

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Beltram, M., 2014. Analiza metod za dimenzioniranje obročastih ojačitev jeklenih rezervoarjev. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Sinur, F.): 166 str.

Datum arhiviranja: 04-11-2014

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Beltram, M., 2014. Analiza metod za dimenzioniranje obročastih ojačitev jeklenih rezervoarjev. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Sinur, F.): 166 pp.

Archiving Date: 04-11-2014

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*

Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si



UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI
PROGRAM GRADBENIŠTVO
KONSTRUKCIJSKA SMER

Kandidat:

MATJAŽ BELTRAM

**ANALIZA METOD ZA DIMENZIONIRANJE
OBROČASTIH OJAČITEV JEKLENIH
REZERVOARJEV**

Diplomska naloga št.: 3408/KS

**METHODS FOR STABILITY DESIGN OF RING
STIFFENED STEEL TANKS**

Graduation thesis No.: 3408/KS

Mentor:

doc. dr. Franc Sinur

Predsednik komisije:

izr. prof. dr. Janko Logar

Član komisije:

doc. dr. Tomaž Maher

Ljubljana, 29. 10. 2014

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Podpisani Matjaž Beltram izjavljam, da sem avtor diplomskega dela z naslovom »Analiza metod za dimenzioniranje obročastih ojačitev jeklenih rezervoarjev«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, 16.10.2014

Matjaž Beltram

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

| | |
|-------------------------|---|
| UDK: | 624.014.2(497.4)(043.2) |
| Avtor: | Matjaž Beltram |
| Mentor: | doc. dr. Franc Sinur |
| Naslov: | Analiza metod za dimenzioniranje obročastih ojačitev jeklenih konstrukcij |
| Tip dokumenta: | Diplomska naloga – univerzitetni študij |
| Obseg in oprema: | 166 str., 38 pregl., 6 graf., 76sl. |
| Ključne besede: | jekleni rezervoarji, stabilnost, standardi, priporočila, primerjava, ojačitve, Abaqus, Matlab, program, BuckleTank |

Izvelek:

Diplomska naloga obravnava stabilnost jeklenih rezervoarjev. Ker imajo jekleni rezervoarji zelo veliko razmerje med radijem in debelino stene, je potrebno poseben poudarek nameniti kontroli stabilnosti. Ta je najbolj kritična v primeru praznega rezervoarja in delovanja vetrne obtežbe. Da povečamo uklonsko odpornost rezervoarja, mu lahko dodamo obročne ojačitve. Predstavili in med seboj primerjali smo standarde in priporočila za kontrolo stabilnosti rezervoarjev (API650 in EN14015, ter Evropska priporočila ECCS 5th Edition). Primerjavo smo izvedli na dejanskem rezervoarju v začetnem in trenutnem stanju, kjer se je debelina zaradi korozije občutno zmanjšala. Opravljene so bile tudi numerične LBA, GMNA in GMNIA analize za potrebe kontrole standardov. Z GMNIA analizo smo preverili odpornost rezervoarja, GMNA analiza pa nam je služila kot kontrola zajema začetnih nepopolnosti v GMNIA analizi. Te smo določili s pomočjo LBA analize, s katero smo poiskali tudi optimalna mesta ojačitev in jih primerjali z mesti dobljenimi po standardih.

Glavna ideja diplomske naloge je bila izdelava računalniškega programa, ki bi poenostavil in skrajšal kontrolo stabilnosti rezervoarjev. V ta nam smo izdelali program »BuckleTank«, ki omogoča tako projektiranje novega kot kontrolo obstoječega rezervoarja po zgoraj naštetih standardih. Dodatno omogoča tudi generiranje vhodnih podatkov in zagon numerične analize v programu SIMULIA Abaqus FEA.

BIBLIOGRAFHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**UDC:** 624.014.2(497.4)(043.2)**Author:** Matjaz Beltram**Supervisor:** Assist. Prof Franc Sinur, PhD**Title:** Methods for stability design of ring stiffened steel tanks**Document type:** Graduation Thesis – University studies**Scope and tools:** 166 p., 38 tab., 6 graf., 76fig.**Keywords:** steel tanks, stability, codes, recommendations, comparison, stiffening rings, Abaqus, Matlab, program, BuckleTank**Abstract:**

The diploma thesis deals with design of steel tanks. Since the steel tanks are very slender (high ratio between the radius and plate thickness), special attention should be given to stability check. The most critical load situation to stability loss is when the wind load acts on the empty tank. To increase the buckling resistance of the steel tank the ring stiffeners are applied. Within the framework of the thesis the international design specification for buckling design of ring stiffened steel tanks (API650 and EN 14015 Standard and European recommendations ECCS 5th Edition) are given and compared. The design recommendations were used and compared on the already-built tank, for the built and current state, where the plates thicknesses were reduced due to steel corrosion. Additionally the LBA, GMNA and GMNIA numerical analysis of the tank were performed and compared to the results obtained by the design specifications. The GMNIA analysis was used to compare numerically obtained resistance to design specifications, while the LBA analysis was used to find the optimal position of the ring stiffener and to reproduce initial imperfection shape for GMNIA analysis.

One of the main ideas of the diploma thesis was to build a computer program that would perform stability design of ring stiffened tanks. To this end the program “BuckleTank”, which allows for buckling design of new as well as existing tanks in accordance to above mentioned design specifications was build. In addition the program also allows the generation and execution of python file which performs required analysis (FEA, GMNA, GMNIA) in program SIMULIA Abaqus FEA.

ZAHVALA

Za pomoč, usmerjanje in koristne nasvete bi se v prvi vrsti zahvalil mentorju doc. dr. Francu Sinurju. Posebna zahvala gre tudi prof. Darku Begu, ki je zaslužen za moje zanimanje nad jeklenimi konstrukcijami.

Posebna zahvala gre prijateljem in sošolcem, še posebej Marku S., Gorazdu, Janku, Tomažu, Tinetu, Žigi, Janezu, Matevžu in Marku A., brez katerih študiranje ne bi bilo tako zanimivo.

Največja zahvala pa gre mami, očetu, Juliji in ostalim družinskim članom, ki so mi omogočili študij in me vseskozi podpirali in spodbujali.

KAZALO VSEBINE

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | UVOD | 1 |
| 2 | ECCS BUCKLING OF STEEL SHELLS EUROPEAN RECOMMENDATION, 5TH EDITION, 2008 [6] | 5 |
| 2.1 | Robni pogoji | 5 |
| 2.2 | Material | 6 |
| 2.3 | Geometrijske tolerance in nepopolnosti | 6 |
| 2.3.1 | Odstopanje od kroga | 7 |
| 2.3.2 | Slučajna ekscentričnost pri stikovanju segmentov | 8 |
| 2.3.3 | Lokalne nepopolnosti | 10 |
| 2.4 | Obtežba | 12 |
| 2.5 | Projektiranje rezervoarjev s konstantno debelino | 14 |
| 2.5.1 | Vertikalni uklon | 16 |
| 2.5.2 | Uklon v obodni smeri | 19 |
| 2.5.3 | Strig | 22 |
| 2.5.4 | Interakcija | 25 |
| 2.6 | Projektiranje rezervoarjev s spremenljivo debelino | 27 |
| 2.6.1 | Predpostavke | 27 |
| 2.6.2 | Vertikalni uklon | 28 |
| 2.6.3 | Uklon v obodni smeri | 29 |
| 2.6.4 | Strig | 34 |
| 2.7 | Kontrola ojačitev rezervoarja | 34 |
| 2.7.1 | Območje med ojačitvami | 38 |
| 2.7.2 | Ojačitve | 39 |
| 3 | EN 14015:2004 [7] | 46 |
| 3.1 | Projektiranje primarne ojačitve | 46 |
| 3.2 | Projektiranje sekundarne ojačitve | 47 |
| 4 | API 650 [8] | 50 |
| 4.1 | Projektiranje primarne ojačitve | 50 |
| 4.2 | Projektiranje sekundarne ojačitve | 51 |
| 5 | PRIMERJAVA MED STANDARDI | 53 |
| 5.1 | Primerjava med standardi na dejanskem primeru | 56 |
| 5.2 | Začetno stanje | 58 |
| 5.2.1 | EN14015 | 58 |
| 5.2.2 | API650 | 61 |
| 5.2.3 | ECCS 5th Edition | 63 |

| | | |
|-------------|---|------------|
| 5.2.4 | Povzetek in primerjava standardov | 88 |
| 5.3 | Trenutno stanje | 89 |
| 5.3.1 | EC14015 | 89 |
| 5.3.2 | API 650 | 92 |
| 5.3.3 | ECCS 5th Edition | 95 |
| 5.3.4 | Povzetek in primerjava med standardi | 126 |
| 6 | NUMERIČNA ANALIZA | 128 |
| 6.1 | Model | 128 |
| 6.2 | Material | 128 |
| 6.3 | Materialna nelinearnost | 128 |
| 6.4 | Geometrijska nelinearnost | 129 |
| 6.5 | Geometrijske nepopolnosti | 129 |
| 6.6 | Robni pogoji | 130 |
| 6.7 | Obtežba | 130 |
| 6.8 | Analize | 131 |
| 6.9 | Začetno stanje | 132 |
| 6.9.1 | LBA analiza | 132 |
| 6.9.2 | GMNIA analiza | 133 |
| 6.9.3 | GMNA analiza | 135 |
| 6.9.4 | Primerjava rezultatov in komentar | 137 |
| 6.9.5 | Kontrola postavitve ojačitev | 138 |
| 6.10 | Trenutno stanje | 142 |
| 6.10.1 | LBA analiza | 142 |
| 6.10.2 | GMNIA analiza | 144 |
| 6.10.3 | GMNA analiza | 145 |
| 6.10.4 | Primerjava rezultatov in komentar | 147 |
| 7 | PROGRAM ZA RAČUN STABILNOSTI REZERVOARJEV »BuckleTank« | 149 |
| 7.1 | Uvod | 149 |
| 7.2 | Shema delovanja programa | 151 |
| 7.3 | Delovanje | 152 |
| 7.3.1 | Račun po enačbah standardov | 152 |
| 7.3.2 | Numerična analiza | 160 |
| 8 | ZAKLJUČEK | 163 |
| VIRI | | 165 |

KAZALO PREGELDNIC

| | |
|--|-----|
| Preglednica 2.1: Tipi robnih pogojev | 6 |
| Preglednica 2.2: Tolerance odstopanja od kroga | 8 |
| Preglednica 2.3: Mejna tolerance slučajne ekscentričnosti | 9 |
| Preglednica 2.4: Brezdimenzijska mejna toleranca slučajne ekscentričnosti | 10 |
| Preglednica 2.5: Tolerance lokalnih nepopolnosti | 12 |
| Preglednica 2.6: Vrednost parametra C_{xb} | 17 |
| Preglednica 2.7: Vrednost parametra Q | 18 |
| Preglednica 2.8: Vrednost parametra C_{θ} | 20 |
| Preglednica 2.9: Vrednosti $C_{\theta s}$ | 21 |
| Preglednica 2.10: Elastični redukcijski faktor nepopolnosti | 21 |
| Preglednica 2.11: Strižni elastični nadomestni faktor nepopolnosti | 24 |
| Preglednica 2.12: Določitev sodelujočega dela rezervoarja za račun upogibnega momenta | 37 |
| Preglednica 2.13: Tolerance parametra za račun začetne obodne ukrivljenosti | 38 |
| Preglednica 2.14: Tolerance zasuka ojačitve | 38 |
| Preglednica 2.15: Vrednost η glede na način izdelave pločevine | 43 |
| Preglednica 3.1: Minimalen odpornostni moment ojačitve glede na radij rezervoarja | 48 |
| Preglednica 5.1: Primerjava med standardi | 54 |
| Preglednica 5.2: Začetne dimenzije rezervoarja | 56 |
| Preglednica 5.3: Izkoriščenost po segmentih rezervoarja | 73 |
| Preglednica 5.4: Dimenzije območja rezervoarja pod prvo ojačitvijo | 79 |
| Preglednica 5.5: Dimenzije območja pod prvo ojačitvijo za kontrolo uklona v vertikalni smeri | 83 |
| Preglednica 5.6: Primerjava med standardi | 88 |
| Preglednica 5.7: Dimenzije rezervoarja v trenutnem stanju | 89 |
| Preglednica 5.8: Dimenzije območja nad prvo ojačitvijo | 96 |
| Preglednica 5.9: Dimenzije območja nad prvo ojačitvijo | 98 |
| Preglednica 5.10: Dimenzije območja med prvo in drugo ojačitvijo | 102 |
| Preglednica 5.11: Dimenzije območja pod drugo ojačitvijo | 103 |
| Preglednica 5.12: Dimenzije območja nad prvo ojačitvijo | 109 |
| Preglednica 5.13: Dimenzije območja med prvo in drugo ojačitvijo | 112 |
| Preglednica 5.14: Dimenzije območja med drugo in tretjo ojačitvijo | 113 |
| Preglednica 5.15: Dimenzije tretjega območja za račun uklona v vertikalni smeri | 115 |
| Preglednica 5.16: Dimenzije območja pod tretjo ojačitvijo | 118 |

| | |
|---|-----|
| Preglednica 5.17: Dimenzije za kontrolo vertikalnega uklona | 121 |
| Preglednica 5.18: Izkoriščenost po segmentih rezervoarja | 126 |
| Preglednica 5.19: Primerjava med standardi za trenutno stanje | 127 |
| Preglednica 6.1: Priporočene vrednosti parametrov za določitev amplitude nepopolnosti | 130 |
| Preglednica 6.2: Predpostavke analiz | 131 |
| Preglednica 6.3: Primerjava različnih analiz | 137 |
| Preglednica 6.4: Primerjava različnih analiz za trenutno stanje | 148 |

KAZALO GRAFIKONOV

| | |
|--|-----|
| Grafikon 2.1: Krivulje za določitev vrednosti $\kappa(1)$ | 32 |
| Grafikon 2.2: Krivulje za določitev vrednosti $\kappa(2)$ | 32 |
| Grafikon 2.3: Krivulje za določitev vrednosti $\kappa(3)$ | 33 |
| Grafikon 2.4: Minimalna upogibna togost ojačitve | 40 |
| Grafikon 6.1: Primerjava med inženirskim in dejanskim diagramom jekla uporabljenim v Abaqusu | 129 |
| Grafikon 6.2: Primerjava pozicij ojačitev | 142 |

KAZALO SLIK

| | |
|--|----|
| Slika 1.1: Jekleni rezervoarji [1] | 1 |
| Slika 1.2: Gradnja rezervoarja [3] | 1 |
| Slika 1.3: Porušitev odprtih rezervoarjev zaradi hurikana Hugo, St. Croix, 1989 [4] | 2 |
| Slika 1.4: Uklon rezervoarja zaradi delovanja vetra, Otok Guam, 2002 [4] | 2 |
| Slika 1.5: Uklon rezervoarja med hurikanom Georges, Puerto Rico, 1998 [4] | 3 |
| Slika 1.6: Uklon rezervoarja med delovanje hurikana Georges, Puerto Rico, 1998 [4] | 3 |
| Slika 1.7: Primer rezervoarja s horizontalno ojačitvijo [5] | 4 |
| Slika 2.1: Shema rezervoarja | 5 |
| Slika 2.2: Idealno elastičen - idealno plastičen material | 6 |
| Slika 2.3: Odstopanje od kroga | 8 |
| Slika 2.4: Slučajna ekscentričnost (levo), namenski zamik (sredina) in skupna ekscentričnost (desno) | 9 |
| Slika 2.5: Dolžina meritve nepopolnosti v primeru prisotnosti osne tlačne napetosti | 10 |
| Slika 2.6: Dolžina meritve nepopolnosti v primeru prisotnosti obročnih ali strižnih napetosti | 11 |
| Slika 2.7: Dolžina meritve v okolici zvarov | 11 |
| Slika 2.8: Dejanski pritisk vetra okoli rezervoarja | 13 |
| Slika 2.9: Predpostavljena obtežba vetra | 13 |
| Slika 2.10: Diagram relativne vitkosti | 14 |
| Slika 2.11: Glavne smeri in glavne napetosti | 15 |
| Slika 2.12: A) kratki B) srednji C) vitki rezervoar | 16 |
| Slika 2.13: Primer potek napetosti, kot posledice vpliva vetra in lastne teže pri kratkih rezervoarjih | 26 |
| Slika 2.14: Stena rezervoarja s spremenljivo debelino | 27 |
| Slika 2.15: Zamik stikajočih se segmentov | 28 |
| Slika 2.16: Pretvorba dejanskega rezervoarja na nadomestni rezervoar treh debelin | 30 |
| Slika 2.17: Pretvorba nadomestnega rezervoarja treh debelin na rezervoar konstantne debeline | 31 |
| Slika 2.18: Sodeljuoč prerez ojačitve | 36 |
| Slika 2.19: Predpostavljen model za račun maksimalnega upogibnega momenta pri vertikalni obtežbi | 42 |
| Slika 3.1: Sodeljuoč prerez ojačitve | 47 |
| Slika 5.1: Shema rezervoarja | 57 |
| Slika 5.2: Korekcija pozicije zaradi bližine spoja segmentov | 60 |
| Slika 5.3: Pozicija ojačitev po EN14015 | 60 |
| Slika 5.4: Pretvorba na nadomestni rezervoar treh debelin | 64 |
| Slika 5.5: Dimenzije nadomestnega rezervoarja | 65 |

| | |
|--|-----|
| Slika 5.6: Nadoemstna dolžina rezervoarja | 66 |
| Slika 5.7: Obtežba vetra | 72 |
| Slika 5.8: Shema območij rezervoarja z eno ojačitvijo po priporočilih ECCS | 74 |
| Slika 5.9: Pozicija ojačitev po EN14015 | 92 |
| Slika 5.10: Pozicija ojačitev po API650 | 94 |
| Slika 5.11: Shema treh ojačitev po priporočilih ECCS | 109 |
| Slika 5.12: Izkoriščenost po območjih po Evropskih priporočilih ECCS | 126 |
| Slika 6.1: Obtežba na rezervoarju | 131 |
| Slika 6.2: Model rezervoarja | 132 |
| Slika 6.3: Prva izbočitvena oblika rezervoarja v začetnem stanju | 133 |
| Slika 6.4: Potek napetosti v rezervoarju po GMNIA analizi | 134 |
| Slika 6.5: Graf nanašanja obtežbe na model | 135 |
| Slika 6.6: Deformacijska oblika rezervoarja pri GMNIA analizi | 135 |
| Slika 6.7: Potek napetosti po rezervoarju pri GMNA analiz | 136 |
| Slika 6.8: Deformacijska oblika rezervoarja po GMNA analizi | 136 |
| Slika 6.9: Pomik po višini rezervoarja | 137 |
| Slika 6.10: Shema različnih primerov postavitve ojačitev | 139 |
| Slika 6.11: Prva izbočitvena oblika rezervoarja z ojačitvijo na $H=3,60\text{m}$ | 139 |
| Slika 6.12: Prva izbočitvena oblika rezervoarja z ojačitvijo na $H=3,56\text{m}$ | 140 |
| Slika 6.13: Prva izbočitvena oblika rezervoarja z ojačitvijo na $H=3,86\text{m}$ | 141 |
| Slika 6.14: Prva izbočitvena oblika rezervoarja v trenutnem stanju | 143 |
| Slika 6.15: Model rezervoarja z dodano ojačitvijo | 143 |
| Slika 6.16: Prva izbočitvena oblika rezervoarja z dodano ojačitvijo v trenutnem stanju | 144 |
| Slika 6.17: Potek napetosti po GMNIA analizi | 145 |
| Slika 6.18: Deformacijska oblika rezervoarja po GMNIA analizi | 145 |
| Slika 6.19: Potek napetosti po GMNA analizi | 146 |
| Slika 6.20: Deformacijska oblika po GMNA analizi | 146 |
| Slika 6.21: Pomiki tekom višine rezervoarja | 147 |
| Slika 7.1: Prvi zavihek | 152 |
| Slika 7.2: Drugi zavihek pri kontroli obstoječega rezervoarja (levo) in pri projektiranju novega rezervoarja (desno) | 153 |
| Slika 7.3: Tretji zavihek pri kontroli obstoječega (levo) in pri projektiranju novega rezervoarja (desno) | 154 |

| | |
|---|-----|
| Slika 7.4: Tretji zavihek pri kontroli obstoječega rezervoarja (levo) in pri projektiranju novega rezervoarja (desno) | 154 |
| Slika 7.5: Baza ojačitev | 155 |
| Slika 7.6: Četrty zavihek | 156 |
| Slika 7.7: Podrobnejši opis kategorije terena | 157 |
| Slika 7.8: Podrobnejši opis izbire razreda izdelave | 157 |
| Slika 7.9: Podrobnejši opis robnih pogojev | 157 |
| Slika 7.10: Peti zavihek | 158 |
| Slika 7.11: Predlagana mesta ojačitev novega rezervoarja (levo) in kontrola obstoječega (desno) po EN14015 | 159 |
| Slika 7.12: Kontrola obstoječega rezervoarja brez ojačitev po ECCS (levo) in API650 (desno) | 159 |
| Slika 7.13: Kontrola stene rezervoarja in ojačitve po priporočilih ECCS 5th Edition | 160 |
| Slika 7.14: Način zajema nepopolnosti | 160 |
| Slika 7.15: Rezultat LBA analize in izbira uklonske oblike | 161 |
| Slika 7.16: Podajanje obtežb in obtežnih kombinacij | 162 |

»Ta stran je namenoma prazna«

1 UVOD

Rezervoarji so cilindrične konstrukcije namenjene shranjevanju tekočih snovi (slika 1.1). Po svoji obliki so podobni dimnikom, zelo vitkim cilindrom in pa silosom, ki se od rezervoarjev ločijo po namembnosti uporabe. Slednji so namenjeni shranjevanju trdnih snovi, kot so živila, gradbeni material ipd.



