



**FAKULTA  
STROJNÍ  
ČVUT V PRAZE**

## **Ústav konstruování a částí strojů**

**Pevnostní analýza přepravníku na sypké  
hmoty**

**Stress Analysis of a Tank for Bulk  
Materials**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**2017**

**Marek ŠTÁDLER**

**Studijní program:** STROJNÍ INŽENÝRSTVÍ

**Studijní obor:** Dopravní, letadlová a transportní technika

**Vedoucí práce:** Ing. Martin Dub, Ph.D.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: „Pevnostní analýza přepravníku na sypké hmoty“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Martina Duba, Ph.D., s použitím literatury, uvedené na konci mé diplomové práce v seznamu použité literatury.

V Praze 25.6.2017      Marek Štádler

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat panu Ing. Martinu Dubovi, Ph.D , za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při zpracování této práce.

## **Anotační list:**

Jméno autora: Marek Štádler  
Název DP: Pevnostní analýza přepravníku na sypké hmoty  
Anglický název: Stress Analysis of a Tank for Bulk Materials  
Rok: 2017  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Obor studia: Dopravní, letadlová a transportní technika  
Ústav: Ústav konstruování a částí strojů  
Vedoucí DP: Ing. Martin Dub, Ph.D.  
Konzultant: ----  
Bibliografické údaje: počet stran 66  
počet obrázků 46  
počet tabulek 11  
počet příloh 0  
Klíčová slova: Přepravník, Sypké hmoty, Jannsenova teorie, MKP Analýza  
Keywords: Tank trailer, Bulk materials, Jannsen`s theory, Finite element analysis

### **Anotace:**

Cílem této práce je definovat účinky sypkého materiálu na stěnu přepravníku, dále pak z pracovního cyklu přepravníku určit krajní stavy zatížení konstrukce a následně provést MKP analýzu stávající konstrukce cisterny přepravníku sypkých hmot. Na základě jejích výsledků navrhnout optimalizaci tak, aby došlo, pokud to bude možné, ke snížení hmotnosti konstrukce a případně aby se odstranila místa se zvýšeným namáháním.

### **Abstract:**

The aim of this work is to define the effects of bulk material on the tank trailer wall and to determine the extreme load conditions of the structure from the trailer working cycle and subsequently to perform a FEM analysis of the existing tank trailer construction. Based on its results, design optimization so as to reduce the weight of the structure and, if possible, eliminate the places with increased stress.

# Obsah

|   |    |
|---|----|
| 1. Úvod.....  | 1  |
| 2. Převravníky sypkých hmot ZVVZ .....                          | 2  |
| 2.1. Převravníky řady NC 3 .....                                | 3  |
| 2.2. Převravníky řady NKA a NCF.....                            | 4  |
| 2.3. Převravníky řady NS3.....                                  | 4  |
| 3. Převravník NSA 62 .....                                      | 5  |
| 3.1 Technické parametry převravníku NSA 62 .....                | 5  |
| 4. Zatěžovací stavy konstrukce.....                             | 7  |
| 4.1. Pracovní cyklus převravníku.....                           | 7  |
| 5. Sypké materiály .....  | 10 |
| 5.1. Klasifikace sypkých hmot .....                             | 10 |
| 5.1.1. Zrnitost .....   | 10 |
| 5.1.2. Soudržnost a sypnost .....                               | 11 |
| 5.1.3. Odpor při dopravě.....                                   | 12 |
| 5.1.4. Objemová sypná hmotnost.....                             | 12 |
| 6. Rozložení tlaku sypkých hmot.....                            | 14 |
| 6.1. Jannsenova teorie sypkých hmot.....                        | 15 |
| 6.1.1 Mělké zásobníky: .....                                    | 16 |
| 7. Zatížení stěny převravníku sypkým materiálem.....            | 21 |
| 7.1. Aplikace Jannsenovy teorie .....                           | 21 |
| 8. Ověření aplikace Jannsenovy teorie.....                      | 23 |
| 8.1 Definice zatížení v MKP modelu .....                        | 25 |
| 9. Tvorba MKP modelů pro ověření správnosti pole zatížení ..... | 26 |
| 9.1 Křivý prut.....   | 26 |
| 9.1.1 Analytické řešení.....                                    | 26 |
| 9.1.2 Řešení pomocí MKP .....                                   | 28 |
| 9.2 Válcová nádoba:.....  | 30 |
| 9.2.1 Analytické řešení.....                                    | 30 |
| 9.2.2 Řešení pomocí MKP .....                                   | 30 |
| 9.2.3 Porovnání analytického a MKP řešení .....                 | 31 |
| 10. Značení hliníku a jeho slitin.....                          | 32 |

|   |    |
|---|----|
| 10.1 Značení stavu tepelného zpracování hliníku a jeho slitin ..... | 32 |
| 11. Materiál EN AW-5083 0/H111 (AlMg4,5Mn W28) .....                | 33 |
| 11.1 Chemické složení.....  | 33 |
| 11.2 Mechanické vlastnosti EN AW-5083 podle EN 485-2 .....          | 34 |
| 12. Aplikace materiálových charakteristik v programu MKP .....      | 35 |
| 12.1 Využití materiálových dat z normy EN 485-2.....                | 36 |
| 13. Model cisterny přepravníku pro MKP výpočet .....                | 38 |
| 13.1 Stávající model .....  | 38 |
| 13.2 Tvorba nového modelu.....                                      | 38 |
| 14. Tvorba a optimalizace sítě .....                                | 40 |
| 15. MKP analýza konstrukce.....                                     | 42 |
| 15.1 MKP analýza zatěžovacího stavu 1 - počátek sklápění:.....      | 42 |
| 15.2 MKP analýza zatěžovacího stavu 2 - konec sklápění .....        | 47 |
| 15.3 MKP analýza zatěžovacího stavu 3 - tlaková zkouška .....       | 51 |
| 16. Návrh opatření ke snížení napjatosti kritických míst .....      | 53 |
| 16.1 Návrh konstrukčních úprav.....                                 | 53 |
| 16.2 Výpočet navýšení celkové hmotnosti přepravníku .....           | 56 |
| 17. MKP analýza upravené konstrukce.....                            | 57 |
| 17.1 Způsob porovnání MKP analýz .....                              | 57 |
| 17.2 Zhodnocení konstrukčních úprav .....                           | 58 |
| 18. Závěr .....   | 60 |
| 19. Seznam obrázků.....   | 61 |
| 20. Seznam tabulek .....  | 63 |
| 21. Seznam zkratk a symbolů .....                                   | 64 |
| 22. Zdroje.....   | 66 |

## 1. Úvod

Nákladní kamionová doprava je v dnešní době nejrozšířenější a stále se rozvíjející druh dopravy zboží a materiálů v České republice, ale i v Evropě. S jejím rozvojem roste také objem přepravovaných sypkých hmot, kdy se stále více uplatňují velkoobjemové, cisternové přepravníky.

S rostoucími požadavky na ekologii, ekonomiku provozu a bezpečnost jsou kladeny stále vyšší nároky na snižování hmotnosti a zvyšování bezpečnosti a životnosti konstrukcí přepravníků.

Vzhledem k nepřehledným, složitým tvarům cisteren přepravníků a specifickým vlastnostem jejich nákladů, klasické analytické výpočetní postupy přestávají dostačovat. Pro nově navržené přepravníky je tak často správnost navržené konstrukce ověřována, dle preferencí výrobce, experimenty či MKP analýzou.

Výše uvedeným požadavkům na ekologii, ekonomiku a bezpečnost nepodléhají pouze zcela nové konstrukce přepravníků, ale i stávající vyráběné typy navržené dříve na základě zkušeností a analytických metod. V průběhu let jsou v rámci modernizace nové přepravníky staršího typu vylepšovány a optimalizovány tak, aby vyhovovali zvyšujícím se technickým nárokům a zákazníkům.

Takto vzniklo i téma této práce, kdy chtěl výrobce přepravníku provést revizi stávající konstrukce a na jejím základě přepravník inovovat.

Cílem této práce je definovat účinky sypkého materiálu na stěnu přepravníku, dále pak z pracovního cyklu přepravníku určit krajní stavy zatížení konstrukce a následně provést MKP analýzu stávající konstrukce cisterny přepravníku sypkých hmot. Na základě jejích výsledků navrhnout optimalizaci tak, aby došlo, pokud to bude možné, ke snížení hmotnosti konstrukce a případně aby se odstranila místa se zvýšeným namáháním.



## 2. Přepravníky sypkých hmot ZVVZ

Společnost ZVVZ vyrábí cisternové, návěsné přepravníky sypkých hmot v celé řadě variant. Přepravníky jsou určeny pro přepravu volně ložených, sypkých a granulovaných materiálů. Cisterny vybraných přepravníků je možné využívat i pro dopravu materiálů pro potravinářské účely.

Vyráběny jsou následující řady přepravníků sypkých hmot:

### 1) Návěsy řady NC3:

- Přepravník NCJ 32
- Přepravník NCEA 36
- Přepravník NCG 40
- Přepravník NCD 45

### 2) Návěsy řady NKA a NKR:

- Přepravník NKA 46
- Přepravník NKR 46

### 3) Návěsy řady NS3:

- Přepravník NSA 62
- Přepravník NSB 62
- Přepravník NSC 48
- Přepravník NSE 58
- Přepravník NSF 58
- Přepravník NCG 42

(poslední dvojčíslí v označení uvádí přepravní kapacitu přepravníku v m<sup>3</sup>)

## 2.1. Přepravníky řady NC 3

Jedná se o cisternové přepravníky plně z hliníkových slitin, které jsou určeny pro přepravu suchých, sypkých, prachových, jemně zrnitých a granulovaných materiálů, mletého vápna, vápence, cementu, maltových směsí a slévárenského písku viz. Obr.:1. V úpravě pro potravinářské účely je možné využít přepravníky pro dopravu mouky, cukru, potravinářských a krmných granulátů.



*Obr.1: Přepravník NCJ 32, převzato z [1]*

Přepravníky jsou řešeny jako nesklopné, bez nosného rámu o přepravní kapacitě 32 až 45 m<sup>3</sup>. Plnění je prováděno do dvou až čtyř horních plnicích otvorů DN 450 mm, volným násypem a vyprazdňování se děje přetlakově s výstupem armatury pod nárazníkem. Podvozky přepravníků jsou osazeny třemi nápravami SAF/BPW, o rozvoru 1310 mm, se vzduchovým odpružením, z nichž je vždy jedna zvedací v případě přepravy prázdného přepravníku a dále pak teleskopickými snímatelnými podpěrami JOST MODUL, pro odstavení přepravníku. Přepravníky nejsou vybaveny vlastním zdrojem tlakového vzduchu, pro přetlakové vyprazdňování je zapotřebí externí zdroj stlačeného vzduchu o objemovém toku 500 Nm<sup>3</sup>h<sup>-1</sup> při tlaku 2 bar. Hlavní rozměry přepravníků řady NC3 uvádí tabulka 1.

*Tabulka 1 Hlavní rozměry přepravníků řady NC3.*

| <b>Přepravník :</b> | <b>Max. délka [mm]:</b> | <b>Max. výška [mm]:</b> | <b>Max. šířka[mm]:</b> |
|---------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|
| NCJ 32              | 9202                    | 3820                    | 2520                   |
| NCEA 36             | 9429                    | 3830                    | 2550                   |
| NCG 40              | 10060                   | 3793                    | 2550                   |
| NCD 45              | 11125                   | 3830                    | 2550                   |

## 2.2. Přepravníky řady NKA a NCF

Jedná se o sedmi-komorové cisternové přepravníky plně z hliníkových slitin, které jsou určeny pro přepravu suchých granulovaných materiálů, především pelet pro energetické využití a plastových granulátů viz. Obr.: 2. V úpravě pro potravinářské účely je možné využít přepravníky pro dopravu potravinářských a krmných granulátů.



*Obr.2: Přepravník NKA 46, převzato z [1]*

Přepravníky jsou řešeny jako nesklopné, bez nosného rámu o přepravní kapacitě 46 m<sup>3</sup>. Plnění je prováděno do sedmi horních plnicích otvorů DN 450 mm, volným násypem a vyprazdňování se děje přetlakově s výstupem armatury nad nárazníkem. Podvozky přepravníků jsou osazeny, třemi nápravami (dvěma standardními nápravami SAF/BPW a poslední otočnou nápravou TRIDEC) se vzduchovým odpružením, z nichž první je vždy zvedací v případě přepravy prázdného přepravníku, a dále pak teleskopickými snímatelnými podpěrami, pro odstavení přepravníku. Přepravníky nejsou vybaveny vlastním zdrojem tlakového vzduchu, pro přetlakové vyprazdňování je zapotřebí externí zdroj stlačeného vzduchu o objemovém toku 500 Nm<sup>3</sup>h<sup>-1</sup> při tlaku 1,5 bar. Hlavní rozměry přepravníků NKA a NCF uvádí tabulka 2.

*Tabulka 2 Hlavní rozměry přepravníků NKA a NCF.*

| <b>Přepravník:</b> | <b>Max. délka [mm]:</b> | <b>Max. výška [mm]:</b> | <b>Max. šířka [mm]:</b> |
|--------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| NKA 46             | 11200                   | 3800                    | 2540                    |
| NKR 46             | 11350                   | 3830                    | 2550                    |

## 2.3. Přepravníky řady NS3

Přepravníky řady NS3 reprezentuje přepravník NSA62 popsaný detailně v další kapitole.

### 3. Přepravník NSA 62

Přepravník NSA 62 je největším přepravníkem objemové řady přepravníků NSA (42,48,58,62 m<sup>3</sup>) vyráběné od roku 2002.

Jedná se o sklopný, cisternový přepravník z hliníkových slitin, který je určen pro přepravu suchých, sypkých, prachových, jemně zrnitých a granulovaných materiálů např.: krmných granulátů, elektrárenského popílku, vápenných hydrátů, mouky a krmných směsí viz. Obr.:3.



*Obr.3: Přepravník NSA 62, převzato z [1]*

#### 3.1 Technické parametry přepravníku NSA 62

Celkový objem nádoby 62 m<sup>3</sup>

Provozní hmotnost 6 900 kg

Nejvyšší pracovní přetlak nádoby 2 bar

Rozvor náprav 1 310 mm

Hlavní rozměry přepravníku NSA62 viz.Obr.:4.

Maximální délka návěsu 13750 mm

Maximální výška návěsu 3960 mm

Maximální šířka návěsu 2550 mm

Největší tech. přípustná / povolená hmotnost 38 000 / 34 000 kg

Největší tech. přípustná / povolená hmotnost na točnici 11 200 / 10 000 kg

Největší tech. přípustná / povolená hmotnost na nápravy 3 x 9 000 / 8 000 kg

Požadovaná výkonnost cizího zdroje vzduchu 500 Nm<sup>3</sup>.h-1

**Tlaková nádoba:**

Nádoba odpovídá evropské směrnici 97/23/EC, resp. nařízení vlády ČR č. 26/2003 Sb.

Dále odpovídá normě AD2000 Merkblatt.

Plnění volným násypem do 5 hrdel DN 450

Vyprazdňování přetlakové při současném naklápění cisterny hrdlem DN 150 na kuželovém závěru servisního otvoru.

**Podvozek:**

Podvozek návěsu je opatřen třemi nápravami s diskovými koly 22,5 x 11,75, z oceli a pneumatikami 385/65 R – 22,5 160 J.

Nápravy jsou vybaveny elektronickým systémem brzdění EBS (systém WABCO)

Podvozek vybaven vzduchovým pérováním.

Teleskopické podpěry přední JOST MODUL pro odstavení návěsu

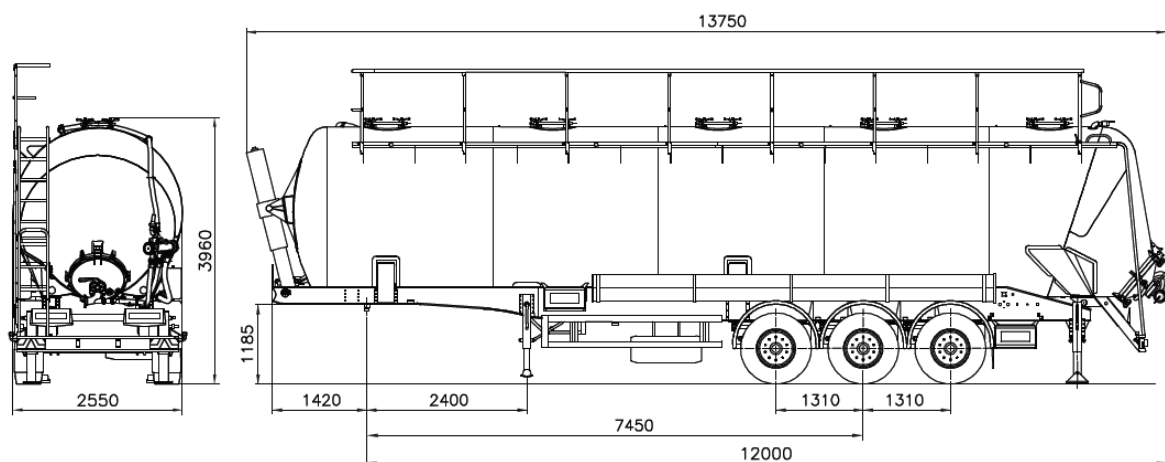
Teleskopické podpěry zadní JOST MODUL pro podepření návěsu při sklápění

Manometr pro stanovení velikosti zatížení

Plastové blatníky se zástěrkami proti rozstříku

**Homologace:**

Převravník splňuje homologace E8-13R, E8-48R, E8-58R a E8-73R



*Obr.4: Hlavní rozměry přepravníku NSA, převzato z [1]*

## 4. Zatěžovací stavy konstrukce

Pro porozumění, jaké zatěžovací stavy působí na cisternu přepravníku NSA je nutné popsat jeho pracovní cyklus.

### 4.1. Pracovní cyklus přepravníku

Přepravník je po příjezdu do závodu zákazníka přistaven přepravcem na příslušné místo pod plnicí terminál viz Obr.:5.



*Obr.5: Přistavení přepravníku pod plnicí terminál, převzato z [2]*

Následně jsou otevřeny horní plnicí otvory a podle počtu připojovacích portů dochází k plnění celého přepravníku naráz, nebo je plněn postupně. Daný materiál je sypan do přepravníku pomocí teleskopických rukávů viz Obr.:6 , které díky pryžové koncovce dokonale dosednou na horní hranu plnicích otvorů a umožní tak přesun materiálu zcela bez kontaminace z okolního prostředí, či naopak bez kontaminace okolního prostředí přepravovaným materiálem.



*Obr.6: Teleskopický rukáv pro plnění přepravníku, převzato z [2]*

Přepravník je tu to chvíli ve vodorovné poloze a bez přetlaku pracovního plynu. Po požadovaném naplnění přepravníku jsou následně horní plnicí otvory uzavřeny a přepravník je převezen do místa určení nákladu. Zde je přepravník přistaven k terminálu, je podepřen zadními teleskopickými podpěrami pro podepření návěsu při sklápění a je připojen zadním vyprazdňovacím otvorem DN 150 mm na kuželovém závěru servisního otvoru ke skladovacím zásobníkům vybavených pro pneumatickou dopravu materiálu. Prostor cisternového tělesa je dále tlakován pracovním plynem (nejčastěji vzduchem) a je započato se sklápěním cisterny pro usnadnění pohybu materiálu cisternou, které v krajní poloze dosahuje  $45^\circ$  od roviny vozovky viz Obr.:7.



*Obr.7: Maximální sklopení cisterny při vyprazdňování přepravníku, převzato z [1]*

Po vyprázdnění přepravníku, je přepravník sklopen zpět do přepravní polohy, jsou odjištěny teleskopické podpěry a je odpojeno spojovací potrubí. Na základě výše uvedeného popisu je možné určit stavy nejvíce namáhající konstrukci během pracovního cyklu přepravníku. Jedná se o stavy kdy na konstrukci působí nejvíce vnějších zatížení (vnitřní přetlak, účinky sypkého materiálu), nebo se mění podmínky uložení konstrukce. Můžeme tedy určit jako krajní stavy konstrukce počátek a konec sklápění, kdy je cisterna plně zatížena a dále se mění podmínky jejího uložení ( úhel náklonu cisterny a snížení počtu podpěrných míst).

Další stav, který může konstrukci krajně namáhat, je tlaková zkouška nádoby. Při výrobě cisterny je po dokončení svářecích prací provedena v souladu s evropskou směrnicí 97/23/EC, dle normy AD2000 Merkblatt tlaková zkouška nádoby, která je prováděna z bezpečnostních důvodů vodou (pro minimalizování akumulované energie v prostoru cisterny během tlakové zkoušky) o přetlaku odpovídajícímu 1,5 násobku pracovního tlaku.

Cisterna je při tlakové zkoušce podepřena identicky jako v přepravní poloze na přepravníku. Důvodem proč je možné tlakovou zkoušku považovat za krajní případ namáhání nádoby je fakt že celková váha vody uvnitř cisterny činí 62000 kg, což je téměř 200% maximální povolené hmotnosti nákladu.

V následující tabulce (Tabulka 3) je uveden přehled zatěžovacích stavů konstrukce, které budou analyzovány, přičemž je uvažováno maximální využití parametrů přepravníku deklarovaných výrobcem ( vnitřní přetlak, povolená hmotnost nákladu, technicky možný úhel sklopení cisterny).

*Tabulka 3 Přehled jednotlivých zatěžovacích stavů.*

| <b>Stav:</b>     | <b>Přetlak média [MPa]:</b> | <b>Hustota nákladu [kg/m<sup>3</sup>]:</b> | <b>Úhel náklonu cisterny:</b> | <b>Charakter materiálu:</b> |
|------------------|-----------------------------|--|-------------------------------|-----------------------------|
| Počátek sklápění | 0,2                         | 516  | 0°                            | sypký                       |
| Konec sklápění   | 0,2                         | 516  | 45°                           | sypký                       |
| Tlaková zkouška  | 0,3                         | 1000                                       | 0°                            | tekutina                    |



## 5. Sypké materiály

Mechanicko – fyzikální vlastnosti sypkých hmot určují schopnost příslušné sypké hmoty protékat přes otvory, výsypky, zásobníky apod. a sledovat změny toku. Přitom základní vlastnost sypkých hmot, kterou se tyto odlišují od kapalin, představuje jejich schopnost přenášet třecí síly v klidu. V kapalinách vznikají třecí síly pouze za pohybu, to znamená při určitém gradientu rychlosti, a takovéto síly jsou úměrné právě tomuto gradientu. V klidovém stavu pak tyto síly zanikají. U sypkých hmot třecí síly působí stále a jsou poměrně málo závislé na gradientu rychlosti (pro praktické účely lze vliv gradientu rychlosti zanedbat).

