

# **Statika vertikálních rotačně odlévaných velkoobjemových nádob.**

Bc. Pavel Soukup

---

Diplomová práce  
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. Pavel Soukup**  
Osobní číslo: **T12449**  
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**  
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Statika vertikálních rotačně odlévaných  
velkoobjemových nádob**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární studii na dané téma.
2. Vypracujte FEM modely vertikálních podzemních nádob, vyráběných technologií rotačního odlévání.
3. Vypracujte parametrickou studii vlivu doby zatížení a změny geometrických parametrů nádoby na úroveň stabilitní 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*

Příjmení a jméno: SOUKUP PAVEL

Obor: KONSTRUKCE  
TECHNICKÝCH  
ZARIŽENÍ

## 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 <sup>1)</sup>;
- 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 <sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> 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 <sup>3)</sup> 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 6.5.2014

Paul Soukup

<sup>1)</sup> 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 nahlázení 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.

<sup>2)</sup> 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 vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

<sup>3)</sup> 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 přihlíží k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce se zabývá studiem stabilitní únosnosti vertikálních rotačně odlévaných velkoobjemových podzemních nádrží, zejména čističek odpadních vod. Jsou sestaveny FEM modelové studie pro mimořádný krátkodobý případ zatížení prázdné nádoby pod účinky vnějšího tlaku obsypu, a provozní - dlouhodobý případ kombinace zatížení hydrostatickým tlakem náplně a vnějším tlakem obsypu.

Teoretická část diplomové práce se popisuje technologie výroby velkoobjemových nádob, v oblasti plastů, především technologie rotomoldingu, jejím použitím v praxi a jejími výhodami a nevýhodami. Dále je popisována problematika mechanického chování tenkostěnných plastových skořepinových konstrukcí, zejména stability a stabilitní únosnosti.

Praktická část diplomové práce se zabývá sestavením jednotlivých FEM modelů, a následnými parametrickými studii, zahrnujícími vliv tloušťky pláště, rozměry nádob a typu zatížení. Výsledky analýz jsou pak v závěru diskutovány z hlediska stabilitní odolnosti.

Klíčová slova: plastová skořepina, stabilita, velkoobjemové nádrže, optimalizace, rotační tváření

## **ABSTRACT**

This thesis deals with the stability bearing capacity of statics of vertical rotomolding bulk containers, and load capacity of underground tanks. They are drawn FEM model studies for emergency short-term the case load empty container under the effects of external pressure backfill, and operational - a long-term case load combinations hydrostatic pressure load and external pressure backfill.

In the theoretical part, I concentrate on the technology of production of bulk containers, used plastic materials, which are treated for producing rotational molding, and its advantages and disadvantages. Lately, the issue of mechanical behavior of thin-walled plastic shell structures, stability and buckling loads is introduced.

The practical part of this study focuses on making each of FEM models, and following parametric studies involving the influence of the thickness of the shell, container size and type of load. The results of the analysis are discussed in the conclusion in terms of the stability of resistance

Keywords: plastic shell, stability, bulk container, optimization, rotomolding

Tímto bych chtěl poděkovat panu doc. Ing. Oldřichovi Šubovi, CSc. za jeho čas, ochotu, trpělivost, odborné rady a připomínky, které mi pomohly při psaní této bakalářské práce.

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

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>11</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>12</b>
<b>1 TECHNOLOGIE VÝROBY PLASTOVÝCH VELKOOBJEMOVÝCH NÁDOB</b> .....	<b>13</b>
1.1 SVAŘOVANÉ VELKOOBJEMOVÉ PLASTOVÉ NÁDOBY .....	13
1.1.1 Svařování horkým plynem a přidavným materiálem .....	13
1.1.2 Svařování ruční rychlotryskou .....	16
1.1.3 Svařování desek extruderem (vytlačovací svařování).....	16
1.1.4 Svařování natupo.....	19
1.2 SPIRÁLNÍ NAVÍJENÍ (ŠROUBOVICOVÉ NAVÍJENÍ) .....	19
1.2.1 Princip spirálního navíjení .....	19
1.2.2 Použití spirálně vinutých nádob .....	21
1.2.3 Hlavní výhody spirálně vinutých nádob .....	21
1.2.4 Navíjení šroubovicové za mokra.....	21
1.2.5 Navíjení pólové za mokra .....	22
1.2.6 Axiální navíjení.....	23
1.3 ROTAČNÍ TVÁŘENÍ - ODLÉVÁNÍ (ROTOMOLDING).....	23
1.3.1 Princip rotačního tváření (Rotomoldingu) .....	23
1.3.2 Výhody rotačního tváření.....	25
1.3.3 Nevýhody rotačního tváření.....	25
1.3.4 Rozsah využití rotačního tváření.....	26
<b>2 MATERIÁLY POUŽÍVANÉ PRO ROTAČNÍ TVÁŘENÍ</b> .....	<b>27</b>
2.1 POUŽÍVANÉ MATERIÁLY PRO TECHNOLOGII ROTAČNÍHO TVÁŘENÍ (ROTOMOLDING).....	27
2.1.1 Polyetylen.....	27
2.1.2 Nízkohustotní polyetylen (LDPE).....	27
2.1.3 Vysokohustotní polyetylen (HDPE) .....	27
2.1.4 Středněhustotní polyetylen (MDPE).....	28
2.1.5 Laminární nízkohustotní polyetylen (LLDPE) .....	28
2.1.6 Zesíťovaný polyetylen XLPE.....	28
2.1.7 Ostatní, méně používané materiály .....	29
<b>3 VELKOOBJEMOVÉ NÁDRŽE</b> .....	<b>30</b>
3.1 POUŽITÍ PLASTOVÝCH NÁDRŽÍ.....	30
3.2 OSAZENÍ VELKOOBJEMOVÝCH NÁDRŽÍ.....	31
3.2.1 Samostatné volně stojící nádrže .....	31
3.2.2 Nádrže k obsypání.....	31
3.2.3 Nádrže k obetonování .....	32
3.2.4 Nádrže k obetonování proti spodní vodě .....	32
3.3 ÚDRŽBA PLASTOVÝCH NÁDRŽÍ.....	32
3.4 VÝHODY A NEVÝHODY VELKOOBJEMOVÝCH NÁDRŽÍ.....	33
3.4.1 Výhody velkoobjemových plastových nádrží.....	33
3.4.2 Nevýhody velkoobjemových plastových nádrží.....	33
<b>4 STABILITA TENKOSTĚNNÝCH VÝROBKŮ A KONSTRUKCÍ</b> .....	<b>34</b>



4.1	STABILITA VÁLCOVÉ SKOŘEPINY ZATÍŽENÉ VNĚJŠÍM PŘETLAKEM.....	35
4.2	MEMBRÁNOVÁ, OHYBOVÁ NAPIJATOST A DEFORMACE TENKOSTĚNNÝCH VÝROBKŮ S HOMOGENNÍ STĚNOU .....	39
4.3	NEBEZPEČÍ ZBORCENÍ NÁDOB VLVIVEM VNĚJŠÍHO PŘETLAKU .....	42
4.3.1	Mezní stavy únosnosti a způsobilosti.....	43
4.3.2	Mezní stav stabilitního zborcení .....	43
4.3.3	Nebezpečí stabilitního selhání.....	45
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>47</b>
<b>5</b>	<b>CÍL PRÁCE .....</b>	<b>48</b>
<b>6</b>	<b>POČÁTEČNÍ PARAMETRY NÁDOB - ROZDĚLENÍ ZATÍŽENÍ.....</b>	<b>49</b>
6.1	ROZMĚRY NÁDOB 4M - OBJEM 4 M <sup>3</sup> A 8M - OBJEM 4 M <sup>3</sup> .....	49
6.1.1	Rozměry nádoby velkoobjemové nádoby 4M .....	49
6.1.2	Rozměry nádoby velkoobjemové nádoby 8M .....	50
6.2	MATERIÁL.....	51
6.2.1	Vlastnosti vybraného materiálu.....	51
6.2.2	Modul tečení (kvalifikovaný odhad).....	51
6.3	ZATÍŽENÍ VELKOOBJEMOVÉ NÁDOBY .....	51
6.3.1	Zatížení vyvolané obsypáním nádoby.....	52
6.3.2	Zatížení vyvolané hydrostatickým tlakem .....	52
6.3.3	Zatížení pěší - zatížení, které může vzniknout vnějšími silami - chodci nebo auta .....	53
6.3.4	Zatížení nádoby s označením A_LC2 .....	53
6.3.5	Zatížení nádoby s označením A_LC3 .....	54
6.3.6	Zatížení nádoby s označením B_LC2 .....	54
6.3.7	Zatížení nádoby s označením B_LC3 .....	55
6.4	ULOŽENÍ VELKOOBJEMOVÉ NÁDOBY 4M A 8M.....	56
6.4.1	Uložení na tuhém podkladu .....	56
<b>7</b>	<b>VÝSLEDKY ANALÝZ.....</b>	<b>57</b>
7.1	VÝPOČTY SIMULACÍ PRO 4M_A_LC2 - MIMOŘÁDNÝ STAV ZATÍŽENÍ - ZCELA VYPRÁZDNĚNÁ NÁDOBA POD VLVIVEM TLAKU OBSYPU NA STĚNY NÁDOBY .....	57
7.2	VÝPOČTY SIMULACÍ PRO 4M_A_LC3 - PROVOZNÍ ZATÍŽENÍ - KOMBINACE HYDROSTATICKEHO TLAKU VODY A TLAKU OBSYPU NA NÁDOBU.....	59
7.3	VÝPOČTY SIMULACÍ PRO 4M_B_LC2 - MIMOŘÁDNÝ STAV ZATÍŽENÍ - ZCELA VYPRÁZDNĚNÁ NÁDOBA POD VLVIVEM TLAKU OBSYPU NA STĚNY NÁDOBY, KDY VRCHNÍ POLOVINA KOPULE NÁDOBY JE ZATÍŽENA VERTIKÁLNÍM TLAKEM.....	61
7.4	VÝPOČTY SIMULACÍ 4M_B_LC3 - PROVOZNÍ ZATÍŽENÍ - KOMBINACE HYDROSTATICKEHO TLAKU VODY A TLAKU OBSYPU NA NÁDOBU, KDY VRCHNÍ POLOVINA KOPULE NÁDOBY JE ZATÍŽENA VERTIKÁLNÍM TLAKEM.....	64
7.5	VÝPOČTY SIMULACÍ PRO 8M_A_LC2 - MIMOŘÁDNÝ STAV ZATÍŽENÍ - ZCELA VYPRÁZDNĚNÁ NÁDOBA POD VLVIVEM TLAKU OBSYPU NA STĚNY NÁDOBY .....	66
7.6	VÝPOČTY SIMULACÍ PRO 8M_A_LC3 - PROVOZNÍ ZATÍŽENÍ - KOMBINACE HYDROSTATICKEHO TLAKU VODY A TLAKU OBSYPU NA NÁDOBU.....	69
7.7	VÝPOČTY SIMULACÍ PRO 8M_B_LC2 - MIMOŘÁDNÝ STAV ZATÍŽENÍ - ZCELA VYPRÁZDNĚNÁ NÁDOBA POD VLVIVEM TLAKU OBSYPU NA STĚNY NÁDOBY,	

KDY VRCHNÍ POLOVINA KOPULE NÁDOBY JE ZATÍŽENA VERTIKÁLNÍM TLAKEM.....	71
7.8    VÝPOČTY SIMULACÍ 8M_B_LC3 - PROVOZNÍ ZATÍŽENÍ - KOMBINACE HYDROSTATICKÉHO TLAKU VODY A TLAKU OBSYPU NA NÁDOBU, KDY VRCHNÍ POLOVINA KOPULE NÁDOBY JE ZATÍŽENA VERTIKÁLNÍM TLAKEM.....	74
7.9    SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ A_LC2 A B_LC2 A VÝSLEDKŮ A_LC3 A B_LC3 .....	76
7.9.1    Srovnání výsledků velkoobjemové nádoby 4M_A_LC2 a 4M_B_LC2.....	76
7.9.2    Srovnání výsledků velkoobjemové nádoby 4M_A_LC3 a 4M_B_LC3.....	79
7.9.3    Srovnání výsledků velkoobjemové nádoby 8M_A_LC2 a 8M_B_LC2.....	81
7.9.4    Srovnání výsledků velkoobjemové nádoby 8M_A_LC3 a 8M_B_LC3.....	83
<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>86</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>87</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>89</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>90</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>93</b>

## ÚVOD

Specifičnost mechanického chování termoplastů s sebou přináší zvláštnosti a obtíže při navrhování ve srovnání s klasickými konstrukcemi. Charakter technologie a snaha omezit hmotnost příp. cenu výrobku, vede k tomu, že konstrukce z termoplastů jsou nejčastěji navrhovány jako tenkostěnné. Vzhledem k malým hodnotám tuhosti (modul pružnosti) resp. časově závislé tuhosti (modul tečení) je pro návrh výrobku rozhodující stavy deformace, nikoliv únosnosti. Velmi často tak jsou pro návrh rozhodující mezní stavy, mající za příčinu ztrátu stability konstrukce.

Provozní zatížení je dáno superpozicí vnitřního hydrostatického tlaku s určitou výškou hladiny vody a vnějšího tlaku, způsobeného obsypem nádrže. Mezi montážní případy zatížení je pak nutno řadit procesy zasypávání resp. obetonování za současného protitlaku vody, postupně napouštěné tak, aby výška hladiny v každé fázi převyšovala úroveň obsypu resp. betonové směsi.

Mimořádné resp. nežádoucí stavy zatížení představují účinky spodní vody, přitížení vozidly apod. Z hlediska vzniku mezního stavu ztráty stability válcového pláště je obecně značně nepříznivý stav vyprázdněné čistírny, kdy plášť je zatížen pouze vnějším tlakem obsypu. Vzhledem k viskoelastickému chování termoplastů musí být trvání tohoto stavu omezeno na relativně krátkou dobu, nezbytnou k vykonání údržby či opravy.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

# 1 TECHNOLOGIE VÝROBY PLASTOVÝCH VELKOOBJEMOVÝCH NÁDOB

V současné době je pro výrobu plastových velkoobjemových nádob využíváno následujících technologií:

- svařování
- spirální navíjení
- rotační odlévání [1]

Každá z uvedených technologií přináší určité výhody i omezení z hlediska výroby finálního výrobku. [1]

## 1.1 Svařované velkoobjemové plastové nádoby

Pro svařování plastů se výhradně používají termoplasty, proto se používá v odborné literatuře pojem svařování termoplastů. Na rozdíl od svařování kovů, při svařování termoplastů nedochází v tavenině k zásadní přeměně materiálu. Řetězce makromolekul se při ohřívání nemění, dojde pouze k jejich propletení a po ochlazení se znovu vytvoří vazebné síly. Pro svařování se používají především metody svařování horkým tělesem nebo horkým vzduchem. [2]

### 1.1.1 Svařování horkým plynem a přídavným materiálem

Princip ručního svařování horkým plynem spočívá v ohřevu základního materiálu v místě svarových ploch horkým plynem přítomnosti přídavného materiálu, který je svářečem vtlačován do plastifikovaných svarových ploch. Tento způsob svařování se využívá pro svařování termoplastových materiálů. Na základě uvedeného principu svařování můžeme používat dva způsoby spojování desek:

- svařování ruční, horkým plynem kruhovou tryskou s přídavným materiálem
- svařování ruční, horkým plynem rychlotryskou [2]

### **Zařízení, nástroje a pomůcky pro ruční svařování horkým plynem**

Základem této metody je zdroj horkého plynu. Nejčastěji jeto ruční elektrické dmýchadlo s ohřevem plynu (vzduchu) uzpůsobené pro držení v ruce, často označované jako horkovzdušná pistole. [2]

### **Hlavní části zařízení pro svařování horkým vzduchem**

- dmýchadlo, topná spirála a obal, případně stacionární dmýchadlo s hadicí zakončenou rukojetí pro připojení trysky (možnost připojení více svářečů najedno dmýchadlo)
- regulace teploty, výkonu dmýchadla, čidlo kontroly teploty horkého plynu (digitální ukazatel)
- trysky (kruhová tryska, stehovací tryska, různé typy rychlotrysek) [2]

### **Příklady použitých materiálů při svařování**

- PE - polyetylen
- PP - polypropylen
- PVC - polyvinylchlorid
- PVDF - polyvinylidenfluorid
- ABS - akrylonitrilbutadienstyren
- PMMA - polymethylmetakrylát [2]

### **Příklady použitých přídavných materiálů**

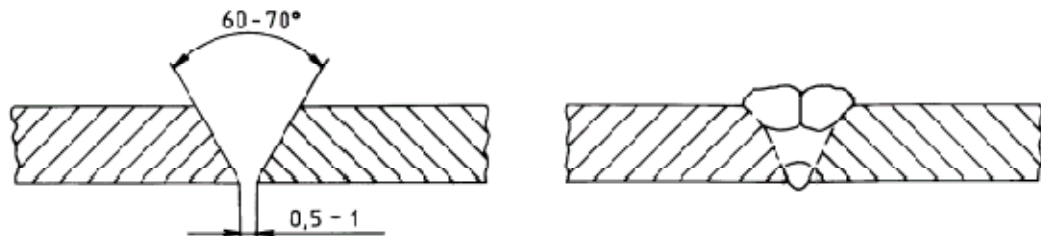
Dráty na svařování podle ČSN EN 12943

- kruhový průřez - Ø 2.0 mm, Ø 3.0 mm, Ø 4.0 mm, Ø 5.0 mm
- trojúhelníkový průřez – 90/5, 80/5 (úhel/šířka)
- nestandardní po dohodě: obdélníkový průřez, oválné, tvarové

Tyto materiály se dodávají v balení jako tyče, svitky nebo cívky. [2]

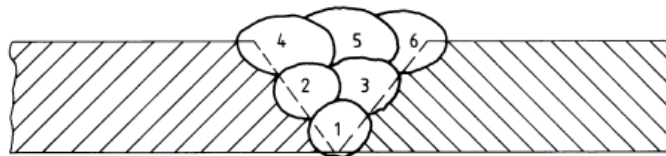
## Typy svárů

- tupé sváry



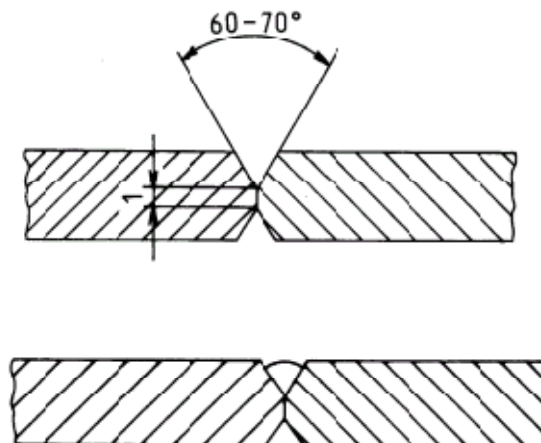
Obrázek 1: Tupé sváry [2]

- vícevrstvé tupé sváry - kdy do jednoho sváru jsou kladeny housenky [2]



Obrázek 2: Vícevrstvé tupé sváry [2]

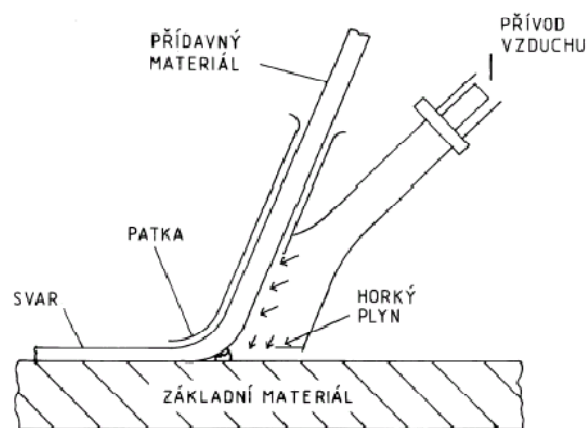
- oboustranný V svar - střídavě protilehlý postup kladení housenek [2]



Obrázek 3: oboustranný V svar [2]

### 1.1.2 Svařování ruční rychlotryskou

Horkovzdušné svařovací přístroje je nutné vybavit svařovacími nástavci - tryskou. Jejich volba závisí na druhu použití a liší se i podle typu připojení ke svařovací pistoli (nasunovací, nebo závitové, které se šroubují), či druhu svařovacího drátu. V praxi se nejčastěji používají rychlosvařovací trysky, které nabízejí výhodu v rychlosti svařovacího procesu. Díky tomu, že vedou svařovací drát a nahřívají ho rovnoměrně se svařovaným materiálem, probíhá svařování rychleji než se základní svařovací tryskou. Při pokládání drátu je vyvíjen konstantní tlak, a výsledný svár je obvykle také kvalitnější. V případě těžko dostupných míst nelze použít toto řešení, takže potom se uplatní základní svařovací tryska. [3]



Obrázek 4: Rychlosvařovací tryska [2]

### 1.1.3 Svařování desek extruderem (vytlačovací svařování)

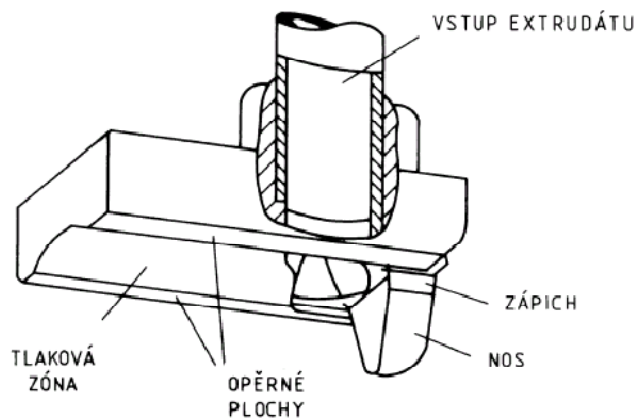
Tato technologie je nejrozšířenější při svařování konstrukcí z termoplastů. Ve srovnání s ručním svařováním horkým plynem a přídatným materiálem je dlouhodobý svařovací faktor hlediska spolehlivosti mnohem příznivější ve prospěch svařování extruderem. Svařují se tak konstrukce z desek pro stavební účely, podzemní nádoby, žumpy, čističky, bazény, vodoměrné šachty, nadzemní nádrže, mořící vany pro hutní provozy, nádoby pro těžkou chemii. Materiály, které se úspěšně svařují uvedenou metodou, jsou zejména PP, PE, PVDF. Tímto způsobem se dají svařovat i desky z PVC, životnost zejména plastifikační komory a šneku je díky látkám, které se při plastifikaci uvolňují z PVC je významně omezená. [2]



### Princip svařování extruderem

Svařovací drát zavedený do extruzního přístroje je nejprve rozmělněn a poté v extruzní komoře roztaven na požadovanou teplotu. Z komory je roztavená hmota tzv. extrudát vytlačován skrz svařovací botku do místa spoje. Přisun svařovacího drátu si přístroj reguluje automaticky v závislosti na svařovacím výkonu.

I při extruzním svařování se používá předehřevu svařovaného materiálu horkým vzduchem, takže extrudery, stejně jako horkovzdušné přístroje, jsou dodávány ve variantách s vlastním předehřevem (součástí je integrované dmychadlo) nebo bez něj, a platí pro ně stejná charakteristika. [3]



Obrázek 5: Detailní rozkreslení botičky [2]

### Příklady použitých přídatných materiálů

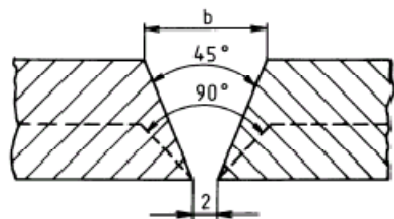
- dráty na svařování podle ČSN EN 12943:
  - o kruhový průřez -  $\varnothing$  3.0 mm,  $\varnothing$  4.0 mm,  $\varnothing$  5.0 mm
- granuláty standardního provedení

Materiál kruhového průřezu se dodávají v balení jako cívka. [2]

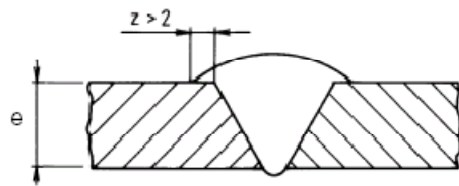
**Typy svarů**

- u tupých styků V-svarů nebo oboustranných V-svarů je nutné dbát následujících zásad:

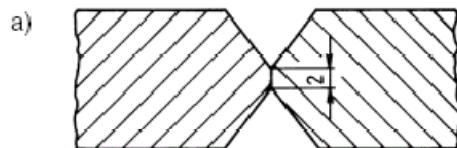
- |                                |                                      |
|--------------------------------|--------------------------------------|
| ○ úhel rozvržení               | 45° - 90°, závislý na tloušťce desky |
| ○ šířka otevření ,b‘           | omezit na ≈ 30 mm                    |
| ○ šířka spáry v oblasti kořene | ≈ 2 mm                               |
| ○ oblast překrytí ,z‘          | ≥2 mm [2]                            |



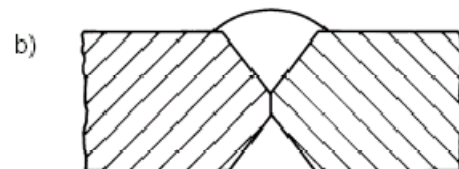
PŘIPRAVENÁ SVAŘOVACÍ SPÁRA



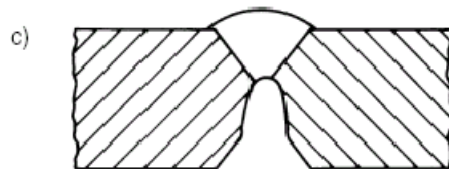
SVAŘENÝ ŠEV



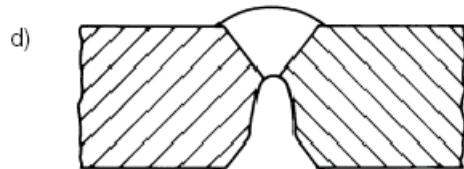
PŘIPRAVENÁ SVAŘOVACÍ SPÁRA



SVAŘENÝ HORNÍ ŠEV



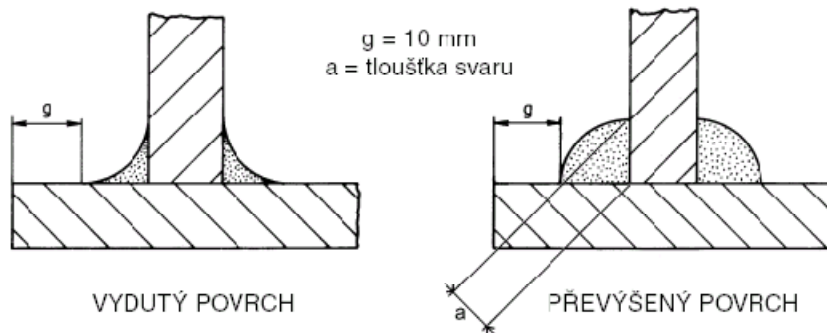
PROVEDENÝ KOŘEN SVARU



DOLNÍ SVAŘOVÁ HOUSENKA

Obrázek 6: Typy tupých svarů [2]

- koutové svary



Obrázek 7: Koutový svar [2]

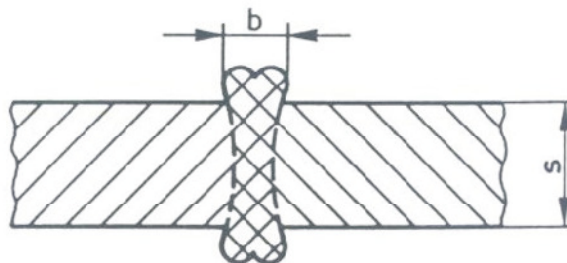
### 1.1.4 Svařování natupo

Nejkvalitnější způsob svařování termoplastických materiálů umožňuje technologie tzv. svařování natupo. Provádí se pomocí ohřevu čel desek nebo profilů na topném tělese (pravítku) a jejich následným spojením s použitím tlaku. Nepoužívá se tedy žádný přídavný materiál jako u jiných metod svařování termoplastů. [3]

Proces probíhá ve třech fázích:

- nahřívání
- přestavování
- spojování [3]

Spojování probíhá pomocí svařovacích strojů, které jsou tvořeny rámem s pohybovým ústrojím, které zajišťuje paralelní pohyb obou částí svařovacího stolu a topným tělesem, které tvoří topná lišta, nebo tzv. pravítko, které je pohyblivě upnuto k rámu a řídicí jednotkou. Některé stroje jsou vybaveny programovatelnými automaty. U mechanických strojů provádí obsluha potřebné úkony ručně. Upnutí desek zajišťují přítlačné hydraulicky nebo pneumaticky ovládané upínací patky, u mechanických svařovacích strojů upíná díly obsluha mechanickými svěrkami. [3]

