

# **Studium ohybové tuhosti stěn podzemních nádrží, vyráběných technologií rotomolding**

Ing. Oldřich Šuba

---

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: **Ing. Oldřich ŠUBA**  
Osobní číslo: **T10956**  
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**  
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Studium ohybové tuhosti stěn podzemních nádrží,  
vyráběných technologií rotomolding**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární studii na dané téma.
2. Výpočtově stanovte hodnoty ohybové tuhosti stěn nádrží pro jednotlivé koncepce struktury stěny (homogenní, dvouvrstvá, třívrstvá – sendvičová struktura) z hlediska jejich stabilitní odolnosti.
3. Experimentálně stanovte hodnoty ohybové tuhosti zadaných vzorků stěn nádob, vyrobených technologií rotomolding.
4. Získané výsledky vyhodnoťte z hlediska mezního stavu ztráty stability nádob, zatížených vnějším tlakem od obsypu zeminou.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

**Dle doporučení vedoucího DP.**

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Libuše Sýkorová, Ph.D.**

Ústav výrobního inženýrství

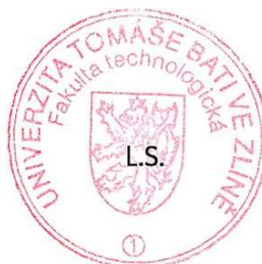
Datum zadání diplomové práce: **10. února 2014**

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: .....

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 <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, 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 .....

.....

---

<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 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.

<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 přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce je věnována studiu ohybových vlastností vrstevnatých struktur stěn plastových nádrží, vyráběných technologií rotačního odlévání. Posuzovány jsou sendvičové - třívrstvé a dvouvrstvé struktury. Záměrem práce je posoudit vhodnost těchto struktur z hlediska stabilitní únosnosti v případě podzemních nádrží.

V teoretické části jsou popisovány technologie výroby velkoobjemových nádob a problematika statického posuzování podzemních nádrží, se zaměřením na mezní stavy ztráty stability tenkostěnného pláště.

Praktická část obsahuje analýzu stabilitní únosnosti válcové podzemní nádrže v mimořádném a provozním stavu zatížení. Výpočtově a experimentálně jsou stanoveny hodnoty ohybových tuhostí daných struktur a srovnány s tuhostí homogenní stěny.

Klíčová slova: rotomolding, stabilita, sendvičová struktura, dvouvrstvá struktura, ohybová tuhost

## **ABSTRACT**

This diploma thesis is dedicated to study of bending behaviour of layered wall structures in case of plastic tanks, produced by rotomolding technology. Sandwich and 2-layer structures are considered. An intention is evaluate the suitability of these structures from the point of view of stability load capacity.

Technologies of producing of high-volumes tanks and problematics of static analysis underground tanks with focus on limiting conditions of buckling thin shells are part of theoretical section.

Practical section contains the analysis of stability load capacity of cylindrical subsurface tanks in extraordinary and working load case.

Keywords: rotomolding, wall bending stiffness, sandwich structure, 2-layer structure

Na tomto místě bych velmi rád poděkoval vedoucí své diplomové práce, paní doc. Ing. Libuši Sýkorové, Ph.D. za její vstřícnost a ochotu.

Dále bych rád poděkoval firmě Aquatec VFL, s. r. o. za zpřístupnění jejich výrobních prostor, cenné rady v oblasti výroby technologií rotomolding a rovněž za možnost získání potřebných vzorků.

V neposlední řadě patří díky mému otci doc. Ing. Oldřichu Šubovi, CSc. za konzultace týkající se dimenzování a navrhování výrobků z plastů.

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

-----  
Oldřich Šuba

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>11</b>
<b>1 TECHNOLOGIE VÝROBY VELKOOBJEMOVÝCH NÁDOB</b> .....	<b>12</b>
1.1    TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ.....	13
1.2    TECHNOLOGIE SPIRÁLNÍHO NAVÍJENÍ.....	14
1.3    TECHNOLOGIE ROTAČNÍHO ODLÉVÁNÍ.....	15
1.4    PŘEHLED UŽÍVANÝCH MATERIÁLŮ .....	19
<b>2 PROBLEMATIKA STATICKÉHO POSOUZENÍ     VELKOOBJEMOVÝCH PODZEMNÍCH NÁDRŽÍ</b> .....	<b>22</b>
2.1    MEMBRÁNOVÁ NAPJATOST IZOTROPNÍCH SKOŘEPIN.....	22
2.2    OHYBOVÁ NAPJATOST IZOTROPNÍCH SKOŘEPIN .....	23
2.3    MEMBRÁNOVÁ A OHYBOVÁ NAPJATOST STĚN VRSTEVNATÉ STRUKTURY .....	24
2.4    STABILITA SKOŘEPINOVÝCH KONSTRUKCÍ ZATÍŽENÝCH VNĚJŠÍM TLAKEM .....	25
2.5    PROBLÉMY NAVRHOVÁNÍ A DIMENZOVÁNÍ PLASTOVÝCH PODZEMNÍCH NÁDOB A NÁDRŽÍ.....	30
2.6    NUMERICKÉ MODELOVÁNÍ STABILITY PLÁŠŤŮ ČOV .....	33
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>35</b>
<b>3 CÍL PRÁCE</b> .....	<b>36</b>
<b>4 MODELOVÁNÍ Vlivu OHYBOVÉ TUHOS TI STĚNY VÁLCOVÉ     PODZEMNÍ NÁDRŽE NA JEJÍ ODOLNOST PROTI ZTRÁTĚ     STABILITY</b> .....	<b>37</b>
4.1    Vliv TLOUŠŤKY STĚNY A DOBY ZATÍŽENÍ NA STABILITNÍ ÚNOSNOST.....	38
4.2    Vliv NEROVNOMĚRNOSTI TLOUŠŤKY PLÁŠŤE NÁDOBY NA STABILITNÍ ÚNOSNOST .....	41
<b>5 VRSTEVNATÉ STRUKTURY STĚN NÁDOB V TECHNOLOGII     ROTOMOLDING</b> .....	<b>45</b>
5.1    TŘÍVRSTVÉ - SENDVIČOVÉ STRUKTURY .....	45
5.2    DVOUVRSTVÉ STĚNY .....	52
5.3    VÝSLEDKY ZKOUŠEK OHYBOVÉ TUHOS TI REÁLNÝCH STRUKTUR .....	55
5.4    DOSAŽENÉ VÝSLEDKY A DISKUSE.....	58
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>61</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b> .....	<b>62</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>64</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ A DIAGRAMŮ</b> .....	<b>65</b>
<b>SEZNAM TABULEK</b> .....	<b>66</b>



<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>67</b>
<b>PŘÍLOHA P I: MATERIÁLOVÝ LIST GP NATURAL .....</b>	<b>68</b>
<b>PŘÍLOHA P II: MATERIÁLOVÝ LIST GP BLUE.....</b>	<b>69</b>
<b>PŘÍLOHA P III: MATERIÁLOVÝ LIST GP GREEN.....</b>	<b>70</b>
<b>PŘÍLOHA P IV: TESTOVACÍ ZPRÁVA VÚSAPL.....</b>	<b>71</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 vedou k tomu, že konstrukce z termoplastů jsou nejčastěji navrhovány jako tenkostěnné. Vzhledem k malým hodnotám tuhosti (modul pružnosti) resp. časově závislé tuhosti (modul tečení) jsou pro návrh výrobku rozhodující stavy deformace, nikoliv únosnosti. Velmi často tak jsou 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, působeného 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.

Diplomová práce je věnována studiu ohybových vlastností vrstevnatých struktur stěn plastových nádrží, vyráběných technologií rotačního odlévání. Posuzovány jsou sendvičové - třívrstvé a dvouvrstvé struktury. Záměrem práce je posoudit vhodnost těchto struktur z hlediska stabilitní únosnosti v případě podzemních nádrží.

V průmyslu jsou v současnosti velmi aktuální otázky posouzení možností náhrady homogenních stěn rotačně odlévaných velkoobjemových podzemních nádob strukturálními stěnami, a to z hlediska stabilitní únosnosti. Je nutno zjišťovat možnosti případné úspory materiálu kombinací lehčených a nelehčených vrstev stěny nádoby, a tím vytvářet třívrstvé - sendvičové a dvouvrstvé stěny. Z toho vyplývá nutnost výpočtově stanovit predikci hodnot ohybové tuhosti stěn nádrží pro jednotlivé koncepce struktury stěny z hlediska jejich stabilitní odolnosti.

## I. TEORETICKÁ ČÁST

## 1 TECHNOLOGIE VÝROBY VELKOOBJEMOVÝCH NÁDOB

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

- svařování
- spirální navíjení
- rotační odlévání

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

### **Obecné výhody nádob z plastu:**

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

## 1.1 Technologie svařování

Touto technologií jsou zpravidla vyráběny beztlaké nádrže, které je možné dělit z několika hledisek [8]:

### 1) Dle umístění

#### a) Nadzemní nádrže

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

#### b) Podzemní nádrže

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

### 2) Dle tvaru

#### a) Válcové

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

#### b) Hranaté

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

## 1.2 Technologie spirálního navíjení

Pás polymeru je přehříván 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 4 500 mm
- bez navařování lze dosáhnout výšky pláště 10 m
- pracovní objem až 150 m<sup>3</sup>
- tloušťka pláště není limitována
- chemická odolnost
- lze neprojektovat životnost nádoby i na 50 let

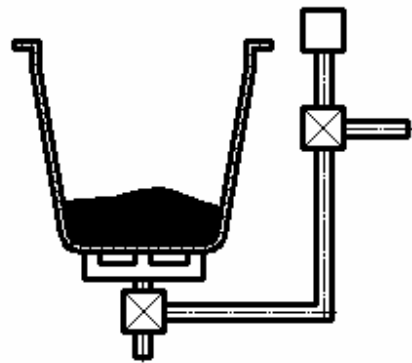


*Obr. 1 Příklad nádoby vyráběné spirálním navíjením*

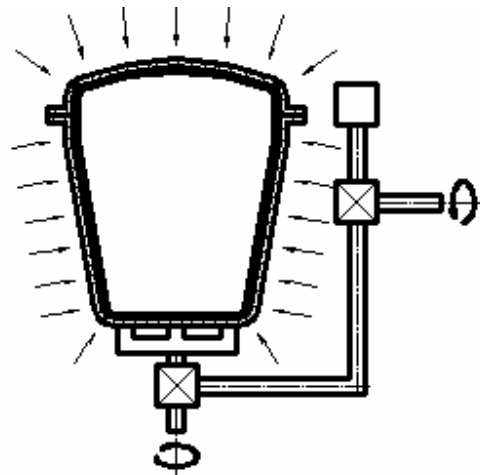
### 1.3 Technologie rotačního odlévání

Rotomolding - rotační odlévání je technologie, zaznamenávající v současnosti výrazný vzestup. Princip výroby spočívá v tom, že se do otevíratelné formy nasype prášek, resp. granulát. Forma se pak v peci otáčí kolem dvou os a prášek se postupně natavuje na horké stěny formy a vytvoří vnitřní obtisk formy. Generuje se tak pouze vnější povrch výrobku. Forma s výrobkem se chladí proudem vzduchu, ev. i vodní mlhou nebo vodní sprchou, poté se forma otevře a hotový výrobek vyjme ven. Proces je relativně pomalý, ale protože cena forem je výrazně nižší než např. u vstřikování, lze snadno vyrábět i malé série výrobků. Výrobky jsou plně recyklovatelné a výroba nezatěžuje životní prostředí. Technologie se uplatňuje nejnověji ve výrobě velkoobjemových nádob, kdy nejsou zvláštností objemy 10 i více m<sup>3</sup> [1,2].

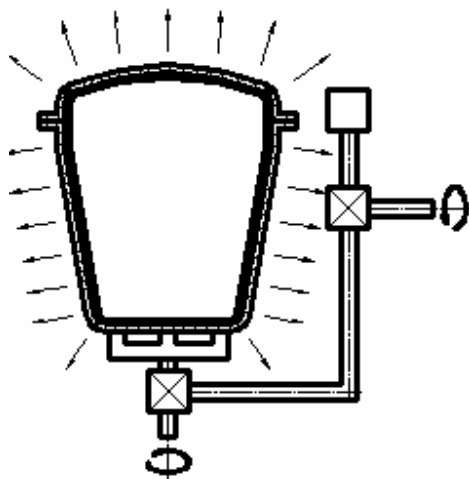
Výrobky jsou duté, bez vnitřních pnutí a švů, mají pravidelnou vnitřní strukturu. Výraznou výhodou z pevnostního hlediska je, že výrobky mají zesílené hrany a kouty, a zvyšuje se tak odolnost výrobku proti poškození [11].



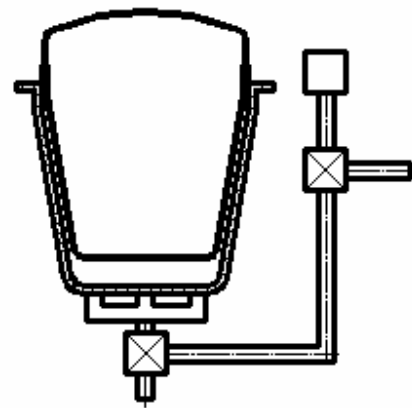
a) plnění formy



b) ohřev formy



c) chlazení formy



d) Odformování

*Obr. 2 Princip technologie rotačního odlévání*



## Princip technologie

Princip technologie rotačního odlévání lze rozdělit do čtyř hlavních částí:

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 či ve vodní sprše, popř. 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 cyklus opakovat.