Existenci třecích sil lze poměrně snadno dokázat při pozorování hromady nesoudržné sypké hmoty (volně tekoucího sypkého materiálu). Takováto hromada drží pohromadě v důsledku třecích sil uvnitř sypké hmoty resp. mezi jejich částicemi a dále pak v důsledku třecích sil mezi sypkou hmotou a základnou. Nebýt těchto sil, potom by se uvažovaná hromada chovala jako kapalina.

### 5.1. Klasifikace sypkých hmot

Sypké hmoty se klasifikují podle následujících hledisek.

#### 5.1.1. Zrnitost

Zrnitost vyjadřuje rozměry a tvar zrn. Za rozměr zrna je považována nejdelší hrana pravoúhlého rovnoběžnostěnu opsaného zrna. Pro charakteristiku zrnitosti se sypké hmoty dělí v závislosti na tvaru zrn a poměru velikostí zrn.

Rozměry zrn, které přicházejí do přepravních, zpracovatelských a skladovacích systémů jsou jednou z nejdůležitějších charakteristik, kterou je nutno znát při výběru a používání způsobů dopravy, dopravního a skladovacího zařízení. Maximální rozměr zrna určuje mnohé parametry konstrukce např. velikost násypných a vypouštěcích otvorů, rozměry korečků, šířku pásu, průměr šneku apod. Podle rozměrů zrn se i sypké hmoty třídí viz. Tabulka 4.

*Tabulka 4 Třídění sypkých hmot podle velikosti zrn.*

| <b>Sypká hmota</b> | <b>Rozměr zrna [mm]:<br/>od – do</b> |
|--------------------|--------------------------------------|
| velmi jemná        | 0,07 – 0,4                           |
| jemná              | 0,5 – 3,5                            |
| jemně zrnitá       | 3,6 – 13,0                           |
| středně zrnitá     | 14,0 – 75,0                          |
| hrubě zrnitá       | nad 75,0                             |

### 5.1.2. Soudržnost a sypnost

Sypnost je dána vzájemným silovým působením jednotlivých zrn a je charakterizována sypným úhlem – tj. úhlem udávaným v úhlových stupních, který svírá vodorovná rovina a povrchová přímka sypného kužele. Podle sypnosti vyjádřené sypným úhlem se sypké hmoty třídí. Rozmezí jeho hodnot se teoreticky může pohybovat od 0° do 90° s tím, že s rostoucí hodnotou sypného úhlu roste také soudržnost partikulární látky a dochází proto ke zhoršování jejich tokových vlastností. Rozdělení sypkých hmot podle hodnoty sypného úhlu uvádí Tabulka 5.

*Tabulka 5 Rozdělení sypkých hmot podle velikosti sypného úhlu.*

| <b>Rozsah sypných úhlů:</b> | <b>Sypká hmota:</b> |
|-----------------------------|---------------------|
| max. 6°                     | velmi volně sypká   |
| max. 15°                    | volně sypká         |
| max. 30°                    | normálně sypká      |
| nad 30°                     | málo sypká až vazká |

V některých případech je potřeba znát sypný úhel působí-li na nasypané těleso další vlivy jako je setřásání, vibrace atd. Například doprava materiálu na pásovém dopravníku nebo ve vibrující nádobě či podložce. Vibrace usnadňují tok sypkého materiálu a způsobují tak větší roztečení materiálu spojené se zmenšením sypného úhlu, pro který byl zaveden pojem dynamický sypný úhel viz. Tabulka 6.

*Tabulka 6 Rozdělení sypkých hmot podle velikosti sypného úhlu.*

| <b>Materiál:</b>          | <b>Statický sypný úhel:<br/>[ °]</b> | <b>Dynamický sypný úhel:<br/>[ °]</b> |
|---------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| Obilí                     | 20-31                                | 10                                    |
| Piliny                    | 20-45                                | 15-25                                 |
| Pelety                    | 34                                   | 15                                    |
| Granule krmné             | 25-40                                | 15-20                                 |
| Mouka                     | 20-35                                | 10-20                                 |
| Cement sypaný             | 10-15                                | 5-7                                   |
| Popílek                   | 15-18                                | 9                                     |
| Mletý vápenec             | 30                                   | 12-15                                 |
| Plastový granulát<br>(PE) | 10                                   | 5                                     |

### **5.1.3. Odpor při dopravě**

Uvažují se odpory dané tvary a rozměry zrn a dále pak vnitřním třením sypkých hmot, zahrnutých v součiniteli odporu, který je vyšší než obvyklé hodnoty součinitele tření.

### **5.1.4. Objemová sypná hmotnost**

Objemová sypná hmotnost je chápána jako poměr hmotnosti vyjádřené v kg k objemu udanému v m<sup>3</sup> v sypkém stavu viz. Tabulka 7.

*Tabulka 7 Rozdělení sypkých hmot podle objemové sypné hmotnosti.*

| <b>Materiál:</b>          | <b>Objemová sypná hmotnost:<br/>[kg/m<sup>3</sup>]</b> |
|---------------------------|--|
| Obilí                     | 500-800  |
| Piliny                    | 120-180  |
| Pelety                    | 450-650  |
| Granule krmné             | 300-700  |
| Mouka                     | 400-600  |
| Cement sypaný             | 1200-1400  |
| Popílek                   | 500-650  |
| Mletý vápenec             | 300-600  |
| Sušené brambory           | 130-150  |
| Cukr krystalický          | 850-900  |
| Plastový granulát<br>(PE) | 520-580  |
| Soda                      | 1200-1280  |

## 6. Rozložení tlaku sypkých hmot

Na těleso cisterny přepravníku působí několik vnějších zatížení, kdy jedno z hlavních zatížení působí přepravovaný sypký materiál svým tlakem na vnitřní stěnu přepravníku. Proto je pro analýzu napětí ve stěně tělesa přepravníku velmi důležité se co nejlépe přiblížit reálnému rozložení tlaku sypkého materiálu po stěně nádoby.

Pro statické chování sypkého materiálu můžeme dle mechaniky tekutin a mechaniky pevných látek uvažovat tři základní způsoby přístupu k výpočtu rozložení tlaku. Jak je patrné z fyzikálních vlastností sypkých materiálů, sypké materiály svým chováním tvoří přechod mezi tekutinou a pevnou látkou. Základními přístupy pro popis chování sypkých materiálů je tedy přístup k sypkému materiálu jako k pevné látce a druhým způsobem je přístup k sypkému materiálu jako k tekutině. Třetí přístup, tedy popis chování materiálu mezi dvěma výše uvedenými krajními stavy, řeší Janssenova teorie sypkých hmot, která již byla několikrát experimentálně ověřena. Na Obr.:8 je ilustrováno působení sypkého materiálu na skloněnou stěnu dle jednotlivých teorií, kdy pro určení jednotlivých tlaků  $p_h$ ,  $p_s$  a  $p_j$  jsou použity následující postupy:

a)

$$p_h = h \cdot \rho \cdot g \quad (1)$$

Kdy  $p_h$  vyjadřuje hodnotu hydrostatického tlaku na dně nádrže o výšce  $h$ .

b)

$$p_s = h \cdot \rho \cdot g \cdot \frac{\cos(\alpha)}{2} \quad (2)$$

Kdy  $p_s$  vyjadřuje rovnoměrný tlak úměrný tíze trojúhelníkového hranolu sypkého materiálu nad skloněnou stěnou.

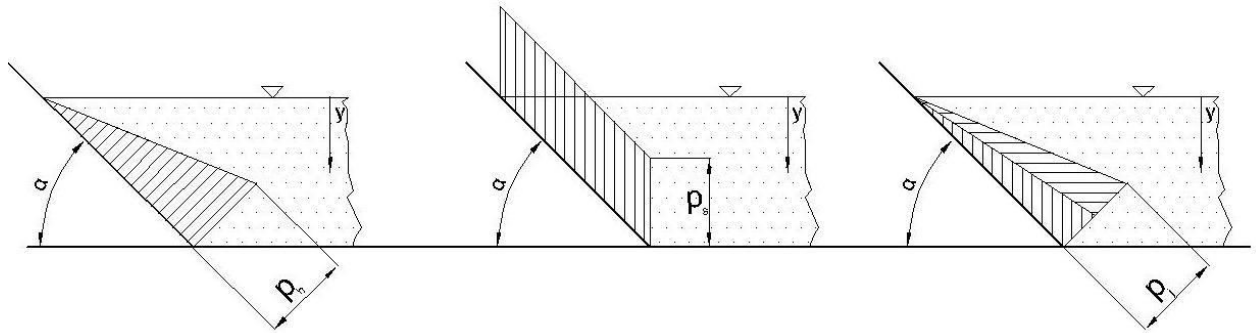
c)

$$p_j = \sqrt{p_n^2 + p_t^2} \quad (3)$$

$$p_n = \frac{p_y + p_x}{2} + \frac{p_y - p_x}{2} \cos(2\alpha)$$

$$p_t = \frac{p_y - p_x}{2} \sin(2\alpha)$$

Kdy  $p_j$  je dáno superpozicí normálového a tečného tlaku vyjádřených pomocí tlaku  $p_x$  ve vodorovném směru a tlaku  $p_y$  ve svislém směru (jejichž definiční vztahy budou určeny následně).



Obr.8: Působení sypkého materiálu na skloněnou stěnu dle jednotlivých teorií.

Jak zkušenosti ukazují, první dva přístupy by byly oprávněné jen v případech sypkého materiálu zvláštních vlastností, tedy pro první případ by se jednalo o materiál s velmi malým sypným úhlem, který by se svým chováním blížil tekutině a pro druhý případ by to byl silně lepivý a soudržný materiál se sypným úhlem blížícím se  $\pi/2$ .

Pro naše potřeby, druhy a vlastnosti přepravovaných materiálů (viz kap.5), tedy vidíme, že použití prvních dvou přístupů by nebylo vhodné. Proto se zaměříme na třetí přístup, tedy Janssenovu teorii sypkých hmot.

### 6.1. Janssenova teorie sypkých hmot

Nejprve je nutné zmínit předpoklady, které doprovázejí výpočet dle této teorie:

- 1) Veškerý sypký materiál v síle/nádobě se nachází v mezním rovnovážném stavu.
- 2) V každém místě sypkého materiálu v nádobě mají roviny hlavních napětí směr horizontální a vertikální.
- 3) Poměr hlavních napětí  $K = \frac{p_x}{p_y}$  je v každém bodě skladovaného sypkého materiálu konstantní.
- 4) Na stěně působí tečné napětí  $\tau = f \cdot p_x$ , kde  $f$  je součinitel tření mezi sypkým materiálem a stěnou nádoby a  $p_x$  je horizontální stěnový tlak.
- 5) Základní fyzikální vlastnosti skladovaného materiálu (hlavně sypná hmotnost, součinitel vnitřního tření a poměr hlavních napětí v materiálu - sypný úhel) nejsou závislé na hloubce uvažované vrstvy materiálu.

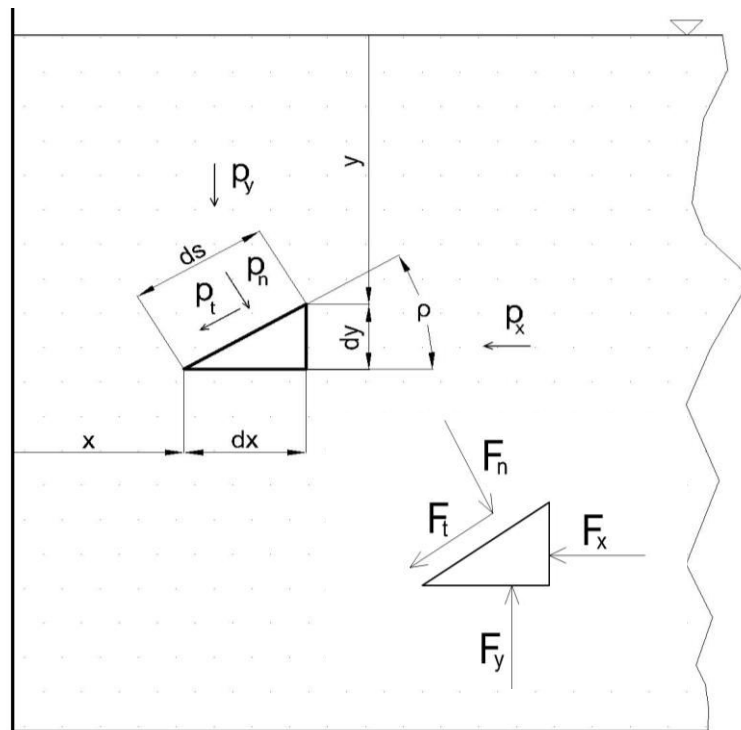
Nádoby pro skladování sypkého materiálu lze rozdělit do dvou skupin dle jejich geometrie.

- a) **mělké zásobníky** - široké a nízké nádoby
- b) **hluboké zásobníky** - vysoké a úzké nádoby (např.: obilná síla), kde výška řádově převyšuje rozměry podstavy nádoby

### 6.1.1 Mělké zásobníky:

U široké a nízké nádoby s vodorovným povrchem sypkého materiálu platí pro tlak ve svislém směru stejný zákon jako pro hydrostatický tlak v nádobě naplněné kapalinou tj. obecně  $p_y = \gamma \cdot y$  respektive v hloubce  $h$ :  $p_h = \gamma \cdot h$ . Tuto analogii lze odvodit z bohatých Coulombových pokusů z oblasti mechaniky zemin (výpočet aktivního tlaku nesoudržné zeminy) při použití teorie pro mezní porušení materiálu [6].

Jestliže je vyjmut elementární hranol jednotkové šířky (viz Obr.:9), pak pro rovnováhu uvažovaného hranolu seříznutého rovinou skloněnou od vodorovné roviny o sypný úhel  $\rho$  (a při zanedbání tangenciálních napětí na stěně) lze napsat rovnice silové rovnováhy ve vodorovném a svislém směru.



Obr.9: Odvození normálového a tečného tlaku v sypké hmotě.

$$x: F_x = F_n \cdot \sin(\rho) - F_t \cdot \cos(\rho)$$

$$y: F_y = F_n \cdot \cos(\rho) + F_t \cdot \sin(\rho)$$

$$x: p_x \cdot dy = p_n \cdot ds \cdot \sin(\rho) - p_t \cdot ds \cdot \cos(\rho) \quad / \frac{1}{ds}$$

$$y: p_y \cdot dx = p_n \cdot ds \cdot \cos(\rho) + p_t \cdot ds \cdot \sin(\rho) \quad / \frac{1}{ds}$$



$$x: p_x \cdot \frac{dy}{ds} = p_n \cdot \sin(\rho) - p_t \cdot \cos(\rho)$$

$$y: p_y \cdot \frac{dx}{ds} = p_n \cdot \cos(\rho) + p_t \cdot \sin(\rho)$$

$$\text{Kde } \frac{dy}{ds} = \sin(\rho) \text{ a } \frac{dx}{ds} = \cos(\rho)$$

$$x: p_x \cdot \sin(\rho) = p_n \cdot \sin(\rho) - p_t \cdot \cos(\rho) \quad / \cdot \sin(\rho)$$

$$y: p_y \cdot \cos(\rho) = p_n \cdot \cos(\rho) + p_t \cdot \sin(\rho) \quad / \cdot \cos(\rho)$$

$$x: p_x \cdot \sin^2(\rho) = p_n \cdot \sin^2(\rho) - p_t \cdot \cos(\rho) \cdot \sin(\rho)$$

$$y: p_y \cdot \cos^2(\rho) = p_n \cdot \cos^2(\rho) + p_t \cdot \sin(\rho) \cdot \cos(\rho) \quad (4)$$

Kdy sečtením obou rovnic vznikne vztah vyjadřující normálový tlak  $P_n$ :

$$x + y: p_n \cdot (\sin^2(\rho) + \cos^2(\rho)) = p_x \cdot \sin^2(\rho) + p_y \cdot \cos^2(\rho)$$

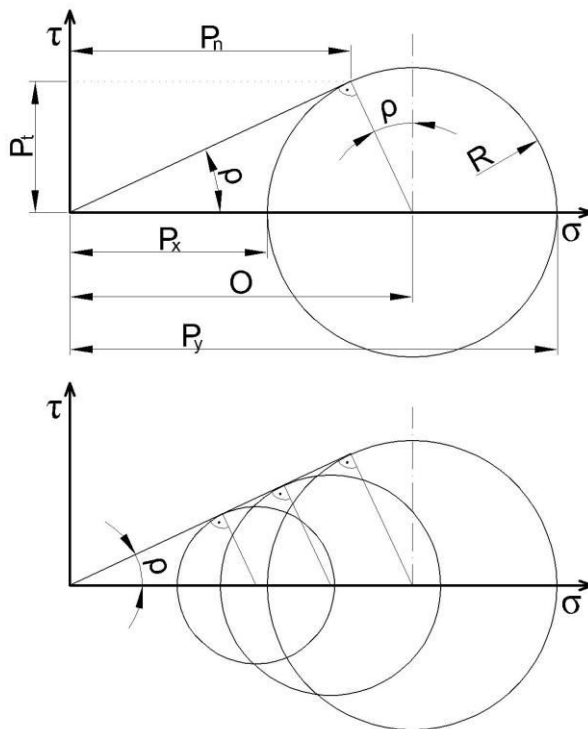
$$\underline{\underline{p_n = \frac{p_y + p_x}{2} + \frac{p_y - p_x}{2} \cos(2\rho)}} \quad (5)$$

Analogicky lze z výše uvedených rovnic vyjádřit  $P_t$ :

$$\underline{\underline{p_t = \frac{p_y - p_x}{2} \sin(2\rho)}} \quad (6)$$



Oba tyto výrazy lze graficky interpretovat Mohrovou kružnicí napětí se středem posunutým od počátku o hodnotu  $O = \frac{P_y + P_x}{2}$  a o poloměru  $R = \frac{P_y - P_x}{2}$ .



Obr.10: Odvození vodorovného a svislého tlaku v sypké hmotě.

Jak lze na Obr.:10 vidět Mohrovy kružnice kreslené pro různé  $y$  (výšku nasypané vrstvy) mají společnou tečnu. Dle definice sypného úhlu je  $\operatorname{tg}(\rho) = \frac{P_t}{P_n}$ . Podle Jansenovy teorie (resp. Coulombovy teorie) platí že:  $p_y = \gamma \cdot y$ , zbývá tedy najít vztah pro určení horizontálního tlaku  $p_x$ . Z geometrie Mohrovy kružnice lze určit následující vztahy.

$$\begin{aligned} \frac{R}{O} &= \sin(\rho) \Rightarrow R = O \cdot \sin(\rho) \\ p_x &= O - R \Rightarrow p_x = O \cdot (1 - \sin(\rho)) \\ p_y &= O + R \Rightarrow p_y = O \cdot (1 + \sin(\rho)) \end{aligned} \quad (7)$$

Dělením výše uvedených rovnic vznikne:

$$\frac{p_x}{p_y} = \frac{1 - \sin(\rho)}{1 + \sin(\rho)} \quad (8)$$

Tento vztah lze, při užití vztahu  $\sin(\alpha) = \cos(\frac{\pi}{2} - \alpha)$ , uměle upravit na tvar:

$$\frac{p_x}{p_y} = \frac{1 - \sin(\rho)}{1 + \sin(\rho)} = \frac{1 - \cos(\frac{\pi}{2} - \rho)}{1 + \cos(\frac{\pi}{2} - \rho)} \quad (9)$$

$$\text{Kdy: } \sin^2(\rho) = \frac{1 - \cos(2\rho)}{2} \quad a \quad \cos^2(\rho) = \frac{1 + \cos(2\rho)}{2}$$

$$\frac{p_x}{p_y} = \frac{1 - \sin(\rho)}{1 + \sin(\rho)} = \frac{1 - \cos(\frac{\pi}{2} - \rho)}{1 + \cos(\frac{\pi}{2} - \rho)} = \frac{2 \cdot \sin^2(\frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2})}{2 \cdot \cos^2(\frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2})} \quad (10)$$

Při použití známého vztahu  $\frac{\sin(\alpha)}{\cos(\alpha)} = \text{tg}(\alpha)$  lze rovnici 10 upravit na tvar:

$$p_x = p_y \cdot \text{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2}\right) = \gamma \cdot y \cdot \text{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2}\right) \quad (11)$$

Kde  $(\text{tg}^2(\frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2}) = \text{konst.})$  pro daný sypký materiál a jeho stav.

Výraz 11 vyjadřuje trojúhelníkové rozložení horizontálního tlaku na svislou stěnu. Platnost takto odvozeného vztahu lze snadno ověřit. Jak již bylo výše uvedeno, Janssenova teorie popisuje materiál, který je svými vlastnostmi mezi pevnou látkou a kapalinou, proto by měla být platnost vztahu zachována i pro mezní případy (pro pevnou látku a kapalinu) a tento vztah by pro ně měl poskytovat výsledky v souladu s mechanikou tekutin resp. mechanikou pevných látek.

Z chování pevných látek je známo, že pokud je těleso umístěno na vodorovnou rovinu, bude na ní působit pouze ve svislém směru a že po umístění na rovinu za normálních podmínek nezmění svůj tvar. Proto lze předpokládat, že sypný úhel  $\rho = (\pi/2)$  a  $p_x = 0$ . Z výrazu 11 vyplývá, že tlak  $p_x$  bude roven nule pouze pokud  $\text{tg}^2(\frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2}) = 0$ , toho je obecně

$$\text{dosaženo pro } \rho = \frac{1}{2}(4\pi \cdot n + \pi) \quad ; \quad n \in \mathbb{Z}.$$

Kdy nejmenší kořen rovnice pro  $n = 0$  je  $\rho = (\pi/2)$ .

Tuto podmínku odvozený vztah splňuje. Dále je třeba ověřit zda pro kapalinu poskytne vztah 11 výsledky shodné s mechanikou tekutin a tedy že  $p_x = p_y = p_{\text{hydrostatický}}$  neboť tlak se v kapalině šíří všemi směry stejně. Tekutiny ze své definice zaujímají tvar nádoby ve které jsou umístěny, proto když tekutina nalita na vodorovnou plochu, rozlije se na nekonečně tenkou vrstvu, tedy pomyslný sypný úhel  $\rho = 0$ .

Vztah 11 bude splňovat výše uvedené předpoklady pouze pokud pro  $\rho = 0$  bude

$$\operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2}\right) = 1 ; \text{ resp.: } \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4}\right) = 1$$

Jak lze snadno ověřit, této rovnosti je dosaženo vždy.

Odvozený vztah je tedy platný a lze ho aplikovat pro naše potřeby.

