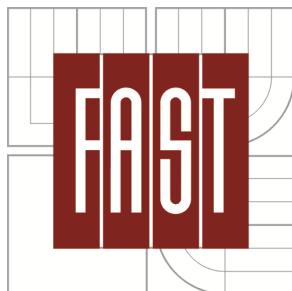


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV STAVEBNÍ MECHANIKY

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF STRUCTURAL MECHANICS

**ANALÝZA SPOLEHLIVOSTI TENKOSTĚNNÝCH
VÁLCOVÝCH NÁDRŽÍ PRO SKLADOVÁNÍ ROPY**
RELIABILITY ANALYSIS OF THIN-WALLED CYLINDRICAL TANKS FOR CRUDE OIL STORAGE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

KATEŘINA SERBOUSKOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. ZDENĚK KALA, Ph.D.

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor 3608R001 Pozemní stavby
Pracoviště Ústav stavební mechaniky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student Kateřina Serbousková

Název Analýza spolehlivosti tenkostěnných válcových nádrží pro skladování ropy

Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Zdeněk Kala, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce 30. 11. 2014

Datum odevzdání bakalářské práce 29. 5. 2015

V Brně dne 30. 11. 2014

.....
prof. Ing. Drahomír Novák, DrSc.
Vedoucí ústavu

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

KŘUPKA, V. Konstrukce aparátů, PD-DIR - nakladatelství, Brno, 1998, ISBN 80-214-1124-4.

EEMUA Usersguide to the inspection, maintenance and repair of above ground vertical cylindrical steel storage tanks. Publication number 159; 2003.
API 650 Welded Tanks for Oil Storage, Twelfth Edition, Includes Errata (2013). Standard published 03/01/2013 by American Petroleum Institute.

Zásady pro vypracování

Nastudovat statické působení membránového stavu rotačně symetricky zatížených skořepin. Zpracovat analýzu spolehlivosti rotačně symetrické tenkostěnné válcové nádrže pro skladování ropy.

Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

.....
prof. Ing. Zdeněk Kala, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá spolehlivostí rotačně symetrické tenkostěnné válcové nádrže pro skladování ropy. V první části je popsán obecný tvar, membránový stav a rovnice rovnováhy rotačně symetrické skořepiny. Druhá část popisuje pravděpodobnostní analýzu spolehlivosti nádrže pomocí indexu spolehlivosti podle Cornella. Na závěr byl vytvořen model nádrže v programovém systému ANSYS, který vyobrazuje průběhy napětí a deformace od daného zatížení.

Klíčová slova

Tenkostěnná nádrž, válcová nádrž, napětí, spolehlivost, metoda konečných prvků (MKP)

Abstract

This bachelor thesis is focused on the reliability of rotationally symmetric thin-walled cylindrical tank for crude oil storage. The general form, membrane state, and balance equation of rotationally symmetric shell is described in the first part of the bachelor thesis. The second part of this bachelor thesis describes the probabilistic analysis of reliability of the tank by using Cornell's index of reliability. At the end the model of tank was created in ANSYS software, which indicates processes of stresses and deformations of the particular load.

Keywords

Thin-walled tank, cylindrical tank, stress, reliability, Finite element method

Bibliografická citace VŠKP

SERBOUSKOVÁ, Kateřina. *Analýza spolehlivosti tenkostěnných válcových nádrží pro skladování ropy*. Brno, 2015. 52 s., 0 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební mechaniky. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Zdeněk Kala, Ph.D.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 28. 5. 2015

.....
podpis autora
Kateřina Serbousková

Poděkování:

Ráda bych poděkovala mému vedoucímu bakalářské práce, prof. Ing. Zdeňku Kalovi, Ph.D, za odborné vedení, podporu a trpělivost během zpracování této práce. Dále bych chtěla poděkovat jeho kolegům z ústavu stavební mechaniky, díky kterým jsem se seznámila se základy práce v systému ANSYS.

Tato bakalářská práce byla zpracována s využitím infrastruktury Centra AdMaS.

Obsah

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | ÚVOD | 9 |
| 2 | ROTAČNĚ SYMETRICKÉ SKOŘEPINY | 10 |
| 2.1 | Obecný tvar rotačně symetrické skořepiny..... | 10 |
| 2.2 | Rovnice rovnováhy membránového stavu osově symetrické skořepiny..... | 12 |
| 2.3 | Podmínky rovnováhy..... | 13 |
| 2.3.1 | Momentová podmínka rovnováhy ke středu prvku | 13 |
| 2.3.2 | Součtová podmínka rovnováhy ve směru normály..... | 13 |
| 3 | SPOLEHLIVOST ROTAČNĚ SYMETRICKÉ TENKOSTĚNNÉ VÁLCOVÉ NÁDRŽE PRO SKLADOVÁNÍ ROPY | 16 |
| 3.1 | Geometrie nádrže | 16 |
| 3.2 | Zatížení nádrže | 16 |
| 3.2.1 | Výpočet reakcí od zatížení..... | 17 |
| 3.3 | Podmínka spolehlivosti..... | 26 |
| 3.4 | Pravděpodobnostní analýza spolehlivosti nádrže..... | 27 |
| 3.4.1 | Index spolehlivosti podle Cornella..... | 27 |
| 3.5 | Spolehlivost ropné nádrže společnosti Mero, a.s..... | 27 |
| 3.5.1 | Popis nádrže | 27 |
| 3.5.2 | Vstupní náhodné veličiny | 28 |
| 3.5.3 | Závislost indexu spolehlivosti na tloušťce stěn nádrže | 29 |
| 4 | VÝPOČTOVÝ MODEL V PROGRAMU ANSYS..... | 34 |
| 4.1 | Použité prvky | 34 |
| 4.2 | Okrajové podmínky | 35 |
| 4.3 | Síť konečných prvků | 35 |
| 4.4 | Zatížení skořepiny | 36 |
| 4.5 | Analýza napětí a deformace nádrže..... | 37 |
| | ZÁVĚR..... | 46 |
| | SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ..... | 48 |
| | SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ..... | 49 |
| | SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ | 51 |

1 ÚVOD

Předmětem bakalářské práce je posouzení spolehlivosti ocelové tenkostěnné válcové nádrže na ropu provozovanou státní firmou MERO ČR, a.s., která sídlí v Kralupech nad Vltavou, kde se také nachází centrální tankoviště sloužící jako strategická zásobárna ropy pro Českou republiku v případě výpadku dodávek ropy.

Ocel je vysoce spolehlivým materiálem, který se vyznačuje vysokou pevností, malou hmotností konstrukčních prvků, snadnou kombinovatelností s ostatními materiály (spřažené konstrukce) a odolností proti mechanickému poškození. Architektům a designérům dává velkou svobodu díky své štíhlosti a schopnosti překonat velká rozpětí. Ekonomicky výhodná je díky menším základům a rychlé (suché) montáži nezávislé na klimatických podmínkách. Ocel je také velmi šetrná k životnímu prostředí, neboť je až z 90% recyklovatelná a při přepravě a montáži nedochází ke znečištění jako u jiných materiálů. Naopak k nevýhodám ocelových konstrukcí patří nutnost ochrany proti korozi nátěry nebo žárovým zinkováním. Nutná je také ochrana proti požáru (hodnota meze kluzu při požáru poměrně rychle poklesne). Dalšími nevýhodami jsou vyšší tepelná a zvuková vodivost a malá odolnost proti účinkům dynamického zatížení.

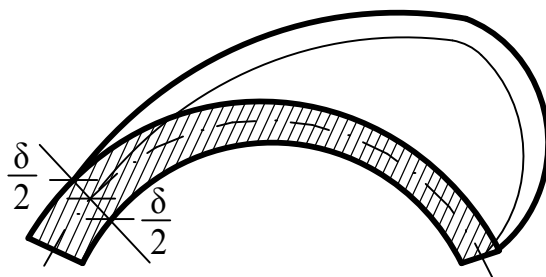
Skořepiny jsou plošné konstrukce, jejichž tloušťka je mnohonásobně menší než zbylé dva rozměry. Střednicová plocha, která půlí tloušťku skořepiny může být zakřivená. Mohou se použít jako nosné části konstrukcí ohraničující objem (báně, střechy a kapotáž) nebo jako samostatné konstrukce s objemem (nádrže, potrubí a tlakové nádoby). Zatížením skořepiny vznikají po tloušťce skořepiny napětí. Charakter a průběh napětí je obdobný jako u desek nebo stěn. Integrací napětí po tloušťce skořepiny lze získat vnitřní síly (normálové síly, posouvající síly a ohybové momenty), které jsou vztaženy ke střednicové ploše.

Dělení skořepin je možné podle tvaru na obecné, rotační (rotačně symetrické) a rovinné, což jsou desky. Další rozdělení podle tloušťky je na skořepiny tlustostěnné, skořepiny střední tloušťky, skořepiny tenkostěnné, nelineární tenkostěnné skořepiny a membrány. Tlustostěnné skořepiny se vyznačují srovnatelnou tloušťkou s minimálním poloměrem křivosti a nelineárním rozložením napětí po tloušťce skořepiny, z něhož vyplývá velice složité řešení blízké tlustým deskám. Nejčastěji se používá metoda konečných prvků. Skořepiny tenkostěnné mají velmi malou tloušťku ve srovnání s minimálním poloměrem křivosti střednicové plochy. Lze zanedbat vliv smykových napětí na deformaci normál ke střednicové ploše, což vede na lineární rozložení normálového napětí a k jednoduššímu analytickému řešení. Tenkostěnné skořepiny vyžadující nelineární řešení jsou zpravidla velmi tenké a dochází k deformacím srovnatelným s tloušťkou konstrukce. Je potřeba uvážit geometrickou nelinearitu při řešení, a proto se většinou využívá metody konečných prvků. Speciálním typem jsou membrány, u kterých se nevyskytují žádné momenty (ohybové ani krouťící). Namáhané jsou pouze normálovými, popřípadě smykovými silami, čímž je docíleno rovnoměrného rozložení napětí po tloušťce stěny.

2 ROTAČNĚ SYMETRICKÉ SKOŘEPINY

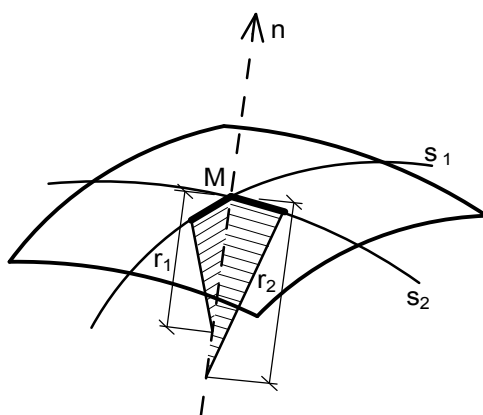
2.1 Obecný tvar rotačně symetrické skořepiny

Skořepina je těleso, které je ohraničené dvěma křivými plochami a oproti ostatním rozměrům tělesa je vzdálenost mezi těmito plochami zanedbatelná. Tloušťka skořepiny (vzdálenost mezi vnějším a vnitřním povrchem skořepiny) se označí δ . Množina bodů, která pólí δ , tvoří střednicovou plochu viz obr. 2.1. Tloušťka δ a tvar střednice jsou určujícími parametry skořepiny.



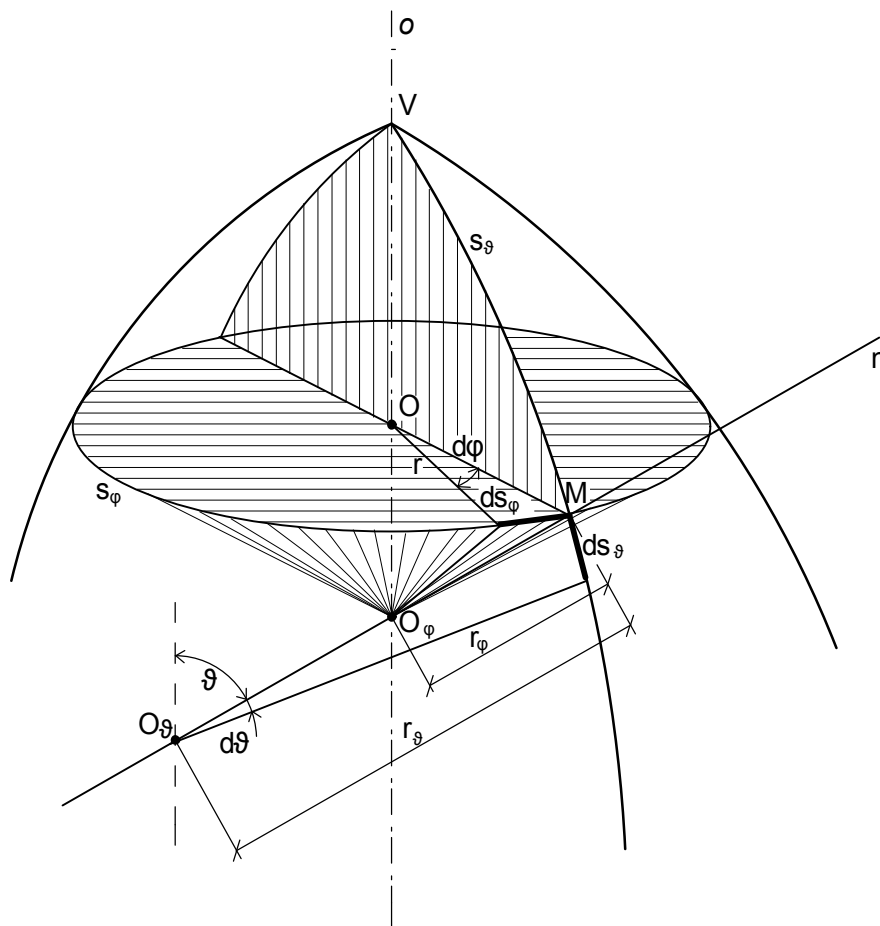
Obr. 2.1 Střednicová plocha

Normálou n se rozumí kolmice, která prochází obecným bodem M patřící střednicové ploše. Touto přímkou se proloží normálové roviny. Dvě navzájem kolmé normálové roviny, z nichž každá protíná v bodě M střednicovou plochu v místě maximální eventuálně minimální křivosti, se nazývají hlavními normálovými rovinami. Na obr. 2.2 jsou tyto roviny vyšrafovány. Hlavní křivky s_1 a s_2 jsou průsečnice hlavní roviny se střednicovou plochou. Jejich křivosti $\frac{1}{r_1}$ a $\frac{1}{r_2}$ jsou hlavní křivosti. U rotačně symetrických skořepin se zamění arabské číslice 1 a 2 za symboly φ a ϑ .



Obr. 2.2 Hlavní normálové roviny

Obecný tvar rotačně symetrické skořepiny je znázorněn na obr. 2.3. První hlavní rovina je určena osou rotace o a normálou n v bodě M . Její průsečnice se střednicovou plochou tvoří poledník – meridián s_ϑ . Bod M na meridiánu je určen úhlem ϑ , který je svírán normálou a osou rotace. V obrázku je r_ϑ poloměr křivosti meridiánu v obecném bodě a O_ϑ střed křivosti.



Obr. 2.3 Obecný tvar rotačně symetrické skořepiny

Druhá hlavní rovina má hlavní poloměr r_φ a střed křivosti O_φ , jenž je průsečíkem normály n a osy rotace o (viz obr. 2.3). Poloměry r_φ tvoří kužel. Vrchol kužele je střed křivosti O_φ na ose rotace a rovnoběžka s_φ je kružnice základny. Poloměr r této kružnice se vyjádří vztahem (2.1), neboť r se získá jako průmět poloměru křivosti r_φ do roviny určené rovnoběžkou.

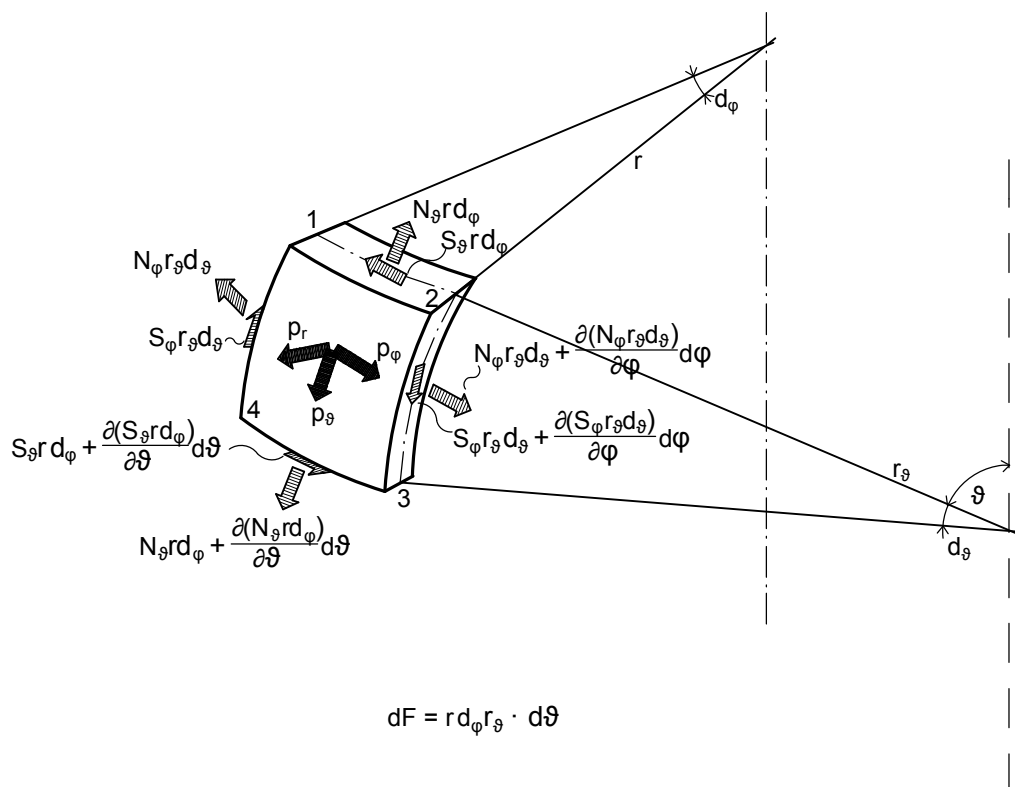
$$r = r_\varphi \cdot \sin \vartheta \quad (2.1)$$

Úhel φ určuje polohu bodů na jednotlivých rovnoběžkách.

Hlavní řezy tvoří na střednicové ploše síť poledníků a rovnoběžek, jejichž průsečíky určují úhly φ a ϑ , což znamená, že poloha bodů na rotačních skořepinách bude obecně určena právě těmito úhly [1].

2.2 Rovnice rovnováhy membránového stavu osově symetrické skořepiny

Membránový stav napjatosti u osově symetrických skořepin je stav, při kterém se na přenášení zatížení podílí pouze vnitřní síly, konkrétně smykové síly S_φ a S_ϑ a normálové síly N_φ a N_ϑ . Velikosti vnitřních sil rotačně symetrické skořepiny znázorněné na obr. 2.4 nám poslouží k jejímu dimenzování.



Obr. 2.4 Působící síly na uvolněném elementu skořepiny

Vnější obecné zatížení plošné je na uvolněném elementu $\overline{1,2,3,4}$ složeno ze složek p_r (směr normály), p_ϑ (tečna k meridiánu) a p_φ (tečna k rovnoběžce). Rozměr složek je v MPa. Toto zatížení vyvolá vnitřní síly, které se vypočítají použitím podmínek rovnováhy. Skutečné silové veličiny rozměru [N], které jsou označeny šipkami, vzniknou vynásobením příslušné membránové veličnosti vnitřních sil (N_ϑ , N_φ , S_φ a S_ϑ) s délkou elementu, na kterém působí. Například na délce $\overline{14}$ působí N_φ , což odpovídá síle $N_\varphi r_\vartheta d_\vartheta$. Posunutím o $r_\vartheta d_\vartheta$ ve směru meridiánu se mění velikost normálové složky N_ϑ na $\left(N_\vartheta + \frac{\partial N_\vartheta}{\partial \vartheta} d\vartheta\right)$. Vztah pro normálovou sílu lze dostat vynásobením s délkou elementu $\overline{34}$

$$\left(N_\vartheta + \frac{\partial N_\vartheta}{\partial \vartheta} d\vartheta\right) \left(r d\varphi + \frac{\partial(r d\varphi)}{\partial \vartheta} d\vartheta\right) \quad (2.2)$$

vypuštěním malých veličin vyššího řádu vznikne tvar

$$N_{\vartheta}rd\varphi + \frac{\partial(N_{\vartheta}rd\varphi)}{\partial\vartheta}d\vartheta \quad (2.3)$$

Obdobný postup je i při určení veličin ve směru rovnoběžky. Velikosti složek jsou patrné z obrázku 2.4 [1].