Slika 1.1: Jekleni rezervoarji [1]

Za gradnjo rezervoarja se uporabljata dva materiala; jeklo in beton. Izbiro materiala skoraj vedno narekuje cena. Pa najsi bo to sama cena izdelave, čas potreben za izdelavo, stroški vzdrževanja ali življenjska doba konstrukcije. Jekleni rezervoarji so po ceni izdelave cenejši, cenejše je tudi njihovo vzdrževanje, življenjska doba pa je daljša. Prav tako je njihova izdelava hitrejša, in v primerjavi z betonskimi rezervoarji nimajo problemov s pronicanjem tekočine [2].



Slika 1.2: Gradnja rezervoarja [3]

Moramo pa seveda biti pri projektiranju jeklenih rezervoarjev previdni. Debeline sten jeklenih rezervoarjev so zelo tanke, le nekaj milimetrov v zgornjih segmentih. Razmerje med radijem in debelino stene rezervoarja je zato zelo velika, kar posledično vpliva na velikost občutljivosti na uklon. Dimenzije jeklenih rezervoarjev v primeru majhne potresne nevarnosti narekuje hidrostatični pritisk tekočine znotraj rezervoarja in s tem kontrola dopustnih napetosti na meji elastičnosti. Pri tem pa ne smemo pozabiti na kontrolo stabilnosti.



Slika 1.3: Porušitev odprtih rezervoarjev zaradi hurikana Hugo, St. Croix, 1989 [4]

Večina rezervoarjev je sestavljena iz segmentov različnih debelin, kar je posledica ekonomičnosti (slika 1.2). Pri dnu rezervoarja so pritiski večji in posledično je zahtevana debelina stene rezervoarja večja. Višje kot je segment, manjša je potrebna debelina. Če sledimo temu konceptu pa lahko pride v zgornjem delu rezervoarja do stabilnostnega problema.



Slika 1.4: Uklon rezervoarja zaradi delovanja vetra, Otok Guam, 2002 [4]

Za stabilnost je najbolj kritičen primer praznega rezervoarja med delovanjem vetrne obtežbe. Cilindrična zasnova omogoča prevzem zelo velikih nateznih obodnih napetosti, a je po drugi strani

zaradi velike vitkosti (razmerja med radijem in debelino – r/t) občutljiva na tlačne obremenitve. Prave te generira obtežba vetra, ki v primeru praznega rezervoarja nima odpornosti tekočine z notranje strani. K manjši uklonski odpornosti še dodatno vpliva lastna teža rezervoarja in strehe. Znanih je več primerov, ko je ob delovanju močnega vetra in nizkega nivoja tekočine v rezervoarju prišlo do uklona stena ali pa celo porušitve. Nekaj primerov je prikazanih na slikah 1.3 – 1.6.



Slika 1.5: Uklon rezervoarja med hurikanom Georges, Puerto Rico, 1998 [4]

Ena izmed možnosti za povečanje uklonske odpornosti rezervoarja je seveda povečanje debeline stene rezervoarja. Druga, bolj ekonomična pa je namestitev ojačitev po steni rezervoarja.



Slika 1.6: Uklon rezervoarja med delovanje hurikana Georges, Puerto Rico, 1998 [4]

Ojačitve so lahko vertikalne, horizontalne ali pa kombinirane. Uporabijo se lahko ojačitve različnih oblik; L – kotniki, U – profili, I – profili ali pa enostavne ojačitve pravokotnega prečnega prereza. Najbolj pogosta je uporaba horizontalnih ojačitev, kot je vidno na sliki 1.7. Tako Evropski standard

EN14015 kot tudi Ameriški API650 v svojih zahtevah predpostavljata uporabo horizontalne ojačitve. V predpisih ECCS projektiranje horizontalnih ojačitev zajema samostojno poglavje. V diplomski nalogi smo se zato omejili samo na horizontalne ojačitve.



Slika 1.7: Primer rezervoarja s horizontalno ojačitvijo [5]

Ojačitve rezervoar razdelijo na več območij. V primeru, da so ojačitve dovolj toge vsako območje obravnavamo kot samostojen rezervoar.

V začetku diplomske naloge so opisani predpisi, ki zajemajo kontrolo stabilnosti jeklenih rezervoarjev. To je priporočilo ECCS Buckling of Steel Shells European Recommendation, 5th Edition, ter standarda EN14015 in API650. V nadaljevanju je opravljena kontrola obstoječega rezervoarja po naštetih standardih, ter njihova primerjava. Kot kontrola standardom je bila izvedena še numerična analiza s pomočjo programa SIMULIA Abaqus FEA.

Glavna ideja diplomske naloge je bila izdelava računalniškega programa za hitrejše preverjanje obstoječih in projektiranje novih rezervoarjev po zgoraj naštetih predpisih. V ta namen sem v programskem okolju Matlab izdelal program »BuckleTank«. Poleg naštetega program omogoča tudi generiranje vhodnih podatkov in zagon numerične analize v programu SIMULIA Abaqus FEA. Opis izdelave in samo delovanje programa je predstavljeno v zadnjem delu diplomske naloge.

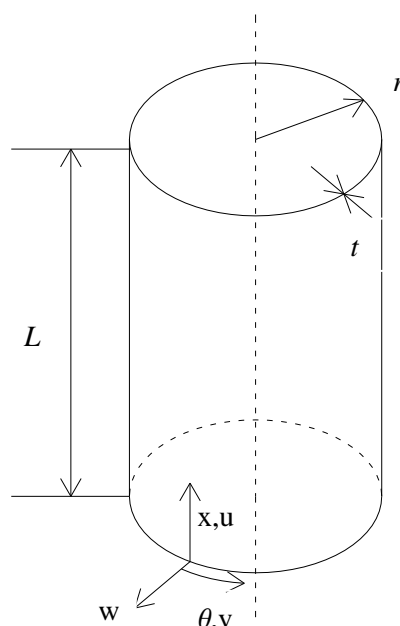
2 ECCS BUCKLING OF STEEL SHELLS EUROPEAN RECOMMENDATION, 5TH EDITION, 2008 [6]

Evropska ECCS priporočila so namenjena izključno kontroli stabilnosti rezervoarjev.

V poštev pride več poglavij priporočil. Poglavje o kontroli ojačitev rezervoarja, poglavje o projektiranju rezervoarjev s spremenljivo debelino in poglavje o kontroli rezervoarja s konstantno debelino.

Za lažje razumevanje, na začetku podajam nekaj osnov in predpostavk, ki veljajo za vsa poglavja priporočila. Šele nato so predstavljene kontrole različnih tipov rezervoarjev.

2.1 Robni pogoji



Slika 2.1: Shema rezervoarja

Kljub več možnim, se priporočila omejujejo na 5 kombinacij robnih pogojev. To pa zato, ker nekateri robni pogoji nimajo velikega vpliva na odziv konstrukcije. Kombinacije robnih pogojev so označene kot BC1, BC2 in BC3 in predstavljajo 3 pogoste in še zlasti pomembne kombinacije robnih pogojev. Zajemajo kombinacijo, ko sta preprečena tako radialni kot osni pomik, kombinacijo ko je preprečen samo radialni pomik in pa primer ko oba pomika nista preprečena. Kombinacije robnih pogojev so podane v preglednici 2.1.

Zahteve glede podpiranja obodnega pomika ' v ' niso posebej podane, saj je v praksi odziv konstrukcije v tej smeri zaradi oblike in izgradnje zelo podoben tistemu v radialni smeri. Zato privzamemo enako

podpiranje kot za smer radialnega pomika ' w '. Koordinatni sistem v rezervoarju je predstavljen na sliki 2.1.

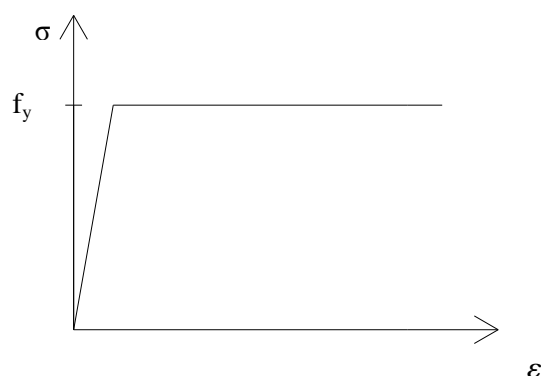
Oсна rotacija β_θ na robu rezervoarja ima, razen pri zelo kratkih cilindrih, majhen vpliv na stabilnost konstrukcije. Zato je med kombinacijami zajeta le kot podkategorija.

Preglednica 2.1: Tipi robnih pogojev

| Tip robnega pogoja | Opis pomika | Radialni pomik | Osni pomik | Oсна rotacija |
|--------------------|---|----------------|------------|-----------------------|
| BC1r | radialno preprečen osno preprečen rotacija preprečena | $w=0$ | $u=0$ | $\beta_\theta=0$ |
| BC1f | radialno preprečen osno preprečen rotacija dovoljena | $w=0$ | $u=0$ | $\beta_\theta \neq 0$ |
| BC2r | radialno preprečen osno dovoljen rotacija preprečena | $w=0$ | $u \neq 0$ | $\beta_\theta=0$ |
| BC2f | radialno preprečen osno dovoljen rotacija dovoljena | $w=0$ | $u \neq 0$ | $\beta_\theta \neq 0$ |
| BC3 | radialno dovoljen osno dovoljen rotacija dovoljena | $w \neq 0$ | $u \neq 0$ | $\beta_\theta \neq 0$ |

2.2 Material

V računih je predpostavljen idealno elasto-plastičen material (slika 2.2), katerega opišemo z elastičnim modulom E , Poissonovim količnikom ν in mejo tečenja f_y . Izmed treh največ vplivata elastični modul in meja tečenja.



Slika 2.2: Idealno elastičen - idealno plastičen material

2.3 Geometrijske tolerance in nepopolnosti

Uklonska odpornost je odvisna od velikosti geometrijskih nepopolnosti. Zato je smotrno imeti različne razrede izdelave, znotraj katerih rezervoarje razvrstimo glede na velikost geometrijskih nepopolnosti.

Uklonska nosilnost rezervoarjev je močno pogojena z amplitudami začetnih nepopolnosti, ki pa so odvisne od kategorije izdelave. Rezervoarje glede na tolerance izdelave razvrščamo v tri razrede; A, B in C. Razred A ima najstrožje zahteve, razred C pa najšibkejše. V kateri razred izdelave rezervoar uvrščamo, določimo na podlagi treh kriterijev.

Izbrane tolerance za pravokotna odstopanja od nominalne površine stene rezervoarja, ki najbolj vplivajo na stabilnost so:

- odstopanje od kroga,
- slučajna ekscentričnost pri stikovanju segmentov,
- lokalne nepopolnosti.

Vsaka nepopolnost mora biti ločeno obravnavana in razvrščena v pripadajoči razred. Izmed treh kriterijev, najnižji dobljen razred izdelave narekuje nadaljnjo projektiranje rezervoarja.

Vse tolerančne meje so predpisane za odstopanja pravokotno na srednjo ravnino stene rezervoarja z dovoljeno največjo vrednostjo odstopanja.

2.3.1 Odstopanje od kroga

Odstopanje od kroga je predstavljeno na sliki 2.3. Določi se s parametrom U_r , ki predstavlja razmerje med največjim absolutnim odkikom in nominalnim premerom rezervoarja.

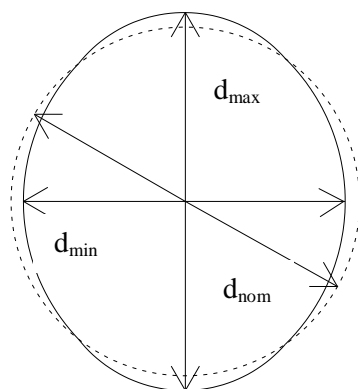
$$U_r = \frac{d_{\max} - d_{\min}}{d_{\text{nom}}}, \quad (1)$$

kjer je:

d_{\max} največji izmerjeni notranji premer,

d_{\min} najmanjši izmerjeni notranji premer,

d_{nom} nominalni notranji premer.



Slika 2.3: Odstopanje od kroga

Parameter U_r mora zadostiti tolerančnemu pogoju razreda:

$$U_r = \frac{d_{\max} - d_{\min}}{d_{\text{nom}}}, \quad (2)$$

Za cilindre manjšega premera so podane drugačne tolerančne meje. Predvsem to velja za dimnike. Ker pa rezervoarji ne spadajo v ta razred, je za nas zanimiv le zadnji stolpec v preglednici 2.2.

Preglednica 2.2: Tolerance odstopanja od kroga

| | Premer | $d \leq 0,5 \text{ m}$ | $0,5 \text{ m} < d < 1,25 \text{ m}$ | $1,25 \text{ m} \leq d$ |
|------------------------|-------------|------------------------|--------------------------------------|-------------------------|
| Razred izdelave | Opis | $U_{r,\max}$ | | |
| Razred A | odličen | 0,014 | $0,007 + 0,0093(1,25-d)$ | 0,007 |
| Razred B | visok | 0,020 | $0,010 + 0,0133(1,25-d)$ | 0,010 |
| Razred C | normalen | 0,030 | $0,015 + 0,020(1,25-d)$ | 0,015 |

2.3.2 Slučajna ekscentričnost pri stikovanju segmentov

Na stiku segmentov se slučajna ekscentričnost meri kot razlika med celotno ekscentričnostjo in namenskim zamikom:

$$e_a = e_{\text{tot}} - e_{\text{int}}, \quad (3)$$

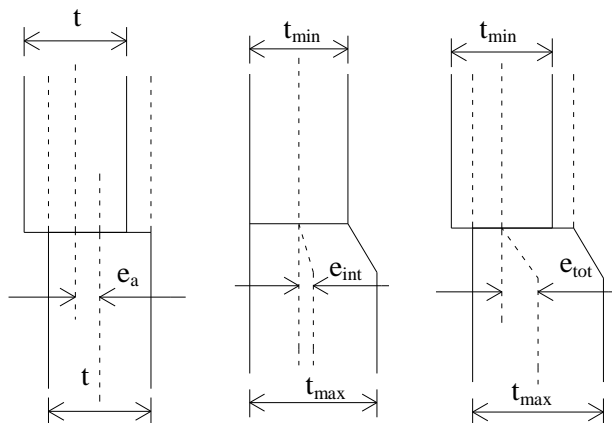
pri čemer je:

e_a slučajna ekscentričnost med srednjimi ploskvami sosednjih segmentov,

e_{tot} ekscentričnost med sosednjimi ploskvami sosednjih segmentov,

e_{int} namenski zamik med sosednjimi ploskvami sosednjih segmentov, zaradi stikovanja segmentov različnih debelin.

Slučajna ekscentričnost e_a mora biti za pripadajoči razred izdelave manjša od največje dovoljene slučajne ekscentričnosti $e_{a,max}$, ki je podana v preglednici 2.3.



Slika 2.4: Slučajna ekscentričnost (levo), namenski zamik (sredina) in skupna ekscentričnost (desno)

Na sliki 2.4 vidimo slučajno ekscentričnost pri konstantni debelini (levo), namenski zamik brez slučajne ekscentričnosti zaradi spremembe debeline segmenta (sredina) in skupno ekscentričnost, kot seštevek namenskega zamika zaradi spremembe debeline in slučajne ekscentričnosti (desno).

Preglednica 2.3: Mejna tolerance slučajne ekscentričnosti

| Razred izdelave | Opis | Priporočene vrednosti največje dovoljene slučajne ekscentričnosti $e_{a,max}$ |
|-----------------|----------|---|
| Razred A | Odličen | 2 mm |
| Razred B | Visok | 3 mm |
| Razred C | Normalen | 4 mm |

Slučajno ekscentričnost e_a ocenimo tudi z brezdimenzijskim parametrom U_e . Ponazarja delež slučajne ekscentričnosti glede na debelino segmenta in ga določimo na naslednji način:

$$U_e = \frac{e_a}{t}, \quad (4)$$

oziroma pri spreminjajoči se debelini:

$$U_e = \frac{e_a}{t_{av}}, \quad (5)$$

pri čemer je t_{av} srednja vrednost debelin segmentov na stiku.

Zadostiti je potrebno naslednjemu pogoju:

$$U_e \leq U_{e,max} \quad (6)$$

pri čemer je $U_{e,max}$ mejna toleranca slučajne ekscentričnosti za izbran razred, podan v tabeli 2.4:

Preglednica 2.4: Brezdimenzijska mejna toleranca slučajne ekscentričnosti

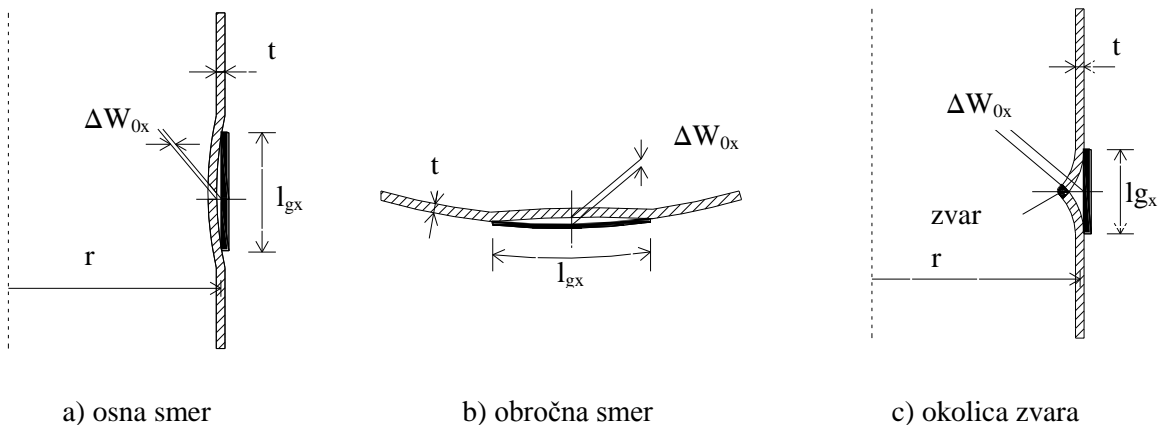
| Razred izdelave | Opis | Priporočena vrednost $U_{e,max}$ |
|-----------------|----------|----------------------------------|
| Razred A | Odličen | 0,14 |
| Razred B | Visok | 0,20 |
| Razred C | Normalen | 0,30 |

2.3.3 Lokalne nepopolnosti

Lokalne nepopolnosti so lahko različnih oblik in imajo različen vpliv na uklonsko odpornost rezervoarja. Merimo jih tako v obročni kot tudi v osni smeri rezervoarja. Dolžina za meritve v osni smeri mora biti popolnoma ravna, za tiste v obročni pa mora imeti enak radij kot je radij rezervoarja. Tolerance so določene tako, da zajamejo tiste lokalne nepopolnosti, ki so še posebej nevarne za stabilnost rezervoarja.

Začetne nepopolnosti Δw_0 merimo na dolžini l_g , ki jo določimo na različne načine. Čim so v rezervoarju prisotne osne tlačne napetosti je potrebno nepopolnosti izmeriti tako v osni kot obročni smeri (slika 2.5a in slika 2.5b) in sicer na dolžini:

$$l_{gx} = 4\sqrt{rt}. \quad (7)$$



Slika 2.5: Dolžina meritve nepopolnosti v primeru prisotnosti osne tlačne napetosti

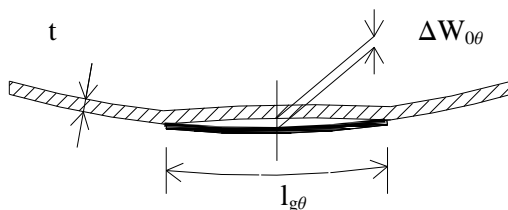
V primeru, da se pojavijo le obročne ali strižne tlačne napetosti, velikost nepopolnosti $\Delta W_{0\theta}$ merimo samo v obročni smeri (slika 2.6) in sicer na dolžini:

$$l_{g\theta} = 2,3(l^2rt)^{0,25}, \quad (8)$$

vendar

$$l_{g\theta} \leq r, \quad (9)$$

kjer je l osna dolžina segmenta.

