

Optimalizace tvaru rotačně odlévaných velkoobjemových nádob

Bc. Zdeněk Kramoliš

Diplomová práce
2012



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Zdeněk KRAMOLIŠ**
Osobní číslo: **T10376**
Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**

Téma práce: **Optimalizace tvaru rotačně odlévaných
velkoobjemových nádob**

Zásady pro vypracování:

- 1. Vypracujte rešeršní studii na dané téma**
- 2. Prověřte možnosti tvorby skořepinových modelů v software SolidWorks včetně jejich zatěžování hydrostatickým tlakem vody a vnějším tlakem obsypu zeminou**
- 3. Sestavte studijní modely velkoobjemových nádob ČOV resp. septiků s předpokládanou technologií rotačního odlévání**
- 4. Provedte analýzu napjatosti a modální analýzu navržených modelů a výsledky diskutujte z hlediska dosažené únosnosti a odolnosti na ztrátu stability**

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího DP

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Oldřich Šuba, CSc.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

13. února 2012

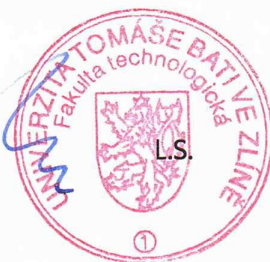
Termín odevzdání diplomové práce:

18. května 2012

Ve Zlíně dne 2. února 2012



doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan





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

Příjmení a jméno:

Obor:

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

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

.....

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá optimalizací rotačně odlévaných velkoobjemových nádob.

V teoretické části jsou uvedeny některé technologie výroby plastových velkoobjemových nádob a nejčastěji užívané materiály pro technologii rotačního odlévání.

Praktická část je zaměřena na výpočty ztráty stability a vytvoření nových variant velkoobjemových nádob.

Klíčová slova: optimalizace, rotační odlévání, stabilita

ABSTRACT

This master thesis deals with the shape optimisation of rotationally moulded high-volume vessels.

Technology of production plastic high-volume vessels and the most commonly used materials for rotomoulding technique are presented in theoretical part.

The practical part focuses on calculations of buckling and created new design variant for high-volume vessels.

Keywords: optimisation, rotomoulding, buckling

Na této stránce bych rád poděkoval svojí rodině za podporu a trpělivost, vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Oldřichu Šubovi Csc. za ochotu a užitečné rady a v neposlední řadě všem kantorům, kteří vždy byli vstřícní a přátelští.

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

Zdeněk Kramoliš

OBSAH

ÚVOD	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 TECHNOLOGIE UMOŽŇUJÍCÍ VÝROBU PLASTOVÝCH VELKOOBJEMOVÝCH NÁDOB	13
1.1 VÝHODY NÁDOB Z PLASTU	13
1.2 NEVÝHODY NÁDOB Z PLASTU	13
2 SVAŘOVÁNÍ	14
Konstrukční a výrobní zásady	15
3 SPIRÁLNÍ NAVÍJENÍ	16
4 ROTAČNÍ ODLÉVÁNÍ	17
4.1 PRINCIP TECHNOLOGIE	17
4.2 HLAVNÍ VÝHODY ROTAČNÍHO ODLÉVÁNÍ	18
4.3 HLAVNÍ NEVÝHODY ROTAČNÍHO ODLÉVÁNÍ	19
4.4 PŘEHLED UŽÍVANÝCH MATERIÁLŮ	20
4.4.1 Polyethylen	22
4.4.2 Polypropylen (PP)	25
4.4.3 Další materiály	27
4.5 OBLASTI POUŽITÍ	27
5 VÁLCOVÁ NÁDOBA ZATÍŽENÁ VNITŘNÍM PŘETLAKEM	29
5.1 MEMBRÁNOVÉ NAPĚTÍ	29
5.2 MEMBRÁNOVÉ DEFORMACE	31
II PRAKTICKÁ ČÁST	32
6 CÍL PRÁCE	33
7 DESIGN HLADKÉ NÁDOBY	34
7.1 TVAR A ROZMĚRY NÁDRŽE.....	34
7.2 ZATÍŽENÍ NÁDRŽE.....	35
7.2.1 Zatížení dopravou.....	35
7.2.2 Zatížení podzemní vodou	35
7.2.3 Zatížení zemním tlakem	35
7.3 UCHYCENÍ NÁDRŽE	37
7.4 MATERIÁL	37
7.5 PARAMETRY SÍTĚ.....	38
8 VÝSLEDKY SIMULACE	39

8.1	NÁDOBA VYSTAVENA KRÁTKODOBÝM ÚČINKŮM	39
8.2	NÁDOBA ZATÍŽENÁ PO DOBU 10H.....	40
8.3	NÁDOBA ZATÍŽENÁ PO DOBU 1000H.....	41
8.4	NÁDOBA ZATÍŽENÁ PO DOBU 1 ROKU	42
8.5	SUMARIZACE VÝSLEDKŮ	43
9	DESIGN NÁDOBY VYZTUŽENÉ JEDNÍM ŽEBREM	44
9.1	PARAMETRY SIMULACE	44
9.2	DATA OPTIMALIZACE.....	45
9.3	VARIANTA I.....	48
9.3.1	Nádoba vystavena krátkodobým účinkům	48
9.3.2	Nádoba zatížená po dobu 10h	49
9.3.3	Nádoba zatížená po dobu 1000h	50
9.3.4	Nádoba zatížená po dobu 1 roku	50
9.3.5	Sumarizace výsledků.....	51
9.4	VARIANTA II.....	52
9.4.1	Nádoba vystavena krátkodobým účinkům	52
9.4.2	Nádoba zatížená po dobu 10h	53
9.4.3	Nádoba zatížená po dobu 1000h	54
9.4.4	Nádoba zatížená po dobu 1 roku	55
9.4.5	Sumarizace výsledků.....	55
10	DESIGN NÁDOBY VYZTUŽENÉ DVĚMI ŽEBRY	56
10.1	PARAMETRY SIMULACE	56
10.2	DATA OPTIMALIZACE.....	57
10.3	VARIANTA I.....	59
10.3.1	Nádoba vystavena krátkodobým účinkům	59
10.3.2	Nádoba zatížená po dobu 10h	60
10.3.3	Nádoba zatížená po dobu 1000h	61
10.3.4	Nádoba zatížená po dobu 1 roku	62
10.3.5	Sumarizace výsledků.....	62
10.4	VARIANTA II.....	63
10.4.1	Nádoba vystavena krátkodobým účinkům	63
10.4.2	Nádoba zatížená po dobu 10h	64
10.4.3	Nádoba zatížená po dobu 1000h	65
10.4.4	Nádoba zatížená po dobu 1 roku	66
10.4.5	Sumarizace výsledků.....	66
11	KONFRONTACE VÝSLEDKŮ	67
12	NÁDOBA VYZTUŽENÁ KRÁTKÝMI SKELNÝMI VLÁKNY.....	69

12.1	MATERIÁL	69
12.2	PARAMETRY SÍTĚ.....	69
12.3	NÁDOBA ZATÍŽENÁ PO DOBU 1000H.....	70
12.4	OPTIMALIZACE	70
12.4.1	Parametry simulace	71
12.4.2	Data optimalizace.....	71
12.4.3	Optimalizovaná varianta	73
12.4.4	Nádoba zatížená po dobu 1000h	74
ZÁVĚR		75
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....		76
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK		77
SEZNAM OBRÁZKŮ		78
SEZNAM TABULEK.....		80
SEZNAM PŘÍLOH.....		81
PŘÍLOHA P I: DESIGN NÁDOBY (1 ŽEBRO)		82
PŘÍLOHA P II: DESIGN NÁDOBY (2 ŽEBRA).....		91
PŘÍLOHA P III: NÁDOBA S KRÁTKÝMI SKELNÝMI VLÁKNY		98

ÚVOD

V současné době dochází k výraznému vzestupu výrobků z plastů. Díky nízké hmotnosti, odolnosti vůči vnějším vlivům i cenám polotovarů nahrazují původní materiály. Uplatnění nachází téměř ve všech oblastech.

Rozličnost možností zpracování nám umožňuje vyrábět výrobky variabilních tvarů a velikostí, jenž splňují i stále zvyšující se estetické požadavky.

Technologie rotačního odlévání umožňuje výrobu bezešvých výrobků s relativně tenkou tloušťkou stěny vůči celkovým rozměrům výrobku. Vzhledem k povaze výroby nedochází ke vzniku vnitřního pnutí.

Tato práce se zabývá optimalizací rotačně odlévaných nádob, které budou uloženy pod povrchem země. Simulací je řešena nejrizikovější možnost a to prázdná nádrž na kterou působí tlak vyvolaný okolní zeminou. Ten způsobuje v závislosti na čase klesání modulu a ztrátu stability nádoby (zborcení). Návrhem vyztužení nádrže lze docílit úsporu materiálu, energie i výrobního času. Proto by optimalizace měla být prováděna u všech obdobných výrobků.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 TECHNOLOGIE UMOŽŇUJÍCÍ VÝROBU PLASTOVÝCH VELKOOBJEMOVÝCH NÁDOB

V současné době jsou nejvíce využívány následující technologie výroby velkoobjemových plastových nádob:

- svařování
- spirální navíjení
- rotační odlévání

Každá výše uvedená technologie s sebou přináší výhody i omezení z hlediska výroby finálního výrobku.

1.1 Výhody nádob z plastu

- měrná pevnost
- nízká hmotnost
- vysoká chemická odolnost
- odolnost vůči korozi
- odolnost vůči povětrnostním vlivům
- dlouhá životnost
- dobré izolační vlastnosti

1.2 Nevýhody nádob z plastu

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

2 SVAŘOVÁNÍ

Touto technologií jsou zpravidla vyráběny beztlaké nádrže, jenž je možné dělit z několika hledisek:

1) Dle umístění

a) Nadzemní nádrže

- nádrže umístěny v budově nebo venku
- nutné brát v úvahu UV záření a povětrnostní podmínky
- pro návrh je užívána norma ČSN EN 12573 – 1

b) Nádrže umístěné v zemi

- nutné počítat se zemním tlakem, spodními vodami
- možná změna zatížení (sněh, průjezd automobilu...)

2) Dle tvaru

a) Válcové

- zpravidla stojící nádoby s plochým dnem
- plášť vyroben z trubky, nebo skružováním (vznik svaru)
- pro návrh je užívána norma ČSN EN 12573 – 2



Obr. 1 Válcová nádrž

b) Hranaté

- vysoký počet svarů
- svary umísťovány do míst s nejmenším ohybovým momentem
- často vytuženy žebry
- pokud je teplota konstantní je možné užít ocelové výztuže
- pro návrh je užívána norma ČSN EN 12573 – 3



Obr. 2 Hranatá nádrž

Konstrukční a výrobní zásady

- teplota média a okolí
- křížení svarů není možné
- nelze manipulovat s nádobou, pokud je teplota menší než 5°C
- manipulace s pláštěm možná, pokud teplota svaru klesne pod 30°C
- při skružování za studena je nutno brát v úvahu protažení krajního vlákna desky (z této podmínky vyplývá poměr tloušťky stěny a minimálního průměru pláště)

3 SPIRÁLNÍ NAVÍJENÍ

Pás polymeru je předeříván a následně navíjen na požadovaný vnitřní průměr nádoby. Tímto způsobem je postupně dosaženo výsledného výrobku.

Hlavní výhody:

- větší bezpečnost vůči technologii svařování
- průměr nádoby až 4 500mm
- bez navařování lze dosáhnout výšky pláště i 10 000mm
- pracovní objem až 150m³
- tloušťka pláště není limitována
- lze neprojektovat životnost nádoby i na 50let
- chemická odolnost



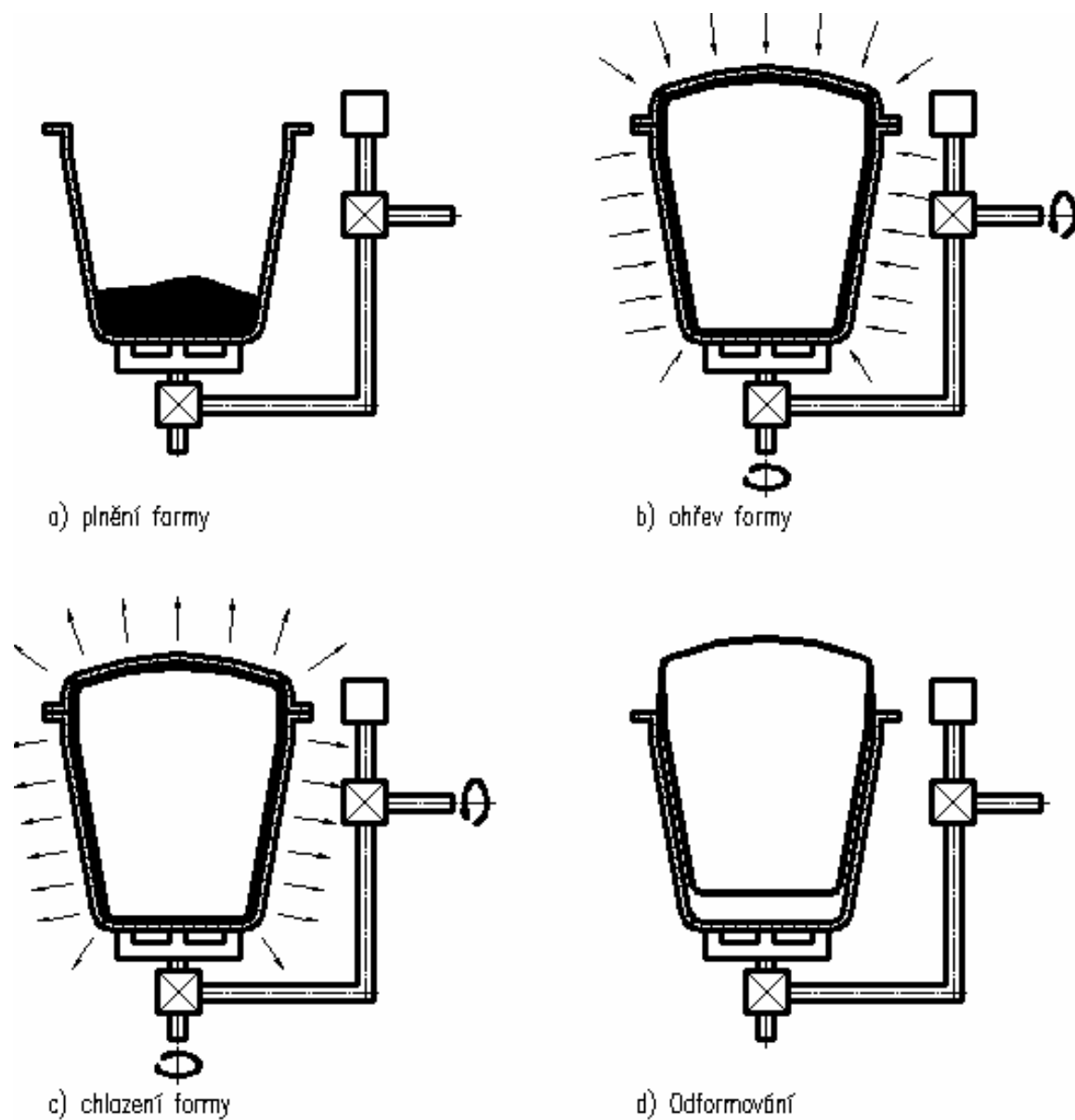
Obr. 3 Příklad nádoby vyráběné spirálním navíjením

4 ROTAČNÍ ODLÉVÁNÍ

Jedná se o technologii pro výrobu dutých dílů, jenž využívá přívodu tepla k tavení polymeru a pomalé rotace kolem dvou os. Jako polotovar bývá zpravidla užíván plastový prášek, nebo granulát.

4.1 Princip technologie

Princip technologie rotačního odlévání lze rozdělit do čtyř hlavních částí:



Obr. 4 Princip technologie rotačního odlévání

a) Plnění formy

Do formy je umístěn materiál v požadovaném množství ve formě kapaliny, prášku nebo granulí.

b) Zahřívání

Forma se relativně pomalu otáčí kolem dvou os za současného přívodu tepla (teplota formy je regulována v závislosti na typu zpracovávaného materiálu a procesních podmínkách).

c) Chlazení

Rotace formy pokračuje i při chladicí fázi. Chlazení probíhá za pomoci proudícího vzduchu, nebo ve vodní sprše, popřípadě chladicí kapalinou.

Tento krok je velmi důležitým z hlediska následného odformování. Pokud by chladicí fáze byla příliš krátká, výsledný produkt by se po vyjmutí z formy deformoval.

d) Odformování

Jakmile je výrobek dostatečně ztuhlý, končí chladicí fáze i rotace formy. V tomto kroku je vyjmut hotový výrobek a je možné opakovat cyklus.

Jelikož jsou výrobní časy jednoho dílce dlouhé, bylo nutné tento proces zefektivnit. Toho lze docílit pomocí víceramenných strojů.

4.2 Hlavní výhody rotačního odlévání

Tato technologie je výhodná pro vytváření malých i velkých dutých dílců často s komplikovaným tvarem. Velké množství těchto výrobků není možné vyrobit jako jednodité (bezešvé) žádnou jinou plastikářskou technologií. Jelikož se jedná o nízkotlaký proces, je možné užít formy i stroje pro lehká provozní zatížení. Díky tomu lze dosáhnout zisku již při menších sériích výroby.

Technologií rotačního odlévání nevzniká uvnitř formy žádný tlak, jenž by nutil taveninu téci (tvar vzniká díky rotaci formy a pokrývání stěn zvoleným materiálem). Díky tomu je možné dosáhnout tenkých stěn v poměru s celkovou velikostí.

Stroje pro rotační odlévání jsou vcelku univerzální, tj. na jednom stroji lze vyrábět dílce různých velikostí a tvarů. Jelikož je polotovár před zahájením procesu umístěn do dutiny formy, není potřeba vytvářet vtoky (jako např. u vstřikování). Proto je tato technologie výhodná i z hlediska recyklace odpadu.

Mezi hlavní výhody rotačního odlévání lze zařadit:

- dutý výrobek je vyroben jako jednolitý
- výrobek je bez vnitřního pnutí
- minimální tloušťka stěn
- formy jsou poměrně levné (v porovnání se vstřikovacími)
- rychlost výroby formy (v porovnání se vstřikovacími)
- množství vzniklého odpadu je zanedbatelné
- vytváření vícevrstevných výrobků
- na jednom stroji lze vyrábět různé druhy výrobků
- snadné zabudování insertů
- pro vytváření pohledových dílců

4.3 Hlavní nevýhody rotačního odlévání

Technologie rotačního odlévání je založena na principu ohřevu polotovaru v dutině formy a následném ochlazení (zafixování tvaru). Z tohoto vyplývá nevýhoda vůči jiným běžně používaným technologiím v nutnosti ohřevu a následného ochlazení celé formy (nikoli pouze polotovaru, jako například u vstřikování) => vyšší spotřeba energie a prodloužení výrobního času dílce.

Další nevýhodou je doba ohřevu materiálu, jenž může vést k tepelné degradaci. Toto hledisko zároveň omezuje sortiment použitelných materiálů. Zvolený polotovár musí být v hodné formě (kapalina, prášek, nebo granulát).

U výsledného výrobku je shodná s formou pouze vnější strana. Tloušťková tolerance se pak pohybuje v rozmezí 10% - 20%.

Mezi hlavní nevýhody rotačního odlévání lze zařadit:

- dlouhý výrobní čas dílce
- sortiment užívaných materiálů
- cena polotovaru
- geometrická omezení (např. žebra)
- není možné vytvořit náhlou změnu tloušťky

4.4 Přehled užívaných materiálů

Technologie rotačního odlévání má značná omezení v sortimentu využívaných materiálů. Materiály lze dělit podle různých hledisek, jako například dle vstupní formy na:

- prášek
- granulát
- tekutou formu

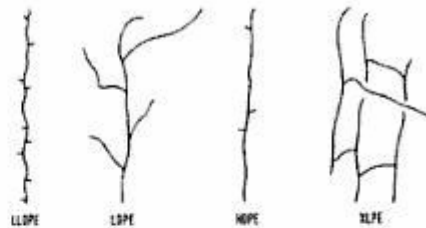
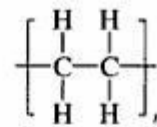
Mezi nejdůležitější požadavky, jenž souvisí s výběrem vhodného materiálu, lze zařadit tyto:

- a) v práškové, či tekuté formě (popř. granulát)
- b) teplotní stabilita
- c) dobré tokové vlastnosti
- d) požadované mechanické vlastnosti
- e) umístění výsledného produktu
- f) předpokládaná životnost
- g) teplota prostředí, popřípadě teplota média
- h) cena

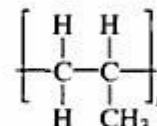
V současné době jsou nejběžněji užívané polymery pro technologii rotačního odlévání tyto:

- polyethylen
- polypropylen
- PVC
- nylon
- polykarbonát

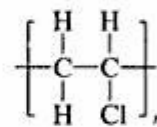
Polyethylene



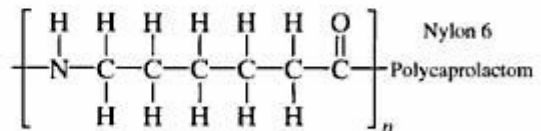
Polypropylene



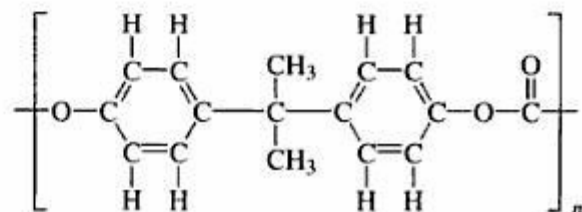
Polyvinyl Chloride



Nylon



Polycarbonate



Obr. 5 Nejběžněji užívané polymery pro technologii rotačního odlévání [1]

4.4.1 Polyethylen

Nejvýhodnějším a také nejvíce užívaným materiálem pro technologii rotačního odlévání je v současné době polyethylen. Na trhu má více než 80% zastoupení.

Typy polyethylenu:

- LDPE (nízkohustotní polyethylen)
- LLDPE (lineární nízkohustotní polyethylen)
- MDPE (středněhustotní polyethylen)
- HDPE (vysokohustotní polyethylen)
- XDPE (zesíťovaný polyethylen)

LDPE (nízkohustotní polyethylen)

Nízkohustotní polyethylen (LDPE) je charakterizován dlouhým makromolekulárním řetězcem (jako všechny termoplasty) s velkým počtem rozsáhlých postranních řetězců (až 100 ethylenů). Tyto postranní řetězce mají tendenci bránit organizaci makromolekul při chladnutí. Vlivem toho je dosažena relativně nízká hustota.