2.3 Podmínky rovnováhy

2.3.1 Momentová podmínka rovnováhy ke středu prvku

Po zanedbání veličin vyšších řádů je tvar momentové podmínky

$$S_{\vartheta}rd\varphi r_{\vartheta}d\vartheta - S_{\varphi}r_{\vartheta}d\vartheta rd\varphi = 0 \quad (2.4)$$

z čehož plyne, že

$$S_{\vartheta} = S_{\varphi} = S \quad (2.5)$$

tento vztah je analogický k zákonu o vzájemnosti smykových napětí, jenž je znám z teorie pružnosti. Musí ovšem platit předpoklad, že tloušťka skořepiny je podstatně menší než poloměry křivosti. V opačném případě bude $S_{\vartheta} \neq S_{\varphi}$ [1].

2.3.2 Součtová podmínka rovnováhy ve směru normály

Všechny síly působící na element se sečtou ve směru normály podle obr. 2.5. Ve výpočtu se nejdříve určí vnější zatížení p_r , a potom membránové síly N_{ϑ} a N_{φ} . Do směru normály má vnější zatížení p_r složku

$$p_r dF = p_r r r_{\vartheta} d\varphi d\vartheta \quad (2.6)$$

Po vypuštění malých veličin vyšších řádů budou mít membránové síly N_{ϑ} průmět do směru normály

$$N_{\vartheta}rd\varphi d\vartheta \quad (2.7)$$

viz obr. 2.5 (a).

V dalším kroku výpočtu se promítnou do směru normály i membránové síly N_{φ} . Z vyšrafovaných trojúhelníků v obr. 2.5 (b) vyplývá, že promítnutím, obdobně jako u membránové síly N_{ϑ} , obou normálových sil pomocí úhlu $\frac{d\varphi}{2}$ a sečtením se dostane síla $N_{\varphi}r_{\vartheta}d\vartheta d\varphi$. Tato síla ovšem leží v rovině kolmé na osu rotace (ve vodorovné rovině), proto se

musí ještě promítnout do směru normály, čímž se získá síla

$$N_{\varphi} r_{\vartheta} \sin \vartheta d\vartheta d\varphi \quad (2.8)$$

patrná z vyšrafovaného trojúhelníku u obr. 2.5 (a).

Sečtením (2.6), (2.7) a (2.8) s příslušnými znaménky se stanoví rovnice

$$N_{\vartheta} r d\varphi d\vartheta + N_{\varphi} r_{\vartheta} \sin \vartheta d\varphi d\vartheta - p_r r r_{\vartheta} d\varphi d\vartheta = 0 \quad (2.9)$$

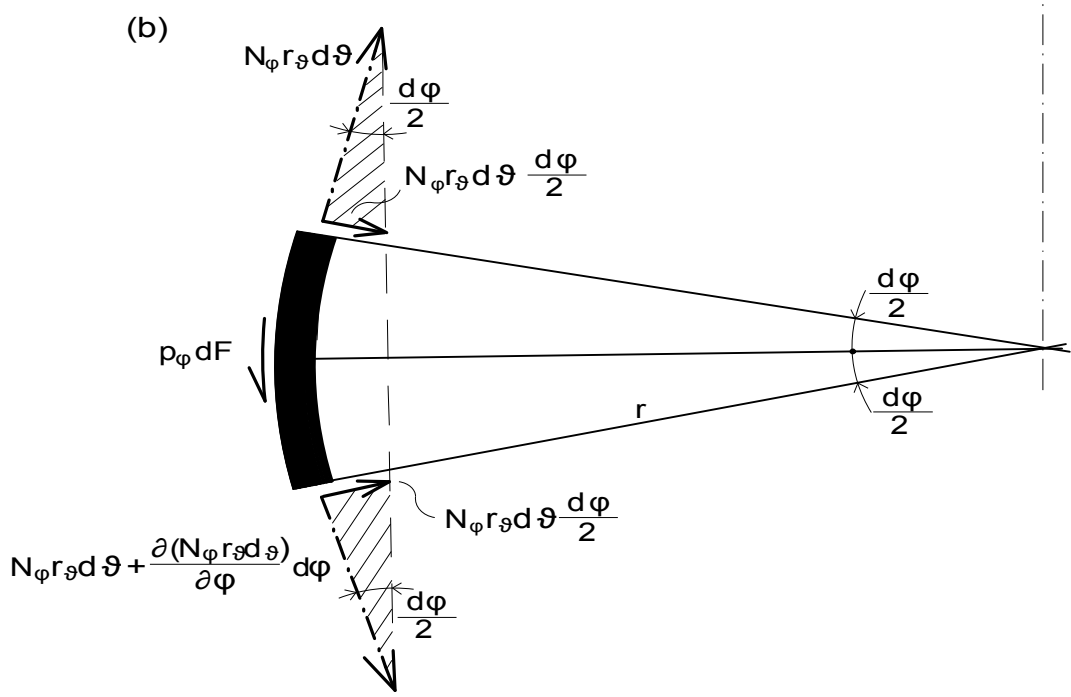
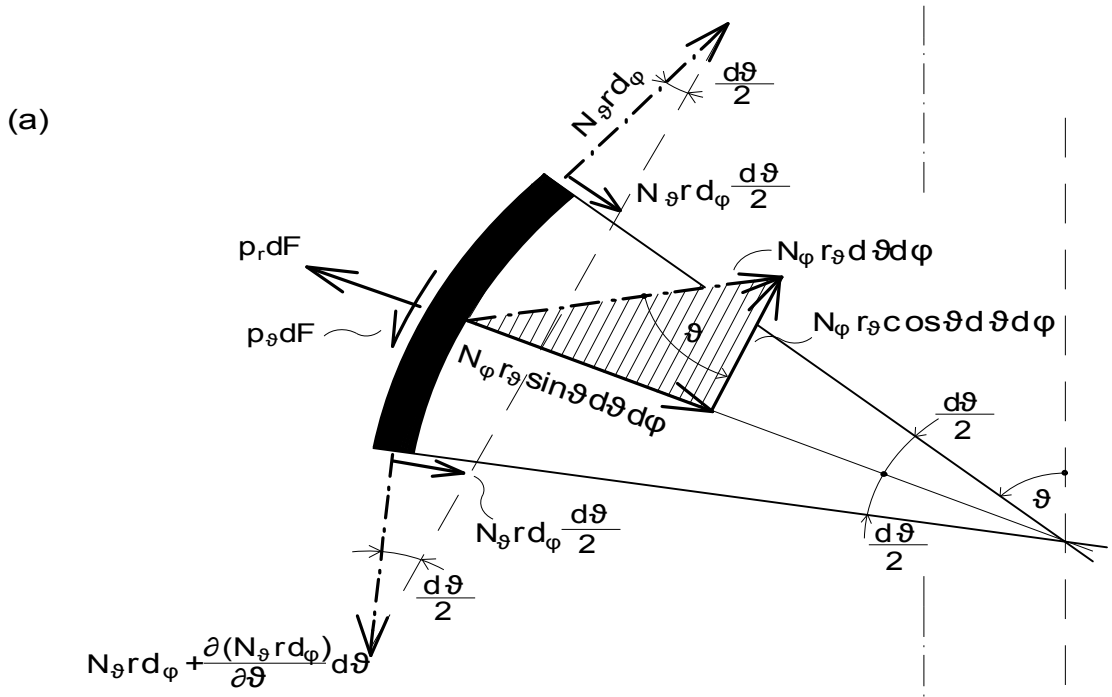
Do získané rovnice po dosazení za $r = r_{\varphi} \sin \vartheta$ (dle vztahu 2.1) a upravením vznikne

$$N_{\vartheta} r_{\varphi} + N_{\varphi} r_{\vartheta} = p_r r_{\vartheta} r_{\varphi}. \quad (2.10)$$

Konečný tvar

$$\frac{N_{\vartheta}}{r_{\vartheta}} + \frac{N_{\varphi}}{r_{\varphi}} = p_r \quad (2.11)$$

je výchozím vztahem pro podmínku spolehlivosti a lze ho získat vydělením rovnice součinem $r_{\vartheta} r_{\varphi}$ [1].

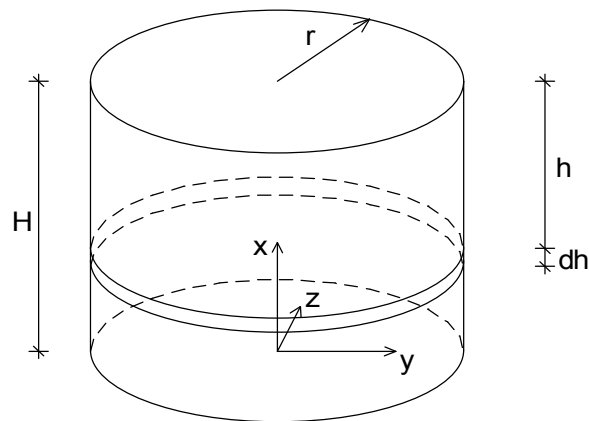


Obr. 2.5 (a) Svislý řez procházející osou skořepiny, (b) vodorovný řez

3 SPOLEHLIVOST ROTAČNĚ SYMETRICKÉ TENKOSTĚNNÉ VÁLCOVÉ NÁDRŽE PRO SKLADOVÁNÍ ROPY

3.1 Geometrie nádrže

Obr. 3.1 představuje schéma tenkostěnné kruhové válcové nádrže o výšce H , světlym poloměrem r (vzdálenost od vertikální osy symetrie k povrchu stěny) a tloušťce stěny t .



Obr. 3.1 Schéma kruhové válcové nádrže

3.2 Zatížení nádrže

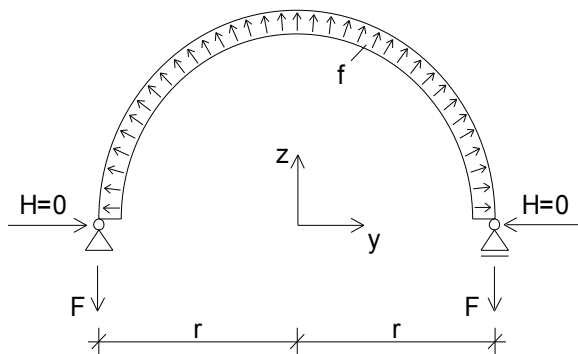
V hloubce h se vypočte hydrostatický tlak p jako

$$p = \rho \cdot g \cdot h \quad (3.1)$$

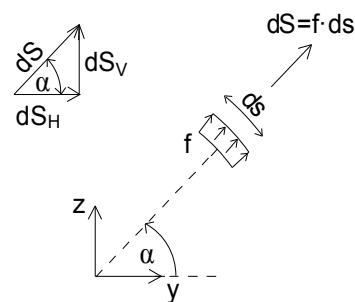
kde ρ je hustota ropy při teplotě 20°C . Podle údajů poskytnutých ze spoluřešitelského pracoviště Mero, a.s. se hustota ropy pohybuje v rozmezí $790 - 880 \text{ kg/m}^3$. Celosvětově uváděné hodnoty však jsou $730 - 1000 \text{ kg/m}^3$. Tíhové zrychlení g v naší zeměpisné šířce (49°) se udává hodnotou $g = 9,81 \text{ m/s}^2$. Rovnoměrné zatížení f působí kolmo k povrchu nádrže v hloubce h .

$$f = \rho \cdot g \cdot h \cdot dh \quad (3.2)$$

Normálové napětí σ kolmé k rovině procházející osou x je vyvoláno v hloubce h rovnoměrným zatížením a je na ploše $dh \cdot t$ iniciováno silou F . Sílu F můžeme vypočítat jako reakci rovinného půlkruhového oblouku (poloviny obruče), viz obr. 3.2.



Obr. 3.2 Schéma rovinného kruhového oblouku



Obr. 3.3 Silové působení na délku ds

3.2.1 Výpočet reakcí od zatížení

Síla dS působí na délku oblouku $ds = r \cdot d\alpha$ a lze ji rozložit na vertikální složku dS_V a horizontální složku dS_H .

$$dS = f \cdot ds = f \cdot r \cdot d\alpha \quad (3.3)$$

$$dS_H = dS \cdot \cos(\alpha) \quad (3.4)$$

$$dS_V = dS \cdot \sin(\alpha) \quad (3.5)$$

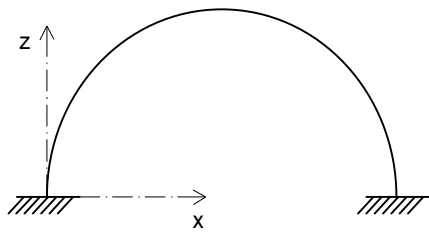
Reakci F lze s uvážením symetrie spočítat jako

$$F = \int_0^{\frac{\pi}{2}} dS_V = \int_0^{\frac{\pi}{2}} dS \cdot \sin(\alpha) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} f \cdot r \cdot \sin(\alpha) d\alpha = \rho \cdot g \cdot h \cdot dh \cdot r \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin(\alpha) d\alpha = \rho \cdot g \cdot h \cdot r \cdot dh \quad (3.6)$$

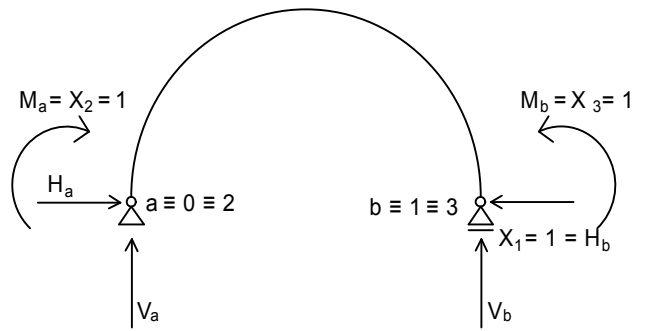
Obdobně lze odvodit hodnota reakce H , která je nulová. Základem je zjištění stupně statické neurčitosti n_s rovinného kruhového oblouku, který je na obr. 3.4. Stupeň statické neurčitosti je možno určit ze vztahu

$$n_s = (a - 3) + 3u - p_{kl} \quad (3.7)$$

kde a představuje celkový počet jednoduchých složek reakcí vnějších vazeb, který je snížen o tři povinné vazby staticky určitého podepření v rovině. Počet uzavřených částí se třemi neznámými složkami interakcí je značen u a počet vnitřních kloubů přepočtených na jednoduché klouby má označení ve vztahu p_{kl} . V našem případě nemáme žádný kloub ani uzavřenou část, proto k výpočtu stupně statické neurčitosti bude zapotřebí pouze složky a . Jelikož naše soustava je oboustranně vetknutá, přičemž vetknutí má tři složky reakcí vnějších vazeb (M , H a V), bude a rovno šesti. Stupeň statické neurčitosti je tedy $n_s=3$, což představuje jednoznačnou hodnotu určující kolik neznámých veličin a současně rovnic bude u řešení soustavy silovou metodou. Vhodným odstraněním tří složek reakcí vnějších vazeb získáme staticky určitou konstrukci (základní soustavu) viz obr. 3.5 [2].

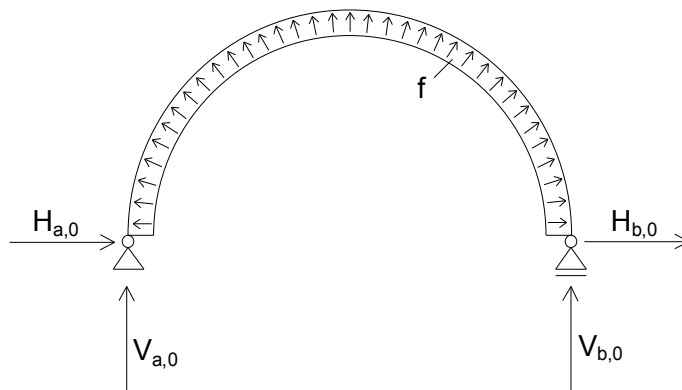


Obr. 3.4 Staticky neurčitá konstrukce

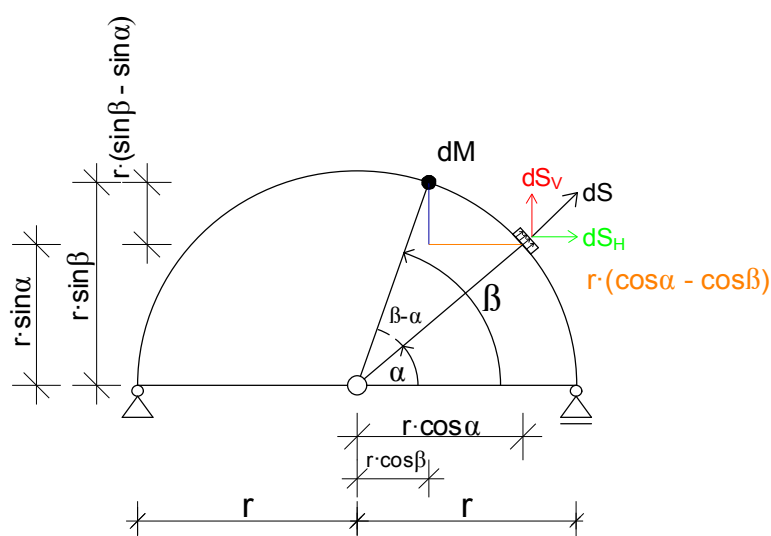


Obr. 3.5 Staticky určitá konstrukce

Na staticky určité konstrukci se vyřeší nultý stav pro dané silové zatížení a jednotlivé jednotkové stavy pro jednotkové síly či momenty X_k , jež nahradily odebranou vnější vazbu. Při řešení převládá ohybové namáhání, proto se zanedbá vliv normálových a posouvajících sil a sestaví se pouze průběhy ohybových momentů [2].



