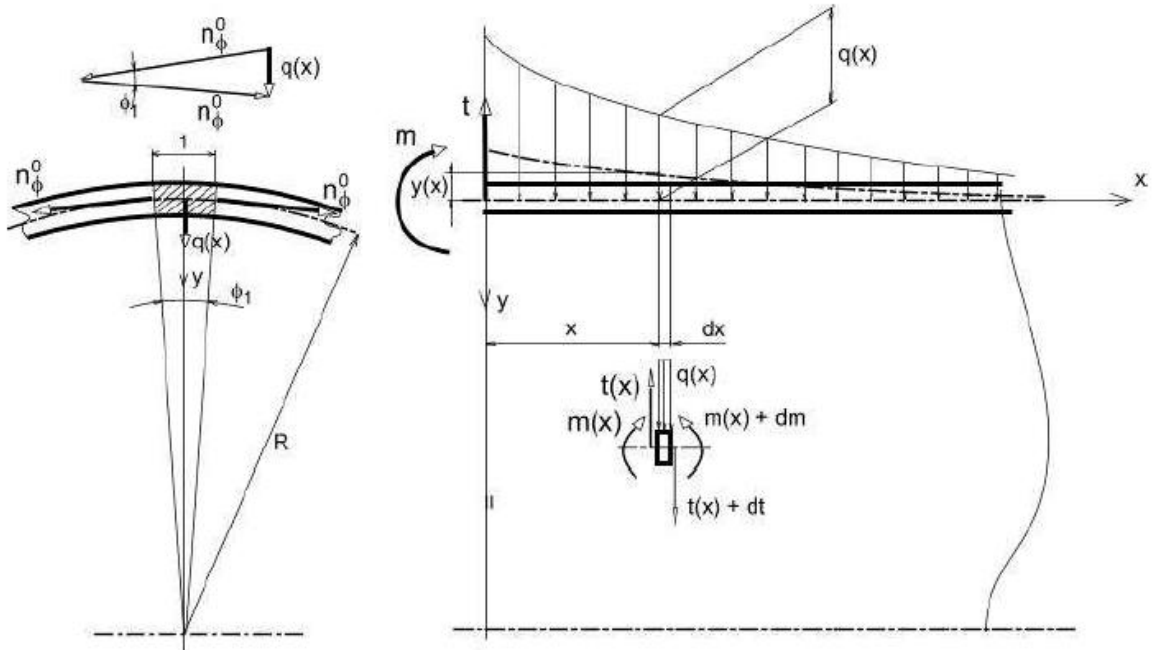
Při změně se pak plášť deformuje dle vztahu:

$$\varepsilon_{\varphi}(x) = \frac{\Delta R(x)}{R} = -\frac{y(x)}{R} \quad (46)$$

deformaci odpovídá obvodová membránová síla:

$$n_{\phi}^0(x) = -Es \frac{y(x)}{R} \quad (47)$$

kde $E.s$ je tuhost v tahu/tlaku myšlených prstenců jednotkové šířky, vymezených dvěma příčnými řezy. [3]



Obrázek 12 Působící síly a momenty na element nosníku – pásku. [3]

Radiální výslednice pásků, jsou dány:

$$q(x) = n_{\phi}^0 \phi_1 = -Es \frac{y(x)}{R} \quad (48)$$

kde úhel ϕ_1 je malý.

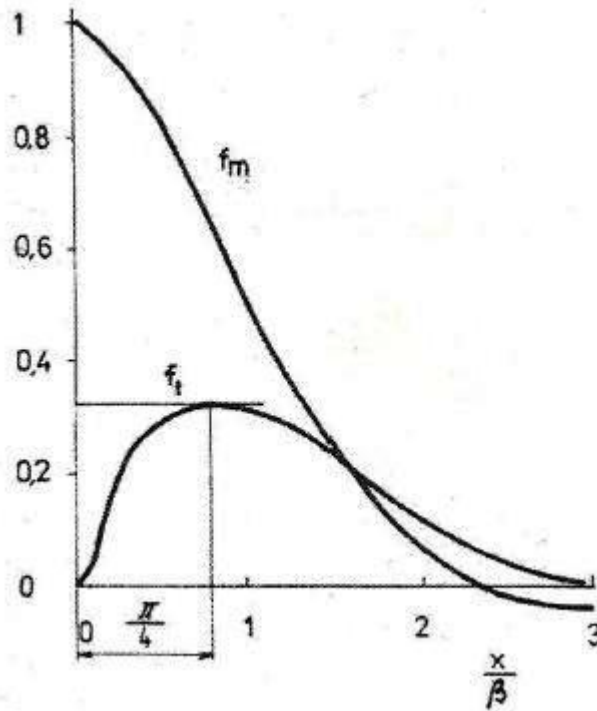
Ohybové deformace pásků jsou dány rovnicí:

$$y''(x) = -\frac{m(x)}{D}. \quad (49)$$

Z rovnic rovnováhy elementu pásků vyplývají známé Schwedlerovy věty. Jejich úpravou do diferenciálního tvaru, a následným všeobecným řešením, se dostáváme k matematickým vztahům funkčním. Diagram vyplývající z těchto funkcí nám udává, do jakých průměrů lze hodnoty momentu \mathbf{m} a síly \mathbf{t} zanedbat. [3]

$$f_m(x) = e^{-\frac{x}{\beta}} \left(\sin \frac{x}{\beta} + \cos \frac{x}{\beta} \right) \quad (50)$$

$$f_t(x) = e^{-\frac{x}{\beta}} \left(\sin \frac{x}{\beta} \right) \quad (51)$$

Průběh funkcí f_m a f_t [3]

Podle průběhu funkcí a jejich grafického znázornění lze tvrdit, že v případě $x = 3\beta$, lze již hodnoty f_m a f_t a tedy i hodnotu ohybového momentu m_x zanedbat. Ohyb okrajů je pak jen místní povahy, tj. v relativně malé vzdálenosti od okraje jsou již napětí vlivem okrajů zanedbatelná.

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{D \cdot R}{E \cdot s}} \quad (52)$$

kde D je válcová ohybová tuhost, R je poloměr válcové nádoby, $E \cdot s$ je tuhost v tahu/tlaku myšlených prstenců jednotkové šířky, vymezených dvěma příčnými řezy. [3]

2 STABILITA TENKOSTĚNNÝCH VÝROBKŮ

U tenkostěnných konstrukcí výrobků se setkáváme s vlivem tlakových napětí, která mohou zapříčínovat ztrátu stability. Podle daného namáhání a konstrukce výrobku se setkáváme s místní nebo s celkovou ztrátou stability, která vede k destrukci daného výrobku.

Pro stabilitu tenkostěnných výrobků rozeznáváme dva typy konstrukcí, kterými jsou deskové a skořepinové. U obou těchto typů je důležitým faktorem ohybová tuhost dané konstrukce. Na ohybovou tuhost stěny mají vliv tyto faktory:

- Tenkostěnnost (resp. tloušťka stěny)
- Nízká tuhost
- Doba zatížení
- Teplota
- Tlakové membránové namáhání

V praxi pak musíme posuzovat jednotlivé případy zatížení vnějších účinků, které vyvolávají membránová tlaková napětí, ale musí být brány v potaz i ostatní vlivy. [1]

2.1 Jednoose tlačená ideálně rovná deska s volnými bočními okraji

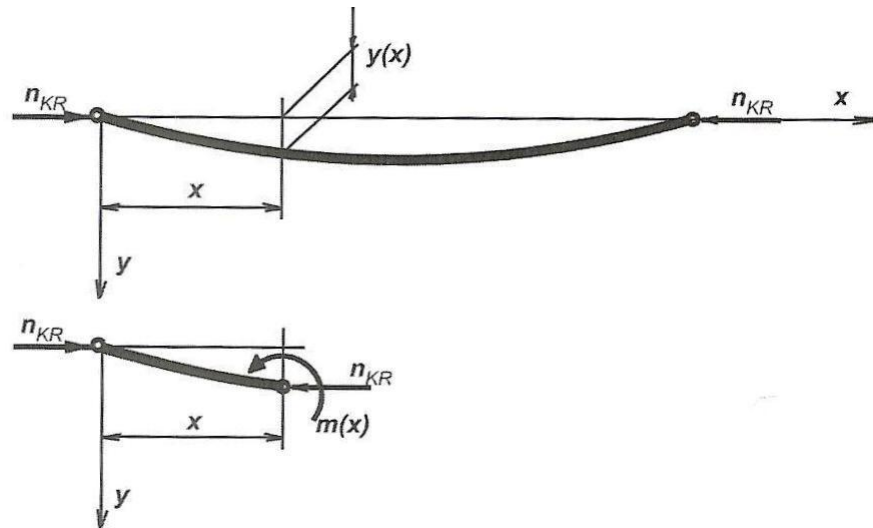
Základním případem pro chování tenkostěnných výrobků při jejich tlakovém zatížení je jednoose tlačená ideálně rovná deska s volnými bočními okraji.

Tento případ zatížení je možno řešit dvěma způsoby. Prvním je Eulerovo řešení, při kterém se takto zatížená deska (membránovou silou) při daných podmínkách chová jako široký nosník namáhaný na vzpěr. Proto při dosažení kritické hodnoty zatížení dochází k vybočení (průhybu do válcové plochy).

Z následujícího obrázku č. 13 je zřejmé, že základním vztahem pro řešení kritického zatížení je rovnice:

$$y''(x) = -\frac{m(x)}{D} \quad (53)$$

kde D je válcová tuhost desky. [1]



Obrázek 13 Eulerovo řešení membránové napjatosti tenkostěnných výrobků. [1]

Při použití rovnice:

$$(\sigma)^* = \frac{1}{V} \int_{(V)} (\sigma) dV, \quad (\varepsilon)^* = \frac{1}{V} \int_{(V)} (\varepsilon) dV \quad (54)$$

kde $(\sigma)^*$ a $(\varepsilon)^*$ jsou složky středních napětí a deformace, V je objem charakteristického elementu struktury pak následně vyplývá:

$$y''(x) + k^2 y(x) = 0 \quad (55)$$

Dále pak při použití rovnic rovnováhy elementu a všeobecné rovnice je zřejmé že:

$$y(x) = A \sin kx + B \cos kx \quad (56)$$

kde A , B jsou integrační konstanty.

Pro $x = 0$ je $y = 0$ a pro $x = l$ je $y = 0$ z čehož následně vyplývá vztah:

$$0 = A \sin kl \quad (57)$$

kde A je amplituda křivky (v daném případě průhyb y).

Důležité je dodat, že tato rovnice je splněna pro $kl = 0, \pi, 2\pi, \dots$

První hodnota odpovídá nezatíženému stavu, z čehož vyplývá, že nejmenší hodnota kritického zatížení je vzata z první vlastní hodnoty. [1]

$$k^2 = \frac{n_{kr}}{D}, \quad k^2 l^2 = \pi^2 \quad (58, 59)$$

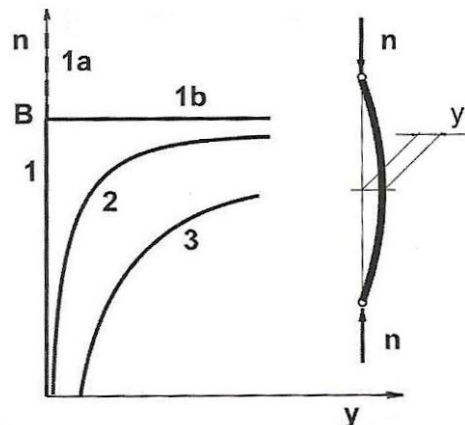
Po dosazení všech vztahů dostáváme Eulerovo řešení pro kritickou sílu tlačného prutu na vzpěr.

$$n_{kr} = \frac{\pi^2 D}{l^2} \quad (60)$$

Ohybová tuhost prutu je v tomto případě nahrazena válcovou tuhostí, která představuje ohybovou tuhost pásku jednotkové šířky při ohybu do válcové plochy.

Dalším principem řešení je z pohledu energie, který se na stejnou problematiku dívá z pohledu úbytku potenciální energie a deformační práce. Při použití tohoto principu se opět dostáváme ke stejnému vztahu n_{kr} , proto řešení za pomoci energetického principu dále není rozváděno. [1]

Pro lepší představu je na dalším obrázku diagram závislosti membránových sil n na deformaci y .

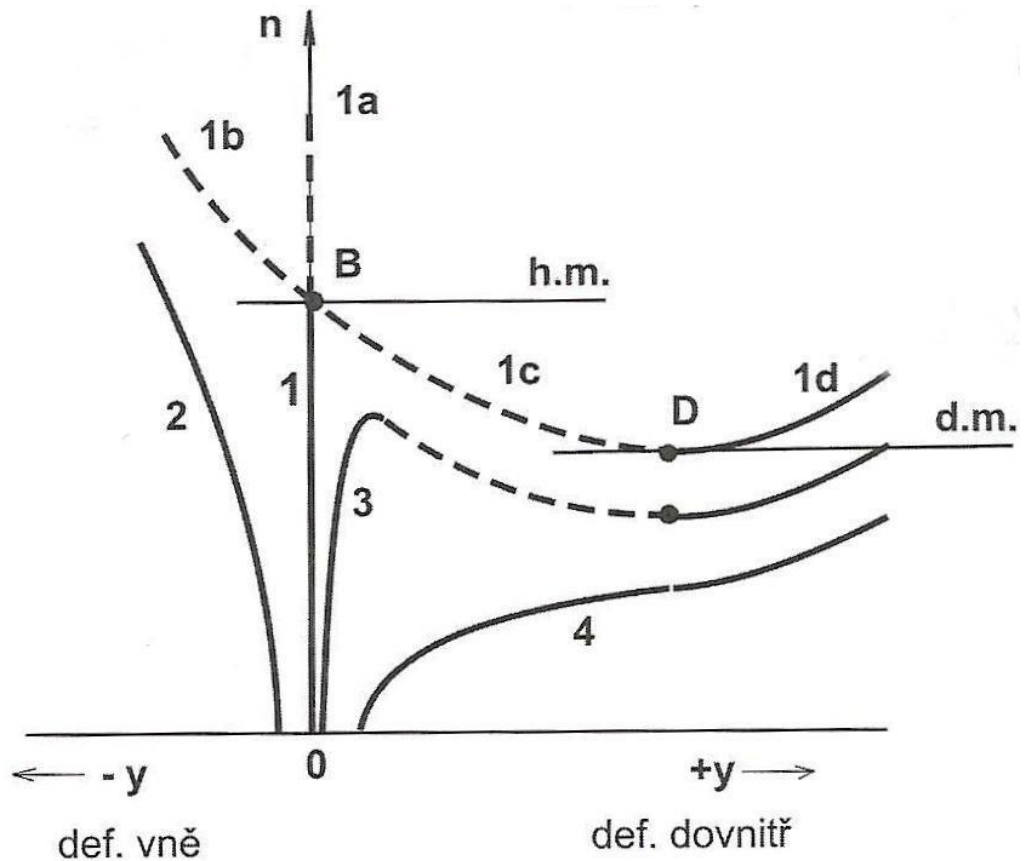


Obrázek 14 Diagram chování jednoose tlačené ideálně rovné desky s volnými bočními okraji zatížené osovými silami. [1]

„Při podkritickém membránovém tlakovém zatížení je deska ve stabilní rovnovážné poloze. Dostoupí-li zatížení na kritickou hodnotu, vybočí náhle deska ohybem – křivka 1b. Přímý tvar 1a již není stabilní. Bod B se nazývá bodem bifurkace (rozdělení).“ Protože v praxi nemůžeme dosáhnout ideálního uložení, rovinnosti desky ani jejího uložení, v důsledku pak k vybočení dochází od počátku zatěžování – křivka 2, 3. [1]

2.2 Válcová skořepina zatížená osovým tlakem

Chování zatížené válcové skořepiny je složitější než předchozí příklad. Zobrazen je diagramem na obrázku 15.



Obrázek 15 Diagram chování válcové skořepiny zatížené osovým tlakem. [1]

„Křivka 1 představuje ideální válcový plášť ve stavu čistě membránové tlakové napjatosti. Rovnováha se opět rozděluje v bodě B na teoreticky tři možné stavy. Stav 1a je stav pláště bez jeho vybočení, 1b je stav, při němž plášť skořepiny vybočí převážně směrem vně, stav 1c představuje prolomení pláště směrem ke středu křivosti, tj. dovnitř. Po ztrátě stability nabývá skořepina stabilního stavu v bodě D (tzv. dolní kritická hranice).“ [1]

Ve srovnání s deskou je plášť válcové skořepiny schopen přenášet tzv. pokritické zatížení v případě, že není porušen. Pokritická únosnost je znázorněna křivkou 1d. Díky tomu, že válcová skořepina nemá v praxi nikdy ideálně kruhový tvar, se pak reálný stav liší od křivky v diagramu 1 – 1c. [1]

Konkrétní chování válcové skořepiny s malými imperfekcemi, což je nedokonalá kruhovitost, znázorňuje křivka č. 3. Jak je zřejmé s diagramu, zatížení nejprve roste

v závislosti na průhybech vybočení pláště, ale nedosahuje horní meze (h. m.) a po dosažení ztráty stability křivka klesá na svoji dolní mez. Během tohoto poklesu se radikálně zvětšují deformace směrem dovnitř a po dosažení dolní meze (d. m.) opět křivka narůstá. [1]

Křivka č. 4 znázorňuje průběh deformací v případě, že jsou již počáteční deformace větších rozměrů a nedochází k náhlému prolomení pláště. V případě křivky č. 2 se jedná o chování skořepiny s prvotní deformací do středu křivosti. U tohoto typu ztrácí skořepina stabilitu při dosažení horní kritické meze, což je bod B. [1]

2.3 Stabilita válcových skořepin

Při řešení stability a podmínek, při kterých dochází ke ztrátě stability válcových skořepin, je nutno řešení daného problému rozdělit dle délky dané válcové skořepiny. Vztah, kterým určíme, zda se jedná o krátkou nebo dlouhou válcovou skořepinu je:

$$L \geq 4R \cdot \sqrt{\frac{R}{s}} \quad (61)$$

V případě že je délka větší nebo rovna danému výpočtu jedná se o dlouhou skořepinu a opačně. [1]

2.3.1 Dlouhá válcová skořepina, její stabilita při zatížení vnějším přetlakem

Pokud působí na tenkostěnnou válcovou skořepinu podtlak, případně vnější přetlak, namísto vnitřního přetlaku obrací se znaménka působení napětí (membránové obvodové, osové napětí). V tomto případě se mění napětí, která působí na válcovou skořepinu, na tlaková. [1]

