



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

**NÁVRH TLAKOVÉ NÁDOBY Z PLASTU**

DESIGN OF PLASTIC PRESSURE VESSEL

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Daniel Milan Rackovský**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Marek Pernica, Ph.D.**

**BRNO 2022**



# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav procesního inženýrství  
Student: **Daniel Milan Rackovský**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Marek Pernica, Ph.D.**  
Akademický rok: 2021/22

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Návrh tlakové nádoby z plastu

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Úkolem práce je provést podrobnou rešerši návrhu tlakových nádob a potrubí z plastových materiálů. Poznatky z provedené rešerše budou využity při následném pevnostním návrhu zadané tlakové nádoby. Jedním z hlavních bodů rešerše bude poznání materiálů používaných pro konstrukci plastových tlakových nádob a jejich mechanických vlastností, které zásadním způsobem ovlivňují následný pevnostní návrh, který bude proveden na základě zvolené normy a ověřen pomocí MKP.

### Cíle bakalářské práce:

Podrobná rešerše plastových materiálů vhodných pro konstrukci tlakových nádob  
Rešerše mechanických vlastností plastových materiálů  
Rešerše z oblasti norem pro pevnostní návrh tlakových nádob  
Pevnostní návrh vybraných částí tlakové nádoby na základě zvolené normy  
Ověření vybrané části nádoby pomocí MKP

### Seznam doporučené literatury:

ČSN EN 13445 Netopené tlakové nádoby. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.

VEJVODA, S., V. KUDĚLKA, Z. BALEJ, a J. OPLETAL. Konstrukce procesních zařízení: teorie skořepin a prstenců, metoda počátečních parametrů. Brno: TESYDO, 2019

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## Abstrakt

Táto bakalárska práca sa zaoberá návrhom tlakovej nádoby z plastu. Úvodná časť práce obsahuje teoretické poznatky týkajúce sa plastových materiálov. Ďalšiu časť tvorí výber materiálov vhodných pre konštrukciu tlakovej nádoby a hlbší rozbor ich mechanických a ďalších vlastností. Posledná časť práce sa zaoberá výpočtom hrúbky steny plastovej tlakovej nádoby na základe teórie bezmomentových membránových škrupín a overením výsledkov pomocou metódy konečných prvkov v programe Ansys Workbench 2022 R1. Analytický výpočet je taktiež porovnaný s výpočtom pomocou vzťahov uvedených v norme ČSN EN 13445.

## Kľúčové slová

tlaková nádoba, plastové materiály, polyméry, rotačne symetrická škrupina, metóda konečných prvkov

## Abstract

This bachelor thesis deals with the design of a pressure vessel made of plastic. The introductory part of the thesis contains the theoretical knowledge related to plastic materials. The next part consists of the selection of materials suitable for the design of the pressure vessel and a deeper analysis of their mechanical and other properties. The last part of the thesis deals with the calculation of the wall thickness of the plastic pressure vessel based on the theory of momentless diaphragm shells and the verification of the results using the finite element method, in Ansys Workbench 2022 R1. The analytical calculation is also compared with the calculation using the relationships given in ČSN EN 13445.

## Keywords

pressure vessel, plastic materials, polymers, rotationally symmetric shell, finite element method



## **Bibliografická citácia**

RACKOVSKÝ, Daniel Milan. *Návrh tlakové nádoby z plastu*. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/139758>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce Marek Pernica.



## Čestné prehlásenie

Prehlasujem, že som túto prácu na tému „*Návrh tlakovej nádoby z plastu*“ vypracoval samostatne pod vedením pána Ing. Mareka Pernicu, Ph.D. s použitím odbornej literatúry a zdrojov uvedených v zozname použitej literatúry.

V Brne dňa:

-----  
podpis autora



## Pod'akovanie

Rád by som pod'akoval vedúcemu práce Ing. Marekovi Pernicovi Ph.D. za cenné rady a pripomienky, ktoré mi poskytol pri vypracovaní tejto práce. Taktiež by som chcel pod'akovať svojej rodine a blízkym priateľom za ich podporu počas celého štúdia.

V Brne dňa:

-----  
podpis autora



# Obsah

|                                                                          |           |
|--------------------------------------------------------------------------|-----------|
| ÚVOD .....                                                               | 15        |
| <b>1. TEORETICKÝ ÚVOD DO PLASTOVÝCH MATERIÁLOV .....</b>                 | <b>16</b> |
| 1.1 PLASTOVÉ MATERIÁLY – VŠEOBECNE .....                                 | 16        |
| 1.2 POLYMÉRY .....                                                       | 16        |
| 1.3 VÄZBOVÉ SILY SÚDRŽNOSTI .....                                        | 16        |
| 1.3.1 Primárne väzbové sily súdržnosti .....                             | 16        |
| 1.3.2 Sekundárne väzbové sily súdržnosti .....                           | 17        |
| 1.4 ZLOŽENIA REŤAZCA .....                                               | 18        |
| 1.5 TVAR MAKROMOLEKULÁRNYCH REŤAZCOV .....                               | 18        |
| 1.6 KONFIGURÁCIA .....                                                   | 19        |
| 1.7 KONFORMÁCIA .....                                                    | 19        |
| 1.8 STUPEŇ POLYMERIZÁCIE .....                                           | 20        |
| 1.9 MOLEKULÁRNA HMOTNOSŤ .....                                           | 20        |
| 1.10 KRYŠTALIZÁCIA .....                                                 | 21        |
| 1.10.1 Kryštalinita .....                                                | 21        |
| 1.11 FÁZOVÉ STAVY POLYMÉROV .....                                        | 21        |
| 1.11.1 Kryštalická zložka .....                                          | 21        |
| 1.11.2 Amorfná zložka .....                                              | 22        |
| 1.12 MORFOLÓGIA POLYMÉROVÝCH MATERIÁLOV .....                            | 22        |
| 1.12.1 Amorfné polyméry .....                                            | 22        |
| 1.12.2 Semikryštalické polyméry .....                                    | 22        |
| 1.13 CHOVANIE POLYMÉROV PRI MECHANICKOM ZAŤAŽOVANÍ .....                 | 24        |
| 1.13.1 Vplyv teploty na modul pružnosti .....                            | 24        |
| 1.13.2 Ťahové vlastnosti polymérov .....                                 | 25        |
| 1.13.3 Dlhodobé statické skúšky polymérov .....                          | 26        |
| 1.13.4 Viskoelastické chovanie polymérov .....                           | 27        |
| 1.14 ROZDELENIE PLASTOVÝCH MATERIÁLOV .....                              | 28        |
| 1.14.1 Rozdelenie podľa chovania za zvýšenej teploty .....               | 28        |
| 1.14.2 Rozdelenie podľa obsahu prídavných látok .....                    | 29        |
| 1.14.3 Rozdelenie podľa oblasti použitia .....                           | 30        |
| <b>2. PLASTOVÉ MATERIÁLY VHODNÉ PRE TLAKOVÉ NÁDOBY .....</b>             | <b>31</b> |
| 2.1 MATERIÁLY PLASTOVÝCH POTRUBÍ UVEDENÉ V NORMÁCH ČSN .....             | 32        |
| 2.1.1 Plastové potrubia pre rozvod teplej a studenej vody .....          | 32        |
| 2.1.2 Plastové potrubia pre priemyselné aplikácie .....                  | 33        |
| 2.2 MATERIÁLY BEZTLAKOVÝCH PLASTOVÝCH NÁDRŽÍ UVEDENÉ V NORMÁCH ČSN ..... | 34        |
| 2.3 ZHRNUTIE .....                                                       | 35        |
| <b>3. ROZBOR VLASTNOSTÍ JEDNOTLIVÝCH PLASTOVÝCH MATERIÁLOV .....</b>     | <b>36</b> |
| 3.1 POLYETYLÉN (PE) .....                                                | 36        |
| 3.2 POLYPROPYLÉN (PP) .....                                              | 37        |
| 3.3 POLYVINYLCHLORID (PVC) .....                                         | 38        |
| 3.3.1 Chlórovaný polyvinylchlorid (PVC-C) .....                          | 38        |
| 3.3.2 Nemäkčený polyvinylchlorid (PVC-U) .....                           | 39        |

|                                                   |                                                                       |           |
|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.4                                               | AKRYLONITRILBUTADIÉNSTYRÉN (ABS).....                                 | 39        |
| 3.5                                               | POLYBUTÉN (PB).....                                                   | 40        |
| 3.6                                               | POLYVINYLIDENFLUORID (PVDF).....                                      | 41        |
| <b>4.</b>                                         | <b>NÁVRH TLAKOVÝCH NÁDOB – NORMY ČSN .....</b>                        | <b>42</b> |
| 4.1                                               | NORMY ČSN PRE PEVNOSTNÝ NÁVRH TLAKOVÝCH NÁDOB.....                    | 42        |
| 4.1.1                                             | Norma ČSN 69 0010.....                                                | 42        |
| 4.1.2                                             | Norma ČSN EN 286.....                                                 | 42        |
| 4.1.3                                             | Norma ČSN EN 13445.....                                               | 42        |
| 4.1.4                                             | Norma ČSN EN 13923.....                                               | 43        |
| 4.2                                               | HRÚBKA STENY TLAKOVEJ NÁDOBY PODĽA NORMY ČSN EN 13445.....            | 43        |
| 4.2.1                                             | Valcový plášť tlakovej nádoby.....                                    | 43        |
| 4.2.2                                             | Pologul'ové dno tlakovej nádoby .....                                 | 43        |
| <b>5.</b>                                         | <b>NÁVRH VYBRANÝCH ČASTÍ TLAKOVEJ NÁDOBY .....</b>                    | <b>44</b> |
| 5.1                                               | VÝBER VHODNEJ NORMY .....                                             | 44        |
| 5.2                                               | VÝBER VHODNÉHO MATERIÁLU .....                                        | 44        |
| 5.3                                               | STANOVENIE DOVOLENÉHO NAMÁHANIA.....                                  | 45        |
| 5.3.1                                             | Dlhodobá pevnosť pri navrhovanej teplote a životnosti $K$ .....       | 45        |
| 5.3.2                                             | Korekčný faktor $A_{2K}$ .....                                        | 45        |
| 5.3.3                                             | Korekčný faktor $A_1$ .....                                           | 46        |
| 5.3.4                                             | Dlhodobý zvarací faktor $f_l$ .....                                   | 47        |
| 5.3.5                                             | Koeficient bezpečnosti $S$ .....                                      | 47        |
| 5.3.6                                             | Dovolené namáhanie v prevádzkových podmienkach $\sigma_{al}$ .....    | 48        |
| 5.4                                               | VÝPOČET ROZMEROV NÁDOBY .....                                         | 48        |
| 5.5                                               | STANOVENIE VÝPOČTOVÉHO TLAKU $P$ .....                                | 49        |
| 5.6                                               | VÝPOČET MINIMÁLNEJ HRÚBKY STENY.....                                  | 50        |
| 5.6.1                                             | Teória rotačne symetrických bezmomentových škrupín.....               | 50        |
| 5.6.2                                             | Hrúbka pologul'ového dna .....                                        | 51        |
| 5.6.3                                             | Hrúbka steny valcovej časti tlakovej nádoby.....                      | 53        |
| 5.6.4                                             | Výsledná hrúbka steny tlakovej nádoby.....                            | 54        |
| 5.6.5                                             | Porovnanie odvodených výpočtových vzťahov s normou ČSN EN 13445 ..... | 54        |
| 5.7                                               | OVERENIE VÝPOČTU POMOCOU MKP .....                                    | 55        |
| 5.7.1                                             | Model v programe Ansys Workbench .....                                | 55        |
| 5.7.2                                             | Sieť konečných prvkov a okrajové podmienky .....                      | 56        |
| 5.7.3                                             | Vyhodnotenie výsledkov.....                                           | 57        |
| <b>ZÁVER.....</b>                                 |                                                                       | <b>58</b> |
| <b>ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY.....</b>            |                                                                       | <b>60</b> |
| <b>ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV .....</b> |                                                                       | <b>63</b> |

# ÚVOD

História často používa pre označenie istého časového obdobia názov vychádzajúci z materiálu, ktorý je pre toto obdobie charakteristický. Ak sa dnes pozrieme okolo seba, môžeme celkom rýchlo a jasne usúdiť, že žijeme v dobe syntetických polymérov – plastov.

Začiatky týchto materiálov siahajú do prvej polovice 19. storočia, kedy boli zaznamenané prvé úspešné pokusy ich prípravy a skúmania. Ich prudký rozvoj však začal až o niekoľko desaťročí neskôr, v dvadsiatych rokoch 20. storočia. Postupný vývoj a zdokonaľovanie ich vlastností spôsobilo, že dnes vo veľkom nahrádzajú celú radu prírodných materiálov ako je napríklad drevo, kovy, sklo, či koža. To je zapríčinené najmä ich schopnosťou nadobúdať širokú škálu vlastností, dobrou spracovateľnosťou a prijateľnou cenou.

Rovnako neoddeliteľnou súčasťou dnešného sveta sú tlakové nádoby. Tie sú využívané v rôznych odvetviach priemyslu ako je napríklad chemický, farmaceutický, či potravinársky priemysel. Využitie taktiež nachádzajú v doprave, kde môžu tvoriť súčasť brzdného systému vozidiel, alebo slúžiť ako zásobník plynného paliva. Tlakové nádoby môžeme taktiež nájsť v domácnostiach, ako súčasť vykurovacieho systému, vo forme tlakového hrnca, alebo ako nádoby kozmetických prípravkov vo forme spreja.

Typicky sú tlakové nádoby vyrábané z kovových materiálov ako je oceľ, liatina, prípadne zliatiny hliníka či niklu. Ďalšou kategóriou sú kompozitné tlakové nádoby, ktorých materiál je tvorený polymérovou maticou vystuženou najčastejšie sklenenými vláknami. Tieto tlakové nádoby majú vysokú pevnosť a v porovnaní s kovovými tlakovými nádobami výrazne nižšiu hmotnosť. Ďalšou výhodou je ich chemická odolnosť a odolnosť voči korózii. Daňou za tieto vlastnosti je ale vysoká cena.

Chýbajúci medzičlánok medzi vyššie spomenutými dvoma druhmi tlakových nádob by v budúcnosti mohli tvoriť práve tlakové nádoby vyrobené z nevystužených plastov. Takéto tlakové nádoby by boli použiteľné všade tam, kde nie je požadovaný vysoký prevádzkový tlak, no je požadovaná vysoká chemická odolnosť, odolnosť voči korózii a čistota média uskladneného v nádobe. V takomto prípade by mohli tlakovým nádobám z vyššie spomenutých materiálov konkurovať práve nižšou výrobnou cenou. Súčasná legislatíva však prevádzku tlakových nádob vyrobených plastových materiálov neumožňuje.

Cieľom tejto práce je preskúmať, aké možnosti v dnešnej dobe existujú z hľadiska plastových materiálov vhodných pre konštrukciu tlakových nádob a na základe získaných poznatkov sa pokúsiť takéto zariadenie navrhnúť. Aby bolo možné tento cieľ splniť, bolo potrebné získať odpoveď na nasledujúce tri otázky:

- Ako správne navrhnúť výrobok z plastového materiálu?
- Aký plastový materiál je vhodný pre konštrukciu tlakovej nádoby?
- Aké sú špecifiká tohto materiálu?

Práve odpoveď na uvedené otázky sa pokúša poskytnúť táto práca. Prvá kapitola preto čitateľa oboznamuje s vnútornou stavbou plastových materiálov. Druhá kapitola sa venuje výberu materiálov vhodných pre konštrukciu tlakových nádob. V tretej kapitole je možné nájsť hlbší rozbor vlastností týchto materiálov. Štvrtá kapitola uvádza prehľad o tom, aké možnosti z hľadiska materiálov poskytujú súčasné normy ČSN zaoberajúce sa návrhom tlakových nádob. V poslednej, piatej kapitole je uvedený pevnostný výpočet hrúbky steny tlakovej nádoby z vybraného plastového materiálu.

# 1. TEORETICKÝ ÚVOD DO PLASTOVÝCH MATERIÁLOV

## 1.1 Plastové materiály – všeobecne

Aby bolo možné správne navrhnuť výrobok z plastového materiálu, je potrebné sa najprv dôkladne zoznámiť s teóriou plastových materiálov, ich vnútornou stavbou, chovaním pri zaťažovaní a parametrami ovplyvňujúcimi ich mechanické a ďalšie vlastnosti.

Keďže sa táto práca zaoberá návrhom tlakovej nádoby z plastu, pričom jej dôležitú časť tvorí výber plastových materiálov, vhodných pre takúto aplikáciu, prvá kapitola práce sa zaoberá práve rozborom vyššie uvedených teoretických poznatkov o plastových materiáloch.

## 1.2 Polyméry

Polyméry sú makromolekulárne látky s vysokou molekulárnou hmotnosťou, skladajúce sa z veľkého počtu rovnakých častí – monomérov. Vznikajú polyreakciou, počas ktorej dochádza k spájaniu monomérov do reťazcov, za vzniku makromolekúl. Existujú tri druhy polyreakcie:

- **polymerizácia** – molekuly monoméru reagujú s rastúcim reťazcom a postupne sa k nemu pripájajú. Priebeh reakcie je veľmi rýchly a bez vzniku vedľajších produktov,
- **polykondenzácia** – molekuly rôznej veľkosti (monoméry, diméry) sa vzájomne spájajú a takto postupne dochádza k vzniku makromolekulárneho reťazca. Reakcia prebieha pomaly a dochádza pri nej k vzniku vedľajších produktov,
- **polyadícia** – prebieha rovnakým mechanizmom ako polykondenzácia, avšak bez vzniku vedľajších produktov. [1]

## 1.3 Väzbové sily súdržnosti

Medzi jednotlivými atómami tvoriacimi makromolekulárny reťazec, a tiež medzi jednotlivými makromolekulárnymi reťazcami pôsobia sily, ktoré zabezpečujú ich vzájomnú súdržnosť. Tieto sily sú označované ako väzbové sily súdržnosti, pričom sily pôsobiace medzi jednotlivými atómami molekuly sa nazývajú primárnymi väzbovými silami súdržnosti a sily pôsobiace medzi jednotlivými reťazcami sa nazývajú sekundárnymi väzbovými silami súdržnosti. V nasledujúcich dvoch oddieloch textu bude popísaný vplyv týchto síl na vlastnosti plastových materiálov.

### 1.3.1 Primárne väzbové sily súdržnosti

Primárnymi väzbovými silami súdržnosti označujeme sily pôsobiace medzi jednotlivými atómami molekuly. Atómy hlavného aj vedľajšieho polymérneho reťazca sú spojené kovalentnou väzbou. Taktiež sú kovalentnou väzbou pripojené bočné skupiny rozvetvených reťazcov. [1]

Druh kovalentnej väzby rozhoduje o mechanickej pevnosti, stabilite za zvýšených teplôt a odolnosti polymérov voči pôsobeniu korozívneho prostredia. V prípade, že reťazec obsahuje polárne skupiny (skupiny atómov s polárnou kovalentnou väzbou), polymér sa navonok prejavuje ako polárny. Intenzita polárnosti polyméru závisí na pomere polárnych a nepolárnych skupín atómov tvoriacich reťazec. V prípade, že je makromolekula tvorená iba polárnymi skupinami rovnakého typu, dochádza ku vzájomnej kompenzácii pôsobenia dipólov a polymér sa navonok javí ako nepolárny. Polárne polyméry reagujú s nízkomolekulárnymi látkami, nepolárne s vysokomolekulárnymi látkami. [2]

### **1.3.2 Sekundárne väzbové sily súdržnosti**

Sekundárnymi (kohéznymi) väzobnými silami súdržnosti na seba vzájomne pôsobia jednotlivé molekuly alebo časti molekúl. Vzájomná súdržnosť makromolekulárnych reťazcov rastie s ich dĺžkou. V porovnaní s primárnymi silami súdržnosti sú o jeden rád slabšie. Vplývajú na schopnosť kryštalizovať, úžitkové vlastnosti a charakter interakcie polymérov s plynmi a kvapalinami. Existujú nasledujúce štyri druhy sekundárnych väzbových síl súdržnosti. [1]

#### **Dipól–dipól**

Vzájomné pôsobenie elektrických polí permanentných dipólov. Spôsobuje vzájomné usporiadanie molekúl v látke. Ovplyvňuje usporiadanie molekúl do vyšších štruktúr a tým vplýva na schopnosť polymérov kryštalizovať. Táto interakcia je narušovaná tepelným pohybom molekúl. [1]

#### **Dipól–indukovaný dipól**

Molekula obsahujúca permanentný dipól svojím elektrickým poľom polarizuje pôvodne nepolárnu molekulu, z ktorej tak vzniká indukovaný dipól. Interakcia nie je závislá na teplote. [1]

#### **Indukovaný dipól–indukovaný dipól**

Vzájomné pôsobenie neutrálnych molekúl inak nazývané aj disperznými silami. V molekulách, ktoré neobsahujú polárne dipóly existuje fluktuujúci dipólový moment indukovaný neustálym pohybom jadier a elektrónov molekuly. Ten indukuje dipólový moment v susednej molekule, s ktorým následne interaguje. [1]

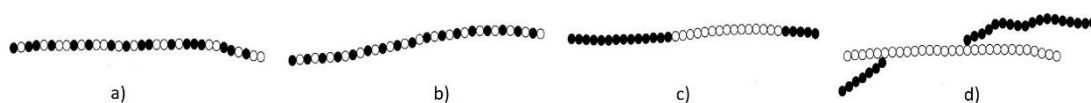
#### **Vodíková väzba**

Špeciálny prípad interakcie typu dipól–dipól, ktorá prebieha medzi kationom vodíka a relatívne malým elektronegatívnym atómom. Je najsilnejšou zo sekundárnych väzobných síl. Umožňuje tvorbu stabilných kryštalických a orientovaných štruktúr. Interakcia je so zvyšujúcou sa teplotou oslabovaná tepelným pohybom. [1]

## 1.4 Zloženia reťazca

Homopolyméry sú tvorené iba jedným typom monoméru. Kopolyméry sú tvorené z dvoch (bipolymér), troch (terpolymér) alebo viacerých typov monomérnych jednotiek. Podľa usporiadania (viď obrázok 1.1) monomérnych jednotiek v reťazci sa kopolyméry ďalej delia na:

- **štatistické** – monoméry typu A a B sa striedajú náhodne,
- **alternujúce** – monoméry typu A a B sa striedajú pravidelne,
- **blokové** – striedajú sa bloky monomérov typu A a B,
- **štepený** – vetvy tvorené monomérnymi jednotkami typu B sú náhodne pripojené k hlavnému reťazcu tvorenému monomérmi typu A. [1, 3]



Obrázok 1.1 – Typy kopolymérov. a) štatistický, b) alternujúci, c) blokový, d) štepený [4]

## 1.5 Tvar makromolekulárnych reťazcov

Makromolekulárne reťazce môžeme podľa tvaru (viď obrázok 1.2), rozdeliť na:

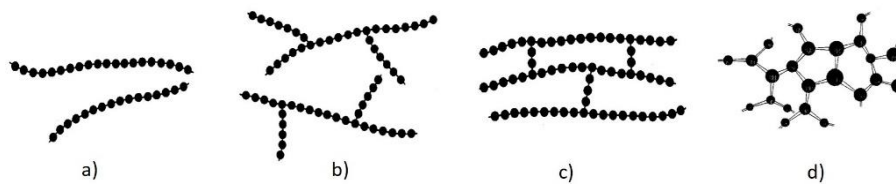
- lineárne,
- rozvetvené,
- priečne zosieťované,
- priestorovo zosieťované.