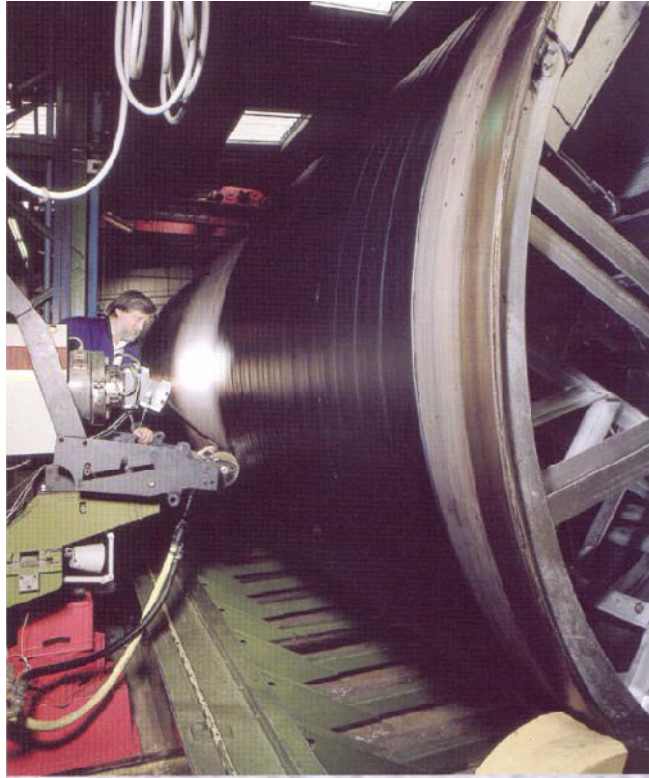


Obrázek 8: Spoj natupo [3]

## 1.2 Spirální navíjení (šroubovicové navíjení)

### 1.2.1 Princip spirálního navíjení

Pás materiálu se vytlačuje z vytlačovací hlavy, která se pohybuje rovnoběžně s osou trnu, který má tvar nádoby. Požadovaná tloušťka stěny nádoby je sestavena z počtu vinutí po celé délce nádoby. V místech kde, nastává vinutí materiálu a následné vinutí další vrstvy materiálu, musí být trn nebo už navinutý materiál předehříván na určitou teplotu pro správné přilnutí nového materiálu. Po navinutí všech vrstev materiálu se nádoba ochladí na teplotu okolního prostředí. [6]



Obrázek 9: Navíjená nádoba [6]

Po ochlazení na okolní teplotu se nádoba odstraní z trnu, ořežou se její konce a na tyto konce se přivaří základna nádoby. Původně se základny vyráběly spirálním navíjením na válec. Toto vinutí se podélně rozřízlo a narovnal se do plochého tvaru. Tato metoda je stále používána pro méně namáhané nádoby. Pro více namáhané nádoby se základna zhotovuje z polymerních desek. [6]



Obrázek 10: Svařování základny s vinutým válce [6]

Vinutý válec je vyroben na jednu operaci až do konečné podoby. Maximální tloušťka pásu se pohybuje v rozmezí 70 - 80 mm. Regulace teploty je zásadní veličinou pro úspěšné přilnutí materiálu k leštěnému trnu. [6]

Velké nádrže jsou často vyráběny ze dvou částí, které jsou spojeny ve vodorovném švu. [6]

### 1.2.2 Použití spirálně vinutých nádob

Nádrže, vyrobené z termoplastů jsou určeny převážně pro:

- roztoky agresivních chemických kapalin
- odpadní vody
- kapalná hnojiva i pitnou vodu. [5]

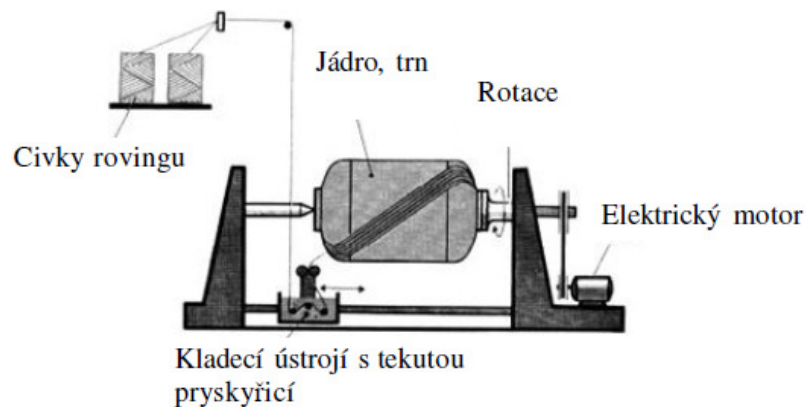
Plastové nádrže jsou bezúdržbového provedení. Jejich výhodou jsou tedy téměř nulové náklady na údržbu při vysoké životnosti zařízení. [5]

### 1.2.3 Hlavní výhody spirálně vinutých nádob

- rozměrová řada od průměru 850 mm do průměru 4 500 mm
- max. výška pláště bez navařování je 10 000 mm
- pracovní objem až 150 m<sup>3</sup>
- neomezená tloušťka pláště oproti vrstveným pláštům z desek
- vysoká projektová životnost nádrží, až 50 let oproti nádržím z laminátu
- vyšší bezpečnost vůči technologii svařování
- bezpečné skladování i vysoce agresivních médií
- bezúdržbové (téměř nulové náklady na údržbu) [5]

### 1.2.4 Navíjení šroubovicové za mokra

Stroje pro šroubovicové navíjení je možno přirovnat k soustruhům. Navíjení rovingů smočených v pryskyřici (obvykle se v pryskyřici brodí pouze kotouč a přes jeho horní povrch se vedou vlákna) je používáno při výrobě rotačních i nerotačních nádob s konvexními povrchy (trubky a těla raket). Vhodné orientace vláken ve stěně nádoby je dosahováno volbou rychlosti posuvu kladecího ústrojí (vlákna procházejí tzv. „okem“) při dané rychlosti otáčení jádra (trnu). Vhodné množství pryskyřice je dosahováno průchodem namočeného rovingu „tryskou“, která přebytečnou pryskyřici odstraní (roving „vyždíme“) a volbou vhodného tahového napětí v navíjeném rovingu. Při navíjení na otáčející se trn klade vodící oko rovingu podle schématu níže. [4]

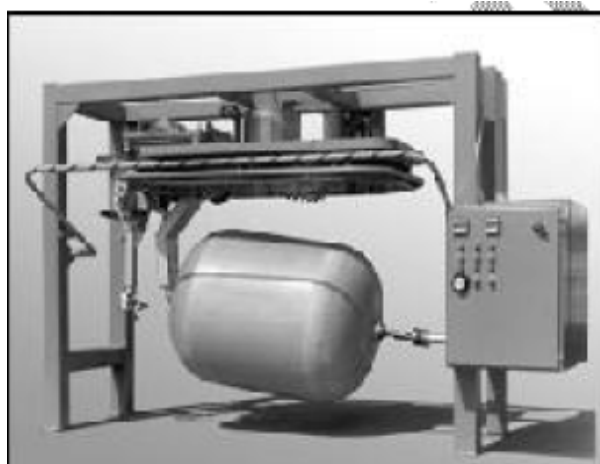


Obrázek 11: Navíjecí schéma [4]

Pro velké nádoby se používají zvláštní trny, které před snímáním výrobku sklopí dovnitř segmenty. U menších průměrů lze trn z výrobku vytlačit pomocí lisu. V případě, že je vyráběna tlaková nádoba (nádoby na stlačený plyn pro letadla), zůstává tzv. „liner” uvnitř nádoby a zaručuje těsnost nádoby. Mechanickou pevnost stěny nádoby zaručuje kompozit. Použití prepregů při technologii navíjení zaručuje reprodukovatelné mechanické vlastnosti výrobků. [4]

### 1.2.5 Navíjení pólové za mokra

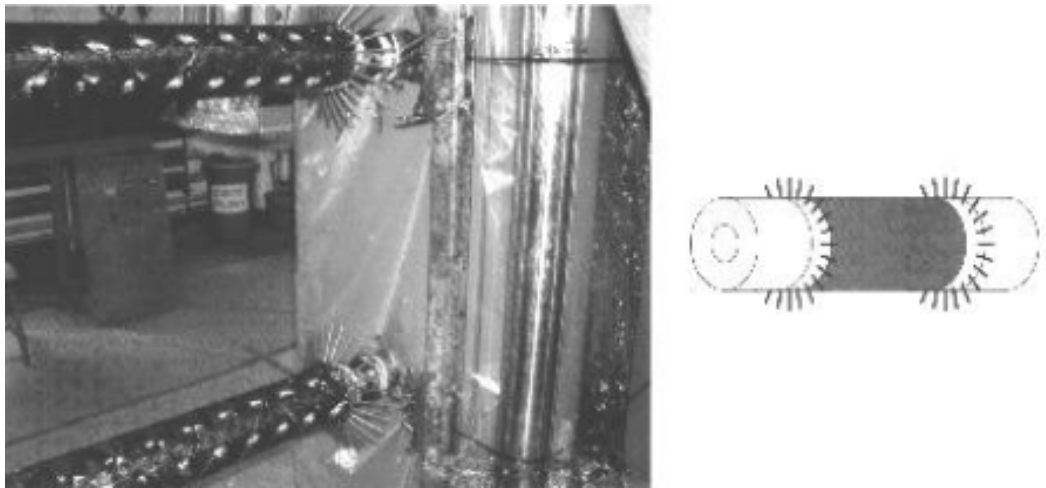
Stroje pro pólové navíjení používají otáčivou tenkostěnnou formu. Vlákna jsou nanášena ramenem, které se pohybuje okolo formy, takže vlákna jsou kladena i v oblasti pólů formy. (při šroubovicovém navíjení je nutno nádoby (s malou délkou při velkém průměru) uzavírat víky, které se vyrábějí zvlášť). Forma zůstává ve výrobku a funguje jako liner. [4]



Obrázek 12: Navíjení pólové za mokra [4]

### 1.2.6 Axiální navíjení

K položení vláken v axiálním směru, které zvyšují odolnost výrobku při axiálním tlaku, lze použít zvláštní techniky v angličtině nazývané “pin supported winding”. Téměř axiálně položená vlákna jsou na koncích jádra držena systémem radiálních trnů. Snímek tohoto navíjení je na obrázku níže. [4]



Obrázek 13: Axiální navíjení [4]

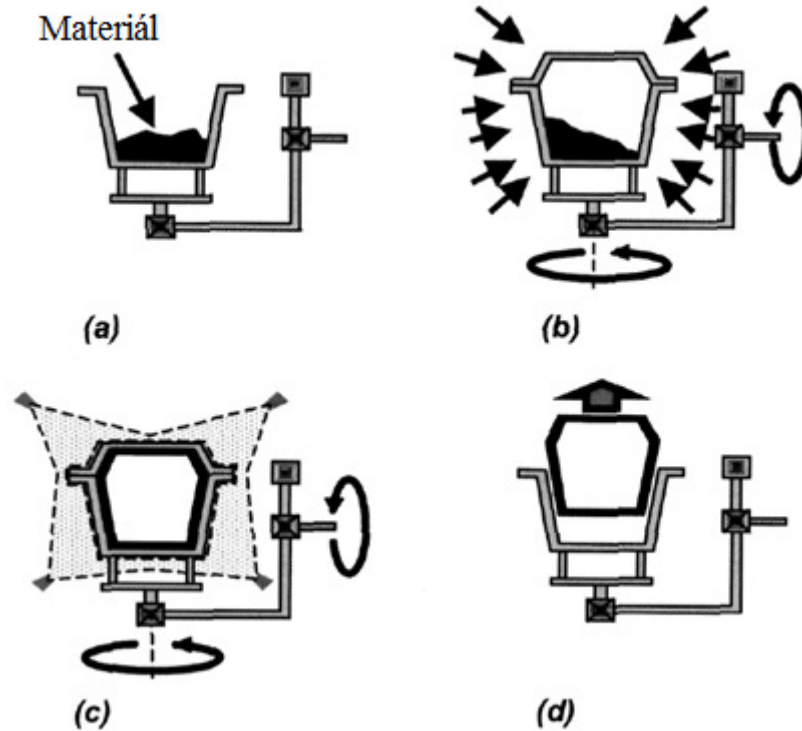
## 1.3 Rotační tváření - odlévání (Rotomolding)

Rotační tváření plastů je moderní technologie, která používá za základní materiál plastový prášek a přetváří jej pomocí gravitace, tepla, tvaru formy a pomalého otáčení do výrobku, který je dutý, nemá vnitřní pnutí a švy, má pravidelnou vnitřní strukturu a tvarovou paměť. Výrobky mají přirozeně zesílené rohy a hrany a tenčí, pružnější stěny. Do výrobku se dají přímo ve výrobním procesu zalít matice, šrouby a nátrubky, které pak slouží k upevnění výrobku ke konstrukci nebo k montáži komponentů a dalších zařízení. Výrobky jsou plně recyklovatelné, použitý materiál je naprosto čistý a proto nezatěžuje životní prostředí. [9]

### 1.3.1 Princip rotačního tváření (Rotomoldingu)

Principem rotačního odlévání je nasypání určitého množství materiálu ve formě prášku, granulí, nebo tekutého, do dutiny formy, která se otáčí nebo houpá okolo dvou hlavních os při relativně malých rychlostech. Forma je zahřívána a zahřívá se tedy i materiál, který se dostává do tekutého stavu. Během chlazení otáčení formy materiál na stěně začne tuhnout a tím se zafixuje do požadovaného tvaru. Jakmile materiál dostatečně drží svůj tvar, chlazení a rotace formy se zastaví a vyjme se výrobek z formy. Na obrázku níže lze vidět popis principu rotačního odlévání. [7]



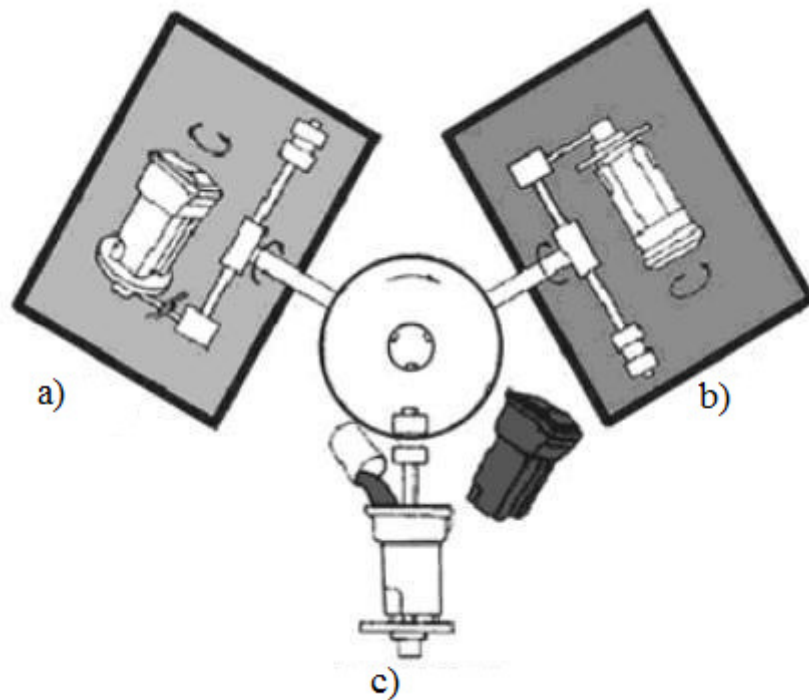


Obrázek 14: Princip rotačního odlévání a) Plnění formy, b) ohřívání

formy, c) chlazení formy, d) vyhození výrobku z formy [7]

V dnešní době se používá hodně rozdílných typů jedno nebo víceramenných strojů pro rotační tváření. Víceramenný typ stroje je nejpoužívanější. Jedinou metodou, jak zvýšit počet výrobků na výstupu tvářecího stroje, je současně provádět různé tvářecí funkce. Nutnost této potřebné metody vedla k vývoji víceramenného otočného typu stroje pro rotační tváření. Tříramenné zařízení tohoto typu umožňuje, aby jedna forma byla ohřívána v komoře, zatímco druhá je chlazená a třetí forma je vyprazdňována nebo plněna. [8]





Obrázek 15: Tříramenný otočný tvářecí stroj, a) Plnění formy, b) ohřívání formy, c) chlazení formy, a vyhození výrobku z formy [8]

### 1.3.2 Výhody rotačního tváření

Hlavními výhodami rotačního tváření jsou:

- dutý výrobek je vyroben z jednoho kusu - bez spojů, svarů, nebo švů
- konečný výrobek je v podstatě bez vnitřního pnutí
- formy jsou relativně levné
- výroba formy probíhá v relativně krátkém čase
- krátké výrobní série mohou být ekonomicky výhodné
- žádný odpadní materiál, všechno materiál plněný do formy je spotřebován na výrobek
- možnost výroby vícevrstvých výrobků
- možnost výroby různých tvarů výrobků na jednom stroji
- tvarové vložky jsou snadno zabudovatelné do formy
- lze tvářet i vysoce náročné tvary [7]

### 1.3.3 Nevýhody rotačního tváření

Hlavními nevýhodami rotačního tváření jsou:

- časy výrobního cyklu jsou dlouhé
- výběr formovacího materiálu je omezený
- cena materiálu je poměrně vysoká v důsledku potřeby zvláštních přísad a skutečností, že materiál musí být rozemlet na jemný prášek
- některé geometrické tvary jsou pro výrobu náročné (žebra, klenba) [7]

### 1.3.4 Rozsah využití rotačního tváření

Rotačně tvářené plastové výrobky se používají v téměř všech oborech lidské činnosti. Nejširší využití v celosvětovém měřítku mají v oblasti skladování a manipulace s vodou, jak pitnou, tak odpadovou, dále v nádržích a zásobnících obecně. S vodou souvisí i výroba lodí, bójí, mol, potravinářský průmysl používá chladicí přepravní boxy vyráběné rotačním tvářením, podobně jako armáda ve své logistice využívá podobné přepravní bedny. Rotační tváření zasahuje i do takových oborů jako reklamní průmysl, využití volného času, ale například i pohřebnictví. [10]

Tabulka 1: Využití rotačního tváření v jednotlivých odvětvích [7]

<b>Nádoby</b>		
Septiky	Olejové nádrže	Palivové nádrže
Čističky odpadních vod	Nádrže pro skladování chemikálií	Přepravní nádrže
Automobilový průmysl		
Dopravní bariéry	Přístrojové desky	Palivové nádrže
Potrubí		
<b>Kontejnery</b>		
Přepravní kontejnery	Sudy	Chladicí boxy
IBC kontejnery	Letecké kontejnery	
<b>Hračky a volný čas</b>		
Balonky	Pojezdné hračky	Hlavy panenek a části těla
Zahradní nábytek		
<b>Manipulace s materiálem</b>		
Palety	Obaly	Rybí koše
Odpadkové koše	Zdravotnické brašny	
<b>Námořnický průmysl</b>		
Plováky	Kajaky	Dokovací blatníky
Bazénové vložky	Záchranné pásy	Vesty
<b>Ostatní</b>		
Zahradnická technika	Boxy na nářadí	Poklopy
Zubařská křesla	Reklamní boxy	Pouzdra čistících zařízení

## 2 MATERIÁLY POUŽÍVANÉ PRO ROTAČNÍ TVÁŘENÍ

### 2.1 Používané materiály pro technologii rotačního tváření (rotomolding)

Rotační tváření je technologie, která je značně omezena výběrem materiálů vhodných ke tváření. Tři nejdůležitější z mnoha kritérií souvisejících s výběrem materiálu jsou:

- dostupnost v tekuté nebo práškové formě
- teplotní stabilita
- dobrý tok

Více než 80% rotačně tvářených plastů je z rodiny polyetylenů – nízkohustotní LDPE, lineární nízkohustotní LLDPE, středněhustotní MDPE, vysokohustotní HDPE a zesíťovaný polyetylen XLPE. Velmi používaný je také etyl vinyl acetát. [8]

#### 2.1.1 Polyetylen

Protože je z více než 80% nejpoužívanějším rotačně spékaným materiálem, bude se tato kapitola o materiálech věnovat zejména PE. [8]

#### 2.1.2 Nízkohustotní polyetylen (LDPE)

Nejstarší rotačně spékaný člen rodiny PE. LDPE je jako všechny ostatní termoplasty vytvořen z dlouhého molekulárního řetězce. Tyto dlouhé řetězce jsou složeny z opakujících se skupin molekul, které jsou k sobě vzájemně vázány a tvoří polymer. LDPE obsahuje pouze atomy uhlíku a vodíku. Molekula LDPE je charakterizována zejména tím, že má hodně postranních větví. Jakýkoliv polyetylen (PE) s hustotou v rozmezí 0,91 – 0,925 g/cm<sup>3</sup> je nízkohustotní polyetylen – LDPE. [8]

#### 2.1.3 Vysokohustotní polyetylen (HDPE)

Polyetylen s hustotou v rozmezí 0,941 – 0,959 g/cm<sup>3</sup> je považován za vysokohustotní polyetylen. HDPE je také složen z atomů uhlíku a vodíku, ale je přibližně 50x větší než molekula LDPE. Jednotlivé molekuly v polymeru k sobě nepoutá žádná chemická nebo fyzická vazba, avšak mezi molekulami působí elektrostatická vazba, známá jako Van der Waalova síla. Mezimolekulární Van der Waalovi síly jsou vzájemně uspořádány blízko sebe. [8]

Běžné rotačně tvářené materiály, známé pro jejich krystalinitu, jsou polypropylen PP, HDPE a PA 6.6 Nylon. Vhodně tvářený HDPE díl bude ze 70 až 90% krystalický. Stupeň

krystalinity polymeru má významný vliv na fyzické vlastnosti materiálu. Tato hodnota může být měněna způsobem, jakým je materiál zpracováván. Všechny PE jsou v tekutém stavu amorfní. Pokud je polymeru umožněno chladnout pomalu, krystaly se mohou zreformovat. Pokud dojde k ochlazení rychle, polymer nemá dostatečný čas na tuto změnu a stává se více amorfním. Obecně řečeno, se zvětšujícím se stupněm krystalinity roste hustota, koeficient smrštění, tepelná a chemická odolnost materiálu. [8]

#### **2.1.4 Středněhustotní polyetylen (MDPE)**

Polyetylen s hustotou v rozmezí 0,925 – 0,941 g/cm<sup>3</sup> je považován za MDPE. Tvar, stupeň krystalinity a fyzické vlastnosti tohoto polymeru jsou mezi LDPE a HDPE. V minulosti to byl důležitý materiál pro rotační tváření. [8]

#### **2.1.5 Laminární nízkohustotní polyetylen (LLDPE)**

Molekula LLDPE je podobná jako LDPE, s výjimkou kratších postranních větví a jejich jednoduššího uspořádání po délce řetězce. To umožňuje molekulám zachovat si jejich nízkou hustotu. Jeho zlepšené fyzické vlastnosti oproti LDPE dovolují použití LLDPE v aplikacích, kde mohli vyhovovat jen HDPE nebo XLPE. Tento materiál byl rotačně tvářen ve velkých množstvích okamžitě, jakmile byly rozpoznány jeho výhody oproti LDPE. [8]

#### **2.1.6 Zesíťovaný polyetylen XLPE**

K rozvětveným a nerozvětveným materiálům byl navíc průmyslem vyvinut XLPE. Molekuly jsou uzavřeny v neohebném trojrozměrném tvaru. Zahříváním tohoto materiálu svazky mezi molekulami nezeslábnu. Zesíťované materiály si tedy uchovají své fyzikální vlastnosti navzdory zvyšující se teplotě. [8]

Hlavní výhody dosahované díky zesíťování jsou zlepšený index toku materiálu, vyšší teplotní a chemická odolnost. Vzhledem k takovým zlepšením ve vlastnostech XLPE je tento materiál používán pro benzínové nádrže a těla chemicky odolných čerpadel. XLPE může být použit při 182°C. [8]

Nevýhodou je fakt, že se XLPE nesmí opakovaně tavit, to znamená, že nesmí být ani opakovaně zpracován rotačním tvářením. [8]

### 2.1.7 Ostatní, méně používané materiály

Tyto ostatní materiály uvedené níže jsou ve většině případů limitovány použitelností pro rotační tvářeni. Použitelnost těchto materiálů je také brzděna omezeným množstvím zpracovatelů, kteří se je naučili tvářet. S časem, některé z těchto materiálů přestaly vyhovovat pro užívání v technologii rotomolding. Například akrylonitril butadien styren (ABS) byl rotačně tvářen v polovině sedmdesátých let dvacátého století. Dnes není na trhu komerčně dostupný ABS materiál ve formě vhodné pro rotační tvářeni. [8]

- polypropylen
- ABS
- acetal
- epoxidová pryskyřice
- polyester
- polystyren
- polyuretan
- silikon [8]

### 3 VELKOOBJEMOVÉ NÁDRŽE

Nádoba je 100% vodotěsná. Ve stropě nádrže je vstupní otvor, nástavec v průměru 600 mm pro možnost kontroly a vyčerpání nádoby. Nástavec je na povrchu zakrytý plastovým UV stabilizovaným uzamykatelným krytem. Ve standardním provedení je nástavec dodáván v délce 1000 mm. Ve spodní části nástavce nad tělesem nádoby je situovaný vstup přítokového potrubí DN 110 až DN 160 pro napojení kanalizace z objektu. [11]

#### 3.1 Použití plastových nádrží

Plastové nádrže slouží k akumulaci:

- odpadní vody
- užitkové vody
- pitné vody
- chemických roztoků a kalů [12]



Obrázek 16: Velkoobjemová nádrž [11]

## 3.2 Osazení velkoobjemových nádrží

Velkoobjemové nádrže se dají používat jak nad zemí tak i zabudované pod zemí. Pro každý jednotlivý typ zabudování se používá jiný typ usazení.

### 3.2.1 Samostatné volně stojící nádrže

Samostatné a volně stojící nádrže se umísťují v exteriéru i v interiéru na betonový podklad, pískové lože nebo na zděnou, ocelovou či dřevěnou podkladní konstrukci. Podle provedení a velikosti jímky jsou buď svařovány z vytlačovaných PP desek (válcové nádrže) a opásané ocelovými nebo nerezovými obručemi, nebo svařovány z lehčených PP desek nebo PP stěnových prvků a vyztuženy plastovými žebry nebo opásaním ocelovými profily podle velikosti nádrže. [12]



Obrázek 17: Samostatné volně stojící nádrže [12]

### 3.2.2 Nádrže k obsypání

Nádrže k obsypání jsou určeny do volného terénu bez spodní vody. Umísťují se na betonový podklad a obsypou se tříděným stabilizovaným výkopkem (hlína z výkopu + cement v poměru 8:1). Při obsypávání musí být nádrž uvnitř rozepřena podle montážního předpisu výrobce a napuštěna vodou tak, aby hladina vody byla vždy přibližně 50 cm nad úrovní obsypu. [12]



Obrázek 18: Obsyp nádoby [11]

### 3.2.3 Nádrže k obetonování

Nádrže k obetonování jsou určeny do lokalit s možným vyšším statickým zatížením (blízkost budov, opěrných zdí nebo komunikací pro motorová vozidla). Plášť nádrže je vyztužen žebry a ocelovými závlačemi. Při obetonování musí být nádrž uvnitř rozepřena podle montážního předpisu výrobce a napuštěna vodou tak, aby hladina vody byla neustále přibližně 50 – 100 cm nad úrovní betonu. [12]

### 3.2.4 Nádrže k obetonování proti spodní vodě

Nádrže k obetonování proti spodní vodě se použijí tam, kde hladina spodní vody dosahuje nad základovou spáru. Plášť nádrže (případně i dno) je vyztužen žebry a ocelovými závlačemi. Úpravy proti spodní vodě jsou závislé na velikosti nádrže a výšce hladiny spodní vody. Vždy je nutná konzultace s výrobcem. Po osazení nádrže je nutné ji co nejdříve napustit vodou minimálně do výšky hladiny spodní vody. Při obetonování musí být nádrž uvnitř rozepřena podle montážního předpisu výrobce a napuštěna vodou tak, aby hladina vody byla neustále cca 50 – 100 cm nad úrovní betonu. [12]

## 3.3 Údržba plastových nádrží

Plastové nádrže nepotřebují žádnou údržbu. Při vyčerpávání kapaliny z nádrže je třeba dbát na příslušné bezpečnostní předpisy. Při čerpání fekálním vozem je třeba dodržet bezpečnou vzdálenost fekálního vozu od nádrže, obzvláště pokud není nádrž obetonovaná. Bezpečná vzdálenost vozu od stěny nádrže je rovna minimálně hloubce nádrže. [12]

Je-li třeba provádět práce uvnitř nádrže (čištění, opravy atd.), je třeba nádrž úplně vyčerpát, vyčistit tlakovou vodou a vydezinfikovat, případně neutralizovat použité chemikálie. [12]



### **3.4 Výhody a nevýhody velkoobjemových nádrží**

#### **3.4.1 Výhody velkoobjemových plastových nádrží**

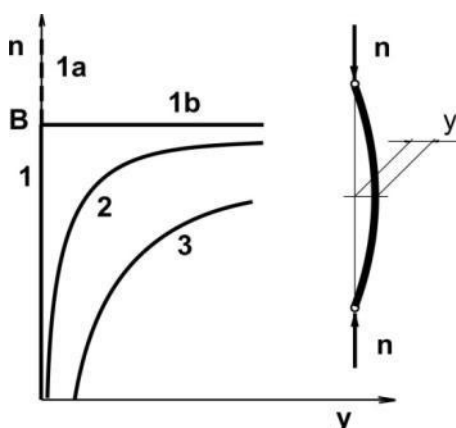
- nízká hmotnost
- snadná manipulace
- maximální těsnost nádoby
- vyztuženy žebrováním
- vysoká chemická odolnost
- dlouhá životnost
- nízké ceny
- vysoká pevnost nádoby [11]

#### **3.4.2 Nevýhody velkoobjemových plastových nádrží**

- vlastnosti silně závislé na teplotě
- časová závislost mechanických vlastností
- omezený rozsah teplot pracovního média [1]