## 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 výrobních sériích [2,11].

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 další výhody rotačního odlévání patří zejména:

- možnosti vyrábět nádrže o stejném rozměru, ale různých tloušťkách
- dutý výrobek je vyroben jako jednolitý
- výrobek je bez vnitřního pnutí
- formy jsou poměrně levné (v porovnání se vstřikovacími)
- možnost výroby uzavřených - těsných nádob
- množství vzniklého odpadu je zanedbatelné
- vytváření vícevrstvých výrobků
- produktivní výroba i malých sérií výrobku
- na jednom stroji lze vyrábět různé druhy výrobků
- možnost usazení výztužných kovových profilů do výrobku

### **Nevýhody rotačního odlévání**

Technologie rotačního odlévání je založena na principu ohřevu polotovaru v dutině formy a následném ochlazení (zafixování tvaru). Z toho vyplývá nevýhoda v nutnosti ohřevu a následného ochlazení celé formy. Jistou nevýhodou v oblasti nádob představuje omezená možnost tvarového návrhu výztužných prvků, a zejména nemožnost dosáhnout změny tloušťky v určité oblasti pláště nádoby.

## 1.4 Přehled užívaných materiálů

V současnosti patří mezi nejběžněji užívané polymery pro technologii rotačního odlévání polyetylen a polypropylen.

### **Polyethylen**

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

#### **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.

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.

#### **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.

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, které by jinak musely být vyrobeny z HDPE. Z tohoto důvodu je lineární nízkohustotní polyethylen v současné době velmi využíván [6,7].

**MDPE (středněhustotní polyethylen)**

Středněhustotní polyethylen (MDPE) je obvykle preferován 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.

**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 [6].

**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.

**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.

**Další používané materiály**

Níže uvedené materiály pro technologii rotačního odlévání jsou limitovány svou použitelností.

- ABS
- polyacetal
- polyester
- polyuretan
- silikon
- PVC
- nylon
- polykarbonát
- epoxidová pryskyřice

## 2 PROBLEMATIKA STATICKÉHO POSOUZENÍ VELKOOBJEMOVÝCH PODZEMNÍCH NÁDRŽÍ

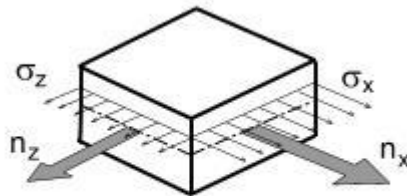
### 2.1 Membránová napjatost izotropních skořepin

Tělesa, jejichž jeden rozměr - tloušťka, je zanedbatelný oproti dvěma ostatním, označujeme v technické praxi jako desková, resp. skořepinová. Potom lze zanedbat složky napětí ve směru normály ke střední ploše desky, resp. skořepiny a předpokládat, že napjatost tenkých desek a skořepin je pouze dvouosá.

Na obr. 3 je znázorněn element desky tloušťky  $s$  s rozměry  $1 \times 1$  mm. Element je namáhán pouze normálovými tahovými silami, jejichž velikost připadající na jednotkovou šířku průřezů desky je  $n_x, n_z$ . Tyto síly jsou výslednicemi elementárních sil v průřezech elementu  $\sigma_x dS, \sigma_z dS$ :

tj.

$$\sigma_i^M = \frac{n_i}{s}, \quad i = x, z.$$



Obr. 3 Schéma membránové napjatosti elementu stěny

Každá myšlená „vrstva“ elementární tloušťky  $dy$  je ve stavu dvouosé napjatosti. Takovou napjatost desek a skořepin označujeme jako membránovou napjatost [3].

Rotačně symetrický případ membránové napjatosti válcové skořepiny představuje plášť tenkostěnné válcové nádoby, zatížené vnitřním přetlakem.

Osové (axiální) membránové napětí v plášti nádoby je

$$\sigma_x = \frac{pR}{2s}.$$

a obvodové napětí

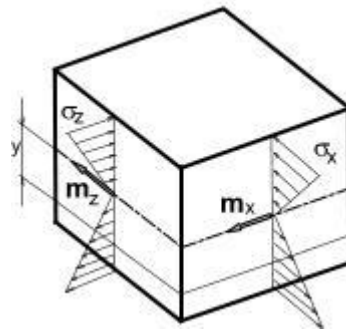
$$\sigma_\varphi = \frac{pR}{s}.$$

Ve stěně pláště tedy působí dvouosá membránová napjatost s normálovými složkami napětí ve směru osovém a obvodovém, přičemž obvodové napětí je dvakrát větší než osové (axiální).

## 2.2 Ohybová napjatost izotropních skořepin

U elementu desky na obr. 4 jsou složky poměrné deformace v myšlené vrstvě elementární tloušťky vzdálené o  $y$  od střední plochy

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



Obr. 4 Schéma ohybové napjatosti elementu stěny

Ohybové momenty  $m_x$ ,  $m_z$  jsou vyvažovány v průřezech stěny vnitřními elementárními normálovými silami. Ohybové křivosti jsou dány vztahem

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

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

Konstanta  $D$  je ohybovou tuhostí stěny desky / skořepiny [3].

### 2.3 Membránová a ohybová napjatost stěn vrstevnaté struktury

Pod pojmem homogenní stěna desky či skořepiny rozumíme neproměnnost mechanických vlastností po tloušťce stěny.

V oblasti výrobků z plastů se však často setkáváme s případy tenkostěnných výrobků, u nichž se po tloušťce stěny fyzikální vlastnosti mění, ať již nespojitě, či spojitě. Příkladem jsou např. dvouvrstvé, tzv. plátované konstrukce s termoplastovými výstělkami, či třívrstvé - sendvičové plošné prvky. Vrstevnatou konstrukci představují i plošné výrobky z integrálních lehčených plastů, kdy povrchové „vrstvy“ a vnitřní „jádro“ vznikají vlivem technologického procesu.

Pokud je element stěny ve stavu čistě membránové normálové napjatosti, s vnitřními membránovými normálovými silami  $n_i$ ,  $i = x, z$ , je obecně

$$\varepsilon_i^M + \nu \varepsilon_j^M = \frac{n_i}{A}, \quad i, j = x, z.$$

Membránová tuhost izotropní, avšak obecně nehomogenní – vrstevnaté stěny je zde

$$A = \int_{(s)} E^{**}(y) dy,$$

Výraz pro membránovou tuhost vrstevnaté stěny lze psát ve tvaru

$$A = E_1^{**} \int_{(s)} \frac{E^{**}(y)}{E_1^{**}} dy = E_1^{**} s_R,$$



kde  $E_I^{**}$  je zvolený (zpravidla maximální) vztažený „válcový“ modul pružnosti, a  $s_R$  jednotková (jednotkové šířky) redukovaná plocha průřezu stěny.

Je-li element vrstevnaté stěny výrobku namáhán pouze ohybovými momenty  $m_i$ ,  $i = x, z$ , jsou ohybové deformace - křivosti

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

kde ohybová tuhost vrstevnaté stěny je

$$D = E_I^{**} j_R,$$

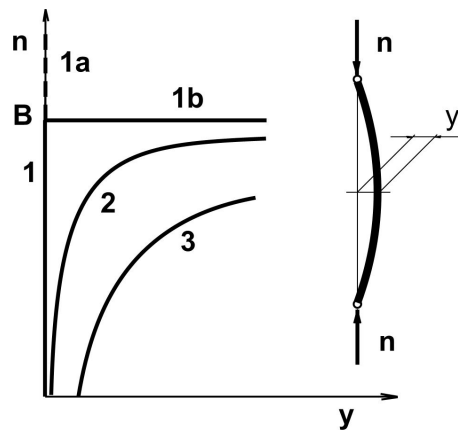
a kvadratický moment redukované plochy průřezu (jednotkové šířky) stěny [5]

$$j_R = \int_{(s)} \frac{E^{**}(y)}{E_I^{**}} y^2 dy.$$

## 2.4 Stabilita skořepinových konstrukcí zatížených vnějším tlakem

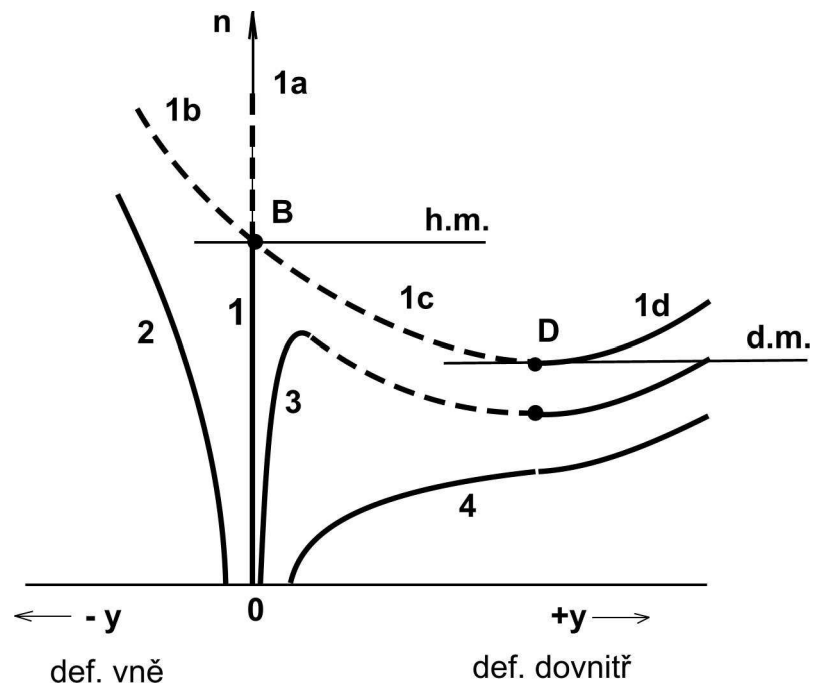
Existence tlakových napětí v tenkostěnných konstrukcích deskového a skořepinového typu znamená obecně nebezpečí ztráty stability konstrukce, ať již místní, nebo celkové. Toto nebezpečí vzniku náhlých značných deformací a možnosti následné destrukce je u plastových konstrukcí umocněno jejich obecně malou tuhostí. Je tak v praxi nutno posoudit případy zatížení vnějších účinků, vyvolávajících v tenkostěnném plášti membránová tlaková napětí - např. osová tlaková zatížení, vnější přettlak, 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 - křivka 1b. Přímý tvar 1a již není stabilní. Bod B se nazývá bodem bifurkace (rozdělení). Ve skutečnosti ovšem praktické případy nelze označit za ideální, tj. deska není ideálně rovná, a ideálně zatížená pouze ve své střední ploše, a ideálně uložena. V důsledku počátečních imperfekcí 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.



Obr. 5 K výkladu ztráty stability jednoose tlačené stěny

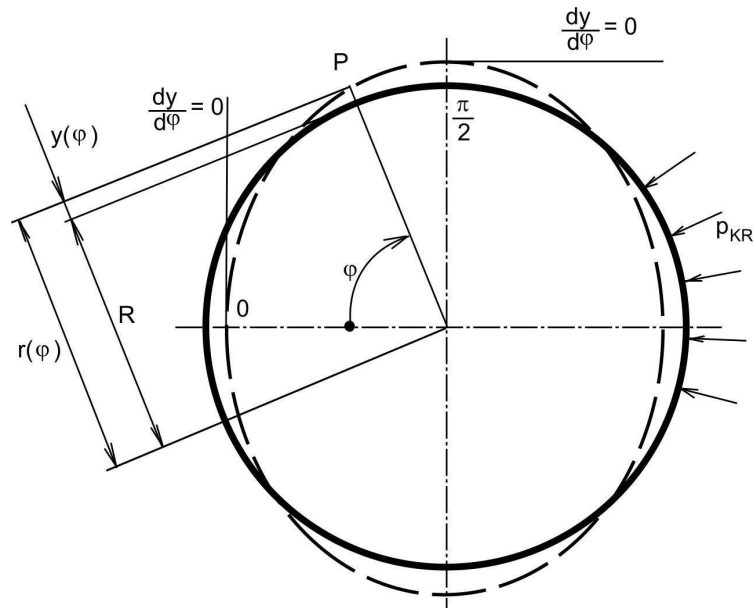
Odezva skořepin na tlaková namáhání je poněkud složitější. Na obr. 5 je analogické schéma chování válcové skořepiny, zatížené osovým tlakem. Křivka 1 představuje ideální válcový plášť ve stavu čistě membránové tlakové napjatosti. Rovnováha se opět rozděluje v bodě B na teoreticky tři možné stavy. Stav 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. pokritické 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 [5].



Obr. 6 K výkladu ztráty stability válcové skořepiny

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.

Působí-li na válcovou skořepinu namísto vnitřního přetlaku podtlak nebo vnější přetlak, 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. 7.



Obr. 7 Ztráta stability dlouhé válcové skořepiny

Tvar válcové skořepiny po její ztrátě stability je popsán diferenciální rovnicí

$$\frac{d^2 y}{d\varphi^2} + \beta^2 y = 0,$$

s označením

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

Všeobecné řešení dif. rovnice je tvaru

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

V místech  $\varphi = 0$ ,  $\varphi = \frac{R}{2}$  je podle obr. 10  $y'(\varphi) = 0$ .

Derivací obdržíme

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

takže  $B = 0$  a  $A \sin \beta \frac{R}{2} = 0$ .

