

# Osnivanje konstrukcije dvodijelnog spremnika za prijevoz ukapljenog plina

---

Tutek, Mario

Master's thesis / Diplomski rad

2011

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:987527>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-06-30**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Dr.sc. Smiljko Rudan, dipl. ing.

Student:

Mario Tutek

Zagreb, 2011.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Mario Tutek

Zahvaljujem mentoru, docentu Smiljku Rudanu, na ukazanom velikom povjerenju, podršci i nesebičnoj pomoći pri izradi ovog rada.

Zahvaljujem se i ostalim djelatnicima Zavoda za brodogradnju i pomorsku tehniku na svojoj pomoći koju su mi pružili.

Posebno zahvaljujem gospođi Silvani Škoko Gavranović koja mi je uvijek pomogla kada mi je bilo najteže.



Zahvaljujem svojim roditeljima na ogromnoj podršci koju su mi dali. Hvala vam.

---

# 1 Sadržaj

<b>1</b>	<b>UVOD</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>BRODOVI I SPREMNICI ZA PRIJEVOZ UKAPLJENOG PLINA</b>	<b>2</b>
2.1	PRIJEVOZ UKAPLJENOG PLINA	2
2.2	ČVRSTOĆA KONSTRUKCIJE	2
2.3	ZAPALJIVOST PLINSKIH TERETA	3
2.4	ZNAČAJKE PLINSKIH TERETA	4
2.5	VRSTE BRODOVA ZA PRIJEVOZ UKAPLJENOG PLINA	5
2.5.1	<i>Brodovi za potpuno stlačene plinove</i>	5
2.5.2	<i>Brodovi za prijevoz rashlađenih, polustlačenih plinova</i>	6
2.5.3	<i>Brodovi za potpuno rashlađeni teret</i>	7
2.5.4	<i>LNG brodovi</i>	8
2.6	VRSTE SPREMNIKA ZA PRIJEVOZ UKAPLJENOG PLINA	9
2.6.1	<i>Integralni spremnici</i>	9
2.6.2	<i>Membranski spremnici</i>	10
2.6.3	<i>Polumembranski spremnici</i>	10
2.6.4	<i>Nezavisni ili samostojeći spremnici</i>	10
<b>3</b>	<b>GEOMETRIJSKE I FIZIKALNE ZNAČAJKE RAZMATRANOG SPREMNIKA I BRODA</b>	<b>12</b>
3.1	PODACI O BRODU	12
3.2	PODACI O SPREMNICIMA	12
<b>4</b>	<b>PRORAČUN DEBLJINA STIJENKI SPREMNIKA</b>	<b>15</b>
4.1	MATERIJAL OPLATE SPREMNIKA	15
4.2	PROJEKTI TLAK PARA	17
4.2.1	<i>Zahtjevi BV-a</i>	18
4.2.2	<i>Zahtjevi USCG-a</i>	18
4.3	UNUTARNJI TLAK	19
4.3.1	<i>Komponente ubrzanja <math>a_x</math>, <math>a_y</math>, <math>a_z</math></i>	19
4.3.2	<i>Komponente ubrzanja <math>a_\theta</math></i>	21
4.3.3	<i>Određivanje veličine <math>z_\theta</math></i>	23
4.3.4	<i>Određivanje unutarnjeg tlaka</i>	33
4.4	PRORAČUN DEBLJINA STIJENKI SPREMNIKA	39
<b>5</b>	<b>DIMENZIONIRANJE UZDUŽNE PREGRADE</b>	<b>41</b>
5.1	DOPUŠTENA NAPREZANJA STIJENKE I UKREPA	41
5.2	PRORAČUN DEBLJINE STIJENKE UZDUŽNE PREGRADE	41
5.3	PROJEKTI TLAK	42
5.4	NOSAČI	45
5.4.1	<i>Nosači vakuumskih prstenova</i>	45
5.4.2	<i>Naprezanja u vakuumskim prstenovima</i>	48
5.5	UZDUŽNE UKREPE	50
5.6	ČVRSTOĆA OPLATE	53
<b>6</b>	<b>SILE PO PRESJEKU NOSIVIH PRSTENOVA</b>	<b>54</b>
6.1	UVOD	54
6.2	OPTEREĆENJE NOSIVIH PRSTENOVA	55
6.3	KRUTOST OSLOKACA	59

---

6.4	PRESJEČNE SILE .....	60
6.5	OPTEREĆENJE OSLOMACA .....	75
6.6	REZIME ANALIZE PROVEDENE U POGLAVLJU 6. ....	76
<b>7</b>	<b>DIMENZIONIRANJE NOSIVIH PRSTENOVA .....</b>	<b>77</b>
7.1	UVOD.....	77
7.2	TIPOVI POPREČNIH PRESJEKA NOSIVIH PRSTENA.....	77
7.3	EKVIVALENTNO NAPREZANJE U NOSIVIM PRSTENOVIMA .....	79
7.4	KARAKTERISTIKE MATERIJALA I DOPUŠTENA NAPREZANJA .....	83
7.5	PRORAČUNSKO EKVIVALENTNO NAPREZANJE U POPREČNIM PRESJECIMA NOSIVOG PRSTENA.....	84
7.6	PRILOG .....	85
<b>8</b>	<b>PROVJERA ČVRSTOĆE SPREMNIKA POMOĆU PROSTORNOG MODELA.....</b>	<b>86</b>
8.1	UVOD.....	86
8.2	PROSTORNI MODEL .....	86
8.3	MREŽA KONAČNIH ELEMENATA .....	88
8.4	PROVJERA MODELA.....	91
8.5	PRORAČUN ZA ZADANE SLUČAJEVE OPTEREĆENJA .....	91
8.5.1	<i>Uspravni model</i> .....	92
8.5.2	<i>Nagnuti model</i> .....	97
8.6	ZAKLJUČAK .....	101
<b>9</b>	<b>ZAKLJUČAK.....</b>	<b>103</b>

---

## Popis slika

SLIKA 2.1. BROD SA SPREMNIKOM POTPUNO STLAČENOG UKAPLJENOG PLINA .....	6
SLIKA 2.2. BROD SA SPREMNIKOM RASHLAĐENOG, POLUSTLAČENOG UKAPLJENOG PLINA .....	7
SLIKA 2.3. BROD SA SPREMNIKOM POTPUNO RASHLAĐENOG UKAPLJENOG PLINA.....	8
SLIKA 2.4. LNG BROD S PRIZMATIČNIM I SFERIČNIM SPREMNIKOM UKAPLJENOG PLINA .....	9
SLIKA 3.1. RASPORED SPREMNIKA TERETA.....	13
SLIKA 3.2. TLOCRT SPREMNIKA 1.....	14
SLIKA 3.3. 3D PRIKAZ SPREMNIKA 1. ....	14
SLIKA 4.1. ODREĐIVANJE UBRZANJA $A_B$ U RAVNINI Y-Z I X-Z .....	22
SLIKA 4.2. VELIČINA $Z_B$ .....	24
SLIKA 4.3. ODREĐIVANJE $Z_B$ (-X, +Z) .....	24
SLIKA 4.4. ODREĐIVANJE $Z_B$ (-X, -Z).....	25
SLIKA 4.5. PREDNJI I STRAŽNJI DIO U X-Z RAVNINI .....	26
SLIKA 4.6. PREDNJI POLUSFERNI DIO U Y-Z RAVNINI .....	26
SLIKA 4.7. STRAŽNJI TORUSNI DIO U Y-Z RAVNINI.....	26
SLIKA 4.8. DEBLJINE STIJENKE SPREMNIKA (X-Z RAVNINA) .....	40
SLIKA 4.9. DEBLJINE STIJENKE PREDNJEG POLUSFERNOG SEGMENTA (Y-Z RAVNINA).....	40
SLIKA 4.10. DEBLJINE STIJENKE STRAŽNJEG TORUSNOG SEGMENTA (Y-Z RAVNINA) .....	40
SLIKA 5.1. DEBLJINE STIJENKE UZDUŽNE PREGRADE.....	42
SLIKA 5.2. PROJEKTA OPTEREĆENJA UZDUŽNE PREGRADE .....	43
SLIKA 5.3. NOSAČ VAKUUMSKIH PRSTENA VR1, VR2 I VR3.....	46
SLIKA 5.4. NOSAČ VAKUUMSKOG PRSTENA VR4 .....	47
SLIKA 5.5. NOSAČ VAKUUMSKOG PRSTENA VR5 .....	48
SLIKA 5.6. VAKUUMSKI PRSTENOV I VR1, VR2, VR3 .....	49
SLIKA 5.7. VAKUUMSKI PRSTEN VR4 .....	49
SLIKA 5.8. VAKUUMSKI PRSTEN VR5 .....	50
SLIKA 6.1. POPREČNI PRESJEK SPREMNIKA NA POLOŽAJU NOSIVOG PRSTENA SR1 .....	54
SLIKA 6.2. POPREČNI PRESJEK SPREMNIKA NA POLOŽAJU NOSIVOG PRSTENA SR2 .....	55
SLIKA 6.3. MODEL KONAČNIH ELEMENATA ZA SR1 .....	56
SLIKA 6.4. MODEL KONAČNIH ELEMENATA ZA SR2.....	56
SLIKA 6.5. TOK SMIČNIH SILA USLIJED VERTIKALNE I HORIZONTALNE SMIČNE SILE ZA PRESJEK SR1 .....	58
SLIKA 6.6. TOK SMIČNIH SILA USLIJED VERTIKALNE I HORIZONTALNE SMIČNE SILE ZA PRESJEK SR2 .....	58
SLIKA 6.7. DOGOVOR O PREDZNACIMA ZA KOSU SMIČNU SILU.....	59
SLIKA 6.8. FEM MODEL USPRAVNOG SPREMNIKA (PRESJEK SR1) .....	61
SLIKA 6.9. FEM MODEL USPRAVNOG SPREMNIKA (PRESJEK SR2) .....	61
SLIKA 6.10. RUBNI UVJETI GREĐNOG MODELA USPRAVNOG SPREMNIKA (PRESJEK SR1) .....	62
SLIKA 6.11. RUBNI UVJETI GREĐNOG MODELA USPRAVNOG SPREMNIKA (PRESJEK SR2) .....	62
SLIKA 6.12. DISTRIBUCIJA OBODNOG SMIČNOG OPTEREĆENJA (PRESJEK SR1) .....	63
SLIKA 6.13. DISTRIBUCIJA OBODNOG SMIČNOG OPTEREĆENJA (PRESJEK SR2) .....	63
SLIKA 6.14. DEFORMACIJE NOSIVOG PRSTENA SR1 USPRAVNOG SPREMNIKA.....	64
SLIKA 6.15. DEFORMACIJE NOSIVOG PRSTENA SR2 USPRAVNOG SPREMNIKA.....	64
SLIKA 6.16. NORMALNA SILA $N_{xx}$ ZA SR1 .....	65
SLIKA 6.17. NORMALNA SILA $N_{xx}$ ZA SR2 .....	65
SLIKA 6.18. SMIČNA SILA $N_{xz}$ ZA SR1 .....	66
SLIKA 6.19. SMIČNA SILA $N_{xz}$ ZA SR2 .....	66
SLIKA 6.20. MOMENT SAVIJANJA $M_y$ ZA SR1 .....	67
SLIKA 6.21. MOMENT SAVIJANJA $M_y$ ZA SR2 .....	67
SLIKA 6.22. RASPORED OPRUGA NAGNUTOG SPREMNIKA NA POLOŽAJU SR1 .....	68

SLIKA 6.23. RASPORED OPRUGA NAGNUTOG SPREMNIKA NA POLOŽAJU SR2 .....	68
SLIKA 6.24. RUBNI UVJETI GREDNOG MODELA PRESJEKA SR1 NAGNUTOG SPREMNIKA.....	69
SLIKA 6.25. RUBNI UVJETI GREDNOG MODELA PRESJEKA SR2 NAGNUTOG SPREMNIKA.....	69
SLIKA 6.26. TOK SMIČNIH OPTEREĆENJA PO OBODU NOSIVOG PRSTENA SR1, GREDNI MODEL .....	70
SLIKA 6.27. TOK SMIČNIH OPTEREĆENJA PO OBODU NOSIVOG PRSTENA SR2, GREDNI MODEL .....	70
SLIKA 6.28. DEFORMACIJE GREDNOG MODELA NOSIVOG PRSTENA SR1 .....	71
SLIKA 6.29. DEFORMACIJE GREDNOG MODELA NOSIVOG PRSTENA SR2 .....	71
SLIKA 6.30. DIJAGRAM NORMALNIH SILA $N_{xx}$ ZA PRESJEK SR1 .....	72
SLIKA 6.31. DIJAGRAM NORMALNIH SILA $N_{xx}$ ZA PRESJEK SR2 .....	72
SLIKA 6.32. RASPORED SMIČNE SILE $N_{yz}$ ZA NOSIVI PRSTEN SR1.....	73
SLIKA 6.33. RASPORED SMIČNE SILE $N_{yz}$ ZA NOSIVI PRSTEN SR2.....	73
SLIKA 6.34. DIJAGRAM MOMENATA SAVIJANJA $M_y$ ZA PRESJEK SR1.....	74
SLIKA 6.35. DIJAGRAM MOMENATA SAVIJANJA $M_y$ ZA PRESJEK SR2.....	74
SLIKA 6.36. REAKCIJE U OSLONCIMA.....	75
SLIKA 7.1. OBIČNI (LIJEVO) I POJAČANI (DESNO) POPREČNI PRESJECI NOSIVIH PRSTENOVA U OBODNOM DIJELU .....	78
SLIKA 7.2. OBIČNI (LIJEVO) I POJAČANI (DESNO) POPREČNI PRESJECI NOSIVIH PRSTENOVA NA UZDUŽNOJ PREGRADI .....	78
SLIKA 7.3. POLOŽAJI TOČAKA NA POPREČNOM PRESJECU U KOJIMA SE RAČUNA NAPREZANJE .....	79
SLIKA 7.4. POLOŽAJI TOČAKA NA POPREČNOM PRESJECU VERTIKALNOG NOSAČA PREGRADE U KOJIMA SE RAČUNA NAPREZANJE .....	83
SLIKA 8.1. OPRUGE MODELA U FUNKCIJI RUBNIH UVJETA .....	87
SLIKA 8.2. MODEL SPREMNIKA SA PRIKAZOM POLOŽAJA OPRUGA .....	87
SLIKA 8.3. OBLIK I POLOŽAJ GREDNIH ELEMENATA 0.001x0.001 [M].....	88
SLIKA 8.4. MREŽA KONAČNIH ELEMENATA STIJENKE SPREMNIKA.....	89
SLIKA 8.5. MREŽA KONAČNIH ELEMENATA UZDUŽNE PREGRADE .....	90
SLIKA 8.6. GREDNI ELEMENTI .....	90
SLIKA 8.7. DEBLJINE STRUKA NOSIVIH PRSTENOVA .....	91
SLIKA 8.8. UKUPNE DEFORMACIJE STIJENKE MODELA .....	92
SLIKA 8.9. UKUPNE DEFORMACIJE NOSIVIH PRSTENA.....	92
SLIKA 8.10. EKVIVALENTNA NAPREZANJA U VANJSKIM VLAKNIMA STIJENKE MODELA .....	93
SLIKA 8.11. EKVIVALENTNA NAPREZANJA U UNUTARNJIM VLAKNIMA STIJENKE MODELA .....	93
SLIKA 8.12. EKVIVALENTNA NAPREZANJA U VANJSKIM VLAKNIMA NOSIVIH PRSTENOVA .....	94
SLIKA 8.13. EKVIVALENTNA NAPREZANJA U UNUTARNJIM VLAKNIMA NOSIVIH PRSTENOVA .....	95
SLIKA 8.14. KONCENTRACIJE NAPREZANJA UNUTARNJIH VLAKANA DONJEG DIJELA NOSIVOG PRSTENA SR1 .....	96
SLIKA 8.15. KONCENTRACIJE NAPREZANJA VANJSKIH VLAKANA DONJEG DIJELA NOSIVOG PRSTENA SR1 .....	96
SLIKA 8.16. UKUPNE DEFORMACIJE STIJENKE MODELA .....	97
SLIKA 8.17. UKUPNE DEFORMACIJE NOSIVIH PRSTENOVA.....	98
SLIKA 8.18. EKVIVALENTNA NAPREZANJA U VANJSKIM VLAKNIMA STIJENKE MODELA (U PRIKAZU OGRANIČENA NA 240 [N/MM <sup>2</sup> ])... ..	98
SLIKA 8.19. EKVIVALENTNA NAPREZANJA U UNUTARNJIM VLAKNIMA STIJENKE MODELA (U PRIKAZU OGRANIČENA NA 270 [N/MM <sup>2</sup> ]) .....	99
SLIKA 8.20. KONCENTRACIJE NAPREZANJA UNUTARNJIH (LIJEVO) I VANJSKIH (DESNO) VLAKANA NA SPOJU CILINDRIČNIH LJUSAKA.....	99
SLIKA 8.21. KONCENTRACIJA NAPREZANJA UNUTARNJIH VLAKANA NA NOSIVOM PRSTENU SR2 .....	100
SLIKA 8.22. EKVIVALENTNA NAPREZANJA U VANJSKIM VLAKNIMA NOSIVIH PRSTENOVA (U PRIKAZU OGRANIČENA NA 220 [N/MM <sup>2</sup> ]) .....	100
SLIKA 8.23. EKVIVALENTNA NAPREZANJA U UNUTARNJIM VLAKNIMA NOSIVIH PRSTENOVA (U PRIKAZU OGRANIČENA NA 240 [N/MM <sup>2</sup> ]) .....	101

---

## Popis tablica

TABLICA 2.1. OSNOVE FIZIKALNE ZNAČAJKE UKAPLJENIH PLINOVA.....	5
TABLICA 4.1. VRIJEDNOSTI BEZDIMENZIJSKOG UBRZANJA $A_b$ .....	23
TABLICA 4.2. KOORDINATE TOČAKA PREDNJEG I STRAŽNJEG DIJELA U X-Z RAVNINI.....	27
TABLICA 4.3. KOORDINATE TOČAKA PREDNJEG POLUSFERNOG I STRAŽNJEG TORUSNOG DIJELA U Y-Z RAVNINI .....	27
TABLICA 4.4. VRIJEDNOSTI $Z_b$ ZA PREDNJI DIO U X-Z RAVNINI.....	29
TABLICA 4.5. VRIJEDNOSTI $Z_b$ ZA STRAŽNJI DIO U X-Z RAVNINI .....	31
TABLICA 4.6. VRIJEDNOSTI $Z_b$ ZA PREDNJI POLUSFERNI DIO I STRAŽNJI TORUSNI DIO U Y-Z RAVNINI.....	32
TABLICA 4.7. UNUTARNJI TLAKOVI PREDNJEG DIJELA U X-Z RAVNINI .....	35
TABLICA 4.8. UNUTARNJI TLAKOVI STRAŽNJEG DIJELA U X-Z RAVNINI .....	37
TABLICA 4.9. UNUTARNJI TLAKOVI ZA PREDNJI POLUSFERNI DIO I STRAŽNJI TORUSNI DIO U Y-Z RAVNINI.....	38
TABLICA 5.1. TLAKOVI UZDUŽNE PREGRADE .....	45
TABLICA 5.2. GEOMETRIJSKE KARAKTERISTIKE UZDUŽNJAKA SA VISINOM $H = 30$ [MM] .....	51
TABLICA 6.3. VISINE STRUKA PROFILA STRAŽNJEG DIJELA SPREMNIKA.....	52
TABLICA 5.4. VISINE STRUKA PROFILA PREDNJEG DIJELA SPREMNIKA .....	53
TABLICA 6.1. DEBLJINE STIJENKE UZDUŽNE PREGRADE .....	55
TABLICA 6.2. SMIČNO OPTEREĆENJE USLIJED JEDINIČNE SMIČNE SILE ZA SR1, $Q_v = -1$ kN, $Q_H = 1$ kN .....	57
TABLICA 6.3. SMIČNO OPTEREĆENJE USLIJED JEDINIČNE SMIČNE SILE ZA SR2, $Q_v = -1$ kN, $Q_H = 1$ kN .....	57
TABLICA 6.4. OPTEREĆENJE OSLOKACA .....	76

## Popis dijagrama

DIJAGRAM 5.1. MOMENT OTPORA T-PROFILA.....	51
--	----

## 1 Uvod

Zadatak ovog diplomskog rada je projektirati konstrukciju pramčanog spremnika broda za prijevoz ukapljenog plina, jednog od tri spremnika ukupnog kapaciteta 21 000 m<sup>3</sup>. Projektiranje je potrebno provesti prema pravilima klasifikacijskog društva Bureau Veritas. Iako se ova pravila redovno primjenjuju u projektiranju, nadzoru i odobrenju gradnje, trend sve veće potražnje za plinovima ima za posljedicu spremnike sve većih kapaciteta. Takvi spremnici postavljaju nove zahtjeve i pitanja kojima projektanti moraju pristupiti u okvirima novih spoznaja i trendova.

Ovaj rad analitički i numerički razmatra nezavisan spremnik tipa C. Numeričkim modeliranjem prostornog modela spremnika pokušat će se dobiti što točniji uvid u način ponašanja konstrukcije kao i njezine interakcije sa skladišnim prostorom.

Na početku rada dan je kratki prikaz brodova i spremnika za prijevoz ukapljenih plinova. Prikazani su osnovni podaci o razmatranom spremniku i brodu kao i njihove geometrijske i fizikalne karakteristike. U četvrtom poglavlju, kao osnova za daljnja razmatranja, pristupilo se određivanju debljina stijenki spremnika prema pravilima klasifikacijskog društva. Analiziran je materijal opločenja i opterećenja koja se u eksploataciji javljaju na stijenkama spremnika. U nastavku se na isti način pristupilo dimenzioniranju uzdužne pregrade i njezinih konstrukcijskih elemenata.

U šestom poglavlju spremnik se modelirao grednim elementima a oslonci elastičnim oprugama u svrhu analiziranja djelovanja smičnog opterećenja. Dobivena distribucija unutarnjih sila biti će odrednica u sedmom poglavlju za definiranje konačnih dimenzija nosivih prstenova na osnovi stvarnog izračunatog opterećenja.

## 2 Brodovi i spremnici za prijevoz ukapljenog plina

### 2.1 Prijevoz ukapljenog plina

Ukapljeni plin je supstanca koja je atmosferskom tlaku i temperaturi u plinovitom stanju. U svrhu praktičnosti i iz ekonomskih razloga plin stlačivanjem ili hlađenjem mijenja agregatno stanje [1]. Stanja ukapljenog plina podobna za prijevoza određena su prema International Maritime Organization-u (IMO) kako slijedi:

- potpuno stlačeni – pod tlakom ali pri okolišnoj temperaturi
- rashlađeni, polustlačeni – pod nekim tlakom ali pothlađen ispod temperature okoliša
- potpuno rashlađeni – stlačen malo iznad atmosferskog tlaka
- ukapljeni prirodni plin (LNG) – izdvojen pri kriogenim temperaturama i stlačen malo iznad atmosferskog tlaka.

Za sve načine prijevoza, tekućina je na ili blizu temperature ključanja u skladu s pripadnim tlakom. Kod postupka potpunog stlačivanja, plinske pare su potpuno zadržane proizvedenim tlakom, a tlačni spremnici na brodovima su projektirani da izdrže tlakove za bilo koje stanje okoliša u kojem se brod može naći. Kod postupka rashlađivanja, tlak se u spremnicima održava unutar granica projektnog tlaka rashlađivanjem isparenim plinskim parama. U slučaju prirodnog plina, plinske pare se koriste u brodskim kotlovima dok se kod ostalih rashlađenih plinova plinske pare ponovo ukapljaju i vraćaju u spremnike.

### 2.2 Čvrstoća konstrukcije

Brodovi za prijevoz ukapljenog plina projektiraju se u skladu sa „Gas Carrier Codes“-om, odnosno međunarodno usuglašenim pravilima pod okriljem „International Maritime Organization“-a. Uvelike se nastoji smanjiti rizik potencijalne nesreće koje bi mogle nastupiti kod ovih tipova brodova u svrhu čega se definiraju opširni i specifični standardi za projektiranje ovakvih brodova i njihovu eksploataciju.

Zbog specifičnosti tereta, spremnici se projektiraju tako da mogu izdržati visoke tlakove ili niske temperature. Stoga, mogu biti izvedeni kao jako robusni i otporni na udarna oštećenja ili fleksibilni i sposobni podnijeti deformacije bez pojava trajnih oštećenja. I najmanja oštećenja mogu dovesti do



isparavanja i disperzije proizvoda i, u nekim slučajevima, mogu uzrokovati krhki prijelom trupa. Zahtjevi u IMO Codes-u su namijenjeni kako bi se smanjili rizici koliko je to moguće, na temelju postojećih spoznaja i tehnologija.

Brodovi projektirani po pravilima IMO Codes-a trebaju preživjeti normalne posljedice poplava nastalih pod djelovanjem vanjskih sila. Osim toga, u svrhu zaštite broda i okoliša, spremnici trebaju biti zaštićeni od manjih prodora u slučaju oštećenja broda prilikom, na primjer, sudara sa pristaništem ili tegljačem, na način da ih se pozicionira na određenu udaljenost od oplata broda.

Spremnici ne sudjeluju u ukupnoj čvrstoći broda, odnosno, neovisni su o konstrukciji broda iako su s njom kruto povezani. Kao rezultat takvog konstrukcijskog rješenja, sigurnost ovakvih brodova je velika. Kako se balastne vode ne mogu krcati u teretne spremnike kad su prazni, niti u prostore uz spremnike, balastni su prostori osigurani u dvodnu ili u dvoboku, što ovim brodovima daje veliku rezervu istisnine.

Do danas još nije zabilježeno niti jedno nekontrolirano ispuštanje tereta iz ovakvih brodova uslijed nasukavanja ili sudara, čak i u slučajevima kada je trup bio probijen rijetko je dolazilo do potonuća broda.

### **2.3 Zapaljivost plinskih tereta**

S obzirom na zapaljivost, ukapljeni plinovi prevoženi morem dijele se u dvije kategorije. Oni čije su pare zapaljive kada se pomiješaju sa zrakom i oni čije su pare zapaljive i otrovne. Prva je kategorija najzastupljenija i uključuje: butan, butadien, propan, propilen, etilen i prirodni plin. Druga kategorija su ukapljeni kemijski plinovi poput vinil-klorid monomera (VCM), metil-klorida, amonijaka i propilen oksida.

Kod svih načina prijevoza, teret je pod tlakom većim od atmosferskog s neispunjenim prostorom iznad tereta u kojima se nalaze samo pare. Zapaljiva mješavina sa zrakom, stoga, ne smije biti unutar teretnog prostora kada je teret ukrcan ili se krca ili je u bilo kojem trenutku procesa krcanja/iskrcavanja. Prazni prostori oko spremnika tereta su kontinuirano pod automatiziranim nadzorom za slučaj curenja para, a u mnogim slučajevima to mogu biti inertni plinovi. Operativni

postupci nadzora osiguravaju uvjete nezapaljivosti unutar teretnog prostora i prostora oko spremnika u balastnoj plovidbi. Izgledi za eksploziju zapaljivih plinova na ovim brodovima stoga su neznatni.

Do danas još nije evidentirana niti jedna eksplozija plinskih tereta kao rezultat požara na ovim brodovima. Zbog velike brzine i potpunog isparavanja plinova kada su izloženi tlaku i temperaturi okoliša, oni uglavnom ne predstavljaju opasnost za zagađenje voda kojima ovi brodovi plove.

## **2.4 Značajke plinskih tereta**

Kao kod svih tekućina, temperatura površine tekućine određuje apsolutni tlak u njenim parama u neposrednom kontaktu. Kod prijevoza ukapljenih plinova, pare tekućina su jedini plinovi u teretnom prostoru, a temperatura slobodne površine tereta u potpunosti određuje apsolutni tlak unutar teretnog prostora.

Značajke tlaka, odnosno temperature para ukapljenih plinova koji se prevoze morem, variraju u širokom rasponu. Npr. butan ima tlak isparavanja jednak atmosferskom tlaku pri temperaturi od  $-1$  [°C] i tlak isparavanja jednak 5 puta atmosferski tlak (5 [bar]) pri temperaturi od  $45$  [°C] što je ujedno i vjerovatnija temperatura pri kojoj će ovaj plin biti prevožen. Propilen, najčešće prevoženi plin u LPG brodovima, ima tlak isparavanja jednak atmosferskom tlaku pri temperaturi od približno  $-48$  [°C] i tlak isparavanja od približno 19 [bar] pri  $45$  [°C]. Butadien, VCM, metil-klorid, amonijak, propan i propilen oksid imaju tlak isparavanja između navedenih za butan i propilen s rastućim karakteristikama kako su nabrojani.

Teretni prostor kod brodova s potpuno stlačenim plinom je projektiran za maksimalni tlak tereta pri najvišoj temperaturi okoliša, odnosno  $45$  [°C]. Kod potpuno rashlađenih plinova, teretni prostor je projektiran za najnižu temperaturu tereta koji će se prevoziti kada su blizu atmosferskog tlaka. Svi navedeni tereti mogu se prevoziti pod bilo kojim od prva tri uvjeta navedena u poglavlju 2.1. Etilen i prirodni plin međutim, ne mogu se prevoziti samo stlačeni pri atmosferskom tlaku, nego moraju biti i rashlađeni. Etilen se obično prevozi u rashlađenom, polustlačenom stanju u specijaliziranim brodovima s uređajima za ukapljivanje koji su sposobni prihvatiti i održavati teret u potpuno rashlađenom stanju ( $-104$  [°C]). Prirodni plin, koji je pretežno metan, prevozi se jedino u potpuno rashlađenom stanju ( $-161$  [°C]) s dobro izoliranim spremnicima i tlakom koji je malo iznad

atmosferskog tlaka. Dok se kod svih ostalih primjer rashlađenog tereta plinske pare ukapljaju i ponovno vraćaju u teretni prostor, kod prirodnog plina one se koriste kao gorivo za brodske kotlove.

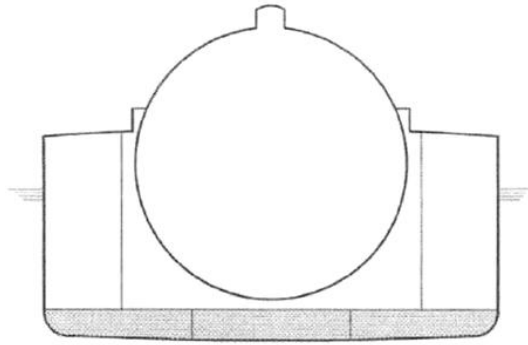
	temperatura isparavanja	gustoća pare	točka zapaljenja	točka samozapaljenja	područje zapaljivosti
	[°C]	rel. prema zraku	[°C]	[°C]	% volumena
Metan	-162	0.55	-175	595	5.3 - 14.0
Etilen	-104	0.975	-150	453	3.0 - 34.0
Propilen	-42	1.55	-105	468	2.1 - 9.5
N butan	-0.5	2.09	-60	365	1.5 - 9.0
I butan	-12	2.07	-76	500	1.5 - 9.0
Vinil-klorid	-14	2.15	-78	472	4.0 - 33.0
Amonijak	-33	0.59	-57	615	14.0 - 28.0
Etilen-oksidi	10.7	1.52	-18	429	3.0 - 100.0
Propilen	-48	1.48	-108	453	2.0 - 11.1

**Tablica 2.1.** Osnove fizikalne značajke ukapljenih plinova

## 2.5 Vrste brodova za prijevoz ukapljenog plina

### 2.5.1 Brodovi za potpuno stlačene plinove

Projektirani su za radni tlak do 20 [bar]. Uglavnom su to manji brodovi kapaciteta do 2500 [m<sup>3</sup>] ali neki čak i do 4000 [m<sup>3</sup>]. Tankovi su im sferični, cilindrični ili dvodijelni cilindrični. Konstruktivno su neovisni o trupu broda i postavljeni su na sedlaste oslonace ugrađene u brodsku konstrukciju. Velika čvrstoća ovih brodova, udaljena pozicija spremnika unutar broda od njegovih bokova, te njihova zaštita dvodnom, čini ove brodove dosta robusnima s dosta rezervne istisnine u oštećenom stanju. S obzirom da su spremnici tereta projektirani tako da izdrže tlakove isparavanja tereta pri najvišim temperaturama okoline, teret će ostati u spremnicima bez ispuštanja para, čak i kad brod ostane bez energije ili potone.

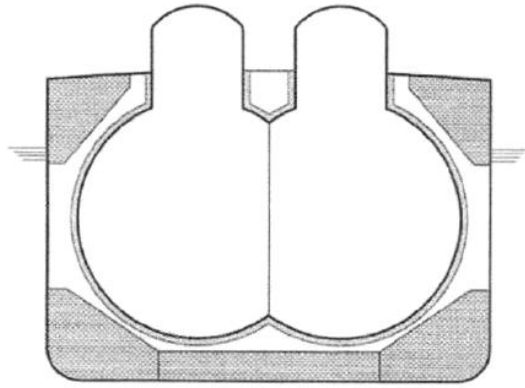


**Slika 2.1.** Brod sa spremnikom potpuno stlačenog ukapljenog plina

### 2.5.2 Brodovi za prijevoz rashlađenih, polustlačenih plinova

Ovi brodovi prevoze teret u cilindričnim tankovima projektiranim za radni tlak do 7 [bar] i izrađenim od specijalnih čelika povišene čvrstoće, pogodnih za prijevoz tereta pri različitim temperaturama. Spremnici su izolirani da bi se minimalizirao utjecaj okolne topline na teret. Zahtijevana temperatura tereta se održava isparavanjem tereta u spremnicima, koji se opet ukapljuje i vraća u spremnike.

Ovi brodovi su obično veći od brodova za potpuno stlačene plinove s kapacitetom do 15000 [m<sup>3</sup>]. Konstruktivno su im slični; dosta su robusni s zalihom rezervne istisnine u oštećenom stanju. Održavanje zahtijevane temperature i tlaka tereta tijekom službe ovisi o mogućnostima uređaja za ukapljivanje. U slučaju potpunog gubitka energije, temperatura i tlak tereta će polako rasti (zbog neaktivnih uređaja za ukapljivanje). Moguće je da postane neophodno, ali samo nakon dužeg vremenskog perioda odsutnosti energije (nekoliko dana), smanjiti tlak u spremnicima i ohladiti teret kontroliranim otpuštanjem plinova isparavanja.



Slika 2.2. Brod sa spremnikom rashlađenog, polustlačenog ukapljenog plina

### 2.5.3 Brodovi za potpuno rashlađeni teret

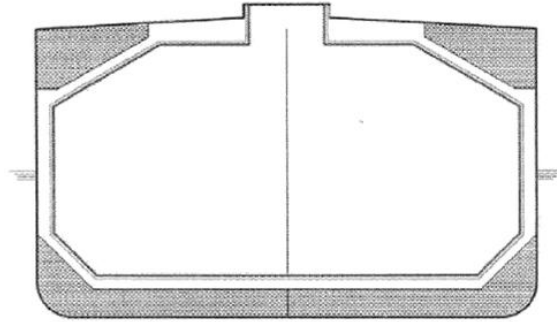
Ovo su uglavnom veliki brodovi kapaciteta od 5000 [m<sup>3</sup>] do 100000 [m<sup>3</sup>]. Njima je obično moguće prevoziti sve vrste ukapljenih plinova, od butana do propilena, a mogu biti opremljeni za prijevoz ukapljenih kemijskih plinova kao što su amonijak ili vinil-klorid. Tereti se prevoze pri skoro atmosferskom tlaku i temperaturama do -50 [°C]. Prema zahtjevima IGC koda, potrebno je postaviti uređaje za ukapljivanje sa značajnom rezervom kapaciteta.

Spremnici tereta ne moraju izdržavati visoke tlakove, te su stoga uglavnom slobodnostojeći prizmatičnog tipa, robusno ukrepljeni i napravljeni od specijalnih čelika otpornih na niske temperature. Svi brodovi imaju velike prostore u dvodnu.

Spremnici su postavljeni unutar zatvorenog prostora broda i udaljeni minimalno od oplata trupa za 760 [mm]. Okolna konstrukcija ili ona uz spremnike tereta je također od specijalnih čelika kako bi se stvorila sekundarna barijera u slučaju da dođe do istjecanja tereta iz primarnih spremnika tereta.

Kako je raspon tlakova ovakvih spremnika ograničen na oko 0.7 [bar], u slučaju da dođe do produženog gubitka energije kojom se napajaju uređaji za ukapljivanje, kod ovih brodova se može pribjeći kontroliranom otpuštanju plinova kako bi se teret održao pri zahtjevanoj temperaturi i tlaku.

U svakom slučaju, svi spremnici ukapljenog plina, bili oni u brodovima za potpuno stlačeni teret ili kvadratični kod potpuno rashlađenih tereta, opremljeni su sigurnosnim ventilima koji otpuštaju plinske pare u slučaju nemogućnosti ukapljivanja, odnosno, u najgorem slučaju požara.

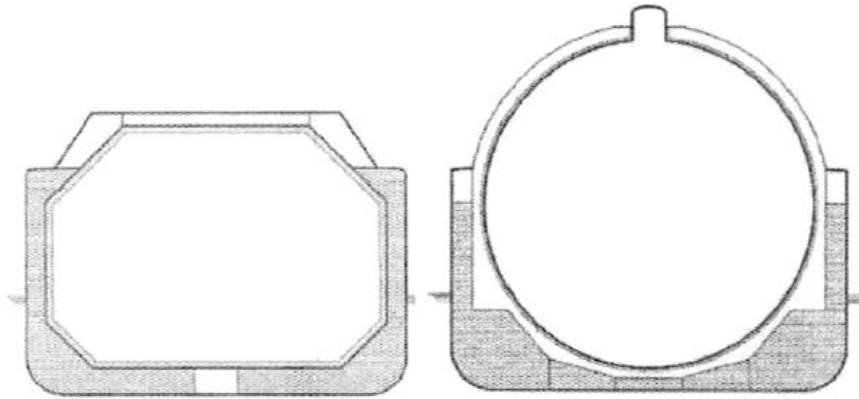


Slika 2.3. Brod sa spremnikom potpuno rashlađenog ukapljenog plina

#### 2.5.4 LNG brodovi

Kapacitet ovakvih brodova je od 25000 [m<sup>3</sup>] do 145000 [m<sup>3</sup>]. Spremnici tereta mogu biti samostojeći sferični i konstruirani po principu spremnika za potpuno stlačene terete, s nešto limitiranim rasponom radnih tlakova. Alternativno, mogu biti i prizmatičnog oblika i slobodno oslonjeni ili membranskog tipa. Kod membranskih, teret je smješten unutar tankostjenih spremnika od nehrđajućeg čelika. Spremnici su pričvršćeni na pogodnim mjestima za unutarnju oplatu, te se opterećenja od tereta prenose na trup preko termalne izolacije. Svi LNG brodovi imaju nepropusnu unutarnju oplatu jer se od svih prizmatičnih spremnika zahtijeva da imaju sekundarno odjeljenje sposobno za sigurno zadržavanje bilo kakvog curenja tereta iz primarnih spremnika najmanje 15 dana. Zbog jednostavnosti i pouzadnosti analize naprezanja sferičnih spremnika, sekundarna barijera se ne zahtijeva. Pljuskače i izolirane posude za skupljanje iscurenih plinova štite unutarnji trup od bilo kakvog curenja koje se može pojaviti u službi.

Suvremeni LNG brodovi ne ukapljaju plinske pare. Ovi plinovi se koriste kao gorivo za brodske kotlove. Ostećeni LNG brodovi u mogućnosti su izgarati plinske pare. Ako ovo nije moguće, ograničeni raspon radnih tlakova spremnika tereta omogućiti će zadržavanje plinskih para samo nekoliko sati, nakon čega će biti potrebno plin kontrolirano ispuštati u atmosferu. Ipak, pare prirodnog plina, zagrijane iznad -110 [°C], lakše su od zraka i vrlo brzo nestaju u atmosferi. Neki LNG brodovi opremljeni su zagrijačima koji podižu temperaturu ispuštenih plinskih para kako bi se osiguralo još brže nestajanje u atmosferi.



Slika 2.4. LNG brod s prizmatičnim i sferičnim spremnikom ukapljenog plina

## 2.6 Vrste spremnika za prijevoz ukapljenog plina

Postoje dvije osnovne vrste spremnika na brodovima za prijevoz ukapljenog plina; to su integralni i nezavisni. Integralni spremnici u cjelosti ili djelomično sudjeluju u čvrstoći broda, dok nezavisni spremnici ne sudjeluju u čvrstoći broda. Spremnike je moguće podijeliti u sljedeće osnovne kategorije [2,3]:

1. integralne, koji su sastavni dio brodske strukture i izravno sudjeluju u čvrstoći trupa,
2. membranske, kod kojih se nenosiva membrana u potpunosti oslanja na izolaciju,
3. polumembranske, kod kojih se membrana djelomično oslanja na izolaciju,
4. nezavisne spremnike tipa A, B i C.

### 2.6.1 Integralni spremnici

Integralni spremnici sastavni su dio strukture brodskog trupa, te su podvrgnuti zajedničkom opterećenju. Projektni tlak uobičajeno ne prelazi vrijednost od 0.25 [bar]. Pojačavanjem strukture moguće je vrijednost tlaka povećati do najviše 0.7 [bar]. Integralni spremnici koriste se za terete kojima temperatura isparavanja nije niža od -10 [°C].

### **2.6.2 Membranski spremnici**

Membranski spremnici sadrže tanku membranu koja se preko sloja izolacije oslanja na brodsku strukturu. Membrana mora biti građena tako da toplinske i druge deformacije ne uzrokuju u njoj dodatna naprezanja.

Projektni tlak uobičajeno ne prelazi vrijednost od 0.25 [bar]. Ojačavanjem strukture i izolacije moguće je vrijednost projektnog tlaka povećati na najviše 0.7 [bar]. U posebnim okolnostima moguće je membrane izvesti tako da čine sastavni dio izolacije. Debljina membrane ni u kojem slučaju ne prelazi 10 [mm].