Nízkohustotní polyethylen (LDPE) má vcelku špatné mechanické vlastnosti a není odolný vůči vzniku trhlin. Nicméně je schopný velmi dobře replikovat povrch formy, již při relativně nízkých teplotách.

Vlastnosti:

- | | |
|--------------------------------|-----------|
| - hustota [kg/m ³] | 910 - 925 |
| - stupeň krystalinity [%] | 45 - 65 |
| - modul v ohybu [MPa] | 240 - 350 |
| - tvrdost [Shore D] | 46 - 52 |

LLDPE (lineární nízkohustotní polyethylen)

Lineární nízkohustotní polyethylen (LLDPE) má makromolekulární řetězce dlouhé obdobně jako nízkohustotní polyethylen (LDPE). Na rozdíl od něj má ovšem krátké postranní řetězce. Dosahuje relativně nízké hustoty.

Lineární nízkohustotní polyethylen (LLDPE) má díky vyššímu stupni krystalinity lepší tuhost i pevnost v tahu, avšak horší rázovou pevnost vůči LDPE a MDPE. Jeho lepší vlastnosti vůči LDPE umožňují užití i u výrobků, jenž by jinak musely být vyrobeny z HDPE, nebo XLPE. Z tohoto důvodu je lineární nízkohustotní polyethylen v současné době využíván ve velkých množstvích.

Vlastnosti:

- hustota [kg/m^3]	910 - 940
- stupeň krystalinity [%]	65 - 75
- modul v ohybu [MPa]	420 - 830
- tvrdost [Shore D]	50 - 56

MDPE (středněhustotní polyethylen)

Středněhustotní polyethylen (MDPE) je obvykle preferovaný před LDPE pro aplikace, kde jsou kladeny požadavky na požadovanou sílu, či tuhost. MDPE je charakterizován menším množstvím postranních řetězců vůči LDPE. Středněhustotní polyethylen má po vyjmutí z formy matný povrch.

Vlastnosti:

- hustota [kg/m^3]	925 - 940
- stupeň krystalinity [%]	55 - 75
- modul v ohybu [MPa]	690 - 900
- tvrdost [Shore D]	52 - 56

HDPE (vysokohustotní polyethylen)

Vysokohustotní polyethylen (HDPE) je také známý jako lineární polyethylen, i když má i krátké postranní řetězce. Je odolný vůči mnohým chemikáliím i vůči vzniku trhlin. Má dobré mechanické vlastnosti a vysoký stupeň krystalinity.

Vlastnosti:

- hustota [kg/m ³]	960 - 1000
- stupeň krystalinity [%]	75 - 90
- modul v ohybu [MPa]	930 - 1520
- tvrdost [Shore D]	60 – 66

XDPE (zesíťovaný polyethylen)

Díky zesíťování si XDPE uchovává své vlastnosti s rostoucí teplotou. Má vysokou teplotní a chemickou odolnost (lze jej použít i do 182°C). Díky tomu je často využíván pro benzínové nádrže a těla čerpadel. Jeho nevýhodou je jeho opakovatelná netavitelnost.

Závislost vlastností polyethylenu na hustotě:

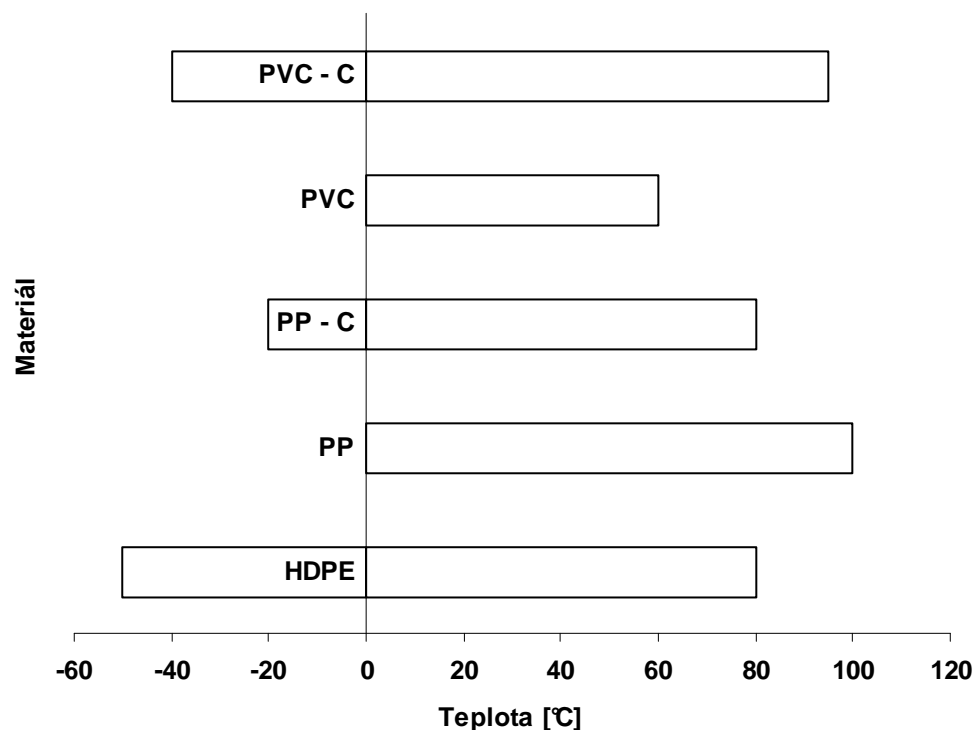
Vlastnost	Tendence
Chemická odolnost	rostoucí
Odolnost vůči tečení	rostoucí
Ohebnost	klesající
Tvrdość	rostoucí
Rázová pevnost	klesající
Optické vlastnosti	klesající
Smršťění	rostoucí
Tuhost	rostoucí
Pevnost v tahu	rostoucí

4.4.2 Polypropylen (PP)

Polypropylen (PP) se vykazuje dobrými mechanickými vlastnostmi. Vůči HDPE vykazuje lepší chemickou odolnost, avšak horší odolnost vůči UV záření. Při teplotách okolo 100°C vykazuje vysokou oxidační degradaci. Z tohoto důvodu je nutné užít stabilizátory a antioxidanty.

Vlastnosti:

- hustota [kg/m ³]	910
- stupeň krystalinity [%]	60
- modul v ohybu [MPa]	1200 – 1400
- tvrdost [Shore D]	72
- tvrdost dle Brinella [DIN EN ISO 2039-1]	70
- koeficient délkové tepelné roztažnosti [1/K]	$1,6 \cdot 10^{-4}$



Graf 1 Teplotní rozsah použitelnosti vybraných materiálů

Výběr z technického datového listu pro materiál s obchodním názvem PE 100, dostupný na adrese www.simona-plastics.cz ke dni 12. 1. 2012:

Obchodní název: PE 100

Veličina	Jednotka	Norma	Hodnota
Hustota	[g/cm ³]	ISO 1183	0,960
Mez kluzu	[MPa]	DIN EN ISO 527	23
Protažení na mezi kluzu	[%]	DIN EN ISO 527	9
Modul pružnosti v tahu	[MPa]	DIN EN ISO 527	1100
Rázová houževnatost	[kJ/m ²]	DIN EN ISO 179	bez lomu
Vrubová houževnatost	[kJ/m ²]	DIN EN ISO 179	30
Tvrдость dle Brinella	[MPa]	DIN EN ISO 2039-1	40
Tvrдость Shore D		ISO 868	65
Střední koeficient délkové tepelné roztažnosti	[1/K]	DIN 53752	1,8.10 ⁻⁴
Tepelná vodivost	[W/m.K]		0,38
Fyziologická nezávadnost dle EU			ano
Teplotní rozsah použitelnosti	[°C]		Od -50°C Do +80°C

Tab.1 Výběr z technického datového listu pro materiál PE 100

(dostupný na adrese: www.simona-plastics.cz ke dni 12. 1. 2012)

4.4.3 Další materiály

V této podkapitole jsou uvedeny některé materiály pro technologii rotačního odlévání, jenž jsou limitovány použitelností. Taktéž je omezen sortiment výrobců na trhu. Některé materiály byly preferovány v minulých letech (akrylonitril butadien styren (ABS) byl využíván v polovině sedmdesátých let), v současné době však nejsou využívány.

- ABS
- epoxidová pryskyřice
- polyacetal
- polyester
- polykaprolaktan
- polykarbonát
- polyuretan
- silikon

4.5 Oblasti použití

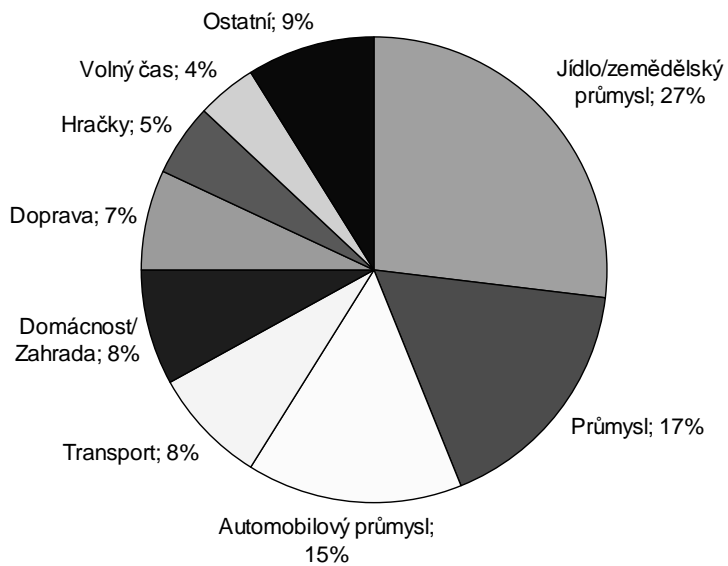
Hlavní oblastí použití technologie rotačního odlévání je výroba velkoobjemových bežeškových nádrží. Zde lze využít všech zmíněných výhod.

Své zastoupení ovšem mají i při výrobě malých výrobků, jenž by byly vyrobitelné i jinými procesy. Nespornou výhodou jsou totiž náklady spojené na výrobu formy. Do formy je možné umístit vložky, takže po ochlazení vzniká jednolitý výrobek bez švů, vnitřního pnutí a stop po demontáži.

Typické produkty vyráběné rotačním odléváním:

- nádrže – septiky, nádrže pro chemikálie, benzínové nádrže, nádrže na olej, čističky odpadních vod, ...
- automobilový průmysl – dveřní opěradla pro ruce, bedny postelí do kamionů, dopravní značky, palivové nádrže, ...

- volný čas – hračky (míče, hlavy i části těl panenek), zahradní nábytek, kajaky, kánoe, bóje, ...
- zemědělský průmysl – nádrže na vodu, kabiny traktorů, zásobníky na plodiny, krmící a napájecí nádoby, ...

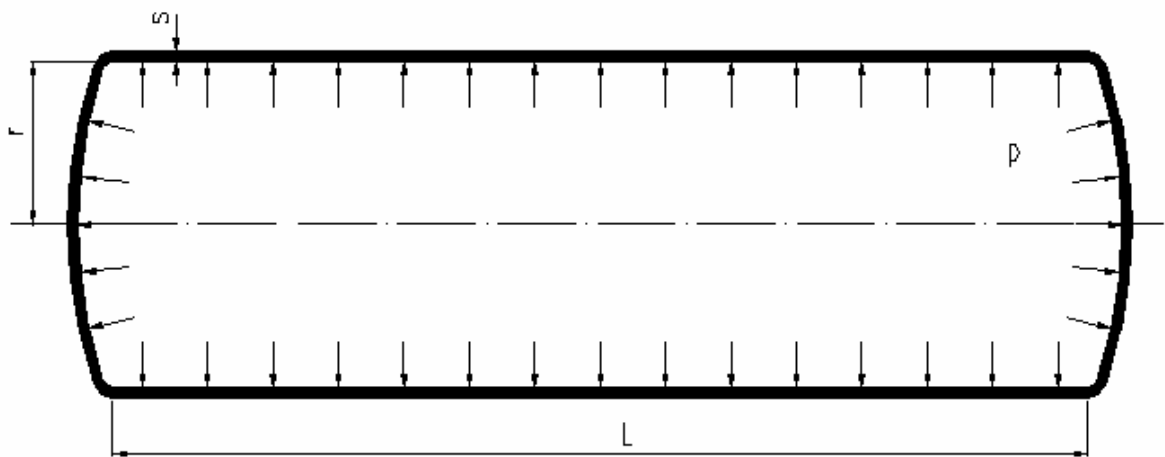


Graf 2 Zastoupení produktů na evropském trhu v roce 1999

5 VÁLCOVÁ NÁDOBA ZATÍŽENÁ VNITŘNÍM PŘETLAKEM

5.1 Membránové napětí

V praxi nejčastějším případem rotačně symetrické skořepiny je válcová nádoba zatížená vnitřním přetlakem.



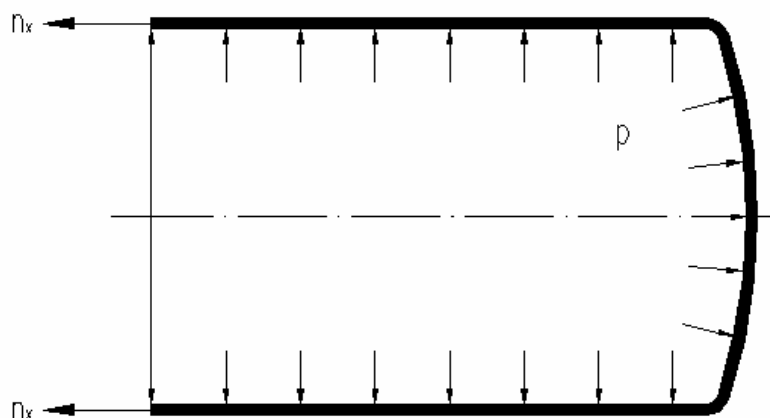
Obr. 6 Schéma válcové nádoby

Je-li veden řez kolmo k ose, bude rovnice rovnováhy sil pro uvolněnou část nádoby:

$$p \cdot \pi r^2 = \sigma_x \cdot 2\pi r \cdot s$$

Odtud osové (axiální) membránové napětí:

$$\sigma_x = \frac{pr}{2s} \quad (1.1)$$



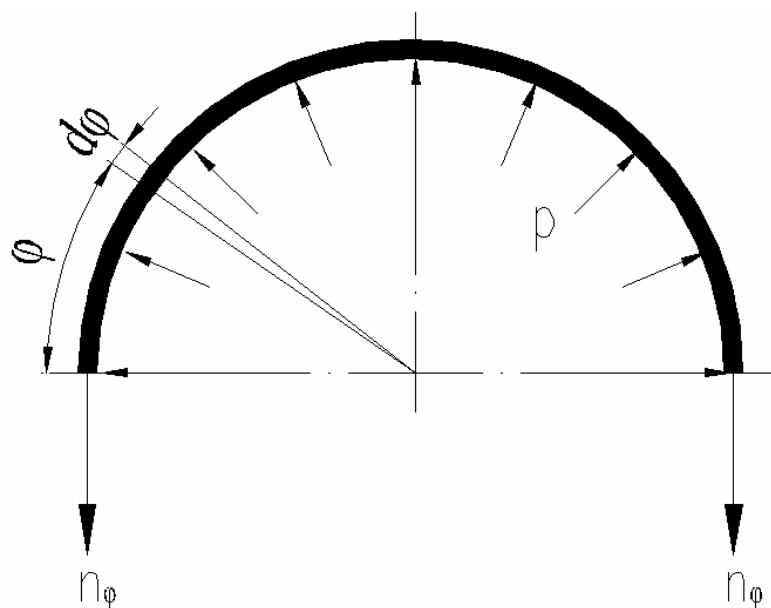
Obr. 7 Osové (axiální) membránové napětí

Dvěmi myšlenými řezy kolnými k ose válce oddělíme prstenec jednotkové šířky, pro jehož polovinu platí rovnice rovnováhy:

$$2\sigma_{\varphi}s = \int_0^{\pi} pr \sin \varphi d\varphi = 2pr$$

Odtud obvodové napětí:

$$\sigma_{\varphi} = \frac{pr}{s} \quad (1.2)$$



Obr. 8 Obvodové síly

Jelikož smykové napětí nepůsobí v osovém ani v obvodovém směru, jsou σ_x a σ_{φ} hlavní napětí membránové napjatosti válcové stěny.

Zároveň platí, že napětí obvodové je dvojnásobkem napětí osového \Rightarrow pokud je možnost, snaha konstruovat kulové nádoby (poloviční tloušťka stěny).

5.2 Membránové deformace

Dle rovnic elasticity je osová membránová deformace pláště:

$$\varepsilon_x^M = \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu\sigma_\varphi) \quad (1.3)$$

Dosazením rovnic (1.1) a (1.2) do rovnice (1.3) získáváme:

$$\varepsilon_x^M = \frac{Pr}{Es}(0,5 - \nu)$$



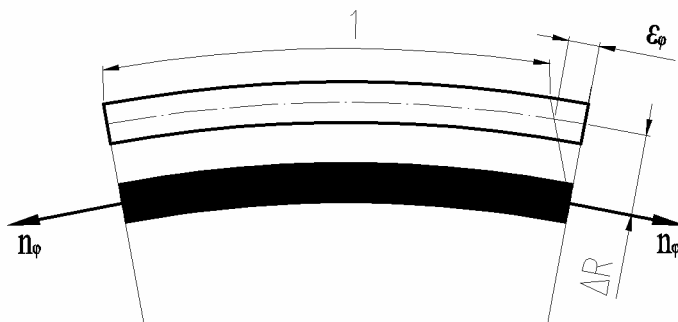
Obr. 9 Obvodová deformace

Obdobně pro axiální deformaci pláště:

$$\varepsilon_\varphi^M = \frac{1}{E}(\sigma_\varphi - \nu\sigma_x) \quad (1.4)$$

Odtud dosazením rovnic (1.1) a (1.2) do rovnice (1.3) získáváme:

$$\varepsilon_\varphi^M = \frac{Pr}{Es}\left(1 - \frac{\nu}{2}\right)$$



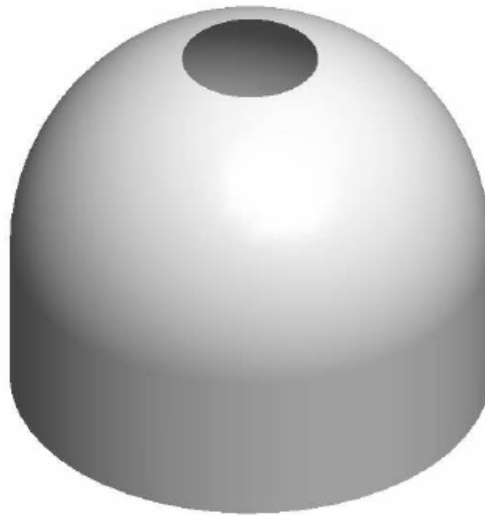
Obr. 10 Obvodová deformace

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 CÍL PRÁCE

Cílem práce je optimalizovat návrhy rotačně odlévaných velkoobjemových nádob z hlediska mechanických vlastností zejména po stránce ztráty stability za účelem snížení nákladů na polotovary i spotřebu energie. Tyto nádoby jsou nasazeny v podmínkách, při kterých dochází, při špatném návrhu, ke zborcení vlivem tlaku okolní zeminy, tj. při nižší úrovni zatížení, než které způsobí selhání materiálu. Zborcení je definováno jako náhlá deformace vznikající, pokud se energie povrchové vrstvy změní v ohybovou energii, aniž by došlo ke změně externího zatížení.

Jako výchozí tvar byla brána nádoba, jejíž horní část je sférického charakteru. Spodní část nádoby je pak válcového tvaru.

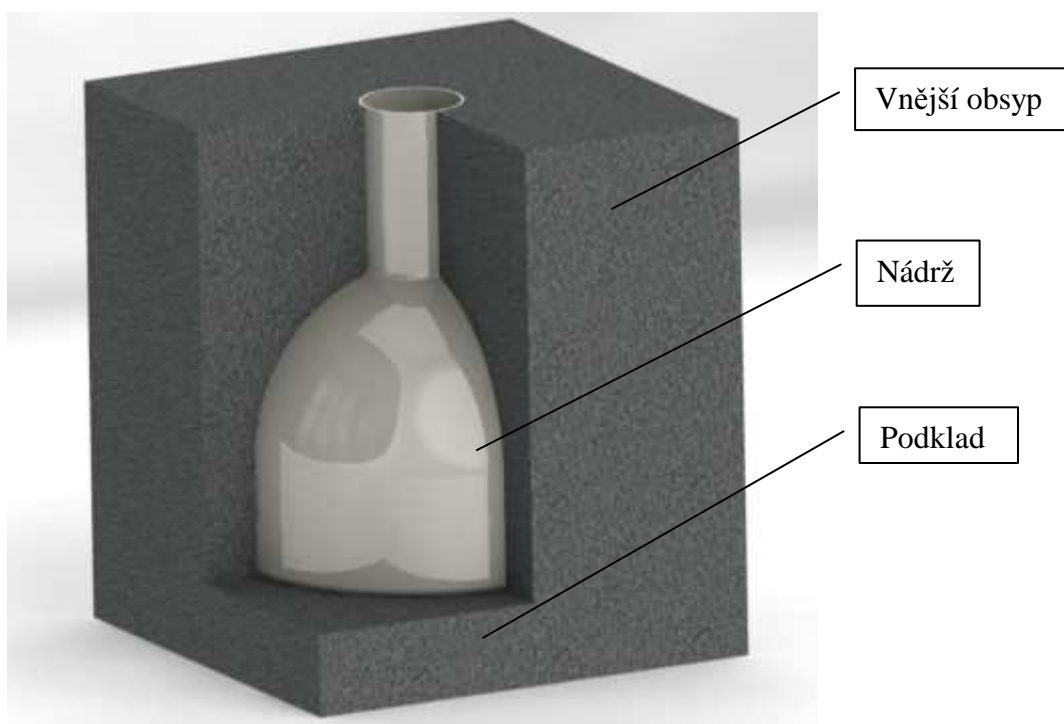


Obr. 11 Schéma nádoby

Technologií rotačního odlévání jsou na budoucí výrobek kladeny požadavky z hlediska vyrobitelnosti. Mezi nejdůležitější patří, že nelze vytvořit žebra jako taková. Je možné vytvářet žebra dutá s doporučeným poměrem šířky k hloubce větším než 1.