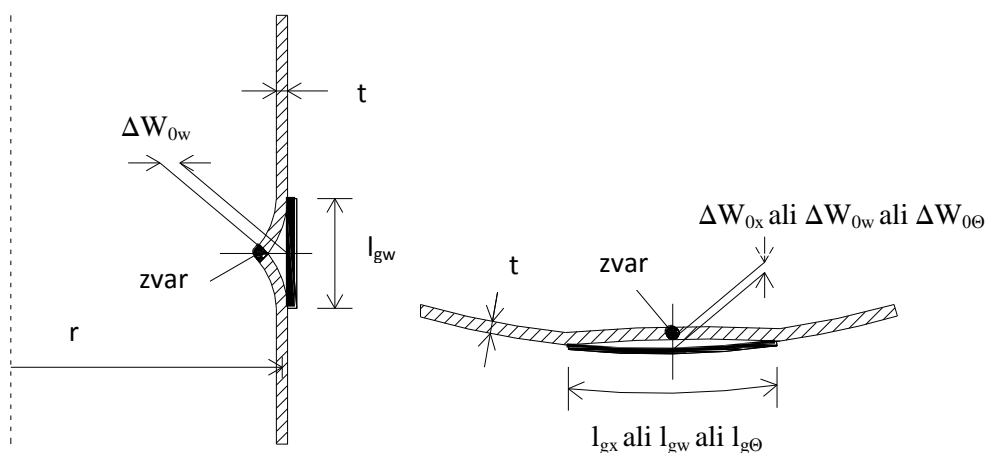


Slika 2.6: Dolžina meritve nepopolnosti v primeru prisotnosti obročnih ali strižnih napetosti

Dodatno je potrebno izmeriti velikost nepopolnosti okoli zvarov ΔW_{0w} , tako v osni kot tudi v obročni smeri (slika 2.7) na dolžini l_{gw} :

$$l_{gw} = \min(25t_{min}; 500 \text{ mm}), \quad (10)$$

kjer je t_{min} debelina tanjšega elementa na stiku zvara.



Slika 2.7: Dolžina meritve v okolici zvarov

Merilne dolžine so oblikovane tako, da sovpadajo z velikostjo pričakovanega uklonskega vala za izbran rezervoar.

Velikost začetnih nepopolnosti ocenimo s parametrom U_0 , ki predstavlja relativno velikost nepopolnosti glede na pričakovano velikost uklonskega vala:

$$\begin{aligned} U_{0x} &= \Delta w_{0x} / l_{gx}, \\ U_{0w} &= \Delta w_{0w} / l_{gw}, \\ U_{0\theta} &= \Delta w_{0x} / l_{g\theta}. \end{aligned} \quad (11)$$

Vrednosti morajo biti manjše od zahtev, ki jih določa posamezen razred kvalitete izdelave $U_{0,max}$ podanega v preglednici 2.5:

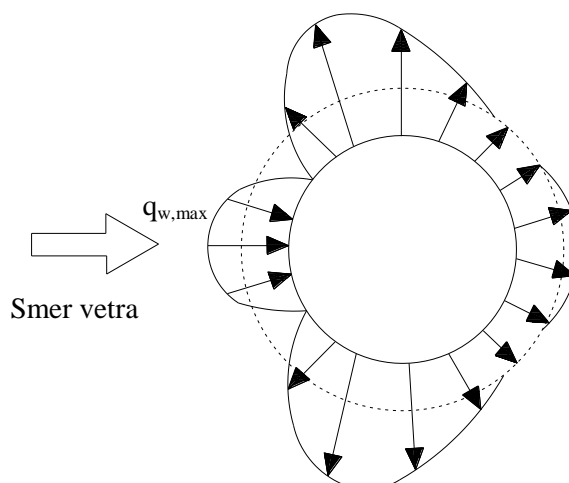
$$\begin{aligned} U_{0x} &\leq U_{0,max}, \\ U_{0w} &\leq U_{0,max}, \\ U_{0\theta} &\leq U_{0,max}. \end{aligned} \quad (12)$$

Preglednica 2.5: Tolerance lokalnih nepopolnosti

| Razred izdelave | Opis | Vrednost $U_{0,max}$ |
|-----------------|----------|----------------------|
| Razred A | Odličen | 0,006 |
| Razred B | Visok | 0,01 |
| Razred C | Normalen | 0,016 |

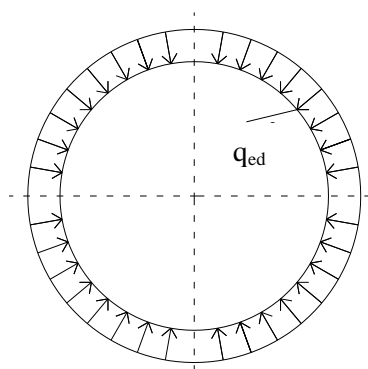
2.4 Obtežba

Obtežbe, ki delujejo na rezervoar in jih obravnavamo kot statične so: lastna in stalna obtežba (streha), obtežba snega ter obtežba vetra. Pritisk vetra se po obodu spreminja, iz pozitivne vrednosti na privetni strani pa do negativnega srka na zavetrni strani, kot je prikazano na sliki 2.8.



Slika 2.8: Dejanski pritisk vetra okoli rezervoarja

Priporočila predlagajo, da zaradi lažjega računa predpostavimo konstanten pritisk po obodu v velikosti maksimalnega pritiska na privetni strani (slika 2.9). Predpostavljen je tudi konstanten pritisk vetra po višini rezervoarja, saj gre za razmeroma nizke konstrukcije. Vpliv vetra je izračunan s pomočjo standarda EN 1991-1-4, ki določa vplive vetra na konstrukcije.



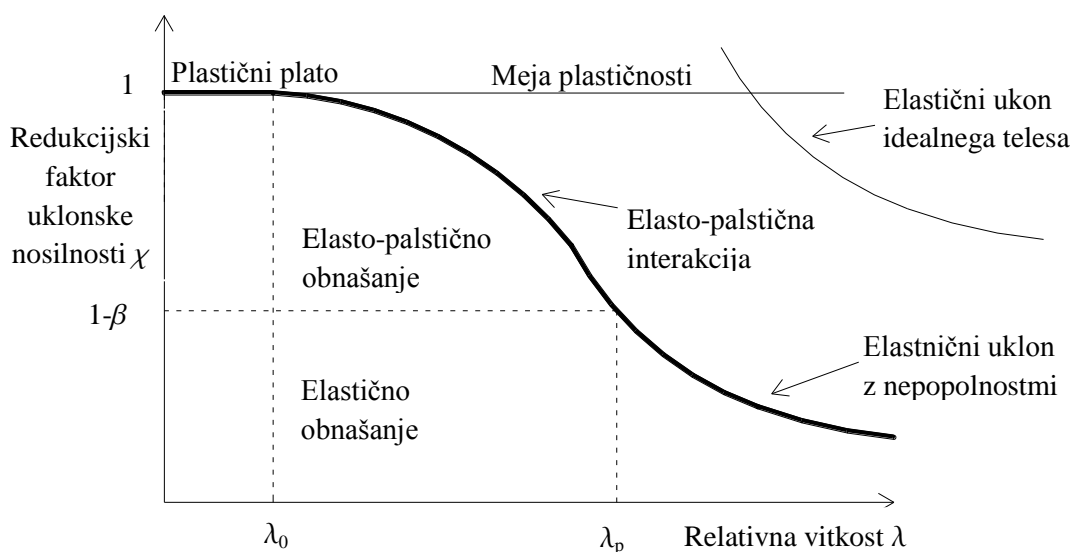
Slika 2.9: Predpostavljena obtežba vetra

2.5 Projektiranje rezervoarjev s konstantno debelino

Izbrano poglavje pride v poštev pri kontroli rezervoarjev konstantne debeline in brez ojačitev. Z njim lahko sicer preverimo tudi rezervoarje, ki imajo ojačitve. Ojačitve morajo biti toge, ter preprečevati radialni pomik w . Tako dobimo rezervoar razdeljen na območja med ojačitvami, katera obravnavamo kot samostojen rezervoar z robnimi pogoji tip BC2, ki jih zagotavljajo ojačitve. Območja med ojačitvami preverimo po pravilih za rezervoar konstantne debeline, ojačitve same pa s pomočjo poglavja, ki zajema kontrole ojačitev.

Predpostavljeno je, da se v steni rezervoarja ne razvijejo upogibne napetosti. Pravila in enačbe sledijo konceptu napetostne metode.

Ideja je, da najprej določimo elastično kritično uklonsko napetost σ_{Rcr} idealnega elementa. Ob znani meji tečenja materiala, lahko določimo relativno vitkost segmenta λ . Glede na velikost nepopolnosti izberemo elastični redukcijski faktor nepopolnosti α . Redukcijski faktor uklonske nosilnosti χ je odvisen od relativne vitkosti. Odvisnost je predstavljena z uklonsko krivuljo, ki je ponazorjena na sliki 2.10. Obliko uklonske krivulje iz katere izračunamo faktor χ , določimo s pomočjo parametrov α , β , η in λ_0 . Z njimi zajamemo občutljivost na nepopolnosti (α), območje plastičnega obnašanja (β), ukrivljenost krivulje v elasto-plastičnem območju (η) in spodnjo mejo vitkosti (λ_0). Uklonska krivulja se deli na tri območja. V območju, kjer je relativna vitkost segmenta manjša od spodnje meje vitkosti λ_0 , predpostavimo plastično obnašanje in je zato redukcijski faktor enak ena, oziroma nimamo redukcije nosilnosti zaradi uklona. Faktor β določa območje elasto-plastičnega uklona, kjer poteka interakcija med elastičnim uklonom in plastično nosilnostjo. Pri večjih vitkostih imamo elastični uklon, kjer velik vpliv predstavljajo nepopolnosti. Elastični uklon predstavlja Eulerjeva krivulja, ki je zmanjšana za faktor α na račun nepopolnosti.



Slika 2.10: Diagram relativne vitkosti

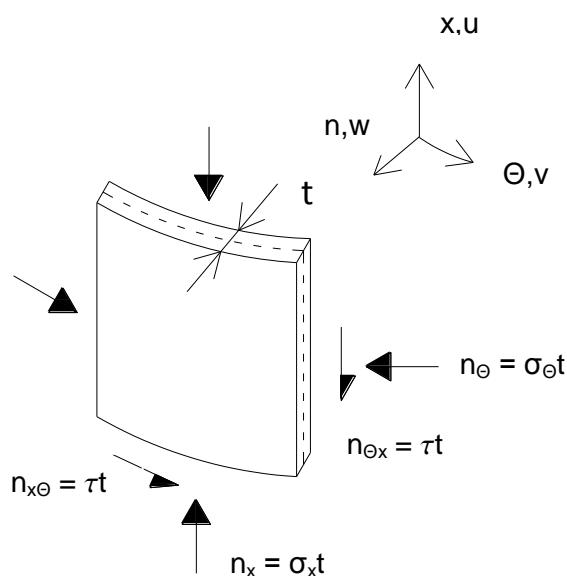
Z določenim redukcijskim faktorjem uklonske nosilnosti pomnožimo mejo tečenja in dobimo uklonsko odpornost.

$$\begin{aligned}
 \chi &= 1 && \text{ko } \bar{\lambda} \leq \bar{\lambda}_0, \\
 \chi &= 1 - \beta \left(\frac{\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0}{\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_0} \right)^\eta && \text{ko } \bar{\lambda}_0 \leq \bar{\lambda} \leq \bar{\lambda}_p, \\
 \chi &= \frac{\alpha}{\bar{\lambda}^2} && \text{ko } \bar{\lambda}_p \leq \bar{\lambda}.
 \end{aligned} \tag{13}$$

Ker je težko zajeti redukcijo nosilnosti z enim faktorjem za vse napetosti (σ_x , σ_θ , τ), napetostna metoda obravnava vsako izmed njih posebej (slika 2.11). Tako dobimo reducirane nosilnosti v vertikalni, obodni in strižni smeri posebej, ki morajo biti večje od napetosti v pripadajoči smeri:

$$\begin{aligned}
 \sigma_{x,Ed} &\leq \sigma_{x,Rd}, & \sigma_{\theta,Ed} &\leq \sigma_{\theta,Rd}, \\
 \tau_{x\theta,Ed} &\leq \tau_{x\theta,Rd}.
 \end{aligned} \tag{14}$$

V primeru, ko se pojavijo napetosti v več kot eni smeri, je potrebno izvesti kontrolo interakcije. Podrobneje je interakcija razložena v poglavju 2.5.4.



Slika 2.11: Glavne smeri in glavne napetosti

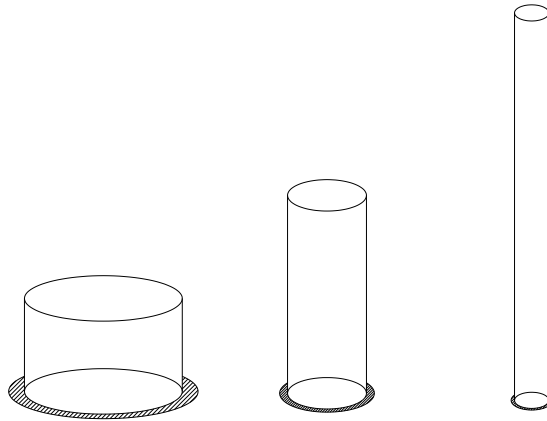
2.5.1 Vertikalni uklon

Enačbe veljajo le za robne pogoje BC1 in BC2 na zgornjem in spodnjem robu rezervoarja. To pomeni, da mora biti na obeh koncih preprečen radialni pomik w . Ta ima namreč največji vpliv na vertikalni uklon. Podpiranje v obodni smeri igra prav tako pomembno vlogo. Obodni pomik v , je v obeh tipih robnih pogojev prav tako preprečen.

Elastična kritična napetost je odvisna od brezdimenzijskega parametra ω , ki je določen z naslednjo enačbo:

$$\omega = \frac{l}{\sqrt{rt}}. \quad (15)$$

Na sliki 2.12 so prikazani trije razredi vitkosti rezervoarjev, ki jih določimo glede na parameter ω .



Slika 2.12: A) kratki B) srednji C) vitki rezervoar

Kritično vertikalno uklonsko napetost, ki je odvisna od velikosti segmenta izračunamo na naslednji način:

$$\sigma_{xRcr} = 0,605 \times E \times C_x \times \frac{t}{r}. \quad (16)$$

Faktor C_x zajema vpliv velikosti rezervoarja in je za srednje velike rezervoarje, ki ustrezajo kriteriju:

$$1,7 \leq \omega \leq 0,5 \frac{r}{t}, \quad (17)$$

enak:

$$C_x = 1,0. \quad (18)$$

Ko se dolžina segmenta manjša, se kritična uklonska napetost približuje uklonski napetosti neskončno široke plošče. Za kratke rezervoarje, za katere velja:

$$\omega \leq 1,7, \quad (19)$$

faktor C_x izračunamo:

$$C_x = 1,36 - \frac{1,83}{\omega} + \frac{2,07}{\omega^2}. \quad (20)$$

Zelo dolg segment se obnaša podobno kot steber. V to kategorijo spadajo rezervoarji naslednjih dimenzij:

$$\omega > 0,5 \frac{r}{t}. \quad (21)$$

Parameter C_x je večji izmed:

$$C_x = \max \left\{ \begin{array}{l} 1 + \frac{0,2}{C_{xb}} \left[1 - 2\omega \frac{t}{r} \right], \\ 0,60 \end{array} \right. \quad (22)$$

kjer je C_{xb} parameter odvisen od robnih pogojev in ga odčitamo iz preglednice 2.6:

Preglednica 2.6: Vrednost parametra C_{xb}

| Rob | Robni pogoj | C_{xb} |
|-------------|-------------|----------|
| zgornji rob | BC1 | 6 |
| spodnji rob | BC1 | |
| zgornji rob | BC2 | 3 |
| spodnji rob | BC1 | |
| zgornji rob | BC2 | 1 |
| spodnji rob | BC2 | |

Parameter C_{xb} je odvisen od tega ali je segment vertikalno podprt ali ne.

Nepopolnosti zajamemo z elastičnim redukcijskim faktorjem nepopolnosti α_x ki ga izračunamo na naslednji način:

$$\alpha_x = \frac{0,62}{1 + 1,91(\Delta w_k / t)^{1,44}}, \quad (23)$$

kjer je Δw_k karakteristična velikost nepopolnosti, ki zajema kvaliteto izdelave in jo določimo z:

$$\Delta w_k = \frac{1}{Q} \sqrt{\frac{r}{t}} \times t. \quad (24)$$

Q je parameter kvalitete izdelave, ki ga preberemo iz preglednice 2.7:

Preglednica 2.7: Vrednost parametra Q

| Razred izdelave | Opis | Q |
|-----------------|----------|----|
| Razred A | odličen | 40 |
| Razred B | visok | 25 |
| Razred C | normalen | 16 |

Višja je kvaliteta izdelave, manjša je velikost nepopolnosti in večji je faktor nepopolnosti α_x .

Ostali faktorji, ki jih še potrebujemo za račun so spodnja mejna vitkost $\lambda_{0,x}$, faktor ki določa plastično območje β in faktor interakcije η . Vsi so konstantni, ne glede na dimenzije rezervoarja.

$$\begin{aligned} \lambda_{0,x} &= 0,2, \\ \beta_x &= 0,60, \\ \eta_x &= 1,00. \end{aligned} \quad (25)$$

Ob znanih vseh parametrih, lahko izračunamo redukcijski faktor uklona χ_x , ki se določi v odvisnosti od vitkosti segmenta.

$$\begin{aligned} \chi_x &= 1 && \text{ko } \bar{\lambda}_x \leq \bar{\lambda}_{0,x}, \\ \chi_x &= 1 - \beta_x \left(\frac{\lambda_x - \lambda_{0,x}}{\lambda_{p,x} - \lambda_{0,x}} \right)^{\eta_x} && \text{ko } \bar{\lambda}_{0,x} \leq \bar{\lambda}_{p,x}, \\ \chi_x &= \frac{\alpha_x}{\lambda_x} && \text{ko } \bar{\lambda}_{p,x} \leq \bar{\lambda}_x. \end{aligned} \quad (26)$$

Parametra $\lambda_{0,x}$ in $\lambda_{p,x}$ predstavljata mejni vitkosti. Prvi ponazarja spodnjo mejo vitkosti, pod katero ni redukcije nosilnosti zaradi uklona, drugi pa mejo nad katero imamo elastični uklon in kjer velja Eulerjeva enačba, zmanjšana za faktor α zaradi nepopolnosti.

Mejo elastičnega uklona določimo z naslednjo enačbo:

$$\lambda_{p,x} = \sqrt{\frac{\alpha_x}{1-\beta_x}}. \quad (27)$$

Spodnja mejna vitkost je določena z že zgoraj navedeno konstanto:

$$\lambda_{0,x} = 0,2. \quad (28)$$

Samo vitkost segmenta pa, ko imamo izračunano elastično kritično uklonsko napetost izračunamo kot:

$$\lambda_x = \sqrt{f_{yk} / \sigma_{x,Rcr}}. \quad (29)$$

Ko poznamo v katerem območju vitkosti se rezervoar nahaja, lahko izračunamo redukcijski faktor uklona. Z njim lahko nato izračunamo uklonsko odpornost segmenta:

$$\sigma_{x,Rd} = \chi_x f_y / \gamma_{M1}. \quad (30)$$

2.5.2 Uklon v obodni smeri

Tako kot pri uklonu v vertikalni smeri, tudi tu naprej izrazimo velikost segmenta z brez dimenzijskim parametrom ω :

$$\omega = \frac{l}{\sqrt{rt}}. \quad (31)$$

Tudi tu se kritična uklonska napetost razlikuje od velikosti segmenta. Med srednje dolge segmente spadajo tisti, ki zadostijo naslednjemu pogoju:

$$20 \leq \frac{\omega}{C_\theta} \leq 1,63 \frac{r}{t}. \quad (32)$$

Kritična napetost za take segmente je:

$$\sigma_{\theta Rcr} = 0,92E \frac{C_\theta t}{\omega r}, \quad (33)$$

pri čemer je C_θ faktor, ki zajame vpliv robnih pogojev, ki imajo velik vpliv na kritično uklonsko napetost. Preberemo jih iz preglednice 2.8:

Preglednica 2.8: Vrednost parametra C_θ

| Rob segmenta | Robni pogoj | Vrednost C_θ |
|--------------|-------------|---------------------|
| zgornji rob | BC1 | 1,5 |
| spodnji rob | BC1 | |
| zgornji rob | BC2 | 1,25 |
| spodnji rob | BC1 | |
| zgornji rob | BC2 | 1,0 |
| spodnji rob | BC2 | |
| zgornji rob | BC3 | 0,6 |
| spodnji rob | BC1 | |
| zgornji rob | BC3 | 0 |
| spodnji rob | BC2 | |
| zgornji rob | BC3 | 0 |
| spodnji rob | BC3 | |

Zadnja dva primera, ko je vrednost faktorja enaka 0, sta podana zgolj informativno. Takim robnim pogojem se je potrebno pri srednje dolgih segmentih izogibati. Če se temu ne moremo izogniti, segment projektiramo kot neskončno dolg segment, s katerim dobimo majhno obodno kritično uklonsko napetost in posledično majhno nosilnost.

Ko se višina segmenta manjša, se kritična uklonska napetost približuje kritični uklonski napetosti neskončno dolge plošče.