### **2.6.3 Polumembranski spremnici**

Polumembranski spremnici su nesamostojeći spremnici načinjeni tako da se jednim svojim dijelom putem izolacije oslanjaju na brodsku strukturu, a drugim, zaobljenim dijelovima, povezuju ove prve i ujedno preuzimaju eventualne toplinske deformacije, odnosno stezanje i širenje spremnika. I kod ovih spremnika projektni tlak uobičajeno ne prelazi vrijednost od 0.25 [bar]. Ojačavanjem strukture i izolacije moguće je vrijednost projektnog tlaka povećati na najviše 0.7 [bar].

### **2.6.4 Nezavisni ili samostojeći spremnici**

Nezavisni spremnici su u potpunosti samostojeći spremnici. Ne čine sastavni dio broskog trupa i ne sudjeluju u čvrstoći trupa. Mogu se podijeliti u tri kategorije:

1. Tip A, koji se projektira u cijelosti prema pravilima klasifikacijskog društva, bez preciznog određivanja polja naprezanja,
2. Tip B, kod kojeg se projekt zasniva na točnijim proračunima, modelskim i drugim ispitivanjima, u cilju preciznog određivanja vrijednosti naprezanja i vjerojatnosti pojave i širenja pukotine,
3. Tip C, koji spada u posude pod tlakom i koji mora zadovoljiti kriterije čvrstoće.

Ova podjela je usko povezana s projektnim tlakom u pojedinoj vrsti spremnika.

Nezavisni spremnici tipa A najčešće su prizmatičnog poprečnog presjeka i sastavljeni od ravninskih strukturalnih elemenata. Svojim oblikom prate oblik skladišnog prostora, odnosno broskog trupa i stoga maksimalno popunjavaju postojeći prostor.



Tlak u njima iznosi najviše 0.7 [bar], odnosno u prosjeku 0.25 [bar], te se ukapljeni plin u takvim spremnicima prevozi potpuno ohlađen i pri tlaku tek nešto višim od atmosferskog.

Nezavisni spremnici tipa B često su sferičnog ili "bilobe" oblika, kapaciteta od 2000 do 8000 [m<sup>3</sup>], a najviše 30000 [m<sup>3</sup>], a mogu biti i prizmatičnog oblika. Zbog umjerenog tlaka u spremnicima oni su većih dimenzija i svojim oblikom povoljnije prate oblik brodskih skladišta.

Zbog relativno velikih dimenzija, naprezanja u spremnicima tipa B mogu doseći visoke vrijednosti. Stoga je pri projektiranju potrebno točnije odrediti ta naprezanja metodom konačnih elemenata ili drugačije.

Nezavisni spremnici tipa C na suvremenim brodovima cilindričnog su ili sferičnog oblika. Tlak u spremnicima može doseći 18 [bar] i mora se održavati bez obzira na uvjete plovidbe. Kapacitet spremnika je najčešće od 1000 do 3000 [m<sup>3</sup>], najviše do 5000 [m<sup>3</sup>].

### 3 Geometrijske i fizikalne značajke razmatranog spremnika i broda

#### 3.1 Podaci o brodu

Naručioc broda je Hamworthy Gas System AS. Ukupna zapremina svih spremnika iznosi 21 000 m<sup>3</sup>. Brod je namjenjen prijevozu ukapljenog naftnog plina (LPG).

Glavni parametri broda:

duljina preko svega	$L_{oa}$ [m]	154.80
duljina između okomica	$L_{pp}$ [m]	147.80
širina (moulded)	$B$ [m]	25.60
visina do glavne palube	$H$ [m]	16.40
gaz (design)	$T_D$ [m]	8.80
gaz (scantling)	$T_S$ [m]	8.80
koeficijent istisnine	$C_b$	0.722
kapacitet spremnika	$V$ [m <sup>3</sup> ]	21000
brzina na projektom gasu	$v$ [kn]	16.5

#### 3.2 Podaci o spremnicima

Brod ima tri velika dvodjelna spremnika. Pozicija i geometrija spremnika prikazana je nacrtom na slici Slika 3.1.

Volumeni spremnika:

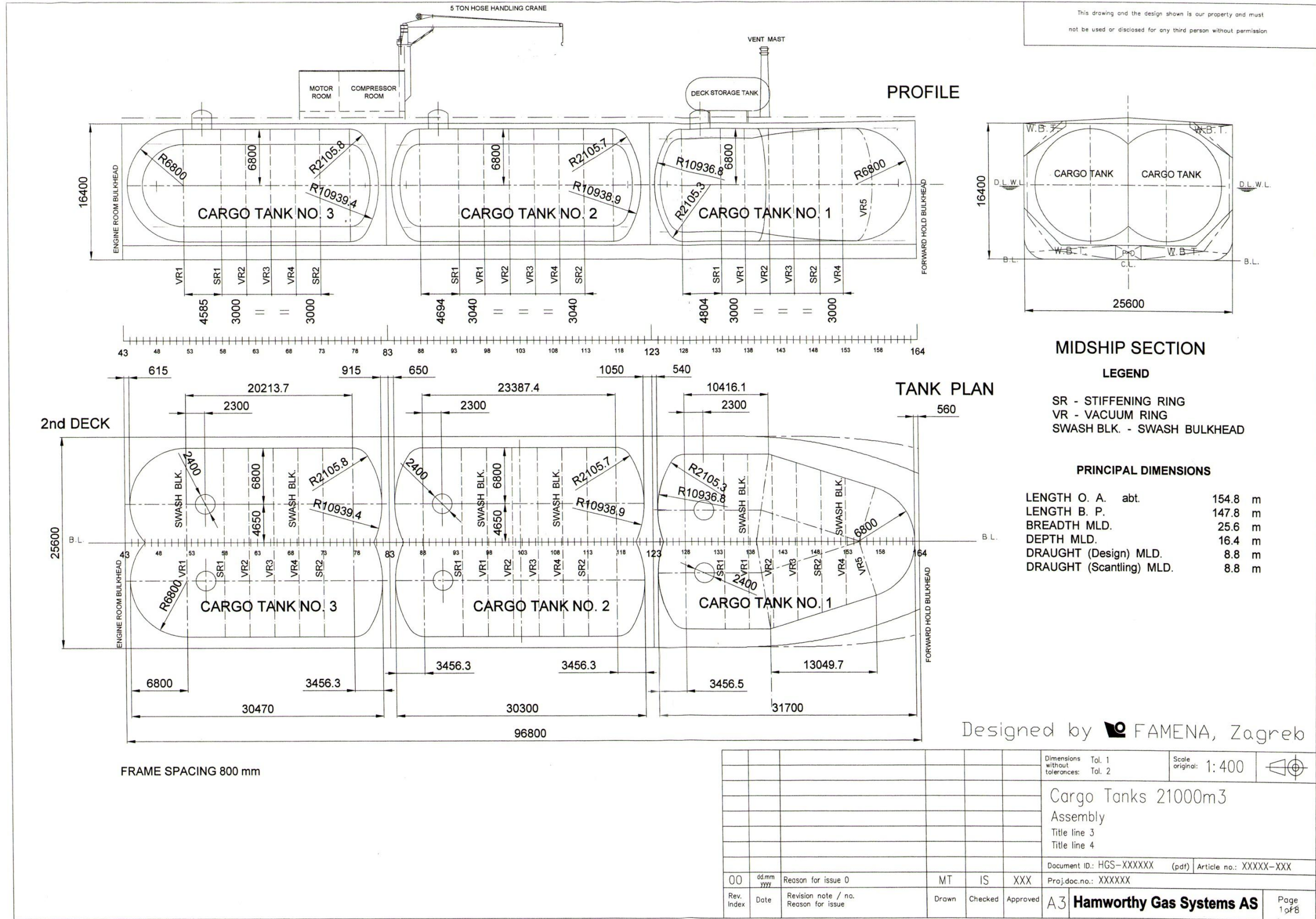
Spremnik 1:	5971.42 [m <sup>3</sup> ]
Spremnik 2:	7331.70 [m <sup>3</sup> ]
Spremnik 3:	7331.70 [m <sup>3</sup> ]

Zadatak je projektirati konstrukciju pramčanog spremnika odnosno spremnika 1.

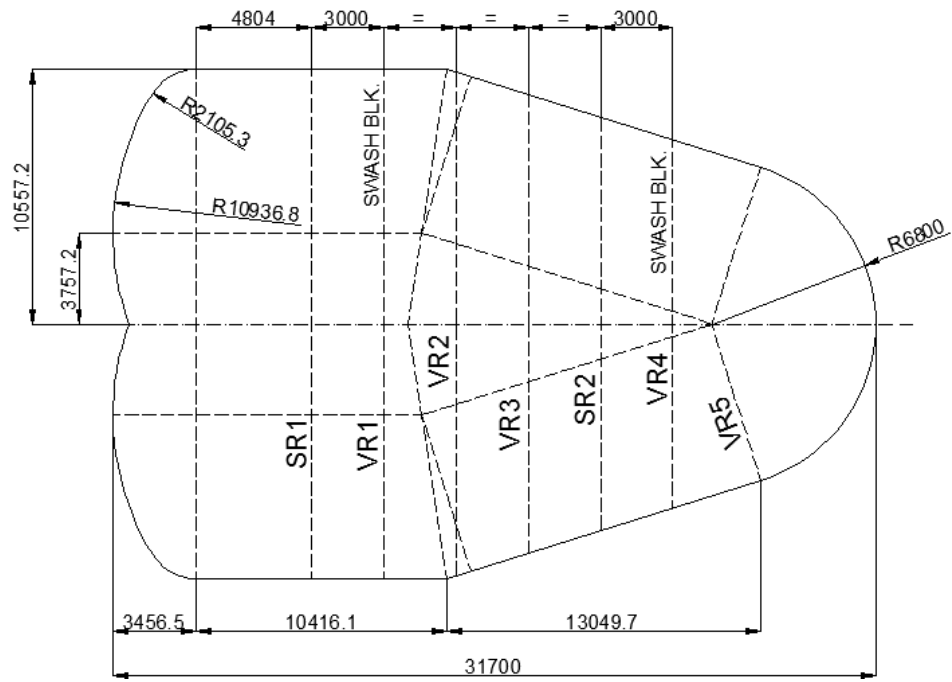
Stražnji dio spremnika 1. izveden je sfernim segmentom na koji se nadovezuje torusni segment; slijedi cilindrični segment i na kraju prednji polusferni dio izveden iz torusnog i sfernog segmenta.

Iz [4] slijede parametri:

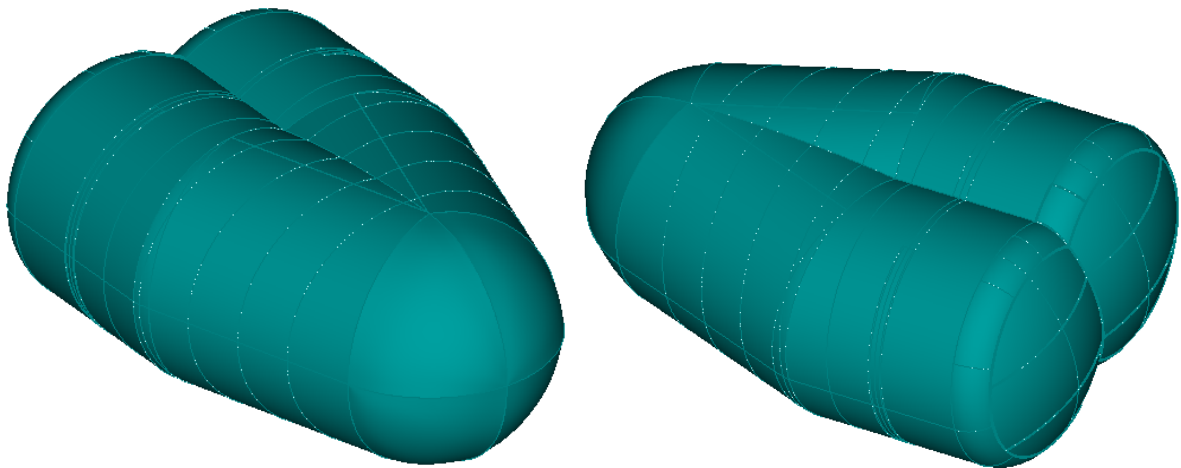
- položaj težišta u uzdužnom smjeru  $x_V = 13247.3$  [mm]
- težina praznog spremnika  $Q_s = 616$  [t]



Slika 3.1. Raspored spremnika tereta



Slika 3.2. Tlocrt spremnika 1



Slika 3.3. 3D prikaz spremnika 1.

## 4 Proračun debljina stijenki spremnika

### 4.1 Materijal oplata spremnika

Spremnik se projektira za najveći radni tlak od 5.3 [bar] po Bureau Veritas-u (BV) odnosno 3.6 [bar] po United States Coast Guard-u (USCG) pri čemu je najniža temperatura punjenja i transporta -48 [°C] a specifična gustoća tereta 690 [kg/m<sup>3</sup>].

Vrste tereta predviđene za transport:

bezvodni amonijak (temperature transporta iznad -20 [°C] nisu dopuštene po IGC 17. 13.2.3)

1,3-butadien

butan (iso i normalni)

butan/propan mješavina

butilen

dimetilamin

dietil eter\*

etilamine\*

izopren monomer

izopropilamin\*

propan

komercijalni propan

propilen

vinil klorid monomer

vinil etil eter\*

\* prema IGC 17.11, količina ovih vrsta tereta ne smije preći 3000 [m<sup>3</sup>] u bilo kojem spremniku.

Prema vrstama tereta, njihovim temperaturama i projektnom tlaku, iz slijedećih pravila Bureau Veritas-a slijedi materijal opločenja spremnika:

*Bureau Veritas, Rules for the Classification of Steel Ships – April 2005 edition (entry into force 1 July 2005) Part D Chapter 9 Liquefied gas carrier;*

*Bureau Veritas, Rules on Materials and Welding for the Classification of Marine Units – April 2005 edition (entry into force 1 July 2005), Chapter 2 Section 1 [5] Ferritic steels for low temperature service;*

*International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gas in Bulk, 1993 (IGC Code), Chapter 6 Section 6.2 Material requirements;*

*Table 6.2 „Plates, section and forgings for cargo tanks, secondary barriers and process pressure vessels for design temperatures below 0 [°C] and down to -55 [°C]“.*

S obzirom na prethodno navedene uvjete, odabire se ugljik-manganov čelik za nisko temperaturnu službu 510 LF.

## 4.2 Projektni tlak para

BV/IGC Ch. 4 Sec. 4.2.4.4

Projektni tlak para nezavisnih tankova tipa C (ili spremnika pod tlakom) ne smije biti manji od:

$$P_0 = 2 + A \cdot C \cdot (\rho_r)^{1.5} \quad [\text{bar}]$$

gdje su:

$$A = 0.0185 \left( \frac{\sigma_m}{\Delta\sigma_A} \right)^2$$

$\sigma_m$  - projektno osnovno membransko naprezanje

$\Delta\sigma_A$  - dopušteno promjenjivo membransko naprezanje (dvostruka vrijednost amplitude na razini vjerojatnosti  $Q = 10^{-8}$ )  
 55 [N/mm<sup>2</sup>] za feritno-perlitne, martenzitne i austenitne čelike  
 25 [N/mm<sup>2</sup>] za aluminijske legure (5083-0)

$C$  - karakteristika dimenzija spremnika; jednaka najvećoj vrijednosti od:  
 $h$ ,  $0.75b$  ili  $0.45l$

gdje su:

$h$  – visina spremnika (dimenzija u vertikalnom smjeru broda) [m]

$b$  – širina spremnika (dimenzija u poprečnom smjeru broda) [m]

$l$  – duljina spremnika (dimenzija u uzdužnom smjeru broda) [m]

$\rho_r$  - relativna gustoća tereta ( $\rho_r = 1$  za svježu vodu) pri projektnoj temperaturi

Karakteristika dimenzija spremnika iznosi:

$$C = h = 13.6$$

$$C = 0.75b = 0.75 \cdot 10.6 = 7.95$$

$$C = 0.45l = 0.45 \cdot 31.7 = 14.265$$

Odabrano:  $C = 14.265$ .

Najveće dopušteno membransko naprezanje jednako je manjoj vrijednosti od  $\frac{R_m}{A}$  i  $\frac{R_e}{B}$ .

$R_e$  - navedena minimalna granica razvlačenja u [N/mm<sup>2</sup>] pri sobnoj temperaturi

$R_m$  - navedena minimalna vlačna čvrstoća u [N/mm<sup>2</sup>] pri sobnoj temperaturi

Iz svojstava materijala opločenja slijede vrijednosti:

$$R_m = 510 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$R_e = 345 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

Vrijednosti konstanti  $A$  i  $B$  određene su propisima registra i definiraju projektni tlak po BV-u odnosno po USCG-u.

#### 4.2.1 Zahtjevi BV-a

BV/IGC Code Ch. 6.4 Sec 4.5

$$A = 3.0$$

$$B = 2.0$$

Za najveće dopušteno naprezanje slijedi:

$$\sigma_m = \frac{510}{3} = 170 \text{ [N/mm}^2\text{]} \qquad \sigma_m = \frac{345}{2} = 172.5 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

odnosno,  $\sigma_m = 170 \text{ [N/mm}^2\text{]}$ .

$$A = 0.0185 \left( \frac{\sigma_m}{\Delta\sigma_A} \right)^2 = 0.0185 \left( \frac{170}{55} \right)^2 = 0.17674$$

Tako se po propisima BV-a dobiva vrijednost projektnog tlaka:

$$P_0 = 2 + AC(\rho_r)^{1.5} = 2 + 0.17674 \cdot 14.265 \cdot 0.69^{1.5} = 3.445 \text{ [bar]}$$

Kako se spremnik projektira za najveći radni tlak od 5.3 [bar] po BV-u, za konačni tlak para uzima se vrijednost 5.3 [bar].

$$P_0 = 5.3 \text{ [bar]}$$

#### 4.2.2 Zahtjevi USCG-a

CFR Title 46 – Shipping Ch. I Part 154/154.448 – Table 2

$$A = 4.0$$

$$B = 2.0$$

United States Coast Guard propisuje vrijednosti membranskog naprezanja:

$$\sigma_m = \frac{510}{4} = 127.5 \text{ [N/mm}^2\text{]} \qquad \sigma_m = \frac{345}{2} = 172.5 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

odnosno,  $\sigma_m = 127.5 \text{ [N/mm}^2\text{]}$ .

$$A = 0.0185 \left( \frac{\sigma_m}{\Delta\sigma_A} \right)^2 = 0.0185 \left( \frac{127.5}{55} \right)^2 = 0.09941$$

Slijedi vrijednost projektnog tlaka:



$$P_0 = 2 + AC(\rho_r)^{1.5} = 2 + 0.09941 \cdot 14.265 \cdot 0.69^{1.5} = 2.813 \text{ [bar]}$$

Kako se spremnik projektira za najveći radni tlak od 3.6 [bar] po USCG, za konačni tlak para uzima se vrijednost 3.6 [bar].

$$P_0 = 3.6 \text{ [bar]}$$

### 4.3 Unutarnji tlak

BV/IGC Code Ch. 4 Sec. 4.3.2

Unutarnji tlak  $P_{eq}$  rezultat je djelovanja projektnog tlaka para  $P_0$  i tlaka tekućine  $P_{gd}$  no ne uključuje učinke zapljuskivanja tekućine.

$$P_{eq} = P_0 + (P_{gd})_{max} \text{ [bar]}$$

Unutarnji tlak tekućine  $P_{gd}$  nastaje kombiniranim djelovanjem efekata gravitacije i dinamičkih ubrzanja a njegova vrijednost iznosi:

$$P_{gd} = \frac{a_\beta \cdot z_\beta \cdot \rho}{1.02 \cdot 10^4} \text{ [bar]}$$

gdje su:

- $a_\beta$  - bezdimenzionalno ubrzanje (odnosno, relativno prema gravitacijskom ubrzanju) u proizvoljnom smjeru  $\beta$ ; rezultat gravitacijskih i dinamičkih opterećenja
- $z_\beta$  - najveća visina tekućine iznad točke u kojoj se određuje tlak, mjerena od stijenke spremnika u  $\beta$  smjeru

#### 4.3.1 Komponente ubrzanja $a_x$ , $a_y$ , $a_z$

BV/IGC Code Ch. 4 Sec. 4.12

Bezdimenzionalno ubrzanje  $a_\beta$  rastavlja se u komponente  $a_z$  (vertikalno),  $a_y$  (poprečno) i  $a_x$  (uzdužno). Vertikalno ubrzanje ne uključuje statičku komponentu težine, poprečno uključuje statičku komponentu težine u poprečnom smjeru uslijed valjanja dok uzdužno ubrzanje uključuje statičku komponentu težine u uzdužnom smjeru uslijed posrtanja.

$$a_z = \pm a_0 \sqrt{1 + \left[ 5.3 - \frac{45}{L} \right]^2 \left[ \frac{x}{L} + 0.05 \right]^2 \left[ \frac{0.6}{C_B} \right]^{1.5}}$$

$$a_y = \pm a_0 \sqrt{0.6 + 2.5 \left[ \frac{x}{L} + 0.05 \right]^2 + k \left[ 1 + 0.6 \cdot k \frac{z}{B} \right]^2}$$

$$a_z = \pm a_0 \sqrt{0.06 + A^2 - 0.25A}$$

gdje su:

$L$  - duljina broda u [m], prema IGC Code Ch. 4 Sec. 4.12 i BV Pt B Ch. 1 Sec. 2

prvi kriterij:

$$L_{WL} \cdot 0.96 < L_1 < L_{WL} \cdot 0.97$$

$$L_{WL} = 149.6 \text{ [m]}$$

$$143.6 < L_1 < 145.1$$

drugi kriterij:

$$L_1 = L_{BP} + 0.096 = 147.8 + 0.096 = 147.9 \text{ [m]}$$

odabrano:

$$L = 145.0 \text{ [m]}$$

$C_B$  - koeficijent istisnine

$$C_B = 0.722$$

$B$  - najveća širina broda [m]

$$B = 25.6 \text{ [m]}$$

$x$  - uzdužna udaljenost u [m] od sredine broda do težišta ispunjenog spremnika;

$x$  je pozitivan naprijed od sredine odnosno negativan natrag od sredine broda

$$x = 39.172 \text{ [m]}$$

$z$  - vertikalna udaljenost u [m] od vodne linije broda do težišta ispunjenog spremnika;

$z$  je pozitivno iznad vodne linije odnosno negativno ispod vodne linije broda;

težište ispunjenog spremnika mjereno od osnovice iznosi 8.95 [m]

$$z = 8.95 - 8.8 = 0.15 \text{ [m]}$$

$v$  - maksimalna brzina u mirnoj vodi pri punom gasu u [kn]

$$v = 16.5 \text{ [kn]}$$

$$A = \left[ 0.7 - \frac{L}{1200} + 5 \frac{z}{L} \right] \left[ \frac{0.6}{C_B} \right] = \left[ 0.7 - \frac{145.0}{1200} + 5 \frac{0.15}{145.0} \right] \left[ \frac{0.6}{0.722} \right] = 0.4856$$

$$a_0 = 0.2 \frac{v}{\sqrt{L}} + \frac{34 - \frac{600}{L}}{L} = 0.2 \frac{16.5}{\sqrt{145.0}} + \frac{34 - \frac{600}{145.0}}{145.0} = 0.48$$

$k$  - općenito iznosi 1; za posebne tipove opterećenja i oblike trupa  $k$  se određuje kako slijedi:

$$k = \frac{13 \cdot \overline{M_B G}}{B}$$

$M_B G$  – metacentarska visina [m]

$M_B G = 0.5$  [m] – maksimalna procjenjena vrijednost

$$k = \frac{13 \cdot \overline{M_B G}}{B} = \frac{13 \cdot 0.5}{25.6} = 0.253$$

odabrana vrijednost:

$$k = 1$$

Vrijednosti bezdimenzijskih komponenti ubrzanja:

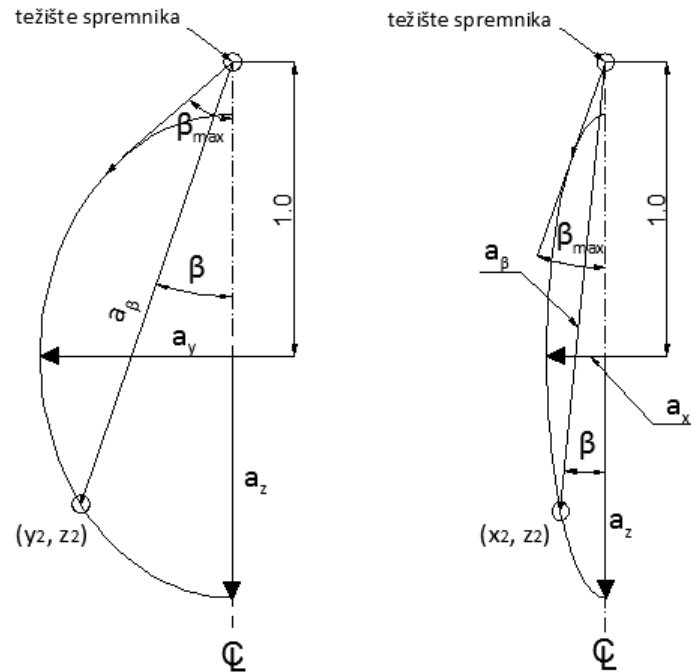
$$a_x = \pm 0.20046$$

$$a_y = \pm 0.65520$$

$$a_z = \pm 0.82207$$

#### 4.3.2 Komponente ubrzanja $a_\theta$

Veličina  $a_\theta$  nema dimenzije u odnosu na gravitacijsko ubrzanje a rezultat je gravitacijskih i dinamičkih opterećenja i računa se u smjerovima od  $\theta = 0^\circ$  do  $\theta = 30^\circ$ .

Slika 4.1. Određivanje ubrzanja  $a_\beta$  u ravnini y-z i x-z

Iz slike Slika 4.1. se vidi da se vrijednosti ubrzanja  $a_\beta$  dobiju se iz točke presjecišta elipse i pravca. Elipsa je određena bezdimenzijskim ubrzanjima  $a_x$  i  $a_z$  za ravninu x-z, odnosno  $a_y$  i  $a_z$  za ravninu y-z.

Jednadžba elipse i pravca za x-z ravninu:

$$\frac{x^2}{a_x^2} + \frac{z^2}{a_z^2} = 1$$

$$z = x \cdot \tan \delta + 1$$

odnosno za y-z ravninu:

$$\frac{y^2}{a_y^2} + \frac{z^2}{a_z^2} = 1$$

$$z = y \cdot \tan \delta + 1$$

gdje je  $\delta = 90^\circ - \beta$ .

Za vrijednost ubrzanja  $a_\beta$  slijedi:

$$a_\beta = \sqrt{x^2 + (1 + z^2)}$$

$$a_\beta = \sqrt{y^2 + (1 + z^2)}$$

gdje su  $x$ ,  $y$  i  $z$  koordinate presjecišta pravca i elipse u x-z odnosno y-z ravnini s ishodištem u centru elipse.

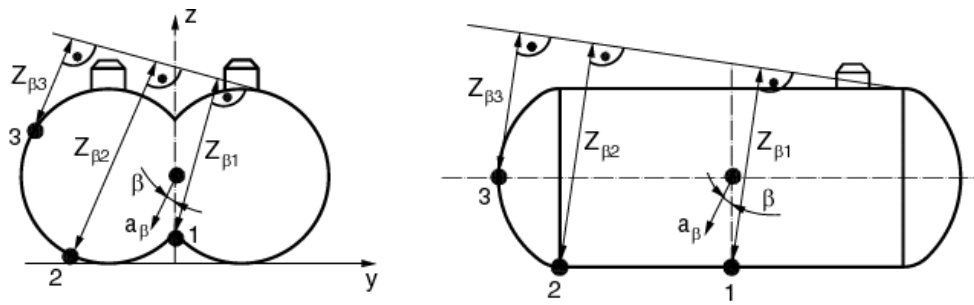
U tablici Tablica 4.1 dane su koordinate presjecišta pravca i elipse za vrijednosti nagiba pravca (kut  $\beta$ ). U x-z ravnini zadnji kut pod kojim pravac siječe elipsu iznosi  $19^\circ$  pa za veće kuteve  $a_\beta$  poprima vrijednost nule.

x-z ravnina				y-z ravnina			
$\beta$ [°]	$x_2$ [m]	$z_2$ [m]	$a_\beta$	$\beta$ [°]	$y_2$ [m]	$z_2$ [m]	$a_\beta$
0	0,00000	-0,82206	1,8221	0	0,00000	-0,82206	1,8221
1	-0,03170	-0,81172	1,8120	1	-0,06275	-0,81829	1,8194
2	-0,06236	-0,78127	1,7824	2	-0,09438	-0,81350	1,8160
3	-0,09087	-0,73274	1,7351	3	-0,12577	-0,80678	1,8112
4	-0,11679	-0,66814	1,6722	4	-0,15683	-0,79817	1,8050
5	-0,13927	-0,59127	1,5974	5	-0,18749	-0,78769	1,7975
6	-0,15825	-0,50458	1,5129	6	-0,21767	-0,77538	1,7887
7	-0,17343	-0,41222	1,4228	7	-0,24730	-0,76127	1,7785
8	-0,18505	-0,31604	1,3290	8	-0,27630	-0,74540	1,7671
9	-0,19318	-0,21953	1,2347	9	-0,30460	-0,72783	1,7545
10	-0,19818	-0,12352	1,1409	10	-0,30476	-0,72773	1,7544
12	-0,19993	0,05968	0,9613	12	-0,35885	-0,68780	1,7255
14	-0,19262	0,22761	0,7960	14	-0,40943	-0,64180	1,6921
16	-0,17771	0,38036	0,6446	16	-0,45607	-0,59023	1,6543
18	-0,15408	0,52585	0,4986	18	-0,49838	-0,53366	1,6126
19	-0,13465	0,60899	0,4135	20	-0,53606	-0,47268	1,5672
20	0,00000	0,00000	0,0000	22	-0,56886	-0,40789	1,5185
22	0,00000	0,00000	0,0000	24	-0,59658	-0,33988	1,4667
24	0,00000	0,00000	0,0000	26	-0,61906	-0,26924	1,4122
26	0,00000	0,00000	0,0000	28	-0,63620	-0,19651	1,3551
28	0,00000	0,00000	0,0000	30	-0,64792	-0,12223	1,2958
30	0,00000	0,00000	0,0000				

Tablica 4.1. Vrijednosti bezdimenzijskog ubrzanja  $a_\beta$

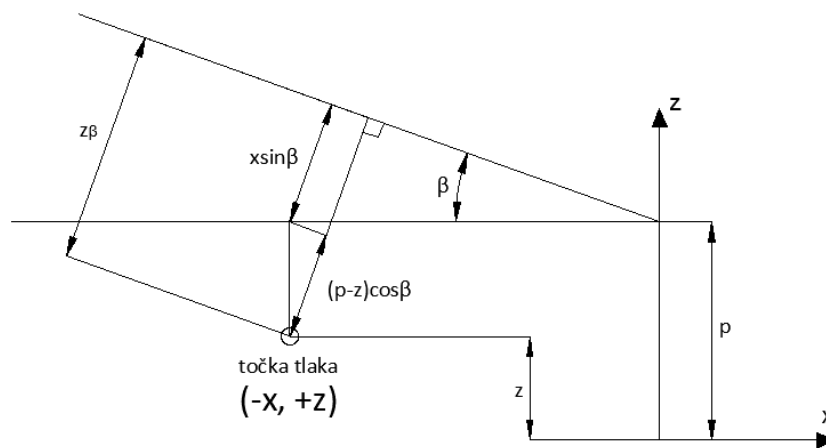
#### 4.3.3 Određivanje veličine $z_\beta$

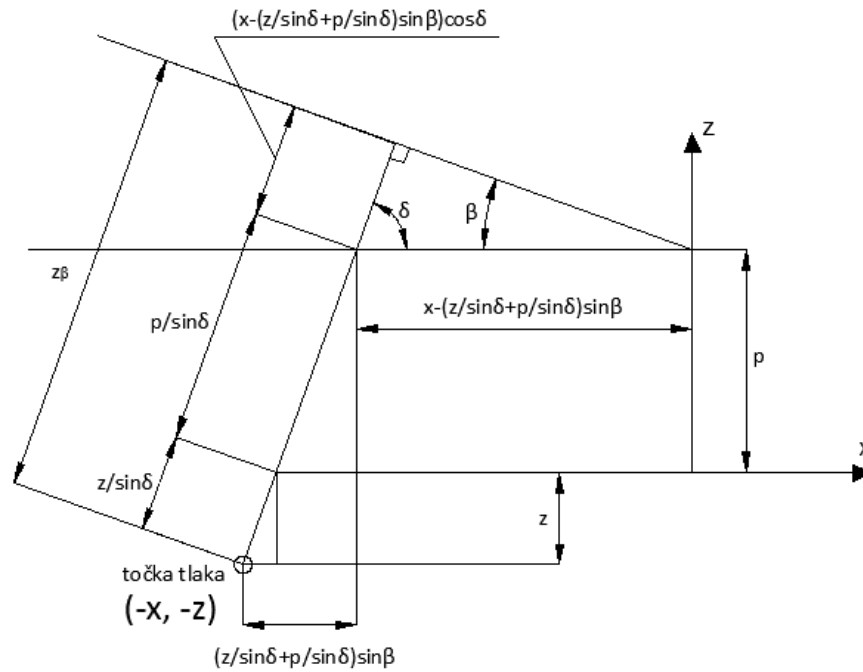
Veličina  $z_\beta$  predstavlja najveću visinu tekućine iznad točke u kojoj se određuje tlak, mjerenu od stijenske spremnika u  $\beta$  smjeru, kao što je prikazano na slici Slika 4.2.

Slika 4.2. Veličina  $z_\beta$ 

Vrijednost veličine  $z_\beta$  ovisi o položaju točke tlaka i odabranom lokalnom koordinatnom sustavu, ishodište kojeg je udaljeno od najviše točke spremnika za vrijednost  $p$ . Položaj ishodišta lokalnog koordinativnog sustava ovisi o promatranom slučaju nagiba broda.

Na slici Slika 4.3. i Slika 4.4. prikazan je način na koji se određuje vrijednost  $z_\beta$  u ravnini x-z, ovisno o tome da li se točka nalazi iznad (slika Slika 4.3.) ili ispod (slika Slika 4.4.) ishodišta.

Slika 4.3. Određivanje  $z_\beta$   $(-x, +z)$

Slika 4.4. Određivanje  $z_\beta$   $(-x, -z)$ 

Slijedi:

x-z ravnina

y-z ravnina

 $(-x, -z)$  $(-y, -z)$ 

$$z_\beta = \frac{1}{\sin \delta} (z + p) - \frac{\cos^2 \delta}{\sin \delta} (z + p) + x \cdot \cos \delta$$

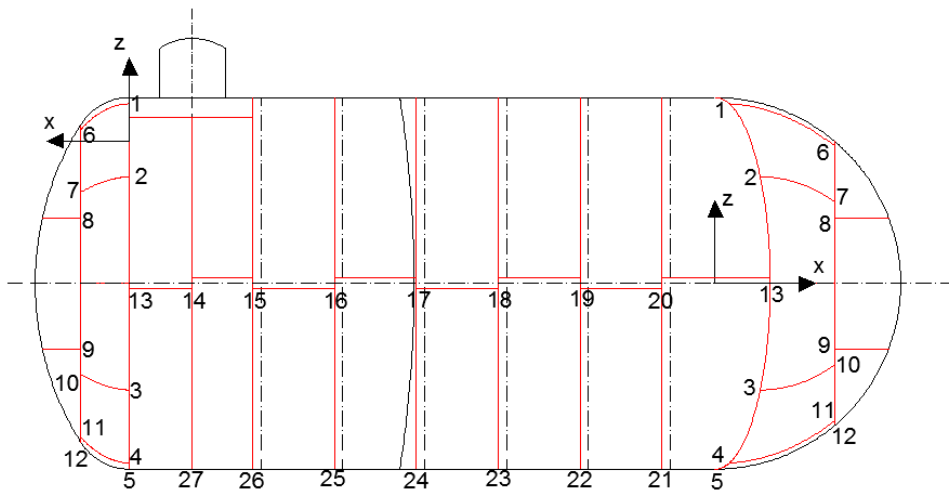
$$z_\beta = \frac{1}{\sin \delta} (z + p) - \frac{\cos^2 \delta}{\sin \delta} (z + p) + y \cdot \cos \delta$$

 $(-x, +z)$  $(-y, +z)$ 

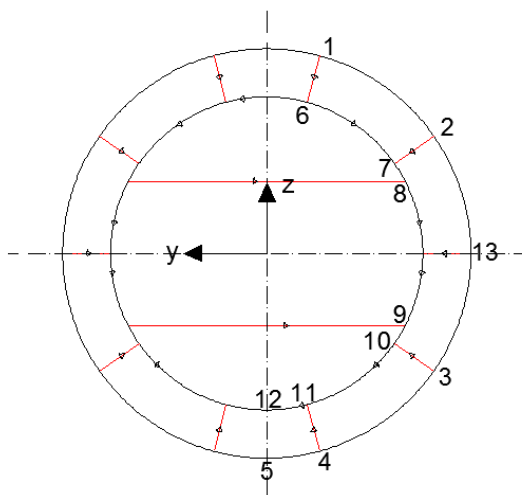
$$z_\beta = x \cdot \sin \beta + (p - z) \cdot \cos \beta$$

$$z_\beta = y \cdot \sin \beta + (p - z) \cdot \cos \beta$$

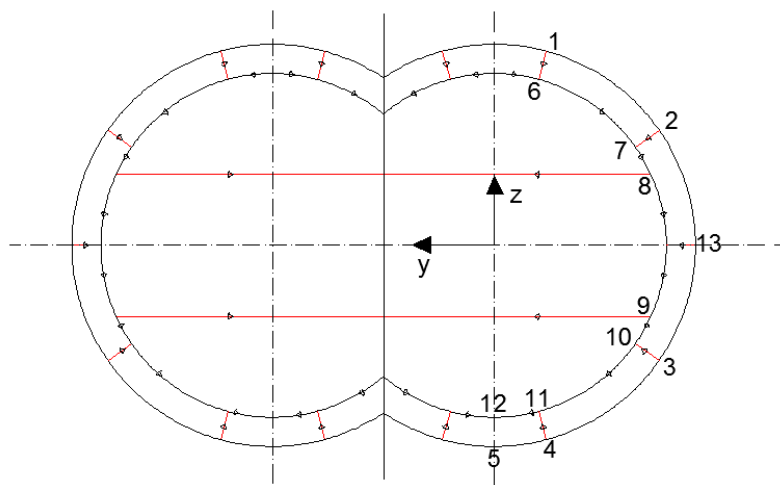
Spremnik se promatra s obzirom na ishodište lokalnog koordinatnog sustava pa razlikujemo prednji i stražnji dio. Položaj točaka tlakova i ishodišta koordinatnih sustava prikazani su na slijedećim slikama.



Slika 4.5. Prednji i stražnji dio u x-z ravnini



Slika 4.6. Prednji polusferni dio u y-z ravnini



Slika 4.7. Stražnji torusni dio u y-z ravnini



Koordinate točaka tlakova prikazani su u slijedećim tablicama.

prednji dio (k.s. 1)			stražnji dio (k.s. 2)		
br. točke	x [m]	z [m]	br. točke	x [m]	z [m]
1	-21.967	1.368	1	-21.444	6.568
2	-23.100	-1.300	2	-21.444	3.900
3	-23.100	-9.100	3	-21.444	-3.900
4	-21.967	-11.768	4	-21.444	-6.568
5	-21.444	-12.000	5	-21.444	-6.800
6	-25.825	-0.177	6	-23.227	5.615
7	-25.825	-2.217	7	-23.227	3.334
8	-25.825	-2.800	8	-23.227	2.400
9	-25.825	-7.600	9	-23.227	-2.400
10	-25.825	-8.183	10	-23.227	-3.334
11	-25.825	-10.223	11	-23.227	-5.615
12	-25.825	-10.400	12	-23.227	-5.815
13	-23.447	-5.200	13	-21.444	0.000
14	-2.300	-5.200	14	-19.144	0.000
15	-4.504	-5.200	15	-16.940	0.000
16	-7.504	-5.200	16	-13.940	0.000
17	-10.504	-5.200	17	-10.940	0.000
18	-13.504	-5.200	18	-7.940	0.000
19	-16.504	-5.200	19	-4.940	0.000
20	-19.504	-5.200	20	-1.940	0.000
21	-19.504	-12.000	21	-1.940	-6.800
22	-16.504	-12.000	22	-4.940	-6.800
23	-13.504	-12.000	23	-7.940	-6.800
24	-10.504	-12.000	24	-10.940	-6.800
25	-7.504	-12.000	25	-13.940	-6.800
26	-4.504	-12.000	26	-16.940	-6.800
27	-2.300	-12.000	27	-19.144	-6.800

**Tablica 4.2.** Koordinate točaka prednjeg i stražnjeg dijela u x-z ravnini

prednji polusferni dio			stražnji torusni dio		
br. točke	y [m]	z [m]	br. točke	y [m]	z [m]
1	-1.760	6.568	1	-1.760	6.568
2	-5.570	3.900	2	-5.570	3.900
3	-5.570	-3.900	3	-5.570	-3.900
4	-1.760	-6.568	4	-1.760	-6.568
5	0.000	-6.800	5	0.000	-6.800
13	-6.800	0.000	13	-6.800	0.000

**Tablica 4.3.** Koordinate točaka prednjeg polusfernog i stražnjeg torusnog dijela u y-z ravnini

Vrijednosti veličine  $z_{\beta}$  pojedinih točaka tlakova prikazane su u slijedećim tablicama.