Této rovnici vyhovuje posloupnost hodnot  $\beta \frac{R}{2} = ir, i = 1, 2, 3, \dots$ . Je tedy  $\beta = 2i$  a hodnota kritického tlaku

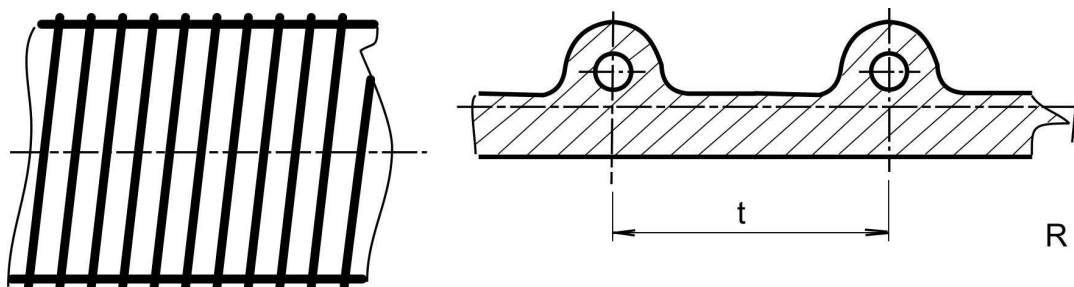
$$\beta^2 = 4i^2 = 1 + \frac{p_{KRi} R^3}{D}.$$

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

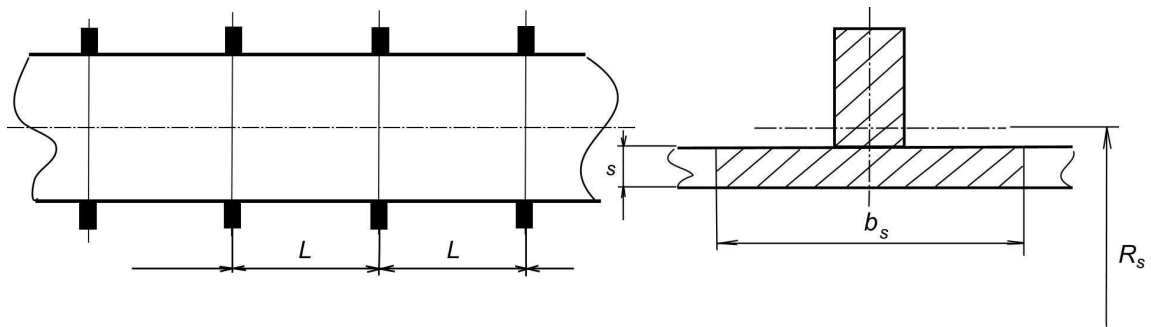
$$p_{KR} = \frac{3D}{R^3}.$$

Tak jako u deskových konstrukcí je kritické zatížení přímo úměrné ohybové tuhosti stěny  $D$ . Takto vypočtená hodnota tlaku ovšem odpovídá teoretické horní hranici dané bodem bifurkace  $B$  na obr. 6, platné pro ideální skořepinu. Reálná hodnota kritického tlaku je vždy nižší, a je značně závislá na velikosti geometrických imperfekcí (ovality) reálné skořepiny, podmínkách uložení, zatížení apod.

Při daném materiálu a poloměru válcové skořepiny  $R$  tak zbývá možnost zvyšovat odolnost proti ztrátě stability pouze zvětšováním tloušťky pláště. Takový postup představuje značné zvýšení materiálových nákladů, především u skořepin větších průměrů. Často je proto nutné volit cestu vyztužení tenkostěnného válcového pláště. Jedním ze způsobů vyztužení jsou vinuté roury, viz. příklad na obr. 8. Lze tak dosáhnout vysoké obvodové ohybové tuhosti při současné úspoře hmotnosti. Jiný způsob představuje diskontinuální vyztužení hladké skořepiny tuhými prstenci s jistou roztečí  $L$  – viz. obr. 9 [5].



Obr. 8 Příklad spirální roury



Obr. 9 Vyztužení dlouhé válcové skořepiny prstenci

## 2.5 Problémy navrhování a dimenzování plastových podzemních nádob a nádrží

Termoplasty pronikají do mnoha průmyslových odvětví a tempo jejich aplikací se v současnosti neustále zvyšuje. Je tomu tak především proto, že klasické materiály již přestávají splňovat rostoucí potřeby techniky. Bez moderních materiálů by řada inovačních procesů nemohla být uskutečněna. Specifické vlastnosti termoplastů spolu s novými zpracovatelskými a softwarovými technologiemi otevírají široké možnosti použití v nejrůznějších oblastech.

Každá úspěšná aplikace termoplastů je podmíněna vedle důkladné konstrukční a technologické přípravy kvalifikovaným stanovením dimenzí a tvaru navrhované konstrukce. Termoplasty jsou obecně relativně málo tuhé a pevné, mají výrazný sklon k tečení, vysokou teplotní roztažnost a výraznou závislost mechanických charakteristik na teplotě. Tyto vlastnosti se obvykle jeví jako nevýhodné. Na druhé straně však stojí nesporné přednosti, zejména snadné zpracování, nízká energetická náročnost a vysoká produktivita výroby či široké možnosti nových technologií. V neposlední řadě stojí vynikající odolnost proti agresivním látkám a prostředím, která termoplasty předurčuje ke stavbě zařízení, pracujících v tvrdých podmínkách provozů např. v chemickém a potravinářském průmyslu.

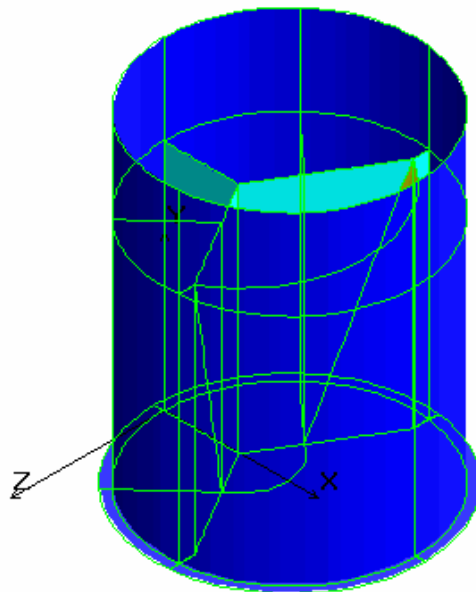
Specifičnost mechanického chování termoplastů s sebou přináší zvláštnosti a obtíže při navrhování ve srovnání s klasickými konstrukcemi. Charakter technologie a snaha omezit hmotnost příp. cenu výrobku vedou k tomu, že konstrukce z termoplastů jsou nejčastěji navrhovány jako tenkostěnné. Přitom však poměr tuhosti k pevnosti je u termoplastů značně nízký, takže v řadě případů je pro návrh výrobku rozhodující stav deformace, nejen

únosnost. Často tak mohou být pro návrh rozhodující mezní stavy, mající za příčinu ztrátu stability konstrukce .

Pláště válcových nádob malých ČOV tvoří tenkostěnná válcová skořepina s určitou vnitřní vestavbou, dělící objem čistírny na jednotlivé sekce. Vnější výztuž pak tvoří zpravidla soustava svislých a obvodových výztužných žeber, resp. pásů.

Provozní zatížení je dáno superpozicí vnitřního hydrostatického tlaku s určitou výškou hladiny vody a vnějšího tlaku, působeného 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.



*Obr. 10 Příklad konstrukce plastového pláště malé ČOV [7]*

Na obr. 10 je znázorněn příklad typické konstrukce malé ČOV. Hladina vody dosahuje určité výše, prakticky do úrovně výšky vnitřní vestavby. Výška vnějšího obsypu (zpravidla šterkového) dosahuje zpravidla po horní okraj nádoby. Norma EN 12 566 stanovuje zjednodušeně průběh tlaku obsypu po výšce nádoby jako lineární. Za běžného - provozního stavu zatížení se vnitřní hydrostatický tlak vody a vnější tlak obsypu vyrovnávají. Ohrožen možnou ztrátou stability je v tomto případě pouze horní nevyztužený úsek nádstavce v případech jeho relativně větších výšek. Z hlediska vzniku mezního stavu ztráty stability válcového pláště je 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. Není-li věnována problematice stability dostatečná pozornost, dochází mnohdy k dosažení mezního stavu ztráty stability zborcením pláště nádoby, viz. příklad havárie na obr. 11.



*Obr. 11*

*Destrukce nádoby malé ČOV ztrátou stability vlivem kombinace zatížení vnějšího tlaku obsypu a hydrostatického tlaku spodní vody [7]*

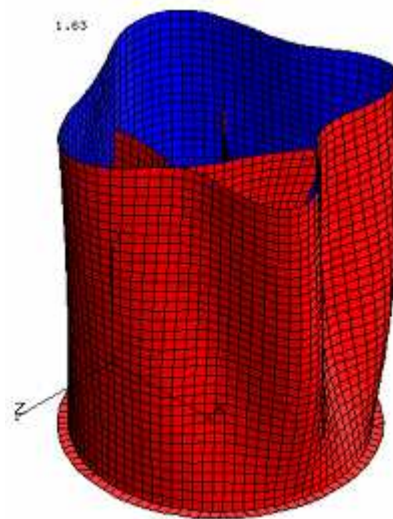


## 2.6 Numerické modelování stability pláště ČOV

Analytická řešení stanovení kritického vnějšího tlaku při ztrátě stability jsou známa pro případy hladkých válcových homogenních a izotropních, příp. ortotropních skořepin, zatížených radiálním vnějším tlakem. Tato řešení umožňují stanovení kritického zatížení při ztrátě stability nevyztužených úseků mezi jednotlivými tuhými obvodovými výztužnými žebry, viz. nejnověji [1]. Umožňují také verifikovat výsledky FEM analýz.

V případech, kdy jsou na válcový plášť přivařeny prvky vnitřní vestavby, nebo je použita soustava výztužných vnějších obvodových a axiálních výztuh je již nutno použít FEM modelování.

Výsledek výpočtu lineární stability skořepinové konstrukce představuje teoretickou hodnotu tzv. kritického zatížení, odpovídající přechodu mezi stabilním a labilním rovnovážným stavem konstrukce (indiferentní rovnováha při kritickém zatížení). Kritické zatížení obecně představuje horní odhad stabilitní únosnosti konstrukce. Na obr. 12 je uveden výsledek výpočtu kritického



Obr. 12 Výsledek FEM analýzy stability pláště ČOV, zatížené vnějším tlakem obsypu [7]  
zatížení PP pláště nádoby z obr. 11. Z výsledných hodnot kritických zatížení, resp. bezpečností na tato zatížení vyplývá relativně malý, prakticky zanedbatelný vliv svislých přepážek vestaveb na stabilitní odolnost vnějšího pláště. Podobně i svislé vnější výztuhy nepřispívají výrazně ke zvýšení stabilitní únosnosti. Z tohoto hlediska jsou nejúčinnější vnější přiva-

řovaná obvodová žebra. Ta jsou však v mnohých aplikacích odmítána z důvodu jak pracnosti, tak jejich snadné zranitelnosti při instalaci čistírny. Volena jsou proto především využití obvodovými pásy, s tloušťkou obvykle odpovídající tloušťce pláště nádoby.

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.

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

### 3 CÍL PRÁCE

Cílem diplomové práce je posouzení možností náhrady homogenních stěn rotačně odlévaných velkoobjemových podzemních nádob strukturními stěnami, a to z hlediska stabilitní únosnosti. Budou zjišťovány možnosti případné úspory materiálu kombinací lehčených a nelehčených vrstev stěny nádoby, a tím vytvářením třívrstevných - sendvičových a dvouvrstevných struktur. Budou výpočtově, na základě aplikace technické teorie ohybu nehomogenních - vrstevnatých stěn stanoveny hodnoty ohybové tuhosti stěn nádrží pro jednotlivé koncepce struktury stěny (homogenní, dvouvrstvá, třívrstvá - sendvičová struktura) z hlediska jejich stabilitní odolnosti. Experimentálně budou dále stanoveny hodnoty ohybové tuhosti vzorků stěn nádob, vyrobených technologií rotomolding. Záměrem je pak srovnání výpočtem stanovených a experimentálně zjištěných hodnot ohybových tuhostí stěn homogenních a vrstevnatých.

## 4 MODELOVÁNÍ VLIVU OHYBOVÉ TUHOSTI STĚNY VÁLCOVÉ PODZEMNÍ NÁDRŽE NA JEJÍ ODOLNOST PROTI ZTRÁTĚ STABILITY

Charakter technologie a snaha omezit hmotnost, příp. cenu výrobku vedou k tomu, že plastové konstrukce jsou navrhovány jako tenkostěnné. Vzhledem k malým hodnotám tuhosti, resp. časově závislé tuhosti (modul tečení) jsou pro návrh výrobku 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, působeného 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 a pod.

Hladina vody v nádržích dosahuje určité výše, výška vnějšího obsypu (zpravidla štěrk) dosahuje zpravidla po horní okraj nádoby. Norma EN 12 566 stanovuje zjednodušeně průběh tlaku obsypu po výšce nádoby jako lineární. Za běžného - provozního stavu zatížení se vnitřní hydrostatický tlak vody a vnějšího tlaku obsypu vyrovnávají. Ohrožen možnou ztrátou stability je v tomto případě pouze horní nevyztužený úsek nádstavce v případech jeho relativně větších výšek. Z hlediska vzniku mezního stavu ztráty stability válcového pláště je obecně značně nepříznivý stav vyprázdňené 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.

#### 4.1 Vliv tloušťky stěny a doby zatížení na stabilitní únosnost

Výsledek FEM výpočtu lineární stability skořepinové konstrukce představuje teoretickou hodnotu tzv. kritického zatížení, odpovídající přechodu mezi stabilním a labilním rovnovážným stavem konstrukce (indiferentní rovnováha při kritickém zatížení). Kritické zatížení obecně představuje teoretickou, tzv. horní mez stabilitní únosnosti konstrukce - tj. velikosti kritického zatížení. Pro studium závislosti ohybové tuhosti stěny nádrže pod účinky vnějšího tlaku obsypu jsme zvolili válcový tvar nádrže - malé čistírny odpadních vod s rozměry: průměr nádoby 1400, výška 2300 mm.

Jako uvažovaný stav zatížení nádoby jsme zvolili nejméně příznivý mimořádný stav zcela vyprázdňené čistírny pod vlivem tlaku zásypu na stěny nádrže .

Hodnotu zatížení jsme stanovili podle normy EN 12 566-3:

Max. hodnota horizontálního tlaku je

$$p_z = k H \gamma g ,$$

kde výpočtová výška  $H = 2,3$  m,  $\gamma = 18$  kN/m<sup>3</sup>, koeficient  $k = 0,27$  pro materiál zásypu štěrk .

Podle EN 12 566 je po výšce nádoby je uvažováno lineární rozložení tlaku s nulovou hodnotou v úrovni terénu.

Řešení je provedeno jako lineárně elastická modální analýza skořepinového modelu. Podmínka spolehlivosti vyžaduje, aby výpočtové zatížení nádoby v uvažovaném případě zatížení s požadovanou bezpečností nepřekročilo výpočtem určené zatížení na mezi ztráty kvazielastické stability pláště konstrukce.