Kratki segmenti so določeni z naslednjim pogojem:

$$\frac{\omega}{C_\theta} < 20, \quad (34)$$

kritično uklonsko napetost pa izračunamo z:

$$\sigma_{Rcr} = 0,92E \frac{C_{\theta s} t}{\omega r}. \quad (35)$$

Faktor C_{θ} zajema vpliv večanja uklonske odpornosti zaradi zmanjševanja velikosti segmenta in pa vpliv robnih pogojev na obodno kritično uklonsko napetost. Podan je v preglednici 2.9:

Preglednica 2.9: Vrednosti C_{θ}

| Rob segmenta | Robni pogoj | C_{θ} |
|----------------------------|-------------|---|
| zgornji rob spodnji rob | BC1 BC1 | $1,5 + \frac{10}{\omega^2} - \frac{5}{\omega^3}$ |
| zgornji rob spodnji rob | BC2 BC1 | $1,25 + \frac{8}{\omega^2} - \frac{4}{\omega^3}$ |
| zgornji rob spodnji rob | BC2 BC2 | $1,0 + \frac{3}{\omega^{1,35}}$ |
| zgornji rob spodnji rob | BC3 BC1 | $0,6 + \frac{1}{\omega^2} - \frac{0,3}{\omega^3}$ |

Pri večanju dolžine segmenta se ta začne obnašati kot neskončno dolga cev, katere kritična uklonska napetost je enaka kritični uklonski napetosti obroča. Pogoj za dolge cilindre je:

$$\frac{\omega}{C_{\theta}} > 1,63 \frac{r}{t}, \quad (36)$$

enačba kritične uklonske napetosti pa:

$$\sigma_{Rcr} = E \left(\frac{t}{r} \right)^2 \left[0,275 + 2,03 \left(\frac{C_{\theta} r}{\omega t} \right)^4 \right]. \quad (37)$$

Za račun uklonske odpornosti je potrebno določiti še elastični redukcijski faktor nepopolnosti α_{θ} (preglednica 2.10), spodnjo mejno vitkost λ_{θ} , faktor ki določa plastično območje β in faktor interakcije η . Zadnji trije so ne glede na karakteristike rezervoarja konstantni.

Preglednica 2.10: Elastični redukcijski faktor nepopolnosti

| Razred izdelave | Opis | α_{θ} |
|-----------------|----------|-------------------|
| Razred A | odličen | 0,75 |
| Razred B | visok | 0,65 |
| Razred C | normalen | 0,50 |

$$\begin{aligned}\lambda_{0,\theta} &= 0,40, \\ \beta_{\theta} &= 0,60, \\ \eta_{\theta} &= 1,00.\end{aligned}\tag{38}$$

Z znanimi parametri rezervoarja, lahko izračunamo uklonski redukcijski faktor χ_{θ} , ki je odvisen od vitkosti segmenta. Postopek je enak tistemu za vertikalni uklon.

Z znano elastično kritično uklonsko napetostjo najprej določimo vitkost segmenta:

$$\lambda_{\theta} = \sqrt{f_{yk} / \sigma_{\theta,Rcr}}.\tag{39}$$

Nato določimo mejne vitkosti, s pomočjo katerih lahko rezervoar umestimo na krivuljo vitkosti. Mejno vitkost, pri kateri obravnavamo elastični uklon določimo z naslednjo enačbo:

$$\lambda_{p,\theta} = \sqrt{\frac{\alpha_{\theta}}{1 - \beta_{\theta}}}.\tag{40}$$

Spodnja mejna vitkost, pod katero nimamo redukcije nosilnosti zaradi uklona, je večja kot pri vertikalnem uklonu in znaša:

$$\lambda_{0,\theta} = 0,4.\tag{41}$$

Z znano vitkostjo segmenta in mejnimi vitkostmi lahko določimo na katerem delu diagrama vitkosti se rezervoar nahaja in glede na to izračunamo pripadajoči redukcijski faktor uklona:

$$\begin{aligned}\chi_{\theta} &= 1 && \text{ko } \bar{\lambda}_{\theta} \leq \bar{\lambda}_{0,\theta}, \\ \chi_{\theta} &= 1 - \beta_x \left(\frac{\lambda_{\theta} - \lambda_{0,\theta}}{\lambda_{p,\theta} - \lambda_{0,\theta}} \right)^{\eta_{\theta}} && \text{ko } \bar{\lambda}_{0,\theta} \leq \bar{\lambda}_{p,\theta}, \\ \chi_{\theta} &= \frac{\alpha_{\theta}}{\lambda_{\theta}^2} && \text{ko } \bar{\lambda}_{p,\theta} \leq \bar{\lambda}_{\theta}.\end{aligned}\tag{42}$$

Uklonsko odpornost segmenta določimo z naslednjo enačbo:

$$\sigma_{\theta,Rd} = \chi_{\theta} f_y / \gamma_{M1}.\tag{43}$$

2.5.3 Strig

Pravila za kontrolo strižnih napetosti veljajo le za robne pogoje tipa BC1 in BC2 na obeh koncih rezervoarja. Z drugimi besedami, preprečeni morajo biti pomiki tako v radialni kot obodni smeri. Kot pri ostalih dveh kontrolah, tudi pri kontroli striga najprej preverimo v kateri razred vitkosti spada rezervoar:

$$\omega = \frac{l}{\sqrt{rt}}. \quad (44)$$

Kritično strižno uklonsko napetost izračunamo:

$$\tau_{x\theta, Rcr} = 0,75EC_{\tau} \sqrt{\frac{1}{\omega} \frac{t}{r}}. \quad (45)$$

Faktor C_{τ} zajema vpliv velikosti rezervoarja na kritično strižno uklonsko napetost.

Za srednje velike rezervoarje, ki zadoščajo naslednjemu pogoju

$$10 \leq \omega \leq 8,7 \frac{r}{t}, \quad (46)$$

privzamemo vrednost faktorja kar 1, saj je bila enačba za račun kritične napetosti razvita za slednje rezervoarje:

$$C_{\tau} = 1,0. \quad (47)$$

Kratki rezervoarji, kateri zadostijo pogoju:

$$\omega < 10, \quad (48)$$

se obnašajo kot neskončno dolga tanka plošča. Faktor C_{τ} dobimo z naslednjo enačbo:

$$C_{\tau} = \sqrt{1 + \frac{42}{\omega^3}}. \quad (49)$$

Pri dolgih rezervoarjih, ki zadoščajo pogoju:

$$\omega > 8,7 \frac{r}{t}, \quad (50)$$

pa vpliv velikosti zajamemo z:

$$C_{\tau} = \frac{1}{3} \sqrt{\omega \frac{t}{r}}. \quad (51)$$

Strižni elastični nadomestni faktor nepopolnosti, je odvisen od kvalitete izdelave rezervoarja. Vrednosti so podane v preglednici 2.11:

Preglednica 2.11: Strižni elastični nadomestni faktor nepopolnosti

| Razred izdelave | Opis razreda | α_{τ} |
|-----------------|--------------|-----------------|
| Razred A | Odličen | 0,75 |
| Razred B | Visok | 0,65 |
| Razred C | Normalen | 0,50 |

Tako kot pri ostalih dveh kontrolah za spodnjo mejo vitkosti, faktor vpliva plastičnosti in faktor interakcije, privzamemo konstante vrednosti:

$$\begin{aligned} \lambda_{0,\tau} &= 0,40, \\ \beta_{\tau} &= 0,60, \\ \eta_{\tau} &= 1,00. \end{aligned} \quad (52)$$

Račun strižne odpornosti je podoben tistemu za račun obodne in vertikalne odpornosti. Zato na tem mestu podajamo samo enačbe. Komentar je enak in že podan pri prejšnjih dveh kontrolah:

Določitev na katerem delu uklonske krivulje leži segment:

$$\begin{aligned} \chi_{\tau} &= 1 && \text{ko } \bar{\lambda}_{\tau} \leq \bar{\lambda}_{0,\tau}, \\ \chi_{\tau} &= 1 - \beta_x \left(\frac{\lambda_{\tau} - \lambda_{0,\tau}}{\lambda_{p,\tau} - \lambda_{0,\tau}} \right)^{\eta_{\tau}} && \text{ko } \bar{\lambda}_{0,\tau} \leq \bar{\lambda}_{p,\tau}, \\ \chi_{\tau} &= \frac{\alpha_{\tau}}{\lambda_{\tau}^2} && \text{ko } \bar{\lambda}_{p,\tau} \leq \bar{\lambda}_{\tau}. \end{aligned} \quad (53)$$

Račun meje elastičnega uklona:

$$\lambda_{p,\tau} = \sqrt{\frac{\alpha_{\tau}}{1 - \beta_{\tau}}}. \quad (54)$$

Spodnja mejna vitkost:

$$\lambda_{0,\tau} = 0,4. \quad (55)$$

Račun vitkosti segmenta:

$$\lambda_{\tau} = \sqrt{f_{yk} / \sqrt{3}\tau_{x\theta,Rcr}}. \quad (56)$$

V skladu s Von Misesovim kriterijem tečenja je pri strigu za razliko od obodne in vertikalne smeri, meja tečenja zmanjšana za faktor 1,7.

Strižna odpornost segmenta

$$\tau_{x\theta,Rd} = \frac{\chi_{\tau} f_y}{\gamma_{M1} \sqrt{3}}. \quad (57)$$

2.5.4 Interakcija

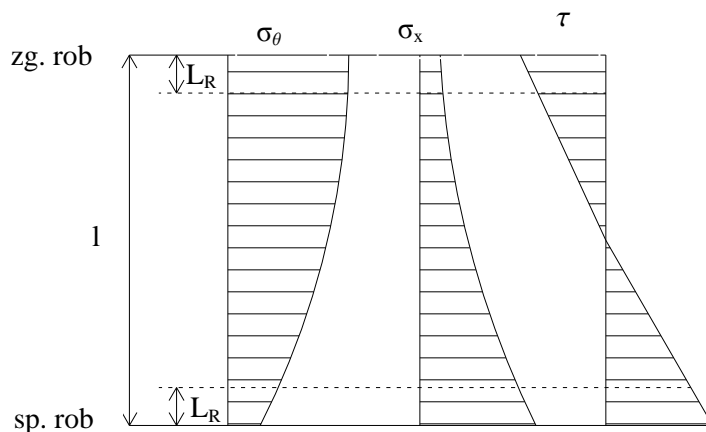
Interakcijo je potrebno izvesti, ko sta/so prisotne napetosti v več kot eni smeri. Kontrolo vertikalnih, obodnih in strižnih napetosti in odpornosti izvedemo s pomočjo faktorjev k_x , k_{θ} in k_{τ} .

Interakcija je možna v vsaki točki segmenta, a ni zaželena v bližini robov, kjer je vpliv robnih pogojev močno prisoten. Interakciji se je priporočljivo izogniti v območju, ki leži znotraj dolžine l_R . Velikost območja določa manjša izmed naslednjih vrednosti:

$$l_R = \min \begin{cases} 0,1L \\ 0,16r \sqrt{\frac{r}{t}} \end{cases}. \quad (58)$$

Ocena je torej, da robni pogoji ne vplivajo globlje kot 10% višine od roba rezervoarja.

Ker bi bilo zelo zahtevno preveriti interakcijo za vsak del segmenta posebej, se poslužimo konservativne metode, po kateri med seboj kombiniramo maksimalne napetosti v posamezni smeri ne glede na lokacijo, kjer se pojavijo, torej tudi v bližini robov. Kot vidimo na sliki 2.13, so maksimalne obodne napetosti ravno na mestu, kjer so minimalne vertikalne napetosti in obratno. Ker pa imajo robovi preprečene pomike, tam ni nevarnosti uklona. Interakcija maksimalnih napetosti tako ne privede do točnega rezultata in je kot že rečeno, zelo konservativna a zato enostavna.



Slika 2.13: Primer potek napetosti, kot posledice vpliva vetra in lastne teže pri kratkih rezervoarjih

Napetosti med seboj kombiniramo s pomočjo pomožnih faktorjev k_x , k_θ , k_τ in k_i , ki jih določimo s pomočjo redukcijskih faktorjev χ_x, χ_θ in χ_τ , določenih po zgornjih enačbah za vsako smer posebej.

$$\begin{aligned}
 k_x &= 1,25 + 0,75\chi_x, \\
 k_\theta &= 1,25 + 0,75\chi_\theta, \\
 k_\tau &= 1,25 + 0,75\chi_\tau, \\
 k_i &= (\chi_x\chi_\theta)^2.
 \end{aligned} \tag{59}$$

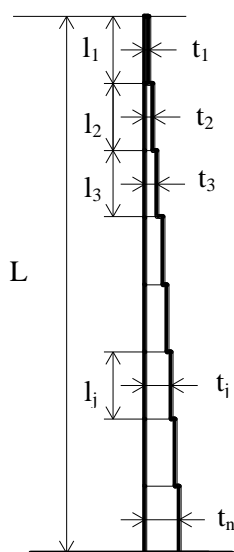
Interakcijska enačba kontrole stabilnosti rezervoarja se tako glasi:

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}} \right)^{k_x} - k_i \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}} \right) \left(\frac{\sigma_{\theta,Ed}}{\sigma_{\theta,Rd}} \right) + \left(\frac{\sigma_{\theta,Ed}}{\sigma_{\theta,Rd}} \right)^{k_\theta} + \left(\frac{\tau_{x\theta,Ed}}{\tau_{x\theta,Rd}} \right)^{k_\tau} \leq 1,0. \tag{60}$$

2.6 Projektiranje rezervoarjev s spremenljivo debelino

Za rezervoarje katerih debelina se spreminja tekom višine veljajo posebna pravila. Ti rezervoarji so zgrajeni iz več segmentov konstantnih debelin (slika 2.14). Tak izbor narekuje ekonomičnost. Pri dnu potrebujemo večje debeline, saj so napetosti zaradi pritiska tekočine tam večji. Obratno je pri vrhu rezervoarja, kjer ne bi bilo smotno imeti debelih segmentov.

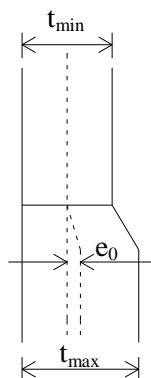
Ideja je, da rezervoar spremenljive debeline prevedemo na nadomestni rezervoar istih lastnosti a konstantne debeline. Nadomestni rezervoar preverimo z napetostno metodo, ki je podana v poglavju 2.5.



Slika 2.14: Stena rezervoarja s spremenljivo debelino

2.6.1 Predpostavke

V računu je predpostavljen konstanten radij, čeprav se razdalja od središča pa do srednje ravnine stene rezervoarja, zaradi različnih debelin, tekom višine malenkost spreminja. Pravila veljajo za robne pogoje tipa BC1 in BC2 (preprečen radialni pomik) na obeh koncih rezervoarja. Na zgornjem robu to zagotovim z nepomično streho ali togo robno ojačitvijo. Zahtevano je, da se debelina segmentov stopnjuje od zgoraj navzdol. Tako mora biti vsak segment enake ali večje debeline od segmenta nad seboj. Predpisana je tudi velikost zamika stikajočih se segmentov e_0 (slika 2.15), ki nastane zaradi različnih debelin.



Slika 2.15: Zamik stikajočih se segmentov

Zamik mora biti manjši od mejnega zamika.

$$e_0 \leq e_{0,p} = \min \begin{cases} 0,5(t_{\max} - t_{\min}) \\ 0,5t_{\min} \end{cases}, \quad (61)$$

kjer sta t_{\min} in t_{\max} debelini stikajočih se segmentov.

Za lažje razumevanje enačb in komentarja podajam osnovne oznake:

L celotna dolžina rezervoarja,

r radij rezervoarja,

j indeks segmenta,

t_j debelina j-tega segmenta,

l_j dolžina j-tega segmenta.

2.6.2 Vertikalni uklon

Vertikalne napetosti se zaradi lastne teže proti dnu rezervoarja povečujejo. Pri naraščajoči debelini segmentov se stopničasto povečuje tudi odpornost. Območje kontrole je zato na spodnjem delu vsakega segmenta, saj je tam napetost največja.

Kontrola vertikalnega uklona je enaka kontroli uklona pri konstantni debelini. Preveriti je potrebno vsak segment posebej. Za velikost segmenta l_j se privzame velikost celotnega rezervoarja L , debelina segmenta t_j ostane ista.

V primeru dolgega segmenta, po kriteriju kontrole za vertikalni uklon rezervoarja konstantne debeline, je priporočljivo za parameter C_x vzeti vrednost 1,0.

2.6.3 Uklon v obodni smeri

Za razliko od kontrole vertikalnega uklona, tu celoten rezervoar pretvorimo v nadomestnega. To naredimo v dveh korakih.

Rezervoar najprej pretvorimo v nadomestni rezervoar sestavljen iz treh segmentov: a , b in c , znotraj katerih povprečimo dejanske debeline segmentov, kot je to prikazano na sliki 2.16. Takšna metoda je veliko varnejša, kot pa da bi imeli samo en nadomestni segment z nadomestno debelino, kot povprečjem vseh debelin po višini rezervoarja. S tem ločeno obravnavamo zgornji del, kjer je debelina segmentov najtanjša in se pričakuje da bo prišlo do uklona.

Velikost prvega nadomestnega segmenta l_a seže od zgornjega roba rezervoarja pa do zgornjega roba prvega segmenta, katerega debelina je 1,5 – krat večja od najtanjšega segmenta. Pri tem l_a ne sme biti večji od polovice celotne višine dejanskega rezervoarja. Velikosti ostalih dveh segmentov določimo glede na velikost prvega.

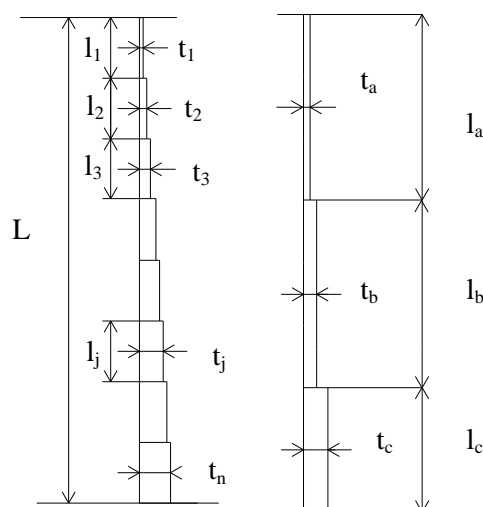
Če velja $l_a \leq L/3$, potem je drugi nadomestni segment b enake velikosti kot prvi in tretji segment zasede preostali prostor celotne višine rezervoarja:

$$l_b = l_a, \quad (62)$$

$$l_c = L - 2l_a. \quad (63)$$

Če je prvi segment večji od tretjine celotne višine $L/3 < l_a < L/2$ sta ostala dva segmenta enake velikosti:

$$l_b = l_c = 0,5(L - l_a). \quad (64)$$



Slika 2.16: Pretvorba dejanskega rezervoarja na nadomestni rezervoar treh debelin

V primeru, da je dejanski rezervoar sestavljen samo iz treh segmentov različnih debelin, za dimenzije nadomestnega rezervoarja privzamemo kar realne vrednosti. V primeru, da imamo rezervoar sestavljen le iz dveh segmentov različnih debelin, predpostavimo da sta nadomestna segmenta a in b enake debeline.

Debelino nadomestnih segmentov določimo kot povprečje dejanskih debelin na območju nadomestnega segmenta:

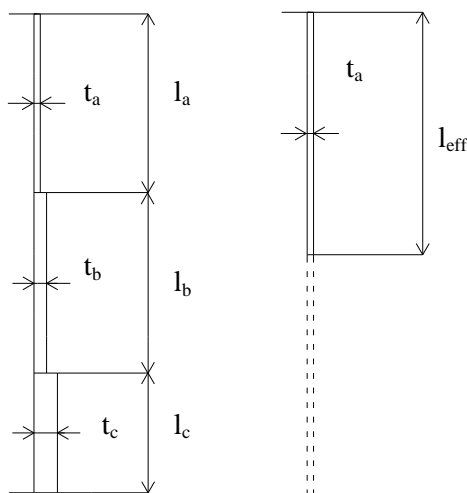
$$\begin{aligned} t_a &= \frac{1}{l_a} \sum_a l_j t_j, \\ t_b &= \frac{1}{l_b} \sum_b l_j t_j, \\ t_c &= \frac{1}{l_c} \sum_c l_j t_j. \end{aligned} \quad (65)$$

V naslednjem koraku nadomestne tri segmente nadomestimo z enim segmentom konstantne debeline in efektivne velikosti l_{eff} (slika 2.17). Za velikost privzamemo kar velikost prvega nadomestnega segmenta l_a , povečanega za faktor κ . Tega preberemo iz pripadajočih diagramov. Debelina končnega nadomestnega rezervoarja ostane enaka debelini prvega nadomestnega segmenta t_a .

$$l_{eff} = l_a / \kappa. \quad (66)$$

Tako dobimo končni nadomestni rezervoar konstantne debeline t_a in velikosti l_{eff} .