$\theta$ [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
0	0.232	2.900	10.700	13.368	13.600	1.777	3.817	4.400	9.200	9.783	11.823	12.000	6.800	6.800
1	0.615	3.302	11.102	13.750	13.972	2.228	4.268	4.850	9.649	10.232	12.272	12.449	7.208	6.839
2	0.998	3.704	11.500	14.127	14.340	2.677	4.716	5.299	10.096	10.678	12.717	12.894	7.614	6.876
3	1.381	4.105	11.895	14.500	14.704	3.126	5.164	5.746	10.539	11.121	13.158	13.335	8.018	6.911
4	1.763	4.504	12.286	14.868	15.063	3.574	5.610	6.191	10.979	11.560	13.595	13.772	8.419	6.944
5	2.145	4.902	12.673	15.232	15.417	4.021	6.054	6.634	11.416	11.996	14.029	14.205	8.818	6.975
6	2.527	5.298	13.056	15.591	15.767	4.467	6.496	7.075	11.849	12.428	14.458	14.634	9.214	7.003
7	2.907	5.693	13.436	15.946	16.112	4.911	6.936	7.515	12.279	12.857	14.882	15.058	9.607	7.030
8	3.287	6.086	13.811	16.295	16.452	5.354	7.374	7.951	12.705	13.282	15.302	15.477	9.997	7.054
9	3.665	6.478	14.182	16.640	16.787	5.795	7.810	8.386	13.127	13.702	15.717	15.892	10.384	7.076
10	4.043	6.867	14.549	16.980	17.117	6.235	8.244	8.818	13.545	14.118	16.128	16.302	10.768	7.096
12	4.794	7.639	15.269	17.643	17.761	7.108	9.103	9.673	14.368	14.938	16.934	17.107	11.526	7.130
14	5.539	8.402	15.971	18.285	18.384	7.972	9.952	10.517	15.174	15.740	17.719	17.891	12.270	7.154
16	6.278	9.155	16.653	18.905	18.984	8.827	10.788	11.348	15.962	16.522	18.483	18.654	12.999	7.171
18	7.009	9.896	17.315	19.502	19.561	9.671	11.611	12.165	16.730	17.284	19.225	19.393	13.713	7.178
19	7.371	10.262	17.638	19.792	19.840	10.088	12.017	12.568	17.107	17.658	19.587	19.754	14.063	7.178
20	7.731	10.626	17.956	20.075	20.114	10.503	12.420	12.967	17.478	18.025	19.943	20.109	14.409	7.177
22	8.444	11.342	18.575	20.624	20.643	11.322	13.214	13.754	18.204	18.745	20.636	20.801	15.088	7.166
24	9.146	12.045	19.171	21.147	21.146	12.128	13.991	14.524	18.909	19.441	21.305	21.467	15.749	7.148
26	9.838	12.733	19.744	21.645	21.624	12.918	14.752	15.276	19.590	20.114	21.947	22.107	16.390	7.120
28	10.517	13.405	20.293	22.116	22.075	13.693	15.495	16.009	20.247	20.762	22.563	22.720	17.012	7.084
30	11.184	14.061	20.817	22.561	22.500	14.452	16.219	16.723	20.880	21.385	23.151	23.305	17.613	7.039

$\theta$ [°]	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
0	6.800	6.800	6.800	6.800	6.800	6.800	13.600	13.600	13.600	13.600	13.600	13.600	13.600
1	6.878	6.930	6.982	7.035	7.087	7.139	13.938	13.886	13.834	13.781	13.729	13.677	13.638
2	6.953	7.058	7.162	7.267	7.372	7.477	14.272	14.168	14.063	13.958	13.854	13.749	13.672
3	7.026	7.183	7.340	7.497	7.654	7.811	14.602	14.445	14.288	14.131	13.974	13.817	13.702
4	7.098	7.307	7.516	7.725	7.935	8.144	14.927	14.718	14.509	14.300	14.090	13.881	13.727
5	7.167	7.428	7.690	7.951	8.213	8.474	15.248	14.987	14.725	14.464	14.202	13.941	13.749
6	7.234	7.547	7.861	8.174	8.488	8.801	15.564	15.251	14.937	14.623	14.310	13.996	13.766
7	7.298	7.664	8.029	8.395	8.761	9.126	15.876	15.510	15.144	14.779	14.413	14.048	13.779
8	7.361	7.778	8.196	8.613	9.031	9.448	16.182	15.765	15.347	14.930	14.512	14.094	13.788
9	7.421	7.890	8.359	8.829	9.298	9.767	16.484	16.014	15.545	15.076	14.606	14.137	13.792
10	7.479	8.000	8.521	9.042	9.563	10.084	16.780	16.259	15.738	15.217	14.696	14.175	13.793
12	7.588	8.212	8.835	9.459	10.083	10.707	17.358	16.734	16.110	15.487	14.863	14.239	13.781
14	7.688	8.413	9.139	9.865	10.591	11.316	17.914	17.189	16.463	15.737	15.011	14.286	13.752
16	7.778	8.605	9.432	10.259	11.086	11.913	18.449	17.622	16.795	15.968	15.142	14.315	13.707
18	7.859	8.786	9.713	10.640	11.567	12.494	18.961	18.034	17.107	16.180	15.253	14.326	13.645
19	7.896	8.873	9.849	10.826	11.803	12.779	19.209	18.232	17.256	16.279	15.302	14.325	13.608
20	7.930	8.956	9.982	11.009	12.035	13.061	19.451	18.425	17.398	16.372	15.346	14.320	13.566
22	7.992	9.116	10.240	11.364	12.487	13.611	19.916	18.792	17.668	16.545	15.421	14.297	13.471
24	8.044	9.264	10.484	11.705	12.925	14.145	20.357	19.137	17.917	16.697	15.476	14.256	13.360
26	8.086	9.401	10.716	12.032	13.347	14.662	20.774	19.458	18.143	16.828	15.513	14.198	13.232
28	8.119	9.527	10.935	12.344	13.752	15.161	21.165	19.756	18.348	16.939	15.531	14.123	13.088
30	8.141	9.641	11.141	12.641	14.141	15.641	21.530	20.030	18.530	17.030	15.530	14.030	12.928

Tablica 4.4. Vrijednosti  $z_{\theta}$  za prednji dio u x-z ravnini

$\theta$ [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
0	0.232	2.900	10.700	13.368	13.600	1.185	3.466	4.400	9.200	10.134	12.415	12.615	6.800	6.800
1	0.606	3.273	11.073	13.741	13.972	1.590	3.871	4.805	9.604	10.538	12.818	13.018	7.173	7.133
2	0.980	3.646	11.442	14.109	14.340	1.995	4.274	5.208	10.005	10.939	13.218	13.418	7.544	7.464
3	1.354	4.018	11.808	14.472	14.704	2.399	4.677	5.610	10.403	11.336	13.613	13.813	7.913	7.793
4	1.727	4.388	12.170	14.832	15.063	2.802	5.078	6.009	10.798	11.730	14.005	14.204	8.279	8.119
5	2.100	4.758	12.529	15.186	15.417	3.205	5.477	6.408	11.189	12.120	14.392	14.591	8.643	8.443
6	2.472	5.125	12.883	15.537	15.767	3.606	5.875	6.804	11.577	12.507	14.775	14.973	9.004	8.764
7	2.843	5.491	13.234	15.882	16.112	4.007	6.271	7.198	11.962	12.889	15.153	15.351	9.363	9.082
8	3.214	5.856	13.581	16.223	16.452	4.406	6.665	7.590	12.343	13.268	15.527	15.724	9.718	9.398
9	3.583	6.219	13.923	16.558	16.787	4.804	7.057	7.979	12.720	13.643	15.896	16.093	10.071	9.711
10	3.952	6.579	14.261	16.889	17.117	5.200	7.446	8.366	13.094	14.014	16.260	16.456	10.420	10.021
12	4.685	7.295	14.925	17.535	17.761	5.988	8.219	9.133	13.828	14.742	16.973	17.168	11.110	10.632
14	5.412	8.001	15.570	18.159	18.384	6.769	8.982	9.888	14.546	15.452	17.665	17.859	11.786	11.229
16	6.133	8.698	16.196	18.761	18.984	7.541	9.734	10.632	15.246	16.144	18.336	18.528	12.447	11.813
18	6.847	9.384	16.803	19.340	19.561	8.305	10.474	11.362	15.927	16.816	18.985	19.175	13.094	12.383
19	7.200	9.723	17.099	19.621	19.840	8.682	10.839	11.722	16.261	17.144	19.300	19.489	13.411	12.662
20	7.552	10.059	17.389	19.896	20.114	9.058	11.201	12.079	16.589	17.467	19.610	19.798	13.724	12.937
22	8.248	10.721	17.954	20.428	20.643	9.800	11.914	12.780	17.231	18.097	20.212	20.397	14.338	13.476
24	8.934	11.371	18.497	20.934	21.146	10.530	12.613	13.467	17.852	18.705	20.789	20.971	14.934	13.998
26	9.608	12.006	19.018	21.416	21.624	11.247	13.297	14.137	18.451	19.290	21.340	21.520	15.512	14.504
28	10.272	12.627	19.515	21.871	22.075	11.951	13.964	14.789	19.027	19.852	21.866	22.042	16.071	14.991
30	10.922	13.233	19.988	22.299	22.500	12.640	14.615	15.424	19.581	20.390	22.365	22.538	16.611	15.461

$\theta$ [°]	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
0	6.800	6.800	6.800	6.800	6.800	6.800	13.600	13.600	13.600	13.600	13.600	13.600	13.600
1	7.095	7.042	6.990	6.938	6.885	6.833	13.632	13.684	13.736	13.789	13.841	13.894	13.932
2	7.387	7.282	7.178	7.073	6.968	6.864	13.659	13.764	13.869	13.973	14.078	14.183	14.260
3	7.677	7.520	7.363	7.206	7.049	6.892	13.683	13.840	13.997	14.154	14.311	14.468	14.583
4	7.965	7.756	7.547	7.337	7.128	6.919	13.702	13.911	14.121	14.330	14.539	14.749	14.902
5	8.250	7.989	7.728	7.466	7.205	6.943	13.717	13.979	14.240	14.502	14.763	15.025	15.217
6	8.533	8.220	7.906	7.593	7.279	6.965	13.728	14.042	14.355	14.669	14.983	15.296	15.527
7	8.814	8.448	8.083	7.717	7.351	6.986	13.735	14.101	14.466	14.832	15.197	15.563	15.832
8	9.091	8.674	8.256	7.839	7.421	7.004	13.738	14.155	14.573	14.990	15.408	15.825	16.132
9	9.366	8.897	8.428	7.958	7.489	7.020	13.736	14.205	14.675	15.144	15.613	16.082	16.427
10	9.638	9.117	8.596	8.075	7.554	7.033	13.730	14.251	14.772	15.293	15.814	16.335	16.718
12	10.173	9.550	8.926	8.302	7.678	7.055	13.706	14.330	14.954	15.577	16.201	16.825	17.283
14	10.696	9.970	9.245	8.519	7.793	7.067	13.665	14.391	15.117	15.843	16.568	17.294	17.827
16	11.206	10.379	9.552	8.725	7.898	7.071	13.608	14.435	15.262	16.088	16.915	17.742	18.350
18	11.702	10.775	9.848	8.921	7.994	7.067	13.534	14.461	15.388	16.315	17.242	18.169	18.850
19	11.944	10.968	9.991	9.014	8.038	7.061	13.490	14.467	15.444	16.421	17.397	18.374	19.092
20	12.184	11.157	10.131	9.105	8.079	7.053	13.443	14.469	15.495	16.521	17.547	18.573	19.327
22	12.650	11.527	10.403	9.279	8.155	7.031	13.336	14.460	15.584	16.708	17.832	18.955	19.781
24	13.102	11.882	10.662	9.441	8.221	7.001	13.213	14.433	15.654	16.874	18.094	19.314	20.211
26	13.538	12.222	10.907	9.592	8.277	6.962	13.074	14.389	15.704	17.019	18.334	19.649	20.616
28	13.957	12.548	11.140	9.731	8.323	6.915	12.919	14.327	15.735	17.144	18.552	19.961	20.995
30	14.359	12.859	11.359	9.859	8.359	6.859	12.748	14.248	15.748	17.248	18.748	20.248	21.350

Tablica 4.5. Vrijednosti  $z_\theta$  za stražnji dio u x-z ravnini

$\theta$ [°]	prednji polusferni dio						stražnji torusni dio					
	1	2	3	4	5	13	1	2	3	4	5	13
0	0.232	2.900	10.700	13.368	13.600	6.800	0.232	2.900	10.700	13.368	13.600	6.800
1	0.262	2.996	10.796	13.397	13.598	6.918	0.262	2.996	10.796	13.397	13.598	6.918
2	0.293	3.092	10.888	13.422	13.592	7.033	0.293	3.092	10.888	13.422	13.592	7.033
3	0.323	3.187	10.977	13.442	13.581	7.147	0.323	3.187	10.977	13.442	13.581	7.147
4	0.354	3.281	11.063	13.459	13.567	7.258	0.354	3.281	11.063	13.459	13.567	7.258
5	0.384	3.374	11.145	13.471	13.548	7.367	0.384	3.374	11.145	13.471	13.548	7.367
6	0.414	3.466	11.224	13.479	13.525	7.474	0.414	3.466	11.224	13.479	13.525	7.474
7	0.444	3.557	11.299	13.483	13.499	7.578	0.444	3.557	11.299	13.483	13.499	7.578
8	0.474	3.647	11.371	13.483	13.468	7.680	0.474	3.647	11.371	13.483	13.468	7.680
9	0.504	3.735	11.440	13.479	13.433	7.780	0.504	3.735	11.440	13.479	13.433	7.780
10	0.534	3.823	11.505	13.471	13.393	7.878	0.534	3.823	11.505	13.471	13.393	7.878
12	0.593	3.994	11.625	13.442	13.303	8.065	0.593	3.994	11.625	13.442	13.303	8.065
14	0.651	4.161	11.730	13.397	13.196	8.243	0.651	4.161	11.730	13.397	13.196	8.243
16	0.708	4.323	11.821	13.336	13.073	8.411	0.708	4.323	11.821	13.336	13.073	8.411
18	0.764	4.479	11.898	13.258	12.934	8.568	0.764	4.479	11.898	13.258	12.934	8.568
20	0.820	4.630	11.960	13.164	12.780	8.716	0.820	4.630	11.960	13.164	12.780	8.716
22	0.874	4.775	12.008	13.054	12.610	8.852	0.874	4.775	12.008	13.054	12.610	8.852
24	0.928	4.915	12.041	12.928	12.424	8.978	0.928	4.915	12.041	12.928	12.424	8.978
26	0.980	5.048	12.059	12.787	12.224	9.093	0.980	5.048	12.059	12.787	12.224	9.093
28	1.031	5.175	12.063	12.630	12.008	9.196	1.031	5.175	12.063	12.630	12.008	9.196
30	1.081	5.296	12.052	12.457	11.778	9.289	1.081	5.296	12.052	12.457	11.778	9.289

Tablica 4.6. Vrijednosti  $z_\theta$  za prednji polusferni dio i stražnji torusni dio u y-z ravnini

#### 4.3.4 Određivanje unutarnjeg tlaka

Klasifikacijsko društvo [BV/IGC Code Ch. 4 Sec. 4.3.2] propisuje veličinu unutarnjeg tlaka tekućine kao:

$$P_{gd} = \frac{a_{\beta} \cdot z_{\beta} \cdot \rho}{1.02 \cdot 10^4} \text{ [bar]}.$$

Tako prethodno definirane točke na oplati spremnika dobivaju vlastite vrijednosti tlaka s obzirom na bezdimenzijsko ubrzanje  $a_{\beta}$  i veličinu  $z_{\beta}$ .

Maksimalni unutarnji tlak tekućine  $(P_{gd})_{\max}$  zajedno sa projektним tlakom para  $P_0$  stvara projektни unutarnji tlak  $P_{eq}$ .

$$P_{eq} = P_0 + (P_{gd})_{\max} \text{ [bar]}$$

gdje je:

$P_0$  - projektни tlak para određen po IMO i USCG pravilima

$$(P_0)_{\text{IMO}} = 5.3 \text{ [bar]}$$

$$(P_0)_{\text{USCG}} = 3.6 \text{ [bar]}$$

U slijedećim tablicama prikazane su vrijednosti tlaka  $P_{gd}$  kao i ukupnog projektноg tlaka  $P_{eq}$  po IMO i USCG pravilima.

$\beta$ [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
0	0.0286	0.3574	1.3189	1.6477	1.6763	0.2191	0.4705	0.5423	1.1340	1.2058	1.4573	1.4791	0.8382	0.8382
1	0.0754	0.4048	1.3608	1.6854	1.7127	0.2731	0.5231	0.5945	1.1828	1.2542	1.5042	1.5259	0.8836	0.8383
2	0.1204	0.4466	1.3866	1.7033	1.7290	0.3228	0.5687	0.6389	1.2173	1.2875	1.5333	1.5546	0.9180	0.8291
3	0.1621	0.4818	1.3961	1.7019	1.7259	0.3670	0.6061	0.6744	1.2370	1.3053	1.5445	1.5652	0.9411	0.8112
4	0.1995	0.5095	1.3898	1.6819	1.7039	0.4043	0.6346	0.7003	1.2420	1.3077	1.5379	1.5579	0.9524	0.7855
5	0.2318	0.5297	1.3694	1.6459	1.6659	0.4345	0.6541	0.7169	1.2336	1.2963	1.5159	1.5350	0.9528	0.7536
6	0.2586	0.5423	1.3362	1.5956	1.6136	0.4572	0.6648	0.7241	1.2127	1.2720	1.4796	1.4976	0.9429	0.7167
7	0.2798	0.5480	1.2932	1.5348	1.5508	0.4727	0.6676	0.7233	1.1818	1.2375	1.4324	1.4493	0.9247	0.6766
8	0.2955	0.5472	1.2416	1.4650	1.4791	0.4813	0.6630	0.7148	1.1422	1.1940	1.3757	1.3914	0.8988	0.6342
9	0.3061	0.5411	1.1846	1.3899	1.4022	0.4841	0.6524	0.7004	1.0964	1.1445	1.3128	1.3274	0.8674	0.5910
10	0.3120	0.5300	1.1228	1.3104	1.3210	0.4812	0.6362	0.6805	1.0453	1.0896	1.2447	1.2581	0.8311	0.5476
12	0.3118	0.4968	0.9930	1.1474	1.1550	0.4622	0.5920	0.6291	0.9344	0.9715	1.1012	1.1125	0.7496	0.4637
14	0.2983	0.4524	0.8600	0.9847	0.9900	0.4293	0.5359	0.5663	0.8171	0.8476	0.9542	0.9634	0.6608	0.3853
16	0.2737	0.3992	0.7262	0.8244	0.8278	0.3849	0.4704	0.4948	0.6961	0.7205	0.8060	0.8134	0.5669	0.3127
18	0.2364	0.3338	0.5840	0.6577	0.6597	0.3262	0.3916	0.4103	0.5642	0.5829	0.6484	0.6541	0.4625	0.2421
19	0.2062	0.2871	0.4934	0.5537	0.5550	0.2822	0.3362	0.3516	0.4786	0.4940	0.5479	0.5526	0.3934	0.2008
20	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
22	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
24	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
26	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
28	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
30	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
$(P_{gd})_{max}$ [bar]	0.3120	0.5480	1.3961	1.7033	1.7290	0.4841	0.6676	0.7241	1.2420	1.3077	1.5445	1.5652	0.9528	0.8383
$(P_{eq})_{IMO}$ [bar]	5.6120	5.8480	6.6961	7.0033	7.0290	5.7841	5.9676	6.0241	6.5420	6.6077	6.8445	6.8652	6.2528	6.1383
$(P_{eq})_{USCG}$ [bar]	3.9120	4.1480	4.9961	5.3033	5.3290	4.0841	4.2676	4.3241	4.8420	4.9077	5.1445	5.1652	4.5528	4.4383



$\theta$ [°]	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
0	0.8382	0.8382	0.8382	0.8382	0.8382	0.8382	1.6763	1.6763	1.6763	1.6763	1.6763	1.6763	1.6763
1	0.8430	0.8494	0.8559	0.8623	0.8687	0.8751	1.7085	1.7021	1.6957	1.6893	1.6828	1.6764	1.6717
2	0.8383	0.8510	0.8636	0.8762	0.8888	0.9015	1.7208	1.7082	1.6956	1.6830	1.6704	1.6577	1.6485
3	0.8247	0.8432	0.8616	0.8800	0.8984	0.9169	1.7139	1.6955	1.6771	1.6587	1.6402	1.6218	1.6083
4	0.8029	0.8266	0.8502	0.8739	0.8976	0.9213	1.6886	1.6649	1.6413	1.6176	1.5939	1.5702	1.5528
5	0.7744	0.8027	0.8309	0.8592	0.8874	0.9157	1.6477	1.6194	1.5912	1.5629	1.5346	1.5064	1.4856
6	0.7403	0.7724	0.8045	0.8366	0.8687	0.9008	1.5929	1.5608	1.5287	1.4966	1.4645	1.4324	1.4088
7	0.7025	0.7376	0.7728	0.8080	0.8432	0.8784	1.5280	1.4928	1.4576	1.4225	1.3873	1.3521	1.3262
8	0.6617	0.6993	0.7368	0.7743	0.8119	0.8494	1.4548	1.4173	1.3797	1.3422	1.3047	1.2671	1.2395
9	0.6198	0.6590	0.6982	0.7374	0.7766	0.8158	1.3768	1.3376	1.2984	1.2592	1.2200	1.1808	1.1520
10	0.5772	0.6174	0.6576	0.6978	0.7380	0.7782	1.2950	1.2548	1.2146	1.1744	1.1342	1.0940	1.0645
12	0.4935	0.5340	0.5746	0.6151	0.6557	0.6963	1.1288	1.0883	1.0477	1.0071	0.9666	0.9260	0.8962
14	0.4140	0.4531	0.4921	0.5312	0.5703	0.6094	0.9647	0.9256	0.8865	0.8474	0.8084	0.7693	0.7406
16	0.3392	0.3752	0.4113	0.4474	0.4834	0.5195	0.8045	0.7685	0.7324	0.6963	0.6603	0.6242	0.5977
18	0.2651	0.2963	0.3276	0.3589	0.3901	0.4214	0.6395	0.6082	0.5770	0.5457	0.5144	0.4832	0.4602
19	0.2209	0.2482	0.2755	0.3029	0.3302	0.3575	0.5374	0.5101	0.4827	0.4554	0.4281	0.4008	0.3807
20	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
22	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
24	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
26	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
28	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
30	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
$(P_{gd})_{\max}$ [bar]	0.8430	0.8510	0.8636	0.8800	0.8984	0.9213	1.7208	1.7082	1.6957	1.6893	1.6828	1.6764	1.6763
$(P_{eq})_{\text{IMO}}$ [bar]	6.1430	6.1510	6.1636	6.1800	6.1984	6.2213	7.0208	7.0082	6.9957	6.9893	6.9828	6.9764	6.9763
$(P_{eq})_{\text{USCG}}$ [bar]	4.4430	4.4510	4.4636	4.4800	4.4984	4.5213	5.3208	5.3082	5.2957	5.2893	5.2828	5.2764	5.2763

Tablica 4.7. Unutarnji tlakovi prednjeg dijela u x-z ravnini

$\theta$ [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
0	0.0286	0.3574	1.3189	1.6477	1.6763	0.1461	0.4272	0.5423	1.1340	1.2491	1.5302	1.5549	0.8382	0.8382
1	0.0743	0.4013	1.3573	1.6843	1.7127	0.1949	0.4744	0.5889	1.1772	1.2917	1.5712	1.5957	0.8793	0.8743
2	0.1182	0.4396	1.3796	1.7011	1.7290	0.2405	0.5154	0.6279	1.2063	1.3189	1.5937	1.6178	0.9096	0.8999
3	0.1589	0.4716	1.3860	1.6987	1.7259	0.2816	0.5489	0.6584	1.2211	1.3306	1.5979	1.6213	0.9288	0.9147
4	0.1954	0.4964	1.3767	1.6778	1.7039	0.3170	0.5744	0.6798	1.2215	1.3269	1.5842	1.6068	0.9366	0.9184
5	0.2269	0.5141	1.3538	1.6410	1.6659	0.3463	0.5918	0.6924	1.2091	1.3096	1.5551	1.5767	0.9339	0.9123
6	0.2530	0.5245	1.3185	1.5900	1.6136	0.3691	0.6012	0.6963	1.1849	1.2799	1.5121	1.5324	0.9215	0.8969
7	0.2737	0.5285	1.2738	1.5286	1.5508	0.3857	0.6035	0.6928	1.1514	1.2406	1.4585	1.4776	0.9012	0.8742
8	0.2889	0.5265	1.2209	1.4584	1.4791	0.3961	0.5992	0.6823	1.1097	1.1928	1.3959	1.4137	0.8737	0.8449
9	0.2993	0.5194	1.1629	1.3830	1.4022	0.4013	0.5894	0.6665	1.0625	1.1395	1.3277	1.3442	0.8412	0.8111
10	0.3050	0.5078	1.1006	1.3034	1.3210	0.4013	0.5747	0.6457	1.0105	1.0815	1.2549	1.2700	0.8042	0.7734
12	0.3047	0.4744	0.9706	1.1403	1.1550	0.3894	0.5345	0.5939	0.8993	0.9587	1.1038	1.1165	0.7225	0.6914
14	0.2915	0.4309	0.8385	0.9779	0.9900	0.3645	0.4837	0.5325	0.7833	0.8321	0.9513	0.9617	0.6347	0.6047
16	0.2675	0.3793	0.7063	0.8181	0.8278	0.3289	0.4245	0.4636	0.6648	0.7040	0.7996	0.8080	0.5428	0.5151
18	0.2309	0.3165	0.5667	0.6523	0.6597	0.2801	0.3532	0.3832	0.5372	0.5671	0.6403	0.6467	0.4416	0.4176
19	0.2014	0.2720	0.4783	0.5489	0.5550	0.2429	0.3032	0.3279	0.4549	0.4796	0.5399	0.5452	0.3752	0.3542
20	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
22	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
24	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
26	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
28	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
30	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
$(P_{gd})_{\max}$ [bar]	0.3050	0.5285	1.3860	1.7011	1.7290	0.4013	0.6035	0.6963	1.2215	1.3306	1.5979	1.6213	0.9366	0.9184
$(P_{eq})_{\text{IMO}}$ [bar]	5.6050	5.8285	6.6860	7.0011	7.0290	5.7013	5.9035	5.9963	6.5215	6.6306	6.8979	6.9213	6.2366	6.2184
$(P_{eq})_{\text{USCG}}$ [bar]	3.9050	4.1285	4.9860	5.3011	5.3290	4.0013	4.2035	4.2963	4.8215	4.9306	5.1979	5.2213	4.5366	4.5184

$\theta$ [°]	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
0	0.8382	0.8382	0.8382	0.8382	0.8382	0.8382	1.6763	1.6763	1.6763	1.6763	1.6763	1.6763	1.6763
1	0.8696	0.8632	0.8568	0.8504	0.8440	0.8375	1.6709	1.6774	1.6838	1.6902	1.6966	1.7030	1.7077
2	0.8907	0.8780	0.8654	0.8528	0.8402	0.8275	1.6469	1.6596	1.6722	1.6848	1.6974	1.7101	1.7193
3	0.9011	0.8827	0.8643	0.8458	0.8274	0.8090	1.6060	1.6245	1.6429	1.6613	1.6798	1.6982	1.7117
4	0.9010	0.8773	0.8537	0.8300	0.8063	0.7827	1.5500	1.5737	1.5973	1.6210	1.6447	1.6684	1.6858
5	0.8915	0.8633	0.8350	0.8068	0.7785	0.7503	1.4822	1.5105	1.5387	1.5670	1.5953	1.6235	1.6443
6	0.8733	0.8412	0.8091	0.7770	0.7450	0.7129	1.4050	1.4371	1.4692	1.5012	1.5333	1.5654	1.5890
7	0.8483	0.8131	0.7779	0.7428	0.7076	0.6724	1.3220	1.3572	1.3924	1.4276	1.4628	1.4979	1.5238
8	0.8173	0.7798	0.7423	0.7047	0.6672	0.6296	1.2350	1.2726	1.3101	1.3476	1.3852	1.4227	1.4503
9	0.7823	0.7431	0.7039	0.6647	0.6255	0.5863	1.1473	1.1865	1.2257	1.2649	1.3041	1.3433	1.3721
10	0.7438	0.7036	0.6634	0.6232	0.5830	0.5428	1.0596	1.0998	1.1401	1.1803	1.2205	1.2607	1.2902
12	0.6616	0.6210	0.5805	0.5399	0.4993	0.4588	0.8913	0.9319	0.9725	1.0130	1.0536	1.0941	1.1239
14	0.5760	0.5369	0.4978	0.4587	0.4197	0.3806	0.7359	0.7750	0.8140	0.8531	0.8922	0.9313	0.9600
16	0.4886	0.4526	0.4165	0.3805	0.3444	0.3084	0.5934	0.6294	0.6655	0.7016	0.7376	0.7737	0.8002
18	0.3947	0.3634	0.3321	0.3009	0.2696	0.2383	0.4564	0.4877	0.5190	0.5502	0.5815	0.6128	0.6357
19	0.3342	0.3068	0.2795	0.2522	0.2249	0.1975	0.3774	0.4047	0.4320	0.4594	0.4867	0.5140	0.5341
20	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
22	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
24	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
26	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
28	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
30	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
$(P_{gd})_{\max}$ [bar]	0.9011	0.8827	0.8654	0.8528	0.8440	0.8382	1.6763	1.6774	1.6838	1.6902	1.6974	1.7101	1.7193
$(P_{eq})_{IMO}$ [bar]	6.2011	6.1827	6.1654	6.1528	6.1440	6.1382	6.9763	6.9774	6.9838	6.9902	6.9974	7.0101	7.0193
$(P_{eq})_{USCG}$ [bar]	4.5011	4.4827	4.4654	4.4528	4.4440	4.4382	5.2763	5.2774	5.2838	5.2902	5.2974	5.3101	5.3193

Tablica 4.8. Unutarnji tlakovi stražnjeg dijela u x-z ravnini

$\theta$ [°]	prednji polusferni dio						stražnji torusni dio					
	1	2	3	4	5	13	1	2	3	4	5	13
0	0.0286	0.3574	1.3189	1.6477	1.6763	0.8382	0.0286	0.3574	1.3189	1.6477	1.6763	0.8382
1	0.0323	0.3688	1.3287	1.6488	1.6736	0.8514	0.0323	0.3688	1.3287	1.6488	1.6736	0.8514
2	0.0360	0.3799	1.3375	1.6488	1.6697	0.8640	0.0360	0.3799	1.3375	1.6488	1.6697	0.8640
3	0.0396	0.3905	1.3449	1.6469	1.6640	0.8756	0.0396	0.3905	1.3449	1.6469	1.6640	0.8756
4	0.0432	0.4006	1.3508	1.6433	1.6566	0.8862	0.0432	0.4006	1.3508	1.6433	1.6566	0.8862
5	0.0467	0.4103	1.3552	1.6380	1.6474	0.8958	0.0467	0.4103	1.3552	1.6380	1.6474	0.8958
6	0.0501	0.4194	1.3581	1.6309	1.6366	0.9043	0.0501	0.4194	1.3581	1.6309	1.6366	0.9043
7	0.0535	0.4279	1.3595	1.6222	1.6241	0.9117	0.0535	0.4279	1.3595	1.6222	1.6241	0.9117
8	0.0567	0.4359	1.3594	1.6118	1.6099	0.9181	0.0567	0.4359	1.3594	1.6118	1.6099	0.9181
9	0.0598	0.4433	1.3578	1.5998	1.5942	0.9234	0.0598	0.4433	1.3578	1.5998	1.5942	0.9234
10	0.0634	0.4537	1.3654	1.5987	1.5895	0.9349	0.0634	0.4537	1.3654	1.5987	1.5895	0.9349
12	0.0692	0.4663	1.3569	1.5691	1.5528	0.9414	0.0692	0.4663	1.3569	1.5691	1.5528	0.9414
14	0.0745	0.4763	1.3427	1.5335	1.5105	0.9435	0.0745	0.4763	1.3427	1.5335	1.5105	0.9435
16	0.0792	0.4838	1.3229	1.4924	1.4630	0.9413	0.0792	0.4838	1.3229	1.4924	1.4630	0.9413
18	0.0834	0.4886	1.2979	1.4463	1.4110	0.9347	0.0834	0.4886	1.2979	1.4463	1.4110	0.9347
20	0.0869	0.4909	1.2680	1.3956	1.3549	0.9240	0.0869	0.4909	1.2680	1.3956	1.3549	0.9240
22	0.0898	0.4905	1.2334	1.3409	1.2953	0.9093	0.0898	0.4905	1.2334	1.3409	1.2953	0.9093
24	0.0920	0.4876	1.1947	1.2827	1.2327	0.8908	0.0920	0.4876	1.1947	1.2827	1.2327	0.8908
26	0.0936	0.4822	1.1520	1.2215	1.1677	0.8686	0.0936	0.4822	1.1520	1.2215	1.1677	0.8686
28	0.0945	0.4744	1.1058	1.1578	1.1008	0.8430	0.0945	0.4744	1.1058	1.1578	1.1008	0.8430
30	0.0947	0.4643	1.0565	1.0920	1.0325	0.8143	0.0947	0.4643	1.0565	1.0920	1.0325	0.8143
$(P_{gd})_{\max}$ [bar]	0.0947	0.4909	1.3654	1.6488	1.6763	0.9435	0.0947	0.4909	1.3654	1.6488	1.6763	0.9435
$(P_{eq})_{\text{IMO}}$ [bar]	5.3947	5.7909	6.6654	6.9488	6.9763	6.2435	5.3947	5.7909	6.6654	6.9488	6.9763	6.2435
$(P_{eq})_{\text{USCG}}$ [bar]	3.6947	4.0909	4.9654	5.2488	5.2763	4.5435	3.6947	4.0909	4.9654	5.2488	5.2763	4.5435

Tablica 4.9. Unutarnji tlakovi za prednji polusferni dio i stražnji torusni dio u y-z ravnini

#### 4.4 Proračun debljina stijenki spremnika

BV Pt C Ch 1 Sec 3

Ukupni unutarnji tlak  $P_{eq}$  u određenoj točki na konturi spremnika relevantan je za određeno područje stijenke, odnosno, debljinu stijenke iznad promatrane točke. Proračun debljine izvršen je po pravilima Bureau Veritas-a za vrijednosti tlakova određenih u skladu BV-a i USCG-a.

Krajnja vrijednost debljine stijenke odabrana je kao veća od vrijednosti dobivenih po tim pravilima.

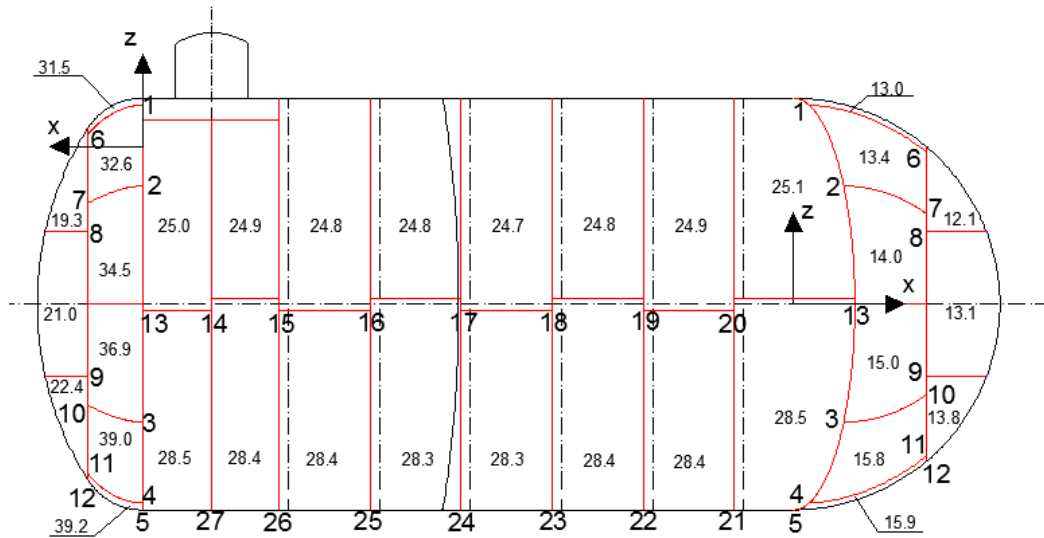
Spremnik se izvodi iz različitih oblika ljuska pa tako za svaki segment slijedi debljina stijenke u [mm] po pravilima BV-a:

torisferična ljuska	-	$t = \frac{P_{eq} \cdot D \cdot C}{2 \cdot K \cdot e}$
sferična ljuska	-	$t = \frac{P_{eq} \cdot D}{(4 \cdot K - p) \cdot e}$
cilindrična ljuska	-	$t = \frac{P_{eq} \cdot D}{(2 \cdot K - p) \cdot e}$

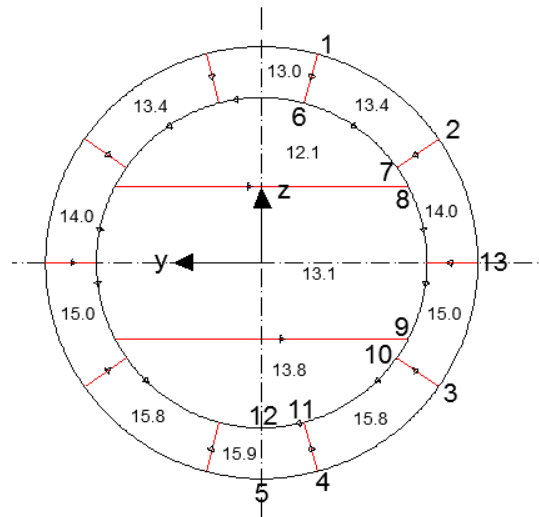
gdje su:

- $P_{eq}$  - projektni unutarnji tlak određen po IMO i USCG pravilima u [MPa]
- $D$  - promjer ljuske u [mm]
- $C$  - faktor oblika, BV Pt C Ch 1 Sec 3 2.5.3  
funkcija  $H/D$  i  $t/D$ , gdje je  $H$  dubina vršnog segmenta spremnika;  
iteracijom dobivena vrijednost za stražnji torisferni kraj  $C = 1.38$  odnosno za prednji polusferni dio  $C = 0.56$
- $K$  - dopušteno naprezanje  
 $K_{IMO} = 170$  [N/mm<sup>2</sup>]  
 $K_{USCG} = 127.5$  [N/mm<sup>2</sup>]
- $e$  - učinkovitost spoja ljusaka, BV Pt C Ch 1 Sec 3 2.4.2 Table 10  
 $e = 1$

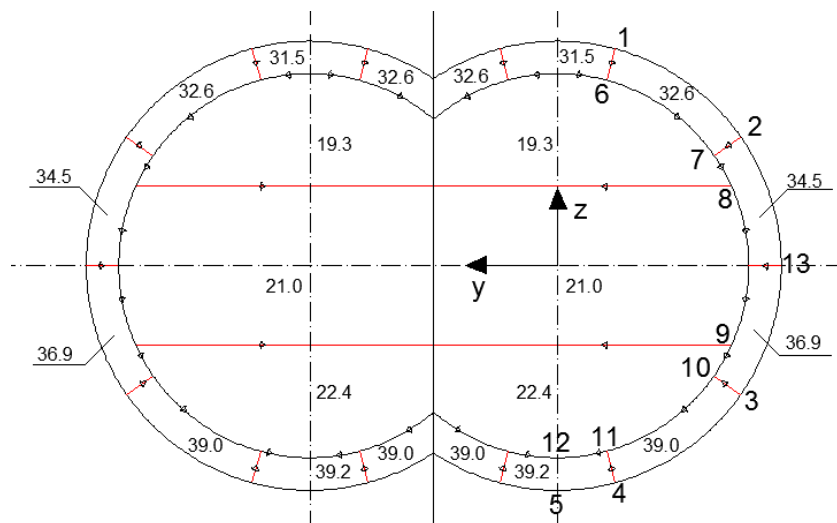
Stražnji dio spremnika izveden je iz sfernog kraja na koji se nadovezuje torusni segment; slijedi cilindrični segment i na kraju prednji polusferni dio izveden iz torusnog i sfernog segmenta. Vrijednosti debljine stijenke spremnika prikazane su na slijedećim slikama.



Slika 4.8. Debljine stijenke spremnika (x-z ravnina)



Slika 4.9. Debljine stijenke prednjeg polusfernog segmenta (y-z ravnina)



Slika 4.10. Debljine stijenke stražnjeg torusnog segmenta (y-z ravnina)

## 5 Dimenzioniranje uzdužne pregrade

### 5.1 Dopuštena naprezanja stijenke i ukrepa

Materijal stijenke uzdužne pregrade jednak je materijalu stijenke opločenja spremnika. To je ugljik-manganov čelik slijedećih karakteristika:

$$R_e = 345 \quad - \quad \text{minimalna granica razvlačenja u [N/mm}^2\text{]}$$

$$R_m = 510 \quad - \quad \text{minimalna vlačna čvrstoća u [N/mm}^2\text{]}$$

Prema klasifikacijskom društvu (BV/IGC, Ch. 4, Sec. 4.5.1.4), dopušteno membransko naprezanje za ljuske jednako je manjoj od slijedećih vrijednosti:

$$\sigma_m = \frac{510}{3} = 170 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$\sigma_m = \frac{345}{2} = 172.5 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

odnosno,

$$\sigma_m = 170 \text{ [N/mm}^2\text{]}.$$

Za ukrepe, dopušteno membransko naprezanje jednako je manjoj od slijedećih vrijednosti:

$$\sigma_L = 1.5 \frac{510}{3} = 255 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$\sigma_L = 1.5 \frac{345}{2} = 258.75 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

odnosno,

$$\sigma_L = 255 \text{ [N/mm}^2\text{]}.$$

Ukoliko membransko naprezanje dosegne granični iznos, za dopušteno savojno naprezanje u vertikalnom smjeru ostaje:

$$\sigma_b = 255 - 170 = 85 \text{ [N/mm}^2\text{]},$$

odnosno u uzdužnom smjeru:

$$\sigma_b = 255 - 85 = 170 \text{ [N/mm}^2\text{]}.$$

### 5.2 Proračun debljine stijenke uzdužne pregrade

Uzdužna pregrada dvodijelnih spremnika postavlja se u spoju ljusaka spremnika. Na taj način stijenka pregrade preuzima membranske sile ljusaka. Iz toga proizlazi da je debljina stijenke uzdužne pregrade funkcija debljine opločenja cilindra, odnosno:

$$t_b = \frac{2t_c e}{R} \text{ [mm]}$$

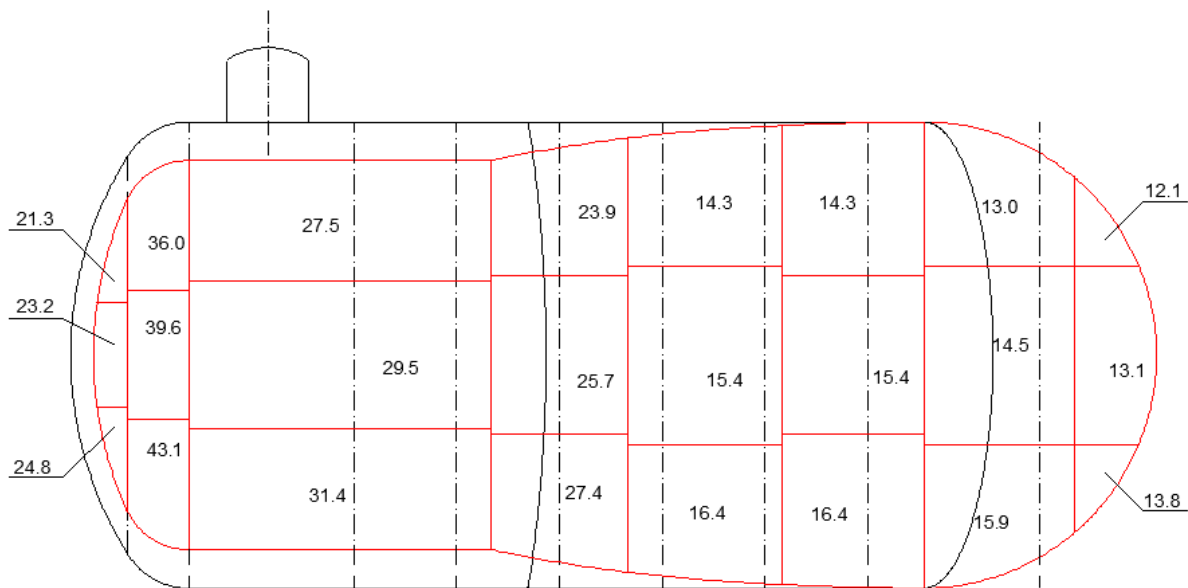
gdje su:

- $t_b$  - debljina stijenke uzdužne pregrade u [mm]  
 $t_c$  - debljina oplata cilindra u [mm]  
 $R$  - promjer cilindra u [mm]

Pregrada se izvodi iz tri voja. Debljina gornjeg i donjeg voja računa se prema gore navedenom izrazu dok je debljina srednjeg voja njihova prosječna vrijednost.