7 DESIGN HLADKÉ NÁDOBY

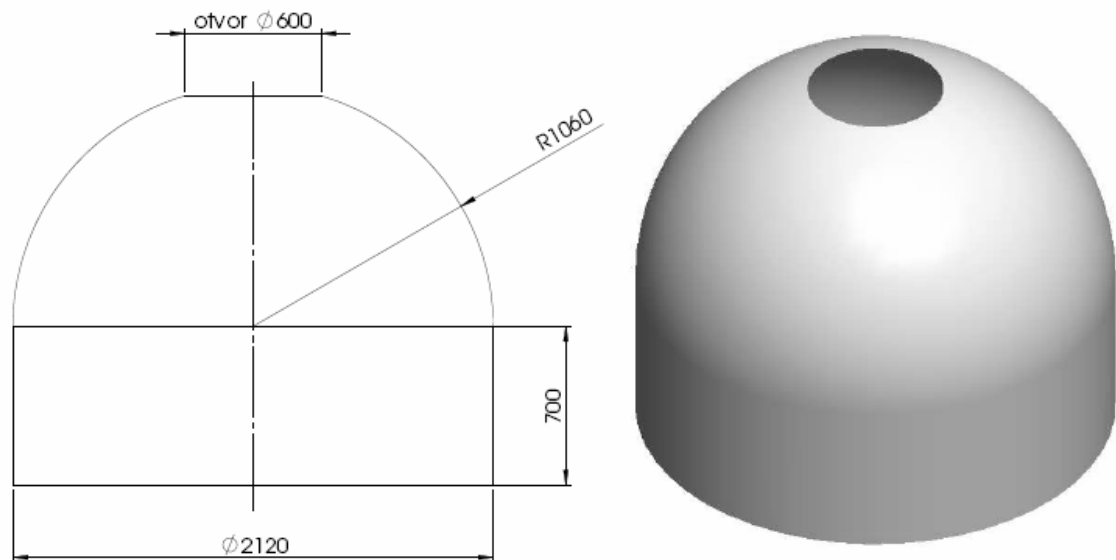
Simulace se zabývá nejrizikovější možností a to prázdnou nádrží na niž působí tlak vyvolaný okolní zeminou. Ten způsobuje v závislosti na čase klesání modulu a ztrátu stability nádoby (zborcení). Při výpočtu zatížení zemním tlakem jsou brány v potaz půdní podmínky i vlastnosti zásypového materiálu a tvar nádrže.



Obr. 12 Koncept nádoby

7.1 Tvar a rozměry nádrže

Celá nádoba se sestává ze dvou samostatně vyráběných částí. První tvoří velkoobjemová nádrž o objemu 5m^3 vyráběná rotačním odléváním. Druhou částí je trubka o vnitřním průměru 600mm a délce 1 000mm, jenž je následně k nádrži uchycena. Z tohoto důvodu jsou simulace prováděny pouze na modelu nádrže.



Obr. 13 Rozměry nádoby

7.2 Zatížení nádrže

7.2.1 Zatížení dopravou

Jelikož výška nadloží neklesla pod jeden metr, zatížení vyvolané chodci ($2,5 \text{ kN/m}^2$) je zanedbáváno. Taktéž není předpokládáno zatížení vozidly. V opačném případě jsou pojížděné nádrže navrhovány individuálně dle uvažovaného konečného využití.

7.2.2 Zatížení podzemní vodou

Pokud je nádrž umístěna do podzemní vody, je uvažovaná tíha přilehlé zeminy 10 kN/m^3 . K této hodnotě se dále připočítává výška vodního sloupce.

7.2.3 Zatížení zemním tlakem

Velikost zatížení zemním tlakem je přímo úměrné typu zvoleného obsypového materiálu i tvaru nádrže.

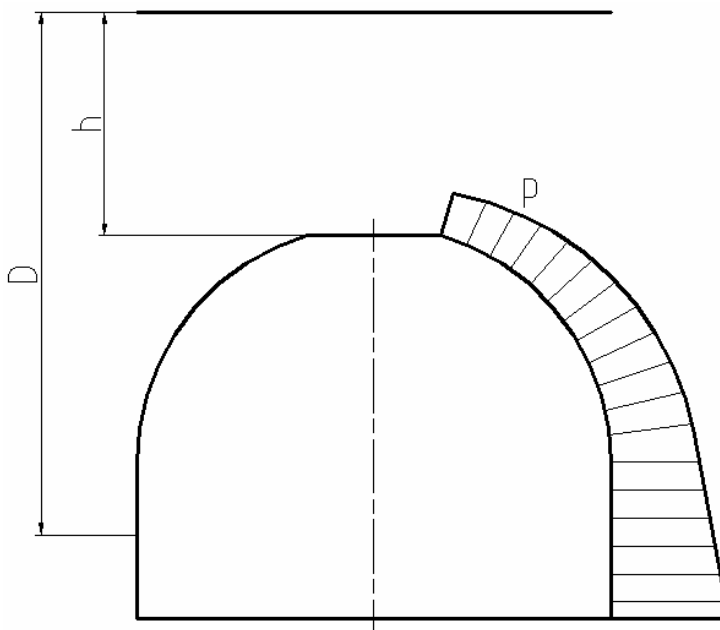
Zatížení dělíme na dvě složky:

a) Svislá složka:

$$h \cdot 18 \text{ kN/m}^2 \quad (2.1)$$

b) Vodorovná složka:

$$K \cdot D \cdot 18 \text{ kN/m}^2 \quad (2.2)$$



Obr. 14 Zatížení nádoby

Legenda

h [m] Výška nadloží mezi horním povrchem septiku a povrchem terénu

K [1] Součinitel úhlu tření pro různé druhy zeminy

- Pro písek: 0,33

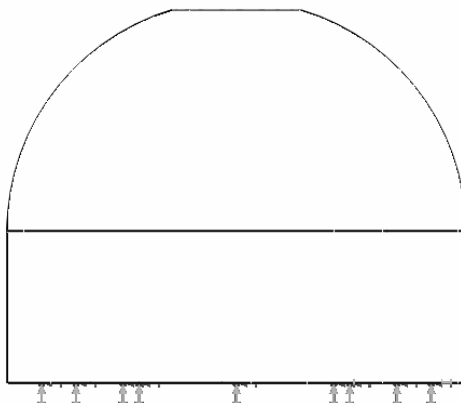
- Pro štěrk: 0,27

- Pro ostatní zásypové materiály: 0,5

D [m] Vzdálenost mezi povrchem terénu a bodem, na nějž působí zatížení

7.3 Uchycení nádrže

V rámci simulace je dno nádrže uchyceno pomocí vetknutí (tj. odebráno všech šest stupňů volnosti).



Obr. 15 Uchycení nádoby

7.4 Materiál

Jako materiál nádrže byl zvolen lineární nízkohustotní polyethylen (LLDPE) díky výhodným vlastnostem a relativně nízkým pořizovacím nákladům. Tyto vlastnosti se řídí normou EN 1778.

Vlastnosti:

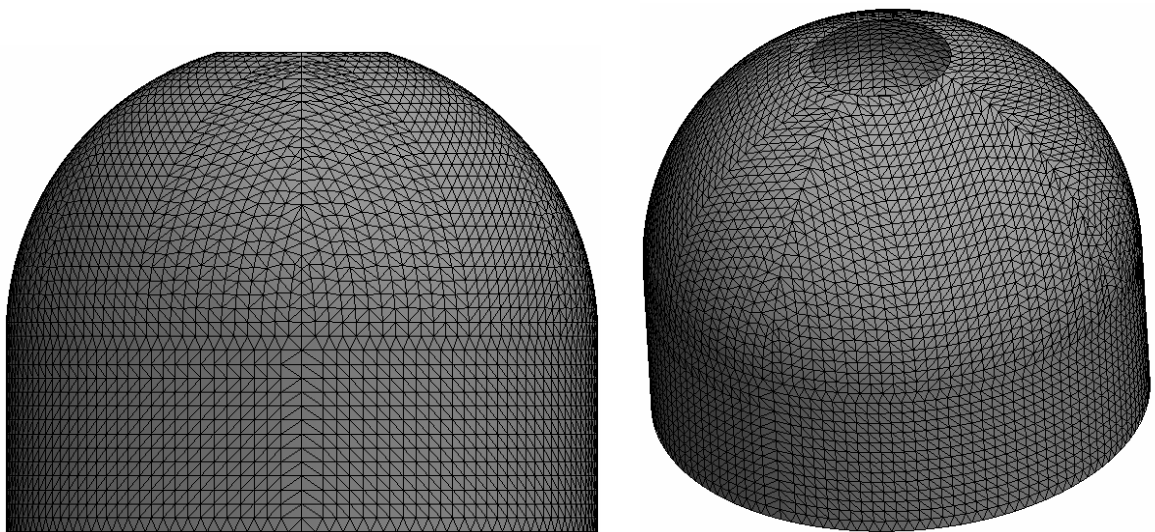
MFI (190°C / 2,16kg) [g/10min]	4
Hustota [kg/m ³]	938
Yongův modul (E) [MPa]	800
Poissonova konstanta (ν)	0,4
Protažení při přetržení (ε) [%]	>700

Modul tečení [MPa] (kvalifikovaný odhad)

- 10 hodin (E_1)	600
- 1000 hodin (E_3)	400
- 1 rok (E_r)	300

7.5 Parametry sítě

Typ modelu:	skořepina
Typ skořepiny:	tenkostěnná / tlustostěnná (dle výpočtu)
Velikost strany trojúhelníku:	50 mm
Tolerance:	2,5 mm
Počet nodů:	24 125
Počet elementů:	12 042



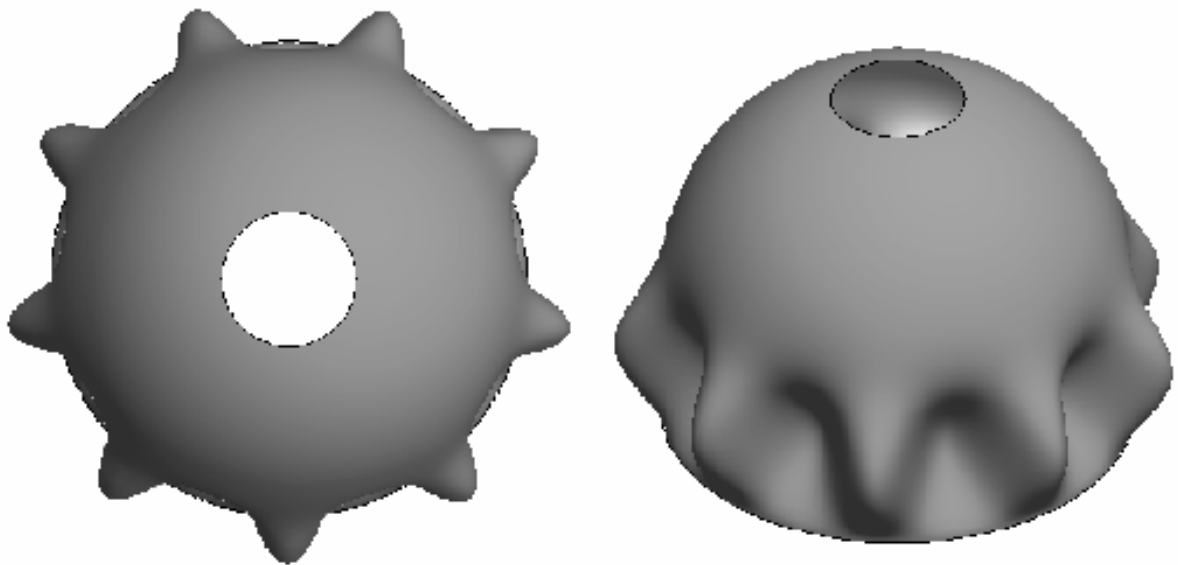
Obr. 16 Vytvořená síť

8 VÝSLEDKY SIMULACE

8.1 Nádobu vystavena krátkodobým účinkům

Jako první případ byla vypočtena nádoba, u níž právě došlo k vyčerpání obsahu. Tato situace je výhodná z hlediska modulu pružnosti E (800MPa), jenž je značně vyšší vůči modulům tečení.

Mode Shape : 1 Load Factor = 2.0338
Deformation scale: 221.04



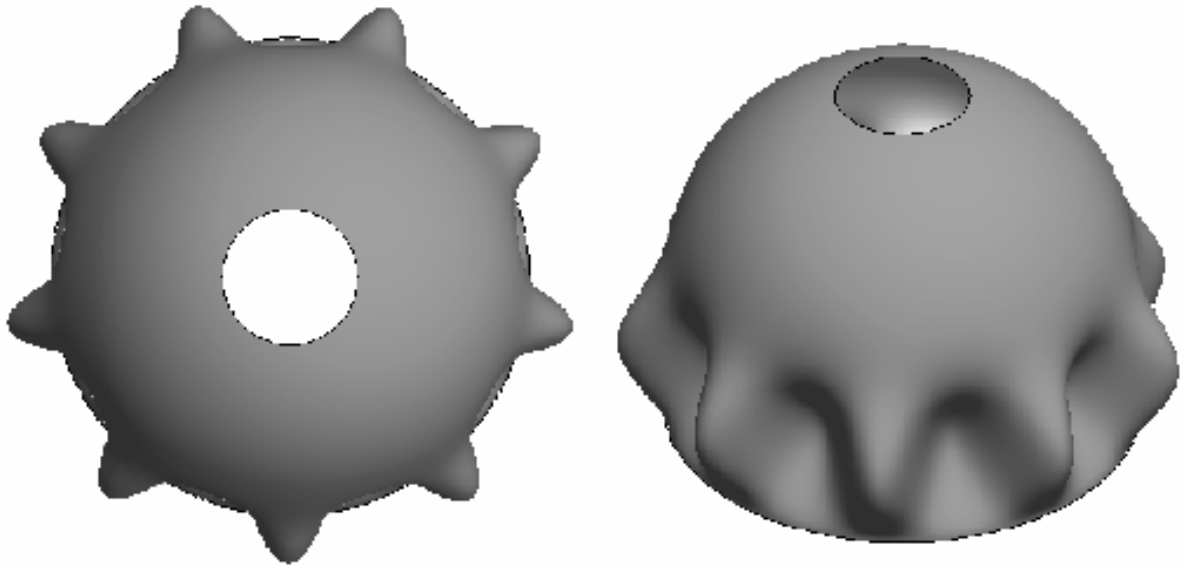
Obr. 17 Vzhled deformace při ztrátě stability ($E = 800\text{MPa}$)

Modul:	800MPa
Tloušťka stěny:	13mm
Typ skořepiny:	tenkostěnná
Koeficient bezpečnosti:	2,0338
Spotřeba materiálu:	194 523,90cm ³
Hmotnost:	182,46kg

Při zvolené tloušťce 13mm je koeficient bezpečnosti 2,0338. Hmotnost jednoho kusu činí 182,46kg.

8.2 Nádoba zatížená po dobu 10h

Mode Shape : 1 Load Factor = 2.011
Deformation scale: 222.269



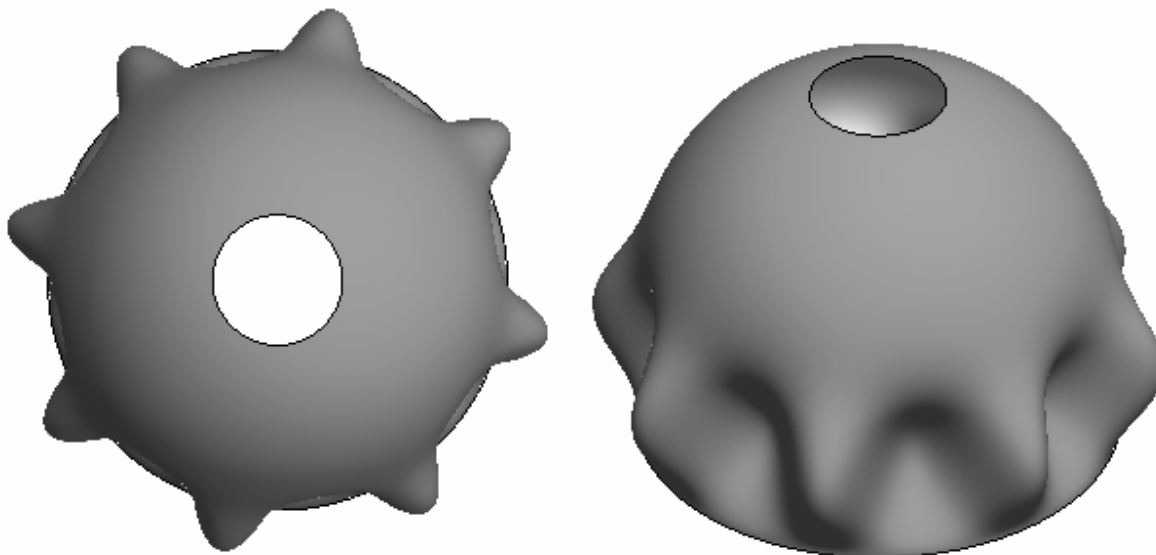
Obr. 18 Vzhled deformace při ztrátě stability ($E_1 = 600\text{MPa}$)

Modul tečení:	600MPa
Tloušťka stěny:	14,5mm
Typ skořepiny:	
a) Tlustostěnná	
Koefficient bezpečnosti:	2,011
b) Tenkostěnná	
Koefficient bezpečnosti:	2,018
Spotřeba materiálu:	216 969,74cm ³
Hmotnost:	203,52kg

Tloušťka nádoby, jenž je zatížena po dobu 10 hodin, je 14,5mm při koeficientu bezpečnosti 2,011. Hmotnost jednoho kusu činí 203,52kg.

8.3 Nádoba zatížená po dobu 1000h

Mode Shape : 1 Load Factor = 2.0131
Deformation scale: 201.211



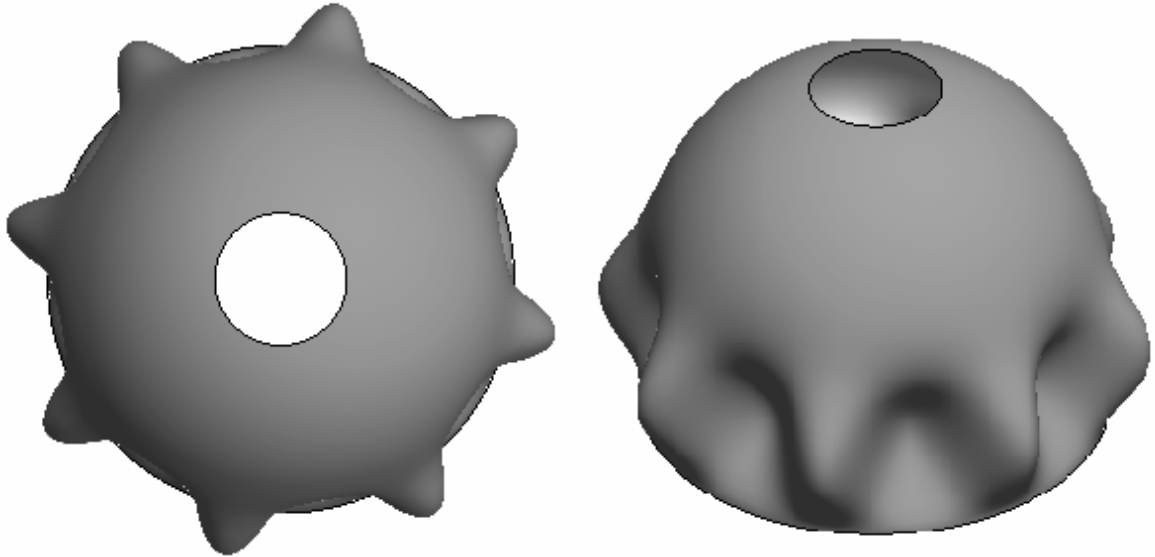
Obr. 19 Vzhled deformace při ztrátě stability ($E_3 = 400\text{MPa}$)

Modul tečení:	400MPa
Tloušťka stěny:	17mm
Typ skořepiny:	
a) Tlustostěnná	
Koeficient bezpečnosti:	2,013
b) Tenkostěnná	
Koeficient bezpečnosti:	2,023
Spotřeba materiálu:	254 380,05cm ³
Hmotnost:	238,61kg

U nádoby zatížené po dobu 1000h je potřebná tloušťka stěny 17mm při koeficientu bezpečnosti 2,013.

8.4 Nádoba zatížená po dobu 1 roku

Mode Shape : 1 Load Factor = 2.0211
Deformation scale: 201.834



Obr. 20 Vzhled deformace při ztrátě stability ($E_r = 300\text{MPa}$)

Modul tečení:	300MPa
Tloušťka stěny:	19,1mm
Typ skořepiny:	
a) Tlustostěnná	
Koeficient bezpečnosti:	2,021
b) Tenkostěnná	
Koeficient bezpečnosti:	2,035
Spotřeba materiálu:	285 805,32cm ³
Hmotnost:	268,09kg

U vyčerpané nádoby po dobu jednoho roku byla vypočtena minimální tloušťka stěny 19,1mm s koeficientem bezpečnosti 2,021.

8.5 Sumarizace výsledků

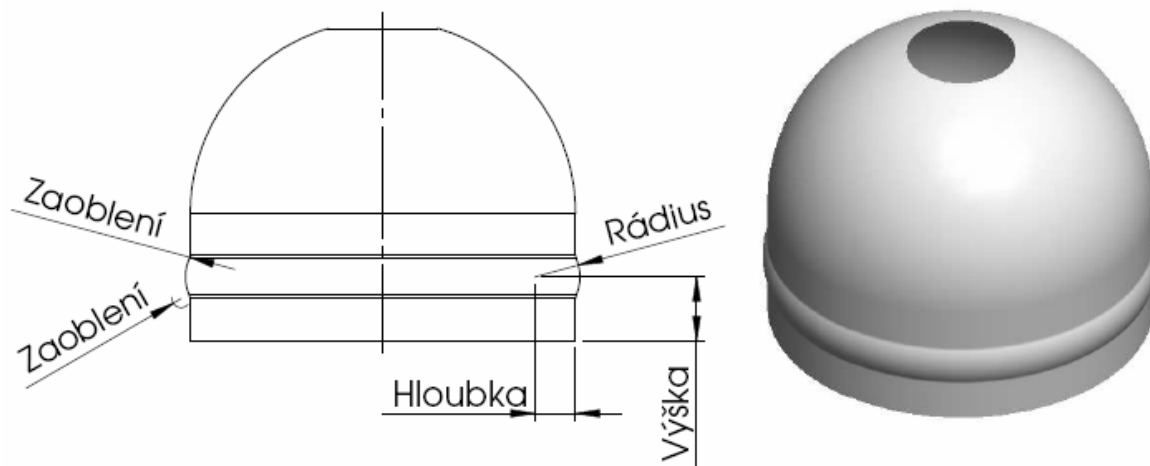
Jako nejideálnější varianta se jeví okamžité napouštění nádrže po jejím vyprázdnění. Tento stav ovšem v praxi nenastává, jelikož nádrž je zpravidla po vypuštění nutné vyčistit. Optimálním řešením je nádoba vypuštěná maximálně po dobu 1000h, tj. necelých 6 týdnů. U této doby zatížení je nutné užít o 30,8% více materiálu vůči okamžitému napouštění nádrže.