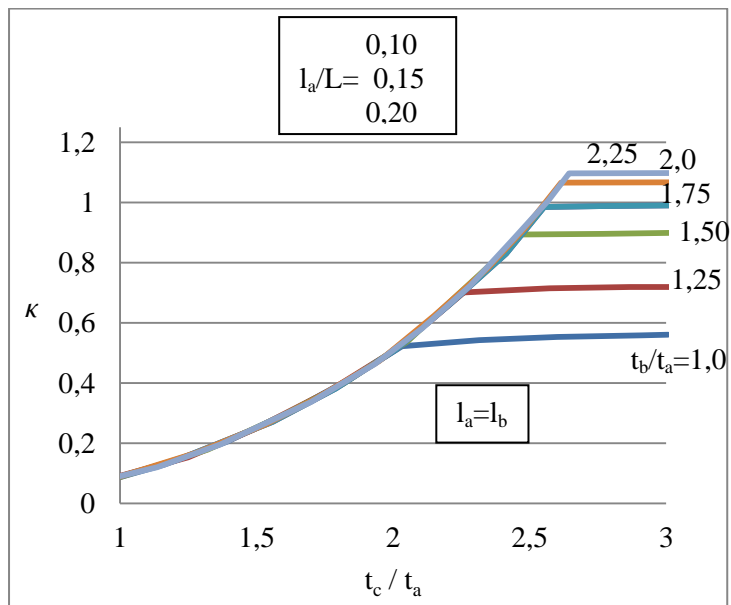
Kritična uklonska napetost je tako določena glede na zgornji del dejanskega rezervoarja. Tam se namreč, zaradi najtanjših segmentov, tudi pričakuje do bo prišlo do uklona. Vpliv velikosti in debeline ostalih treh nadomestnih segmentov se odraža pri izbiri faktorja κ .



Slika 2.17: Pretvorba nadomestnega rezervoarja treh debelin na rezervoar konstantne debeline

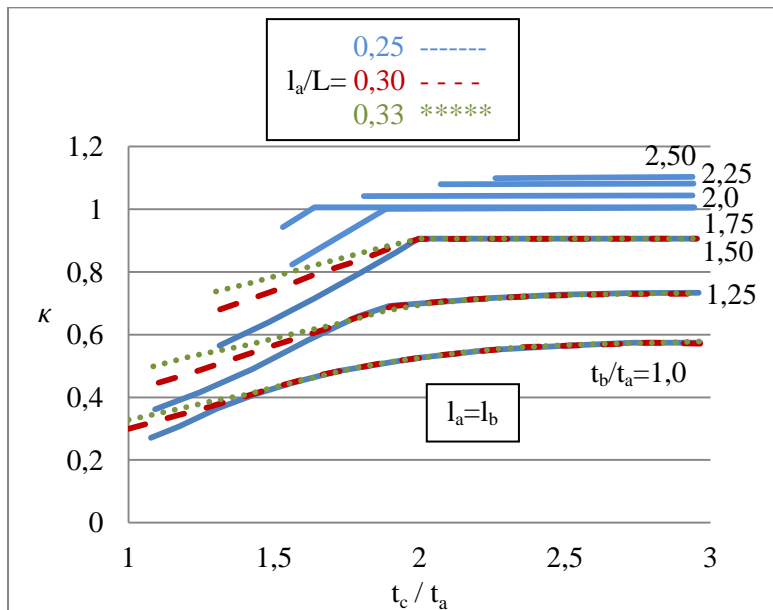
Faktor κ razberemo iz grafikonov 2.1 – 2.4.

Na prvem grafu lahko odčitamo vrednosti kapa za rezervoarje katerih razmerje l_a/L se giblje med 0,10 in 0,20. Dejanski graf v priporočilih podaja različne krivulje tudi za vmesna razmerja, vendar je zaradi nepreglednosti nemogoče odčitati posamezne vrednosti. Zato smo graf poenostavili. Višja razmerja smo enačili z vrednostmi za razmerje 0,10 in tako ostali na varni strani, saj dobimo manjše vrednosti kapa in posledično večji l_{eff} .

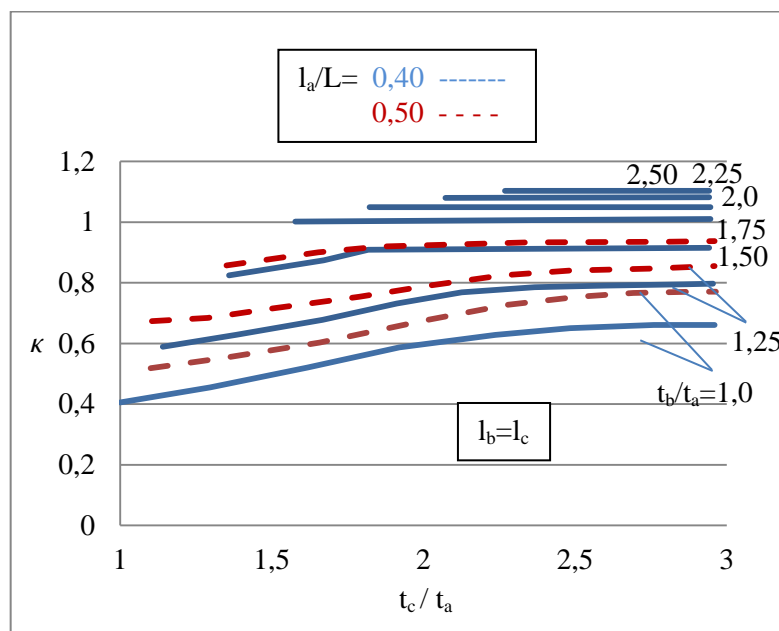


Grafikon 2.1: Krivulje za določitev vrednosti $\kappa(1)$

Na drugem grafu so prodane vrednosti za razmerje $l_a / L = 0,25, 0,30$ in $0,33$.



Grafikon 2.2: Krivulje za določitev vrednosti $\kappa(2)$



Grafikon 2.3: Krivulje za določitev vrednosti $\kappa(3)$

Pri razmerjih t_b/t_a od 1,0 pa do 1,50 imamo za vsako razmerje svojo krivuljo. Vendar te krivulje konvergirajo k skupni vrednosti, ko se razmerje t_c/t_a povečuje. Pri višjih razmerjih t_b/t_a je na grafikonu narisana le ena krivulja, saj tam krivulje z različnim l_d/L zavzamejo enake vrednosti.

Na tretjem grafu pa so prodane vrednosti za razmerje $l_d/L = 0.40$ in 0.50 . Tudi tu so pri večjih razmerjih t_b/t_a krivulje zavzamejo enak vrednosti pri sicer različnem razmerju l_d/L .

Elastično kritično obodno uklonsko napetost računamo za nadomestni rezervoar dolžine l_{eff} in konstantne debeline t_a . Sledimo enačbam za račun uklona v obodni smeri rezervoarjev konstantne debeline, podanimi v prejšnjem poglavju.

Priporočljivo je le, da za srednje in vitke rezervoarje za faktor C_θ privzamemo vrednost $C_\theta = 1,0$.

Pri kratkih rezervoarjih za faktor C_θ uporabimo enake enačbe kot pri računu za konstantno debelino.

Z znano elastično kritično uklonsko napetostjo celotnega nadomestnega rezervoarja $\sigma_{\theta,Rcr,eff}$ lahko izračunamo kritično napetost posameznega segmenta. Za segmente kratke in srednje velikosti, kritično napetost izračunamo kar z razmerjem debelin dejanskega in nadomestnega segmenta:

$$\sigma_{\theta,Rcr,j} = \left(\frac{t_a}{t_j} \right) \sigma_{\theta,Rcr,eff}, \quad (67)$$

pri čemer velikost segmenta določimo z:

$$\omega_j = \frac{l_j}{\sqrt{rt_j}}. \quad (68)$$

Pri velikih segmentih, za katere velja:

$$\omega_j > 1,63 \frac{r}{t_j}, \quad (69)$$

je potrebno narediti dodatno kontrolo:

$$\sigma_{\theta, Rcr, j} = E \left(\frac{t_j}{r} \right)^2 \left[0,275 + 2,03 \left(\frac{1}{\omega_j} \frac{r}{t_j} \right)^4 \right]. \quad (70)$$

Merodajna je manjša izmed obeh vrednosti elastične kritične uklonske napetosti.

Za določitev uklonske odpornosti sledimo postopku za uklon v obodni smeri rezervoarjev konstantne debeline, podanemu v zgornjem poglavju.

2.6.4 Strig

Strig prav tako preverimo na nadomestnem rezervoarju, določenem po enakem postopku kot pri uklon v obodni smeri. Elastično kritično uklonsko napetost in uklonsko odpornost pa izračunamo z enačbami za strig pri rezervoarju konstantne debeline, podanimi v prejšnjem poglavju.

2.7 Kontrola ojačitev rezervoarja

Posebno poglavje priporočil se ukvarja tudi s projektiranjem ojačitev. Enačbe veljajo za rezervoarje s konstantno debelino, ki so ojačeni z enako oddaljenimi šibkimi ojačitvami in podprti na robovih z močnimi ojačitvami oziroma nepomično streho.

Ojačitve so lahko na zunanji ali notranji strani stene rezervoarja, pritrjene pa morajo biti neprekinjeno oziroma vsaj na kratkih razmikih.

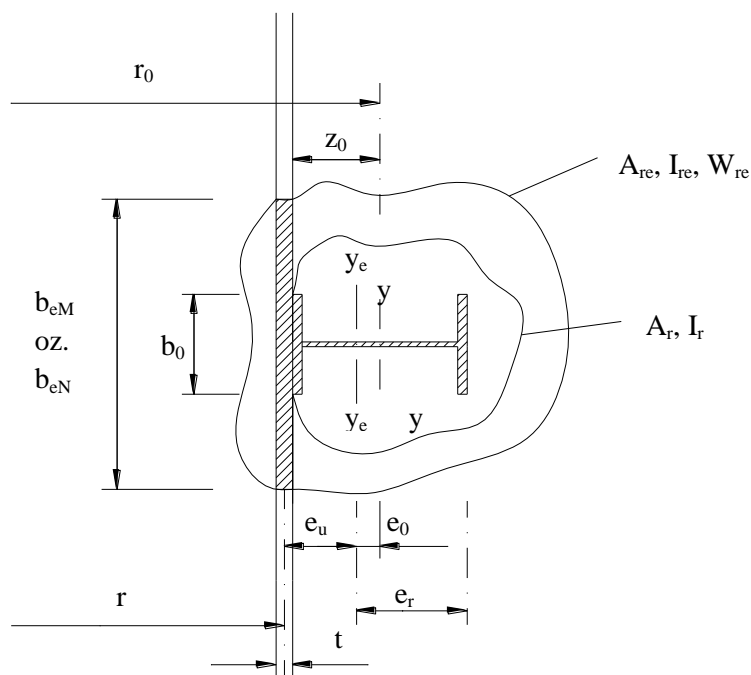
Zunanji enakomerno porazdeljeni obtežbi pravokotno na steno rezervoarja se lahko doda vertikalno obtežbo, ki zajema vpliv lastne teže rezervoarja, ter vpliv snega, pod pogojem, da je osna napetost manjša od obročne:

$$n_{xEd}(P_{xEd}) \leq q_{ed} * r. \quad (71)$$

Pravila so primerna le za rezervoarje, ki imajo na robovih preprečen radialni pomik, to je za robne pogoje tipa BC1 in BC2 na obeh koncih rezervoarja. Čeprav se rezervoarji, ki imajo preprečen tudi vertikalni pomik bolje obnašajo pri uklonu, priporočila ne delajo razlik med vertikalno podprtimi in vertikalno nepodprtimi rezervoarji.

Za lažje razumevanje enačb, podajam pomen nekaterih oznak že na začetku. Prav tako je v pomoč slika 2.18:

| | |
|--------------------------|--|
| A_r, I_r | površina in vztrajnostni moment šibke ojačitve, |
| A_h, I_h | površina in vztrajnostni moment močne ojačitve, |
| A_{re}, I_{re}, W_{re} | površina, vztrajnostni moment in odpornostni moment efektivne šibke ojačitve (upoštevana tudi sodelujoče dolžine stene rezervoarja), |
| A_{he}, I_{he}, W_{he} | površina, vztrajnostni moment in odpornostni moment efektivne močne ojačitve (upoštevana tudi sodelujoče dolžine stene rezervoarja), |
| b_{eN} | sodelujoča dolžina stene rezervoarja za račun obodne sile, |
| b_{eM} | sodelujoča dolžina stene rezervoarja za račun obodnega upogibnega momenta, |
| l | dolžina ojačene stene rezervoarja med močnimi ojačitvami oziroma robnimi 'pokrovi', |
| l_r | dolžina neojačene stene rezervoarja med šibkimi ojačitvami, |
| m | predpostavljeno število obročnih uklonskih valov, |
| m_{cr} | število obročnih uklonskih valov m , pri katerem dobimo najmanjši q_{Rcr}^* , |
| q_{Rcr}^* | bifurkacijska obtežba, dobljena s predpostavljenim m , |
| q_{Rcr} | kritična uklonska obtežba, dobljena s kritičnim m_{cr} . |



Slika 2.18: Sodeljuoč prezez ojačitve

Pri projektiranju ojačitve, moramo upoštevati sodeljuoč prečni prezez, v katerega je vključen tudi del stene rezervoarja. Priporočila razlikujejo dve sodeljuoč dolžini stene rezervoarja. Eno za račun napetosti zaradi obročne sile in drugo za račun napetosti zaradi obročnega upogibnega momenta. Velikost je predvsem odvisna od radija rezervoarja r in debeline t .

Sodeljuočo dolžino stene rezervoarja za račun obročne sile izračunamo na naslednji način:

$$b_{eN} = b_0 + \eta_1 * 1,56 * \sqrt{r * t} , \quad (72)$$

$$\eta_1 = 0,64 * \frac{(l_r - b_0)}{\sqrt{r * t}} \leq 1. \quad (73)$$

kjer je b_0 širina ojačitve na stiku s steno rezervoarja in l_r razdalja med šibkimi ojačtvami.

Sodeljuočo dolžino stene rezervoarja za račun obročnega upogibnega momenta pa odčitamo iz spodnje preglednice:

$$\lambda_r = 1,285 * \frac{l_r}{\sqrt{r * t}} . \quad (74)$$

Preglednica 2.12: Določitev sodelujočega dela rezervoarja za račun upogibnega momenta

| r/t | λ_r | b_{eM}/l_r |
|---------------------|--------------------|---|
| $30 \leq r/t < 290$ | $\lambda_r < 2$ | $C_1 * 0,5 - 0,25 * (\lambda_r - 2) \leq 1$ |
| $30 \leq r/t < 290$ | $\lambda_r \geq 2$ | C_1/λ_r |
| $r/t \geq 290$ | vsi λ_r | $\left(2 + 0,1 * \left(\frac{r}{t} - 290\right)\right) * \frac{1}{\lambda_r}$ |

$$C_1 = 2 - (0,17 * m - 0,31) * \left(\frac{290 - r/t}{260}\right)^{3,9}. \quad (75)$$

Pri računu sodelujočega prereza upoštevamo celotno ojačitev, razen v primeru, ko zunanja pasnica ojačitve ne zadosti pogoj:

$$b_f \leq (1,2 * r * t_f)^{0,5}. \quad (76)$$

V tem primeru je treba upoštevati efektivno dolžino pasnice, skladno z EN 1993-1-3.

Ostale karakteristike efektivnega prereza, kjer je upoštevana sodelujoča dolžina stene rezervoarja so:

$$A_{re} = A_r + b_{eN} * t,$$

$$I_{re}^* = I_r + A_r * e_0^2 + b_{eM} * t * e_u^2, \quad (77)$$

$$I_{re} = I_{re}^* + \frac{b_{eM} * t^3}{12},$$

$$W_{re} = \frac{I_{re}}{e_r}.$$

Geometrijske tolerance, znotraj katerih mora biti sam rezervoar, so podane na začetku poglavja. Določene pa so tudi mejne tolerance za samo ojačitev. Tudi tu so odvisne od izbranega razreda kvalitete izdelave. Višji kot je razred, strožji so pogoji zadostitve.

Za začetno obodno ukrivljenost so podane naslednje zahteve:

$$a \leq U_{ra} * r \quad \text{za } m \leq 6, \quad (78)$$

$$a \leq U_{rb} * \frac{r}{m} \quad \text{za } m \geq 6,$$

kjer je

a največji absolutni odmik od srednjega radija rezervoarja,

m število predvidenih obročnih uklonskih valov.

Faktorja $U_{r,a}$ in $U_{r,b}$ preberemo iz preglednice 2.13 in sta odvisna od izbranega razreda izdelave.

Preglednica 2.13: Tolerance parametra za račun začetne obodne ukrivljenosti

| Razred kvalitete izdelave | Opis | $U_{r,a}$ | $U_{r,b}$ |
|---------------------------|----------|-----------|-----------|
| Razred A | Odličen | 0,0035 | 0,020 |
| Razred B | Visok | 0,0050 | 0,030 |
| Razred B | Normalen | 0,0075 | 0,045 |

S parametrom a določimo amplitudo sinusni funkciji, ki ponazarja začetno ukrivljenost ojačitve. Najbolj neugodna oblika, sovпада s kritično uklonsko obliko rezervoarja.

Druga zahteva glede ojačitev je začetni nagib glede na vodoravnico, ki mora zadostiti pogoju:

$$\theta \leq U_{\theta}. \quad (79)$$

Tolerance, glede na izbran razred izdelave so podane v preglednici 2.14:

Preglednica 2.14: Tolerance zasuka ojačitve

| Razred izdelave | Opis | U_{θ} [°] |
|-----------------|----------|------------------|
| Razred A | Odličen | 0,35 |
| Razred B | Visok | 0,50 |
| Razred C | Normalen | 0,75 |

2.7.1 Območje med ojačitvami

Kontrola rezervoarjev z ojačitvami se deli na dva dela. Na del, ki zajema območje med ojačitvami in del, ki se ukvarja z ojačitvami samimi.

Steno rezervoarja med ojačitvami projektiramo z enačbami za rezervoarje konstantne debeline, podanimi v prejšnjem poglavju, pri čemer za dolžino vzamemo razdaljo med ojačitvami l_r . V primeru, da je stena rezervoarja med ojačitvami različnih debelin, območje med ojačitvami preverimo z enačbami za rezervoarje spremenljive debeline. Tako najprej prevedemo razdaljo na nadomestno in zanj izračunamo odpornost. Dodatno priporočilo je, da pri računu kritične obodne uklonske napetosti za robne pogoje privzamemo, da vertikalni pomik ni preprečen, torej imamo robni pogoj tipa BC2 na obeh robovih.

2.7.2 Ojačitve

Priporočila posebej obravnavajo projektiranje šibkih ojačitev in projektiranje močnih ojačitev.

2.7.2.1 Šibke ojačitve

Pri projektiranju šibkih ojačitev je potrebno preveriti naslednje:

- upogibna togost obročne ojačitve
- upogibni uklon obročne ojačitve
- torzijski uklon obročne ojačitve
- lokalni uklon obročne ojačitve

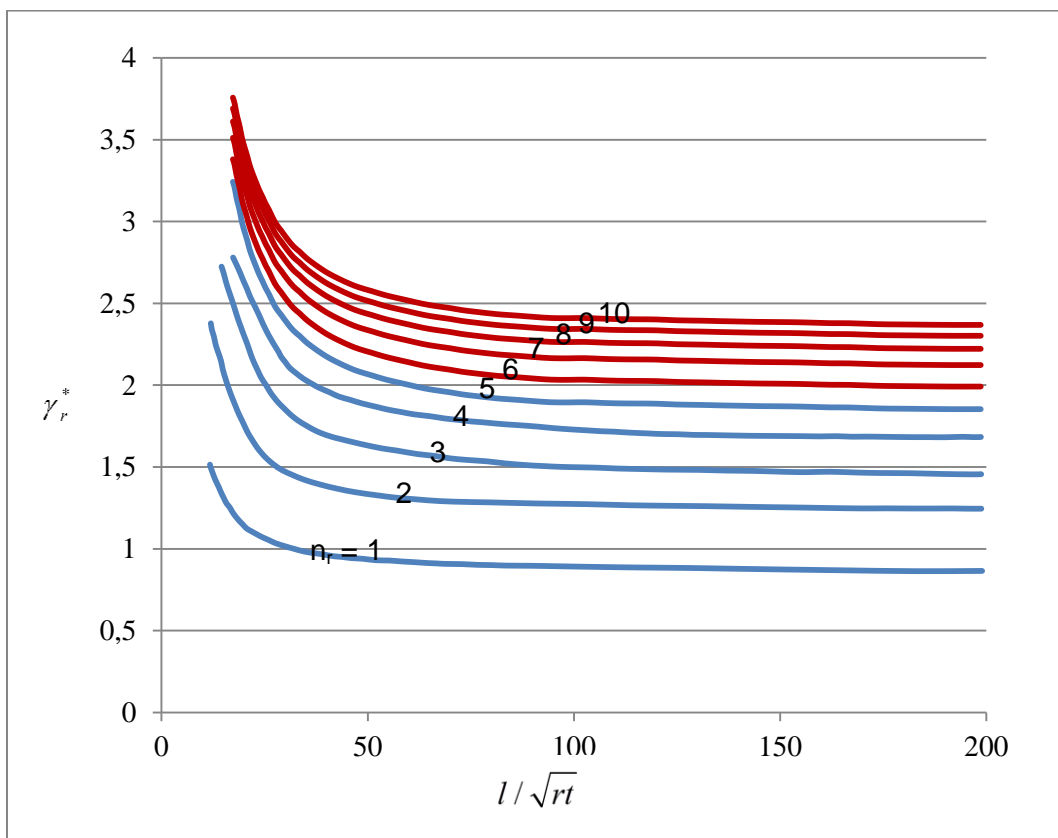
Ključna je kontrola upogibnega uklona ojačitve. Z njo preverimo uklonsko odpornost celotnega ojačenega rezervoarja. S kontrolama lokalnega in torzijskega uklona preverimo le zadostnost prereza, ki zagotavlja, da do uklona ne pride v ojačitvi sami. Prav tako, s kontrolo upogibne togosti ojačitve določimo minimalno togost ojačitve, pri katerem kritičen postane lokalni uklon stene rezervoarja med ojačitvami in ne uklon ojačitve.