Gornji i donji vojevi prednjeg polusfernog završetka jednaki su debljini gornjeg odnosno donjeg voja sferne ljuske spremnika. Debljina srednjeg voja također je njihova srednja vrijednost.

Debljine stijenke uzdužne pregrade slijede iz slike Slika 5.1.



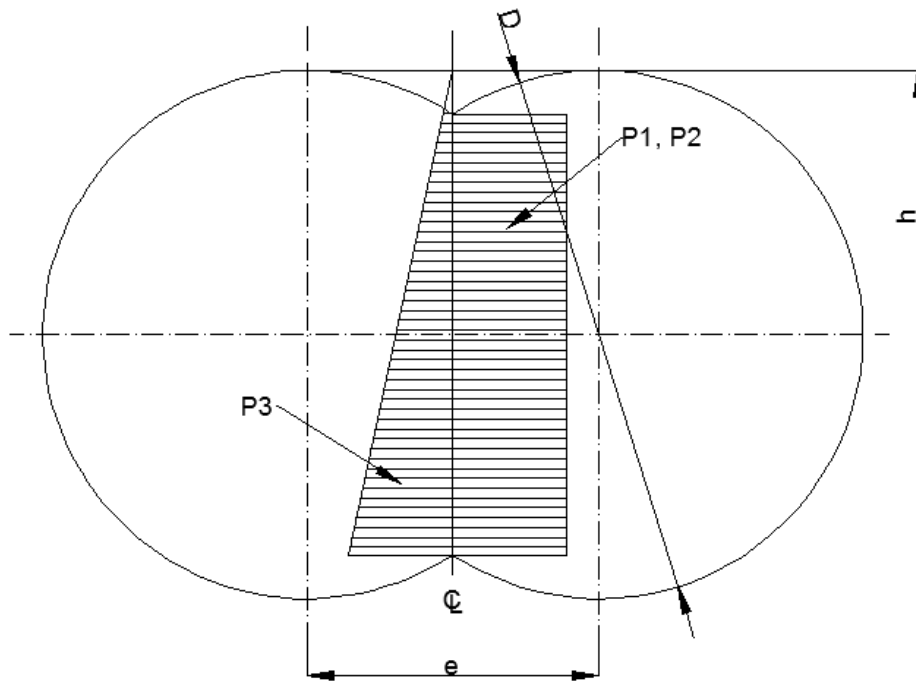
Slika 5.1. Debljine stijenke uzdužne pregrade

### 5.3 Projektni tlak

Uzdužna pregrada, osim što preuzima membranske sile stijenke spremnika, suprotstavlja se i djelovanju tlaka tekućine. Za projektiranje dimenzija ukrepa pregrade koristiti će se tlakovi koji nastaju u najgorim slučajevima krcanja. To su:

1. dinamički tlak na vrhu uzdužne pregrade u slučaju punog spremnika,  $p_1$
2. razlika statičkog i dinamičkog tlaka uzrokovana nagibanjem broda, u slučaju kada je spremnik djelomično napunjen (ali jednako u oba odjeljka),  $p_2$
3. hidrostatski tlak s jedne strane (pun odjeljak) u slučaju ne funkcioniranja jedne od teretnih pumpi,  $p_3$





Slika 5.2. Projektna opterećenja uzdužne pregrade

Tlakovi  $p_1$  i  $p_2$  predstavljaju dinamičko opterećenje uzdužne pregrade koje se računa prema slijedećem izrazu:

$$p_{1,2} = \frac{\Delta_{z\beta} \cdot a_{\beta} \cdot \rho}{1.02 \cdot 10^{-4}}$$

gdje su:

$$\Delta_{z\beta} \quad - \quad \Delta_{z\beta} = e \cdot \sin\beta + 0.03 \cdot D \quad [\text{m}]$$

$$\beta \quad - \quad \beta = \arctan a_y$$

$$a_{\beta} \quad - \quad a_{\beta} = (1 + a_y^2)^{0.5}$$

$a_y$  - poprečna komponenta ubrzanja

$$a_y = 0.7525 \quad (\text{za } p_1)$$

$$a_y = 0.6552 \quad (\text{za } p_2)$$

$\rho$  - gustoća tereta

$$\rho = 690 \quad [\text{kg/m}^3]$$

$D, e$  - promjer i ekscentricitet spremnika

$$D = 13.6 \quad [\text{m}]$$

$$e = 7.5144 \quad [\text{m}]$$

pa slijedi:

$$p_1 = \frac{\Delta_{z\beta} \cdot a_\beta \cdot \rho}{1.02 \cdot 10^{-4}} = \frac{4.926 \cdot 1.251 \cdot 690}{1.02 \cdot 10^{-4}} = 0.586 \text{ [bar]}$$

odnosno

$$p_2 = \frac{\Delta_{z\beta} \cdot a_\beta \cdot \rho}{1.02 \cdot 10^{-4}} = \frac{4.526 \cdot 1.195 \cdot 690}{1.02 \cdot 10^{-4}} = 0.514 \text{ [bar]}$$

Tlak  $p_3$  odnosi se na jednostrano napunjen spremnik. Opterećenje se računa kao linearno opterećenje (hidrostatski tlak) koje se povećava od vrha pregrade do njezina dna. Za proračun se uzima prosječna vrijednost tlaka po ukupnoj visini spremnika.

Hidrostatski tlak na dnu pregrade na položaju vakuumskih prstena VR1, VR2 i VR3:

$$p_3 = \rho \cdot g \cdot h \text{ [bar]}$$

$$\rho = 690 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$h = 6.8 + 5.668 = 12.468 \text{ [m]}$$

$$p_3 = 690 \cdot 10^{-5} \cdot 9.80665 \cdot 12.468 = 0.84365 \text{ [bar]}.$$

Hidrostatski tlak na polovini visine pregrade (prosječni):

$$p_3 = \frac{6.8}{12.468} \cdot 0.84365 = 0.46012 \text{ [bar]},$$

odnosno:

$$p_3 = 690 \cdot 10^{-5} \cdot 9.80665 \cdot 6.8 = 46.012 \text{ [N/mm}^2\text{]}.$$

Tlak  $p_3$  za vakuumske prstenove VR4 i VR5:

$$p_3 = 690 \cdot 10^{-5} \cdot 9.80665 \cdot 13.6 = 0.92025 \text{ [bar]}$$

$$p_3 = \frac{6.8}{13.6} \cdot 0.92025 = 0.46012 \text{ [bar]}.$$

Vrijednosti pojedinih tlakova prikazani su u donjoj tablici. Hidrostatski tlak dan je na pola visine pregrade. Kao projektni tlak za dimenzioniranje ukrepljenja pregrade uzimat će se najveći tlak, tablica Tablica 5.1., odnosno  $p = 58.634 \text{ [N/mm}^2\text{]}$ .

Registar propisuje zabranu punjenja samo jednog spremnika a dopuštena visinska razlika između slobodnih površina u dva odjeljka je 2 [m].

Tlakovi uzdužne pregrade [N/mm <sup>2</sup> ]	
$p_1$ – dinamički, pun spremnik	58.634
$p_2$ – dinamički, djelomično ispunjen spremnik	51.459
$p_3$ – hidrostatski tlak s jedne strane na pola visine spremnika	46.012

Tablica 5.1. Tlakovi uzdužne pregrade

## 5.4 Nosači

### 5.4.1 Nosači vakuumskih prstenova

Uzdužna pregrada primarno je ukrepljena vertikalnim okvirnim nosačima pet vakuumskih prstenova (VR1, VR2, VR3, VR4, VR5) i dva nosiva prstena (SR1, SR2). Potrebno je izvršiti i sekundarno ukrepljenje uzdužnim ukrepama jer je visina pregrade ( $H = 11.336$  [m]) manja od poduprtog raspona nosivih prstena. Potrebni razmak između nosača,  $a$ , određen je tako da su dimenzije nosivih prstena prihvatljive, a segmenti cilindrične ljuske i vakuumski prsteni stabilni.

Nosači se postavljaju sa obje strane pregrade kako bi se izbjegla dodatna naprezanja u oplati pregrade uslijed savijanja nosača. Pretpostavlja se linearna distribucija opterećenja nosača:

$$q = p \cdot a$$

Za slučaj slobodno oslonjenih krajeva maksimalni moment savijanja na sredini raspona nosača iznosi:

$$M_0 = \frac{q \cdot H^2}{8} = \frac{p \cdot a \cdot H^2}{8} \quad [\text{kNm}]$$

a biti će dodatno umanjen uslijed utjecaja vakuumskih prstenova. Analizom konačnih elementa na teretnim spremnicima sličnog poprečnog presjeka utvrđen je koeficijent utjecaja momenta u spoju uzdužne pregrade i cilindra spremnika (Y-spoj) koji iznosi  $C_b = 0.175$ . Tako se najveći moment u sredini raspona smanjuje na:

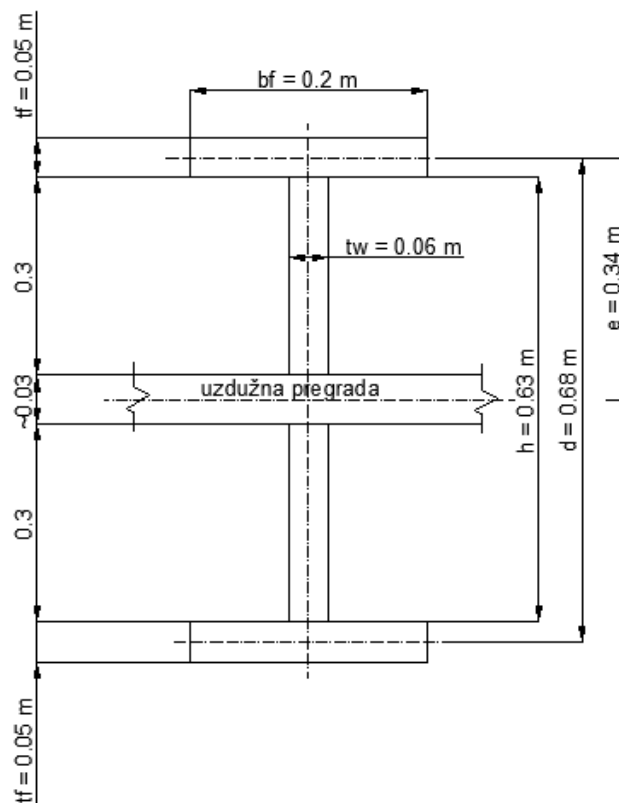
$$M_{\max} = (1 - C_b) \cdot M_0 \quad [\text{kNm}]$$

Moment savijanja vakuumskih prstenova u Y-spoju iznosi:

$$M_{VR} = \frac{1}{2} \cdot C_b \cdot M_0 \text{ [kNm]}$$

Poprečni presjeci vakuumskih prstenova prikazani su na slikama Slika 5.3, Slika 5.4. i Slika 5.5. i provjereni kako slijedi. Dopušteno naprezanje savijanja iznosi  $\sigma_L = 255 \text{ [N/mm}^2\text{]}$ .

Nosač vakuumskih prstena VR1, VR2 i VR3:



Slika 5.3. Nosač vakuumskih prstena VR1, VR2 i VR3

$$M_0 = \frac{p \cdot a \cdot H^2}{8} = \frac{58.635 \cdot 3 \cdot 11.336^2}{8} = 2826 \text{ [kNm]}$$

$$M_{\max} = (1 - C_b) \cdot M_0 = (1 - 0.175) \cdot 2826 = 2331 \text{ [kNm]}$$

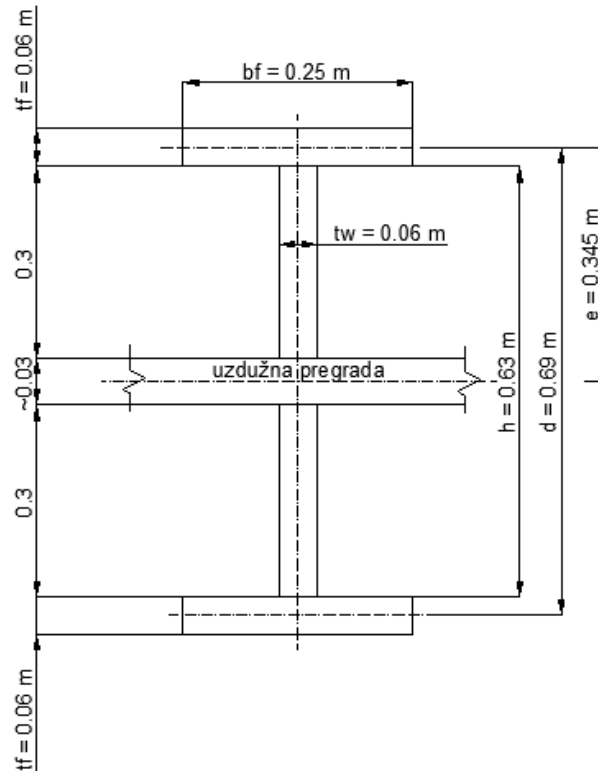
$$M_{VR} = \frac{1}{2} \cdot C_b \cdot M_0 = \frac{1}{2} \cdot 0.175 \cdot 2826 = 247 \text{ [kNm]}$$

$$I = \frac{t_w \cdot h^3}{12} + \frac{b_f \cdot t_f \cdot d^2}{2} = \frac{0.06 \cdot 0.63^2}{12} + \frac{0.2 \cdot 0.05 \cdot 0.68^2}{2} = 3.56 \cdot 10^{-3} \text{ [m}^4\text{]}$$

$$W = \frac{I}{e} = \frac{3.56 \cdot 10^{-3}}{0.34} = 10.48 \cdot 10^{-3} \text{ [m}^3\text{]}$$

$$\sigma = \frac{M_{max}}{W} = \frac{2331}{10.48 \cdot 10^{-3}} = 222 \text{ [N/mm}^2\text{]} < 255 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

Nosač vakuumskog prstena VR4:



Slika 5.4. Nosač vakuumskog prstena VR4

$$M_0 = \frac{p \cdot a \cdot H^2}{8} = \frac{58.635 \cdot 3 \cdot 13.6^2}{8} = 4067 \text{ [kNm]}$$

$$M_{max} = (1 - C_b) \cdot M_0 = (1 - 0.175) \cdot 4067 = 3355 \text{ [kNm]}$$

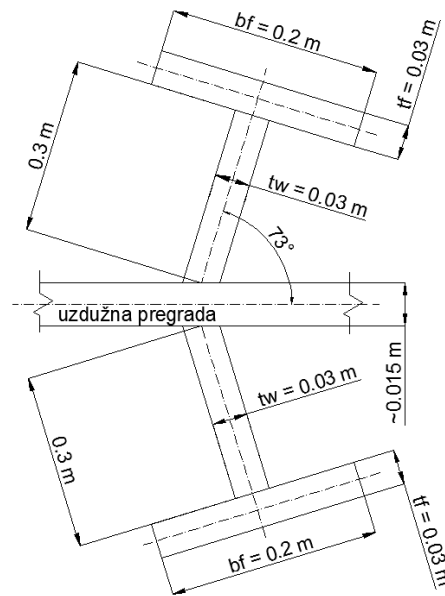
$$M_{VR} = \frac{1}{2} \cdot C_b \cdot M_0 = \frac{1}{2} \cdot 0.175 \cdot 4067 = 356 \text{ [kNm]}$$

$$I = \frac{t_w \cdot h^3}{12} + \frac{b_f \cdot t_f \cdot d^2}{2} = \frac{0.06 \cdot 0.63^2}{12} + \frac{0.25 \cdot 0.06 \cdot 0.69^2}{2} = 4.82 \cdot 10^{-3} \text{ [m}^4\text{]}$$

$$W = \frac{I}{e} = \frac{4.82 \cdot 10^{-3}}{0.345} = 13.97 \cdot 10^{-3} \text{ [m}^3\text{]}$$

$$\sigma = \frac{M_{max}}{W} = \frac{3355}{13.97 \cdot 10^{-3}} = 240 \text{ [N/mm}^2\text{]} < 255 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

Nosač vakuumskog prstena VR5:



Slika 5.5. Nosač vakuumskog prstena VR5

$$M_0 = \frac{p \cdot a \cdot H^2}{8} = \frac{58.635 \cdot 1.6395 \cdot 13.6^2}{8} = 2222 \text{ [kNm]}$$

$$M_{\max} = (1 - C_b) \cdot M_0 = (1 - 0.175) \cdot 2222 = 1834 \text{ [kNm]}$$

$$M_{VR} = \frac{1}{2} \cdot C_b \cdot M_0 = \frac{1}{2} \cdot 0.175 \cdot 2222 = 194 \text{ [kNm]}$$

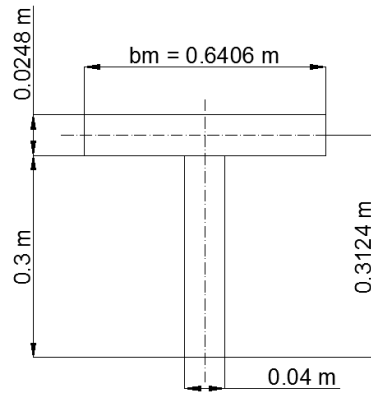
$$I = 3.64 \cdot 10^{-3} \text{ [m}^4\text{]}$$

$$W = \frac{I}{e} = 11.28 \cdot 10^{-3} \text{ [m}^3\text{]}$$

$$\sigma = \frac{M_{\max}}{W} = \frac{1834}{11.28 \cdot 10^{-3}} = 163 \text{ [N/mm}^2\text{]} < 255 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

#### 5.4.2 Naprezanja u vakuumskim prstenovima

Uslijed djelovanja tlaka na uzdužnu pregradu u vakuumskim prstenovima se javlja naprezanje. U dijelu luka spremnika vakuumski prstenovi zajedno sa sunosivom širinom oplata spremnika tvore T-profile. Provedena je provjera vrijednosti naprezanja.



Slika 5.6. Vakuumski prstenovi VR1, VR2, VR3

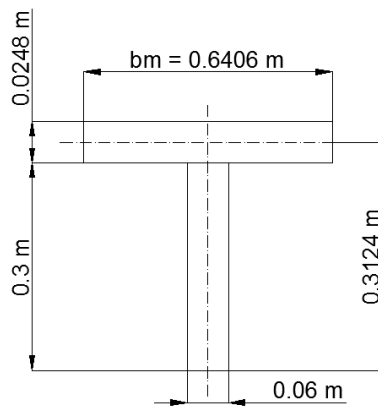
$$b_m = 2 \cdot 0.78 \cdot \sqrt{R \cdot t} = 1.56 \cdot \sqrt{6.8 \cdot 0.0248} = 0.6406 \text{ [m]}$$

$$A = 0.027887 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$I = 2.711 \cdot 10^{-4} \text{ [m}^4\text{]}$$

$$W = 1.12 \cdot 10^{-3} \text{ [m}^3\text{]}$$

$$\sigma = \frac{M_{VR}}{W} = \frac{247}{1.12 \cdot 10^{-3}} = 221 \text{ [N/mm}^2\text{]} < 255 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$



Slika 5.7. Vakuumski prsten VR4

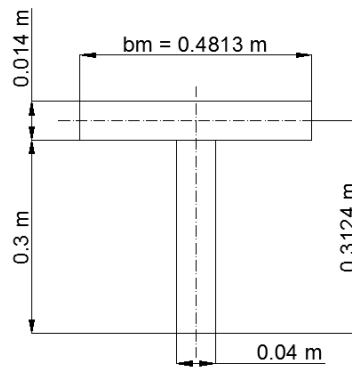
$$b_m = 2 \cdot 0.78 \cdot \sqrt{R \cdot t} = 1.56 \cdot \sqrt{6.8 \cdot 0.0248} = 0.6406 \text{ [m]}$$

$$A = 0.03389 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$I = 3.584 \cdot 10^{-4} \text{ [m}^4\text{]}$$

$$W = 1.58 \cdot 10^{-3} \text{ [m}^3\text{]}$$

$$\sigma = \frac{M_{VR}}{W} = \frac{356}{1.58 \cdot 10^{-3}} = 224 \text{ [N/mm}^2\text{]} < 255 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$



Slika 5.8. Vakuumski prsten VR5

$$b_m = 2 \cdot 0.78 \cdot \sqrt{R \cdot t} = 1.56 \cdot \sqrt{6.8 \cdot 0.014} = 0.4813 \text{ [m]}$$

$$A = 0.02394 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$I = 2.5 \cdot 10^{-4} \text{ [m}^4\text{]}$$

$$W = 1.08 \cdot 10^{-3} \text{ [m}^3\text{]}$$

$$\sigma = \frac{M_{VR}}{W} = \frac{194}{1.08 \cdot 10^{-3}} = 180 \text{ [N/mm}^2\text{]} < 255 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

## 5.5 Uzdužne ukrepe

Uzdužna pregrada sekundarno se ukrepljuje uzdužnjacima koji sudjeluju u prenošenju membranskih opterećenja oplata. Dopušteno aksijalno naprezanje po pravilima registra iznosi  $\sigma_m / 2 = 85 \text{ [N/mm}^2\text{]}$ .

Stoga za dopušteno naprezanje savijanja u uzdužnjacima ostaje  $\sigma_{ab} = 255 - 85 = 170 \text{ [N/mm}^2\text{]}$ .

Maksimalni moment savijanja javlja se u osloncima upetih krajeva uzdužnjaka i on iznosi:

$$M = \frac{p \cdot b \cdot a^2}{12}$$

gdje su:

$p$  - tlak

$$p = 58.63 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

$b$  - razmak uzdužnjaka

$a$  - duljina uzdužnjaka



U području između nosivog prstena SR1 i vakuumske prstena VR2 uzdužnjaci su izvedeni iz ravnih profila debljine 30 [mm] i visine  $h$ . Prosječna debljina gornjeg voja limova u tom dijelu uzdužne pregrade iznosi  $t_b = 25.7$  [mm] pa za sunosivu širinu proizlazi:

$$b_m = 40 \cdot t_b = 40 \cdot 0.0257 = 1.028 \text{ [m]}$$

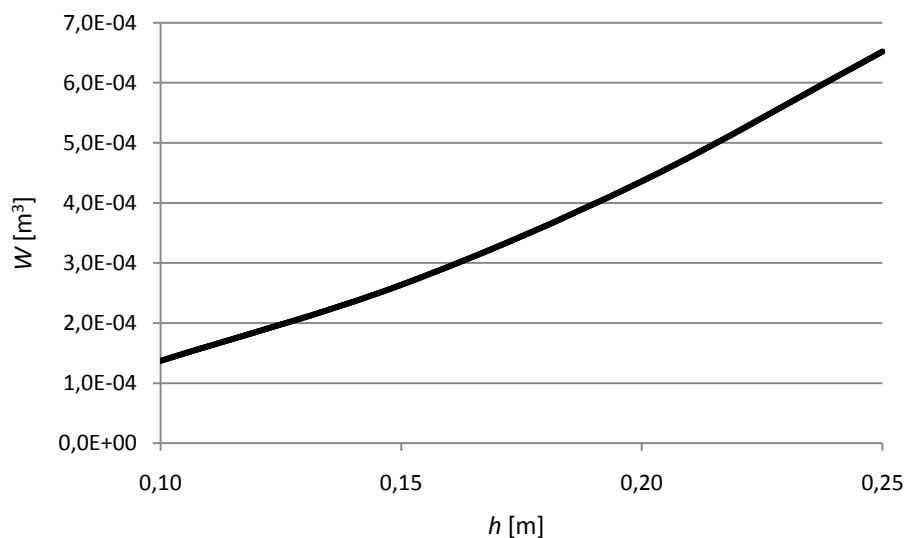
Tako uzdužnjaci sa sunosivom širinom tvore T-profil dimenzija  $h \times 30/1028 \times 25.7$ . Kako bi se odredila nepoznata visina  $h$ , izvodi se moment otpora  $W$  u funkciji visine  $h$ . Geometrijske karakteristike profila za četiri visine prikazani su u slijedećoj tablici.

$h$ [m]	$A$ [m <sup>2</sup> ]	$I$ [m <sup>4</sup> ]	$W$ [m <sup>3</sup> ]
0.10	0.0294196	$1.460 \cdot 10^{-5}$	$1.371 \cdot 10^{-4}$
0.15	0.0309196	$3.957 \cdot 10^{-5}$	$2.637 \cdot 10^{-4}$
0.20	0.0324196	$8.372 \cdot 10^{-5}$	$4.361 \cdot 10^{-4}$
0.25	0.0339196	$1.515 \cdot 10^{-4}$	$6.521 \cdot 10^{-4}$

**Tablica 5.2.** Geometrijske karakteristike uzdužnjaka sa visinom  $h = 30$  [mm]

Potrebna vrijednost momenta otpora za zadanu duljinu profila  $a$  proizlazi iz dopuštenog naprezanja:

$$W = \frac{M}{\sigma_{ab}}$$



**Dijagram 5.1.** Moment otpora T-profila

Kako je duljina uzdužnjaka u promatranom području  $a = 3$  [m] a razmak  $b = 1.13$  [m], proizlazi iz dijagrama Dijagram 5.1., za  $M = 49.82$  [kNm] i  $W = 2.93 \cdot 10^{-4}$  [m<sup>3</sup>], visina struka profila  $h = 0.160$  [m].

Između vakuumskog prstena VR2 i VR3 ( $a = 3$  [m],  $b = 1.13$  [m]) postavljeni su uzdužnjaci dimenzija  $hx30/956x23.9$ . Na isti način kao i u prethodnom području utvrđena je visina struka  $h = 0.164$  [m].

Između vakuumskog prstena VR3 i VR4 ( $a = 3$  [m],  $b = 0.71$  [m]) postavljeni su uzdužnjaci dimenzija  $hx30/572x14.3$ . Utvrđena je visina struka  $h = 0.134$  [m].

Između vakuumskog prstena VR4 i VR5 ( $a = 1.6395$  [m],  $b = 0.71$  [m]) postavljeni su uzdužnjaci dimenzija  $hx30/572x14.3$ . Utvrđena je visina struka  $h = 0.063$  [m].

Na krajnjem prednjem i stražnjem dijelu uzdužne pregrade povećava se duljine uzdužnjaka.

Za stražnji dio, do nosivog prstena SR1, razmak uzdužnjaka iznosi  $b = 0.945$  [m] a dimenzije T-profila su  $hx50/1132x28.3$ . Iz tablice Tablica 5.3. slijede visine struka uzdužnjaka s obzirom na njegovu duljinu  $a$ .

$a$ [m]	8.2605	7.554	7.4303	7.221	6.9209	6.5112
$M$ [kNm]	315	263	255	241	221	196
$W$ [m <sup>3</sup> ]	$1.853 \cdot 10^{-4}$	$1.550 \cdot 10^{-4}$	$1.499 \cdot 10^{-4}$	$1.416 \cdot 10^{-4}$	$1.301 \cdot 10^{-4}$	$1.151 \cdot 10^{-4}$
$h$ [m]	0.335	0.305	0.299	0.290	0.277	0.259

**Tablica 5.3.** Visine struka profila stražnjeg dijela spremnika

Od vakuumskog prstena VR5 pa do kraja pregrade uzdužnjaci su izvedeni u obliku profila dimenzija  $hx30/504x12.6$  sa promjenjivom duljinom i razmakom  $b = 0.62$  [m]. Visine struka tih uzdužnjaka slijede iz tablice Tablica 5.4.

$a$ [m]	6.800	6.772	6.686	6.5407	6.3316	
$M$ [kNm]	140.07	138.91	135.41	129.59	121.44	
$W$ [m <sup>3</sup> ]	$0.824 \cdot 10^{-4}$	$0.817 \cdot 10^{-4}$	$0.797 \cdot 10^{-4}$	$0.762 \cdot 10^{-4}$	$0.714 \cdot 10^{-4}$	
$h$ [m]	0.320	0.318	0.314	0.306	0.296	
$a$ [m]	6.0523	5.6922	5.2349	4.6517	3.8863	2.7928
$M$ [kNm]	110.96	98.15	83.01	65.55	45.75	23.63
$W$ [m <sup>3</sup> ]	$0.653 \cdot 10^{-4}$	$0.577 \cdot 10^{-4}$	$0.488 \cdot 10^{-4}$	$0.386 \cdot 10^{-4}$	$0.269 \cdot 10^{-4}$	$0.139 \cdot 10^{-4}$
$h$ [m]	0.282	0.264	0.241	0.212	0.174	0.122

Tablica 5.4. Visine struka profila prednjeg dijela spremnika

## 5.6 Čvrstoća oplata

Maksimalni moment savijanja oplata uzdužne pregrade između vakuumskih prstenova i uzdužnjaka javlja se u sredini dužeg ruba. Kako je omjer  $a/b$  relativno velik, slijedi za naprezanje:

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{\frac{p \cdot 1 \cdot b^2}{12}}{\frac{t^2}{6}} = \frac{p \cdot b^2}{2 \cdot t^2}$$

Najmanja debljina oplata pregrade iznosi  $t = 0.0121$  [m] u području prednjeg dijela. Za razmak uzdužnjaka u tom području  $b = 0.62$  [m] proizlazi:

$$\sigma = \frac{58.63 \cdot 0.62^2}{2 \cdot 0.0121^2} = 77 \text{ [N/mm}^2\text{]} < 85 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

Naprezanje je manje od dopuštenog naprezanja savijanja u vertikalnom smjeru.

## 6 Sile po presjeku nosivih prstenova

### 6.1 Uvod

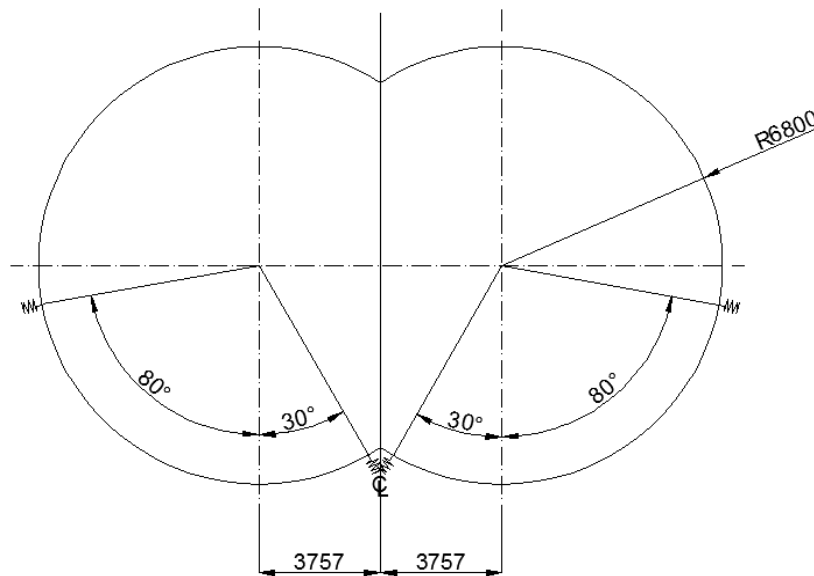
Spremnik se izvodi sa dva nosiva prstena koji prenose statička i dinamička opterećenja na oslonce spremnika. Glavne odlike poprečnih presjeka nosivih prstenova SR1 i SR2 prikazani su na slici Slika 6.1. i Slika 6.2. Zbog jednostavnosti, sile na presjeku određene su za jedinično opterećenje. U prvom približenju proračuna geometrijske karakteristike poprečnog presjeka prstena su konstante po cijelom obodu spremnika, uključujući i uzdužnu pregradu, i pretpostavljene na osnovi iskustva i njihovih očekivanih vrijednosti. Nakon što su prsteni projektirani, u drugom koraku proračuna, korištena je prosječna vrijednost njihovih karakteristika.

Geometrijske karakteristike nominalnog poprečnog presjeka nosivih prstena, prosječni I-profil:

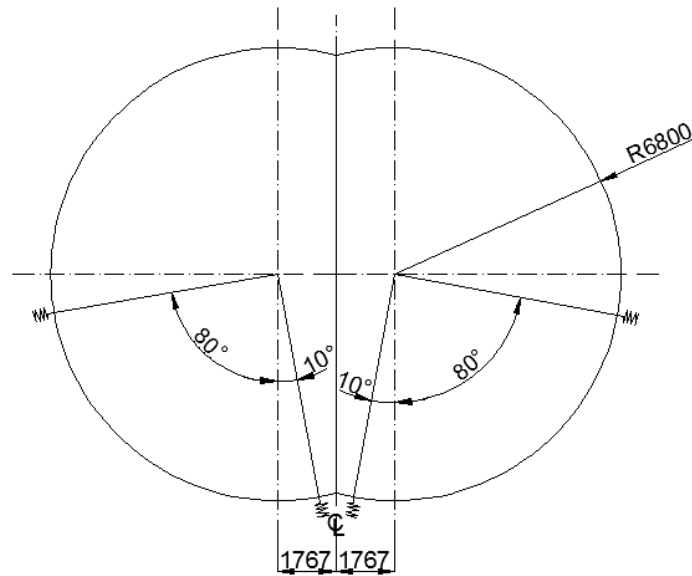
- površina poprečnog presjeka  $A = 0.11 \text{ [m}^2\text{]}$
- smična površina  $A_s = 0.033 \text{ [m}^2\text{]}$
- moment inercije  $I = 0.022 \text{ [m}^4\text{]}$

Proizlazi koeficijent smicanja:

$$\gamma = \frac{A_s}{A} = 0.3$$



Slika 6.1. Poprečni presjek spremnika na položaju nosivog prstena SR1



Slika 6.2. Poprečni presjek spremnika na položaju nosivog prstena SR2

## 6.2 Opterećenje nosivih prstenova

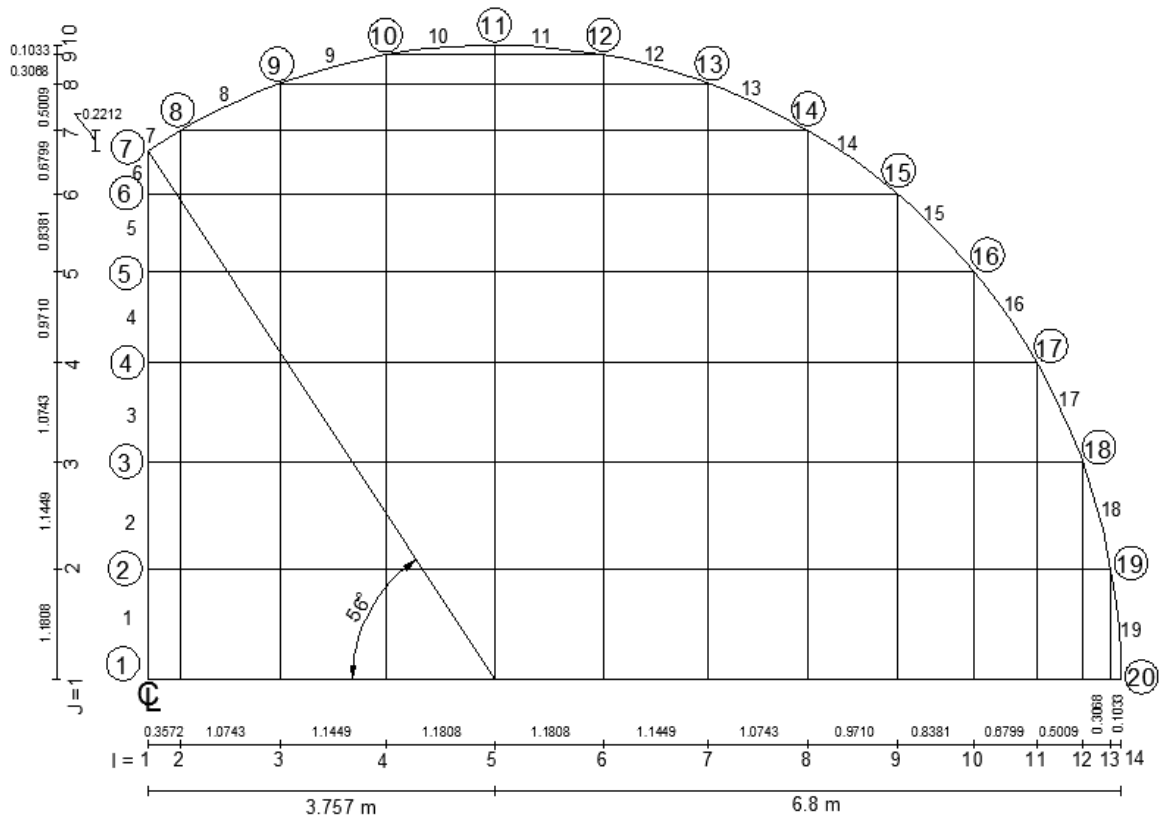
Savijanjem spremnika između oslonaca u nosivim prstenovima se javljaju smične sile. U nastavku se određuje tok smičnih sila po obodu prstenova. Bureau Veritas zahtjeva analizu čvrstoće prstenova i za nagnuti brod zbog čega se uz tok smičnih sila za vertikalnu određuje i tok sila za horizontalnu jediničnu smičnu silu.

Zbog dvostruke simetrije razmatra se samo jedna četvrtina poprečnog presjeka spremnika. Proračun je proveden u programu „Stiff“ metodom vrpčastih konačnih elemenata [6, 7, 8]. Modeli konačnih elemenata prikazani su na slikama Slika 6.3. i Slika 6.4. U oba slučaja, modeli imaju po 19 konačnih elemenata. Obod spremnika dijeli se u segmente od 10° a prikazan je u ortogonalnom koordinatnom sustavu unutar  $I \times J = 14 \times 10$  koordinatne mreže. Radi jednostavnosti pretpostavljena je debljina oplata cilindra  $t_c = 0.01$  [m]. O njoj ovisi debljina stijenke uzdužne pregrade, odnosno:

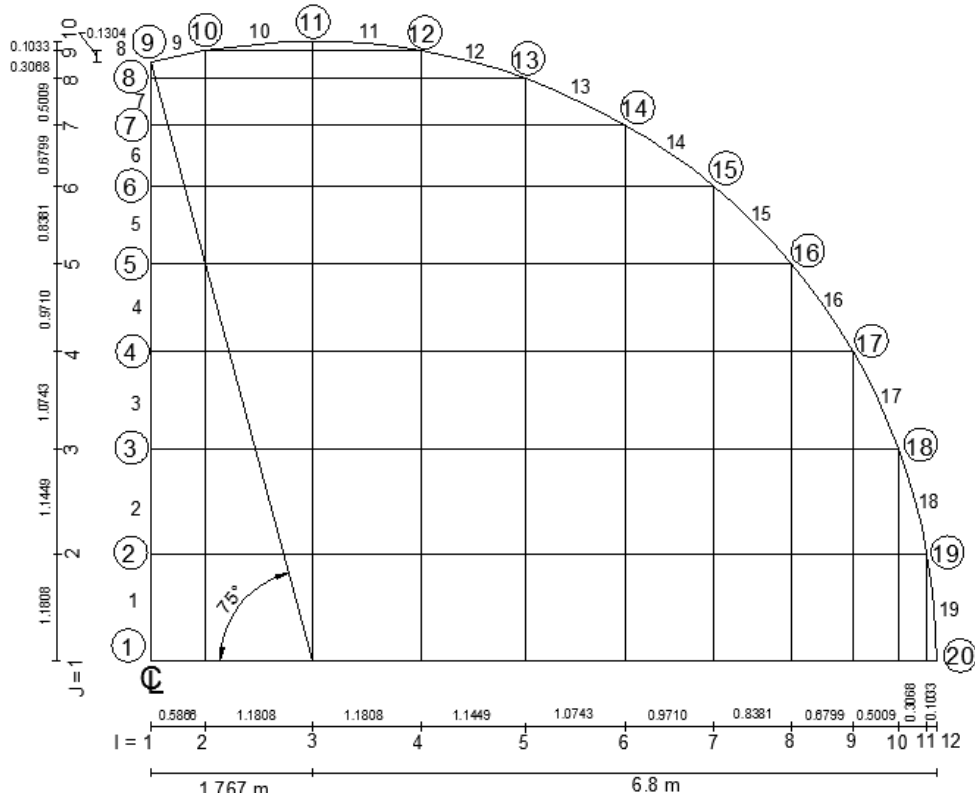
$$t_b = \frac{2 \cdot t_c \cdot e}{R}$$

oznaka prstena	$t_c$ [m]	$e$ [m]	$R$ [m]	$t_b$ [m]
SR1	0.01	3.757	6.800	0.01105
SR2	0.01	1.767	6.800	0.00519

Tablica 6.1. Debljine stijenke uzdužne pregrade



Slika 6.3. Model konačnih elemenata za SR1



Slika 6.4. Model konačnih elemenata za SR2

Vrijednosti toka smičnih sila po vrpčastim elementima za jediničnu vertikalnu i horizontalnu smičnu silu,  $q$ , prikazani su u tablicama Tablica 6.2. i Tablica 6.3.