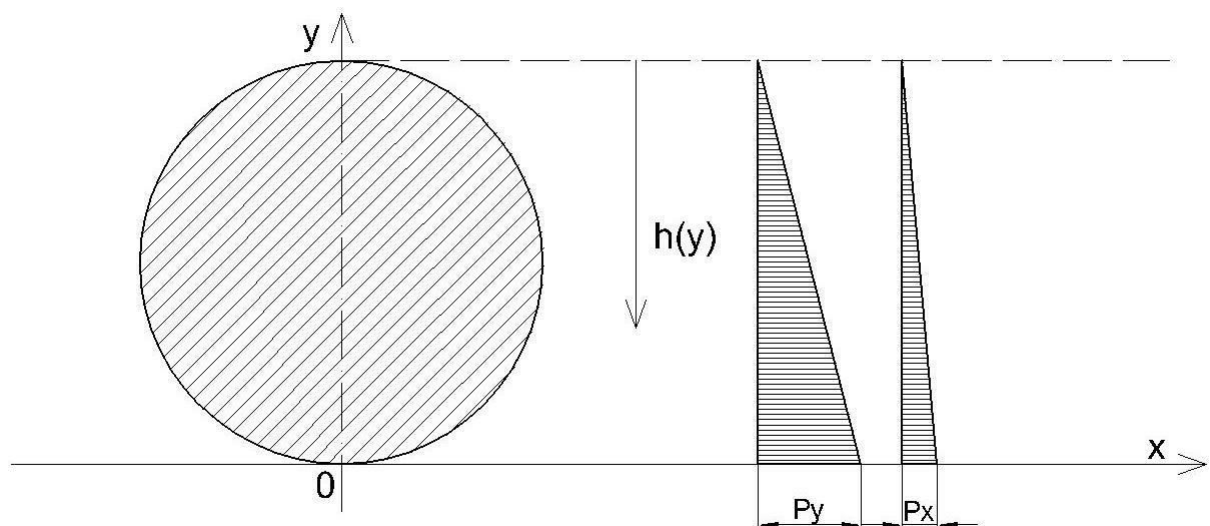
## 7. Zatížení stěny přepravníku sypkým materiálem

Pokud bude postupně přepravník plněn sypkým materiálem, tak jako se tomu reálně při nakládce děje (viz Obr.:5), bude se pod každým z pěti násypných otvorů vytvářet kužel materiálu zdola ohraničený válcovou plochou pláště přepravníku a s patním úhlem rovným dynamickému sypnému úhlu materiálu (od vodorovné roviny). Zaplnění přepravníku lze sledovat ve dvou na sebe kolmých rovinách a to v rovině podélné a rovině příčné.

V obou těchto rovinách lze nalézt místa která nejsou při plnění teoreticky zaplněna. Přičemž nejméně zaplněné místo se nachází v polovině vzdálenost mezi násypnými otvory (v podélné rovině). Tyto nedokonalosti zaplnění ale lze zanedbat neboť díky velikosti dynamických sypných úhlů přepravovaných materiálů ( $10^{\circ}$ - $15^{\circ}$ ) je velikost těchto nedokonalostí vzhledem k objemu přepravníku minimální. Pro další postup tedy je možné předpokládat, že je celý objem (průřez) přepravníku zaplněn (viz Obr.:11).

### 7.1. Aplikace Janssenovy teorie

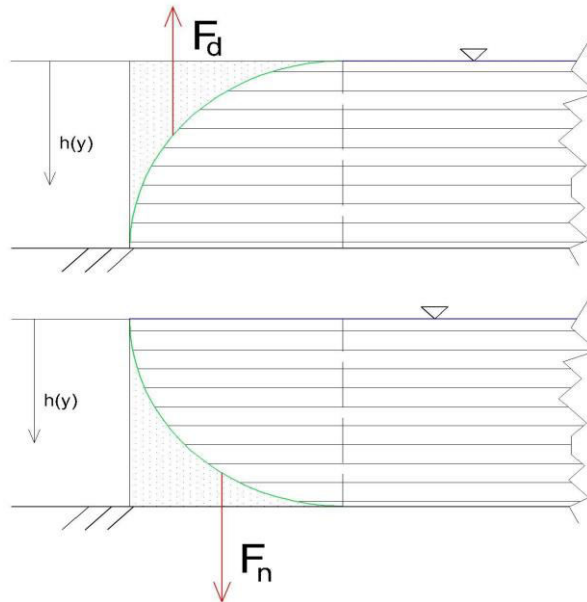
Pokud je vyříznut z tělesa přepravníku, kolmo na jeho osu, prstenec jednotkové šířky lze pro rozložení namáhání sypkým materiálem provést následující úvahy viz Obr.:11. Jak bylo výše odvozeno, je pro určení tlaku na stěnu přepravníku klíčové určit směr a velikost působení) svislé složky tlaku sypkého materiálu.



Obr.11: Průběh vodorovného a svislého tlaku po průřezu.

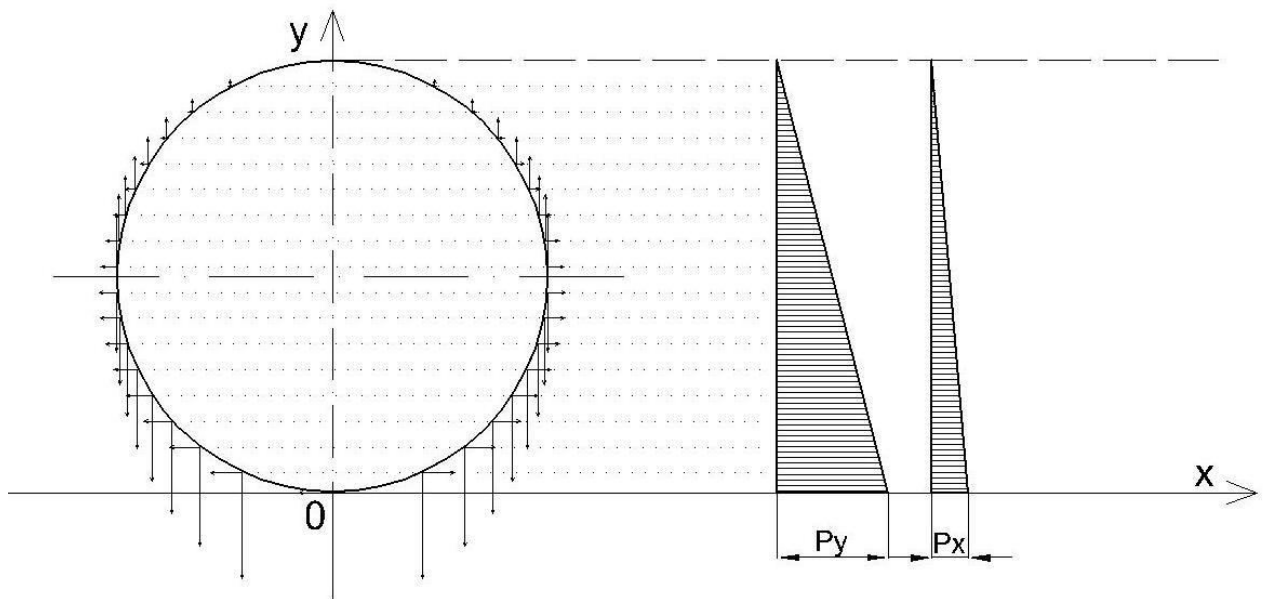
Díky symetrii lze určovat tlak pouze na levou polovinu prstence. Smysl působení svislého tlaku na kruhovou stěnu není ihned zcela patrný a je vhodné použít analogie sypkého materiálu a tekutiny.

Jestliže je levá polovina prstence nahrazena dvěma nad sebou umístěnými čtvrtkruhovými stěnami zadržujícími tekutinu, lze dle mechaniky tekutin určit výslednou sílu tekutiny na stěnu ve svislém směru ( $F_d$ ,  $F_n$ ). Z Obr.:12 je zřejmé, že v horní polovině prstence bude tlak působit v kladném a v dolní polovině v záporném směru (ve smyslu směru  $h(y)$ ).



*Obr.12: Působení výslednice tlaku tekutiny na čtvrtkruhové stěny.*

Na Obr.:13 je ilustrováno výsledné pole tlakového zatížení stěny přepravníku po aplikaci Janssenovy teorie.



*Obr.13: Výsledné pole tlakového zatížení stěny přepravníku.*

## 8. Ověření aplikace Jannsenovy teorie

Výše uvedené závěry lze analyticky ověřit následující úvahou. Pokud je uvažováno těleso přepravniku jako čistě válcová nádoba o stejném objemu a příčném průřezu, z něhož je vyjmut prsteneček jednotkové šířky, je z fyzikální podstaty nutné aby výslednice svislého tlaku sypkého materiálu na stěnu prstenečku byla rovna měrnému zatížení  $Q$  [ N/m ] délky. Ze vzorce pro hmotnost válce lze vyjádřit měrnou hmotnost:

$$m = \frac{M}{l} = \frac{\rho \cdot V}{l} = \frac{\rho \cdot S \cdot l}{l} = \rho \cdot S = \rho \cdot R^2 \cdot \pi \quad (12)$$

$$Q = m \cdot g = \rho \cdot g \cdot R^2 \cdot \pi \quad (13)$$

Nyní bude určena výsledná síla kterou působí materiál na vyjmutý prsteneček (viz. Obr.:14) . Pro zjednodušení analytických operací bude použito cylindrických resp. polárních souřadnic  $(R, \varphi)$ . Jak bylo výše odvozeno svislý tlak sypkého materiálu je analogií hydrostatického tlaku.

$$p_H = h(y) \cdot \rho \cdot g \quad (14)$$

$$h(y) = (1 - \cos \varphi) \cdot R \quad (15)$$

$$p_H = (1 - \cos \varphi) \cdot R \cdot \rho \cdot g \quad (16)$$

Kdy pro  $\varphi=0$  je  $h(y)=0$ , pro  $\varphi=\pi$  je  $h(y)=2R$ .

V případě zakřivené stěny je však nutné uvažovat pouze svislou složku hydrostatického tlaku tedy:

$$p_y = p_H \cdot \cos \varphi = R \cdot \rho \cdot g \cdot (1 - \cos \varphi) \cdot \cos \varphi \quad (17)$$

Kdy svislá složka působí pouze na vodorovný průmět elementu zakřivené stěny.

$$dF_y = p_y \cdot dA_x \quad (18)$$

Na Obr.:15 je možné ukázat že:

$$\beta = \frac{\pi}{2} - \varphi$$

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \beta = \frac{\pi}{2} - \left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) = \varphi \quad (19)$$

$$dA = R \cdot d\varphi$$

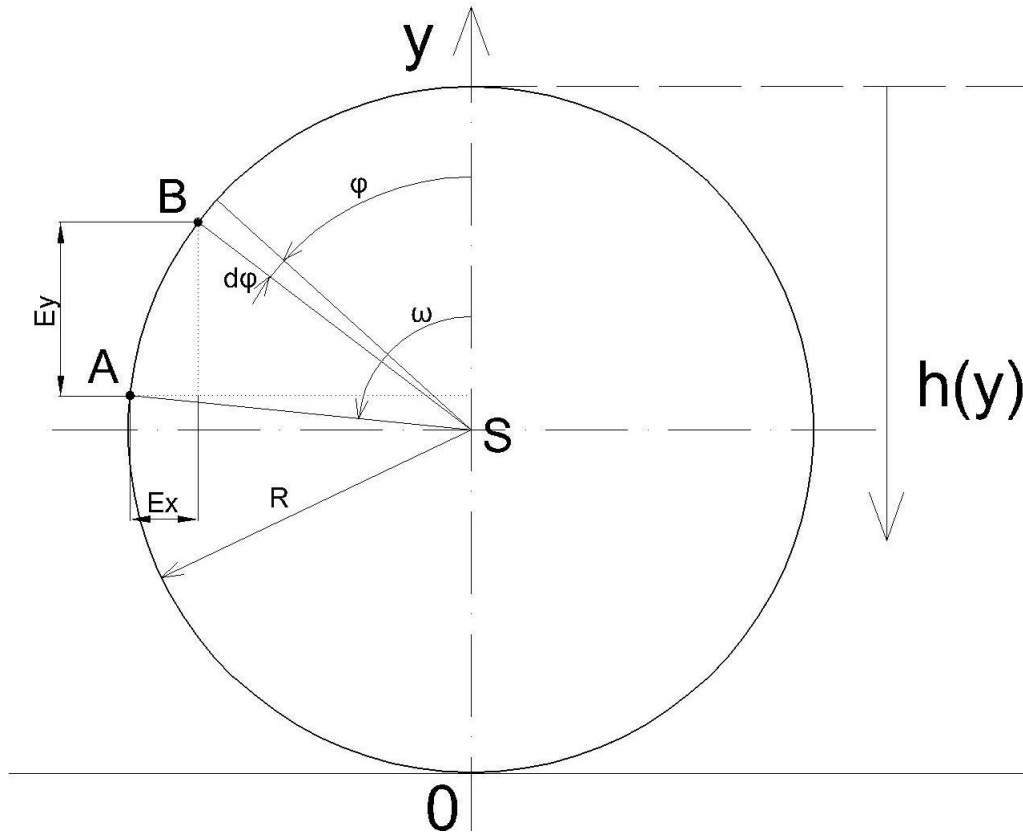
$$dA_x = dA \cdot \sin \varphi = R \cdot d\varphi \cdot \sin \varphi$$

$$dA_y = dA \cdot \cos \varphi = R \cdot d\varphi \cdot \cos \varphi \quad (20)$$

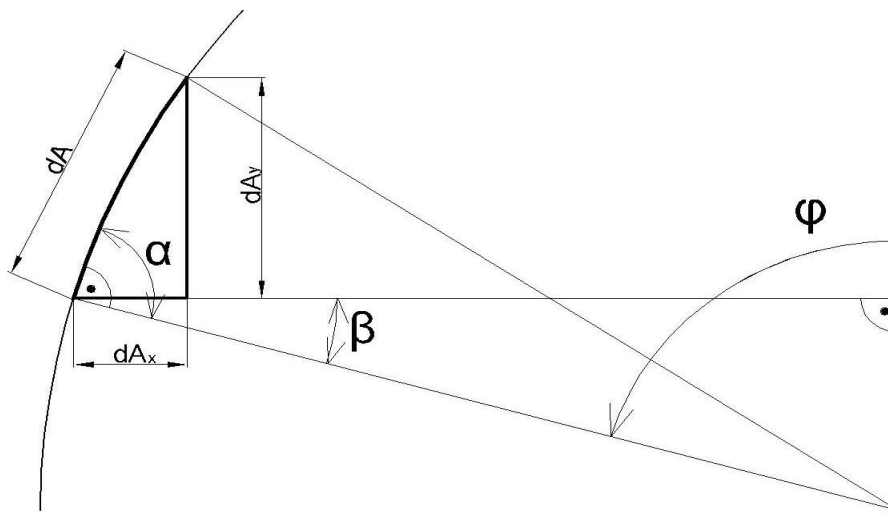
Pak lze vyjádřit:

$$dF_y = p_y \cdot dA_x = [R \cdot \rho \cdot g \cdot (1 - \cos \varphi) \cdot \cos \varphi \cdot R \cdot \cos \varphi] d\varphi \quad (21)$$

$$dF_y = R^2 \cdot \rho \cdot g \cdot [(1 - \cos \varphi) \cdot \cos^2 \varphi] d\varphi \quad (22)$$



Obr.14: Analytické odvození silových účinků tlakového pole.



Obr.15: Analytické odvození silových účinků tlakového pole-element.

Integrace vztahu 22:

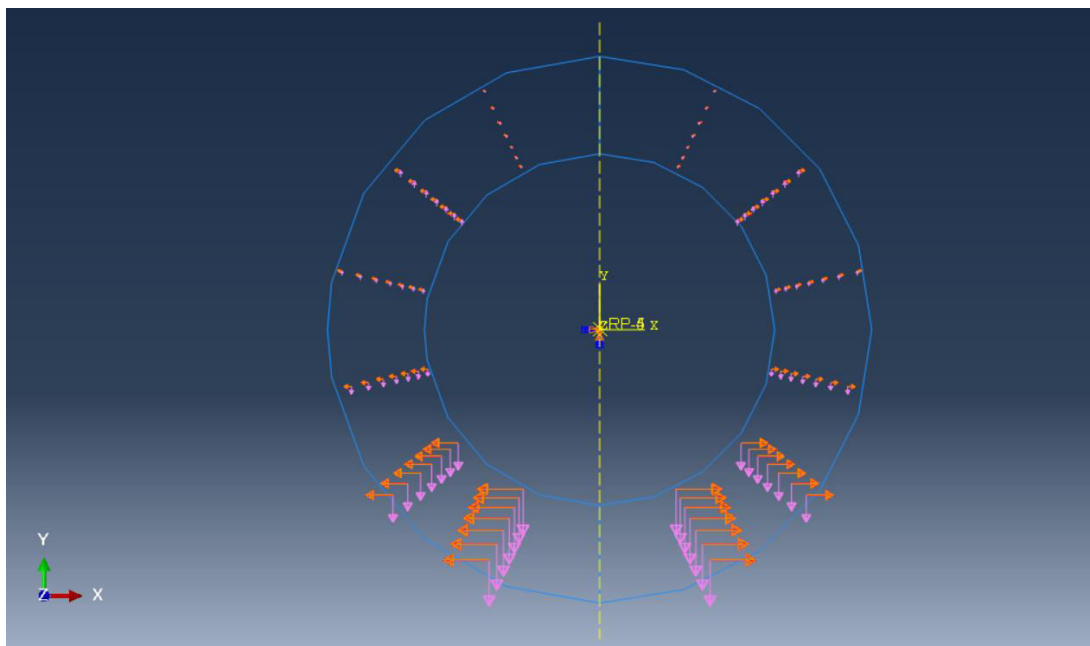
$$\begin{aligned}
 F_y &= 2 \cdot \int_0^{\pi} [R^2 \cdot \rho \cdot g \cdot (1 - \cos \varphi) \cdot \cos^2 \varphi] d\varphi = 2 \cdot R^2 \cdot \rho \cdot g \cdot \int_0^{\pi} [(1 - \cos \varphi) \cdot \cos^2 \varphi] dx = \\
 &= 2 \cdot R^2 \cdot \rho \cdot g \cdot \left[ \frac{\varphi}{2} - \frac{3}{4} \sin \varphi + \frac{1}{4} \sin 2\varphi - \frac{1}{12} \sin 3\varphi \right]_0^{\pi} = \\
 &= 2 \cdot R^2 \cdot \rho \cdot g \cdot \left[ \left( \frac{\pi}{2} - \frac{3}{4} \sin \pi + \frac{1}{4} \sin 2\pi - \frac{1}{12} \sin 3\pi \right) - \left( \frac{0}{2} - \frac{3}{4} \sin 0 + \frac{1}{4} \sin 0 - \frac{1}{12} \sin 0 \right) \right] = \\
 &= 2 \cdot R^2 \cdot \rho \cdot g \cdot \frac{\pi}{2} = \rho \cdot g \cdot R^2 \cdot \pi
 \end{aligned} \tag{23}$$

Jak je zřejmé výsledky rovnic 23 a 13 jsou shodné. Byla tedy ověřena správnost výše uvedených předpokladů.

### 8.1 Definice zatížení v MKP modelu

Jak již bylo zmíněno v kapitole 4, hlavními zatěžujícími faktory jsou silové účinky sypkého materiálu a vnitřní přetlak v nádobě. Účinky sypkého materiálu na zakřivenou stěnu (pole zatížení) byly analyticky definovány na základě Jannsenovy teorie a toto pole bylo vytvořeno v MKP programu Abakus viz. Obr.:16.

Aplikace takovéhoho pole (jeho přepis) zatížení pro MKP analýzu není zcela jednoznačná a je potřeba si její správnost ověřit.



Obr.16: Modelované pole zatížení v programu Abaqus.



## 9. Tvorba MKP modelů pro ověření správnosti pole zatížení

Pro ověření způsobu zatěžování (pole zatížení) byly vytvořeny dva verifikační modely.

- 1) Křivý prut
- 2) Válcová nádoba

### 9.1 Křivý prut

Cílem tohoto modelu bylo přesné ověření správnosti vytvořeného pole v programu Abaqus. Tedy zda-li se podařilo vytvořit pole zatížení shodné s polem odvozeným analyticky výše. Protože není možné určit analyticky výslednou napjatost v reálné konstrukci nádoby, byl vybrán pro ověření jednoduchý křivý prut (polovina prstence jednotkové šířky, vyjmutého z nádoby) na spodním konci vetknutý.

Tento prut byl řešen analyticky, následně pomocí MKP a výsledky byly porovnány.

#### 9.1.1 Analytické řešení

Analytické určení napětí v prutu se odvíjí hlavně od určení ohybového momentu v prutu. Pro určení výsledného ohybového momentu byl použita superpozice momentu ve vodorovném a svislém směru viz Obr.:14. Kdy je možné sestavit pro bod na křivém prutu určeným úhlem  $\omega$  následující diferenciální rovnice:

$$dM_y = dF_y \cdot E_x \quad (24)$$

$$dM_x = dF_x \cdot E_y \quad (25)$$

Jak bylo odvozeno výše pro  $dF_y$  je možné psát:

$$dF_y = p_y \cdot dA_x = [R \cdot \rho \cdot g \cdot (1 - \cos \varphi) \cdot \cos \varphi \cdot R \cdot \cos \varphi] \cdot d\varphi \quad (26)$$

$$dF_y = R^2 \cdot \rho \cdot g \cdot [(1 - \cos \varphi) \cdot \cos^2 \varphi] \cdot d\varphi \quad (27)$$

Analogicky pak lze pro  $dF_x$  odvodit vztah:

$$dF_x = p_x \cdot dA_y = p_y \cdot \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2}\right) \cdot dA_y = R \cdot \rho \cdot g \cdot (1 - \cos \varphi) \cdot \cos \varphi \cdot \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2}\right) \cdot dA_y \quad (28)$$

$$dF_x = [R \cdot \rho \cdot g \cdot \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2}\right) \cdot (1 - \cos \varphi) \cdot \cos \varphi \cdot R \cdot \sin \varphi] \cdot d\varphi \quad (29)$$

$$dF_x = R^2 \cdot \rho \cdot g \cdot \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2}\right) \cdot [(1 - \cos \varphi) \cdot \cos \varphi \cdot \sin \varphi] \cdot d\varphi \quad (30)$$

Pro vyjádření vztahů 24 a 25 jako funkce středového úhlu  $\omega$  je nutné určit  $E_x$  a  $E_y$ .