Obr. 3.6 Nultý stav



Obr. 3.7 Statické schéma s bodem M pod úhlem β

$$dS = f \cdot ds = f \cdot r \cdot d\alpha$$

$$dS_V = dS \cdot \sin\alpha = f \cdot r \cdot d\alpha \cdot \sin\alpha$$

$$dS_H = dS \cdot \cos\alpha = f \cdot r \cdot d\alpha \cdot \cos\alpha$$

Moment od rovnoměrného zatížení v bodě pod úhlem β :

$$dM_1 = dS_H \cdot r \cdot (\sin\beta - \sin\alpha) + dS_V \cdot r \cdot (\cos\alpha - \cos\beta) =$$

$$= f \cdot r \cdot d\alpha \cdot \cos\alpha \cdot r \cdot (\sin\beta - \sin\alpha) + f \cdot r \cdot d\alpha \cdot \sin\alpha \cdot r \cdot (\cos\alpha - \cos\beta) =$$

$$= f \cdot r^2 \cdot [\cos\alpha \cdot (\sin\beta - \sin\alpha) + \sin\alpha \cdot (\cos\alpha - \cos\beta)] d\alpha$$

$$M_1(\beta) = \int_0^\beta f \cdot r^2 \cdot [\cos\alpha \cdot (\sin\beta - \sin\alpha) + \sin\alpha \cdot (\cos\alpha - \cos\beta)] d\alpha =$$

$$= -f \cdot r^2 \cdot (\cos\beta - 1)$$

Moment od síly F v bodě pod úhlem β :

$$M_2(\beta) = -F \cdot (r - r \cdot \cos\beta) = -F \cdot r \cdot (1 - \cos\beta) = -f \cdot r^2 \cdot (1 - \cos\beta) =$$

$$= f \cdot r^2 \cdot (\cos\beta - 1)$$

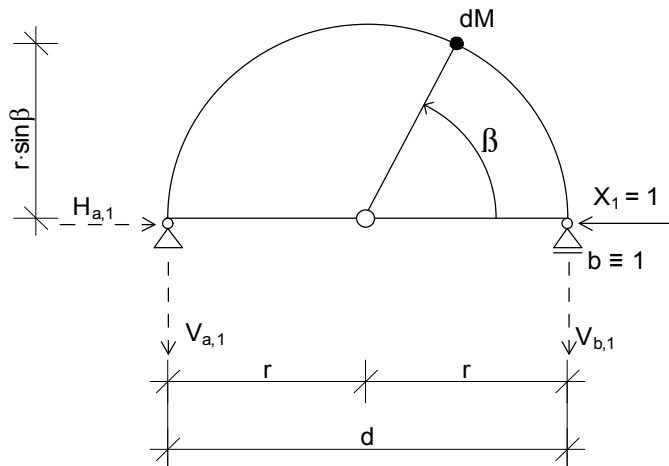
Celkový moment v bodě pod úhlem β :

$$M(\beta) = M_1(\beta) + M_2(\beta) = -f \cdot r^2 \cdot (\cos\beta - 1) + f \cdot r^2 \cdot (\cos\beta - 1) = 0 \text{ kNm}$$

(M₀)

0

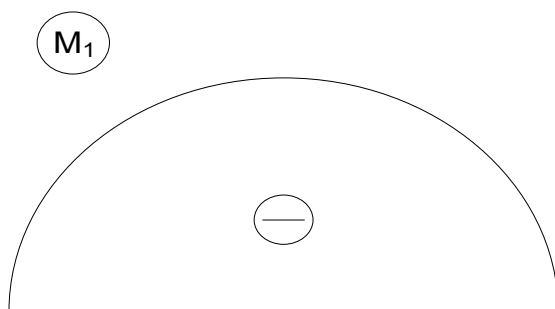
Obr. 3.8 Průběh momentů nultého stavu



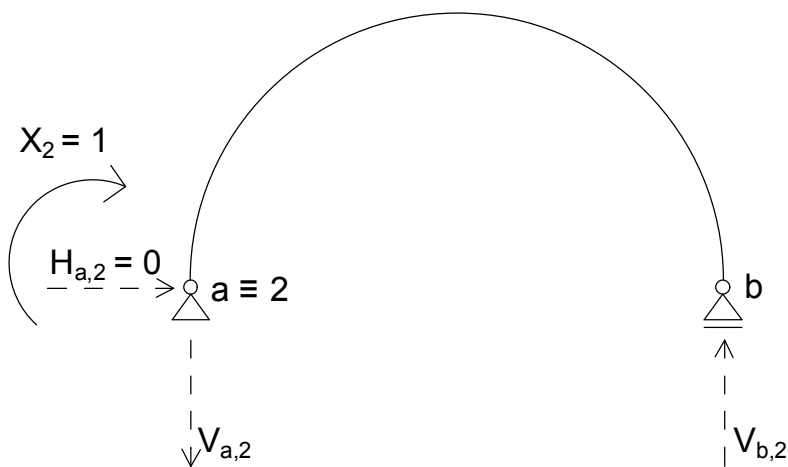
Obr. 3.9 První stav

Moment v bodě pod úhlem β :

$$M(\beta) = -X_1 \cdot r \cdot \sin\beta = -r \cdot \sin\beta$$

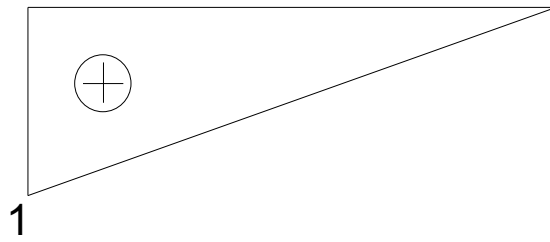


Obr. 3.10 Průběh momentů prvního stavu

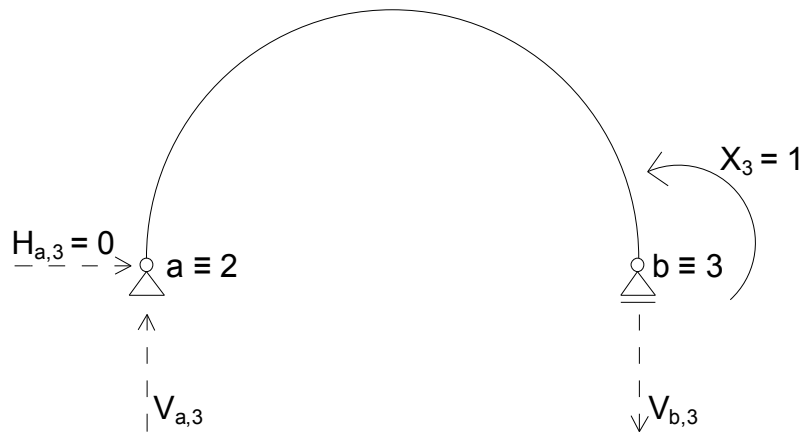


Obr. 3.11 Druhý stav

M_2

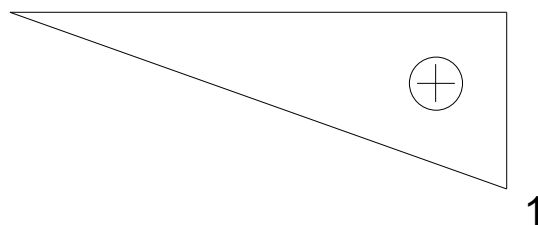


Obr. 3.12 Průběh momentů druhého stavu



Obr. 3.13 Třetí stav

M_3



Obr. 3.14 Průběh momentů třetího stavu

Každá i -tá odstraněná vazba se předepíše přetvárnou (deformační) podmínkou v obecně zapsaném tvaru

$$\delta_i = 0.$$

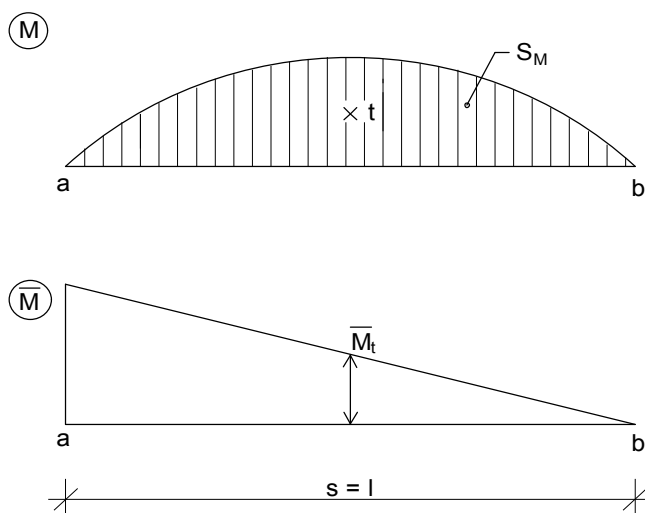
Uvažováním deformačního zatížení bude δ_i nahrazeno posunem u či pootočením φ . Rozepsaná soustava podmínek sestavuje kanonické rovnice pro neznámé složky \bar{X}_k

$$\sum_{k=1}^{n_s} \delta_{i,k} \cdot \bar{X}_k + \delta_{i,0} = 0 \quad (i = 1,2,3),$$

kde $\delta_{i,k}$ a $\delta_{i,0}$ jsou přetvárné (deformační) součinitele vyjadřující posunutí nebo pootočení základní soustavy. Zanedbáním vlivu normálových a posouvajících sil přetvárné součinitele určují vztahy

$$\delta_{i,0} = \int_0^l \frac{M_i M_0}{EI} dx, \quad \delta_{i,k} = \int_0^l \frac{M_i M_k}{EI} dx.$$

Ohybová tuhost EI se vytkne před integrál, který lze vyřešit Vereščaginovým pravidlem [2].



Obr. 3.15 Vereščaginovo pravidlo

Princip Vereščagina pravidla je znázorněn pomocí obr. 3.15. Máme-li dvě momentové funkce M a \bar{M} a chceme-li vyřešit integrál jejich součinu, přičemž jedna M může být libovolná a druhá \bar{M} je v daném intervalu lineární, je integrál roven součinu plochy S_M momentového obrazce M a pořadnice \bar{M}_t lineární funkce \bar{M} v místě těžiště t obrazce M [3].

$$\int_0^s M \bar{M} ds = S_M \cdot \bar{M}_t$$

Vypočtené přetvárné součinitele Vereščaginovým pravidlem mají následné hodnoty.

$$\delta_{1,0} = 0$$

$$\delta_{2,0} = 0$$

$$\delta_{3,0} = 0$$

$$\delta_{1,1} = \frac{1}{EI} \cdot \left[-r \cdot \left(-r \cdot \int_0^\pi \sin\beta \, d\beta \right) \right] = \frac{1}{EI} \cdot \left(r^2 \cdot \int_0^\pi \sin\beta \, d\beta \right)$$

$$\delta_{2,2} = \frac{1}{EI} \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot 1 \cdot \frac{1}{2} \cdot d \cdot 1 \right) = \frac{1}{EI} \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot d \right)$$

$$\delta_{3,3} = \frac{1}{EI} \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot 1 \cdot \frac{1}{2} \cdot d \cdot 1 \right) = \frac{1}{EI} \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot d \right)$$

$$\begin{aligned} \delta_{1,2} = \delta_{2,1} &= \frac{1}{EI} \cdot \left[\left(-\sqrt{r^2 - \left(r - \frac{1}{3} \cdot d \right)^2} \right) \cdot \frac{1}{2} \cdot d \cdot 1 \right] \\ &= \frac{1}{EI} \cdot \left[\left(-\sqrt{r^2 - \left(r - \frac{1}{3} \cdot d \right)^2} \right) \cdot \frac{1}{2} \cdot d \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta_{1,3} = \delta_{3,1} &= \frac{1}{EI} \cdot \left[\left(-\sqrt{r^2 - \left(r - \frac{1}{3} \cdot d \right)^2} \right) \cdot \frac{1}{2} \cdot d \cdot 1 \right] \\ &= \frac{1}{EI} \cdot \left[\left(-\sqrt{r^2 - \left(r - \frac{1}{3} \cdot d \right)^2} \right) \cdot \frac{1}{2} \cdot d \right] \end{aligned}$$

$$\delta_{2,3} = \delta_{3,2} = \frac{1}{EI} \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot 1 \cdot \frac{1}{2} \cdot d \cdot 1 \right) = \frac{1}{EI} \cdot \left(\frac{1}{6} \cdot d \right)$$

Soustava kanonických rovnic:

$$u_b = u_1 = 0: \delta_{1,1} \cdot \bar{X}_1 + \delta_{1,2} \cdot \bar{X}_2 + \delta_{1,3} \cdot \bar{X}_3 + \delta_{1,0} = 0$$

$$\varphi_a = \varphi_2 = 0: \delta_{2,1} \cdot \bar{X}_1 + \delta_{2,2} \cdot \bar{X}_2 + \delta_{2,3} \cdot \bar{X}_3 + \delta_{2,0} = 0$$

$$\varphi_b = \varphi_3 = 0: \delta_{3,1} \cdot \bar{X}_1 + \delta_{3,2} \cdot \bar{X}_2 + \delta_{3,3} \cdot \bar{X}_3 + \delta_{3,0} = 0$$

$$\frac{1}{EI} \cdot \left(r^2 \cdot \int_0^\pi \sin\beta \, d\beta \right) \cdot \bar{X}_1 + \frac{1}{EI} \cdot \left[\left(-\sqrt{r^2 - \left(r - \frac{1}{3} \cdot d \right)^2} \right) \cdot \frac{1}{2} \cdot d \right] \cdot \bar{X}_2 + \frac{1}{EI} \cdot \left[\left(-\sqrt{r^2 - \left(r - \frac{1}{3} \cdot d \right)^2} \right) \cdot \frac{1}{2} \cdot d \right] \cdot \bar{X}_3 + 0 = 0$$

$$\frac{1}{EI} \cdot \left[\left(-\sqrt{r^2 - \left(r - \frac{1}{3} \cdot d \right)^2} \right) \cdot \frac{1}{2} \cdot d \right] \cdot \bar{X}_1 + \frac{1}{EI} \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot d \right) \cdot \bar{X}_2 + \frac{1}{EI} \cdot \left(\frac{1}{6} \cdot d \right) \cdot \bar{X}_3 + 0 = 0$$

$$\frac{1}{EI} \cdot \left[\left(-\sqrt{r^2 - \left(r - \frac{1}{3} \cdot d \right)^2} \right) \cdot \frac{1}{2} \cdot d \right] \cdot \bar{X}_1 + \frac{1}{EI} \cdot \left(\frac{1}{6} \cdot d \right) \cdot \bar{X}_2 + \frac{1}{EI} \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot d \right) \cdot \bar{X}_3 + 0 = 0$$

$$\bar{X}_1 = 0$$

$$\bar{X}_2 = 0$$

$$\bar{X}_3 = 0$$

Kontrola ručně vyřešené soustavy rovnic je provedena pomocí programu MATLAB, kde je soustava přehledněji vyjádřena v maticovém zápisu. Podle Bettiho věty platí, že $\delta_{i,k} = \delta_{k,i}$, což znamená, že je matice soustavy symetrická.

```

%delta10=0
%delta20=0
%delta30=0
delta11=(1/(E*I))*(r^2)*int(sin(beta),beta,0,pi)
delta22=(1/(E*I))*(d/3)
delta33=(1/(E*I))*(d/3)
%delta12=delta21
delta12=(1/(E*I))*((-sqrt((r^2)-(r-(d/3))^2))*d/2)
%delta13=delta31
delta13=(1/(E*I))*((-sqrt((r^2)-(r-(d/3))^2))*d/2)
%delta23=delta32
delta23=(1/(E*I))*(d/6)
A=[delta11,delta12,delta13;delta12,delta22,delta23;delta13,delta23,delta33]
b=[0;0;0]
X=A\b

delta11 =
(2*r^2)/(E*I)

delta22 =
d/(3*E*I)

delta33 =
d/(3*E*I)

delta12 =
-(d*(r^2 - (1/3*d - r)^2)^(1/2))/(2*E*I)

delta13 =
-(d*(r^2 - (1/3*d - r)^2)^(1/2))/(2*E*I)

delta23 =
d/(6*E*I)
A =
[
(2*r^2)/(E*I), -(d*(r^2 - (1/3*d - r)^2)^(1/2))/(2*E*I), -(d*(r^2 - (1/3*d - r)^2)^(1/2))/(2*E*I)]
[ -(d*(r^2 - (1/3*d - r)^2)^(1/2))/(2*E*I), d/(3*E*I), d/(6*E*I)]
[ -(d*(r^2 - (1/3*d - r)^2)^(1/2))/(2*E*I), d/(6*E*I), d/(3*E*I)]

b =

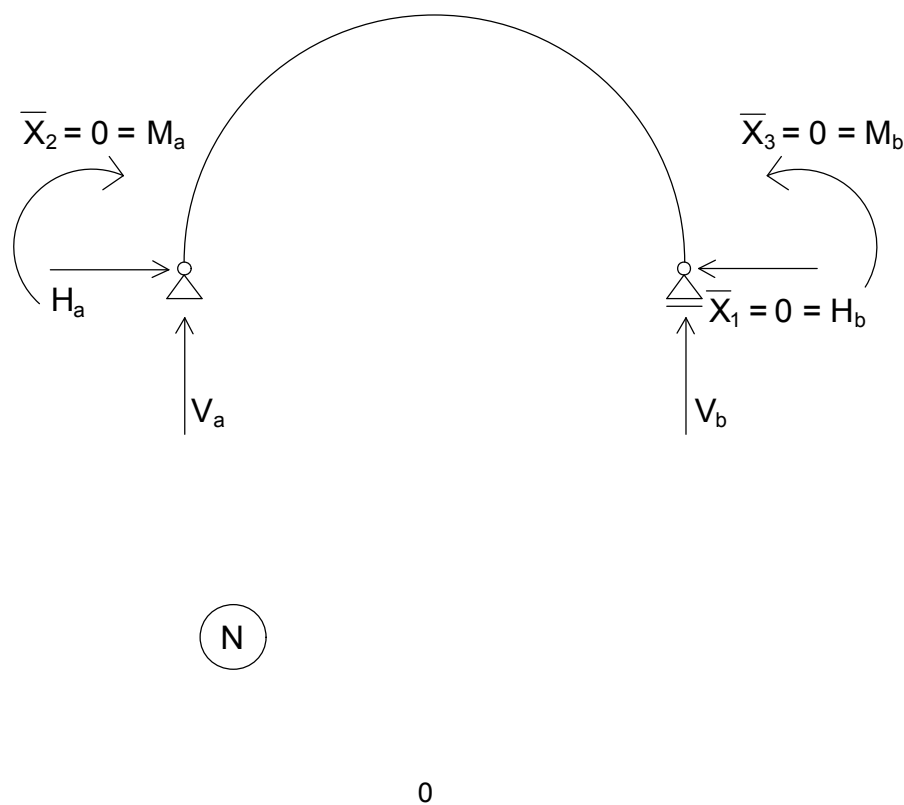
0
0
0

X =

0
0
0

```

Obr. 3.16 Soustava rovnic vyřešená programem MATLAB



Obr. 3.17 Statické schéma s průběhem normálových sil

Složky \bar{X}_k ze soustavy kanonických rovnic se uplatní na základní staticky určitou soustavu, dle obr. 3.17 a pomocí statických podmínek rovnováhy se vyřeší složky reakcí H a následný průběh vnitřních normálových sil, čímž je zjištěno, že hodnota reakce H je nulová.

3.3 Podmínka spolehlivosti

Zatěžovací sílu představuje síla F (akce), která vyvolává normálové napětí ve směru tečny ke střednici plechu tloušťky t a výšky dh . Střednice má tvar kružnice ležící v rovině kolmé na osu x . Spolehlivý návrh je ten, který splňuje podmínku, že zatěžovací síla F (akce) je menší nebo rovna odolnosti plechu R .

$$F \leq R \quad (3.8)$$

Odolnost R se vypočítá jako

$$R = f_y \cdot t \cdot dh \quad (3.9)$$

kde f_y je mez kluzu. Podmínka spolehlivosti (3.8) může být zapsána s uvážením (3.6) a (3.8) ve tvaru

$$\rho \cdot g \cdot h \cdot r \leq f_y \cdot t \quad (3.10)$$

Rovnice (3.10) je výchozím vztahem pro posouzení spolehlivosti kruhových válcových nádrží řady norem, např. ČSN 14015 [4] nebo API 653 [5].

3.4 Praviděpodobnostní analýza spolehlivosti nádrže

3.4.1 Index spolehlivosti podle Cornella

Podmínka spolehlivosti může být přepsána v závislosti na rovnici (3.10) jako

$$G = f_y \cdot t - \rho \cdot g \cdot h \cdot r \geq 0 \quad (3.11)$$

K selhání konstrukce dojde, není-li nerovnost splněna. Proměnné v rovnici (3.11) jsou považovány za náhodné veličiny při pravděpodobnostním posuzování spolehlivosti [10]. Spolehlivost všech lubů nádrže je možno posoudit pomocí indexu spolehlivosti β podle Cornella (Rjanytrina), který je definován převrácenou hodnotou variačního koeficientu náhodné veličiny G [7].

$$\beta = \frac{\mu_G}{\sigma_G}$$

Musí být splněn předpoklad, že náhodné veličiny G , F a R mají hustoty pravděpodobnosti ve tvaru Gaussovy funkce (normálního rozdělení). Pomocí zmíněného indexu lze studovat vliv změn (snížení) tloušťky stěny nádrže. Snížení tloušťky může způsobit koroze.

Dvě náhodné vstupní veličiny mez kluzu f_y a tloušťka lubu t mají Gaussovo pravděpodobnostní rozdělení funkce hustoty a mohou být spočteny pomocí programu Freet [11]. Program Freet je víceúčelový pravděpodobnostní software pro statistickou a spolehlivostní analýzu inženýrských problémů.

3.5 Spolehlivost ropné nádrže společnosti Mero, a.s.

3.5.1 Popis nádrže

Provozovaná nádrž společnosti Mero, a.s. na obr. 3.18 má objem 125 000 m³, poloměr 42,235 m, celkovou výšku 24 m a výšku plnění 22,3 m. Nominální výšky (tloušťky) jednotlivých lubů od dolního po horní jsou 2, 2 m (39 mm); 2,4 m (35 mm); 2,4 m (30 mm); 2,8 m (26 mm); 2,8 m (22 mm); 2,85 m (17 mm); 2,85 m (12 mm), 2,85 m (11 mm) a 2,85 m (10 mm). Poslední dva horní luby jsou z oceli S235 a u zbylých je použita ocel S355.