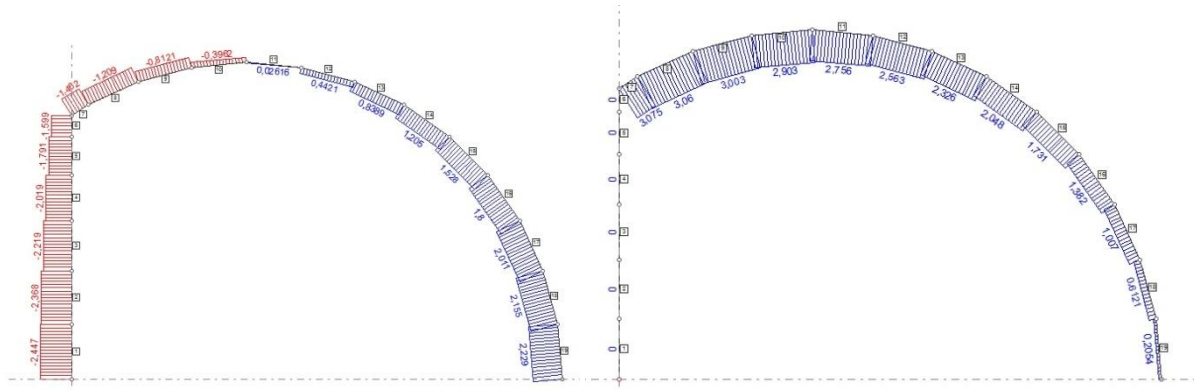
vrpčasti element	$q_v$ [kN/m]	$q_h$ [kN/m]
1	-0.02447	0.0
2	-0.02368	0.0
3	-0.02219	0.0
4	-0.02019	0.0
5	-0.01791	0.0
6	-0.01599	0.0
7	-0.01462	0.03075
8	-0.01209	0.03060
9	-0.00812	0.03003
10	-0.00396	0.02903
11	0.00026	0.02756
12	0.00442	0.02563
13	0.00839	0.02326
14	0.01205	0.02048
15	0.01528	0.01731
16	0.01800	0.01382
17	0.02011	0.01007
18	0.02155	0.00612
19	0.02229	0.00205

**Tablica 6.2.** Vrijednosti toka smičnih sila uslijed jedinične smične sile za SR1,  $Q_v = -1$  kN,  $Q_h = 1$  kN

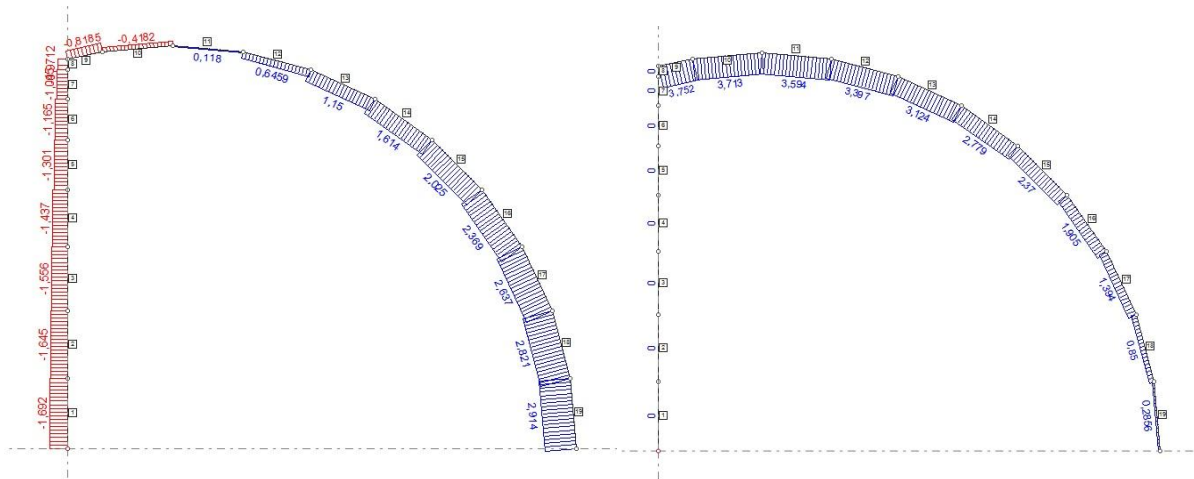
vrpčasti element	$q_v$ [kN/m]	$q_h$ [kN/m]
1	-0.01692	0.0
2	-0.01645	0.0
3	-0.01556	0.0
4	-0.01437	0.0
5	-0.01301	0.0
6	-0.01165	0.0
7	-0.01045	0.0
8	-0.00971	0.0
9	-0.00819	0.03752
10	-0.00418	0.03713
11	0.00118	0.03594
12	0.00646	0.03397
13	0.01150	0.03124
14	0.01614	0.02779
15	0.02025	0.02370
16	0.02369	0.01905
17	0.02637	0.01394
18	0.02821	0.00850
19	0.02914	0.00286

**Tablica 6.3.** Vrijednosti toka smičnih sila uslijed jedinične smične sile za SR2,  $Q_v = -1$  kN,  $Q_h = 1$  kN

Tok smičnih sila za vertikalnu i horizontalnu smičnu silu su grafički prikazana na slici Slika 6.5. za nosivi prsten SR1 i slici Slika 6.6. za nosivi prsten SR2. Kod vertikalne smične sile, tok mijenja predznak blizu vrha spremnika a maksimum postiže na horizontalnoj liniji simetrije. U slučaju horizontalne sile, tok smičnih sila postiže maksimalnu vrijednost u Y-spoju. U ovom slučaju uzdužna pregrada nije opterećena.



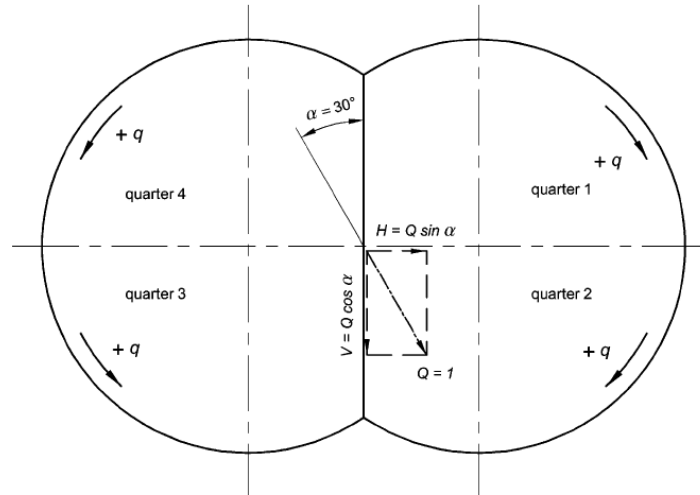
**Slika 6.5.** Tok smičnih sila uslijed vertikalne i horizontalne smične sile za presjek SR1



**Slika 6.6.** Tok smičnih sila uslijed vertikalne i horizontalne smične sile za presjek SR2

Kod nagnutog broda rezultatni tok smičnih sila rastavlja se u dvije komponente, horizontalnu i vertikalnu. Pojavljuje se u različitim kombinacijama predznaka ovisno o kvadrantu spremnika kako je prikazano na slici Slika 6.7.





Slika 6.7. Dogovor o predznacima za kosu smičnu silu

Slijedi:

$$\text{kvadraniti 1 i 3: } \{q\} = \{q\}_v \cos \alpha + \{q\}_h \sin \alpha$$

$$\text{kvadraniti 2 i 4: } \{q\} = \{q\}_v \cos \alpha - \{q\}_h \sin \alpha$$

gdje je  $\alpha$  kut nagiba broda. Smjer pozitivnog rezultatnog toka smičnih sila prikazan je na slici Slika 6.7.

### 6.3 Krutost oslonaca

Na položajima nosivih prstena spremnik se oslanja na sedlaste oslonce koji su prekriveni drvenim oblogama. Ti oslonci imaju funkciju elastičnih temelja pa se u analizi konstrukcije modeliraju elastičnim oprugama. Potrebno je odrediti krutost opruge.

$$F = k \cdot \delta$$

Krutost opruge data je u obliku:

$$k = E \frac{a \cdot b}{h}$$

gdje su:

- $E$  - Young-ov modul elastičnosti;  
za Lingostone H II/2/30-E5 slijedi  $E = 2.4 \cdot 10^6$  [psi] =  $1.655 \cdot 10^7$  [kN/m<sup>2</sup>]
- $a$  - duljina luka opruge;  
za razmak opruga  $\Delta\phi = 10^\circ$  slijedi  
 $a = R \cdot \Delta\phi = 6.8 \cdot 0.1745 = 1.186$  [m]
- $b$  - širina drvene obloge;

pretpostavljeno  $b = 0.4$  [m]  
 $h$  - debljina drvene obloge;  
 pretpostavljeno  $h = 0.2$  [m]

Slijedi za krutost opruge:

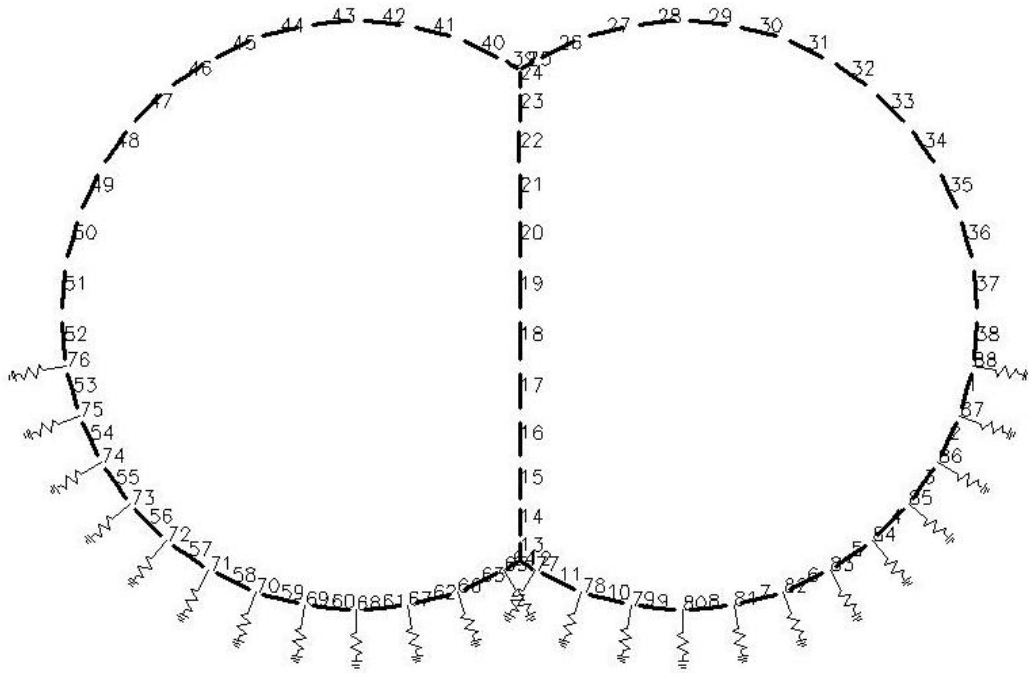
$$k = E \frac{a \cdot b}{h} = 1.655 \cdot 10^7 \frac{1.186 \cdot 0.4}{0.2} = 3.92 \cdot 10^7 \text{ [kN/m]}$$

Opruge su raspoređene radijalno na obje strane spremnika unutar centralnog kuta  $\theta$  sedlastog oslonca, protežući se od  $-30^\circ$  do  $80^\circ$  za nosivi prsten SR1, odnosno od  $-10^\circ$  do  $80^\circ$  za prsten SR2 kako je prikazano na slikama Slika 6.1. i Slika 6.2.

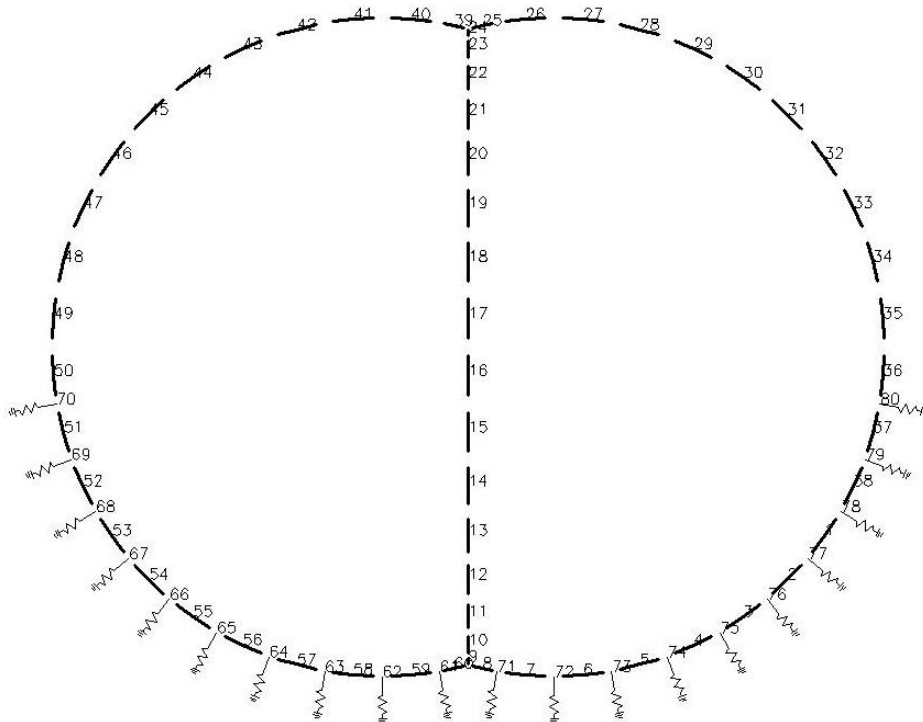
#### 6.4 Presječne sile

Proračun presječnih sila za oba nosiva prstena proveden je u programu „Sesam“ [10]. FEM modeli prikazani su na slikama Slika 6.8. i Slika 6.9. Model presjeka SR1 izveden je iz 64 konačna elementa. U čvorovima elementa 53 do 64 pozicionirano je 12 opruga. Model presjeka SR2 izveden je iz 60 konačnih elementa sa ukupno 10 opruga od elementa 51 do 60. Opruge su raspoređene uz bok broda i imaju smanjenu krutost jer je okvirno rebro broda elastičnije od dvodna. Stoga krutost opruga u čvorovima 76 i 88 za SR1 presjek, odnosno u čvorovima 70 i 80 za SR2 presjek, iznosi  $k/3$ , odnosno  $2k/3$  u čvorovima 75 i 87 za SR1 i 69 i 79 za presjek SR2. Rubni uvjeti: spriječeni su pomaci u smjeru osi  $z$  kao i rotacija oko osi  $x$  i  $y$  (slika Slika 6.10. i slika Slika 6.11.).

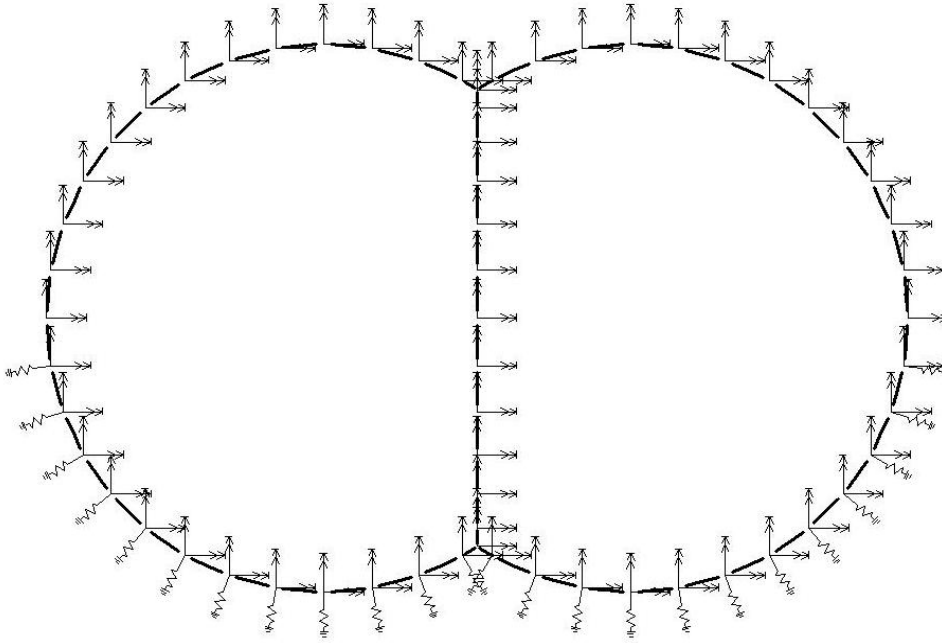
$$\Delta z = 0, \quad \phi_x = 0, \quad \phi_y = 0$$



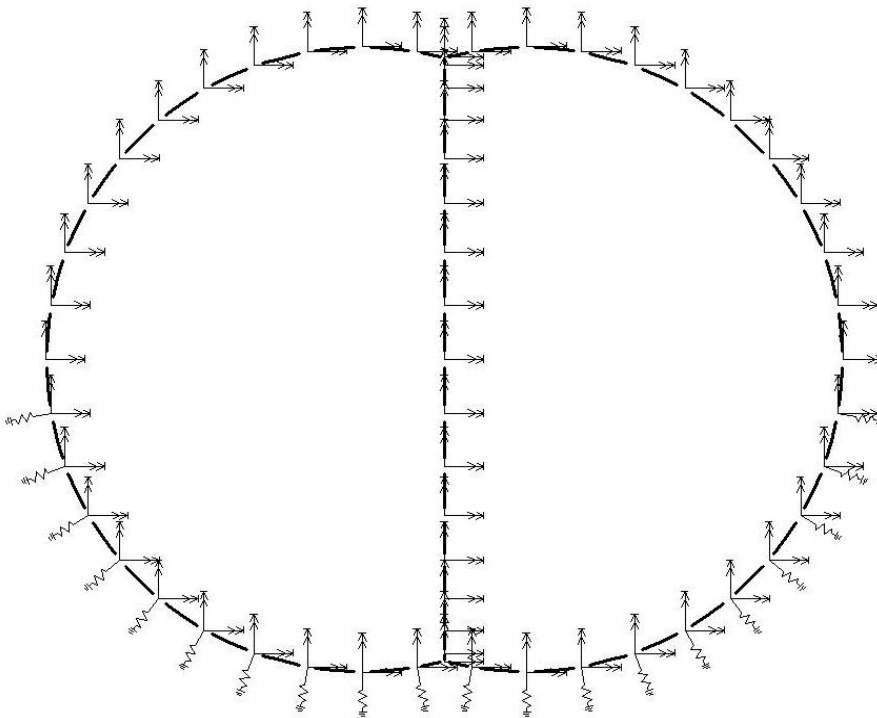
Slika 6.8. FEM model uspravnog spremnika (presjek SR1)



Slika 6.9. FEM model uspravnog spremnika (presjek SR2)

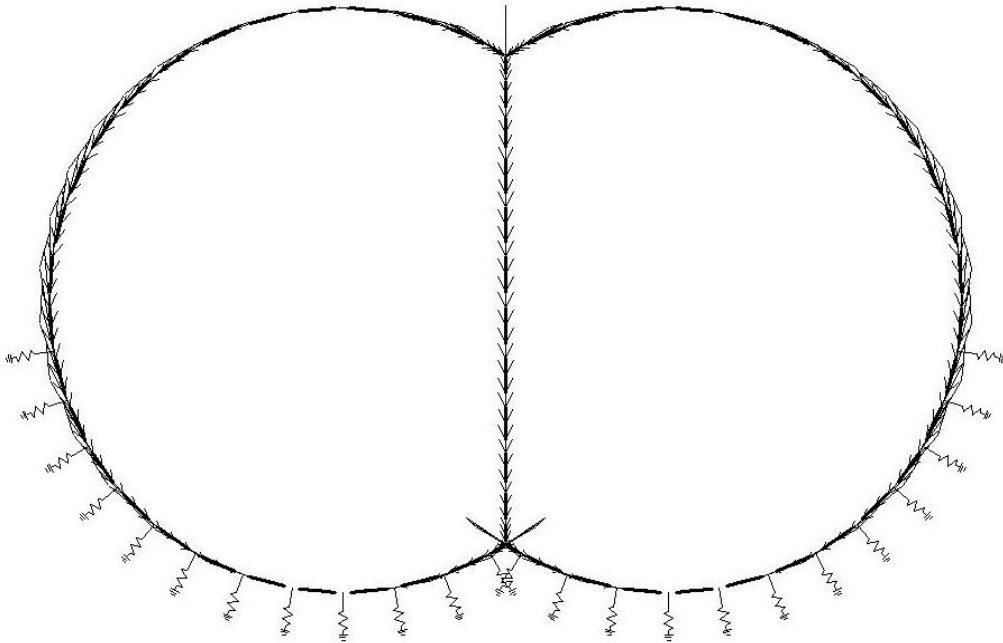


Slika 6.10. Rubni uvjeti grednog modela uspravnog spremnika (presjek SR1)

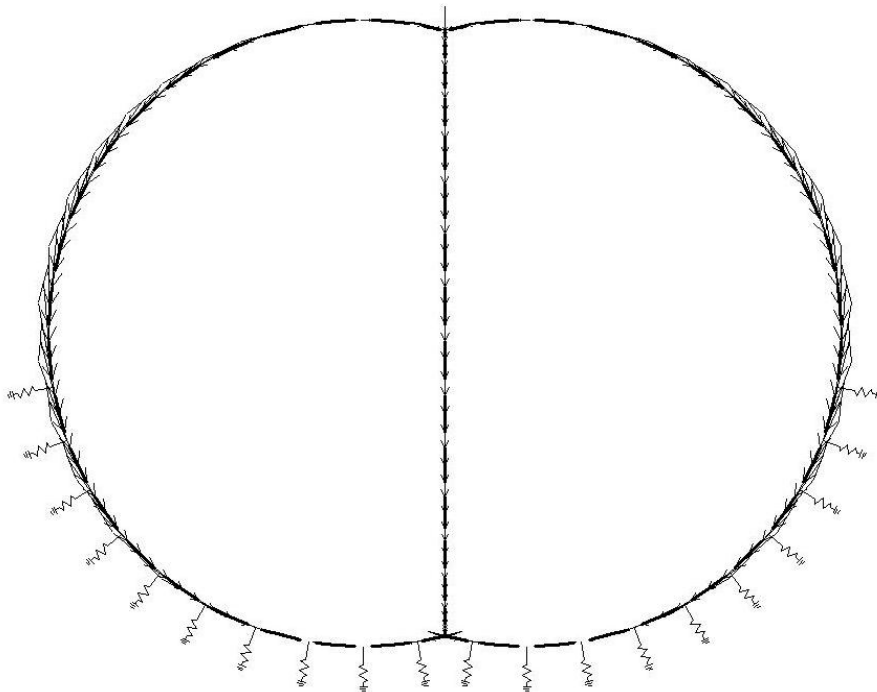


Slika 6.11. Rubni uvjeti grednog modela uspravnog spremnika (presjek SR2)

Distribucija obodnog smičnog opterećenja uslijed djelovanja vertikalne smične sile  $Q_v = -1$  [kN] prikazana je na slijedećim slikama.

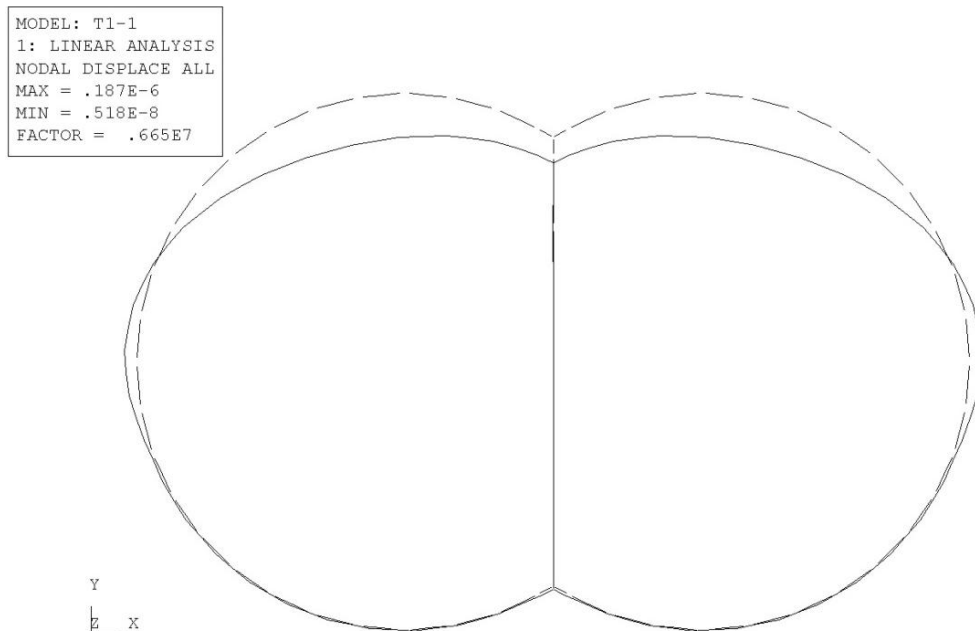


**Slika 6.12.** Distribucija obodnog smičnog opterećenja (presjek SR1)

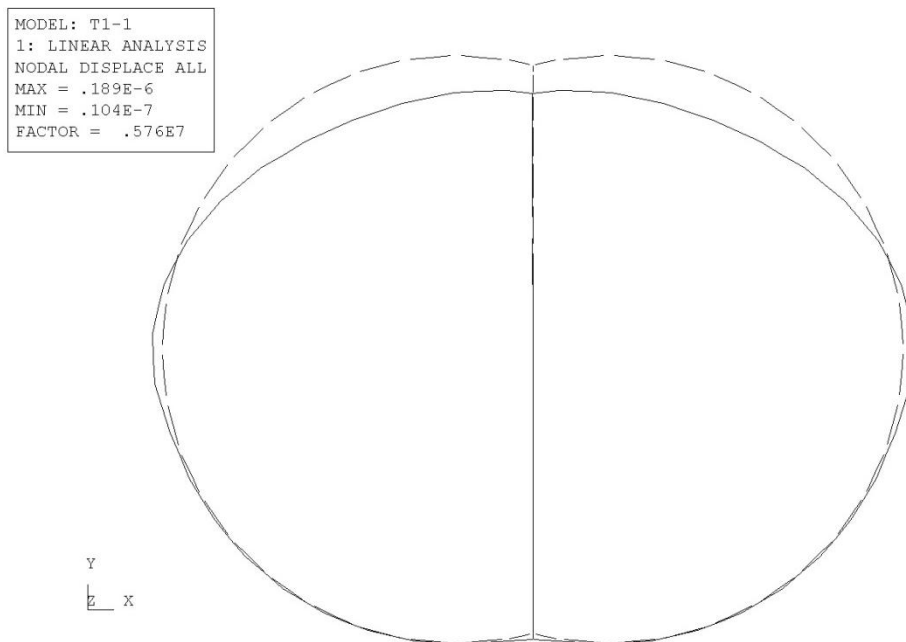


**Slika 6.13.** Distribucija obodnog smičnog opterećenja (presjek SR2)

Rezultati proračuna uslijed djelovanja vertikalne smične sile  $Q_v = -1$  [kN] prikazani su na slikama Slika 6.14 i Slika 6.15. Vidljivo je da oslonci dobro nose spremnik. Sve su opruge aktivne, tj. tlačno napregnute s pozitivnim radijalnim reakcijama. Kružni presjek spremnika poprima eliptični oblik s najvećim progibom od  $0.187 \cdot 10^{-6}$  [m] za SR1 odnosno  $0.189 \cdot 10^{-6}$  [m] za SR2.



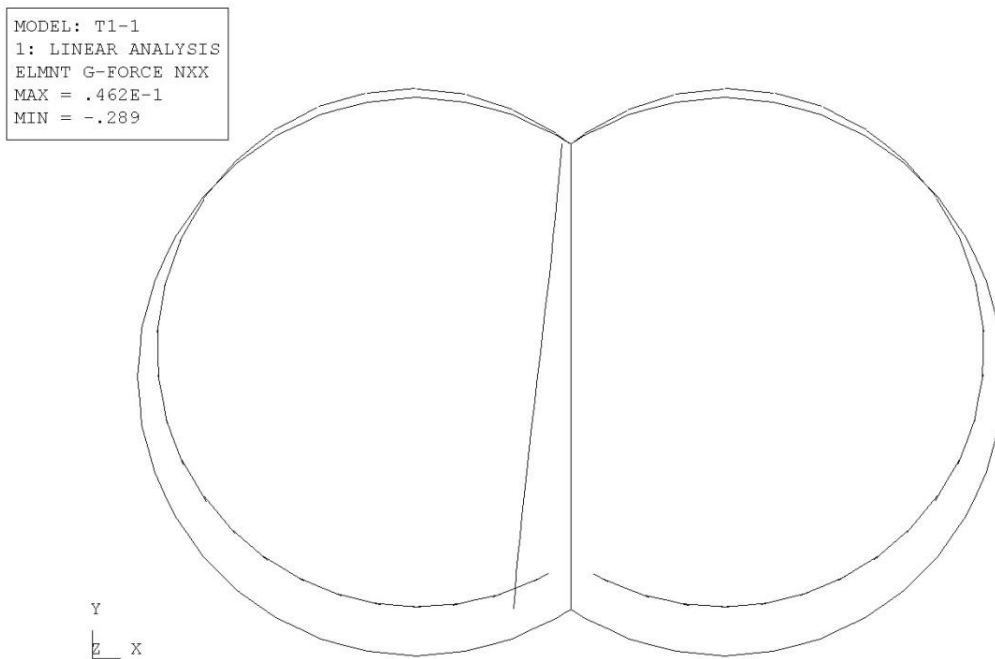
**Slika 6.14.** Deformacije nosivog prstena SR1 uspravnog spremnika



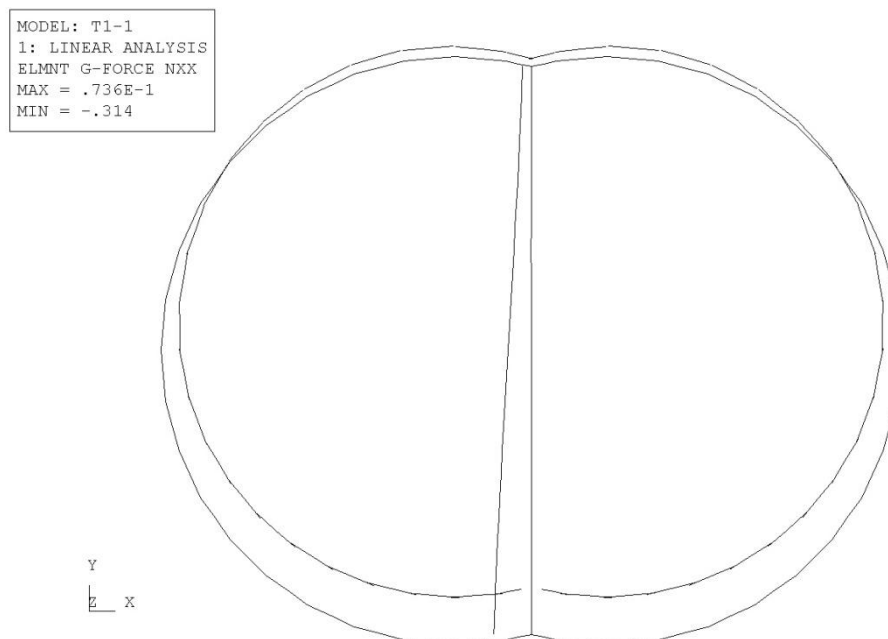
**Slika 6.15.** Deformacije nosivog prstena SR2 uspravnog spremnika

U slijedećim slikama rezultati opterećenja prikazani su kao koračna funkcija sa slobodnim dijelovima prstena i konstantnim vrijednostima po elementima.

Normalna sila djeluje u cirkularnom smjeru i u vrhu prstena uzrokuje naprezanje na vlak pa je označena kao pozitivna. Najveća sila od -0.289 [kN], odnosno -0.314 [kN] za presjek SR2, pojavljuje se u dnu prstena.

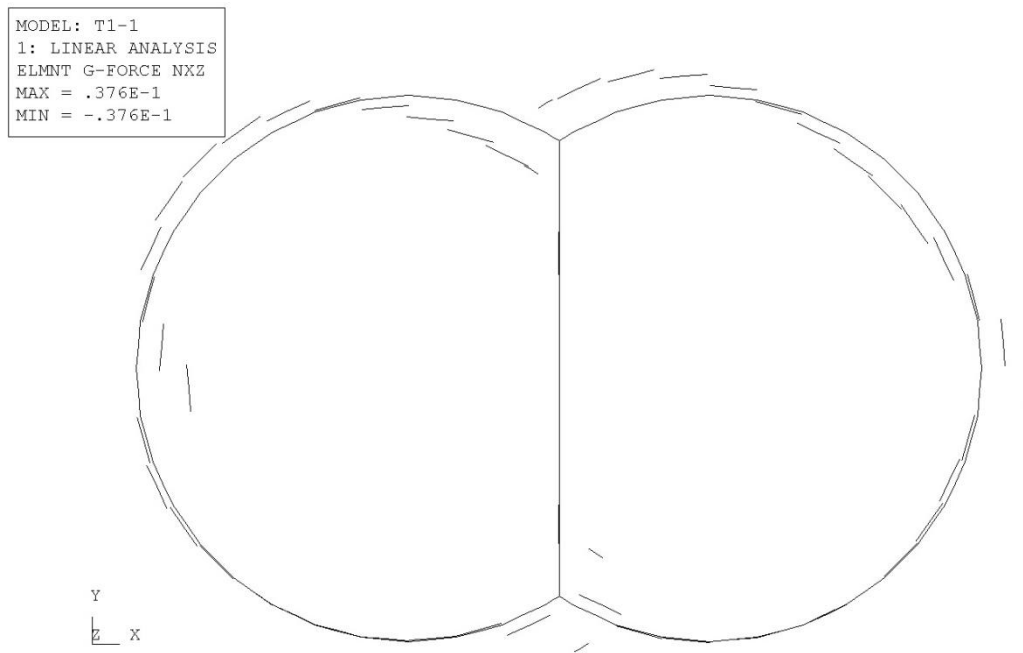


Slika 6.16. Normalna sila  $N_{xx}$  za SR1

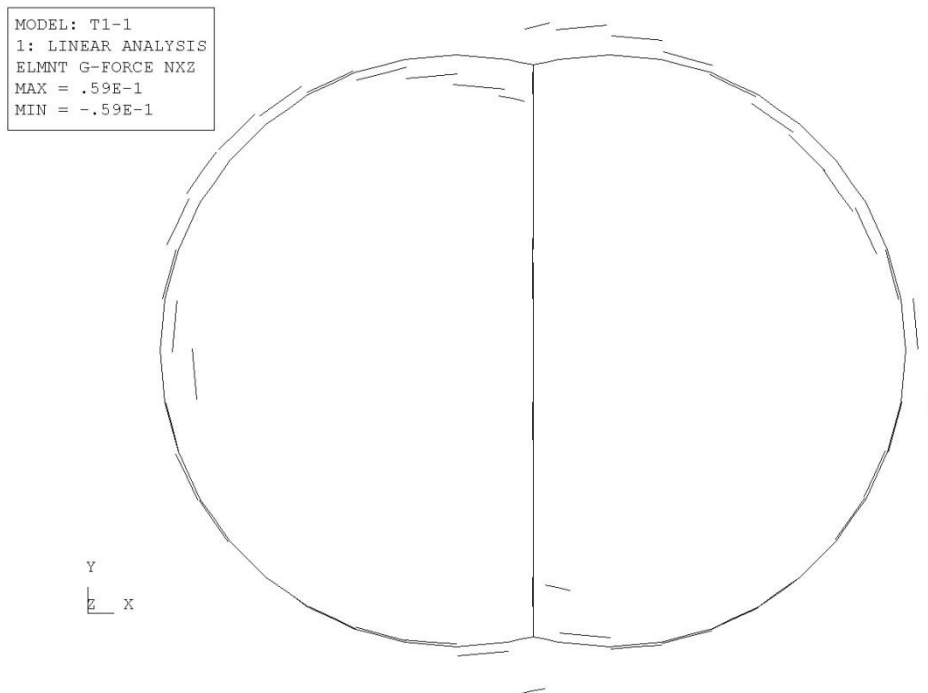


Slika 6.17. Normalna sila  $N_{xx}$  za SR2

U slučaju smične sile najveće vrijednosti javljaju se na krajevima oslonaca i mjestima Y-spoja. Opterećenju se suprotstavljaju oslonci pa u tom području smične sile poprimaju najmanje vrijednosti.



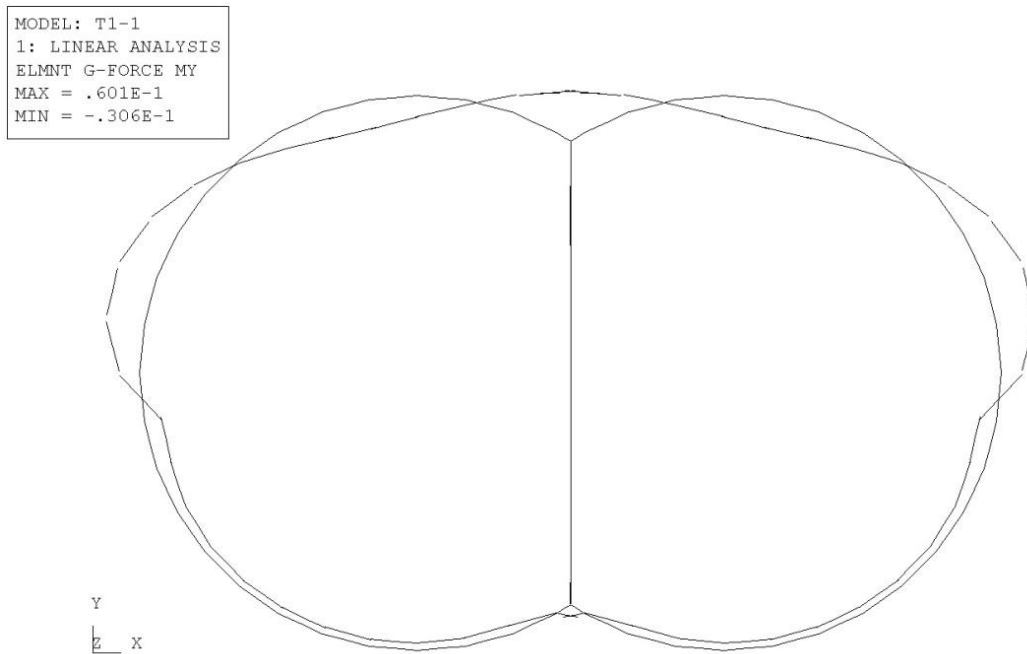
Slika 6.18. Smična sila  $N_{xz}$  za SR1



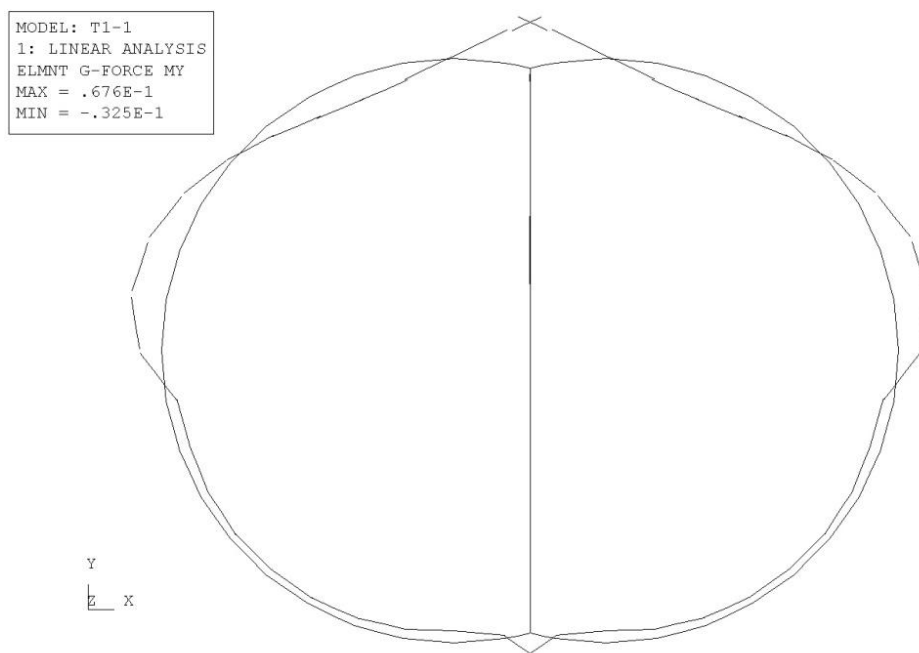
Slika 6.19. Smična sila  $N_{xz}$  za SR2



Moment mijenja predznak na krajevima oslonca i vlačno opterećuje oplatu. Najveća vrijednost se očekivano javlja u Y-spoju (na mjestu spoja uzdužne pregrade i cilindra) i iznosi 0.0601 [kNm] kod prstena SR1 odnosno 0.0676 [kNm] kod prstena SR2.