Tvar makromolekulárnych reťazcov má vplyv na fyzikálne a mechanické vlastnosti polymérov. V závislosti na počte väzobných miest monomérov, teplotných a tlakových podmienkach pri polyreakcii, môžu vzniknúť lineárne, alebo rozvetvené makromolekulárne reťazce. Makromolekulárne siete vznikajú spájaním lineárnych alebo rozvetvených reťazcov, ktoré obsahujú doposiaľ nevyčerpané väzobné miesta pri reakcii nazývanej vytvrdzovanie. Počet nevyčerpaných väzobných miest, ktoré molekula obsahuje na jednotku dĺžky, vplýva na hustotu vzniknutej siete. [3]

Polyméry tvorené *lineárnymi* reťazcami sú schopné tesného usporiadania a kryštalizácie, vyznačujú sa vyššou hustotou, vyšším modulom pružnosti, pevnosťou, tepelnou odolnosťou a nižšou ťažnosťou. [1]

Polyméry tvorené *rozvetvenými* reťazcami majú obmedzenú schopnosť pohybu a schopnosť vzájomne sa priblížiť. To má za následok ich obmedzenú možnosť kryštalizovať, zníženie hustoty, mechanickej pevnosti, tvrdosti, tepelnej odolnosti a nižší modul pružnosti. Ťažnosť a viskozita týchto polymérov je oproti polymérom, ktoré sú tvorené lineárnymi reťazcami vyššia. [1]

Polyméry so *zosieťovanou štruktúrou* majú obmedzenú pohyblivosť reťazcov. Oproti lineárnym polymérom sa vyznačujú vyššou pevnosťou, vyšším modulom pružnosti a tepelnou odolnosťou. Stráca sa schopnosť rozpustnosti a tavitelnosti. [1]

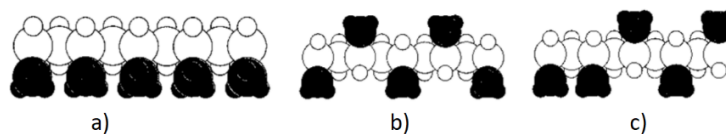


Obrázok 1.2 – Molekulárna štruktúra: a) lineárna, b) rozvetvená, c) priečne zosieťovaná, d) priestorovo zosieťovaná [4]

## 1.6 Konfigurácia

Označuje stabilné priestorové usporiadanie atómov makromolekuly, ktorého zmenu by bolo možné doceliť iba rozrušením väzieb chemickým zásahom. Pravidelné usporiadanie atómov v reťazci umožňuje tesnejšie priblíženie reťazcov a tým ovplyvňuje schopnosť polyméru kryštalizovať. [3, 4, 5]

Reťazce s izotaktickou konfiguráciou (viď obrázok 1.3a) môžu vytvárať kryštalické útvary. Syndiotaktické reťazce (viď obrázok 1.3b) kryštalizujú obmedzene a reťazce s ataktickým usporiadaním (viď obrázok 1.3c) sú amorfné, teda nevytvárajú kryštalické útvary. [3]

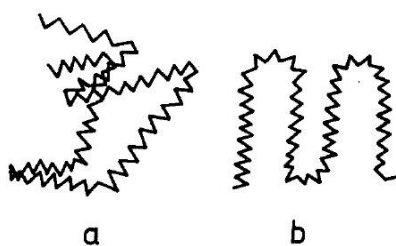


Obrázok 1.3 – Konfigurácia – a) izotaktická, b) syndiotaktická, c) ataktická [4]

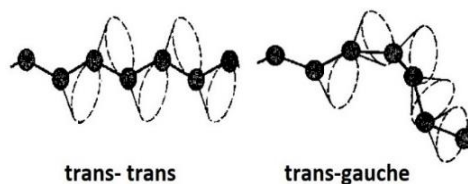
## 1.7 Konformácia

Konformáciou nazývame vzájomnú polohu, ktorú voči sebe zaujímajú jednotlivé časti makromolekúl. Každá vzájomná poloha dvoch segmentov reťazca má určitú potenciálnu energiu. Makromolekulárne reťazce môžu v priestore nadobúdať rôzne tvary, majú však prirodzenú tendenciu usporiadať sa do tvaru, ktorému zodpovedá minimálna voľná energia systému. [1]

Pre neusporiadané reťazce je typickou konformáciou náhodné kĺbko (viď obr. 1.4a). Konformácia lineárnych reťazcov s malými substituentmi, prípadne bez substituentov, usporiadaných v kryštálickej mriežke (viď obr. 1.4b) je typu trans-trans (viď obr. 1.5). V prípade, že takýto lineárny reťazec obsahuje objemnú bočnú skupinu, tvaruje sa do špirálovitého postavenia zvaného trans-gauche (viď obr. 1.5). [1]



Obrázok 1.4 – Usporiadanie reťazca.  
a) náhodné klbko  
b) kryštalická lamela [3]



Obrázok 1.5 – Konformácie lineárnych reťazcov [4]

Zmena konformácie nastáva rotáciou okolo jednoduchých väzieb prvkov tvoriacich hlavný reťazec. Pre zmenu konformácie je potrebné prekonať energetickú bariéru medzi jednotlivými polohami, a to buď dodaním tepelnej energie, alebo pôsobením vonkajších síl. Veľkosť tejto energetickej bariéry závisí najmä na druhu substitučných atómov naviazaných na atómy prvkov tvoriacich hlavný reťazec. Schopnosť meniť tvar dáva reťazcom možnosť reagovať na vonkajšie namáhanie zmenou tvaru, a taktiež vplyva na ich schopnosť usporiadať sa do vyšších celkov. [1, 2, 4]

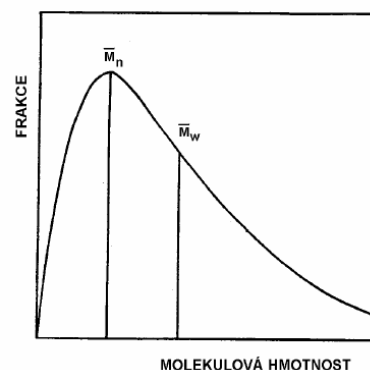
## 1.8 Stupeň polymerizácie

Udáva počet monomérov, ktorými je tvorený makromolekulárny reťazec. Aby boli mechanické vlastnosti polyméru vyhovujúce pre praktické účely, musí sa jeho stupeň polymerizácie pohybovať minimálne v rozmedzí od 40 do 80. Hodnota niektorých vlastností sa pri určitom stupni polymerizácie ustáli a ďalej nenarastá. U polymérov s veľkou dĺžkou reťazcov sa z dôvodu vysokej viskozity taveniny a vysokej pravdepodobnosti zauzľovania reťazcov zhoršuje ich spracovateľnosť. [1, 2, 5]

## 1.9 Molekulárna hmotnosť

Hodnota molekulárnej hmotnosti predstavuje jednu z najdôležitejších charakteristík polyméru. Priamo súvisí so stupňom polymerizácie, a teda aj s dĺžkou reťazca. So zväčšujúcou sa dĺžkou reťazca narastá veľkosť sekundárnych molekulárnych síl súdržnosti, čo spôsobuje nárast teploty topenia, viskozity, mechanických charakteristík, a to najmä pevnosti v ťahu a vrubovej húževnatosti materiálu. [1, 2, 3]

V porovnaní s nízkomolekulárnymi látkami je molekulárna hmotnosť polymérov vysoká. Ďalším rozdielom je, že dĺžka jednotlivých reťazcov v materiáli je rôzna a závisí na podmienkach pri polyreakcii. Pomerné zastúpenie molekúl jednotlivých veľkostí je vyjadrené distribučnou krivkou (viď obrázok 1.6).



Obrázok 1.6 – Distribučná krivka molekulárnych hmotností polyméru.  $M_n$  – číselný priemer molárnej hmotnosti  
 $M_w$  – hmotnostný priemer molárnej hmotnosti [3]

Odhad šírky distribučnej krivky možno vykonať pomocou experimentálne stanovených hodnôt:

- číselného priemeru molárnej hmotnosti  $\bar{M}_n$ ,
- hmotnostného priemeru molárnej hmotnosti  $\bar{M}_w$ .

Šírka distribučnej krivky má vplyv na jednotnosť fyzikálnych a mechanických vlastností materiálu. [2, 3, 5]

## 1.10 Kryštalizácia

Schopnosť kryštalizácie polymérov závisí najmä na zložitosti a ohybnosti makromolekulárneho reťazca. So zvyšujúcou sa zložitosťou reťazca a zväčšujúcim sa objemom bočných atómov schopnosť kryštalizovať klesá. [2, 5]

Polyméry schopné kryštalizovať vytvárajú semikryštalickú štruktúru skladajúcu sa z podielu kryštalickej fázy obklopenej a prepojenej amorfnou fázou. Reťazce polymérov nedokážu zaplniť mriežkový priestor dostatočne tesne na to, aby mohli kryštalizovať v kubickej sústave. Typicky kryštalizujú v monoklinickej, triklinickej a ortorombickej sústave. V kryštalickej fáze polymérov môžu existovať dva typy základných kryštálových buniek súčasne. [3]

### 1.10.1 Kryštalinita

Hmotnostný podiel kryštalickej fázy v štruktúre sa nazýva kryštalinita. So zvyšujúcou sa hodnotou kryštalinity, stúpa modul pružnosti a pevnostné charakteristiky. Kryštalinitu je možné vypočítať pomocou vzťahu:

$$X_c = \frac{\rho_c}{\rho} \cdot \left( \frac{\rho - \rho_a}{\rho_c - \rho_a} \right) \quad (1.1)$$

kde príslušné symboly znamenajú:

- $X_c$  hmotnostný podiel [ $\text{kg/m}^3$ ],
- $\rho$  hustota vzorku s neznámou kryštalinitou [ $\text{kg/m}^3$ ],
- $\rho_c$  hustota ideálneho kryštálu [ $\text{kg/m}^3$ ],
- $\rho_a$  hustota ideálnej amorfnej fázy [ $\text{kg/m}^3$ ]. [2, 3]

## 1.11 Fázové stavy polymérov

Polyméry sa môžu vyskytovať v pevnom alebo kvapalnom stave. Vysoká molekulárna hmotnosť polymérov spôsobuje, že teplota bodu varu je vo všetkých prípadoch vyššia ako teplota ich rozkladu. Plynný stav polymérneho materiálu teda nemôže nastať. [5]

### 1.11.1 Kryštalická zložka

Medznou teplotou, pri ktorej dochádza k prechodu kryštalickej zložky z pevného do kvapalného stavu je teplota topenia  $T_m$ . Index „m“ pôvodí z anglického slova „melt“ – „topiť sa“. [5]

### 1.11.2 Amorfna zložka

Pri postupnom ohrievaní amorfna zložka polyméru postupne prechádza nasledujúcimi fázovými stavmi:

- **Sklovitý stav** – materiál sa v ňom nachádza pri nízkych teplotách, pri ktorých je pohyblivosť reťazcov obmedzená. Materiál v tomto stave je krehký a tuhý. Súčasti z polymérnych materiálov sa prevádzkujú v tomto stave. [1, 2]
- **Kaučukovitý stav** – nastáva po dosiahnutí teploty skelného prechodu  $T_g$ . Index „g“ pôvodí z anglického slova „glass“ – sklo. Nad touto teplotou sú reťazce schopné konformačnej zmeny. Hodnota teploty  $T_g$  stúpa so zvyšujúcimi sa medzimolekulárnymi silami a klesá so zvyšujúcou sa ohybnosťou makromolekulárných reťazcov. Materiál v kaučukovitom stave je možné značne deformovať pôsobením malých síl, pričom tieto deformácie sú z podstatnej časti vratné. [2, 4, 5, 6]
- **Plastický stav** – nastáva po ďalšom zahrievaní a dosiahnutí teploty  $T_f$ . Index „f“ pôvodí z anglického slova „flow“ – tok. Prekročením tejto teploty dochádza k narušeniu sekundárnych väzieb a vzájomnému pohybu reťazcov. Nastáva viskózný tok materiálu. Tento stav je vhodný pre spracovávanie materiálu vstrekováním, vytlačovaním, či vyfukovaním. [2, 4, 5]

## 1.12 Morfológia polymérových materiálov

Podľa vzájomného usporiadania makromolekulárných reťazcov v materiáli sa polyméry delia na amorfne, ktorých reťazce sú usporiadané náhodne, a semikryštalické, ktoré sa skladajú z amorfnej a kryštalickej zložky. Nasledujúci text bližšie popisuje vnútornú štruktúru amorfných a semikryštalických polymérov.

### 1.12.1 Amorfné polyméry

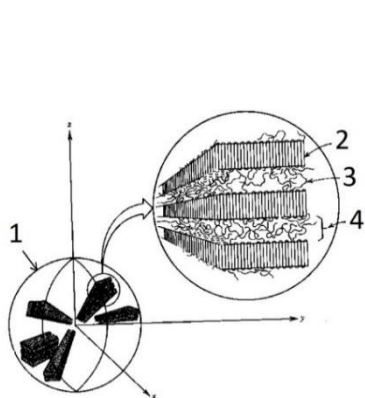
Štruktúra amorfných polymérov je tvorená reťazcami náhodne poskladanými v nepravidelných útvaroch tvaru kĺbka. Tieto kĺbka sú tvorené makromolekulárnymi reťazcami zapletenými do nepravidelnej siete. Medzi jednotlivými reťazcami pôsobia sekundárne väzobné sily súdržnosti. So zvyšujúcou sa hustotou siete reťazcov stúpa hodnota mechanickej pevnosti polyméru. Pri pôsobení vonkajších síl sa reťazce rozvinú a vzniká usporiadanejšia štruktúra tvorená paralelne združenými zväzkami, zvanými aj nepravé kryštalinity. [1]

Amorfnú štruktúru majú typicky polyméry s nepravidelnou konfiguráciou reťazca a veľkými bočnými skupinami, ktoré bránia reťazcom pohybovať sa a vytvárať pravidelné útvary. [1]

### 1.12.2 Semikryštalické polyméry

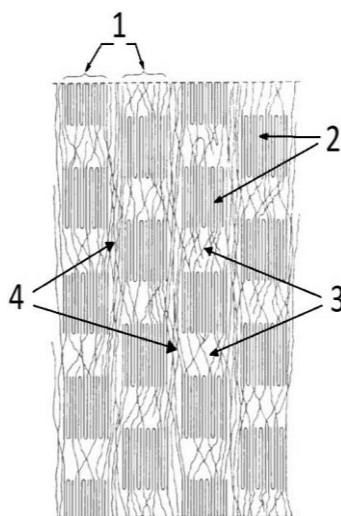
V závislosti od podmienok tuhnutia môže vnútorná štruktúra semikryštalických polymérov nadobúdať viacero podôb, medzi ktoré patria sférolitická štruktúra, fibrilárna štruktúra a štruktúra šiškebab. [1,2]

- **Sférolitická štruktúra** – vzniká pri tuhnutí polymérov z taveniny. Je tvorená nadmolekulárnymi útvarmi polyedrického tvaru – sférolitmi (viď obr. 1.7). Tie vznikajú lúčovitým rastom lamiel z jedného kryštalizačného centra. Priestor medzi lamelami je tvorený neusporiadanými amorfnými oblasťami. [2]
- **Fibrilárna štruktúra** – vysoko pevná nadmolekulárna štruktúra tvorená skryštalizovanými mikrofibrilami spojenými do fibríl. Kryštality oddelené amorfnými oblasťami sú uložené v smere fibrily (viď obr. 1.8). Vzniká pri špeciálne vykonanej kryštalizácii z roztoku, alebo dodatočným dĺžením izotropických semikryštalických polymérov medzi teplotami  $T_g$  a  $T_i$ . [1, 3]
- **Štruktúra šiškebab** – je tvorená striedaním skladaných a vypriamených reťazcov (viď obr. 1.9). Vzniká v prípade, že kryštalizáciu v pokoji strieda prúdenie. [1, 4]



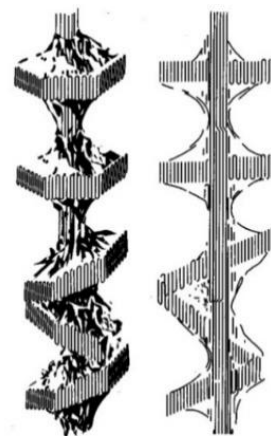
Obrázok 1.7 – Schéma vnútorného usporiadania sférolitu.

1 – povrch sférolitu,  
2 – lamelárny kryštalit,  
3 – makromolekulárny reťazec,  
4 – amorfný materiál [2]



Obrázok 1.8 – Schéma vnútorného usporiadania fibrilárnej štruktúry.

1 – mikrofibrily,  
2 – kryštality,  
3 – neusporiadané oblasti,  
4 – medzifibrilárna vrstva [1]



Obrázok 1.9 – Štruktúra typu šiškebab [4]

## 1.13 Chovanie polymérov pri mechanickom zaťažovaní

Na chovanie plastových materiálov pri mechanickom zaťažovaní vplyva viacero faktorov, ako je napríklad vnútorná štruktúra materiálu, teplota, či rýchlosť, akou je materiál zaťažovaný. Táto kapitola uvádza informácia o tom, akým spôsobom vyššie uvedené faktory vplyvajú na správanie materiálu pri jeho zaťažovaní.

Keďže plastové materiály vykazujú pri mechanickom zaťažovaní zároveň viskózne aj elastické chovanie, koniec kapitoly je venovaný reologickým modelom popisujúcim správanie viskoelastických materiálov.

### 1.13.1 Vplyv teploty na modul pružnosti

#### Amorfné polyméry

Pri zahrievaní amorfného materiálu na teploty dostatočne vzdialené od teploty skelného prechodu  $T_g$  dochádza iba k miernemu poklesu modulu pružnosti. V okolí teploty  $T_g$ , prechádza materiál prechodovým pásmom medzi sklovitým a kaučukovitým stavom, v ktorom modul pružnosti prudko klesá približne o tri až štyri rády. Ďalší prudký pokles modulu pružnosti nastáva v okolí teploty tečenia  $T_f$ , kde materiál prechádza do plastického stavu (viď obrázok 1.10-1). [2, 3, 6]

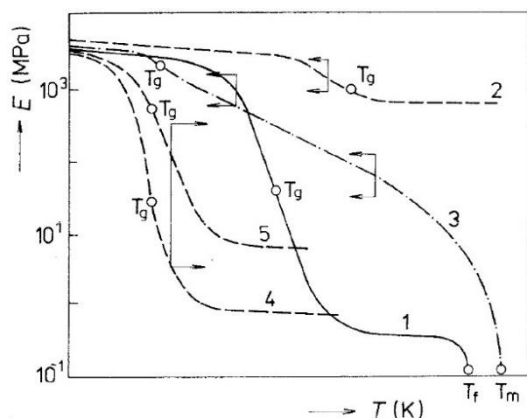
#### Semikryštalické polyméry

Štruktúra semikryštalických polymérov obsahuje amorfnú aj kryštalickú zložku. Z tohto dôvodu je tvar závislosti modulu pružnosti na teplote ovplyvnený ako teplotou skelného prechodu  $T_g$ , tak teplotou topenia kryštalickej fázy  $T_m$ . Po prekročení teploty  $T_g$  prechádza amorfná zložka do kaučukovitého stavu, avšak kryštalická zložka ostáva nezmenená a naďalej vystužuje materiál. Modul pružnosti klesá približne o jeden rád v závislosti na kryštalinite polyméru. Prudký pokles modulu pružnosti nastáva až v okolí teploty topenia kryštalickej fázy  $T_m$  (viď obrázok 1.10-3). [2, 3]

Vplyv kryštalinity, na to ako rýchlo klesá modul pružnosti pri zahrievaní je pre vybraný semikryštalický materiál polytetrafluorethylén (PTFE) možné pozorovať na obrázku 1.11. So stúpajúcim podielom kryštalickej zložky v materiáli klesá pri zahrievaní modul pružnosti menej strmo.