#### 4 STABILITA TENKOSTĚNNÝCH VÝROBKŮ A KONSTRUKCÍ

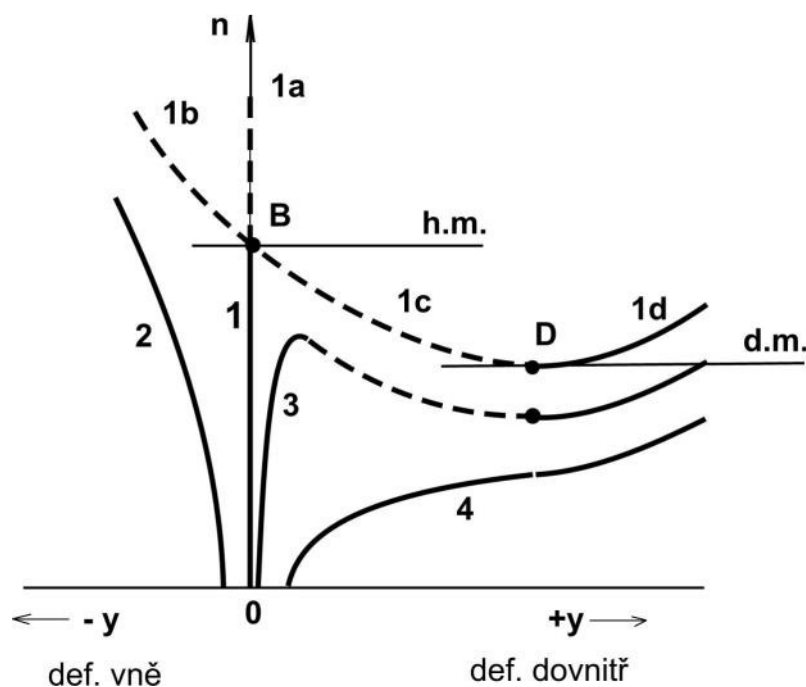
Existence tlakových napětí v tenkostěnných konstrukcích deskového a skořepinového typu znamená obecně nebezpečí ztráty stability konstrukce, ať již místní, nebo celkové. Toto nebezpečí vzniku náhlých značných deformací a možnosti následné destrukce je u plastových konstrukcí umocněno jejich obecně malou tuhostí. Je tak v praxi nutno posoudit případy zatížení vnějších účinků, vyvolávajících v tenkostěnném plášti membránová tlaková napětí – např. osová tlaková zatížení, vnější přetlak, teplotní účinky apod. Základní případ představuje jednoose tlačena ideálně rovná deska s volnými bočními okraji. Při podkritickém membránovém tlakovém zatížení je deska ve stabilní rovnovážné poloze. Dostoupí-li zatížení kritickou hodnotu, vybočí náhle deska ohybem, znázorněném na obrázku 19, křivka 1b. Přímý tvar 1a již není stabilní. Bod B se nazývá bodem bifurkace (rozdělení). V důsledku počátečních imperfekcí (náklonu konstrukce) vybočují desky již od počátku zatěžování – křivky 2 a 3. Závislosti zatížení na deformaci pak neprocházejí bodem B, ale ohýbají se blíže nebo dále od bodu B v závislosti na velikosti počátečních imperfekcí. [15]



Obrázek 19: Ohyb desky [15]

Odezva skořepin na tlaková namáhání je poněkud složitější. Na obrázku 20 je analogické schéma chování válcové skořepiny, zatížené osovým tlakem. 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. Stavy 1a, 1b jsou nestabilními rovnovážnými stavy. Reálný stav představuje pouze křivka 1c. Po ztrátě stability nabývá skořepina stabilního stavu v bodě D (tzv. dolní kritická hranice). Na rozdíl od předchozího případu desky je plášť skořepiny schopen přenášet další, tzv. podkritické zatížení, pokud nedojde k jeho

porušení. Diagram reálných skořepin s odchylkami od ideálního kruhového tvaru se bude lišit od průběhu 1 – 1c. Křivka 3 znázorňuje chování skořepiny s malými imperfekcemi. [15]



Obrázek 20: Analogické schéma chování válcové skořepiny [15]

Zatížení v závislosti na průhybech vybočení pláště nejdříve roste, nedosáhne však bodu B, představujícího tzv. horní kritickou mez. Po ztrátě stability klesá křivka 3 na svou dolní mez, pak opět vzrůstá. Jsou-li počáteční deformace pláště větší, zvyšují se ohybové deformace značnou měrou v průběhu zatěžování bez charakteristického náhlého prolomení pláště – křivka 4. Chování skořepiny s počáteční deformací ve směru od středu křivosti je znázorněno křivkou 2. Tato charakteristika je strmější a plášť ztrácí stabilitu při namáháních vyšších než je horní kritická mez B. [15]

#### 4.1 Stabilita válcové skořepiny zatížené vnějším přetlakem

Působí-li na válcovou skořepinu na místo vnější přetlak nebo vnitřní podtlak, obrátí se znaménka membránových obvodových, případně osových napětí, takže jsou nyní tlaková. Při určité – kritické hodnotě přetlaku  $p_{KR}$  ztratí plášť skořepiny stabilitu tak, že původně kruhový průřez se zploští – přetváří se v oválný tvar, jak je naznačeno na obr. 21. Jedná o vzpěrný ohyb do válcové plochy, kde namísto páska jednotkové šířky uvažujeme o myšleném prstenci jednotkové šířky, zatíženém obvodovou tlakovou membránovou silou. [15]

$$n_{\varphi} = pR. \quad (1)$$

Po přetvoření kruhového prstence do oválného tvaru jsou průřezy prstence namáhány obvodovým ohybovým momentem [15]

$$m(\varphi) = n_{\varphi KR} y(\varphi) = p_{KR} R y(\varphi). \quad (2)$$

Změna křivosti válcové skořepiny se tedy vyjádří

$$\frac{1}{\rho(\varphi)} - \frac{1}{R} = \frac{m(\varphi)}{D}, \quad (3)$$

kde  $R$  je poloměr střednice nezátížené skořepiny. Křivost rovinné křivky v polárních souřadnicích lze pro malé deformace  $y(\varphi)$ , představující počátek vybočení pláště, vyjádřit vztahem

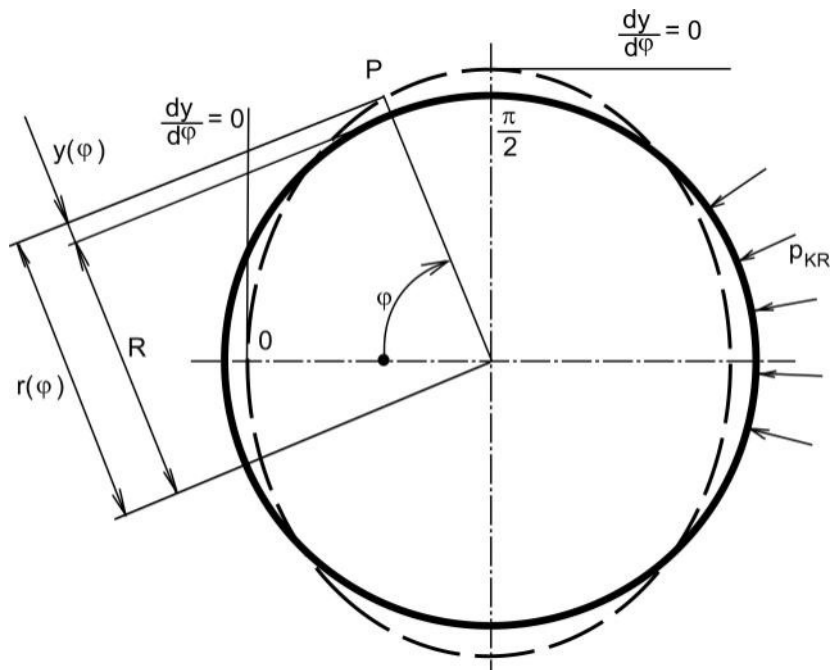
$$\frac{1}{\rho(\varphi)} = \frac{1}{r} - \frac{1}{r^2} \frac{d^2 r}{d\varphi^2}, \quad (4)$$

kde radiální pořadnice je podle obrázku 21 [15]

$$r = R + y(\varphi). \quad (5)$$

Dosazením vztahu (5) do rovnice (4) dostaneme po úpravách, s uvážením, že  $y^2 \ll R^2$  a  $y/R \ll 1$

$$\frac{1}{\rho(\varphi)} - \frac{1}{R} = -\frac{1}{R^2} \left( \frac{d^2 y}{d\varphi^2} + y \right). \quad (6)$$



Obrázek 21: Stabilita válcové skořepiny [15]

Srovnáním pravých stran rovnic (3) a (6) obdržíme diferenciální rovnici

$$\frac{1}{R^2} \frac{d^2 y}{d\varphi^2} + \frac{y}{R^2} = -\frac{m(\varphi)}{D}, \quad (7)$$

a po dosazení za  $m(\varphi)$

$$\frac{d^2 y}{d\varphi^2} + \beta^2 y = 0, \quad (8)$$

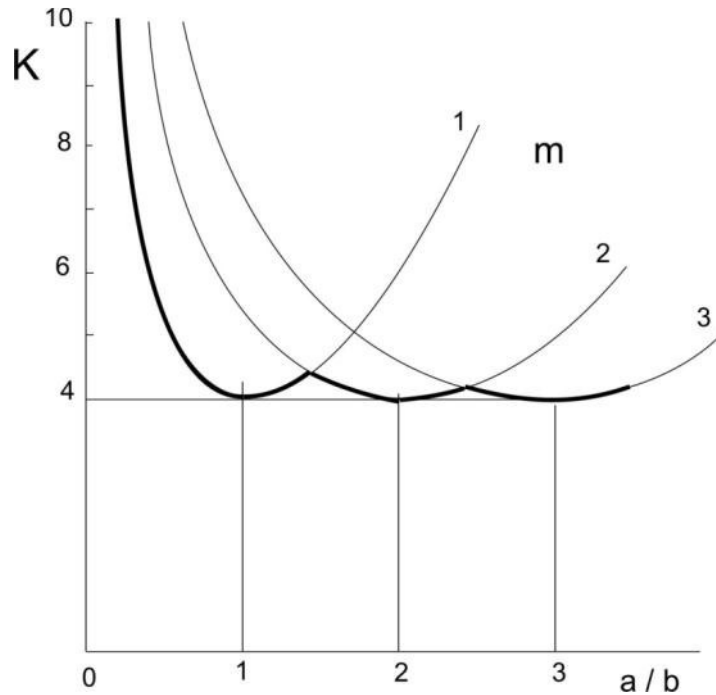
s označením [15]

$$\beta^2 = 1 + \frac{p_{KR} R^3}{D}. \quad (9)$$

Všeobecné řešení rovnice (9) je tvaru [15]

$$y(\varphi) = A \cos \beta\varphi + B \sin \beta\varphi. \quad (10)$$

V místech  $\varphi = 0$ ,  $\varphi = \frac{\pi}{2}$  je podle obrázku 21.  $y'(\varphi) = 0$ . [15]



Obrázek 22: Grafické znázornění funkce  $K = \left( \frac{a}{bm} + \frac{bm}{a} \right)^2$  [15]

Derivací rovnice (10) obdržíme [15]

$$\frac{dy(\varphi)}{d\varphi} = -\beta A \sin \beta\varphi + \beta B \cos \beta\varphi, \quad (11)$$

$$\text{takže } B = 0 \text{ a } A \sin \beta \frac{\pi}{2} = 0. \quad (12)$$

Rovnici (12) vyhovuje posloupnost hodnot  $\beta \frac{\pi}{2} = i\pi$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots$ . Je tedy  $\beta = 2i$  a hodnota kritického tlaku [15]

$$\beta^2 = 4i^2 = 1 + \frac{p_{KRi} R^3}{D}. \quad (13)$$

Fyzikální význam má nejmenší z hodnot  $p_{KRi}$ , tj. pro  $i = 1$ . Je tedy [15]

$$p_{kr} = \frac{3D}{R^3}. \quad (14)$$

Tak jako u přímé desky je kritické zatížení přímo úměrné ohybové tuhosti stěny  $D$ . Hodnota tlaku podle rovnice (14) ovšem odpovídá teoretické horní hranici dané bodem bifurka-

ce B na obrázku 20, platné pro ideální skořepinu. Reálná hodnota kritického tlaku je vždy nižší, a je značně závislá na velikosti geometrických imperfekcí (ovality) reálné skořepiny. [15]

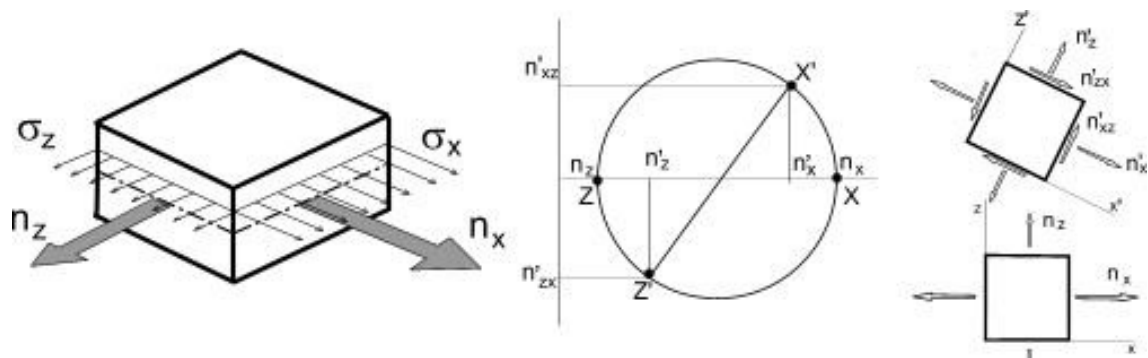
## 4.2 Membránová, ohybová napjatost a deformace tenkostěnných výrobků s homogenní stěnou

Tělesa, jejichž jeden rozměr – tloušťka – je zanedbatelný oproti dvěma ostatním, označujeme v technické praxi jako skořepinová. Potom lze zanedbat složky napětí ve směru normály ke střední ploše skořepiny a předpokládat, že napjatost tenkých skořepin je pouze dvouosá. Na obrázku 23 je znázorněn element desky tloušťky  $s$ , s rozměry  $1 \times 1$  mm. Představme si, že element je na svých bočních plochách namáhán pouze normálovými tahovými silami  $N_x$ ,  $N_z$ , jejichž velikost připadající na jednotkovou šířku průřezů desky je  $n_x$ ,  $n_z$ . Tyto síly jsou výslednicemi elementárních sil v průřezech  $\sigma_x dS$ ,  $\sigma_z dS$ : [15]

$$N_i = \int_{(s)} \sigma_i^M dS = \sigma_i^M s ; i = x, z, \quad (15)$$

tj.

$$\sigma_i^M = \frac{n_i}{s}, \quad n_i = \frac{N_i}{b}, \quad i = x, z. \quad (16)$$



Obrázek 23: Element desky tloušťky  $s$  [15]

Každá myšlená „vrstva“ elementární tloušťky  $dy$  je ve stavu dvouosé napjatosti. Takovouto napjatost desek a skořepin označujeme jako membránovou napjatost. Pootočíme-li souřadný systém, změní se složky membránové napjatosti podle příslušného transformačního vztahu, který můžeme graficky znázornit příslušnou Mohrovou kružnicí. Podle (16) můžeme pak zřejmě znázornit Mohrovou kružnicí i transformaci membránových sil – dle obrázku 23. [15]

Membránové deformace elementu skořepiny v hlavním souřadném systému  $x, z$  jsou podle rovnic elasticity

$$\varepsilon_i^M = \frac{1}{E} (\sigma_i^M - \nu \sigma_j^M), \quad i, j = x, y; \quad (17)$$

inverzní těchto rovnic je pak

$$\sigma_i^M = E' (\varepsilon_i^M + \nu \varepsilon_j^M), \quad i, j = x, z. \quad (18)$$

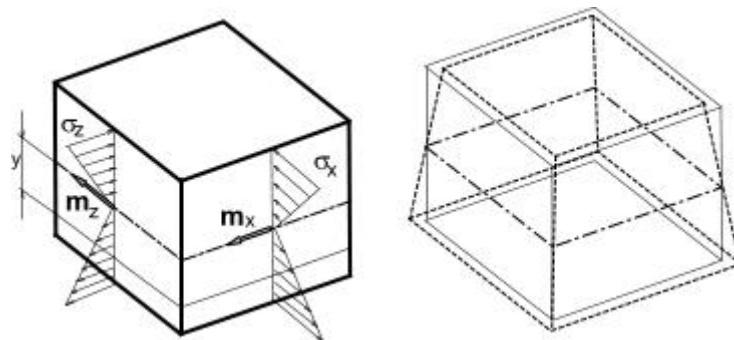
s použitím rovnice (16) pak [15]

$$(\varepsilon_i^M + \nu \varepsilon_j^M) = \frac{n_i}{E'' s}, \quad i, j = x, z. \quad (19)$$

Výraz  $E'' s$  je membránovou tuhostí stěny skořepiny. Nechť je nyní homogenní izotropní deska obdélníkového tvaru namáhána pouze momenty  $m_x, m_z$  rozloženými rovnoměrně po jejich okrajích. U elementu desky na obrázku 24 jsou potom složky poměrné deformace v myšlené vrstvě elementární tloušťky vzdálené o  $y$  od střední plochy zřejmě

$$\varepsilon_i(y) = \frac{1}{r_i} y, \quad i = x, z, \quad (20)$$

neboť podle předpokladu zůstávají boční stěny elementu rovinné a pootáčejí se kolem své neutrální osy, což je průsečnice boční stěny se střední plochou. [15]



Obrázek 24: Elementy desky [15]

Ohybové momenty  $m_x, m_z$  jsou vyvažovány v průřezích stěny vnitřními elementárními normálovými silami podle rovnic rovnováhy [15]

$$\int_{(S)} \sigma_i(y) dy \cdot y = m_i, \quad i, j = x, z. \quad (21)$$

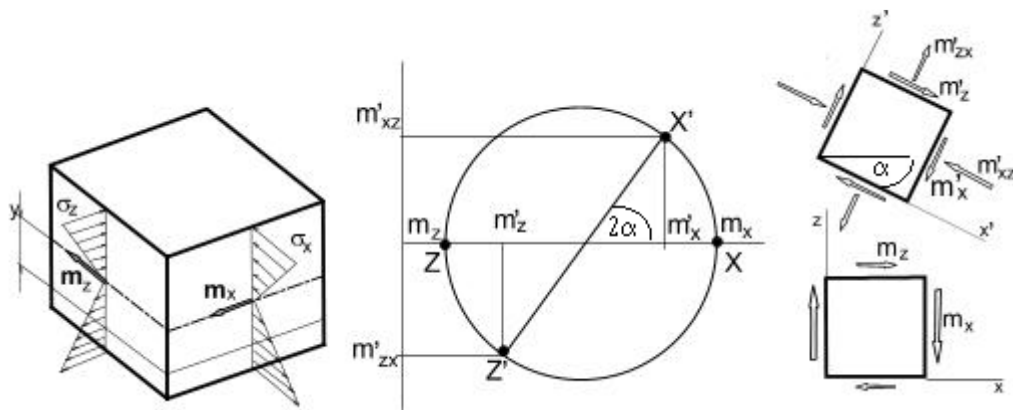
S použitím (18) a (20) je



$$\frac{1}{r_i} + \nu \frac{1}{r_j} = \frac{m_i}{D}, \quad i, j = x, z, \quad (22)$$

$$\text{kde } D = E''j, \quad E'' = E / (1 - \nu^2), \quad j = s^3 / 12. \quad (23)$$

Konstantu  $D$  nazýváme válcovou (cylindrickou) ohybovou tuhostí stěny skořepiny. Představíme-li si stěnu desky myšleně složenou z vrstev o elementární tloušťce  $dy$ , je každá z těchto vrstev ve stavu dvouosé napjatosti  $\sigma_x(y), \sigma_z(y)$ . Směry  $x, z$  jsou hlavními osami a složky  $\sigma_y, \sigma_z$



Obrázek 25: Mohrova kružnice [15]

hlavními napětími, neboť v průřezech stěny takto orientovaných nejsou smykové složky napětí. Pootočíme-li souřadný systém elementu stěny o určitý úhel  $\alpha$  - viz obrázek. 25, můžeme složky napětí v tomto systému určit pomocí Mohrovy kružnice resp. transformačního vztahu. Poněvadž momenty  $m_x, m_z$  jsou výslednicemi elementárních vnitřních sil v průřezech stěny, musí pro ně platit stejný transformační vztah. Kromě ohybových momentů  $m_x', m_z'$  se v pootočeném souřadném systému objeví v průřezech stěny i krouticí momenty  $m_{xz}' = m_{zx}'$  jako výslednice smykových napětí. Element stěny v pootočeném souřadném systému bude proto vykazovat kromě křivosti – prohnutí ve směru  $x'$  i zakřivení ve směru  $z'$  a zkroucení. Pro případ ohybu stěny do válcové plochy, tj. pro  $\frac{1}{r_z} = 0$  přecházejí rovnice (22) na rovnici [15]

$$\frac{1}{r_x} = \frac{m_x}{D}. \quad (24)$$

Kromě ohybu do válcové plochy nastává další zvláštní případ ohybu desky pro  $m_x = m_z$ .

Z rovnice (22) vyplývá  $\frac{1}{r_x} = \frac{1}{r_z} = \frac{1}{r}$ , tj. vzniklá deformační plocha střednice desky je kulová. Její křivost je [15]

$$\frac{1}{r} = \frac{m}{E^* j}, \quad E' = \frac{E}{1-\nu}. \quad (25)$$

Ohybová napětí v desce budou podle (17) a (22) nabývat hodnot [15]

$$\sigma_i(y) = \frac{m_i}{j} y; \quad i = x, z. \quad (26)$$

Kvadratický moment plochy průřezu desky o šířce 1 mm je  $j = s^3 / 12$ , takže napětí v krajních plochách desky činí [15]

$$\sigma_i = \frac{6m_i}{s^2}, \quad i = x, z. \quad (27)$$

Rovnice (22) představují (až na zvláštní případ ohybu do válcové plochy, kdy  $m_z = \nu m_x$ ) deformační plochu nerovinnou, což odporuje výchozímu předpokladu o nulové deformaci střední – neutrální plochy. Ve skutečnosti tedy vznikají při dvouosém ohybu desky kromě napětí ohybových také napětí membránová. Jejich vliv lze zanedbat pouze při malých průhybech desek. [15]

### 4.3 Nebezpečí zborcení nádob vlivem vnějšího přetlaku

Výpočtové metodiky pro dimenzování tlakových nádob vycházejí důsledně z mezních stavů konstrukce, ke kterým se přiřazují předepsané rezervy bezpečnosti. Rozhodujícím pro posouzení konstrukce jsou mezní stavy a rezervy bezpečnosti k těmto stavům. Rozhodujícím je zde samozřejmě stav „pevnosti“ uzlu nebo části. U houževnatých materiálů se nejedná o pevnost ve vlastním slova smyslu, ale o mezní stav plastické únosnosti, tedy stav zatížení, při kterém se změní gradient závislosti zatížení a deformace a původně elastická konstrukce se začne trvale plasticky deformovat, přičemž dojde k plastickému zhroucení. Dalšími mezními stavy jsou potom poruchy způsobené únavou, ztrátou stability apod. a to v závislosti na typu konstrukce a jejího zatížení. Tyto mezní stavy popisují jednotlivé možné způsoby selhání konstrukce. [14]

Mezní stav konstrukce je podle současného předpisu, který platí pro tlakové nádoby stabilní, klasifikován jako mezní stav únosnosti (ovlivňují přímo bezpečnost zařízení) nebo mezní stav způsobilosti (ovlivňují způsobilost a provozuschopnost zařízení).

#### 4.3.1 Mezní stavy únosnosti a způsobilosti

Mezní stavy únosnosti jsou zahrnuty zejména selhání:

- výraznou plastickou deformaci (mezní stav plastické únosnosti)
- progresivní plastickou deformací
- ztrátu stability (mezní stav stabilitního zborcení)
- únavu (mezní stav únavy)
- ztrátu statické rovnováhy
- únik tekutiny, který ovlivňuje bezpečnost nebo nepříjemné poškození prostředí [14]

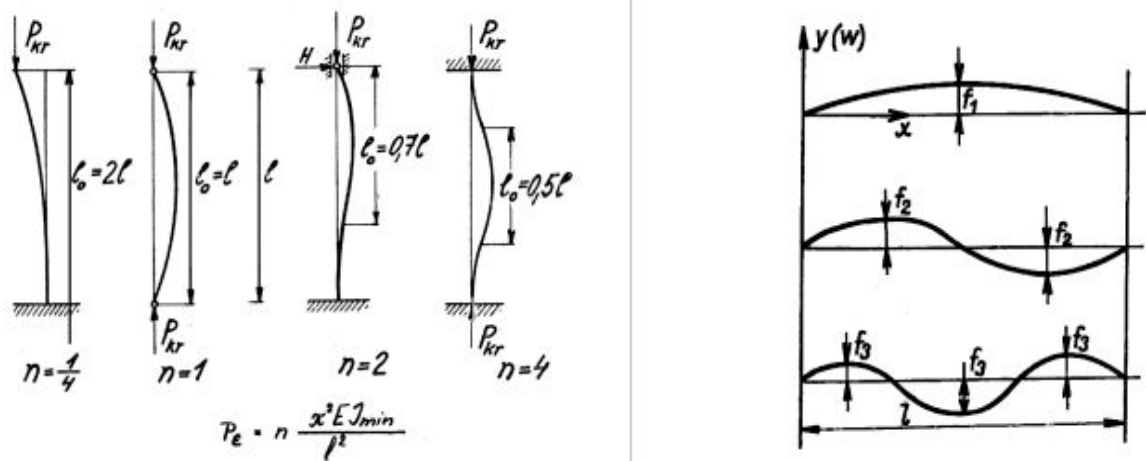
Mezní stavy způsobilosti jsou zahrnuty selhání:

- deformací nebo průhybem
- únik tekutiny, který ovlivňuje použitelnost zařízení ale ne jeho bezpečnost [14]

#### 4.3.2 Mezní stav stabilitního zborcení

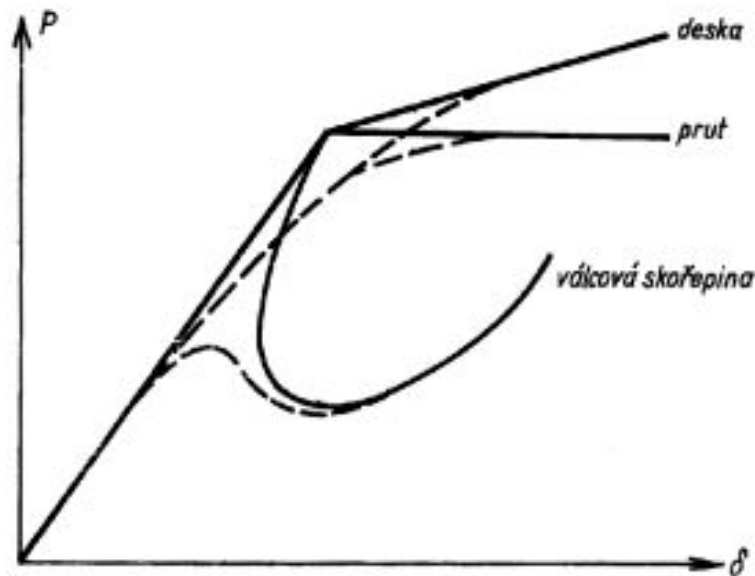
Stabilitním zborcením jsou ohrožovány všechny komponenty tlakových nádob a zařízení, u kterých se v provozních režimech vyskytuje ve stěně globální tlakové napětí, tedy tlakové napětí, které působí napříč celým průřezem. Základním takto ohroženým prvkem u tlakové nádoby je prut. [14]

Řešení kritické síly při tlakovém zatížení prutu podal L. Euler (1707-1783). Základní vztah pro velikost kritické síly  $P_{\epsilon}$  je na obrázku 26, které platí pro kloubově uložené pruty, které se deformují ve tvaru jedné půlvlny ( $n = 1$ ). Pokud oba konce vetkneme, přinutíme prut, aby se deformoval do jedné celé vlny, a kritická síla stoupne s kvadrátem délky půlvlny, tedy 4 krát ( $n = 4$ ). Naopak, pokud jeden konec zcela uvolníme, deformuje se prut do jedné poloviny půlvlny a kritická síla opět s kvadrátem klesne, tedy opět čtyřikrát ( $n = 1 / 4$ ). Tyto vlastnosti jsou pro chování těles při stabilitním zborcení typické. Protože v Eulerově vztahu je jako vlastnost materiálu modul pružnosti materiálu, a ne jeho dovolené namáhání, je zřejmě pro stabilitní chování rozhodující tuhost a ne pevnost materiálu. Podstatné je, že zvýšení stabilitní únosnosti lze dosáhnout pouze zvýšením tuhosti části. [14]



Obrázek 26: Ukázka prutů a základní vztah pro  $P_{kr}$  [14]

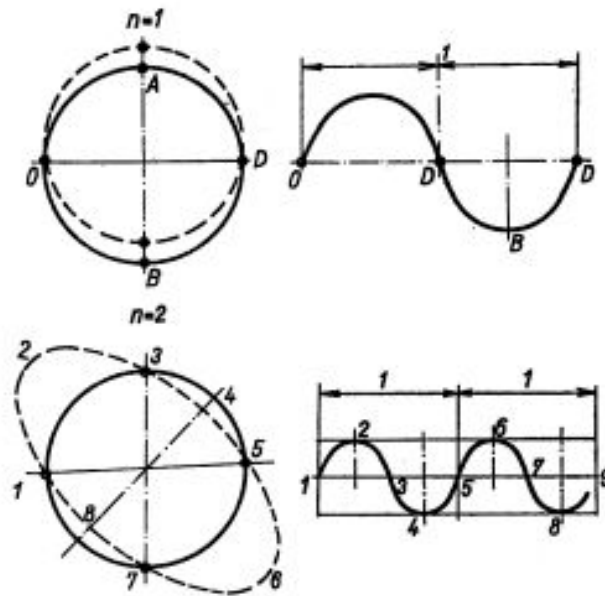
Pro nebezpečí, která plynou ze stabilitního zborcení elementu konstrukce je rozhodující typ konstrukce. Jinak se chová již dříve ukázaný prut, jinak deska a jinak zakřivená skořepina. [14]