Obr. 3.18 Nádř na ropu provozovaná společností Mero, a.s.

3.5.2 Vstupní náhodné veličiny

Vstupní náhodné veličiny pro verifikaci spolehlivosti nádrže jsou přehledně uvedeny v tabulce 3.1:

Tabulka 3.1: Vstupní náhodné veličiny pro pravděpodobnostní analýzu spolehlivosti nádrže

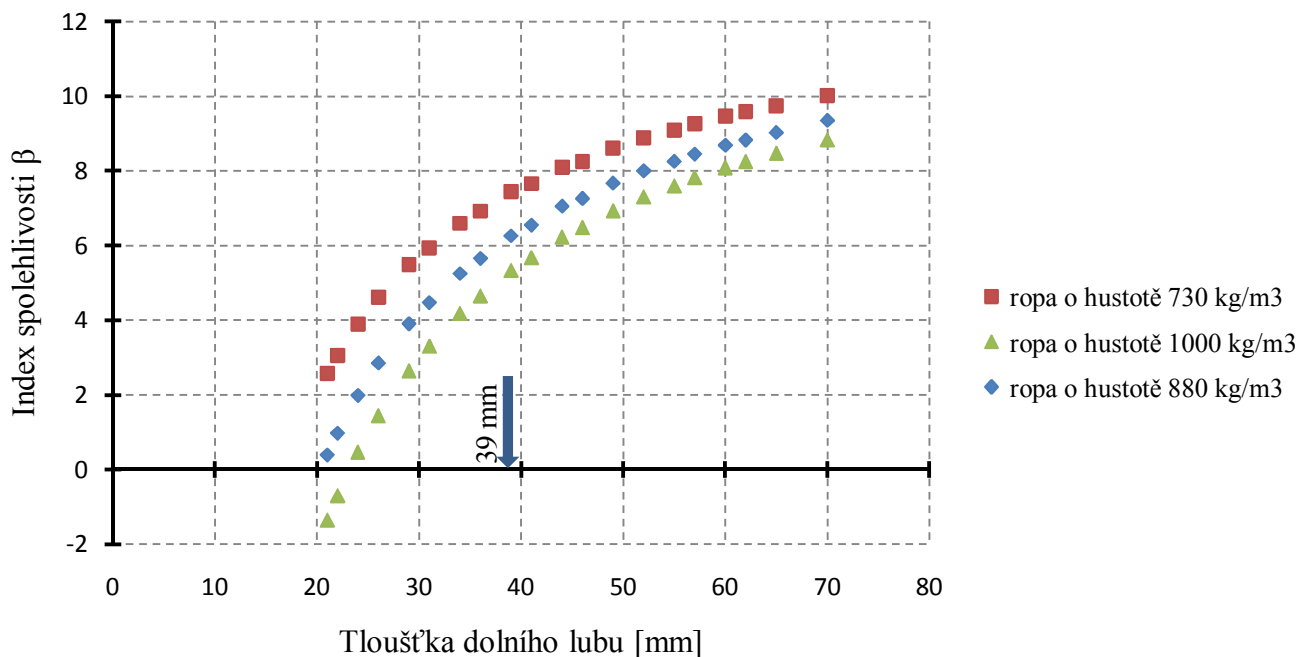
| Č. | Veličina | Typ rozdělení | Střední hodnota | | Směrodatná odchylka | |
|----|----------|---------------|------------------------|-----------|---------------------|----------|
| | | | | | | |
| 1 | f_y | Gauss | S 355 | 393,5 MPa | S 355 | 25,4 MPa |
| | | | S 235 | 284,5 MPa | S 235 | 21,5 MPa |
| 2 | t | Gauss | t | | $0,04 \cdot t$ | |
| 3 | ρ | - | 880 kg/m ³ | | 0 | |
| | | | 730 kg/m ³ | | | |
| | | | 1000 kg/m ³ | | | |
| 4 | h | - | 22 m | | 0 | |
| 5 | r | - | 42,235 m | | 0 | |
| 6 | g | - | 9,81 m/s ² | | 0 | |

Výpočet je uvažován pro tři různé hustoty ropy, které vyjadřují extrémní hodnoty (730 a 1000 kg/m³) a skutečnou hodnotu objemové hmotnosti ropy v nádrži (880 kg/m³). Výška nádrže $h = 22,3 - 0,3 = 22$ m. Ode dna se neuvažuje 0,3 m, protože podmínka spolehlivosti (3.10) by u hrany stěny se dnem, kde se mění tloušťka plechu, byla nepřesná. Tato hodnota je v souladu s normami EEMUA159 a API 653.

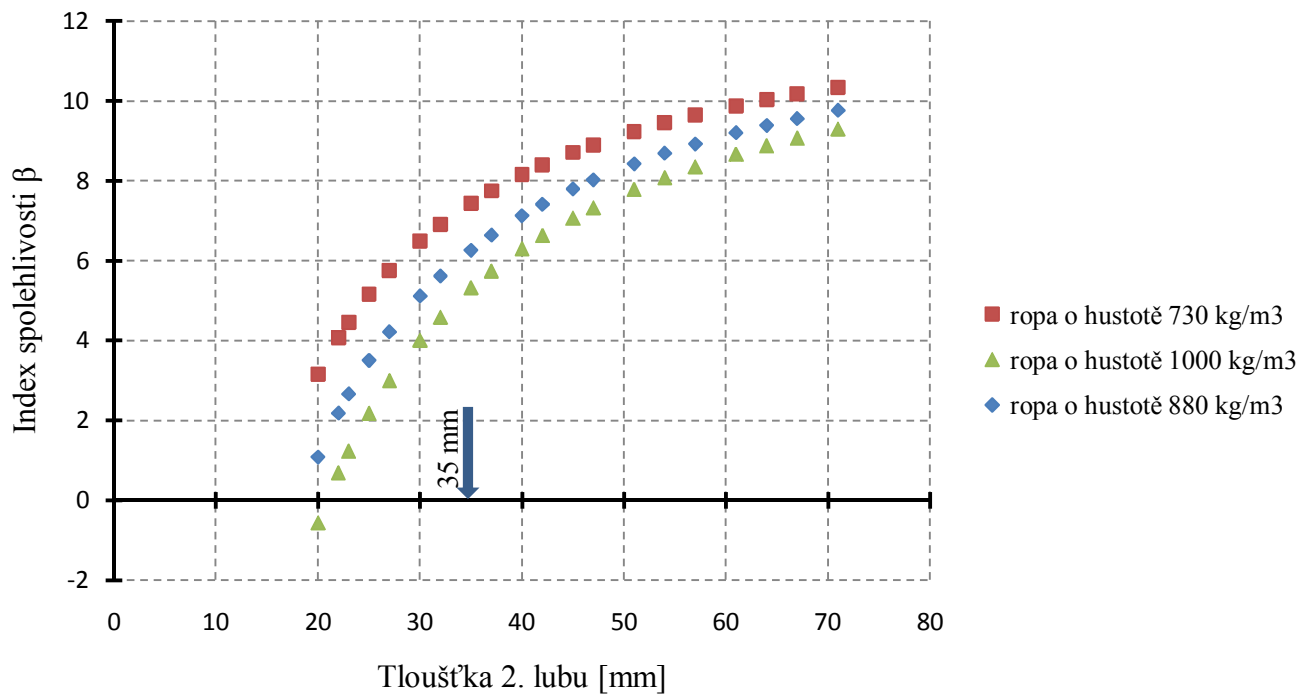
3.5.3 Závislost indexu spolehlivosti na tloušťce stěn nádrže

Index spolehlivosti β byl vypočten pomocí programů Freet a excel. Z Freetu bylo metodou Latin Hypercube Sampling [8, 9] získáno 100 simulovaných náhodných realizací s Gaussovým rozložením hustoty pravděpodobnosti, směrodatnou odchylkou 25,4 MPa a střední hodnotou 393,5 MPa pro mez kluzu ocele S355. Obdobně byly zjištěny i hodnoty pro ocel S235 a různé tloušťky lubů podle tabulky 3.1. V excelu byla těmto hodnotám přiřazena výška lubu, tíhové zrychlení, hustota a poloměr. Dle rovnice (3.10) byl proveden výpočet náhodné veličiny G , u které byla zjištěna směrodatná odchylka a střední hodnota. Podílem byl získán index spolehlivosti dle Cornella.

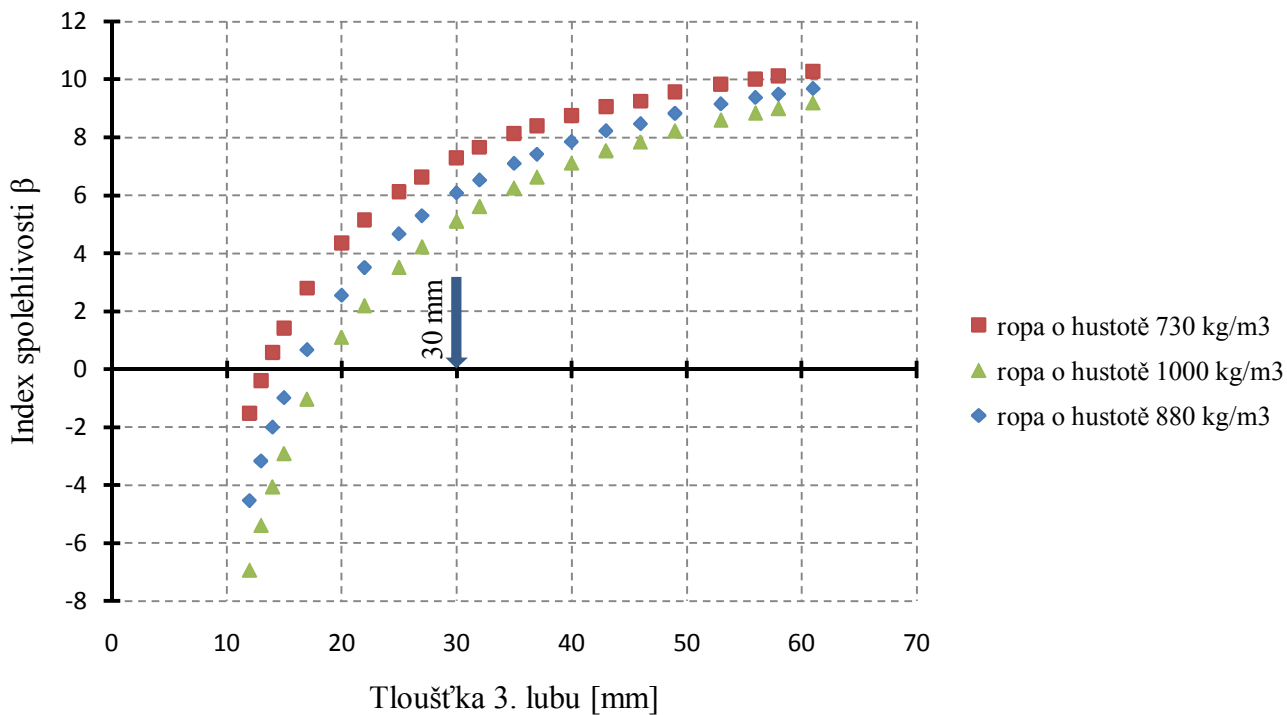
Tloušťka plechu jednotlivých lubů je uvažována jako parametr výpočtu. Pro nominální (průměrnou) hodnotu t tohoto parametru je vypočítán index spolehlivosti β pravděpodobnostním výpočtem. Získáme tak závislost β na t charakterizující provozní spolehlivost nádrže. Následující grafy popisují tuto závislost pro tři výše zmíněné hustoty ropy a všechny luby.



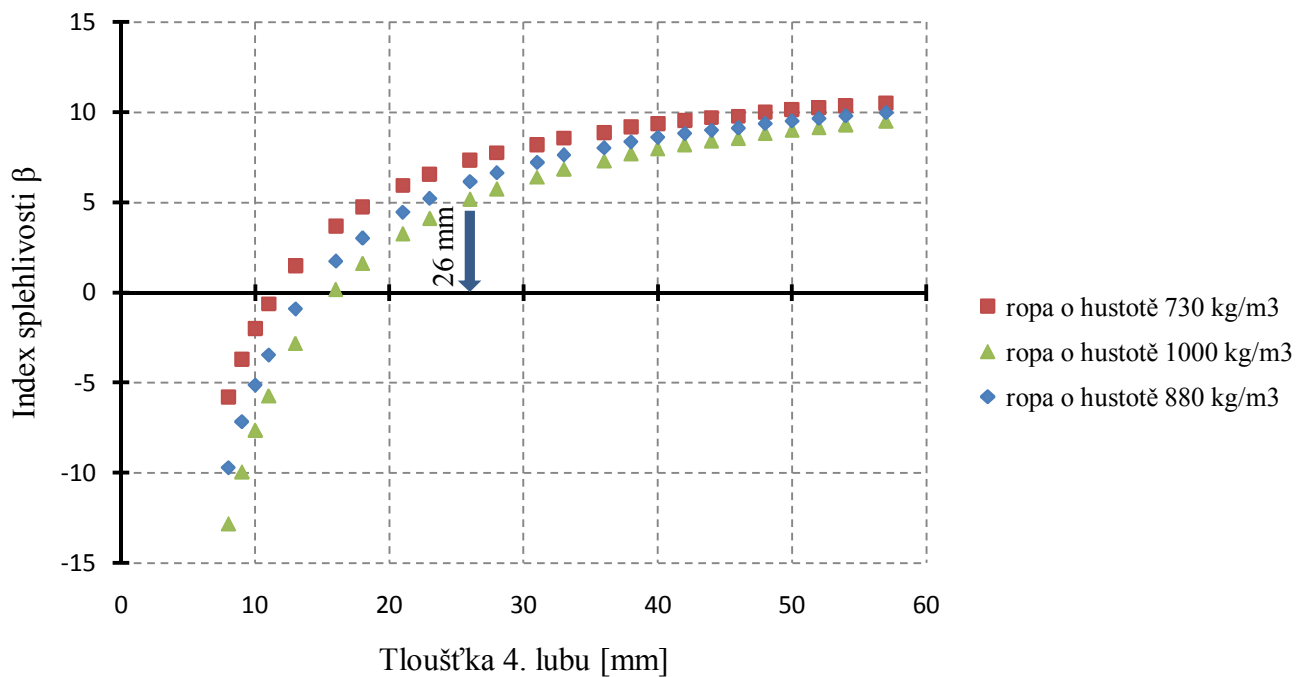
Graf 3.1 Závislost indexu spolehlivosti dle Cornella na tloušťce dolního lubu pro $h = 22$ m



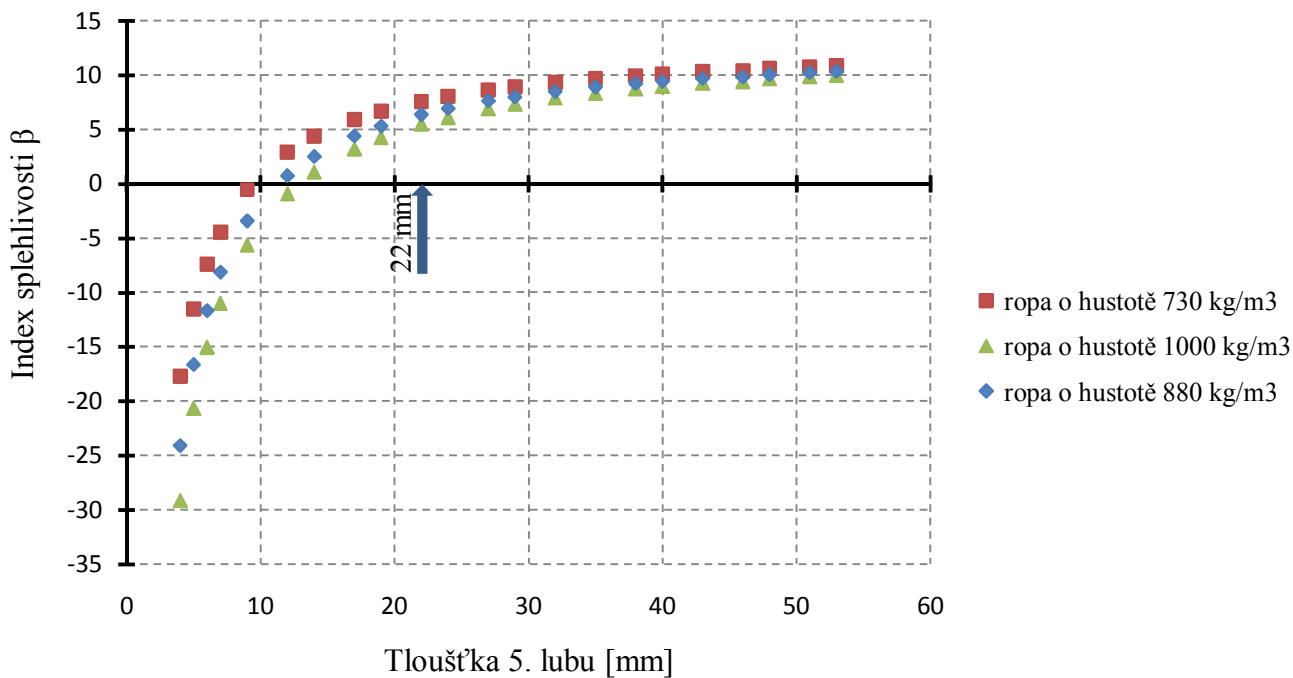
Graf 3.2 Závislost indexu spolehlivosti dle Cornella na tloušťce 2. lubu pro $h = 19,8$ m



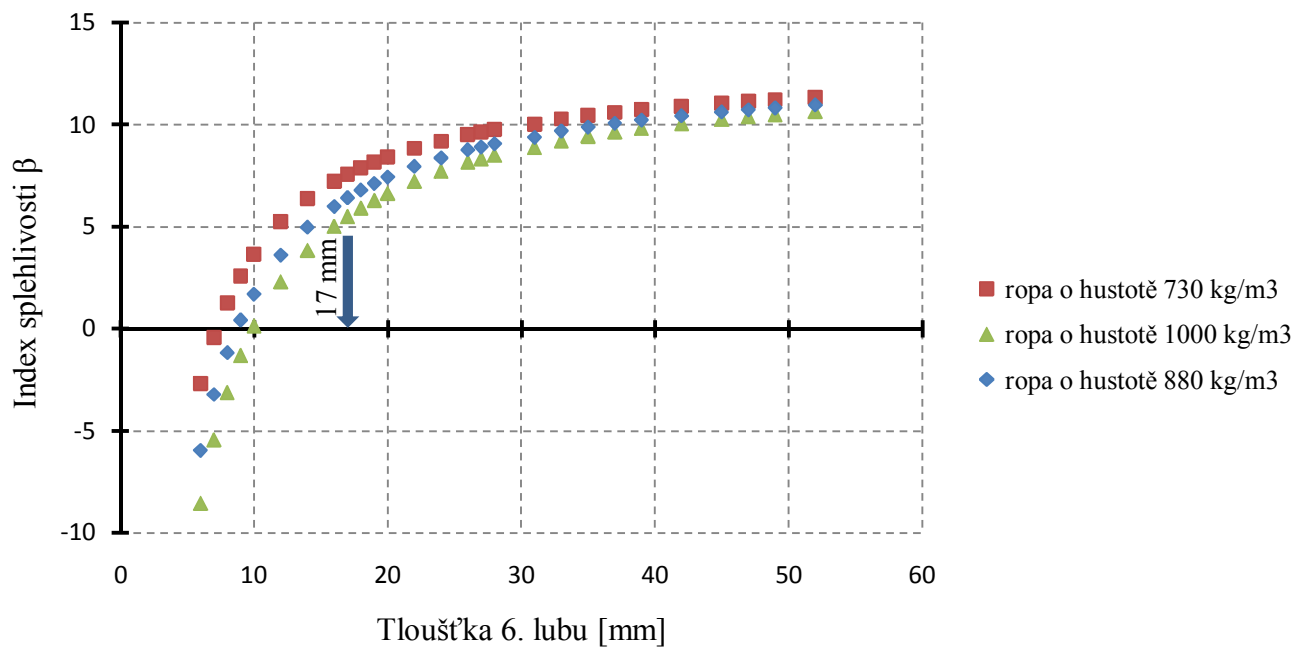
Graf 3.3 Závislost indexu spolehlivosti dle Cornella na tloušťce 3. lubu pro $h = 17,4$ m