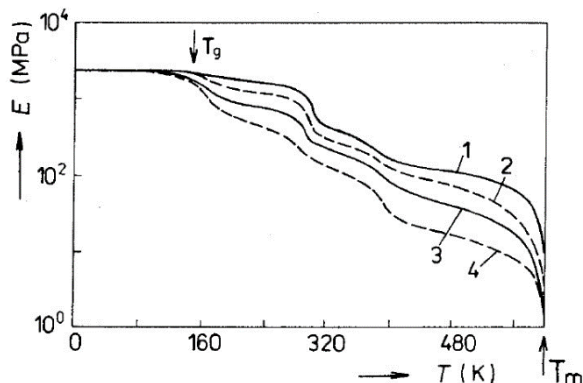
#### Polyméry so zosieťovanou štruktúrou

U polymérov so zosieťovanou molekulárnou štruktúrou po dosiahnutí teploty  $T_g$  klesá modul pružnosti o jeden až dva rády v závislosti na stupni zosieťovania a chemickej štruktúre siet'ovacieho činidla. Pri ďalšom zahrievaní modul pružnosti takmer nemení svoju hodnotu až po teplotu, pri ktorej začína materiál degradovať (viď obr. 1.10-2, 4, 5). [2]



Obrázok 1.10 – Teplotná závislosť modulu pružnosti pre uvedené typy polymérov.

- 1 – lineárny amorfný termoplast,
- 2 – zosietený amorfný reaktoplast,
- 3 – semikryštalický termoplast,
- 4 – pryž s malou hustotou siete,
- 5 – pryž so strednou hustotou siete,
- | → – oblasť konštrukčného použitia [3]



Obrázok 1.11 – Vplyv kryštalinity  $X_c$  na teplotnú závislosť modulu pružnosti materiálu PTFE.

- 1 –  $X_c = 92 \%$ ,
- 2 –  $X_c = 76 \%$ ,
- 3 –  $X_c = 64 \%$ ,
- 4 –  $X_c = 48 \%$  [3]

### 1.13.2 Ťahové vlastnosti polymérov

Získavajú sa ťahovou skúškou podľa normy ČSN EN ISO 527-1, ktorej výstupom je deformačná krivka poskytujúca informácie o základných mechanických vlastnostiach a pevnostných charakteristikách materiálu. [7]

Na obrázku 1.12 sú znázornené štyri základné typy ťahových diagramov polymérnych materiálov. Ich tvar závisí na druhu skúšaného materiálu, teplote a rýchlosti zaťažovania. Charakteristické tvary ťahovej krivky:

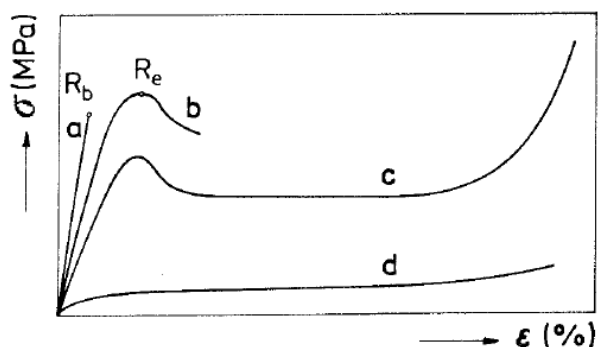
a – Charakteristická pre krehké reaktoplasty a amorfné termoplasty. Deformácie sú vratné a pri lome dosahujú 1 % až 4 %.

b – Stredne húževnaté amorfné alebo semikryštalické termoplasty s vysokou kryštalinitou. Deformácie sú z časti vratné a pri lome dosahujú 20 % až 100 %.

c – Húževnaté semikryštalické polyméry so strednou a malou kryštalinitou. Deformácie po prekročení medze klzu  $R_e$  trvalé, pri lome dosahujú 100 % až 700 %.

d – Húževnaté nekryštalizujúce elastoméry. Deformácie v celom rozsahu namáhania sú vratné a pri pretrhnutí dosahujú 250 % až 700 %. [2, 3]

V prípade krivky „b“ (vid' obr. 1.12) má medza klzu  $R_e$  hodnotu vyššiu ako napätie pri ktorom dochádza k pretrhnutiu vzorky, preto túto hodnotu považujeme za medzu pevnosti. V prípade krivky „c“ je hodnota napätia, pri ktorej dochádza k pretrhnutiu vzorky vyššia ako medza klzu, a preto považujeme za medzu pevnosti túto hodnotu napätia. [2]



Obrázok 1.12 – Charakteristické krivky napätie – pomerne predĺženie pre plasty a pryže [3]

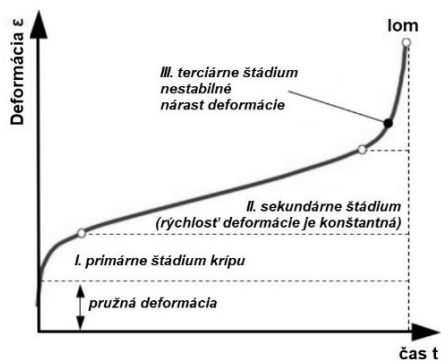
### 1.13.3 Dlhodobé statické skúšky polymérov

Pri dlhodobom zaťažovaní súčastí z plastových materiálov dochádza ku krípu (tečeniu za studena). Keďže požadovaná životnosť súčastí v praxi je zväčša niekoľko rokov, je potrebné pri návrhu dlhodobo zaťažovaných súčastí z plastov využívať mechanické charakteristiky stanovené dlhodobými mechanickými skúškami, ktorých postup je stanovený normou ČSN EN ISO 899. [7]

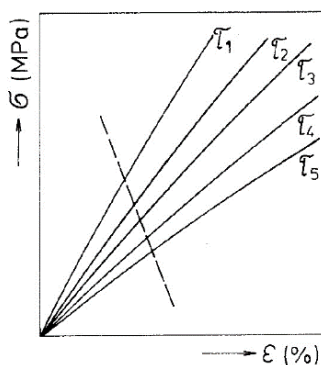
Tieto skúšky sa môžu vykonávať pre väčší rozsah teplôt a počiatočných napätí. Výsledkom kríbovej skúšky je kríbová krivka (viď obr. 1.13) udávajúca pomerne pretvorenie vzorky v závislosti na čase. Kríbove krivky je následne možné spracovať do izochrónnych kriviek (viď obr. 1.14) udávajúcich závislosť pomerneho pretvorenia na napätí pre rôzne dlhé časové úseky zaťažovania. [7]

Z izochrónnych kriviek je možné odčítať kríbový modul pružnosti pre predpokladaný čas zaťažovania výrobku (resp. jeho životnosť). Ten je oproti modulu pružnosti získanému krátkodobou ťahovou skúškou značne nižší. Použitím kríbového modulu pružnosti vo výpočte je získaný výsledok posuvov na telese, ktorý zahŕňa predĺženie vplyvom tečenia materiálu za daný časový úsek zaťažovania. Hodnoty kríbového modulu pružnosti pre vybrané materiály je možné odčítať z digramov uvedených v norme ČSN EN 1778. [7, 8]

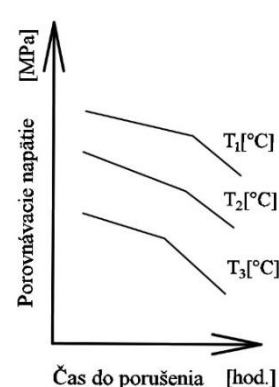
Výsledky z dlhodobých mechanických skúšok materiálov sú pre vybrané plastové materiály uvedené napríklad v norme ČSN EN 1778. V nej sú uvedené takzvané „krivky životnosti“ (viď obr. 1.15), ktoré pre jednotlivé prevádzkové teploty uvádzajú závislosti napätia pôsobiaceho v materiáli a minimálneho času, za ktorý pri tomto napätí dôjde k zlyhaniu súčastí. [8]



Obrázok 1.13 – Obecná kríbová krivka plastového materiálu [7]



Obrázok 1.14 – Izochrónne krivky [3]



Obrázok 1.15 – Krivky životnosti

#### 1.13.4 Viskoelastické chovanie polymérov

Pri deformačnom namáhaní polymérov súčasne prebiehajú elastické aj viskózne deformačné pochody. Deformácia polymérových materiálov je z tohto dôvodu závislá, okrem veľkosti pôsobiaceho napätia, aj na dĺžke jeho pôsobenia. Pre popis deformačného chovania viskoelastických materiálov sa používajú reologické modely. Tie modelujú procesy prebiehajúce v materiáloch pomocou jednoduchých mechanických zariadení. [2, 9]

##### Kelvin-Voightov model

Používa sa pre modelovanie krípu viskoelastických materiálov. Modelové zariadenie reologického modelu pozostáva z pružiny o tuhosti  $E$ , paralelne radenej s hydraulickým valcom obsahujúcim kvapalinu o viskozite  $\eta$  (viď obrázok 1.16a). Deformačné správanie materiálu popisuje tento model vzťahom (1.2):

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \left[ 1 - e^{\left(-\frac{E \cdot t}{\eta}\right)} \right] \quad (1.2)$$

kde príslušné symboly znamenajú:

|               |                                                   |
|---------------|---------------------------------------------------|
| $\varepsilon$ | pomerné pretvorenie [–],                          |
| $\sigma$      | pôsobiace napätie [MPa],                          |
| $E$           | modul pružnosti [MPa],                            |
| $t$           | doba zaťaženia [s],                               |
| $\eta$        | viskozita materiálu pri danej teplote [Pa·s]. [9] |

##### Maxwellov model

Používa sa pre modelovanie relaxácie viskoelastických materiálov. Modelové zariadenie reologického modelu pozostáva z pružiny o tuhosti  $E$  sériovo radenej s hydraulickým valcom obsahujúcim kvapalinu o viskozite  $\eta$  (viď obrázok 1.16b). Deformačné správanie materiálu tento model popisuje vzťahom:

$$\sigma_t = \sigma_i \cdot e^{\left(-\frac{E \cdot t}{\eta}\right)} \quad (1.3)$$

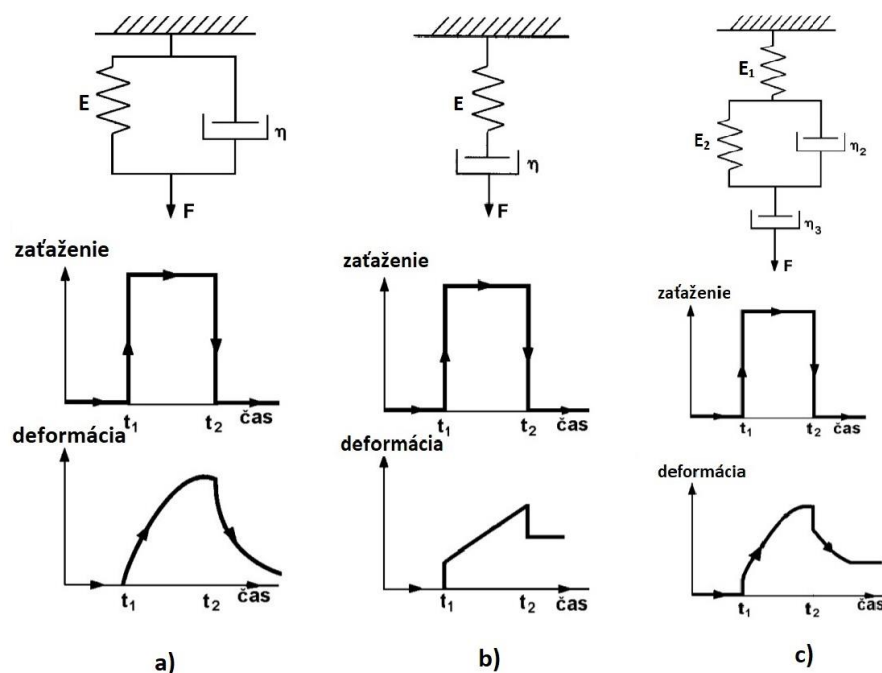
kde príslušné symboly znamenajú:

|            |                                                  |
|------------|--------------------------------------------------|
| $\sigma_t$ | napätie v materiáli dosiahnuté v čase $t$ [MPa], |
| $\sigma_i$ | pôvodné zaťaženie [MPa]. [9]                     |

##### Tuckettov model

Vzniká kombináciou Kelvin-Voightovho a Maxwellovho modelu. Modelové zariadenie reologického modelu je tvorené sériovým zapojením pružiny o tuhosti  $E_1$ , hydraulického valca s kvapalinou o viskozite  $\eta_3$  a Kelvinovho modelu obsahujúceho pružinu o tuhosti  $E_2$  a hydraulický valec s kvapalinou o viskozite  $\eta_2$  (viď obrázok 1.16c). Model používa pre kvalitatívnu predpoveď viskoelastického chovania lineárnych amorfných polymérov vzťah. [9]

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_2} \cdot \left[ 1 - e^{\left(-\frac{E_2 \cdot t}{\eta_2}\right)} \right] + \frac{\sigma}{\eta_3} \cdot t \quad (1.4)$$



Obrázok 1.16 – Reologické modely polymérových materiálov.

a) Kelvin-Voightov model, b) Maxwellov model, c) Tuckettov model [9]

## 1.14 Rozdelenie plastových materiálov

Plastové materiály je možné rozdeliť z rôznych hľadísk. V tejto kapitole je uvedené rozdelenie plastových materiálov podľa chovania za zvýšenej teploty, podľa obsahu prídavných látok a taktiež podľa oblasti, v ktorej sa používajú.

Chovanie plastových materiálov za zvýšenej teploty súvisí s možnosťou opakovane uvádzať materiál do tekutého stavu, čo zásadne vplýva na možnosti spracovania. Použitie prídavných látok spôsobuje úpravu vybraných vlastností materiálu tak, aby sa zlepšila jeho vhodnosť pre danú aplikáciu. Rozdelenie podľa oblasti použitia úzko súvisí s kvalitou materiálu a taktiež jeho cenou.

### 1.14.1 Rozdelenie podľa chovania za zvýšenej teploty

Podľa chovania za zvýšenej teploty sa polyméry delia na elastoméry, termoplasty a reaktoplasty. [5]

#### Termoplasty

Termoplasty sú polyméry, ktoré sú za bežných podmienok tvrdé. Po zahriatí prechádzajú do plastického stavu, v ktorom je možné meniť ich tvar a ďalej ich spracovávať. Po ochladnutí sa stávajú znova tvrdými. Proces prechodu do plastického stavu a následné tuhnutie je iba fyzikálnym procesom, vďaka čomu je možné ho opakovať. Termoplasty môžu mať amorfnú, alebo semikryštalickú štruktúru. Medzi termoplasty patria napríklad polyetylén (PE), polypropylén (PP), polystyrén (PS), polyvinylchlorid (PVC), polyamid (PA). [3, 6, 7]

## Reaktoplasty

Reaktoplasty sú polyméry, u ktorých dochádza k vytvrdnutiu. Vytvrdnutie je výsledkom chemickej reakcie, pri ktorej dochádza k priestorovému zosieťovaniu vnútornej štruktúry. Reaktoplasty po vytvrdnutí nie je možné znova uviesť do plastického stavu a ich opätovným zahrievaním dochádza k rozkladu hmoty. Medzi reaktoplasty radíme napríklad epoxidové živice (EP), fenolformaldehydové hmoty (PF) a polyesterové hmoty (UP). [6]

## Elastoméry

Elastoméry (pryže a kaučuky) sú polyméry, ktoré sa vyznačujú vysokou elasticitou. Už pri izbovej teplote je ich možné bez porušenia značne deformovať (dvojnásobok pôvodnej dĺžky), pričom táto deformácia je vratná. Vnútna štruktúra je priestorovo zosieťovaná, s nízkou hustotou siete. Proces, pri ktorom dochádza u elastomérov k zosieťovaniu, sa nazýva *vulkanizácia*. Medzi najčastejšie používané elastoméry patria prírodný kaučuk (NR), butadienstyrenový kaučuk (SBR), butadienový kaučuk (BR). [5, 10]

### 1.14.2 Rozdelenie podľa obsahu prídavných látok

Požiadavky na vlastnosti výrobkov z plastových materiálov sú veľmi široké. Aby bolo možné tieto požiadavky splniť, pridávajú sa do plastových materiálov prídavné látky, upravujúce ich mechanické, spracovateľské a fyzikálne vlastnosti. Tieto prídavné látky sa delia na plnivá, zmäkčovadlá, mazivá, tvrdivá, farbivá, opticky zjasňujúce látky a ďalšie. Koncentrácia prísad sa vyjadruje počtom hmotnostných dielov pripadajúcich na sto hmotnostných dielov polyméru. [5, 6, 10]

- **Plnivá** – pevné neprchavé prísady organického alebo anorganického pôvodu. Delia sa na vystužujúce a nevystužujúce. *Nevystužujúce plnivá* majú vplyv napríklad na modul pružnosti, ťažnosť, húževnatosť, klzové vlastnosti, tepelnú rozťažnosť a tepelnú vodivosť. *Vystužujúce plnivá* sú tvorené vláknami rôzneho materiálu (napr. prírodné, syntetické, anorganické, tkaniny). Ich pridaním vzniká z materiálu kompozit. Zvyšujú sa pevnostné vlastnosti a modul pružnosti. [10]
- **Zmäkčovadlá** – málo prchavé organické látky. Princíp ich fungovania je založený na zvyšovaní vnútornej pohyblivosti makromolekulárnych reťazcov. Umožňujú zvýšenie húževnatosti, ohybnosti a spracovateľnosti materiálu. Ich použitie môže zapríčiniť zhoršenie mechanických vlastností materiálu. [6, 10]
- **Tvrdivá** – alebo aj sieťovacie činidlá, spôsobujú vznik priečného zosieťovania makromolekulárnych reťazcov a tým ich vytvrdenie. V prípade kaučukov tieto prísady nazývame vulkanizačné činidlá. [5, 6]
- **Mazivá** – slúžia na zlepšenie spracovateľských vlastností. Mazivá s vnútorným účinkom znižujú viskozitu taveniny polyméru. Mazivá s vonkajším účinkom zabraňujú lepeniu výrobku na steny formy. Ako mazivá sa používajú napríklad uhľovodíky, vosky, ťažké alkoholy. [5, 10]
- **Farbivá** – látky, ktorých pridaním sa zabezpečuje požadovaná farba materiálu. Nerozpustné farebné pigmenty v práškovej forme sú založené na anorganických zlúčeninách kovov. Farbivá rozpustné v polyméri (organické liehové roztoky) sa používajú, ak je potrebné, aby vyfarbený materiál ostal čiastočne priehľadný. [6]

- **Opticky zjasňujúce látky** – pohlcujú určité frekvenčné pásmo ultrafialového svetla a získanú energiu vyžiaria vo frekvencii viditeľného spektra, čím v ľudskom oku vytvorí dojem svetlejšej farby. [5]
- **Antistatické prostriedky** – slúžia na zvýšenie elektrickej vodivosti materiálu a zamedzeniu vzniku nežiadúceho elektrostatického náboja na jeho povrchu. [5]
- **Retardéry horenia** – prostriedky znižujúce rýchlosť, alebo spôsobujúce úplne znemožnenie horenia materiálu. [6]

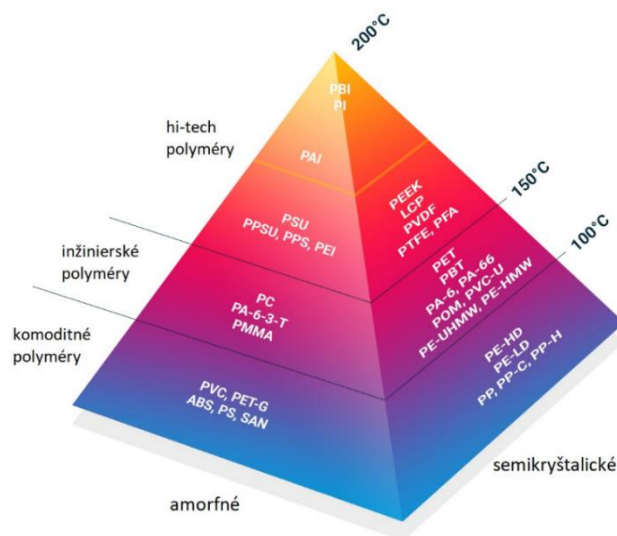
### 1.14.3 Rozdelenie podľa oblasti použitia