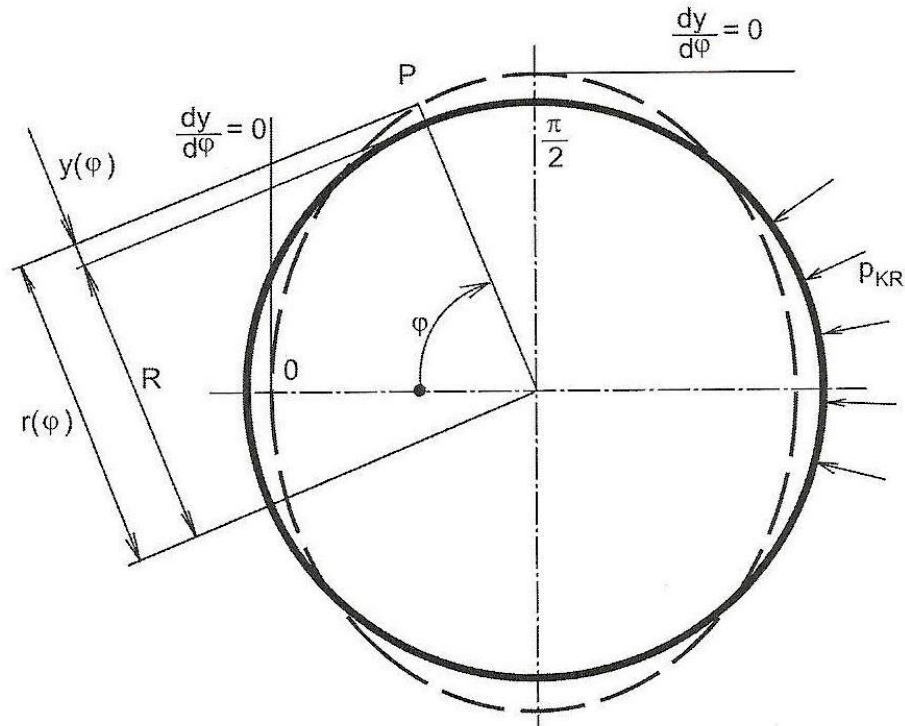
V momentě, kdy dosáhneme kritického tlakového napětí, ztrácí plášť skořepiny stabilitu a původně kruhový průřez skořepiny se zploští do oválného tvaru. Stejně jako v předchozím případě jednoose tlačené ideálně rovné desky s volnými bočními okraji se jedná o vzpěrný ohyb. U válcové skořepiny, na rozdíl u rovné desky, kde byl použit pásek o jednotné šířce, uvažujeme myšlený prsteneček jednotkové šířky, který je zatížen obvodovou tlakovou membránovou silou. Tuto sílu můžeme vyjádřit vztahem:

$$n_{\varphi} = pR \quad (62)$$

Pokud je kruhový prsteneček zdeformován do oválného tvaru vlivem tlakové síly, pak původně myšlený prsteneček jednotkové šířky namáhán obvodovým ohybovým momentem o velikosti:

$$m_\varphi = n_{\varphi KR} y(\varphi) = p_{KR} R y(\varphi) \quad (64)$$

kde $n_{\varphi KR}$ je kritická membránová tlaková síla, $y(\varphi)$ deformace, p_{KR} je kritický tlak, R je poloměr střednice nezátížené skořepiny. [1]



Obrázek 16 Chování válcové skořepiny při působení vnějšího přetlaku. [1]

Při použití analogie k rovnici

$$y''(x) = -\frac{m(x)}{D}, \quad y''(x) = -\frac{1}{r(y)} \quad (65, 66)$$

pak zřejmě dostáváme změnu křivosti ve tvaru:

$$\frac{1}{\rho(\varphi)} - \frac{1}{R} = \frac{m(\varphi)}{D}. \quad (67)$$

„Křivost rovinné křivky v polárních souřadnicích, lze pro malé deformace $y(\varphi)$, představující počátek vybočení pláště, vyjádřit vztahem“:

$$\frac{1}{\rho(\varphi)} = \frac{1}{r} - \frac{1}{r^2} \frac{d^2 r}{d\varphi^2} \quad (68)$$

Kde radiální pořadnice je dle obr 16:

$$r = R + y(\varphi) \quad (69)$$

Úpravou a dosazením do dvou předchozích rovnic při uvážení, že platí $y \ll R^2$ a $y/R \ll 1$ získáme vztah:

$$\frac{1}{\rho(\varphi)} - \frac{1}{R} = -\frac{1}{R^2} \left(\frac{d^2 y}{d\varphi^2} + y \right). \quad [1] \quad (70)$$

Porovnáním pravých stran rovnic získáme diferenciální rovnici ve tvaru:

$$\frac{1}{R^2} \frac{d^2 y}{d\varphi^2} + \frac{y}{R^2} = -\frac{m(\varphi)}{D} \quad (71)$$

při dosazení za $m(\varphi)$

$$\frac{d^2 y}{d\varphi^2} + \beta^2 y = 0, \quad \text{s označením } \beta = 1 + \frac{p_{KR} R^3}{D}. \quad (72, 73)$$

Všeobecné řešení předchozí rovnice je:

$$y(\varphi) = A \cos \beta \varphi + B \sin \beta \varphi, \quad (74)$$

kde v místech $\varphi=0$, $\varphi=\pi/2$ je podle obrázku č. 16: $y'(\varphi)=0$. [1]

Derivací rovnice 74 obdržíme:

$$\frac{dy(\varphi)}{d\varphi} = -\beta A \sin \beta \varphi + \beta B \cos \beta \varphi, \quad \text{takže } B = 0 \text{ a } A \sin \beta \frac{\pi}{2} = 0 \quad (75, 76)$$

V rovnici č. 76 vyhovuje posloupnost hodnot $\beta \frac{\pi}{2} = i\pi$, $i = 1, 2, 3, \dots$. Je tedy $\beta = 2i$ a hodnota kritického tlaku pak následně:

$$\beta^2 = 4i^2 = 1 + \frac{p_{KR} R^3}{D} \quad (77)$$

Význam má nejmenší z hodnot p_{KR} , tj. pro $i=1$

Proto je hodnota kritického tlaku rovna:

$$p_{KR} = \frac{3D}{R^3} \quad (78)$$

Z výše uvedených rovnic je kritické zatížení přímo úměrné ohybové tuhosti stěny D . Teoretická horní hranice, která je dána bodem bifurkace B, jak je zobrazeno na obr 14., odpovídá výpočtu kritického tlaku z rovnice č. 78. Nutné je však vzít v úvahu, že

skutečná hodnota kritického tlaku je v praxi nižší díky počátečním geometrickým imperfecím válcové skořepiny. [1]

2.3.2 Vyztužení dlouhé válcové skořepiny.

Při výrobě jakéhokoliv výrobku se klade důraz na úsporu nákladů. Konkrétně úsporu materiálu u válcových skořepin můžeme řešit vyztužením žebry a následným snížením tloušťky stěny pláště skořepiny. [1]

Vyztužení válcové skořepiny je možné několika způsoby. Jedním ze způsobů je za pomoci tzv. vinuté roury. Dalším způsobem je výztuha za pomoci několika žebor, které mají tvar prstenců s určitou roztečí L . Vyztužení tímto typem má význam pouze za určitých podmínek.

Pro hladkou homogenní skořepinu platí:

$$D = E^{**} \frac{s^3}{12} \quad (79)$$

a při následném dosazení do výpočtu kritického tlaku dostáváme:

$$p_{KR} = \frac{E^{**}}{4} \left(\frac{s}{R}\right)^3 \cdot \quad (80)$$

Výztuha spolu se stěnou skořepiny vytváří prstenec s kruhovou střednicí, pro který je zřejmě zatížení připadající na jednotku obvodu $q = pL$. [1]

Při analogii s rovnicí č. 78 je

$$q_{KR} = \frac{3EJ_p}{R_s^3} = p_{KR}L \quad (81)$$

kde J_p je kvadratický moment průřezu prstence se spolupůsobící částí pláště vztahený k neutrální ose daného průřezu, což je osa těžiště. L je rozteč mezi jednotlivými prstenci. [1]

2.3.3 Krátká válcová skořepina

Při vyztužení dlouhé válcové skořepiny nastávají z hlediska výpočtu ztráty stability a tedy i kritického tlaku jisté změny. Pokud skořepinu vyztužíme kruhovými prstenci o

rozteči L , mění dlouhá skořepina krátkou. Důvodem je rozdělení na několik krátkých úseků právě za pomoci vyztužení. Při čemž platí, že kritické zatížení daného úseku válcové skořepiny závisí právě na rozteči vyztužujících prstenců. Analogicky k výpočtu kritického tlaku z rovnice 80, dostáváme výpočet pro horní hranici kritického tlaku u ideální válcové skořepiny (bez imperfekcí):

$$p_{KR} = \frac{E^{**}}{4} \left(\frac{s}{R}\right)^{2,5} \frac{R}{L}. \quad (82)$$

Při vyztužování dlouhé válcové skořepiny a již zmíněného rozdělení na kratší úseky platí, že s rostoucí roztečí L klesá kritické zatížení p_{KR} . „Rozteč, při níž p_{KR} skořepiny vyztužené prstenci klesne na hodnotu p_{KR} pro dlouhou skořepinu danou vztahem č. 80, plyne z porovnání vztahů (80) a (82):

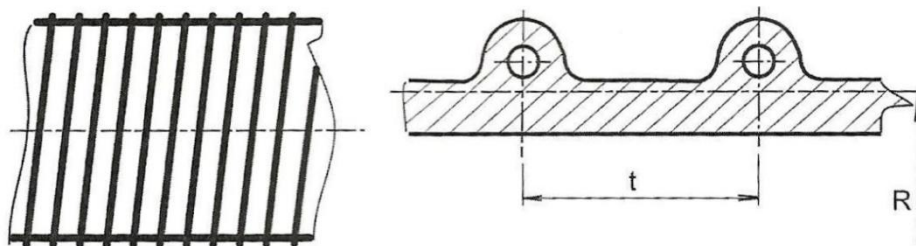
$$\frac{E^{**}}{4} \left(\frac{s}{R}\right)^{2,5} \frac{R}{L^*} = \frac{E^{**}}{4} \left(\frac{s}{R}\right)^3. \quad (83)$$

Z čehož pak dostáváme:

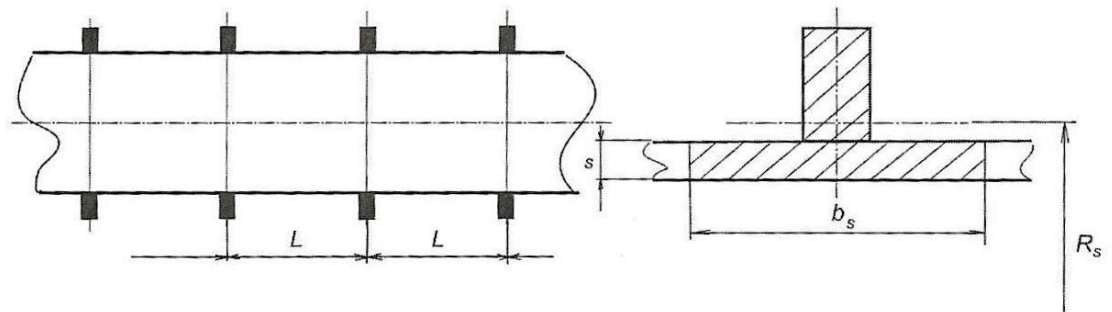
$$L^* = 4R \sqrt{\frac{R}{s}}. \quad (84)$$

Vyztužení dlouhé válcové skořepiny prstenci má smysl pouze v případě že:

$$L < L^* \quad . [1] \quad (85)$$



Obrázek 17 Kontinuální vyztužení válcové skořepiny. [1]



Obrázek 18 Diskontinuální vyztužení válcových skořepin – prstence.[1]

2.4 Mezní stavy únosnosti

Mezní stavy jsou dány:

- výraznou plastickou deformací (mezní stav plastické únosnosti). GPD- C (Gross Plastic Deformation - Design Check).
- progresivní plastickou deformací (mezní stav ratchetingu). PD-DC (Progressive Plastic Deformation - Design Check).
- ztrátou stability (mezní stav stabilitního zborcení). I-DC (Instability - Design Check).
- únavou (mezní stav únavy). F-DC (Fatigue - Design Check).
- ztrátou statické rovnováhy. SE-DC (Static Equilibrium - Design Check).
- únikem tekutiny, který ovlivňuje bezpečnost nebo nepřijatelné poškození prostředí. [5]

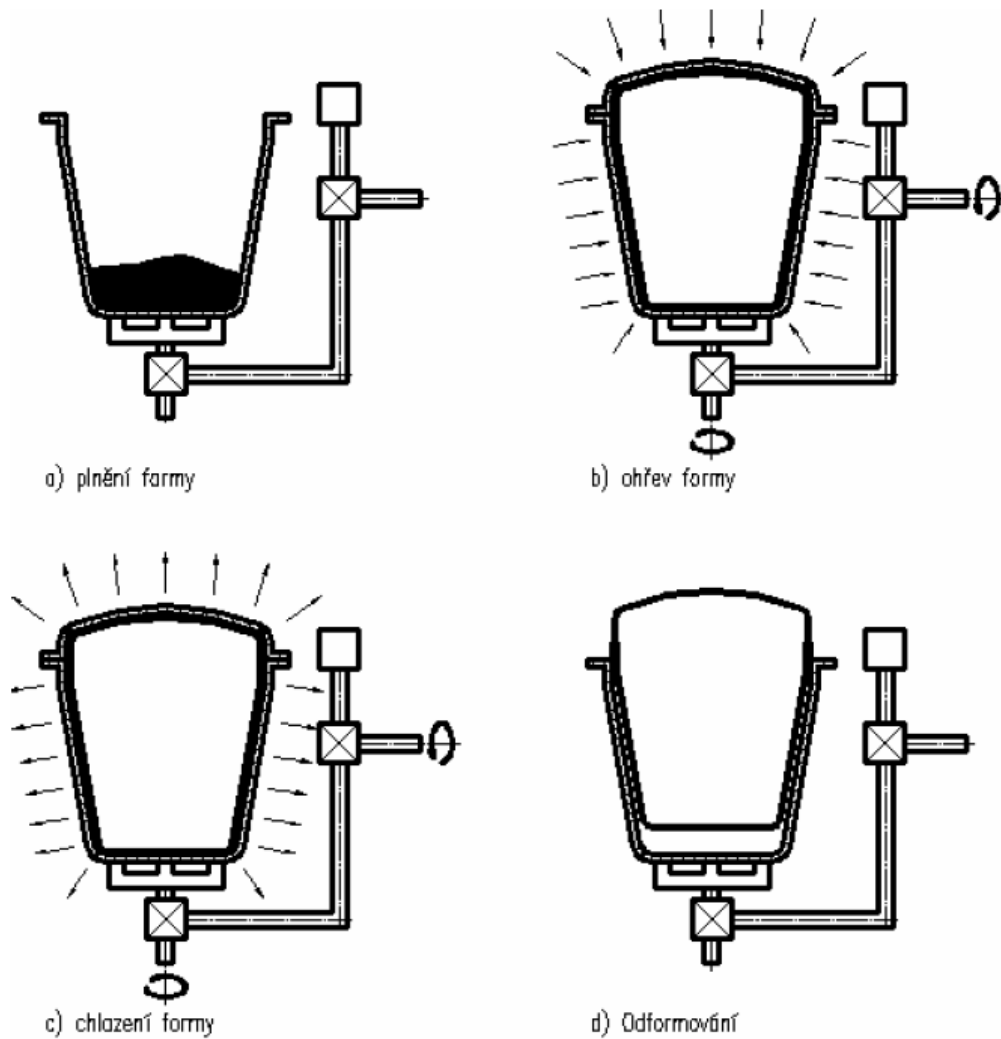
2.5 Mezní stavy způsobilosti

- deformací nebo průhybem
- únikem tekutiny. [5]

3 ROTAČNÍ ODLÉVÁNÍ

Rotační odlévání je technologie, která se zejména využívá pro výrobu plastových dutých výrobků. Tyto výrobky jsou ve většině případů větších rozměrů. Také se používá pro tenkostěnné výrobky, které by nebylo možné jinou technologií vyrobit. [8]

3.1 Princip rotačního odlévání



Obrázek 19 Princip technologie rotačního odlévání. [8]

- a) Plnění formy: do formy se vloží materiál většinou ve formě granulí, prášku nebo kapaliny.
- b) Zahřívání: forma je ohřívána na stanovenou teplotu dle druhu polymeru a otáčí se pomalu ve dvou osách.
- c) Chlazení: forma se otáčí a ochlazuje za pomoci proudícího vzduchu, vodní sprchy nebo chladicí kapaliny. Tato fáze je důležitá pro tvarovou stálost

vyjmutého výrobku. Pokud by forma (výrobek) byl chlazen příliš krátkou dobu, jeho tvar by se po vyjmutí zdeformoval.

- d) Odformování: Pokud je výrobek dostatečně tuhý, zastavuje se proces chlazení a rotace a výrobek je vyjmut z formy. [8]

3.2 Výhody rotačního odlévání

- Velkoobjemové výrobky, ale i malé
- Možnost výroby výrobků s komplikovaným tvarem
- Bezešvé výrobky (bez svarů, apod.)
- Použití strojů pro lehká provozní zatížení – nízkotlaký proces výroby. [8]

3.3 Nevýhody rotačního odlévání

- Dlouhý výrobní čas
- Cena polotovaru
- Geometrická omezení
- Imperfekce. [8]

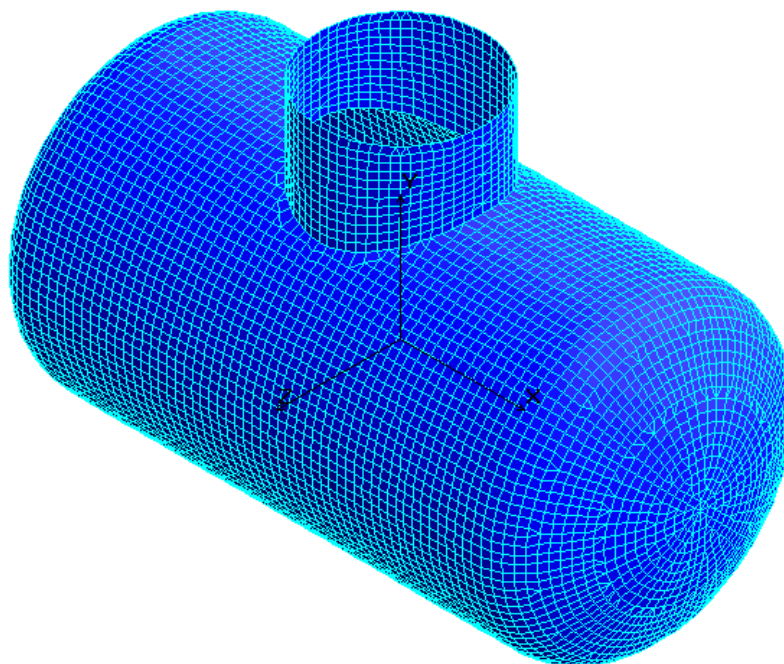
II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 GEOMETRICKÉ PARAMETRY NÁDOB TÉTO STUDIE

Parametrická studie je zaměřena na tenkostěnné horizontální rotačně odlévané nádoby, které zprostředkovává firma Aquatec. Do studie stabilitní únosnosti byly zahrnuty tři velikosti nádob tj. nádoby s odlišným objemem $2,3 \text{ m}^3$, $4,2 \text{ m}^3$ a $6,2 \text{ m}^3$.