Doba zatížení	Tloušťka [mm]	Spotřeba mat. [cm³]	Hmotnost [kg]	Spotřeba mat. [%]
krátkodobá	13	194 523,90	182,46	100,0
10h	14,5	216 969,74	203,52	111,5
1000h	17	254 380,05	238,61	130,8
1rok	19,1	285 805,32	268,09	146,9

Tab.2 Sumarizace výsledků pro původní model

9 DESIGN NÁDOBY VYZTUŽENÉ JEDNÍM ŽEBREM

Prvním optimalizovaným tvarem je jedno žebro, u něž jsou postupně měněny tyto parametry: Rádus, Hloubka, Výška, Zaoblení.

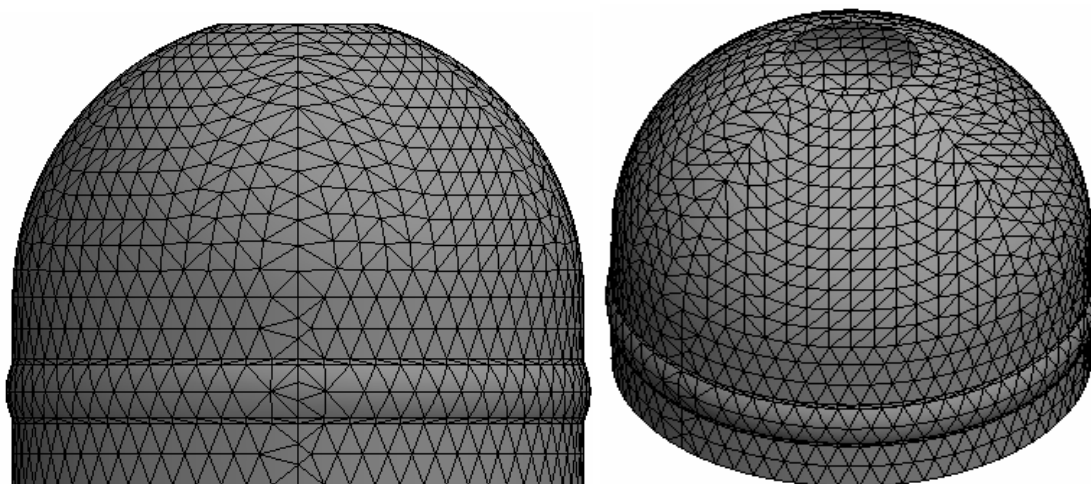


Obr. 21 Tvar optimalizované nádoby

9.1 Parametry simulace

Parametry sítě:

Typ modelu:	skořepina
Typ skořepiny:	tenkostěnná
Velikost strany trojúhelníku:	100 mm
Tolerance:	5 mm



Obr. 22 Vzhled sítě

Ostatní konstanty:

Modul:	800 MPa
Tloušťka stěny:	13 mm
Zaoblení:	50 mm

9.2 Data optimalizace

Pro získání představy o závislosti jednotlivých parametrů modelu na koeficientu bezpečnosti byly vytvořeny tyto návrhy:

Rádus: 100 – 400mm, krok 50mm

Hloubka: 75 – 375mm, krok 50mm

Výška: 250 – 490mm, krok 40mm

Celkem bylo vytvořeno 347 návrhů. Z toho 198 návrhů geometricky realizovatelných. Pouhá třetina (66 návrhů) však splňuje podmínku koeficientu bezpečnosti > 2 , tj. návrh vyžaduje maximálně stejnou tloušťku stěny jako nádoba bez žebra. V tabulce 3 jsou uvedeny návrhy s koeficientem bezpečnosti větším než 2,5.

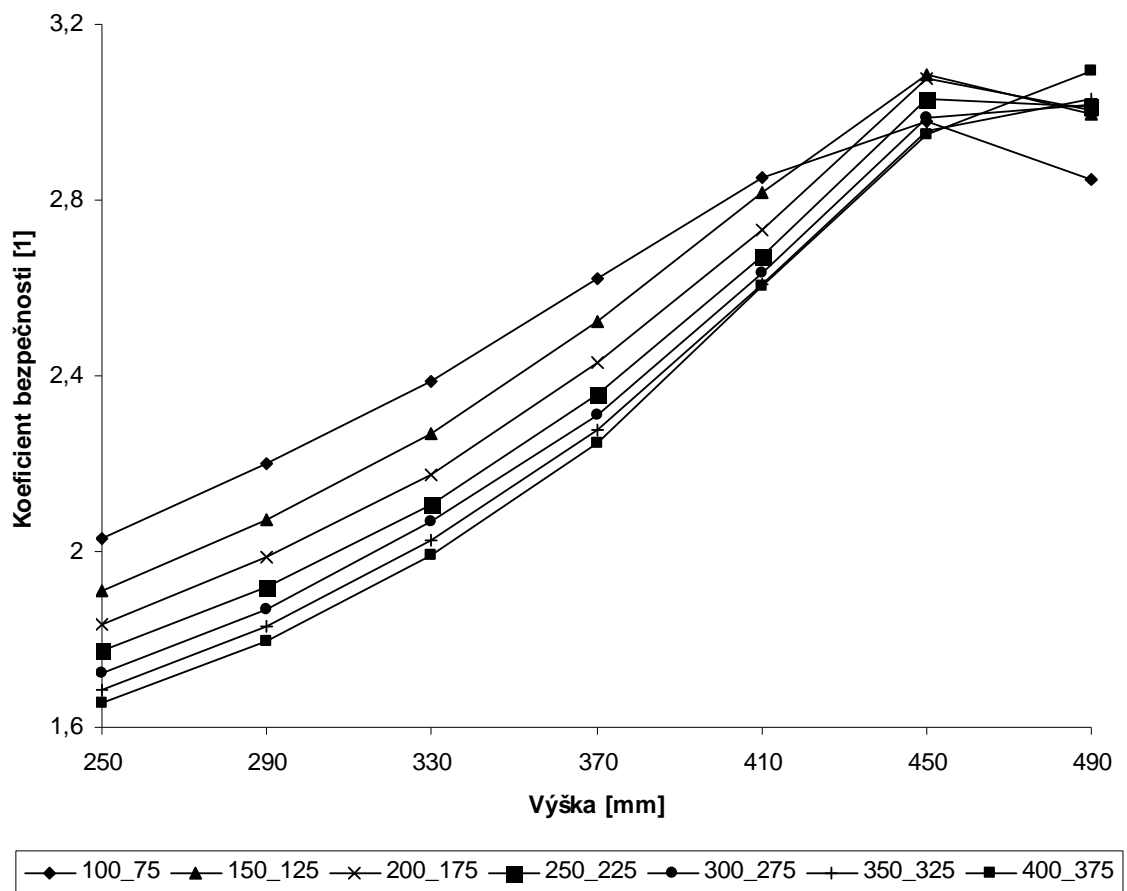
	Rádus [mm]	Hloubka [mm]	Výška [mm]	Koeficient bezpečnosti [1]
Návrh 148	100	75	370	2,620
Návrh 197	100	75	410	2,853
Návrh 246	100	75	450	2,978
Návrh 295	100	75	490	2,845
Návrh 247	150	75	450	2,608
Návrh 296	150	75	490	2,666
Návrh 156	150	125	370	2,525
Návrh 205	150	125	410	2,816
Návrh 254	150	125	450	3,087
Návrh 303	150	125	490	2,995

	Rádus [mm]	Hloubka [mm]	Výška [mm]	Koeficient bezpečnosti [1]
Návrh 213	200	175	410	2,734
Návrh 262	200	175	450	3,075
Návrh 311	200	175	490	3,003
Návrh 221	250	225	410	2,672
Návrh 270	250	225	450	3,030
Návrh 319	250	225	490	3,011
Návrh 229	300	275	410	2,632
Návrh 278	300	275	450	2,987
Návrh 327	300	275	490	3,018
Návrh 237	350	325	410	2,609
Návrh 286	350	325	450	2,957
Návrh 335	350	325	490	3,029
Návrh 245	400	375	410	2,606
Návrh 294	400	375	450	2,949
Návrh 343	400	375	490	3,092

Tab.3 Návrhy s koeficientem bezpečnosti > 2,5 pro $E = 800\text{MPa}$

Z výsledků si lze povšimnout, že hledání optimální varianty je závislé zejména na výšce umístění žebra a na hloubce zvoleného rádiusu. Jelikož je lepších výsledků dosahováno u návrhů, u nichž rozdíl rádiusu a hloubky je minimální, byl sestrojen graf závislosti koeficientu bezpečnosti na výšce pro tyto varianty:

- | | |
|-------------------------|-------------------------|
| a) R = 100mm, H = 75mm | d) R = 250mm, H = 225mm |
| b) R = 150mm, H = 125mm | e) R = 300mm, H = 275mm |
| c) R = 200mm, H = 175mm | f) R = 350mm, H = 325mm |
| g) R = 400mm, H = 375mm | |



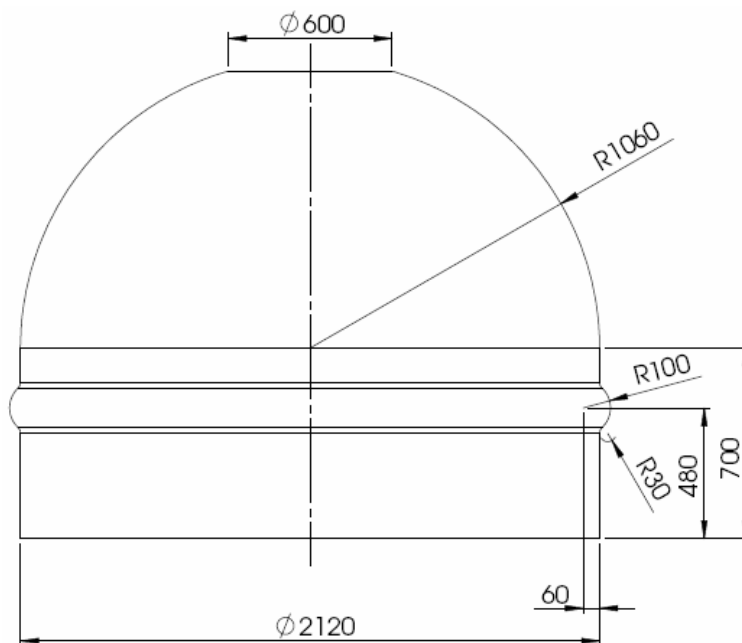
Graf 3 Trend koeficientu bezpečnosti na výšce

(Legenda: Rádus_Hloubka)

Z grafu 1 lze vyčíst, že s rostoucím rádiusem a výškou umístění žebra stoupá taktéž rychleji i koeficient bezpečnosti. Pro rádiusy v rozmezí 100mm až 350mm nastává zlom ve výšce od 410mm do 450mm. Pouze pro rádius $R = 400\text{mm}$ dochází ke zlomu okolo hodnoty 490mm. Z tohoto důvodu byly optimalizací navrženy dvě varianty.

9.3 Varianta I

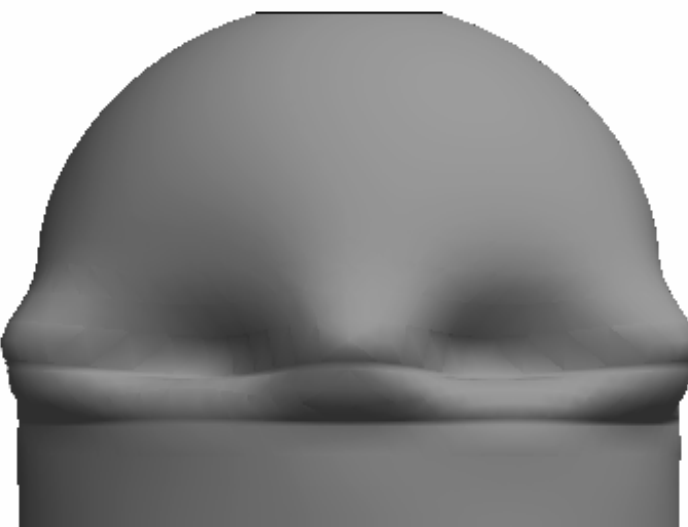
U první optimalizované varianty činil koeficient bezpečnosti pro tloušťku 13mm 3,687. Tato varianta vychází z grafu 1, tj. výška umístění žebra v rozmezí 410mm až 490mm.



Obr. 23 Rozměry první optimalizované varianty

9.3.1 Nádoba vystavena krátkodobým účinkům

Mode Shape : 1 Load Factor = 2.0284
Deformation scale: 124.226

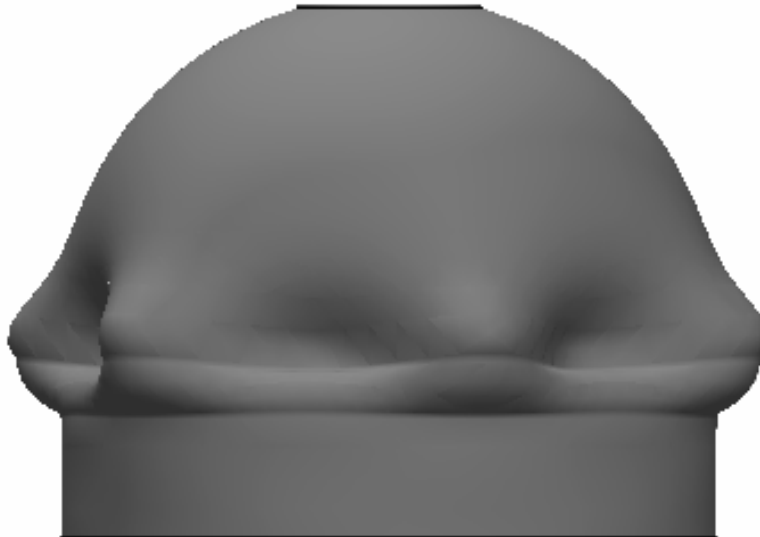


Obr. 24 Vzhled deformace při ztrátě stability ($E = 800\text{MPa}$)

Modul:	800MPa
Tloušťka stěny:	10,3mm
Typ skořepiny:	Tenkostěnná
Koeficient bezpečnosti:	2,028
Spotřeba materiálu:	155 947,11cm ³
Hmotnost:	146,28kg

9.3.2 Nádobu zatížená po dobu 10h

Mode Shape : 1 Load Factor = 2.0237
Deformation scale: 122.23

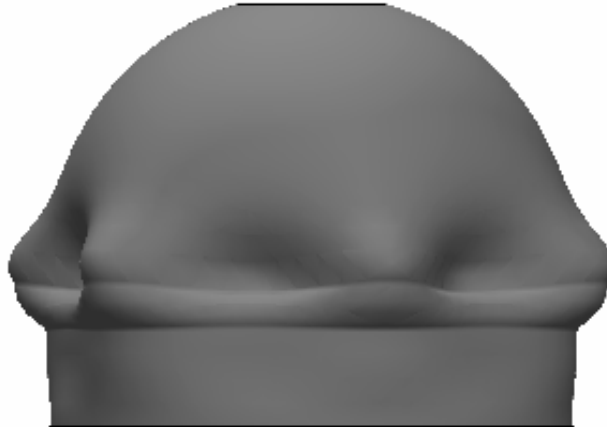


Obr. 25 Vzhled deformace při ztrátě stability ($E_1 = 600\text{MPa}$)

Modul tečení:	600MPa
Tloušťka stěny:	11,5mm
Typ skořepiny:	Tenkostěnná
Koeficient bezpečnosti:	2,024
Spotřeba materiálu:	174 116,10cm ³
Hmotnost:	163,32kg

9.3.3 Nádobu zatížená po dobu 1000h

Mode Shape : 1 Load Factor = 2.0253
Deformation scale: 121.234

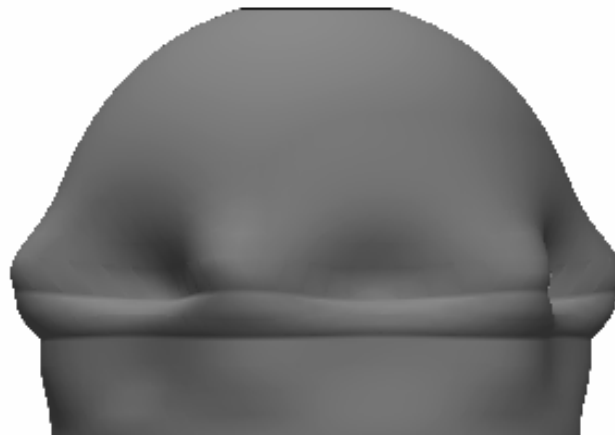


Obr. 26 Vzhled deformace při ztrátě stability ($E_3 = 400\text{MPa}$)

Modul tečení:	400MPa
Tloušťka stěny:	13,5mm
Typ skořepiny:	Tenkostěnná
Koeficient bezpečnosti:	2,025
Spotřeba materiálu:	204 398,02cm ³
Hmotnost:	191,73kg

9.3.4 Nádobu zatížená po dobu 1 roku

Mode Shape : 1 Load Factor = 2.0252
Deformation scale: 123.627



Obr. 27 Vzhled deformace při ztrátě stability ($E_r = 300\text{MPa}$)

Modul tečení:	300MPa
Tloušťka stěny:	15,2mm
Typ skořepiny:	Tenkostěnná
Koeficient bezpečnosti:	2,025
Spotřeba materiálu:	230 137,99cm ³
Hmotnost:	215,87kg

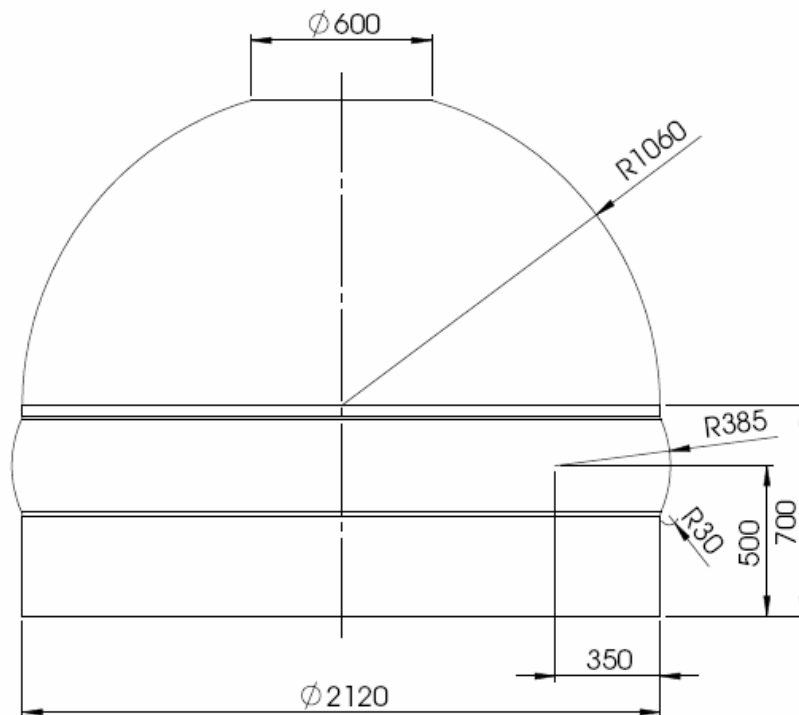
9.3.5 Sumarizace výsledků

Doba zatížení	Tloušťka [mm]	Spotřeba mat. [cm³]	Hmotnost [kg]
krátkodobá	10,3	155 947,11	146,28
10h	11,5	174 116,09	163,32
1000h	13,5	204 398,02	191,73
1rok	15,2	230 137,99	215,87

Tab.4 Sumarizace výsledků pro variantu I

9.4 Varianta II

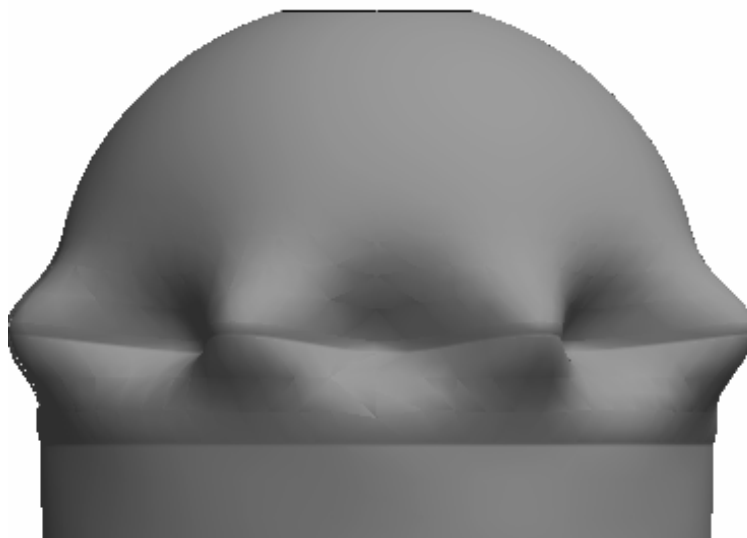
Druhou optimalizovanou variantou byla výška umístění žebra okolo hodnoty 490mm. V tomto případě činil koeficient bezpečnosti 3,320 pro tloušťku stěny 13mm.