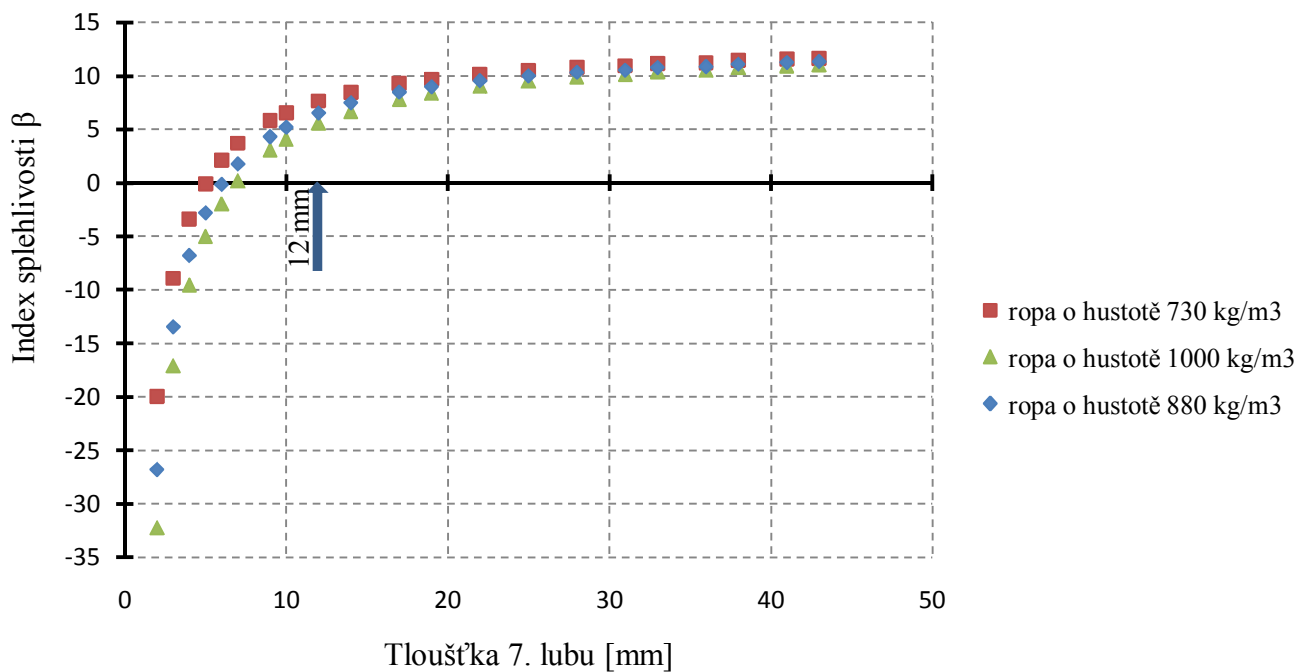
Graf 3.4 Závislost indexu spolehlivosti dle Cornella na tloušťce 4. lubu pro $h = 15,0$ m



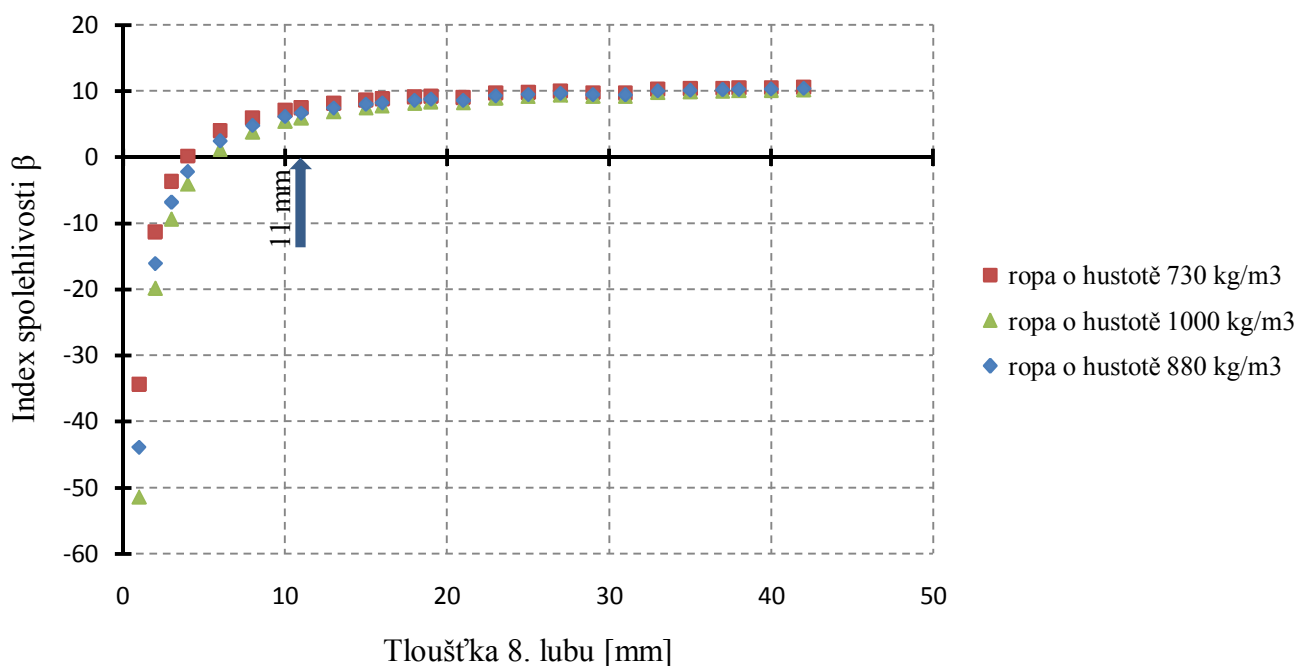
Graf 3.5 Závislost indexu spolehlivosti dle Cornella na tloušťce 5. lubu pro $h = 12,2$ m



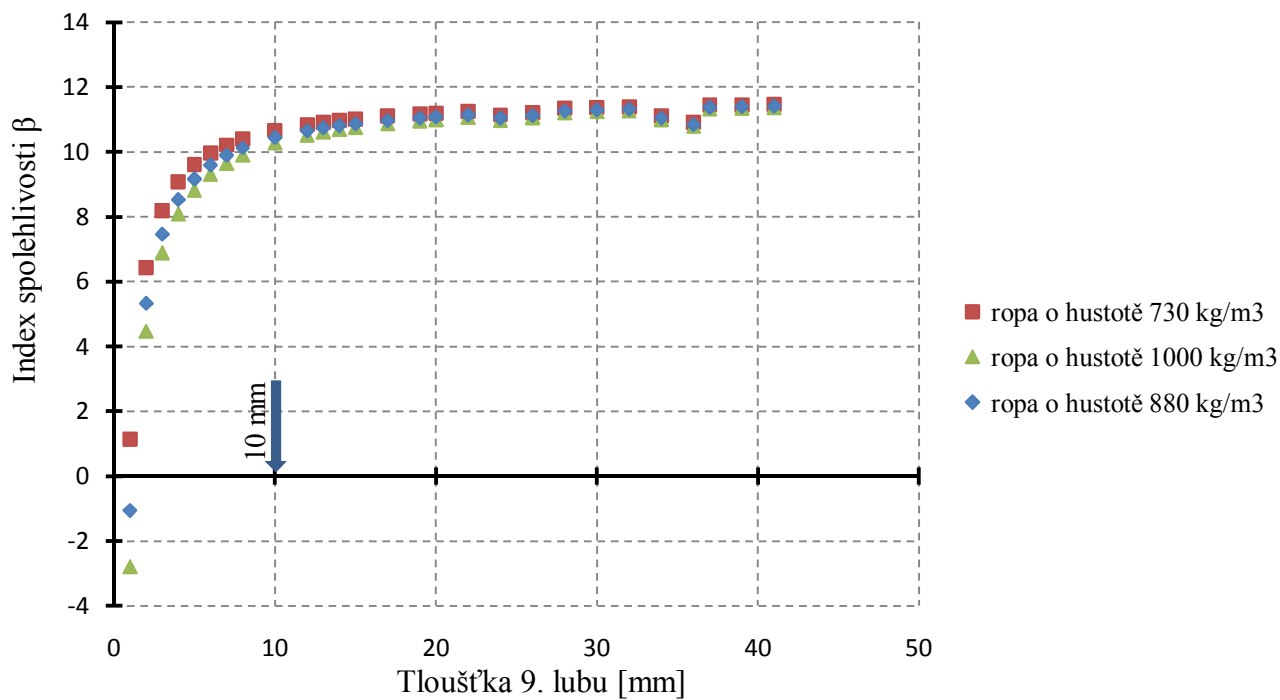
Graf 3.6 Závislost indexu spolehlivosti dle Cornella na tloušťce 6. lubu pro $h = 9,4$ m



Graf 3.7 Závislost indexu spolehlivosti dle Cornella na tloušťce 7. lubu pro $h = 6,55$ m



Graf 3.8 Závislost indexu spolehlivosti dle Cornella na tloušťce 8. lubu pro $h = 3,7$ m



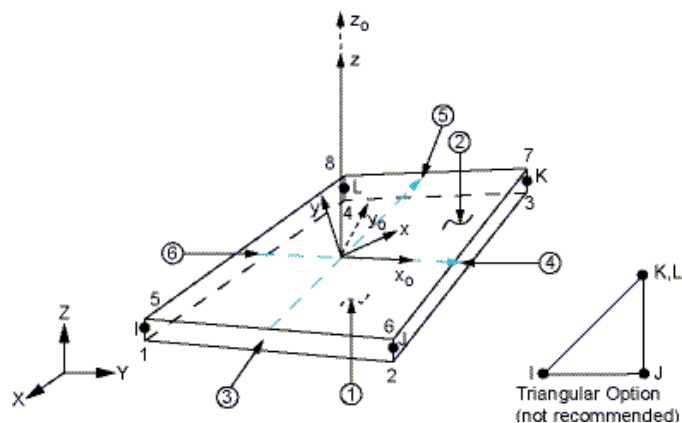
Graf 3.9 Závislost indexu spolehlivosti dle Cornella na tloušťce 9. lubu pro $h = 0,85$ m

4 VÝPOČTOVÝ MODEL V PROGRAMU ANSYS

Programový systém ANSYS je založen na řešení numerického modelu pomocí metody konečných prvků. V tomto systému jsou výstupem deformace a z nich jsou zjištěny napětí a vnitřní síly. Princip práce v systému ANSYS je následující. V první řadě je vytvořen geometrický model, který je následně diskretizován sítí konečných prvků. Správná volba sítě konečných prvků závisí na požadovaném tvaru sítě a také na způsobu zatížení modelu konstrukce. Síť může být volná nebo mapovaná. Celý model je pokryt mapovanou sítí konečných prvků. Následuje samotný výpočet a jeho řešení. Postprocesor programu ANSYS umožňuje výstup a vygenerování výsledků v grafickém i textovém formátu.

4.1 Použité prvky

Pro řešení byl použit prvek SHELL 181, viz [6]. Prvek je vhodný pro modelování tenkých až mírně tlustých skořepinových prvků. Jedná se o čtyř-uzlový prvek se šesti stupni volnosti v každém uzlu: posuny v lokálních osách x , y a z a rotace okolo lokálních os x , y a z , viz obr. 4.1. Je možné použít také trojúhelníkovou variantu. Prvek se používá pro popis ohybového i membránového chování skořepin. Prvek je vhodný pro řešení úloh lineárních, velkých rotací a velkých nelineárních přetvoření. Dále se dá použít pro vícevrstvé skořepinové konstrukce.



Obr. 4.1 Geometrie prvku SHELL181 [6]

Vstupní údaje prvku:

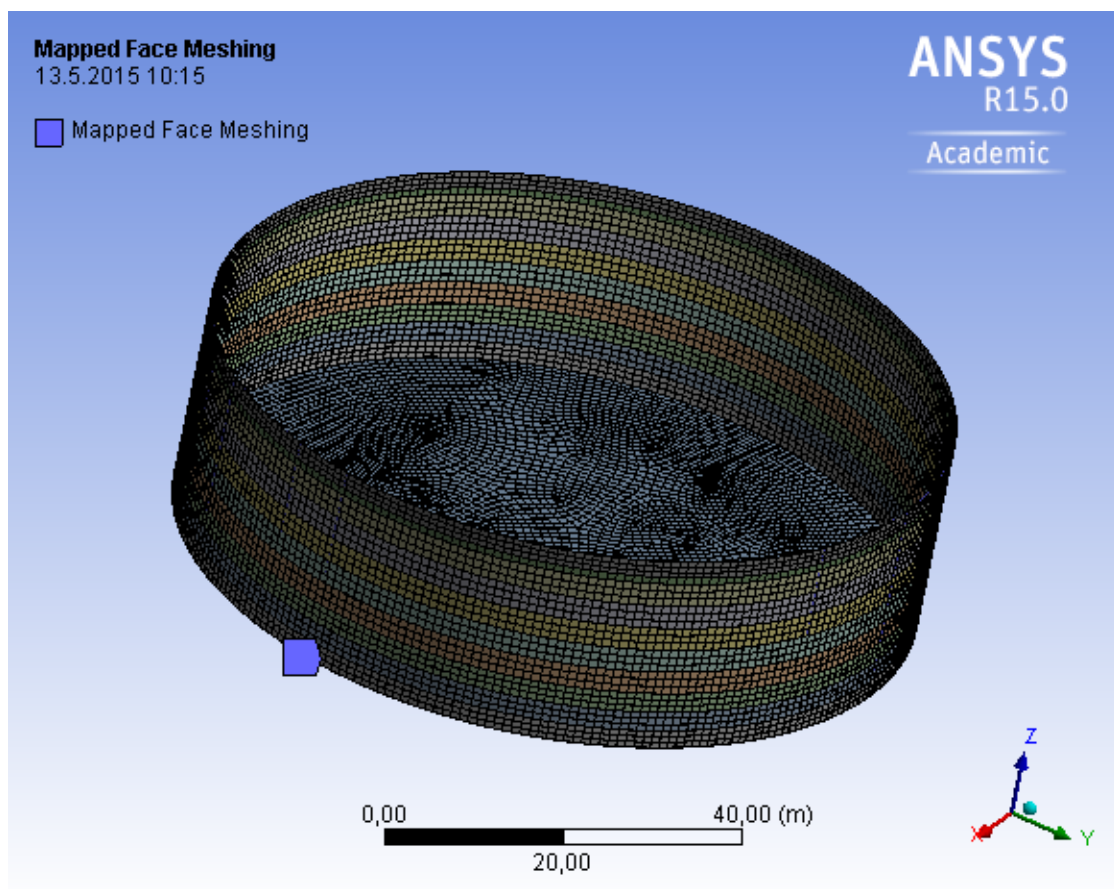
- Název: SHELL181
- Uzly: I, J, K, L
- Stupně volnosti: UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ
- Materiálové vlastnosti: EX, EY, EZ, ALPX, ALPY, ALPZ, DENS, GXY, GXZ, GYZ, ALPD
- Povrchové zatížení: Spojité zatížení na plochy.
- Objemové zatížení: Teploty T(1), T(2), ... ,T(8)

4.2 Okrajové podmínky

Nádrž byla podepřena v celé ploše patního plechu. Stupně volnosti jsou ve všech směrech nulové ($UX = UY = UZ = ROTX = ROTY = ROTZ = 0$).

4.3 Síť konečných prvků

Síť skořepinové konstrukce byla vygenerována programem automaticky pomocí čtyřhranných mapovaných prvků. Tvorba sítě proběhla bez chybných i varovných hlášek. Síť je zobrazena na obr. 4.2.



Obr. 4.2 Síť konečných prvků nádrže

Skořepinovým prvkům byl přiřazen materiál odpovídající oceli. Hodnota hustoty je 7850 kg/m^3 , hodnota modulu pružnosti 210 GPa a hodnota poissonova součinitele je $0,3$. V tabulce 4.1 jsou počty prvků v lubech a dně.

Tabulka 4.1: Počet prvků modelu nádrže

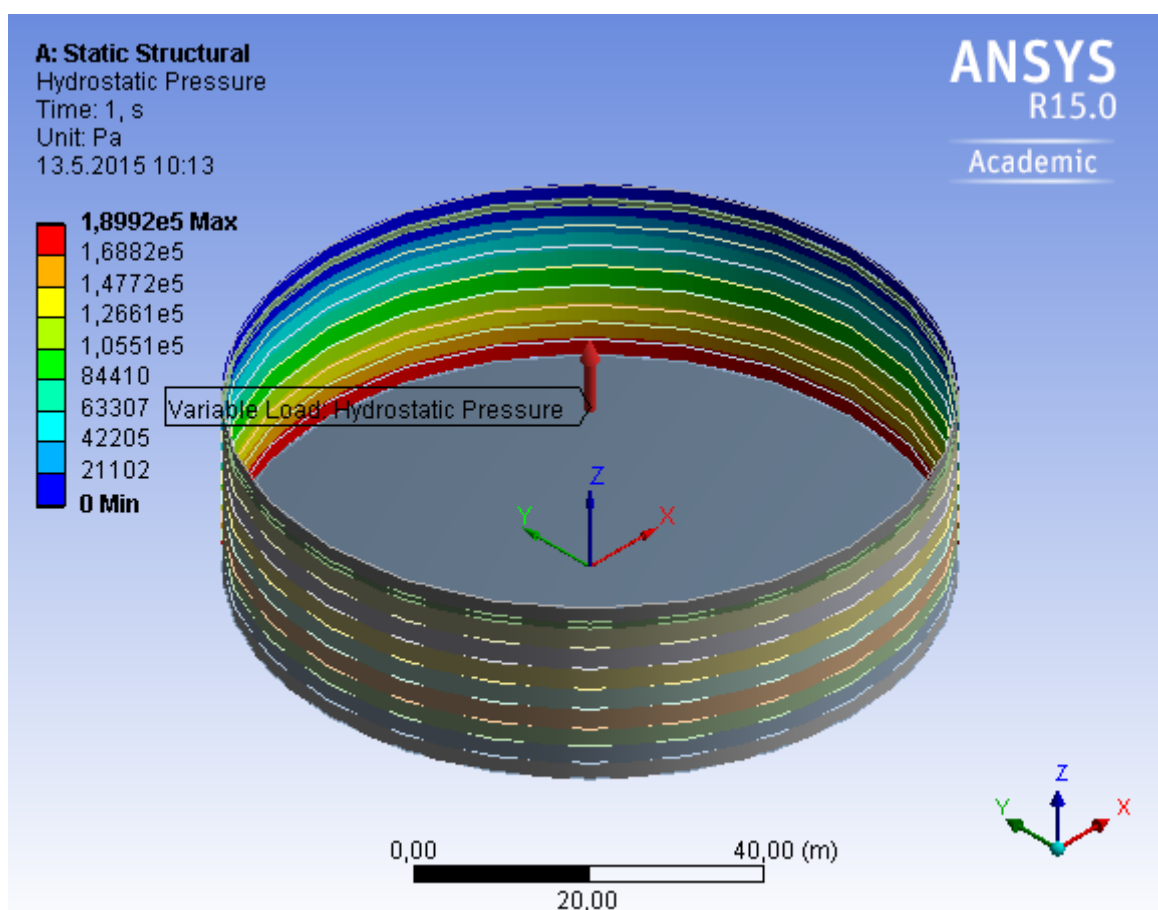
| lub | 1. (dolní) | 2. | 3. | 4. | 5. | 6. | 7. | 8. | 9. | dno |
|---------------------|--------------|----|----|----|----|----|----|----|----|------|
| Počet uzlů | 1596 | | | | | | | | | 9033 |
| Počet prvků | 1064 | | | | | | | | | 8903 |
| Celkem uzlů | 16481 | | | | | | | | | |
| Celkem prvků | 16351 | | | | | | | | | |

4.4 Zatížení skořepiny

Vlastní tíha je počítána automaticky programem a je definována gravitačním zrychlením ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$) ve směru osy z a zadanou hustotou jednotlivých částí modelu. Vlastní tíha stěny nádrže je závislá na zatížení plechů jednotlivých lubů, jejichž tloušťka roste od okraje nádrže směrem ke dnu. Druhý lub je zatížen vlastní tíhou prvního lubu $2,237 \text{ kN/m}$, třetí lub je zatížen vlastní tíhou horních lubů $4,698 \text{ kN/m}$ atd., viz tabulka 4.2. Maximální tlak ropy na stěnu nádrže je u dna

$$p = \rho \cdot g \cdot h = 880 \cdot 9,81 \cdot 22 = 189921,6 \text{ Pa}$$

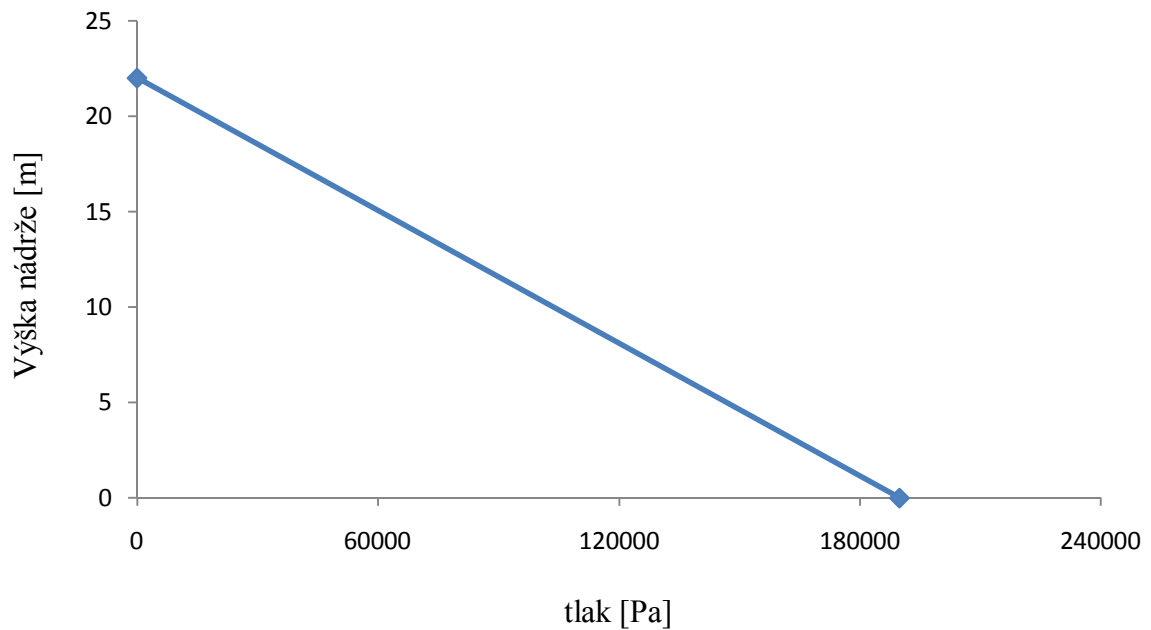
a hodnoty pro ostatní vzdálenosti ode dna k hladině mohou být lineárně interpolovány, viz graf 4.1.