Obrázek 27: Chování rozdílných konstrukcí [14]

Prut při dosažení kritického zatížení osovou silou je schopen tuto sílu dále nést. Této vlastnosti se např. využívá u výměníků s pevnými trubkovicemi, kdy pole trubek zatížené na mezi stabilitní únosnosti nese trubkovice. Kritická síla je minimální silou, kterou je prut schopen unést při libovolné deformaci na obrázku 27. Obdobně jsou na tom smykově zatížené desky, u kterých se mění gradient závislosti, a které i za kritickým zatížením dále „zpevnují“. Pro tělesa tlakových a netlakových (netlakových z hlediska zařídění legislati-

vou) jsou však rozhodující komponentou skořepiny stěn, a z těchto potom skořepina válcová. [14]



Obrázek 28: Zatížení válcové skořepiny [14]

Při zatížení válcového pláště nádoby vnějším přetlakem dojde při dosažení kritické hodnoty tohoto přetlaku ke stabilitnímu zborcení ve tvaru vln. U válcových plášťů dochází ke zborcení ve tvaru celého počtu vln po obvodu. V podélném směru se potom mezi řezy, které zajišťují dodržení kruhovitosti skořepiny, tvoří vlna jedna. Vzdálenost těchto „tuhých“ řezů je potom určující i pro počet tvořících se obvodových vln. A opět platí, stejně jako u prutu, že čím větší je počet vln, zde obvodových, tím větší je i kritický tlak při stabilitním zborcení. Další vlastností válcové skořepiny při stabilitním zborcení je, a to pro skořepinu nádoby nejdůležitější, že na rozdíl od prutu a desky, zde dochází ke zborcení „katastrofickému“. [14]

Nádoba „ztratí“ tvar a v novém tvaru je její únosnost proti kruhové skořepině radikálně nižší, a to až řádově. V praktických případech dochází ke zničení nádoby nebo její části. Další podstatnou vlastností stabilitního zborcení válcového pláště je, že minimální počet vln při zborcení jsou dvě zobrazené na obrázku 28. Jedna vlna je posunutí celého průřezu, jak je zřejmé z obrázku 28. [14]

### 4.3.3 Nebezpečí stabilitního selhání

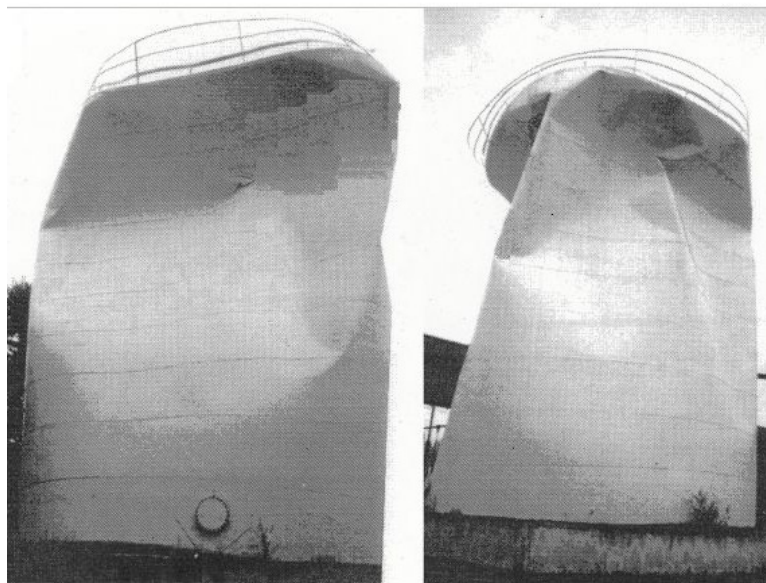
Ke stabilitnímu zhroucení plášťů nádob při výrobě a tlakových zkouškách zpravidla nedochází. Je to dáno zejména tím, že velikosti případných vnějších přetlaků jsou téměř vždy

výpočtově ověřovány a pláště jsou na tyto stavy dimenzovány. U tenkostěnných nádob, zejména nádrží, je při jejich větších průměrech a délkách hodnota kritického stabilitního přetlaku dostatečně nízká, aby mohlo k tomuto zborcení pláště dojít. [14]

Ke stabilitnímu selhání a zničení nádob dochází většinou u nádob, které na zatížení vnějším přetlakem stavěny nebyly. Ke zborcení nádob může dojít dokonce při jejich montáži, aniž by byly uvedeny do provozu. Důvodem zborcení nádob je podtlak, se kterým projektant nádoby nepočítal, protože k němu při provozu nemá dojít. K poruchám tedy většinou došlo tím, že obsluha linky nebo nádoby nebyla seznámena s nebezpečím stabilitního zborcení nádoby. Jedním z příčin, které k dosažení neočekávaného podtlaku vedou, je vypouštění kapalin z nádrží bez zajištění dostatečného a současného zavzdušňování. [14]

Další možností, jak zničit nádrž nebo nádobu, je výrazná změna teplot okolního prostředí. Na základě platnosti stavové rovnice plynů ( $pV = RT$ ) lze spočítat, co se stane, když otevřenou nádobu s teplotou okolí kolem 20 °C hermeticky uzavřeme a v noci dojde k výraznému poklesu teploty, řekněme na 0 °C. Poměr tlaků bude potom roven poměru teplot v Kelvinech a tlak v nádrži klesne zhruba o 0,008 MPa. To může být pro tenkostěnnou nádrž i vysoce překročený přípustný vnější přetlak. [14]

Dalším způsobem jak je možné zničit nádobu vnějším přetlakem je dosažení ještě výraznějšího rozdílu tlaků na základě dosažení ještě výraznějšího rozdílu teplot např. čištěním nádoby parou a následným hermetickým uzavřením. Při poklesu teplot potom dojde i ke kondenzaci par ze vzduchu. [14]



Obrázek 29: Ukázka zborcení nádoby [14]

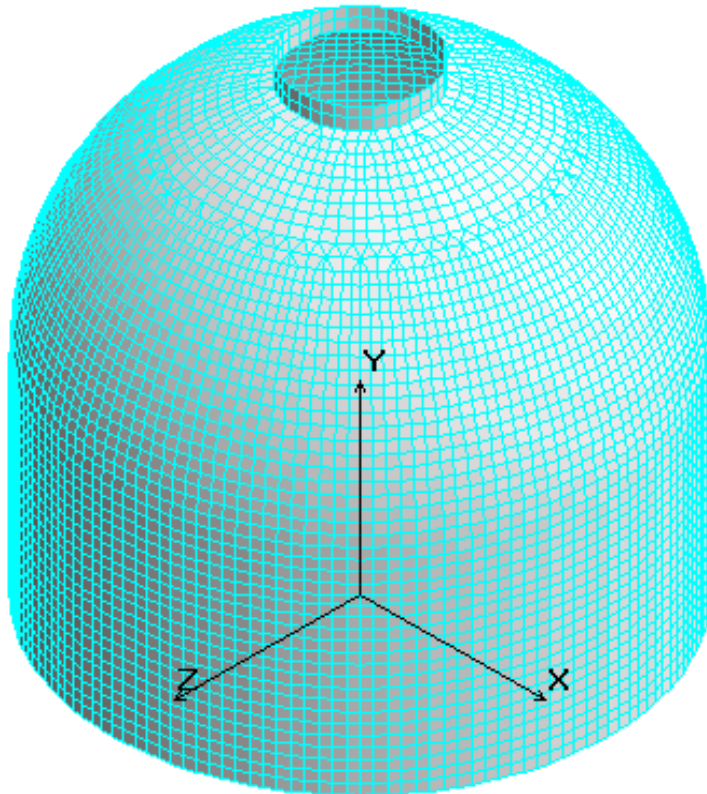
## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 5 CÍL PRÁCE

Cílem této práce je vytvořit FEM modely vertikálních podzemních nádob, které se vyrábějí technologií rotačního odlévání. U těchto vypracovaných FEM modelů dále zjistit stabilitní odolnost při zatížení vnějším tlakem obsypu, tlakem vertikálním působícím na kupoli nádrže, případně tlakem hydrostatickým, který působí uvnitř nádrže tím způsobem, že byly měněny typy zatížení a tloušťky stěn vertikálních podzemních nádob v závislosti na koeficientu bezpečnosti.

Jako výchozí rozměr jsou brány dvě nádoby a to nádoba s označením M4 - nádoba s objemem  $4 \text{ m}^3$  a nádoba s označením M8 - nádoba s objemem  $8 \text{ m}^3$ .

Jednotlivé typy zatížení jsou děleny na typ A a typ B se zatížením LC2 a LC3 (load case).



Obrázek 30: Ukázka použitého FEM modelu

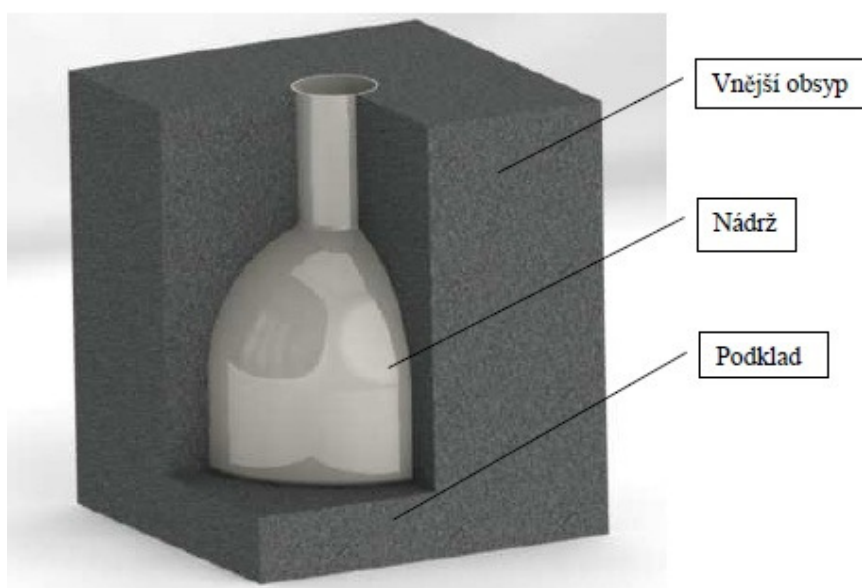


## 6 POČÁTEČNÍ PARAMETRY NÁDOB - ROZDĚLENÍ ZATÍŽENÍ

Analýza se zabývá určením koeficientu bezpečnosti pro jednotlivé moduly tečení materiálu. Koeficient bezpečnosti je uveden v normě ČSN EN 1778. Analýza probíhá pro dva typy nádob s označením M4 a M8.

Analýza proběhla pro čtyři typy zatížení s označením:

- A\_LC2 - mimořádný stav zatížení - zcela vyprázdněná nádoba pod vlivem tlaku obsypu na stěny nádoby
- A\_LC3 - provozní stav zatížení - kombinace hydrostatického tlaku vody a tlaku obsypu na nádobu
- B\_LC2 - mimořádný stav zatížení - zcela vyprázdněná nádoba pod vlivem tlaku obsypu na stěny nádoby, kdy vrchní polovina kopule nádoby je zatížena vertikálním tlakem
- B\_LC3 - provozní zatížení - kombinace hydrostatického tlaku vody a tlaku obsypu na nádobu, kdy vrchní polovina kopule nádoby je zatížena vertikálním tlakem



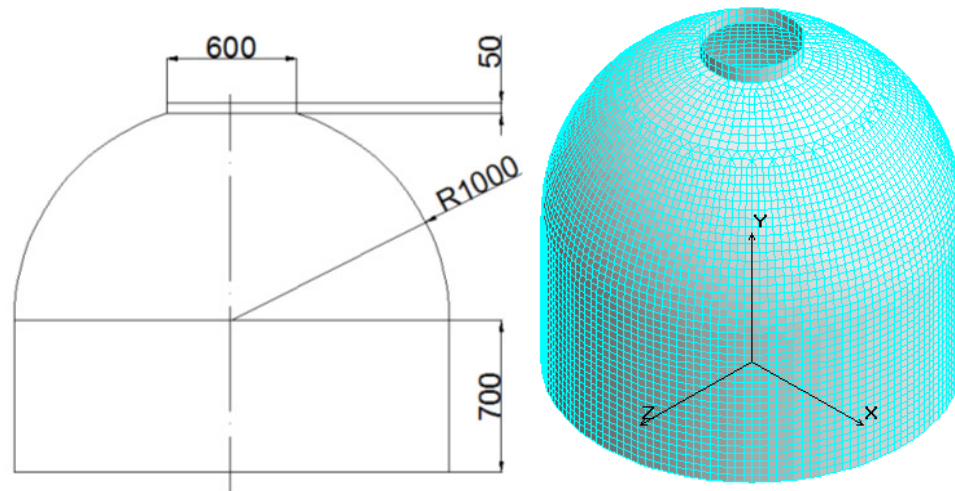
Obrázek 31: Ukázka uložení nádoby [1]

### 6.1 Rozměry nádob 4M - objem 4 m<sup>3</sup> a 8M - objem 4 m<sup>3</sup>

#### 6.1.1 Rozměry nádoby velkoobjemové nádoby 4M

Velkoobjemová nádoba je složena ze dvou částí. První část tvoří spodní díl velkoobjemové nádoby o objemu 4 m<sup>3</sup>, která se vyrábí technologií rotačního odlévání. Druhou část velko-

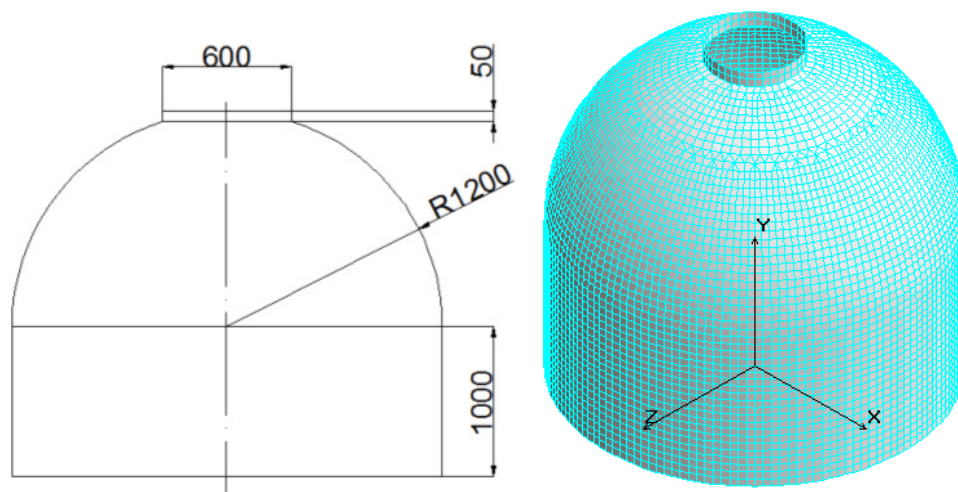
objemové nádoby tvoří vrchní díl (nástavec) o délce 1000 mm a průměru 600 mm, který je přivařen ke spodnímu dílu velkoobjemové nádoby. Pro výpočet je použita pouze spodní část nádoby za předpokladu, že ve spodní části se nachází nejvíce kritické místo na celé velkoobjemové nádobě.



Obrázek 32: Rozměry velkoobjemové nádoby 4M

### 6.1.2 Rozměry nádoby velkoobjemové nádoby 8M

Velkoobjemová nádoba je složena ze dvou částí. První část tvoří spodní díl velkoobjemové nádoby o objemu  $8 \text{ m}^3$ , která se vyrábí technologií rotačního odlévání. Druhou část velkoobjemové nádoby tvoří vrchní díl (nástavec) o délce 1000 mm a průměru 600 mm, který je přivařen ke spodnímu dílu velkoobjemové nádoby. Pro výpočet je použita pouze spodní část nádoby za předpokladu, že ve spodní části se nachází nejvíce kritické místo na celé velkoobjemové nádobě.



Obrázek 33: Rozměry velkoobjemové nádoby 8M

## 6.2 Materiál

Pro to, aby bylo možno určit tloušťku stěny nádoby, je důležité vědět, který materiál bude použit. U daného materiálu je nejdůležitější znát jeho modul tečení  $E$  v MPa. Tento modul je u každého polymerního materiálu odlišný a mění se v závislosti na čase. Je-li změřen modul tečení  $E$ , lze pak snadno zjistit tloušťku velkoobjemové nádoby, tak aby velkoobjemová nádoba splňovala koeficient bezpečnosti daný normou ČSN EN 1778 v závislosti na jejím použití.

Pro diplomovou práci je tedy brán jako příkladný materiál nízkohustotní polyetylen (LLDPE), který je vhodný pro rotační lití. Jeho vlastnosti se řídí normou ČSN EN 1778. [1]

### 6.2.1 Vlastnosti vybraného materiálu

Tabulka 2: Vlastnosti LLDPE [1]

Vlastnost	Jednotka	Hodnota
MFI (190°C / 2,16 kg)	g / 10 min	4
Hustota	kg / m <sup>3</sup>	938
Yongův modul (E)	Mpa	800
Poissonova konstanta ( $\nu$ )	-	0,4
Protážení při přetržení ( $\epsilon$ )	%	>700

### 6.2.2 Modul tečení (kvalifikovaný odhad)

Pro nízkohustotní polyetylen budeme brát v úvahu, že krátkodobý modul tečení dosahuje hodnoty  $E = 400$  MPa. Za krátkodobý modul tečení se dá považovat doba dle kvalifikovaného odhadu přibližně jednoho měsíce.

Dlouhodobý modul tečení dosahuje hodnoty modulu tečení  $E = 200$  MPa. Za dlouhodobý modul tečení můžeme považovat dle kvalifikovaného odhadu dobu delší než jeden rok.

## 6.3 Zatížení velkoobjemové nádoby

Velkoobjemová nádoba musí odolávat zatížení a namáhání, které jsou vyvolány manipulací, instalací, používáním, odkalováním a údržbou této nádoby. V závislosti na konečném použití nádoby musí být použity bezpečnostní faktory, které jsou uvedeny v bezpečnostní normě ČSN EN 12566 nebo musí splňovat normy státu, ve kterém jsou tyto nádoby použity.

Výpočty se provádí v závislosti na určení použití velkoobjemové nádoby.

Dle způsobu použití jsou brány v úvahu tři následující druhy zatížení velkoobjemové nádoby:

- zatížení nádoby vlastní silou obsypu
- hydrostatické zatížení nádoby
- zatížení pěší - zatížení, které může vzniknout vnějšími silami - chodci nebo auta

### 6.3.1 Zatížení vyvolané obsypáním nádoby

Výpočet zásypového zatížení musí brát v úvahu vliv půdy, zásypových materiálů a tvar nádrže. Vertikální a horizontální prvky výpočtu jsou brány následovně:

- Vertikální složka: -  $h \cdot 0,018$  MPa kde 0,018 MPa je specifické zatížení zemi-ny a  $h$  je výška od povrchu po bod působení tlaku
- Horizontální složka: -  $K \cdot D \cdot 0,018$  MPa, kde  $D$  je vzdálenost od úrovně terénu po místo kde zatížení působí a  $K$  je koeficient horizontálního půdního tlaku

Koeficienty pro horizontální půdní tlak  $K$ :

- písek:  $K = 0,33$
- štěrk:  $K = 0,27$
- ostatní obsypové materiály:  $K = 0,5$

### 6.3.2 Zatížení vyvolané hydrostatickým tlakem

Výpočty horizontálního a vertikálního hydrostatického zatížení jsou brány následovně:

- Vertikální složka: -  $H_w \cdot 0,01$  MPa kde 0,01 MPa je specifické zatížení vody
- Horizontální složka: -  $H \cdot D \cdot 0,01$  MPa kde  $H$  je vzdálenost od hladiny vody po dno nádoby

V místech, kde hladina podzemní vody má svůj význam (nejvyšší úroveň hladiny podzemní vody dosahuje nad dno nádrže), jsou podmínky stability nádoby v závislosti na tlaku vody uvedeny v návody od výrobce. V tomto případě je specifické zatížení zemi-ny 0,01 MPa a musí být připočteno k zatížení vody.

### 6.3.3 Zatížení pěší - zatížení, které může vzniknout vnějšími silami - chodci nebo auta

Zatížení 0,0025 MPa se uvažuje jen tehdy, pokud výška zásypu je menší než 1 metr. Je-li výška větší než 1 metr toto zatížení se zanedbává.

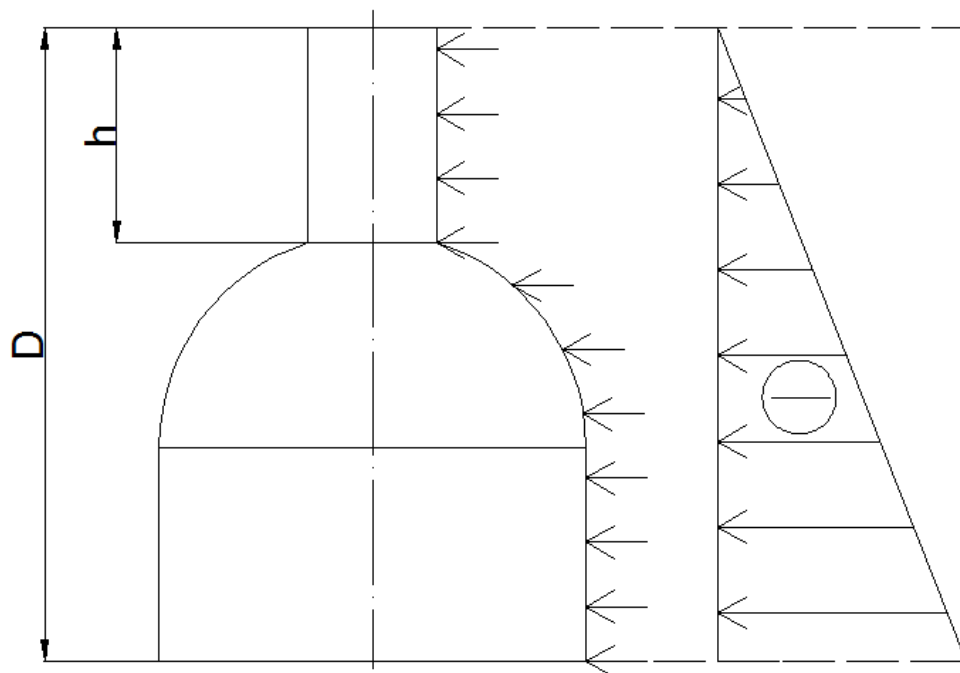
V případě výpočtu velkoobjemových nádob dosahuje obsyp nádoby 1 metr. Pěší zatížení je tedy zanedbáno.

Mimořádný stav zatížení - zcela vyprázdněná nádoba pod vlivem tlaku obsypu na stěny nádoby.

### 6.3.4 Zatížení nádoby s označením A\_LC2

Jedná se o mimořádný stav zatížení. To znamená, že nádoba je zcela vyprázdněná a působí na ní vnější tlak obsypu.

Na obrázku níže lze vidět, jakým způsobem je nádoba zatížena. Při simulaci je zanedbán komín nádoby dle kapitoly 6.1.

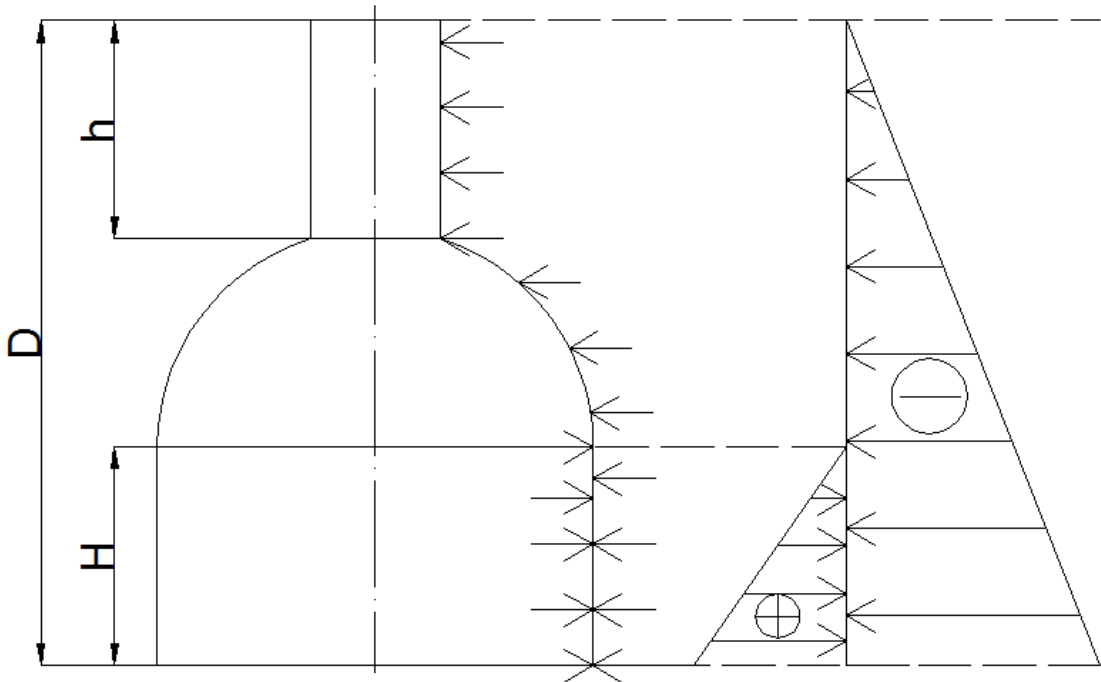


Obrázek 34: Ukázka zatížení nádoby s označením A\_LC2

### 6.3.5 Zatížení nádoby s označením A\_LC3

Jedná se o provozní stav zatížení. To znamená, že nádoba je zaplněna do určité hladiny vodou. V případě nádoby 4M je výška hladiny 0,7 m. Na nádobu tedy působí vnitřní hydrostatický tlak a tlak vnějšího obsypu.

Na obrázku níže lze vidět, jakým způsobem je nádoba zatížena. Při simulaci je zanedbán komín nádoby dle kapitoly 6.1.

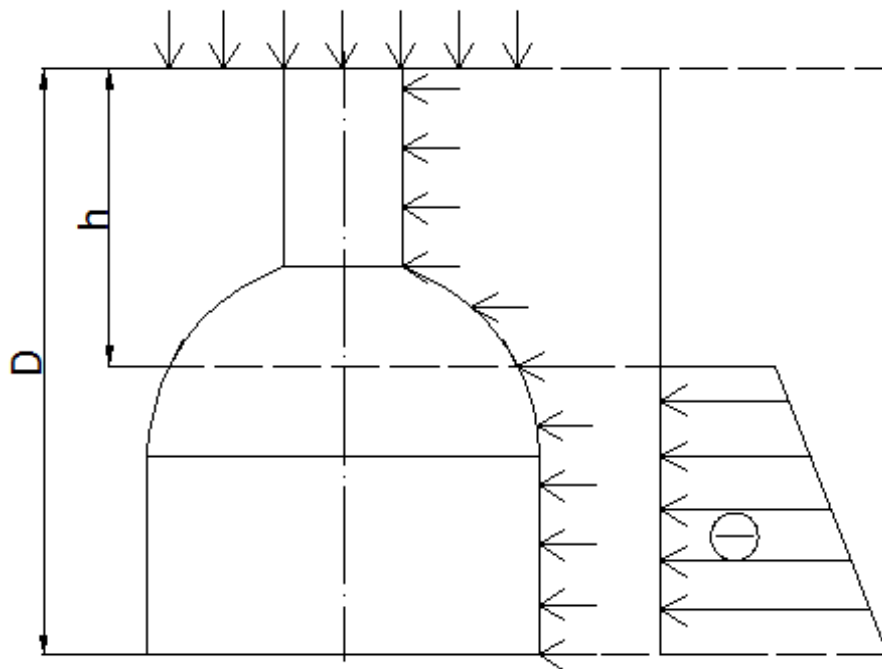


Obrázek 35: Ukázka zatížení nádoby s označením A\_LC3

### 6.3.6 Zatížení nádoby s označením B\_LC2

Jedná se o mimořádný stav zatížení. To znamená, že nádoba je zcela vyprázdněná a působí na ní vnější tlak obsypu. Na horní polovinu kupole zde působí i vnější vertikální tlak.

Na obrázku níže lze vidět, jakým způsobem je nádoba zatížena. Při simulaci je zanedbán komín nádoby dle kapitoly 6.1.