Obr. 28 Rozměry druhé optimalizované varianty

9.4.1 Nádoba vystavena krátkodobým účinkům

Mode Shape : 1 Load Factor = 2.009
Deformation scale: 148.907

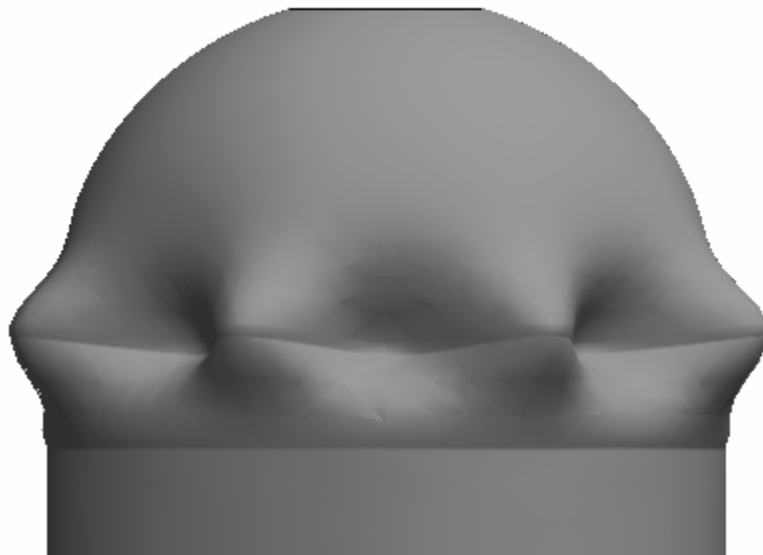


Obr. 29 Vzhled deformace při ztrátě stability ($E = 800\text{MPa}$)

Modul:	800MPa
Tloušťka stěny:	10,8mm
Typ skořepiny:	Tenkostěnná
Koeficient bezpečnosti:	2,009
Spotřeba materiálu:	162 824,60cm ³
Hmotnost:	152,73kg

9.4.2 Nádobu zatížená po dobu 10h

Mode Shape : 1 Load Factor = 2.0045
Deformation scale: 147.483

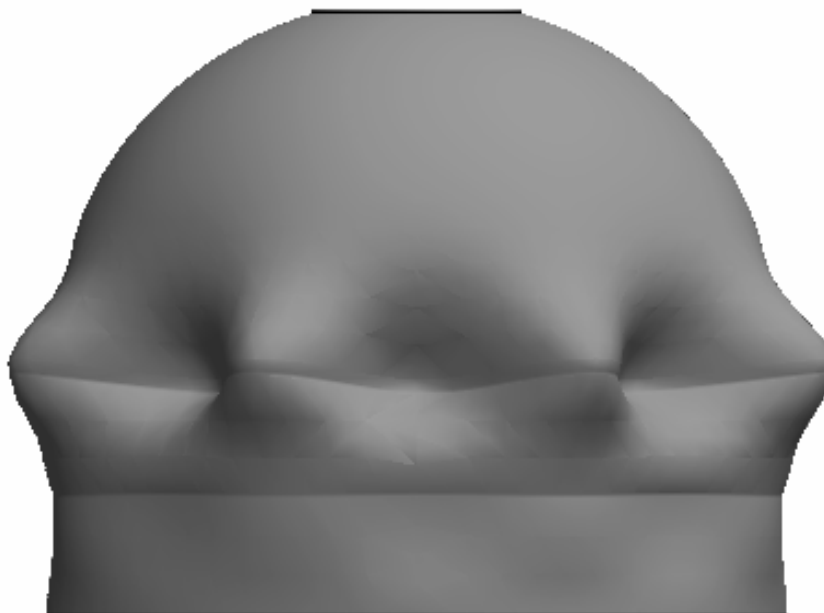


Obr. 30 Vzhled deformace při ztrátě stability ($E_1 = 600\text{MPa}$)

Modul tečení:	600MPa
Tloušťka stěny:	12 mm
Typ skořepiny:	Tenkostěnná
Koeficient bezpečnosti:	2,005
Spotřeba materiálu:	180 916,64cm ³
Hmotnost:	169,70kg

9.4.3 Nádobu zatížená po dobu 1000h

Mode Shape : 1 Load Factor = 2.0276
Deformation scale: 144.435

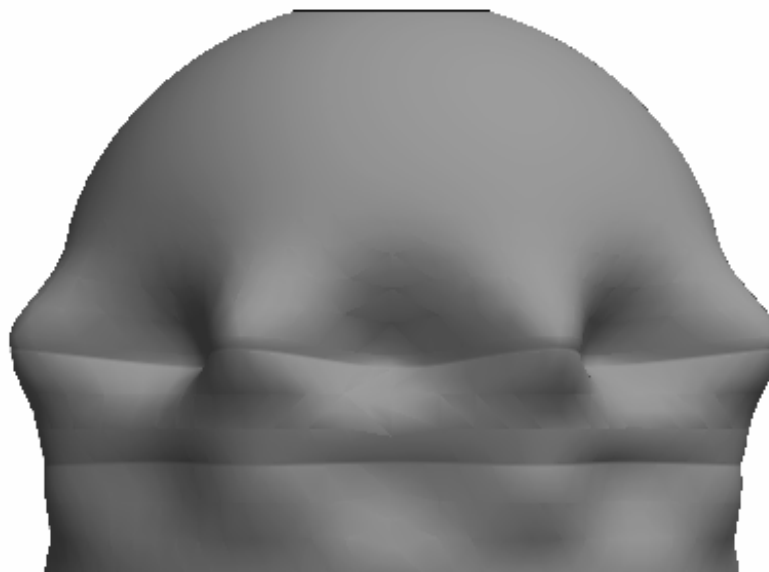


Obr. 31 Vzhled deformace při ztrátě stability ($E_3 = 400\text{MPa}$)

Modul tečení:	400MPa
Tloušťka stěny:	14 mm
Typ skořepiny:	Tenkostěnná
Koeficient bezpečnosti:	2,028
Spotřeba materiálu:	211 070,35cm ³
Hmotnost:	197,98kg

9.4.4 Nádobu zatížená po dobu 1 roku

Mode Shape : 1 Load Factor = 2.0248
Deformation scale: 144.234



Obr. 32 Vzhled deformace při ztrátě stability ($E_r = 300\text{MPa}$)

Modul tečení:	300MPa
Tloušťka stěny:	15,6mm
Typ skořepiny:	Tenkostěnná
Koeficient bezpečnosti:	2,025
Spotřeba materiálu:	235 193,63cm ³
Hmotnost:	220,61kg

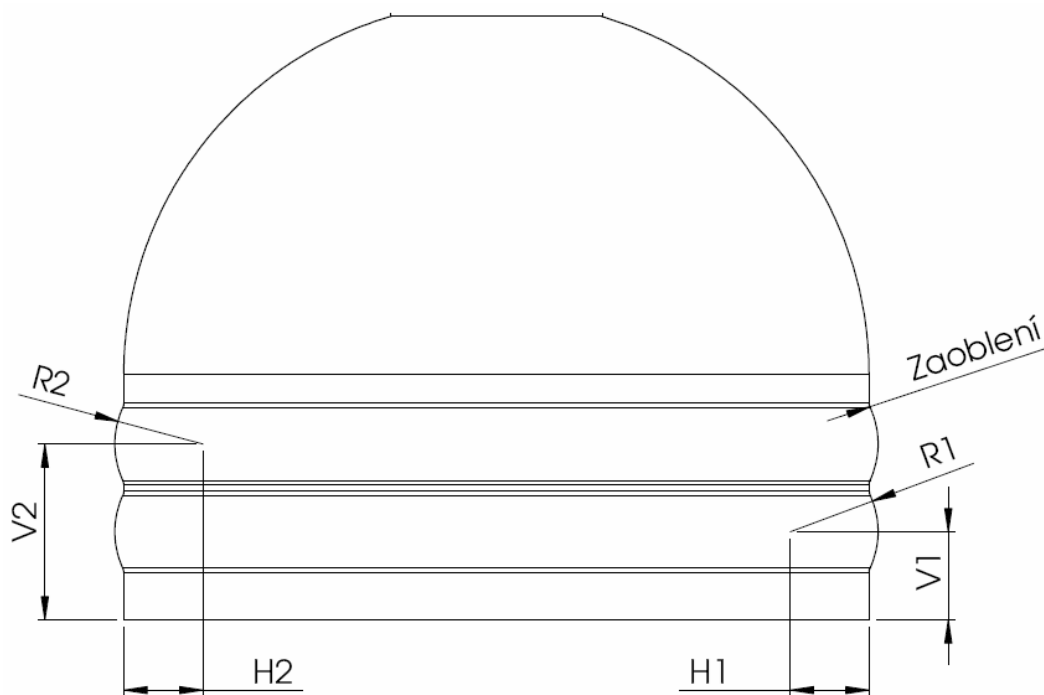
9.4.5 Sumarizace výsledků

Doba zatížení	Tloušťka [mm]	Spotřeba mat. [cm³]	Hmotnost [kg]
krátkodobá	10,8	162 824,60	152,73
10h	12	180 916,64	169,70
1000h	14	211 070,35	197,98
1rok	15,6	235 193,63	220,61

Tab.5 Sumarizace výsledků pro variantu II

10 DESIGN NÁDOBY VYZTUŽENÉ DVĚMI ŽEBRY

Druhou optimalizační variantou jsou dvě žebra, jenž se nacházejí na válcové stěně nádoby.

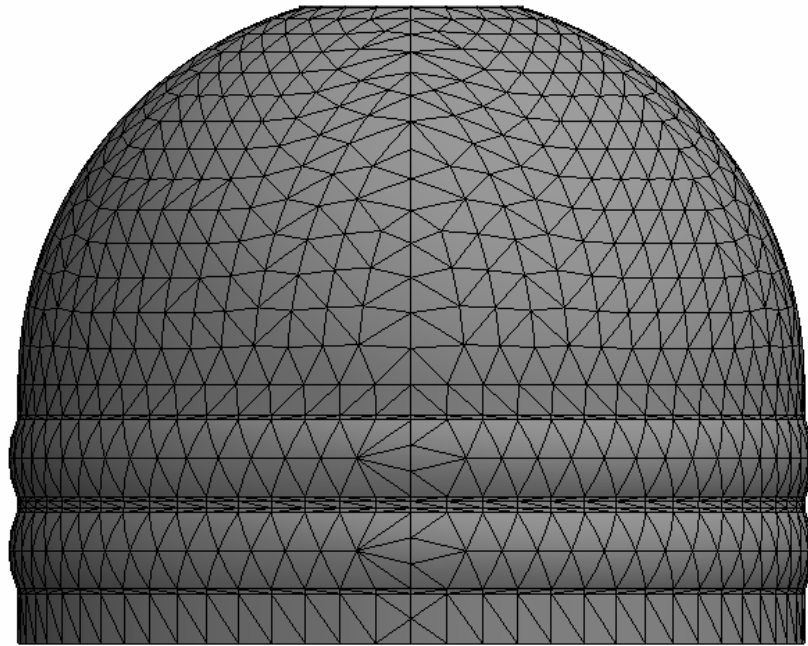


Obr. 33 Tvar optimalizované nádoby

10.1 Parametry simulace

Parametry sítě:

Typ modelu:	skořepina
Typ skořepiny:	tenkostěnná
Velikost strany trojúhelníku:	100 mm
Tolerance:	5 mm



Obr. 34 Vzhled sítě

Ostatní konstanty:

Modul:	800 MPa
Tloušťka stěny:	13 mm
Zaoblení:	30 mm

10.2 Data optimalizace

Pro získání představy o závislosti jednotlivých parametrů modelu na koeficientu bezpečnosti byly vytvořeny tyto návrhy:

R1: 100 – 400mm, krok 75mm

H1: 75 – 375mm

V1: 250 – 400mm, krok 50mm

R2: 100 – 400mm, krok 75mm

H2: 75 – 375mm

V2: 450 – 600mm, krok 50mm

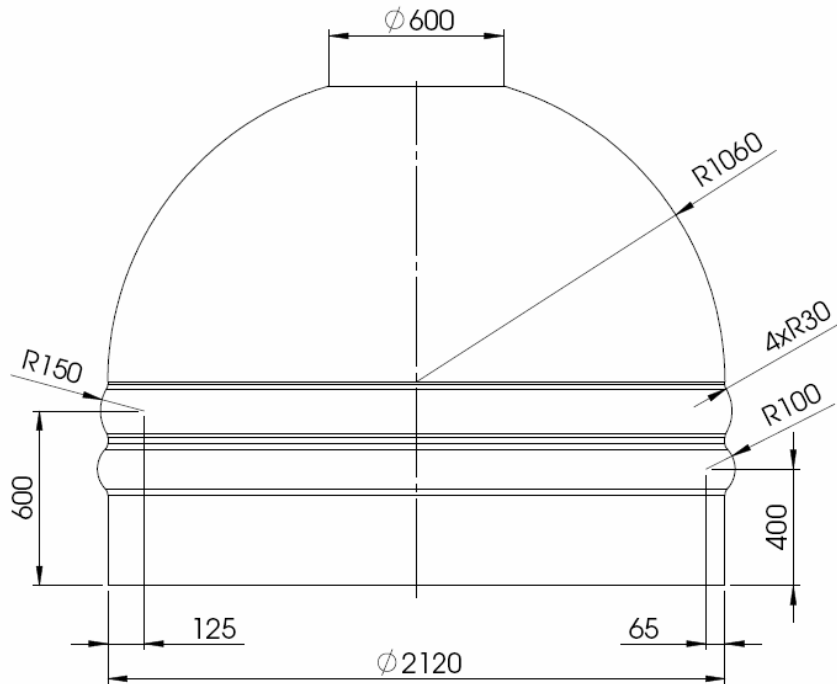
V tabulce 6 jsou uvedeny návrhy, u kterých koeficient bezpečnosti vyšel větší než 4.

	R1 [mm]	V1 [mm]	H1 [mm]	R2 [mm]	V2 [mm]	H2 [mm]	Koef.bezpečnosti [1]
Návrh 42	100	350	75	100	550	75	4,158
Návrh 43	175	350	150	100	550	75	4,121
Návrh 55	100	350	75	175	550	150	4,331
Návrh 56	175	350	150	175	550	150	4,268
Návrh 66	100	350	75	250	550	225	4,293
Návrh 72	100	300	75	325	550	300	4,088
Návrh 80	100	300	75	400	550	375	4,143
Návrh 81	175	300	150	400	550	375	4,095
Návrh 97	100	400	75	100	600	75	4,022
Návrh 98	175	400	150	100	600	75	4,368
Návrh 99	250	400	225	100	600	75	4,407
Návrh 111	175	350	150	175	600	150	4,019
Návrh 115	100	400	75	175	600	150	4,003
Návrh 116	175	400	150	175	600	150	4,325
Návrh 127	100	350	75	250	600	225	4,092
Návrh 128	175	350	150	250	600	225	4,147
Návrh 129	250	350	225	250	600	225	4,101
Návrh 130	325	350	300	250	600	225	4,088
Návrh 142	100	350	75	325	600	300	4,146
Návrh 143	175	350	150	325	600	300	4,192
Návrh 144	250	350	225	325	600	300	4,139
Návrh 155	100	350	75	400	600	375	4,160
Návrh 156	175	350	150	400	600	375	4,265

Tab.6 Návrhy s koeficientem bezpečnosti > 4 pro $E = 800\text{MPa}$

10.3 Varianta I

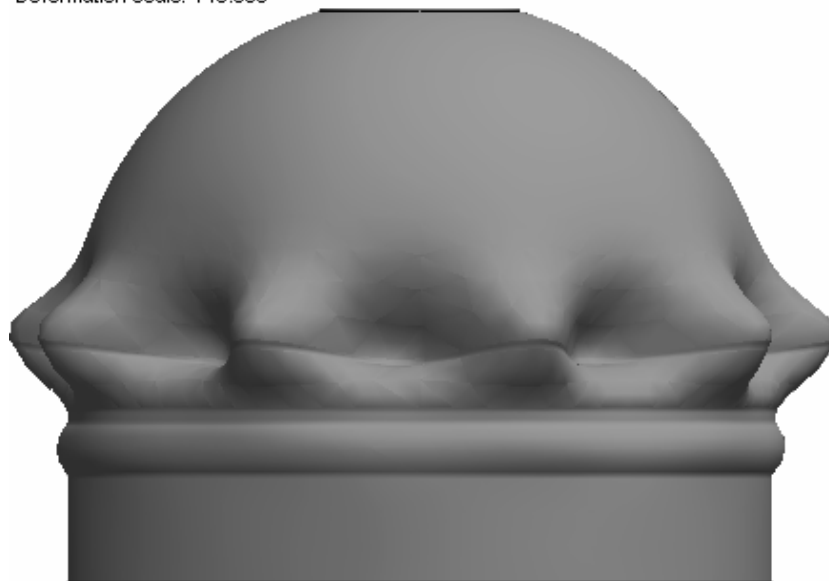
U první optimalizované varianty bylo docíleno hodnoty koeficientu bezpečnosti 5,335 pro tloušťku stěny 13mm.



Obr. 35 Rozměry první optimalizované varianty

10.3.1 Nádobu vystavena krátkodobým účinkům

Mode Shape : 1 Load Factor = 2.0542
Deformation scale: 148.058

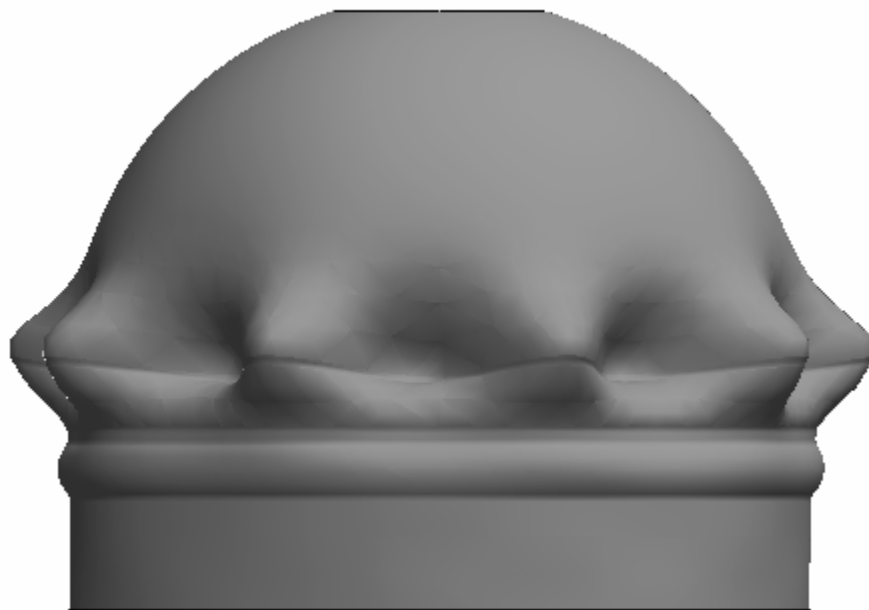


Obr. 36 Vzhled deformace při ztrátě stability ($E = 800\text{MPa}$)

Modul:	800MPa
Tloušťka stěny:	8,7 mm
Typ skořepiny:	Tenkostěnná
Koeficient bezpečnosti:	2,054
Spotřeba materiálu:	132 114,60cm ³
Hmotnost:	123,92kg

10.3.2 Nádoba zatížená po dobu 10h

Mode Shape : 1 Load Factor = 2.0321
Deformation scale: 144.582

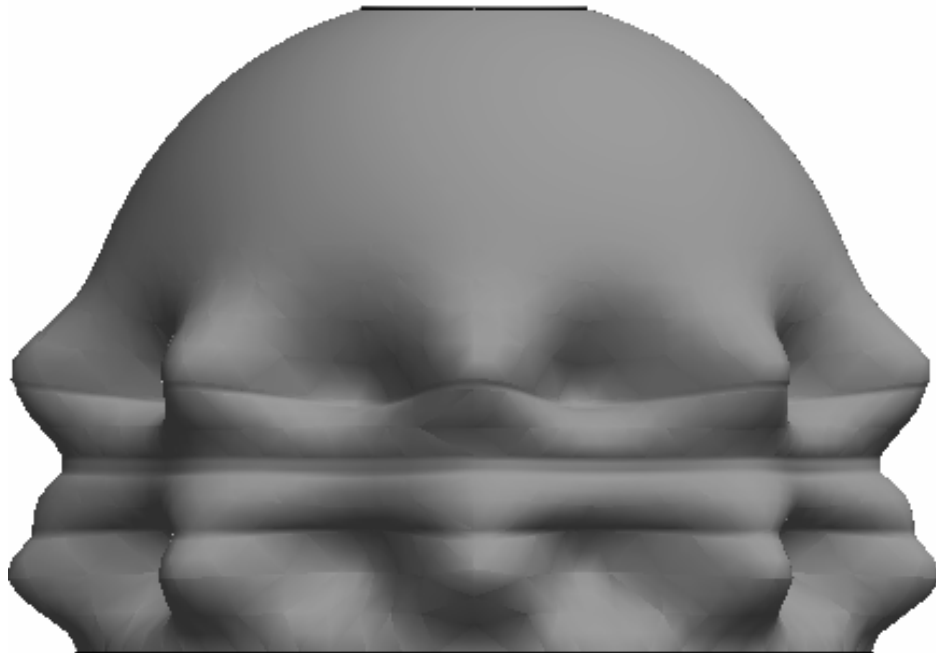


Obr. 37 Vzhled deformace při ztrátě stability ($E_1 = 600\text{MPa}$)

Modul tečení:	600MPa
Tloušťka stěny:	9,7 mm
Typ skořepiny:	Tenkostěnná
Koeficient bezpečnosti:	2,032
Spotřeba materiálu:	147 300,41cm ³
Hmotnost:	138,17kg

10.3.3 Nádobá zatížená po dobu 1000h

Mode Shape : 1 Load Factor = 2.0093
Deformation scale: 218.969

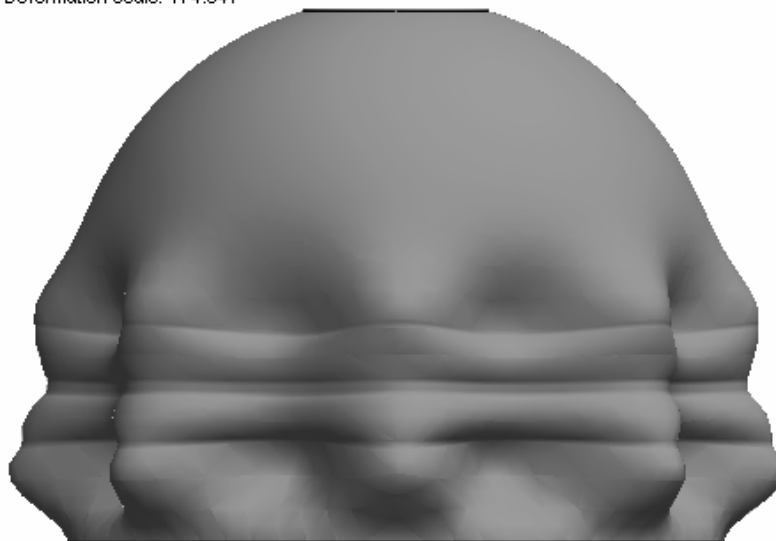


Obr. 38 Vzhled deformace při ztrátě stability ($E_3 = 400\text{MPa}$)

Modul tečení:	400MPa
Tloušťka stěny:	11,4mm
Typ skořepiny:	Tenkostěnná
Koeficient bezpečnosti:	2,001
Spotřeba materiálu:	173 116,48cm ³
Hmotnost:	162,38kg

10.3.4 Nádobu zatížená po dobu 1 roku

Mode Shape : 1 Load Factor = 2.0005
Deformation scale: 174.541



Obr. 39 Vzhled deformace při ztrátě stability ($E_r = 300\text{MPa}$)