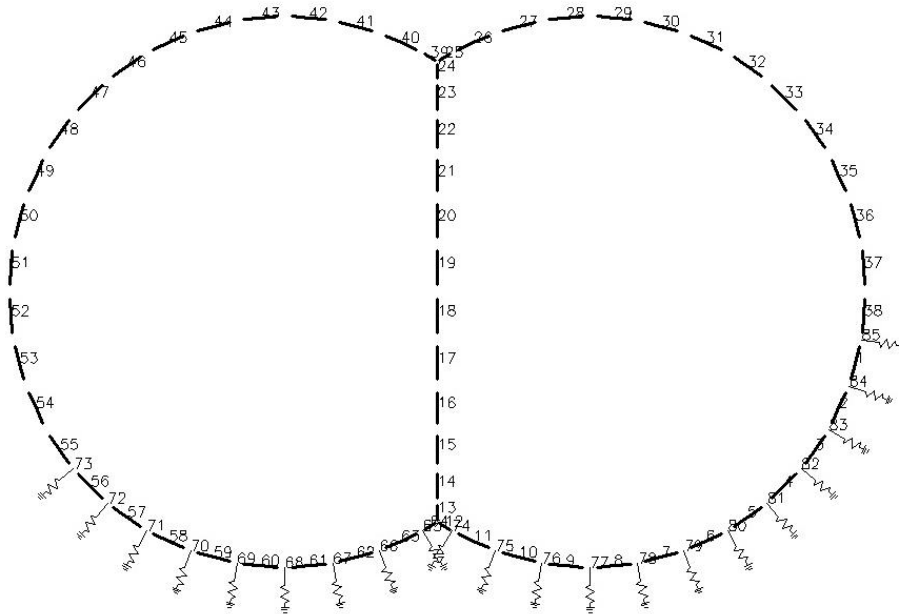


Slika 6.20. Moment savijanja  $M_y$  za SR1

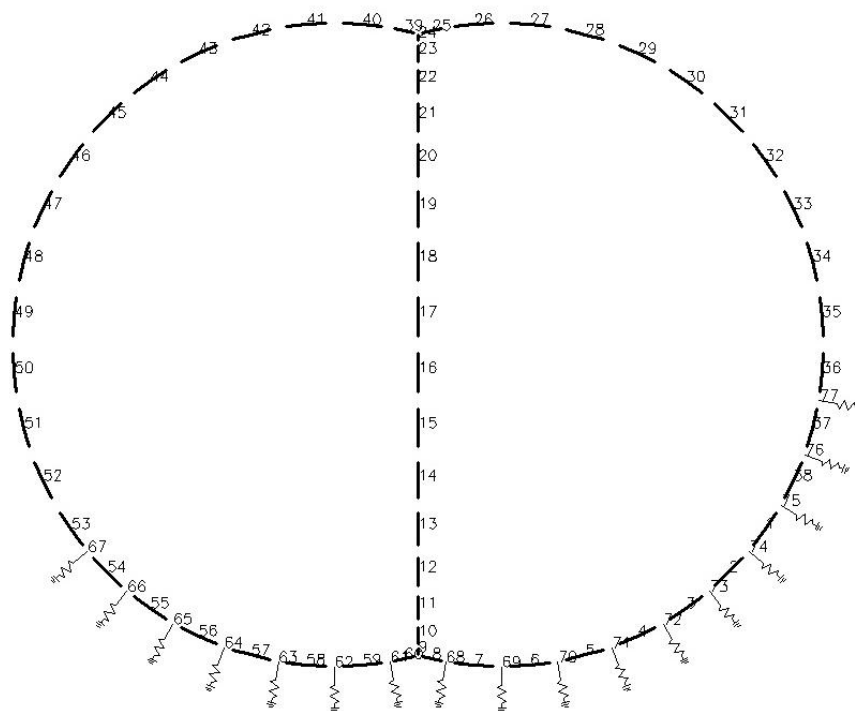


Slika 6.21. Moment savijanja  $M_y$  za SR2

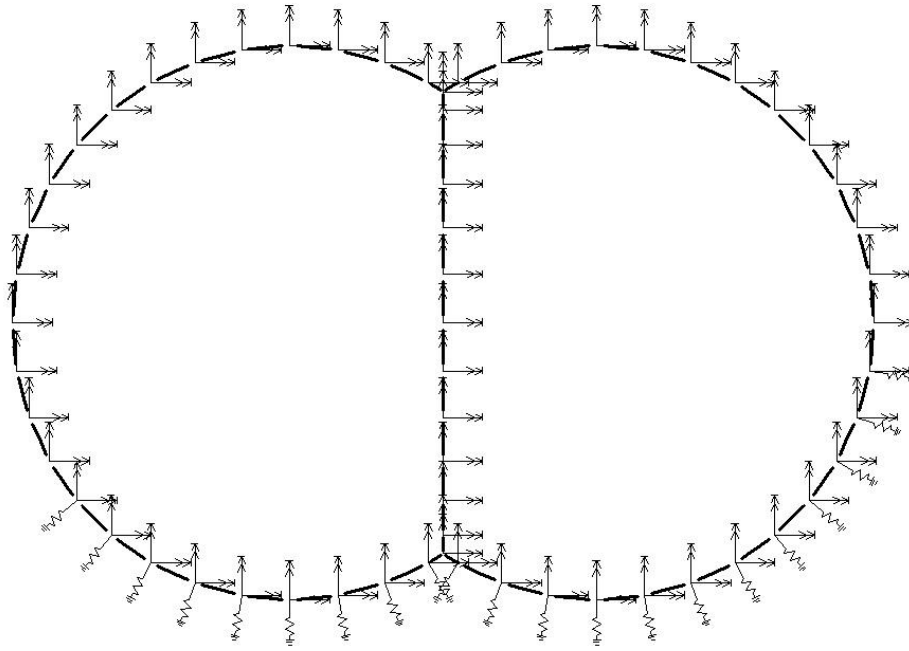
U slučaju nagnutog spremnika, tri su opruge na lijevoj strani uklonjene iz razloga što postaju neaktivne i uzrokuju vlačnu silu u oplati. Odgovarajući rubni uvjeti i smično opterećenje prikazani su na slijedećim slikama.



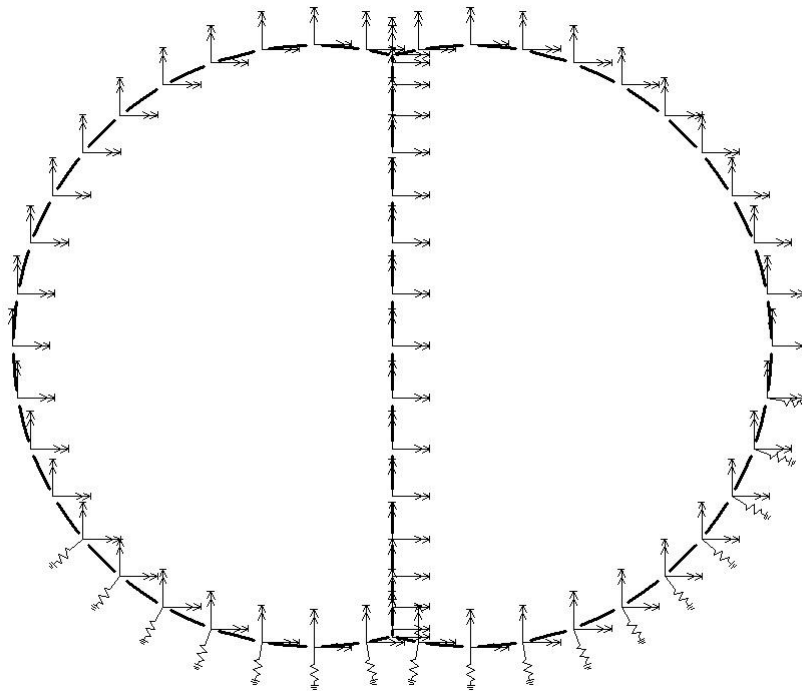
Slika 6.22. Raspored opruga nagnutog spremnika na položaju SR1



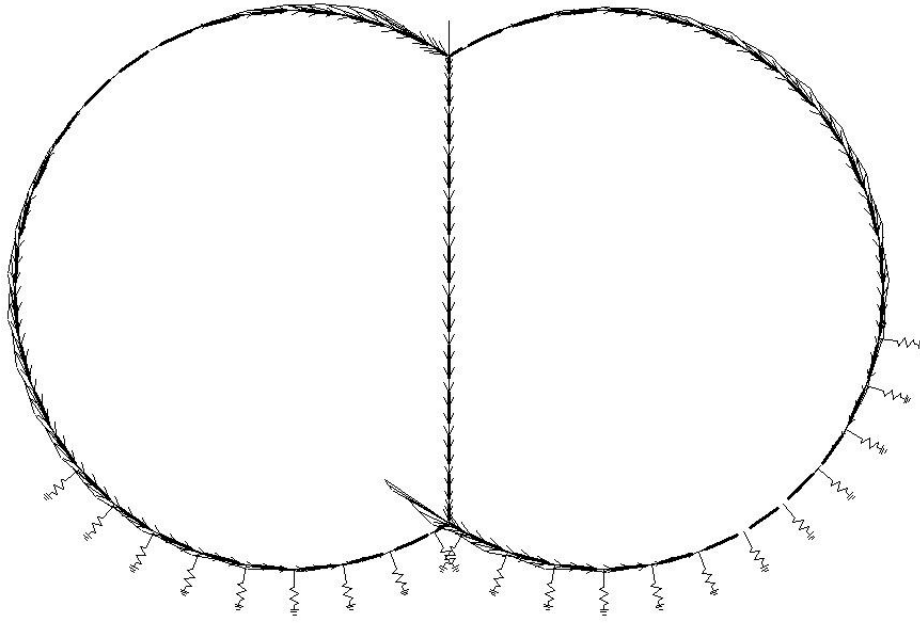
Slika 6.23. Raspored opruga nagnutog spremnika na položaju SR2



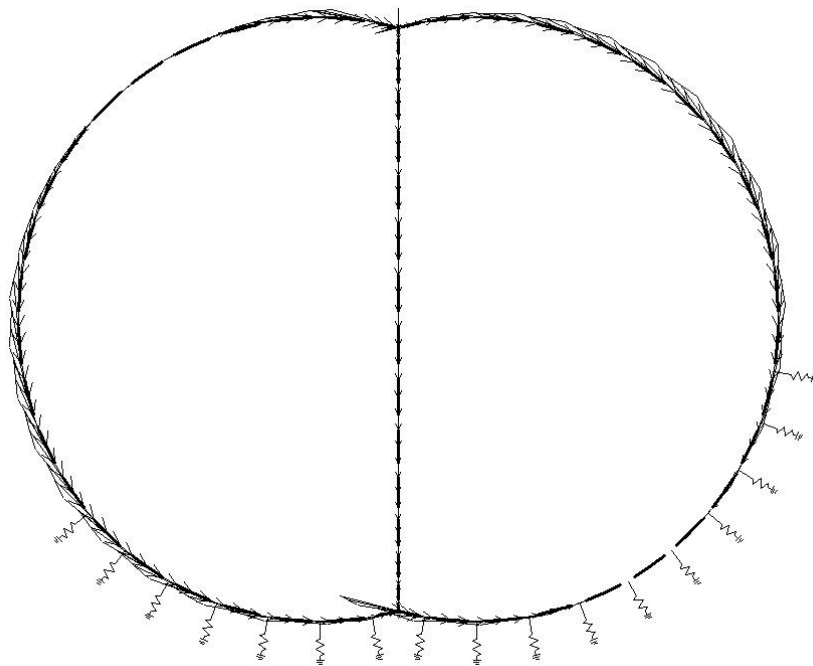
Slika 6.24. Rubni uvjeti grednog modela presjeka SR1 nagnutog spremnika



Slika 6.25. Rubni uvjeti grednog modela presjeka SR2 nagnutog spremnika

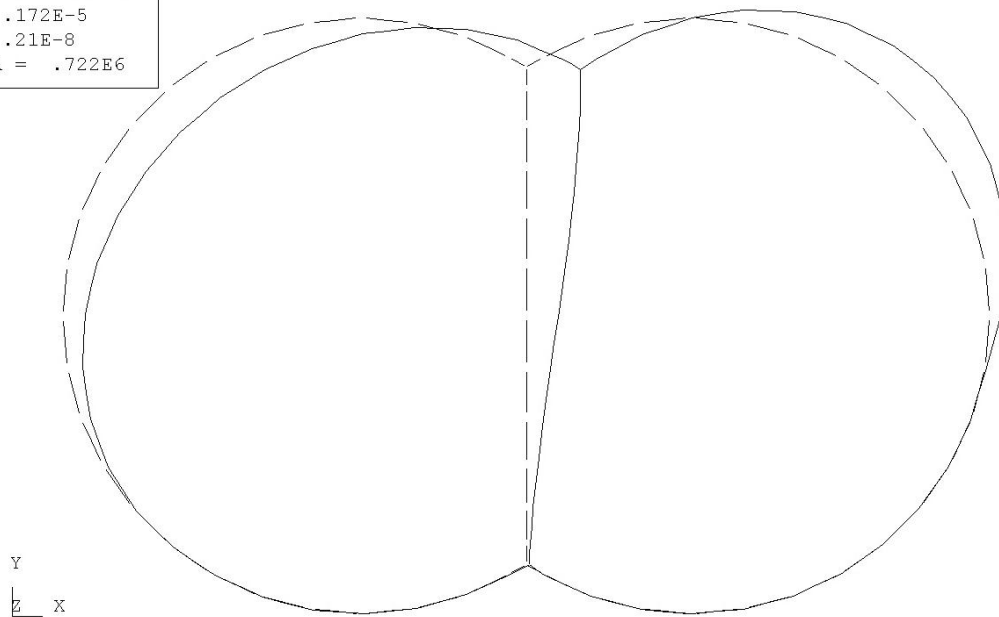


Slika 6.26. Tok smičnih opterećenja po obodu nosivog prstena SR1, gredni model



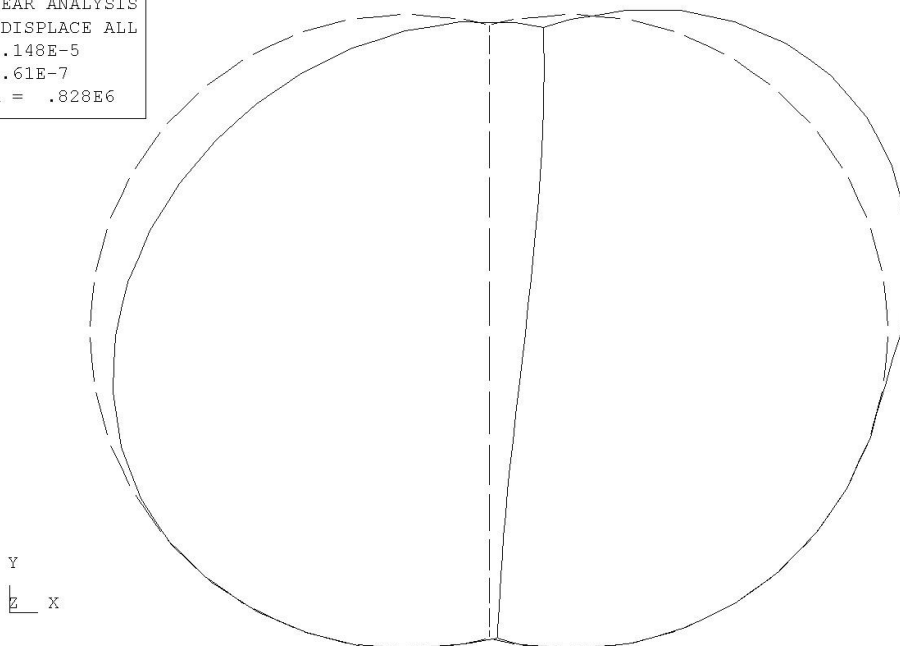
Slika 6.27. Tok smičnih opterećenja po obodu nosivog prstena SR2, gredni model

```
MODEL: T1-1  
3: LINEAR ANALYSIS  
NODAL DISPLACE ALL  
MAX = .172E-5  
MIN = .21E-8  
FACTOR = .722E6
```



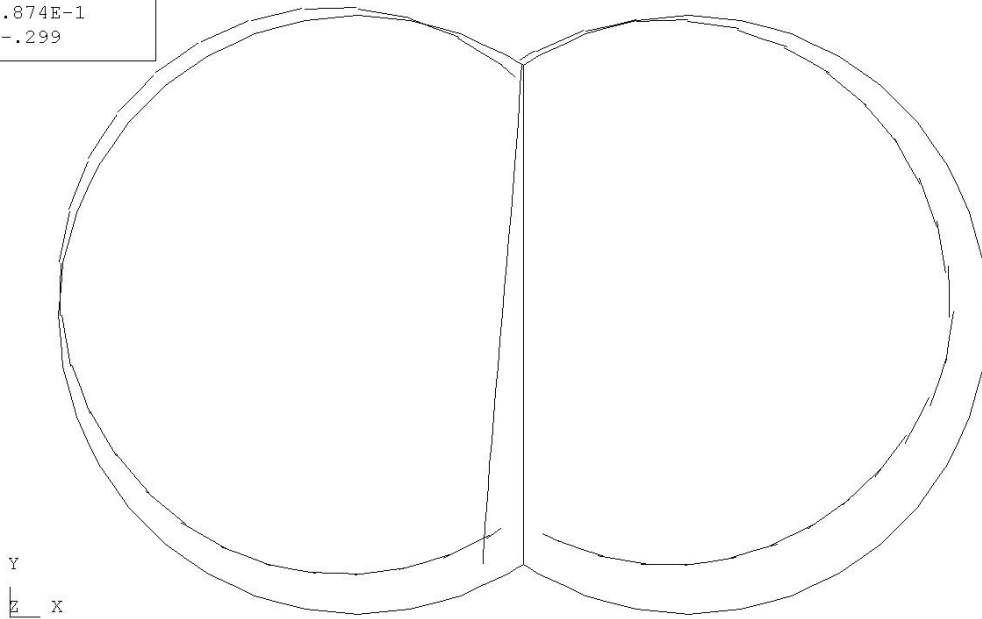
Slika 6.28. Deformacije grednog modela nosivog prstena SR1

```
MODEL: T1-1  
3: LINEAR ANALYSIS  
NODAL DISPLACE ALL  
MAX = .148E-5  
MIN = .61E-7  
FACTOR = .828E6
```



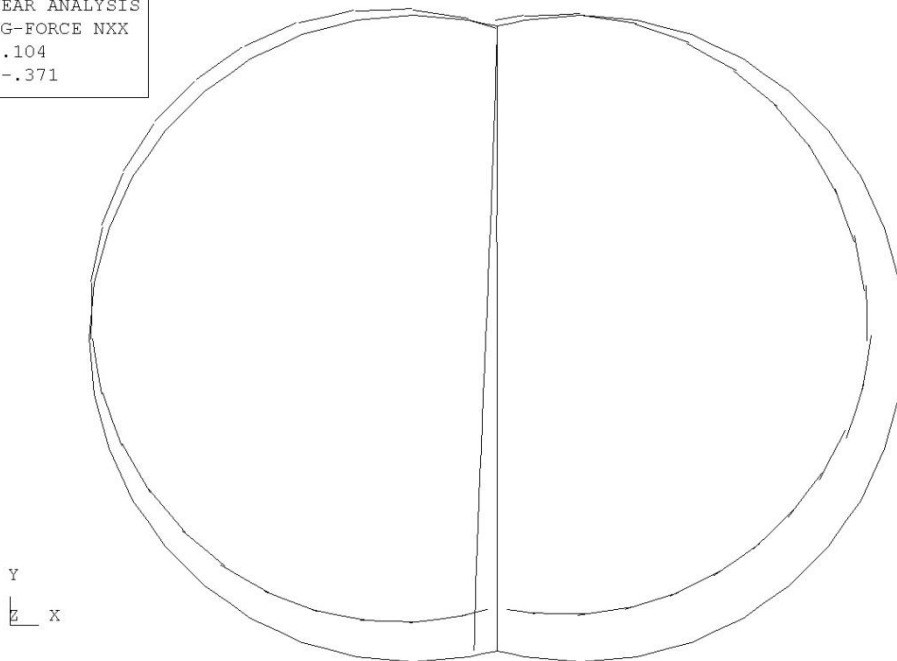
Slika 6.29. Deformacije grednog modela nosivog prstena SR2

```
MODEL: T1-1  
3: LINEAR ANALYSIS  
ELMNT G-FORCE NXX  
MAX = .874E-1  
MIN = -.299
```



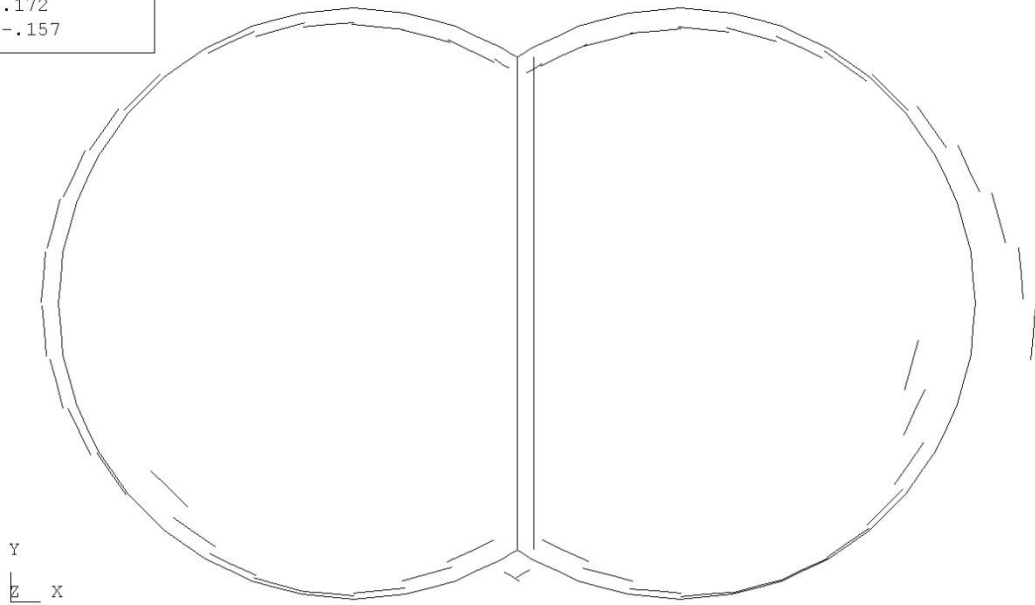
Slika 6.30. Dijagram normalnih sila  $N_{xx}$  za presjek SR1

```
MODEL: T1-1  
3: LINEAR ANALYSIS  
ELMNT G-FORCE NXX  
MAX = .104  
MIN = -.371
```



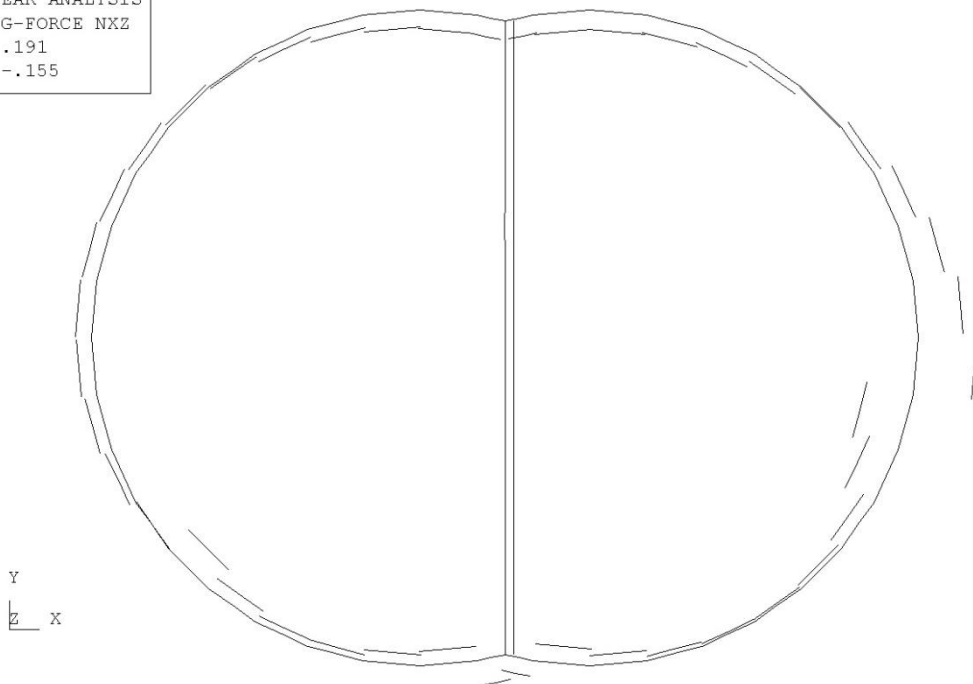
Slika 6.31. Dijagram normalnih sila  $N_{xx}$  za presjek SR2

```
MODEL: T1-1  
3: LINEAR ANALYSIS  
ELMNT G-FORCE NXZ  
MAX = .172  
MIN = -.157
```



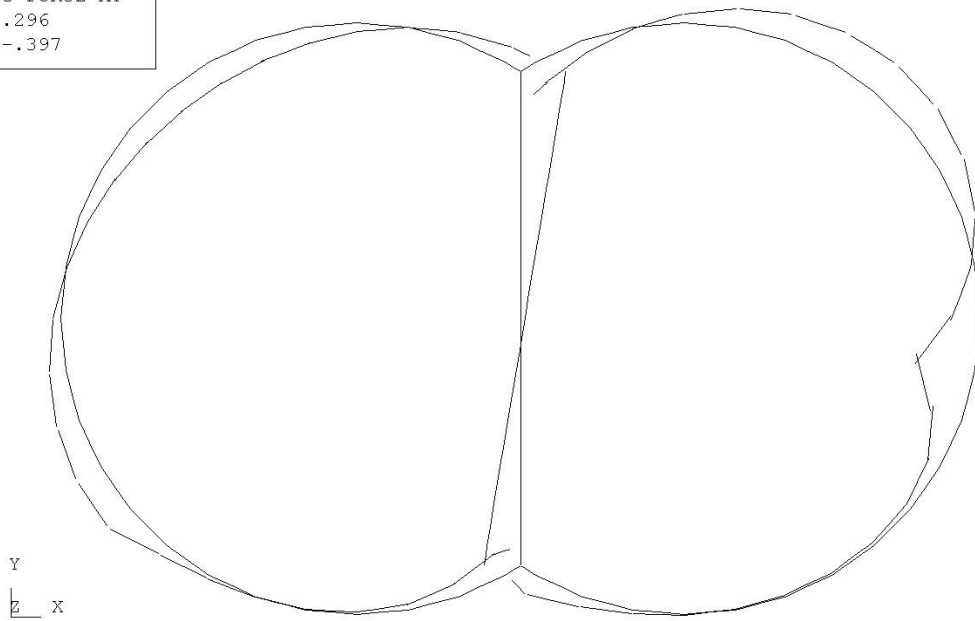
Slika 6.32. Raspored smične sile  $N_{xz}$  za nosivi prsten SR1

```
MODEL: T1-1  
3: LINEAR ANALYSIS  
ELMNT G-FORCE NXZ  
MAX = .191  
MIN = -.155
```



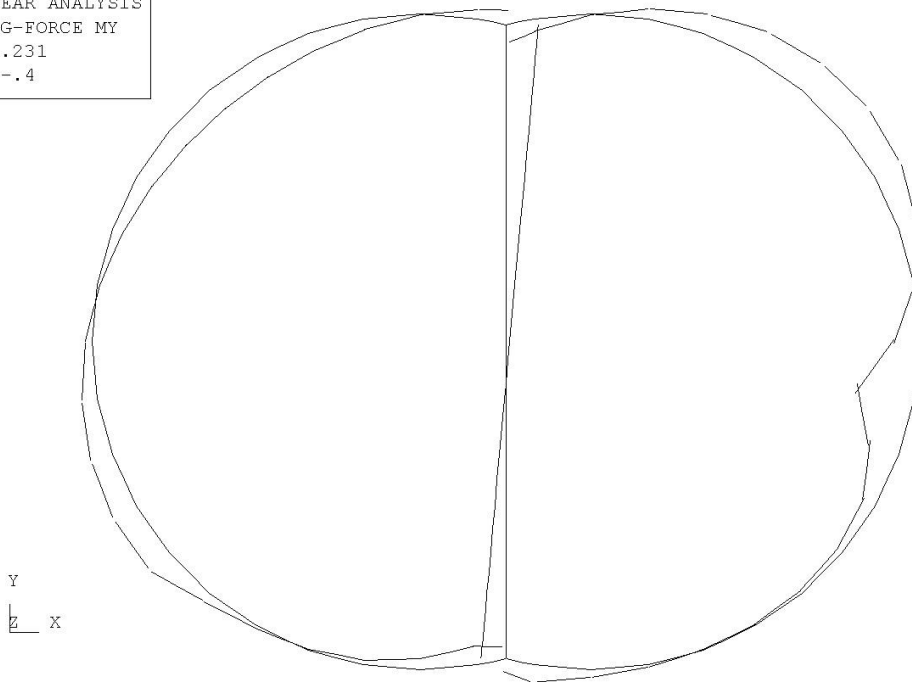
Slika 6.33. Raspored smične sile  $N_{xz}$  za nosivi prsten SR2

MODEL: T1-1  
3: LINEAR ANALYSIS  
ELMNT G-FORCE MY  
MAX = .296  
MIN = -.397



Slika 6.34. Dijagram momenata savijanja  $M_y$  za presjek SR1

MODEL: T1-1  
3: LINEAR ANALYSIS  
ELMNT G-FORCE MY  
MAX = .231  
MIN = -.4



Slika 6.35. Dijagram momenata savijanja  $M_y$  za presjek SR2



## 6.5 Opterećenje oslonaca

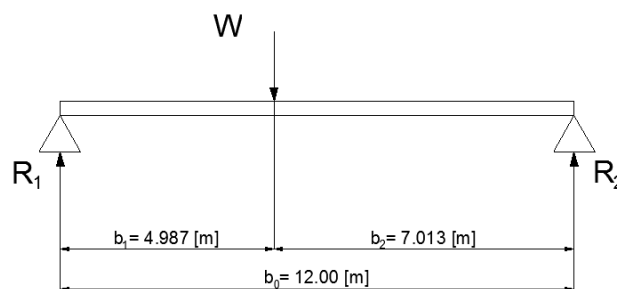
Spremnik na oslonce prenosi vlastito opterećenje koje se sastoji od statičke i dinamičke komponente. Statička komponenta ovisi o uzdužnom položaju težišta spremnika u odnosu na položaj oslonaca, odnosno:

$$R_{s1} = C_1 \cdot W \quad R_{s2} = C_2 \cdot W$$

gdje su:

$C_1, C_2$  - reakcijski koeficijenti;

$$C_1 = \frac{b_2}{b_0} \quad C_2 = \frac{b_1}{b_0}$$



Slika 6.36. Reakcije u osloncima

Dinamičke reakcije nastaju uslijed ubrzanja oslonaca i prikazuju se kao dodatak na statičke reakcije.

$$R_{di} = \alpha_i \cdot R_{si} \quad i = 1, 2$$

gdje je  $\alpha$  predstavlja bezdimenzijsko ubrzanje, odnosno, odnos između stvarne akceleracije i gravitacijske konstante.

Ukupna reakcija u osloncima na kraju iznosi:

$$F_i = R_{si} + R_{di} = C_i \cdot (1 + \alpha_i) \cdot W$$

$$F_i = C_i \cdot a_{\beta i} \cdot W$$

gdje je:

$a_{\beta i}$  - bezdimenzijsko ukupno ubrzanje uključujući gravitaciju a čiji iznos ovisi o gibanju broda i kutu nagiba  $\beta$

U tablici Tablica 6.4. dane su vrijednosti izračunatih parametara ukupnog opterećenje kao i konačne reakcije pojedinog oslonca za brod u uspravnom i nagnutom položaju. Ove vrijednosti koristiti će se u analizi čvrstoće nosivih prstenova spremnika.

volumen spremnika, $V$ [m <sup>3</sup> ]	5971.42	
težina tereta, $W_c$ [kN]	40406	
težina čelika, $W_s$ [kN]	6041	
ukupna težina, $W$ [kN]	46447	
oznaka oslonca	SR1	SR2
reakcijski koeficijent, $C$	0.5844	0.4155
ubrzanje, $a_{\beta}$ , $\beta = 0^\circ$	1.765	1.906
ubrzanje, $a_{\beta}$ , $\beta = 30^\circ$	1.279	1.322
reakcija u oslancima, $F$ [kN], $\beta = 0^\circ$	47911	36786
reakcija u oslancima, $F$ [kN], $\beta = 30^\circ$	34721	25519

Tablica 6.4. Opterećenje oslonaca

## 6.6 Rezime analize provedene u poglavlju 6.

Uslijed savijanja spremnika između sedlastih oslonaca u nosivim prstenovima javlja se tok smičnih sila. Smična naprezanja nosivih prstenova određena su u skladu sa teorijom tankostjenih nosača programom „Stiff“. Primjenjujući metodu konačnih elemenata na lučni gredni model određene su presječne sile u nosivim prstenovima programom „SESAM“. U prvom koraku proračuna dimenzije poprečnog presjeka prstena pretpostavljene su iskustveno i konstantne su po cijelom prstenu. Sedlasti oslonci sa drvenim oblogama na koje je spremnik položen, kod modela su zamjenjeni elastičnim oprugama. Djelovanjem jedinične smične sile analizira se i određuje djelovanje smičnog opterećenja. Dobivena distribucija unutarnjih (presječnih) sila, tj. normalne i smične sile te momenta savijanja, biti će odrednica za definiranje konačnih dimenzija na osnovi stvarnog izračunatog opterećenja iz prethodne točke.

## 7 Dimenzioniranje nosivih prstenova

### 7.1 Uvod

Cjelokupna konstrukcija spremnika oslanja se na dva sedlasta oslonca. Na tim mjestima, spremnik se orebruje jakim rebrima odnosno nosivim prstenovima. Uslijed savijanja spremnika između oslonaca prsteni bivaju opterećeni tokom smičnih sila.

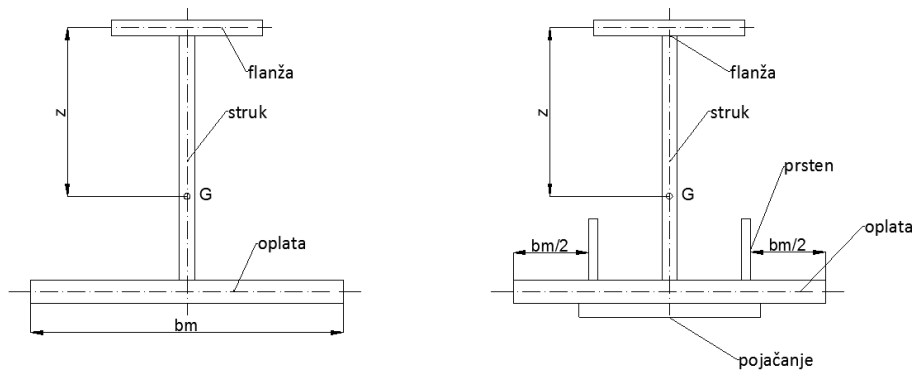
U prethodnom poglavlju određeni su tokovi smičnih sila za jediničnu smičnu silu po obodu nosivih prstena SR1 i SR2 pomoću programa „Stiff“. Nosivi prstenovi su zatim u „SESAMU“-u modelirani grednim elementima s tri čvora, a oslonci elastičnim oprugama. Modeli su opterećeni odgovarajućim smičnim opterećenjem. Proračunom je određeno polje presječnih sila po presjecima nosivih prstena. Na zahtjev registra analiza je provedena za uspravan i za brod u nagnutom položaju.

U ovom poglavlju, na osnovi rezultata analize, odnosno na osnovi vrijednosti normalne i smične sile te momenta savijanja, odrediti će se konačne dimenzije nosivih prstena. Jedinične vrijednosti presječnih sila množe se s ukupnim, stvarnim reakcijama u osloncima, a rezultirajuća naprezanja ne smiju prelaziti dopuštene vrijednosti.

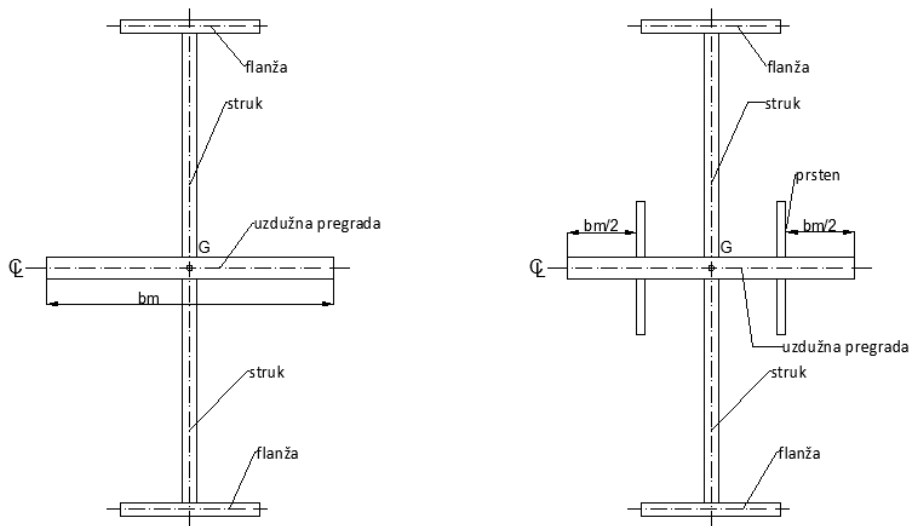
Stvarne reakcije u osloncima sastoje se od statičke i dinamičke komponente. Statička komponenta ovisi o uzdužnoj poziciji težišta spremnika u odnosu na poziciju oslonaca spremnika, dok je dinamička komponenta uzrokovana ubrzanjem oslonaca koje ovisi o njihovom položaju po duljini spremnika. Sile u osloncima određene su u prethodnom poglavlju i prikazane u tablici Tablica 6.4.

### 7.2 Tipovi poprečnih presjeka nosivih prstena

Razlikuju se dva tipa poprečnih presjeka nosivih prstenova: prvi na obodnom dijelu prstena i drugi u području visine uzdužne pregrade. Jednostavnog su presjeka (slike Slika 7.1. i Slika 7.2.) osim na dijelovima većeg opterećenja gdje su djelomično pojačani trakom s vanjske strane oplata, dimenzija 800x30 [mm], i po jedan prsten iznutra sa svake strane struka dimenzija 250x30 [mm]. Kod prstena u dijelu uzdužne pregrade pojačanje je izvedeno sa po jednim prstenom dimenzija 500x30 [mm] sa svake strane struka. Dimenzije pojačanja preuzete su od spremnika sličnih karakteristika.



Slika 7.1. Obični (lijevo) i pojačani (desno) poprečni presjeci nosivih prstenova u obodnom dijelu



Slika 7.2. Obični (lijevo) i pojačani (desno) poprečni presjeci nosivih prstenova na uzdužnoj pregradi

Sunosiva širina oplata cilindra spremnika određena je u skladu sa pravilima registra prema:

$$b_m = 2 \cdot 0.78 \cdot \sqrt{r \cdot t}$$

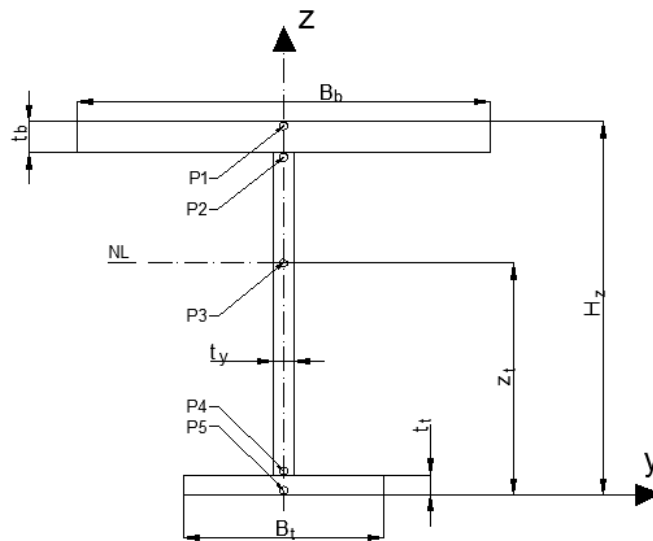
gdje je  $r$  radijus cilindra a  $t$  debljina oplata. Sunosiva širina opločenja uzdužne pregrade određuje se prema:

$$b_m = 40 \cdot t$$

gdje je  $t$  debljina opločenja. Ovdje valja napomenuti da sunosiva širina opločenja pregrade preuzima samo normalnu silu.

### 7.3 Ekvivalentno naprezanje u nosivim prstenovima

Ekvivalentno naprezanje u nosivim prstenovima, odnosno, raspored normalne i smične sile te momenta savijanja, slijede iz umnoška vrijednosti toka smičnih sila urokovanog jediničnom smičnom silom s ukupnom reakcijom u osloncu. Vrijednosti unutarnjih sila računane su u dvije Gauss-ove točke svakog elementa grednog modela nosivog prstena. Kao posljedica djelovanja unutarnjih sila javlja se naprezanje čije se vrijednosti izračunavaju u pet točaka. Pozicije tih točaka su prikazane na slici Slika 7.3.



Slika 7.3. Položaji točaka na poprečnom presjeku u kojima se računa naprezanje

Vrijednost naprezanja u pojedinoj točki određuje se pomoću von Mises-ove formule:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{yz}^2}$$

gdje su:

$\sigma_x$  - normalno naprezanje u smjeru osi x

$$\sigma_x = \sigma_{xN} + \sigma_{xM_y}$$

$\sigma_{xN}$  - normalno naprezanje uslijed aksijalne sile  $N_x$

$\sigma_{xM_y}$  - normalno naprezanje uslijed momenta savijanja  $M_y$

$\sigma_y$  - normalno naprezanje u smjeru osi y

$\tau_{yz}$  - smično naprezanje u y-z ravnini

Sile po poprečnim presjecima i komponente naprezanja definirane su u lokalnom koordinatnom sustavu grede, kako je prikazano na slici Slika 7.3.