Z Obr.:14 je možné určit že:

$$\begin{aligned} E_x &= R \cdot \sin \omega - R \cdot \sin \varphi = R \cdot (\sin \omega - \sin \varphi) \\ E_y &= R \cdot \cos \varphi - R \cdot \cos \omega = R \cdot (\cos \varphi - \cos \omega) \end{aligned} \quad (31)$$

Pak lze zapsat:

$$\begin{aligned} dM_y &= dF_y \cdot E_x = R \cdot (\sin \omega - \sin \varphi) \cdot R^2 \cdot \rho \cdot g \cdot [(1 - \cos \varphi) \cdot \cos^2 \varphi] \, d\varphi \\ dM_x &= dF_x \cdot E_y = R \cdot (\cos \varphi - \cos \omega) \cdot R^2 \cdot \rho \cdot g \cdot \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2}\right) \cdot [(1 - \cos \varphi) \cdot \cos \varphi \cdot \sin \varphi] \, d\varphi \end{aligned} \quad (32)$$

Pro zjednodušení a přehlednost integrace vztahů 32 je lépe použít zápis:

$$\begin{aligned} dM_y &= R^3 \cdot \rho \cdot g \cdot [(1 - \cos \varphi) \cdot \cos^2 \varphi \cdot (\sin \omega - \sin \varphi)] \, d\varphi \\ dM_x &= R^3 \cdot \rho \cdot g \cdot \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2}\right) \cdot [(1 - \cos \varphi) \cdot \cos \varphi \cdot \sin \varphi \cdot (\cos \varphi - \cos \omega)] \, d\varphi \end{aligned} \quad (33)$$

Po integraci:

$$\begin{aligned} M_y(\omega) &= R^3 \cdot \rho \cdot g \cdot \int_0^\omega [(1 - \cos \varphi) \cdot \cos^2 \varphi \cdot (\sin \omega - \sin \varphi)] \, d\varphi \\ M_y(\omega) &= R^3 \cdot \rho \cdot g \cdot \frac{1}{96} \cdot [48 \cdot \omega \cdot \sin(\omega) + 36 \cdot \cos(\omega) + 20 \cdot \cos(2\omega) - 4 \cdot \cos(3\omega) + \cos(4\omega) - 53] \end{aligned} \quad (34)$$

$$\begin{aligned} M_x(\omega) &= R^3 \cdot \rho \cdot g \cdot \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2}\right) \cdot \int_0^\omega [(1 - \cos \varphi) \cdot \cos \varphi \cdot \sin \varphi \cdot (\cos \varphi - \cos \omega)] \, d\varphi \\ M_x(\omega) &= R^3 \cdot \rho \cdot g \cdot \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2}\right) \cdot \frac{1}{3} \cdot \sin^4\left(\frac{\omega}{2}\right) \cdot \sin^2(\omega) \end{aligned} \quad (35)$$

Výsledný ohybový moment působící na křivý prut lze získat superpozicí. Vzhledem k tomu že oba momenty působí ve stejném smyslu (otevírají prut), lze je oba považovat za kladné.

Tedy:

$$M_c(\omega) = M_x(\omega) + M_y(\omega)$$

$$\begin{aligned}
 M_c(\omega) = R^3 \cdot \rho \cdot g \cdot [ & (\operatorname{tg}^2(\frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2}) \cdot \frac{1}{3} \cdot \sin^4(\frac{\omega}{2}) \cdot \sin^2(\omega)) - \\
 & - \frac{1}{96} \cdot (48 \cdot \omega \cdot \sin(\omega) + 36 \cdot \cos(\omega) + 20 \cdot \cos(2\omega) - 4 \cdot \cos(3\omega) + \cos(4\omega) - 53)]
 \end{aligned}
 \tag{36}$$

Vyjádření ohybového napětí:

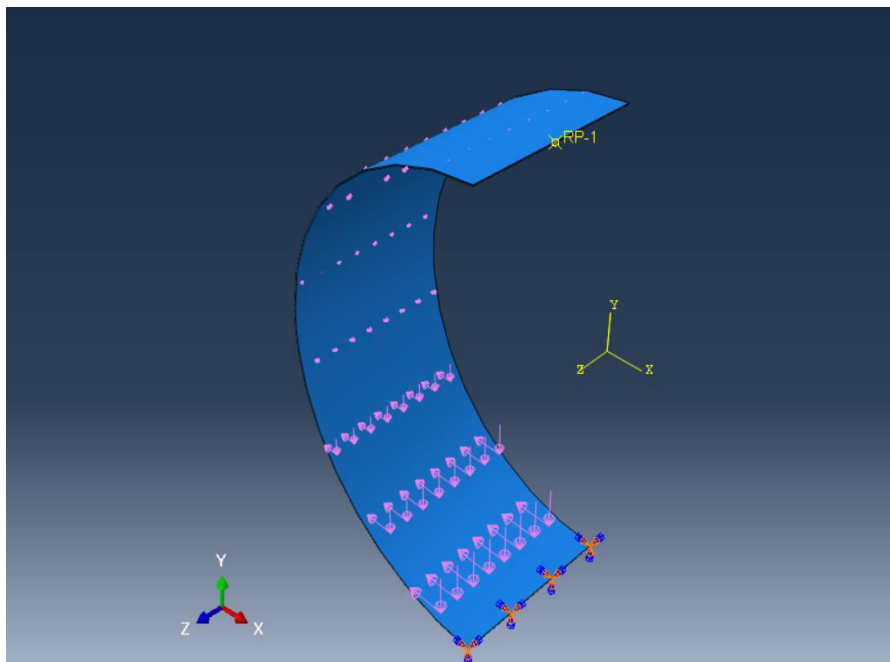
$$\sigma_o(\omega) = \frac{M_c(\omega)}{W_{OP}} \tag{37}$$

Kdy  $W_{OP} = \text{konst.}$

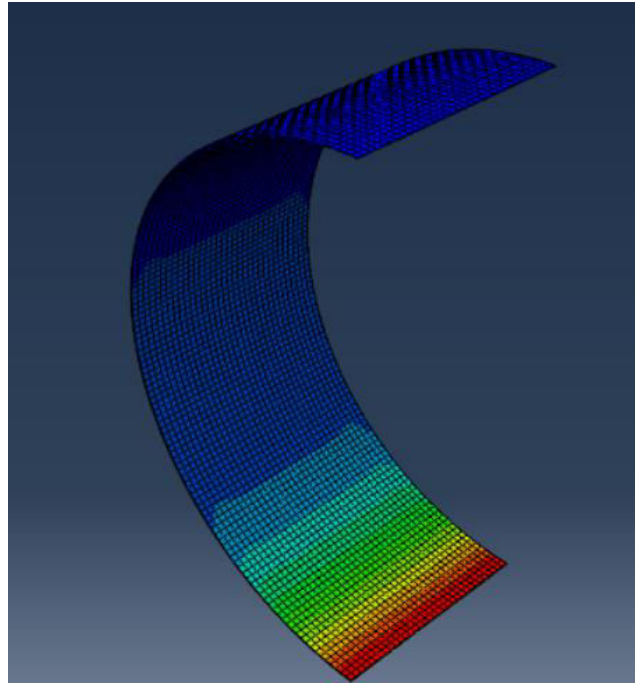
Proto pro porovnání analytického řešení s řešením pomocí MKP není zapotřebí vyjadřovat ohybové napětí v prutu, neboť je pouze lineární funkcí ohybového momentu.

### 9.1.2 Řešení pomocí MKP

Daný prut byl vymodelován a zatížen polem definovaným v kapitole 7 viz Obr.:17.

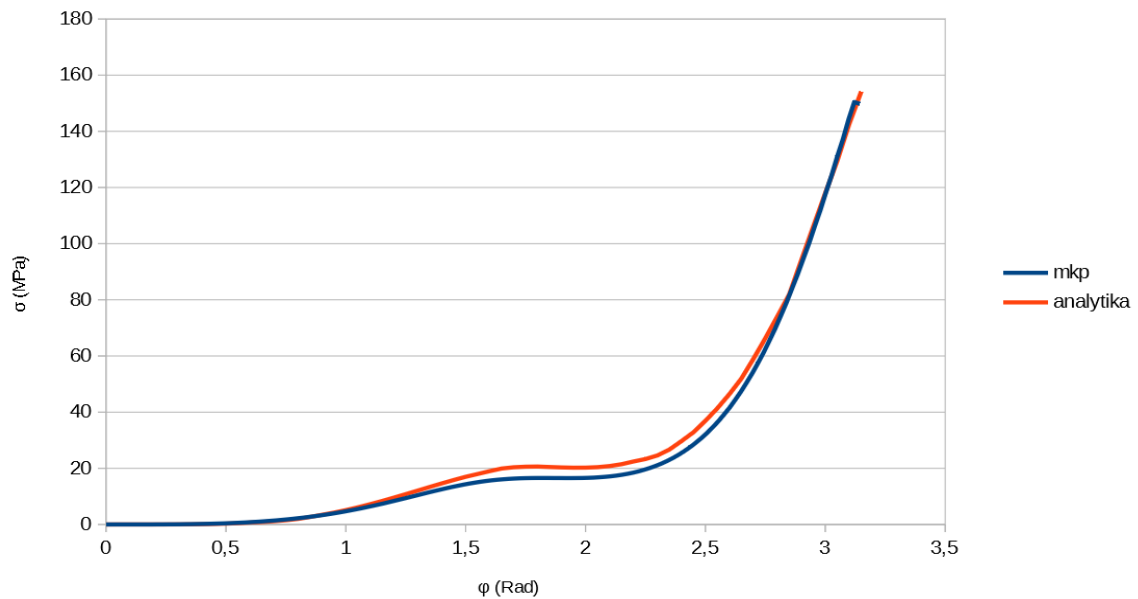


Obr.17: Modelovaný křivý prut v programu Abaqus.



Obr.18: Výsledné pole napětí na křivém prutu.

Z výsledného pole napětí vypočteného MKP viz Obr.:18 bylo v krajních vláknech po délce prutu vyčteno redukované (ohybové) napětí viz Obr.:19. Výsledné průběhy ohybových napětí vypočtené analyticky a získané MKP výpočtem byly vyneseny do grafu viz Obr.:19. Maximální vzájemná odchylka obou napětí činí 13%.



Obr.19: Graf porovnání analytického a MKP řešení.

## 9.2 Válcová nádoba:

Dalším ověřovacím modelem byla ověřována výsledná hmotnost (tíha) naplněné, válcové nádoby. V programu MKP byla vymodelována porovnávací válcová nádoba a byla zatížena výše uvedeným tlakovým polem reprezentujícím účinek sypkého materiálu. Byly sledovány svislé složky reakcí resp. jejich součet, nakolik se shodují s vypočtenou tíhou nádoby.

### 9.2.1 Analytické řešení

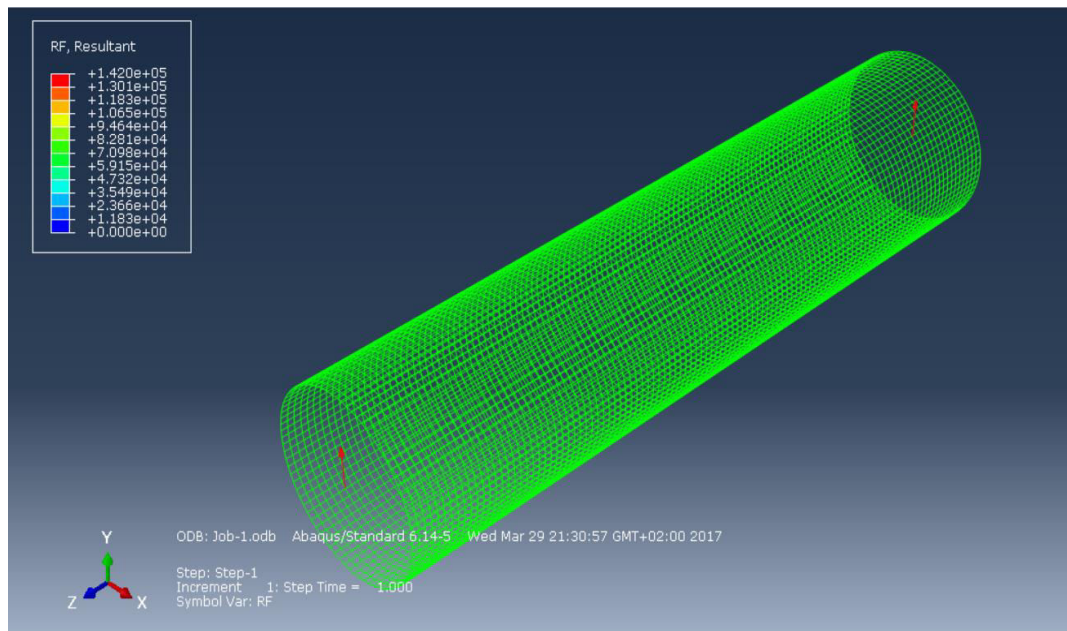
Porovnávací nádoba byla určena délkou  $l = 11\text{m}$  a průměru  $D_P = 2,54\text{m}$ , naplněná sypkým materiálem o objemové hmotnosti  $516\text{kg/m}^3$ . Dle rovnice 13 pro měrnou tíhu nádoby byla určena celková tíha nádoby:

$$Q = \rho \cdot g \cdot R^2 \cdot \pi = \rho \cdot g \cdot \frac{D_P^2}{4} \cdot \pi \quad (38)$$

$$L = Q \cdot l = \rho \cdot g \cdot \frac{D_P^2}{4} \cdot \pi \cdot l = 516 \cdot 9,81 \cdot \frac{2,54^2}{4} \cdot \pi \cdot 11 = 282142,63\text{N} \quad (39)$$

### 9.2.2 Řešení pomocí MKP

Následně byl proveden MKP výpočet a byly z něj zjištěny reakční síly  $R_{F1}$ ,  $R_{F2}$  viz Obr.:20.



Obr.20: Graf porovnání analytického a MKP řešení.

Ze symetrie:

$$R_{F1} = 142000N$$

$$R_{F2} = 142000N$$

$$L_{MKP} = R_{F1} + R_{F2} = 284000N \quad (40)$$

### 9.2.3 Porovnání analytického a MKP řešení

Výsledné hodnoty tíhy nádoby vypočtené analyticky a získané MKP výpočtem byly porovnány a byla stanovena jejich odchylka. Odchylka  $F_e$  obou hodnot činí 0,66%.

$$\Delta L = |L - L_{MKP}| = |282142,63 - 284000| = 1857,37N \quad (41)$$

$$F_e = \frac{\Delta L}{\min(L; L_{MKP})} = \frac{\Delta L}{L} = \frac{1857,37}{282142,63} = 6,58 \cdot 10^{-3} \approx 0,66\% \quad (42)$$

## 10. Značení hliníku a jeho slitin

Značení hliníku a jeho slitin pro tváření je u nás převážně řešeno dle ČSN EN 573-1,2 a 3. Značení začíná písmeny EN (evropská norma) a AW (A=hliník / W=tvářené slitiny) a následují čísla, které určují chemické složení slitiny ( EN AW XXXX).

Rozlišujeme těchto osm základních skupin slitin hliníku:

Skupina 1000 – v podstatě čistý hliník s minimálním obsahem 99% hliníku

Skupina 2000 – slitina hliníku s mědí

Skupina 3000 – slitina hliníku s manganem

Skupina 4000 – slitina hliníku se křemíkem

Skupina 5000 – slitina hliníku s hořčíkem

Skupina 6000 – slitina hliníku s hořčíkem a křemíkem

Skupina 7000 – slitina hliníku se zinkem

Skupina 8000 – slitina hliníku s různými prvky, převážně s lithiem

### 10.1 Značení stavu tepelného zpracování hliníku a jeho slitin

Pro další zpracování hliníku a jeho slitin je také důležité, v jaké stavu tepelného zpracování je dodáván. Dále jsou uvedeny základní stavy a jejich značení dle ČSN EN515.

F – přímo z výroby, bez speciální kontroly teplených podmínek zpracování

O – žíhaný, požadovaných vlastností se dosáhne po tváření za tepla

H11 až H19 – deformačně zpevněný.

H111=žíhaný a mírně deformačně zpevněný (měkký, méně zpevněný než H11)

H22 až H28 – deformačně zpevněný a částečně žíhaný

H32 až H38 – deformačně zpevněný a stabilizovaný

H42 až H48 – deformačně zpevněný a barvený nebo lakovaný

T – tepelně ošetřen, pro výrobu stabilizovaných stavů

T1=ochlazený ze zvýšené teploty s následným přirozeným stárnutím

T2= ochlazený ze zvýšené teploty, tváření za studena s následným přirozeným stárnutím

T3=stav po rozpouštěcím žíhání, tváření za studena s následným přirozeným stárnutím

T4= stav po rozpouštěcím žíhání s následným přirozeným stárnutím

T5= ochlazený ze zvýšené teploty s následným umělým stárnutím

T6= stav po rozpouštěcím žíhání s následným umělým stárnutím

T7= stav po rozpouštěcím žíhání s následným umělým přestárnutím a stabilizací

T8= stav po rozpouštěcím žíhání, tváření za studena s následným umělým stárnutím

T9= stav po rozpouštěcím žíhání, po umělém stárnutím a následným tváření za studena

T10= ochlazený ze zvýšené teploty, tváření za studena s následným umělým stárnutím.

## 11. Materiál EN AW-5083 0/H111 (AlMg4,5Mn W28)

EN AW-5083 je tepelně nevytvrditelná slitina hliníku s hořčíkem (Tabulka 8). Používá se mimo jiné při výrobě tlakových nádob, kryogenních zařízení, dále se používá v chemickém průmyslu (úložné nádrže) a dopravních prostředcích. V měkkém stavu 0/H111 materiál spojuje dostatečnou pevnost s dostatečnou tvařitelností. Zvýšení pevnosti je možné jen formováním za studena, kdy lze dosáhnout nejvyšších hodnot v dané skupině tepelně nevytvrditelných slitin (Tabulka 9). Materiál dodávaný ve stavu 0/H111 je žíhaný na měkko a mírně deformačně zpevněný avšak méně než H11. Při velkých deformacích, např. při tažení plechu, může být nutné materiál znovu měkce žíhat při teplotách 380 až 420°C.

Odolnost proti korozi je v normálních atmosférických podmínkách i při mírně agresivnějších podmínkách jako je mořské prostředí (přítomnost chloridových iontů) výborná. Odolnost proti korozi je možno zlepšit technickou anodickou oxidací výrobků. Materiál může být po tepelném ošetření nebo při dlouhodobém používání při teplotě vyšších než 65°C citlivý na mezikrystalickou korozi.

Slitina v kvalitě EN AW-5083 (AlMg4,5 Mn) je dobře svařitelná všemi běžnými postupy svařování hliníkových slitin, především postupy svařování elektrickým obloukem pod ochrannou atmosférou inertního plynu MIG a TIG (WIG). Při svařování je nutno, u zpevněného materiálu, počítat v přechodovém pásmu se snížením materiálových vlastností na úroveň stavu měkkého žíhání (H111).

### 11.1 Chemické složení

Tabulka 8 Chemické složení materiálu EN-AW 5083.

| Označení: |           | Složení [ % ]: |        |        |         |         |           |        |        |
|-----------|-----------|----------------|--------|--------|---------|---------|-----------|--------|--------|
| EN-AW     | DIN       | Si             | Fe     | Cu     | Mn      | Mg      | Cr        | Zn     | Ti     |
| 5083      | AlMg4,5Mn | ≤ 0,40         | ≤ 0,40 | ≤ 0,10 | 0,4-0,1 | 4,0-4,9 | 0,05-0,25 | ≤ 0,25 | ≤ 0,15 |



## 11.2 Mechanické vlastnosti EN AW-5083 podle EN 485-2

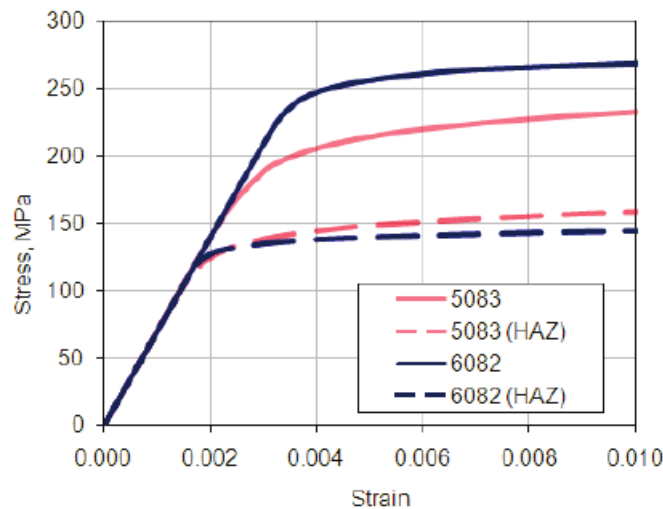
Tabulka 9 Materiálové vlastnosti EN AW-5083 v závislosti na tloušťce polotovaru.

| Specifikovaná tloušťka [mm]: |       | Pevnost v tahu [N/mm <sup>2</sup> ]: |      | R <sub>p0,2%</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]: | Tažnost [%]: | Tvrдость [HBS]: | Minimální poloměr ohybu: |      |
|------------------------------|-------|--------------------------------------|------|--|--------------|-----------------|--------------------------|------|
| nad                          | do    | min.                                 | max. | min.                                     | min.         | 75              | 180°                     | 90°  |
| 0,2                          | 0,5   | 275                                  | 350  | 125                                      | 11           | 75              | 1,0t                     | 0,5t |
| 0,5                          | 1,5   | 275                                  | 350  | 125                                      | 12           | 75              | 1,0t                     | 1,0t |
| 1,5                          | 3,0   | 275                                  | 350  | 125                                      | 13           | 75              | 1,5t                     | 1,0t |
| 3,0                          | 6,0   | 275                                  | 350  | 125                                      | 15           | 75              | -                        | 1,5t |
| 6,0                          | 12,5  | 275                                  | 350  | 125                                      | 16           | 75              | -                        | 2,5t |
| 12,5                         | 50,0  | 275                                  | 350  | 125                                      | 15           | 75              | -                        | -    |
| 50,0                         | 80,0  | 270                                  | 345  | 115                                      | 14           | 73              | -                        | -    |
| 80,0                         | 120,0 | 260                                  | 340  | 110                                      | 12           | 70              | -                        | -    |
| 120,0                        | 150,0 | 255                                  | 330  | 105                                      | 12           | 69              | -                        | -    |

(t udává danou tloušťku materiálu)

## 12. Aplikace materiálových charakteristik v programu MKP

Materiálové pevnostní charakteristiky jsou v programu Abaqus definovány tabulkou hodnot reprezentující tahovou zkoušku materiálu, kdy je oddělen elastický a plastický stav materiálu. Pro převedení tahové zkoušky reálného vzorku z materiálu EN-AW 5083 H111 viz Obr.:21 (křivka 5083), je nutné popsat odděleně elastickou a plastickou část křivky.