#### Materiálové parametry:

Pro studii byl zvolen typ LLDPE italské firmy Gerbaldo Polimeri, používaný v technologii rotačního odlévání, pod obchodním označením MICROLEX RM 1242 WT .

Z hlediska výpočtu stabilitní únosnosti je rozhodující pouze tuhost v ohybu skořepinového pláště nádoby, která je dána hodnotou modulu pružnosti pro krátkodobé zatížení, resp. modulem tečení pro danou dobu zatížení, tj. po dobu, po kterou bude nádrž prázdná a na nádobu tak bude působit vnější tlak obsypu.

Atest uvádí pro modul pružnosti:

Flexural modulus: metoda: ASTM D 790 naměřená hodnota: 680 MPa

Hodnoty modulu tečení v závislosti na době zatížení, resp. teplotě nejsou běžně k dispozici. Tyto hodnoty je nutno kvalifikovaně odhadovat na základě podobnosti v chování jednotlivých typů PE, uvedených např. v normě EN 1778. Jako výpočtový modul jsme zvolili hodnotu 400 MPa, která v praxi odpovídá době zatížení cca. 1000 h.

### **Uvažovaný stav zatížení:**

Uvažujeme mimořádný stav zatížení, představující zcela vyprázdňenou nádobu pod účinkem tlaku zásypu na stěny nádrže. Uvažuje se max. trvání tohoto mimořádného stavu po dobu, odpovídající výpočtovému modulu (modulu tečení).

Hodnota bezpečnosti na mezní stav ztráty stability vyžadovaná normou EN 1778, čl. 7 je  $S = 2$ .

Hodnota bezpečnosti obecně respektuje především skutečnost, že vypočtené mezní zatížení představuje teoretickou - tzv. horní mez, přičemž mezní zatížení reálných nádob jsou vždy menší, a to v důsledku geometrických nepřesností tvaru nádoby, proměnlivosti tloušťky či místních zeslabení stěny, reziduálních pnutí, nerovnoměrností zatížení při instalaci nádoby, možných účinků spodních vod, dešťových srážek, a dalších aspektů, spojených jak s montáží zařízení, tak jeho provozem.

### **Vypočtené vlastní hodnoty:**

FEM modelem vypočtená vlastní hodnota představuje mezní zatížení na mezi ztráty stability jako násobek provozního zatížení a je tedy hodnotou bezpečnosti na mezní stav ztráty stability konstrukce. Takto určené hodnoty dosaženého stupně bezpečnosti jsou v závislosti na zvolené tloušťce stěny nádoby a době zatížení (době, po kterou je nádoba prázdná), vyjádřené příslušnou hodnotou modulu tečení vyneseny v diagramu 1.

Jak patrně, můžeme pro určitou dobu zatížení - modul tečení nalézt pro zvolenou tloušťku stěny výslednou bezpečnost na ztrátu stability. Např. pokud se požaduje nadi-  
menzování nádoby - malé čistírny odpadních vod pouze na dobu nezbytnou ke krátkodo-

bému vyprázdnění nádoby v řádu hodin (oprava, resp. vyčištění apod.), odpovídá této době zatížení tlakem zeminy modul tečení cca 600 MPa. Bezpečnost pro takto krátkodobý stav je potom např. pro tloušťku stěny 14 mm  $S = 2,4$ .

Podobně lze nalézt pro zadaný modul tloušťku stěny, která vyhovuje podmínce spolehlivosti podle EN 1778, t.j. hodnotě bezpečnosti 2. Např. pro dlouhou dobu prázdné nádrže, dané modulem  $E = 300$  by potřebná tloušťka činila cca 17,5 mm.

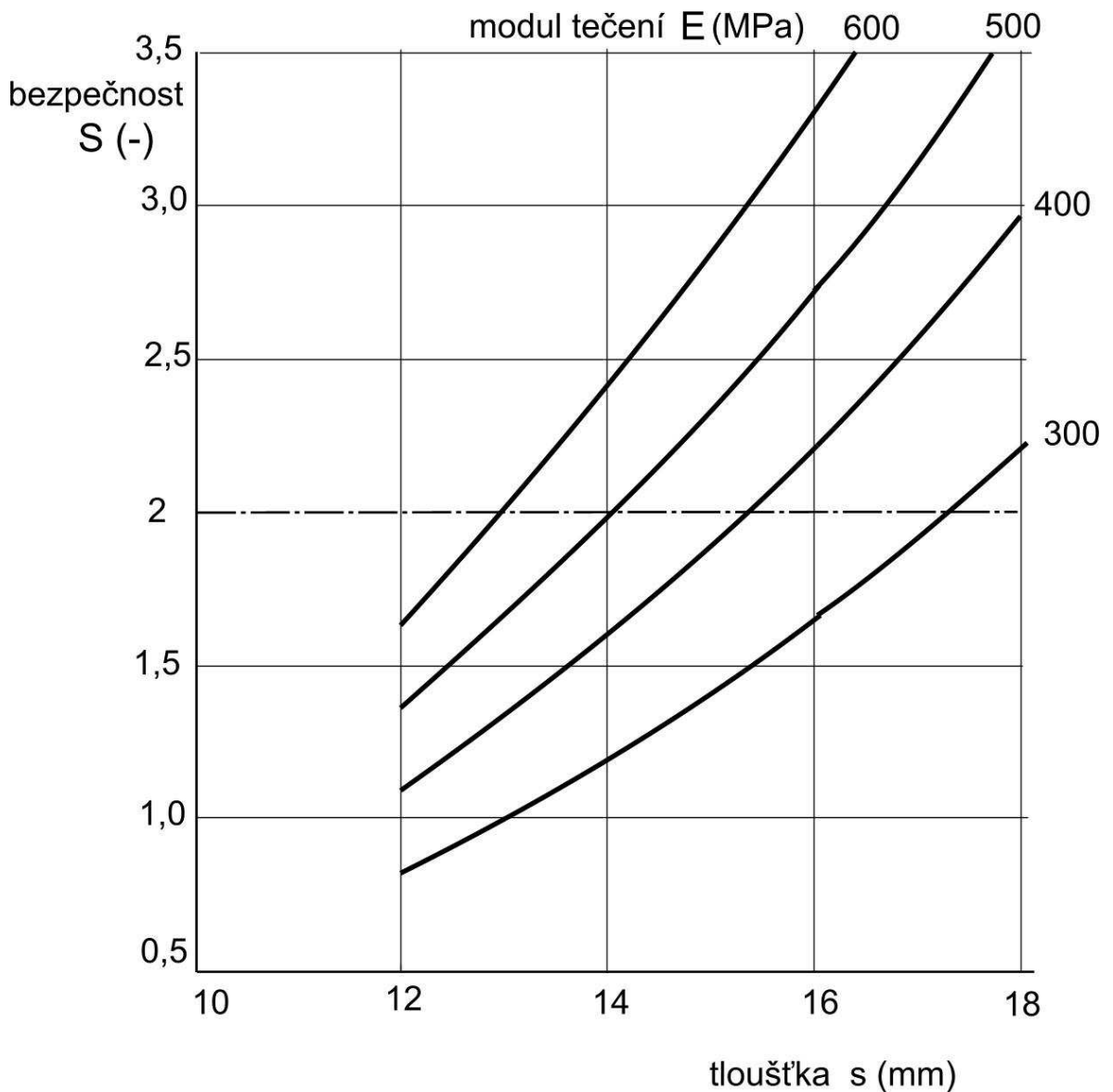
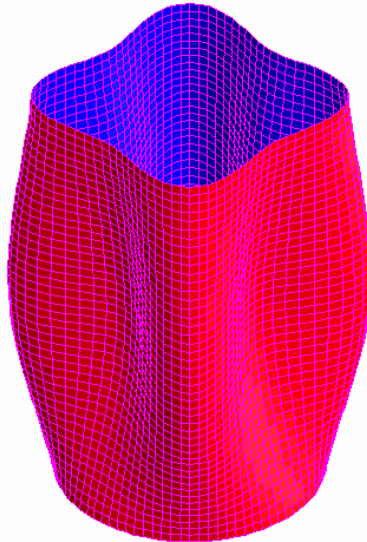


Diagram 1 Závislost stupně bezpečnosti na mez ztráty stability válcového pláště nádoby malé ČOV  $\phi 1400/2300$  mm na tloušťce stěny a výpočtovému modulu tečení



Charakter teoretického vybočení pláště nádoby při ztrátě stability pro tl. 15,5 mm a modul 400 MPa je uveden na obr. 13.

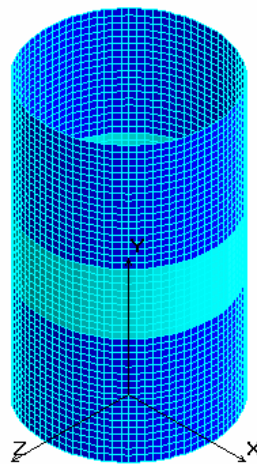
B\_Mode=1 2.05464



*Obr. 13 Charakter teoretického vybočení pláště nádoby při ztrátě stability pro tl. 15,5 mm a modul 400 MPa*

## 4.2 Vliv nerovnoměrnosti tloušťky pláště nádoby na stabilitní únosnost

Za účelem kvalifikovaného odhadu dopadů v nerovnoměrnosti rozdělení tlouštěk, resp. místního zeslabení pláště nádoby při její výrobě jsme sestavili FEM model nádoby shodných rozměrů jako u základního rozměru s tím, že v nejcitlivější oblasti vzhledem ke stabilitní únosnosti, tj. v jeho střední části (obr.13) jsme namodelovali pás o výšce 0,5 m, v němž lze programově tloušťku pláště měnit - viz obr. 14.



*Obr. 14 Model nádoby se zeslabeným úsekem válcového pláště*

Výsledky modelování místního zeslabení pláště nádoby jsme pro modul 400 MPa vynesli v grafické formě na obr. 15.

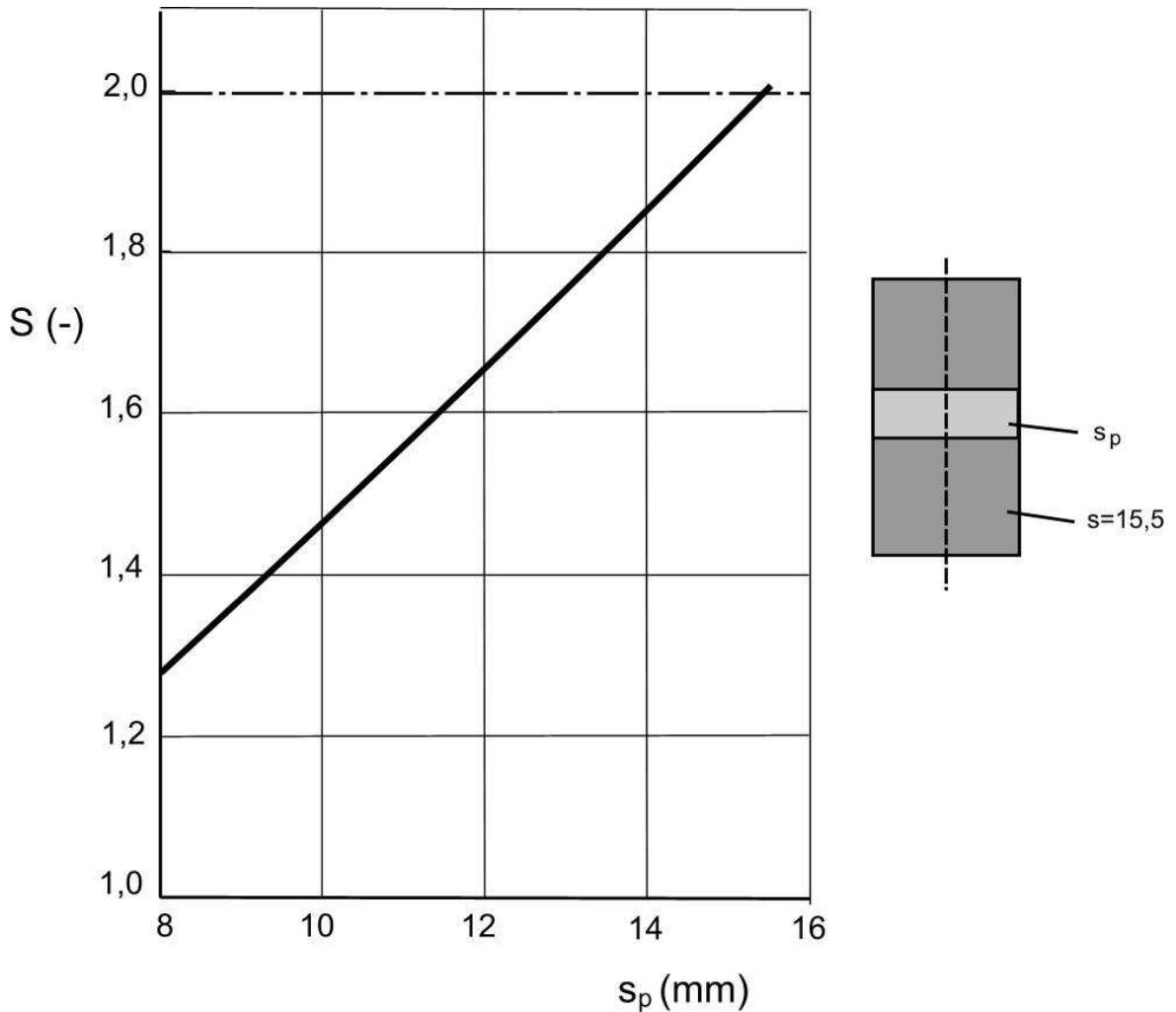
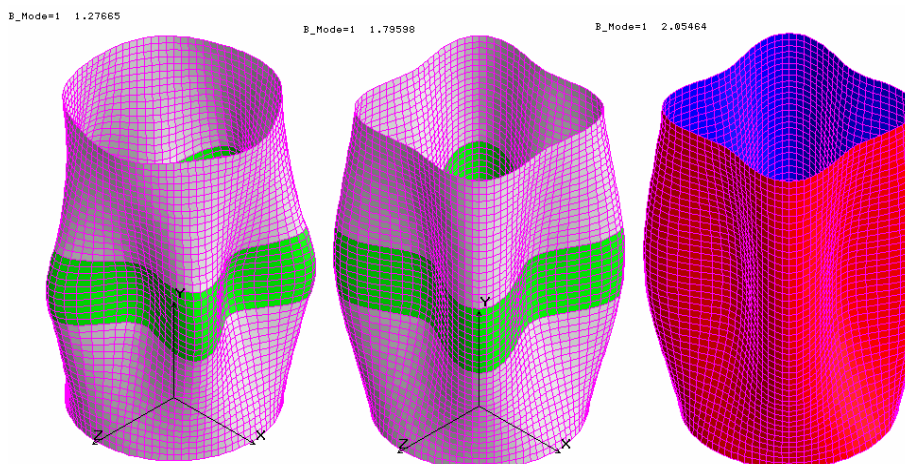


Diagram 2 Závislost stupně bezpečnosti vzhledem k meznímu stavu ztráty stability na místním zeslabení stěny nádrže

Jak patrně, pokud činí zeslabení oproti základní - projektované tloušťce 15,5 mm pouze 0,5 mm, není se třeba zeslabení stěny obávat. Stabilitní odolnost nádoby zůstává prakticky zachována. Tolerovat lze i větší místní zeslabení, cca. o 1 mm, t.j. do 14 mm. Modelový výsledek je totiž na straně větší bezpečnosti, a to proto, že zeslabení jsme modelovali v nejcitlivější oblasti pláště nádoby. V jiných místech by mělo stejné místní zeslabení menší vliv na snížení stupně bezpečnosti.