2.7.2.1.1 Upogibna togost

Upogibno togost ojačitve preverimo s pomočjo brez dimenzionalnega togostnega parametra γ_r :

$$\gamma_r = 0,91 * \left(\frac{I_{re}^*}{l^* \frac{t^3}{12}} \right). \quad (80)$$

Tega primerjamo z γ_r^* , ki ga preberemo iz grafikona 2.5, glede na izbrano število ojačitev ter lastnosti rezervoarja. Graf sicer ne omogoča odčitke γ_r^* za število ojačitev večje od 5, vendar, glede na to, da je ta kontrola le inženirski približek lahko graf, brez posebne nevarnosti, ekstrapoliramo do 10 ojačitev.



Grafikon 2.4: Minimalna upogibna togost ojačitve

2.7.2.1.2 Upogibni uklon

Pri kontroli upogibnega uklona je potrebno najprej izračunati predvideno število obročnih uklonskih valov m :

$$m_{cr} = \left(\frac{r}{l}\right) * 10^{\bar{m}} \quad \beta \leq 10^4, \quad (81)$$

$$m_{cr} = \left(\frac{3200}{1 + \gamma_r * (l/l_r)}\right)^{0,125} * \left(\frac{r^3}{l^2 * t}\right)^{0,25} \quad \beta > 10^4,$$

kjer je:

$$\beta = \frac{0,95}{\sqrt{1 + \gamma_r * (l/l_r)}} * \left(\frac{l^2}{r * t}\right),$$

$$\bar{m} = 0,443 + 0,248 * \log(\beta) - 7 * 10^{-4} * (4 - \log(\beta))^{4,51},$$

$$l / \sqrt{rt}. \quad (82)$$

Glede na dobljeno vrednost m_{cr} postopamo različno. Če je $m_{cr} > 6$, vzamemo to vrednost za predvideno število obročnih uklonskih valov in z njo izračunamo kritični uklonski pritisk q_{Rcr} , obodni upogibni moment M_r in obodno napetost $\sigma_{\theta r}$.

Če pa dobimo za m_{cr} vrednost, ki je manjša ali enaka 6, pa moramo postopati interaktivno in za vsak m med 2 in 6 izračunati q_{Rcr} , M_r in $\sigma_{\theta r}$ posebej. Pravi m je tisti, ki na koncu da največjo obročno napetost $\sigma_{\theta r}$:

$$q_{Rcr}^* = 0,183 * E * \left(\frac{t}{r}\right)^3 * \bar{q},$$

$$\bar{q} = \frac{1}{\lambda_r^2} + \frac{m^4}{\left(\frac{1}{\lambda_r^2} + 2 * m^2\right)} * \left(1 + \gamma_r * \left(\frac{l}{l_r}\right)\right) + \frac{10,92 * \left(\frac{r}{t}\right)^2}{(1 + m^2 * \lambda_r^2)^2 * \left(\frac{1}{\lambda_r^2} + 2 * m^2\right)}, \quad (83)$$

$$\lambda_r = \frac{l}{\pi * r}.$$

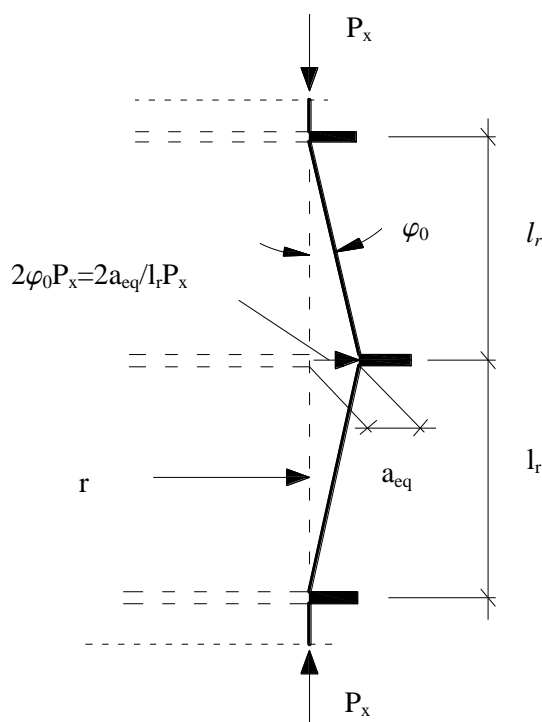
V kontroli upogibnega uklona ojačitve uporabimo teorijo II. reda z upoštevanjem geometrijskih nepopolnosti v obliki sinusne funkcije. Izračunana obodna napetost v ojačitvi mora biti manjša od napetosti tečenja:

$$\sigma_{\theta r} = \left(\frac{N_r}{A_{re}}\right) + \left(\frac{M_r}{W_{re}}\right) \leq \frac{f_{y,k}}{\gamma_M}, \quad (84)$$

kjer je N_r obodna sila v ojačitvi in M_r obodni upogibni moment v ojačitvi, ki nastane zaradi nepopolnosti:

$$N_r = q * r * b_{eN},$$

$$M_r = \left[\frac{E * I_{re}}{r^2} * (m^2 - 1) * a_{eq} * \frac{q}{q_{Rcr}^*} + \left(P_x * \frac{2 * a_{eq}}{l_r} * \frac{r^2}{m^2 - 1} \right) \right] * \frac{1}{1 - \frac{q}{q_{Rcr}^*}}. \quad (85)$$



Slika 2.19: Predpostavljen model za račun maksimalnega upogibnega momenta pri vertikalni obtežbi

V oklepaju enačbe za račun obodnega upogibnega momenta drugi izraz zajema vpliv vertikalne obtežbe. Predpostavljeno je, da ima pri treh zaporednih ojačitvah srednja ojačitev polno vrednost nepopolnosti a_{eq} , sosednji pa je nimata. Tako dobimo največji upogibni moment zaradi vertikalne sile in nepopolnosti (slika 2.19). Ker pa lahko z večanjem števila ojačitev in posledično manjšanjem razdalje l_r postane izraz zelo velik in nesmiseln, saj se z manjšanjem razdalje l_r povečujemo tudi upogibni moment, je podana naslednja omejitev:

$$\frac{a_{eq}}{l_r} \leq \frac{1}{200}, \quad (86)$$

$$a_{eq} = \eta_2 * a,$$

kjer je:

a_{eq} amplituda sinusne nadomestne nepopolnosti ojačitve,

η_2 faktor glede na tip izdelave, odčitano iz preglednice 2.15,

a največji absolutni odmik od srednjega radija rezervoarja, izbran glede na razred izdelave.

Preglednica 2.15: Vrednost η glede na način izdelave pločevine

| Tip izdelave | η_2 |
|-----------------------------|----------|
| hladno oblikovana pločevina | 1,5 |
| vroče oblikovana pločevina | 1,3 |

2.7.2.1.3 Torzijski uklon

Za obročne ojačitve H-, T- in L- oblike je potrebno dokazati, da je torzijska odpornost ojačitve najmanj 1,5 - krat večja kot lokalna uklonska odpornost stene med ojačitvami.

$$\chi_{tor} \geq 1,5 * \chi_{loc}, \quad \chi_{tor} \leq 1,0. \quad (87)$$

faktor χ_{loc} , določimo z enačbami za uklon rezervoarja konstantne debeline, redukcijski faktor χ_{tor} pa odčitamo iz uklonskih krivulj v EN 1993-1-1, ob znani vitkosti λ_{tor} :

$$\lambda_{tor} = \sqrt{\frac{N_{r,pl}}{N_{r,cr}}}, \quad (88)$$

pri čemer je $N_{r,pl}$ plastična nosilnost obročne ojačitve :

$$N_{r,pl} = A_r * f_{y,k}, \quad (89)$$

in $N_{r,cr}$ kritična torzijska uklonska nosilnost, ki jo lahko določimo z izrazom:

$$N_{r,cr} = \frac{E * I_{rz}}{r_0 * z_0}, \quad (90)$$

kjer je I_{rz} vztrajnostni moment ojačitve okoli šibke osi.

2.7.2.1.4 Lokalni uklon ojačitve

Kot zadnja kontrola je kontrola lokalnega uklona ojačitve. Pri zunanjih ojačitvah tej kontroli zadostimo z ustrežno izbiro prečnega prereza ojačitve, ki mora spadati v najmanj tretji razred kompaktnost. Navedene so sicer še natančnejše enačbe, ki v odpornosti ojačitve upoštevajo vpliv stene rezervoarja, vendar bomo znotraj diplomske naloge uporabljali le ojačitve, ki spadajo vsaj v tretji razred kompaktnosti, tako da dodatne kontrole niso potrebne. Prav tako priporočilo posebej podaja zahtevo za obročne ojačitve na notranji strani rezervoarja, ki pa jih prav tako v diplomski nalogi ne bomo obravnavali in zato ta zahteva tu ni zajeta.

2.7.2.2 Močne ojačitve

Priporočila dodajajo tudi zahteve za močne ojačitve, ki so analogne zahtevam za šibke ojačitve vendar z nekaj spremembami.

Sodelujoč prečni prerez izračunamo enako kot pri šibkih ojačitvah, le da pri računu vplivne dolžne rezervoarja, ki ga upoštevamo v sodelujočem prerezu b_{eN} upoštevamo, da je število obročnih valov m enako 2, ter parameter l_r nadomestimo z l_h .

V izrazu za izračun sodelujoče dolžine stene rezervoarja za račun obodne sile b_{eN} vzamemo samo polovico drugega izraza. Prav tako v izrazih za račun vztrajnostnih momentov vzamemo le polovično vrednost b_{eM} :

$$b_{eN} = b_0 + 0,5 \times \eta_1 \times 1,56 \sqrt{rt},$$

$$I_{he} = I_{he}^* + 0,5 \frac{b_{eM} t^3}{12}, \quad (91)$$

$$I_{he}^* = I_{he} + A_{he} \times e_0^2 + 0,5 \times b_{eM} \times t \times e_u^2.$$

Če imamo močno ojačitev na sredini rezervoarja, za vrednost l_h vzamemo povprečno velikost zgornjega in spodnjega polja rezervoarja l . V primeru močne ojačitve na zgornjem robu rezervoarja, pa za l_h vzamemo polovico celotne dolžine l .

Pri močnih ojačitvah je treba izvesti enake kontrole kot pri šibkih ojačitvah, le z nekaj spremembami.

2.7.2.2.1 Upogibna togost

Zadostno upogibno togost preverimo z naslednjo enačbo:

$$I_{he} \geq q * \frac{r^3 * l_h}{3 * E}, \quad (92)$$

pri čemer je I_{he} vztrajnostni moment močne ojačitve in sodelujoče stene rezervoarja.

2.7.2.2.2 Upogibni uklon

Enačbe za kontrolo upogibnega uklona so enake tistim za šibke ojačitve, le da je upoštevano število obročnih uklonskih valov m enako 2 in razred kvalitete izdelave enak B:

$$q_{h,Rcr} = \frac{3 * E * I_{he}}{r^3 * l_h}, \quad (93)$$

$$N_h = q * r * b_{eN},$$

$$M_h = \frac{E * I_{he}}{r} * \left(\frac{\eta_2}{67}\right) * \left(\frac{\frac{q}{q_{h,Rcr}}}{1 - \frac{q}{q_{h,Rcr}}}\right),$$

$$\sigma_{\theta h} = \left(\frac{N_h}{A_{he}}\right) + \left(\frac{M_h}{W_{he}}\right) \leq \frac{f_{y,k}}{\gamma_{M1}},$$

2.7.2.2.3 Torzijski in lokalni uklon ojačitve

Kontroli torzijskega in lokalnega uklona močne ojačitve sta enaki kontrolam za šibke ojačitve.

3 EN 14015:2004 [7]

Navodila za projektiranje obročnih ojačitev vsebuje tudi Evropski standard EN14015, ki sicer vsebuje pravila za projektiranje jeklenih valjastih rezervoarjev. Kot je razvidno v spodnjih vrsticah so pravila in enačbe namenjene hitremu in enostavnemu izračunu potrebne velikosti in pozicije ojačitev, tako da ni ogrožena stabilnost rezervoarja.

V primeru odprtih rezervoarjev je potrebno, zaradi zagotovitve stabilnosti rezervoarja pod vplivom vetra, uporabiti primarno (močno) ojačitev. Ojačitev mora biti postavljena v bližini zgornjega roba rezervoarja in najboljše na zunanji strani. Primarna ojačitev pa ni potrebna v primeru uporabe nepomične strehe, saj le-ta zagotovi zadostno togost rezervoarja. Slednje velja v primeru vodoravne strehe, katera na stiku z rezervoarjem povzroča samo vertikalne reakcije. V nasprotnem primeru je potrebno zagotoviti robno ojačitev, ki omogoča prevzem horizontalne reakcije na zgornjem robu rezervoarja.

Ko sama uporaba močne ojačitve ni dovolj, je potrebno, da zagotovimo stabilnost rezervoarja, dodati sekundarne ojačitve. Sekundarne ojačitve so lahko poljubnih oblik.

Standard navaja minimalne dimenzije za ojačitev v obliki kotnika, kot samostojne ojačitve ali kot dela sestavljene ojačitve 60 mm*60 mm*5 mm. Minimalna debelina pločevine, uporabljene v sestavljeni ojačitvi, ko je njena širina manjša od 600mm, je 5mm. Ko je širina ojačitve večja od 600 mm mora biti njena debelina najmanj 6 mm.

V primeru, ko dolžina horizontalne stojine ali pasnice primarne ojačitve preseže 16 -kratnik lastne debeline, je ojačitev potrebno na primernih razdaljah podpreti s konzolami tekom celotnega oboda.

Da zagotovimo pravilno vzajemno delovanje rezervoarja in ojačitve, mora biti ojačitev pritrjena na rezervoar z neprekinjenim kotnim zvarom na zgornji strani tekom oboda.

3.1 Projektiranje primarne ojačitve

Standard navaja enačbo za določitev minimalnega odpornostnega momenta primarne ojačitve

$$Z = 0,058 * D^2 * H_f * \frac{V_w^2}{45^2}, \quad (94)$$

kjer je:

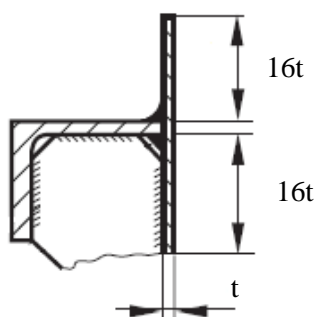
D premer rezervoarja [m]

H_f višina rezervoarja [m]

V_w hitrost sunka vetra [m/s]

Pri čemer V_w , hitrost 3 sekundnega sunka vetra, ne sme biti manjša od 45 m/s. V primeru, ko se pričakuje višje hitrosti, je potrebno v skladu z dogovorom med naročnikom in izvajalcem določiti hitrost na podlagi nacionalnih podatkov. Za rezervoarje, katerih premer je večji od 60 m, predpostavimo vrednost 60 m.

V računu odpornostnega momenta upoštevamo celoten sodelujoč prerez. Tako je potrebno zajeti tudi del stene rezervoarja. K prerezu ojačitve dodamo še 16 -kratnik debeline stene pod in kjer je možno tudi nad mestom pritrditve ojačitve na steno rezervoarja (slika 3.1).



Slika 3.1: Sodelujoč prerez ojačitve

V primeru, ko primarna ojačitev leži več kot 600 mm pod zgornjim robom rezervoarja, je potrebno na zgornji rob dodati ojačitev v obliki kotnika. Minimalne dimenzije kotnika so 60 mm*60 mm*5 mm, ko je debelina zadnjega segmenta rezervoarja 5 mm ali manjša in 80 mm*80 mm*6 mm, ko je debelina zadnjega segmenta rezervoarja 6 mm ali večja.

V primeru uporabe kotnika kot primarne ojačitve pritrjene na zgornjem robu na steno s čelnim zvarom, sodelujoča dolžina pločevine, ki sodeluje s kotnikom, znaša 16 -kratnik debeline stene zmanjšane za vertikalno dolžino stranice kotnika.

3.2 Projektiranje sekundarne ojačitve

Minimalne dimenzije sekundarne ojačitve standard navaja kar v preglednici in niso odvisne od obtežbe, temveč le od premera rezervoarja. V preglednici 3.1 so podane minimalne dimenzije za ojačitev v obliki kotnika. Seveda ja možna tudi uporaba ojačitev drugačnih oblik, vendar morajo imeti enak odpornostni moment kot zahtevan kotnik.

Preglednica 3.1: Minimalen odpornostni moment ojačitve glede na radij rezervoarja

| Premer rezervoarja D [m] | Minimalne dimenzije kotnika [mm x mm x mm] | Odpornostni moment [mm ³] |
|-----------------------------|---|--|
| D ≤ 20 | 100 x 65 x 8 | 18900 |
| 20 < D ≤ 36 | 120 x 80 x 10 | 34100 |
| 36 < D ≤ 48 | 150 x 90 x 10 | 53300 |
| 48 < D | 200 x 100 x 12 | 111000 |

Spoji pri sestavljenih ojačitvah morajo biti polno nosilni. Zaželena je uporaba čelnih zvarov.

Ko določimo potrebne dimenzije ojačitve, je potrebno določiti še položaj teh ojačitev tekom višine rezervoarja. Pomagamo si z nadomestnim rezervoarjem konstantne debeline.

Praviloma so rezervoarji sestavljeni iz več segmentov različnih debelin, saj pri dnu potrebujemo večjo debelino kot na vrhu rezervoarja. Iz ekonomskih razlogov bi bilo neracionalno imeti rezervoar konstantne debeline, ki jo narekuje obtežba pri dnu rezervoarja. Da pa lahko takemu rezervoarju določimo položaj ojačitev je potrebno najprej uvesti nadomestni rezervoar istih stabilnostnih lastnosti, s konstantno debelino enako zgornjemu, najtanjšemu segmentu. Nadomestni rezervoar ima zato manjšo višino od dejanskega. Vsak segment posebej prevedemo na debelino najtanjšega segmenta H_e . Skupno višino nadomestnega rezervoarja H_E izračunamo tako, da seštejemo višine vseh nadomestnih segmentov:

$$H_E = \sum H_e, \quad (95)$$

$$H_e = h * \left(\frac{t_{min}}{t} \right)^{\frac{5}{2}}.$$

Nadalje je potrebno izračunati maksimalno dovoljeno razdaljo med sekundarnimi ojačitvami nadomestnega rezervoarja H_P :

$$H_P = K * \left(\frac{t_{min}^5}{D^3} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (96)$$

$$K = \frac{95000}{3,563 * V_W^2 + 580 * p_v},$$

kjer je:

t_{min} debelina najtanjšega segmenta [mm],

t debelina i-tega segmenta [mm],

- h višina i-tega segmenta [m],
- D premer rezervoarja [m],
- H_p maksimalna razdalja med ojačitvami [m],
- p_v projektni negativni pritisk [mbar],
- V_w hitrost sunka vetra [m/s].

Maksimalna razdalja med ojačitvami je odvisna tako od sunka vetra V_w , kot tudi od projektne vrednosti notranjega negativnega pritiska p_v .

Za vrednost projektnega notranjega negativnega pritiska p_v je za odprte rezervoarje potrebno vzeti vrednost 5mbar, za zaprte pa standard navaja le, da mora biti pritisk manjši ali enak 5mbar.

Ko imamo izračunano višino nadomestnega rezervoarja in največjo dovoljeno razdaljo med ojačitvami, lahko določimo potrebno število ojačitev. Te razporedimo enakomerno po višini nadomestnega rezervoarja na razdalji H_s . Razdalja H_s je določena za nadomestni rezervoar, zato je potrebno, v primeru da položaj ojačitve seže v naslednji, debelejši segment, le-ta del razdalje ponovno pretvoriti v dejanske dimenzije debelejšega segmenta in določiti dejanski položaj ojačitve.

Glede položaja ojačitve velja omejitev in sicer sekundarna ojačitev ne sme biti postavljena znotraj območja 150mm nad in pod horizontalnim spojem segmentov.

Zgornje enačbe veljajo v primeru, da kombinacija projektne obtežbe ne presega vrednosti $1,2\text{kN/m}^2$.

4 API 650 [8]

Ojačitve rezervoarjev zajema tudi Ameriški standard API 650, ki obravnava varjene rezervoarje za shranjevanje naftnih derivatov.

Zahteve tega standarda so zelo podobne v nekaterih delih pa popolnoma enake zahtevam Evropskega standarda EN 14015. Kljub temu, zaradi preglednosti, podajam vse zahteve standarda, čeprav kot že rečeno so v veliko delih identične Evropskemu standardu.