4.1 Základní geometrie

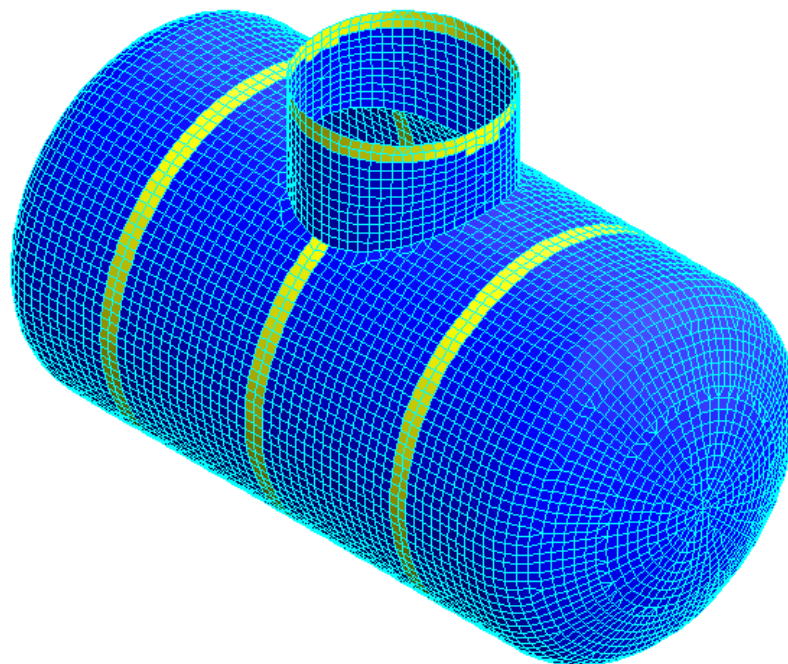
Pro parametrickou studii nádob, byly vytvořeny FEM modely všech výše zmíněných velikostí. Z konstrukčního hlediska byly tyto nádoby upraveny na základní geometrii bez vyztužení a rozměrové parametry jednotlivých nádob byly zachovány. Následně byly vytvořené modely zatíženy dle normou stanovených hodnot. Podmínky ztráty stability (bezpečnosti) se řídí normou ČSN EN 12566 – 3, která je více popsána v další kapitole.



Obrázek 20 FEM model základní geometrie

4.2 Geometrie vyztužená žebry

Pro parametrickou studii nádob vyztužených žebry byly vytvořeny FEM modely, jejichž geometrie je totožná s předchozím typem základních geometrií, ale rozteče vyztužení žebry byly rozměrově ponechány dle výkresové dokumentace uvedené v příloze. Sestavené modely byly taktéž vystaveny jednotlivým případům zatížením.



Obrázek 21 FEM model geometrie vyztužené žebry

5 PŘÍPADY ZATÍŽENÍ HORIZONTÁLNÍCH ROTAČNĚ ODLÉVANÝCH NÁDOB

5.1 Příklad zatížení 1 – nádoba zapuštěná v zemi, zcela prázdná – zatížení pouze tlakem obsypu

5.1.1 Provozní podmínky:

Medium – znečištěná voda

$$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$$

Střední teplota konstrukce

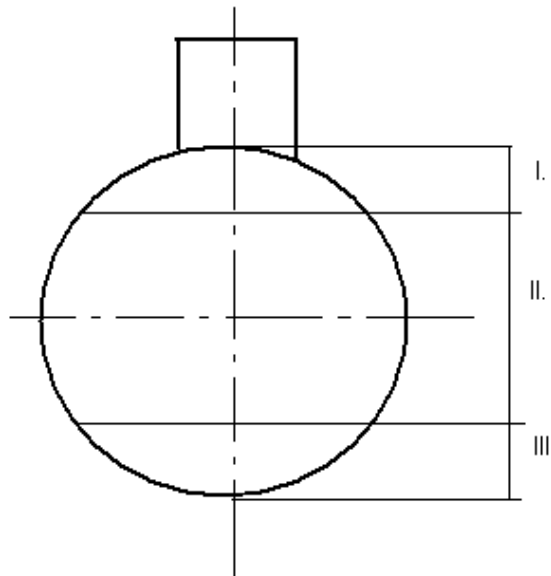
$$t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

Materiál zásypu nádrže: štěrk, dle ČSN EN 12566 –3, čl. 5.2.1.

$$\gamma = 18 \text{ kN/ m}^3$$

5.1.2 Uvažované stavy zatížení a okrajové podmínky konstrukce:

Zatížení jsou uvažována v hodnotách podle EN 12 566-3 . Nádoba je vzhledem k válcovému tvaru pro výpočet horizontálně rozdělena na 3 sekce podle obr.:



Obrázek 22 Sekce nádoby, rozdělení směru působení tlaku.

V sekci I. je zaveden vertikální tlak zeminy dle EN 12 566 - 3:

$$p_V = H \rho_Z g$$

v sekcích II., resp. III. horizontální tlak zeminy dle EN 12 566-3:

$$p_H = k H \gamma g$$

kde $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$, koeficient $k = 0,27$ pro materiál zásypu štěrku – dle EN 12 566-3

Uložení nádoby je uvažováno jako uložení sekce III. na kvazipružném podkladu s konstantou tuhosti podkladu $0,001 \text{ N/mm}^3$.

Po výšce nádoby je uvažováno lineární rozložení tlaku s nulovou hodnotou v úrovni terénu. Přetížení osobami: dle EN 12 566-3, čl. 5.3.1.4 se pro výšku obsypu větší jak 1 m přetížení osobami neuvažuje.

Dle normy EN 1778 musí nádoba splňovat bezpečnostní koeficient roven dvěma. Aby bylo patrné chování nádoby při změnách tloušťky stěny, byla provedena studie v rozsahu tohoto bezpečnostního koeficientu v rozmezí od 1 do 3.

5.1.3 Příklad zatížení 1 – krátkodobý stav zatížení

5.1.3.1 Materiálové parametry konstrukce (nádoby):

Výpočtové hodnoty mezních napětí a modulů tečení materiálu:

krátkodobý případ zatížení	$K = 6,5 \text{ MPa,}$
modul tečení materiálu v řádu 1000 hodin při teplotách cca do 20°C (kvalifikovaný odhad)	$E = 400 \text{ MPa}$
Poissonův poměr je uvažován (nezávisle na době zatížení)	$\nu = 0,4$

Redukční součinitele dle ČSN EN 1778 :

korekční faktor na vliv provozovaného media (znečištěná voda)	$A_{2K} = 1,0$
korekční faktor zohledňující vliv teploty na rázovou pevnost	$A_1 = 1$
krátkodobý koeficient svaru	$F = 1$

5.1.3.2 Dovolena výpočtová namáhání pro kontrolu pevnosti podle EN 1778, čl. 4.1.1

Koeficient bezpečnosti $S = 1,3$, EN 1778, tab. 3

$$\sigma_{DOV} = \frac{Kf}{A_1 A_2 K S} = \frac{8,5 \cdot 1}{1 \cdot 1 \cdot 1,3} = 6,5 \text{ MPa}$$

5.1.4 Příklad zatížení 1 – dlouhodobý stav zatížení

5.1.4.1 Materiálové parametry konstrukce (nádoby):

Výpočtové hodnoty mezních napětí a modulů tečení materiálu:

dlouhodobý případ zatížení	K = 6,5 MPa,
modul tečení materiálu v řádu několika let při teplotách cca do 20°C (kvalifikovaný odhad)	E = 200 MPa
Poissonův poměr je uvažován (nezávisle na době zatížení)	$\nu = 0,4$

Redukční součinitele dle ČSN EN 1778 :

korekční faktor na vliv provozovaného media (znečištěná voda)	$A_{2K} = 1,0$
korekční faktor zohledňující vliv teploty na rázovou pevnost	$A_1 = 1$
dlouhodobý koeficient svaru	f = 1

5.1.4.2 Dovolená výpočtová namáhání pro kontrolu pevnosti podle EN 1778, čl. 4.1.1

Koeficient bezpečnosti S = 1,3, EN 1778, tab. 3

$$\sigma_{DOV} = \frac{Kf}{A_1 A_2 K S} = \frac{8,5 \cdot 1}{1 \cdot 1 \cdot 1,3} = 6,5 \text{ MPa}$$

5.2 Provozní případ zatížení 2 – nádoba zapuštěná v zemi, zaplněná vodou do předepsané výšky – h – zatížení hydrostatickým tlakem a tlakem obsypu

Nádoba byla posuzována na dovolené namáhání pro dobu životnosti. Zatížení tlakem obsypu je stejné jako v případě zatížení 1. Střední provozní úroveň hladiny v nádrži je uvažována jako z poloviny naplněná.

5.2.1 Provozní podmínky:

Medium – znečištěná voda	$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$
Střední teplota konstrukce	$t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$
Materiál záspy nádrže: štěrk, dle ČSN EN 12566 –3, čl. 5.2.1.	$\gamma = 18 \text{ kN/ m}^3$

Uvažované stavy zatížení a okrajové podmínky jsou totožné jako u předchozího případu zatížení 1.

5.2.2 Krátkodobý stav zatížení

Výpočtové hodnoty mezních napětí a modulů tečení materiálu:

krátkodobý případ zatížení	$K = 6,5 \text{ MPa,}$
modul tečení materiálu v řádu 1000 hodin při teplotách cca do 20°C (kvalifikovaný odhad)	$E = 400 \text{ MPa}$
Poissonův poměr je uvažován (nezávisle na době zatížení)	$\nu = 0,4$

Redukční součinitele dle ČSN EN 1778 :

korekční faktor na vliv provozovaného media (znečištěná voda)	$A_{2K} = 1,0$
korekční faktor zohledňující vliv teploty na rázovou pevnost	$A_1 = 1$
krátkodobý koeficient svaru	$f = 1$

Dovolená výpočtová namáhání pro kontrolu pevnosti podle EN 1778, čl. 4.1.1

Koeficient bezpečnosti $S = 1,3$, EN 1778, tab. 3

$$\sigma_{DOV} = \frac{Kf}{A_1 A_{2K} S} = \frac{8,5 \cdot 1}{1 \cdot 1 \cdot 1,3} = 6,5 \text{ MPa}$$

5.2.3 Dlouhodobý stav zatížení

Materiálové parametry konstrukce (nádoby):

Výpočtové hodnoty mezních napětí a modulů tečení materiálu:

dlouhodobý případ zatížení	$K = 6,5 \text{ MPa,}$
modul tečení materiálu v řádu několika let při teplotách cca do 20°C (kvalifikovaný odhad)	$E = 200 \text{ MPa}$
Poissonův poměr je uvažován (nezávisle na době zatížení)	$\nu = 0,4$

Redukční součinitele dle ČSN EN 1778 :

korekční faktor na vliv provozovaného media (znečištěná voda)	$A_{2K} = 1,0$
korekční faktor zohledňující vliv teploty na rázovou pevnost	$A_1 = 1$
dlouhodobý koeficient svaru	$f = 1$

Dovolená výpočtová namáhání pro kontrolu pevnosti podle EN 1778, čl. 4.1.1

Koeficient bezpečnosti $S = 1,3$, EN 1778, tab. 3

Vypočtené dovolené namáhání je stejné jako u případu krátkodobého stavu zatížení.

6 VÝSLEDKY A DISKUZE

6.1 Příklad zatížení 1 – nádoba zapuštěná v zemi, zcela prázdná – zatížení pouze tlakem obsypu

6.1.1 Krátkodobý případ zatížení 1

Tabulka 1 Výsledky – nádoba 2,3 m³ pro E=400 MPa

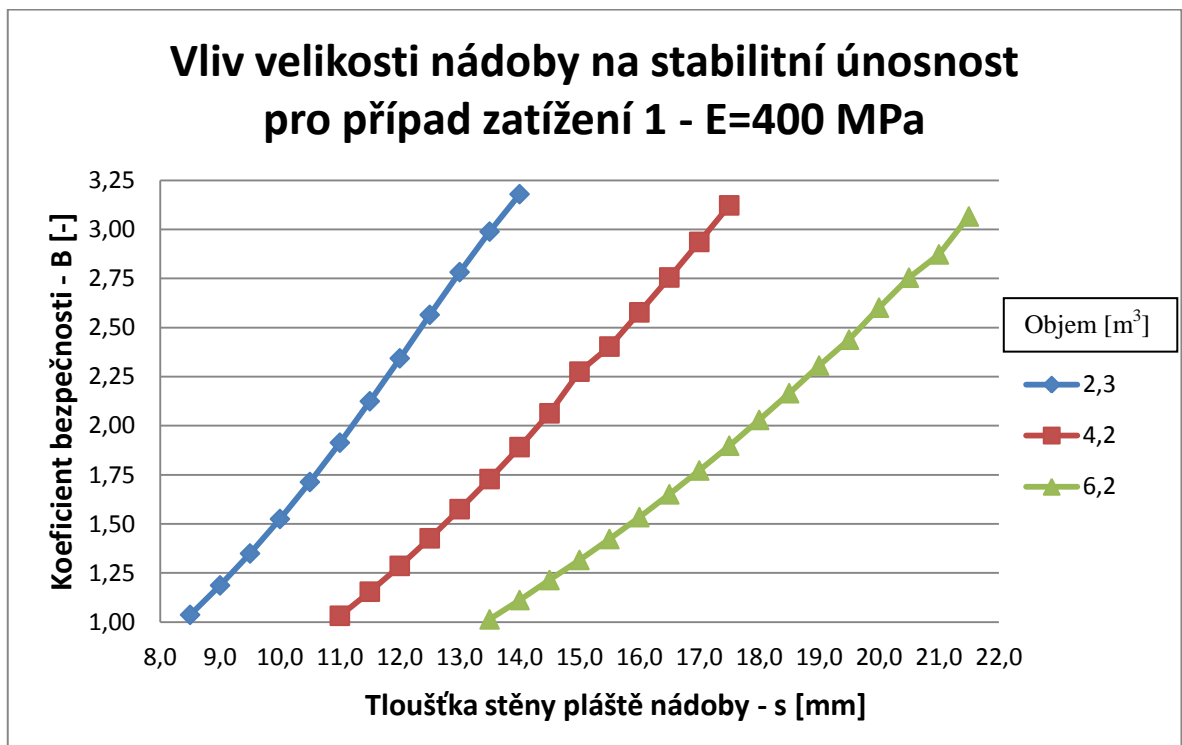
Tloušťka stěny [mm]	Koeficient bezpečnosti [-]
8,5	1,04
9,0	1,19
9,5	1,35
10,0	1,53
10,5	1,71
11,0	1,91
11,5	2,12
12,0	2,34
12,5	2,57
13,0	2,78
13,5	2,99
14,0	3,18

Tabulka 2 Výsledky – nádoba 4,2 m³ pro E=400 MPa

Tloušťka stěny [mm]	Koeficient bezpečnosti [-]
11,0	1,03
11,5	1,15
12,0	1,29
12,5	1,43
13,0	1,58
13,5	1,73
14,0	1,89
14,5	2,06
15,0	2,28
15,5	2,40
16,0	2,58
16,5	2,76
17,0	2,94
17,5	3,12

Tabulka 3 Výsledky – nádoba 6,2 m³ pro E=400 MPa

Tloušťka stěny [mm]	Koeficient bezpečnosti [-]
13,5	1,01
14,0	1,11
14,5	1,21
15,0	1,32
15,5	1,42
16,0	1,53
16,5	1,65
17,0	1,77
17,5	1,90
18,0	2,03
18,5	2,17
19,0	2,31
19,5	2,44
20,0	2,60
20,5	2,75
21,0	2,87
21,5	3,07

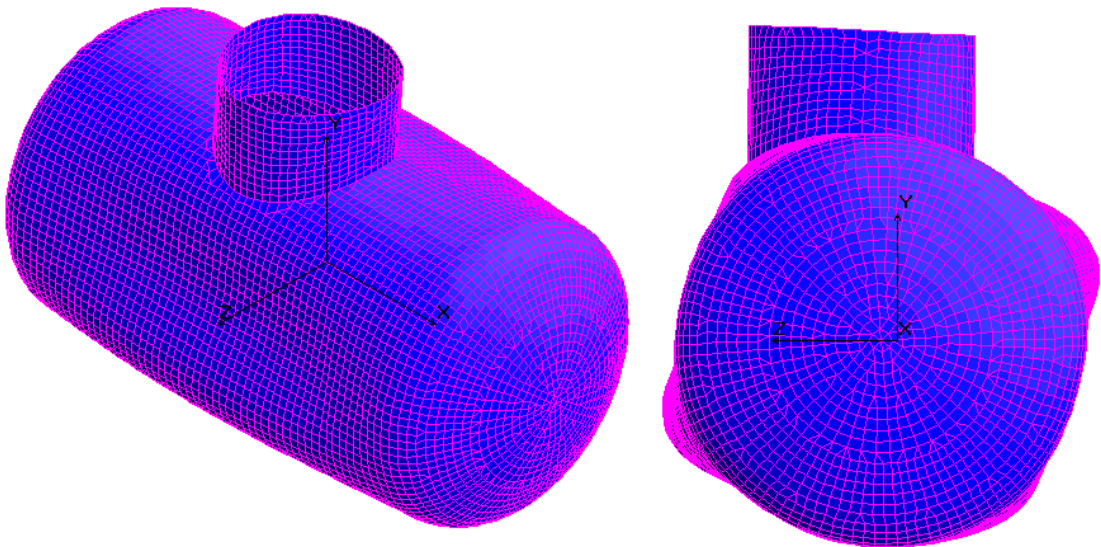


Graf 1 Vliv velikosti nádoby na stabilitní únosnost - krátkodobý případ zatížení 1

Z grafického vyjádření závislosti tloušťky na koeficientu bezpečnosti mezního stavu ztráty stability pláště nádoby (dále jen koeficient bezpečnosti) je zřejmé, že se vzrůstající tloušťkou stěny nádoby koeficient bezpečnosti roste. Norma ČSN EN 1778 udává pro podzemní nádoby minimální koeficient bezpečnosti 2.

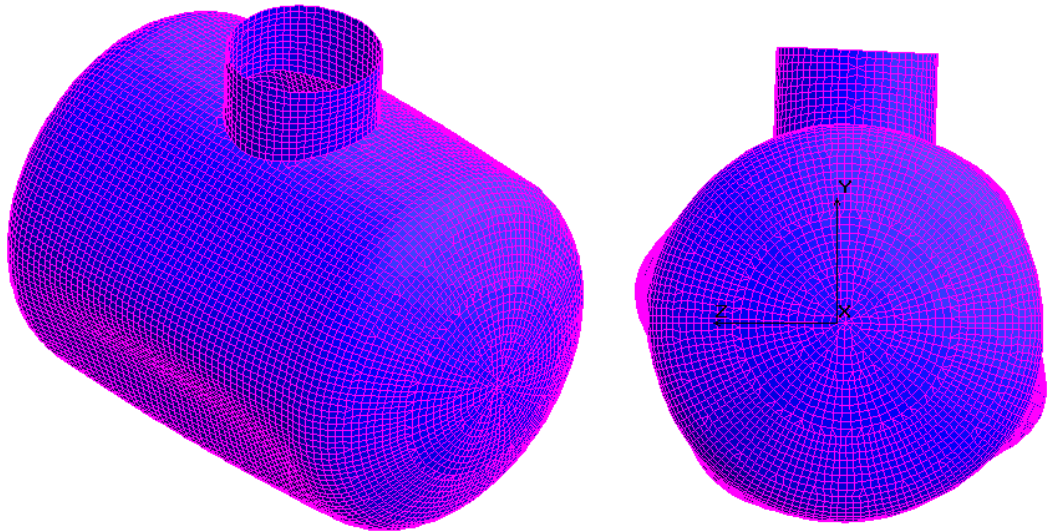
Splnění normy v případě zatížení 1 – krátkodobé působení tlaku obsypu, vyhovuje: nádoba o objemu $2,3 \text{ m}^3$ s tloušťkou stěny pláště 11,5 mm, nádoba o objemu $4,2 \text{ m}^3$ s tloušťkou stěny pláště 14,5 mm a nádoba o objemu $6,2 \text{ m}^3$ s tloušťkou stěny pláště 18 mm. Z čehož vyplývá, že s rostoucí velikostí nádoby je nutné zvětšit tloušťku stěny pláště nádoby.