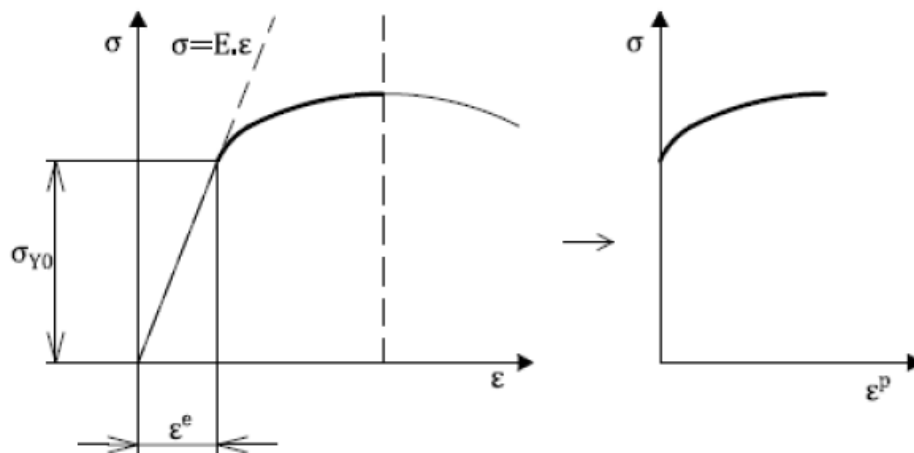
Obr.21: Průběh tahové zkoušky materiálu EN AW-5083, převzato z [3]

Rozdělení křivky nominálního tahového diagramu na elastickou a plastickou ilustruje následující obrázek, Obr.:22. Elastický stav materiálu, který vyhovuje Hookovu zákonu popisují dva parametry, a to Youngův modul a Poissonovo číslo. Kdy Youngův modul je získán jako tangenta směrnice růstu křivky (přímky), tedy např. jako podíl napětí na mezi kluzu a celkové elastické deformace, podle vztahu 43 .

$$E = \operatorname{tg}(\xi) = \frac{\sigma_Y}{\varepsilon_{EL}} \quad (43)$$

Pro získání plastické části křivky je nutné odstranit její část, která odpovídá elastickému chování materiálu a deformaci upravit dle principu aditivního rozkladu deformace (vztah 44). Dále pak je nutné odstranit klesající část tahové křivky, protože od chvíle kdy začne křivka klesat dochází k zaškrcování vzorku a k rozvoji poškození.

$$\varepsilon_{pl} = \varepsilon - \varepsilon_{EL} = \varepsilon - \frac{\sigma_Y}{E} \quad (44)$$



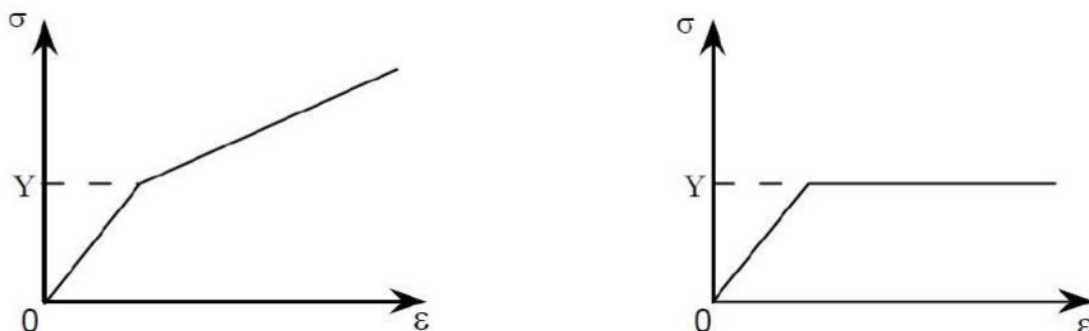
Obr.22: Úprava diagramu tahové zkoušky pro získání plastické křivky, převzato z [4]

## 12.1 Využití materiálových dat z normy EN 485-2

Z důvodu absence naměřených dat tahové zkoušky materiálu EN AW-5083 0/H111, je nutné využít dat z normy EN 485-2 a z nich rekonstruovat přibližný průběh tahové zkoušky.

Norma uvádí viz. Tabulka 9 pro tloušťky materiálu použitých na přepravníku (žluté řádky) hodnoty meze pevnosti v tahu, smluvní meze kluzu, tažnost testovaného vzorku a dále uvádí Youngův modul materiálu. Norma tedy neudává průběh plastické křivky, ale pouze její počáteční a koncový bod, za předpokladu že tažnost pro technické účely označuje plastické prodloužení vzorku.

Pro rekonstrukci tahového diagramu je tedy z dostupných dat viz. Tabulka 9 možné modelovat pouze dva elasto-plastické stavy materiálu, a to stav pružně plastický s lineárním zpevněním a stav pružně ideálně plastický viz Obr.:23.



Obr.23: Diagram tahové zkoušky pružně plastického materiálu s lineárním zpevněním a pružně ideálně plastického materiálu, převzato z [4]

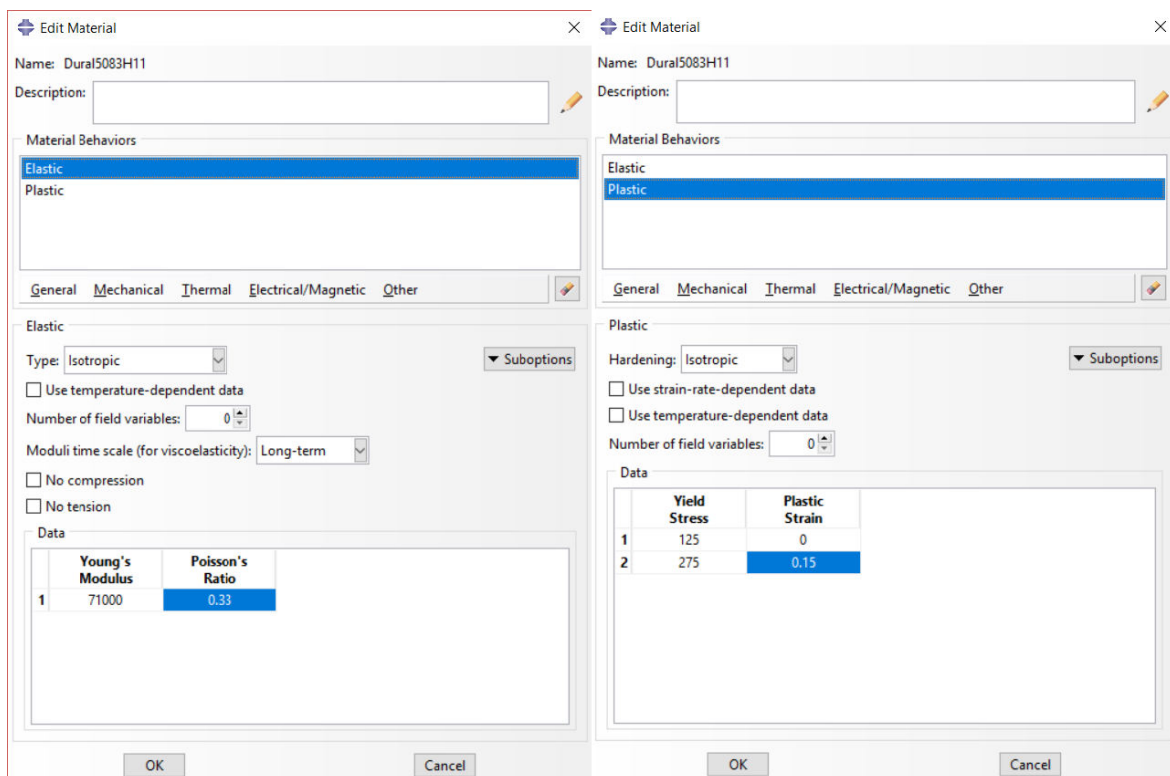
Pro možnost porovnání MKP řešení napjatosti konstrukce se stávajícím stavem navrženým dle 97/23/EC, resp. AD2000 Merkblatt bude pro materiál používáno minimálních pevnostních hodnot které uvádí norma EN 485-2 viz. Tab.:10.

*Tabulka 10 Rozdělení materiálových parametrů pro elastické a plastické chování.*

| <b>Chování materiálu:</b> | <b>Youngův modul:</b><br>[N/mm <sup>2</sup> ] | <b>Poissonovo číslo:</b><br>[1] | <b>Smluvní mez kluzu:</b><br>[N/mm <sup>2</sup> ] | <b>Plastická deformace:</b><br>[1] | <b>Mez pevnosti:</b><br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|---------------------------|---|---------------------------------|---|------------------------------------|--|
| Elastické                 | 71000   | 0,33                            | 125   | -                                  | -  |
| Plastické                 | -   | -                               | 125   | 0,15                               | 275  |

Při porovnání chování materiálu z Obr.:21 (křivka 5083) s chováním modelových elasto-plastických materiálů na Obr.:23, je zřejmé, že je vhodné použít model lineárního pružně-plastického materiálu, protože lépe aproximuje průběh reálné tahové zkoušky.

Výsledné tabulky hodnot pro elastický a plastický stav, v programu MKP viz Obr.:24, jsou při respektování výše uvedených postupů interpretací uvedené Tabulky 10.



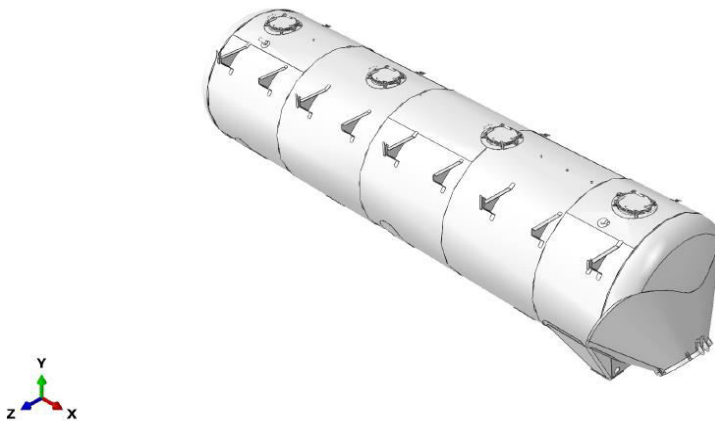
*Obr.24: Aplikace materiálových parametrů v prostředí programu Abaqus 6.14*

## 13. Model cisterny přepravníku pro MKP výpočet

Pro MKP simulaci konstrukce je klíčový správně vytvořený 3D model konstrukce.

### 13.1 Stávající model

Výrobce přepravníku byl poskytnut 3D model cisterny přepravníku NSA 62 viz Obr.:25. Tento model byl však pro řešení metodou MKP zcela nevhodný. Model vykazoval následující nedostatky. Z důvodu že model resp. sestava je výrobcem používána pouze pro konstrukční účely a účely výkresové dokumentace, byly veškeré díly modelovány jako objemová tělesa, což je vzhledem k tomu, že je cisterna konstruována jako skořepina, s ohledem na MKP, zcela chybně. Dále byly mezi jednotlivými prvky sestavy fyzicky ponechány mezery v místech, kde se díly při výrobě svařovaly. Díly u zadního výpustního kužele jsou velice geometricky složité, vzhledem ke komplikovaným průřezům rotačních ploch, a v sestavě nebyly přesně sesazeny. Z výrobního hlediska tento fakt nevádí, protože při výrobě dochází k dolemování dílů tak, aby bylo umožněno je kvalitně svařit a zároveň případné nepřesnosti jsou vyrovnány svarem. Dodaný model cisterny přepravníku nebylo možné upravit a byl proto použit pouze pro odměření rozměrů konstrukce.



*Obr.25: Dodaný 3D model cisterny přepravníku.*

### 13.2 Tvorba nového modelu

Pro MKP analýzu byl vytvořen nový model, který plně respektuje potřeby MKP analýzy viz Obr.:26. Z modelu byly odebrány detaily, u kterých se nepředpokládá vliv na napjatost v tělese cisterny resp. u kterých jsou jejich lokální vrubové účinky zanedbatelné. Konstrukce byla modelována pomocí ploch, kdy plochy modelu reprezentují vždy vnitřní povrch plechu v konstrukci.

Průniky rotačních ploch v zadní části cisterny byly vytvořeny jako geometricky přesné průnikové čáry, bez respektování lemů vytvořených při sesazování dílů před svařováním. Příruby násypných otvorů a vyprazdňovacího otvoru byly vypuštěny a nahrazeny mezikružím u kterého zvýšená tloušťka plechu reprezentuje jejich tuhost. Místa, kde je konstrukce vyztužena přiloženými výztužnými plechy, byla na plochách vyznačena. Výztužné plechy budou obdobně jako příruby otvorů simulovány zvýšenou tloušťkou plechu odpovídající součtu tloušťek základního a výztužného plechu. Příslušné tloušťky plechu nejsou přiřazovány v modelu, jsou definovány následně v programu Abaqus dle tabulky 11.



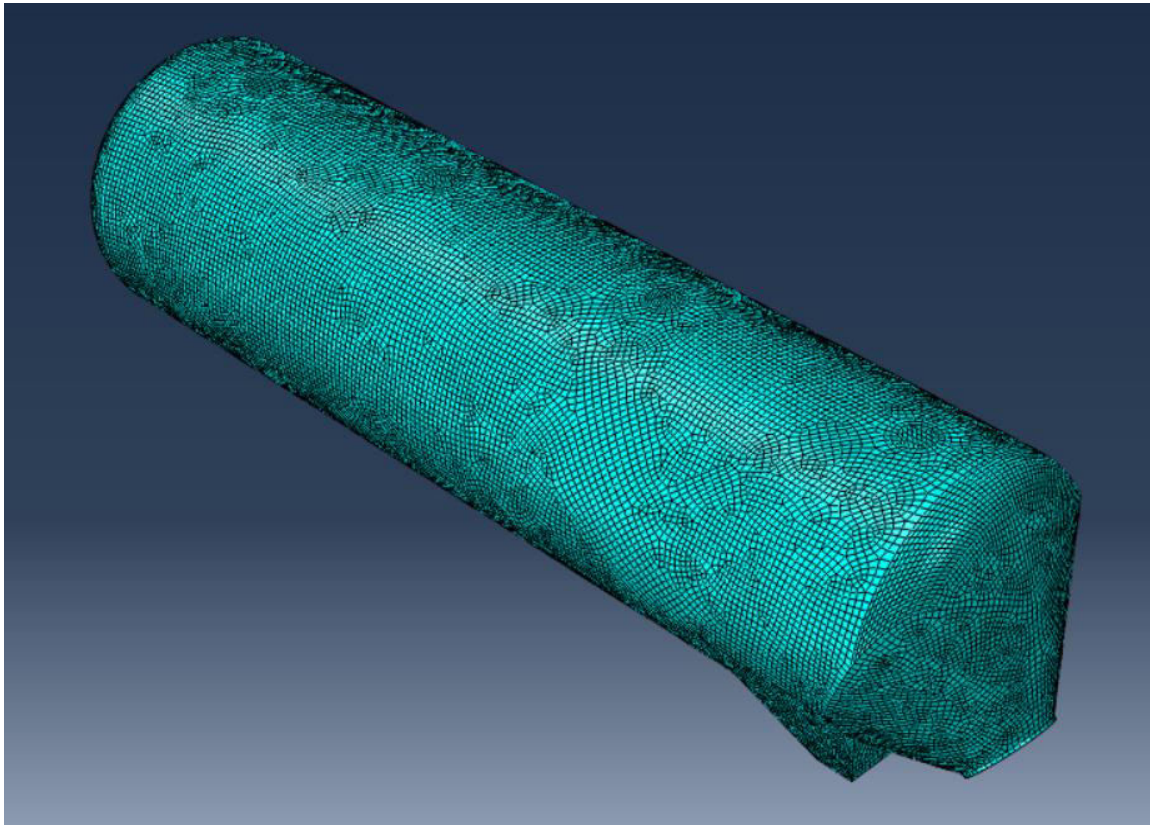
*Obr.26: Vytvořený 3D model cisterny přepravníku.*

*Tabulka 11 Reálné a simulované tloušťky plechu konstrukce cisterny.*

| <b>Díl konstrukce:</b>                        | <b>Reálná tloušťka plechu<br/>[mm]:</b> | <b>Simulovaná tloušťka plechu<br/>[mm]:</b> |
|---|---|---|
| Střední válcová část                          | 5                                       | 5   |
| Klenutá dna                                   | 7-9                                     | 7   |
| Vyprazdňování kužel                           | 5                                       | 5   |
| Opěrné nohy a příslušné<br>výztužné plechy    | 7                                       | 7   |
| Vyprazdňování otvor<br>(příruba)              | 10-24                                   | 20  |
| Násypné otvory                                | 6-30                                    | 20  |
| Spodní výztužné pásy                          | 6                                       | 6   |
| Příruby opěrných nohou                        | 20                                      | 20  |
| Výztužný plech přípoje<br>hydraulického válce | 7                                       | 7   |

## 14. Tvorba a optimalizace sítě

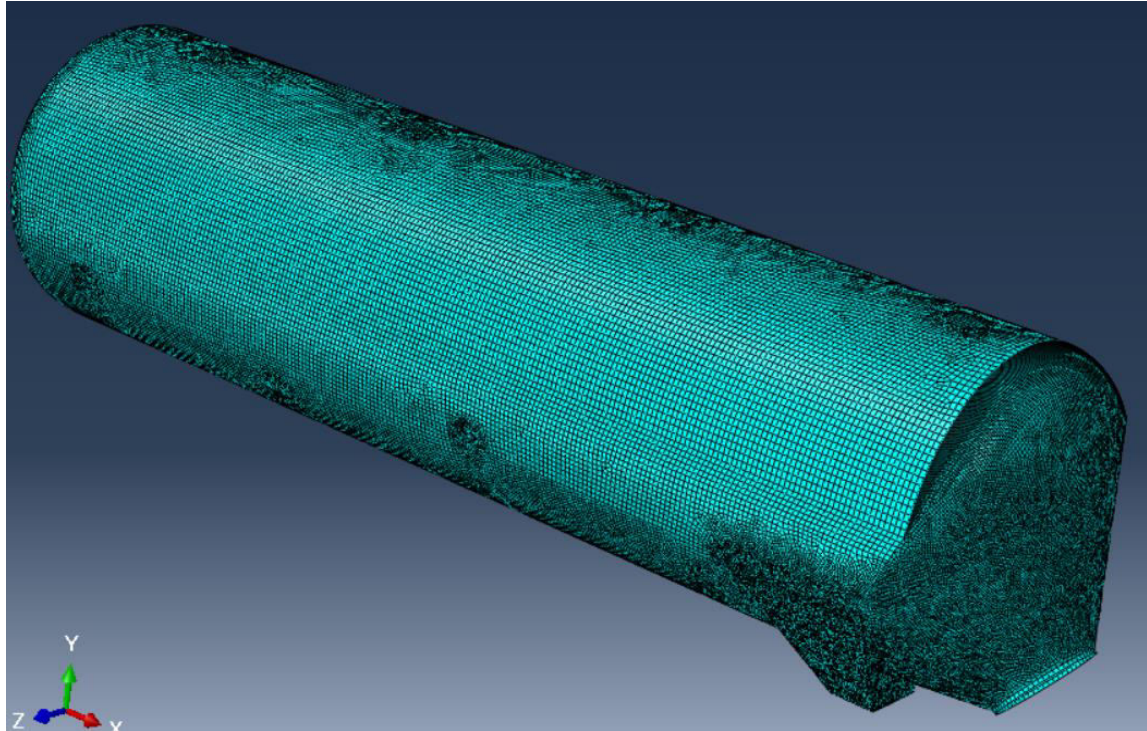
Na vytvořeném modelu cisterny byla pro prvotní spuštění analýzy vytvořena síť automatickým síťováním s elementy o velikosti 40 mm. Tato síť obsahovala elementy s nevyhovující geometrií a nebylo možné pouhým zvolením menší velikosti elementů dosáhnout dostatečně jemné sítě v předpokládaných kritických místech konstrukce. Po odladění zbývajících parametrů výpočtu byla síť upravena. Pro odstranění deformací sítě okolo kruhových kontur modelu, byl model upraven, a síť byla ve střední válcové části vyrovnána. Síť byla dále zjemňována na koncích cisterny, kde je složitá geometrie modelu a v místech uložení konstrukce, kde je možné předpokládat velké lokální namáhání konstrukce. V obou případech byla volena velikost elementů dle potřeby 5 mm až 10 mm.



*Obr.27: Síť vytvořená automatickým síťováním.*

Celkově bylo na modelu cisterny po úpravách a zjemňování sítě vytvořeno 242 220 elementů. Celkový počet elementů byl volen s ohledem na omezení maximálního počtu elementů studentské verze programu Abaqus 6.14 na 250 000. Při vytváření sítě se projevila další výhoda modelování konstrukce jako skořepiny. Na rozdíl od objemového tělesa je na kvalitní vysíťování modelu skořepiny zapotřebí řádově méně elementů.

V případě skořepin je síťována pouze definiční plocha skořepiny a odpadá tak velký počet elementů v objemu materiálu. Elementy umístěné „po tloušťce“ skořepiny reprezentuje volený počet integračních bodů, který nemá vliv na celkový počet elementů sítě.



*Obr.28: Optimalizovaná síť pro snížení imperfekcí elementů.*

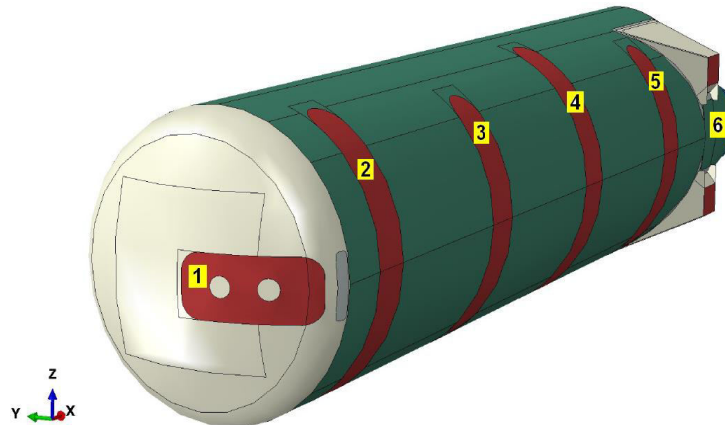
Pro tvorbu sítě byly použity čtyřúhelníkové elementy lineární interpolací. Jedná se o standardní shell S4R elementy určené pro předpokládaná velká napětí v konstrukci. Dle Abaqus 6.14 Documetation [5] se jedná o široce použitelné elementy, avšak s nejdelším výpočetním časem. Vzhledem k faktu že veškeré analýzy pro potřeby této práce byly provedeny v příznivých výpočetních časech, je nad rozsah této práce provádět výběr vhodnějších typů elementů vzhledem k částem konstrukce a k výpočetnímu času.

Takto vytvořená a upravená síť byla použita ve všech následujících MKP výpočtech.



## 15. MKP analýza konstrukce

V následující kapitole je popsána provedená MKP analýza konstrukce cisterny přepravníku ve všech třech zatěžovacích stavech popsanych v kapitole 4. Pro zjednodušení popisu uložení konstrukce cisterny, ilustruje Obr.:30 polohu jednotlivých podpor.