Standard zahteva, da mora ojačitev ležati na ali blizu zgornjega roba rezervoarja, najboljša na zunanji strani.

Minimalne dimenzije kotnika kot samostojne ojačitve ali kot dela sestavljene ojačitve so 65*65*6mm. Minimalna debelina pločevine uporabljene v sestavljeni ojačitvi je 6mm.

V primeru, ko je ojačitev oddaljena od zgornjega roba več kot 60 cm, je potrebno na zgornji rob dodati kotnik dimenzij 65*65*6mm za steno rezervoarja debeline 5mm, oziroma kotnik dimenzij 75*75*6mm za rezervoarje debeline več kot 5mm. Kot primarna ojačitev je lahko uporabljena tudi ojačitev druge oblike, vendar enakega odpornostnega momenta kot zahtevan kotnik.

Obročne ojačitve, katerih dolžina horizontalne stojine ali pasnice presega 16-kratnik svoje debeline je potrebno podpreti na primernih razdaljah tekom oboda.

4.1 Projektiranje primarne ojačitve

Standard podaja enačbo za izračun minimalnega odpornostnega momenta obročne ojačitve:

$$Z = \frac{D^2 * H_2}{17} * \left(\frac{V}{190} \right)^2, \quad (97)$$

kjer je:

Z potreben minimalen odpornostni moment [cm^3],

D premer rezervoarja [m],

H_2 višina rezervoarja [m],

V projektna hitrost sunka vetra [km/h].

Projektna hitrost 3 sekundnega sunka vetra je 190km/h oziroma hitrost sunka vetra določena iz nacionalnega aneksa ali vrednost podana s strani naročnika.

Za rezervoarje katerih premer presega 60m, lahko zahtevan minimalen odpornostni moment obročne ojačitve zmanjšamo na podlagi dogovora med naročnikom in izvajalcem, vendar ne sme biti manjši od odpornostnega momenta ojačitve potrebne za rezervoar premera 61m.

V izračunu odpornostnega momenta ojačitve upoštevamo tudi del stene rezervoarja in sicer 16-kratnik debeline stene pod in kjer je mogoče tudi nad mestom pritrditve ojačitve na steno rezervoarja. V primeru, ko imamo kotnik s čelnim zvarom pritrjen na sam vrh rezervoarja, je potrebno za izračun sodelujoče dolžine stene 16-kratnik debeline stene zmanjšati za velikost vertikalne stranice kotnika.

4.2 Projektiranje sekundarne ojačitve

Postopek je podoben tistemu iz Evropskega standarda EN14015. Najprej je potrebno izračunati maksimalno razdaljo med ojačitvami:

$$H_1 = 9,47 * t * \sqrt{\left(\frac{t}{D}\right)^3 * \left(\frac{190}{V}\right)^2}, \quad (98)$$

kjer je:

H_1 maksimalna dolžina neojačene stene rezervoarja [m],

t debelina najtanjšega segmenta rezervoarja [mm],

D premer rezervoarja,

V projektna hitrost sunka vetra [km/h].

V enačbi je glede na predpostavljeno izpostavljenost rezervoarja, njegovo obliko in pomembnost ter pričakovano hitrost vetra predpostavljen zunanji pritisk 1,48 kPa, kateremu dodamo še notranji negativni pritisk velikosti 0,24kPa, kar skupaj znese 1,72kPa. V primeru večjih koeficientov podanih s strani naročnika vrednost H_1 enostavno delimo s faktorjem 1,72 in pomnožimo z novim pritiskom.

Ko poznamo maksimalno razdaljo med ojačitvami, izračunamo višino nadomestnega rezervoarja. Vsako višino segmenta pretvorimo v nadomestno, z debelino enako najtanjšemu segmentu:

$$W_{tr} = W * \sqrt{\left(\frac{t_{uniform}}{t_{actual}}\right)^5}, \quad (99)$$

kjer je:

W_{tr} nadomestna višina segmenta [mm],

W dejanska višina segmenta [mm],

$t_{uniform}$ debelina najtanjšega segmenta [mm],

t_{actual} dejanska debelina segmenta [mm].

Višina nadomestnega rezervoarja je seštevek vseh nadomestnih segmentov.

S poznano višino nadomestnega rezervoarja in maksimalno razdaljo med ojačitvami, lahko določimo potrebno število ojačitev. Ojačitve razporedimo enakomerno po višini rezervoarja. Če je ojačitev potrebna tudi v segmentu, ki ni najtanjši, je potrebno za določitev dejanske pozicije ojačitve, razdalje pretvoriti iz nadomestnih nazaj v dejanske in določiti mesto ojačitve.

Enako kot v Evropskem standardu je tudi tukaj zahteva glede pozicije ojačitve in sicer ta ne sme biti znotraj 150mm nad in pod horizontalnim spojem segmentov.

Z znanim potrebnim številom ojačitev in njihovo pozicijo lahko določim same dimenzije ojačitve. Za razliko od Evropskega standarda, kjer so dimenzije podane tabelarično in odvisne le od radija, so tu določene z enačbo za izračun minimalnega odpornostnega momenta v odvisnosti od radija, višine in hitrosti vetra:

$$Z = \frac{D^2 * H_1}{17} * \left(\frac{V}{190} \right)^2, \quad (100)$$

kjer je:

Z potreben odpornostni moment [cm³],

D premer rezervoarja [m],

H_1 maksimalne vertikalna razdalja med ojačitvami [m],

V projektna hitrost sunka vetra [km/h].

V računu odpornostnega momenta zajamemo tudi vpliv stene nad in pod mestom pritrditve ojačitve in sicer v velikosti:

$$l = 13,4 * (D * t)^{0,5}, \quad (101)$$

kjer je:

D premer rezervoarja [m],

t debelina stene rezervoarja na mestu ojačitve [mm].

5 PRIMERJAVA MED STANDARDI

V želji po preglednosti in lažji primerjavi, sem v tem poglavju uvedel enotne oznake:

- Z odpornostni moment ojačitve [cm^3],
- H višina rezervoarja [m],
- V hitrost sunka vetra [m/s],
- h višina i -tega segmenta,
- t debelina i -tega segmenta,
- t_{min} debelina najtanjšega segmenta,
- H_p največja dovoljena razdalja med ojačitvami,
- D premer rezervoarja,
- r radij rezervoarja.

Zaradi podobnosti in praktično enakega principa projektiranja ojačitev sem v preglednici 5.1 predstavil primerjavo med standardi EN14015 in API650.

Standarda se bistveno razlikujeta le pri računu največje neojačene dolžine stene rezervoarja, kjer vsak na svoj način določi faktorje, ki zajemajo vpliv vetra, notranjega pritiska, izpostavljenosti, pomembnosti objekta itd.

Različne vrednosti dobimo tudi pri računu minimalnega odpornostnega momenta sekundarne ojačitve. Evropski standard EN 14015 podaja vrednosti le za štiri razrede velikosti radija rezervoarja. Po Ameriškem standardu pa minimalni odpornostni moment izračunamo glede na radij, hitrost sunka vetra in največje dovoljene razdalje med ojačitvami.

Preglednica 5.1: Primerjava med standardi

| Primerjava | EN 14015 | API 650 |
|---|---|--|
| minimalne dimenzije ojačitve v obliki kotnika | 60 x 60 x 5mm | 65 x 65 x 6mm |
| minimalna debelina ojačitvene pločevine | $t=5\text{mm}; b \leq 600\text{mm}$ $t=6\text{mm}; b > 600\text{mm}$ $b \dots$ širina pločevine | $t=6\text{mm}$ |
| ko je ojačitev več kot 60cm pod zgornjim robom potrebujemo robno ojačitev | 60 x 60 x 5mm; $t \leq 5\text{mm}$ 80 x 80 x 6mm; $t \geq 6\text{mm}$ $t \dots$ debelina stene rezervoarja | 65 x 65 x 6mm; $t = 5\text{mm}$ 75 x 75 x 6mm; $t > 5\text{mm}$ $t \dots$ debelina stene rezervoarja |
| minimalen odpornostni moment | Z $= 0,058 * D^2 * H$ $* \left(\frac{V}{45\text{m/s}}\right)^2$ $V_{min} = 45\text{m/s}$ za $D > 60\text{m}$ vzemi $D=60\text{m}$ | $Z = \frac{D^2 * H}{17} * \left(\frac{V}{52,8\text{m/s}}\right)^2$ za $D > 60\text{m}$ vzemi $D=61\text{m}$ |
| vklučitev stene rezervoarja v odpornostni moment primarne ojačitve | $l_{eff} = 16 \cdot t$; pod in nad ojačitvijo | $l_{eff} = 16 \cdot t$; pod in nad ojačitvijo |
| velikost območja okoli spojev segmentov, kjer ni zaželeno imeti oj. | 150mm | 150mm |
| nadomestna višina rezervoarja kot seštevek i nadomestnih segmentov | $H_e = \sum_i h_i * \left(\frac{t_{min}}{t_i}\right)^{2,5}$ | $H_e = \sum_i h_i * \left(\frac{t_{min}}{t_i}\right)^{2,5}$ |
| največja dovoljena razdalja med ojačitvami | $H_p = \left(\frac{t_{min}^5}{D^3}\right)^{0,5} * K$ $K = \frac{95000}{3,563 * V^2 + 580 * p_v}$ $p_v = 5\text{mbar}$ | $H_p = \left(\frac{t_{min}^5}{D^3}\right)^{0,5} * 9,47$ $* \left(\frac{52,8\text{m/s}}{V}\right)^2$ |

se nadaljuje...

nadaljevanje Preglednice 5.1

| | | |
|--|---|--|
| Minimalne dimenzije/odpornostni moment | $D \leq 20 \rightarrow Z_{\min} = 127 \text{ cm}^3$ $D \leq 36 \rightarrow Z_{\min} = 276 \text{ cm}^3$ $D \leq 48 \rightarrow Z_{\min} = 535 \text{ cm}^3$ $D > 48 \rightarrow Z_{\min} = 1440 \text{ cm}^3$ sodelujoči del stene ni upoštevan | $Z = \frac{D^2 * H_1}{17} * \left(\frac{V}{190}\right)^2$ sodelujoči del stene rezervoarja: $l = 13,4 * (D * t)^{0,5}$ |
|--|---|--|

5.1 Primerjava med standardi na dejanskem primeru

Kako se standardi med seboj razlikujejo, najlažje vidimo na dejanskem primeru. Kot referenčni rezervoar smo vzeli obstoječ rezervoar, zgrajen leta 1963 v Angliji. Sestavljen je iz petih segmentov različnih debelin (slika 5.1). Opravljen je bil posnetek trenutnega stanja, tako da so nam na voljo tudi ažurni podatki debelin. Zaradi korozije se je debelina rezervoarju zelo zmanjšala, tako da je zanimivo preveriti ali še ustreza današnjim projektnim pogojem ki jih določajo predpisi.

Gre za rezervoar radija $r = 19,5\text{m}$ in višine $h = 9,05\text{m}$. Na območju kjer je postavljen se pričakuje največja hitrost sunka vetra $v = 45\text{m/s}$. Uporabljen material ima mejo tečenja pri $f_y = 240\text{MPa}$. Obtežba strehe znaša $G_{r,k} = 2,3\text{kN/m}$.

Podatki o debelini in višini segmentov so podani v preglednici 5.2.

Preglednica 5.2: Začetne dimenzije rezervoarja

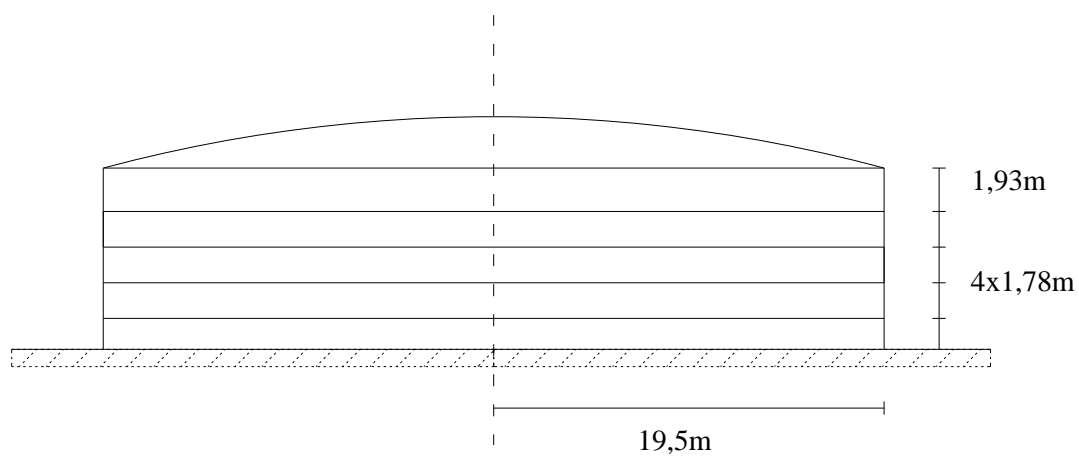
| Višina segmenta [mm] | Začetna debelina [mm] | Trenutna debelina [mm] |
|----------------------|-----------------------|------------------------|
| 1930 | 7,94 | 5,6 |
| 1780 | 7,94 | 5,5 |
| 1780 | 7,94 | 6,9 |
| 1780 | 9,65 | 9 |
| 1780 | 12,19 | 11,3 |

Rezervoar ima na zgornjem robu nameščeno primarno ojačitev, ki preprečuje radialne pomike roba rezervoarja. Rezervoar nima nameščene nobene sekundarne ojačitve.

Za izbran rezervoar smo na zgornjem robu predpostavili, da so preprečene le rotacije in radialni pomik (BC2), na spodnjem pa da so preprečeni vsi pomiki in zasuki (BC1). Predpostavljen je B razred kvalitete izdelave.

Ostali podatki rezervoarja nas trenutno ne zanimajo, potrebovali jih bomo pri numerični analizi.

Najprej bomo po vseh treh standardih preverili ali bi že v začetnem stanju po današnjih zahtevah potreboval kakšno ojačitev.



Slika 5.1: Shema rezervoarja

5.2 Začetno stanje

5.2.1 EN14015

5.2.1.1 Primarna ojačitev

Primarna ojačitev po zahtevah standarda v primeru nepomične strehe ni potrebna. Kljub temu ima rezervoar nameščeno primarno ojačitev, ki pomaga prevzeti horizontalno reakcijo, kot posledico lastne teže strehe in tako preprečuje radialne pomike zgornjega roba rezervoarja.

5.2.1.2 Sekundarna ojačitev

Najprej je potrebno izračunati nadomestno višino rezervoarja. V ta namen prevedemo vsak segment na debelino najtanjšega segmenta, ki znaša 7,94 mm. Prvi trije segmenti so že minimalne debeline, tako da je potrebno preračunati le spodnja dva segmenta:

$$H_{e,i} = h_i \times \left(\frac{7,94mm}{e_i} \right)^{\frac{5}{2}},$$

$$H_{e,4} = 1,78m \times \left(\frac{7,94mm}{9,65mm} \right)^{\frac{5}{2}},$$

$$H_{e,4} = 1,09m,$$

$$H_{e,5} = 1,78m \times \left(\frac{7,94mm}{12,19mm} \right)^{\frac{5}{2}},$$

$$H_{e,5} = 0,61m.$$

Ko imamo izračunane vse posamezne nadomestne višine segmentov, vrednosti med seboj seštejemo in dobimo celotno nadomestno višino rezervoarja. Ta znaša 7,1m:

$$H_E = \sum_i H_{e,i},$$

$$H_E = 1,93m + 1,78m + 1,78m + 1,09m + 0,61m,$$

$$H_E = 7,1m.$$

Sedaj ko imamo nadomestno višino znano, je potrebno izračunati največjo dovoljeno razdaljo neojačene stene rezervoarja.

$$H_p = K \times \left(\frac{e_{\min}^5}{D^3} \right)^{0,5},$$
$$K = \frac{95000}{3,563 \times V_w^2 + 580 \times p_v},$$
$$K = \frac{95000}{3,563 \times \left(45 \frac{m}{s} \right)^2 + 580 \times 5 \text{ mbar}},$$
$$K = 9,39.$$

$$H_p = 9,39 \times \left(\frac{(7,94 \text{ mm})^5}{(39 \text{ m})^3} \right)^{0,5},$$
$$H_p = 6,85 \text{ m}.$$

Vidimo, da je največja nepodprta razdalja stene rezervoarja manjša od nadomestne višine rezervoarja, kar pomeni da potrebujemo ojačitev. Tako že projektne dimenzije novega rezervoarja ne ustrezajo zahtevam Evropskega standarda EN14015.

Glede na dobljene rezultate potrebujemo eno ojačitev, ki jo postavimo na sredino nadomestnega rezervoarja:

$$H_{Oj} = 7,1 \text{ m} / 2,$$
$$H_{Oj} = 3,6 \text{ m}.$$

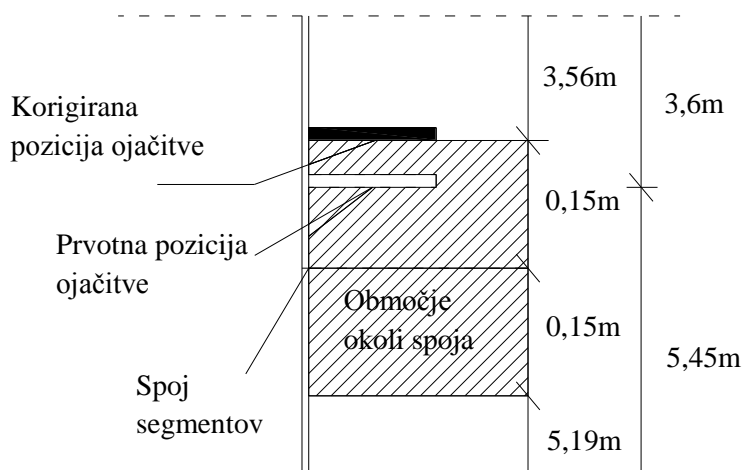
Ker dobljena pozicija ojačitve, ne seže v segment z debelino večjo od minimalne, je to kar dejanska pozicija ojačitve. Oziroma z drugimi besedami, ojačitev leži v segmentu, ki ima debelino enako nadomestni debelini. V nasprotnem primeru bi bilo potrebno nadomestne višine pretvoriti nazaj v dejanske:

$$1,93 \text{ m} + 1,78 \text{ m} + 1,78 \text{ m} = 5,49 \text{ m} > 3,6 \text{ m},$$

$$H_{oj} = 3,6 \text{ m}.$$

Preveriti je potrebno še, da ojačitev ne leži znotraj 150mm od horizontalnega spoja segmentov. Drugi spoj zapovrstjo od zgoraj navzdol leži na koti:

$$h_{spoj,2} = 1,93 \text{ m} + 1,78 \text{ m},$$
$$h_{spoj,2} = 3,71 \text{ m}.$$

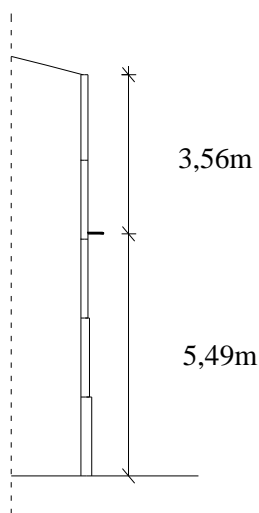


Slika 5.2: Korekcija pozicije zaradi bližine spoja segmentov

Kot je razvidno na sliki 5.2 je to znotraj območja, okoli spoja, kjer postavitev ojačitve ni zaželena, le-to premaknemo navzgor. Nova pozicija ojačitve je tako:

$$H_{OJ} = 3,56m.$$

Torej, po Evropskem standardu EN14015, bi izbrani rezervoar že v začetnem stanju potreboval ojačitev na razdalji 3,56 m od zgornjega roba (slika 5.3). Prez ojačitve mora imeti odpornosti moment enak kotniku dimenzij 150x90x10, to je 53300mm³.



Slika 5.3: Pozicija ojačitev po EN14015

5.2.1.3 Normirana višina

Zaradi lažje končne primerjave med standardi podajam še normirano višino nepodprte višine stene rezervoarja. Izrazimo jo kot razmerje med dejansko neojačeno razdaljo H_E in največjo dovoljeno neojačeno razdaljo H_p :

$$\eta = \frac{H_E}{H_p} = \frac{3,6m}{6,85m} = 0,53.$$

Dobljena normirana višine ne predstavlja dejanske izkoriščenosti prereza, ampak le razmerje med maksimalnimi in dejanskimi neojačenimi razdaljami.

V primeru brez ojačitve bi dobili:

$$\eta = \frac{H_E}{H_p} = \frac{7,1m}{6,85m} = 1,04.$$

5.2.2 API650

Račun po Ameriškem standardu je zelo podoben izračunu po Evropskem standardu. Račun se razlikuje le v enačbi za določitev največje neojačene višine stene rezervoarja.

5.2.2.1 Primarna ojačitev

Za razliko od EN14015 API standard ne omenja nič o nepotrebnosti primarne ojačitve v primeru nepomične strehe. Rezervoar ima nameščeno primarno ojačitev, ki pomaga prevzeti horizontalno reakcijo, kot posledico lastne teže strehe in tako preprečuje radialne pomike zgornjega roba rezervoarja.