Na trhu existuje množstvo druhov plastových materiálov s rôznymi vlastnosťami a oblasťou použitia, pre ktorú sú určené. Obrázok 1.17 znázorňuje pyramídový graf rozdeľujúci plastové materiály, pričom umiestnenie na vyššom mieste znamená vyššiu kvalitu materiálu, no zároveň aj jeho vyššiu cenu. [7]

Plasty pre široké použitie, tiež nazývané aj *komoditné plasty*, predstavujú triedu plastov s najväčším svetovým objemom výroby aj spotreby a vďaka tomu súčasne aj najnižšou cenou. Do tejto skupiny patria najmä polyetylén (PE), polypropylén (PP), polystyrén (PS), polyvinylchlorid (PVC) a akrylonitrilbutadiénstyrén (ABS). [7]

Ďalšou skupinou plastových materiálov sú *inžinierske plasty*. Ponúkajú lepšie mechanické vlastnosti, úžitkové vlastnosti a vyššiu tepelnú odolnosť. Patria medzi nich napríklad polykarbonát (PC), polymethylmetakrylát (PMMA), polyoxymetylén (POM), polyfenylénoxid (PPO). [7]

Najvyššou triedou plastových materiálov sú *high-tech polyméry*, určené pre špičkové aplikácie. V závislosti na aplikácii, pre ktorú sú určené, majú unikátne vlastnosti ako tepelná, chemická stabilita, schopnosť samouhasenia, odolnosť voči starnutiu. Tu patria materiály ako polyfenylsulfon (PPSU), polyvinylidéfluorid (PVDF), polytetrafluórethylén (PTFE), polybenzimidazol (PBI). [7, 11]



Obrázok 1.17 – Rozdelenie plastov podľa oblasti použitia [11]

## 2. PLASTOVÉ MATERIÁLY VHODNÉ PRE TLAKOVÉ NÁDOBY

Rešerš ukázala, že použitie nevystužených plastových materiálov pre konštrukciu tlakových nádob nie je štandardným riešením a množstvo informácií k tejto problematike je značne obmedzené. Existujú však zariadenia pracujúce pod tlakom, pre ktorých výrobu sú už dlhodobo štandardne používané plastové materiály. Vedomosť o tom, aké materiály sa používajú na výrobu týchto zariadení, nám môže poskytnúť predstavu, aký materiál zvoliť pre konštrukciu navrhovanej tlakovej nádoby. Medzi takéto zariadenia patria napríklad:

- **Časti chladiaceho systému v automobiloch** – Pracujú pri zvýšenom tlaku a zvýšenej teplote (približne 100 °C). Hlavy chladičov môžu byť vyrobené z nylónu (PA) vystuženého skleneným vláknom. Hadice bývajú vyrobené z elastoméru (EPDM, SBR) taktiež vystuženého skleneným vláknom. Súčasťou chladiaceho systému je tiež expanzná nádoba, vyrábaná z termoplastov (PP, ABS, PB). [12]
- **Plastové fľaše na nápoje** – podobnosť s tlakovou nádobou spočíva v tom, že stena takejto fľaše je vzhľadom k svojej hrúbke značne namáhaná tlakom, a to najmä v prípade, že sa v nej nachádza čerstvo sytený nápoj. Tieto fľaše sa vyrábajú z polyetyléntereftalátu (PET). [12]
- **Kompozitné tlakové nádoby** – sú využívané najmä v doprave ako nádrže plynného paliva (LPG, vodík). Majú nízku hmotnosť, sú schopné odolávať vysokým tlakom, korozívnemu prostrediu aj poškodeniu nárazom. Návrhom a výrobou takýchto tlakových nádob sa zaoberá norma ČSN EN 13923. [12]
- **Plastové potrubia** – využívajú sa v širokej škále odvetví. V stavebníctve sú využívané pre rozvody teplej a studenej vody a taktiež pre konštrukciu kanalizačných systémov. Ďalej sú využívané v rôznych odvetviach priemyslu, počnúc chemickým priemyslom a polovodičovým priemyslom, cez energetiku a vodohospodárstvo až po ťažobný priemysel. Môžu byť používané ako na transport tekutých látok, tak na transport sypkých látok. [13, 14]
- **Priemyselné skladovacie nádrže z plastu** – podobným prípadom ako tlaková nádoba sú taktiež priemyselné plastové nádrže určené na skladovanie rôznych látok. Tieto nádrže síce nie sú navrhované na prevádzku pod tlakom, no ich tvar je podobný tvaru tlakových nádob a ich steny sú zaťažované hydrostatickým tlakom.

Pre návrh tlakovej nádoby sú potrebné dovolené hodnoty namáhania získané pomocou dlhodobých skúšok. Tieto hodnoty je možné z verejne dostupných zdrojov získať iba v obmedzenej miere. V normách ČSN sú tieto hodnoty uvedené pre materiály používané na konštrukciu plastových potrubí a plastových skladovacích nádrží. Z tohto dôvodu bude ďalší rozbor obmedzený na plastové materiály, odporúčané normami ČSN pre tieto aplikácie.

## 2.1 Materiály plastových potrubí uvedené v normách ČSN

Normy ČSN pojednávající o konstrukci plastových potrubí možno rozdeliť na tri skupiny. Prvá skupina sa zaoberá plastovými potrubiami pre rozvody teplej a studenej vody, druhá plastovými potrubiami pre priemyselné aplikácie a tretia plastovými potrubiami pre rozvod plyných palív.

V ďalšom texte budú uvedené konkrétne normy a materiály, ktoré tieto normy uvádzajú ako vhodné pre konštrukciu plastových potrubí.

### 2.1.1 Plastové potrubia pre rozvod teplej a studenej vody

Systémové normy ČSN uvedené v tejto práci, zaoberajúce sa konštrukciou plastových potrubí pre rozvod teplej a studenej vody sa skladajú zo štyroch častí. Označenie „Časť 4“ je ale vynechané a štvrtá časť nesie názov „Časť 5“. Jednotlivé časti normy nesú pomenovanie:

- **Prvá časť** označovaná „Časť 1: – Všeobecne“, alebo „Časť 1: – Obecné“,
- **Druhá časť** označovaná „Časť 2: – Trubky“,
- **Tretia časť** označovaná „Časť 3: – Tvarovky“,
- **Štvrtá časť** označovaná „Časť 5: – Vhodnosť použitia systému“.

V tejto práci budú využité poznatky z prvých častí týchto noriem označovaných názvom „Všeobecne“ alebo „Obecné“.

#### Norma ČSN EN ISO 15874

Norma „ČSN EN ISO 15874-1. Plastové potrubní systémy pro rozvod horké vody a studené vody – Polypropylen (PP) – Část 1: Obecně“, uvádza použitie materiálov:

- **PP-H** – polypropylén, homopolymér,
- **PP-B** – polypropylén, blokový kopolymér,
- **PP-R** – polypropylén, štatistický kopolymér,
- **PP-RCT** – polypropylén, štatistický kopolymér s modifikovanou kryštalinitou. [14]

#### Norma ČSN EN ISO 15875

Norma „ČSN EN ISO 15875-1. Plastové potrubní systémy pro rozvod horké vody a studené vody – Šíťovaný polyethylen (PE-X) – Část 1: Všeobecne“, uvádza použité materiálu:

- **PEX** – sieťovaný polythylén. [15]

#### Norma ČSN EN ISO 15876

Norma „ČSN EN ISO 15876-1. Plastové potrubní systémy pro rozvod horké vody a studené vody – Polybuten (PB) – Část 1: Obecně“, uvádza použitie materiálu:

- **PB-H** – polybutén, kopolymér,
- **PB-R** – polybutén, náhodný kopolymér. [16]

### **Norma ČSN EN ISO 15877**

Norma „ČSN EN ISO 15877-1. *Plastové potrubní systémy pro rozvod horké vody a studené vody – Chlorovaný polyvinylchlorid (PVC-C) – Část 1: Všeobecně*“, uvádza použitie materiálu:

- **PVC-C** – chlórovaný polyvinylchlorid. [17]

### **Norma ČSN EN ISO 22391**

Norma „ČSN EN ISO 22391-1. *Plastové potrubní systémy pro rozvod horké vody a studené vody – Polyethylen odolný zvýšeným teplotám (PE-RT) – Část 1: Všeobecně*“, uvádza použitie materiálu:

- **PE-RT** – polyetylén odolný zvýšeným teplotám. [18]

## **2.1.2 Plastové potrubia pre priemyselné aplikácie**

Normy uvedené v tejto časti sa zaoberajú konštrukciou plastových potrubí a ich súčasti (tvarovky, ventily, trubky), ktoré slúžia na dopravu kvapalných, plyných a tuhých látok v priemyslových aplikáciách uvedených pri jednotlivých normách.

### **Norma ČSN EN ISO 15493**

Norma „ČSN EN ISO 15493. *Plastové potrubní systémy pro průmyslové aplikace – Akrylonitrilbutadienstyren (ABS), neměkčený polyvinylchlorid (PVC-U), a chlorovaný polyvinylchlorid (PVC-C) – Specifikace pro součásti a systém – Metrické řady*“, sa zaoberá konštrukciou priemyslových potrubí a ich súčastí využívaných v:

- chemickom priemysle,
- polovodičovom priemysle,
- poľnohospodárskom priemysle,
- energetike (napríklad doprava vody),
- vodohospodárstve,
- pre priemyslové kanalizácie,
- prevádzkach zaoberajúcich sa galvanickým pokovovaním a morením. [19]

Pre výrobu potrubí používaných v týchto oblastiach daná norma uvádza nasledujúce materiály:

- **ABS** – akrylonitrilbutadienstyren,
- **PVC-U** – nemäkčený polyvinylchlorid,
- **PVC-C** – chlórovaný polyvinylchlorid. [19]

### **Norma ČSN EN ISO 15494**

Norma „ČSN EN ISO 15494. *Plastové potrubní systémy pro průmyslové aplikace – Polybuten (PB), polyethylen (PE), polyethylen odolný zvýšeným teplotám (PE-RT), síťovaný polyethylen (PE-X), polypropylen (PP) – Metrické řady pro specifikace pro součásti a systém*“ sa zaoberá konštrukciou potrubných systémov určených pre použitie v **rovnakých aplikáciách**, ako sú uvedené v **predchádzajúcej norme**, a ďalších aplikáciách ako sú:

- ťažobný priemysel,
- zariadenia pre hasenie požiarov,
- geotermálne aplikácie. [13]

Pre konštrukciu potrubných systémov určených pre uvedené aplikácie norma udáva použitie materiálov:

- **PB** – polybutén,
- **PE** – polyetylén,
- **PE-RT** – polyetylén odolný zvýšeným teplotám,
- **PE-X** – sieťovaný polyetylén,
- **PP-H** – polypropylén homopolymér,
- **PP-B** – polypropylén, blokový kopolymér,
- **PP-R** – polypropylén, štatistický kopolymér ,
- **PP-RCT** – polypropylén, štatistický kopolymér s modifikovanou kryštalinitou. [13]

## **2.2 Materiály beztlakových plastových nádrží uvedené v normách ČSN**

### **Norma ČSN EN ISO 12573**

Norma ČSN EN ISO 12573-1. *Svařované stabilní beztlakové termoplastické nádrže – Část 1: Všeobecné zásady*, uvádza pre konštrukciu stabilných plastových nádrží materiály:

- **PE** – polyetylén,
- **PP** – polypropylén,
- **PVC** – polyvinylchlorid,
- **PVDF** – polyvinylidenfluorid. [20]

## 2.3 Zhrnutie

Z predchádzajúceho rozboru vyplýva, že pre konštrukciu plastových potrubí a plastových nádrží normy ČSN uvádzajú materiály a modifikácie materiálov:

- polyetylén (PE),
- polypropylén (PP),
- polyvinylchlorid (PVC),
- akrylonitrilbutadiénstyrén (ABS),
- polybutén (PB),
- polyvinylidénfluorid (PVDF).

V ďalšej kapitole preto bude uvedený rozbor týchto materiálov z hľadiska mechanických vlastností, chemickej odolnosti, odolnosti voči poveternostným podmienkam, možností spracovania a typických oblastí použitia.

### 3. ROZBOR VLASTNOSTÍ JEDNOTLIVÝCH PLASTOVÝCH MATERIÁLŮV

Táto kapitola poskytuje hlbší rozbor vlastností plastových materiálov, ktoré sa na základe výsledkov predošlej kapitoly javia ako vhodné pre konštrukciu tlakovej nádoby. V nasledujúcom texte sú uvedené informácie o vnútornej štruktúre, tepelnej odolnosti, chemickej odolnosti, možnostiach spracovania a taktiež typických oblastiach použitia týchto materiálov. Taktiež sú pre jednotlivé druhy plastov uvedené príklady reálnych materiálov a ich mechanické vlastnosti.

#### 3.1 Polyetylén (PE)

Polyetylén je semikryštalický termoplast (kryštalinita približne 75 %) patriaci od skupiny komoditných polymérov. Jeho teplotný rozsah pre dlhodobé používanie je  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Môže byť tvorený lineárnymi, alebo rozvetvenými reťazcami. Tvar reťazca vplýva na molekulárnu hustotu materiálu, ktorá so zvyšujúcou sa rozvetvenosťou reťazca klesá. [11, 21]

Materiál s lineárnym reťazcom sa označuje PE-HD – polyetylén s vysokou hustotou. Materiál tvorený rozvetveným reťazcom sa označuje PE-LD – polyetylén s nízkou hustotou. Okrem týchto dvoch materiálov taktiež existujú materiály s označením PE-MD – polyetylén so strednou molekulárnou hmotnosťou a PE-UHMW – polyetylén s veľmi vysokou molekulárnou hmotnosťou. [5, 21]

Nepolárna povaha polyetylénu zabezpečuje dobrú chemickú odolnosť voči kyselinám, alkalickým roztokom, rozpúšťadlám, alkoholu a vode. Proti oxidujúcim kyselinám, ketónom, aromatickým uhl'ovodíkom a chl'orovaným uhl'ovodíkom je však chemická odolnosť nízka. Tuhy a oleje spôsobujú mierne bobtnanie materiálu. [21]

Odolnosť voči ultrafialovému žiareniu je nízka, a tak je v prípade dlhodobého vystavenia výrobku z tohto materiálu slnečnému žiareniu potrebné aplikovať ochranné opatrenia (ochranný náter, prísady do materiálu). Materiál sa taktiež vyznačuje dobrou odolnosťou voči oteru. [21]

Výrobky z polyetylénu je možné vyrábať vstrekováním do formy, zváraním, a tiež obrábaním polotovarov na obrábacích strojoch. V závislosti od typu a molekulárnej hustoty materiálu sa polyetylén používa v rôznych oblastiach. Materiál s nízkou molekulárnou hustotou sa používa na výrobu obalových materiálov, tašiek a fólií. Materiál s vysokou molekulárnou hustotou je používaný na výrobu rôznych typov potrubí, kanistrov, častí domáчих spotrebičov a ďalších výrobkov pre domácnosť. Polyetylén s veľmi vysokou molekulárnou hustotou je možné vďaka jeho výhodným vlastnostiam použiť pre výrobu klzných vodiacich elementov, ložísk, pluhových radlíc či súčastí kĺbových protéz. [5, 21, 22]

Po porovnaní riešeného problému s typickými aplikáciami uvedených typov polyetylénu je možné usúdiť, že pre konštrukciu tlakovej nádoby je vhodný materiál PE-HD. Príkladom materiálu na báze PE-HD je materiál ERACLENE® MM70 U, ktorého vybrané dostupné vlastnosti sú uvedené v tabuľke 3.1.

Tabuľka 3.1 – Vybrané vlastnosti materiálu ERACLENE® MM70 U [23]

| Charakteristika          | Hodnota | Jednotka          | Norma    |
|--------------------------|---------|-------------------|----------|
| Hustota                  | 953     | kg/m <sup>3</sup> | ISO 1183 |
| Modul pružnosti v ťahu   | 1200    | MPa               | ISO 527  |
| Medza klzu               | 26      | MPa               | ISO 527  |
| Predĺženie na medzi klzu | 11      | %                 | ISO 527  |
| Ťažnosť                  | >50     | %                 | ISO 527  |

## 3.2 Polypropylén (PP)

Polypropylén je semikryštalický termoplast (kryštalinita 60–70 %) patriaci do triedy komoditných plastov. V porovnaní s inými termoplastmi sa vyznačuje nižšou hustotou a vyššou teplotou topenia (približne 160 °C) a teda použiteľnosťou pri vyšších teplotách. Je charakteristický pevnosťou, tvrdosťou a odolnosťou voči oteru. Je málo priepustný pre plyny a pary, a vďaka nepolárnej povahe odolný voči chemikáliám aj pri zvýšených teplotách. [11, 24]

Teplotný rozsah použitia polypropylénu je v rozmedzí od 0 °C do 80 °C. Pri teplotách nižších ako 0 °C výrazne klesá rázová odolnosť materiálu a ten sa stáva krehkým. Taktiež materiál nedokáže odolávať poveternostným podmienkam. Vplyvom dlhodobého pôsobenia UV žiarenia, v spojení s účinkom kyslíka podlieha degradácii. Ak by mala byť tlaková nádoba vyrobená z polypropylénu dlhodobo vystavená takémuto žiareniu, je potrebné jej povrch ošetriť náterom, ktorý dokáže absorbovať UV žiarenie. Bez použitia prídavných látok nie je odolný horeniu. Z chemických látok nie je odolný voči oxidačným činidlám, ketónom (napr. acetón), benzínu, benzénu, chlórovaným uhlíkovodíkom, kontaktu s meďou. [5, 24]

Pre spracovanie polypropylénu je v závislosti od požadovaného tvaru výrobku vhodné použiť technológiu vstrekovania, vyfukovania, vytlačovania, prípadne obrábania polotovarov na CNC strojoch. Výrobky z polypropylénu je taktiež možné vyrábať zvaráním. [5, 22, 24]

Okrem výroby potrubných systémov sa používa napríklad na výrobu rôznych súčastí v automobilovom priemysle (ventilátory, nárazníky), spotrebnom priemysle (súčasti domácich spotrebičov) a stavebnom priemysle. [5, 22]

Ako príklad bol vybraný materiál ALTECH PP-H A 1000/120 UV GY LWA, na báze polypropylénového homopolyméru. Tento materiál obsahuje látky, zvyšujúce jeho odolnosť voči pôsobeniu UV žiarenia. Vybrané vlastnosti tohto materiálu sú uvedené v tabuľke 3.2.

Tabuľka 3.2 – Vybrané vlastnosti materiálu ALTECH PP-H A 1000/120 UV GY LWA [23]

| Charakteristika             | Hodnota | Jednotka          | Norma    |
|-----------------------------|---------|-------------------|----------|
| Hustota                     | 920     | kg/m <sup>3</sup> | ISO 1183 |
| Modul pružnosti v ťahu      | 1150    | MPa               | ISO 527  |
| Medza klzu                  | 28      | MPa               | ISO 527  |
| Predĺženie na medzi klzu    | 12,5    | %                 | ISO 527  |
| Rázová húževnatosť (23 °C)  | 120     | kJ/m <sup>2</sup> | ISO 179  |
| Vrubová húževnatosť (23 °C) | 8       | kJ/m <sup>2</sup> | ISO 179  |

### 3.3 Polyvinylchlorid (PVC)

Polyvinylchlorid je amorfny termoplast. Patrí do triedy komoditných plastov, pričom po polypropyléne a polyetyléne je najviac používaným plastovým materiálom. Jeho výroba je lacná a je možné ho spracovávať všetkými základnými postupmi (valcovanie, vytlačovanie, vstrekovanie, vyfukovanie). Na tvrdé výrobky, ako sú napríklad potrubia, profily a dosky, sa používa polyvinylchlorid bez pridania zmäkčovadiel. Z mäkkého polyvinylchloridu sa vyrábajú polotuhé až elastické výrobky ako fólie, nádoby či ochranné rukavice. [5]

Pre výrobu tlakovej nádoby sa na základe informácií z predchádzajúcej kapitoly javí ako vhodné použiť polyvinylchlorid-chlórovaný a polyvinylchlorid-nemäkkčený. Ďalej budú uvedené špecifické vlastnosti týchto dvoch modifikácií.

#### 3.3.1 Chlórovaný polyvinylchlorid (PVC-C)

Chlórovaný polyvinylchlorid je možné prevádzkovať v teplotnom rozsahu 40 °C až 80 °C. Aj za zvýšených teplôt je chemicky odolný voči vplyvu vysoko koncentrovaných minerálnych kyselín, zásaditých látok, soľných roztokov a suchého chlóru. Nie je odolný voči aromatickým a chlórovaným roztokom, esterom a ketómom. Pre použitie v prostredí riedidiel, olejov, zmáčadiel, alebo tukov, je potrebné odolnosť materiálu vopred otestovať. Materiál je čiastočne odolný voči slnečnému UV žiareniu, a dobre odoláva poveternostným podmienkam. [25]

Používa sa na súčasti zariadení v chemickom a elektrotechnickom priemysle, v zariadeniach pre úpravu vody, na výrobu častí potrubných rozvodov, čerpadiel a ventilov. Materiál je možno použiť vo vysoko korozívnych prostrediach ako náhradu za nerezovú oceľ. Ďalším špecifikom chlórovaného polyvinylchloridu je vysoká odolnosť voči horeniu aj bez pridania ohňuvzdorných prísad. Tú zabezpečuje práve vysoký obsah chlóru. [25, 26]

Ako príklad materiálu PVC-C bol vybraný materiál GEHR Plastics PVC-C®, ktorého vybrané materiálové charakteristiky uvádza tabuľka 3.3.