B_Mode=1 2.12493



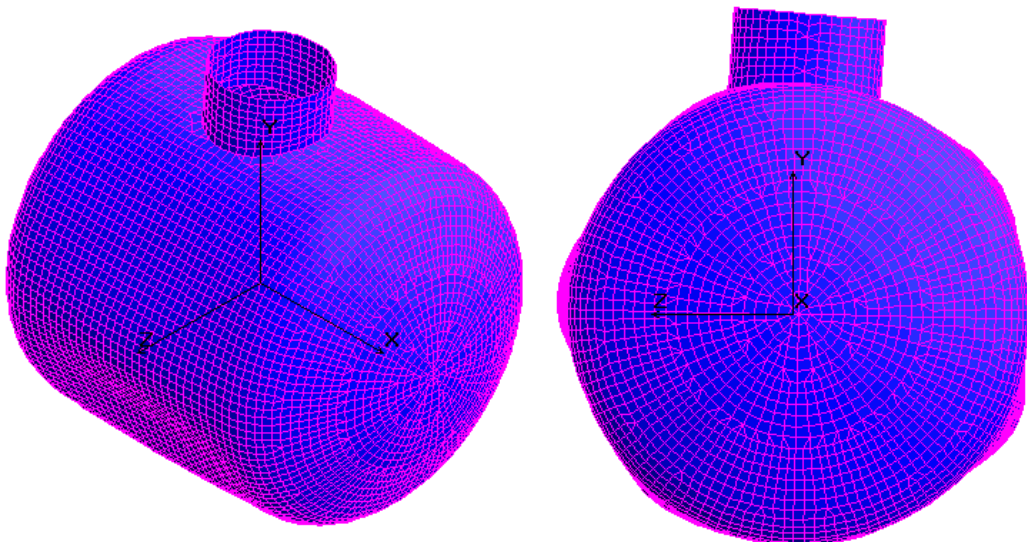
Obrázek 23 Deformace nádoby o objemu $2,3 \text{ m}^3$ při splnění koeficientu bezpečnosti mezního stavu ztráty stability

B_Mode=1 2.0636



Obrázek 24 Deformace nádoby o objemu $4,2 \text{ m}^3$ při splnění koeficientu bezpečnosti mezního stavu ztráty stability – krátkodobý stav zatížení.

B_Mode=1 2.0287



Obrázek 25 Deformace nádoby o objemu $6,2 \text{ m}^3$ při splnění koeficientu bezpečnosti mezního stavu ztráty stability – krátkodobý stav zatížení.

6.1.2 Dlouhodobý případ zatížení 1

Tabulka 4 Výsledky – nádoba 2,3 m³ pro E=200 MPa

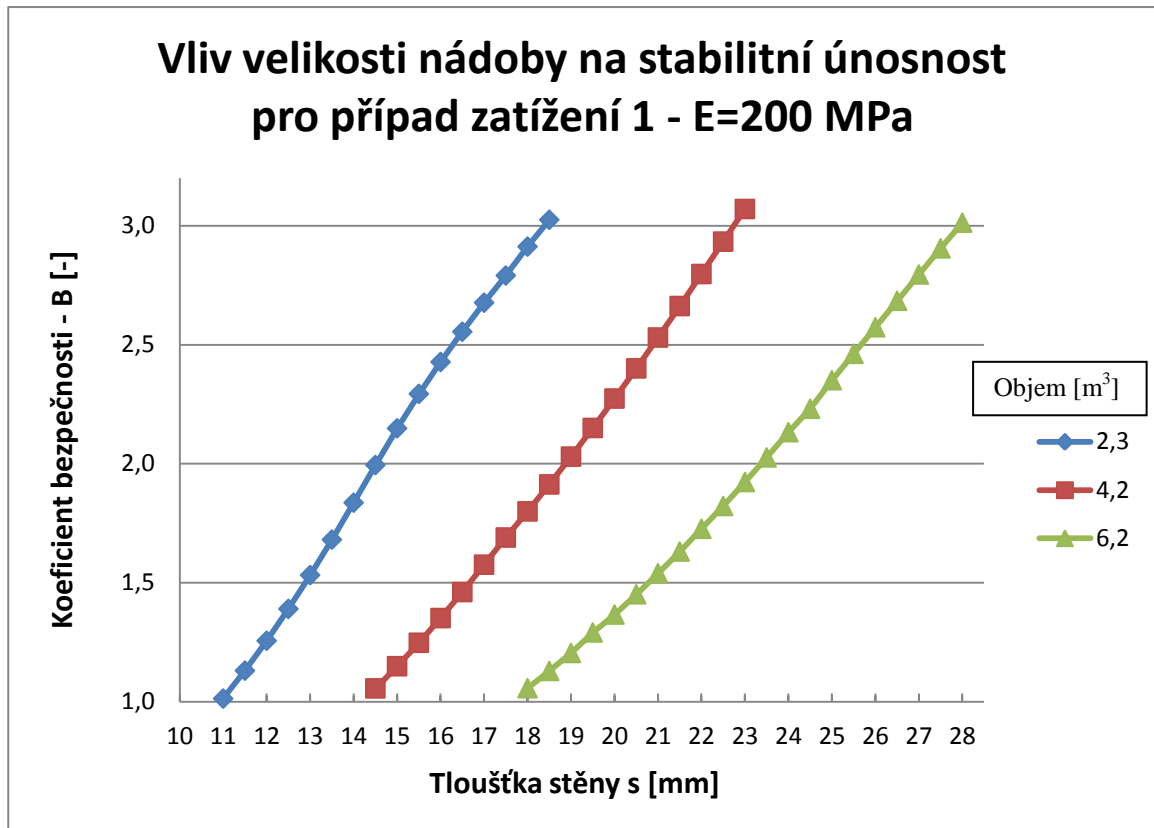
Tloušťka stěny [mm]	Koeficient bezpečnosti [-]
11,0	1,01
11,5	1,13
12,0	1,26
12,5	1,39
13,0	1,53
13,5	1,68
14,0	1,84
14,5	1,99
15,0	2,15
15,5	2,29
16,0	2,43
16,5	2,55
17,0	2,68
17,5	2,79
18,0	2,91
18,5	3,02

Tabulka 5 Výsledky – nádoba 4,2 m³ pro E=200 MPa

Tloušťka stěny [mm]	Koeficient bezpečnosti [-]
14,5	1,06
15,0	1,15
15,5	1,25
16,0	1,35
16,5	1,46
17,0	1,58
17,5	1,69
18,0	1,80
18,5	1,91
19,0	2,03
19,5	2,15
20,0	2,27
20,5	2,40
21,0	2,53
21,5	2,66
22,0	2,80
22,5	2,93
23,0	3,07

Tabulka 6 Výsledky – nádoba 6,2 m³ pro E=200 MPa

Tloušťka stěny [mm]	Koeficient bezpečnosti [-]
18,0	1,06
18,5	1,13
19,0	1,20
19,5	1,29
20,0	1,37
20,5	1,45
21,0	1,54
21,5	1,63
22,0	1,73
22,5	1,82
23,0	1,92
23,5	2,03
24,0	2,13
24,5	2,23
25,0	2,35
25,5	2,46
26,0	2,57
26,5	2,68
27,0	2,79
27,5	2,90
28,0	3,01

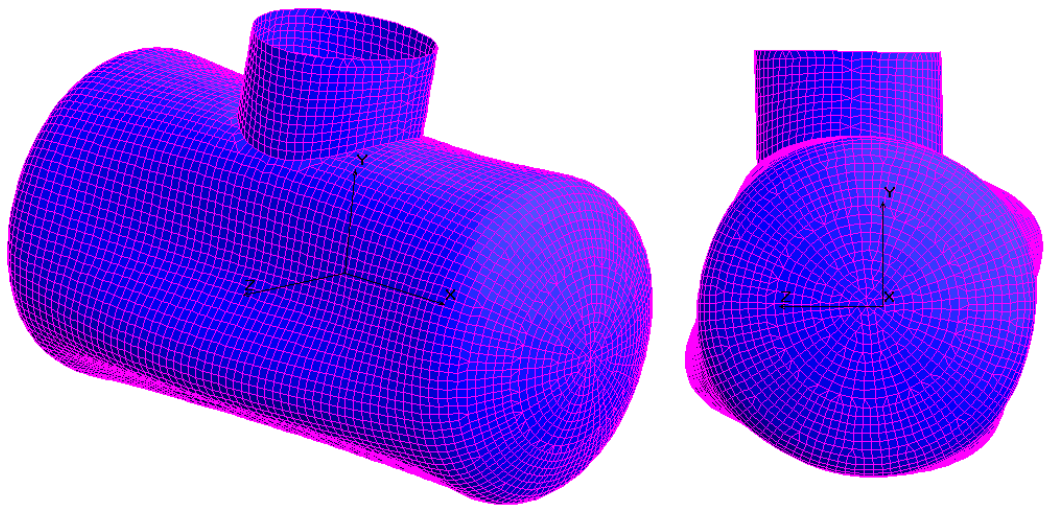


Graf 2 Vliv velikosti nádoby na stabilitní únosnost - dlouhodobý případ zatížení 1

Splnění normy v případě zatížení 1 – dlouhodobé působení tlaku obsypu, vyhovuje: nádoba o objemu 2,3 m³ s tloušťkou stěny pláště 14,5 mm, nádoba o objemu 4,2 m³ s tloušťkou stěny pláště 19 mm a nádoba o objemu 6,3 m³ s tloušťkou stěny pláště 23,5 mm.

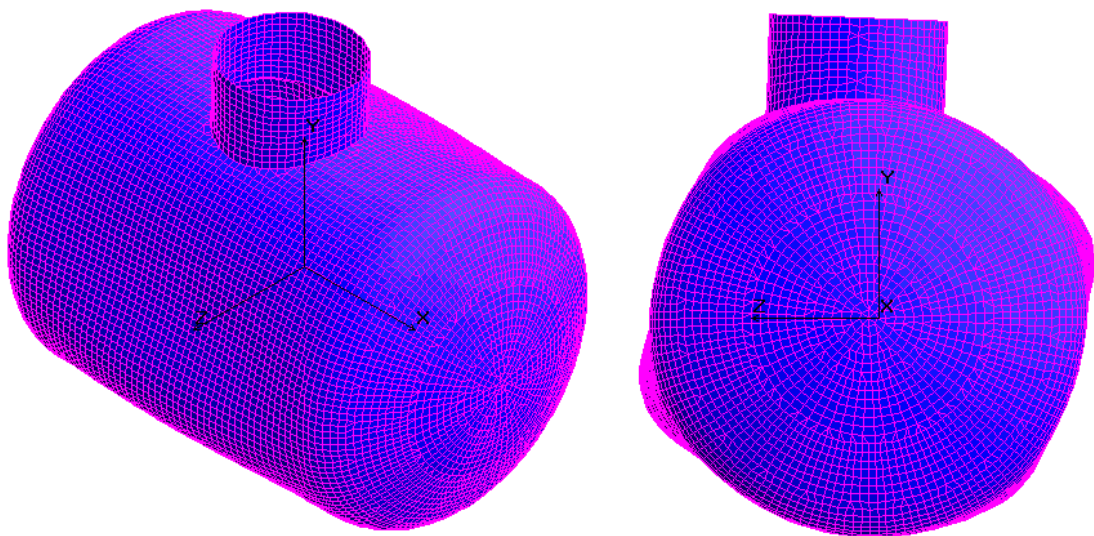
Ve srovnání s krátkodobým případem zatížení 1 je vidět znatelný rozdíl vlivu snížení modulu tečení materiálu a z něho vyplývající zvětšení tloušťky stěny pláště nádoby, který je nutný pro dosažení normou stanoveného koeficientu bezpečnosti mezního stavu ztráty stability pláště nádoby.

E_Mode=1 1.99416



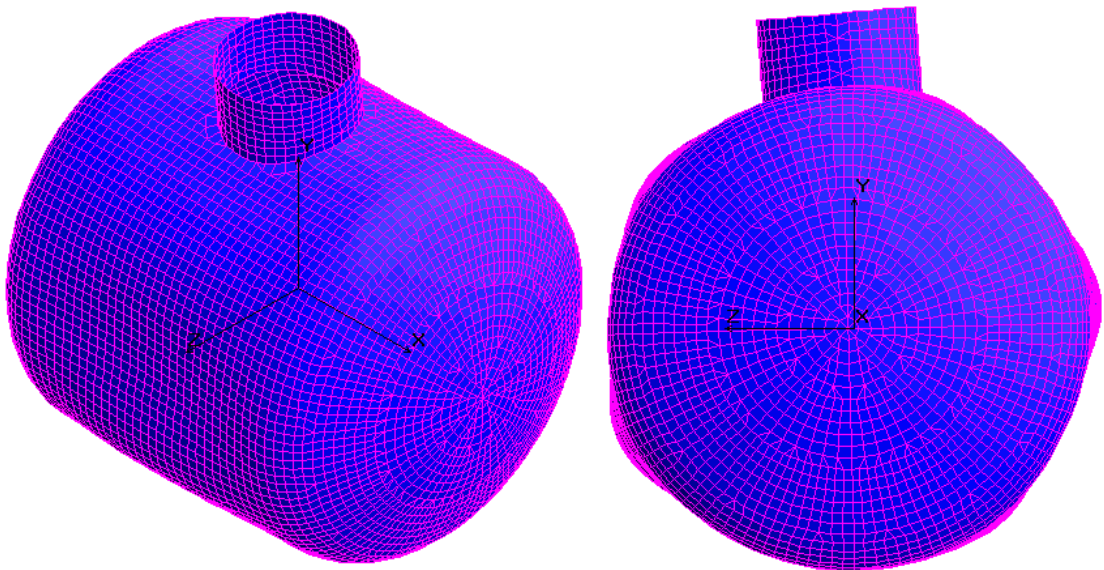
Obrázek 26 Deformace nádoby o objemu $2,3 \text{ m}^3$ při splnění koeficientu bezpečnosti mezního stavu ztráty stability – dlouhodobý stav zatížení.

E_Mode=1 2.0296



Obrázek 27 Deformace nádoby o objemu $4,2 \text{ m}^3$ při splnění koeficientu bezpečnosti mezního stavu ztráty stability – dlouhodobý stav zatížení.

E_Mode=1 2.02665



Obrázek 28 Deformace nádoby o objemu $6,2 \text{ m}^3$ při splnění koeficientu bezpečnosti mezního stavu ztráty stability – Příklad zatížení 1 - dlouhodobý stav zatížení.

6.1.3 Vliv změny modulu tečení na koeficient bezpečnosti mezního stavu ztráty stability pláště nádoby a tloušťku stěny nádoby

Studie byla provedena pro nádobu o objemu $2,3 \text{ m}^3$.

Tabulka 7 Vliv změny tloušťky stěny pláště nádoby na bezpečnostní koeficient pro $E=400 \text{ MPa}$

Tloušťka stěny [mm]	Koeficient bezpečnosti [-]
8,5	1,04
9,0	1,19
9,5	1,35
10,0	1,53
10,5	1,71
11,0	1,91
11,5	2,12
12,0	2,34
12,5	2,57
13,0	2,78
13,5	2,99
14,0	3,18

Tabulka 8 Vliv změny tloušťky stěny pláště nádoby na bezpečnostní koeficient pro $E=300\text{MPa}$

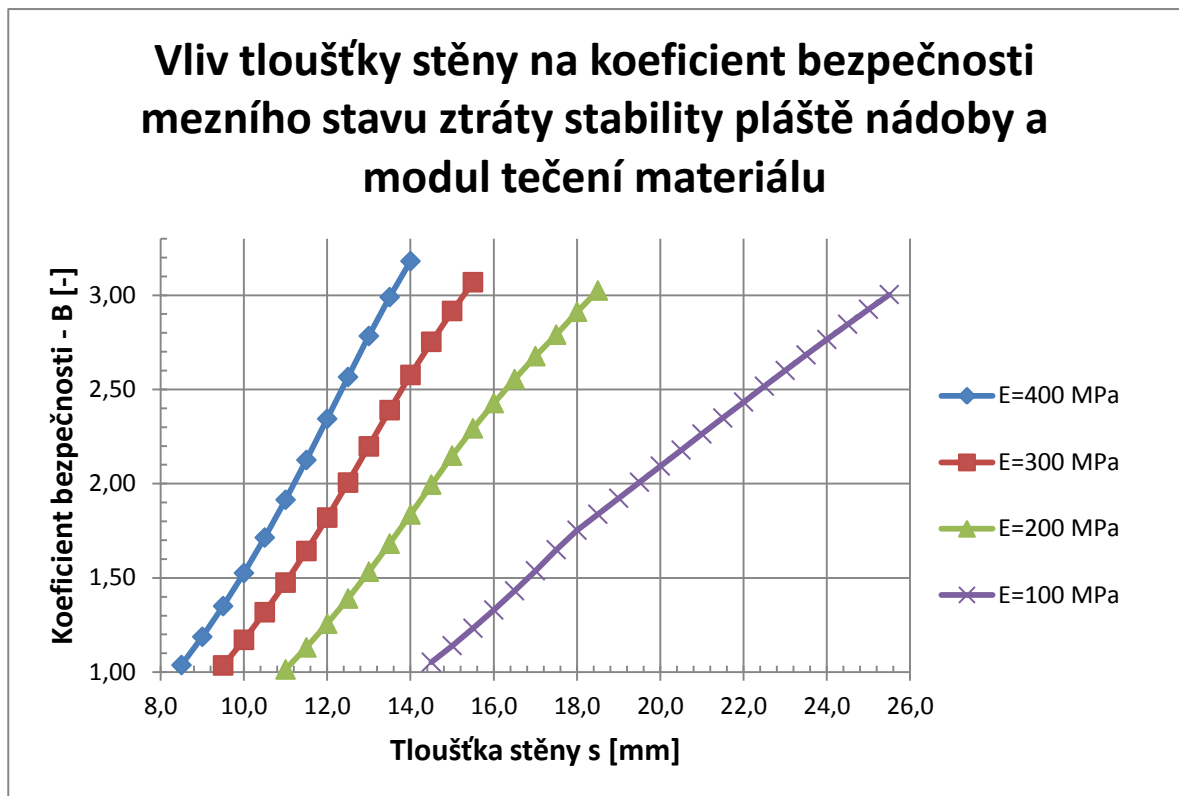
Tloušťka stěny [mm]	Koeficient bezpečnosti [-]
9,5	1,03
10,0	1,17
10,5	1,32
11,0	1,47
11,5	1,64
12,0	1,82
12,5	2,01
13,0	2,20
13,5	2,39
14,0	2,58
14,5	2,75
15,0	2,92
15,5	3,07

Tabulka 9 Vliv změny tloušťky stěny pláště nádoby na bezpečnostní koeficient pro $E=200\text{MPa}$

Tloušťka stěny [mm]	Koeficient bezpečnosti [-]
11,0	1,01
11,5	1,13
12,0	1,26
12,5	1,39
13,0	1,53
13,5	1,68
14,0	1,84
14,5	1,99
15,0	2,15
15,5	2,29
16,0	2,43
16,5	2,55
17,0	2,68
17,5	2,79
18,0	2,91
18,5	3,02

Tabulka 10 Vliv změny tloušťky stěny pláště nádoby na bezpečnostní koeficient pro $E=100\text{MPa}$

Tloušťka stěny [mm]	Koeficient bezpečnosti [-]
14,5	1,05
15,0	1,14
15,5	1,23
16,0	1,33
16,5	1,43
17,0	1,54
17,5	1,65
18,0	1,75
18,5	1,84
19,0	1,92
19,5	2,01
20,0	2,09
20,5	2,18
21,0	2,26
21,5	2,35
22,0	2,43
22,5	2,52
23,0	2,60
23,5	2,68
24,0	2,76
24,5	2,85
25,0	2,92
25,5	3,00



Graf 3 Vliv modulu tečení materiálu na koeficient bezpečnosti mezního stavu ztráty stability pláště nádoby a tloušťku stěny pláště nádoby - případ zatížení 1

Z grafického znázornění poklesu modulu tečení materiálu lze říci, že vyhovující koeficient bezpečnosti splňuje nádoba s modulem tečení $E = 400$ MPa a tloušťkou stěny pláště 11,5 mm, $E = 300$ MPa tloušťkou stěny 12,5 mm, $E = 200$ MPa tloušťkou stěny 14,5 mm a $E = 100$ MPa tloušťkou stěny 19,5 mm.