*Obr. 15 Charakter teoretického vybočení pláště nádoby při ztrátě stability pro případ místního zeslabení tloušťky*

Jak ukazuje obr. 15, do tloušťky zeslabené části 13 mm je vlastní tvar vybočení ještě totožný s tvarem bez zeslabení. Pro větší zeslabení než 13 mm se již charakter vybočení mění.

Dosažené výsledky modelování vlivu nerovnoměrnosti, resp. místního oslabení ukazují, že případná, v praxi se často vyskytující místní relativně malá zeslabení stěny nemají podstatný vliv na celkovou stabilitní únosnost nádoby.

## 5 VRSTEVNATÉ STRUKTURY STĚN NÁDOB V TECHNOLOGII ROTOMOLDING

### 5.1 Třívrstvé - sendvičové struktury

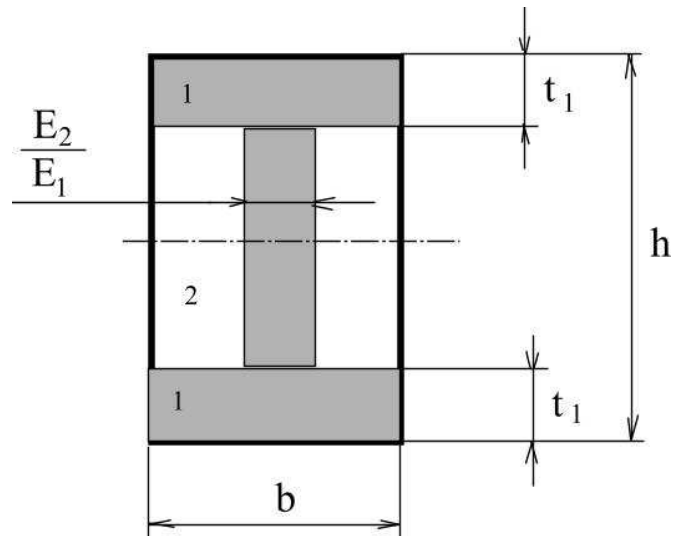
Rotomolding – rotační odlévání je technologie, zaznamenávající v současnosti výrazný vzestup. V produkci velkoobjemových nádob je na jedné straně snaha omezit hmotnost a tím cenu výrobku, což vede k tomu, že nádoby z termoplastů jsou navrhovány jako tenkostěnné skořepiny. Ovšem vzhledem k malým hodnotám tuhosti (modul pružnosti), resp. časově závislé tuhosti (modul tečení) jsou pro návrh podzemních nádrží ( tj. skořepin namáhaných vnějším tlakem a tedy tlakovými membránovými napětími), rozhodující mezní stavy ztráty stability, nikoliv pevnosti. Jednou z cest, jak dosáhnout při úspoře materiálu vyšších hodnot ohybové tuhosti pláštů nádob, je volba třívrstvé - sendvičové stěny. Proces rotomoldingu umožňuje tyto vrstevnaté struktury utvářet.

Navrhovat ohybané prvky jako pruty plného homogenního průřezu je z hlediska efektivního využití materiálu nevhodné. Oblast poblíž neutrální plochy je totiž namáhána nepatrně ve srovnání s namáháním krajních vláken průřezu. Vysoké tuhosti při minimální hmotnosti lze dosáhnout použitím třívrstvého - sendvičového průřezu. Vnější tuhé a pevné vrstvy 1 jsou odděleny lehčným pěnovým jádrem 2 o malé tuhosti. Jde tedy o zvláštní případ složeného prutu.

Pro ohybovou tuhost vrstevnatého - složeného průřezu platí obecně podle technické teorie ohybu kompozitních prvků

$$K_0 = E_1 J_R ,$$

kde  $E_1$  je modul pružnosti povrchových vrstev,  $J_R$  - kvadratický moment plochy redukovaného průřezu.

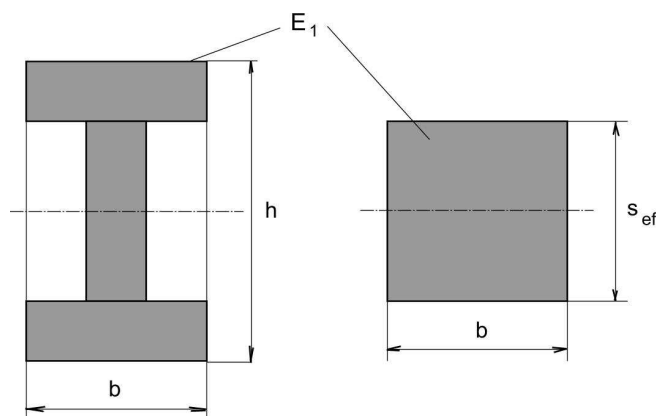


Obr. 16 Redukovaná plocha sendvičové struktury

Pro hodnotu ohybové tuhosti sendvičové struktury jsme odvodili vztah

$$K_0 = E_1 \frac{bh^3}{12} \left[ 1 - \frac{E_1 - E_2}{E_1} \left( 1 - 2 \frac{t_1}{h} \right)^3 \right] .$$

Sendvičová struktura daných rozměrů  $t_1$ ,  $h$  svou hodnotou ohybové tuhosti nahrazuje homogenní vrstvu určité tloušťky. Tuto tloušťku jsme nazvali *efektivní tloušťkou sendvičové stěny*  $s_{ef}$  - viz obr. 17.



Obr. 17 Efektivní tloušťka sendvičové struktury

Efektivní tloušťka sendvičové stěny je tak dána podle obr. 17 rovností ohybových tuhostí

$$E_1 J_R = E_1 J ,$$

a tedy rovností kvadratických momentů

$$J_R = J ,$$

kde  $E_1$  je modul pružnosti základního - nelehčeného plastu,  $J$  je kvadratický moment plochy myšleně homogenního (jednovrstvého) průřezu stěny, daný vztahem

$$J = b s_{ef}^3 / 12 ,$$

kde  $s_{ef}$  je efektivní tloušťka dané struktury.

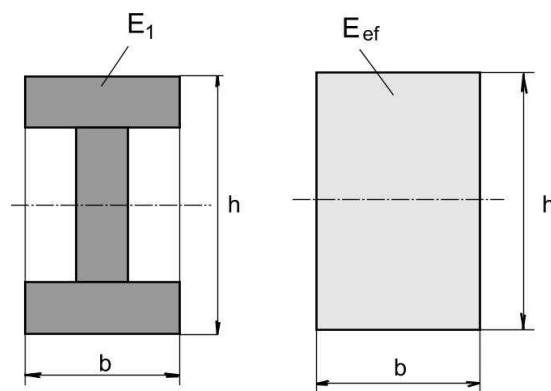
Je tedy

$$s_{ef} = ( 12 J_R / b )^{1/3} .$$

Druhou možností je, především pro případy vyhodnocování experimentálních výsledků, zavést pojem *efektivního modulu pružnosti* sendvičové struktury. Definujeme jej jako modul pružnosti myšleně homogenní (jednovrstvé) stěny tloušťky shodné s tloušťkou sendviče, mající shodnou hodnotu ohybové tuhosti jako daná sendvičová struktura. Z této podmínky je podle obr. 18

$E_1 J_R = E_{ef} J_H$ , takže

$$E_{ef} = E_1 \frac{12 J_R}{b h^3} .$$



Obr. 18 Efektivní modul pružnosti sendvičové struktury

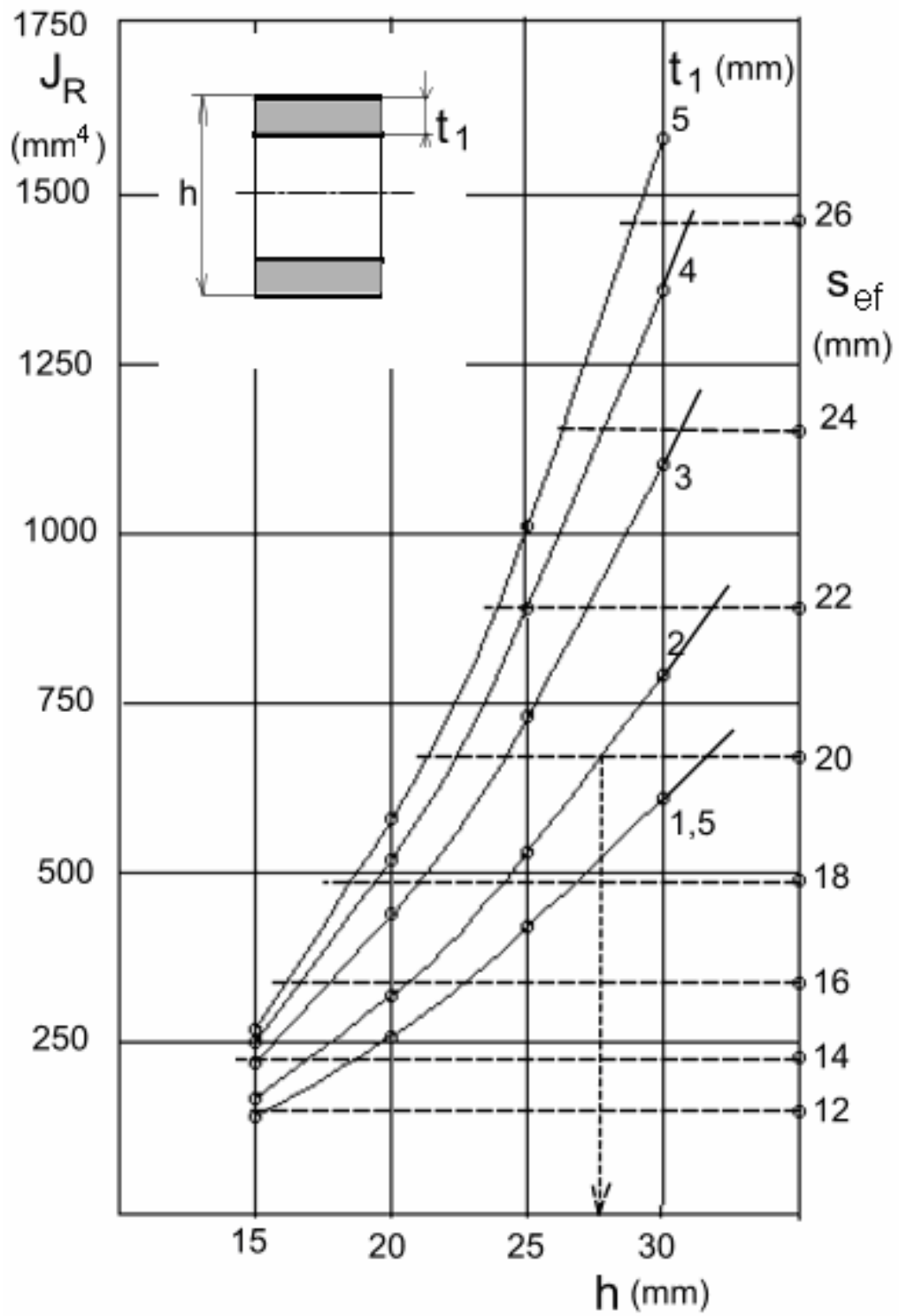


Diagram 3 Závislosti efektivní tloušťky a redukovaného kvadratického momentu na rozměrech sendvičové struktury



Vztahy pro ohybovou tuhost sendvičové struktury a efektivní tloušťky jsme zpracovali v tabulkovém kalkulátoru a výsledky přehledně vynesli v diagramu 3. Výpočet jsme provedli pro limitní případ  $E_2 / E_1 \ll 1$ , tj. za předpokladu zanedbání vlivu lehčené vrstvy na výslednou ohybovou tuhost. Tento předpoklad je oprávněn nejen relativně malou hodnotou modulu pružnosti lehčené střední vrstvy, ale i skutečností, že ohybová napětí v oblasti neutrální plochy ohýbaného prvku jsou malá. Takto určené hodnoty  $J_R$  jsou tak na straně větší bezpečnosti.