Tabuľka 3.3 – Vybrané vlastnosti materiálu GEHR Plastics PVC-C® [27]

| Charakteristika             | Hodnota | Jednotka          | Norma    |
|-----------------------------|---------|-------------------|----------|
| Hustota                     | 1520    | kg/m <sup>3</sup> | ISO 1183 |
| Modul pružnosti v ťahu      | 2570    | MPa               | ISO 527  |
| Medza klzu                  | 49      | MPa               | ISO 527  |
| Pevnosť v ťahu              | 80      | MPa               | ISO 527  |
| Predĺženie na medzi klzu    | 5       | %                 | ISO 527  |
| Ťažnosť                     | 15      | %                 | ISO 527  |
| Vrubová húževnatosť (23 °C) | 27      | kJ/m <sup>2</sup> | ISO 179  |

### 3.3.2 Nemäkčený polyvinylchlorid (PVC-U)

Nemäkčený polyvinylchlorid je možné používať v rozsahu teplôt od 0 °C do 60 °C. Pri teplotách mimo tohto intervalu sa zhoršujú jeho mechanické vlastnosti ako pevnosť v ťahu, tuhosť a rázová húževnatosť. Materiál dokáže odolávať vplyvom väčšiny minerálnych kyselín, zásaditých látok, soľných roztokov, roztokov chlórnanu sodného, alifatických uhl'ovodíkov a elementárneho chlóru. Nie je však odolný voči aromatickým alebo chlórovaným rozpúšťadlám, esterom a ketómom. Rovnako ako v prípade PVC-C je potrebné jeho odolnosť voči olejom, riedidlám, zmäčadlám a tukom overiť pomocou testov. Materiál, rovnako ako PVC-C, odoláva vplyvu poveternostných podmienok a čiastočne aj slnečnému UV žiareniu. Rovnako vďaka vysokému obsahu chlóru odoláva horeniu. [28]

Nemäkčený polyvinylchlorid je materiál s univerzálnym využitím. Je fyziologicky nezávadný, a nemá žiaden vplyv na kvalitu pitnej vody, vďaka čomu je možné ho používať aj v gastronómii a vodohospodárstve. [28]

Ako príklad materiálu na báze PVC-U, bol vybraný materiál GEHR Plastics PVC-U, ktorého vybrané materiálové vlastnosti sú uvedené v tabuľke 3.4.

Tabuľka 3.4 – Vybrané vlastnosti materiálu GEHR Plastics PVC-U [27]

| Charakteristika             | Hodnota | Jednotka          | Norma    |
|-----------------------------|---------|-------------------|----------|
| Hustota                     | 1360    | kg/m <sup>3</sup> | ISO 1183 |
| Modul pružnosti v ťahu      | 3040    | MPa               | ISO 527  |
| Medza klzu                  | 51      | MPa               | ISO 527  |
| Pevnosť v ťahu              | 30      | MPa               | ISO 527  |
| Predĺženie na medzi klzu    | 3       | %                 | ISO 527  |
| Ťažnosť                     | ≥10     | %                 | ISO 527  |
| Vrubová húževnatosť (23 °C) | 3       | kJ/m <sup>2</sup> | ISO 179  |

### 3.4 Akrylonitrilbutadiénstyrén (ABS)

Akrylonitrilbutadiénstyrén je amorfný termoplastický materiál. Patrí do skupiny komoditných plastov. Je tvorený spojením troch zložiek, pričom každá z nich materiálu dodáva istú vlastnosť. Akrylonitril a styrén dodávajú materiálu pevnosť, pričom styrénová zložka tiež zaručuje kvalitný povrch. Zložka butadiénu zaručuje materiálu vysokú húževnatosť, rázovú pevnosť a odolnosť voči oteru. [29]

Materiál je vhodný hlavne pre použitie pri nižších teplotách v rozsahu –50 °C až 60 °C. Pri prekročení hornej hranice uvedeného intervalu sa jeho mechanické vlastnosti zhoršujú. Pri teplotách nižších ako –50 °C sa naopak jeho húževnatosť a pevnosť naďalej zvyšuje. [23]

Materiál vykazuje chemickú odolnosť voči vode, roztokom soli, nízko koncentrovaným kyselinám, alkoholom, organickým uhl'ovodíkom a olejom. Odolnosť voči koncentrovaným kyselinám, esterom, ketómom a aromatickým uhl'ovodíkom je nedostatočná. Dlhodobé pôsobenie ultrafialového žiarenia spôsobuje poškodenie povrchu (vyblednutie farby a stratu lesku) a mierny pokles rázovej húževnatosti. [29]

Dobré mechanické vlastnosti pri nízkych teplotách v spojení s chemickou odolnosťou predurčujú tento materiál na použitie v chladiarenských a klimatizačných zariadeniach. Vysoká odolnosť voči oteru umožňuje použiť materiál tam, kde dochádza ku kontaktu s abrazívnymi látkami, ako je transport pevných látok, kalov, či ťažobný priemysel. [29]

Ako príklad materiálu na báze ABS bol vybraný materiál predávaný pod obchodnou značkou Novodur® H702. Tabuľka 3.5 uvádza hodnoty vybraných mechanických vlastností daného materiálu získaných krátkodobými mechanickými skúškami.

Tabuľka 3.5 – Vybrané vlastnosti materiálu Novodur® H702 [23]

| Charakteristika             | Hodnota | Jednotka          | Norma    |
|-----------------------------|---------|-------------------|----------|
| Hustota                     | 1040    | kg/m <sup>3</sup> | ISO 1183 |
| Modul pružnosti v ťahu      | 2500    | MPa               | ISO 527  |
| Medza klzu                  | 46      | MPa               | ISO 527  |
| Predĺženie na medzi klzu    | 2,6     | %                 | ISO 527  |
| Vrubová húževnatosť (23 °C) | 16      | kJ/m <sup>2</sup> | ISO 179  |

### 3.5 Polybutén (PB)

Polybutén je semikryštalický termoplast tvorený prevažne izotaktickými reťazcami patriaci do skupiny inžinierskych plastov. Jeho kryštalinita býva približne 50 %. Je odolný voči vysokým teplotám, ale zároveň je jeho teplota krehnutia nízka. Teplotný rozsah, pri ktorom je možné ho dlhodobo používať, je –10 °C až 90 °C. Má veľmi vysokú molekulovú hmotnosť (10-krát väčšia ako PE-HD). Tá v spojení s kryštalinitou zabezpečuje materiálu vysokú rázovú pevnosť, odolnosť voči oteru, odolnosť voči tečeniu a korózii pri pôsobiacom mechanickom napätí. [30]

Je chemicky odolný voči zriedeným kyselinám, zásaditým roztokom, olejom, tukom a alifatickým uhl'ovodíkom. Odolnosť voči aromatickým uhl'ovodíkom a halogénovým uhl'ovodíkom je nízka. Dokáže odolávať dlhodobému pôsobeniu UV žiarenia. Spracováva sa vyfukovaním, vytlačovaním, alebo vstrekaním a je možné ho zväť. Používa sa pre rozvody pitnej a úžitkovej vody, rozvody kúrenia, rozvody tlakového vzduchu (znáša tlakové rázy), tlakové pneumatické nádrže, tlakové fľaše. Tiež sa používa v chemickom priemysle pri vyšších teplotách, pri ktorých by už vlastnosti polypropylénu neboli dostačujúce. [5, 30, 31]

Ako príklad materiálu na báze polybuténu bol vybratý materiál Akoalit PB 4237. Vybrané mechanické vlastnosti tohto materiálu uvádza tabuľka 3.6.

Tabuľka 3.6 – Vybrané vlastnosti materiálu Akoalit PB 4237 [32]

| Charakteristika             | Hodnota | Jednotka          | Norma    |
|-----------------------------|---------|-------------------|----------|
| Hustota                     | 938     | kg/m <sup>3</sup> | ISO 1183 |
| Modul pružnosti v ohybe     | 450     | MPa               | ISO 173  |
| Medza klzu                  | 20      | MPa               | ISO 527  |
| Pevnosť v ťahu              | 35      | MPa               | ISO 527  |
| Ťažnosť                     | 300     | %                 | ISO 527  |
| Vrubová húževnatosť (20 °C) | 20      | kJ/m <sup>2</sup> | ISO 180  |

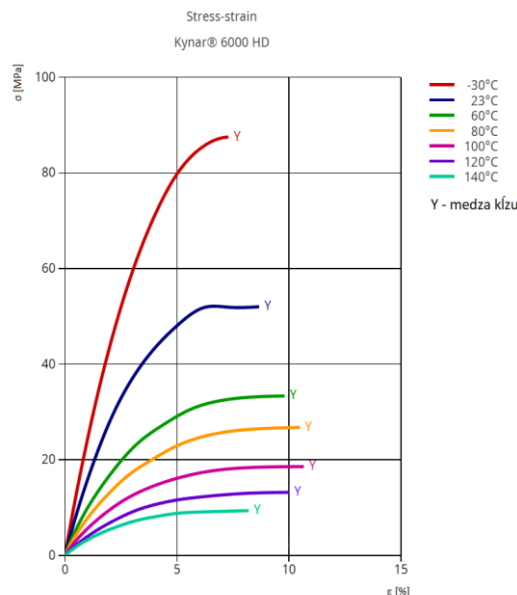
### 3.6 Polyvinylidenfluorid (PVDF)

Polyvinylidenfluorid patrí medzi semikryštalické termoplasty a radí sa do skupiny high-tech polymérov. Jeho použitie je možné v rozsahu teplôt od  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  až do  $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Je odolný voči anorganickým rozpúšťadlám, organickým kyselinám, alkoholu, halogénovým rozpúšťadlám a na rozdiel od ostatných skôr uvedených materiálov aj voči alifatickým a aromatickým uhlíkovodíkom.

Ketóny, estery a niektoré organické kyseliny môžu spôsobiť jeho bobtnanie. Voči silným primárnym amínom a alkalickým kovom je chemická odolnosť materiálu nedostatočná. Polyvinylidenfluorid sa vyznačuje odolnosťou voči slnečnému ultrafialovému žiareniu, ktoré nespôsobuje zmenu jeho vlastností. Taktiež sa vyznačuje odolnosťou voči horeniu. Je možné ho spracovávať technológiami ako vytlačanie, vstrekovanie, vyfukovanie a taktiež spájať zváraním. [33]

Polyvinylidenfluorid je do teploty  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  fyziologicky nezávadný a vysoká stabilita jeho molekúl zabezpečuje vysokú čistotu média, s ktorým je v kontakte. To umožňuje jeho použitie v polovodičovom a farmaceutickom priemysle. Taktiež je tento materiál používaný v papierenskom priemysle a automobilovom priemysle. [33]

Ako príklad bol v tomto prípade použitý materiál Kynar® 6000 HD. Krátkodobé mechanické charakteristiky tohto materiálu sú uvedené v tabuľke 3.7.



Obrázok 3.1 – Ťahový diagram materiálu Kynar® 6000 HD pre rôzne teploty [23]

Tabuľka 3.7 – Vybrané vlastnosti materiálu Kynar® 6000 HD [23]

| Charakteristika                                      | Hodnota | Jednotka        | Norma    |
|------------------------------------------------------|---------|-----------------|----------|
| Hustota                                              | 1770    | $\text{kg/m}^3$ | ISO 1183 |
| Modul pružnosti v ťahu                               | 2300    | MPa             | ISO 527  |
| Medza klzu                                           | 52      | MPa             | ISO 527  |
| Predĺženie na medzi klzu                             | 9       | %               | ISO 527  |
| Ťažnosť                                              | 40      | %               | ISO 527  |
| Vrubová húževnatosť ( $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) | 12      | $\text{kJ/m}^2$ | ISO 179  |

## 4. NÁVRH TLAKOVÝCH NÁDOB – NORMY ČSN

Pre návrh tlakových nádob slúžia normy ČSN uvedené v nasledujúcom texte, pričom každá z týchto noriem uvádza podmienky ktoré obmedzujú jej platnosť. Keďže cieľom tejto práce je navrhnuť tlakovú nádobu z plastu, čiže materiálu, ktorý nie je pre konštrukciu tlakových nádob používaný štandardne, prvá časť tejto kapitoly uvádza materiály ktoré sú jednotlivými normami povolené pre konštrukciu tlakových nádob.

Druhá časť kapitoly uvádza vzťahy a pravidlá, pre výpočet hrúbky steny valcového plášťa a pologuľového dna tlakovej nádoby podľa normy ČSN EN 13445. Tieto vzťahy budú využité pre porovnanie výsledkov získaných výpočtom pomocou vlastnej analýzy napätí uvedenom v nasledujúcej kapitole práce.

### 4.1 Normy ČSN pre pevnostný návrh tlakových nádob

Konštrukciou, výrobou a montážou tlakových nádob sa zaoberajú skupiny noriem:

- ČSN 69 0010 – Tlakové nádoby stabilní. Technická pravidla,
- ČSN EN 286 – Jednoduché netopené tlakové nádoby pro vzduch nebo dusík,
- ČSN EN 13445 – Netopené tlakové nádoby,
- ČSN EN 13923 – Vinuté laminátové tlakové nádoby – Materiály, konstrukce, výroba a zkoušení. [34]

Ďalej bude uvedená oblasť použitia jednotlivých noriem a materiály, ktoré tieto normy dovoľujú pre konštrukciu tlakových nádob.

#### 4.1.1 Norma ČSN 69 0010

Norma ČSN 69 0010 sa zaoberá technickými pravidlami a pevnostným výpočtom stabilných tlakových nádob. Uvádza pravidlá a spôsoby výpočtu pre jednotlivé časti tlakových nádob a ich rôzne typické tvary a tiež ďalšie pravidlá týkajúce sa spôsobu výroby, požiadaviek na materiál a označovanie. Táto norma platí pre tlakové nádoby vyrábané z ocele, farebných kovov a hliníka. [35]

#### 4.1.2 Norma ČSN EN 286

Norma ČSN EN 286 sa zaoberá návrhom jednoduchých nevyhrievaných tlakových nádob určených pre vzduch alebo dusík. Uvádza technické pravidla týkajúce sa tlakových nádob pre všeobecné použitie a tlakových nádob, ktoré sú súčasťou brzdnych systémov motorových vozidiel, ich prívesov, alebo koľajových vozidiel. Materiály uvedené normou pre konštrukciu tlakových nádob sú ocele a zliatiny hliníka, pričom norma definuje konkrétne certifikované druhy materiálov. [36]

#### 4.1.3 Norma ČSN EN 13445

Norma ČSN EN 13445 rozsiahlo pokrýva problematiku návrhu, výroby a ďalších technických pravidiel týkajúcich sa nevyhrievaných tlakových nádob. Táto norma podrobne uvádza požiadavky na materiály tlakových nádob, pričom materiály povolené normou sú ocele, liatiny s guľôčkových grafitom, hliník a jeho zliatiny a taktiež nikel a jeho zliatiny. [37]

#### 4.1.4 Norma ČSN EN 13923

Norma ČSN EN 13923 sa zaoberá konštrukciou, materiálmi, výrobou a skúšaním laminátových vinutých tlakových nádob. Materiál týchto tlakových nádob vzniká spojením živíc, termoplastov a vystužujúcich vlákien. Norma uvádza dve návrhové metódy, pričom prvá z nich je založená na teórii siete a druhá na teórii laminátu. [38]

### 4.2 Hrúbka steny tlakovej nádoby podľa normy ČSN EN 13445

Norma ČSN EN 13445 zaoberajúca sa návrhom nevyhrievaných tlakových nádob uvádza pre výpočet hrúbky steny valcového plášťa a pologuľového dna tlakovej nádoby vzťahy a pravidlá uvedené v nasledujúcom texte tejto podkapitoly.

#### 4.2.1 Valcový plášť tlakovej nádoby

Pre výpočet minimálnej hrúbky valcového plášťa tlakovej nádoby norma ČSN EN 13445 uvádza vzťahy (4.1) a (4.2). Výpočtový tlak  $P$  použitý pre tento výpočet má zohľadňovať najnepriaznivejšie podmienky, ktoré môžu v tlakovej nádobe nastať. Hodnota zvarového súčiniteľa  $z$  je závislá na percentuálnom podiele zvarových spojov kontrolovaných nedeštruktívnymi metódami. Maximálne dovolené napätie  $f$  sa pre jednotlivé typy materiálov určuje pomocou vzťahov uvedených v norme. Platnosť uvedených vzťahov je obmedzená vzťahom (4.3). [37]

$$e = \frac{P \cdot D_i}{2f \cdot z - P} \quad (4.1)$$

kde príslušné symboly znamenajú:

- $e$  odporúčaná hrúbka steny valcového plášťa [mm],
- $D_i$  vnútorný priemer valcového plášťa [mm],
- $P$  výpočtový tlak [MPa],
- $z$  zvarový súčiniteľ [-],
- $f$  maximálne dovolené napätie [MPa].

$$e = \frac{P \cdot D_e}{2f \cdot z + P} \quad (4.2)$$

kde príslušný symbol  $D_e$  znamená vonkajší priemer valcového plášťa tlakovej nádoby v jednotkách milimetrov.

$$\frac{e}{D_e} \leq 0,16 \quad (4.3)$$

#### 4.2.2 Pologuľové dno tlakovej nádoby

Norma ČSN EN 13445 uvádza, že hrúbka steny pologuľového dna tlakovej nádoby má byť rovnaká ako vypočítaná hrúbka valcového plášťa tlakovej nádoby, ku ktorému je toto dno pripojené. Priemery k strednicovej ploche sa pre valcový plášť a pologuľové dno musia zhodovať. [37]

## 5. NÁVRH VYBRANÝCH ČASTÍ TLAKOVEJ NÁDOBY

V tejto časti bude vykonaný pevnostný návrh vybraných častí tlakovej nádoby a to konkrétne valcového plášťa tlakovej nádoby, ktorý budú uzatvárať dná tvaru poglobule. Tlaková nádoba bude vyrobená z plastového materiálu, pričom ďalšie požiadavky na nádobu sú stanovené v tabuľke 5.1.

Tabuľka 5.1 – Požiadavky zadané na tlakovú nádobu

|                                        |                  |
|----------------------------------------|------------------|
| Najvyššia prevádzková teplota          | 60 °C            |
| Najvyšší prevádzkový tlak              | 0,5 MPa          |
| Pracovné médium                        | destilovaná voda |
| Vnútorný objem                         | 120 l            |
| Vnútorný priemer valcovej časti nádoby | 450 mm           |
| Životnosť                              | 100 000 h        |
| Odolnosť voči horeniu                  | požadovaná       |
| Odolnosť voči pôsobeniu UV žiarenia    | požadovaná       |
| Vysoká chemická stabilita materiálu    | požadovaná       |

### 5.1 Výber vhodnej normy

Normy ČSN zaoberajúce sa pevnostným návrhom tlakových nádob uvedené v predchádzajúcej kapitole pojednávajú o návrhu tlakových nádob z ocele, liatiny, zliatin hliníka, medi, alebo niklu a kompozitných materiálov.

Žiadna zo súčasných noriem ČSN zaoberajúcich sa pevnostným návrhom tlakových nádob neuvádza informácie týkajúce sa konštrukcie tlakových nádob z nevystuženého plastu. Priame použitie týchto noriem pre prípad riešený v tejto práci nie je možné, a nebolo by v súlade s platnou legislatívou. Uvedené normy však pri riešení problému možno použiť ako zdroj informácií, týkajúci sa riešenej problematiky.

### 5.2 Výber vhodného materiálu

Na základe stanovených požiadaviek na navrhovanú tlakovú nádobu, zhrnutých v tab. 5.1, bol s pomocou informácií uvedených v tretej kapitole zaoberajúcej sa vlastnosťami plastových materiálov vybratý pre konštrukciu tlakovej nádoby materiál na báze PVDF, Kynar® 6000 HD.

Tento materiál je schopný zabezpečiť požiadavky na vysokú chemickú stabilitu materiálu, odolnosť voči ultrafialovému žiareniu a taktiež na odolnosť voči horeniu. Najvyššia prevádzková teplota 60 °C zároveň spadá do intervalu –20 °C až 140 °C, pri ktorom je možné daný materiál používať.

Porovnaním výsledkov ťahovej skúšky tohto materiálu (viď. obrázok 3.1) s krivkami na obrázku 1.12 uvedenom v prvej kapitole práce, je možné pozorovať, že pri teplote 60 °C sa materiál nachádza v húževnatom stave. To je z hľadiska konštrukcie tlakovej nádoby vhodné, pretože pre materiál v tomto stave prudko klesá pravdepodobnosť porušenia krehkým lomom.