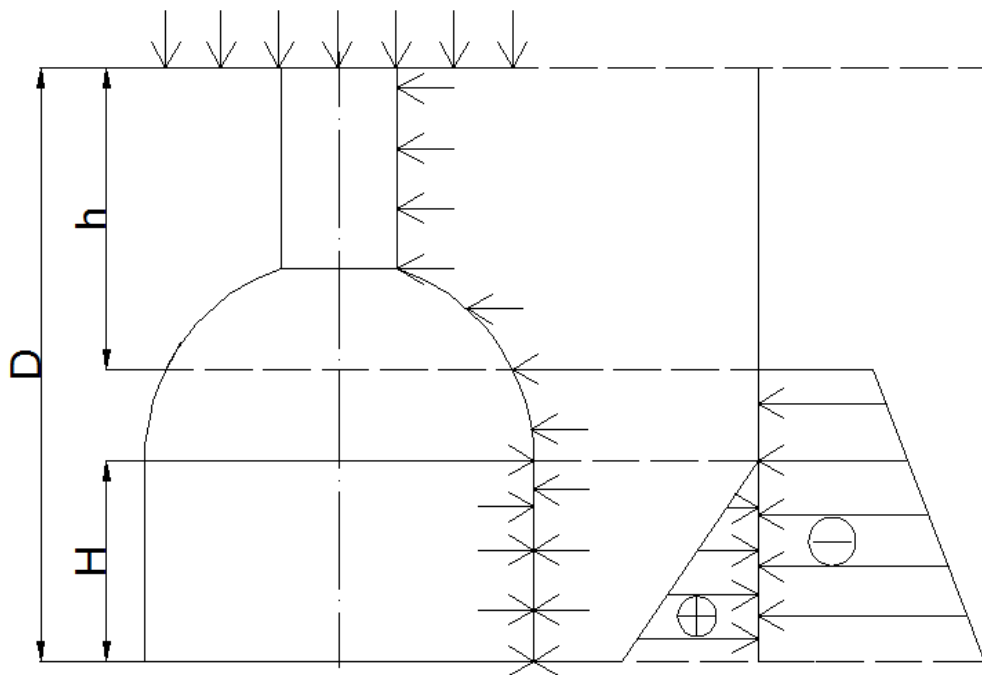


Obrázek 36: Ukázka zatížení nádoby s označením B\_LC2

### 6.3.7 Zatížení nádoby s označením B\_LC3

Jedná se o provozní stav zatížení. To znamená, že nádoba je zaplněna do určité hladiny vodou. V případě nádoby 8M je výška hladiny vody 1 m. Na nádobu tedy působí vnitřní hydrostatický tlak a tlak vnějšího obsypu a na horní polovinu kupole zde působí i vnější vertikální tlak.

Na obrázku níže lze vidět, jakým způsobem je nádoba zatížena. Při simulaci je zanedbán komín nádoby dle kapitoly 6.1.

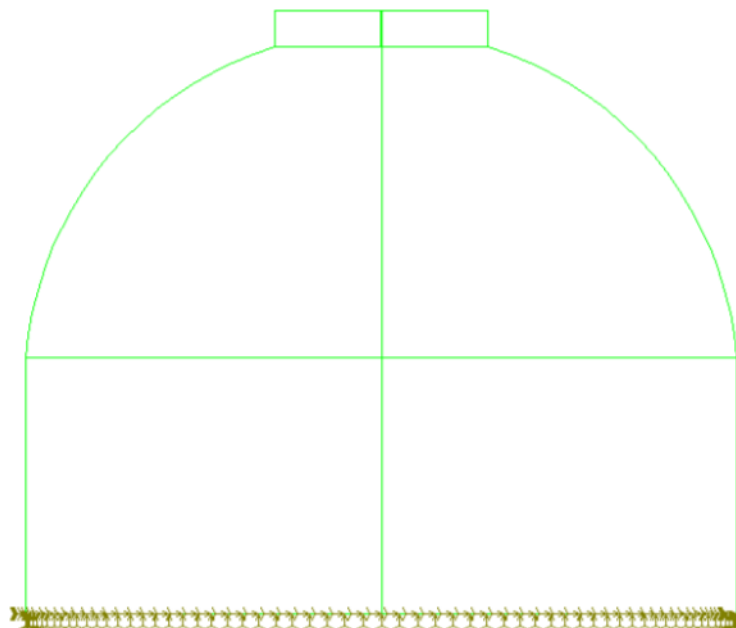


Obrázek 37: Ukázka zatížení nádoby s označením B\_LC3

## 6.4 Uložení velkoobjemové nádoby 4M a 8M

### 6.4.1 Uložení na tuhém podkladu

Uchycení velkoobjemových nádob 4M a 8M bylo zadáno za pomoci vetknutí, tj. odstranění všech šesti stupňů volnosti. Toto vetknutí bylo umístěno na dno nádoby.



Obrázek 38: Uchycení za pomoci vetknutí nádoby 4M a 8M



## 7 VÝSLEDKY ANALÝZ

Všechny výsledky byly získány z programu COSMOS/M GeoSTAR 2010.

COSMOS/M je kompletní, modulový, soběstačný program využívající metodu konečných prvků. Systém je vyvinutý pro strukturální výzkum a na osobních počítačích a pracovních stanicích. Program obsahuje moduly pro řešení lineárních a nelineárních statických a dynamických strukturálních problémů a problémů přenosu tepla, mechaniky tekutin, elektromagnetismu, únavy materiálu a jejich optimalizace.

### 7.1 Výpočty simulací pro 4M\_A\_LC2 - mimořádný stav zatížení - zcela vyprázdněná nádoba pod vlivem tlaku obsypu na stěny nádoby

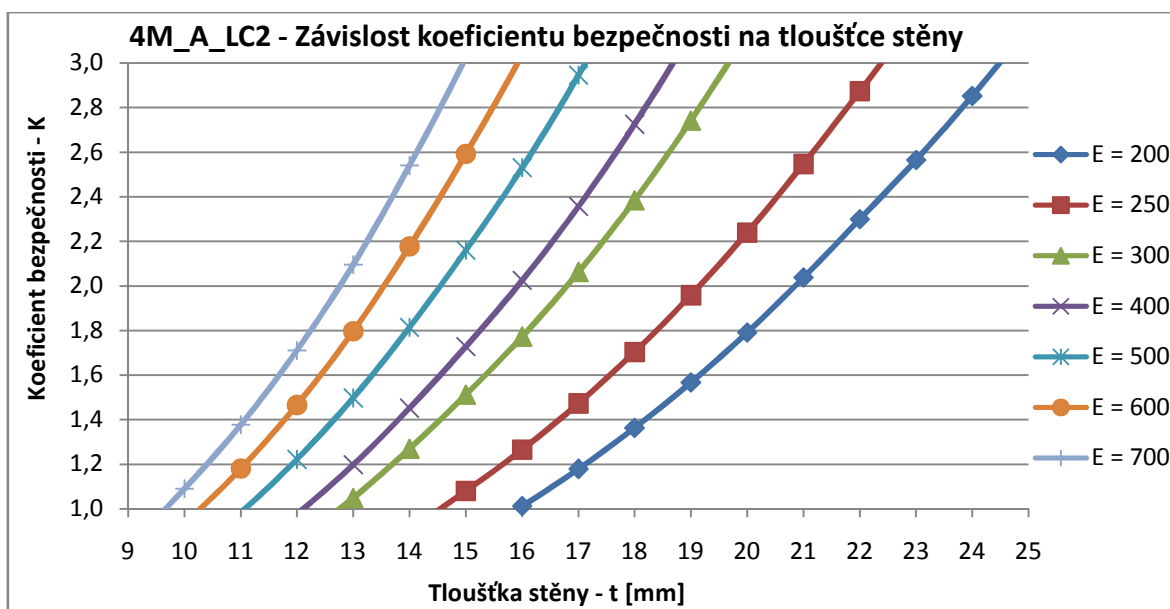
Simulace pro velkoobjemovou nádobu s označením 4M\_A\_LC2 proběhla pro modul tečení E od 200 MPa do 700 MPa, jak je uvedeno v tabulce 3. Při analýze byly měněny tloušťky stěny po jednom milimetru tak, aby koeficient bezpečnosti dosahoval požadovaných hodnot. Koeficient bezpečnosti musí dosahovat hodnoty dle normy ČSN EN 1778. Koeficient bezpečnosti stanovený normou ČSN EN 1778 má hodnotu dva.

Tabulka 3: Výpočty koeficientu bezpečnosti pro 4M\_A\_LC2

Tl. Stěny t [mm]	Koeficient bezpečnosti - Kb pro E [MPa]							
	E = 200	E = 250	E = 300	E = 350	<b>E = 400</b>	E = 500	E = 600	E = 700
9	0,237	0,297	0,356	0,415	<b>0,475</b>	0,593	0,712	0,831
10	0,311	0,389	0,467	0,545	<b>0,623</b>	0,778	0,934	1,090
11	0,393	0,492	0,590	0,689	<b>0,787</b>	0,984	1,180	1,377
12	0,489	0,611	0,733	0,855	<b>0,977</b>	1,221	1,466	1,710
13	0,599	0,749	0,898	1,048	<b>1,198</b>	1,497	1,796	<b>2,096</b>
14	0,726	0,907	1,089	1,270	<b>1,451</b>	1,814	<b>2,177</b>	2,540
15	0,864	1,080	1,296	1,512	<b>1,728</b>	<b>2,160</b>	2,592	3,024
16	1,012	1,265	1,519	1,772	<b>2,025</b>	2,531	3,037	3,543
17	1,178	1,473	1,767	<b>2,062</b>	<b>2,356</b>	2,946	3,535	4,124
18	1,363	1,703	<b>2,044</b>	2,384	<b>2,725</b>	3,406	4,088	4,769
19	1,567	1,958	2,350	2,741	<b>3,133</b>	3,916	4,700	5,483
20	1,791	<b>2,239</b>	2,687	3,135	<b>3,582</b>	4,478	5,374	6,269
21	<b>2,038</b>	2,547	3,056	3,566	<b>4,075</b>	5,094	6,113	7,132
22	2,299	2,874	3,448	4,023	<b>4,598</b>	5,747	6,897	8,046
23	2,565	3,206	3,847	4,489	<b>5,130</b>	6,412	7,695	8,977
24	2,852	3,565	4,278	4,992	<b>5,705</b>	7,131	8,557	9,983
25	3,162	3,953	4,743	5,534	<b>6,324</b>	7,905	9,486	11,067

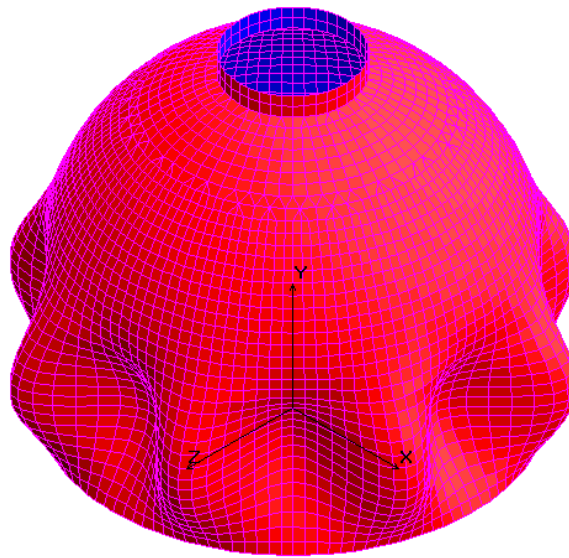
V tabulce 3 lze vidět výsledky koeficientu bezpečnosti v závislosti modulu tečení  $E$  v MPa na změně tloušťky  $t$  v mm. Lze vidět, že pro  $E = 200$  MPa je normou stanovený koeficient bezpečnosti splněn při tloušťce stěny nádoby  $t = 21$  mm, pro  $E = 250$  MPa je  $t = 20$  mm, pro  $E = 300$  MPa je  $t = 18$  mm, pro  $E = 350$  MPa je  $t = 17$  mm, pro  $E = 400$  MPa je na  $t = 16$  mm, pro  $E = 500$  MPa je  $t = 15$  mm, pro  $E = 600$  MPa je  $t = 14$  mm a pro  $E = 700$  MPa doporučená tloušťka nádoby klesá na  $t = 13$  mm.

Pro zcela vyprázdňenou nádobu pod vlivem tlaku obsypu na stěny nádoby je dle kvalifikovaného odhadu volen modul tečení  $E = 400$  MPa. Tloušťka stěn nádoby musí být pro splnění koeficientu bezpečnosti danou normou ČSN EN 1778 rovna minimálně 16 mm při koeficientu bezpečnosti 2,025.



Obrázek 39: Závislost koeficientu bezpečnosti na tloušťce stěny pro 4M\_A\_LC2

Z grafu na obrázku 39 lze určit tloušťku stěny nádoby  $t$  v milimetrech pro jednotlivé moduly tečení  $E$  v MPa pro jednotlivé koeficienty bezpečnosti. Graf je určen pro všechny typy materiálů, které jsou vhodné pro rotační odlévání velkoobjemových nádob a jsou zatíženy mimořádným stavem zatížení, což je prázdná nádoba zatížená vnějším obsypem dle kapitoly 6.3.4. Po změření modulu tečení materiálu lze snadno zjistit, jakou tloušťku musí mít velkoobjemová nádoba, aby byl splněn koeficient bezpečnosti, který je dán normou ČSN EN 1778.



Obrázek 40: Ukázka zborcení nádoby 4M\_A\_LC2

Na obrázku 40 lze vidět deformaci nádoby způsobenou vlivem vnějšího obsypu. Tato deformace nastává v místě největšího namáhání nádoby a to v oválné části ve spodu nádoby. Kopula nádoby je dostatečně pevná, aby snesla tlak vnějšího obsypu.

## 7.2 Výpočty simulací pro 4M\_A\_LC3 - provozní zatížení - kombinace hydrostatického tlaku vody a tlaku obsypu na nádobu

Simulace pro velkoobjemovou nádobu s označením 4M\_A\_LC3 proběhla pro modul tečení  $E$  od 200 MPa do 700 MPa, jak je uvedeno v tabulce 4. Při analýze byly měněny tloušťky stěny po jednom milimetru tak, aby koeficient bezpečnosti dosahoval požadovaných hodnot. Koeficient bezpečnosti musí dosahovat hodnoty dle normy ČSN EN 1778. Koeficient bezpečnosti stanovený normou ČSN EN 1778 má hodnotu dva.

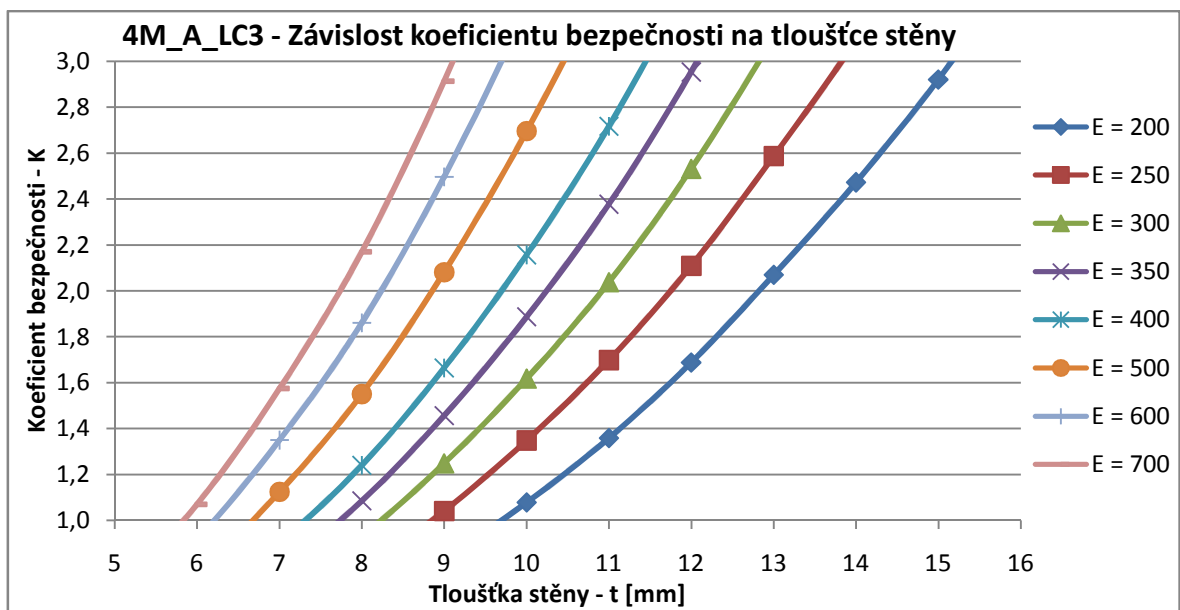
Tabulka 4: Výpočty koeficientu bezpečnosti pro 4M\_A\_LC3

Tl. Stěny t [mm]	Koeficient bezpečnosti - Kb pro E [MPa]							
	E = 200	E = 250	E = 300	E = 350	E = 400	E = 500	E = 600	E = 700
5	<b>0,196</b>	0,245	0,294	0,343	0,392	0,490	0,588	0,686
6	<b>0,306</b>	0,382	0,459	0,535	0,612	0,765	0,918	1,071
7	<b>0,450</b>	0,562	0,675	0,787	0,900	1,125	1,350	1,575
8	<b>0,620</b>	0,775	0,930	1,085	1,240	1,551	1,861	<b>2,171</b>
9	<b>0,832</b>	1,041	1,249	1,457	1,665	<b>2,081</b>	<b>2,497</b>	2,913
10	<b>1,079</b>	1,348	1,618	1,888	<b>2,157</b>	2,697	3,236	3,775
11	<b>1,359</b>	1,699	<b>2,038</b>	<b>2,378</b>	2,718	3,397	4,076	4,756
12	<b>1,688</b>	<b>2,110</b>	2,532	2,953	3,375	4,219	5,063	5,907
13	<b>2,070</b>	2,587	3,105	3,622	4,140	5,175	6,209	7,244
14	<b>2,473</b>	3,091	3,709	4,327	4,945	6,181	7,418	8,654

15	<b>2,920</b>	3,651	4,381	5,111	5,841	7,301	8,761	10,221
16	<b>3,424</b>	4,280	5,136	5,992	6,848	8,560	10,271	11,983

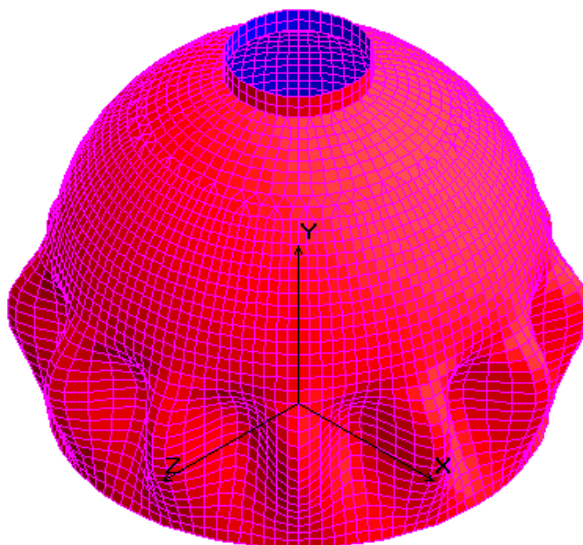
V tabulce 4 lze vidět výsledky koeficientu bezpečnosti v závislosti modulu tečení E MPa na změně tloušťky t v mm. Lze vidět, že pro E = 200 MPa je normou stanovený koeficient bezpečnosti splněn při tloušťce stěny nádoby t = 13 mm, pro E = 250 MPa je t = 12 mm, pro E = 300 MPa je t = 11 mm, pro E = 350 MPa je t = 11 mm, pro E = 400 MPa je na t = 10 mm, pro E = 500 MPa je t = 9 mm, pro E = 600 MPa je t = 9 mm a pro E = 700 MPa doporučená tloušťka nádoby klesá na t = 8 mm.

Pro kombinaci hydrostatického tlaku vody a tlaku obsypu na stěny nádoby je dle kvalifikovaného odhadu volen modul tečení E = 200 MPa. Tloušťka stěn nádoby musí být pro splnění koeficientu bezpečnosti danou normou ČSN EN 1778 rovna minimálně 13 mm při koeficientu bezpečnosti 2,070.



Obrázek 41: Závislost koeficientu bezpečnosti na tloušťce stěny pro 4M\_A\_LC3

Z grafu na obrázku 41 lze určit tloušťku stěny nádoby t v milimetrech pro jednotlivé moduly tečení E v MPa pro jednotlivé koeficienty bezpečnosti. Graf je určen pro všechny typy materiálů, které jsou vhodné pro rotační odlévání velkoobjemových nádob a jsou zatíženy provozním stavem zatížení, což je kombinace hydrostatického tlaku s tlakem vnějšího obsypu dle kapitoly 6.3.5. Po změření modulu tečení materiálu lze snadno zjistit, jakou tloušťku musí mít velkoobjemová nádoba, aby byl splněn koeficient bezpečnosti, který je dán normou ČSN EN 1778.



Obrázek 42: Ukázka zborcení nádoby 4M\_A\_LC3

Na obrázku 42 lze vidět deformaci nádoby způsobenou vlivem hydrostatického tlaku vody a tlakem vnějšího obsypu. Tato deformace nastává v místě největšího namáhání nádoby a to v oválné části ve spodu nádoby. Kopula nádoby je dostatečně pevná, aby snesla tlak vnějšího obsypu.

### 7.3 Výpočty simulací pro 4M\_B\_LC2 - mimořádný stav zatížení - zcela vyprázdněná nádoba pod vlivem tlaku obsypu na stěny nádoby, kdy vrchní polovina kopule nádoby je zatížena vertikálním tlakem

Simulace pro velkoobjemovou nádobu s označením 4M\_B\_LC2 proběhla pro modul teče- ní E od 200 MPa do 700 MPa, jak je uvedeno v tabulce 5. Při analýze byly měněny tloušť- ky stěny po jednom milimetru tak, aby koeficient bezpečnosti dosahoval požadovaných hodnot. Koeficient bezpečnosti musí dosahovat hodnoty dle normy ČSN EN 1778. Koefi- cient bezpečnosti stanovený normou ČSN EN 1778 má hodnotu dva.

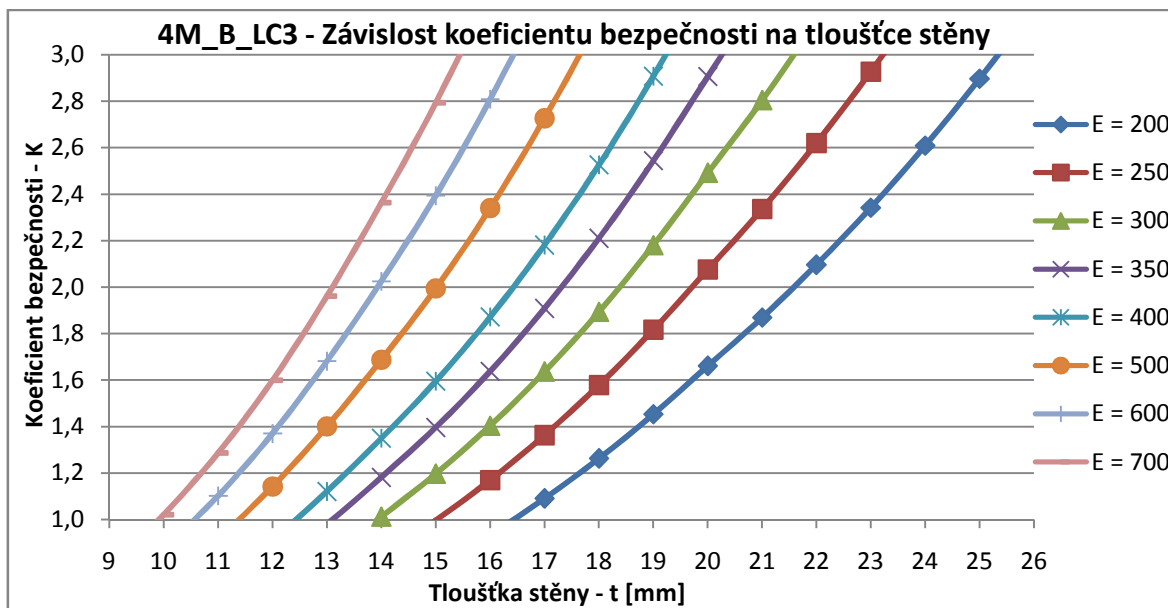
Tabulka 5: Výpočty koeficientu bezpečnosti pro 4M\_B\_LC2

Tl. Stěny t [mm]	Koeficient bezpečnosti - Kb pro E [MPa]							
	E = 200	E = 250	E = 300	E = 350	<b>E = 400</b>	E = 500	E = 600	E = 700
9	0,224	0,280	0,336	0,392	<b>0,448</b>	0,560	0,672	0,784
10	0,292	0,365	0,437	0,510	<b>0,583</b>	0,729	0,875	1,021
11	0,368	0,459	0,551	0,643	<b>0,735</b>	0,919	1,103	1,286
12	0,457	0,571	0,685	0,799	<b>0,914</b>	1,142	1,370	1,599
13	0,561	0,701	0,841	0,981	<b>1,121</b>	1,401	1,682	<b>2,001</b>

14	0,675	0,844	1,013	1,181	<b>1,350</b>	1,688	<b>2,025</b>	2,363
15	0,798	0,997	1,197	1,396	<b>1,596</b>	1,995	2,393	2,792
16	0,936	1,170	1,404	1,638	<b>1,872</b>	<b>2,340</b>	2,808	3,276
17	1,091	1,363	1,636	1,909	<b>2,181</b>	2,727	3,272	3,817
18	1,263	1,579	1,894	<b>2,210</b>	<b>2,526</b>	3,157	3,788	4,420
19	1,454	1,817	<b>2,181</b>	2,544	<b>2,907</b>	3,634	4,361	5,088
20	1,661	<b>2,076</b>	2,491	2,906	<b>3,321</b>	4,152	4,982	5,812
21	1,869	2,336	2,803	3,271	<b>3,738</b>	4,672	5,607	6,541
22	<b>2,096</b>	2,620	3,143	3,667	<b>4,191</b>	5,239	6,287	7,335
23	2,342	2,927	3,513	4,098	<b>4,683</b>	5,854	7,025	8,196
24	2,608	3,260	3,912	4,565	<b>5,217</b>	6,521	7,825	9,129
25	2,896	3,620	4,344	5,068	<b>5,792</b>	7,241	8,689	10,137
26	3,207	4,008	4,810	5,611	<b>6,413</b>	8,016	9,620	11,223

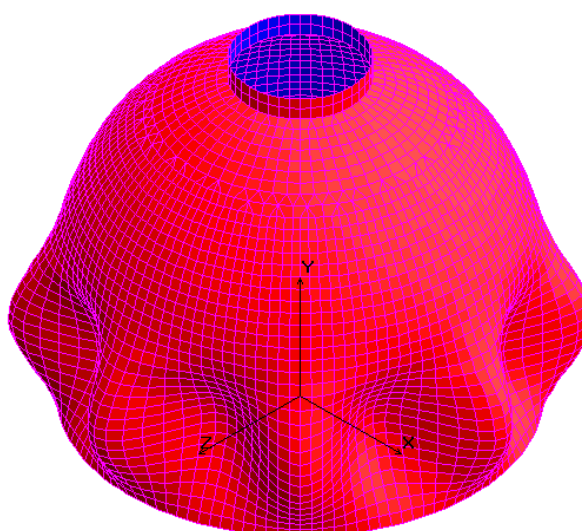
V tabulce 5 lze vidět výsledky koeficientu bezpečnosti v závislosti modulu tečení E MPa na změně tloušťky  $t$  v mm. Lze vidět, že pro  $E = 200$  MPa je normou stanovený koeficient bezpečnosti splněn při tloušťce nádoby  $t = 22$  mm, pro  $E = 250$  MPa je  $t = 20$  mm, pro  $E = 300$  MPa je  $t = 19$  mm, pro  $E = 350$  MPa je  $t = 18$  mm, pro  $E = 400$  MPa je na  $t = 17$  mm, pro  $E = 500$  MPa je  $t = 16$  mm, pro  $E = 600$  MPa je  $t = 14$  mm a pro  $E = 700$  MPa doporučená tloušťka nádoby klesá na  $t = 13$  mm.

Pro zcela vyprázdněnou nádobu pod vlivem tlaku obsypu na stěny nádoby, kdy vrchní polovina kopule nádoby je zatížena plným tlakem, je dle kvalifikovaného odhadu volen modul tečení  $E = 400$  MPa. Tloušťka stěn nádoby musí být pro splnění koeficientu bezpečnosti danou normou ČSN EN 1778 rovna minimálně 17 mm při koeficientu bezpečnosti 2,181.



Obrázek 43: Závislost koeficientu bezpečnosti na tloušťce stěny pro 4M\_B\_LC2

Z grafu na obrázku 43 lze určit tloušťku stěny nádoby  $t$  v milimetrech pro jednotlivé moduly tečení  $E$  v MPa pro jednotlivé koeficienty bezpečnosti. Graf je určen pro všechny typy materiálů, které jsou vhodné pro rotační odlévání velkoobjemových nádob a jsou zatíženy mimořádným stavem zatížení, což je prázdná nádoba zatížená vnějším obsypem a horní polovina kupole je zatížena vertikálním tlakem dle kapitoly 6.3.6. Po změření modulu tečení materiálu lze snadno zjistit, jakou tloušťku musí mít velkoobjemová nádoba, aby byl splněn koeficient bezpečnosti, který je dán normou ČSN EN 1778.



Obrázek 44: Ukázka zborcení nádoby 4M\_B\_LC2



Na obrázku 44 lze vidět deformaci nádoby způsobenou vlivem vnějšího obsypu. Tato deformace nastává v místě největšího namáhání nádoby a to v oválné části ve spodu nádoby. Kopule nádoby je dostatečně pevná, aby snesla tlak vnějšího obsypu.

#### 7.4 Výpočty simulací 4M\_B\_LC3 - provozní zatížení - kombinace hydrostatického tlaku vody a tlaku obsypu na nádobu, kdy vrchní polovina kopule nádoby je zatížena vertikálním tlakem

Simulace pro velkoobjemovou nádobu s označením 4M\_B\_LC3 proběhla pro modul tečení E od 200 MPa do 700 MPa, jak je uvedeno v tabulce 6. Při analýze byly měněny tloušťky stěny po jednom milimetru tak, aby koeficient bezpečnosti dosahoval požadovaných hodnot. Koeficient bezpečnosti musí dosahovat hodnoty dle normy ČSN EN 1778. Koeficient bezpečnosti stanovený normou ČSN EN 1778 je na hodnotě dva.