Obr 4.3 Hydrostatický tlak

Tabulka 4.2: Vlastní tíha lubů

| lub | 1. (horní) | 2. | 3. | 4. | 5. | 6. | 7. | 8. | 9. |
|---------------------------------|---------------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Vlastní tíha lubu [kN/m] | 2,237 | 4,698 | 7,383 | 11,186 | 16,022 | 21,737 | 27,389 | 33,983 | 40,718 |

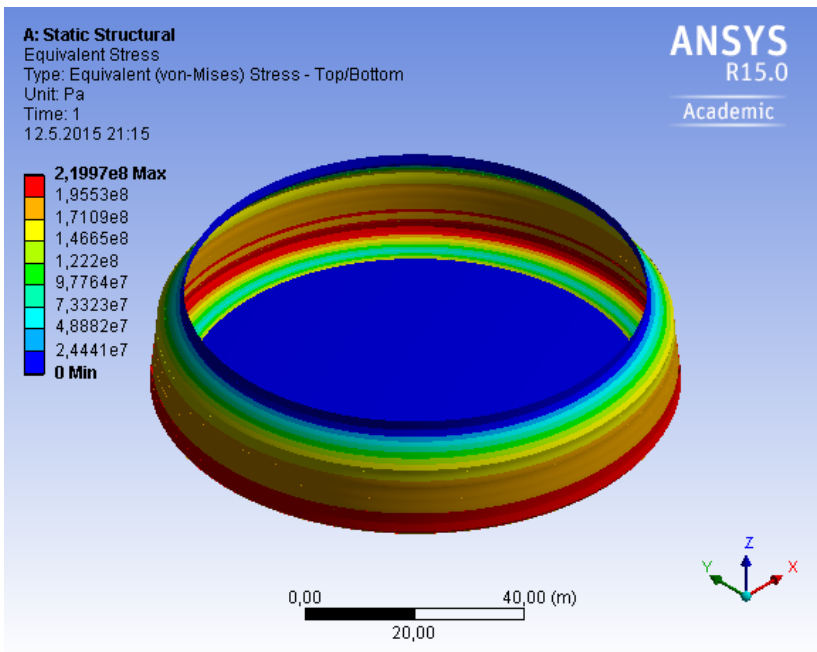


Graf 4.1 Hydrostatický tlak

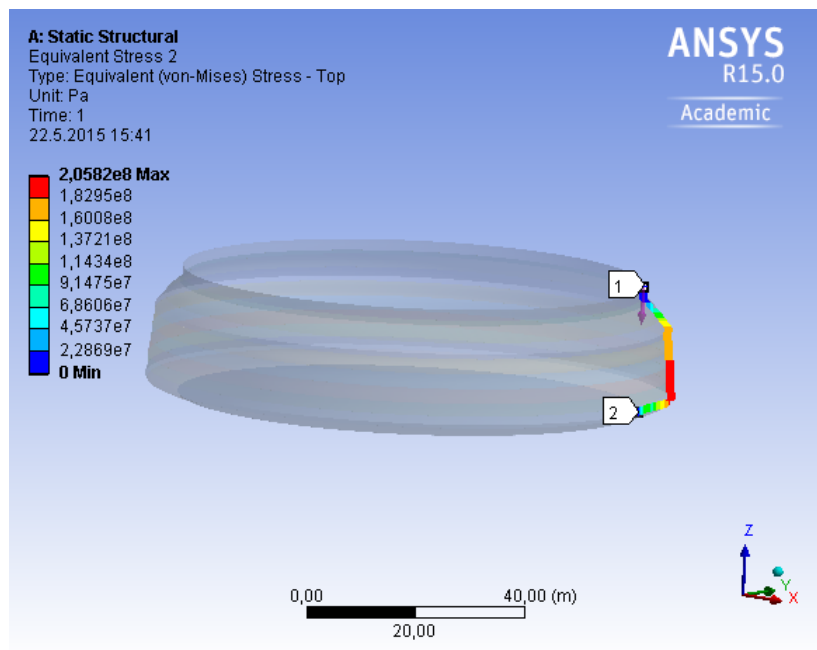
4.5 Analýza napětí a deformace nádrže

Pro zjištění napětí od zatížení je využito řešení lineární statické analýzy. Grafické výstupy napětí a deformace jsou následující:

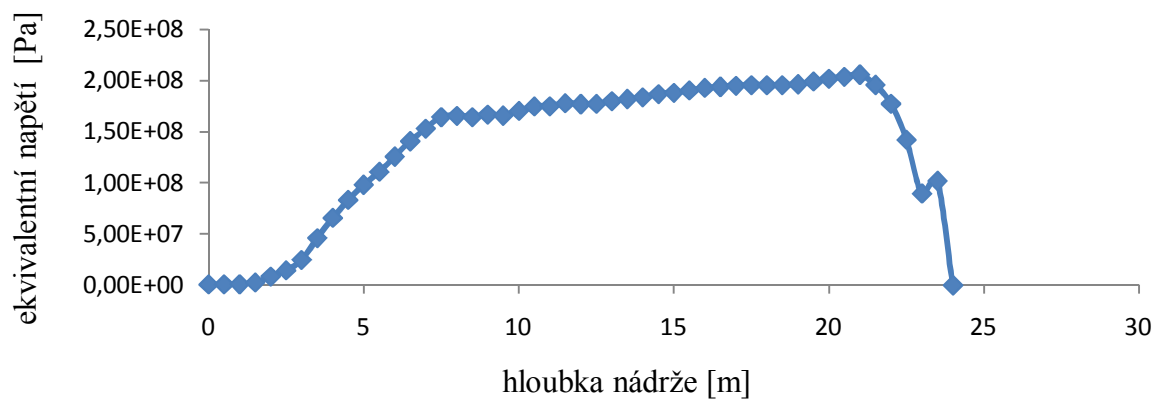
- obr. 4.4 Ekvivalentní (von Misesovo) napětí
- obr. 4.6 Normálové napětí po obvodu
- obr. 4.16 Membránové napětí
- obr. 4.10 Maximální hlavní napětí
- obr. 4.12 Střední hlavní napětí
- obr. 4.14 Minimální hlavní napětí
- obr. 4.18 Celková deformace
- obr. 4.8 Normálové napětí (kolmé na osu x)



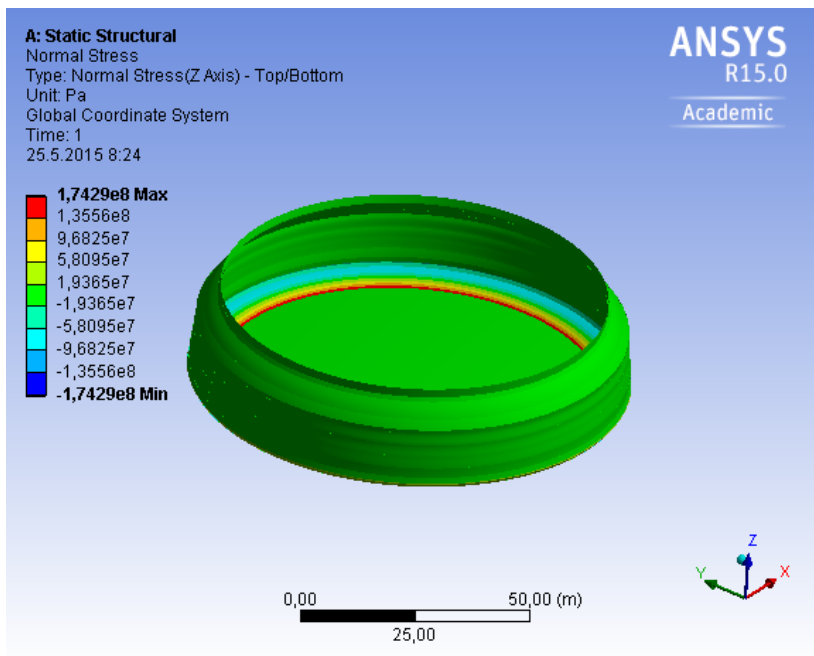
Obr. 4.4 Ekvivalentní (von Misesovo) napětí



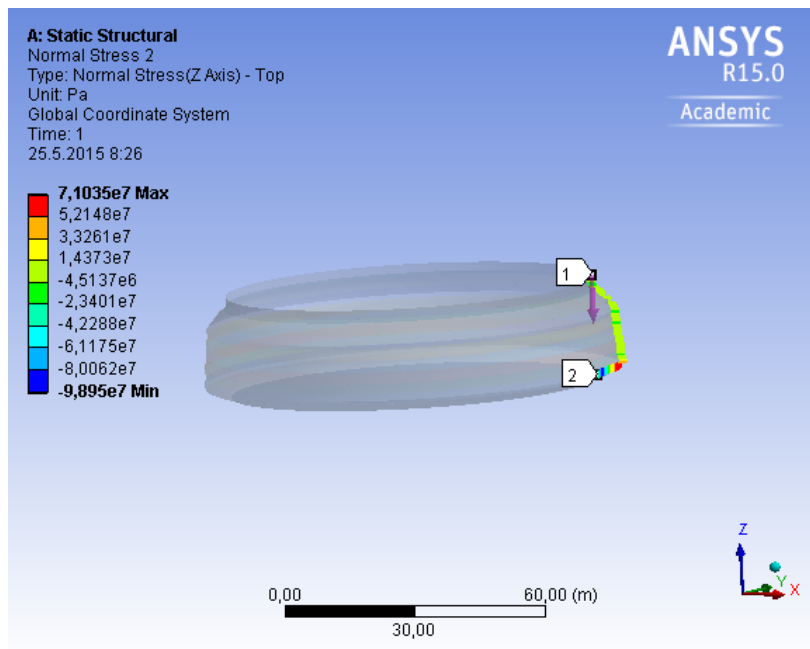
Obr. 4.5 Ekvivalentní (von Misesovo) napětí v řezu



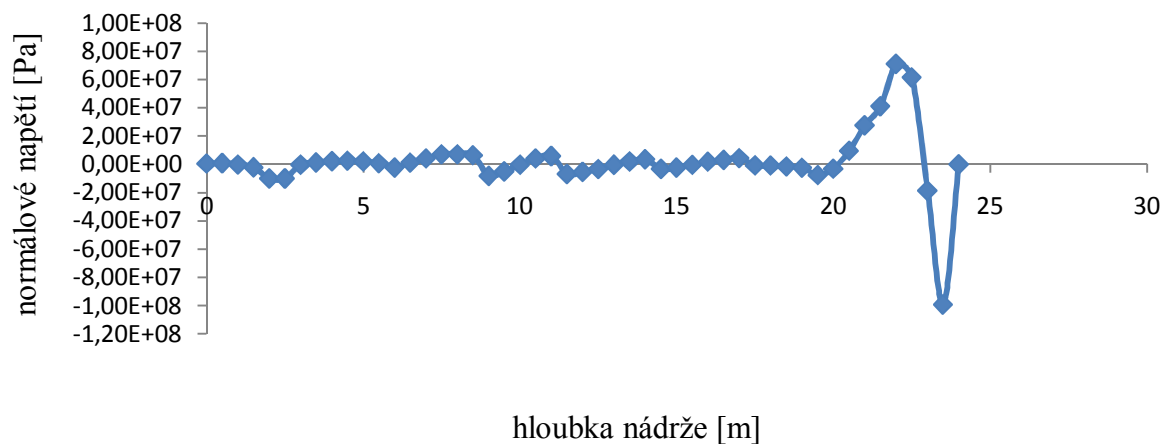
Graf 4.2 Ekvivalentní (von Misesovo) napětí



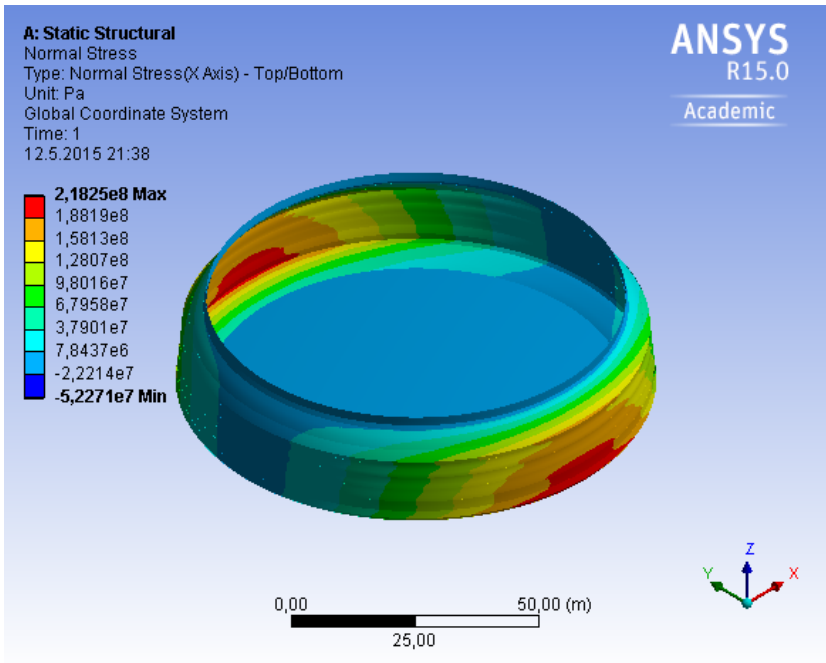
Obr. 4.6 Normálové napětí po obvodu



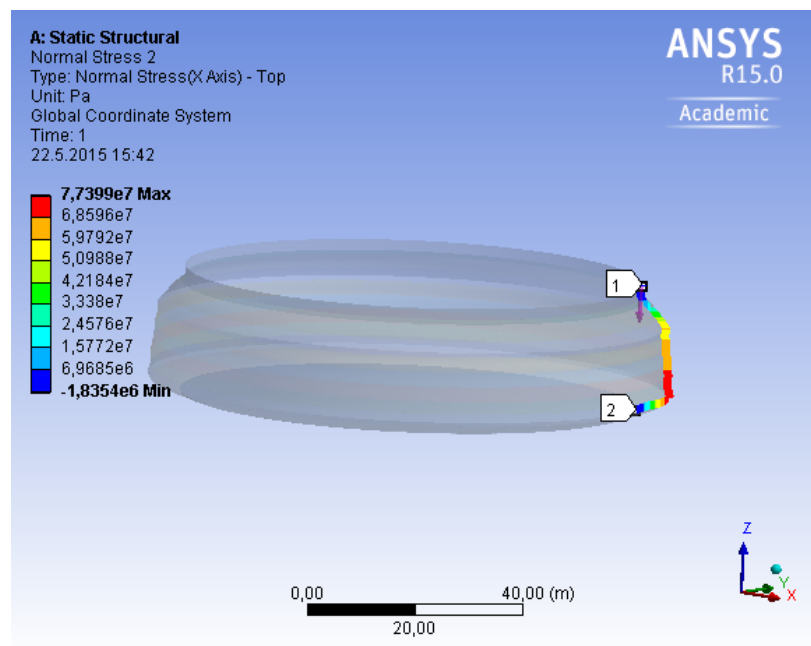
Obr. 4.7 Normálové napětí po obvodu v řezu



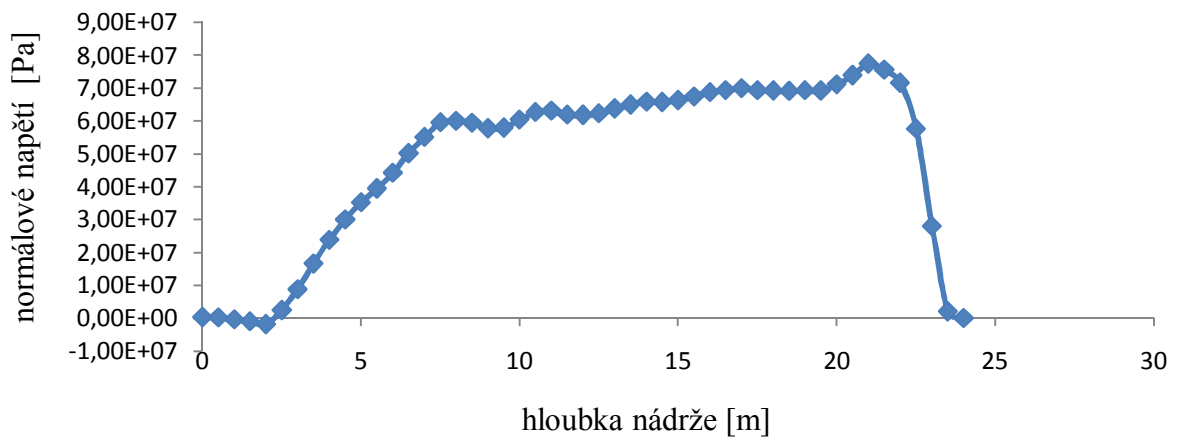
Graf 4.3 Normálové napětí po obvodu



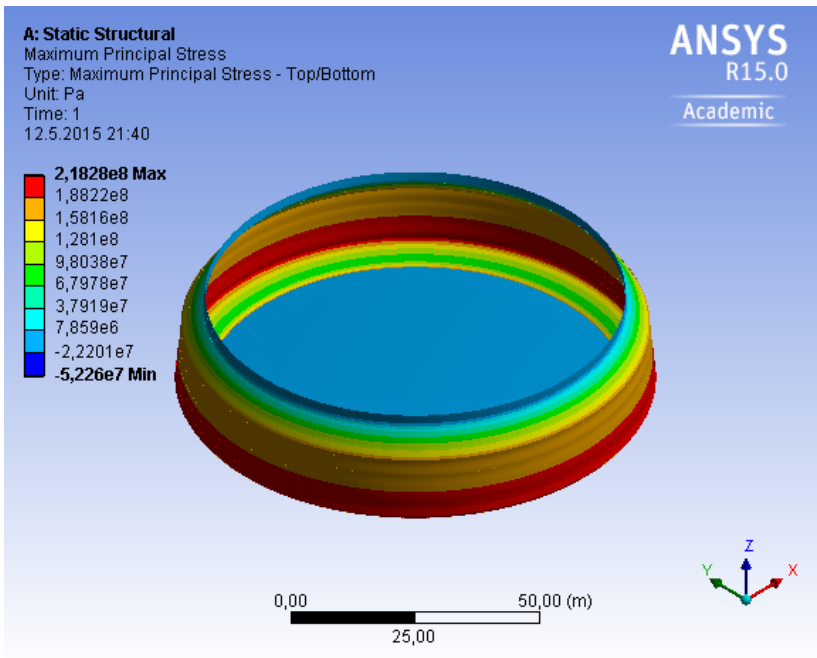
Obr. 4.8 Normálové napětí (kolmé na osu x)