Jak je v diagramu znázorněno, například jednovrstvou stěnu tloušťky 20 mm nahrazuje co do ohybové tuhosti, a tedy co do stabilitní únosnosti, např. sendvičová stěna s rozměry  $t_1 = 2$  mm,  $h =$  cca 28 mm. Diagram tak umožňuje praktické zhodnocení určité sendvičové struktury z hlediska stabilitní odolnosti nádoby. Při úspoře materiálu tak lze dosáhnout shodných hodnot ohybové tuhosti ve srovnání s homogenní stěnou a tím i únosnosti vzhledem k meznímu stavu ztráty stability nádoby.

Pro praktické vyhodnocení výsledků standardních zkoušek tuhosti v ohybu reálných sendvičových struktur jsme dále sestavili diagram závislosti poměrné efektivní tloušťky na poměrném efektivním modulu pružnosti zkoumané sendvičové struktury - viz. diagram 4. Z experimentálně stanovených hodnot modulů pružnosti, tj. hodnoty efektivního - zdánlivého modulu pružnosti a modulu pružnosti nelehčeného plastu vyplývá z diagramu 4 poměrná velikost efektivní tloušťky dané sendvičové struktury, tedy tloušťka homogenní vrstvy, kterou sendvičová stěna nahrazuje svou ohybovou tuhostí, a tedy i stabilitní odolností.

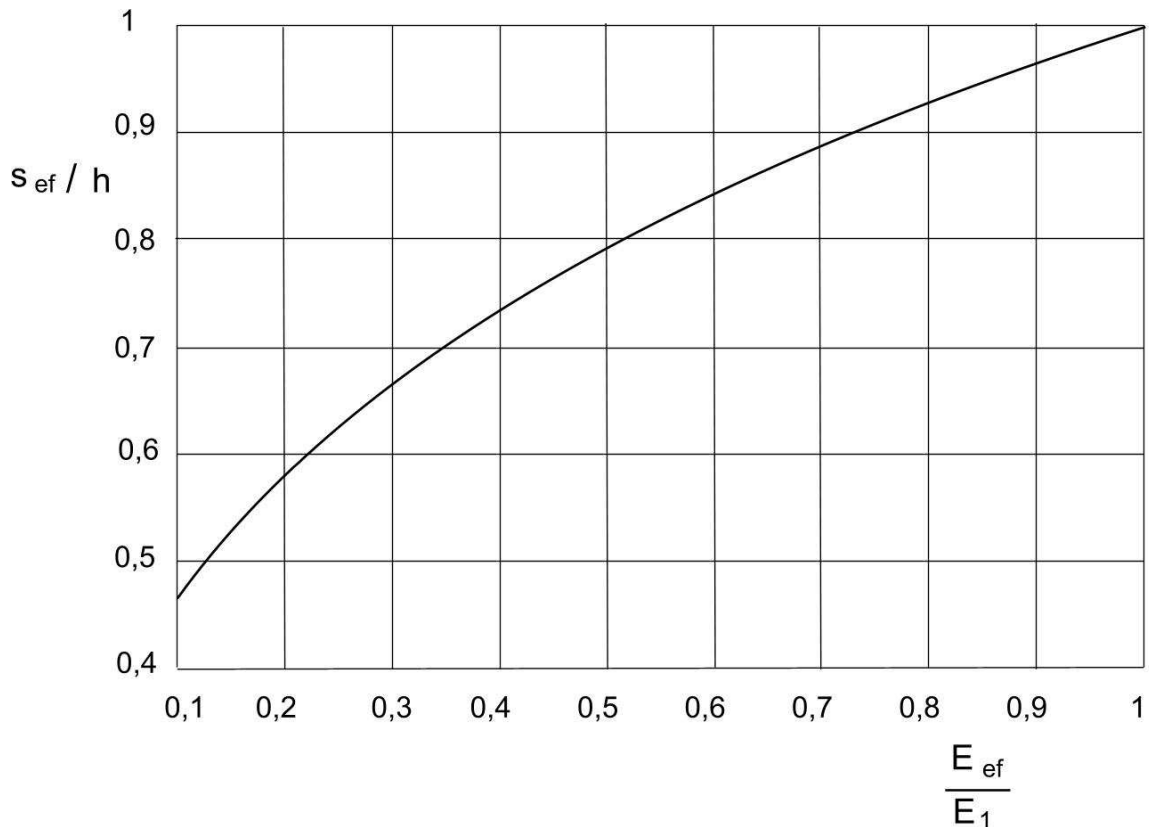


Diagram 4 Závislost poměrné efektivní tloušťky na poměrném efektivním modulu pružnosti sendvičové struktury

Výstupem měření ohybové tuhosti je efektivní modul pružnosti. Je-li naměřená hodnota  $E_{ef}$  např.  $0,5 E_1$ , odpovídá tomuto výsledku podle diagramu 4 efektivní tloušťka o hodnotě 80% výšky sendvičové struktury. Jinak řečeno, zkoumaná struktura nahradí homogenní stěnu o tloušťce 80% výšky  $h$ , t.j. tloušťky sendvičové stěny.

### Optimalizace sendvičové struktury

S předchozími výsledky souvisí pojem optimalizace sendvičové struktury. Jak patrně z diagramu 3, lze homogenní stěnu dané tloušťky  $s_{ef}$  nahradit strukturami s různou geometrií. Lze volit spíše větší výšky  $h$  při nižších tloušťkách povrchových vrstev  $t_1$ , nebo naopak tlustšími povrchovými vrstvami při nižších výškách - celkových tloušťkách sendviče. Podle diagramu 3 lze např. homogenní stěně o síle 20 mm budou odpovídat struktury od  $t_1 = 5$  mm,  $h = 22$  mm po  $t_1 = 1,5$  mm při  $h = 32$  mm. Evidentně se se zvyšujícími hodno-

tami vrstev  $t_1$  využití materiálu a tedy efekt sendvičové struktury zmenšuje, vzhledem k vyšším objemům materiálu v blízkosti neutrální osy.

Označíme-li  $\rho$  jako hustotu, příp. cenu za hmotnostní jednotku materiálu, bude hmotnost, příp. cena jednotkové délky prutu dána vztahem

$$m = b[h\rho_2 + 2t_1(\rho_1 - \rho_2)] .$$

Nalézt pro určité  $b$ ,  $h$  optimální tloušťku vnějších vrstev znamená pak zřejmě nalézt extrém funkce  $K_0/m$ . Pro výšku  $h=30$  mm je podle diagramu 5 optimální tloušťka povrchových vrstev cca. 7 mm.

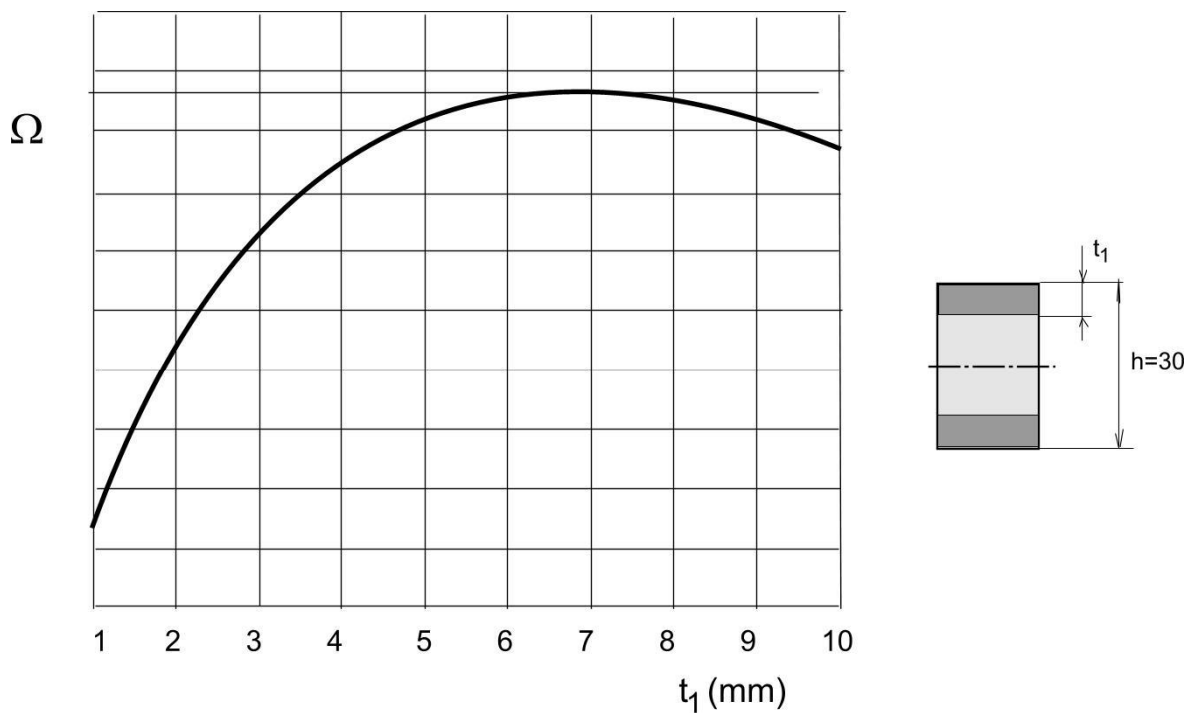
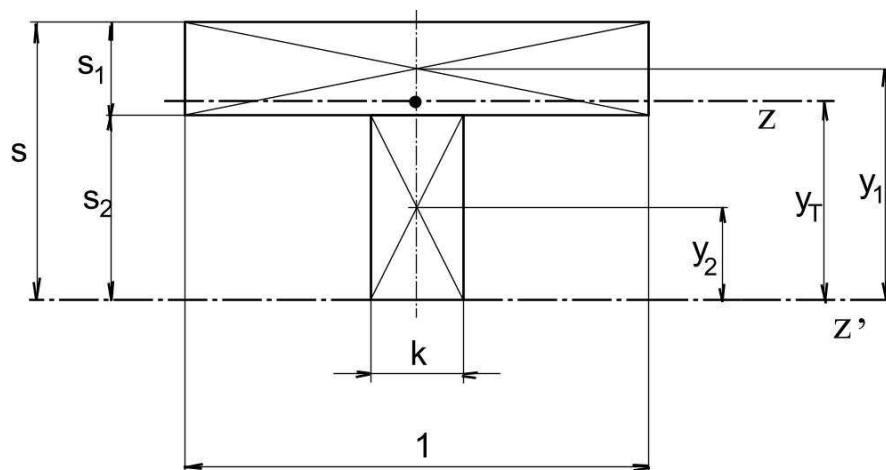


Diagram 5 Nalezení optimální tloušťky povrchových vrstev pro výšku  $h=30$  mm

## 5.2 Dvouvrstvé stěny

V praxi se v oblasti výroby odstředivého odlévání kromě třívrstvých - sendvičových koncepcí objevují i koncepce dvouvrstvé, s jednou - vnější kompaktní - nelehčenou vrstvou a vnitřní lehčenou vrstvou. Na rozdíl od klasické dvouvrstvé koncepce, nejčastěji zamýšlené jako kombinace nosné vrstvy (např. laminát) a ochranné výstelky (termoplast) je zde záměr odlišný. Snahou je zde samozřejmě dosáhnout podobně jako sendvičovou strukturou vyšší ohybové tuhosti při úspoře materiálu.

Lehčení části stěny nádoby při stejné spotřebě materiálu působí zvýšení celkové tloušťky stěny nádoby, tento efekt je však spíše pouze optický, bez většího vlivu na ohybovou tuhost, a tím na stabilitní únosnost nádoby.



Obr. 19 Schéma k výpočtu redukované plochy dvouvrstvého průřezu

Výpočet průřezových charakteristik jsme podle schématu na obr. 19 provedli takto:

Poměr modulů základní - nelehčené a lehčené vrstvy je

$$k = \frac{E_2}{E_1}$$

Poloha těžiště, t.j. poloha neutrální osy je určena vztahem

$$y_T = \frac{U}{S} = \frac{s_1 \left( s_2 + \frac{s_1}{2} \right) + k \frac{s_2^2}{2}}{s_1 + ks_2} .$$

Kvadratický moment redukované plochy dvouvrstvého průřezu k pomocné ose  $z'$  (zvolena krajní osa průřezu) určíme s pomocí Steinerovy věty jako součet

$$J_R' = \frac{1}{12} (s_1^3 + ks_2^3) + \left( s_2 + \frac{s_1}{2} \right)^2 s_1 + k \frac{s_2^3}{4}$$

a kvadratický moment redukované plochy dvouvrstvé stuktury je opět s pomocí Steinerovy věty

$$J_R = J_R' - (s_1 + ks_2)y_T^2 .$$

Podobně jako u sendvičové struktury definujeme efektivní tloušťku dvouvrstvé stěny nádoby  $s_{ef}$ , která svou hodnotou ohybové tuhosti nahrazuje homogenní vrstvu určité tloušťky. Ta je nyní

$$s_{ef} = (12J_R)^{\frac{1}{3}} .$$

Definovali jsme dále hodnotu kvadratického momentu myšleně homogenní stěny se shodnou tloušťkou dvouvrstvé stěny :

$$J_H = \frac{1}{12} (s_1 + s_2)^3$$

Můžeme tak vyjádřit relativní pokles tuhosti, působený nalehčením vrstvy  $s_2$  vůči nelehčené stěně :

$$j = \frac{J_R}{J_H} .$$

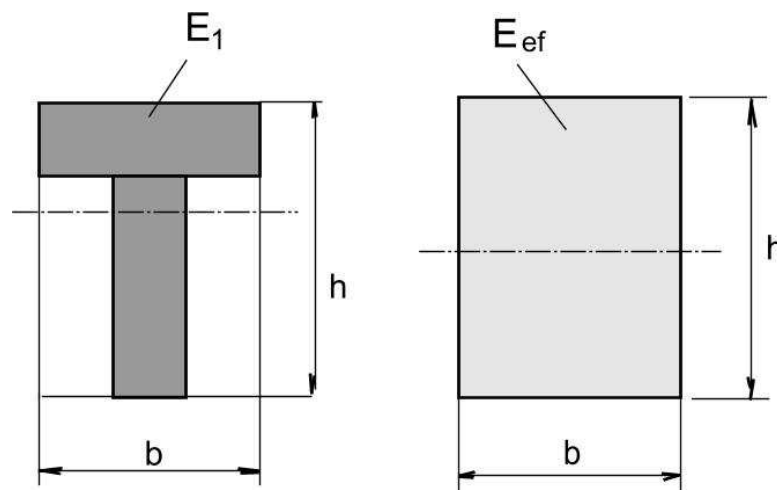
Efektivní modul pružnosti dvouvrstvé stěny je tak podle obr. 20 vyjádřen vztahem

$$E_{ef} = E_1 \frac{J_R}{J_H} = E_1 j ,$$

nebo též

$$E_{ef} = E_1 \frac{12J_R}{h^3} , \text{ kde } h = s_1 + s_2 .$$

Oproti sendvičové struktuře jsou nyní hodnoty kvadratických momentů vztaženy na jednotkovou šířku průřezu ( $b = 1 \text{ mm}$ ).