Ze sklonu křivky znázorňující modul tečení materiálu $E = 100$ MPa je patrný velký nárůst tloušťky stěny pláště při zvyšujícím se koeficientu bezpečnosti (od 1 do 3). Naproti tomu u větších modulů tečení je tento nárůst poměrově nižší. Např. srovnáním modulů tečení $E = 400$ a $E = 100$ MPa zjistíme, že hodnoty poměrného zvětšení tloušťky stěny jsou 2x větší pro modul tečení $E = 100$ MPa.

Kvalifikovaný odhad modulu tečení materiálu pro krátkodobý případ zatížení 1 je 400 MPa, nutné je však říci, že modul tečení materiálu s dobou zatížení klesá a rozdíly tloušťky pláště stěny vyhovující normě ČSN EN 1778, jsou poměrně velké.

Pokud by například nádoba o objemu $2,3\text{m}^3$, která má tloušťku stěny pláště 11,5 mm byla vystavena případu zatížení 1 po dlouhou dobu (čímž by klesl modul tečení až na hod-

notu 100 MPa), došlo by ke ztrátě stability a jejímu zborcení. Z původní tloušťky 11,5 mm by nádoba musela mít tloušťku stěny 19,5 mm, aby splnila normou stanovený koeficient bezpečnosti.

Je tedy nezbytné počítat s poklesem modulu tečení a u dané konstrukce uzpůsobit parametry tak, aby po dobu výrobcem udávané životnosti neztratila svou stabilitu a její plášť tak nebyl porušen.

6.2 Příklad zatížení 2 – provozní stav – nádoba zapuštěná v zemi, zaplněná vodou do předepsané výšky – h – zatížení hydrostatickým tlakem a tlakem obsypu

Nádoba byla posuzována na dovolené namáhání pro dobu životnosti. Zatížení tlakem obsypu je stejné jako v případě zatížení 1. Střední provozní úroveň hladiny v nádrži je uvažována jako z poloviny naplněná.

Reálný provozní stav zatížení je předpokládán dlouhodobého charakteru. Pro srovnání byla provedena i studie krátkodobého provozního stavu zatížení.

6.2.1 Dlouhodobý provozní stav zatížení 2

Tabulka 11 Výsledky – nádoba 2,3 m³ pro E=200 MPa

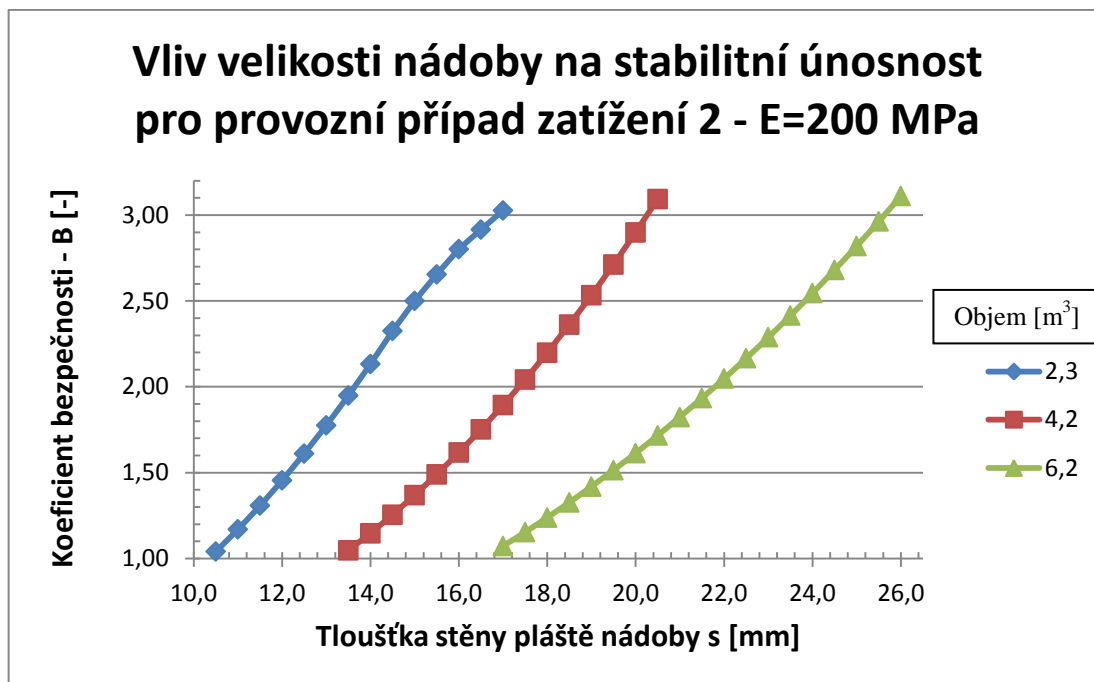
Tloušťka stěny [mm]	Koeficient bezpečnosti [-]
10,5	1,04
11,0	1,17
11,5	1,31
12,0	1,46
12,5	1,61
13,0	1,78
13,5	1,95
14,0	2,13
14,5	2,33
15,0	2,50
15,5	2,65
16,0	2,80
16,5	2,92
17,0	3,03

Tabulka 12 Výsledky – nádoba 4,2 m³ pro E=200 MPa

Tloušťka stěny [mm]	Koeficient bezpečnosti [-]
13,5	1,05
14,0	1,15
14,5	1,25
15,0	1,37
15,5	1,49
16,0	1,62
16,5	1,75
17,0	1,89
17,5	2,04
18,0	2,20
18,5	2,36
19,0	2,53
19,5	2,71
20,0	2,90
20,5	3,09

Tabulka 13 Výsledky – nádoba 6,2 m³ pro E=200 MPa

Tloušťka stěny [mm]	Koeficient bezpečnosti [-]
17,0	1,07
17,5	1,15
18,0	1,24
18,5	1,33
19,0	1,42
19,5	1,51
20,0	1,61
20,5	1,72
21,0	1,82
21,5	1,93
22,0	2,05
22,5	2,17
23,0	2,29
23,5	2,42
24,0	2,55
24,5	2,68
25,0	2,82
25,5	2,96
26,0	3,11



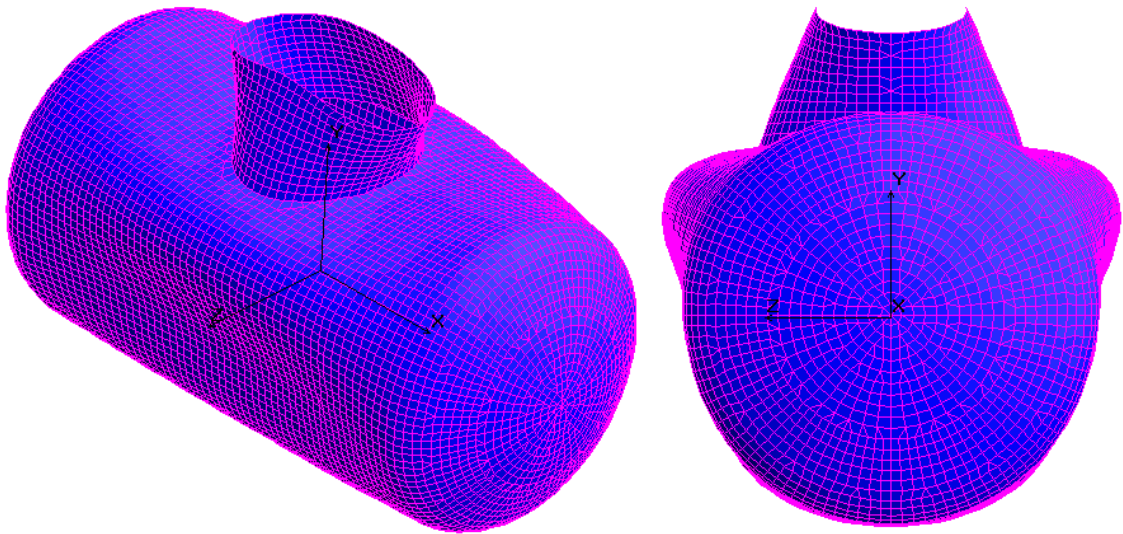
Graf 4 Srovnání velikosti nádoby a vlivu na stabilitní únosnost dlouhodobého provozního případu zatížení 2

Splnění normy v u provozního případu zatížení 2 – dlouhodobé působení tlaku obrysu, a tlaku vody vyhovuje: nádoba o objemu 2,3 m³ s tloušťkou stěny pláště 14 mm, nádoba o objemu 4,2 m³ s tloušťkou stěny pláště 17,5 mm a nádoba o objemu 6,3 m³ s tloušťkou stěny pláště 22 mm.

Díky vyrovnání tlaku obrysu a tlaku vody, je v porovnání s případem zatížení 1 (prázdná nádoba) provozní stav zatížení 2 výhodnější z hlediska úspory materiálu a tím nižších nákladů na výrobu. Je nezbytné říci, že stabilitní únosnost nádoby z poloviny naplněné je odlišná a třeba počítat s tím, že nádoba není vždy takto napuštěná.

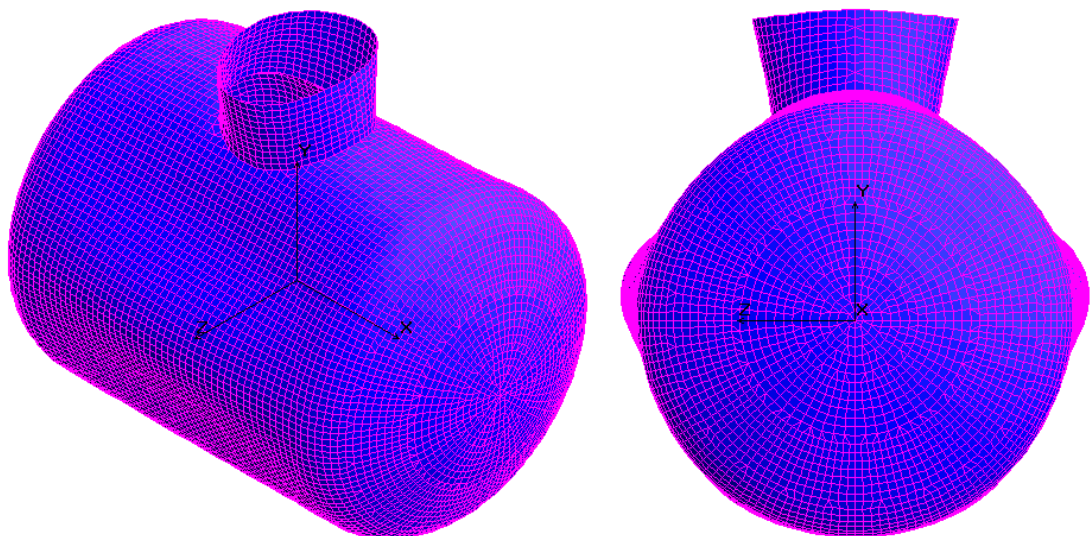
Např. nádoba o objemu 4,2 m³ pro provozní případ zatížení 2 dosahuje splnění koeficientu bezpečnosti dle normy ČSN EN 1778 při tloušťce 17,5, avšak ve skutečnosti v nádobě hladina vody kolísá, případně je nádoba zcela prázdná. V případě, že by byla nádoba prázdná, tj. šlo by o případ zatížení 1, klesla by hodnota bezpečnosti, při stejné tloušťce stěny pláště na hodnotu 1,7. Což by postupem času při snížení modulu tečení materiálu vedlo ke ztrátě stability nádoby. Pokud by nádoba byla po delší dobu vypuštěná, bylo by nutno tuto skutečnost brát v úvahu při návrhu parametrů (zvětšení tloušťky stěny).

E_Mode=1 2.13246



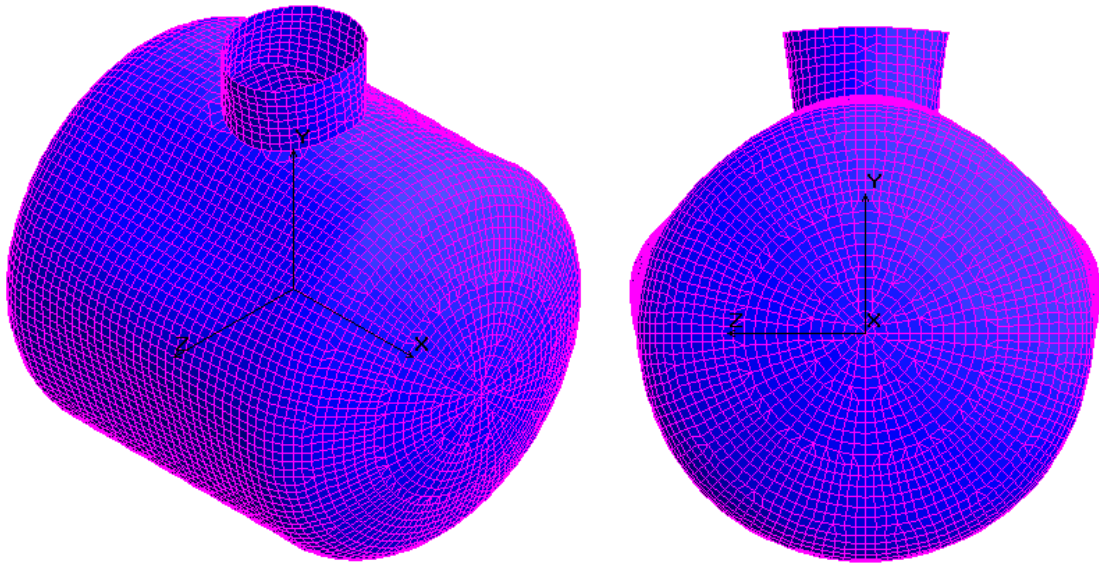
Obrázek 29 Deformace nádoby o objemu $2,3 \text{ m}^3$ při splnění koeficientu bezpečnosti mezního stavu ztráty stability – Provozní případ zatížení 2 - dlouhodobý stav zatížení.

E_Mode=1 2.04334



Obrázek 30 Deformace nádoby o objemu $4,2 \text{ m}^3$ při splnění koeficientu bezpečnosti mezního stavu ztráty stability – Provozní případ zatížení 2 - dlouhodobý stav zatížení.

E_Mode=1 2.04842



Obrázek 31 Deformace nádoby o objemu $6,2 \text{ m}^3$ při splnění koeficientu bezpečnosti mezního stavu ztráty stability – Provozní případ zatížení 2 - dlouhodobý stav zatížení.