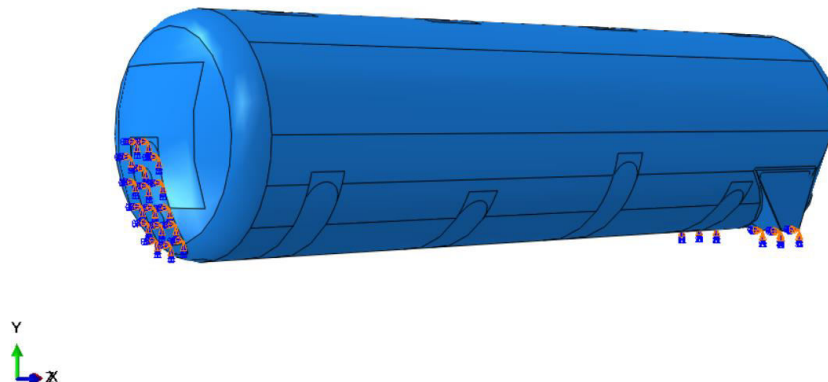


Obr.29: Označení jednotlivých podporových ploch

Barevně označené plochy na obrázku značí plochy modelu pro které byly v programu Abaqus 6.14 přiřazeny jednotlivé podmínky uložení. U podpory 6 jsou obě podstavy opěrných nohou cisterny uvažovány jako jedna podpora pro níž jsou aplikovány příslušné podmínky uložení dle reálného stavu.

### 15.1 MKP analýza zatěžovacího stavu 1 - počátek sklápění:

V prvním zatěžovacím stavu byla konstrukce zkoumána ve chvíli, kdy konstrukci začne sklápět hydraulický válec (podpora1) viz Obr.:29. Vzhledem k tomu, že je konstrukce cisterny na podvozku staticky neurčitě uložena, nedochází k odlehnutí ze všech podpor současně. Nejprve díky průhybu konstrukce dojde k odlehnutí podpory 2 a dále podpory 3,4,5, až je konstrukce podepřena pouze podporou 1 a podporou 6. Tehdy nastává z hlediska uložení konstrukce nejnepříznivější stav v počáteční fázi sklápění. Konstrukce je v této fázi již mírně naklopena, ale pro zjednodušení modelu a výpočtu bylo toto naklopení zanedbáno a pro první zatěžovací stav byla konstrukce uvažována ve vodorovné poloze. Uložení konstrukce bylo uvažováno dle Obr.:30, kdy podpora 1 působí na konstrukci z povahy provedení pístu, reakcí pouze ve svislém směru.(osy Y). Podpora 6 umožňuje konstrukci pouze rotaci kolem osy Z a působí tak na konstrukci reakcemi ve všech třech osách a dvěma reakčními momenty.

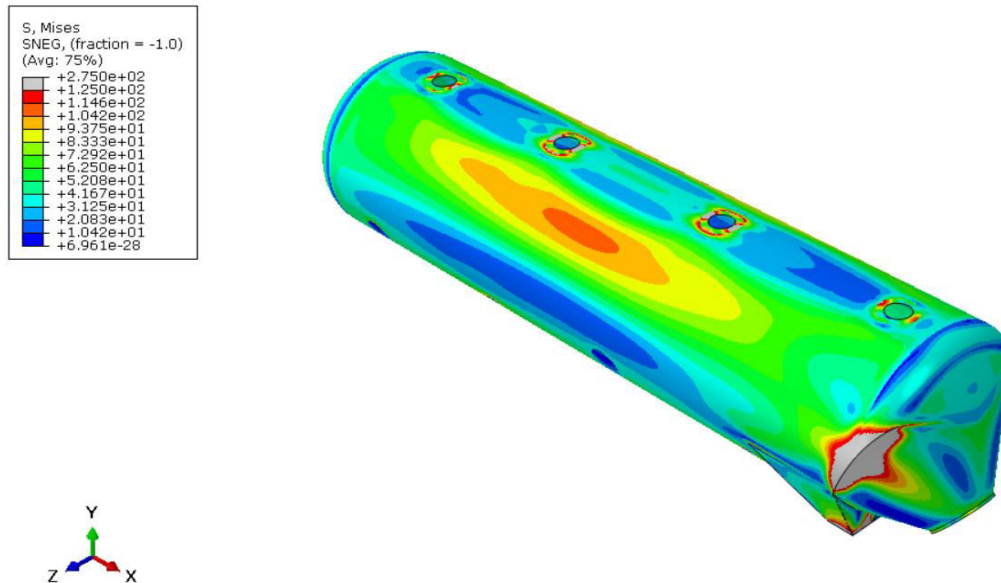


*Obr.30: Uložení konstrukce v programu Abaqus*

Konstrukce byla nejprve analyzována pro materiál s vlastnostmi dle Tabulky 10, kdy byl pro prvotní výpočet použit materiálový model dle kapitoly 12 pro pružně-ideálně plastický materiál. Výpočet takto nastaveného modelu nevedl k žádnému výsledku z důvodu kolapsu konstrukce. Došlo ke vzniku tak rozsáhlé oblasti, kde byla překročena mez kluzu materiálu, že došlo ke zborcení středové části konstrukce. Modelovaný materiál tedy nebyl schopen snést působící zatížení. Materiálový model byl pro další výpočet upraven. Materiál byl modelován jako pružně-plastický s lineárním zpevněním s materiálovými parametry shodnými s prvotním výpočtem. Pro takto nastavený materiálový model výpočet proběhl, s výsledkem dle Obr.:31.

Na Obr.:31 je možné vidět výsledné pole redukovaného HMM napětí v konstrukci cisterny. Na konstrukci lze nalézt dvě významná místa, kde je dosaženo velkých hodnot redukovaného napětí vzhledem k mezi kluzu materiálu. Prvním takovým místem je středová partie válcové části cisterny, kde je, vzhledem k charakteru konstrukce a zatížení, zvýšené namáhání předpokládatelné. Druhým významným místem je zadní část cisterny, konkrétně místo přechodu mezi středovou válcovou částí a zadním vyprazdňovacím kuželem. Zde je vysokých napětí dosaženo z důvodu porušení skořepinového stavu konstrukce. Napojení válcové části a vyprazdňovacího kužele není, z povahy geometrie průniku obou ploch, po celé délce průnikové čáry hladké. Dalším faktorem zvyšujícím namáhání daného místa je lokální konstrukční snížení příčné tuhosti konstrukce (rovina ZY viz Obr.:31). Výsledná svislá reakce v podpoře 6 viz Obr.:31 je přenášena podpěrnými nohama přes příslušné výztužné plechy na válcovou část konstrukce.

Podpěrné nohy a příslušné výztužné plechy jsou vyrobeny z plechu tloušťky dle Tabulky 11 a jsou v rovině ZY velmi tuhé a jsou schopny svislou reakci přenést. Svislá reakční síla, přenášená na válcovou část, vyrobenou z výrazně slabšího plechu viz Tab.11, v kombinaci s lokálním porušením membránového stavu a absencí vyztužení pomocí klenutého dna, tak způsobuje vysoké namáhání daného místa a tím i vysoké hodnoty redukovaného napětí.



Obr.31: Výsledné pole redukovaného HMM napětí ( $R_{p0,2} = 125\text{MPa}$ )

Z výše uvedených závěrů je zřejmé, že konstrukce je pro uvažované materiálové vlastnosti dle normy EN 485-2, při maximálním povoleném zatížení, krajně namáhána a projevují se u ní plastické deformace. U reálné konstrukce se však nikdy v průběhu výroby a používání neobjevily defekty způsobené plastickými deformacemi.

Z tohoto důvodu byly získány inspekční certifikáty dle EN 10204 3.1 materiálu reálně používaného pro stavbu konstrukce viz Obr.:32. Z Obr.:32 lze vyčíst, že dodavatel materiálu dodává materiál s o 32% vyšší mezí kluzu a s o 10% vyšší mezí pevnosti než ho zavazuje norma. Hodnoty materiálových parametrů u výrobce konstrukce v současnosti nepodléhají kontrole, je pouze kontrolována shoda s normou EN 485-2 resp. AD2000 Merkblatt.

Z tohoto důvodu je materiálové vlastnosti nutné uvažovat v intervalu s minimem které udává norma EN 485-2 a maximem udaným inspekčními certifikáty výrobce viz Obr.:32.

## Inspection Results

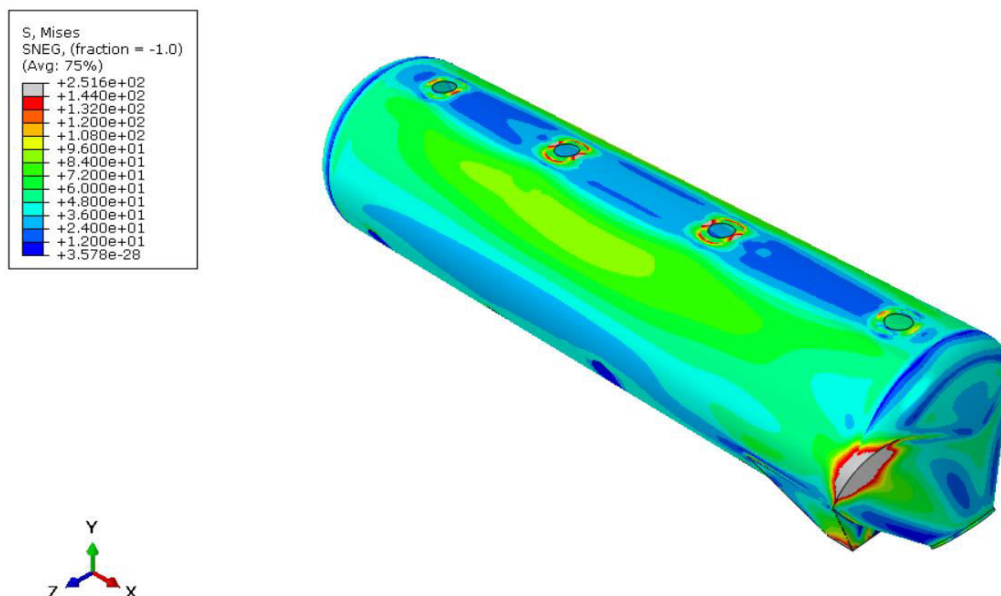
| Call-No.   | Mechanical Properties |        |      |
|------------|-----------------------|--------|------|
|            | Rp0,2 MPa             | Rm MPa | A5 % |
| 6001393008 | 144                   | 301    | 24   |

## Chemical Composition (wt.%) of Batch(es)

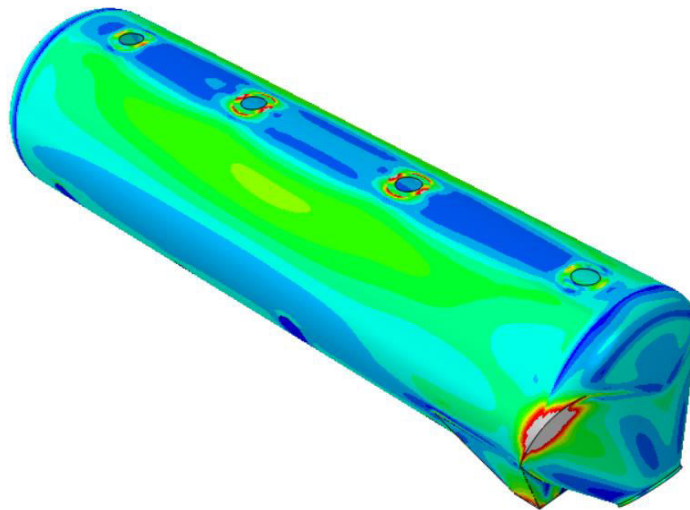
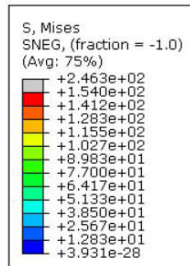
| Cast Batch No. | Si % | Fe % | Cu % | Mn % |
|----------------|------|------|------|------|
| min            | -    | -    | -    | 0,   |
| max            | 0.40 | 0.40 | 0.10 | 1    |
| 100289890 2014 | 0.11 | 0.25 | 0.02 | 0,   |

Obr.32: Část inspekčního certifikátu materiálu EN AW-5083 0/H111

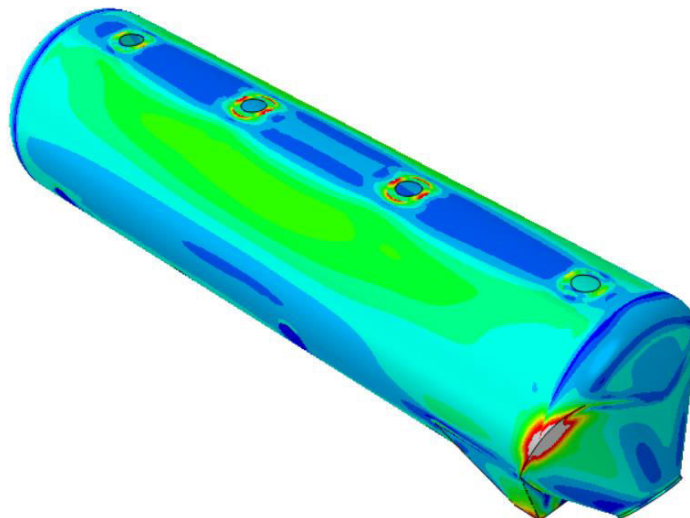
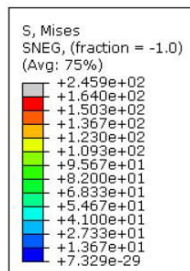
Proto byly provedeny MKP simulace s postupně se měnícími se parametry materiálu, kdy byla zachována hodnota tažnosti materiálu, ale mez kluzu a mez pevnosti byly shodně snižovány o 10 a 20 MPa. Výsledné průběhy redukovaného napětí jednotlivých simulací zobrazují Obr.: 33 až 35.



Obr.33: Výsledné pole redukovaného HMH napětí ( $R_{p0,2} = 144 \text{ MPa}$ )



Obr.34: Výsledné pole redukovaného HMH napětí ( $R_{p0,2} = 154\text{MPa}$ )



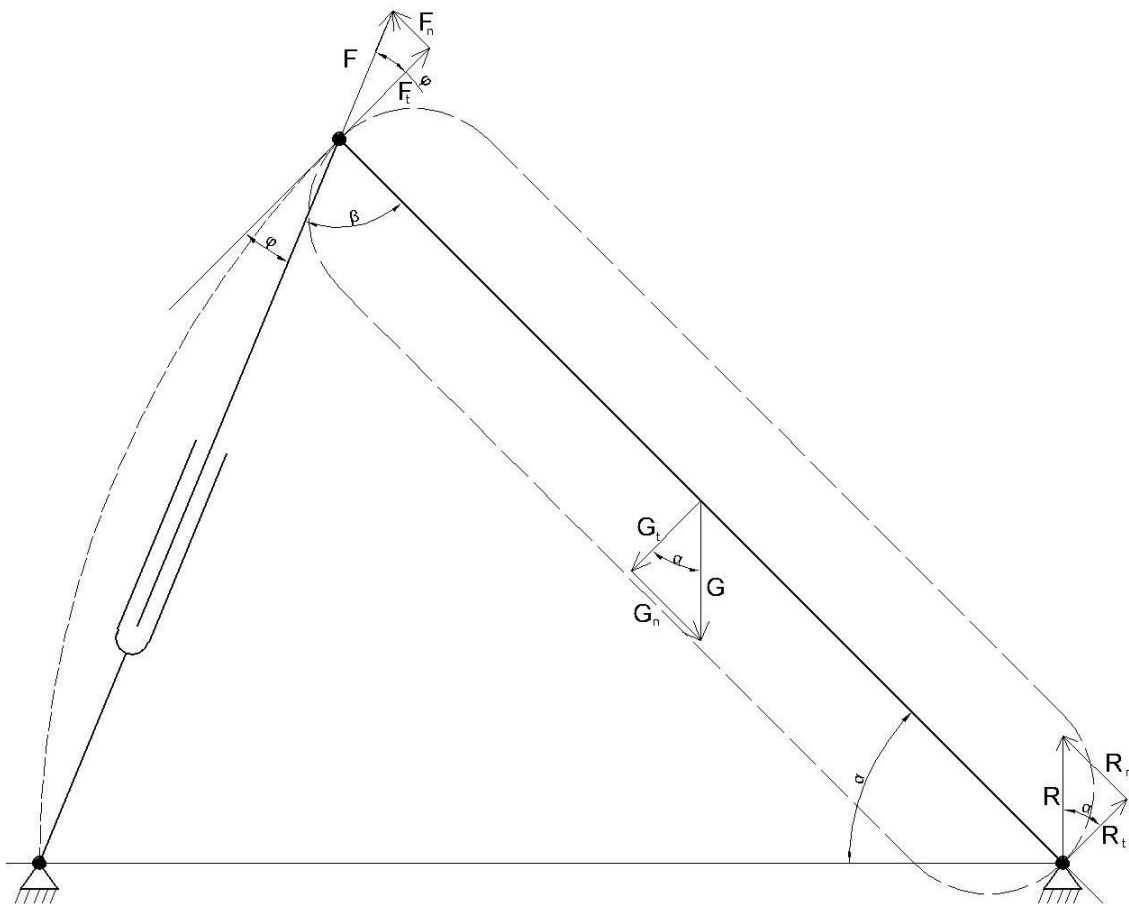
Obr.35: Výsledné pole redukovaného HMH napětí ( $R_{p0,2} = 164\text{MPa}$ )

Na obrázcích Obr.:33 až 35 lze pozorovat velikost redukovaného HMH napětí vždy v relaci k mezi kluzu modelovaného materiálu. Z obrázků je zřejmá změna redukovaného napětí ve dvou výše uvedených sledovaných místech vzhledem k měnícím se materiálovým parametrům. S rostoucí hodnotou napětí na mezi kluzu postupně klesá možnost dosažení plastického stavu ve středové části konstrukce a pro materiál s vlastnostmi dle certifikátu viz Obr.:32 nepředstavuje tato oblast riziko.

U druhé sledované části konstrukce (přechod mezi středovou válcovou částí a zadním vyprazdňovacím kuželem) lze pozorovat s rostoucí hodnotou napětí na mezi kluzu zmenšování oblasti, kde bylo dosaženo plastického stavu materiálu, ale tato oblast ani pro materiál s vlastnostmi dle inspekčního certifikátu viz Obr.:32 nevymizí a představuje tak pro konstrukci riziko.

## 15.2 MKP analýza zatěžovacího stavu 2 - konec sklápění

V druhém zatěžovacím stavu byla konstrukce zkoumána ve chvíli, kdy hydraulický válec sklápění dosáhne své krajní polohy a konstrukce je plně sklopena viz Obr.:7. Konstrukce je uložena na podporách 1 a 6 viz Obr.:29, kdy veškeré silové účinky materiálu v konstrukci přenáší právě tyto podpory na rám přepravníku. Na Obr.:36 je uveden zjednodušený silový rozbor situace.



*Obr.36: Zjednodušený silový rozbor sklopené konstrukce*

Z následujících rovnic lze určit reakční síly v podporách 1 a 6, kdy je uvažován maximální úhel sklopení přepravníku  $\alpha = 45^\circ$  a celková tíha naložené cisterny přepravníku  $G = 330 \text{ kN}$ .

$$T: R_T + F_T - G_T = 0 \quad (45)$$

$$N: R_N + F_N - G_N = 0 \quad (46)$$

$$M_R: F_T \cdot l_P - \frac{G \cdot l_P}{2} \cdot \cos \alpha = 0 \quad (47)$$

$$\alpha = 45^\circ; \beta = \frac{180^\circ - \alpha}{2}; \gamma = 90^\circ - \beta \quad (48)$$

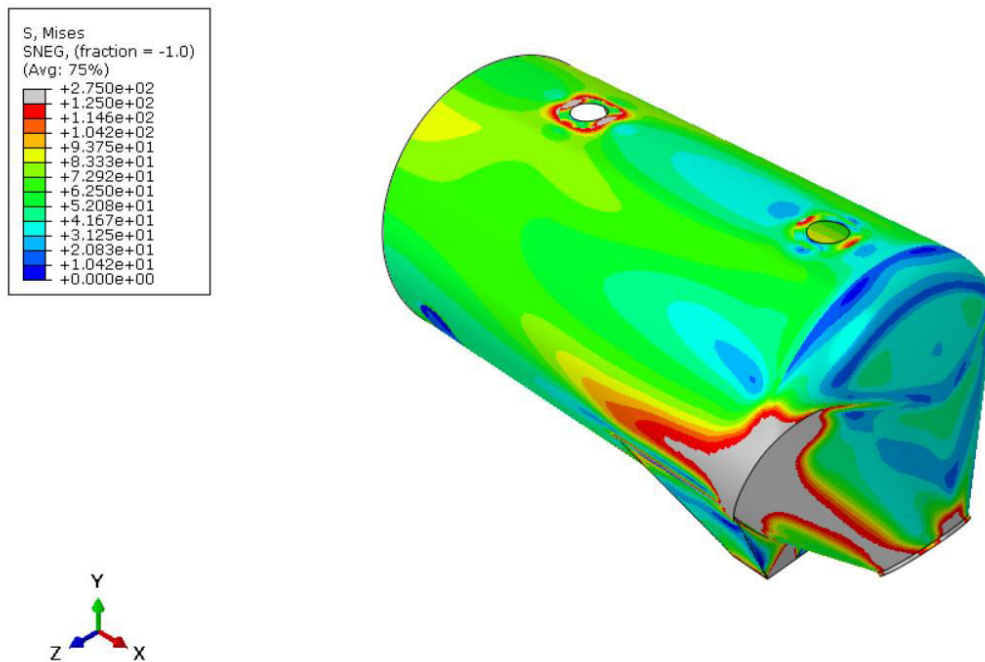
Řešením rovnic lze vyjádřit potřebné reakce v podpoře 6.

$$R_T = \frac{G}{2} \cdot \cos \alpha = \frac{G}{2} \cdot \cos(45^\circ) = \frac{\sqrt{2}}{4} \cdot G = 116,67 \text{ kN} \quad (49)$$

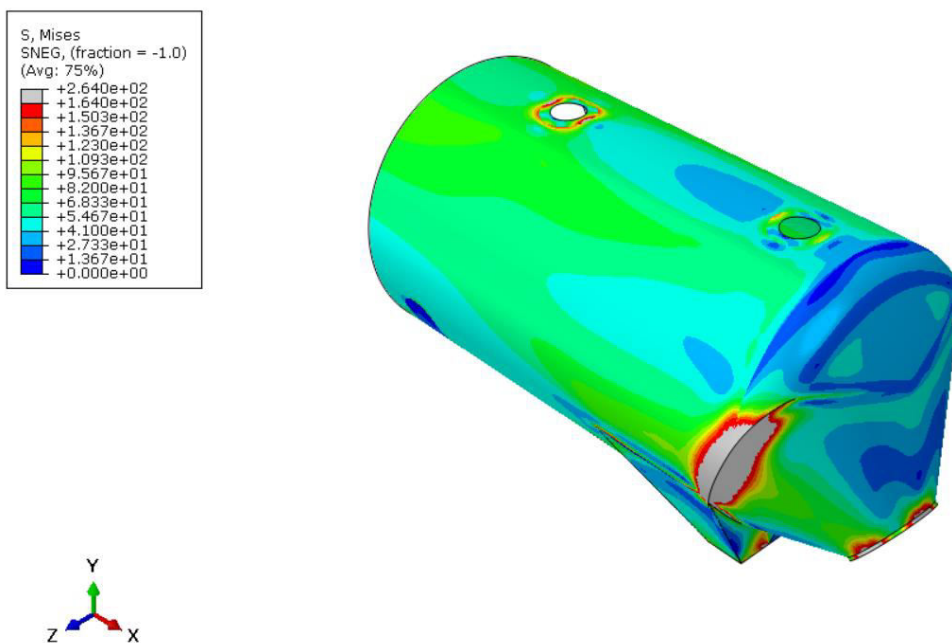
$$R_N = R_T \cdot \operatorname{tg} \alpha = R_T \cdot \operatorname{tg}(45^\circ) = R_T = 116,67 \text{ kN} \quad (50)$$

Vzhledem k tomu, že je v tomto stavu předpokládáno zvýšené namáhání konstrukce cisterny u zadních opěrných nohou (podpora 6 viz Obr.:29) a zároveň by byla velmi obtížná aplikace tlakového pole sypkého materiálu odvozeného výše, byl vytvořen zjednodušený, dílčí model zadní části konstrukce cisterny. Tento model byl při MKP analýze zatěžován reakčními silami  $R_n$  a  $R_t$  viz. Obr.: 36, kdy tyto síly působily na podporu 6 viz. Obr.:29.