Modul tečení:	300MPa
Tloušťka stěny:	13 mm
Typ skořepiny:	Tenkostěnná
Koeficient bezpečnosti:	2,001
Spotřeba materiálu:	197 414,18cm ³
Hmotnost:	185,17kg

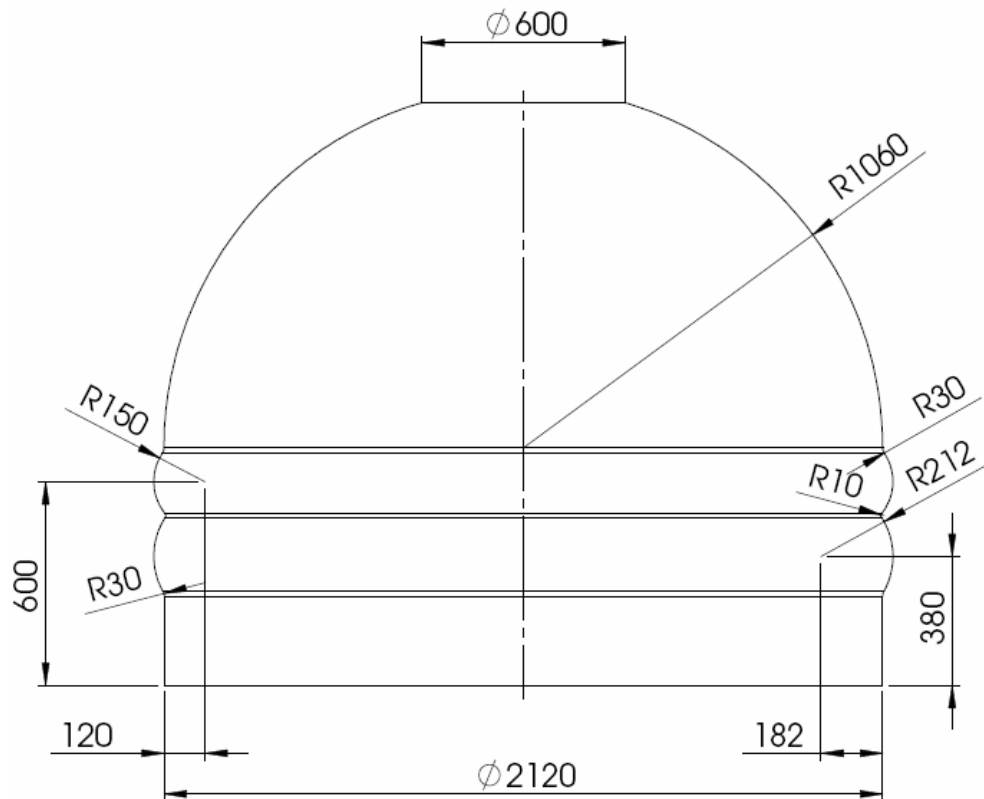
10.3.5 Sumarizace výsledků

Doba zatížení	Tloušťka [mm]	Spotřeba mat. [cm ³]	Hmotnost [kg]
krátkodobá	8,7	132 114,60	123,92
10h	9,7	147 300,41	138,17
1000h	11,4	173 116,48	162,38
1rok	13,0	197 414,18	185,17

Tab.7 Sumarizace výsledků pro variantu I

10.4 Varianta II

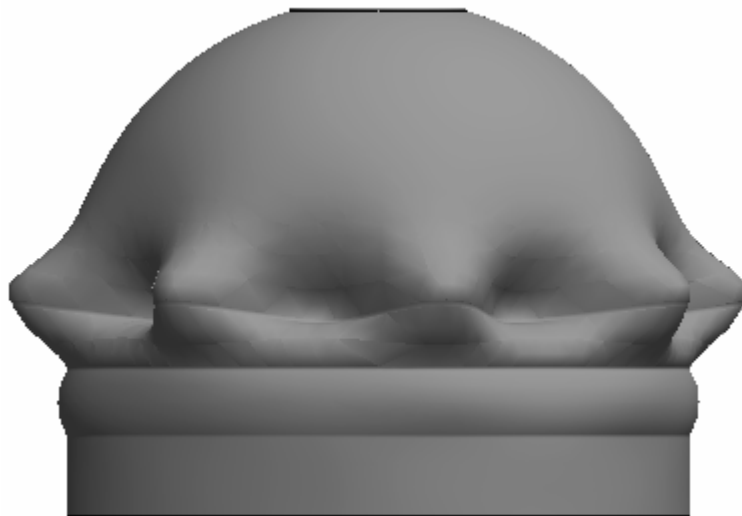
Druhá varianta dosahuje koeficient bezpečnosti 5,275 pro tloušťku stěny 13mm.



Obr. 40 Rozměry druhé optimalizované varianty

10.4.1 Nádoba vystavena krátkodobým účinkům

Mode Shape : 1 Load Factor = 2.0439
Deformation scale: 145.469

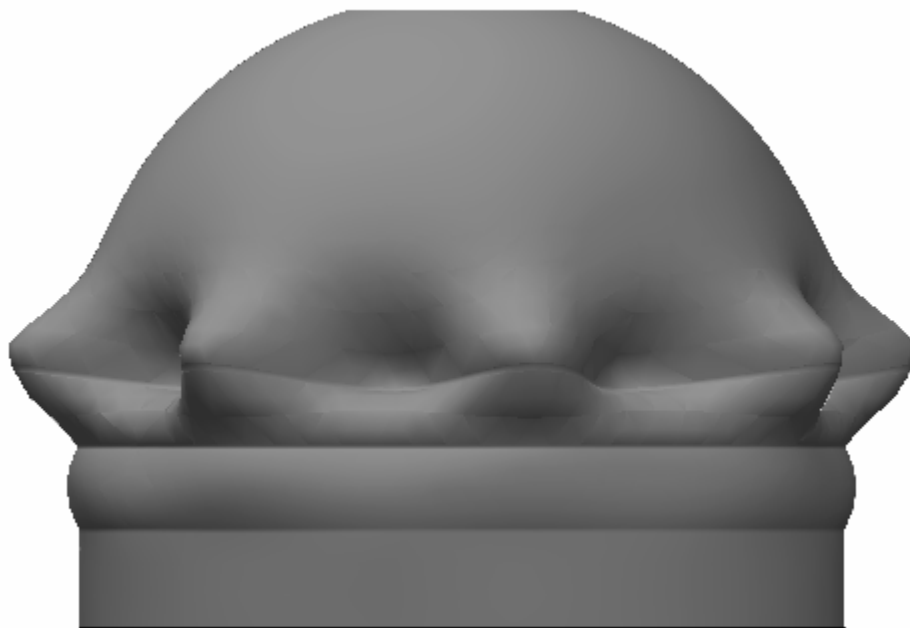


Obr. 41 Vzhled deformace při ztrátě stability ($E = 800\text{MPa}$)

Modul:	800MPa
Tloušťka stěny:	8,8mm
Typ skořepiny:	Tenkostěnná
Koeficient bezpečnosti:	2,044
Spotřeba materiálu:	133 649,06cm ³
Hmotnost:	125,36kg

10.4.2 Nádoba zatížená po dobu 10h

Mode Shape : 1 Load Factor = 2.0251
Deformation scale: 143.714

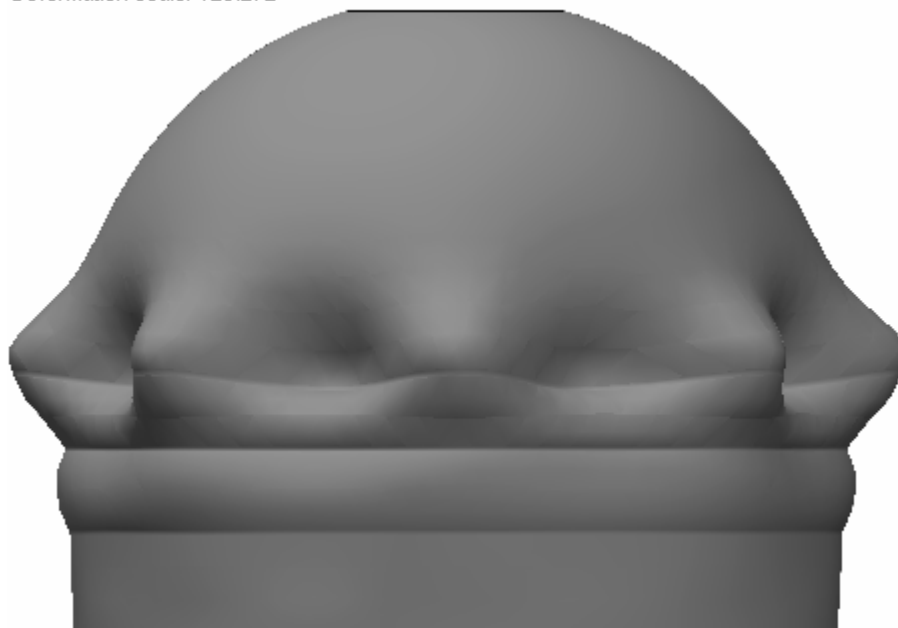


Obr. 42 Vzhled deformace při ztrátě stability ($E_1 = 600\text{MPa}$)

Modul tečení:	600MPa
Tloušťka stěny:	9,9 mm
Typ skořepiny:	Tenkostěnná
Koeficient bezpečnosti:	2,025
Spotřeba materiálu:	150 355,45cm ³
Hmotnost:	141,03kg

10.4.3 Nádobu zatížená po dobu 1000h

Mode Shape : 1 Load Factor = 2.0215
Deformation scale: 123.272

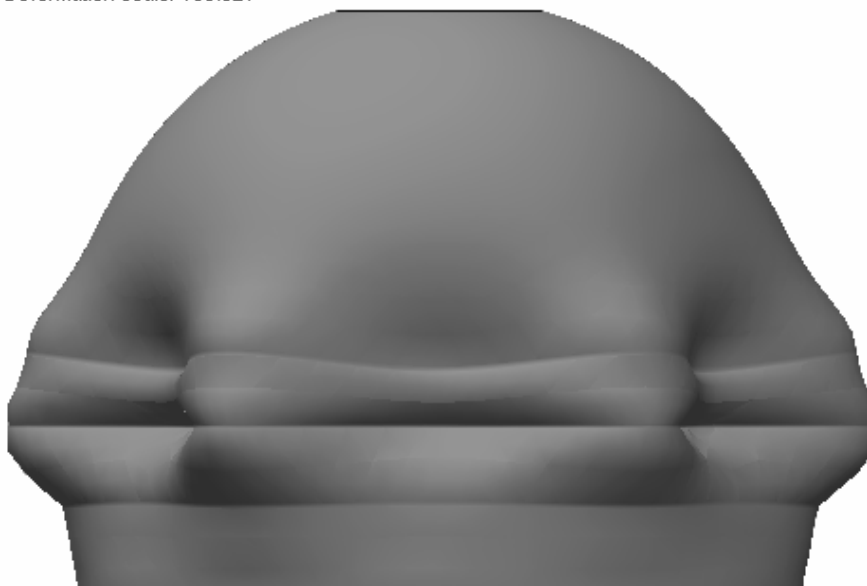


Obr. 43 Vzhled deformace při ztrátě stability ($E_3 = 400\text{MPa}$)

Modul tečení:	400MPa
Tloušťka stěny:	11,6mm
Typ skořepiny:	Tenkostěnná
Koeficient bezpečnosti:	2,022
Spotřeba materiálu:	176 174,61cm ³
Hmotnost:	165,25kg

10.4.4 Nádoba zatížená po dobu 1 roku

Mode Shape : 1 Load Factor = 2.0097
Deformation scale: 133.321



Obr. 44 Vzhled deformace při ztrátě stability ($E_r = 300\text{MPa}$)

Modul tečení:	300MPa
Tloušťka stěny:	13,1mm
Typ skořepiny:	Tenkostěnná
Koeficient bezpečnosti:	2,001
Spotřeba materiálu:	198 956,43cm ³
Hmotnost:	186,62kg

10.4.5 Sumarizace výsledků

Doba zatížení	Tloušťka [mm]	Spotřeba mat. [cm³]	Hmotnost [kg]
krátkodobá	8,8	133 649,06	125,36
10h	9,9	150 355,45	141,03
1000h	11,6	176 174,61	165,25
1rok	13,1	198 956,43	186,62

Tab.8 Sumarizace výsledků pro variantu II

11 KONFRONTACE VÝSLEDKŮ

Dosažené výsledky nejsou konfrontovány z hlediska celkové ceny polotovaru, jelikož se snižující se potřebnou tloušťkou stěny výrobku klesá energie potřebná pro výrobu jednoho kusu i doba výrobního cyklu. Z těchto důvodů byly pro porovnání jednotlivých výsledků zvoleny tyto veličiny:

- a) tloušťka
- b) spotřeba materiálu
- c) hmotnost jednoho kusu výrobku
- d) relativní spotřeba materiálu

Vyrobením žeber na formě nádrže lze docílit úspory materiálu až o 30%. První varianta návrhu s dvěma žebry vyžaduje při ročním zatížení stejnou tloušťku jako nádoba bez žeber po vyčerpání. Rozdíl hmotností způsobený žebry činí méně než 3kg.

Celkově bylo dosahováno lepších výsledků (vyššího koeficientu bezpečnosti při tloušťce stěny 13mm) u nádoby s dvěma žebry vůči nádobě s jedním žebrem a nádobě bez žebra. Návrh žeber musí být podpořen výpočtem, neboť lze navrhnout žebra, která nádobu nevyztužují (koeficient bezpečnosti zůstává stejný), nebo ještě zhoršují situaci (koeficient bezpečnosti klesá).

Vypočtené hodnoty jsou ovšem pouze teoretické, jelikož výsledná stabilita nádrže je závislá na mnoha dalších faktorech jako například:

- a) přesnost výroby formy
- b) deformace vzniklé při chladnutí a vytahování výrobku z formy
- c) poškození nádoby v důsledku manipulace
- d) technika obsypávání nádrže
- e) typ obsypového materiálu

Úprava formy by měla být ovlivněna počtem vyrobených kusů za zvolené období. Při malém využití formy by úprava nemusela být rentabilní, popřípadě by byla dlouhá návratnost investice.

Doba zatížení	Veličina	Bez žebra	1 žebro		2 žebra	
			Varianta I	Varianta II	Varianta I	Varianta II
Krátkod.	Tloušťka [mm]	13,0	10,3	10,8	8,7	8,8
	Spotř. mat. [cm ³]	194 524	155 947	162 824	132 115	133 649
	Hmotnost [kg]	182,46	146,28	152,73	123,92	125,36
	Spotř. mat. [%]	100,00	80,17	83,70	67,92	68,71
10h	Tloušťka [mm]	14,5	11,5	12,0	9,7	9,9
	Spotř. mat. [cm ³]	216 970	174 116	180 917	147 300	150 355
	Hmotnost [kg]	203,52	163,32	169,7	138,17	141,03
	Spotř. mat. [%]	100,00	80,25	83,38	67,89	69,30
1000h	Tloušťka [mm]	17,0	13,5	14,0	11,4	11,6
	Spotř. mat. [cm ³]	254 380	204 398	211 070	173 116	176 174
	Hmotnost [kg]	238,61	191,73	197,98	162,38	165,25
	Spotř. mat. [%]	100,00	80,35	82,97	68,05	69,26
1rok	Tloušťka [mm]	19,1	15,2	15,6	13,0	13,1
	Spotř. mat. [cm ³]	285 805	230 138	235 194	197 414	198 956
	Hmotnost [kg]	268,09	215,87	220,61	185,17	186,62
	Spotř. mat. [%]	100,00	80,52	82,29	69,07	69,61

Tab.9 Konfrontace výsledků

12 NÁDOBA VYZTUŽENÁ KRÁTKÝMI SKELNÝMI VLÁKNY

Pro výpočet modulu tečení u nádoby vyztužené krátkými vlákny, která je zatížena po dobu 1 000 hodin, byla užita Halpin – Tsaiova rovnice modifikovaná pro neusměrněná vlákna. Hmotnostní obsah skelných vláken činí 30%.

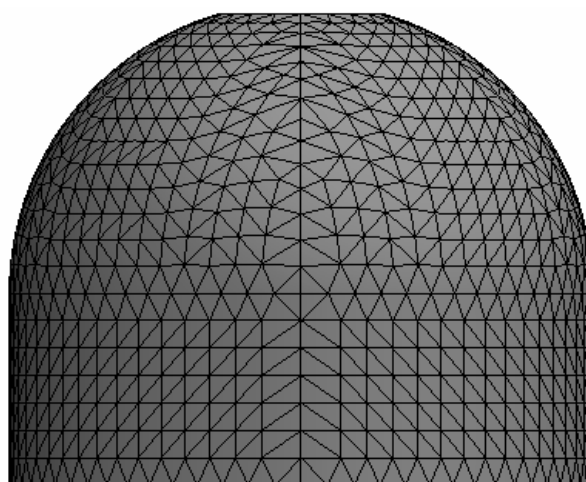
12.1 Materiál

Vlastnosti:

Poissonova konstanta (ν)	0,4
Modul tečení [MPa] - 1000 hodin	1 450

12.2 Parametry sítě

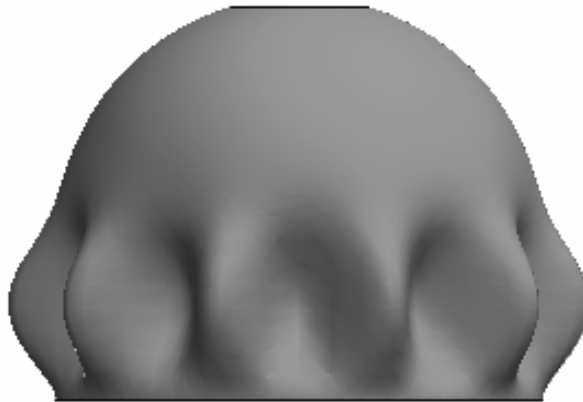
Typ modelu:	skořepina
Typ skořepiny:	tenkostěnná
Velikost strany trojúhelníku:	100 mm
Tolerance:	5 mm
Počet nodů:	6 104
Počet elementů:	3 041



Obr. 45 Vytvořená síť

12.3 Nádoba zatížená po dobu 1000h

Mode Shape : 1 Load Factor = 2.0279
Deformation scale: 241.146



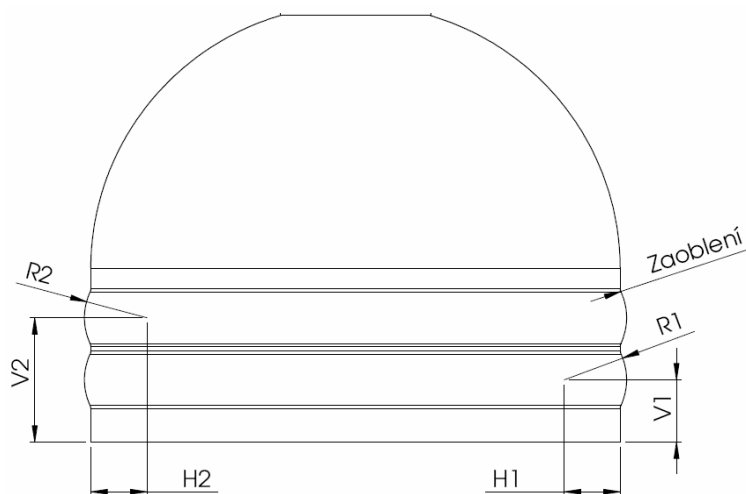
Obr. 46 Vzhled deformace při ztrátě stability ($E_{30\%GF} = 1\,450\text{MPa}$)

Tloušťka stěny:	10,2 mm
Koeficient bezpečnosti:	2,028
Spotřeba materiálu:	152 625,59cm ³

Nádoba zatížená po dobu 1000h, která je vyztužená 30% skelných vláken, vyžaduje minimální tloušťku stěny 10,2mm, což činí vůči původním 17mm úsporu 40% tloušťky.

12.4 Optimalizace

Jelikož u dříve vypočtených výsledků bylo dosahováno vyššího koeficientu bezpečnosti u nádob vyztuženými dvěma žebry, je nádoba optimalizována také pro dvě žebra.