Normalno naprezanje  $\sigma_{xN}$  uzrokovano aksijalnom silom  $N_x$  konstantno je po poprečnom presjeku i definirano izrazom:

$$\sigma_{xN} = \frac{N_x}{A}$$

gdje su:

- $N_x$  - aksijalna sila  
 $A$  - površina poprečnog presjeka

Normalno naprezanje od savijanja  $\sigma_{xM_y}$  uzrokovano momentom savijanja  $M_y$  različito je za razmatrane točke. Definirano je izrazom:

$$\sigma_{xM_y} = \frac{M_y}{W_y}$$

gdje su:

- $M_y$  - moment savijanja oko lokalne osi  $y$   
 $W_y$  - moment otpora oko osi  $y$

Smično naprezanje definirano je izrazom:

$$\tau_{yz} = \frac{N_{xz}}{I_y} \frac{S_y}{t}$$

gdje su:

- $N_{xz}$  - smična sila  
 $I_y$  - moment tromosti oko lokalne osi  $y$   
 $S_y$  - statički moment površine oko lokalne osi  $y$   
 $t$  - debljine elemenata profila

Iznosi  $S_y$  i  $t$  funkcije su dimenzija poprečnog presjeka.

U oplati cilindrične ljuske, između dva vakuumska prstena, membransko meridijalno  $\sigma_{mer}$  i membransko cirkularno  $\sigma_{cir}$  naprezanje određuje se prema:

$$\sigma_{mer} = \frac{p \cdot R}{2t} \quad \sigma_{cir} = \frac{p \cdot R}{t}$$

gdje su:

- $p$  - projektni tlak  
 $R$  - radijus cilindra

$t$  - debljina oplata

Uz pretpostavku da je oplata cilindrične ljuske projektirana kao potpuno napregnuta, meridijalna i cirkularna naprezanja iznose:

$$\sigma_{mer} = \frac{1}{2}\sigma_0 \quad \sigma_{cir} = \sigma_0$$

gdje je  $\sigma_0$  dopušteno membransko jednosmjerno naprezanje.

Ekvivalentno naprezanje u oplati cilindrične ljuske između dva prstena je:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_{mer}^2 + \sigma_{cir}^2 - \sigma_{mer}\sigma_{cir}} = \sigma_0 \sqrt{0.5^2 + 1^2 - 0.5 \cdot 1} = 0.866\sigma_0 \leq \sigma_{mdop}$$

Meridijalna i cirkularna naprezanja za potpuno napregnutu oplatu mogu se napisati u sljedećem obliku:

$$\sigma_{mer} = \frac{1}{2}\sigma_0 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sigma_{mdop}}{0.866} = 0.577\sigma_{mdop}$$

$$\sigma_{cir} = \sigma_0 = \frac{\sigma_{mdop}}{0.866} = 1.155\sigma_{mdop}$$

Ekvivalentno membransko naprezanje ne smije prekoračiti dopuštena membranska naprezanja definirana kao:

$$\sigma_{mdop} = \frac{R_m}{A} \quad \sigma_{mdop} = \frac{R_e}{B}$$

gdje su:

$R_e$  - minimalno naprezanje popuštanja (granica tečenja)

$R_m$  - minimalna vlačna čvrstoća (rastezanja)

$A, B$  - koeficijenti materijala prema registru

Za razmatrani materijal spremnika vrijednost  $\frac{R_m}{A}$  je manja pa time i mjerodavna.

U spoju cilindrične ljuske oplata sa strukom nosivog prstena postoje samo meridijalna naprezanja i ona iznose:

$$\sigma_y = \sigma_{mer} = 0.577\sigma_{mdop} = 0.577 \frac{R_m}{A}$$

U području gdje se spremnik oslanja na drvene oslonce i oslonce protiv plutanja, dodano je pojačanje oplata pa i ono preuzima dio meridijalnih naprezanja. Stoga, meridijalna naprezanja se u oplati reduciraju na:

$$\sigma_y = \sigma_{mer} = 0.577 \sigma_{mdop} = \frac{t_b}{t_b + t_s} 0.577 \frac{R_m}{A}$$

gdje su:

- $t_b$  - debljina cilindrične oplata  
 $t_s$  - debljina lima pojačanja

Von Mises-ova naprezanja za svaki poprečni presjek uzduž nosivog prstena mogu se razmatrati u pet točaka, kao što je prikazano na slici Slika 7.3., koristeći slijedeće izraze:

točka P1 – oplata

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{yz}^2} \quad \sigma_x = \sigma_{xN} + \sigma_{xM_y} \quad \sigma_y = \sigma_{mer}$$

točka P2 – struk u spoju sa oplatom

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_{yz}^2} \quad \sigma_x = \sigma_{xN} + \sigma_{xM_y}$$

točka P3 – struk, u neutralnoj liniji

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_{yz}^2} \quad \sigma_x = \sigma_{xN}$$

točka P4 – struk u spoju sa flanžom

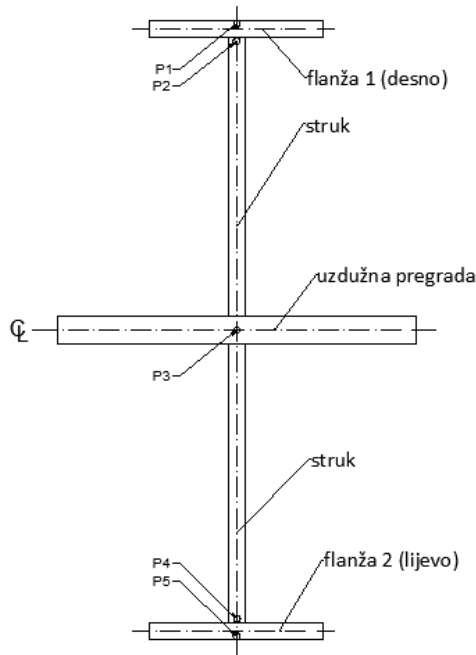
$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_{yz}^2} \quad \sigma_x = \sigma_{xN} + \sigma_{xM_y}$$

točka P5 – flanža

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_{yz}^2} \quad \sigma_x = \sigma_{xN} + \sigma_{xM_y}$$

U slučaju vertikalnog nosača uzdužne pregrade poprečni presjek je simetričan, slika Slika 7.4. Oplata pregrade nalazi se u neutralnoj liniji poprečnog presjeka i stoga je izložena samo normalnim naprezanjima. Točke u kojima se računaju vrijednosti naprezanja prikazane su na slici Slika 7.4.





Slika 7.4. Položaji točaka na poprečnom presjeku vertikalnog nosača pregrade u kojima se računa naprezanje

Za određivanje von Mises-ovih naprezanja korišteni su slijedeći izrazi:

točka P1 – flanža 1 / točka P5 – flanža 2

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_{yz}^2} \quad \sigma_x = \sigma_{xN} + \sigma_{xM_y}$$

točka P2 – struk u spoju sa flanžom 1 / točka P4 – struk u spoju sa flanžom 2

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_{yz}^2} \quad \sigma_x = \sigma_{xN} + \sigma_{xM_y}$$

točka P3 – struk, u neutralnoj liniji (oplata pregrade)

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y} \quad \sigma_y = \sigma_{mer} = 0.577 \sigma_{mdop}$$

## 7.4 Karakteristike materijala i dopuštena naprezanja

Nosivi prstenovi biti će izvedeni iz ugljik-manganova čelika slijedećih svojstava:

$R_e$  - navedena minimalna granica razvlačenja

$$R_e = 345 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$R_m$  - navedena minimalna vlačna čvrstoća

$$R_m = 510 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

Ekvivalentno naprezanje u nosivim prstenovima u ravnini s osloncima ne smije prekoračiti slijedeće vrijednosti:

$$1.5 \frac{R_m}{3} = 1.5 \frac{510}{3} = 255 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$1.5 \frac{R_e}{2} = 1.5 \frac{345}{2} = 258.75 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

odnosno, dopušteno naprezanje:

$$\sigma_{dop} = 1.5 \frac{R_m}{3} = 1.5 \frac{510}{3} = 255 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

U cilindričnoj oplati najveća dopuštena membranska naprezanja moraju biti manja od:

$$\frac{R_m}{A} = \frac{510}{3} = 170 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$\frac{R_e}{B} = \frac{345}{2} = 172.5 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

odnosno, slijedi za dopušteno naprezanje:

$$\sigma_{mdop} = \frac{R_m}{A} = \frac{510}{3} = 170 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

## 7.5 Proračunsko ekvivalentno naprezanje u poprečnim presjecima nosivog prstena

Ekvivalentno naprezanje u poprečnim presjecima uzduž nosivog prstena provjereno je za brod u uspravnom i nagnutom položaju. Faktor iskoristivosti definiran je kao:

$$U_{sf} = \frac{\sigma_{VM}}{\sigma_{dop}} = \frac{\sigma_{VM}}{1.5 \frac{R_m}{3}} \leq 1$$

U prilogu su dane tablice sa geometrijskim karakteristikama različitih poprečnih presjeka prstena (SEC) uređene prema položaju na kojem se dotični presjeci nalaze. Zatim su prikazane tablice sa popisom elemenata, vrijednostima sila i momenta te vrijednostima naprezanja u točkama razmatranja, odvojeno za obodni dio prstena i dio u visini uzdužne pregrade. Za svaki konačni element naznačen je tip poprečnog presjeka (SEC). Odabrani tip poprečnog presjeka provjeren je i za brod u nagnutom položaju. Prikazane su i vrijednosti faktora iskoristivosti koje su manje od jedan za sve elemente čime su zadovoljeni kriteriji naprezanja.

## **7.6 Prilog**

tip presjeka		NOSIVI PRSTEN SR1 (obod)						NOSIVI PRSTEN SR2 (obod)						
		SEC1	SEC2	SEC3	SEC4	SEC5	SEC11	SEC1	SEC2	SEC3	SEC4	SEC5	SEC11	
geometrijske karakteristike presjeka														
visina [m]	$H_z =$	1,3338	1,3338	1,6323	1,8323	1,3120	1,3870	1,3338	1,3338	1,6323	1,8323	1,3120	1,3870	
sunosiva širina oplata [m]	$B_b =$	1,2950	1,3050	1,2860	1,2860	0,6780	0,6780	1,2950	1,3050	1,2860	1,2860	0,6780	0,6780	
debljina oplata [m]	$t_b =$	0,0284	0,0248	0,0248	0,0284	0,0248	0,0248	0,0284	0,0250	0,0284	0,0284	0,0250	0,0250	
širina ojačanja [m]	$B_r =$	0,8000	0,8000	0,8000	0,8000	0,0000	0,0000	0,8000	0,8000	0,8000	0,8000	0,0000	0,0000	
debljina ojačanja [m]	$t_r =$	0,0300	0,0300	0,0300	0,0300	0,0000	0,0000	0,0300	0,0300	0,0300	0,0300	0,0000	0,0000	
debljina struka [m]	$t_y =$	0,0300	0,0400	0,0300	0,0400	0,0300	0,0400	0,0200	0,0300	0,0300	0,0300	0,0200	0,0250	
širina flanže [m]	$B_t =$	0,6000	0,6000	0,6000	0,6000	0,6000	0,6000	0,6000	0,6000	0,6000	0,6000	0,6000	0,6000	
debljina flanže [m]	$t_t =$	0,0300	0,0400	0,0300	0,0300	0,0300	0,0300	0,0300	0,0300	0,0300	0,0300	0,0300	0,0300	
visina dva dodatna prstena za ojačanje [m]	$H_{ar} =$	0,2500	0,2500	0,2500	0,2500	0,0000	0,0000	0,2500	0,2500	0,2500	0,2500	0,0000	0,0000	
debljina prstena za ojačanje [m]	$t_{ar} =$	0,0300	0,0300	0,0300	0,0300	0,0000	0,0000	0,0300	0,0300	0,0300	0,0300	0,0000	0,0000	
površina poprečnog presjeka [m <sup>2</sup> ]	$A =$	0,13114	0,14492	0,13532	0,16328	0,07253	0,08810	0,11869	0,12709	0,13984	0,14584	0,06009	0,06825	
visina z od težišta [m]	$z_t =$	0,92262	0,85508	1,10032	1,20555	0,64748	0,68644	0,95094	0,91175	1,11531	1,24186	0,64655	0,68490	
moment tromosti oko osi y [m <sup>4</sup> ]	$I_y =$	0,03196	0,03772	0,05055	0,07403	0,01933	0,02397	0,02935	0,03146	0,05151	0,06781	0,01772	0,02107	
moment otpora oplata [m <sup>3</sup> ]	$W_{sh} =$	0,07773	0,07879	0,09503	0,11812	0,02908	0,03421	0,07666	0,07455	0,09962	0,11485	0,02663	0,03001	
moment otpora flanže [m <sup>3</sup> ]	$W_{fl} =$	0,03464	0,04411	0,04594	0,06141	0,02985	0,03491	0,03086	0,03451	0,04618	0,05460	0,02741	0,03076	
moment otpora struka [m <sup>3</sup> ]														
u spoju s oplatom	$W_{web,sh} =$	0,09060	0,08898	0,10594	0,13025	0,03021	0,03547	0,09046	0,08572	0,11231	0,12745	0,02767	0,03112	
u spoju s flanžom	$W_{web,fl} =$	0,03581	0,04628	0,04723	0,06297	0,03130	0,03651	0,03187	0,03568	0,04746	0,05596	0,02874	0,03217	

tip presjeka		NOSIVI PRSTEN SR1 (uzdužna pregrada)					NOSIVI PRSTEN SR2 (uzdužna pregrada)						
		SEC6	SEC7	SEC8	SEC9	SEC10	SEC6	SEC7	SEC8	SEC9	SEC10		
geometrijske karakteristike presjeka													
visina [m]	$H_z =$	1,7914	1,4914	1,3878	1,4842	1,7842	1,7914	1,4914	1,3878	1,4842	1,7842		
sunosiva širina pregrade u n.l. [m]	$B_b =$	1,8560	1,2560	1,1120	0,9680	0,9680	1,8560	1,2560	1,1120	0,9680	0,9680		
debljina pregrade [m]	$t_b =$	0,0314	0,0314	0,0295	0,0275	0,0275	0,0164	0,0164	0,0154	0,0143	0,0143		
debljina struka [m]	$t_y =$	0,0300	0,0300	0,0200	0,0300	0,0300	0,0300	0,0300	0,0200	0,0300	0,0300		
širina flanže [m]	$B_t =$	0,6000	0,6000	0,6000	0,6000	0,6000	0,6000	0,6000	0,6000	0,6000	0,6000		
debljina flanže [m]	$t_t =$	0,0400	0,0400	0,0300	0,0400	0,0400	0,0300	0,0300	0,0300	0,0300	0,0300		
visina dva dodatna prstena za ojačanje [m]	$H_{ar} =$	0,5000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,5000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000		
debljina prstena za ojačanje [m]	$t_{ar} =$	0,0300	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0300	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000		
površina poprečnog presjeka [m <sup>2</sup> ]	$A =$	0,18668	0,12884	0,09477	0,11592	0,12492	0,14789	0,09905	0,07937	0,09214	0,10114		
visina z od težišta [m]	$z_t =$	0,89572	0,74570	0,69390	0,74210	0,89210	0,89572	0,74570	0,69390	0,74210	0,89210		
moment tromosti oko osi y [m <sup>4</sup> ]	$I_y =$	0,04935	0,03232	0,02050	0,03196	0,04889	0,04090	0,02656	0,02050	0,02626	0,04051		
moment otpora flanže [m <sup>3</sup> ]	$W_{fl} =$	0,05510	0,04334	0,02954	0,04306	0,05480	0,04567	0,03561	0,02954	0,03538	0,04541		
moment otpora struka u spoju s flanžom [m <sup>3</sup> ]	$W_{web,fl} =$	0,05768	0,04579	0,03088	0,04552	0,05737	0,04725	0,03711	0,03087	0,03687	0,04699		



SRZ - uspravni položaj

Qv = 36786 kN

max. allow. membrane stress 170000 [kN/m²] max. allow. stress 255000 [kN/m²]

Main data table with columns: SEC, ELEMENT, POINT, X, Y, Z, PX unit, PY unit, PZ unit, Normal stress, Shear stress kN/m2, Bending stress kN/m2, Membrane stress, Total normal stress in x-direction kN/m2, VonMises stress kN/m2, VonMises/Max.allowable stress, POINT, ELEMENT.















## 8 Provjera čvrstoće spremnika pomoću prostornog modela

### 8.1 Uvod

U prethodnim poglavljima projektirane su dimenzije konstrukcijskih elemenata spremnika po pravilima Bureau Veritas-a. Definirana su sva opterećenja što djeluju na elemente konstrukcije, a koji su potom dimenzionirani i provjereni prema rezultirajućim naprezanjima i granicama dopuštenih naprezanja za odabrani materijal.

U ovom poglavlju nastojat će se ocijeniti njihovo međudjelovanje, odnosno, odrediti će se ponašanje spremnika kao cjeline. U tu svrhu koristiti će se programski paket „Femap/Nastran“ [14] u kojem će se čvrstoća modela spremnika provjeriti metodom konačnih elemenata. Time će se dobiti odnos naprezanja dobivenih analitičkim putem s vrijednostima naprezanja FEM analize prostornog modela.

### 8.2 Prostorni model

Cjelokupni spremnik se modelirao u programu „Femap“. Nakon definiranja geometrije, stvorena je mreža konačnih elemenata. Nosivi prstenovi sa svim svojim konstrukcijskim dijelovima, osim pojačanja izvedenih grednim elementima, izvedeni su pločastim elementima odgovarajućih debljina. Njima su definirane i stijenke spremnika i uzdužna pregrada. Vakuumski prstenovi u obodnom dijelu i uzdužnjaci uzdužne pregrade modelirani su grednim elementima odgovarajućih geometrijskih karakteristika. U visini uzdužne pregrade vakuumski prstenovi su izvedeni pločastim elementima.

Elementima se pridružilo svojstvo materijala slijedećih karakteristika:

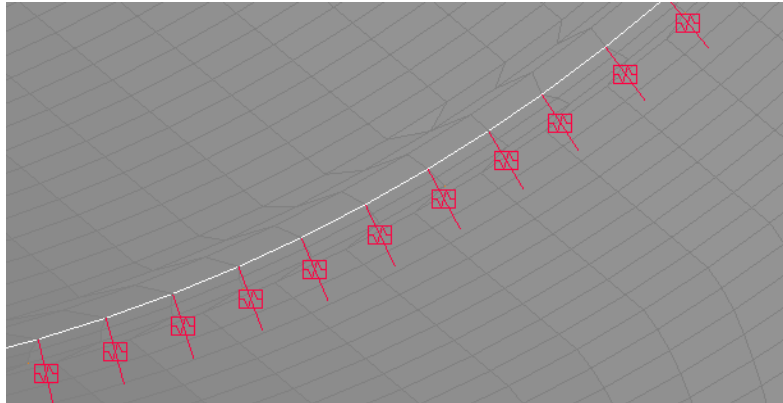
Young-ov modul elastičnosti:  $E = 2.1 \cdot 10^{11}$  [N/m<sup>2</sup>]

Poisson-ov koeficijent:  $\nu = 0.3$

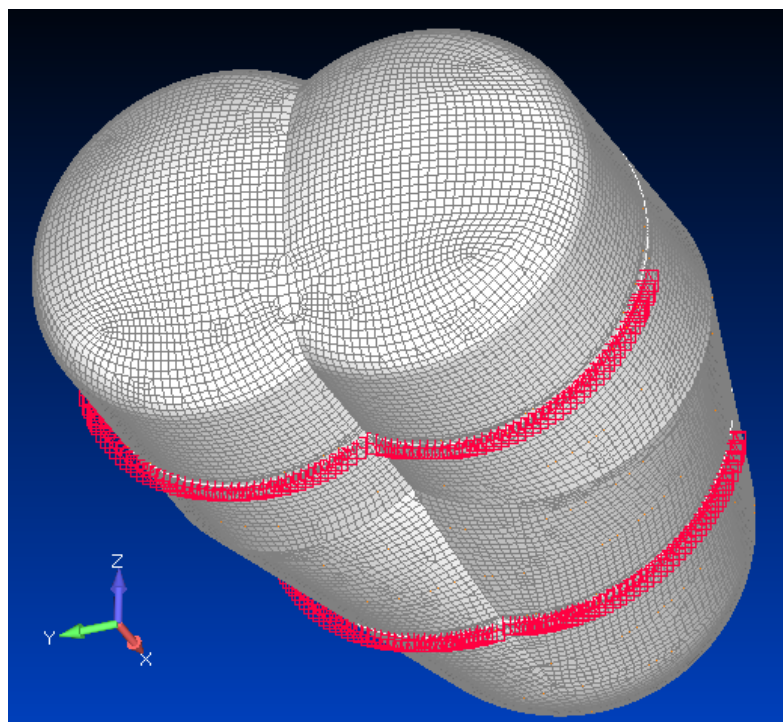
Gustoća:  $\rho = 7850$  [kg/m<sup>3</sup>]

Oslonci spremnika modelirani su oprugama čija je krutost određena u poglavlju 6. Opruge na dnu spremnika izvedene su sa krutošću  $k = 3.92 \cdot 10^7$  [kN/m]. Opruge uzvoja su smanjene na 2/3

vrijednosti  $k$  a na bokovima spremnika na  $k/3$ . One predstavljaju rubne uvjete cjelokupnog modela. Time model dobiva karakteristike stvarnog spremnika koji je smješten unutar brodske strukture i s njom povezan. Rubni uvjeti prikazani su na slikama Slika 8.1. i 8.2.

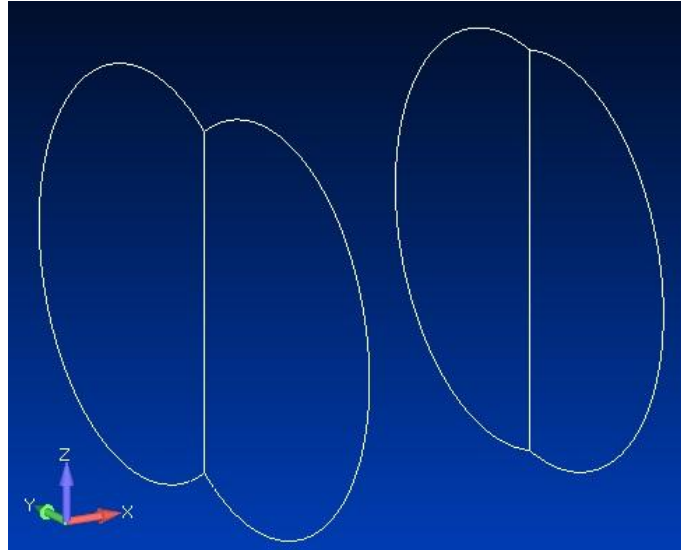


**Slika 8.1.** Opruge modela u funkciji rubnih uvjeta



**Slika 8.2.** Model spremnika sa prikazom položaja opruga

Učvorovima na obodu nosivih prstenova postavljaju se gredni elementi koji prate konturu presjeka stijenke spremnika i uzdužne pregrade u ravnini y-z. Njihov presjek je  $0.001 \times 0.001$  [m], slika Slika 8.3. Pomoću ovih elemenata prenijet će se na model smično opterećenje, odnosno, distribucija smičnih sila za uspravan i nagnut položaj broda.



Slika 8.3. Oblik i položaj grednih elemenata 0.001x0.001 [m]

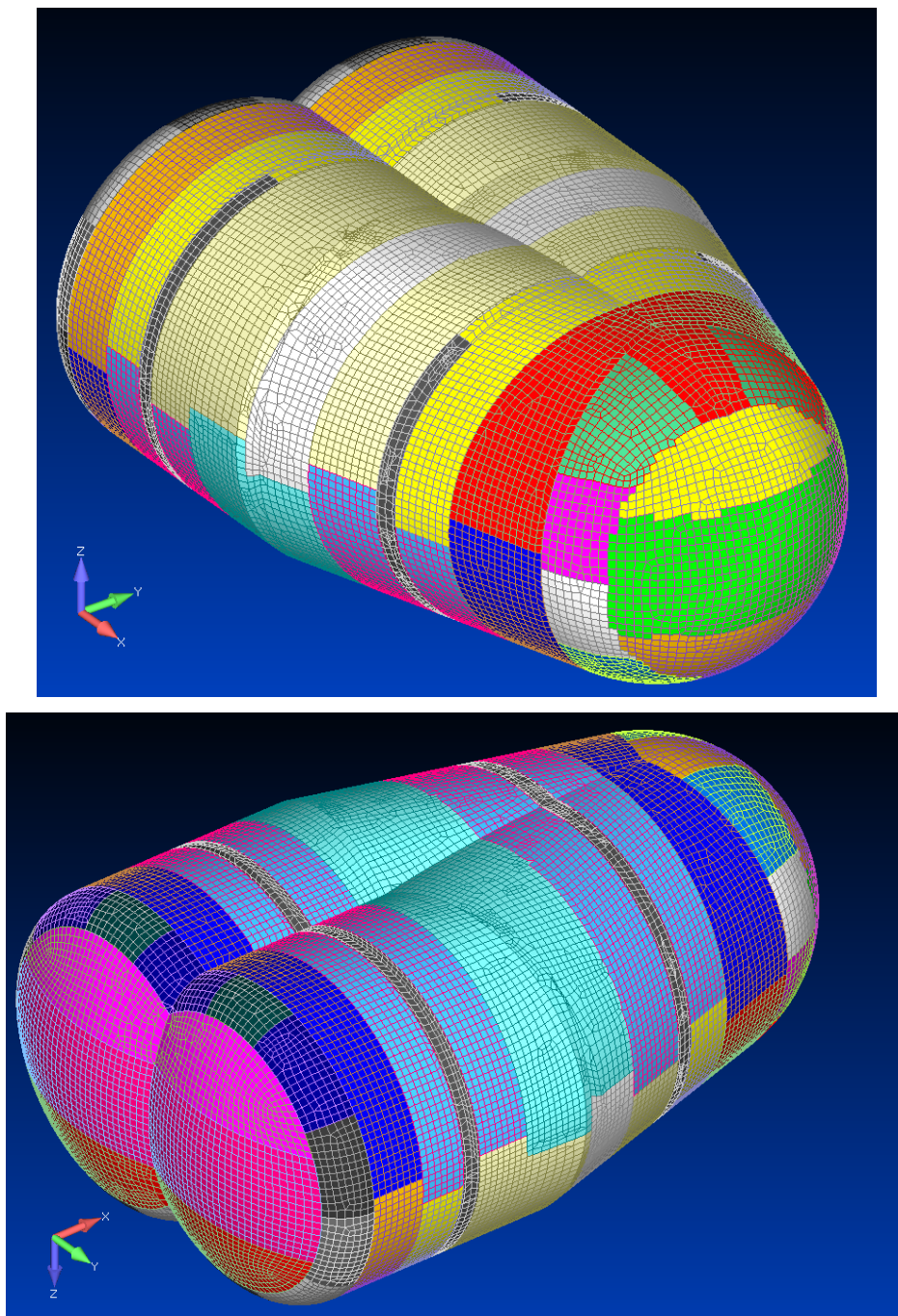
Elementi stijenke spremnika još su podvrgnuti djelovanju projektog tlaka od 5.3 [bar].

### 8.3 Mreža konačnih elemenata

Model se sastoji od dvije vrste elemenata: pločastih (shell), koji su definirani sa tri ili sa četiri čvora, i grednih (bar), linijskih elemenata s mogućnošću definiranja geometrije poprečnog presjeka. Odabrana, prosječna veličina elementa iznosi 0.3x0.3 [m]. „Femap“ sam stvara mrežu na zadanoj geometriji, a koju, ovisno o složenosti te geometrije, treba naknadno korigirati i prilagoditi. Završna mreža modela, slika Slika 8.4., sastoji se od ukupno 34 188 konačna elementa; 3 372 grednih te 30 008 četvrtastih i 808 trokutastih pločastih elemenata.

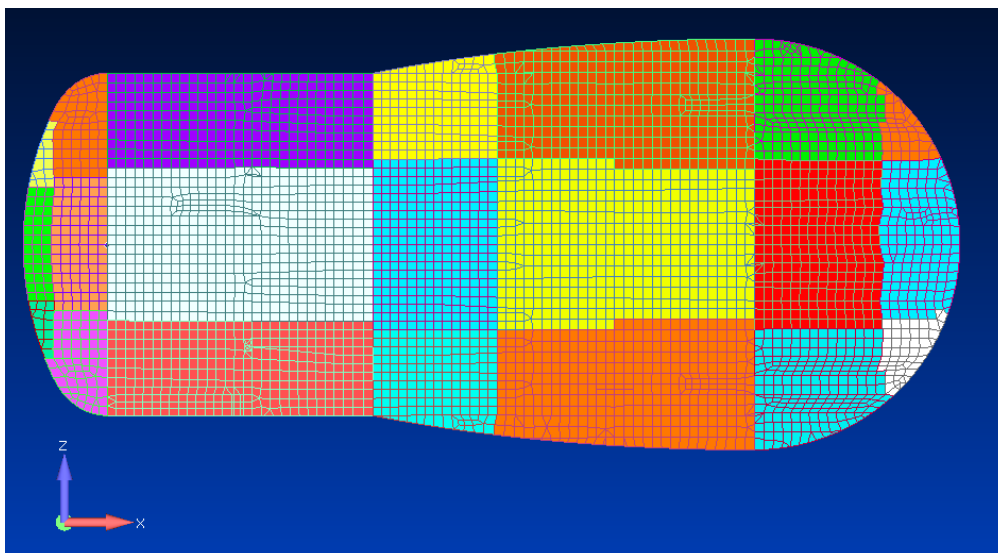
Stijenke spremnika i uzdužne pregrade modelirane su pločastim elementima, slike Slika 8.4. i Slika 8.5. Različitim bojama naznačene su različite debljine stijenke, prema poglavlju 4. Na slici Slika 8.6. su prikazani konstrukcijski elementi spremnika izvedeni pomoću grednih konačnih elemenata.



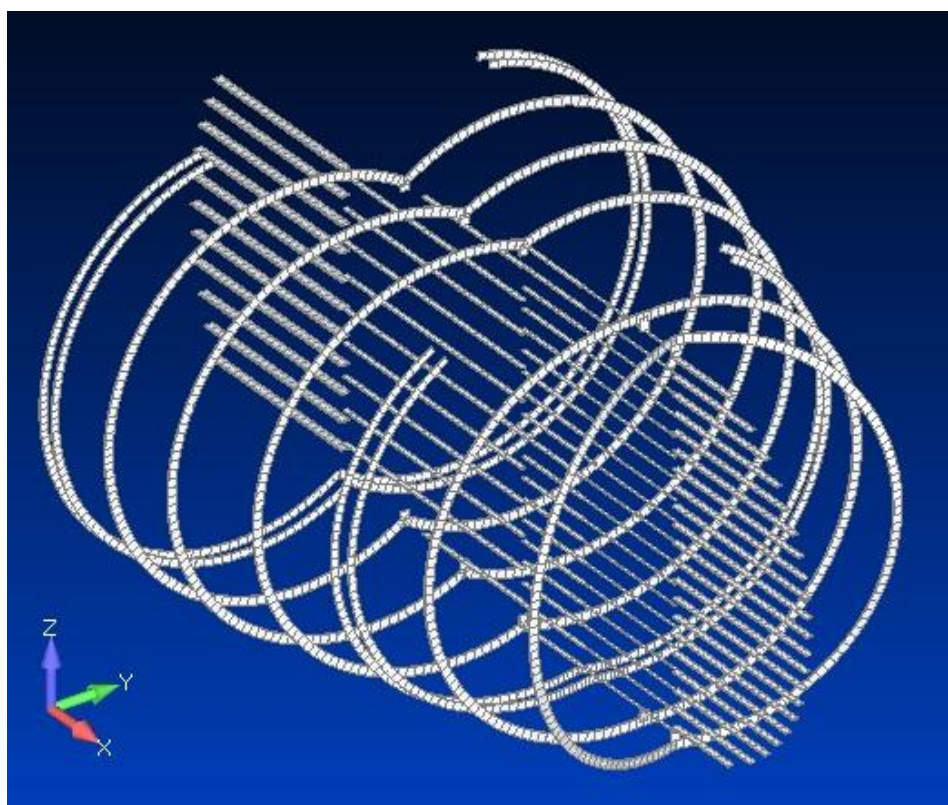


Slika 8.4. Mreža konačnih elemenata stijenske spremnika



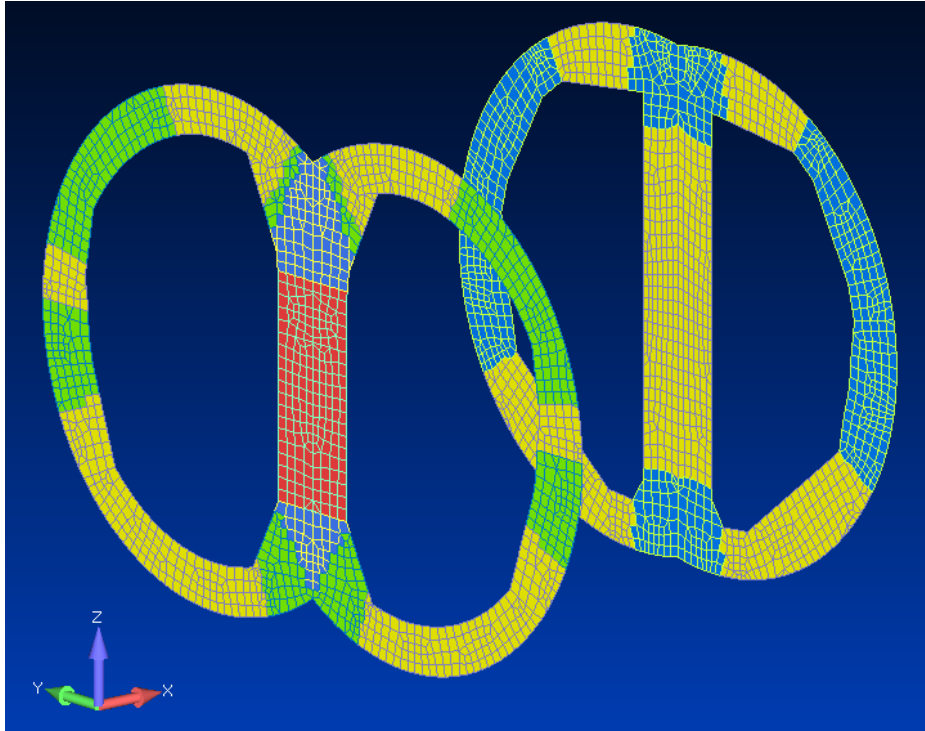


Slika 8.5. Mreža konačnih elemenata uzdužne pregrade



Slika 8.6. Gredni elementi

Na slici Slika 8.7. su prikazani položaji različitih debljina strukova nosivih prstena.



Slika 8.7. Debljine struka nosivih prstenova

## 8.4 Provjera modela

Nakon što je dovršeno modeliranje model se provjerava kontrolnim proračunom. Masa spremnik mora odgovarati masi modela. Zadaje se utjecaj sile teže koja rezultira masom modela. Iz [4] masa spremnika proizlazi da je 616 [t] dok se za vrijednost mase modela proračunom dobije 613 [t].

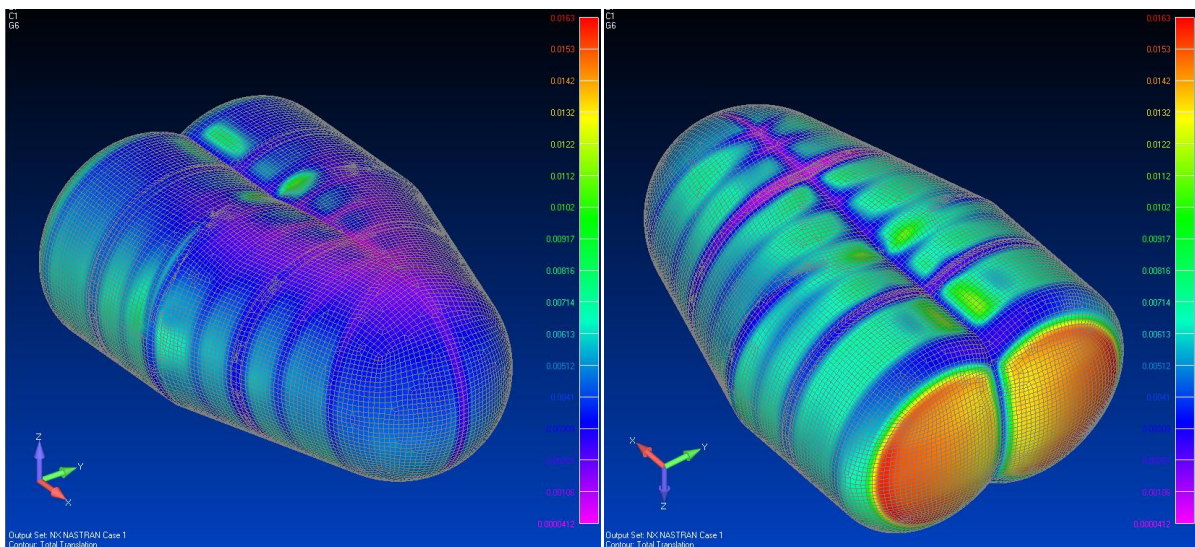
## 8.5 Proračun za zadane slučajevne opterećenja

Kao što je već navedeno na model će djelovati kombinirano opterećenje tlaka na stijenke spremnika od 5.3 [bar] i smičnog opterećenja. Distribucija smičnih sila dobivena je za brod u uspravnom i nagnutom položaju pa će se proračuni raditi na dva odvojena modela: uspravnom i nagnutom.

### 8.5.1 Uspravni model

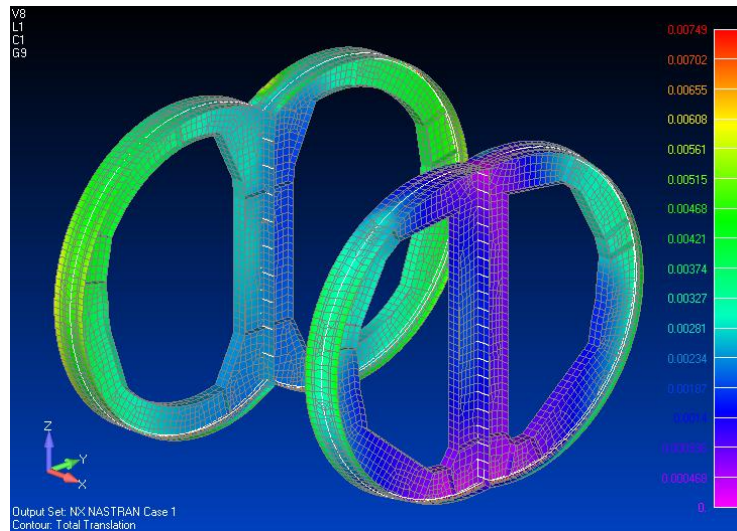
Uspravni model opterećen je vertikalnom smičnom silom  $Q_{vSR1} = 47911$  [kN] na položaju nosivog prstena SR1 i  $Q_{vSR2} = 36786$  [kN] na položaju nosivog prstena SR2. Opterećenje se zadaje kao distribucija uzdužnih sila na gredne elemente prikazane na slici Slika 8.3. Oblik i položaj grednih elemenata  $0.001 \times 0.001$  [m]

Na slici Slika 8.8. prikazane su ukupne deformacije stijenke modela. Najveća vrijednost se javlja na stražnjem torusnom dijelu i iznosi  $16.3$  [mm].



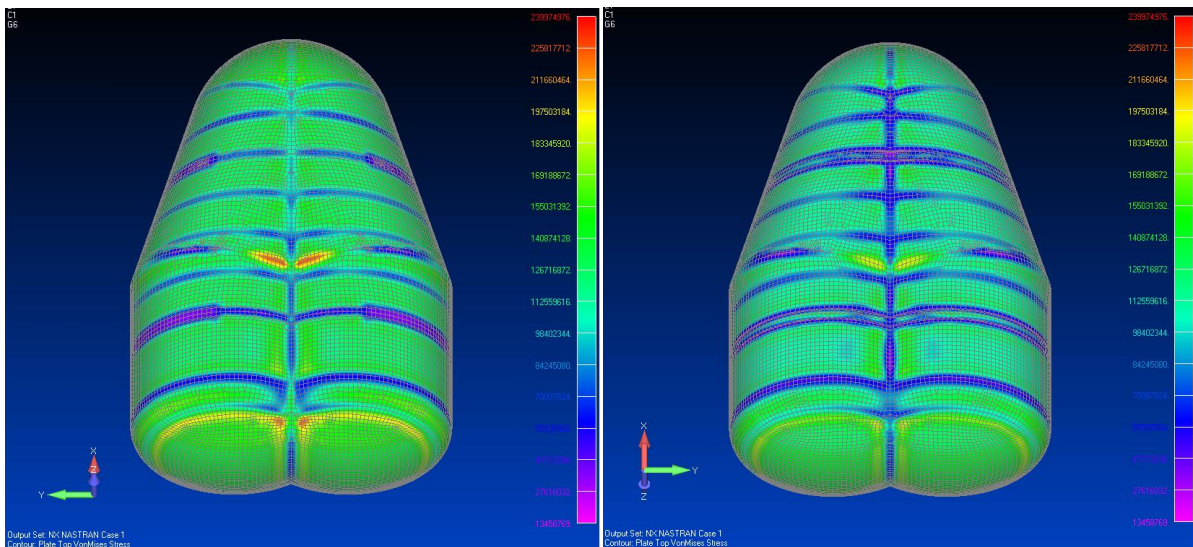
Slika 8.8. Ukupne deformacije stijenke modela

Na slici Slika 8.9. prikazane su ukupne deformacije nosivih prstenova s najvećom vrijednošću od  $6$  [mm]



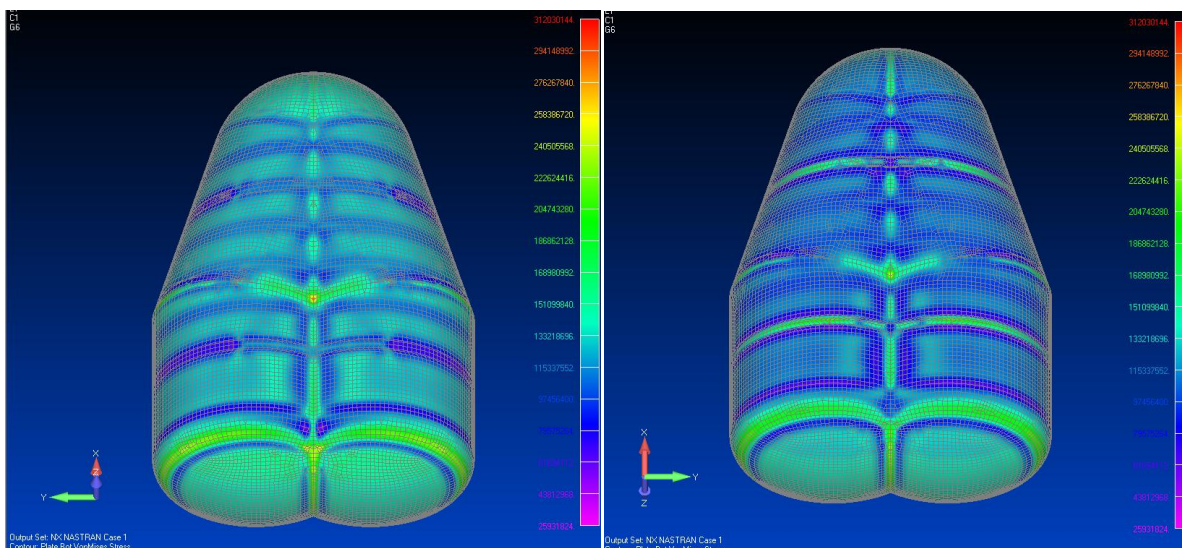
**Slika 8.9.** Ukupne deformacije nosivih prstena

Na slikama Slika 8.10. i Slika 8.11. prikazana su ekvivalentna naprezanja u vanjskim i unutarnjim vlaknima stijenke modela.