### 5.3 Stanovenie dovoleného namáhania

Ako je uvedené v prvej kapitole práce, v prípade dlhodobého namáhania súčastí z plastových materiálov dochádza k javu nazývanému tečenie materiálu. Keďže tlaková nádoba je zariadenie dlhodobo zaťažované prevádzkovým tlakom, je pre určenie dovolenej hodnoty napätia potrebné použiť výsledky z dlhodobých, takzvaných kríповých skúšok.

Pre vybrané druhy termoplastických materiálov, je hodnoty dovoleného namáhania možné vyhľadať v norme ČSN EN 1778. Tá obsahuje diagramy, ktoré umožňujú stanoviť dovolené napätie, ktorým môže byť materiál zaťažený pri požadovanej životnosti a prevádzkovej teplote. Okrem toho tiež obsahuje koeficienty, ktoré odčítanú hodnotu upraví, v závislosti na prostredí, v ktorom sa súčasť bude nachádzať, technológii výroby a spôsobe zaťažovania.

Na základe týchto hodnôt sa prípustné napätie podľa normy ČSN EN 1778 určí pomocou nasledujúceho vzťahu (5.1):

$$\sigma_{al.} = \frac{K \cdot f_l}{A_1 \cdot A_{2K} \cdot S} \quad (5.1)$$

kde príslušné symboly znamenajú:

|                |                                                               |
|----------------|---------------------------------------------------------------|
| $\sigma_{al.}$ | dovolené namáhanie v prevádzkových podmienkach [MPa],         |
| $K$            | dlhodobá pevnosť pri navrhovanej teplote a životnosti [MPa],  |
| $f_l$          | dlhodobý zväčšovací faktor [–],                               |
| $A_1$          | korekčný faktor zohľadňujúci vplyvy špecifického napätia [–], |
| $A_{2K}$       | korekčný faktor zohľadňujúci vplyv okolitého média [–],       |
| $S$            | koeficient bezpečnosti [–]. [8]                               |

#### 5.3.1 Dlhodobá pevnosť pri navrhovanej teplote a životnosti $K$

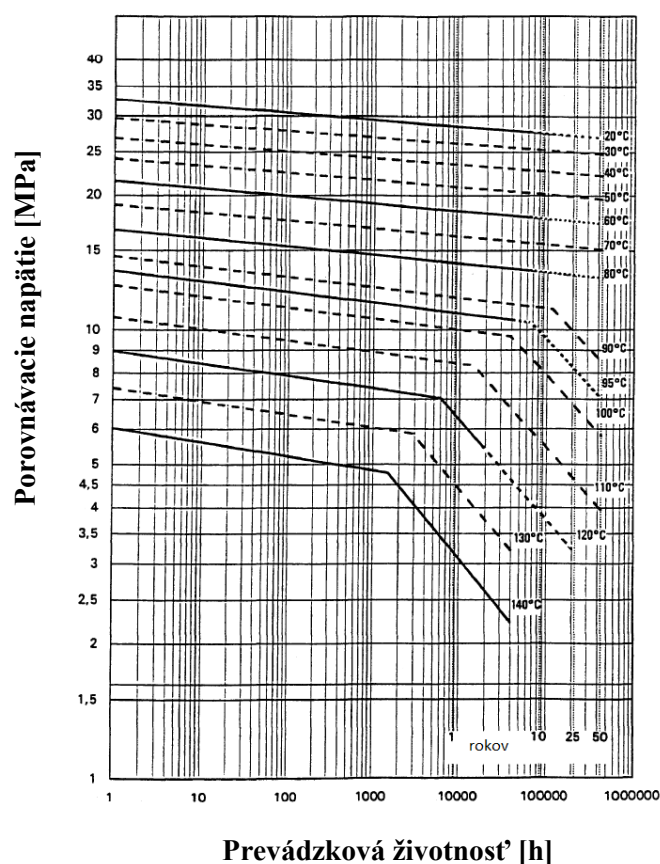
Pre materiál PVDF, prevádzkovú teplotu 60 °C a požadovanú životnosť 100 000 hodín bola odčítaním z diagramu znázorňujúceho krivky životnosti (viď obrázok 5.1) určená dovolená hodnota namáhania  $K = 16 \text{ MPa}$ .

#### 5.3.2 Korekčný faktor $A_{2K}$

Korekčný faktor zohľadňuje vplyv pracovného média na pevnosť materiálu pri tečení. Predstavuje prevrátenú hodnotu odolnosti materiálu v závislosti na napätí pre jednotlivé pracovné prostredia. Norma ČSN 1778 túto hodnotu pre materiál PVDF neuvádza, a preto bolo nutné zvoliť hodnotu súčiniteľa  $A_{2K} = 1,0$ .

Hodnoty súčiniteľa  $A_{2K}$ , uvedené v norme ČSN 1778, pre iné druhy plastových materiálov (PE-HD, PP, PVC-NI) a pracovné médium tvorené vodou sú ale taktiež rovné jednej čo znamená, že prostredie nemá na ich pevnosť pri tečení vplyv. [8]

Vzhľadom na vysokú chemickú stabilitu a odolnosť materiálu PVDF je možné predpokladať, že médium tvorené destilovanou vodou nebude mať na jeho pevnosť pri tečení vplyv a teda zvolená hodnota súčiniteľa sa neodchyľuje od reality.



Obrázok 5.1 – Krivky životnosti materiálu PVDF [8]

### 5.3.3 Korekčný faktor $A_1$

Korekčný faktor do výpočtu dovoleného napätia zahŕňa vplyv teploty na pevnosť materiálu a je závislý na rázovej pevnosti materiálu. [8]

Norma ČSN 1778 pre materiál PVDF a prevádzkovú teplotu 60 °C uvádza korekčný faktor zohľadňujúci vplyv špecifického napätia  $A_1 = 1,0$  (viď tabuľka 5.2).

Tabuľka 5.2 – Korekčné faktory  $A_1$  [8]

| Materiál | Pracovné teploty |       |       |            |
|----------|------------------|-------|-------|------------|
|          | -10 °C           | 20 °C | 40 °C | 60 °C      |
| PE-HD    | 1,2              | 1,0   | 1,0   | 1,0        |
| PP-H     | 1,8              | 1,3   | 1,0   | 1,0        |
| PP-B     | 1,2              | 1,0   | 1,0   | 1,0        |
| PP-R     | 1,2              | 1,0   | 1,0   | 1,0        |
| PVC-NI   | 1,8              | 1,6   | 1,4   | 1,1        |
| PVC-RI   | 1,6              | 1,3   | 1,0   | 1,0        |
| PVC-C    | 1,9              | 1,8   | 1,6   | 1,2        |
| PVDF-H   | 1,6              | 1,4   | 1,2   | <b>1,0</b> |

### 5.3.4 Dlhodobý zvarací faktor $f_l$

Tabuľka 5.3 obsahuje hodnoty krátkodobého zvaracieho faktoru  $f_s$  a dlhodobého zvaracieho faktoru  $f_l$ . Norma ČSN EN 1778 uvádza, že použitie krátkodobého zvaracieho faktoru je možné iba pri zaťažení trvajúcim maximálne hodinu. Pri zaťažení trvajúcim dlhšiu dobu je nutné vo výpočte použiť hodnotu dlhodobého zvaracieho faktoru  $f_l$ . [8]

Keďže voľba technológie, ktorou bude tlaková nádoba vyrobená, nie je v tejto práci popísaná, je z dôvodu bezpečnosti zvolený dlhodobý zvarací faktor pre najnepriaznivejšiu situáciu, a teda zvaranie horúcim plynom. Pre zvolenú technológiu a materiál PVDF nadobúda dlhodobý zvarací faktor hodnotu  $f_l = 0,4$ . (viď tabuľka 5.3)

Tabuľka 5.3 – Zvaracie faktory [8]

| Postup                                  | Materiál  |      |          |       |            |
|-----------------------------------------|-----------|------|----------|-------|------------|
|                                         | PE-HD     | PP*) | PVC-U**) | PVC-C | PVDF       |
| HS – zvaranie horúcim telesom na tupo   | $f_s$ 0,9 | 0,9  | 0,9      | 0,8   | 0,9        |
|                                         | $f_l$ 0,8 | 0,8  | 0,6      | 0,6   | 0,6        |
| WE – zvaranie extruderom                | $f_s$ 0,8 | 0,8  | –        | –     | –          |
|                                         | $f_l$ 0,6 | 0,6  | –        | –     | –          |
| W – zvaranie horúcim plynom             | $f_s$ 0,8 | 0,8  | 0,8      | 0,7   | 0,8        |
|                                         | $f_l$ 0,4 | 0,4  | 0,4      | 0,4   | <b>0,4</b> |
| *) PP-H, PP-B, PP-R<br>) PVC-NI, PVC-RI |           |      |          |       |            |

### 5.3.5 Koeficient bezpečnosti $S$

Sprievodný text v norme ČSN EN 1778 uvádza, že výber koeficientu bezpečnosti je prenechaný na konštruktéra, ktorý má samostatne vyhodnotiť mieru nebezpečenstva pri zlyhaní navrhovanej konštrukcie. [8]

Zlyhanie tlakovej nádoby môže predstavovať nebezpečenstvo pre osoby a prostredie, v ktorej sa nádoba nachádza, a to najmä z dôvodu vysokej teploty pracovného média a taktiež možnosti vážneho úrazu, ktorý môže byť spôsobený pri prípade porušení súdržnosti materiálu tlakovej nádoby. Z tabuľky 5.4 bol preto zvolený koeficient bezpečnosti nadobúdajúci hodnotu  $S = 2,0$ .

Tabuľka 5.4 – Koeficienty bezpečnosti [8]

| Druh zaťaženia                                                                                                                                                                         | $S$        |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Zaťažovací stav 1<br>Statické zaťaženie pri teplote miestnosti a stálych podmienkach. V prípade zlyhania konštrukcie nehrozí nebezpečenstvo osobám, predmetom a prostrediu             | 1,3        |
| Zaťažovací stav 2<br>Zaťaženie pri striedavých podmienkach (napr. teplota plnenie a vyprázdňovanie). V prípade zlyhania konštrukcie hrozí nebezpečenstvo osobám, objektom a prostrediu | <b>2,0</b> |

### 5.3.6 Dovoľené namáhanie v prevádzkových podmienkach $\sigma_{al}$ .

Na základe hodnoty dlhodobej pevnosti, pri navrhovanej teplote a životnosti  $K$ , odčítanej zo závislosti na obrázku 5.1 a koeficientov upravujúcich túto hodnotu, zhrnutých v tab. 5.5, bolo pomocou vzťahu (5.1) vypočítané dovoľené namáhanie v prevádzkových podmienkach  $\sigma_{al} = 3,2 \text{ MPa}$ .

Tabuľka 5.5 – Zhrnutie hodnôt vstupujúcich do výpočtu dovoľeného namáhania  $\sigma_{al}$ .

| Parameter                                                          | Hodnota |
|--------------------------------------------------------------------|---------|
| Dlhodobá pevnosť pri navrhovanej teplote a životnosti $K$ [MPa]    | 16,0    |
| Korekčný faktor $A_{2K}$ [–]                                       | 1,0     |
| Korekčný faktor $A_l$ [–]                                          | 1,0     |
| Dlhodobý zvärací faktor $f_l$ [–]                                  | 0,4     |
| Koeficient bezpečnosti $S$ [–]                                     | 2,0     |
| Dovoľené namáhanie v prevádzkových podmienkach $\sigma_{al}$ [MPa] | 3,2     |

## 5.4 Výpočet rozmerov nádoby

Podľa zadáných hodnôt (viď tabuľka 5.1) má byť tlaková nádoba navrhnutá tak, aby v jej vnútri mohlo byť uskladnené pracovné médium s objemom 120 litrov. Zároveň bola zadaná veľkosť vnútorného priemeru valcovej časti tlakovej nádoby 450 milimetrov.

Aby bolo možné kompletne definovať geometriu tlakovej nádoby, bolo potrebné na základe zadáných hodnôt vypočítať dĺžku valcovej časti tlakovej nádoby. Tá bola vypočítaná pomocou vzťahu (5.2) vyjadrujúceho celkový objem tlakovej nádoby. Keďže pre dná tlakovej nádoby bol zadáný tvar poglobule a na nádobe sa nachádzajú dve dná, prvý člen vzťahu (5.2) vyjadruje objem gule, ktorej priemer zodpovedá zadávanému vnútornému priemeru valcovej časti tlakovej nádoby  $D_i$ . Druhý člen tohto vzťahu vyjadruje objem valca s priemerom  $D_i$  a dĺžkou  $l$ .

$$V = \frac{\pi \cdot D_i^3}{6} + \frac{\pi \cdot D_i^2 \cdot l}{4} \quad (5.2)$$

kde príslušné symboly znamenajú:

- $V$  vnútorný objem tlakovej nádoby [ $\text{m}^3$ ],
- $D_i$  vnútorný priemer valcovej časti tlakovej nádoby [m],
- $l$  dĺžka valcovej časti tlakovej nádoby [m].

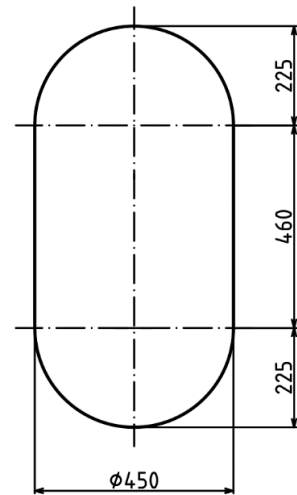
Po vyjadrení dĺžky valcovej časti tlakovej nádoby, zo vzťahu (5.2) a úprave, bol odvodený vzťah (5.3) pomocou ktorého je možné vypočítať dĺžku valcovej časti tlakovej nádoby v závislosti na zadanom objeme  $V$  a vnútornom priemere tlakovej nádoby  $D_i$ .

$$l = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot D_i^2} - \frac{2}{3} \cdot D_i \quad (5.3)$$

Po dosadení zadaného objemu  $V$  a vnútorného priemeru  $D_i$  tlakovej nádoby v jednotkách metrov, do vzťahu (5.3) bola vypočítaná dĺžka valcovej časti tlakovej nádoby  $l_0 = 454,5 \text{ mm}$ . Následným zaokrúhlením vypočítanej hodnoty nahor bola získaná výsledná dĺžka valcovej časti nádoby  $l = 460 \text{ mm}$ . Zaokrúhlením získanej hodnoty nahor, ktoré spôsobilo mierne zväčšenie dĺžky valcovej časti tlakovej nádoby bola pre tlakovú nádobu taktiež zabezpečená mierna objemová rezerva.

Výpočtom objemu valca so zadaným vnútorným priemerom tlakovej nádoby  $D_i$  a dĺžkou získanou rozdielom zaokrúhlenej a nezaokrúhlenej dĺžky valcovej časti tlakovej nádoby bolo zistené, že objem tejto rezervy je približne 0,87 litra.

Použitím zadaných a vypočítaných rozmerov bolo potom možné nakresliť rozmerový náčrt tlakovej nádoby znázornený na obrázku 5.2, kde sú rozmery plášťa uvedené v jednotkách milimetrov.



Obrázok 5.2 – Proporcionálny náčrt plášťa tlakovej nádoby (rozmery v mm)

## 5.5 Stanovenie výpočtového tlaku $P$

Pre výpočet hrúbky steny tlakovej nádoby bolo potrebné stanoviť tlak pôsobiaci na jej steny. Tento tlak je tvorený dvoma zložkami (viď obr. 5.3). Prvú, konštantnú zložkou, tvorí zadaný tlak média uskladneného v tlakovej nádobe. Druhá zložka tlaku je tvorená premenným hydrostatickým tlakom. Ten lineárne narastá od nulovej hodnoty v najvyššej časti nádoby až po maximálnu hodnotu na jej dne.

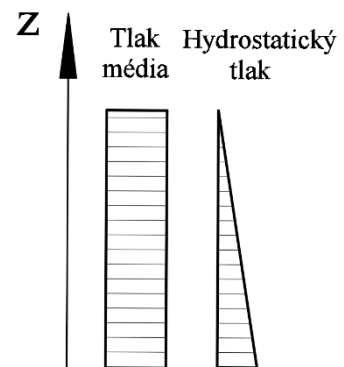
Pre výpočet hrúbky steny bol použitý maximálny tlak pôsobiaci na plášť tlakovej nádoby vypočítaný pomocou vzťahu (5.4), kde prvý člen predstavuje zadaný prevádzkový tlak média v nádobe, a druhý člen predstavuje hydrostatický tlak média na dne nádoby.

$$P = P_{me} + \frac{\rho_{H_2O} \cdot g \cdot (D_i + l)}{10^6} \quad (5.4)$$

kde príslušné symboly znamenajú:

- $P$  výpočtový tlak [MPa],
- $P_{me}$  tlak média uloženého v nádobe [MPa],
- $\rho_{H_2O}$  hustota vody [ $\text{kg/m}^3$ ],
- $g$  tiažové zrýchlenie [ $\text{m/s}^2$ ],
- $l$  dĺžka valcovej časti tlakovej nádoby [m].

Pre tento výpočet bola uvažovaná hustota  $983,2 \text{ kg/m}^3$ , ktorú voda dosahuje pri teplote  $60^\circ\text{C}$  a tiažové zrýchlenie veľkosti  $9,81 \text{ m/s}^2$ . Dosadením hodnôt do vzťahu (5.4) bola získaná hodnota výpočtového tlaku  $P = 0,5088 \text{ MPa}$ . [39]



Obrázok 5.3 – Tlak pôsobiaci na steny tlakovej nádoby

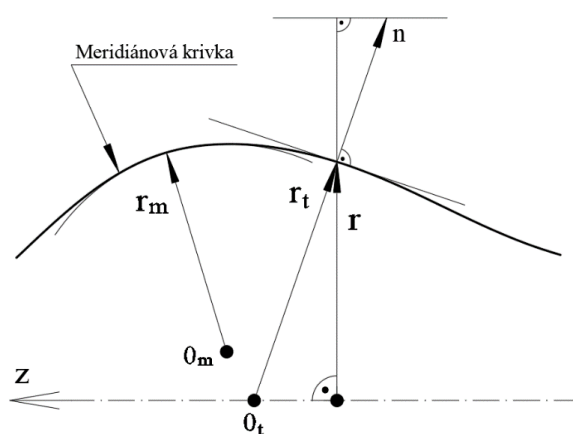
## 5.6 Výpočet minimálnej hrúbky steny

Táto podkapitola uvádza postup výpočtu hrúbky steny navrhovanej tlakovej nádoby. Na začiatku podkapitoly je uvedený krátky teoretický úvod zaoberajúci sa teóriou rotačne symetrických bezmomentových škrupín, na základe ktorej bol daný výpočet vykonaný. Ďalej je popísaný postup, pomocou ktorého boli na základe tejto teórie odvodené výpočtové vzťahy pre minimálnu hrúbku steny tlakovej nádoby. V závere podkapitoly je uvedené zhrnutie výsledkov a porovnanie odvodených výpočtových vzťahov so vzťahmi uvedenými v norme ČSN EN 13445.

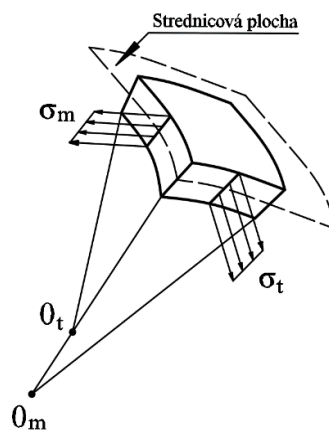
### 5.6.1 Teória rotačne symetrických bezmomentových škrupín

Pri návrhu hrúbky steny tlakovej nádoby, bola použitá teória rotačne symetrických bezmomentových škrupín. Aby bolo možné považovať výsledky získané pomocou danej teórie za platné, musia byť splnené podmienky, ktorými je obmedzené jej použitie.

Prvou z týchto podmienok je, aby strednicová plocha tenkostenného telesa bola tvorená rotáciou takzvanej meridiánovej krivky (viď obrázok 5.4) okolo osi rotácie telesa. Ďalšími podmienkami sú rotačná symetria zaťaženia a väzieb. Zaťaženie steny telesa musí byť konštantné, prípadne sa môže lineárne meniť v smere osi rotácie. V bodoch telesa spĺňajúcich podmienky danej teórie vzniká membránová napätosť, čiže dvojsoá napätosť, pozostávajúca z meridiánového napätia  $\sigma_m$  a obvodového napätia  $\sigma_t$  (viď obrázok 5.5). Napätie v smere normály na plochu telesa je teóriou zanedbané. [40]



Obrázok 5.4 – Geometrické parametre meridiánovej krivky [40]



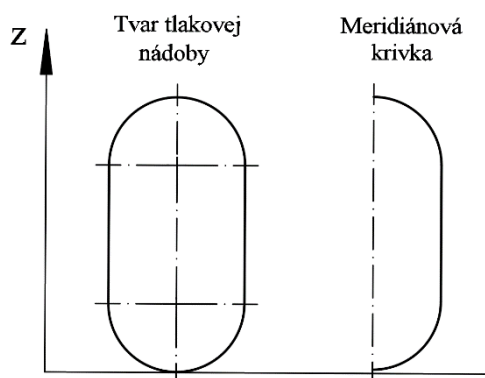
Obrázok 5.5 – Elementárny prvok bezmomentovej škrupiny. Zložky dvojsovej napätosti [40]

Zadaný tvar tlakovej nádoby je rotačne symetrický a je možné ho vytvoriť rotáciou okolo osi rotácie (viď obrázok 5.6). Spôsob akým sú zaťažené steny tlakovej nádoby taktiež spĺňa obmedzujúce podmienky. Zaťaženie je rotačne symetrické a lineárne premenné v smere osi rotácie. (viď obr. 5.3).