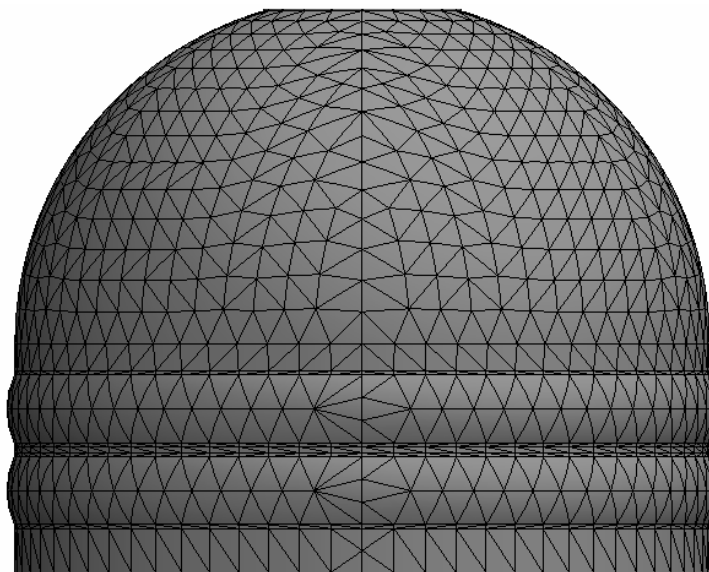


Obr. 47 Tvar optimalizované nádoby

12.4.1 Parametry simulace

Parametry sítě:

Typ modelu:	skořepina
Typ skořepiny:	tenkostěnná
Velikost strany trojúhelníku:	100 mm
Tolerance:	5 mm



Obr. 48 Vzhled sítě

Ostatní konstanty:

Tloušťka stěny:	13 mm
Zaoblení:	30 mm

12.4.2 Data optimalizace

Pro získání představy o závislosti jednotlivých parametrů modelu na koeficientu bezpečnosti byly vytvořeny tyto návrhy:

R1: 100 – 400mm, krok 75mm	R2: 100 – 400mm, krok 75mm
H1: 75 – 375mm	H2: 75 – 375mm
V1: 250 – 400mm, krok 50mm	V2: 450 – 600mm, krok 50mm

	R1 [mm]	V1 [mm]	H1 [mm]	R2 [mm]	V2 [mm]	H2 [mm]	Koef.bezpečnosti [1]
Návrh 42	100	350	75	100	550	75	7,537
Návrh 43	175	350	150	100	550	75	7,470
Návrh 55	100	350	75	175	550	150	7,850
Návrh 56	175	350	150	175	550	150	7,736
Návrh 66	100	350	75	250	550	225	7,781
Návrh 72	100	300	75	325	550	300	7,409
Návrh 80	100	300	75	400	550	375	7,510
Návrh 81	175	300	150	400	550	375	7,422
Návrh 97	100	400	75	100	600	75	7,290
Návrh 98	175	400	150	100	600	75	7,918
Návrh 99	250	400	225	100	600	75	7,988
Návrh 111	175	350	150	175	600	150	7,284
Návrh 115	100	400	75	175	600	150	7,255
Návrh 116	175	400	150	175	600	150	7,839
Návrh 127	100	350	75	250	600	225	7,416
Návrh 128	175	350	150	250	600	225	7,516
Návrh 129	250	350	225	250	600	225	7,432
Návrh 130	325	350	300	250	600	225	7,409
Návrh 142	100	350	75	325	600	300	7,514
Návrh 143	175	350	150	325	600	300	7,598
Návrh 144	250	350	225	325	600	300	7,501
Návrh 155	100	350	75	400	600	375	7,541
Návrh 156	175	350	150	400	600	375	7,730

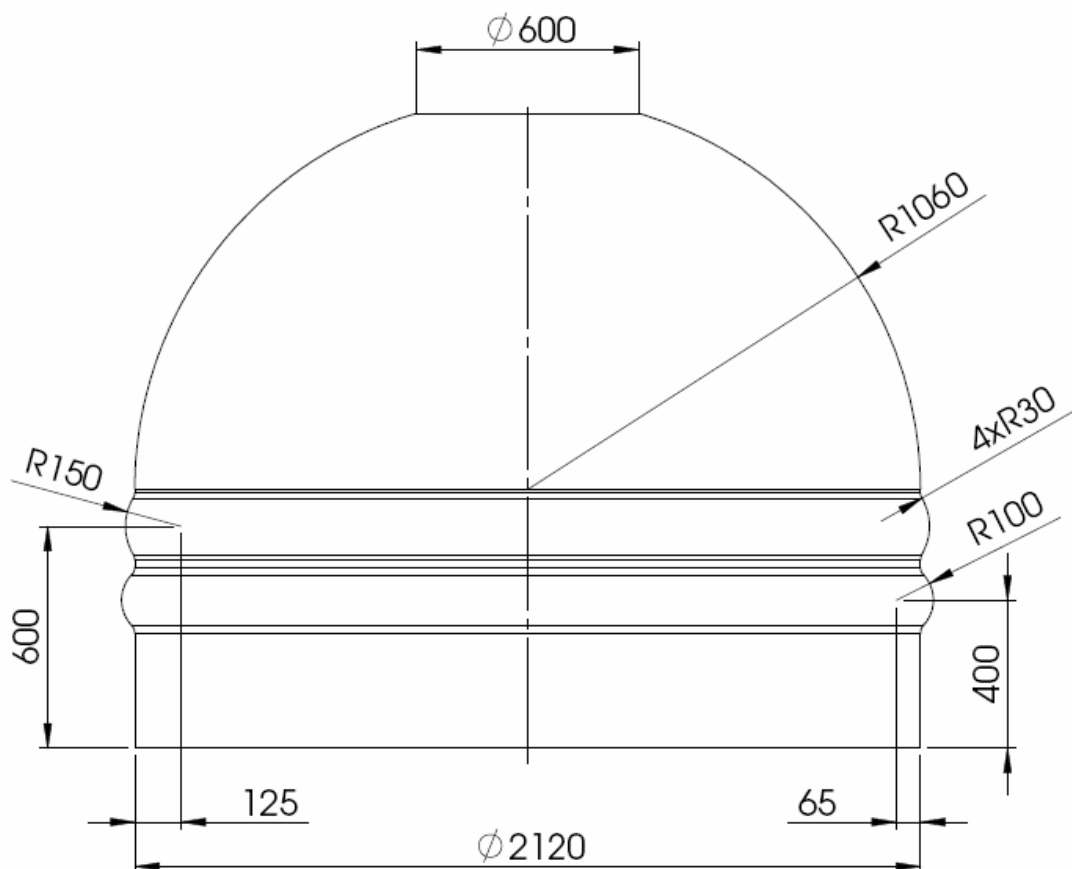
Tab.10 Návrhy s koeficientem bezpečnosti > 7,25

Návrhy s největším koeficientem bezpečnosti jsou dle tabulky 9 identické z tabulkou 6 (návrhy s koeficientem bezpečnosti > 4 pro $E = 800\text{MPa}$). Z toho vychází i vzhled optimalizované nádoby.

Jelikož tvar první optimalizované nádoby je výhodnější z hlediska vypočtených výsledků, byla využita tato varianta.

12.4.3 Optimalizovaná varianta

Tvar optimalizované varianty dosahuje pro tloušťku stěny 13mm koeficient bezpečnosti 9,670.

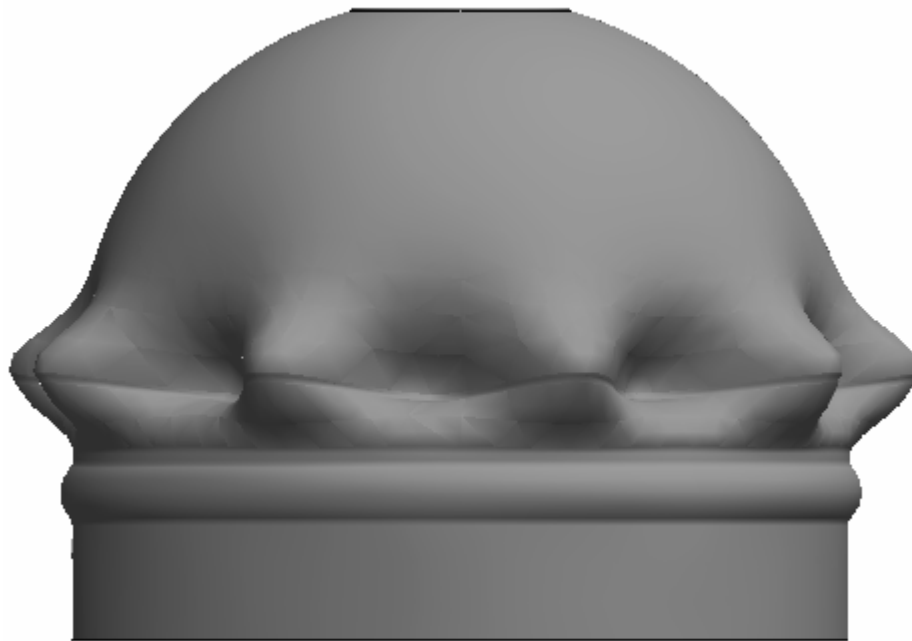


Obr. 49 Rozměry první optimální varianty

12.4.4 Nádoba zatížená po dobu 1000h

U nádoby zatížené po dobu 1000 hodin je minimální tloušťka stěny 6,9mm, což je o 4,5mm méně v porovnání se stejnou nádobou neobsahující skelná vlákna.

Mode Shape : 1 LoadFactor = 2.0432
Deformation scale: 149.671



Obr. 50 Vzhled deformace při ztrátě stability ($E_{30\%GF} = 1\,450\text{MPa}$)

Tloušťka stěny:	6,9 mm
Koeficient bezpečnosti:	2,043
Spotřeba materiálu:	104 780,30cm ³

ZÁVĚR

V diplomové práci jsem se zabýval optimalizací rotačně odlévané velkoobjemové nádoby. Jako materiál nádrže byl zvolen lineární nízkohustotní polyethylen (LLDPE) díky výhodným vlastnostem a relativně nízkým pořizovacím nákladům. Tyto vlastnosti se řídí normou EN 1778. Zatížení bylo simulováno dle normy 12566 – 3.

Byly vypočteny potřebné tloušťky pro zvolený časový interval za předpokladu nevyztužené nádoby. Následně byla dopočtena spotřeba materiálu (objem, hmotnost) a porovnány jednotlivé výsledky.

Při návrhu žebra byly optimalizovány postupně všechny rozměry a byl sledován trend a vliv jednotlivých parametrů na koeficient bezpečnosti. Díky těmto výsledkům byly navrhnuty dvě geometricky odlišné varianty, jenž dosahovaly obdobných výsledků spotřeby materiálu.

Analogicky byla optimalizována nádoba s dvěma žebry. Rovněž byly vytvořeny dvě varianty nádrže. Poté následovala konfrontace výsledků původní nádoby s variantami žebrových výztuží.

Na závěr byla navrhnutá a vypočtena varianta nádoby vyztužené krátkými skelnými vlákny. Tato nádoba nebyla konfrontována v důsledku změny užitého materiálu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Beall, Glenn, Rotational molding, materials, tooling, and processing. místo neznámé : Hanser/Gardner Publications, 1998. ISBN 1-56990-260-7.
- [2] Crawford, Roy J., Throne, James L., (2002), Rotational Molding Technology.. William Andrew Publishing/Plastics Design Library. Online verze dostupná na adrese: http://www.knovel.com/web/portal/browse/display?_EXT_KNOVEL_DISPLAY_bookid=444&VerticalID=0
- [3] Šuba O., Mechanické chování těles, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2009. ISBN 978 – 80 – 7318 – 792 – 7
- [4] Šuba O., Dimenzování a navrhování výrobků z polymerů, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010. ISBN 978 – 80 – 7318 – 948 – 8
- [5] Šuba O., Mechanika polymerů a kompozitů, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011. ISBN 978 – 80 – 7454 – 015 – 8
- [6] www.simona-plastics.cz
- [7] www.formoplast.com

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Název	Jednotka
D	Vzdálenost mezi povrchem terénu a bodem, ne nějž působí zatížení	[m]
E	Yongův modul	[MPa]
E_1	Modul tečení pro dobu 10h	[MPa]
E_3	Modul tečení pro dobu 1000h	[MPa]
$E_{30\%GF}$	Modul tečení pro dobu 1000h (mat. LLDPE + 30% skelných vláken)	[MPa]
E_r	Modul tečení pro dobu 1 roku	[MPa]
h	Výška nadloží mezi horním povrchem septiku a povrchem terénu	[m]
K	Součinitel úhlu tření pro různé druhy zeminy	[1]
p	Tlak	[MPa]
r	Poloměr válcové nádoby	[mm]
s	Tloušťka válcové nádoby	[mm]
ε_φ^M	Obvodová deformace pláště	[1]
ε_x^M	Membránová deformace pláště	[1]
ν	Poissonova konstanta	[1]
σ_φ	Obvodové napětí	[MPa]
σ_x	Osové (axiální) membránové napětí	[MPa]

SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Graf 1 Teplotní rozsah použitelnosti vybraných materiálů	25
Graf 2 Zastoupení produktů na evropském trhu v roce 1999	28
Graf 3 Trend koeficientu bezpečnosti na výšce	47
Obr. 1 Válcová nádrž	14
Obr. 2 Hranatá nádrž	15
Obr. 3 Příklad nádoby vyráběné spirálním navíjením	16
Obr. 4 Princip technologie rotačního odlévání	17
Obr. 5 Nejběžněji užívané polymery pro technologii rotačního odlévání [1].....	21
Obr. 6 Schéma válcové nádoby.....	29
Obr. 7 Osově (axiální) membránové napětí	29
Obr. 8 Obvodové síly	30
Obr. 9 Obvodová deformace	31
Obr. 10 Obvodová deformace	31
Obr. 11 Schéma nádoby	33
Obr. 12 Koncept nádoby	34
Obr. 13 Rozměry nádoby	35
Obr. 14 Zatížení nádoby.....	36
Obr. 15 Uchycení nádoby	37
Obr. 16 Vytvořená síť	38
Obr. 17 Vzhled deformace při ztrátě stability ($E = 800\text{MPa}$).....	39
Obr. 18 Vzhled deformace při ztrátě stability ($E_1 = 600\text{MPa}$).....	40
Obr. 19 Vzhled deformace při ztrátě stability ($E_3 = 400\text{MPa}$)	41
Obr. 20 Vzhled deformace při ztrátě stability ($E_r = 300\text{MPa}$)	42
Obr. 21 Tvar optimalizované nádoby	44
Obr. 22 Vzhled sítě	44
Obr. 23 Rozměry první optimalizované varianty.....	48
Obr. 24 Vzhled deformace při ztrátě stability ($E = 800\text{MPa}$).....	48
Obr. 25 Vzhled deformace při ztrátě stability ($E_1 = 600\text{MPa}$).....	49
Obr. 26 Vzhled deformace při ztrátě stability ($E_3 = 400\text{MPa}$)	50
Obr. 27 Vzhled deformace při ztrátě stability ($E_r = 300\text{MPa}$)	50

Obr. 28 Rozměry druhé optimalizované varianty	52
Obr. 29 Vzhled deformace při ztrátě stability ($E = 800\text{MPa}$).....	52
Obr. 30 Vzhled deformace při ztrátě stability ($E_1 = 600\text{MPa}$).....	53
Obr. 31 Vzhled deformace při ztrátě stability ($E_3 = 400\text{MPa}$)	54
Obr. 32 Vzhled deformace při ztrátě stability ($E_r = 300\text{MPa}$)	55
Obr. 33 Tvar optimalizované nádoby	56
Obr. 34 Vzhled sítě	57
Obr. 35 Rozměry první optimalizované varianty.....	59
Obr. 36 Vzhled deformace při ztrátě stability ($E = 800\text{MPa}$).....	59
Obr. 37 Vzhled deformace při ztrátě stability ($E_1 = 600\text{MPa}$).....	60
Obr. 38 Vzhled deformace při ztrátě stability ($E_3 = 400\text{MPa}$)	61
Obr. 39 Vzhled deformace při ztrátě stability ($E_r = 300\text{MPa}$)	62
Obr. 40 Rozměry druhé optimalizované varianty.....	63
Obr. 41 Vzhled deformace při ztrátě stability ($E = 800\text{MPa}$).....	63
Obr. 42 Vzhled deformace při ztrátě stability ($E_1 = 600\text{MPa}$).....	64
Obr. 43 Vzhled deformace při ztrátě stability ($E_3 = 400\text{MPa}$)	65
Obr. 44 Vzhled deformace při ztrátě stability ($E_r = 300\text{MPa}$)	66
Obr. 45 Vytvořená síť	69
Obr. 46 Vzhled deformace při ztrátě stability ($E_{30\%GF} = 1\,450\text{MPa}$).....	70
Obr. 47 Tvar optimalizované nádoby	70
Obr. 48 Vzhled sítě	71
Obr. 49 Rozměry první optimální varianty.....	73
Obr. 50 Vzhled deformace při ztrátě stability ($E_{30\%GF} = 1\,450\text{MPa}$).....	74

SEZNAM TABULEK

Tab.1 Výběr z technického datového listu pro materiál PE 100.....	26
Tab.2 Sumarizace výsledků pro původní model.....	43
Tab.3 Návrhy s koeficientem bezpečnosti $> 2,5$ pro $E = 800\text{MPa}$	46
Tab.4 Sumarizace výsledků pro variantu I.....	51
Tab.5 Sumarizace výsledků pro variantu II.....	55
Tab.6 Návrhy s koeficientem bezpečnosti > 4 pro $E = 800\text{MPa}$	58
Tab.7 Sumarizace výsledků pro variantu I.....	62
Tab.8 Sumarizace výsledků pro variantu II.....	66
Tab.9 Konfrontace výsledků.....	68
Tab.10 Návrhy s koeficientem bezpečnosti $> 7,25$	72

SEZNAM PŘÍLOH

P I: Design nádoby (1 žebro).....	82
P II: Design nádoby (2 žebra).....	91
P III: Nádobá s krátkými skelnými vlákny.....	98

PŘÍLOHA P I: DESIGN NÁDOBY (1 ŽEBRO)

$E = 800\text{MPa}$ $s = 13\text{mm}$	Rádus [mm]	Hloubka [mm]	Výška [mm]	Koeficient bezpečnosti [1]
Návrh 1	100	75	250	2,029
Návrh 2	150	75	250	1,809
Návrh 3	200	75	250	2,034
Návrh 4	250	75	250	1,560
Návrh 5	300	75	250	1,979
Návrh 6	350	75	250	1,541
Návrh 7	400	75	250	0,999
Návrh 9	150	125	250	1,910
Návrh 10	200	125	250	1,712
Návrh 11	250	125	250	2,073
Návrh 12	300	125	250	1,277
Návrh 13	350	125	250	1,565
Návrh 14	400	125	250	1,929
Návrh 17	200	175	250	1,836
Návrh 18	250	175	250	1,657
Návrh 19	300	175	250	2,025
Návrh 20	350	175	250	1,081
Návrh 21	400	175	250	1,250
Návrh 25	250	225	250	1,773
Návrh 26	300	225	250	1,653
Návrh 27	350	225	250	1,766
Návrh 28	400	225	250	1,010

E = 800MPa s = 13mm	Rádus [mm]	Hĺoubka [mm]	Výška [mm]	Koeficient bezpečnosti [1]
Návrh 33	300	275	250	1,724
Návrh 34	350	275	250	1,655
Návrh 35	400	275	250	1,563
Návrh 41	350	325	250	1,686
Návrh 42	400	325	250	1,639
Návrh 49	400	375	250	1,653
Návrh 50	100	75	290	2,202
Návrh 51	150	75	290	1,894
Návrh 52	200	75	290	1,995
Návrh 53	250	75	290	1,550
Návrh 54	300	75	290	1,854
Návrh 55	350	75	290	1,765
Návrh 56	400	75	290	0,912
Návrh 58	150	125	290	2,074
Návrh 59	200	125	290	1,805
Návrh 60	250	125	290	2,101
Návrh 61	300	125	290	1,369
Návrh 62	350	125	290	1,427
Návrh 63	400	125	290	1,765
Návrh 66	200	175	290	1,986
Návrh 67	250	175	290	1,751
Návrh 68	300	175	290	1,963
Návrh 69	350	175	290	1,205

E = 800MPa s = 13mm	Rádus [mm]	Hĺoubka [mm]	Výška [mm]	Koeficient bezpečnosti [1]
Návrh 70	400	175	290	1,136
Návrh 74	250	225	290	1,920
Návrh 75	300	225	290	1,756
Návrh 76	350	225	290	1,723
Návrh 77	400	225	290	1,138
Návrh 82	300	275	290	1,869
Návrh 83	350	275	290	1,738
Návrh 84	400	275	290	1,517
Návrh 90	350	325	290	1,829
Návrh 91	400	325	290	1,639
Návrh 98	400	375	290	1,795
Návrh 99	100	75	330	2,388
Návrh 100	150	75	330	2,037
Návrh 101	200	75	330	2,057
Návrh 102	250	75	330	1,444
Návrh 103	300	75	330	1,703
Návrh 104	350	75	330	2,044
Návrh 105	400	75	330	0,761
Návrh 107	150	125	330	2,268
Návrh 108	200	125	330	1,942
Návrh 109	250	125	330	2,113
Návrh 110	300	125	330	1,351
Návrh 111	350	125	330	1,339

E = 800MPa s = 13mm	Rádus [mm]	Hĺoubka [mm]	Výška [mm]	Koeficient bezpečnosti [1]
Návrh 112	400	125	330	1,773
Návrh 115	200	175	330	2,176
Návrh 116	250	175	330	1,905
Návrh 117	300	175	330	1,830
Návrh 118	350	175	330	1,343
Návrh 119	400	175	330	1,121
Návrh 123	250	225	330	2,107
Návrh 124	300	225	330	1,863
Návrh 125	350	225	330	1,613
Návrh 126	400	225	330	1,389
Návrh 131	300	275	330	2,067
Návrh 132	350	275	330	1,766
Návrh 133	400	275	330	1,459
Návrh 139	350	325	330	2,027
Návrh 140	400	325	330	1,672
Návrh 147	400	375	330	1,993
Návrh 148	100	75	370	2,620
Návrh 149	150	75	370	2,221
Návrh 150	200	75	370	2,223
Návrh 151	250	75	370	1,379
Návrh 152	300	75	370	1,521
Návrh 153	350	75	370	1,840
Návrh 154	400	75	370	0,946

E = 800MPa s = 13mm	Rádus [mm]	Hĺoubka [mm]	Výška [mm]	Koeficient bezpečnosti [1]
Návrh 156	150	125	370	2,525
Návrh 157	200	125	370	2,147
Návrh 158	250	125	370	1,981
Návrh 159	300	125	370	1,326
Návrh 160	350	125	370	1,405
Návrh 161	400	125	370	1,799
Návrh 164	200	175	370	2,430
Návrh 165	250	175	370	2,059
Návrh 166	300	175	370	1,710
Návrh 167	350	175	370	1,414
Návrh 168	400	175	370	1,367
Návrh 172	250	225	370	2,360
Návrh 173	300	225	370	1,902
Návrh 174	350	225	370	1,529
Návrh 175	400	225	370	1,250
Návrh 180	300	275	370	2,310
Návrh 181	350	275	370	1,794
Návrh 182	400	275	370	1,435
Návrh 188	350	325	370	2,275
Návrh 189	400	325	370	1,726
Návrh 196	400	375	370	2,245
Návrh 197	100	75	410	2,853
Návrh 198	150	75	410	2,490

E = 800MPa s = 13mm	Rádus [mm]	Hĺoubka [mm]	Výška [mm]	Koeficient bezpečnosti [1]
Návrh 199	200	75	410	2,204
Návrh 200	250	75	410	1,370
Návrh 201	300	75	410	1,705
Návrh 202	350	75	410	1,625
Návrh 203	400	75	410	1,249
Návrh 205	150	125	410	2,816
Návrh 206	200	125	410	2,275
Návrh 207	250	125	410	1,861
Návrh 208	300	125	410	1,240
Návrh 209	350	125	410	1,629
Návrh 210	400	125	410	2,008
Návrh 213	200	175	410	2,734
Návrh 214	250	175	410	2,081
Návrh 215	300	175	410	1,632
Návrh 216	350	175	410	1,117
Návrh 217	400	175	410	1,515
Návrh 221	250	225	410	2,672
Návrh 222	300	225	410	1,947
Návrh 223	350	225	410	1,516
Návrh 224	400	225	410	1,194
Návrh 229	300	275	410	2,632
Návrh 230	350	275	410	1,877
Návrh 231	400	275	410	1,357