Konstrukce byla analyzována pro materiál lineární pružně-plastický s vlastnostmi dle Tab.10, a dále na základě výše uvedených zjištění s vlastnostmi dle Obr.:32 udanými inspekčním certifikátem. Pro takto nastavené materiálové modely MKP výpočet proběhl, s výsledkem dle Obr.:37 a Obr.:38.



Obr.37: Výsledné pole redukovaného HMH napětí ( $R_{p0,2}=125\text{MPa}$ )



Obr.38: Výsledné pole redukovaného HMH napětí ( $R_{p0,2}=164\text{MPa}$ )

Na Obr.:37 a Obr.:38 je možné vidět výsledné pole redukovaného HMH napětí v konstrukci cisterny vždy v relaci k mezi kluzu modelovaného materiálu. Na konstrukci lze nalézt v tomto zatěžovacím stavu jedno významné místo, kde je dosahováno velkých hodnot redukovaného napětí vzhledem k mezi kluzu materiálu.





Tímto významným místem je, tak jako v prvním zatěžovacím stavu, zadní část cisterny, konkrétně místo přechodu mezi středovou válcovou částí a zadním vyprazdňovacím kuželem. Důvody dosažení plastického stavu materiálu v daném místě byly popsány a rozebrány v prvním zatěžovacím stavu.

Z obrázků je zřejmá změna redukováného napětí ve výše uvedeném sledovaném místě vzhledem k měnícím se materiálovým parametrům. U sledované části konstrukce (přechod mezi středovou válcovou částí a zadním vyprazdňovacím kuželem) lze pozorovat pro materiál s  $R_{p0,2}=125$  MPa rozsáhlou oblast, kde bylo dosaženo plastického stavu materiálu. S rostoucí hodnotou napětí na mezi kluzu, lze pozorovat zmenšování dané oblasti, ale tato oblast ani pro materiál s vlastnostmi dle certifikátu viz Obr.:32 ( $R_{p0,2}=164$  MPa) nevymizí a představuje tak pro konstrukci riziko.

;

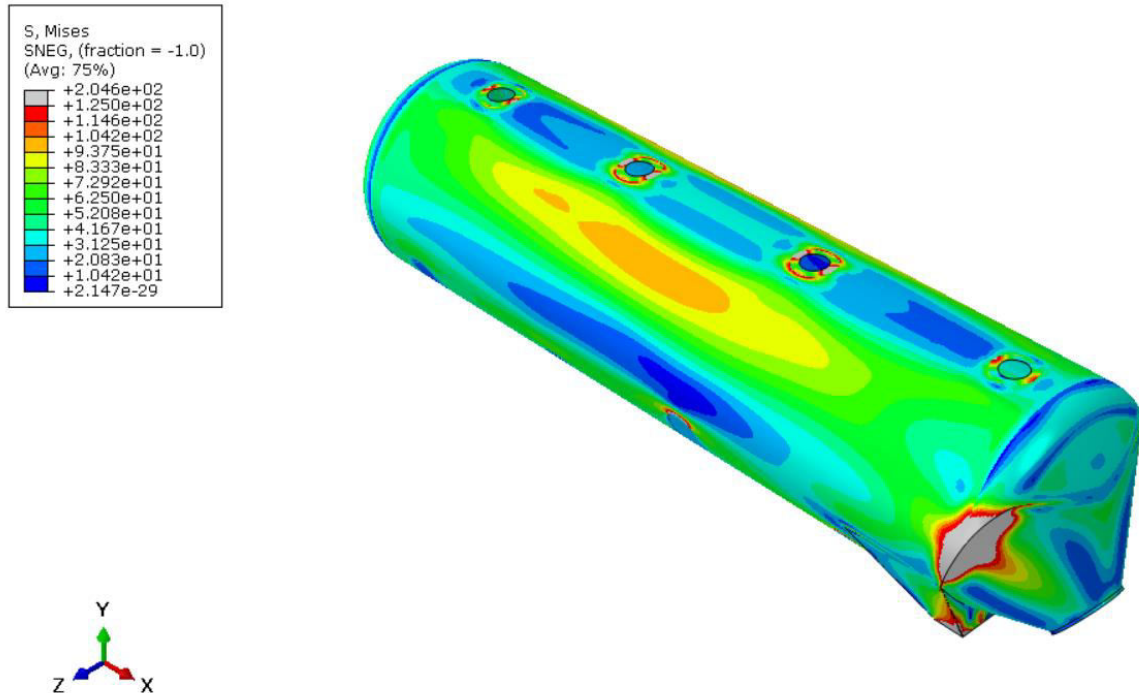
### 15.3 MKP analýza zatěžovacího stavu 3 - tlaková zkouška

Dalším analyzovaným zatěžovacím stavem byla tlaková zkouška nádoby. Při výrobě cisterny je po dokončení svářecích prací provedena tlaková zkouška, která je prováděna z bezpečnostních důvodů vodou dle normy AD2000 Merkblatt (pro minimalizování akumulované energie v prostoru cisterny během tlakové zkoušky) o přetlaku 0,3 MPa. Důvodem proč je možné tlakovou zkoušku považovat za krajní případ namáhání nádoby je fakt, že celková váha vody uvnitř cisterny činí 62000kg což je téměř 200% maximální povolené hmotnosti nákladu.

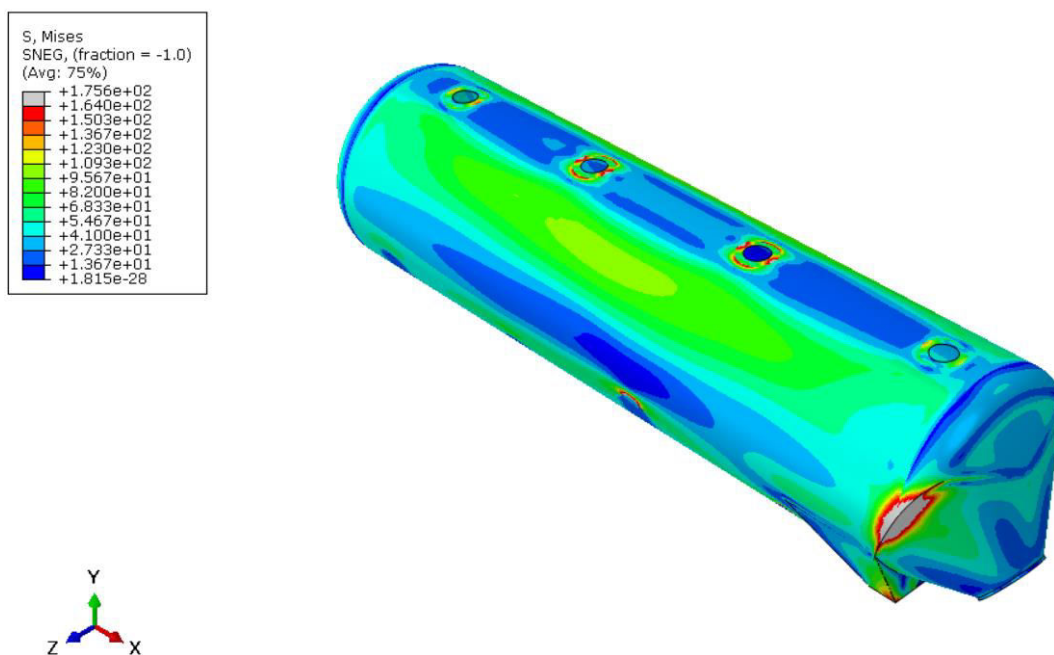
Cisterna je při tlakové zkoušce podepřena identicky jako v přepravní poloze. Uložení konstrukce bylo uvažováno dle Obr.:29 na podporách 2,3,4,5 a 6, kdy podpora 1 se na podepření cisterny nepodílí, protože hydraulický obvod sklápěcího válce není vybaven hydraulickým zámkem a nelze proto s jistotou určit zda píst působí na konstrukci cisterny jako podpora či nikoli. Podpora 6 umožňuje konstrukci pouze rotaci kolem osy Z a působí tak na konstrukci reakcemi ve všech třech osách a dvěma reakčními momenty. Podpory 2,3,4 a 5 jsou uvažovány jako obecné s reakčním silovým účinkem pouze ve směru osy Y .

Konstrukce byla analyzována pro materiál lineární pružně-plastický s vlastnostmi dle Tab.10, a dále na základě výše uvedených zjištění s vlastnostmi dle Obr.:32 udanými inspekčním certifikátem. Pro takto nastavené materiálové modely MKP výpočet proběhl, s výsledkem dle Obr.:39 a Obr.:40, kde je možné vidět výsledné pole redukovaného HMM napětí v konstrukci cisterny. Na konstrukci lze nalézt dvě významná místa, kde je dosaženo velkých hodnot redukovaného napětí vzhledem k mezi kluzu materiálu. Prvním místem je středová partie válcové části cisterny, kde je zvýšené namáhání, vzhledem k charakteru konstrukce a zatížení, předpokladatelné. Druhým významným místem je zadní část cisterny, konkrétně místo přechodu mezi středovou válcovou částí a zadním vyprazdňovacím kuzelem. Důvody dosažení plastického stavu materiálu v daném místě byly popsány a rozebrány v prvním zatěžovacím stavu.

Z Obr.:39 a Obr.:40 je zřejmá změna redukovaného napětí ve dvou výše uvedených sledovaných místech vzhledem k měnícím se materiálovým parametrům.



Obr.39: Výsledné pole redukovaného HMM napětí ( $R_{p0,2}=125\text{MPa}$ )



Obr.40: Výsledné pole redukovaného HMM napětí ( $R_{p0,2}=164\text{MPa}$ )

S rostoucí hodnotou napětí na mezi kluzu postupně klesá možnost dosažení plastického stavu ve středové části konstrukce a pro materiál s vlastnostmi dle inspekčního certifikátu viz.Obr.:32 nepředstavuje tato oblast riziko. U druhé sledované části konstrukce (přechod mezi středovou válcovou částí a zadním vyprazdňovacím kuželem) lze pozorovat s rostoucí hodnotou napětí na mezi kluzu zmenšování oblasti, kde bylo dosaženo plastického stavu materiálu, ale tato oblast ani pro materiál s vlastnostmi dle Obr.:32 nevymizí a představuje, tak jako v předchozích stavech zatížení, riziko pro konstrukci.

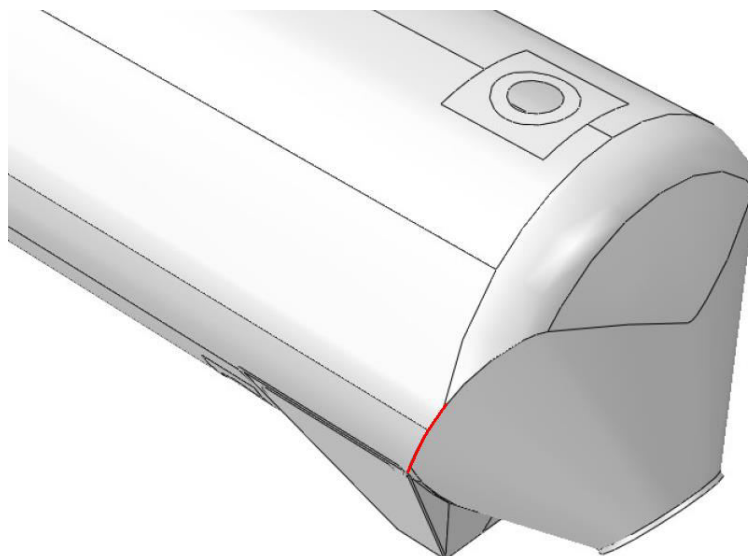
## 16. Návrh opatření ke snížení napjatosti kritických míst

Výše uvedené závěry byly předloženy výrobci přepravníku a výrobce zadal podmínky, které by mělo výsledné řešení splňovat. Jednalo se především o minimální navýšení hmotnosti konstrukce a jednoduchou implementaci upravené konstrukce cisterny do výroby. Hmotnost přepravníku je pro výrobce natolik důležitým faktorem, že byl zpracován výpočet nárůstu hmotnosti upravené konstrukce oproti konstrukci stávající.

### 16.1 Návrh konstrukčních úprav

Z výsledků MKP analýzy všech navržených zatěžovacích stavů je zřejmé, že při uvažování materiálových parametrů dle inspekčního certifikátu viz Obr.:32 (tj. Pro materiál reálně používaný pro výrobu) je nutné provést konstrukční úpravy jen pro zadní část cisterny, konkrétně místo přechodu mezi středovou válcovou částí a zadním vyprazdňovacím kuželem. Tyto předpoklady lze považovat za oprávněné pokud výrobce bude v sledovat hodnoty materiálových parametrů na inspekčních certifikátech a bude tak kontrolována hodnota meze kluzu materiálu.

V kapitole 15 byly identifikovány možné příčiny vzniku rozsáhlé oblasti v zadní části konstrukce, kde byla překročena mez kluzu materiálu. Tato oblast pravděpodobně vzniká za společného působení dvou faktorů. Prvním faktorem je porušení skořepinového stavu konstrukce. Napojení válcové části a vyprazdňovacího kužele není, z povahy geometrie průniku obou ploch, po celé délce průnikové čáry hladké a vzniká tak v místě napojení ostrý přechod.



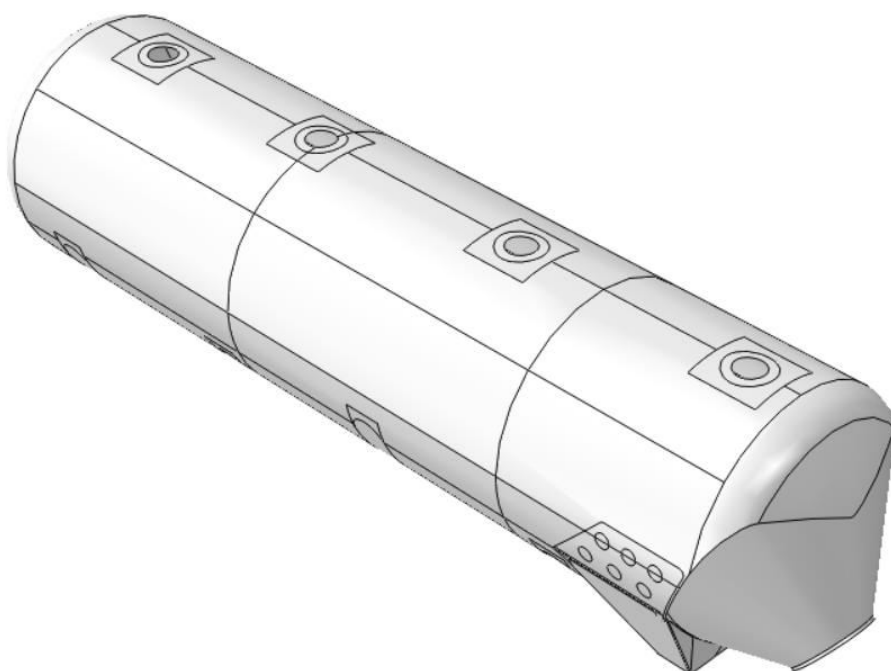
*Obr.41: Vyznačení místa se sníženou tuhostí*

Druhým faktorem zvyšujícím namáhání daného místa je lokální konstrukční snížení příčné tuhosti konstrukce (rovina ZY viz Obr.:33). Toto snížení tuhosti je o to závažnější, že je dané místo namáháno reakcemi vyvozenými zadními opěrnými nohami (podpora 6 viz Obr.:32), které u prvních dvou zatěžovacích stavů konstrukce přenášejí významnou část tíhy nákladu.

Pro volbu konstrukčního řešení, které by oba tyto faktory eliminovalo byl proveden přibližný rozbor distribuce reakčních sil (reakce ve směru Y) z podpory 6 viz. Obr.:32.

Reakce z podpory 6 je přenášena opěrnými nohami na válcovou část cisterny pomocí tří výztužných (podkladních) plechů. Tyto výztužné plechy jsou na konstrukci umístěny z důvodu zesílení spoje mezi opěrnými nohami a válcovou částí cisterny, kdy přímé napojení by nebylo možné z důvodu rozdílných tloušťek materiálu jednotlivých dílů a z toho vyplývajících problémů. Tyto plechy mají ovšem pouze lokální výztužný účinek.

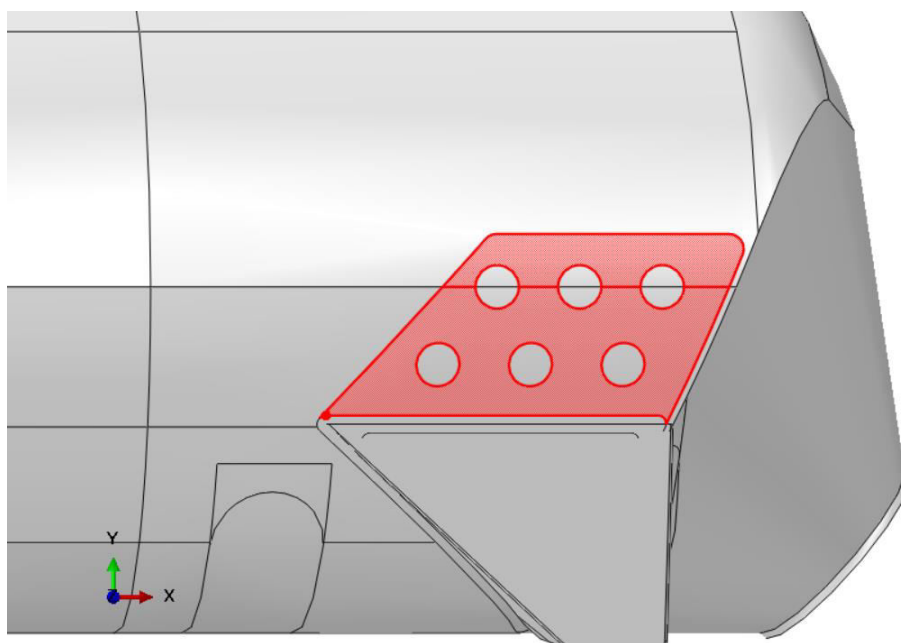
Po přenesení reakční síly na válcovou část nádoby dochází nutně k její distribuci po průřezu této části ve formě posouvající síly. Z důvodu přenášení reakční síly z podpory 6 u konce válcové části je nutné zajistit, aby byla tato část uzavřena prvkem s významným výztužným účinkem (sferoanuloidním dnem), který zajistí kruhovitost průřezu válcové části i při plném zatížení. Stávající konstrukce přepravníku je řešena tak, že je válcová část konstrukce uzavřena pouze segmentem sferoanuloidního dna a tak dochází k situaci, kdy část válcové části není vyztužena ani sferoanuloidním dnem ani výztužnými plechy viz Obr.:41 (červeně označeno). U této oblasti tak dochází při přenášení reakční síly ke zvýšenému namáhání vlivem lokálního snížení tuhosti válcového pláště.



*Obr.42: Upravená konstrukce cisterny přepravníku.*

Nové řešení konstrukce tedy je nutné provést tak aby byla tato oblast se sníženou tuhostí vyztužena. Nejjednodušším a zároveň minimalistickým řešením, které tedy splňuje základní požadavky výrobce, je úprava tvaru stávajících výztužných plechů, resp. jejich prodloužení tak, aby tam, kde končí výztužný účinek segmentu sferoanuloidního dna, začínal účinek výztužných plechů viz Obr.:41.

Dle výše uvedených předpokladů byl navržen tvar prodloužení výztužných plechů, kopírující přechodovou křivku. Pro zajištění spolupůsobení výztužného plechu a válcové části konstrukce, bylo navrženo její spřažení pomocí koutových svarů provedených v šesti kruhových otvorech. Výztužné plechy se ve směru osy Y viz Obr.:42 nepřekrývají s výběžky sferoanuloidního dna, aby nevznikl uzel, který by negativně působil na konstrukci z důvodu styku pěti svarů.



*Obr.43: Upravená konstrukce cisterny přepravníku - detail.*

Toto navržené konstrukční řešení bylo následně analyzováno ve všech třech navržených zatěžovacích stavech cisterny přepravníku.

## 16.2 Výpočet navýšení celkové hmotnosti přepravníku

Na přání výrobce byl vypracován výpočet navýšení celkové hmotnosti přepravníku.

Navýšení plochy jednoho výztužného plechu  $S_{NAV} = 5635 \text{ cm}^2$ .

Celková přidaná hmotnost:

$$M_{NAV} = 2 \cdot S_{NAV} \cdot t_{Plechů} \cdot \rho_{5083} = 2 \cdot 5635 \cdot 0,7 \cdot 0,0027 = 21,3 \text{ kg} \quad (51)$$

Je nutné také uvažovat hmotnost svarového kovu v koutových svarech mezi válcovým pláštěm a výztužnými plechy. Tato hmotnost byla stanovena na  $M_{Svar} = 4,5 \text{ kg}$ .