Tabulka 6: Výpočty koeficientu bezpečnosti pro 4M\_B\_LC3

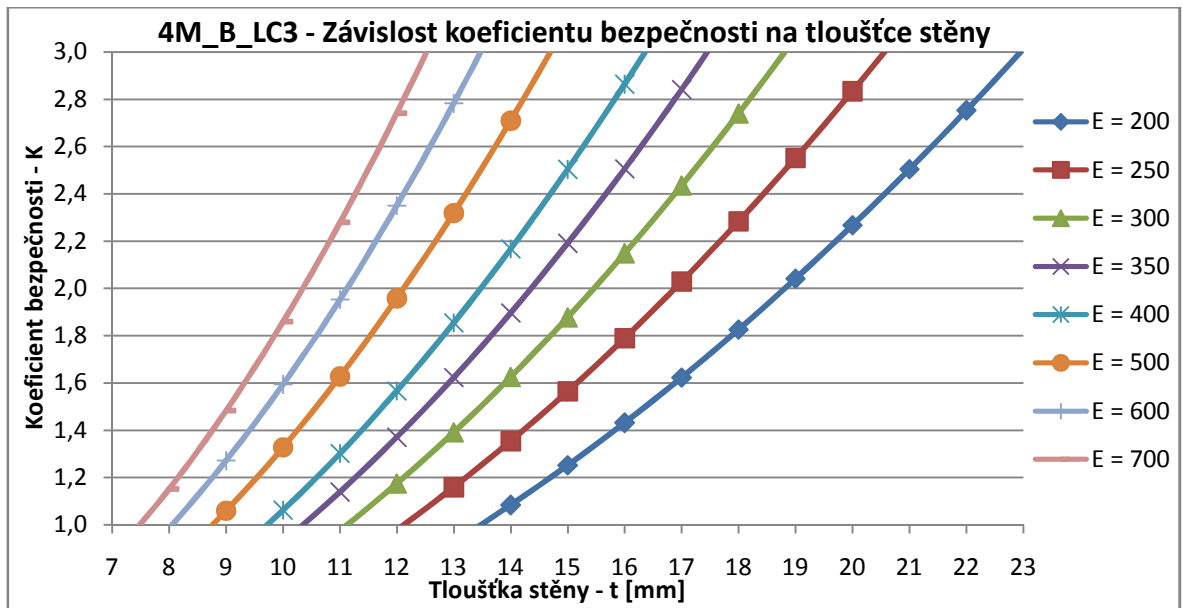
Tl. Stěny t [mm]	Koeficient bezpečnosti - Kb pro E [MPa]							
	E = 200	E = 250	E = 300	E = 350	E = 400	E = 500	E = 600	E = 700
7	<b>0,247</b>	0,309	0,370	0,432	0,494	0,617	0,740	0,864
8	<b>0,329</b>	0,411	0,494	0,576	0,658	0,823	0,987	1,152
9	<b>0,424</b>	0,530	0,636	0,742	0,848	1,060	1,272	1,484
10	<b>0,531</b>	0,664	0,797	0,930	1,063	1,328	1,594	1,860
11	<b>0,651</b>	0,814	0,977	1,139	1,302	1,628	1,953	2,279
12	<b>0,783</b>	0,979	1,175	1,371	1,566	1,958	2,350	2,741
13	<b>0,928</b>	1,159	1,391	1,623	1,855	2,319	2,783	3,246
14	<b>1,084</b>	1,355	1,626	1,896	2,167	2,709	3,251	3,793
15	<b>1,252</b>	1,565	1,878	2,191	2,504	3,130	3,756	4,382
16	<b>1,432</b>	1,790	2,148	2,506	2,864	3,580	4,295	5,011
17	<b>1,623</b>	2,029	2,435	2,841	3,247	4,059	4,870	5,682
18	<b>1,827</b>	2,283	2,740	3,197	3,653	4,567	5,480	6,393
19	<b>2,041</b>	2,551	3,062	3,572	4,082	5,103	6,123	7,144
20	<b>2,267</b>	2,834	3,401	3,967	4,534	5,668	6,801	7,935
21	<b>2,504</b>	3,130	3,756	4,383	5,009	6,261	7,513	8,765
22	<b>2,753</b>	3,441	4,129	4,817	5,506	6,882	8,258	9,635
23	<b>3,012</b>	3,766	4,519	5,272	6,025	7,531	9,037	10,543

V tabulce 6 lze vidět výsledky koeficientu bezpečnosti v závislosti modulu tečení E MPa na změně tloušťky t v mm. Lze vidět, že pro E = 200 MPa je normou stanovený koeficient bezpečnosti splněn při tloušťce nádoby t = 19 mm, pro E = 250 MPa je t = 17 mm, pro E = 300 MPa je t = 16 mm, pro E = 350 MPa je t = 15 mm, pro E = 400 MPa je na



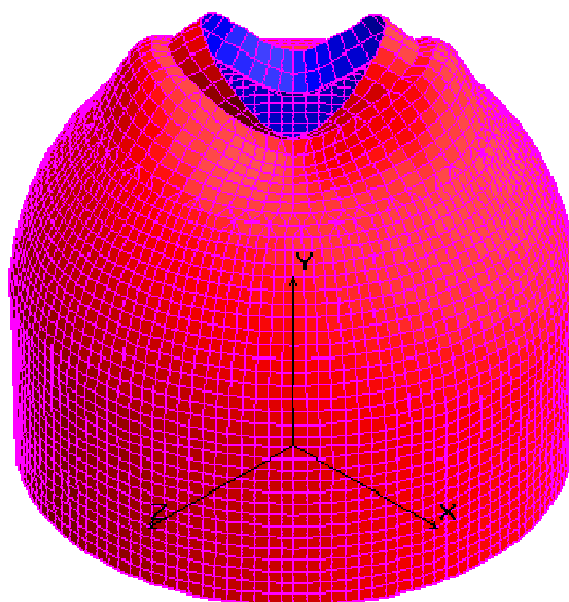
$t = 14$  mm, pro  $E = 500$  MPa je  $t = 13$  mm, pro  $E = 600$  MPa je  $t = 12$  mm a pro  $E = 700$  MPa doporučená tloušťka nádoby klesá na  $t = 11$  mm.

Pro kombinaci hydrostatického tlaku vody a tlaku obsypu na stěny nádoby je dle kvalifikovaného odhadu volen modul tečení  $E = 200$  MPa. Tloušťka stěn nádoby musí být pro splnění koeficientu bezpečnosti danou normou ČSN EN 1778 rovna minimálně 19 mm při koeficientu bezpečnosti 2,041.



Obrázek 45: Závislost koeficientu bezpečnosti na tloušťce stěny pro 4M\_B\_LC3

Z grafu na obrázku 45 lze určit tloušťku stěny nádoby  $t$  v milimetrech pro jednotlivé moduly tečení  $E$  v MPa pro jednotlivé koeficienty bezpečnosti. Graf je určen pro všechny typy materiálů, které jsou vhodné pro rotační odlévání velkoobjemových nádob a jsou zatíženy provozním stavem zatížení, což je kombinace hydrostatického tlaku s tlakem vnějšího obsypu a horní polovina kupole je zatížena vertikálním tlakem dle kapitoly 6.3.7. Po změření modulu tečení materiálu lze snadno zjistit, jakou tloušťku musí mít velkoobjemová nádoba, aby byl splněn koeficient bezpečnosti, který je dán normou ČSN EN 1778.



Obrázek 46: Ukázka zborcení nádoby 4M\_B\_LC3

Na obrázku 46 lze vidět deformaci nádoby způsobenou vlivem hydrostatického tlaku vody a tlakem vnějšího obsypu, kdy je kopule zatížena plným tlakem obsypu. Tato deformace nastává v místě největšího namáhání nádoby a to ve vrchní části nádoby na vrcholu kopule. Spodní část nádoby je dostatečně pevná, aby snesla tlak vnějšího obsypu kombinovaného s hydrostatickým tlakem vody.

## 7.5 Výpočty simulací pro 8M\_A\_LC2 - mimořádný stav zatížení - zcela vyprázdněná nádoba pod vlivem tlaku obsypu na stěny nádoby

Simulace pro velkoobjemovou nádobu s označením 8M\_A\_LC2 proběhla pro modul tečny E od 200 MPa do 700 MPa, jak je uvedeno v tabulce 7. Při analýze byly měněny tloušťky stěny po jednom milimetru tak, aby koeficient bezpečnosti dosahoval požadovaných hodnot. Koeficient bezpečnosti musí dosahovat hodnoty dle normy ČSN EN 1778. Koeficient bezpečnosti stanovený normou ČSN EN 1778 má hodnotu dva.

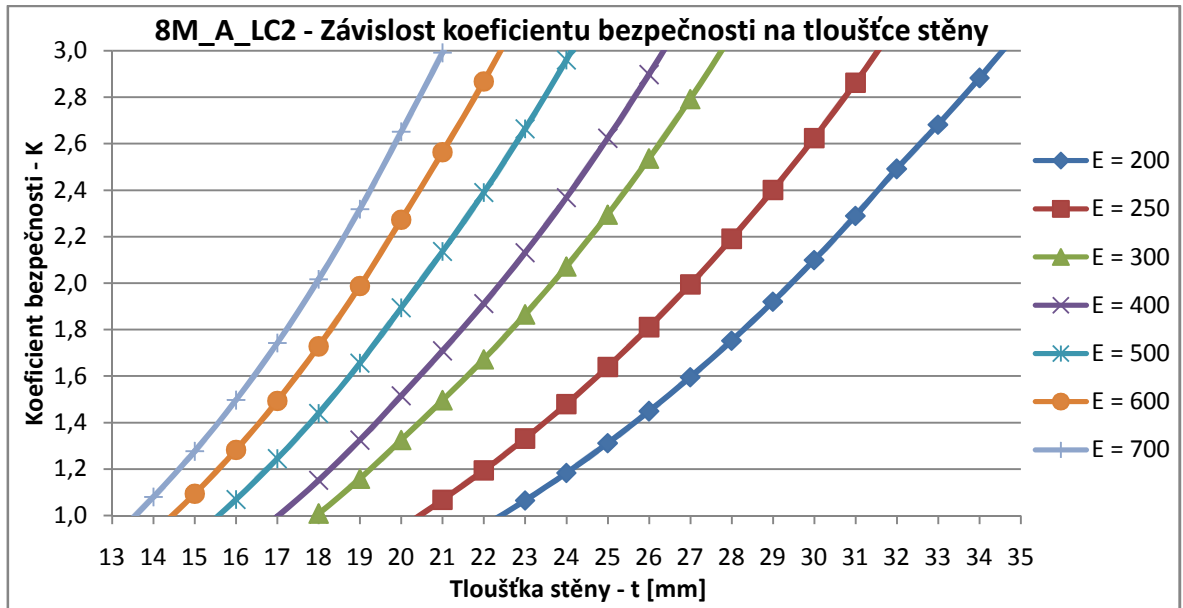
Tabulka 7: Výpočty koeficientu bezpečnosti pro 8M\_A\_LC2

Tl. Stěny t [mm]	Koeficient bezpečnosti - Kb pro E [MPa]							
	E = 200	E = 250	E = 300	E = 350	E = 400	E = 500	E = 600	E = 700
13	0,257	0,321	0,385	0,449	<b>0,513</b>	0,642	0,770	0,898
14	0,309	0,386	0,463	0,540	<b>0,618</b>	0,772	0,926	1,081
15	0,365	0,456	0,547	0,638	<b>0,730</b>	0,912	1,094	1,277
16	0,428	0,535	0,641	0,748	<b>0,855</b>	1,069	1,283	1,497
17	0,498	0,622	0,747	0,871	<b>0,996</b>	1,245	1,494	1,743
18	0,576	0,720	0,864	1,008	<b>1,152</b>	1,440	1,728	<b>2,016</b>

19	0,662	0,828	0,994	1,159	<b>1,325</b>	1,656	1,987	2,319
20	0,758	0,947	1,136	1,326	<b>1,515</b>	1,894	<b>2,273</b>	2,652
21	0,854	1,068	1,282	1,495	<b>1,709</b>	<b>2,136</b>	2,563	2,991
22	0,956	1,195	1,434	1,673	<b>1,912</b>	2,390	2,867	3,345
23	1,065	1,332	1,598	1,865	<b>2,131</b>	2,664	3,196	3,729
24	1,184	1,480	1,776	<b>2,072</b>	<b>2,368</b>	2,960	3,552	4,144
25	1,311	1,639	1,967	2,295	<b>2,623</b>	3,279	3,934	4,590
26	1,449	1,811	<b>2,173</b>	2,535	<b>2,897</b>	3,621	4,346	5,070
27	1,595	1,994	2,393	2,792	<b>3,191</b>	3,989	4,786	5,584
28	1,753	<b>2,191</b>	2,629	3,067	<b>3,505</b>	4,381	5,258	6,134
29	1,920	2,400	2,881	3,361	<b>3,841</b>	4,801	5,761	6,721
30	<b>2,099</b>	2,624	3,149	3,674	<b>4,199</b>	5,248	6,298	7,348
31	2,289	2,862	3,434	4,006	<b>4,579</b>	5,723	6,868	8,013
32	2,491	3,114	3,737	4,359	<b>4,982</b>	6,228	7,473	8,719
33	2,682	3,352	4,022	4,693	<b>5,363</b>	6,704	8,045	9,385
34	2,882	3,603	4,323	5,044	<b>5,764</b>	7,205	8,646	10,087
35	3,093	3,867	4,640	5,413	<b>6,187</b>	7,733	9,280	10,827

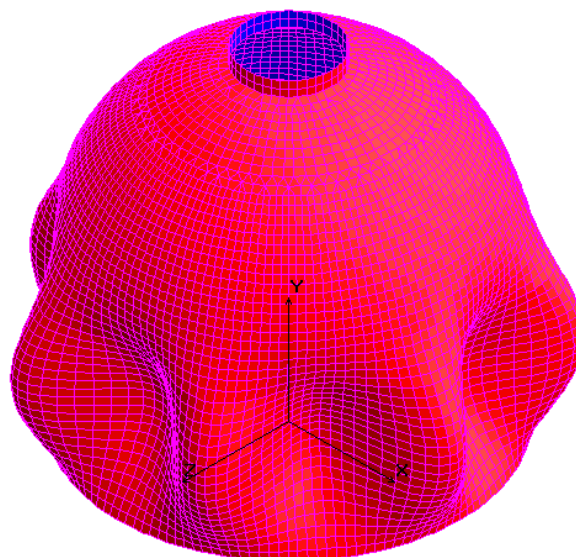
V tabulce 7 lze vidět výsledky koeficientu bezpečnosti v závislosti modulu tečení E MPa na změně tloušťky t v mm. Lze vidět, že pro E = 200 MPa je normou stanovený koeficient bezpečnosti splněn při tloušťce nádoby t = 30 mm, pro E = 250 MPa je t = 28 mm, pro E = 300 MPa je t = 26 mm, pro E = 350 MPa je t = 24 mm, pro E = 400 MPa je na t = 23 mm, pro E = 500 MPa je t = 21 mm, pro E = 600 MPa je t = 20 mm a pro E = 700 MPa doporučená tloušťka nádoby klesá na t = 18 mm.

Pro zcela vyprázdněnou nádobu pod vlivem tlaku obsypu na stěny nádoby je dle kvalifikovaného odhadu volen modul tečení E = 400 MPa. Tloušťka stěn nádoby musí být pro splnění koeficientu bezpečnosti danou normou ČSN EN 1778 rovna minimálně 23 mm při koeficientu bezpečnosti 2,131.



Obrázek 47: Závislost koeficientu bezpečnosti na tloušťce stěny pro 8M\_A\_LC2

Z grafu na obrázku 47 lze určit tloušťku stěny nádoby  $t$  v milimetrech pro jednotlivé moduly tečení  $E$  v MPa pro jednotlivé koeficienty bezpečnosti. Graf je určen pro všechny typy materiálů, které jsou vhodné pro rotační odlévání velkoobjemových nádob a jsou zatíženy mimořádným stavem zatížení, což je prázdná nádoba zatížená vnějším obsypem dle kapitoly 6.3.4. Po změření modulu tečení materiálu lze snadno zjistit, jakou tloušťku musí mít velkoobjemová nádoba, aby byl splněn koeficient bezpečnosti, který je dán normou ČSN EN 1778.



Obrázek 48: Ukázka zborcení nádoby 8M\_A\_LC2

Na obrázku 48 lze vidět deformaci nádoby způsobenou vlivem vnějšího obsypu. Tato deformace nastává v místě největšího namáhání nádoby a to v oválné části ve spodu nádoby. Kopule nádoby je dostatečně pevná, aby snesla tlak vnějšího obsypu.

## 7.6 Výpočty simulací pro 8M\_A\_LC3 - provozní zatížení - kombinace hydrostatického tlaku vody a tlaku obsypu na nádobu

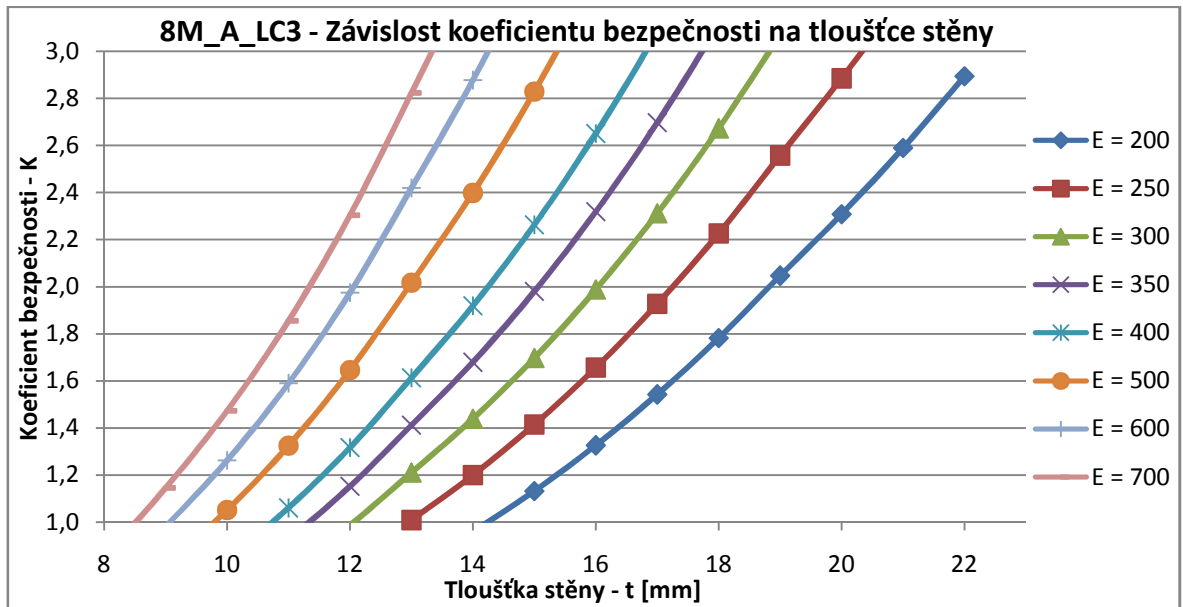
Simulace pro velkoobjemovou nádobu s označením 8M\_A\_LC3 proběhla pro modul tečení E od 200 MPa do 700 MPa, jak je uvedeno v tabulce 8. Při analýze byly měněny tloušťky stěny po jednom milimetru tak, aby koeficient bezpečnosti dosahoval požadovaných hodnot. Koeficient bezpečnosti musí dosahovat hodnoty dle normy ČSN EN 1778. Koeficient bezpečnosti stanovený normou ČSN EN 1778 má hodnotu dva.

Tabulka 8: Výpočty koeficientu bezpečnosti pro 8M\_A\_LC3

Tl. Stěny t [mm]	Koeficient bezpečnosti - Kb pro E [MPa]							
	E = 200	E = 250	E = 300	E = 350	E = 400	E = 500	E = 600	E = 700
8	<b>0,243</b>	0,304	0,365	0,426	0,487	0,608	0,730	0,852
9	<b>0,327</b>	0,409	0,491	0,572	0,654	0,818	0,981	1,145
10	<b>0,421</b>	0,526	0,631	0,736	0,841	1,052	1,262	1,472
11	<b>0,530</b>	0,663	0,795	0,928	1,060	1,325	1,590	1,855
12	<b>0,658</b>	0,823	0,988	1,152	1,317	1,646	1,975	<b>2,304</b>
13	<b>0,807</b>	1,008	1,210	1,412	1,613	<b>2,017</b>	<b>2,420</b>	2,823
14	<b>0,959</b>	1,199	1,439	1,679	1,919	2,399	2,878	3,358
15	<b>1,132</b>	1,415	1,698	1,981	<b>2,264</b>	2,830	3,395	3,961
16	<b>1,325</b>	1,657	1,988	<b>2,319</b>	2,651	3,314	3,976	4,639
17	<b>1,542</b>	1,927	<b>2,312</b>	2,698	3,083	3,854	4,625	5,395
18	<b>1,781</b>	<b>2,227</b>	2,672	3,117	3,563	4,454	5,344	6,235
19	<b>2,046</b>	2,558	3,070	3,581	4,093	5,116	6,139	7,162
20	<b>2,308</b>	2,886	3,463	4,040	4,617	5,771	6,925	8,079
21	<b>2,589</b>	3,237	3,884	4,531	5,179	6,474	7,768	9,063
22	<b>2,894</b>	3,618	4,341	5,065	5,788	7,236	8,683	10,130
23	<b>3,224</b>	4,030	4,836	5,642	6,448	8,060	9,672	11,284

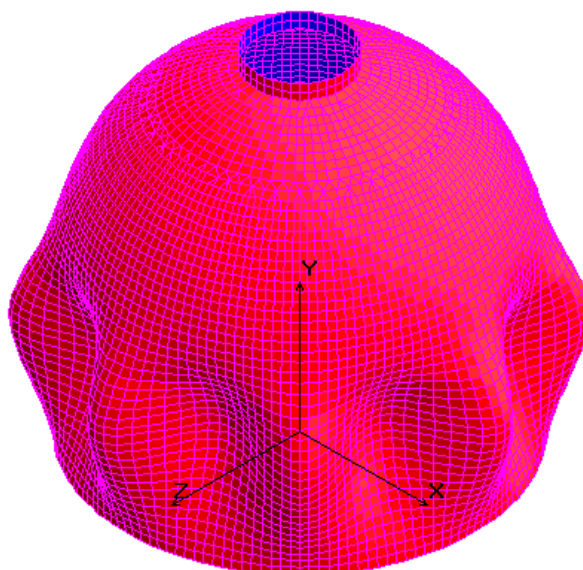
V tabulce 8 lze vidět výsledky koeficientu bezpečnosti v závislosti modulu tečení E v MPa na změně tloušťky t v mm. Lze vidět, že pro E = 200 MPa je normou stanovený koeficient bezpečnosti splněn při tloušťce nádoby t = 19 mm, pro E = 250 MPa je t = 18 mm, pro E = 300 MPa je t = 17 mm, pro E = 350 MPa je t = 16 mm, pro E = 400 MPa je na t = 15 mm, pro E = 500 MPa je t = 13 mm, pro E = 600 MPa je t = 13 mm a pro E = 700 MPa doporučená tloušťka nádoby klesá na t = 12 mm.

Pro kombinaci hydrostatického tlaku vody a tlaku obsypu na stěny nádoby je dle kvalifikovaného odhadu volen modul tečení  $E = 200$  MPa. Tloušťka stěn nádoby musí být pro splnění koeficientu bezpečnosti danou normou ČSN EN 1778 rovna minimálně 19 mm při koeficientu bezpečnosti 2,046.



Obrázek 49: Závislost koeficientu bezpečnosti na tloušťce stěny pro 8M\_A\_LC3

Z grafu na obrázku 49 lze určit tloušťku stěny nádoby  $t$  v milimetrech pro jednotlivé moduly tečení  $E$  v MPa pro jednotlivé koeficienty bezpečnosti. Graf je určen pro všechny typy materiálů, které jsou vhodné pro rotační odlévání velkoobjemových nádob a jsou zatíženy provozním stavem zatížení, což je kombinace hydrostatického tlaku s tlakem vnějšího obsypu dle kapitoly 6.3.5. Po změření modulu tečení materiálu lze snadno zjistit, jakou tloušťku musí mít velkoobjemová nádoba, aby byl splněn koeficient bezpečnosti, který je dán normou ČSN EN 1778.



Obrázek 50: Ukázka zborcení nádoby 8M\_A\_LC3

Na obrázku 50 lze vidět deformaci nádoby způsobenou vlivem hydrostatického tlaku vody a tlakem vnějšího obsypu. Tato deformace nastává v místě největšího namáhání nádoby a to v oválné části ve spodu nádoby. Kopule nádoby je dostatečně pevná, aby snesla tlak vnějšího obsypu.

### 7.7 Výpočty simulací pro 8M\_B\_LC2 - mimořádný stav zatížení - zcela vyprázdněná nádoba pod vlivem tlaku obsypu na stěny nádoby, kdy vrchní polovina kopule nádoby je zatížena vertikálním tlakem

Simulace pro velkoobjemovou nádobu s označením 8M\_B\_LC2 proběhla pro modul tečení  $E$  od 200 MPa do 700 MPa, jak je uvedeno v tabulce 9. Při analýze byly měněny tloušťky stěny po jednom milimetru tak, aby koeficient bezpečnosti dosahoval požadovaných hodnot. Koeficient bezpečnosti musí dosahovat hodnoty dle normy ČSN EN 1778. Koeficient bezpečnosti stanovený normou ČSN EN 1778 má hodnotu dva.

Tabulka 9: Výpočty koeficientu bezpečnosti pro 8M\_B\_LC2

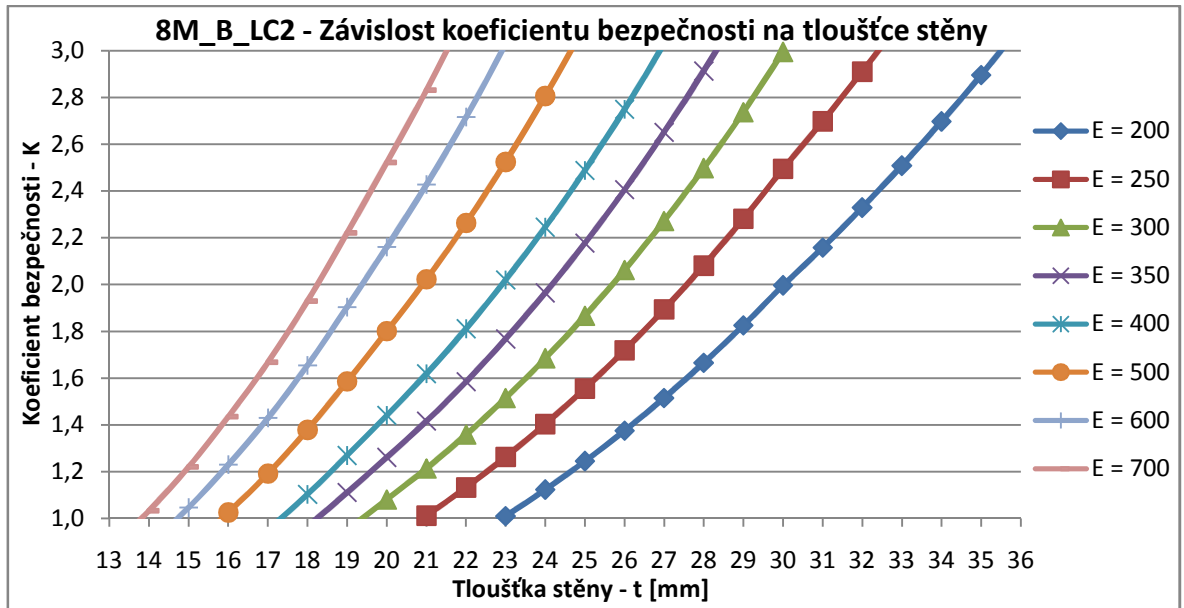
Tl. Stěny	Koeficient bezpečnosti - Kb pro E [MPa]							
	E = 200	E = 250	E = 300	E = 350	<b>E = 400</b>	E = 500	E = 600	E = 700
13	0,247	0,309	0,371	0,433	<b>0,495</b>	0,618	0,742	0,866
14	0,295	0,369	0,443	0,516	<b>0,590</b>	0,738	0,885	1,033
15	0,349	0,436	0,523	0,610	<b>0,697</b>	0,871	1,046	1,220
16	0,410	0,512	0,615	0,717	<b>0,820</b>	1,025	1,230	1,435
17	0,476	0,596	0,715	0,834	<b>0,953</b>	1,191	1,429	1,667
18	0,551	0,689	0,827	0,965	<b>1,103</b>	1,378	1,654	1,930

19	0,634	0,793	0,951	1,110	<b>1,269</b>	1,586	1,903	<b>2,220</b>
20	0,720	0,900	1,080	1,261	<b>1,441</b>	1,801	<b>2,161</b>	2,521
21	0,809	1,011	1,214	1,416	<b>1,618</b>	<b>2,023</b>	2,427	2,832
22	0,905	1,132	1,358	1,584	<b>1,811</b>	2,263	2,716	3,169
23	1,010	1,262	1,514	1,767	<b>2,019</b>	2,524	3,029	3,534
24	1,122	1,403	1,683	1,964	<b>2,245</b>	2,806	3,367	3,928
25	1,244	1,555	1,866	<b>2,177</b>	<b>2,488</b>	3,110	3,731	4,353
26	1,374	1,718	<b>2,062</b>	2,405	<b>2,749</b>	3,436	4,123	4,810
27	1,515	1,893	2,272	2,650	<b>3,029</b>	3,786	4,544	5,301
28	1,665	<b>2,081</b>	2,497	2,913	<b>3,329</b>	4,161	4,994	5,826
29	1,825	2,281	2,737	3,193	<b>3,649</b>	4,562	5,474	6,386
30	1,996	2,495	2,993	3,492	<b>3,991</b>	4,989	5,987	6,985
31	<b>2,158</b>	2,698	3,237	3,777	<b>4,316</b>	5,396	6,475	7,554
32	2,328	2,910	3,492	4,074	<b>4,656</b>	5,820	6,984	8,148
33	2,507	3,134	3,761	4,388	<b>5,015</b>	6,269	7,522	8,776
34	2,697	3,371	4,045	4,719	<b>5,393</b>	6,742	8,090	9,438
35	2,896	3,620	4,344	5,068	<b>5,792</b>	7,240	8,688	10,136
36	3,106	3,882	4,659	5,435	<b>6,212</b>	7,765	9,317	10,870

V tabulce 9 lze vidět výsledky koeficientu bezpečnosti v závislosti modulu tečení E v MPa na změně tloušťky t v mm. Lze vidět, že pro E = 200 MPa je normou stanovený koeficient bezpečnosti splněn při tloušťce nádoby t = 31 mm, pro E = 250 MPa je t = 28 mm, pro E = 300 MPa je t = 26 mm, pro E = 350 MPa je t = 25 mm, pro E = 400 MPa je na t = 23 mm, pro E = 500 MPa je t = 21 mm, pro E = 600 MPa je t = 20 mm a pro E = 700 MPa doporučená tloušťka nádoby klesá na t = 19 mm.