Obr. 20 Efektivní modul dvouvrstvé struktury

### 5.3 Výsledky zkoušek ohybové tuhosti reálných struktur

Laskavostí firmy Aquatec VFL, s. r. o., Dubnica n.V., jsme získali vzorky stěn pokusných - prototypových nádob, vyrobených technologií rotomolding. Byly získány vzorky celkem pěti typů struktur, z toho čtyř sendvičových struktur různé tloušťky  $h$  a tloušťky povrchových vrstev  $t_1$ , a jeden typ dvouvrstvé struktury o jmenovité celkové tloušťce 15 mm.

Vzorky jsme získali z dílů ve formě částí jednotlivých plášťů, které jsme z nádob vyřízli ve výrobě, v laboratoři jsme pak připravili vzorky pro standardní ohybový test nařezáním na pásy šířky 20 mm.

Proměřením tlouštěk vrstev jednotlivých struktur jsme stanovili jejich průměrné - jmenovité hodnoty. Přehled zkoumaných struktur je uveden v tab. 1,2.

Sendvičové struktury		
Ozn. vzorku	$h$ (mm)	$t_1$ (mm)
3v_m	10	2,5
3v_zm 11	11	1,6
3v_zm 7	7	2,4
3v_zm 15	15	2

*Tab. 1 Sendvičové struktury - přehled*

Dvouvrstvá struktura			
Ozn. vzorku	h (mm)	s <sub>1</sub> (mm)	s <sub>2</sub> (mm)
2v_15	15	4,5	10,5

Tab. 2 Dvouvrstvá struktura

Experimentálně zjištěné hodnoty efektivního modulu pružnosti jsou uvedeny v následujících tabulkách.

3v_m10	E	Fmax	dL při Fmax	W při Fmax	a	b	S
n = 15	MPa	MPa	%	Nmm	mm	mm	mm <sup>2</sup>
x	576	5,72	2,1	651,11	9,88	20	197,6
s	10,5	5,01	2,7	1037,79	0,2683	0	5,37
Var.k	2,2	87,6	129,35	159,39	2,72	0	2,72

Tab. 3 Vzorek 3v\_m10

3v_zm11	E	Fmax	dL při Fmax	W při Fmax	a	b	S
n = 15	MPa	MPa	%	Nmm	mm	mm	mm <sup>2</sup>
x	422	1,8	0,5	25,2	10,7	18,9	202,23
s	8,86	0,51	0,2	17,27	0	0,2236	2,39
Var.k	2,61	28,31	38	68,54	0	1,18	1,18

Tab. 4 Vzorek 3v\_zm11



3v_zm7	E	Fmax	dL při Fmax	W při Fmax	a	b	S
n = 15	MPa	MPa	%	Nmm	mm	mm	mm <sup>2</sup>
x	640	2,44	0,4	18,11	6,65	20,2	134,32
s	5,11	0,406	0,1	7,22	0,1291	0,2449	2,61
Var.k	1,02	16,62	26,26	39,87	1,94	1,21	1,94

Tab. 5 Vzorek 3v\_m7

3v_zm15	E	Fmax	dL při Fmax	W při Fmax	a	b	S
n = 15	MPa	MPa	%	Nmm	mm	mm	mm <sup>2</sup>
x	396	3,47	2,8	577,46	14,92	19,46	290,32
s	8,32	2	2,6	737,09	0,19	0,2452	5,31
Var.k	3,53	57,63	94,75	127,64	1,27	1,26	1,83

Tab. 6 Vzorek 3v\_zm15

2v_15	E	Fmax	dL při Fmax	W při Fmax	a	b	S
n = 15	MPa	MPa	%	Nmm	mm	mm	mm <sup>2</sup>
x	296	1,27	0,4	20,11	15,36	19,63	301,52
s	11,9	0,243	0,1	8,31	0,1949	0,1396	4,41
Var.k	4	19,11	22,54	41,3	1,27	0,71	1,46

Tab. 7 Vzorek 2v\_15

## 5.4 Dosažené výsledky a diskuse

Srovnání teoretických a experimentálních hodnot jednotlivých struktur

Sendvičové struktury

Pro jednotlivé rozměry tloušťek struktur byly vypočteny teoretické hodnoty efektivního modulu pružnosti a srovnány s experimentálně určenými. Výsledek je uveden v tab. 8.

Ozn. vzorku	h (mm)	t <sub>1</sub> (mm)	E <sub>ef teor</sub> (MPa)	J <sub>H</sub> (mm <sup>4</sup> )	E <sub>ef exp</sub> (MPa)
3v_m 10	10	3	612	83,3	576
3v_zm 11	11	2	450	111	422
3v_zm 7	7	2,4	678	28,6	640
3v_zm 15	15	2	424	281	396

*Tab. 8 Srovnání sendvičových struktur*

Jak patrně, jsou experimentální hodnoty ve všech případech poněkud nižší, než teoretické.

Přesto lze pro praktické účely, zejména predikce možného nahrazení homogenní - jednovrstvé stěny použít teoretické hodnoty jako kvalifikovaný odhad ohybové tuhosti dané sendvičové struktury a tedy stabilitní odolnosti příslušné nádoby. Pro posouzení vhodnosti náhrady homogenní - jednovrstvé stěny vrstevnatou strukturou slouží hodnota její efektivní tloušťky. Efektivní tloušťky, vypočtené na základě experimentálních hodnot E<sub>ef</sub> jsou uvedeny v tab. 9.

Ozn. vzorku	h (mm)	$E_{ef\ exp}$ (MPa)	$s_{ef}$ (mm)
3v_m 10	10	576	8,9
3v_zm 11	11	422	9,1
3v_zm 7	7	640	6,7
3v_zm 15	15	396	12,6

*Tab. 9 Efektivní tloušťky*

Posouzení vhodnosti náhrady homogenní stěny třívrstvou vyplývá z porovnání spotřeby materiálu. Srovnáme proto relativní hmotnost sendvičové struktury s hmotností homogenní stěny s efektivní tloušťkou (t.j. tloušťkou, kterou daná struktura nahrazuje). Výsledky jsou uvedeny v tab. 10. Uvažovaný stupeň lehčení je podle informací pracovníků firmy Aquatec 1:3.

Ozn. vzorku	$s_{ef}$ (mm)	$m_{3v}$	$m_{sef}$	$m_{sef}/m_{3v}$
3v_m 10	8,9	22	26,7	1,21
3v_zm 11	9,1	19	27	1,42
3v_zm 7	6,7	16,6	20,1	1,21
3v_zm 15	12,6	23	37,8	1,64

*Tab. 10 Sendvičové struktury – srovnání hmotností*

Z dosažených výsledků vyplývá, že zcela jednoznačně je nejefektivnější struktura 15. Poměrně akceptovatelný výsledek představuje ještě i struktura 11. Zbývající struktury 7 a 10 však nelze vzhledem k malé úspoře materiálu doporučit. Je to dáno tím, že struktury 7, 10 dosahují zdánlivě sice vysoké hodnoty  $s_{ef}$ , ale neekonomicky, za cenu značných tloušťek povrchových vrstev  $t_1$ . Tím se pak příliš neliší od homogenní stěny.

V těchto případech se pak jedná o nepochopení principu sendvičové stěny. Efektivita sendvičové struktury je totiž při určité hodnotě tloušťek povrchových vrstev podmíněna relativně větší výškou sendvičové struktury  $h$ . To je patrné na příkladu struktury 10, která má sice tloušťky  $t_1$  rovny 3 mm, a efektivní tl. 8,9, kdežto struktura 15 při  $t_1 = 2$  mm má  $s_{ef} = 12,6$  mm.

#### Dvouvrstvá struktura

Výsledné parametry dané dvouvrstvé stěny jsou uvedeny v tab. 11.

Ozn. vz.	$h$ (mm)	$s_1$ (mm)	$E_{ef\ teor}$ (MPa)	$J_H$ (mm <sup>4</sup> )	$E_{ef\ exp}$ (MPa)	$s_{ef\ exp}$ (mm)
2v_15	15	4,5	311	281,3	296	9,2

*Tab. 11 Dvouvrstvá struktura – výsledné parametry*

Posouzení vhodnosti náhrady homogenní stěny dvouvrstvou vyplývá opět z porovnání spotřeby materiálu. Srovnáním relativní hmotnosti dvouvrstvé stěny s hmotností homogenní stěny s efektivní tloušťkou dostaneme:

Ozn. vzorku	$s_{ef}$ (mm)	$m_{3v}$	$m_{sef}$	$m_{sef} / m_{3v}$
2v_15	9,2	24	27,6	1,15

*Tab. 12 Dvouvrstvá struktura - srovnání hmotností*

Z výsledku vyplývá nevýhodnost volby dvouvrstvé koncepce stěny, kdy i přes relativně značnou tloušťku lehčené vrstvy je možná úspora materiálu zanedbatelná.

## ZÁVĚR

Každá úspěšná aplikace termoplastů je podmíněna vedle důkladné konstrukční a technologické přípravy kvalifikovaným stanovením dimenzí a tvaru navrhované konstrukce. Termoplasty jsou obecně relativně málo tuhé a pevné, mají výrazný sklon k tečení, vysokou teplotní roztlačnost a výraznou závislost mechanických charakteristik na teplotě. Tyto vlastnosti se obvykle jeví jako nevýhodné. Na druhé straně však stojí nesporné přednosti, zejména snadné zpracování, nízká energetická náročnost a vysoká produktivita výroby či široké možnosti nových technologií. V neposlední řadě stojí vynikající odolnost proti agresivním látkám a prostředí, která termoplasty předurčuje ke stavbě zařízení, pracujících v tvrdých podmínkách provozů např. v chemickém a potravinářském průmyslu.

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, a tedy příslušné hodnotě ohybové tuhosti stěny při jejich konstrukčním návrhu zvýšenou pozornost. Tím lze zabránit možným neúspěchům v praktických aplikacích těchto typů konstrukcí.

Jak vyplývá z dosažených výsledků, sendvičová stěna představuje při optimalizované struktuře jak požadovanou - dostatečnou ohybovou tuhost z hlediska stabilitní únosnosti pláště nádoby, tak možnou úsporu materiálu ve srovnání s homogenní - jednovrstvou stěnou.

**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](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](http://www.simona-plastics.cz)
- [7] [www.aquatec.sk](http://www.aquatec.sk)
- [8] Svařování termoplastů: Horkovzdušné svařování. Techmagazin.cz [online]. 2012, s. 1, 6. 3. 2012 [cit. 2013-11-15]. Dostupné z: <http://www.techmagazin.cz/491>
- [9] Plastové nádrže. Výrobce zařízení z konstrukčních termoplastů: ZOMApplast [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/>
- [10] 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)
- [11] Rotomoulding, vstřikování, vytlačování plastů. Plastové nádoby, nádrže na vodu, do země [online]. [cit. 2013-12-07]. Dostupné z: <http://www.img-management.cz/technologie.htm>

- [12] TechPark.sk: Technologie rotačního tváření. TechPark.sk [online]. 2008 [cit. 2013-12-08]. Dostupné z: <http://www.techpark.sk/52008/technologie-rotacniho-tvareni.html>
- [13] 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>
- [14] 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/>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

Symbol	Název	Jednotka
E	Modul pružnosti, resp. modul tečení	[MPa]
$E_{ef}$	Efektivní modul pružnosti	[MPa]
b	Šířka vzorku	[mm]
h	Výška sendvičové struktury	[mm]
$K_O$	Ohybová tuhost struktury	[N.mm <sup>2</sup> ]
J	Kvadratický moment plochy průřezu	[mm <sup>4</sup> ]
$J_R$	Kvadratický moment redukované plochy průřezu	[mm <sup>4</sup> ]
s	Tloušťka vrstvy	[mm]
$s_{ef}$	Efektivní tloušťka vrstevnaté struktury	[mm]
$t_1$	Tloušťka povrchové vrstvy sendvičové struktury	[mm]
U	Statický moment plochy průřezu	[mm <sup>3</sup> ]
S	Plocha průřezu	[mm <sup>2</sup> ]
1	Index nelehčené vrstvy	-
2	Index lehčené vrstvy	-