E = 800MPa s = 13mm	Rádus [mm]	Hĺoubka [mm]	Výška [mm]	Koeficient bezpečnosti [1]
Návrh 237	350	325	410	2,609
Návrh 238	400	325	410	1,861
Návrh 245	400	375	410	2,606
Návrh 246	100	75	450	2,978
Návrh 247	150	75	450	2,608
Návrh 248	200	75	450	2,083
Návrh 249	250	75	450	1,246
Návrh 250	300	75	450	1,928
Návrh 251	350	75	450	1,665
Návrh 252	400	75	450	1,398
Návrh 254	150	125	450	3,087
Návrh 255	200	125	450	2,314
Návrh 256	250	125	450	1,782
Návrh 257	300	125	450	1,176
Návrh 258	350	125	450	1,684
Návrh 259	400	125	450	1,887
Návrh 262	200	175	450	3,075
Návrh 263	250	175	450	2,143
Návrh 264	300	175	450	1,571
Návrh 265	350	175	450	1,287
Návrh 266	400	175	450	1,611
Návrh 270	250	225	450	3,030
Návrh 271	300	225	450	2,062

E = 800MPa s = 13mm	Rádus [mm]	Hĺoubka [mm]	Výška [mm]	Koeficient bezpečnosti [1]
Návrh 272	350	225	450	1,517
Návrh 273	400	225	450	1,494
Návrh 278	300	275	450	2,987
Návrh 279	350	275	450	2,064
Návrh 280	400	275	450	1,574
Návrh 286	350	325	450	2,957
Návrh 287	400	325	450	2,132
Návrh 294	400	375	450	2,949
Návrh 295	100	75	490	2,845
Návrh 296	150	75	490	2,666
Návrh 297	200	75	490	1,999
Návrh 298	250	75	490	1,374
Návrh 299	300	75	490	1,924
Návrh 300	350	75	490	1,818
Návrh 301	400	75	490	1,509
Návrh 303	150	125	490	2,995
Návrh 304	200	125	490	2,402
Návrh 305	250	125	490	1,852
Návrh 306	300	125	490	1,460
Návrh 307	350	125	490	1,756
Návrh 308	400	125	490	1,955
Návrh 311	200	175	490	3,003
Návrh 312	250	175	490	2,285

E = 800MPa s = 13mm	Rádus [mm]	Hĺoubka [mm]	Výška [mm]	Koeficient bezpečnosti [1]
Návrh 313	300	175	490	1,860
Návrh 314	350	175	490	1,626
Návrh 315	400	175	490	1,845
Návrh 319	250	225	490	3,011
Návrh 320	300	225	490	2,157
Návrh 321	350	225	490	1,919
Návrh 322	400	225	490	1,935
Návrh 327	300	275	490	3,018
Návrh 328	350	275	490	1,945
Návrh 329	400	275	490	2,050
Návrh 335	350	325	490	3,029
Návrh 336	400	325	490	1,889
Návrh 343	400	375	490	3,092

PŘÍLOHA P II: DESIGN NÁDOBY (2 ŽEBRA)

$E = 800\text{MPa}$ $s = 13\text{mm}$	R1 [mm]	V1 [mm]	H1 [mm]	R2 [mm]	V2 [mm]	H2 [mm]	Koef.bezpečnosti [1]
Návrh 1	100	250	75	100	450	75	3,096
Návrh 2	175	250	150	100	450	75	2,953
Návrh 3	250	250	225	100	450	75	2,817
Návrh 4	100	250	75	175	450	150	3,010
Návrh 5	175	250	150	175	450	150	2,879
Návrh 6	100	250	75	250	450	225	2,965
Návrh 7	100	250	75	100	500	75	3,359
Návrh 8	175	250	150	100	500	75	3,182
Návrh 9	250	250	225	100	500	75	3,088
Návrh 10	325	250	300	100	500	75	3,032
Návrh 11	400	250	375	100	500	75	2,961
Návrh 12	100	300	75	100	500	75	3,663
Návrh 13	175	300	150	100	500	75	3,508
Návrh 14	250	300	225	100	500	75	3,340
Návrh 15	100	250	75	175	500	150	3,562
Návrh 16	175	250	150	175	500	150	3,440
Návrh 17	250	250	225	175	500	150	3,333
Návrh 18	325	250	300	175	500	150	3,253
Návrh 19	400	250	375	175	500	150	3,162
Návrh 20	100	300	75	175	500	150	3,671
Návrh 21	175	300	150	175	500	150	3,508
Návrh 22	100	250	75	250	500	225	3,579

E = 800MPa s = 13mm	R1 [mm]	V1 [mm]	H1 [mm]	R2 [mm]	V2 [mm]	H2 [mm]	Koef.bezpečnosti [1]
Návrh 23	175	250	150	250	500	225	3,518
Návrh 24	250	250	225	250	500	225	3,397
Návrh 25	325	250	300	250	500	225	3,271
Návrh 26	100	300	75	250	500	225	3,563
Návrh 27	100	250	75	325	500	300	3,582
Návrh 28	175	250	150	325	500	300	3,527
Návrh 29	250	250	225	325	500	300	3,384
Návrh 30	100	250	75	400	500	375	3,583
Návrh 31	175	250	150	400	500	375	3,533
Návrh 32	100	250	75	100	550	75	2,936
Návrh 33	175	250	150	100	550	75	2,770
Návrh 34	250	250	225	100	550	75	2,703
Návrh 35	325	250	300	100	550	75	2,670
Návrh 36	400	250	375	100	550	75	2,650
Návrh 37	100	300	75	100	550	75	3,603
Návrh 38	175	300	150	100	550	75	3,467
Návrh 39	250	300	225	100	550	75	3,389
Návrh 40	325	300	300	100	550	75	3,349
Návrh 41	400	300	375	100	550	75	3,312
Návrh 42	100	350	75	100	550	75	4,158
Návrh 43	175	350	150	100	550	75	4,121
Návrh 44	250	350	225	100	550	75	3,954
Návrh 45	100	250	75	175	550	150	3,095

E = 800MPa s = 13mm	R1 [mm]	V1 [mm]	H1 [mm]	R2 [mm]	V2 [mm]	H2 [mm]	Koef.bezpečnosti [1]
Návrh 46	175	250	150	175	550	150	2,994
Návrh 47	250	250	225	175	550	150	2,936
Návrh 48	325	250	300	175	550	150	2,899
Návrh 49	400	250	375	175	550	150	2,874
Návrh 50	100	300	75	175	550	150	3,866
Návrh 51	175	300	150	175	550	150	3,775
Návrh 52	250	300	225	175	550	150	3,688
Návrh 53	325	300	300	175	550	150	3,632
Návrh 54	400	300	375	175	550	150	3,572
Návrh 55	100	350	75	175	550	150	4,331
Návrh 56	175	350	150	175	550	150	4,268
Návrh 57	100	250	75	250	550	225	3,157
Návrh 58	175	250	150	250	550	225	3,054
Návrh 59	250	250	225	250	550	225	2,990
Návrh 60	325	250	300	250	550	225	2,946
Návrh 61	400	250	375	250	550	225	2,907
Návrh 62	100	300	75	250	550	225	3,995
Návrh 63	175	300	150	250	550	225	3,891
Návrh 64	250	300	225	250	550	225	3,797
Návrh 65	325	300	300	250	550	225	3,744
Návrh 66	100	350	75	250	550	225	4,293
Návrh 67	100	250	75	325	550	300	3,210
Návrh 68	175	250	150	325	550	300	3,102

E = 800MPa s = 13mm	R1 [mm]	V1 [mm]	H1 [mm]	R2 [mm]	V2 [mm]	H2 [mm]	Koef.bezpečnosti [1]
Návrh 69	250	250	225	325	550	300	3,029
Návrh 70	325	250	300	325	550	300	2,975
Návrh 71	400	250	375	325	550	300	2,924
Návrh 72	100	300	75	325	550	300	4,088
Návrh 73	175	300	150	325	550	300	3,998
Návrh 74	250	300	225	325	550	300	3,903
Návrh 75	100	250	75	400	550	375	3,297
Návrh 76	175	250	150	400	550	375	3,174
Návrh 77	250	250	225	400	550	375	3,084
Návrh 78	325	250	300	400	550	375	3,018
Návrh 79	400	250	375	400	550	375	2,948
Návrh 80	100	300	75	400	550	375	4,143
Návrh 81	175	300	150	400	550	375	4,095
Návrh 82	100	250	75	100	600	75	2,499
Návrh 83	175	250	150	100	600	75	2,334
Návrh 84	250	250	225	100	600	75	2,272
Návrh 85	325	250	300	100	600	75	2,267
Návrh 86	400	250	375	100	600	75	2,251
Návrh 87	100	300	75	100	600	75	3,038
Návrh 88	175	300	150	100	600	75	2,902
Návrh 89	250	300	225	100	600	75	2,840
Návrh 90	325	300	300	100	600	75	2,815
Návrh 91	400	300	375	100	600	75	2,807

E = 800MPa s = 13mm	R1 [mm]	V1 [mm]	H1 [mm]	R2 [mm]	V2 [mm]	H2 [mm]	Koef.bezpečnosti [1]
Návrh 92	100	350	75	100	600	75	3,762
Návrh 93	175	350	150	100	600	75	3,723
Návrh 94	250	350	225	100	600	75	3,681
Návrh 95	325	350	300	100	600	75	3,675
Návrh 96	400	350	375	100	600	75	3,682
Návrh 97	100	400	75	100	600	75	4,022
Návrh 98	175	400	150	100	600	75	4,368
Návrh 99	250	400	225	100	600	75	4,407
Návrh 100	100	250	75	175	600	150	2,554
Návrh 101	175	250	150	175	600	150	2,460
Návrh 102	250	250	225	175	600	150	2,452
Návrh 103	325	250	300	175	600	150	2,428
Návrh 104	400	250	375	175	600	150	2,426
Návrh 105	100	300	75	175	600	150	3,166
Návrh 106	175	300	150	175	600	150	3,108
Návrh 107	250	300	225	175	600	150	3,058
Návrh 108	325	300	300	175	600	150	3,030
Návrh 109	400	300	375	175	600	150	3,018
Návrh 110	100	350	75	175	600	150	3,974
Návrh 111	175	350	150	175	600	150	4,019
Návrh 112	250	350	225	175	600	150	3,973
Návrh 113	325	350	300	175	600	150	3,957
Návrh 114	400	350	375	175	600	150	3,944

E = 800MPa s = 13mm	R1 [mm]	V1 [mm]	H1 [mm]	R2 [mm]	V2 [mm]	H2 [mm]	Koef.bezpečnosti [1]
Návrh 115	100	400	75	175	600	150	4,003
Návrh 116	175	400	150	175	600	150	4,325
Návrh 117	100	250	75	250	600	225	2,594
Návrh 118	175	250	150	250	600	225	2,548
Návrh 119	250	250	225	250	600	225	2,507
Návrh 120	325	250	300	250	600	225	2,487
Návrh 121	400	250	375	250	600	225	2,481
Návrh 122	100	300	75	250	600	225	3,239
Návrh 123	175	300	150	250	600	225	3,191
Návrh 124	250	300	225	250	600	225	3,137
Návrh 125	325	300	300	250	600	225	3,103
Návrh 126	400	300	375	250	600	225	3,079
Návrh 127	100	350	75	250	600	225	4,092
Návrh 128	175	350	150	250	600	225	4,147
Návrh 129	250	350	225	250	600	225	4,101
Návrh 130	325	350	300	250	600	225	4,088
Návrh 131	100	400	75	250	600	225	3,924
Návrh 132	100	250	75	325	600	300	2,654
Návrh 133	175	250	150	325	600	300	2,572
Návrh 134	250	250	225	325	600	300	2,534
Návrh 135	325	250	300	325	600	300	2,508
Návrh 136	400	250	375	325	600	300	2,497
Návrh 137	100	300	75	325	600	300	3,280

E = 800MPa s = 13mm	R1 [mm]	V1 [mm]	H1 [mm]	R2 [mm]	V2 [mm]	H2 [mm]	Koef.bezpečnosti [1]
Návrh 138	175	300	150	325	600	300	3,230
Návrh 139	250	300	225	325	600	300	3,167
Návrh 140	325	300	300	325	600	300	3,122
Návrh 141	400	300	375	325	600	300	3,082
Návrh 142	100	350	75	325	600	300	4,146
Návrh 143	175	350	150	325	600	300	4,192
Návrh 144	250	350	225	325	600	300	4,139
Návrh 145	100	250	75	400	600	375	2,701
Návrh 146	175	250	150	400	600	375	2,626
Návrh 147	250	250	225	400	600	375	2,583
Návrh 148	325	250	300	400	600	375	2,551
Návrh 149	400	250	375	400	600	375	2,531
Návrh 150	100	300	75	400	600	375	3,356
Návrh 151	175	300	150	400	600	375	3,298
Návrh 152	250	300	225	400	600	375	3,219
Návrh 153	325	300	300	400	600	375	3,160
Návrh 154	400	300	375	400	600	375	3,100
Návrh 155	100	350	75	400	600	375	4,160
Návrh 156	175	350	150	400	600	375	4,265

PŘÍLOHA P III: NÁDOBA S KRÁTKÝMI SKELNÝMI VLÁKNY

E = 1450MPa s = 13mm	R1 [mm]	V1 [mm]	H1 [mm]	R2 [mm]	V2 [mm]	H2 [mm]	Koef.bezpečnosti [1]
Návrh 1	100	250	75	100	450	75	5,612
Návrh 2	175	250	150	100	450	75	5,352
Návrh 3	250	250	225	100	450	75	5,106
Návrh 4	100	250	75	175	450	150	5,455
Návrh 5	175	250	150	175	450	150	5,218
Návrh 6	100	250	75	250	450	225	5,373
Návrh 7	100	250	75	100	500	75	6,089
Návrh 8	175	250	150	100	500	75	5,767
Návrh 9	250	250	225	100	500	75	5,597
Návrh 10	325	250	300	100	500	75	5,495
Návrh 11	400	250	375	100	500	75	5,366
Návrh 12	100	300	75	100	500	75	6,640
Návrh 13	175	300	150	100	500	75	6,358
Návrh 14	250	300	225	100	500	75	6,054
Návrh 15	100	250	75	175	500	150	6,457
Návrh 16	175	250	150	175	500	150	6,235
Návrh 17	250	250	225	175	500	150	6,041
Návrh 18	325	250	300	175	500	150	5,897
Návrh 19	400	250	375	175	500	150	5,732
Návrh 20	100	300	75	175	500	150	6,654
Návrh 21	175	300	150	175	500	150	6,358
Návrh 22	100	250	75	250	500	225	6,486

E = 1450MPa s = 13mm	R1 [mm]	V1 [mm]	H1 [mm]	R2 [mm]	V2 [mm]	H2 [mm]	Koef.bezpečnosti [1]
Návrh 23	175	250	150	250	500	225	6,376
Návrh 24	250	250	225	250	500	225	6,157
Návrh 25	325	250	300	250	500	225	5,929
Návrh 26	100	300	75	250	500	225	6,458
Návrh 27	100	250	75	325	500	300	6,493
Návrh 28	175	250	150	325	500	300	6,393
Návrh 29	250	250	225	325	500	300	6,133
Návrh 30	100	250	75	400	500	375	6,494
Návrh 31	175	250	150	400	500	375	6,404
Návrh 32	100	250	75	100	550	75	5,321
Návrh 33	175	250	150	100	550	75	5,020
Návrh 34	250	250	225	100	550	75	4,900
Návrh 35	325	250	300	100	550	75	4,839
Návrh 36	400	250	375	100	550	75	4,803
Návrh 37	100	300	75	100	550	75	6,530
Návrh 38	175	300	150	100	550	75	6,284
Návrh 39	250	300	225	100	550	75	6,143
Návrh 40	325	300	300	100	550	75	6,069
Návrh 41	400	300	375	100	550	75	6,002
Návrh 42	100	350	75	100	550	75	7,537
Návrh 43	175	350	150	100	550	75	7,470
Návrh 44	250	350	225	100	550	75	7,166
Návrh 45	100	250	75	175	550	150	5,610

E = 1450MPa s = 13mm	R1 [mm]	V1 [mm]	H1 [mm]	R2 [mm]	V2 [mm]	H2 [mm]	Koef.bezpečnosti [1]
Návrh 46	175	250	150	175	550	150	5,426
Návrh 47	250	250	225	175	550	150	5,321
Návrh 48	325	250	300	175	550	150	5,255
Návrh 49	400	250	375	175	550	150	5,209
Návrh 50	100	300	75	175	550	150	7,008
Návrh 51	175	300	150	175	550	150	6,843
Návrh 52	250	300	225	175	550	150	6,684
Návrh 53	325	300	300	175	550	150	6,584
Návrh 54	400	300	375	175	550	150	6,474
Návrh 55	100	350	75	175	550	150	7,850
Návrh 56	175	350	150	175	550	150	7,736
Návrh 57	100	250	75	250	550	225	5,723
Návrh 58	175	250	150	250	550	225	5,535
Návrh 59	250	250	225	250	550	225	5,419
Návrh 60	325	250	300	250	550	225	5,339
Návrh 61	400	250	375	250	550	225	5,270
Návrh 62	100	300	75	250	550	225	7,242
Návrh 63	175	300	150	250	550	225	7,052
Návrh 64	250	300	225	250	550	225	6,882
Návrh 65	325	300	300	250	550	225	6,786
Návrh 66	100	350	75	250	550	225	7,781
Návrh 67	100	250	75	325	550	300	5,818
Návrh 68	175	250	150	325	550	300	5,622

E = 1450MPa s = 13mm	R1 [mm]	V1 [mm]	H1 [mm]	R2 [mm]	V2 [mm]	H2 [mm]	Koef.bezpečnosti [1]
Návrh 69	250	250	225	325	550	300	5,489
Návrh 70	325	250	300	325	550	300	5,393
Návrh 71	400	250	375	325	550	300	5,300
Návrh 72	100	300	75	325	550	300	7,409
Návrh 73	175	300	150	325	550	300	7,247
Návrh 74	250	300	225	325	550	300	7,074
Návrh 75	100	250	75	400	550	375	5,976
Návrh 76	175	250	150	400	550	375	5,754
Návrh 77	250	250	225	400	550	375	5,591
Návrh 78	325	250	300	400	550	375	5,469
Návrh 79	400	250	375	400	550	375	5,344
Návrh 80	100	300	75	400	550	375	7,510
Návrh 81	175	300	150	400	550	375	7,422
Návrh 82	100	250	75	100	600	75	4,529
Návrh 83	175	250	150	100	600	75	4,231
Návrh 84	250	250	225	100	600	75	4,118
Návrh 85	325	250	300	100	600	75	4,109
Návrh 86	400	250	375	100	600	75	4,079
Návrh 87	100	300	75	100	600	75	5,507
Návrh 88	175	300	150	100	600	75	5,260
Návrh 89	250	300	225	100	600	75	5,148
Návrh 90	325	300	300	100	600	75	5,101
Návrh 91	400	300	375	100	600	75	5,088

E = 1450MPa s = 13mm	R1 [mm]	V1 [mm]	H1 [mm]	R2 [mm]	V2 [mm]	H2 [mm]	Koef.bezpečnosti [1]
Návrh 92	100	350	75	100	600	75	6,818
Návrh 93	175	350	150	100	600	75	6,749
Návrh 94	250	350	225	100	600	75	6,672
Návrh 95	325	350	300	100	600	75	6,662
Návrh 96	400	350	375	100	600	75	6,673
Návrh 97	100	400	75	100	600	75	7,290
Návrh 98	175	400	150	100	600	75	7,918
Návrh 99	250	400	225	100	600	75	7,988
Návrh 100	100	250	75	175	600	150	4,628
Návrh 101	175	250	150	175	600	150	4,459
Návrh 102	250	250	225	175	600	150	4,444
Návrh 103	325	250	300	175	600	150	4,402
Návrh 104	400	250	375	175	600	150	4,396
Návrh 105	100	300	75	175	600	150	5,738
Návrh 106	175	300	150	175	600	150	5,633
Návrh 107	250	300	225	175	600	150	5,542
Návrh 108	325	300	300	175	600	150	5,492
Návrh 109	400	300	375	175	600	150	5,469
Návrh 110	100	350	75	175	600	150	7,204
Návrh 111	175	350	150	175	600	150	7,284
Návrh 112	250	350	225	175	600	150	7,202
Návrh 113	325	350	300	175	600	150	7,173
Návrh 114	400	350	375	175	600	150	7,148

E = 1450MPa s = 13mm	R1 [mm]	V1 [mm]	H1 [mm]	R2 [mm]	V2 [mm]	H2 [mm]	Koef.bezpečnosti [1]
Návrh 115	100	400	75	175	600	150	7,255
Návrh 116	175	400	150	175	600	150	7,839
Návrh 117	100	250	75	250	600	225	4,701
Návrh 118	175	250	150	250	600	225	4,618
Návrh 119	250	250	225	250	600	225	4,544
Návrh 120	325	250	300	250	600	225	4,507
Návrh 121	400	250	375	250	600	225	4,497
Návrh 122	100	300	75	250	600	225	5,871
Návrh 123	175	300	150	250	600	225	5,784
Návrh 124	250	300	225	250	600	225	5,686
Návrh 125	325	300	300	250	600	225	5,624
Návrh 126	400	300	375	250	600	225	5,580
Návrh 127	100	350	75	250	600	225	7,416
Návrh 128	175	350	150	250	600	225	7,516
Návrh 129	250	350	225	250	600	225	7,432
Návrh 130	325	350	300	250	600	225	7,409
Návrh 131	100	400	75	250	600	225	7,112
Návrh 132	100	250	75	325	600	300	4,811
Návrh 133	175	250	150	325	600	300	4,661
Návrh 134	250	250	225	325	600	300	4,592
Návrh 135	325	250	300	325	600	300	4,545
Návrh 136	400	250	375	325	600	300	4,525
Návrh 137	100	300	75	325	600	300	5,946

E = 1450MPa s = 13mm	R1 [mm]	V1 [mm]	H1 [mm]	R2 [mm]	V2 [mm]	H2 [mm]	Koef.bezpečnosti [1]
Návrh 138	175	300	150	325	600	300	5,854
Návrh 139	250	300	225	325	600	300	5,739
Návrh 140	325	300	300	325	600	300	5,659
Návrh 141	400	300	375	325	600	300	5,586
Návrh 142	100	350	75	325	600	300	7,514
Návrh 143	175	350	150	325	600	300	7,598
Návrh 144	250	350	225	325	600	300	7,501
Návrh 145	100	250	75	400	600	375	4,895
Návrh 146	175	250	150	400	600	375	4,759
Návrh 147	250	250	225	400	600	375	4,682
Návrh 148	325	250	300	400	600	375	4,624
Návrh 149	400	250	375	400	600	375	4,587
Návrh 150	100	300	75	400	600	375	6,083
Návrh 151	175	300	150	400	600	375	5,977
Návrh 152	250	300	225	400	600	375	5,834
Návrh 153	325	300	300	400	600	375	5,727
Návrh 154	400	300	375	400	600	375	5,619
Návrh 155	100	350	75	400	600	375	7,541
Návrh 156	175	350	150	400	600	375	7,730