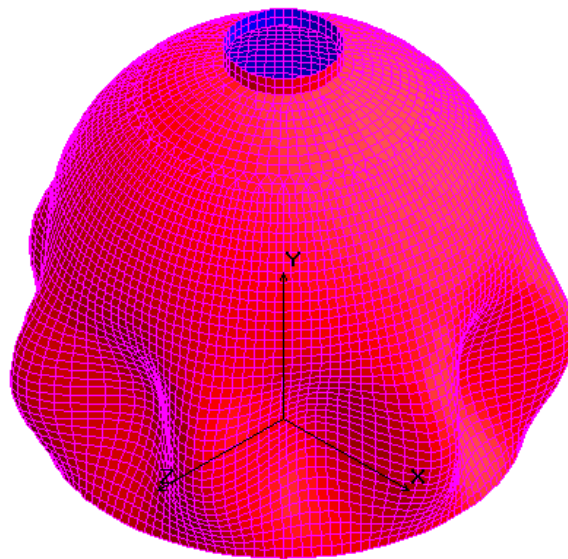
Pro zcela vyprázdněnou nádobu pod vlivem tlaku obsypu na stěny nádoby, kdy vrchní polovina kopule nádoby je zatížena plným tlakem, je dle kvalifikovaného odhadu volen modul tečení E = 400 MPa. Tloušťka stěn nádoby musí být pro splnění koeficientu bezpečnosti danou normou ČSN EN 1778 rovna minimálně 23 mm při koeficientu bezpečnosti 2,019.





Obrázek 51: Závislost koeficientu bezpečnosti na tloušťce stěny pro 8M\_B\_LC2

Z grafu na obrázku 51 výše lze určit tloušťku stěny nádoby  $t$  v milimetrech pro jednotlivé moduly tečení  $E$  v MPa pro jednotlivé koeficienty bezpečnosti. Graf je určen pro všechny typy materiálů, které jsou vhodné pro rotační odlévání velkoobjemových nádob a jsou zatíženy mimořádným stavem zatížení, což je prázdná nádoba zatížená vnějším obsypem a horní polovina kopule je zatížena vertikálním tlakem dle kapitoly 6.3.6. Po změření modulu tečení materiálu lze snadno zjistit, jakou tloušťku musí mít velkoobjemová nádoba, aby byl splněn koeficient bezpečnosti, který je dán normou ČSN EN 1778.



Obrázek 52: Ukázka zborcení nádoby 8M\_B\_LC2

Na obrázku 52 lze vidět deformaci nádoby způsobenou vlivem vnějšího obsypu. Tato deformace nastává v místě největšího namáhání nádoby a to v oválné části ve spodu nádoby. Kopula nádoby je dostatečně pevná, aby snesla tlak vnějšího obsypu.

### 7.8 Výpočty simulací 8M\_B\_LC3 - provozní zatížení - kombinace hydrostatického tlaku vody a tlaku obsypu na nádobu, kdy vrchní polovina kopule nádoby je zatížena vertikálním tlakem

Simulace pro velkoobjemovou nádobu s označením 8M\_B\_LC3 proběhla pro modul tečení  $E$  od 200 MPa do 700 MPa, jak je uvedeno v tabulce 10. Při analýze byly měněny tloušťky stěny po jednom milimetru tak, aby koeficient bezpečnosti dosahoval požadovaných hodnot. Koeficient bezpečnosti musí dosahovat hodnoty dle normy ČSN EN 1778. Koeficient bezpečnosti stanovený normou ČSN EN 1778 má hodnotu dva.

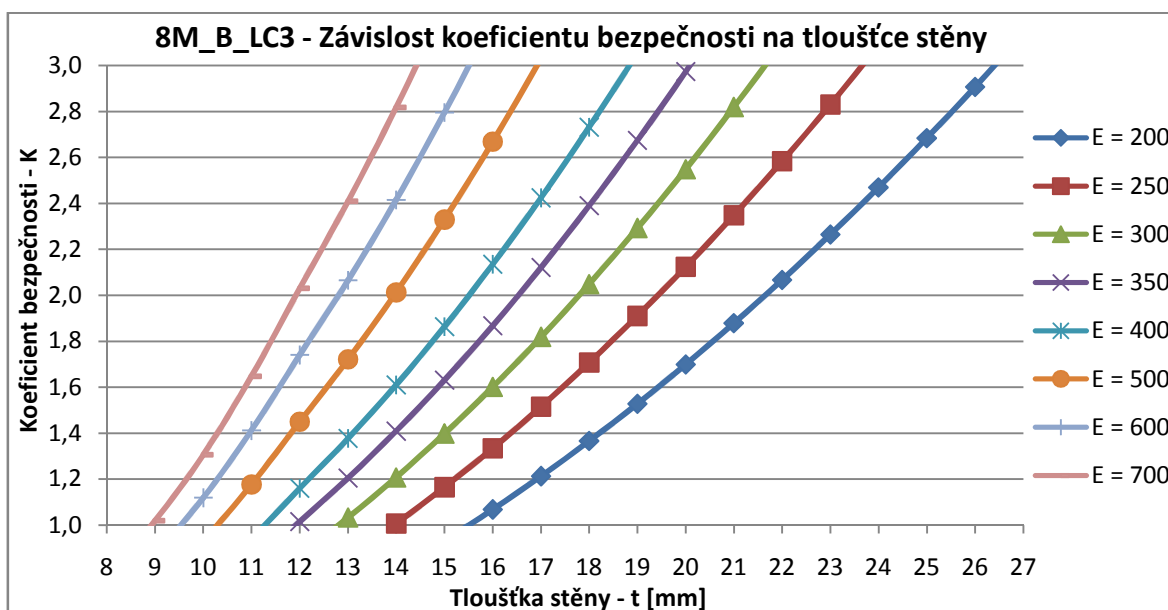
Tabulka 10: Výpočty koeficientu bezpečnosti pro 8M\_B\_LC3

Tl. Stěny t [mm]	Koeficient bezpečnosti - Kb pro E [MPa]							
	E = 200	E = 250	E = 300	E = 350	E = 400	E = 500	E = 600	E = 700
8	<b>0,219</b>	0,274	0,329	0,384	0,438	0,548	0,658	0,767
9	<b>0,291</b>	0,364	0,437	0,509	0,582	0,728	0,873	1,019
10	<b>0,373</b>	0,466	0,559	0,653	0,746	0,932	1,119	1,305
11	<b>0,470</b>	0,588	0,706	0,823	0,941	1,176	1,411	1,646
12	<b>0,580</b>	0,725	0,870	1,015	1,160	1,450	1,740	2,030
13	<b>0,688</b>	0,861	1,033	1,205	1,377	1,721	2,065	2,409
14	<b>0,805</b>	1,006	1,207	1,409	1,610	2,012	2,415	2,817
15	<b>0,932</b>	1,164	1,397	1,630	1,863	2,329	2,795	3,260
16	<b>1,067</b>	1,334	1,601	1,868	2,134	2,668	3,202	3,735
17	<b>1,212</b>	1,515	1,818	2,121	2,424	3,030	3,636	4,242
18	<b>1,365</b>	1,707	2,048	2,389	2,731	3,414	4,096	4,779
19	<b>1,528</b>	1,910	2,292	2,673	3,055	3,819	4,583	5,347
20	<b>1,699</b>	2,124	2,548	2,973	3,398	4,247	5,096	5,946
21	<b>1,879</b>	2,348	2,818	3,287	3,757	4,696	5,636	6,575
22	<b>2,067</b>	2,584	3,100	3,617	4,134	5,167	6,201	7,234
23	<b>2,264</b>	2,830	3,396	3,962	4,528	5,660	6,791	7,923
24	<b>2,469</b>	3,087	3,704	4,321	4,939	6,173	7,408	8,643
25	<b>2,683</b>	3,354	4,025	4,696	5,367	6,709	8,050	9,392
26	<b>2,906</b>	3,633	4,359	5,086	5,812	7,265	8,718	10,171
27	<b>3,137</b>	3,921	4,706	5,490	6,274	7,843	9,411	10,980

V tabulce 10 lze vidět výsledky koeficientu bezpečnosti v závislosti modulu tečení  $E$  v MPa na změně tloušťky  $t$  v mm. Lze vidět, že pro  $E = 200$  MPa je normou stanove-

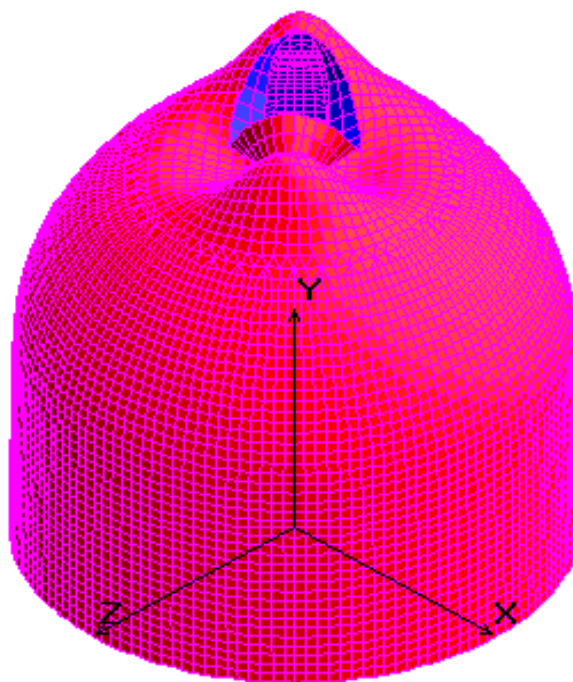
ný koeficient bezpečnosti splněn při tloušťce nádoby  $t = 22$  mm, pro  $E = 250$  MPa je  $t = 20$  mm, pro  $E = 300$  MPa je  $t = 18$  mm, pro  $E = 350$  MPa je  $t = 17$  mm, pro  $E = 400$  MPa je na  $t = 16$  mm, pro  $E = 500$  MPa je  $t = 14$  mm, pro  $E = 600$  MPa je  $t = 13$  mm a pro  $E = 700$  MPa doporučená tloušťka nádoby klesá na  $t = 12$  mm.

Pro kombinaci hydrostatického tlaku vody a tlaku obsypu na stěny nádoby je dle kvalifikovaného odhadu volen modul tečení  $E = 200$  MPa. Tloušťka stěn nádoby musí být pro splnění koeficientu bezpečnosti danou normou ČSN EN 1778 rovna minimálně 22 mm při koeficientu bezpečnosti 2,068.



Obrázek 53: Závislost koeficientu bezpečnosti na tloušťce stěny pro 8M\_B\_LC3

Z grafu na obrázku 53 lze určit tloušťku stěny nádoby  $t$  v milimetrech pro jednotlivé moduly tečení  $E$  v MPa pro jednotlivé koeficienty bezpečnosti. Graf je určen pro všechny typy materiálů, které jsou vhodné pro rotační odlévání velkoobjemových nádob a jsou zatíženy provozním stavem zatížení, což je kombinace hydrostatického tlaku s tlakem vnějšího obsypu a horní polovina kopule je zatížena vertikálním tlakem dle kapitoly 6.3.7. Po změření modulu tečení materiálu lze snadno zjistit, jakou tloušťku musí mít velkoobjemová nádoba, aby byl splněn koeficient bezpečnosti, který je dán normou ČSN EN 1778.



Obrázek 54: Ukázka zborcení nádoby 8M\_B\_LC3

Na obrázku 54 lze vidět deformaci nádoby způsobenou vlivem hydrostatického tlaku vody a tlakem vnějšího obsypu, kdy je kopule zatížena plným tlakem obsypu. Tato deformace nastává v místě největšího namáhání nádoby a to ve vrchní části nádoby na vrcholu kopule. Spodní část nádoby je dostatečně pevná, aby snesla tlak vnějšího obsypu kombinovaného s hydrostatickým tlakem vody.

## 7.9 Srovnání výsledků A\_LC2 a B\_LC2 a výsledků A\_LC3 a B\_LC3

V následující kapitole jsou srovnány výsledky zatížení A\_LC2 a B\_LC2 a výsledků A\_LC3 a B\_LC3. Tyto výsledky jsou zapsány do tabulek a následně grafů.

Při výpočtech v praxi dle normy je uvažován pouze horizontální tlak obsypu na velkoobjemovou nádobu, což odpovídá zatížení s označením A\_LC. Při tomto zatížení je zcela zanedbán tlak vertikální, který působí na kopuli nádoby. Proto bylo experimentálně zavedeno zatížení s označením B\_LC, kde je tento tlak brán v úvahu. Tento tlak se soustřeďuje na horní polovinu kopule, kde působí svou silou a snaží se kopuli zborstit.

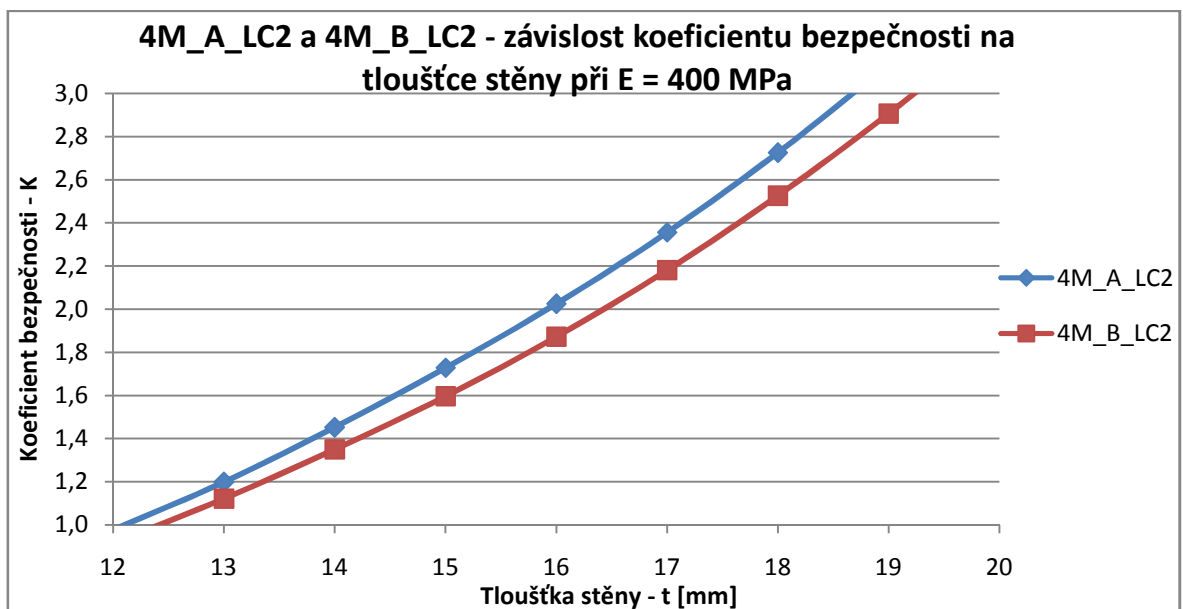
### 7.9.1 Srovnání výsledků velkoobjemové nádoby 4M\_A\_LC2 a 4M\_B\_LC2

V tabulce 11 jsou zaznamenány výsledky analýz pro modul tečení  $E = 400$  MPa. Tento modul je doporučen kvalifikovaným odhadem pro mimořádný stav zatížení s vyprázdněnou nádobou za tlaku vnějšího obsypu případně s vertikálním tlakem na kopu-

li. Z tabulky 11 a grafu na obrázku 55 je patrné, že výsledky pro daná dvě zatížení tedy prázdné nádoby zatížené vnějším obsypem a prázdné nádoby zatížené vnějším obsypem a horizontálním tlakem na kupoli se příliš neliší. Z grafu na obrázku 55 lze vyčíst, že v prvním případě zatížení 4M\_A\_LC2 pro splnění požadavku na koeficient bezpečnosti daného normou musí tloušťka stěny dosahovat  $t = 16$  mm a v druhém případě zatížení 4M\_B\_LC2 musí být tloušťka stěny  $t = 16,5$  mm.

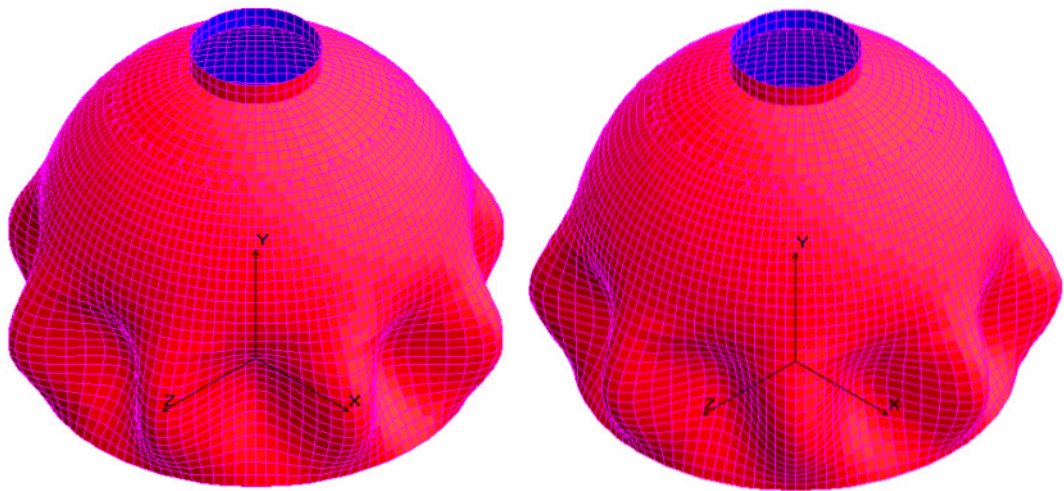
Tabulka 11: Výsledky pro 4M\_LC2 -  $E = 400$  MPa

Tl. Stěny t [mm]	Koeficient bezpečnosti - Kb pro $E = 400$ [MPa]	
	A_LC2	B_LC2
12	0,977	0,914
13	1,198	1,121
14	1,451	1,350
15	1,728	1,596
16	2,025	1,872
17	2,356	2,181
18	2,725	2,526
19	3,133	2,907
20	-	3,321



Obrázek 55: Závislost koeficientu bezpečnosti na tloušťce stěny zatížení 4M\_LC2





Obrázek 56: Srovnání zatížení - vlevo 4M\_A\_LC2, vpravo 4M\_A\_LC2

Na obrázku 56 lze vidět případné zborcení a deformaci obou nádob při odlišném zatížení. Je zde patrné, že prázdná nádoby se deformují stejně. Tedy i přes přidání vertikálního tlaku na kopuli nádoby nemá zásadní vliv je-li nádoba zcela vyprázdněna.



Obrázek 57: Zborcení nádoby z praxe

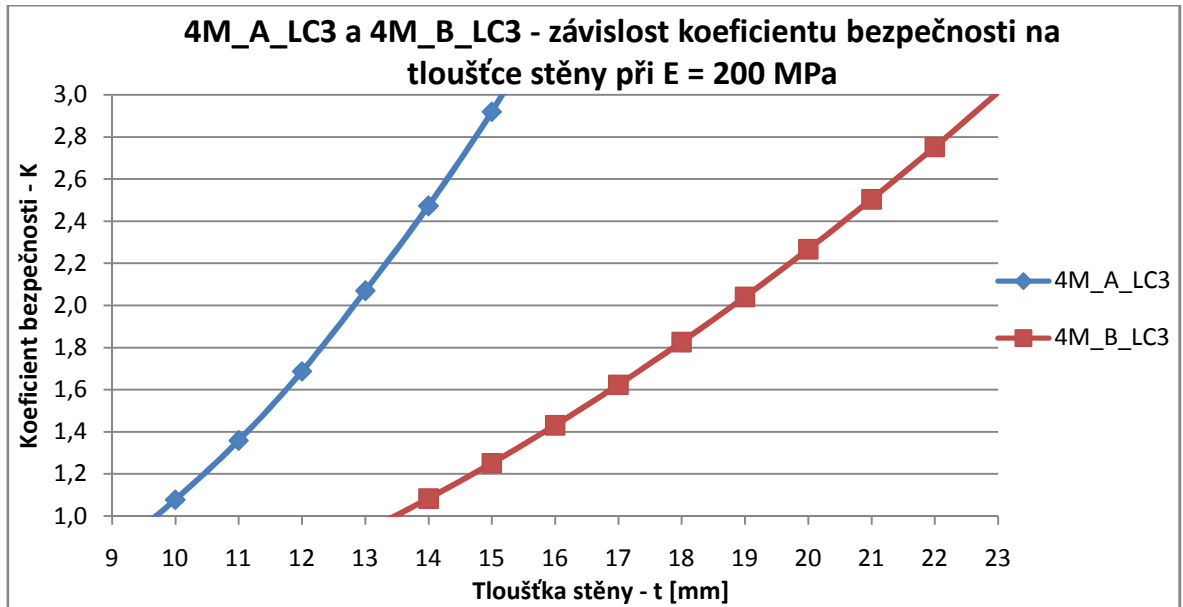
Na obrázku 57 lze vidět, jak se zcela vyprázdněná nádoba chová, při zatížení vnějším ob-  
sypem. Z praxe i z výsledku simulací došlo k deformaci ve spodní části nádoby vlivem tlaku vnějšího obsypu.

### 7.9.2 Srovnání výsledků velkoobjemové nádoby 4M\_A\_LC3 a 4M\_B\_LC3

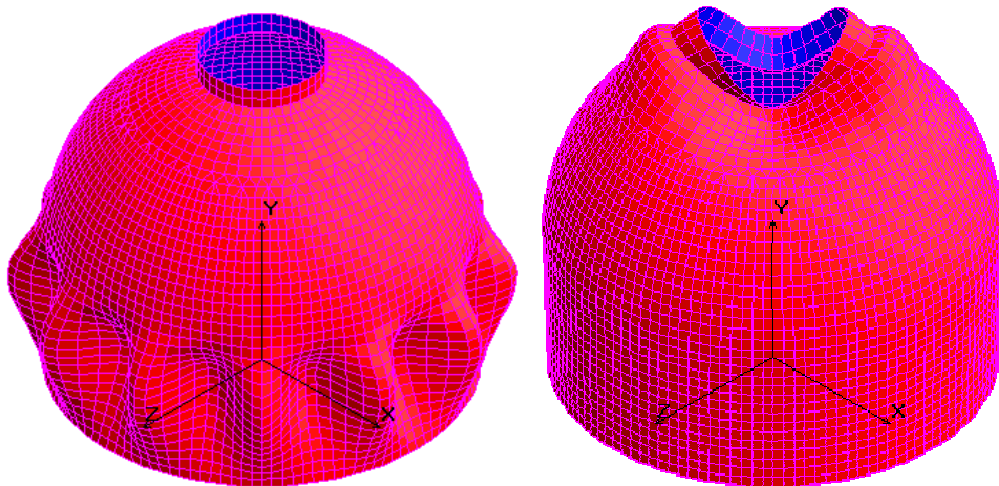
V tabulce 12 jsou zaznamenány výsledky analýz pro modul tečení  $E = 200$  MPa. Tento modul je doporučený kvalifikovaným odhadem pro provozní stav zatížení s nádobou, která je naplněna vodou za tlaku vnějšího obsypu případně s vertikálním tlakem na kupoli. Z tabulky 12 a grafu na obrázku 58 je patrné, že výsledky pro daná dvě zatížení tedy naplněné nádoby vodou zatížené vnějším obsypem a naplněné nádoby vodou zatížené vnějším obsypem a horizontálním tlakem na kupoli se liší. Z grafu na obrázku 58 lze vyčíst, že v prvním případě zatížení 4M\_A\_LC3 pro splnění požadavku na koeficient bezpečnosti daného normou musí tloušťka stěny dosahovat  $t = 13$  mm a v druhém případě zatížení 4M\_B\_LC3 musí být tloušťka stěny  $t = 19$  mm.

Tabulka 12: Výsledky pro 4M\_LC3 -  $E = 200$  MPa

Tl. Stěny t [mm]	Koeficient bezpečnosti - Kb pro $E = 200$ [MPa]	
	4M_A_LC3	4M_B_LC3
9	0,832	-
10	1,079	-
11	1,359	-
12	1,688	-
13	2,070	0,928
14	2,473	1,084
15	2,920	1,252
16	3,424	1,432
17	-	1,623
18	-	1,827
19	-	2,041
20	-	2,267
21	-	2,504
22	-	2,753
23	-	3,012



Obrázek 58: Závislost koeficientu bezpečnosti na tloušťce stěny zatížení 4M\_LC2



Obrázek 59: Srovnání zatížení - vlevo 4M\_A\_LC3, vpravo 4M\_A\_LC3

Na obrázku 59 lze vidět případné zborcení a deformaci obou nádob při odlišném zatížení. Je zde patrné, že naplněná nádoba vodou za tlaku vnějšího obsypu na nádobu se deformuje stejně jako v předchozím případě a to ve spodní části nádoby. V druhém případě zatížení nádoby zaplněné vodou pod tlakem vnějšího obsypu s přidaným vertikálním tlakem na kopuli dojde k deformování v horní části nádoby. To je způsobeno tím, že hydrostatický



tlak uvnitř nádoby vyrovnává vnější tlak na nádobu, který způsobuje obsyp nádoby. Nádo-  
ba se proto v tomto místě nebortí, ale kritické místo se přesouvá na kupoli, která nesnese  
tíhu vertikálního tlaku a zborťí se.



Obrázek 60: Zborcení kopule z praxe

Na obrázku 60 lze vidět, jak se zaplněná nádoba chová, při zatížení vnějším obsypem. Z obrázku je patrné, že došlo ke zborcení kupole velkoobjemové nádoby. Je tedy vidět, že vertikální tlak na kupoli nelze zanedbat.

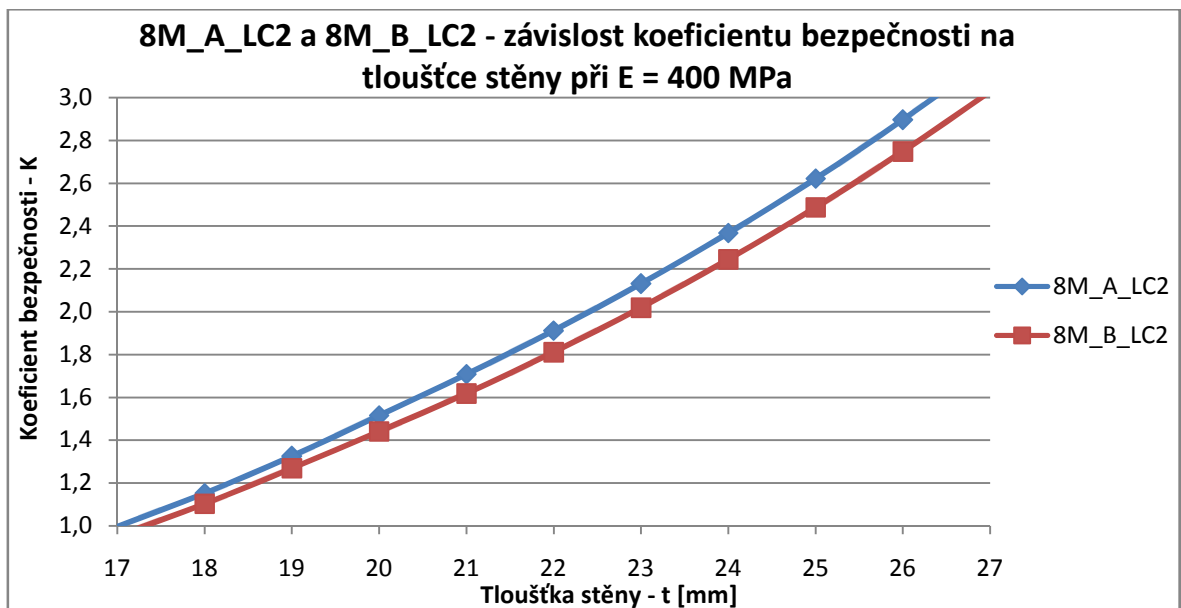
### 7.9.3 Srovnání výsledků velkoobjemové nádoby 8M\_A\_LC2 a 8M\_B\_LC2

Tak jako v kapitole 7.9.1 bylo zhotoveno srovnání výsledků, toto srovnání bylo zhotoveno i pro nádobu o objemu  $8 \text{ m}^3$ . V tabulce 13 jsou zaznamenány výsledky pro modul tečení  $E = 400 \text{ MPa}$ . Tento modul je doporučený kvalifikovaným odhadem pro mimořádný stav zatížení s vyprázdněnou nádobou za tlaku vnějšího obsypu případně s vertikálním tlakem na kupoli. Z tabulky 13 a grafu na obrázku 61 je patrné, že výsledky pro daná dvě zatížení tedy prázdné nádoby zatížené vnějším obsypem a prázdné nádoby zatížené vnějším obsypem a horizontálním tlakem na kupoli se příliš neliší. Z grafu na obrázku 61 lze vyčíst, že v prvním případě zatížení 8M\_A\_LC2 pro splnění požadavku na koeficient bezpečnosti daného normou musí tloušťka stěny dosahovat  $t = 22,5 \text{ mm}$  a v druhém případě zatížení 8M\_B\_LC2 musí být tloušťka stěny  $t = 23 \text{ mm}$ .