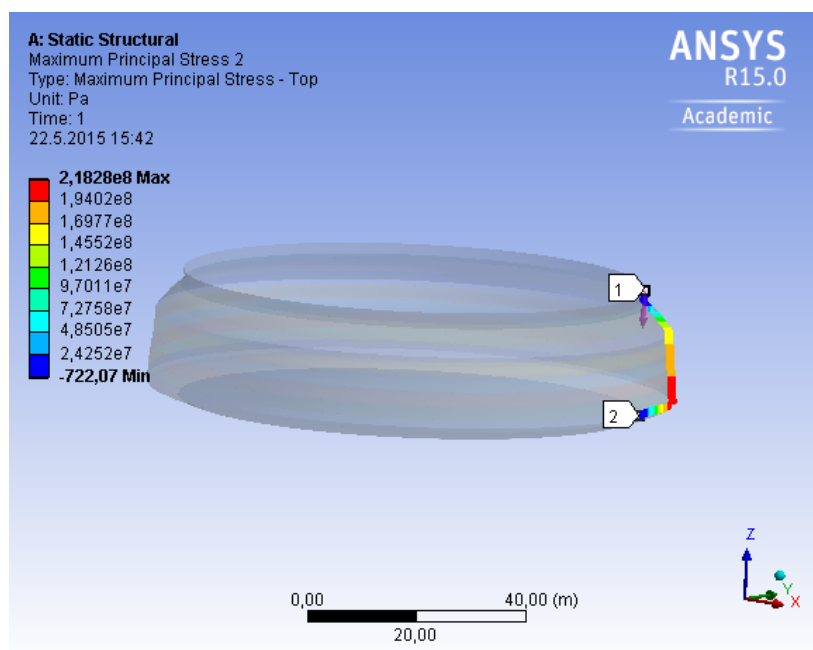
Obr. 4.9 Normálové napětí (kolmé na osu x) v řezu



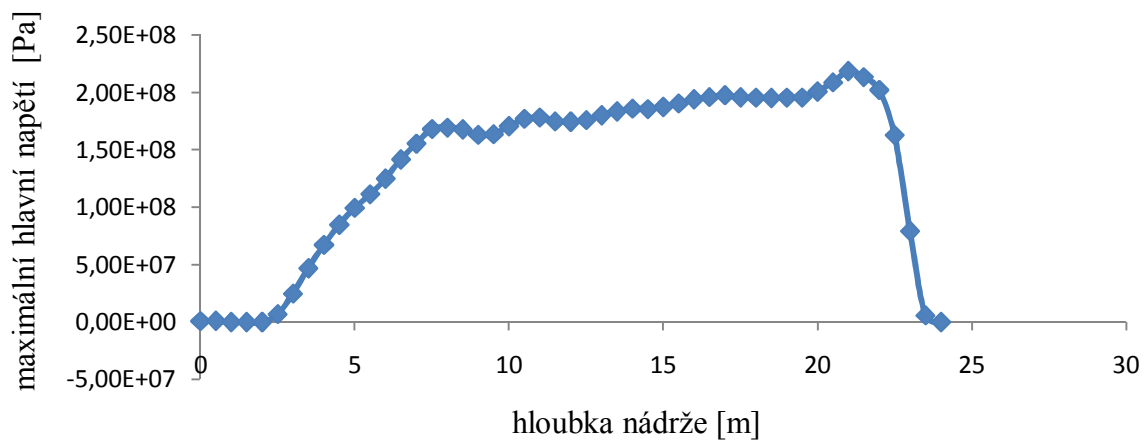
Graf 4.4 Normálové napětí (kolmé na osu x)



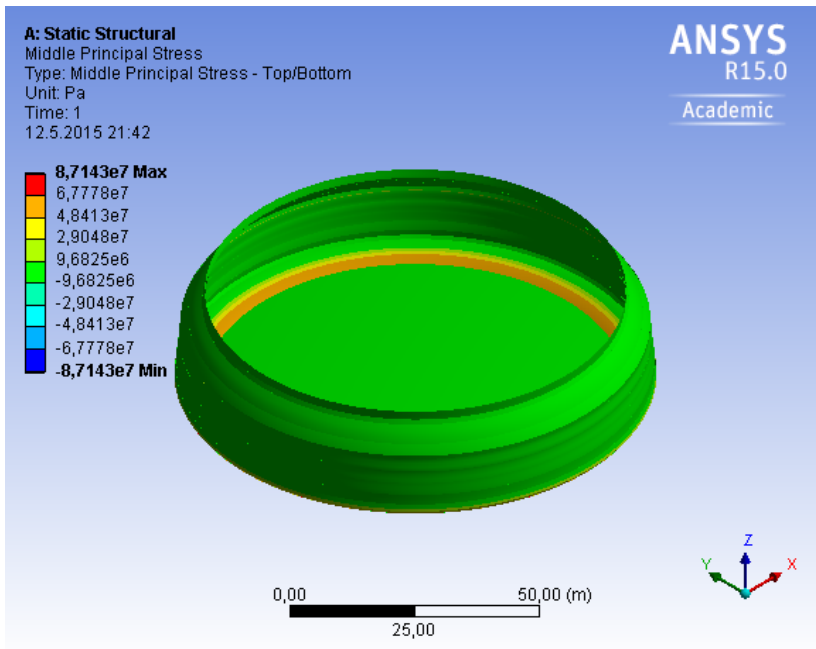
Obr. 4.10 Maximální hlavní napětí



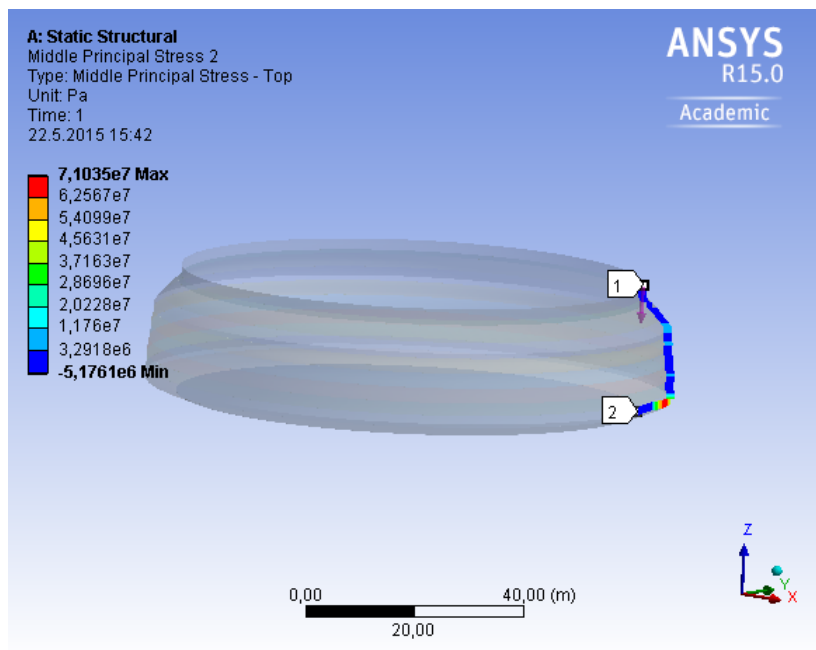
Obr. 4.11 Maximální hlavní napětí v řezu



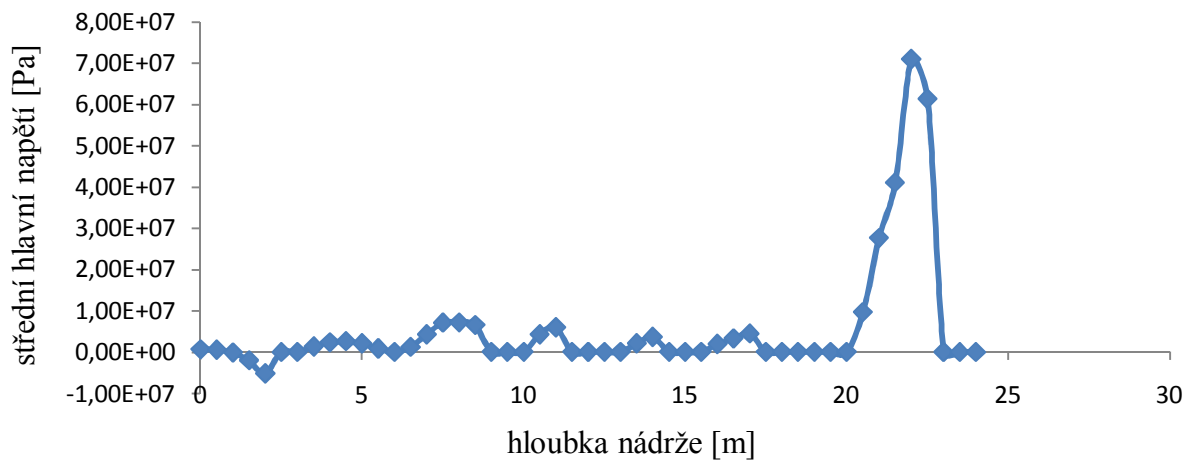
Graf 4.5 Maximální hlavní napětí



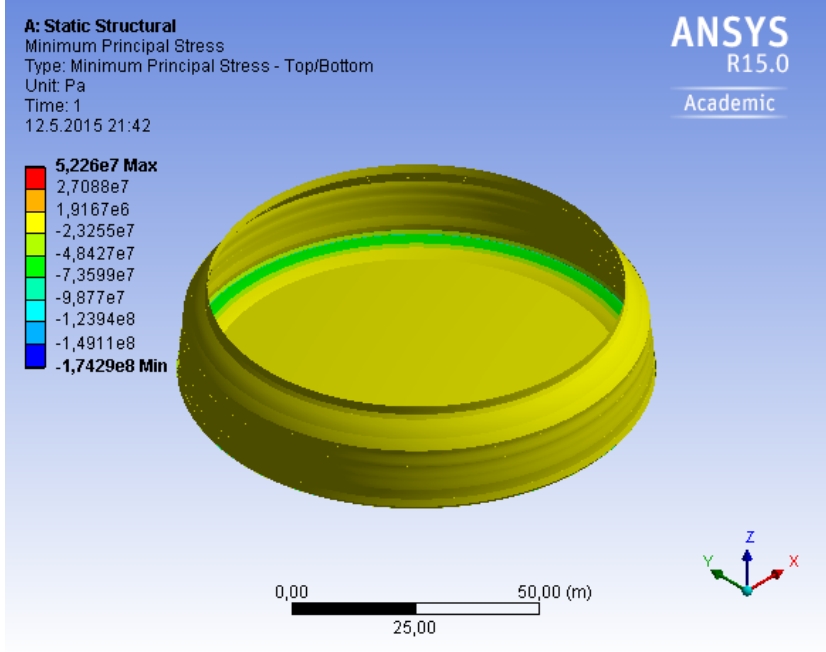
Obr. 4.12 Střední hlavní napětí



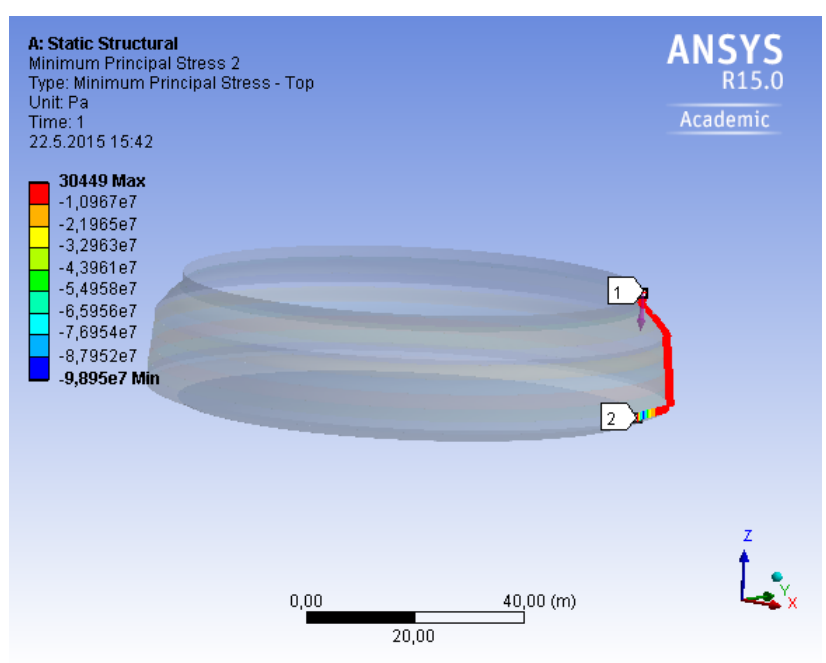
Obr. 4.13 Střední hlavní napětí v řezu



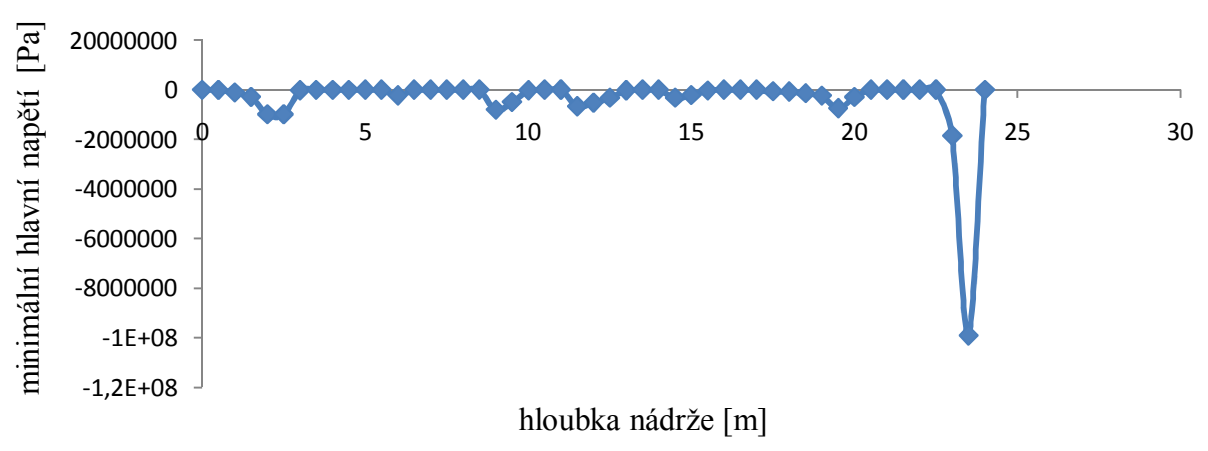
Graf 4.6 Střední hlavní napětí



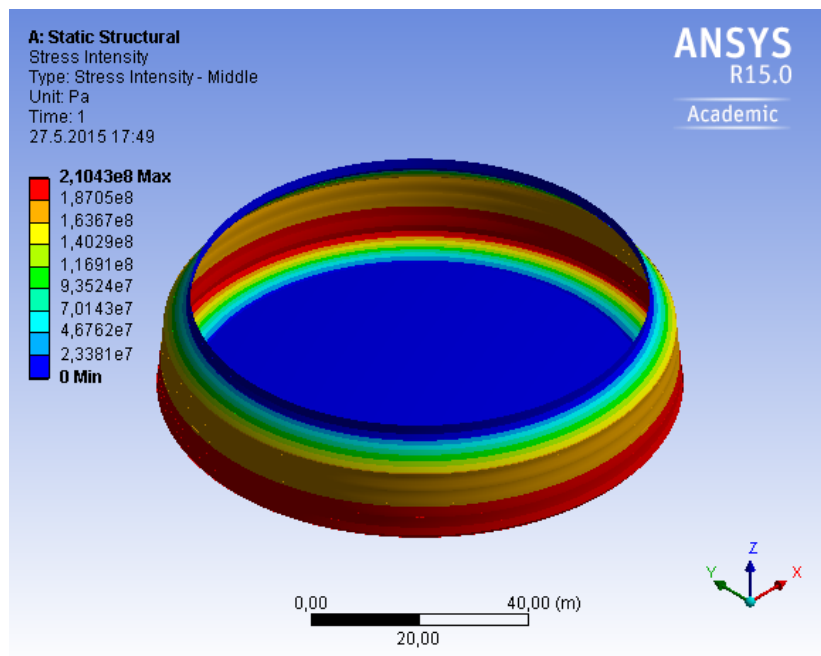
Obr. 4.14 Minimální hlavní napětí



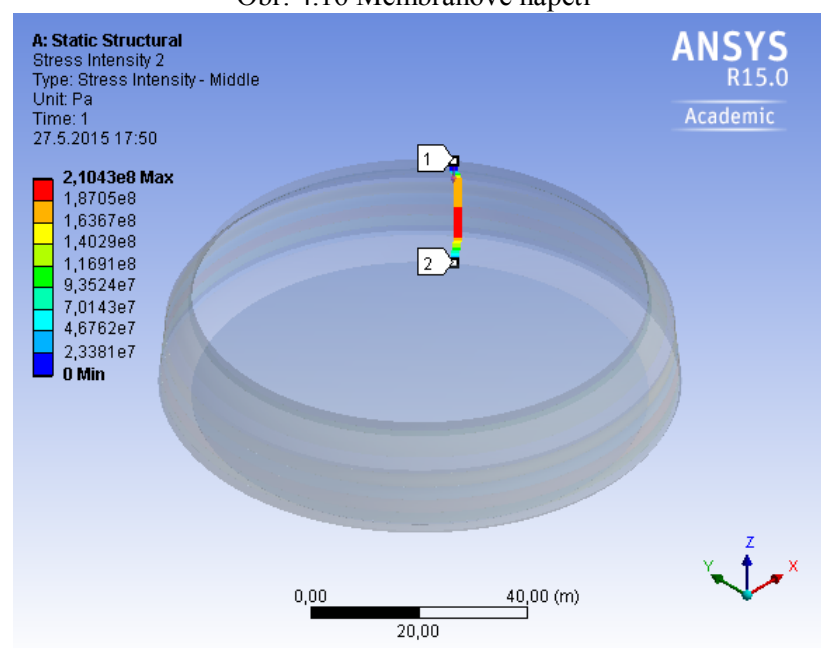
Obr. 4.15 Minimální hlavní napětí v řezu