6.2.2 Krátkodobý provozní stav zatížení 2

Tabulka 14 Výsledky – nádoba $2,3 \text{ m}^3$ pro $E=400 \text{ MPa}$

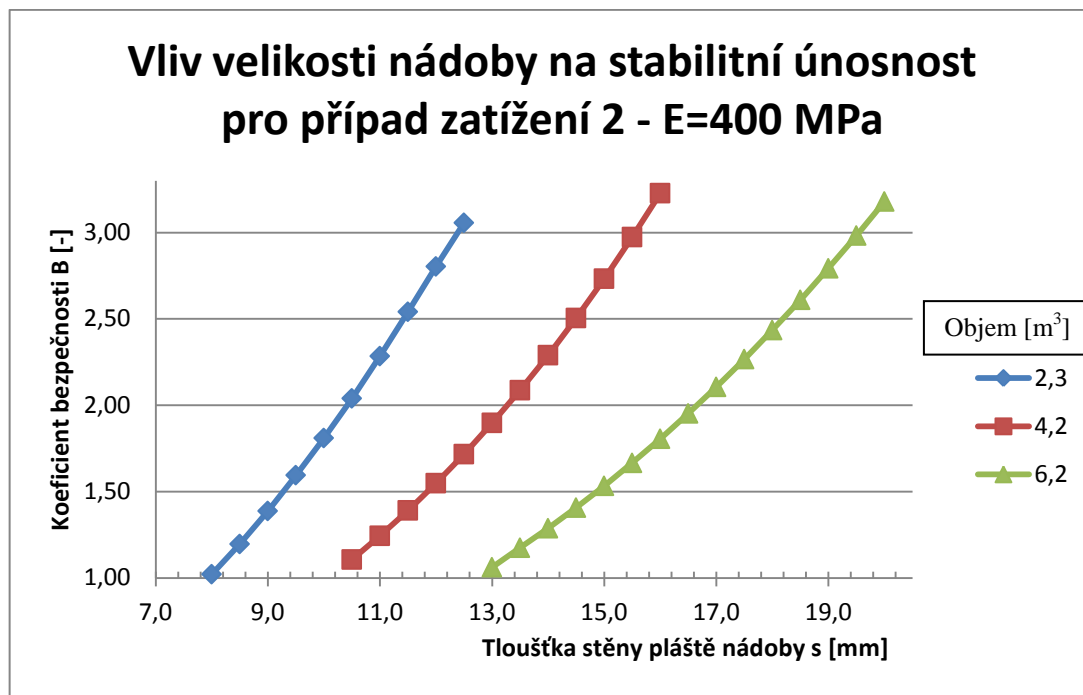
Tloušťka stěny [mm]	Koeficient bezpečnosti [-]
8,0	1,02
8,5	1,20
9,0	1,39
9,5	1,59
10,0	1,81
10,5	2,04
11,0	2,28
11,5	2,54
12,0	2,80
12,5	3,06
13,0	3,28
13,5	3,47
14,0	3,63

Tabulka 15 Výsledky – nádoba 4,2 m³ pro E=400 MPa

Tloušťka stěny [mm]	Koeficient bezpečnosti [-]
10,0	0,98
10,5	1,11
11,0	1,24
11,5	1,39
12,0	1,55
12,5	1,72
13,0	1,86
13,5	2,09
14,0	2,29
14,5	2,51
15,0	2,73
15,5	2,97
16,0	3,23

Tabulka 16 Výsledky – nádoba 6,2 m³ pro E=400 MPa

Tloušťka stěny [mm]	Koeficient bezpečnosti [-]
13,0	1,06
13,5	1,17
14,0	1,29
14,5	1,41
15,0	1,53
15,5	1,67
16,0	1,81
16,5	1,95
17,0	2,11
17,5	2,27
18,0	2,44
18,5	2,61
19,0	2,79
19,5	2,98
20,0	3,18

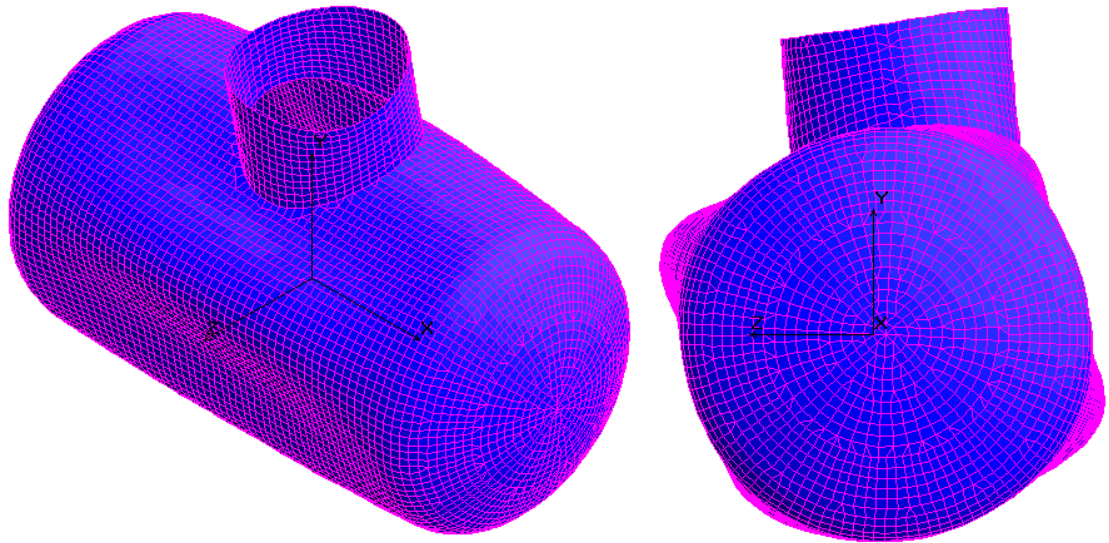


Graf 5 Srovnání velikosti nádoby a vlivu na stabilitní únosnost krátkodobého provozního případu zatížení 2

Splnění normy v u provozního případu zatížení 2 – krátkodobého působení tlaku obsypu, a tlaku vody vyhovuje: nádoba o objemu 2,3 m³ s tloušťkou stěny pláště 10,5 mm, nádoba o objemu 4,2 m³ s tloušťkou stěny pláště 13,5 mm a nádoba o objemu 6,3 m³ s tloušťkou stěny pláště 17 mm.

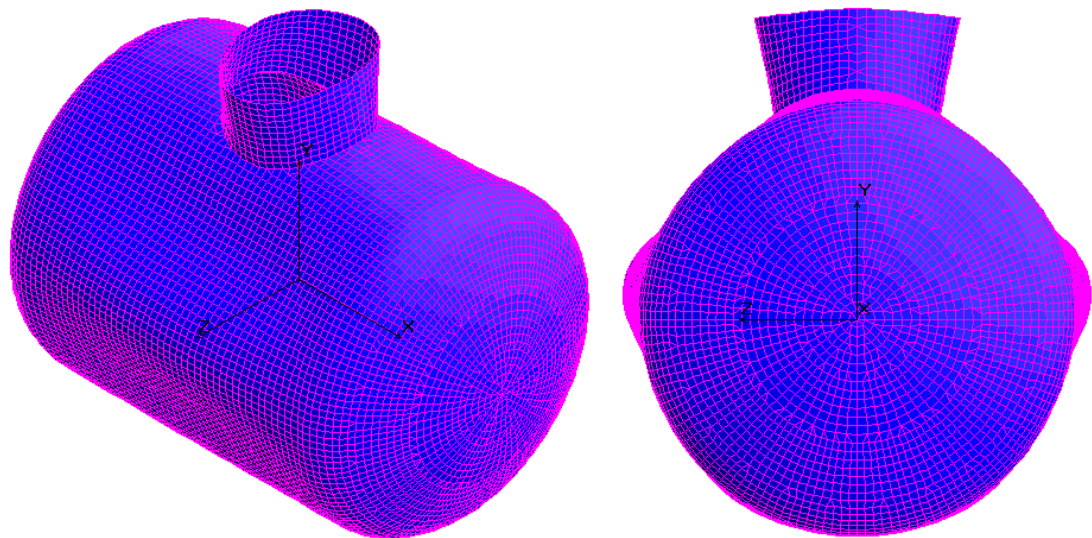
Pokud by nádoba byla využívána spíše ve stavu prázdném po delší dobu a zaplněna z poloviny vždy jen po krátkou dobu, bylo by nutné parametry dimenzovat na dlouhodobě vyprázdněnou nádobu. Výsledky nám říkají, že pro dlouhodobé působení podmínek případu zatížení 1 (prázdná nádoba) je pro vyhovující bezpečnostní koeficient hodnota tloušťky stěny pláště nádoby o objemu 2,3 m³ 14,5 mm, kdežto pro krátkodobý případ provozního zatížení 2 (nádoba z poloviny plná) je potřebná tloušťka stěny pláště jen 10,5 mm. Stejná úvaha platí i pro ostatní velikosti nádob.

E_Mode=1 2.03968



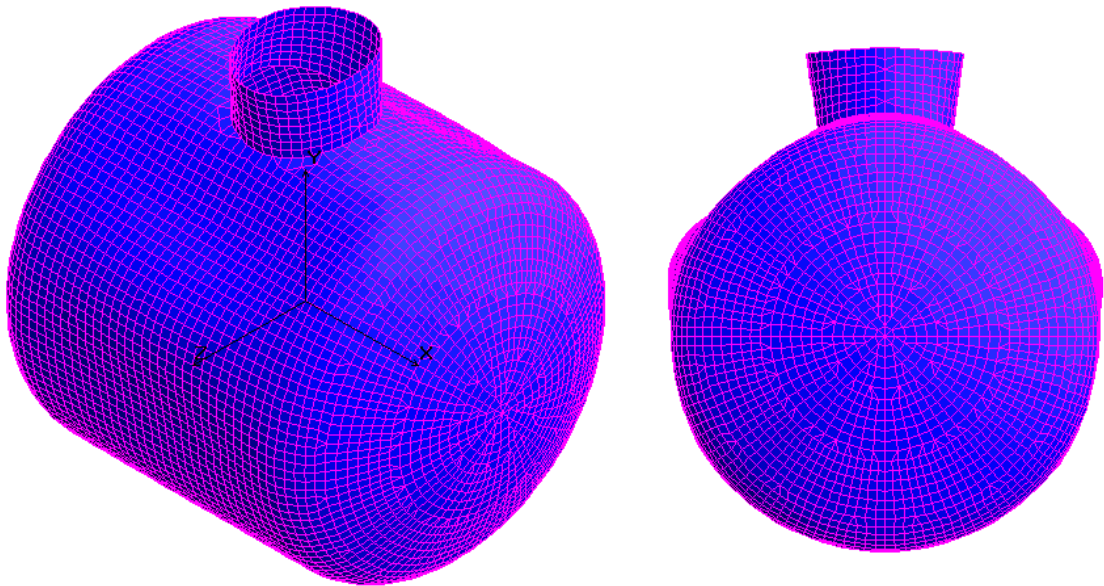
Obrázek 32 Deformace nádoby o objemu $2,3 \text{ m}^3$ při splnění koeficientu bezpečnosti mezního stavu ztráty stability – Provozní případ zatížení 2 - krátkodobý stav zatížení.

E_Mode=1 2.04334



Obrázek 33 Deformace nádoby o objemu $4,2 \text{ m}^3$ při splnění koeficientu bezpečnosti mezního stavu ztráty stability – Provozní případ zatížení 2 - krátkodobý stav zatížení.

B_Mode=1 2.11145



Obrázek 34 Deformace nádoby o objemu $6,2 \text{ m}^3$ při splnění koeficientu bezpečnosti mezního stavu ztráty stability – Provozní případ zatížení 2 - krátkodobý stav zatížení.

6.2.3 Vliv změny modulu tečení na koeficient bezpečnosti mezního stavu ztráty stability pláště nádoby a tloušťku stěny nádoby

Studie byla provedena pro nádobu o objemu $2,3 \text{ m}^3$:

Tabulka 17 Vliv změny tloušťky stěny pláště nádoby na bezpečnostní koeficient pro $E=400\text{MPa}$

Tloušťka stěny [mm]	Koeficient bezpečnosti [-]
8,0	1,02
8,5	1,20
9,0	1,39
9,5	1,59
10,0	1,81
10,5	2,04
11,0	2,28
11,5	2,54
12,0	2,80
12,5	3,06

Tabulka 18 Vliv změny tloušťky stěny pláště nádoby na bezpečnostní koeficient pro $E=300\text{MPa}$

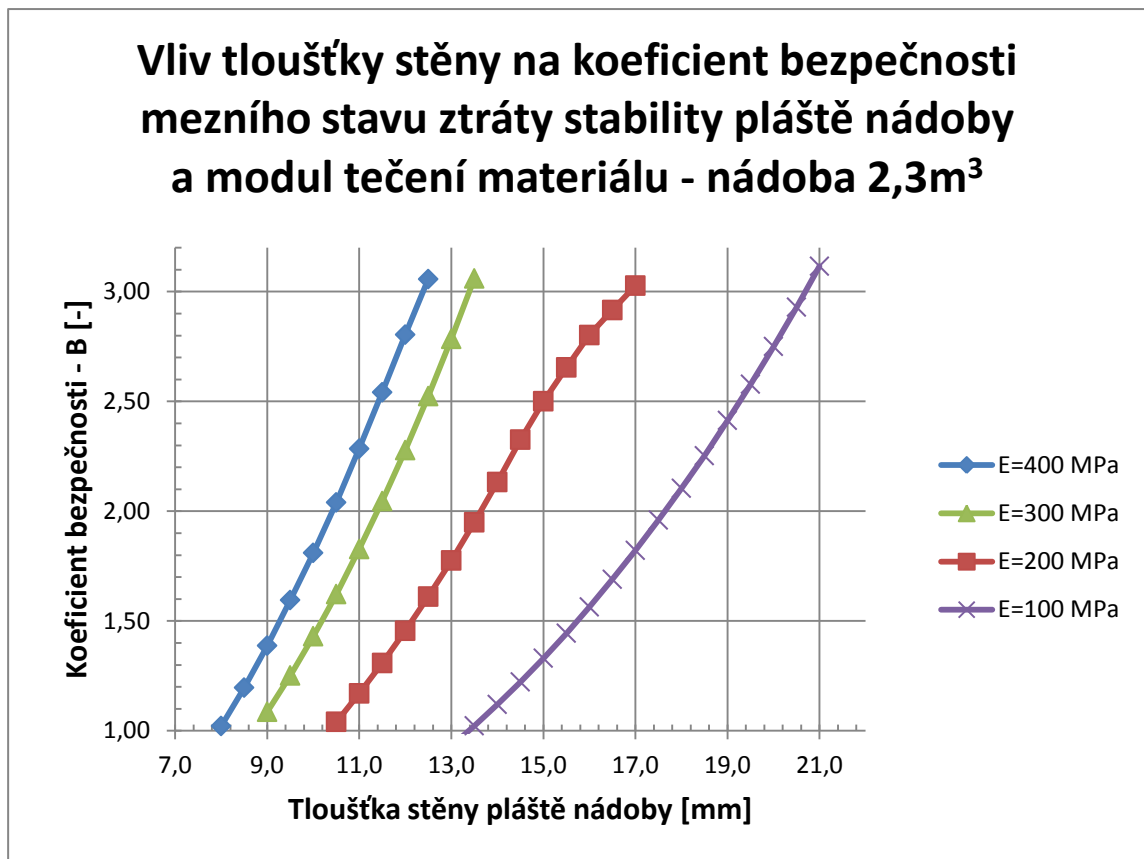
Tloušťka stěny [mm]	Koeficient bezpečnosti [-]
9,0	1,09
9,5	1,25
10,0	1,43
10,5	1,62
11,0	1,83
11,5	2,05
12,0	2,28
12,5	2,52
13,0	2,78
13,5	3,06

Tabulka 19 Vliv změny tloušťky stěny pláště nádoby na bezpečnostní koeficient pro $E=200\text{MPa}$

Tloušťka stěny [mm]	Koeficient bezpečnosti [-]
10,5	1,04
11,0	1,17
11,5	1,31
12,0	1,46
12,5	1,61
13,0	1,78
13,5	1,95
14,0	2,13
14,5	2,33
15,0	2,50
15,5	2,65
16,0	2,80
16,5	2,92
17,0	3,03

Tabulka 20 Vliv změny tloušťky stěny pláště nádoby na bezpečnostní koeficient pro $E=100\text{MPa}$

Tloušťka stěny [mm]	Koeficient bezpečnosti [-]
11,0	0,61
11,5	0,68
12,0	0,76
12,5	0,84
13,0	0,93
13,5	1,02
14,0	1,12
14,5	1,22
15,0	1,33
15,5	1,44
16,0	1,56
16,5	1,69
17,0	1,82
17,5	1,96
18,0	2,10
18,5	2,25
19,0	2,41
19,5	2,58
20,0	2,75
20,5	2,93
21,0	3,12



Graf 6 Vliv modulu tečení materiálu na koeficient bezpečnosti mezního stavu ztráty stability pláště nádoby a tloušťku stěny pláště nádoby – provozní případ zatížení 2

Z grafického znázornění poklesu modulu tečení materiálu lze říci, že vyhovující koeficient bezpečnosti splňuje nádoba s modulem tečení $E = 400$ MPa a tloušťkou stěny pláště 10,5 mm, pro $E = 300$ MPa – 11,5 mm, $E = 200$ MPa – 14 mm, $E = 100$ MPa – 18 mm.

V porovnání s předchozím případem zatížení 1 jsou hodnoty tloušťky stěny pláště nádoby při splnění koeficientu bezpečnosti dle normy ČSN EN 1778 nižší.

Stejně jako u případu zatížení 1 (prázdná nádoba) je vidět odlišný sklon křivky modulu tečení materiálu $E = 100$ MPa. Avšak v tomto případě porovnání poměrného nárůstu tloušťky stěny u modulů tečení $E = 400$ a $E = 100$ MPa při zvyšujícím se koeficientu bezpečnosti (od 1 do 3), se změnil z hodnoty 2 (případ zatížení 1) na 1,6 x větší pro modul tečení materiálu $E = 100$ MPa.

Důležitější je však při provozním stavu zatížení, který se předpokládá dlouhodobého charakteru, porovnání modulů $E=200$ a $E=100$ MPa z důvodu možnosti poklesu (původního kvalifikovaného odhadu) $E=200$ MPa.

Při dosažení koeficientu bezpečnosti 2 je u těchto dvou modulů tečení materiálu rozdíl v tloušťce stěny pláště nádoby 4 mm. Pokud by skutečně modul tečení materiálu klesl na hodnotu $E=100$ MPa, musela by nádoba být dimenzována až nad hodnotu bezpečnosti 3 pro modul tečení materiálu $E=200$ MPa. Při této hodnotě koeficientu bezpečnosti má nádoba tloušťku stěny pláště 17 mm oproti potřebným 18 mm, které by byly potřeba pro splnění normy u modulu $E=100$ MPa.

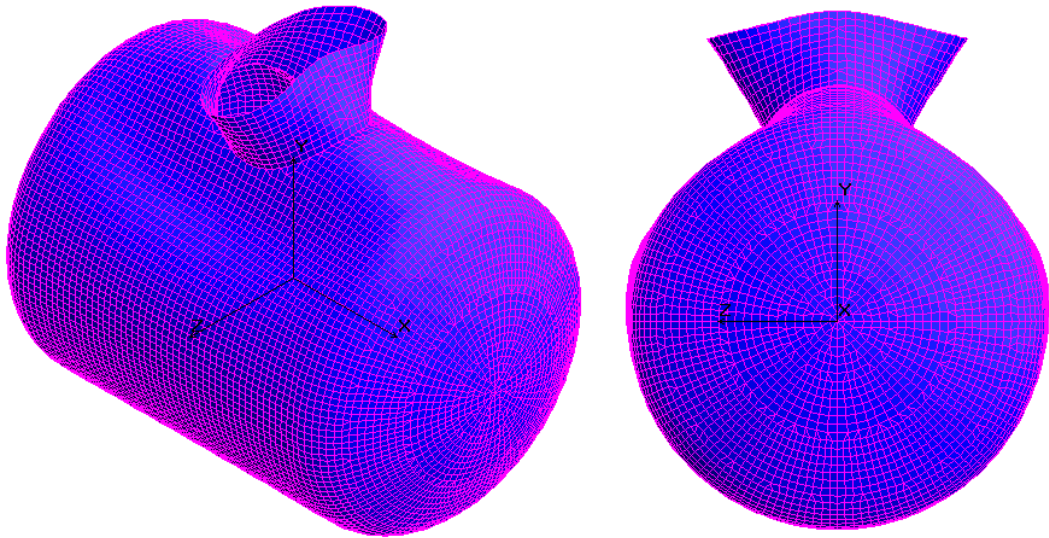
6.3 Příklad zatížení 2 – zvláštní případ provozního zatížení – nádoba zapuštěná v zemi, zcela zaplněná vodou – působení hydrostatického tlaku a tlaku obsypu

Pro srovnání byl vytvořen model nádoby o objemu $4,2 \text{ m}^3$, který byl vystaven dlouhodobému působení tlaku obsypu a hydrostatickému tlaku (po horní okraj nádoby).