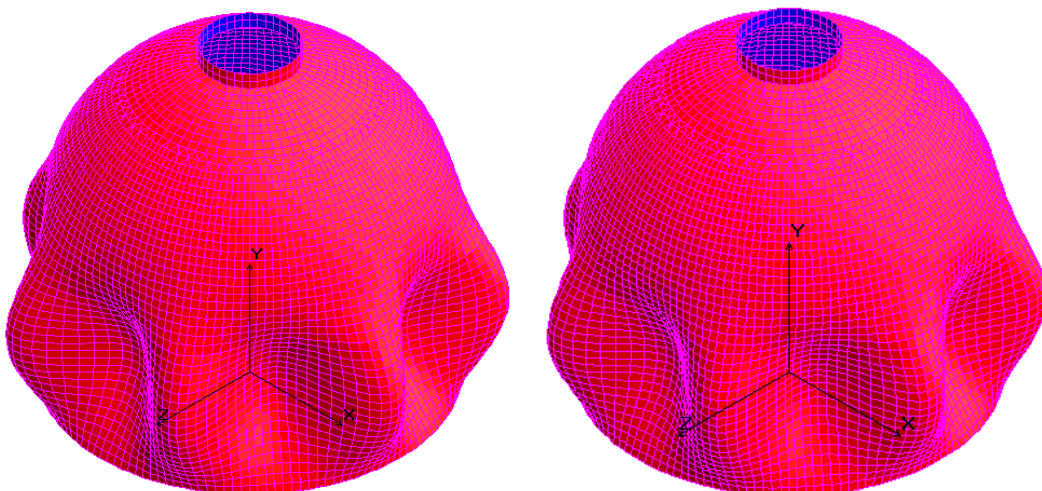
Tabulka 13: Výsledky pro 8M\_LC2 -  $E = 400 \text{ MPa}$

Tl. Stěny $t$ [mm]	Koeficient bezpečnosti - $K_b$ pro $E = 400$ [MPa]	
	8M_A_LC2	8M_B_LC2
17	0,996	0,953
18	1,152	1,103

19	1,325	1,269
20	1,515	1,441
21	1,709	1,618
22	1,912	1,811
23	2,131	2,019
24	2,368	2,245
25	2,623	2,488
26	2,897	2,749
27	3,191	3,029



Obrázek 61: Závislost koeficientu bezpečnosti na tloušťce stěny zatížení 8M\_LC2



Obrázek 62: Srovnání zatížení - vlevo 8M\_A\_LC2, vpravo 8M\_B\_LC2

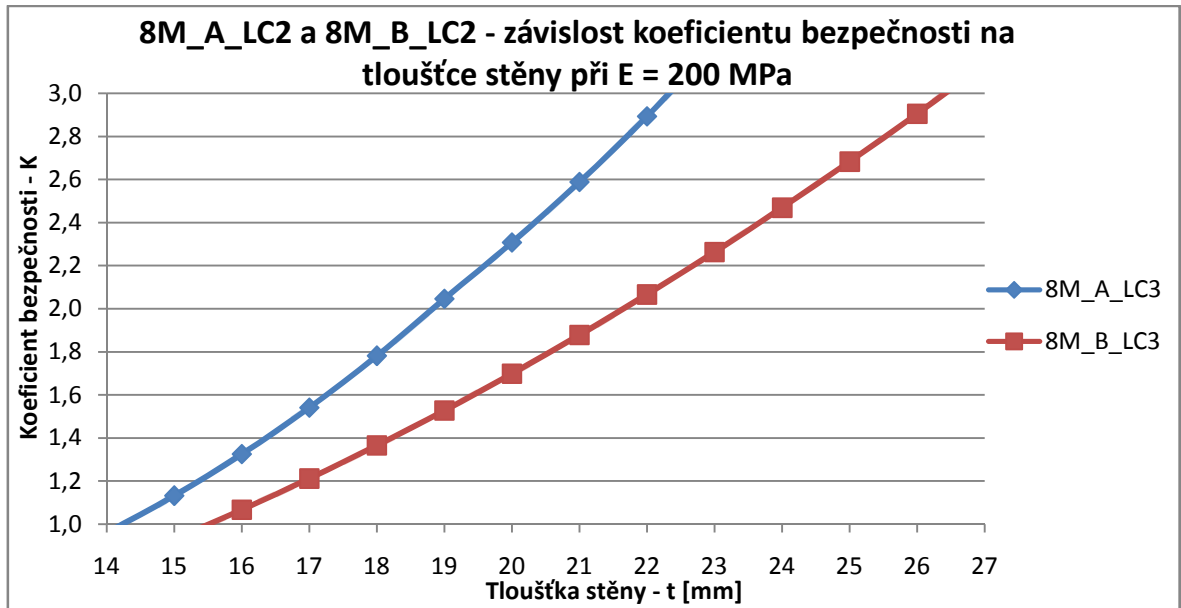
Stejně jako se chová velkoobjemová nádoba o objemu  $4 \text{ m}^3$  v kapitole 7.9.1, tak se chová nádoba s objemem  $8 \text{ m}^3$ . Na obrázku 62 lze vidět případné zborcení a deformaci obou nádob při odlišném zatížení. Je zde patrné, že prázdná nádoby se deformují stejně. Tedy i přes přidání vertikálního tlaku na kopuli nádoby nemá zásadní vliv je li nádoba zcela vyprázdněna.

#### 7.9.4 Srovnání výsledků velkoobjemové nádoby 8M\_A\_LC3 a 8M\_B\_LC3

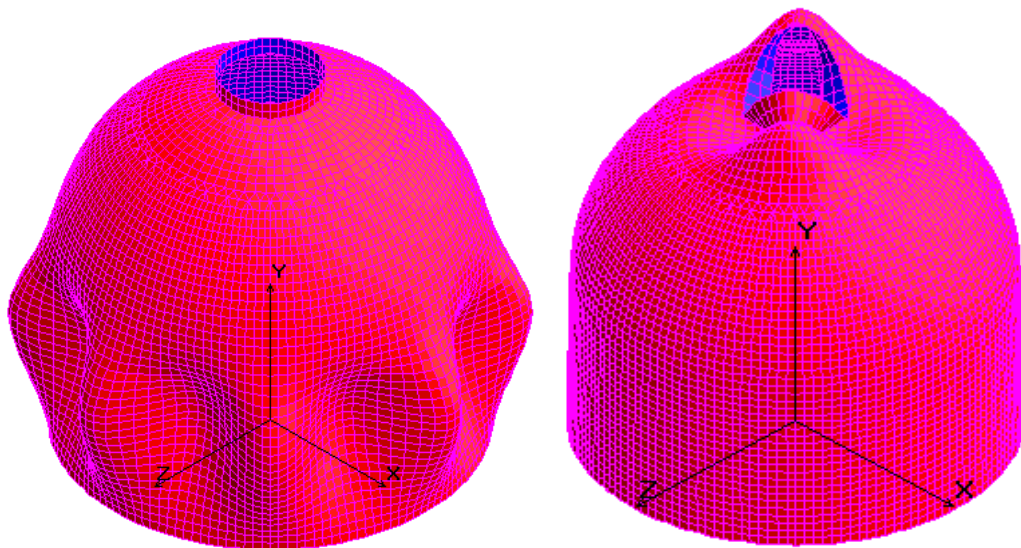
Tak jako v kapitole 7.9.2 bylo zhotoveno srovnání výsledků, toto srovnání bylo zhotoveno i pro nádobu o objemu  $8 \text{ m}^3$ . V tabulce 14 jsou zaznamenány výsledky pro modul tečení  $E = 200 \text{ MPa}$ . Tento modul je doporučen kvalifikovaným odhadem pro provozní stav zatížení s nádobou, která je naplněna vodou za tlaku vnějšího obsypu případně s vertikálním tlakem na kopuli. Z tabulky 14 a grafu na obrázku 63 je patrné, že výsledky pro daná dvě zatížení tedy naplněné nádoby vodou zatížené vnějším obsypem a naplněné nádoby vodou zatížené vnějším obsypem a horizontálním tlakem na kopuli se liší. Z grafu na obrázku 63 lze vyčíst, že v prvním případě zatížení 8M\_A\_LC3 pro splnění požadavku na koeficient bezpečnosti daného normou musí tloušťka stěny dosahovat  $t = 19 \text{ mm}$  a v druhém případě zatížení 8M\_B\_LC3 musí být tloušťka stěny  $t = 22 \text{ mm}$ .

Tabulka 14: Výsledky pro 8M\_LC3 -  $E = 200 \text{ MPa}$

Tl. Stěny t [mm]	Koeficient bezpečnosti - Kb pro $E = 200 \text{ [MPa]}$	
	A_LC2	B_LC2
14	0,959	-
15	1,132	0,932
16	1,325	1,067
17	1,542	1,212
18	1,781	1,365
19	2,046	1,528
20	2,308	1,699
21	2,589	1,879
22	2,894	2,067
23	3,224	2,264
24	-	2,469
25	-	2,683
26	-	2,906
27	-	3,137



Obrázek 63: Závislost koeficientu bezpečnosti na tloušťce stěny zatížení 8M\_LC3



Obrázek 64: Srovnání zatížení - vlevo 8M\_A\_LC3, vpravo 8M\_A\_LC3

Stejně jako se chová velkoobjemová nádoba o objemu  $4 \text{ m}^3$  v kapitole 7.9.2, tak se chová nádoba s objemem  $8 \text{ m}^3$ . Na obrázku 64 lze vidět případné zborcení a deformaci obou nádob při odlišném zatížení. Je zde patrné, že naplněná nádoba vodou za tlaku vnějšího obyspu na nádobu se deformuje stejně jako v předchozím případě a to ve spodní části nádoby. V druhém případě zatížení nádoby zaplněné vodou pod tlakem vnějšího obyspu s přidaným vertikálním tlakem na kopuli dojde k deformování v horní části nádoby. To je způsobeno tím, že hydrostatický tlak uvnitř nádoby vyrovnává vnější tlak na nádobu, který způsobuje

obsyp nádoby. Nádoba se proto v tomto místě nebortí, ale kritické místo se přesouvá na kopuli, která nesnese tíhu vertikálního tlaku a zborší se.

## ZÁVĚR

Diplomová práce je zaměřena na velkoobjemové nádoby, které se vyrábějí technologií rotačního lití. Pro analýzu byly sestaveny dva modely - nádoba o objemu  $4 \text{ m}^3$  a model nádoby o objemu  $8 \text{ m}^3$ . Ke každé nádobě jsou přiřazeny čtyři různé druhy zatížení s označením A\_LC2 - mimořádný stav zatížení, kde nádoba je zcela prázdná a působí na ní tlak vnějšího obsypu, A\_LC3 - provozní stav zatížení, kdy nádoba je zatížená zevnitř hydrostatickým tlakem a tlakem obsypu působícím ze vně nádoby, a způsob zatížení s označením B\_LC2 a B\_LC3, kde k zatížení se přidává vertikální tlak působící na horní část kopule. Výsledky analýz byly shrnuty do tabulek 3 - 10, ze kterých lze vyčíst koeficienty bezpečnosti v závislosti na tloušťce stěny nádoby a modulu tečení materiálu. Z následných grafů lze zjistit při dané hodnotě tečení materiálu a daném způsobu zatížení, jaká tloušťka stěny se musí zvolit, aby byl splněn daný koeficient bezpečnosti velkoobjemové nádoby. Pro zatížení nádoby 4M\_A\_LC2 lze pro daný materiál LLDPE brát v úvahu modul tečení  $E = 400 \text{ MPa}$  a tloušťka stěny  $t$  by měla být minimálně 16 mm při koeficientu bezpečnosti 2. Pro zatížení 4M\_A\_LC3, pro  $E = 200 \text{ MPa}$   $t = 13 \text{ mm}$ . Pro zatížení 4M\_B\_LC2 je  $E = 400 \text{ MPa}$ , a  $t = 16,5 \text{ mm}$ . Pro 4M\_B\_LC3 je  $E = 200 \text{ MPa}$  a  $t = 19 \text{ mm}$ . Pro nádobu o objemu  $8 \text{ m}^3$  je modul materiálu tečení stejný jako u nádoby o objemu  $4 \text{ m}^3$  při srovnatelném typu zatížení. Následující výsledky pak jsou: 8M\_A\_LC2 -  $t = 22,5 \text{ mm}$ , 8M\_A\_LC3 -  $t = 19 \text{ mm}$ , 8M\_B\_LC2 -  $t = 23 \text{ mm}$ , 8M\_B\_LC3 -  $t = 22 \text{ mm}$ . Při srovnání zatížení A\_LC2 a B\_LC2 je patrné, že i přes přidání horizontálního tlaku na vrchní část kopule, se nádoba bortí stejně a to ve spodní části velkoobjemové nádoby, a je zde zapotřebí přibližně stejných tloušťek stěny velkoobjemové nádoby. Při srovnání zatížení A\_LC3 a B\_LC3 ovšem dochází k tomu, že hydrostatický vnitřní tlak vody vyrovnává tlak obsypu a při přidání horizontálního tlaku se nedeformuje spodek nádoby, ale nádoba ztrácí stabilitu ve své horní části.

Vzhledem k obecně nízkým hodnotám ohybové tuhosti stěn skořepinových konstrukcí z termoplastů a její závislosti na době zatížení a teplotě vzniká při jejich praktických aplikacích zcela reálné nebezpečí vzniku mezního stavu ztráty stability tenkostěnného pláště, projevujícího se jeho vybočením a následnou totální destrukcí. Jak vyplývá z předložené parametrické studie, je nutno věnovat problematice stability termoplastových skořepin při jejich konstrukčním návrhu zvýšenou pozornost. Tím lze zabránit možným neúspěchům v praktických aplikacích těchto typů konstrukcí.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] KRAMOLIŠ, Z. Optimalizace tvaru rotačně odlévaných velkoobjemových nádob. Zlín, 2012. Dostupné z: [http://dspace.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/22806/kramoliš\\_2012\\_dp.pdf?sequence=1](http://dspace.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/22806/kramoliš_2012_dp.pdf?sequence=1). Bakalářská práce. UTB ve Zlíně. Vedoucí práce doc. Ing. Oldřich Šuba, CSc.
- [2] STUDIJNÍ MATERIÁL: Nové trendy svařování plastů ve stavebnictví. ONDRÁČEK, L. a V. PRYČEK. Střední škola elektrostavební a dřevozpracující [online]. 2011 [cit. 2013-11-15]. Dostupné z: <http://www.ssed-fm.cz/media/SOUBORY%20TEXTOVE/PROJEKTY/Nove%20trendy%20pracovni%20verze%20II.pdf>
- [3] Svařování termoplastů: Horkovzdušné svařování. <i>Techmagazin.cz</i> [online]. 2012, s. 1, 6. 3. 2012 [cit. 2013-11-15]. Dostupné z: <http://www.techmagazin.cz/491>
- [4] KOŘÍNEK, Z. KOMPOZITY - Ing. Zdenek Korinek, CSc. KOŘÍNEK, Zdeněk. VOLNÝ.cz [online]. [cit. 2013-11-16]. Dostupné z: <http://www.volny.cz/zkorinek/technologie.pdf>
- [5] Plastové nádrže. <i>Výrobce zařízení z konstrukčních termoplastů: ZOMApplast</i> [online]. ZOMApplast s.r.o. Nábřeží Dr. E. Beneše 26 CZ - 750 62 Přerov [cit. 2013-11-16]. Dostupné z: <http://www.zomaplast.net/cz/rubriky/produkty/plastove-nadrze/>
- [6] HSL/2006/21: Specification and Inspection of Thermoplastic Storage Tanks. STONEHILL, J., H. BAINBRIDGE a P. F. HEYES. HSE: Information about health and safety at work [online]. c 2002 [cit. 2013-12-07]. Dostupné z: [http://www.hse.gov.uk/research/hsl\\_pdf/2006/hsl0621.pdf](http://www.hse.gov.uk/research/hsl_pdf/2006/hsl0621.pdf)
- [7] CRAWFORD, R. a J. THORNE. Rotational molding technology [online]. United States of America: Plastics Design Library / William Andrew Publishing, 2002 [cit. 2013-12-07]. ISBN 1-884207-85-5. Dostupné z: [http://www.knovel.com/web/portal/basic\\_search/display?\\_EXT\\_KNOVEL\\_DISPLAY\\_bookid=444](http://www.knovel.com/web/portal/basic_search/display?_EXT_KNOVEL_DISPLAY_bookid=444)

- [8] PINĎÁK, M. Návrh laboratorního zařízení pro rotační tváření (technologie rotomolding) [online]. Zlín, 2010 [cit. 2013-12-07]. Dostupné z: [http://dspace.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/12554/pindák\\_2010\\_bp.pdf?sequence=1](http://dspace.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/12554/pindák_2010_bp.pdf?sequence=1). Bakalářská práce. UTB ve Zlíně Fakulta technologická. Vedoucí práce doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.
- [9] Rotomoulding, vstříkování, vytlačování plastů. Plastové nádoby, nádrže na vodu, do země [online]. [cit. 2013-12-07]. Dostupné z: <http://www.img-management.cz/technologie.htm>
- [10] TechPark.sk: Technologie rotačního tváření. TechPark.sk [online]. 2008 [cit. 2013-12-08]. Dostupné z: <http://www.techpark.sk/52008/technologie-rotacniho-tvareni.html>
- [11] Jímky samonosné, septiky samonosné, plastové nádrže, technické nádoby: ABPLAST. ABPLAST Litomyšl: Bazény, zastřešení bazénů, čistírny odpadních vod, jímky, septiky, nádrže [online]. 2008 [cit. 2013-12-08]. Dostupné z: <http://www.abplast.cz/samososne-plastove-nadrze-retencni>
- [12] Plastové nádrže: Hydroclar s.r.o. Domovní čistírny odpadních vod, ČOV, septiky, žumpy, lapače tuků, plastové nádrže, jímky: Hydroclar s.r.o. [online]. 1999 [cit. 2014-03-28]. Dostupné z: <http://www.hydroclar.cz/plastove-nadrze/>
- [13] Zahrádkáři používají průmyslové kontejnery jako nádrže na vodu. Může to však být nebezpečné: Ekolist.cz. Ekolist.cz: životní prostředí, příroda, ekologie, klima, biodiverzita, energetika, krajina, doprava i cestování [online]. [cit. 2014-03-28]. Dostupné z: <http://ekolist.cz/cz/zelena-domacnost/rady-a-navody/zahradkari-pouzivaji-prumyslove-kontejnery-jako-nadrze-na-vodu-muze-to-vsak-byt-nebezpecne>
- [14] BABINSKÝ, Milan. Nebezpečí zborcení nádob vnějším přetlakem. TLAKinfo: Nebezpečí zborcení nádob vnějším přetlakem [online]. 2006 [cit. 2014-04-29]. Dostupné z: <http://www.tlakinfo.cz/t.py?t=2&i=1260>
- [15] ŠUBA, Oldřich. Mechanika polymerů a kompozitů. Vyd. 1. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011, 110 s. ISBN 978-80-7454-015-8.



**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
ČSN	Československá státní norma.
DN	Jmenovity vnitřní průměr potrubí.
HDPE	Vysokohustotní polyetylen.
LDPE	Nízkohustotní polyetylen.
LLDPE	Laminární nízkohustotní polyetylen.
MFI	g/10 min Index toku taveniny
MDPE	Středněhustotní polyetylen.
PE	Polyetylen.
PMMA	Polymethylmethakrylát
PP	Polypropylen.
PVC	Polyvinylchlorid.
PVDF	Polyvinylidenfluorid.
XLPE	Zesíťovaný polyetylen.
Ø	Průměr.

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1: Tupé sváry [2]</i> .....	15
<i>Obrázek 2: Vícevrstvé tupé sváry [2]</i> .....	15
<i>Obrázek 3: oboustranný V svar [2]</i> .....	15
<i>Obrázek 4: Rychlosvařovací tryska [2]</i> .....	16
<i>Obrázek 5: Detailní rozkreslení botičky [2]</i> .....	17
<i>Obrázek 6: Typy tupých svarů [2]</i> .....	18
<i>Obrázek 7: Koutový svar [2]</i> .....	18
<i>Obrázek 8: Spoj natupo [3]</i> .....	19
<i>Obrázek 9: Navíjená nádoba [6]</i> .....	20
<i>Obrázek 10: Svařování základny s vinutým válce [6]</i> .....	20
<i>Obrázek 11: Navíjecí schéma [4]</i> .....	22
<i>Obrázek 12: Navíjení pólové za mokra [4]</i> .....	22
<i>Obrázek 13: Axiální navíjení [4]</i> .....	23
<i>Obrázek 14: Princip rotačního odlévání a) Plnění formy, b) ohřívání</i> .....	24
<i>Obrázek 15: Tříramenný otočný tvářený stroj, a) Plnění formy, b) ohřívání</i> .....	25
<i>Obrázek 16: Velkoobjemová nádrž [11]</i> .....	30
<i>Obrázek 17: Samostatné vlně stojící nádrže [12]</i> .....	31
<i>Obrázek 18: Obsyp nádoby [11]</i> .....	32
<i>Obrázek 19: Ohyb desky [15]</i> .....	34
<i>Obrázek 20: Analogické schéma chování válcové skořepiny [15]</i> .....	35
<i>Obrázek 21: Stabilita válcové skořepiny [15]</i> .....	37
<i>Obrázek 22: Grafické znázornění funkce <math>K = \left( \frac{a}{bm} + \frac{bm}{a} \right)^2</math> [15]</i> .....	38
<i>Obrázek 23: Element desky tloušťky s [15]</i> .....	39
<i>Obrázek 24: Elementy desky [15]</i> .....	40
<i>Obrázek 25: Mohrova kružnice[15]</i> .....	41
<i>Obrázek 26: Ukázka prutů a základní vztah pro <math>P_{kr}</math> [14]</i> .....	44
<i>Obrázek 27: Chování rozdílných konstrukcí [14]</i> .....	44
<i>Obrázek 28: Zatížení válcové skořepiny [14]</i> .....	45
<i>Obrázek 29: Ukázka zborcení nádoby [14]</i> .....	46
<i>Obrázek 30: Ukázka použitého FEM modelu</i> .....	48
<i>Obrázek 31: Ukázka uložení nádoby [1]</i> .....	49

<i>Obrázek 32: Rozměry velkoobjemové nádoby 4M.....</i>	<i>50</i>
<i>Obrázek 33: Rozměry velkoobjemové nádoby 8M.....</i>	<i>50</i>
<i>Obrázek 34: Ukázka zatížení nádoby s označením A_LC2.....</i>	<i>53</i>
<i>Obrázek 35: Ukázka zatížení nádoby s označením A_LC3.....</i>	<i>54</i>
<i>Obrázek 36: Ukázka zatížení nádoby s označením B_LC2.....</i>	<i>55</i>
<i>Obrázek 37: Ukázka zatížení nádoby s označením B_LC3.....</i>	<i>56</i>
<i>Obrázek 38: Uchycení za pomocí vetknutí nádoby 4M a 8M.....</i>	<i>56</i>
<i>Obrázek 39: Závislost koeficientu bezpečnosti na tloušťce stěny pro 4M_A_LC2.....</i>	<i>58</i>
<i>Obrázek 40: Ukázka zborcení nádoby 4M_A_LC2.....</i>	<i>59</i>
<i>Obrázek 41: Závislost koeficientu bezpečnosti na tloušťce stěny pro 4M_A_LC3.....</i>	<i>60</i>
<i>Obrázek 42: Ukázka zborcení nádoby 4M_A_LC3.....</i>	<i>61</i>
<i>Obrázek 43: Závislost koeficientu bezpečnosti na tloušťce stěny pro 4M_B_LC2.....</i>	<i>63</i>
<i>Obrázek 44: Ukázka zborcení nádoby 4M_B_LC2.....</i>	<i>63</i>
<i>Obrázek 45: Závislost koeficientu bezpečnosti na tloušťce stěny pro 4M_B_LC3.....</i>	<i>65</i>
<i>Obrázek 46: Ukázka zborcení nádoby 4M_B_LC3.....</i>	<i>66</i>
<i>Obrázek 47: Závislost koeficientu bezpečnosti na tloušťce stěny pro 8M_A_LC2.....</i>	<i>68</i>
<i>Obrázek 48: Ukázka zborcení nádoby 8M_A_LC2.....</i>	<i>68</i>
<i>Obrázek 49: Závislost koeficientu bezpečnosti na tloušťce stěny pro 8M_A_LC3.....</i>	<i>70</i>
<i>Obrázek 50: Ukázka zborcení nádoby 8M_A_LC3.....</i>	<i>71</i>
<i>Obrázek 51: Závislost koeficientu bezpečnosti na tloušťce stěny pro 8M_B_LC2.....</i>	<i>73</i>
<i>Obrázek 52: Ukázka zborcení nádoby 8M_B_LC2.....</i>	<i>73</i>
<i>Obrázek 53: Závislost koeficientu bezpečnosti na tloušťce stěny pro 8M_B_LC3.....</i>	<i>75</i>
<i>Obrázek 54: Ukázka zborcení nádoby 8M_B_LC3.....</i>	<i>76</i>
<i>Obrázek 55: Závislost koeficientu bezpečnosti na tloušťce stěny zatížení 4M_LC2.....</i>	<i>77</i>
<i>Obrázek 56: Srovnání zatížení - vlevo 4M_A_LC2, vpravo 4M_A_LC2.....</i>	<i>78</i>
<i>Obrázek 57: Zborcení nádoby z praxe.....</i>	<i>78</i>
<i>Obrázek 58: Závislost koeficientu bezpečnosti na tloušťce stěny zatížení 4M_LC2.....</i>	<i>80</i>
<i>Obrázek 59: Srovnání zatížení - vlevo 4M_A_LC3, vpravo 4M_A_LC3.....</i>	<i>80</i>
<i>Obrázek 60: Zborcení kopule z praxe.....</i>	<i>81</i>
<i>Obrázek 61: Závislost koeficientu bezpečnosti na tloušťce stěny zatížení 8M_LC2.....</i>	<i>82</i>
<i>Obrázek 62: Srovnání zatížení - vlevo 8M_A_LC2, vpravo 8M_A_LC2.....</i>	<i>82</i>
<i>Obrázek 63: Závislost koeficientu bezpečnosti na tloušťce stěny zatížení 8M_LC3.....</i>	<i>84</i>
<i>Obrázek 64: Srovnání zatížení - vlevo 8M_A_LC3, vpravo 8M_A_LC3.....</i>	<i>84</i>

## Seznam tabulek

<i>Tabulka 1: Využití rotačního tváření v jednotlivých odvětvích [7] .....</i>	<i>26</i>
<i>Tabulka 2: Vlastnosti LLDPE [1].....</i>	<i>51</i>
<i>Tabulka 3: Výpočty koeficientu bezpečnosti pro 4M_A_LC2.....</i>	<i>57</i>
<i>Tabulka 4: Výpočty koeficientu bezpečnosti pro 4M_A_LC3.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabulka 5: Výpočty koeficientu bezpečnosti pro 4M_B_LC2.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabulka 6: Výpočty koeficientu bezpečnosti pro 4M_B_LC3.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabulka 7: Výpočty koeficientu bezpečnosti pro 8M_A_LC2.....</i>	<i>66</i>
<i>Tabulka 8: Výpočty koeficientu bezpečnosti pro 8M_A_LC3.....</i>	<i>69</i>
<i>Tabulka 9: Výpočty koeficientu bezpečnosti pro 8M_B_LC2.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabulka 10: Výpočty koeficientu bezpečnosti pro 8M_B_LC3.....</i>	<i>74</i>
<i>Tabulka 11: Výsledky pro 4M_LC2 - E = 400 MPa.....</i>	<i>77</i>
<i>Tabulka 12: Výsledky pro 4M_LC3 - E = 200 MPa.....</i>	<i>79</i>
<i>Tabulka 13: Výsledky pro 8M_LC2 - E = 400 MPa.....</i>	<i>81</i>
<i>Tabulka 14: Výsledky pro 8M_LC3 - E = 200 MPa.....</i>	<i>83</i>

## SEZNAM PŘÍLOH

- P I:** DVD obsahující
- Diplomovou práci (.pdf).
  - Tabulky a grafy výsledků (.xlsx).
  - Fem modely zatížení (.gen).
  - Výkres zatížení (.dwg).