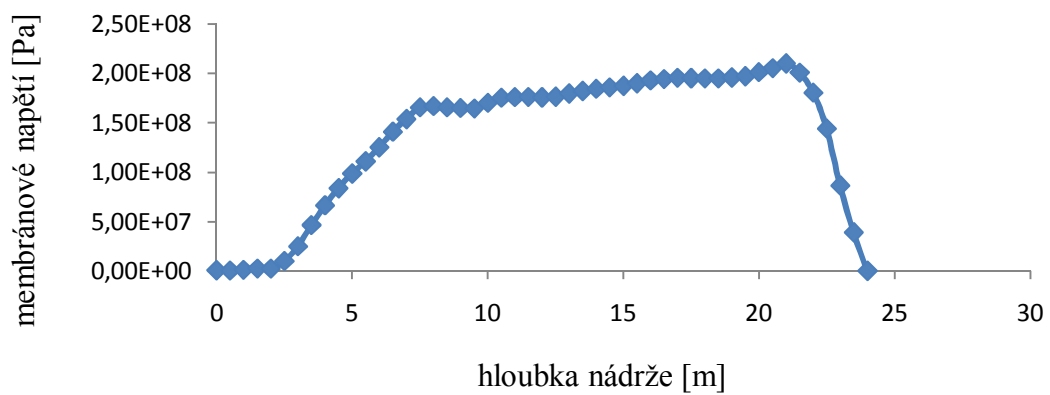
Graf 4.7 Minimální hlavní napětí



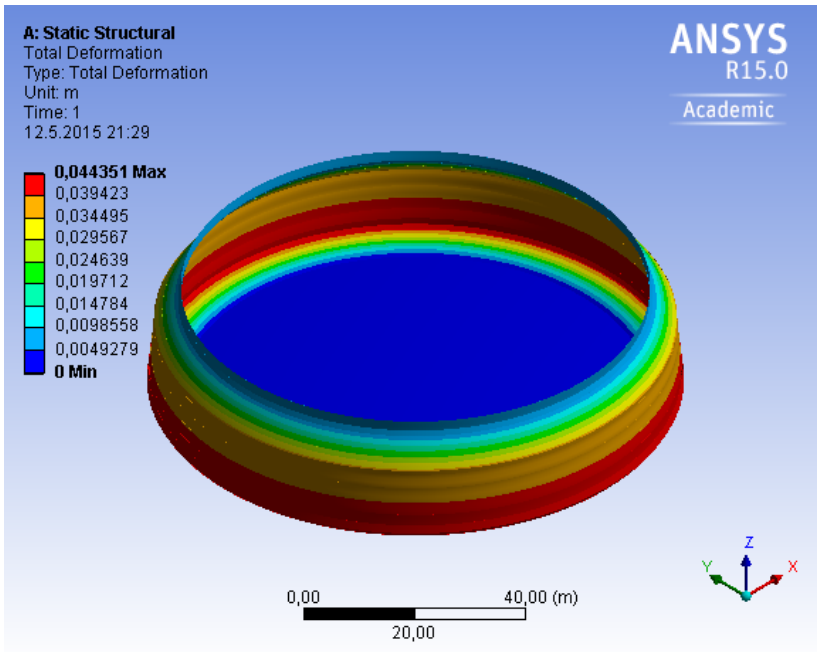
Obr. 4.16 Membránové napětí



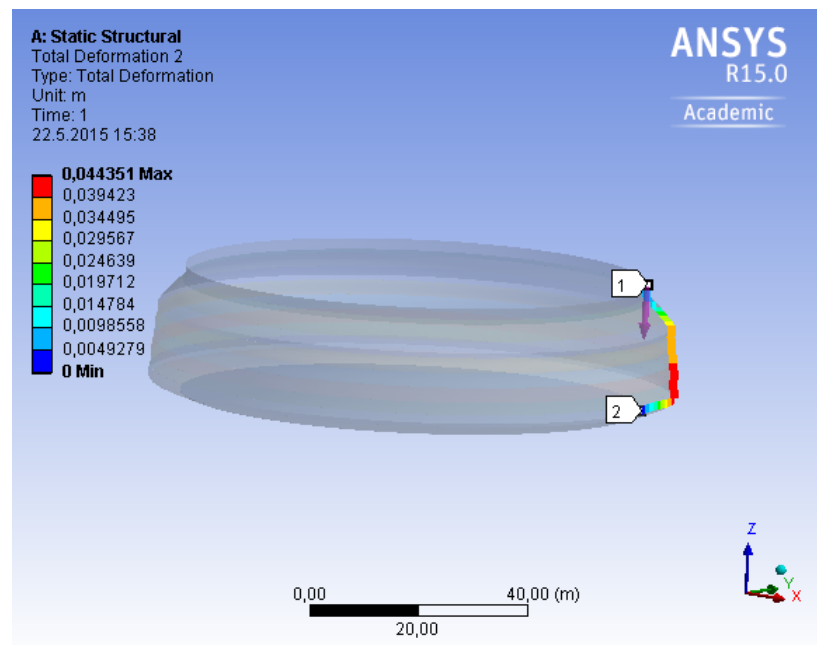
Obr. 4.17 Membránové napětí v řezu



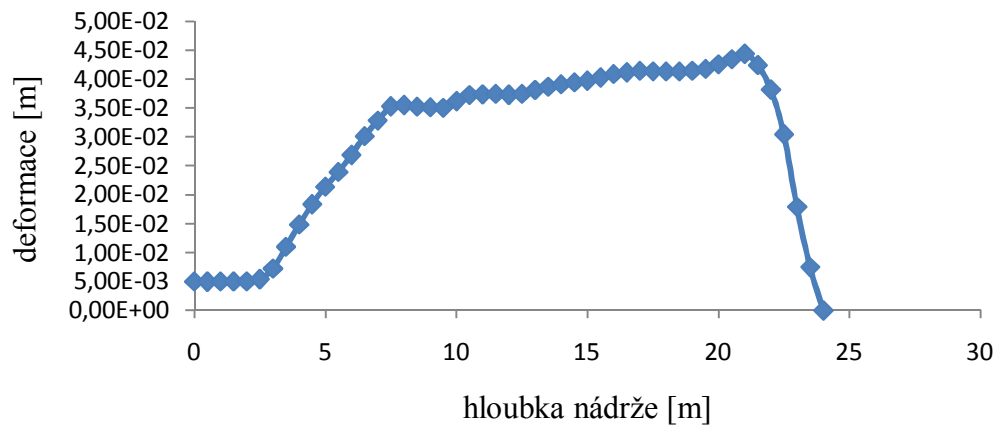
Graf 4.8 Membránové napětí



Obr. 4.18 Celková deformace



Obr. 4.19 Celková deformace v řezu



Graf 4.9 Celková deformace

ZÁVĚR

Cílem první části bakalářské práce bylo posouzení návrhu skladovací nádrže na ropu pravděpodobnostní analýzou spolehlivosti zpracované s pomocí indexu spolehlivosti podle Cornella. Základem byla podmínka spolehlivosti ve tvaru uvedeném níže.

$$G = f_y \cdot t - \rho \cdot g \cdot h \cdot r \geq 0$$

Programem Freet byla provedena randomizace vstupních náhodných veličin s Gaussovým rozložením (mezi kluzu a tloušťek lubů). Poté byly zjištěny hodnoty indexu spolehlivosti β pro různé tloušťky stěn. Z grafů závislostí β na tloušťce plechů stěn nádrže byly zjištěny hodnoty β pro jednotlivé tloušťky lubů nádrže a tři různé objemové hmotnosti ropy. Hodnoty indexů spolehlivosti β jsou posouzeny v následující tabulce s mezní hodnotou β , která je rovna 3,8.

| | tloušťka lubu [mm] | objemová hmotnost ropy [kg/m ³] | index spolehlivosti β [-] | mezní hodnota β [-] | posouzení |
|----------------|--------------------|---|---------------------------------|---------------------------|-----------|
| 1. lub (dolní) | 39 | 730 | 7,432 | 3,8 | vyhovuje |
| | | 880 | 6,263 | 3,8 | vyhovuje |
| | | 1000 | 5,328 | 3,8 | vyhovuje |
| 2. lub | 35 | 730 | 7,441 | 3,8 | vyhovuje |
| | | 880 | 6,265 | 3,8 | vyhovuje |
| | | 1000 | 5,324 | 3,8 | vyhovuje |
| 3. lub | 30 | 730 | 7,297 | 3,8 | vyhovuje |
| | | 880 | 6,091 | 3,8 | vyhovuje |
| | | 1000 | 5,126 | 3,8 | vyhovuje |
| 4. lub | 26 | 730 | 7,341 | 3,8 | vyhovuje |
| | | 880 | 6,139 | 3,8 | vyhovuje |
| | | 1000 | 5,177 | 3,8 | vyhovuje |
| 5. lub | 22 | 730 | 7,554 | 3,8 | vyhovuje |
| | | 880 | 6,401 | 3,8 | vyhovuje |
| | | 1000 | 5,479 | 3,8 | vyhovuje |
| 6. lub | 17 | 730 | 7,570 | 3,8 | vyhovuje |
| | | 880 | 6,421 | 3,8 | vyhovuje |
| | | 1000 | 5,501 | 3,8 | vyhovuje |
| 7. lub | 12 | 730 | 7,642 | 3,8 | vyhovuje |
| | | 880 | 6,507 | 3,8 | vyhovuje |
| | | 1000 | 5,599 | 3,8 | vyhovuje |
| 8. lub | 11 | 730 | 7,528 | 3,8 | vyhovuje |
| | | 880 | 6,667 | 3,8 | vyhovuje |
| | | 1000 | 5,978 | 3,8 | vyhovuje |
| 9. lub | 10 | 730 | 10,660 | 3,8 | vyhovuje |
| | | 880 | 10,442 | 3,8 | vyhovuje |
| | | 1000 | 10,268 | 3,8 | vyhovuje |

V každé výšce nádrže je mezní požadavek na index spolehlivosti splněn, a tudíž je možné návrh považovat za relativně spolehlivý.

Druhá část bakalářské práce se zaměřuje na analýzu napětí a celkové deformace od vlastní tíhy nádrže a tíhy média (ropy) ve výpočtovém programu ANSYS. Posouzení proběhlo v nejvíce namáhaném místě, což je v hloubce 21 m, kde ekvivalentní (von Misesovo) napětí má hodnotu 206 MPa. V této hloubce se nachází lub, který je vyroben z oceli S355. Charakteristická hodnota meze kluzu této oceli pro tloušťku menší jak 40 mm je rovna 355 MPa, a tedy nedojde k překročení ekvivalentním napětím v žádném místě nádrže. Spolehlivost návrhu nádrže bude zachována. Ze závislosti von Misesova napětí na hloubce nádrže lze vyčíst, že horní luby jsou relativně málo namáhané a jejich využití je nízké. Z konstrukčních důvodů je však nutné jejich tloušťky zachovat.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KŘUPKA, Vlastimil a Petr SCHNEIDER. *Konstrukce aparátů*. Vyd. 1. Brno: PC-DIR, 1998, 290 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-214-1124-4.
- [2] KYTÝR, Jiří. *Statika I: řešené příklady*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2014, 114 s. ISBN 978-80-7204-868-7.
- [3] KADLČÁK, Jaroslav. *Statika stavebních konstrukcí II*. 2. dopl. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1991, 274 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně. Stavební fakulta). ISBN 80-214-0273-3.
- [4] ČSN EN 14015, květen 2005, Specifikace pro navrhování a výrobu nadzemních vertikálních válcových svařovaných ocelových nádrží s plochým dnem, zhotovovaných na místě provozování, určených pro skladování kapalin při teplotě okolí a vyšší.
- [5] API Std 653, Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction, Fourth Edition, Includes Addendum 1 (2010).
- [6] ANSYS® HelpViewer, Version 15.0, 2013, SAS IP, Inc.
- [7] CORNELL, Carl Allin. *A normative second-moment reliability theory for structural design*. Solid Mechanics Division, University of Waterloo, 1969, Waterloo, Ontario, Canada. OCLC 43695229.
- [8] IMAN, R. C. and W. J. CONOVER. *Small sample sensitivity analysis techniques for computer models an application to risk assessment*. Communications in Statistics – Theory and Methods 9(17): 1749-1842.
- [9] McKEY, M. D., CONOVER, W. J. and R. J. BECKMAN. *A comparison of the three methods of selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code*. Technometrics 21(2): 239-245.
- [10] MELCHER, Jindřich, Zdeněk KALA, Milan HOLICKÝ, Miroslav FAJKUS a Lubomír ROZLÍVKA. *Design characteristics of structural steels based on statistical analysis of metallurgical products*. Journal of Constructional Steel Research 60(3-5): 795-808.
- [11] NOVÁK, D., VOŘECHOVSKÝ, M., RUSINA, R. FReET – Program Documentation: User's and Theory Guides, Version 1.5, Brno/Červenka Constulting, Česká republika, 2012, <http://www.freet.cz>.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

| Symbol | Jednotka | Popis |
|-----------------|---------------------|---|
| E | [MPa] | Youngův modul |
| F | [N] | síla vyvolující normálové napětí |
| H | [m] | výška nádrže |
| H_i | [N] | složky reakcí |
| I | [m ⁴] | moment setrvačnosti |
| M | [Nm] | momentová funkce |
| \bar{M} | [Nm] | momentová funkce |
| $M_i(\beta)$ | [Nm] | moment od rovnoměrného zatížení pod úhlem β |
| \bar{M}_r | [Nm] | pořadnice |
| N_φ | [N] | normálová síla |
| N_ϑ | [N] | normálová síla |
| O_φ | [-] | střed křivosti |
| O_ϑ | [-] | střed křivosti |
| R | [MPa] | odolnost |
| S | [N] | smyková síla |
| S_M | [mm ²] | plocha momentového obrazce |
| S_φ | [N] | smyková síla |
| S_ϑ | [N] | smyková síla |
| X_k | [-] | jednotkové síly nebo momenty |
| a | [-] | celkový počet jednotlivých složek reakcí vnějších vazeb |
| dS | [N] | diferenciál síly působící na element |
| ds | [mm] | diferenciál oblouku elementu |
| dS _H | [N] | diferenciál síly působící horizontálně na element |
| dS _V | [N] | diferenciál síly působící vertikálně na element |
| f_y | [MPa] | mez kluzu |
| g | [m/s ²] | tíhové zrychlení |
| h | [m] | výška vodního sloupce |
| n | [-] | normála |
| n_s | [-] | stupeň statické neurčitosti |
| p | [Pa] | hydrostatický tlak |
| p_{kl} | [-] | počet vnitřních kloubů |
| p_r | [Pa] | zatížení ve směru normály |
| p_φ | [Pa] | zatížení ve směru tečny k meridiánu |
| p_ϑ | [Pa] | zatížení ve směru tečny k rovnoběžce |
| o | [-] | osa rotace |
| r | [m] | poloměr nádrže |
| r_1 | [m] | poloměr zakřivení |
| r_2 | [m] | poloměr zakřivení |
| r_φ | [m] | hlavní poloměr |
| r_ϑ | [m] | poloměr křivosti meridiánu |
| t | [mm] | tloušťka stěny nádrže |

| | | |
|----------------|----------------------|--|
| u | [-] | počet uzavřených částí se třemi neznámými |
| α | [°] | úhel vyjadřující polohu elementů |
| β | [-] | index spolehlivosti |
| δ | [mm] | tloušťka skořepiny |
| $\delta_{i,0}$ | [-] | přetvárný součinitel vyjadřující posunutí nebo pootočení |
| $\delta_{i,k}$ | [-] | přetvárný součinitel vyjadřující posunutí nebo pootočení |
| μ_G | [-] | průměrná hodnota náhodné veličiny G |
| ρ | [kg/m ³] | hustota |
| σ | [MPa] | normálové napětí |
| σ_G | [-] | směrodatná odchylka náhodné veličiny G |
| φ | [°] | úhel pootočení |
| ϑ | [°] | úhel svírán normálou a osou rotace |

SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ

| | |
|---|----|
| Obr. 2.1 Střednicová plocha..... | 10 |
| Obr. 2.2 Hlavní normálové roviny..... | 10 |
| Obr. 2.3 Obecný tvar rotačně symetrické skořepiny..... | 11 |
| Obr. 2.4 Působící síly na uvolněném elementu skořepiny..... | 12 |
| Obr. 2.5 (a) Svislý řez procházející osou skořepiny, (b) vodorovný řez..... | 15 |
| Obr. 3.1 Schéma kruhové válcové nádrže..... | 16 |
| Obr. 3.2 Schéma rovinného kruhové oblouku..... | 17 |
| Obr. 3.3 Silové působení na délku dz..... | 17 |
| Obr. 3.4 Staticky neurčitá konstrukce..... | 18 |
| Obr. 3.5 Staticky určitá konstrukce..... | 18 |
| Obr. 3.6 Nultý stav..... | 18 |
| Obr. 3.7 Statické schéma s bodem M pod úhlem β | 18 |
| Obr. 3.8 Průběh momentů nultého stavu..... | 19 |
| Obr. 3.9 První stav..... | 20 |
| Obr. 3.10 Průběh momentů prvního stavu..... | 20 |
| Obr. 3.11 Druhý stav..... | 20 |
| Obr. 3.12 Průběh momentů druhého stavu..... | 21 |
| Obr. 3.13 Třetí stav..... | 21 |
| Obr. 3.14 Průběh momentů třetího stavu..... | 21 |
| Obr. 3.15 Vereščaginovo pravidlo..... | 22 |
| Obr. 3.16 Soustava rovnic vyřešená v programu MATLAB..... | 25 |
| Obr. 3.17 Statické schéma s průběhem normálových sil..... | 26 |
| Obr. 3.18 Nádrž na ropu provozovaná společností Mero, a.s..... | 28 |
| Obr. 4.1 Geometrie prvku SHELL181..... | 34 |
| Obr. 4.2 Síť konečných prvků nádrže..... | 35 |
| Obr. 4.3 Hydrostatický tlak..... | 36 |
| Obr. 4.4 Ekvivalentní (von Misesovo) napětí..... | 38 |
| Obr. 4.5 Ekvivalentní (von Misesovo) napětí v řezu..... | 38 |
| Obr. 4.6 Normálové napětí po obvodu..... | 39 |
| Obr. 4.7 Normálové napětí po obvodu v řezu..... | 39 |
| Obr. 4.8 Normálové napětí (kolmé na osu x)..... | 40 |
| Obr. 4.9 Normálové napětí (kolmé na osu x) v řezu..... | 40 |
| Obr. 4.10 Maximální hlavní napětí..... | 41 |
| Obr. 4.11 Maximální hlavní napětí v řezu..... | 41 |
| Obr. 4.12 Střední hlavní napětí..... | 42 |
| Obr. 4.13 Střední hlavní napětí v řezu..... | 42 |
| Obr. 4.14 Minimální hlavní napětí..... | 43 |
| Obr. 4.15 Minimální hlavní napětí v řezu..... | 43 |
| Obr. 4.16 Membránové napětí..... | 44 |
| Obr. 4.17 Membránové napětí v řezu..... | 44 |
| Obr. 4.18 Celková deformace..... | 45 |
| Obr. 4.19 Celková deformace v řezu..... | 45 |
| Tabulka 3.1: Vstupní náhodné veličiny pro pravděpodobnostní analýzu spolehlivosti nádrže..... | 28 |
| Tabulka 4.1: Počet prvků modelu nádrže..... | 32 |
| Tabulka 4.2: Vlastní tíha lubů..... | 36 |
| Graf 3.1 Závislost indexu spolehlivosti dle Cornella na tloušťce dolního lubu pro $h=22$ m..... | 29 |
| Graf 3.2 Závislost indexu spolehlivosti dle Cornella na tloušťce 2. lubu pro $h=19,8$ m..... | 30 |
| Graf 3.3 Závislost indexu spolehlivosti dle Cornella na tloušťce 3. lubu pro $h=17,3$ m..... | 30 |
| Graf 3.4 Závislost indexu spolehlivosti dle Cornella na tloušťce 4. lubu pro $h=15$ m..... | 31 |

| | |
|--|----|
| Graf 3.5 Závislost indexu spolehlivosti dle Cornella na tloušťce 5. lubu pro $h=12,2$ m..... | 31 |
| Graf 3.6 Závislost indexu spolehlivosti dle Cornella na tloušťce 6. lubu pro $h=9,4$ m..... | 32 |
| Graf 3.7 Závislost indexu spolehlivosti dle Cornella na tloušťce 7. lubu pro $h=6,55$ m..... | 32 |
| Graf 3.8 Závislost indexu spolehlivosti dle Cornella na tloušťce 8. lubu pro $h=3,7$ m..... | 33 |
| Graf 3.9 Závislost indexu spolehlivosti dle Cornella na tloušťce 9. lubu pro $h=0,85$ m..... | 33 |
| Graf 4.1 Hydrostatický tlak..... | 37 |
| Graf 4.2 Ekvivalentní (von Misesovo) napětí..... | 38 |
| Graf 4.3 Normálové napětí po obvodu..... | 39 |
| Graf 4.4 Normálové napětí (kolmé na osu x)..... | 40 |
| Graf 4.5 Maximální hlavní napětí..... | 41 |
| Graf 4.6 Střední hlavní napětí..... | 42 |
| Graf 4.7 Minimální hlavní napětí..... | 43 |
| Graf 4.8 Membránové napětí v řezu..... | 44 |
| Graf 4.9 Celková deformace..... | 45 |