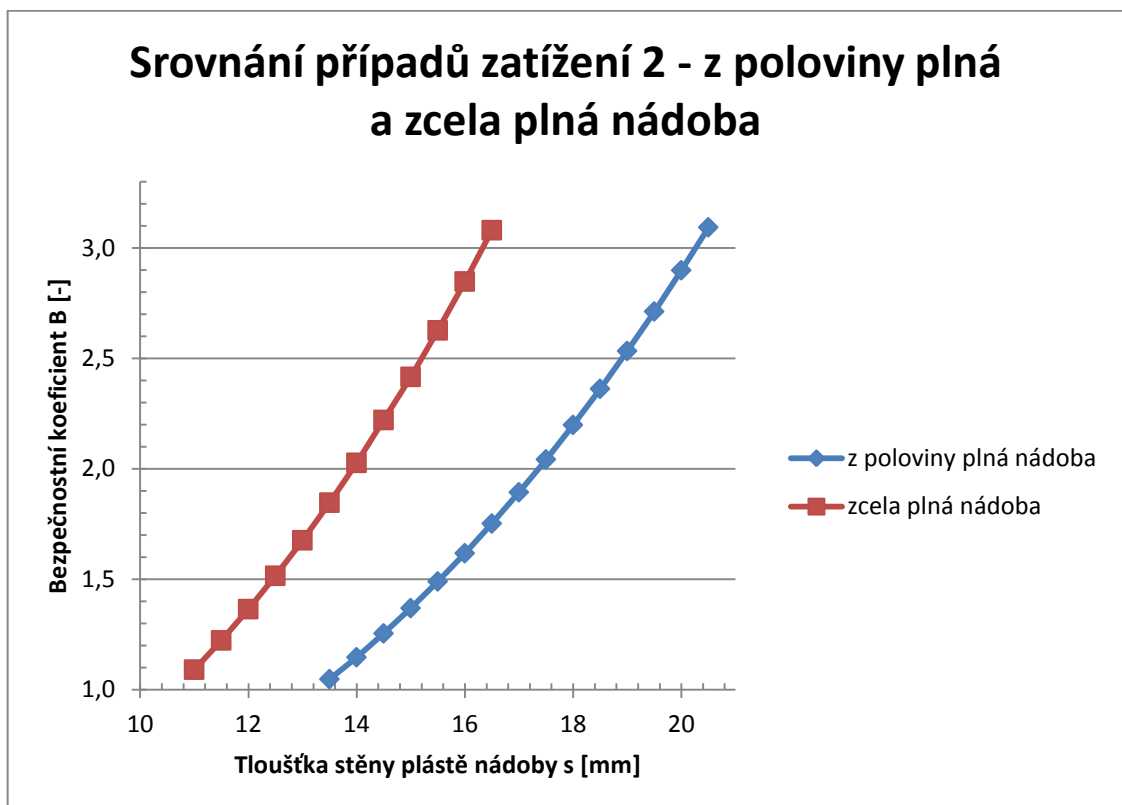
Tabulka 21 Výsledky – nádoba $4,2 \text{ m}^3$ zcela zaplněná vodou

Tloušťka stěny [mm]	Koeficient bezpečnosti [-]
11,0	1,09
11,5	1,22
12,0	1,36
12,5	1,52
13,0	1,68
13,5	1,85
14,0	2,03
14,5	2,22
15,0	2,42
15,5	2,63
16,0	2,85
16,5	3,08

B_Mode=18 2.02519



Obrázek 35 Deformace nádoby o objemu 4,2 m³ při splnění koeficientu bezpečnosti mezního stavu ztráty stability – Zvláštní případ provozního zatížení 2, zcela plná nádoba - dlouhodobý stav zatížení.



Graf 7 Působení hydrostatického tlaku zcela plné a poloprázdné nádoby na tloušťku stěny koeficient bezpečnosti.

Z výsledků a grafického vyjádření lze říci, že pro nádobu o objemu $4,2 \text{ m}^3$ je z hlediska její stabilitní únosnosti výhodnější, když je ve stavu zcela plném. Pro zvláštní případ provozního zatížení 2 (nádobu zcela plnou) je tloušťka stěny pláště vyhovující normě ČSN EN 1778 14 mm. Avšak předpoklad, že nádoba bude po celou dobu plně napuštěná, je pro technickou praxi nepravděpodobný.

Při porovnání všech dlouhodobých stavů zatížení tj. případ zatížení 1 – nádoba zcela prázdná, provozní případ zatížení 2 – nádoba z poloviny plná a zvláštní případ zatížení 2 – nádoba zcela plná, jsme zjistily, že nejkritičtější je případ zatížení 1 (tedy nádoba zcela prázdná). U této nádoby, je pro splnění normou daného koeficientu bezpečnosti mezní ztráty stability, potřebná tloušťka stěny pláště 19 mm. Pro použitou geometrii tedy platí, čím je nádoba plnější, tím menší je potřebná tloušťka stěny pláště pro to, aby nádoba neztratila svou stabilitu.

6.4 Úprava konstrukce nádoby (vyztužením žebry), vliv žebor na stabilitní únosnost

Pro srovnání s předchozím typem konstrukce nádoby byla provedena studie stabilitní únosnosti nádoby s vyztužením o objemu $4,2 \text{ m}^3$

Tabulka 22 Výsledky – parametry nádoby splňující koeficient bezpečnosti mezního stavu ztráty stability pláště nádoby

Konstrukce vyztužená žebry		
Případ zatížení	tloušťka	
	stěny pláště a dna	vyztužení
Případ zatížení 1	12,5	31,0
	15,5	35,0
	17,0	32,0
Provozní případ zatížení 2	13,5	36,0
	15,0	30,0
	16,0	27,0
Zvláštní případ provozního zatížení 2	11,5	30,0
	12,0	29,0
	12,5	27,0

Z tabulky výsledků je patrné, že pro splnění koeficientu bezpečnosti, který uvádí norma, je možné dimenzovat nádobu s různými tloušťkami stěn pláště a vyztužení. Vzhle-

dem k šetření materiálu a tím i nákladů na výrobu, je výhodnější vyrábět nádoby s menší tloušťkou pláště a větší tloušťkou vyztužení.

6.5 Imperfekce a jejich vliv na stabilitní únosnost nádoby

Při výrobě tenkostěnných výrobků technologií rotačního odlévání může docházet k tomu, že výrobek má na některých místech rozdílnou tloušťku. Tato imperfekce se pak může projevit na stabilitní únosnosti nádoby a jejímu následnému stabilitnímu zborcení. Imperfekce se podle velikosti nádoby a tloušťky stěny pláště mohou lišit až o 1 mm, nejčastěji však o 0,5 mm. Zjistit rozsah imperfekcí je možno za pomoci rentgenografického měření.

Pro to, aby nedocházelo ke stabilitnímu zborcení pláště nádob by bylo zapotřebí nadimenzovat parametry nádoby tak, aby koeficient bezpečnosti mezního stavu ztráty stability pláště nádoby byl o něco větší, než předepisuje norma. Z praktického hlediska se výrobci snaží ušetřit co nejvíce na výrobních nákladech, proto tomuto předpokladu vlivu imperfekcí nepřikládají téměř žádný význam. Často se proto stává, že se plášť nádoby zborší ještě před uplynutím doby životnosti nádoby.

7 MATERIÁLOVÉ PARAMETRY

Pro výrobu horizontálních rotačně odlévaných nádob byl zvolen materiál LLDPE (lineární nízkohustotní polyetylen). Tento materiál je levný a v poměru k ceně má dobré fyzikální i chemické vlastnosti.

Vybrané vlastnosti LLDPE:

Hustota	938	[kg/m ³]
Youngův modul E	800	[MPa]
MFI (index toku taveniny) – 190°C/2,16kg	4	[g/10min]
Poissonova konstanta ν	0,4	[-]
Protažení při přetržení ε	>700	[%]

Modul tečení E (kvalifikovaný odhad)

10 hodin	600	[MPa]
1000 hodin	400	[MPa]
1 rok	300	[MPa]

8 SOUHRN VÝSLEDKŮ

Tabulka 23 Souhrn výsledků parametrů splňujících normu ČSN EN 1778 – nádoba bez vyztužení

Konstrukce nádoby bez vyztužení			
Případ zatížení	Objem nádoby [m ³]	Modul tečení materiálu [MPa]	Tloušťka stěny s [mm]
Případ zatížení 1	2,3	400	11,5
		300	12,5
		200	14,5
		100	19,5
	4,2	400	14,5
		200	19,0
Provozní případ zatížení 2	2,3	400	10,5
		300	11,5
		200	14,0
		100	18,0
	4,2	400	13,5
		200	17,5
6,2	400	17,0	
	200	22,0	
Zvláštní případ provozního zatížení 2	4,2	200	14,0

Tabulka 24 Souhrn výsledků parametrů splňujících normu ČSN EN 1778 – nádoba vyztužená žebry

Konstrukce vyztužená žebry				
Případ zatížení	Objem nádoby [m ³]	Modul tečení materiálu [MPa]	Tloušťka stěny [mm]	
			plášť a dno	vyztužení
Případ zatížení 1	4,2	200	15,5	35,0
Provozní případ zatížení 2			15	30,0
Zvláštní případ provozního zatížení 2			11,5	30,0

ZÁVĚR

Diplomová práce detailně popisuje chování podzemních horizontálních rotačně odlévaných nádob při jejich provozním zatížení.

Pro analýzu koeficientu bezpečnosti mezního stavu ztráty stability pláště nádoby byly sestaveny FEM modely s odlišnou velikostí objemu, tj. nádoba TH 2,3m³, TH 4,2 m³ a TH 6,2 m³.

Tyto modely byly zatíženy třemi případy zatížení tj. případem zatížení 1 – nádoba zapuštěná v zemi, zcela prázdná – působení tlakem obsypu, provozním případem zatížení 2 – nádoba zapuštěná v zemi, naplněná do poloviny vodou – působení hydrostatickým tlakem a tlakem obsypu a zvláštním případem provozního zatížení 2 – nádoba zapuštěná v zemi, zcela zaplněná vodou – působení hydrostatického tlaku a tlaku obsypu. Parametrická studie byla provedena jak pro krátkodobé případy zatížení, tak i pro dlouhodobé (provozní) případy zatížení, které se v technické praxi předpokládají, u všech výše zmíněných velikostí nádob.

Parametrická studie zmíněných zatížení ukázala, že větší stabilitní únosnost má nádoba, která je zatížena provozním zatížením 2, tj. tlakem obsypu a hydrostatickým tlakem vody než nádoba zatížena pouze tlakem obsypu. Pro splnění koeficientu bezpečnosti mezního stavu ztráty stability pláště nádoby u provozního případu zatížení dle normy ČSN EN 1778, bylo u provozního případu zatížení 2 potřeba nádoby nadimenzovat s parametrem menší tloušťky stěn než pro provozní případ zatížení 1 (tj. nádobu zcela prázdnou). Při dimenzování tenkostěnných nádob je potřeba určit jakým způsobem bude nádoba zatěžována při provozu, ale důležitým parametrem je také doba, po kterou je nádoba vystavena specifickému zatížení.

Protože v technické praxi jsou tyto nádoby zatěžovány vždy alespoň po krátkou dobu případem zatížení 1, je potřeba parametr tloušťky stěny nadimenzovat i pro tento případ. Případ zatížení 1, tedy nádoby prázdné jsou pro ztrátu stability a z toho vyplývající zborcení nejvíce kritické.

Z důvodu faktu, že s rostoucí dobou provozního zatížení klesá modul tečení materiálu, byla vytvořena studie na tuto problematiku se zkoumáním vlivu poklesu modulu tečení na stabilitní únosnost nádob. Pokud porovnáme (u případu zatížení 1) poměrný nárůst tloušťky a pokles modulu tečení ze E=400 na E=100 MPa zjistíme, že hodnoty poměrného

zvětšení tloušťky v rozmezí koeficientu bezpečnosti od 1 do 3 jsou 2x větší pro modul tečení $E=100$ MPa.

Výsledky ukázaly, že pro případ zatížení 1 jsou vyhovující nádoby těchto parametrů: Nádoba o objemu $2,3 \text{ m}^3$ s tloušťkou stěny pláště 11,5 mm (pro krátkodobý stav zatížení) a 14,5 mm (u dlouhodobého stavu zatížení). Nádoba o objemu $4,2 \text{ m}^3$ (pro krátkodobý stav zatížení) 14,5 a 19 mm (u dlouhodobého stavu zatížení). Nádoba o objemu $6,2 \text{ m}^3$ (pro krátkodobý stav zatížení) 18 mm a 23,5 mm (u dlouhodobého stavu zatížení).

Provozní případ zatížení 2 vyhovuje: Nádoba o objemu $2,3 \text{ m}^3$ s tloušťkou stěny pláště 10,5 mm (pro krátkodobý stav zatížení) a 14 mm (u dlouhodobého stavu zatížení). Nádoba o objemu $4,2 \text{ m}^3$ (pro krátkodobý stav zatížení) 13,5 a 17,5 mm (u dlouhodobého stavu zatížení). Nádoba o objemu $6,2 \text{ m}^3$ (pro krátkodobý stav zatížení) 17 mm a 22 mm (u dlouhodobého stavu zatížení).

Pro srovnání byla vytvořena studie zvláštního případu zatížení 2 pro nádobu o objemu $4,2 \text{ m}^3$, kdy je nádoba zcela plná a tedy zatížená hydrostatickým tlakem a tlakem obrysu. Nádoba při splnění koeficientu dle normy ČSN EN 1778 vyhovuje, pokud je dimenzována na tloušťku 14 mm. V porovnání s ostatními případy zatížení je možno zjistit, že plná nádoba je nejméně náchylná ke zborcení ze všech případů zatížení.

Další částí parametrické studie bylo navržení konstrukce nádoby o objemu $4,2 \text{ m}^3$ vyztužené žebry. Navržená konstrukce byla vystavena všem případům zatížení (tj. případ zatížení 1, provozní případ zatížení 2 a zvláštní případ zatížení 2). Následně byla provedena parametrická studie, ze které byly vybrány hodnoty tloušťky stěny a vyztužení vyhovující koeficientu bezpečnosti mezní ztráty stability pláště nádoby. Výsledky ukázaly, že nejvíce úsporným návrhem z hlediska materiálu a tím i nákladů na výrobu, je nádoba zatížená případem zatížení 1. Parametry jsou: tloušťka pláště 12,5 mm a tloušťka vyztužení 31 mm. U provozního případu zatížení 2 je vyhovující tloušťka stěny pláště 15 mm a tloušťka vyztužení 30 mm. U posledního zkoumaného případu zatížení (zvláštní případ zatížení 2 – zcela plná nádoba) postačila ke splnění normou daného koeficientu tloušťka stěny pláště 11,5 mm a tloušťka vyztužení žebry 30 mm.

Problematika stabilitní únosnosti tenkostěnných konstrukcí je v dnešní době šetření nákladů více než důležitá. Aby nedocházelo k nežádoucímu zborcení nádoby a tím k její destrukci je potřeba problematice mezních stavů věnovat zvýšenou pozornost.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ŠUBA, Oldřich. *Mechanika polymerů a kompozitů*. Vyd. 1. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011, 110 s. ISBN 978-80-7454-015-8.
- [2] ŠUBA, Oldřich. *Dimenzování a navrhování výrobků z polymerů*. Vyd. 3. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010, 112 s. ISBN 978-80-7318-948-8.
- [3] ŠUBA, Oldřich. *Mechanické chování těles*. 5. vyd. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010, 101 s. ISBN 978-80-7318-907-5.
- [4] VOLTR, Ondřej a Petr PAŠČENKO. *Ztráta stability příčně zatěžované válcové skořepiny s počáteční imperfekcí*. s. 8. Dostupné z:
http://dspace.upce.cz/bitstream/10195/48772/1/VoltrO_ZtrataStability_2012.pdf
- [5] BABINSKÝ, Milan. *Nebezpečí zborcení nádob vnějším přetlakem*. In: Tlakinfo.cz: oborový portál pro vyhrazený tlaková zařízení[online]. 4. 9. 2006 [cit. 2013-10-28]. Dostupné z:
<http://www.tlakinfo.cz/t.py?t=2&i=1260>
- [6] BARÁNEK, Vlatimil. *Studium a optimalizace návrhu svařovaných termoplastových konstrukcí ČOV*. Zlín, 2007. Dostupné z:
http://dspace.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/3844/bar%C3%A1nek_2007_dp.pdf?sequence=1.
Diplomová práce. UTB Zlín. Vedoucí práce doc. Ing. Oldřich Šuba, CSc.
- [7] HYNČICA, Radomír. *Nelineární FEM modelování mechanického chování laminátových plošných konstrukcí*. Zlín, 2011. Dostupné z:
http://dspace.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/18236/hyn%C4%8Dica_2011_dp.pdf?sequence=1.
Diplomová práce. UTB Zlín. Vedoucí práce doc. Ing. Oldřich Šuba, CSc.
- [8] ŽITNÝ, R. *COSMOS v procesním inženýrství a strojnictví: (část I. metody dimenzování aparátů)*. ČVUT, 1997. Dostupné z: <http://www1.fs.cvut.cz/cz/U218/pedagog/skripta/predmet/naz/naz.pdf>
- [9] PINĎÁK, Martin. *Návrh laboratorního zařízení pro rotační tváření (technologie rotomolding)* [online]. Zlín, 2010 [cit. 2013-10-28]. Dostupné z:
http://dspace.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/12554/pin%C4%8F%C3%A1k_2010_bp.pdf?sequence=1.
Bakalářská práce. UTB. Vedoucí práce Miroslav Maňas.
- [10] KRAMOLIŠ, Zdeněk. *Optimalizace tvaru rotačně odlévaných velkoobjemových nádob* [online]. 2012 [cit. 2014-05-01]. Dostupné z: http://dspace.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/22806/kramoli%C5%A1_2012_dp.pdf?sequence=1.
Diplomová práce. UTB Zlín. Vedoucí práce Šuba Oldřich.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