Podmienka dvojsovej napätosti v bodoch telesa je na väčšine navrhovaného telesa splnená. Výnimkou je okolie prechodu medzi valcovou časťou tlakovej nádoby a jej dnom tvaru pologule. Je známe, že pri zaťažení telesa tvaru pologule a telesa tvaru valca rovnomerným tlakom rovnakej veľkosti, bude posun telesa v tvare pologule v smere normály na strednicovú plochu telesa menší, ako posuv telesa tvaru valca.

Tento rozdiel posuvov má v prípade telesa tvoreného spojením valca a pologule za následok vznik momentového zaťaženia v mieste prechodu medzi telesami. Napätie získané pomocou teórie bezmomentových škrupín teda nie je možné v okolí prechodu medzi telesami považovať za platné.

Návrh hrúbky stien tlakovej nádoby bol aj napriek tejto skutočnosti vykonaný na základe teórie rotačne symetrických bezmomentových škrupín, pričom pôsobenie momentového zaťaženia v mieste prechodu medzi telesami bolo v analytickom výpočte zanedbané. Vplyv momentového zaťaženia v okolí prechodu medzi jednotlivými časťami navrhovanej nádoby bol následne overený výpočtom pomocou metódy konečných prvkov.



Obrázok 5.6 – Tvar a meridiánová krivka tlakovej nádoby

Vzťahy pre výpočet hrúbky stien tlakovej nádoby boli odvodené zo základného vzťahu teórie bezmomentových rotačných škrupín (5.5) označovaného aj ako Laplaceová rovnica. Význam jej jednotlivých členov je graficky znázornený na obrázku 5.4 a obrázku 5.5.

$$\frac{\sigma_m}{r_m} + \frac{\sigma_t}{r_t} = \frac{p_n}{h} \quad (5.5)$$

kde príslušné symboly znamenajú:

- $\sigma_m$  meridiánové napätie [MPa],
- $r_m$  meridiánový polomer krivosti [mm],
- $\sigma_t$  obvodové napätie [MPa],
- $r_t$  kužeľový polomer krivosti [mm],
- $p_n$  tlak v smere normály strednicovej plochy [MPa],
- $h$  hrúbka steny [mm]. [40]

### 5.6.2 Hrúbka pologuľového dna

V prípade pologuľovitého dna tlakovej nádoby platí, že meridiánový polomer krivosti a kužeľový polomer krivosti majú rovnakú veľkosť. Z toho, na základe vzťahu (5.5) vyplýva, že taktiež meridiánové a obvodové napätie majú rovnakú veľkosť. Na základe týchto skutočností je možné odvodiť vzťah (5.6) pre výpočet meridiánového a obvodového napätia, pôsobiaceho na rotačnej škrupine pologuľovitého tvaru:

$$\sigma_m = \sigma_t = \frac{p_n}{2 \cdot h} \cdot r \quad (5.6)$$

kde symbol  $r$  znamená polomer krivosti pologule v milimetroch.

Pre vyjadrenie redukovaného napätia na škrupine guľového tvaru je potrebné zoradiť hlavné napätia podľa veľkosti. Keďže teória rotačne symetrických škrupín nezahŕňa pôsobenie šmykových napätí, hlavnými napätiami sú meridiánové napätie, obvodové napätie, a napätie v smere normály na plochu. Napätie v smere normály na plochu je ale danou teóriou zanedbané, a teda nulové. Keďže meridiánové napätie je rovnako veľké ako obvodové napätie, platí pre prvé dva hlavné napätia vzťah (5.7). Pre tretie hlavné napätie platí vzťah (5.8) .

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_m = \sigma_t \quad (5.7)$$

$$\sigma_3 = 0 \quad (5.8)$$

kde príslušné symboly znamenajú:

- $\sigma_1$      prvé hlavné napätie [MPa],
- $\sigma_2$      druhé hlavné napätie [MPa],
- $\sigma_3$      tretie hlavné napätie [MPa].

Redukované napätie, podľa teórie maximálnych šmykových napätí, je potom možné vypočítať podľa vzťahu (5.9), kde symbol  $\sigma_{red}^{\tau}$  znamená redukované napätie podľa teórie maximálnych šmykových napätí v jednotkách MPa.

$$\sigma_{red}^{\tau} = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (5.9)$$

Dosadením zo vzťahov (5.7) a (5.8) do vzťahu (5.9) je potom získaný vzťah (5.10).

$$\sigma_{red}^{\tau} = \sigma_m \quad (5.10)$$

Ďalším dosadením zo vzťahu (5.6), do vzťahu (5.10) je potom možné získať vzťah (5.11),

$$\sigma_{red}^{\tau} = \frac{p_n}{2 \cdot h} \cdot r \quad (5.11)$$

Keďže je potrebné zabezpečiť, aby redukované napätie pôsobiace v telese nepresiahlo maximálne dovolené namáhanie  $\sigma_{al.}$  stanovené v predchádzajúcej časti, bolo potrebné do vzťahu (5.11) namiesto redukovaného napätia dosadiť maximálne dovolené napätie  $\sigma_{al.}$ . Po tomto dosadení bol získaný vzťah (5.12).

$$\sigma_{al.} = \frac{p_n}{2 \cdot h} \cdot r \quad (5.12)$$

Teória bezmomentových rotačne symetrických škrupín uvažuje, že meridiánový a kužeľový polomer krivosti siahajú od stredu krivosti k strednicovej ploche telesa. Zadaným parametrom je ale vnútorný priemer nádoby  $D_i$ . Vzdialenosť od stredu krivosti poglobulovitého telesa k jeho strednicovej ploche je možné vyjadriť vzťahom (5.13).

$$r = \frac{D_i + h}{2} \quad (5.13)$$

Po dosadení vzťahu (5.13) do vzťahu (5.12) a následnej úprave bolo možné vyjadriť minimálnu hrúbku steny pologuľovitého konca tlakovej nádoby  $h_{Gmin}$  vzťahom (5.14).

$$h_{Gmin} = \frac{p_n \cdot D_i}{4 \cdot \sigma_{al} - p_n} \quad (5.14)$$

Dosadením hodnoty výpočtového tlaku  $P$  za tlak  $p_n$ , zadaného vnútorného priemeru tlakovej nádoby a maximálneho dovoleného napätia vypočítaného v predchádzajúcej časti, bola získaná minimálna hrúbka steny pologuľového konca tlakovej nádoby  $h_{Gmin} = 18,6 \text{ mm}$ .

### 5.6.3 Hrúbka steny valcovej časti tlakovej nádoby

V prípade valcovej časti tlakovej nádoby je meridiánovou krivkou priamka, a teda jej meridiánový polomer krivosti je  $r_m = \infty$ . Dosadením tejto hodnoty do rovnice (5.5) dôjde k odstráneniu jej prvého člena. Po úprave je potom možné vyjadriť obvodové napätie vzťahom (5.15).

$$\sigma_t = \frac{p_n}{h} \cdot r_t \quad (5.15)$$

Zo statickej rovnováhy medzi pologuľovým dnom a valcovým plášťom tlakovej nádoby platí, že meridiánové napätie na valcovej časti tlakovej nádoby sa rovná meridiánovému napätiu na pologuľovitom konci tlakovej nádoby a je možné ho vyjadriť vzťahom (5.16).

$$\sigma_m = \frac{p_n}{2 \cdot h} \cdot r \quad (5.16)$$

Hlavné napätia sú opäť tvorené meridiánovým napätím, obvodovým napätím a nulovou zložkou napätia v smere normály na plochu telesa. Ich zoradenie podľa veľkosti je možné vykonať po porovnaní vzťahov (5.15) a (5.16), z ktorého je zrejmé, že meridiánové napätie bude mať polovičnú veľkosť obvodového napätia a budú teda platiť nasledujúce vzťahy (5.17), (5.18) a (5.19).

$$\sigma_1 = \sigma_t \quad (5.17)$$

$$\sigma_2 = \sigma_m \quad (5.18)$$

$$\sigma_3 = 0 \quad (5.19)$$

Redukované napätie podľa teórie maximálnych šmykových napätí je potom možné vyjadriť vzťahom (5.20).

$$\sigma_{red}^{\tau} = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (5.20)$$

Po dosadení do vzťahu (5.20) za hlavné napätia z predchádzajúcich vzťahov (5.19), (5.17) a (5.15), získavame vzťah (5.21) pre redukované napätie na valcovej časti tlakovej nádoby.

$$\sigma_{red}^{\tau} = \frac{p_n}{h} \cdot r_t \quad (5.21)$$

Rovnako ako v prípade pologuľovitej časti tlakovej nádoby je potrebné redukované napätie vo vzťahu (5.21) nahradiť maximálnym prípustným napätím  $\sigma_{al}$  a kužeľový polomer krivosti  $r_t$  je možné vyjadriť vzťahom (5.13). Po týchto úpravách je možné zo vzťahu (5.21) vyjadriť minimálnu hrúbku steny valcovej časti nádoby vzťahom (5.22).

$$h_{Vmin} = \frac{p_n \cdot D_i}{2 \cdot \sigma_{al} - p_n} \quad (5.22)$$

Po dosadení hodnoty výpočtového tlaku  $P$  za  $p_n$ , zadaného vnútorného priemeru tlakovej nádoby a maximálneho dovoleného napätia vypočítaného v predchádzajúcej časti bola získaná minimálna hrúbka steny valcovej časti tlakovej nádoby  $h_{Vmin} = 38,9 \text{ mm}$ .

#### 5.6.4 Výsledná hrúbka steny tlakovej nádoby

Minimálne hrúbky steny jednotlivých častí tlakovej nádoby vypočítané z predchádzajúcich vzťahov (viď tabuľka 5.6) sa pre pologuľový koniec tlakovej nádoby a valcovú časť líšia. Stanovenie výslednej hrúbky steny tlakovej nádoby bolo teda vykonané zaokrúhlením vyššej z vypočítaných hodnôt nahor. Tým bola získaná výsledná hrúbka valcovej časti tlakovej nádoby  $h = 40 \text{ mm}$ .

Tabuľka 5.6 – Zhrnutie výsledkov výpočtu

| Parameter                                                            | Hodnota |
|----------------------------------------------------------------------|---------|
| Minimálna hrúbka steny pologuľového konca tlakovej nádoby $h_{Gmin}$ | 18,6 mm |
| Minimálna hrúbka valcovej časti tlakovej nádoby $h_{Vmin}$           | 38,9 mm |
| Výsledná hrúbka steny tlakovej nádoby $h$                            | 40,0 mm |

#### 5.6.5 Porovnanie odvodených výpočtových vzťahov s normou ČSN EN 13445

Porovnaním vzťahu (5.22) pre výpočet hrúbky steny valcového plášťa tlakovej nádoby získaného postupom uvedeným v predchádzajúcom texte, so vzťahom (4.1) uvedenom v norme ČSN EN 13445, je možné pozorovať podobnosť medzi týmito vzťahmi. Vzťah (4.1) uvedený v norme sa od vzťahu (5.22) líši iba tým, že navyše obsahuje zvarový koeficient  $z$ . Na základe tejto skutočnosti je možné usúdiť, že vzťah (4.1) uvedený v norme ČSN EN 13445 vychádza z rovnakej teórie, aká bola použitá pri odvodzovaní vzťahov pre minimálnu hrúbku steny tlakovej nádoby, v tejto práci.

Norma ČSN 13445 uvádza taktiež vzťah (4.3) obmedzujúci platnosť danej teórie. Ten vyjadruje, že pre platnosť vzťahu je nutné, aby pomer medzi hrúbkou steny plášťa tlakovej nádoby  $h$  a vonkajším priemerom valcového plášťa  $D_e$  bol menší ako 0,16. Pomocou zadanej hodnoty  $D_i = 450 \text{ mm}$  a vypočítanej hodnoty hrúbky steny  $h = 40 \text{ mm}$ , bolo možné vonkajší priemer valcového plášťa tlakovej nádoby  $D_e = 530 \text{ mm}$  vypočítať vzťahom (5.23)

$$D_e = D_i + 2 \cdot h \quad (5.23)$$

Dosadením vypočítaných hodnôt  $D_e$  a  $h$  do vzťahu (4.3) bolo zistené, že pomer týchto hodnôt je 0,0754 čo je menej ako 0,16. Použité vzťahy sú teda pre tento prípad platné.

## 5.7 Overenie výpočtu pomocou MKP

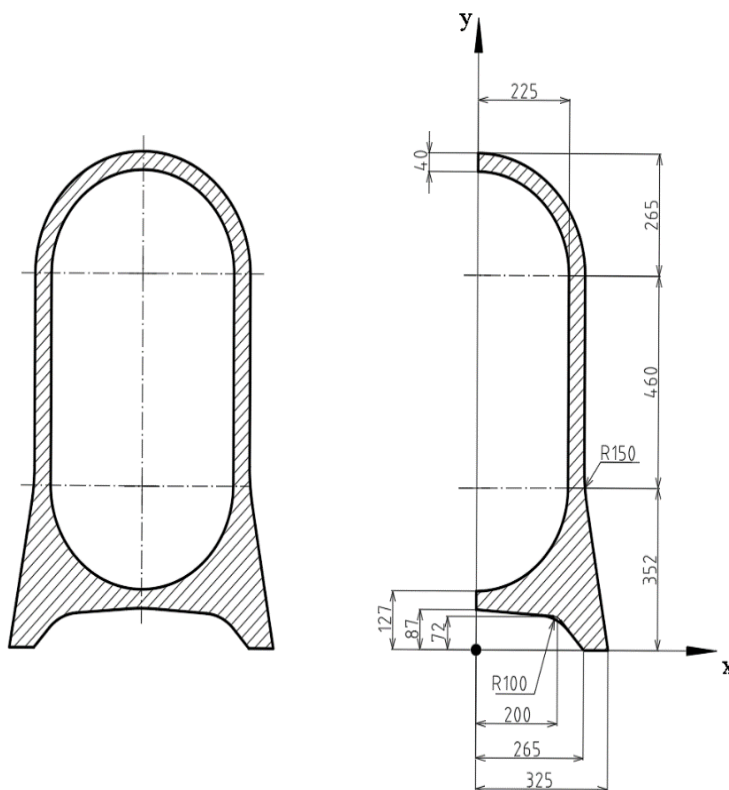
Nasledujúci text obsahuje postup výpočtu napätí vznikajúcich na stenách navrhnutej tlakovej nádoby pomocou metódy konečných prvkov. Pre tento výpočet bol použitý program Ansys Workbench 2022 R1, pričom nasledujúci text podrobne popisuje tvorbu geometrie, siete konečných prvkov a okrajové podmienky zadane pre výpočet. Záver kapitoly je venovaný vyhodnoteniu získaných výsledkov.

### 5.7.1 Model v programe Ansys Workbench

Pre overenie výpočtu pomocou metódy konečných prvkov bol použitý výpočtový program Ansys Workbench. V ňom bol vykonaný výpočet napätí na stenách navrhovanej tlakovej nádoby pomocou analýzy typu *Static Structural*.

Úloha bola uvažovaná ako dvojrozmerná a rotačne symetrická. V module *DesignModeler* bol na základe vypočítaných rozmerov nádoby nakreslený osovo symetrický náčrt nádoby (viď obrázok 5.7). Do náčrtu bol zahrnutý taktiež podstavec zaisťujúci stabilné uloženie tlakovej nádoby na pevnom povrchu. Podstavec a plášť nádoby boli v tomto prípade modelované ako jedno teleso.

V závislosti na zvolenom spôsobe výroby môže byť ale podstavec od nádoby oddelený a vyrobený samostatne. Dodatočne je ho možné k nádobe pripojiť napríklad zvaraním. V tomto prípade by už výsledky výpočtu uvedeného v tejto práci neboli platné a bolo by potrebné vykonať analýzu napätí na modeli zodpovedajúcemu konkrétnemu návrhu.



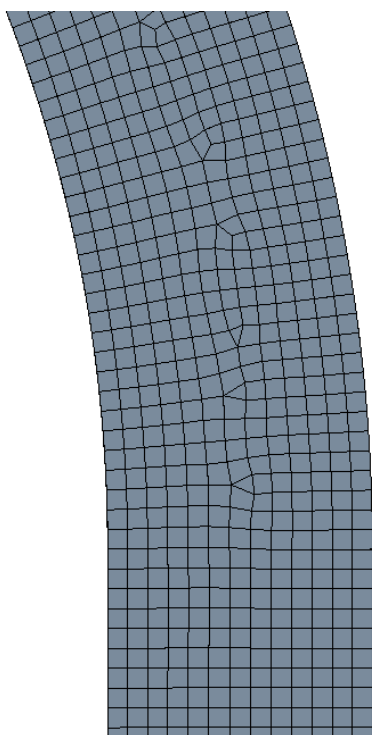
Obrázok 5.7 – Navrhnutý tvar tlakovej nádoby a prevod tvaru na rotačne symetrický náčrt

### 5.7.2 Sieť konečných prvkov a okrajové podmienky

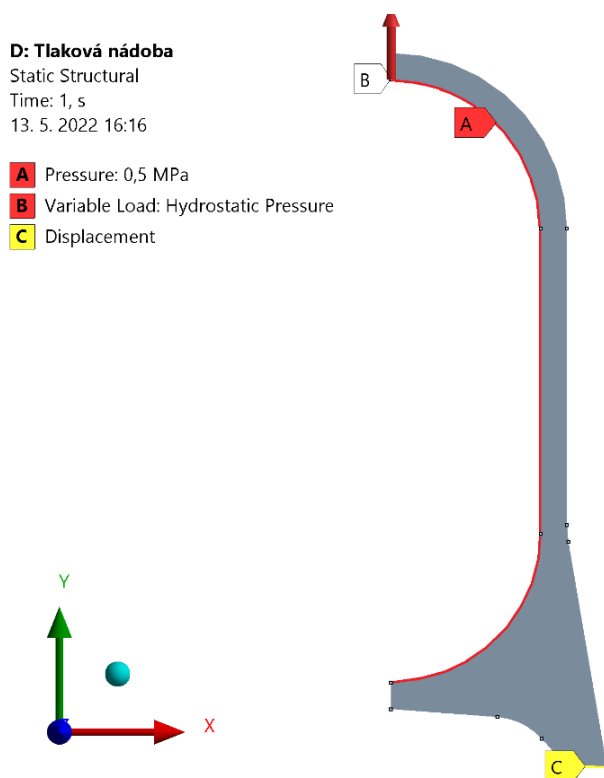
Na modeli bola vytvorená jemná sieť konečných prvkov o veľkosti 3 milimetre (viď obrázok 5.8). Okrajové podmienky (viď obrázok 5.9) boli zvolené tak, aby sa čo najviac približovali reálnemu zaťaženiu. Na vnútorné steny tlakovej nádoby bola zadaná okrajová podmienka *Pressure* simulujúca pôsobenie tlaku média o veľkosti 0,5 MPa. Zároveň bola na tieto steny zadaná podmienka *Hydrostatic pressure*, simulujúca hydrostatický tlak kvapaliny, pričom bolo zadané tiažové zrýchlenie  $9,81 \text{ m/s}^2$  a hustota média  $983,2 \text{ kg/m}^3$ , ktorú voda dosahuje pri  $60^\circ\text{C}$ . [39]

Na spodnú hranu podstavca nádoby bola zadaná okrajová podmienka *Displacement*, pomocou ktorej bol zamedzený posuv v smere osi Y. To simulovalo voľné uloženie nádoby na pevnom povrchu.