## SEZNAM OBRÁZKŮ A DIAGRAMŮ

Obr. 1 Příklad nádoby vyráběné spirálním navíjením.....	14
Obr. 2 Princip technologie rotačního odlévání.....	16
Obr. 3 Schéma membránové napjatosti elementu stěny.....	22
Obr. 4 Schéma ohybové napjatosti elementu stěny.....	23
Obr. 5 K výkladu ztráty stability jednoose tlačené stěny.....	26
Obr. 6 K výkladu ztráty stability válcové skořepiny.....	27
Obr. 7 Ztráta stability dlouhé válcové skořepiny.....	28
Obr. 8 Příklad spirální roury.....	29
Obr. 9 Vyztužení dlouhé válcové skořepiny prstenci.....	30
Obr. 10 Příklad konstrukce plastového pláště malé ČOV.....	31
Obr. 11 Destrukce nádoby malé ČOV ztrátou stability vlivem kombinace zatížení vnějšího tlaku obsypu a hydrostatického tlaku spodní vody.....	32
Obr. 12 Výsledek FEM analýzy stability pláště ČOV, zatížené vnějším tlakem obsypu.....	33
Obr. 13 Charakter teoretického vybočení pláště nádoby při ztrátě stability pro tl. 15,5 mm a modul 400 MPa.....	41
Obr. 14 Model nádoby se zeslabeným úsekem válcového pláště.....	42
Obr. 15 Charakter teoretického vybočení pláště nádoby při ztrátě stability pro případ místního zeslabení tloušťky.....	44
Obr. 16 Redukovaná plocha sendvičové struktury.....	46
Obr. 17 Efektivní tloušťka sendvičové struktury.....	46
Obr. 18 Efektivní modul pružnosti sendvičové struktury.....	47
Obr. 19 Schéma k výpočtu redukované plochy dvouvrstvého průřezu.....	52
Obr. 20 Efektivní modul dvouvrstvé struktury.....	54
Diagram1 Závislost stupně bezpečnosti na mez ztráty stability válcového pláště nádoby malé ČOV $\phi$ 1400/2300 mm na tloušťce stěny a výpočtovému modulu tečení.....	40
Diagram2 Závislost stupně bezpečnosti vzhledem k meznímu stavu ztráty stability na místním zeslabení stěny nádrže.....	43
Diagram3 Závislosti efektivní tloušťky a redukovaného kvadratického momentu na rozměrech sendvičové struktury.....	48
Diagram4 Závislost poměrné efektivní tloušťky na poměrném efektivním modulu pružnosti sendvičové struktury.....	50
Diagram5 Nalezení optimální tloušťky povrchových vrstev pro výšku $h=30$ mm.....	51

**SEZNAM TABULEK**

Tab.1 Sendvičové struktury - přehled.....	55
Tab.2 Dvouvrstvá struktura.....	56
Tab.3 Vzorek 3v_m10.....	56
Tab.4 Vzorek 3v_zm11.....	56
Tab.5 Vzorek 3v_m7.....	57
Tab.6 Vzorek 3v_zm15.....	57
Tab.7 Vzorek 2v_15.....	57
Tab.8 Srovnání sendvičových struktur.....	58
Tab.9 Efektivní tloušťky.....	59
Tab.10 Sendvičové struktury - srovnání hmotností.....	59
Tab.11 Dvouvrstvá struktura - výsledné parametry.....	60
Tab.12 Dvouvrstvá struktura - srovnání hmotností.....	60

**SEZNAM PŘÍLOH**

P I: Materiálový list GP Natural .....	68
P II: Materiálový list GP Blue .....	69
P III: Materiálový list GP Green .....	70
P IV: Testovací zpráva VÚSAPL .....	71

## PŘÍLOHA P I: MATERIÁLOVÝ LIST GP NATURAL



Azienda con sistema  
qualità certificato  
UNI EN ISO 9001:2008  
Bureau Veritas

## Technical Data Sheet

Product: MICROLEX RM 1242 WT

PROPERTIES	UNIT	ASTM METHOD	VALUES
MFI (190°/2,16 Kg)	g/10'	ASTM D 1238	4
Density (at 23°C)	g/cm <sup>3</sup>	ASTM D 1505	0,938
Tensile stress at yield	MPa	ASTM D 638	18
Melting point	°C	ASTM D 2117	128
Elongation at break	%	ASTM D 638	700
Flexural modulus	MPa	ASTM D 790	680
Vicat	°C	ASTM D 1525	118
Hardness (Shore D)	-	ASTM D 2240	64
ESCR @ 50° 100% Igepal	h	ASTM D 1693 (B)	300
Additives	-	-	U.V. - A.O.

N.B.: The methodologies and the reference values are those expressed by the producer of raw material

## Certificate Of Analysis

Material	Colour	MC	Label	Batch
MICROLEX RM 1242 WT	NATURAL	600	6747	12001197

## Granulometry distribution

Mesh	Range	%	Norm
710 my	0 - 2 %	0	ASTM D 1921-89 Met. A
500 my	8 - 15 %	10	ASTM D 1921-89 Met. A
420 my	16 - 26 %	21	ASTM D 1921-89 Met. A
297 my	30 - 40 %	35	ASTM D 1921-89 Met. A
210 my	13 - 25 %	19	ASTM D 1921-89 Met. A
149 my	10 - 20 %	10	ASTM D 1921-89 Met. A
Fond	3 - 10 %	5	ASTM D 1921-89 Met. A

Test	Unit	Range	Values	Norm
Dry Flux	Seconds		28	ASTM D 1895 Met. A
Apparent Density	g/dm <sup>3</sup>		350	ASTM D 1895 Met. A
M.F.I.	g/10'	(± 20 %)*	4,08	ASTM D 1238
Density (at 23° C)	g/cm <sup>3</sup>	(± 0,20 %)*	0,938	ASTM D 1505

\* as referred to the values of the TDS

THIS MATERIAL HAS BEEN PRODUCED, CHECKED AND TESTED FOLLOWING OUR STANDARD PROCEDURES

Att: values given above are the result of test made in our laboratory with comparative methods

THIS DOCUMENT HAS BEEN ELECTRONICALLY GENERATED AND IT DOES NOT NEED TO BE SIGNED

## GERBALDO POLIMERI

Strada del Collaretto 16 - 12030 Caramagna Piemonte (CN)  
Tel. 0172 - 89637 - 810311 Fax 0172 - 89109  
www.gerbaldopolimeri.it - email: info@gerbaldopolimeri.it  
c.f./p.iva e n. reg. delle imprese 01820920047 - R.E.A. 137756

## PŘÍLOHA P II: MATERIÁLOVÝ LIST GP BLUE



## Technical Data Sheet

Product: MICROLEX RM 1242 WT

PROPERTIES	UNIT	ASTM METHOD	VALUES
MFI (190°/2,16 Kg)	g/10'	ASTM D 1238	4
Density (at 23°C)	g/cm <sup>3</sup>	ASTM D 1505	0,938
Tensile stress at yield	MPa	ASTM D 638	18
Melting point	°C	ASTM D 2117	128
Elongation at break	%	ASTM D 638	700
Flexural modulus	MPa	ASTM D 790	680
Vicat	°C	ASTM D 1525	118
Hardness (Shore D)	-	ASTM D 2240	64
ESCR @ 50° 100% Igepal	h	ASTM D 1693 (B)	300
Additives	-	-	U.V.

N.B.: The methodologies and the reference values are those expressed by the producer of raw material

## Certificate Of Analysis

Material	Colour	MC	Label	Batch
MICROLEX RM 1242 WT	BLUE C23	600	6696	12000960

## Granulometry distribution

Mesh	Range	%	Norm
710 my	0 - 2 %	0	ASTM D 1921-89 Met. A
500 my	8 - 15 %	10	ASTM D 1921-89 Met. A
420 my	16 - 26 %	19	ASTM D 1921-89 Met. A
297 my	30 - 40 %	35	ASTM D 1921-89 Met. A
210 my	13 - 25 %	20	ASTM D 1921-89 Met. A
149 my	10 - 20 %	11	ASTM D 1921-89 Met. A
Fond	3 - 10 %	5	ASTM D 1921-89 Met. A

Test	Unit	Range	Values	Norm
Dry Flux	Seconds		24	ASTM D 1895 Met. A
Apparent Density	g/dm <sup>3</sup>		380	ASTM D 1895 Met. A
M.F.I.	g/10'	(± 20 %)*	4,27	ASTM D 1238
Density (at 23° C)	g/cm <sup>3</sup>	(± 0,20 %)*	0,939	ASTM D 1505

\* as referred to the values of the TDS

THIS MATERIAL HAS BEEN PRODUCED, CHECKED AND TESTED FOLLOWING OUR STANDARD PROCEDURES

Att: values given above are the result of test made in our laboratory with comparative methods

THIS DOCUMENT HAS BEEN ELECTRONICALLY GENERATED AND IT DOES NOT NEED TO BE SIGNED

**GERBALDO POLIMERI**  
 Strada del Collaretto 16 - 12030 Caramagna Piemonte (CN)  
 Tel. 0172 - 89637 - 810311 Fax 0172 - 89109  
 www.gerbaldopolimeri.it - email: info@gerbaldopolimeri.it  
 c.f./p.iva e n. reg. delle imprese 01820920047 - R.E.A. 137756

## PŘÍLOHA P III: MATERIÁLOVÝ LIST GP GREEN



## Technical Data Sheet

Product: MICROLEX RM 1242 WT

PROPERTIES	UNIT	ASTM METHOD	VALUES
MFI (190°/2,16 Kg)	g/10'	ASTM D 1238	4
Density (at 23°C)	g/cm <sup>3</sup>	ASTM D 1505	0,938
Tensile stress at yield	MPa	ASTM D 638	18
Melting point	°C	ASTM D 2117	128
Elongation at break	%	ASTM D 638	700
Flexural modulus	MPa	ASTM D 790	680
Vicat	°C	ASTM D 1525	118
Hardness (Shore D)	-	ASTM D 2240	64
ESCR @ 50° 100% Igepal	h	ASTM D 1693 (B)	300
Additives	-	-	U.V.

N.B.: The methodologies and the reference values are those expressed by the producer of raw material

## Certificate Of Analysis

Material	Colour	MC	Label	Batch
MICROLEX RM 1242 WT	GREEN F07	600	6864	12001823

## Granulometry distribution

Mesh	Range	%	Norm
710 my	0 - 2 %	0	ASTM D 1921-89 Met. A
500 my	8 - 15 %	10	ASTM D 1921-89 Met. A
420 my	16 - 26 %	19	ASTM D 1921-89 Met. A
297 my	30 - 40 %	36	ASTM D 1921-89 Met. A
210 my	13 - 25 %	21	ASTM D 1921-89 Met. A
149 my	10 - 20 %	10	ASTM D 1921-89 Met. A
Fond	3 - 10 %	4	ASTM D 1921-89 Met. A

Test	Unit	Range	Values	Norm
Dry Flux	Seconds		22	ASTM D 1895 Met. A
Apparent Density	g/dm <sup>3</sup>		390	ASTM D 1895 Met. A
M.F.I.	g/10'	(± 20 %)*	4,12	ASTM D 1238
Density (at 23° C)	g/cm <sup>3</sup>	(± 0,20 %)*	0,938	ASTM D 1505

\* as referred to the values of the TDS

THIS MATERIAL HAS BEEN PRODUCED, CHECKED AND TESTED FOLLOWING OUR STANDARD PROCEDURES

Att: values given above are the result of test made in our laboratory with comparative methods

THIS DOCUMENT HAS BEEN ELECTRONICALLY GENERATED AND IT DOES NOT NEED TO BE SIGNED

**GERBALDO POLIMERI**  
 Strada del Collaretto 16 - 12030 Caramagna Piemonte (CN)  
 Tel. 0172 - 89637 - 810311 Fax 0172 - 89109  
 www.gerbaldopolimeri.it - email: info@gerbaldopolimeri.it  
 c.f./p.iva e n. reg. delle imprese 01820920047 - R.E.A. 137756



Test report No. 0277/2012  
Page 2/3

Initial length [mm]: 50  
 Distance between grips [mm]: 110  
 Specimen type: 1A  
 Preparation of test specimens: milling operation  
 Number of test specimens: 7  
 Conditioning: STN EN ISO 291, 23/50-2

Table 1 Tensile properties

Identification of the sample	Tensile stress at yield [MPa]		Tensile strain at yield [%]		Tensile stress at break [MPa]		Tensile strain at break [%]	
	x	s	x	s	x	s	x	s
PE Naturel	19,0	0,28	11,5	0,37	7,3	0,93	114,5	115,8
PE Green	19,0	0,28	11,0	0,25	7,1	1,2	81,9	82,2
PE+glass Fiberglas	-	-	-	-	14,6	0,23	3,6	0,33
PE + FOAM	9,9	0,14	10,4	0,49	2,0	0,03	34,5	29,4

Table 2 Modulus of elasticity in tension

Identification of the sample	Modulus of elasticity in tension [MPa]	
	x	s
PE Naturel	739,6	27,4
PE Green	740,5	40,6
PE + glass Fiberglas	1209,6	54,2
PE + FOAM	390,2	30,6

## 2. Determination of flexural properties according to STN EN ISO 178: 2011 - A

Typ of test: deflection measuring  
 Date of the test conducting: June 28 – 29, 2012  
 The test conducted by: Černá

Testing machine: tensile testing machine ZWICK 1474  
 Speed of testing [mm/min]: 2  
 Specimen type: according to STN EN ISO 178  
 Number of test specimens: 7  
 Preparation of test specimens: milling operation  
 Conditioning: STN EN ISO 291, 23/50-2



Test report No. 0277/2012  
Page 3/3

Table 3 Flexural properties

Identification of the sample	Modulus of elasticity in flexural [MPa]		Flexural strength [MPa]	
	x	s	x	s
PE Naturel	669,4	40,8	18,7	0,67
PE Green	729,0	15,6	19,9	0,33
PE + glass Fiberglas	1136,2	54,7	19,9	0,43
PE + FOAM	393,2	19,9	9,4	0,41

**TLS DECLARATION**

The test result relates only to that particular test subject. The test report can only be reproduced in its entirety; the part of it can be reproduced only with written agreement of the head of TLS.

An user of the accredited laboratory services must not use the accreditation label of the laboratory in any case.

The verification of the measuring apparatus is carried out in accordance with Metrological regulations of TLS.

**Test result complaint**

Test results or procedures presented in this test report can be complained in writing.

**Sample saving**

These samples which were subjected of the testing are saved by the laboratory usually within 30 days from the test report delivery to the customer.

**Date of the test report issue:** July 23, 2012

**The test report elaborated by:** Soňa Šugrová

**Supervised by:**

**Emilia Černá**  
Chief of the Physical-mechanical department

**Approved by:**

**Dipl. Ing. Dagmar Škerlíková**  
Chief of TLS