[C]	Matice tuhosti	[-]
A_1	korekční faktor zohledňující vliv teploty na rázovou pevnost	[-]
A_{2K}	korekční faktor na vliv provozovaného media (znečištěná voda)	[-]
b	Šířka elementu	[mm]
B	Bod bifurkace, Koeficient bezpečnosti	[-]
D	Válcová (cylindrická) ohybová tuhost stěny desky, skořepiny	[]
E	Yangův modul pružnosti, Modul pružnosti tečení	[MPa]
E.s	Tuhost v tlaku myšlených prstenců jednotkové šířky	[N.m ²]
E**.s	membránová tuhost stěny desky/skořepiny.	[N.m ²]
F	koeficient svaru	[-]
f_m, f_t	funkce	[-]
G	Smykový modul pružnosti	[MPa]
g	Tíhové zrychlení	[m.s ⁻²]
H	Výška hladiny vody v nádobě	[m]
h	Výška zeminy (šterku)	[m]
j	Jednotkový kvadratický moment průřezu	[mm ⁴]
J_p	Kvadratický moment průřezu	[mm ⁴]
k	Koeficient pro materiál (šterk) – norma ČSN EN 1778	[-]
k,l	konstanta	[-]
L	Délka válcové skořepiny, rozteč prstenců	[mm]
L*	Délka válcové skořepiny, pro niž nemá význam vyztužení	[mm]]
LLDPE	Lineární nízkohustotní polyetylen	
MFI	Index toku taveniny	[g/10min]
$m_{i,j}$	Ohybový moment ve směru x, y	[N.m]

n_{KR}	Kritická síla ve směru normály	[N]
N_x, N_y	normálové síly	[N]
n_x, n_y	Složky normálové síly	[N]
p	Vnitřní přetlak, tlak	[Pa]
P, Q	Bod	[-]
p_h, p_v	Horizontální tlak, vertikální tlak	[Pa]
q_{KR}	Kritické spojité zatížení	[N.mm ⁻¹]
R	Poloměr válcové skořepiny	[m]
r_i	Křivost, Radiální souřadnice k neutrální ose	[mm]
s	Tloušťka stěny, elementu	[mm]
S	Koeficient bezpečnosti (norma ČSN EN 1778)	[-]
\sin, \cos	Goniometrické funkce	[-]
t	Posuvová síla, rozteč prstenců (vyztužení)	[N, mm]
u	Vektor	[-]
V	Objem charakteristického elementu struktury	[m ³]
x, y, z	Směr působení síly, napětí, osa	[-]
α, φ	Úhel	[°]
β	Úhel, hodnota při které jde zanedbat moment a síla	[°, -]
γ	Koeficient pro materiál zásypu	[kN.m ³]
δ	posunutí	[mm]
ΔR	Změna poloměru střední plochy	[mm]
ε_x	Deformace ve směru x	[mm]
ε_{xy}	Sdružená deformace ve směru xy	[mm]
ε_y	Deformace ve směru y	[mm]
ν	Poissonova konstanta	[-]

π	konstanta	[-]
ρ	hustota	[kg.m ³]
σ	Napětí v tahu	[MPa]
σ_1, σ_2	Hlavní složky napětí na Mohrově kružnici	[MPa]
σ_{DOV}	Dovolené tahové napětí	[MPa]
σ_x	Tahové napětí v ose x	[MPa]
σ_{xy}	Dvouosé tahové napětí	[MPa]
σ_y	Tahové napětí v ose y	[MPa]
σ_{yx}	Dvouosé tahové napětí	[MPa]
τ	Smyková složka napětí	[MPa]
τ_{xy}	Sdružená smyková napětí	[MPa]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Element 1x1 mm dvouosé napjatosti. [3].....	12
Obrázek 2 Mohrova kružnice rovinné napjatosti. [3]	13
Obrázek 3 Mohrova kružnice – pootočení souřadného systému, hlavní složky napětí. [3]	13
Obrázek 4 Rovinná deformace – přetvoření tělesa. [3]	14
Obrázek 5 Normálové a smykové složky napětí – dvouosá napjatost. [3].....	15
Obrázek 6 Mohrovy kružnice napětí a deformace – čistý smyk. [3].....	16
Obrázek 7 Složky membránové napjatosti – element 1x1 mm. [3].....	18
Obrázek 8 Složky ohybových momentů a napětí při čistém Kirchhoffově ohybu desky. [3]	19
Obrázek 9 Mohrova kružnice – pootočení souřadného systému. [3]	19
Obrázek 10 Metoda řezu rotačně symetrické válcové tenkostěnné nádoby. [3]	22
Obrázek 11 Chování okrajů válcových skořepin. [3]	24
Obrázek 12 Působící síly a momenty na element nosníku – pásku. [3]	25
Obrázek 13 Eulerovo řešení membránové napjatosti tenkostěnných výrobků. [1]	28
Obrázek 14 Diagram chování jednoose tlačené ideálně rovné desky s volnými bočními okraji zatížené osovými silami. [1]	29
Obrázek 15 Diagram chování válcové skořepiny zatížené osovým tlakem. [1].....	30
Obrázek 16 Chování válcové skořepiny při působení vnějšího přetlaku. [1].....	32
Obrázek 17 Kontinuální vyztužení válcové skořepiny. [1]	35
Obrázek 18 Diskontinuální vyztužení válcových skořepin – prstence.[1]	36
Obrázek 19 Princip technologie rotačního odlévání. [8]	37
Obrázek 20 FEM model základní geometrie	40
Obrázek 21 FEM model geometrie vyztužené žebry.....	41
Obrázek 22 Sekce nádoby, rozdělení směru působení tlaku.	42
Obrázek 23 Deformace nádoby o objemu 2,3 m ³ při splnění koeficientu bezpečnosti mezního stavu ztráty stability	49
Obrázek 24 Deformace nádoby o objemu 4,2 m ³ při splnění koeficientu bezpečnosti mezního stavu ztráty stability – krátkodobý stav zatížení.....	50
Obrázek 25 Deformace nádoby o objemu 6,2 m ³ při splnění koeficientu bezpečnosti mezního stavu ztráty stability – krátkodobý stav zatížení.....	50

Obrázek 26 Deformace nádoby o objemu 2,3 m ³ při splnění koeficientu bezpečnosti mezního stavu ztráty stability – dlouhodobý stav zatížení.....	54
Obrázek 27 Deformace nádoby o objemu 4,2 m ³ při splnění koeficientu bezpečnosti mezního stavu ztráty stability – dlouhodobý stav zatížení.....	54
Obrázek 28 Deformace nádoby o objemu 6,2 m ³ při splnění koeficientu bezpečnosti mezního stavu ztráty stability – Příklad zatížení 1 - dlouhodobý stav zatížení.....	55
Obrázek 29 Deformace nádoby o objemu 2,3 m ³ při splnění koeficientu bezpečnosti mezního stavu ztráty stability – Provozní případ zatížení 2 - dlouhodobý stav zatížení.....	62
Obrázek 30 Deformace nádoby o objemu 4,2 m ³ při splnění koeficientu bezpečnosti mezního stavu ztráty stability – Provozní případ zatížení 2 - dlouhodobý stav zatížení.....	62
Obrázek 31 Deformace nádoby o objemu 6,2 m ³ při splnění koeficientu bezpečnosti mezního stavu ztráty stability – Provozní případ zatížení 2 - dlouhodobý stav zatížení.....	63
Obrázek 32 Deformace nádoby o objemu 2,3 m ³ při splnění koeficientu bezpečnosti mezního stavu ztráty stability – Provozní případ zatížení 2 - krátkodobý stav zatížení.....	66
Obrázek 33 Deformace nádoby o objemu 4,2 m ³ při splnění koeficientu bezpečnosti mezního stavu ztráty stability – Provozní případ zatížení 2 - krátkodobý stav zatížení.....	66
Obrázek 34 Deformace nádoby o objemu 6,2 m ³ při splnění koeficientu bezpečnosti mezního stavu ztráty stability – Provozní případ zatížení 2 - krátkodobý stav zatížení.....	67
Obrázek 35 Deformace nádoby o objemu 4,2 m ³ při splnění koeficientu bezpečnosti mezního stavu ztráty stability – Zvláštní případ provozního zatížení 2, zcela plná nádoba - dlouhodobý stav zatížení.	72

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Výsledky – nádoba 2,3 m ³ pro E=400 MPa	47
Tabulka 2 Výsledky – nádoba 4,2 m ³ pro E=400 MPa	47
Tabulka 3 Výsledky – nádoba 6,2 m ³ pro E=400 MPa	48
Tabulka 4 Výsledky – nádoba 2,3 m ³ pro E=200 MPa	51
Tabulka 5 Výsledky – nádoba 4,2 m ³ pro E=200 MPa	51
Tabulka 6 Výsledky – nádoba 6,2 m ³ pro E=200 MPa	52
Tabulka 7 Vliv změny tloušťky stěny pláště nádoby na bezpečnostní koeficient pro E=400MPa	55
Tabulka 8 Vliv změny tloušťky stěny pláště nádoby na bezpečnostní koeficient pro E=300MPa	56
Tabulka 9 Vliv změny tloušťky stěny pláště nádoby na bezpečnostní koeficient pro E=200MPa	56
Tabulka 10 Vliv změny tloušťky stěny pláště nádoby na bezpečnostní koeficient pro E=100MPa	57
Tabulka 11 Výsledky – nádoba 2,3 m ³ pro E=200 MPa	59
Tabulka 12 Výsledky – nádoba 4,2 m ³ pro E=200 MPa	60
Tabulka 13 Výsledky – nádoba 6,2 m ³ pro E=200 MPa	60
Tabulka 14 Výsledky – nádoba 2,3 m ³ pro E=400 MPa	63
Tabulka 15 Výsledky – nádoba 4,2 m ³ pro E=400 MPa	64
Tabulka 16 Výsledky – nádoba 6,2 m ³ pro E=400 MPa	64
Tabulka 17 Vliv změny tloušťky stěny pláště nádoby na bezpečnostní koeficient pro E=400MPa	67
Tabulka 18 Vliv změny tloušťky stěny pláště nádoby na bezpečnostní.....	68
Tabulka 19 Vliv změny tloušťky stěny pláště nádoby na bezpečnostní koeficient pro E=200MPa	68
Tabulka 20 Vliv změny tloušťky stěny pláště nádoby na bezpečnostní.....	69
Tabulka 21 Výsledky – nádoba 4,2 m ³ zcela zaplněná vodou.....	71
Tabulka 22 Výsledky – parametry nádoby splňující koeficient bezpečnosti	73
Tabulka 23 Souhrn výsledků parametrů splňujících normu ČSN EN 1778 –	76
Tabulka 24 Souhrn výsledků parametrů splňujících normu ČSN EN 1778 –	76

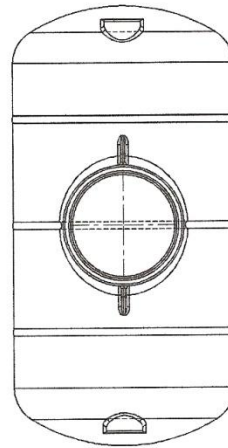
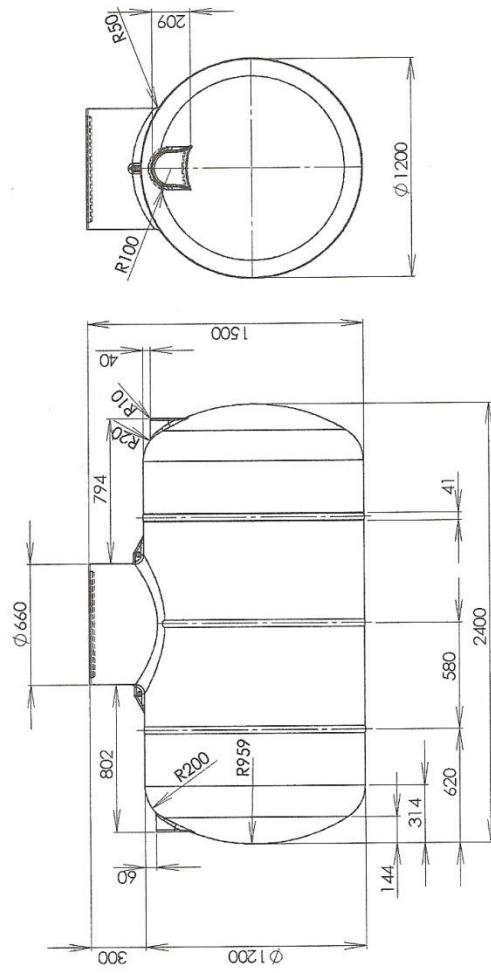
SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Vliv velikosti nádoby na stabilitní únosnost - krátkodobý případ zatížení 1	48
Graf 2 Vliv velikosti nádoby na stabilitní únosnost - dlouhodobý případ zatížení 1	53
Graf 3 Vliv modulu tečení materiálu na koeficient bezpečnosti mezního stavu ztráty stability pláště nádoby a tloušťku stěny pláště nádoby - případ zatížení 1	58
Graf 4 Srovnání velikosti nádoby a vlivu na stabilitní únosnost dlouhodobého provozního případu zatížení 2	61
Graf 5 Srovnání velikosti nádoby a vlivu na stabilitní únosnost krátkodobého provozního případu zatížení 2	65
Graf 6 Vliv modulu tečení materiálu na koeficient bezpečnosti mezního stavu ztráty stability pláště nádoby a tloušťku stěny pláště nádoby – provozní případ zatížení 2.....	70
Graf 7 Působení hydrostatického tlaku zcela plné a poloprázdné nádoby na tloušťku stěny koeficient bezpečnosti.....	72

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Výkresová dokumentace – nádoba o objemu 2,3 m ³	88
Příloha 2 Výkresová dokumentace – nádoba o objemu 4,2 m ³	89
Příloha 3 Výkresová dokumentace – nádoba o objemu 6,2 m ³	90

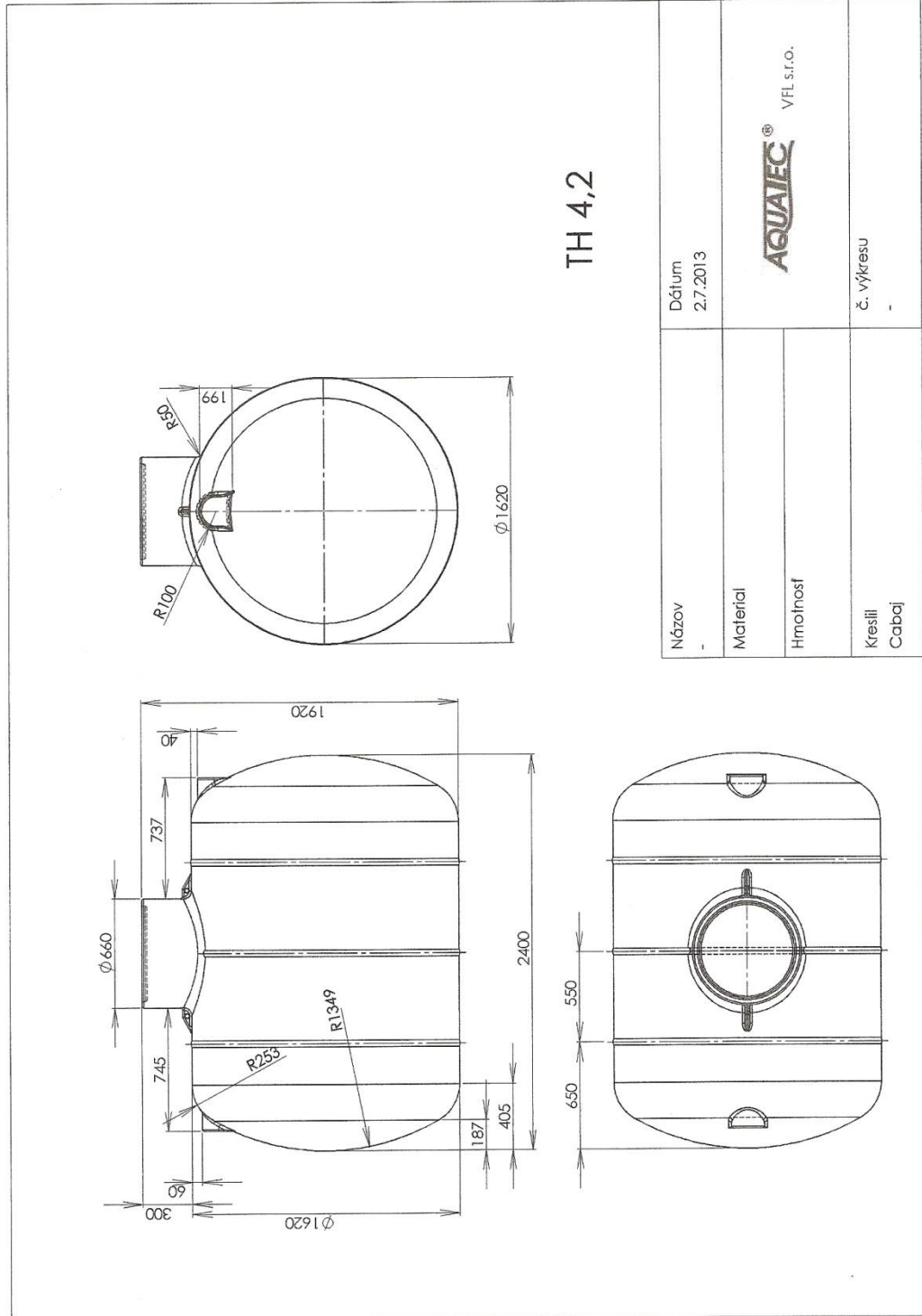
Příloha 1 Výkresová dokumentace – nádoba o objemu 2,3 m³



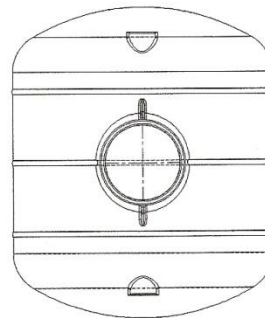
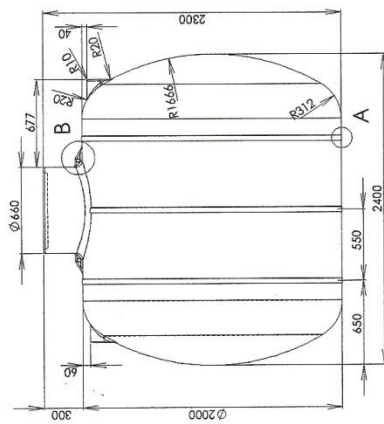
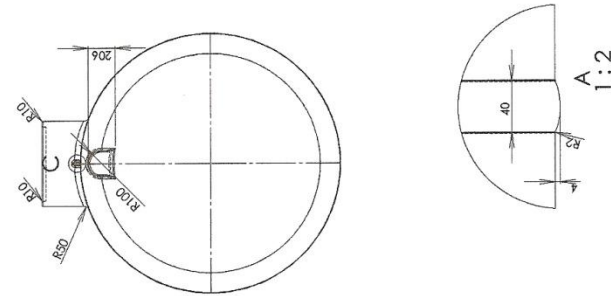
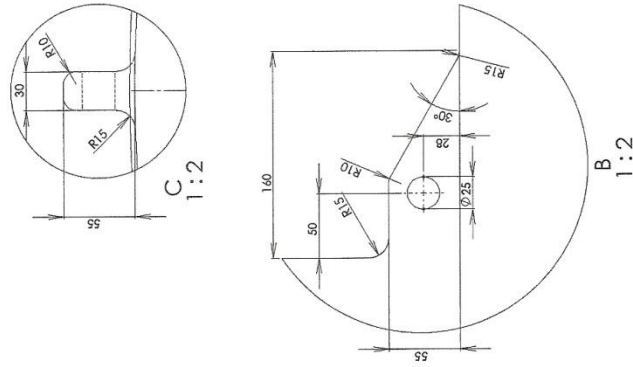
Název	Dátum	
	2.7.2013	
Material		AQUATEC [®] VFL s.r.o.
Hmotnost		
Kreslil Cobaj		č. výkresu

TH 2,3

Příloha 2 Výkresová dokumentace – nádoba o objemu 4,2 m³



Příloha 3 Výkresová dokumentace – nádoba o objemu 6,2 m³



Název	Datum
-	29.6.2013
Material	AQUAJEC® VFL s.r.o.
Hmotnost	
Kresil	č. výřezu
Číslo	-

TH 6,2