**Slika 8.10.** Ekvivalentna naprezanja u vanjskim vlaknima stijenke modela



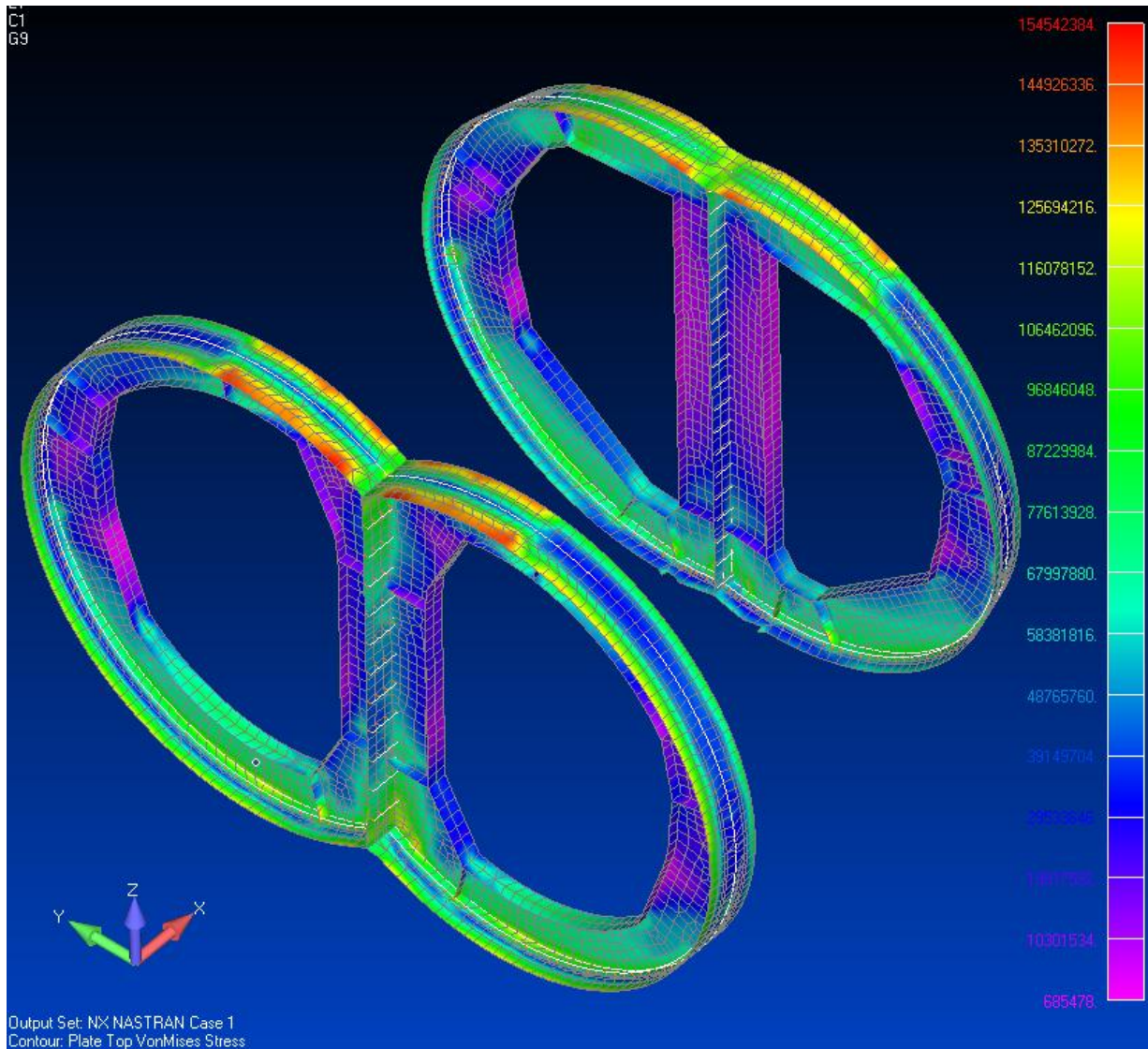


Slika 8.11. Ekvivalentna naprezanja u unutarnjim vlaknima stijenke modela

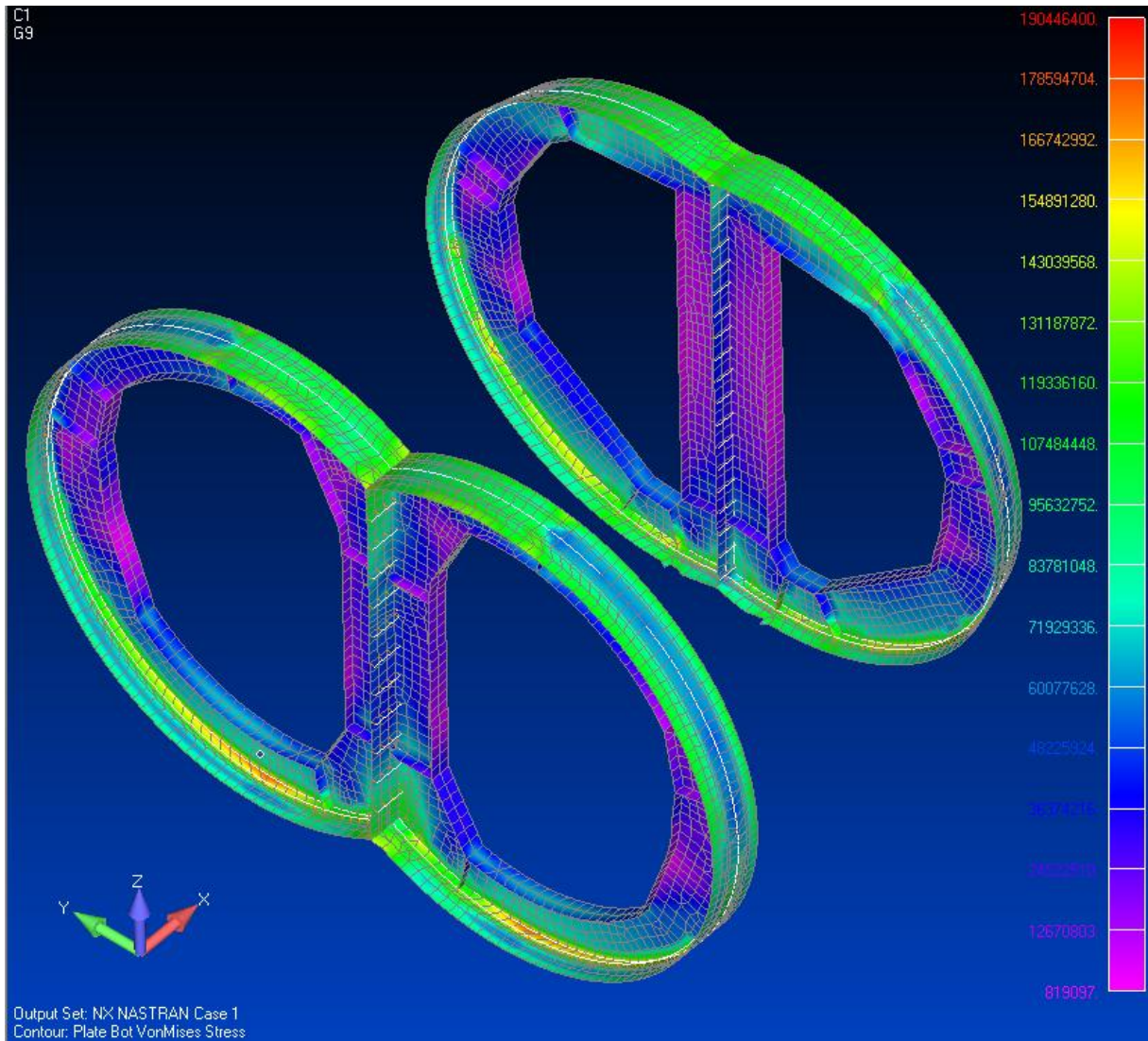
Iz rezultata proizlazi da se na mjestu spoja cilindričnih ljusaka, u položaju uzdužne pregrade, javljaju koncentracije naprezanja koje su znatno veće za unutarnja vlakna na gornjoj stijenci modela. Na tom mjestu naprezanje iznosi  $312 \text{ [N/mm}^2\text{]}$ . Naprezanja vanjskih vlakna na istom kritičnom mjestu, iznose do  $240 \text{ [N/mm}^2\text{]}$ .

Konačni rezultati naprezanja nosivih prstenova prikazani su slikama Slika 8.12.Slika 8.13.

Najveća naprezanja u vanjskim vlaknima javljaju se u dnu struka nosivih prstenova sa vrijednostima do  $125 \text{ [N/mm}^2\text{]}$  što se odgovara vrijednostima naprezanja grednog modela za isto područje od  $120 \text{ [N/mm}^2\text{]}$ .



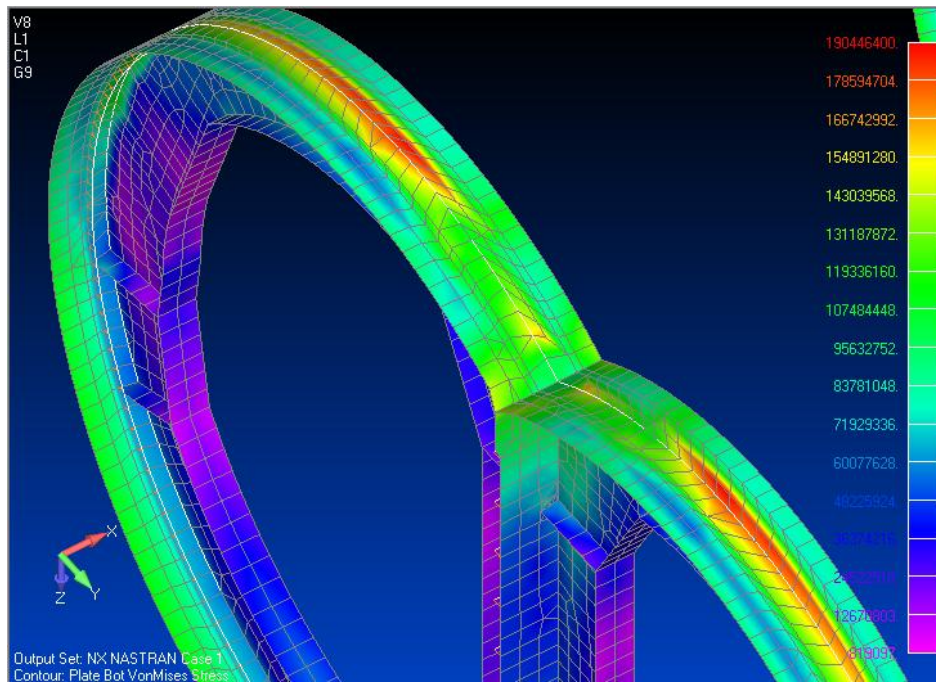
Slika 8.12. Ekvivalentna naprezanja u vanjskim vlaknima nosivih prstenova



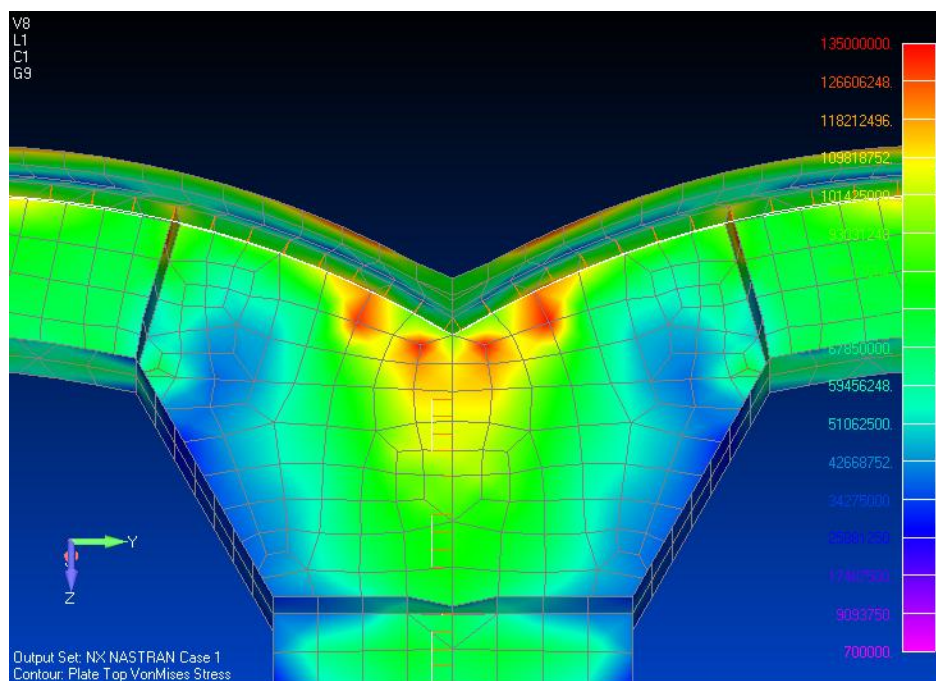
**Slika 8.13.** Ekvivalentna naprezanja u unutarnjim vlaknima nosivih prstenova

Na slici Slika 8.14. prikazane su koncentracije naprezanja unutarnjih vlakana koja se javlju na donjoj strani modela. Nastaju kao posljedica djelovanja opruga, odnosno oslonaca na koje je spremnik oslonjen. koje predstavljaju drvene grede na kojima je spremnik smješten. Najveća vrijednost od 190  $[N/mm^2]$  pojavljuju se na nosivom prstenu SR1 i smanjuje se sa smanjenjem krutosti opruga prema boku modela.





**Slika 8.14.** Koncentracije naprezanja unutarnjih vlakana donjeg dijela nosivog prstena SR1



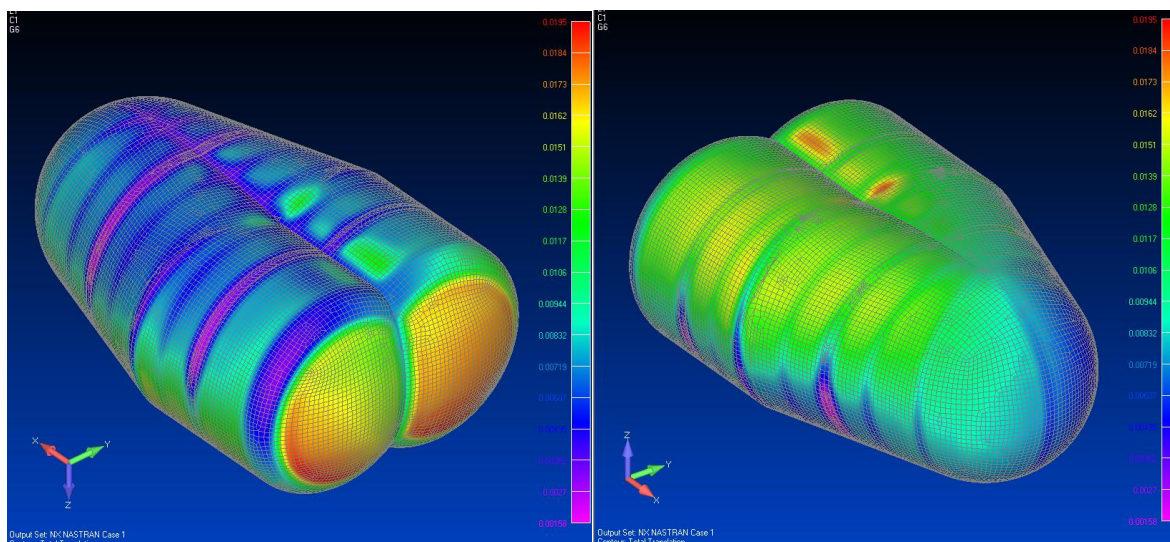
**Slika 8.15.** Koncentracije naprezanja vanjskih vlakana donjeg dijela nosivog prstena SR1



### 8.5.2 Nagnuti model

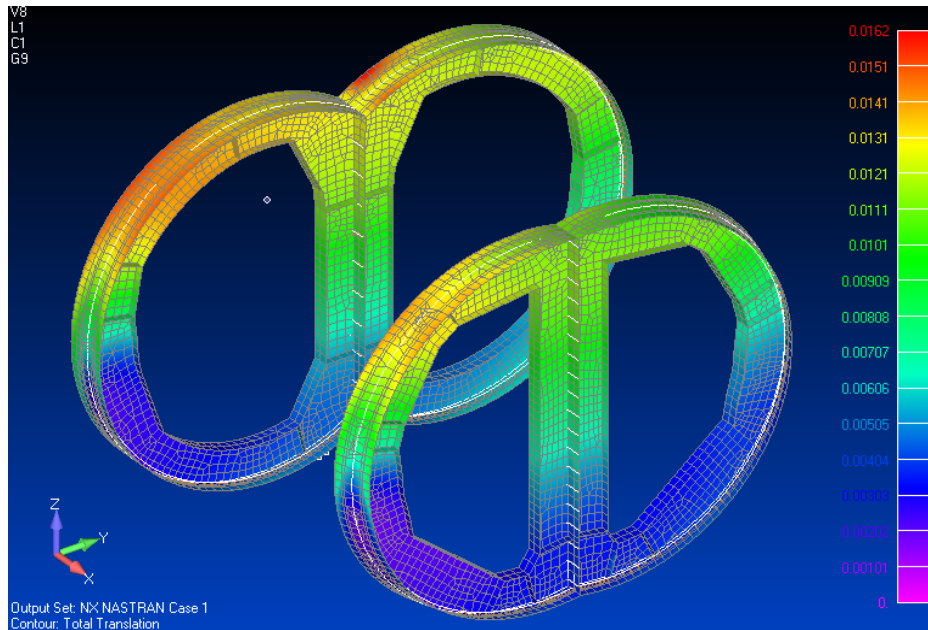
Nagnuti model opterećen je kosom smičnom silom  $Q_{30SR1} = 34721$  [kN] na položaju nosivog prstena SR1 i  $Q_{30SR2} = 25519$  [kN] na položaju nosivog prstena SR2. Opterećenje se zadaje kao distribucija smičnih sila na gredne elemente prikazane na slici Slika 8.3. Oblik i položaj grednih elemenata  $0.001 \times 0.001$  [m] Kako ne bi utjecale na rezultate proračuna, uklonjene su tri najviše opruge sa lijevog boka modela.

Na slici Slika 8.16. i prikazane su ukupne deformacije stijenke modela. Najveća vrijednost i kod nagnutog modela se javlja na stražnjem torusnom dijelu i iznosi 19.5 [mm]. Uslijed kose sile opterećenja javljaju se i koncentracije deformacija na mjestu gornje stijenke modela gdje ne postoji orebrenje te u području spoja dviju cilindričnih ljuski. Vrijednosti ovih deformacija ne prelaze 17 [mm].



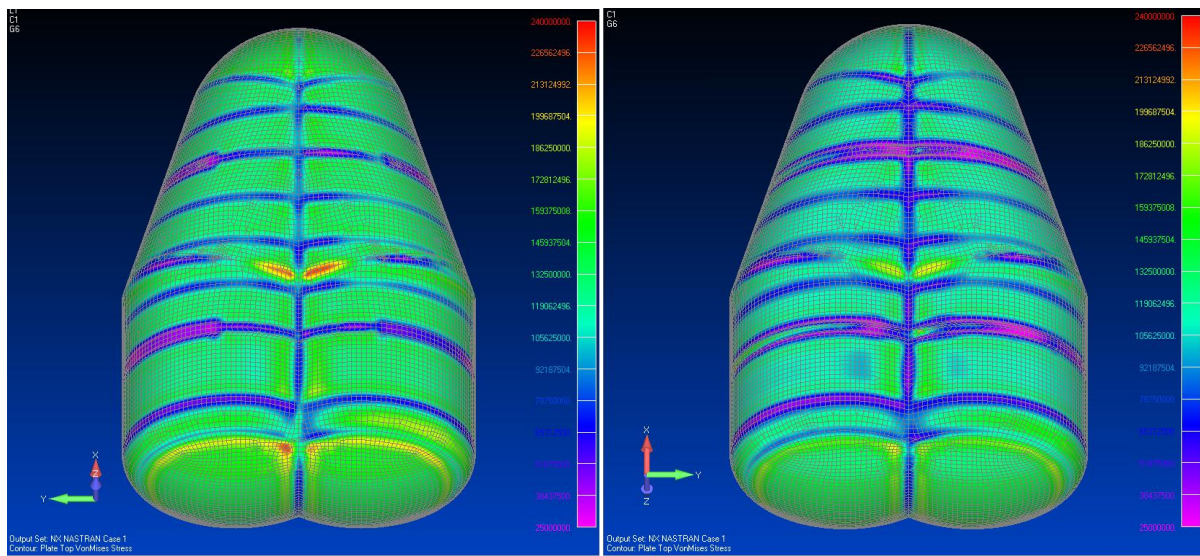
Slika 8.16. Ukupne deformacije stijenke modela

Najveće deformacije nosivih prstenova javljaju se u njihovom gornjem dijelu i iznose 15 [mm] kako je i prikazano na slici Slika 8.17.

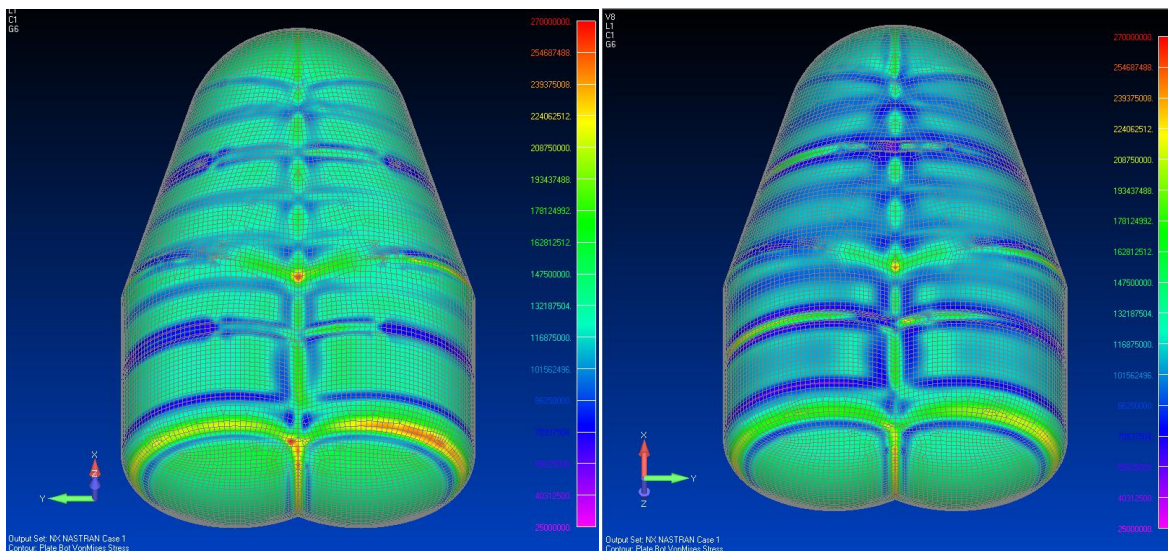


Slika 8.17. Ukupne deformacije nosivih prstenova

Na slikama Slika 8.18. i Slika 8.19. prikazana su ekvivalentna naprezanja u vanjskim i unutarnjim vlaknima stijenke modela.

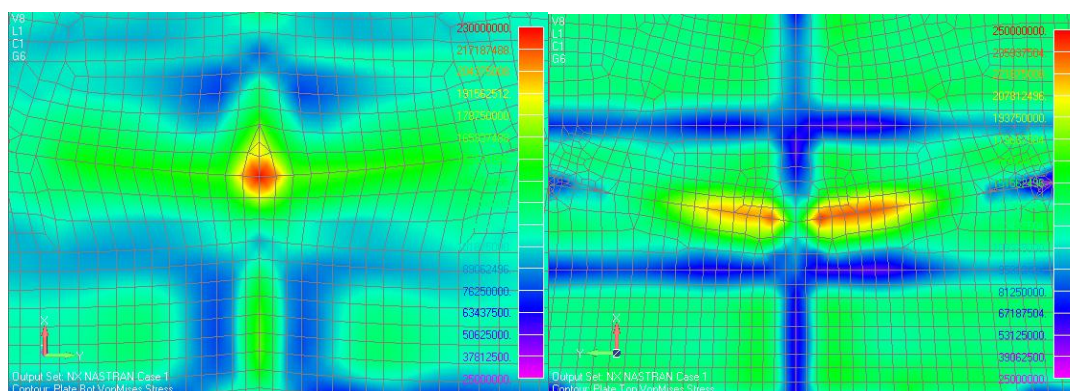


Slika 8.18. Ekvivalentna naprezanja u vanjskim vlaknima stijenke modela (u prikazu ograničena na 240 [N/mm<sup>2</sup>])



Slika 8.19. Ekvivalentna naprezanja u unutarnjim vlaknima stijenke modela (u prikazu ograničena na 270 [N/mm<sup>2</sup>])

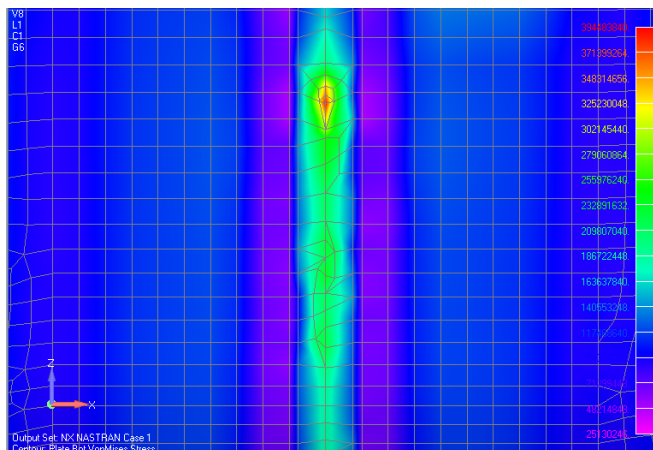
Iz slike Slika 8.20. se vidi da se koncentracije naprezanja javljaju na spoju dviju cilindričnih ljusaka modela kako na gornjoj tako i na donjoj strani.



Slika 8.20. Koncentracije naprezanja unutarnjih (lijevo) i vanjskih (desno) vlakana na spoju cilindričnih ljusaka

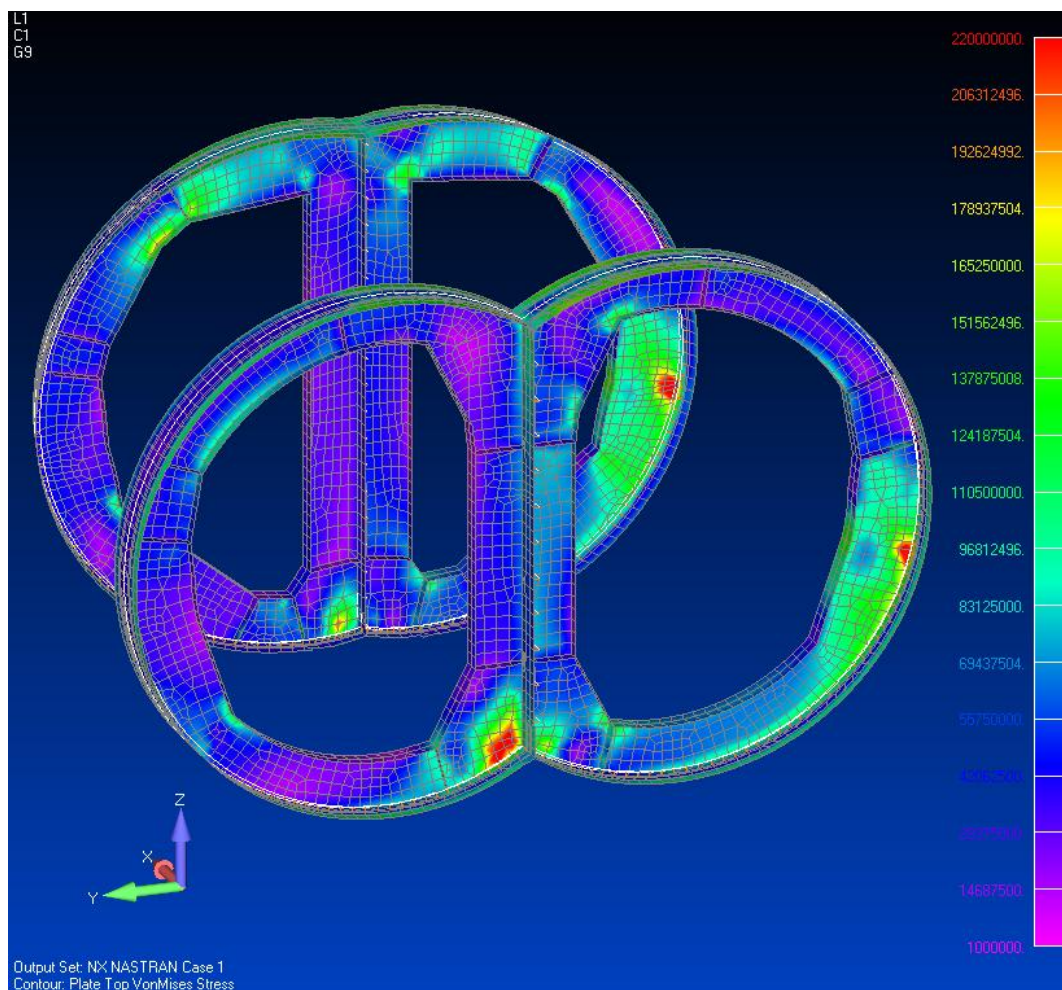
Očekivano, naprezanja rastu i u području torusne ljuske. Vrijednosti ovih naprezanja ne prelaze 270 [N/mm<sup>2</sup>]. Na mjestu najviše opruge na mjestu drugog nosivog prstena javlja se koncentracija naprezanja u unutarnjim vlaknima od 394 [N/mm<sup>2</sup>], slika Slika 8.21.



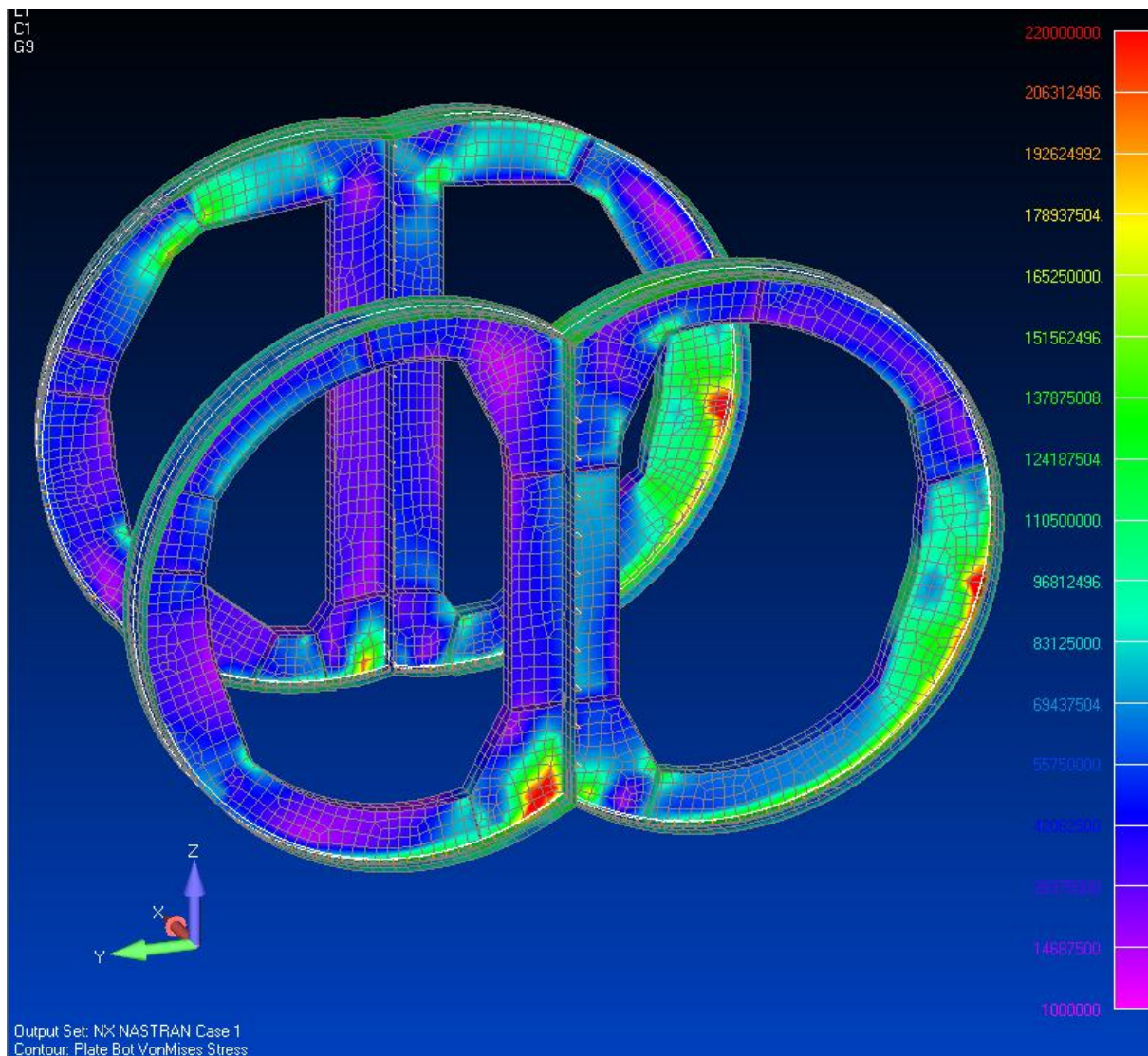


Slika 8.21. Koncentracija naprezanja unutarnjih vlakana na nosivom prstenu SR2

Kod modela opterećenog kosom silom žarišta naprezanja na nosivim prstenovima vide se na slici Slika 8.22. za vanjsko vlakno, odnosno, slici Slika 8.23. za unutarnje vlakno. Kao što je već utvrđeno, najveća vrijednost naprezanja pojavljuje se na mjestu spoja nosivog prstena SR2 sa zadnjom oprugom na boku ali koncentracije naprezanja se mogu uočiti i na mjestu zadnje opruge na dnu spremnika.



Slika 8.22. Ekvivalentna naprezanja u vanjskim vlaknima nosivih prstenova (u prikazu ograničena na 220 [N/mm<sup>2</sup>])



**Slika 8.23.** Ekvivalentna naprezanja u unutarnjim vlaknima nosivih prstenova (u prikazu ograničena na 240 [N/mm<sup>2</sup>])

## 8.6 Zaključak

U ovom poglavlju nastojala se provjeriti čvrstoća spremnika pomoću prostornog modela. Elementi konstrukcije, proračunati u prethodnim poglavljima, modelirani su primjerenim elementima određenih karakteristika. Definirani su rubni uvjeti kao i vrste opterećenja koja će djelovati na model. Ukratko su opisani rezultati proračuna sa analizom ključnih mjesta konstrukcije.

Najveća vrijednosti naprezanja dobivenih FEM analizom iznosi 282 [N/mm<sup>2</sup>] za uspravni model, odnosno, 467 [N/mm<sup>2</sup>] za nagnuti model. Naprezanje popuštanja za čelik spremnika iznosi 345 [N/mm<sup>2</sup>] pa uspravni model zadovoljava s kriterija čvrstoće. Kod nagnutog modela, uslijed kose

smične sile, javlja se velika koncentracija naprezanja na nosivim prstenovima u mjestu zadnje opruge, posebice na SR2 prstenu. Najveća ekvivalentna naprezanja grednog modela javljaju se na istom mjestu ali ona iznose 222 [N/mm<sup>2</sup>].

Ako se usporede ostale vrijednosti naprezanja nosivih prstena prostornih modela sa rezultatima ekvivalentnih naprezanja grednog modela može se zaključiti da se povećane vrijednosti pojavljuju na sličnim mjestima.

Izgled deformacija nosivih prstena u oba prostorna modela sličan je deformaciji prstena grednog modela. Deformacije stijenke modela u granicama su očekivanog.

## 9 Zaključak

Danas je potreba za različitim vrstama plinova sve izraženija a brodovi za prijevoz ukapljenog plina čine sve veći udio u svjetskoj floti. Spremnici, kao njihov najznačajniji dio konstrukcije, predstavljaju posebne jedinice koje zahtjevaju detaljan pristup pri projektiranju. Poznavanje konstrukcije i njezinih specifičnosti predstavlja osnovu za ispravno i kvalitetno projektiranje.

Cilj ovog diplomskog rada bio je da se dobije uvid u način projektiranje konstrukcije jednog primjera takvog spremnika. Nastojale su se što vjernije prikazati specifičnosti ponašanja takve konstrukcije, definirati njezini problemi i načini na koji se ti problemi rješavaju.

Glavni zahtjev klasifikacijskog društva, koji se javlja u projektiranju svih konstrukcijskih elemenata, definiranje je projektnih uvjete posebno za spremnik u uspravnom položaju i posebno za spremnik u nagnutom položaju.

Osnovu za daljnje projektiranje predstavljalo je određivanje debljina stijenki spremnika i uzdužne pregrade. S obzirom na dopušteno naprezanje, dimenzionirane su ukrepe uzdužne pregrade i vakuumski prstenovi. Unutar spremnika pozicionirana su dva nosiva prstena koji predstavljaju osnovu cjelokupne konstrukcije. Prenose statička i dinamička opterećenja na oslonce spremnika koji se uslijed opterećenja savija što uzrokuje smične sile u prstenovima. Tok tih sila određene su programom „Stiff“ u skladu sa teorijom tankostjenih nosača a metodom konačnih elemenata na grednom modelu određene su presječne sile u nosivim prstenovima programom „SESAM“. Određenim reakcijama u osloncima i definiranim vrijednostima presječnih sila postavljeni su uvjeti za određivanje konačnih geometrijskih karakteristika nosivih prstenova.

Kako bi se dobio potpuni uvid u ponašanje konstrukcije, spremnik je modeliran u programu „Femap“. Time su elementi konstrukcije, projektirani na osnovi grednog modela, podvrgnuti provjeri metodom konačnih elemenata na prostornom modelu. Dobiveni rezultati usporedivi su sa rezultatima grednog modela i najveće vrijednosti naprezanja javljaju se na istim položajima na nosivim prstenovima. FEM analizom prostornog modela također su se ukazala mjesta koncentracije naprezanja. Za očekivati je bilo povećanje naprezanja na mjestima gdje završavaju opruge na modelu, odnosno, oslonci na spremniku, posebno za slučaj nagnutog spremnika. Također, spoj torusne ljske sa sferičnom pokazuje povećana naprezanja.

Neočekivano, naprezanja su porasla na mjestu spoja dviju cilindričnih ljsaka u gornjem i donjem dijelu modela. Elementima konstrukcije na tim mjestima treba ponovno pristupiti i dimenzionirati ih obzirom na rezultate naprezanja dobivenih prostornim modelom.

## Literatura

- [1] SIGTTO, Society of International Gas Tanker& Terminal Operators Ltd: Safe Havens for Disabled Gas Carriers, Third Edition, February 2003.
- [2] S. Rudan: Sigurnost konstrukcije spremnika na brodovima za prijevoz ukapljenog plina, Doktorska disertacija, Fakultet strojarstava i brodogradnje, Zagreb, 2006.
- [3] Bureau Veritas: Rules for the Classification of Steel Ships - April 2005 edition (entry into force 1 July 2005)
- [4] Tomić, Senjanović: Geometrical and physical parametars of bilobe cargo tanks 21000 cbm LPG, Report no. 3
- [5] B. Kraut: Strojarski priručnik, str. 46-48, 7. izdanje, Tehnička knjiga, Zagreb, 1982.
- [6] I. Senjanović, Y. Fan: A high-order theory of thin-walled girders with aplication to ship structures, Computers & Structures, Vol.43, No.1, pp.31-52, 1992.
- [7] I. Senjanović, Y. Fan: A finite element formulation of ship cross-sectional stiffness parameters, Brodogradnja 41 (1993) 1, 27-36.
- [8] Y. Fan, I. Senjanović: STIFF User's manual, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, Zagreb, 1999.
- [9] I. Senjanović, J. Parunov, S. Rudan: Ukrućenje nesavršenih čela dvodjelnih spremnika na brodu za prijevoz ukapljenog plina, Brodogradnja 60 (2009) 3, 290-297
- [10] SESAM User's manual, Det Norske Veritas, Hovik, 1999.
- [11] I. Senjanović, S. Tomašević, B. Brekalo: Strength analysis of stifening rings of bilobe cargo tanks in Liquefied Gas Carriers, The 14th Symposium Theory and Practice of Naval Architecture, SORTA, Trogir, 2002.
- [12] Handbook of Structural Stability, Edited by Column Research Committee of Japan, Corona Publishing Company, Ltd. Tokyo, 1971.
- [13] O.F. Hughes: Ship Structural Design, A Rotionally-Based, Computer Aided Optimisation Approach, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1988.
- [14] FEMAP User's manual, Siemens PLM Software, 2010.