Ďalej bol pre výpočet vytvorený nový model materiálu, do ktorého boli z tab. 3.7 zadané hodnoty modulu pružnosti a hustoty materiálu Kynar® 6000 HD na báze PVDF. Chýbajúca hodnota poissonovho pomeru, potrebná pre výpočet, bola z dostupných zdrojov určená ako  $\mu = 0,35$ . [41]



Obrázok 5.8 – Sieť konečných prvkov [42]



Obrázok 5.9 – Zadané okrajové podmienky [42]

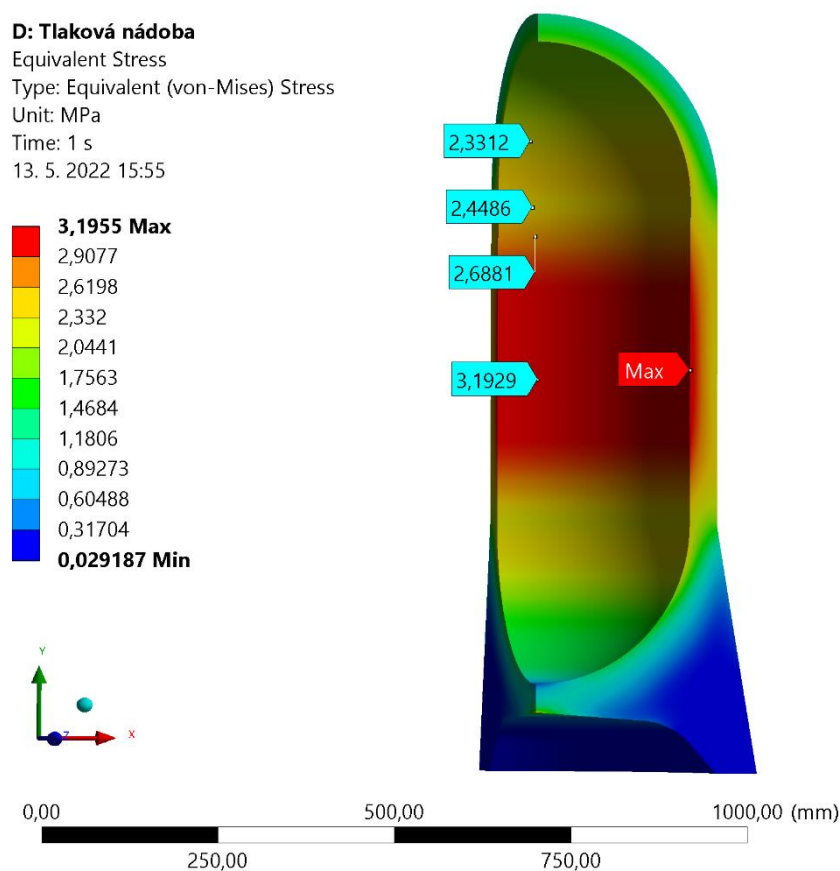
### 5.7.3 Vyhodnotenie výsledkov

Po zadaní okrajových podmienok a vypočítaní úlohy programom boli vykreslené výsledky redukovaného napätia podľa teórie *von-Mises*. Pri vykresľovaní bola využitá možnosť programu vykresliť výsledky dvojrozsmernej analýzy do priestoru, a obrázok 5.10 teda znázorňuje štvrtinovú časť telesa tlakovej nádoby.

Na obrázku 5.10 je možné vidieť, že maximálne redukované napätie sa nachádza na vnútornej strane valcovej časti tlakovej nádoby a dosahuje približne **3,2 MPa**.

Veľkosť najvyššieho redukovaného napätia pôsobiaceho na plášti tlakovej nádoby zodpovedá maximálnemu dovolenému namáhaniu  $\sigma_{al}$ . (viď tabuľka 5.5), stanovenému podľa vzťahu (5.1) v predchádzajúcom texte. To svedčí o tom, že návrh hrúbky steny bol vykonaný správne.

Na obrázku 5.10 taktiež môžeme vidieť, že redukované napätie v oblasti prechodu medzi pologuľovým koncom tlakovej nádoby a valcovou časťou dosahuje veľkosť približne **2,5 MPa**, čo je o 0,7 MPa nižšia hodnota, ako maximálne dovolené napätie  $\sigma_{al}$ . Na základe tohto výpočtu môžeme teda momentové zaťaženie pôsobiace v prechodovej časti, medzi valcovým plášťom a pologuľovými dnami tlakovej nádoby považovať za zanedbateľné.



Obrázok 5.10 – Redukované napätie (von-Mises) [42]

## ZÁVER

Cieľom tejto práce bolo preskúmať možnosti návrhu tlakových nádob z plastu, vyhľadať materiály vhodné pre konštrukciu tlakových nádob a na základe získaných poznatkov vykonať pevnostný návrh vybraných častí plastovej tlakovej nádoby.

Aby bolo možné správne navrhnuť výrobok z plastového materiálu, bolo na začiatok potrebné nadobudnúť teoretické poznatky týkajúce sa týchto materiálov. V *prvej kapitole* práce boli preto uvedené teoretické poznatky zaoberajúce sa vplyvom vnútornej stavby plastových materiálov na mechanické vlastnosti a ďalšie vlastnosti ako je tepelná a chemická odolnosť. Dôležitým poznatkom plynúcim z tejto kapitoly je, že pri návrhu výrobku z plastového materiálu by bolo použitie materiálových charakteristík získaných krátkodobými mechanickými skúškami zásadnou chybou, a je potrebné používať údaje získané dlhodobými materiálovými skúškami. To vyplýva zo skutočnosti, že plastové materiály pri dlhodobom zaťažovaní podliehajú krípu.

*Druhá kapitola* sa zaoberala výberom plastových materiálov vhodných pre konštrukciu tlakových nádob. Keďže sa nepodarilo nájsť žiadne informácie o tlakových nádobách vyrobených z nevystužených plastových materiálov, boli vyhľadané zariadenia, ktoré sú už dlhú dobu vyrábané z plastu, pričom ich tvar a spôsob zaťaženia je podobný prípadu tlakovej nádoby. Ďalší rozbor bol potom obmedzený na plastové potrubia a beztlakové plastové skladovacie nádrže, pričom bolo preštudovaním noriem ČSN zistené, aké typy plastových materiálov sa pre výrobu týchto zariadení využívajú.

V *tretej kapitole* boli následne hlbšie rozobraté vlastnosti týchto materiálov z hľadiska vnútornej stavby, mechanických vlastností, tepelnej odolnosti a chemickej odolnosti. Bolo zistené, že každý z týchto materiálov má svoje špecifické vlastnosti, na základe ktorých je vhodný pre použitie v určitých podmienkach.

*Štvrtá kapitola* uvádza prehľad noriem ČSN zaoberajúcich sa návrhom tlakových nádob, pričom pozornosť je kladená na materiály, ktoré tieto normy dovoľujú pre konštrukciu tlakových nádob. Bolo zistené, že v súčasnej dobe neexistuje norma ČSN, ktorá by pre konštrukciu tlakových nádob umožňovala použitie nevystužených plastových materiálov.

Posledná, *piata kapitola*, sa zaoberá výpočtom tlakovej nádoby z plastového materiálu na základe zadaných parametrov. Pomocou informácii z predošlých častí práce bol zvolený vhodný typ plastového materiálu. Následne bola pre tento materiál stanovená hodnota maximálneho dovoleného namáhania. To bolo vykonané pomocou normy ČSN EN 1778, ktorá pre vybrané druhy plastových materiálov uvádza hodnoty získané dlhodobými mechanickými skúškami a prepočtové koeficienty súvisiace s technológiou výroby, chemickým pôsobením prostredia na materiál a požadovanou bezpečnosťou.

Ďalší postup spočíval v odvodení vzťahov pre výpočet minimálnej hrúbky steny valcovej časti tlakovej nádoby a minimálnej hrúbky steny pologuľového dna nádoby, pomocou teórie bezmomentových rotačne symetrických škupín. Porovnaním odvodených vzťahov so vzťahmi uvedenými v norme ČSN EN 13445 bolo zistené, že ich tvar je až na výnimku súčiniteľa zvaru používaného normou identický. S použitím stanoveného dovoleného namáhania a maximálneho tlaku pôsobiaceho v tlakovej nádobe boli vypočítané minimálne hrúbky týchto častí a zaokrúhlením vyššej z hodnôt nahor bola stanovená hrúbka stien tlakovej nádoby.

Nakoniec boli výsledky analytického výpočtu overené pomocou metódy konečných prvkov v programe Ansys Workbench 2022 R1. Výpočet ukázal, že maximálne redukované napätie vzniká na vnútornej strane valcovej časti nádoby, a jeho veľkosť zodpovedá maximálnemu dovolenému napätiu, ktoré bolo pre použitý materiál stanovené. Týmto výsledkom bola potvrdená správnosť návrhu.

## ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1] FRIČOVÁ, Oľga. *Polymérne materiály: štruktúra a vnútorné interakcie v polyméroch*. Technická univerzita v Košiciach, 2019, 69 s. ISBN 978-80-553-3365-6.  
Dostupné také z: <http://people.tuke.sk/olga.fricova/files/Polymerne-materialy-1.pdf>
- [2] PTÁČEK, Luděk, Jaroslav CIHLÁŘ, Eduard DORAZIL, Rudolf FORET, Bohumil PACAL, Josef STEIDL, Jaroslav ŠENBERGER a Jiří ŠVEJCAR. *Nauka o materiálu II*. Brno: CERM, 1999. ISBN 978-80-7204-130-5.
- [3] PLUHAŘ, Jaroslav. *Nauka o materiálech*. Praha: STNL, 1989, 552 s.
- [4] NOVOTNÁ, Eva. *Polymerní materiály* [online]. [cit. 2022-02-02]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/vyuka/bum/prednasky/11-BUM%20-%20polymery.pdf>.  
BUM – Podklady pro výuku. Posledná úprava 23.04.2019.
- [5] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-708-0617-6.
- [6] LENFELD, Petr. *Technologie II – zpracování plastů* [online]. [cit. 2022-02-01]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce\\_plasty/obsah\\_plasty.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/obsah_plasty.htm)
- [7] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery* [online]. Brno: Code Creator, s.r.o.; distribuce publi.cz, 2016 [cit.2022-03-15]. ISBN 978-80-88058-68-7.  
Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>
- [8] ČSN EN ISO 1778. *Charakteristické hodnoty pro svařované konstrukce z termoplastů – Stanovení dovoleného namáhání a modulů pro navrhování svařovaných dílů z termoplastů*. Praha: Český normalizační institut, 2002.
- [9] EVA, Molliková. *Konstrukční plasty* [online]. [cit. 2022-02-13]. Dostupné z: [http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/vyuka/struktura\\_a\\_vlastnosti\\_materialu/prednasky/11%20-%20Polymery.pdf](http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/vyuka/struktura_a_vlastnosti_materialu/prednasky/11%20-%20Polymery.pdf).  
3SV – podklady pre výuku. Posledná úprava 09.09.2016.
- [10] PULC, Vojtech, Viliam HRNČIAR a Ernest GODNÁR. *Náuka o materiáli*. Bratislava: Vydavateľstvo STU Bratislava, 2004, 333 s. ISBN 80-227-2098-4.
- [11] Rozdělení a charakteristika plastů. *TITAN – Multiplast* [online]. [cit. 2022-02-13].  
Dostupné z: <https://www.titan-multiplast.cz/produkty/rozdeleni-a-charakteristika-plastu-163>
- [12] Polymer Use for Boilers and Pressure Vessels. In: *The National Board of Boiler and Pressure Vessel Inspectors* [online]. 2001 [cit. 2022-02-01].  
Dostupné z: <https://www.nationalboard.org/index.aspx?pageID=164&ID=246>
- [13] ČSN EN ISO 15494. *Plastové potrubní systémy pro průmyslové aplikace – Polybuten (PB), polyethylen (PE), polyethylen odolný zvýšeným teplotám (PE-RT), síťovaný polyethylen (PE-X), polypropylen (PP) – Metrické řady pro specifikace pro součásti a systém*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2019.
- [14] ČSN EN ISO 15874-1. *Plastové potrubní systémy pro rozvod horké a studené vody – Polypropylen (PP) – Část 1: Obecně*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [15] ČSN EN ISO 15875-1. *Plastové potrubní systémy pro rozvod horké vody a studené vody – Síťovaný polyethylen (PE-X) – Část 1: Všeobecně*. Praha: Český normalizační institut, 2004.

- [16] ČSN EN ISO 15876-1. *Plastové potrubní systémy pro rozvod horké vody a studené vody – Polybuten (PB) – Část 1: Obecně*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- [17] ČSN EN ISO 15877-1. *Plastové potrubní systémy pro rozvod horké vody a studené vody – Chlorovaný polyvinylchlorid (PVC-C) – Část 1: Všeobecně*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [18] ČSN EN ISO 22391-1. *Plastové potrubní systémy pro rozvod horké vody a studené vody – Polyethylen odolný zvýšeným teplotám (PE-RT) – Část 1: Všeobecně*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [19] ČSN EN ISO 15493. *Plastové potrubní systémy pro průmyslové aplikace – Akrylonitrilbutadienstyren (ABS), neměkčený polyvinylchlorid (PVC-U), a chlorovaný polyvinylchlorid (PVC-C) – Specifikace pro součásti a systém – Metrické řady*. Praha: Český normalizační institut, 2004.
- [20] ČSN EN 12573. *Svařované stabilní beztlakové termoplastické nádrže*. Praha: Český normalizační institut, 2001.
- [21] Materiálové provedení – PE. In: *TITAN Plastimex* [online]. [cit. 2022-04-21]. Dostupné z: [https://titan-plastimex.cz/wp-content/uploads/2020/07/materialove\\_provedeni\\_pe.pdf](https://titan-plastimex.cz/wp-content/uploads/2020/07/materialove_provedeni_pe.pdf)
- [22] An Overview of Common Plastics. In: *Creative Mechanisms* [online]. [cit. 2022-04-21]. Dostupné z: <https://www.creativemechanisms.com/plastics-for-prototype-parts>
- [23] *CampusPlastic: a material information system for the plastics industry* [online]. [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: <https://www.campusplastics.com>
- [24] Materiálové provedení – PP. In: *TITAN Plastimex* [online]. [cit. 2022-03-13]. Dostupné z: [https://titan-plastimex.cz/wp-content/uploads/2020/07/materialove\\_provedeni\\_pp.pdf](https://titan-plastimex.cz/wp-content/uploads/2020/07/materialove_provedeni_pp.pdf)
- [25] Materiálové provedení – PVC-C. In: *TITAN Plastimex* [online]. [cit. 2022-03-13]. Dostupné z: [https://titan-plastimex.cz/wp-content/uploads/2020/07/materialove\\_provedeni\\_pvcc.pdf](https://titan-plastimex.cz/wp-content/uploads/2020/07/materialove_provedeni_pvcc.pdf)
- [26] Materiály. In: *TRIBON – plastové potrubní systémy* [online]. [cit. 2022-03-13]. Dostupné z: <https://www.georgefischer.cz/produkty/materialy>
- [27] *MatWeb: Material property data* [online]. [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: <https://www.matweb.com>
- [28] Materiálové provedení – PVC-U. In: *TITAN Plastimex* [online]. [cit. 2022-03-14]. Dostupné z: [https://titan-plastimex.cz/wp-content/uploads/2020/07/materialove\\_provedeni\\_pvcu.pdf](https://titan-plastimex.cz/wp-content/uploads/2020/07/materialove_provedeni_pvcu.pdf)
- [29] Materiálové provedení – ABS. In: *TITAN Plastimex* [online]. [cit. 2022-03-14]. Dostupné z: [https://titan-plastimex.cz/wp-content/uploads/2020/07/materialove\\_provedeni\\_abs.pdf](https://titan-plastimex.cz/wp-content/uploads/2020/07/materialove_provedeni_abs.pdf)
- [30] Polybutén. In: *TITAN Plastimex* [online]. [cit. 2022-03-13]. Dostupné z: <https://titan-plastimex.cz/wp-content/uploads/2020/07/Polybuten.pdf>
- [31] Polybutene-1 (PB-1). In: *British Plastics Federation* [online]. [cit. 2022-03-13]. Dostupné z: <https://www.bpf.co.uk/plastipedia/polymers/Polybutene1.aspx>
- [32] Polybutene-1 Properties. In: *Polybutene Piping Systems Association* [online]. [cit. 2022-03-13]. Dostupné z: <https://www.pbpsa.com/pb-1-properties>

- [33] Materiálové provedení – PVDF. In: *TITAN Plastimex* [online]. [cit. 2022-03-16]. Dostupné z: [https://titan-plastimex.cz/wp-content/uploads/2020/07/materialove\\_provedeni\\_pvdf.pdf](https://titan-plastimex.cz/wp-content/uploads/2020/07/materialove_provedeni_pvdf.pdf)
- [34] *TLAKinfo: Oborový portál pro vyhrazená tlaková zařízení: kotle, tlakové nádoby, potrubí a nízkotlaké kotelny* [online]. [cit. 2022-05-03]. Dostupné z: <https://www.tlakinfo.com/t.py?t=14&nobor=10>
- [35] ČSN 69 0010. *Tlakové nádoby stabilní – Technická pravidla*. Praha: Český normalizační institut, 1993.
- [36] ČSN EN 286. *Jednoduché netopené tlakové nádoby pro vzduch nebo dusík*. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [37] ČSN EN 13445. *Netopené tlakové nádoby*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021.
- [38] ČSN EN 13923. *Vinuté laminátové tlakové nádoby*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [39] Hustota a specifická hmotnost vody. In: *E-konstruktor: Portál pro strojní konstruktéry* [online]. [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/hustota-a-specificka-hmotnost-vody>
- [40] ONDRÁČEK, Emanuel, Jan VRBKA, Přemysl JANÍČEK a Jiří BURŠA. *Mechanika těles: pružnost a pevnost II*. Vyd. 4., přeprac. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-3260-8.
- [41] PVDF (Kynar) Detailed Properties. *TexWire: Wire & Cable Products* [online]. [cit. 2022-05-04]. Dostupné z: <http://www.texwire.us/cablewire/pvdfproperties.html>
- [42] Ansys Workbench 2022 R1

## ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV

Skratky:

|      |                         |
|------|-------------------------|
| ČSN  | Česká technická norma   |
| MKP  | metóda konečných prvkov |
| MPa  | megapascal              |
| obr. | Obrázok                 |
| PVDF | polyvinylidenfluorid    |
| tab. | tabuľka                 |
| UV   | ultrafialové žiarenie   |

Symbody:

|            |                                                           |                     |
|------------|-----------------------------------------------------------|---------------------|
| $A_1$      | korekčný faktor zohľadňujúci vplyvy špecifického napätia  | [–]                 |
| $A_{2K}$   | korekčný faktor zohľadňujúci vplyv okolitého média        | [–]                 |
| $D_i$      | vnútorný priemer valcového plášťa                         | [mm]                |
| $D_e$      | vonkajší priemer valcového plášťa tlakovej nádoby         | [mm]                |
| $e$        | odporúčaná hrúbka steny valcového plášťa                  | [mm]                |
| $E$        | modul pružnosti                                           | [MPa]               |
| $f$        | maximálne dovoľené napätie                                | [MPa]               |
| $f_l$      | dlhodobý zvárací faktor                                   | [–]                 |
| $f_s$      | krátkodobého zváracieho faktoru                           | [–]                 |
| $g$        | tiažové zrýchlenie                                        | [m/s <sup>2</sup> ] |
| $h$        | hrúbka steny tlakovej nádoby                              | [mm]                |
| $h_{Gmin}$ | minimálna hrúbka steny pologuľového konca tlakovej nádoby | [mm]                |
| $h_{Vmin}$ | minimálna hrúbka valcovej časti tlakovej nádoby           | [mm]                |
| $K$        | dlhodobá pevnosť pri navrhovanej teplote a životnosti     | [MPa]               |
| $l$        | dĺžka valcovej časti tlakovej nádoby                      | [m]                 |
| $P$        | výpočtový tlak                                            | [MPa]               |
| $P_{me}$   | tlak média uloženého v nádobe                             | [MPa]               |
| $p_n$      | tlak v smere normály strednicovej plochy                  | [MPa]               |
| $R_e$      | medza klzu                                                | [MPa]               |
| $r_t$      | kužeľový polomer krivosti                                 | [mm]                |
| $r_m$      | meridiánový polomer krivosti                              | [mm]                |
| $r$        | polomer krivosti                                          | [mm]                |
| $S$        | koeficient bezpečnosti                                    | [–]                 |
| $t$        | doba zaťaženia                                            | [s]                 |
| $T_m$      | teplota topenia                                           | [°C]                |

|                  |                                                       |                      |
|------------------|-------------------------------------------------------|----------------------|
| $T_g$            | teplota skelného prechodu                             | [°C]                 |
| $T_f$            | teplota toku                                          | [°C]                 |
| $V$              | vnútorný objem tlakovej nádoby                        | [m <sup>3</sup> ]    |
| $X_c$            | hmotnostný podiel                                     | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| $z$              | zvarový súčiniteľ                                     | [–]                  |
| $\varepsilon$    | pomerné pretvorenie                                   | [–]                  |
| $\eta$           | viskozita materiálu pri danej teplote                 | [Pa·s]               |
| $\rho$           | hustota vzorku s neznámou kryštalinitou               | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| $\rho_c$         | hustota ideálneho kryštálu                            | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| $\rho_a$         | hustota ideálnej amorfnej fázy                        | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| $\rho_{H_2O}$    | hustota vody                                          | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| $\sigma$         | pôsobiace napätie                                     | [MPa]                |
| $\sigma_t$       | napätie v materiáli dosiahnuté v čase $t$             | [MPa]                |
| $\sigma_i$       | pôvodné zaťaženie                                     | [MPa]                |
| $\sigma_{al.}$   | dovolené namáhanie v prevádzkových podmienkach        | [MPa]                |
| $\sigma_m$       | meridiánové napätie                                   | [MPa]                |
| $\sigma_t$       | obvodové napätie                                      | [MPa]                |
| $\sigma_{red}^r$ | redukované napätie podľa teórie max. šmykových napätí | [MPa]                |
| $\sigma_1$       | prvé hlavné napätie                                   | [MPa]                |
| $\sigma_2$       | druhé hlavné napätie                                  | [MPa]                |
| $\sigma_3$       | tretie hlavné napätie                                 | [MPa]                |