Celkové navýšení hmotnosti tedy činí:

$$M_{CELKOVE} = M_{NAV} + M_{Svar} = 21,3 + 4,5 = 25,8 \text{ kg} \quad (52)$$

Porovnání k celkové provozní hmotnosti přepravníku:

$$\frac{M_{CELKOVE}}{M_{Přepřavníku}} = \frac{25,8}{6900} = 0,00374 \approx 0,374\% \quad (53)$$

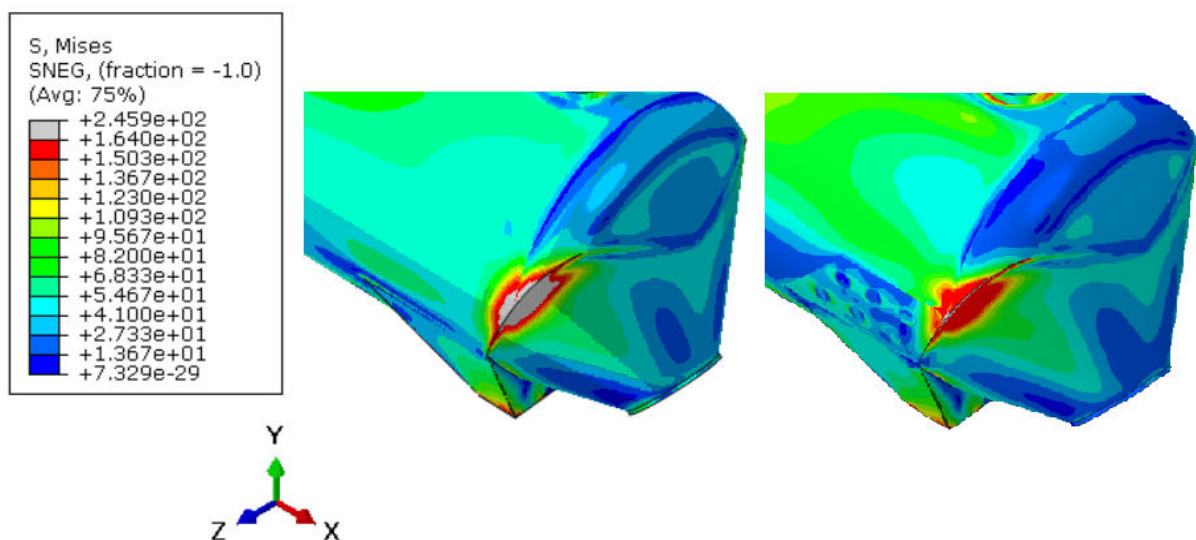
Toto navýšení vzhledem k celkové hmotnosti přepravníku činí 0,374 %.

## 17. MKP analýza upravené konstrukce

V následující kapitole bude provedena MKP analýza upravené konstrukce cisterny přepravníku ve všech třech zatěžovacích stavech popsanych v kapitole 4.

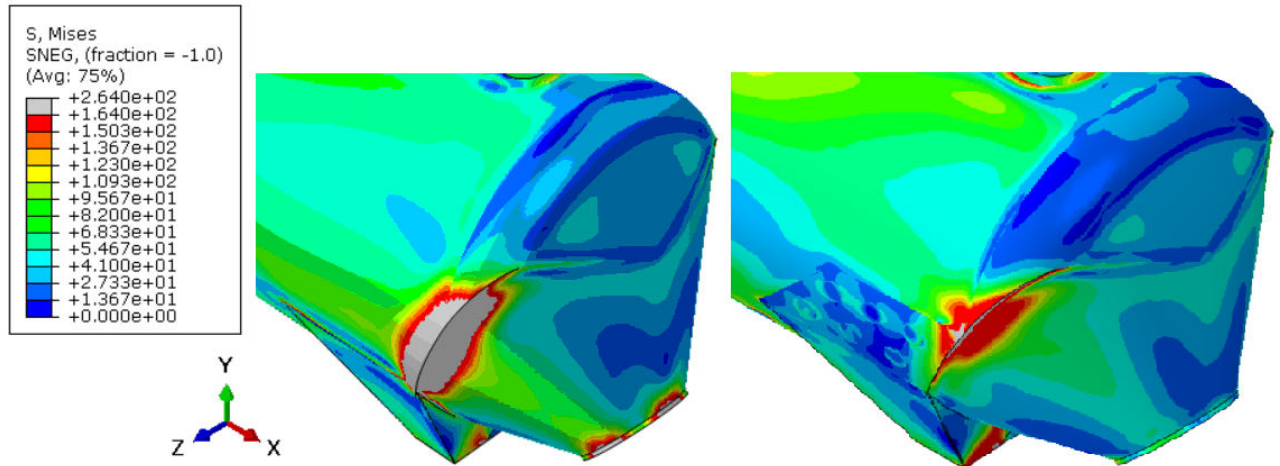
### 17.1 Způsob porovnání MKP analýz

Pro zjednodušení a přehlednost byly na následujících obrázcích ( Obr.:44 až Obr.:46) porovnány výsledky MKP analýzy pro tři navržené zatěžovací stavy konstrukce, a to jak pro stávající konstrukci, tak pro konstrukci upravenou. Všechny porovnávací analýzy byly provedeny pro materiál reálně používaný při výrobě, s vlastnostmi dle Obr.:32 ( $R_{p0,2}=164\text{MPa}$ ) a byl použit model pružně plastického materiálu s lineárním zpevněním. Porovnávání bylo zaměřeno na sledované místo v zadní části cisterny, které bylo řešeno při úpravě konstrukce.

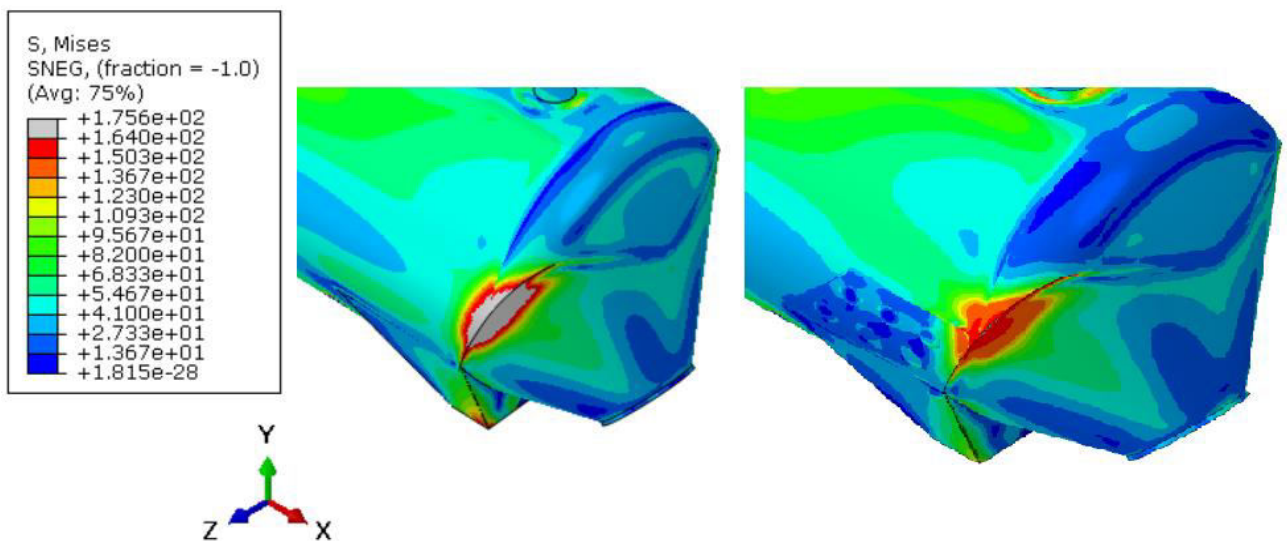


Obr.44: Porovnání pole redukovaného napětí stávající a upravené konstrukce  
 (zatěžovací stav 1 – počátek sklápění)





*Obr.45: Porovnání pole redukovaného napětí stávající a upravené konstrukce  
(zatěžovací stav 2 – konec sklápění)*



*Obr.46: Porovnání pole redukovaného napětí stávající a upravené konstrukce  
(zatěžovací stav 3 – tlaková zkouška)*

## 17.2 Zhodnocení konstrukčních úprav

Na všech porovnáních (Obr.: 44 až Obr.:46) lze pozorovat výrazné omezení až eliminaci oblasti, kde dochází k překročení meze kluzu materiálu. V těsné blízkosti průnikové křivky, střední válcové části a zadního vyprazdňovacího kužele, lze v prvním a druhém zatěžovacím stavu (Obr.: 44 až Obr.:45) nalézt velice malé oblasti, kde byla překročena mez kluzu materiálu.

Tyto lokální koncentrace napětí jsou výsledkem ostrého přechodu na průnikové křivce daného, použitého, 3D modelu. Na reálné konstrukci nemají tyto koncentrace napětí opodstatnění. Při výrobě dochází při sestavování dílů k jejich lemování tak, aby na sebe co nejlépe dosedly a aby byly spojovací svary mezi jednotlivými díly pokud možno zhotovovány jako tupé. Tyto lemy mají proměnný poloměr, který je vzhledem k rozměrům konstrukce velmi malý. V rámci 3D modelu použitého pro analýzu nebylo tyto lemy možné modelovat a z pohledu namáhání celé konstrukce cisterny ani jejich modelování nebylo nutné, vzhledem k jejich rozměrům.

Tyto lemy u reálné konstrukce nemají natolik velký vliv aby, v řešené oblasti (v zadní části konstrukce), vyloučily v zatěžovacích stavech překročení meze kluzu materiálu. Svou existencí ale vylučují ostrý přechod na průnikové křivce a zamezují tak vzniku lokálních koncentrací napětí v její blízkosti.

U reálné, upravené, konstrukce cisterny by tak nemělo v průběhu jejího používání dojít ke vzniku oblastí, kde by byla překročena mez kluzu materiálu a které by ohrožovaly stabilitu konstrukce.

Navržené úpravy lze tedy hodnotit jako vhodné.

## 18. Závěr

Cílem této práce bylo mimo jiné definovat účinky sypkého materiálu na stěnu cisternového přepravníku. Byl vypracován přehled typů přepravníků daného výrobce a dále také přehled a rozdělení nejčastěji přepravovaných sypkých hmot. Následně byla provedena rešerše možných metod výpočtu silových účinků sypkých materiálů na stěny přepravníku a jako nejvhodnější byla zvolena Jannsenova teorie.

Zvolená teorie byla aplikována na kruhovou stěnu cisterny přepravníku a bylo definováno zátěžné pole silových účinků sypkého materiálu. Pro ověření správnosti aplikace Jannsenovy teorie do prostředí MKP programu byly provedeny dva ověřovací příklady, pro něž bylo možné určit výsledky nejen pomocí MKP analýzy, ale také klasickými analytickými postupy a tyto výsledky byly porovnány.

Část diplomové práce byla věnována identifikaci krajních zatěžovacích stavů konstrukce cisterny přepravníku na základě znalosti jeho pracovního cyklu. Z pracovního cyklu byly určeny tři zatěžující stavy u kterých bylo předpokládáno zvýšené namáhání konstrukce přepravníku.

Pro MKP analýzu byl vytvořen vhodně upravený 3D model konstrukce. Následně byla provedena MKP analýza ve všech navržených zatěžovacích stavech a její výsledky byly komentovány. Na základě analýzy byla vytipována místa, kde byla překročena mez kluzu materiálu a byl proveden rozbor možných příčin vzniku těchto oblastí. Z výsledků MKP analýzy také vyplynula potřeba určit vlastnosti reálně používaného materiálu cisterny přepravníku v relaci k minimálním návrhovým hodnotám udaných normou AD 2000 Merkblatt.

Z rozboru možných příčin vzniku oblastí, kde je v jednotlivých zatěžovacích stavech překročena mez kluzu materiálu byl, dle technických požadavků výrobce přepravníku vytvořen návrh konstrukčních úprav.

U upravené konstrukce cisterny přepravníku došlo k navýšení hmotnosti o 25,8 kg, což činí cca 0,37% celkové hmotnosti přepravníku.

Dále byla na upravené konstrukci cisterny provedena identická MKP analýza ve všech navržených zatěžovacích stavech. Z jejich výsledků vyplynulo, že navržené úpravy eliminují překročení meze kluzu materiálu ve sledovaných oblastech na konstrukci a zároveň plně vyhovují technickým požadavkům výrobce.

Navržené úpravy byly představeny výrobcí přepravníku a ten, s nimi souhlasí a připravuje jejich uvedení do výroby.

Tímto lze považovat všechny cíle práce stanovené v úvodu za splněné.

## 19. Seznam obrázků

Obr.1: *Převravník NCJ 32.*(strana 3)

Obr.2: *Převravník NKA 46.* (strana 4)

Obr.3: *Převravník NSA 62.* (strana 5)

Obr.4: *Hlavní rozměry převravníku NSA.* (strana 6)

Obr.5: *Přistavení převravníku pod plnicí terminál.* (strana 7)

Obr.6: *Teleskopický rukáv pro plnění převravníku.* (strana 7)

Obr.7: *Maximální sklopení cisterny při vyprazdňování převravníku.* (strana 8)

Obr.8: *Působení sypkého materiálu na skloněnou stěnu dle jednotlivých teorií.* (strana 15)

Obr.9: *Odvození normálového a tečného tlaku v sypké hmotě.* (strana 16)

Obr.10: *Odvození vodorovného a svislého tlaku v sypké hmotě.* (strana 18)

Obr.11: *Průběh vodorovného a svislého tlaku po průřezu.* (strana 21)

Obr.12: *Působení výslednice tlaku tekutiny na čtvrtkruhové stěny.* (strana 22)

Obr.13: *Výsledné pole tlakového zatížení stěny převravníku.* (strana 22)

Obr.14: *Analytické odvození silových účinků tlakového pole.* (strana 24)

Obr.15: *Analytické odvození silových účinků tlakového pole-element.* (strana 24)

Obr.16: *Modelované pole zatížení v programu Abaqus.* (strana 25)

Obr.17: *Modelovaný křivý prut v programu Abaqus.* (strana 28)

Obr.18: *Výsledné pole napětí na křivém prutu.* (strana 29)

Obr.19: *Graf porovnání analytického a MKP řešení.* (strana 29)

Obr.20: *Graf porovnání analytického a MKP řešení.* (strana 30)

Obr.21: *Průběh tahové zkoušky materiálu EN AW-5083.* (strana 35)

Obr.22: *Úprava diagramu tahové zkoušky pro získání plastické křivky.* (strana 36)

Obr.23: *Diagram tahové zkoušky pružně plastického materiálu s lineárním zpevněním a pružně ideálně plastického materiálu.* (strana 36)

- Obr.24: Aplikace materiálových parametrů v prostředí programu Abaqus 6.14. (strana 37)
- Obr.25: Dodaný 3D model cisterny přepravníku. (strana 38)
- Obr.26: Vytvořený 3D model cisterny přepravníku. (strana 39)
- Obr.27: Síť vytvořená automatickým síťováním. (strana 40)
- Obr.28: Optimalizovaná síť pro snížení imperfekcí elementů. (strana 41)
- Obr.29: Označení jednotlivých podporových ploch. (strana 42)
- Obr.30: Uložení konstrukce v programu Abaqus. (strana 43)
- Obr.31: Výsledné pole redukovaného HMM napětí ( $R_{p0,2} = 125\text{MPa}$ ). (strana 44)
- Obr.32: Část inspekčního certifikátu materiálu EN AW-5083 0/H111. (strana 45)
- Obr.33: Výsledné pole redukovaného HMM napětí ( $R_{p0,2} = 144\text{MPa}$ ). (strana 45)
- Obr.34: Výsledné pole redukovaného HMM napětí ( $R_{p0,2} = 154\text{MPa}$ ). (strana 46)
- Obr.35: Výsledné pole redukovaného HMM napětí ( $R_{p0,2} = 164\text{MPa}$ ). (strana 46)
- Obr.36: Zjednodušený silový rozbor sklopené konstrukce. (strana 47)
- Obr.37: Výsledné pole redukovaného HMM napětí ( $R_{p0,2} = 125\text{MPa}$ ). (strana 49)
- Obr.38: Výsledné pole redukovaného HMM napětí ( $R_{p0,2} = 164\text{MPa}$ ). (strana 49)
- Obr.39: Výsledné pole redukovaného HMM napětí ( $R_{p0,2} = 125\text{MPa}$ ). (strana 52)
- Obr.40: Výsledné pole redukovaného HMM napětí ( $R_{p0,2} = 164\text{MPa}$ ). (strana 52)
- Obr.41: Vyznačení místa se sníženou tuhostí. (strana 53)
- Obr.42: Upravená konstrukce cisterny přepravníku. (strana 54)
- Obr.43: Upravená konstrukce cisterny přepravníku - detail. (strana 55)
- Obr.44: Porovnání pole redukovaného napětí stávající a upravené konstrukce (zatěžovací stav 1 – počátek sklápění). (strana 57)
- Obr.45: Porovnání pole redukovaného napětí stávající a upravené konstrukce (zatěžovací stav 2 – konec sklápění). (strana 58)
- Obr.46: Porovnání pole redukovaného napětí stávající a upravené konstrukce (zatěžovací stav 3 – tlaková zkouška). (strana 58)

## 20. Seznam tabulek

- Tabulka 1 Hlavní rozměry přepravníků řady NC3. (strana 3)
- Tabulka 2 Hlavní rozměry přepravníků NKA a NCF. (strana 4)
- Tabulka 3 Přehled jednotlivých zatěžovacích stavů. (strana 9)
- Tabulka 4 Třídění sypkých hmot podle velikosti zrn. (strana 11)
- Tabulka 5 Rozdělení sypkých hmot podle velikosti sypného úhlu. (strana 11)
- Tabulka 6 Rozdělení sypkých hmot podle velikosti sypného úhlu. (strana 12)
- Tabulka 7 Rozdělení sypkých hmot podle objemové sypné hmotnosti. (strana 13)
- Tabulka 8 Chemické složení materiálu EN-AW 5083. (strana 33)
- Tabulka 9 Materiálové vlastnosti EN AW-5083 v závislosti na tloušťce polotovaru.  
(strana 34)
- Tabulka 10 Rozdělení materiálových parametrů pro elastické a plastické chování.  
(strana 37)
- Tabulka 11 Reálné a simulované tloušťky plechu konstrukce cisterny. (strana 39)

## 21. Seznam zkratek a symbolů

| Symbol:   | Jednotka:                           | Název veličiny:                             |
|-----------|-------------------------------------|---|
| p         | [MPa]                               | Tlak v sypkém materiálu                     |
| h         | [m]                                 | Výška / hloubka vrstvy                      |
| $\nu$     | [kg/m <sup>3</sup> ]                | Hustota materiálu                           |
| g         | [m/s <sup>-2</sup> ]                | Tíhové zrychlení                            |
| $\alpha$  | [Rad]                               | Úhel sklonu stěny                           |
| $\beta$   | [Rad]                               | Pomocný úhel                                |
| K         | [1]                                 | Poměr hlavních napětí                       |
| $\tau$    | [MPa]                               | Tečné napětí                                |
| f         | [1]                                 | Koeficient smykového tření                  |
| $\gamma$  | [kg/s <sup>2</sup> m <sup>2</sup> ] | Konstanta úměrnosti                         |
| x         | [m]                                 | Souřadnice                                  |
| y         | [m]                                 | Souřadnice                                  |
| dx        | [m]                                 | Diferenciál souřadnice                      |
| dy        | [m]                                 | Diferenciál souřadnice                      |
| ds        | [m]                                 | Diferenciál délky                           |
| dA        | [m <sup>2</sup> ]                   | Diferenciál plochy                          |
| dF        | [N]                                 | Diferenciál síly                            |
| $\rho$    | [Rad]/[kg/m <sup>3</sup> ]          | Sypný úhel / Hustota                        |
| F         | [N]                                 | Síla  |
| O         | [MPa]                               | Posun středu Mohrovy kružnice               |
| R         | [MPa]/[m]                           | Poloměr Mohrovy kružnice / Poloměr kružnice |
| m         | [kg/m]                              | Měrná hmotnost                              |
| M         | [kg]                                | Celková hmotnost                            |
| V         | [m <sup>3</sup> ]                   | Objem                                       |
| l         | [m]                                 | Délka                                       |
| S         | [m <sup>2</sup> ]                   | Plocha                                      |
| Q         | [N/m]                               | Měrná tíha                                  |
| $\varphi$ | [Rad]                               | Mapovací úhel                               |
| $\omega$  | [Rad]                               | Středový úhel                               |
| M         | [Nm]                                | Moment                                      |
| dM        | [Nm]                                | Diferenciál momentu                         |

| <b>Symbol:</b> | <b>Jednotka:</b>     | <b>Název veličiny:</b>          |
|----------------|----------------------|---------------------------------|
| E              | [m]/[MPa]            | Rameno síly / Youngův modul     |
| $\sigma$       | [N/mm <sup>2</sup> ] | Mechanické napětí               |
| W              | [mm <sup>3</sup> ]   | Modul průřezu v ohybu           |
| F <sub>e</sub> | [1]                  | Odchylka                        |
| L              | [N]                  | Celková tíha                    |
| R <sub>F</sub> | [N]                  | Reakční síla                    |
| $\varepsilon$  | [1]                  | Poměrné prodloužení (deformace) |



## 22. Zdroje

- [1] Přepravníky | ZVVZ a.s. - dodavatel zařízení pro ekologii. ZVVZ a.s. - dodavatel zařízení pro ekologii [online]. Copyright © 2017, ZVVZ a.s. [cit. 21.06.2017]. Dostupné z: <http://www.zvvz.cz/zvvz-machinery/vyrobky/cisternove-navesy.html>
- [2] Hubice pro nakládku cisteren : Produkty: HENNLICH. [online]. Dostupné z: <https://www.hennlich.cz/produkty/plnici-hubice-hubice-pro-nakladku-cisteren-1944.html>.
- [3] Material stress strain curves for aluminium alloys 5083-H116... - Figure 2 of 9. ResearchGate - Share and discover research [online]. Copyright © 2008 [cit. 21.06.2017]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/233118591\\_fig2\\_Figure-3-Material-stress-strain-curves-for-aluminium-alloys-5083-H116-and-6082-T6-in-the](https://www.researchgate.net/figure/233118591_fig2_Figure-3-Material-stress-strain-curves-for-aluminium-alloys-5083-H116-and-6082-T6-in-the)
- [4] DUB, Martin. *Identifikace parametrů tvárného porušení materiálu 0C15CH při vyšších rychlostech zatěžování*. Praha, 2012. Diplomová práce (Ing.). České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní. Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky. 2012-07-03.
- [5] Abaqus 6.14 Documentation
- [6] DRAŽAN, F. a kol.: *Teorie a stavba dopravníků*, skripta ČVUT v Praze, 1983.