5.2.2.2 Sekundarna ojačitev

Račun višine nadomestnega rezervoarja z debelino najtanjšega segmenta je enak tistemu po Evropskem standardu. Zato na tem mestu samo povzemam rešitev dobljeno v zgornjih vrsticah:

$$H_E = 1,93m + 1,78m + 1,78m + 1,09m + 0,61m,$$

$$H_E = 7,1m.$$

Se pa razlikuje račun največje razdalje neojačene stene rezervoarja:

$$H_p = 9,47 \times t \times \sqrt{\left(\frac{t}{D}\right)^3} \times \left(\frac{190}{V_w}\right)^2,$$
$$H_p = 9,47 \times 7,94 \text{ mm} \times \sqrt{\left(\frac{7,94 \text{ mm}}{39 \text{ m}}\right)^3} \times \left(\frac{190}{162 \frac{\text{km}}{\text{h}}}\right)^2,$$
$$H_p = 9,50 \text{ m}.$$

Izračunana razdalja je večja od višine rezervoarja, tako da ojačitve ne potrebujemo.

5.2.2.3 Normirana višina

Enako kot pri Evropskem standardu tudi tu na enak način podajam normirano višino:

$$\eta = \frac{H_E}{H_p} = \frac{7,1 \text{ m}}{9,5 \text{ m}} = 0,75.$$

5.2.3 ECCS 5th Edition

Projektiranje po Evropskih priporočilih ECCS je veliko daljše in zahtevnejše. Bi pa zato moral biti rezultat najbližje realnemu stanju.

Tako kot po Ameriškem standardu API650 in Evropskem EN14015 je potrebno rezervoar najprej prevesti na nadomesten rezervoar konstantne debeline. Le da tu najprej prevedemo na rezervoar treh različnih debelin in šele nato na rezervoar konstantne debeline.

5.2.3.1 Začetno stanje

5.2.3.1.1 Uklon v obodni smeri

Prvi segment dolžine l_a in debeline t_a sega od vrha pa do prvega segmenta, ki ima debelino večjo kot 1,5 – kratnika debeline najtanjšega segmenta. Vendar l_a ne sme biti daljši od polovice celotne višine rezervoarja:

$$t_1 \times 1,5 = 7,94\text{mm} \times 1,5 = 11,91\text{mm},$$

$$11,91\text{mm} \leq t_5 = 12,19\text{mm}.$$

V tem primeru, bi to bilo od vrha pa do začetka zadnjega segmenta, a ker je to več kot polovica celotne višine, je velikost l_a enaka polovici višine:

$$l_a = l_1 + l_2 + l_3 + l_4 \leq h / 2,$$

$$l_a = 1,93\text{m} + 1,78\text{m} + 1,78\text{m} + 1,78\text{m} = 7,27\text{m},$$

$$h / 2 = 9,05\text{m} / 2 = 4,53\text{m},$$

$$h / 2 < l_a,$$

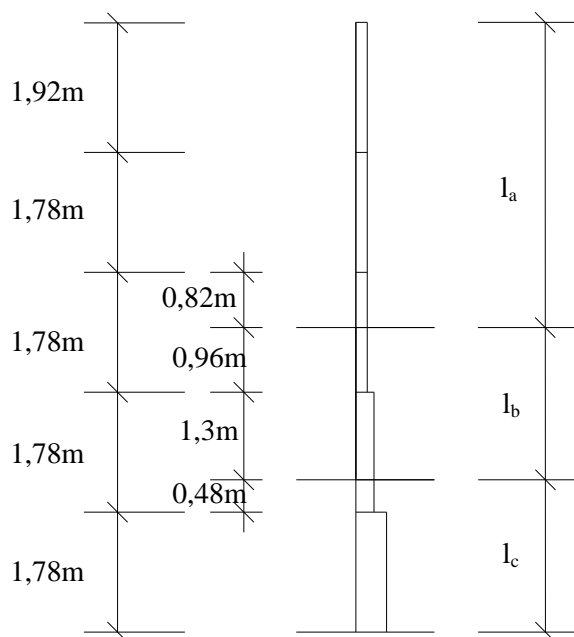
$$\rightarrow l_a = h / 2 = 4,53\text{m}.$$

Ostala dva segmenta sta tako enake velikosti:

$$l_b = l_c = 0,5 \times (h - l_a),$$

$$l_b = l_c = 0,5 \times (9,05\text{m} - 4,53\text{m}),$$

$$l_b = l_c = 2,26\text{m}.$$



Slika 5.4: Pretvorba na nadomestni rezervoar treh debelin

Debelino posameznega nadomestnega segmenta določimo tako, da povprečimo debeline na izbranem odseku. Posamezne dimenzije so prikazane na sliki 5.4:

$$t_a = \frac{1}{l_a} \times \sum_a l_j \times t_j,$$

$$t_a = \frac{1}{4,53m} \times (1,93m \cdot 7,94mm + 1,78m \cdot 7,94mm + 0,82m \cdot 7,94mm),$$

$$t_a = 7,94mm.$$

Celoten prvi nadomestni segment pokriva segmente z najmanjšo debelino, zato je tudi njegova debelina enaka minimalni. Imata pa ostala dva nadomestna segmenta različno debelino:

$$t_b = \frac{1}{l_b} \times \sum_b l_j \times t_j,$$

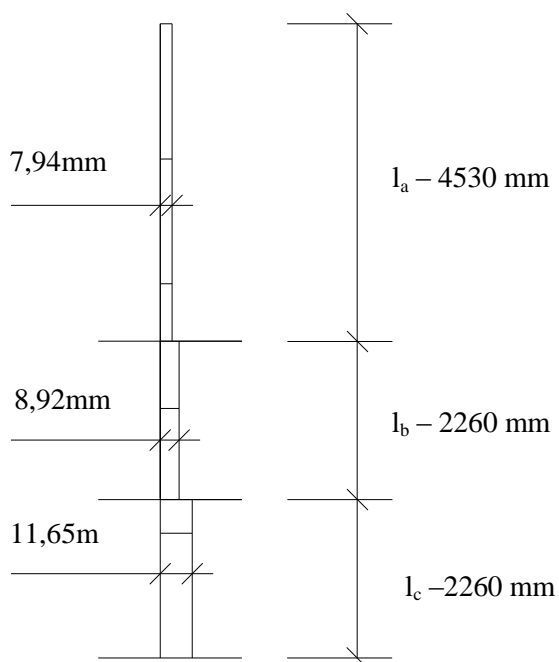
$$t_b = \frac{1}{2,26m} \times (0,96m \cdot 7,94mm + 1,30m \cdot 9,65mm),$$

$$t_b = 8,92mm.$$

$$t_c = \frac{1}{l_c} \times \sum_c l_j \times t_j,$$

$$t_c = \frac{1}{2,26m} \times (0,48m \cdot 9,65mm + 1,78m \cdot 12,19mm),$$

$$t_c = 11,65mm.$$



Slika 5.5: Dimenzije nadomestnega rezervoarja

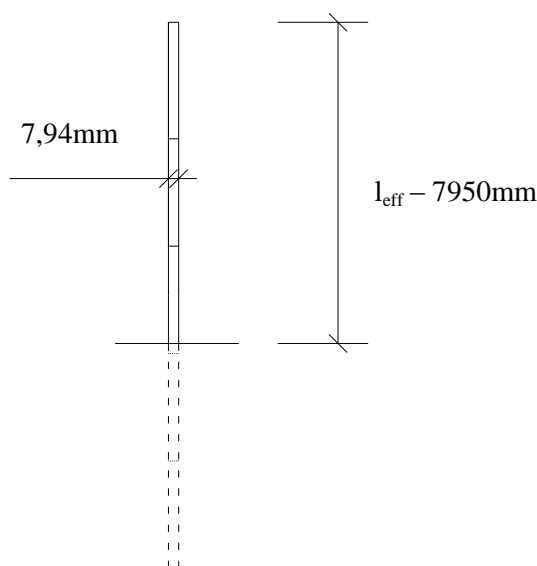
Nadomestni rezervoar, sestavljen iz treh segmentov (slika 5.5) nadomestimo z rezervoarjem konstantne debeline t_a in dolžine l_{eff} (slika 5.6).

Faktor κ odčitamo iz grafikonov 2.1 – 2.3 v poglavju 2.6.3:

$$\begin{aligned}l_a / L &= 4,53m / 9,05m = 0,5, \\t_c / t_a &= 11,65mm / 7,94mm = 1,47, \\t_b / t_a &= 8,92mm / 7,94mm = 1,12,\end{aligned}$$

$$\rightarrow \kappa = 0,57.$$

$$\begin{aligned}l_{eff} &= l_a / \kappa, \\l_{eff} &= 4,53m / 0,58, \\l_{eff} &= 7,95m.\end{aligned}$$



Slika 5.6: Nadoemstna dolžina rezervoarja

Na podlagi dobljene nadomestne višine in debeline lahko izračunamo elastično kritično obročno uklonsko napetost za nadomesten rezervoar. Iz te nato glede na razmerje med dejansko debelino segmenta in debelino t_a , določimo elastično kritično obročno uklonsko napetost za vsak segment posebej.

Najprej moramo izračunati elastično kritično obročno uklonsko napetost nadomestnega rezervoarja višine l_{eff} in debeline t_a .

Potrebno je preveriti med katere rezervoarje, nadomestni rezervoar spada po velikosti:

$$\omega_{eff} = \frac{l_{eff}}{\sqrt{r \times t_a}},$$

$$\omega_{eff} = \frac{7950}{\sqrt{19500 \times 7,94}},$$

$$\omega_{eff} = 20,20.$$

Nadomestni rezervoar spada med srednje rezervoarje, saj je izpolnjen naslednji pogoj:

$$20 < \frac{\omega_{eff}}{C_\theta} < 1,63 \times \frac{r}{t_a},$$

$$20 < \frac{20,20}{1,0} < 1,63 \times \frac{19500}{7,94},$$

$$20 < 20,20 < 4003.$$

Za vrednost parametra C_{θ} standard priporoča vrednost 1,0.

Kritično napetost tako izračunamo z naslednjim izrazom:

$$\sigma_{\theta Rcr,eff} = 0,92 \times E \times \frac{C_{\theta} t_a}{\omega_{eff} r},$$
$$\sigma_{\theta Rcr,eff} = 0,92 \times 21000 \frac{kN}{cm^2} \times \frac{1,0}{20,20} \frac{7,94mm}{19500mm},$$
$$\sigma_{\theta Rcr,eff} = 0,3923 \frac{kN}{cm^2}.$$

S poznano kritično uklonsko napetostjo nadomestnega rezervoarja, lahko izračunamo kritično napetost posameznega segmenta.

Ker so enačbe za rezervoarje kratke in srednje višine drugačne od tistih za visoke rezervoarje, je potrebno prej preveriti posamezne velikosti segmentov.

Velikost segmenta se izrazi z brez-dimenzionalnim parametrom ω_j :

$$\omega_j = \frac{l_j}{\sqrt{r \times t_j}}.$$

Velikosti segmentov so tako:

$$\omega_1 = \frac{1930}{\sqrt{19500 \times 7,94}} = 4,90,$$
$$\omega_2 = \frac{1780}{\sqrt{19500 \times 7,94}} = 4,52,$$
$$\omega_3 = \frac{1780}{\sqrt{19500 \times 7,94}} = 4,52,$$
$$\omega_4 = \frac{1780}{\sqrt{19500 \times 9,65}} = 4,10,$$
$$\omega_5 = \frac{1780}{\sqrt{19500 \times 12,19}} = 3,65.$$

Segment se smatra za dolgega če je izpolnjen naslednji pogoj:

$$\omega_j > 1,63 \times \frac{r}{t_j},$$

$$\omega_1 > 1,63 \times \frac{r}{t_1},$$

$$4,90 > 1,63 \times \frac{19500}{7,94},$$

$$4,90 > 4003,2 \times.$$

Pogoj ni izpolnjen pri nobenem segmentu, kar pomeni, da vsi segmenti spadajo v razred kratke oziroma srednje velikosti. Kritično napetost v posameznih segmentih izračunamo z enačbo:

$$\sigma_{\theta Rcr,j} = \left(\frac{t_a}{t_j} \right) \times \sigma_{\theta Rcr,eff}.$$

Vrednosti so podane spodaj:

$$\sigma_{\theta Rcr,1} = \left(\frac{7,94mm}{7,94mm} \right) \times 0,39 \frac{kN}{cm^2} = 0,39 \frac{kN}{cm^2},$$

$$\sigma_{\theta Rcr,2} = \left(\frac{7,94mm}{7,94mm} \right) \times 0,39 \frac{kN}{cm^2} = 0,39 \frac{kN}{cm^2},$$

$$\sigma_{\theta Rcr,3} = \left(\frac{7,94mm}{7,94mm} \right) \times 0,39 \frac{kN}{cm^2} = 0,39 \frac{kN}{cm^2},$$

$$\sigma_{\theta Rcr,4} = \left(\frac{7,94mm}{9,65mm} \right) \times 0,39 \frac{kN}{cm^2} = 0,32 \frac{kN}{cm^2},$$

$$\sigma_{\theta Rcr,5} = \left(\frac{7,94mm}{12,19mm} \right) \times 0,39 \frac{kN}{cm^2} = 0,26 \frac{kN}{cm^2}.$$

Dobili smo elastično kritično obročno uklonsko napetost za vsak segment posebej. Vidimo, da je napetost večja pri tanjših elementih. Razlog tiči v temu, da smo izračunali pritisk, pri kateri pride do uklona v rezervoarju. Ker so spodnji sloji debelejši, je potem tudi napetost, ki jo povzroči kritični pritisk manjša.

Naslednji korak je izračun odpornosti rezervoarja. Odpornost dobimo tako, da napetost tečenja zmanjšamo za faktor χ , ki je odvisen od relativne vitkosti segmenta:

$$\lambda_{\theta} = \sqrt{\frac{f_{y,k}}{\sigma_{\theta Rcr}}},$$

$$\lambda_{\theta,1} = \sqrt{\frac{24 \frac{kN}{cm^2}}{0,39 \frac{kN}{cm^2}}} = 7,84,$$
$$\lambda_{\theta,2} = \sqrt{\frac{24 \frac{kN}{cm^2}}{0,39 \frac{kN}{cm^2}}} = 7,84,$$
$$\lambda_{\theta,3} = \sqrt{\frac{24 \frac{kN}{cm^2}}{0,39 \frac{kN}{cm^2}}} = 7,84,$$
$$\lambda_{\theta,4} = \sqrt{\frac{24 \frac{kN}{cm^2}}{0,32 \frac{kN}{cm^2}}} = 8,62,$$
$$\lambda_{\theta,5} = \sqrt{\frac{24 \frac{kN}{cm^2}}{0,26 \frac{kN}{cm^2}}} = 9,61.$$

Z znano relativno vitkostjo in parametri, ki zajamejo kvaliteto izdelave, lahko določimo na katerem predelu uklonske krivulje se rezervoar nahaja:

$$\alpha_{\theta} = 0,65,$$

$$\lambda_{\theta 0} = 0,4,$$

$$\beta = 0,6,$$

$$\eta = 1,0,$$

$$\lambda_{p,\theta} = \sqrt{\frac{\alpha_{\theta}}{1-\beta}},$$

$$\lambda_{p,\theta} = \sqrt{\frac{0,65}{1-0,6}},$$

$$\lambda_{p,\theta} = 1,27.$$

Za vse segmente velja, da so v elastičnem območju:

$$\lambda_{\theta} \geq \lambda_{p,\theta}.$$

Faktor χ zato izračunamo z naslednjo enačbo. Enačba je enaka Eulerjevi uklonski krivulji, le da so tu zajete še nepopolnosti s faktorjem α :

$$\chi_{\theta} = \frac{\alpha_{\theta}}{\lambda_{\theta}^2}.$$

Enako naredimo za ostale segmente:

$$\chi_{\theta,1} = \frac{0,65}{7,84^2} = 0,011,$$

$$\chi_{\theta,2} = \frac{0,65}{7,84^2} = 0,011,$$

$$\chi_{\theta,3} = \frac{0,65}{7,84^2} = 0,011,$$

$$\chi_{\theta,4} = \frac{0,65}{8,62^2} = 0,009,$$

$$\chi_{\theta,5} = \frac{0,65}{9,61^2} = 0,007.$$

Odpornost je tako:

$$\sigma_{\theta Rd} = \frac{\chi_{\theta} f_{yk}}{\gamma_{M1}}.$$

In za ostale elemente:

$$\sigma_{\theta Rd,1} = \frac{0,011 \times 24 \frac{kN}{cm^2}}{1,15} = 0,23 \frac{kN}{cm^2},$$

$$\sigma_{\theta Rd,2} = \frac{0,011 \times 24 \frac{kN}{cm^2}}{1,15} = 0,23 \frac{kN}{cm^2},$$

$$\sigma_{\theta Rd,3} = \frac{0,011 \times 24 \frac{kN}{cm^2}}{1,15} = 0,23 \frac{kN}{cm^2},$$

$$\sigma_{\theta Rd,4} = \frac{0,009 \times 24 \frac{kN}{cm^2}}{1,15} = 0,19 \frac{kN}{cm^2},$$

$$\sigma_{\theta Rd,5} = \frac{0,007 \times 24 \frac{kN}{cm^2}}{1,15} = 0,15 \frac{kN}{cm^2}.$$

Ta mora biti zaradi vpliva vetra večja od obročne napetosti, ki se pojavi v rezervoarju.

5.2.3.1.2 Obremenitev

Za potrebe kontrole obročnih napetosti, je potrebno vpliv vetra, ki je podan s hitrostjo sunka vetra, prevesti v napetosti. Postopek je podan v Evropskem standardu EN 1991-1-4, ki zajema vplive vetra na konstrukcije. Poglavje 4.5 podaja enačbe za račun tlaka ob sunkih vetra.

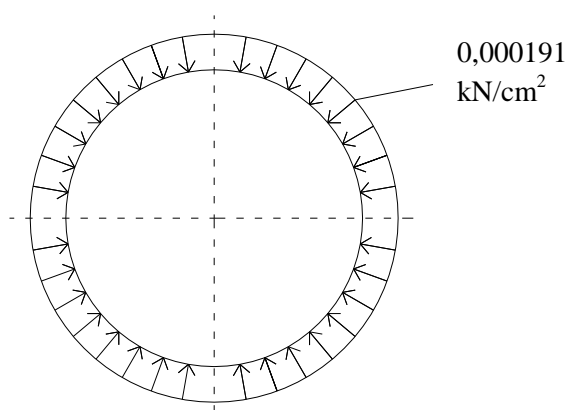
Osnovni pritisk izračunamo z enačbo:

$$\begin{aligned}q_b &= 0,5 \times \rho \times v_b^2, \\q_b &= 0,5 \times 1,25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times \left(45 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2, \\q_b &= 1265,6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 0,000127 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}.\end{aligned}$$

Predpostavili smo konstanten potek pritiska po višini, saj gre za razmeroma nizko konstrukcijo. Prav tako smo predpostavili, da je pritisk tekom oboda konstanten. Shematsko je to prikazano na sliki 5.7. Dejansko se pritisk tekom oboda spreminja iz pozitivne v negativno vrednost. Priporočila predlagajo, da zaradi lažjega računa predpostavimo konstanten pritisk v velikosti maksimalnega pritiska na privetni strani.

Projektno vrednost pritiska dobimo tako, da karakteristično vrednost pomnožimo z obtežnim faktorjem za koristno obtežbo:

$$\begin{aligned}q_{ed} &= 1,5 \times q_p, \\q_{ed} &= 1,5 \times 0,000127 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}, \\q_{ed} &= 0,000191 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}.\end{aligned}$$



Slika 5.7: Obtežba vetra

Za določitev notranjih napetosti se poslužimo t.i. kotelne formule:

$$\sigma_{ed,j} = q_{ed} \times \frac{r}{t_j}$$

Notranji pritisk v posameznem segmentu je enak:

$$\begin{aligned}\sigma_{\theta,Ed,1} &= 0,000191 \frac{kN}{cm^2} \times \frac{19500mm}{7,94mm} = 0,47 \frac{kN}{cm^2}, \\ \sigma_{\theta,Ed,2} &= 0,000191 \frac{kN}{cm^2} \times \frac{19500mm}{7,94mm} = 0,47 \frac{kN}{cm^2}, \\ \sigma_{\theta,Ed,3} &= 0,000191 \frac{kN}{cm^2} \times \frac{19500mm}{7,94mm} = 0,47 \frac{kN}{cm^2}, \\ \sigma_{\theta,Ed,4} &= 0,000191 \frac{kN}{cm^2} \times \frac{19500mm}{9,65mm} = 0,39 \frac{kN}{cm^2}, \\ \sigma_{\theta,Ed,5} &= 0,000191 \frac{kN}{cm^2} \times \frac{19500mm}{12,19mm} = 0,31 \frac{kN}{cm^2}.\end{aligned}$$

Iz rezultatov je razvidno, da je prav v vsakem segmentu prekoračena mejna uklonska nosilnost. Izkoriščenosti so skoraj konstantne tekom celotne višine. To pa zato, ker sta tako pritisk vetra, kot tudi elastični kritični pritisk iz katerega dobimo kritične napetosti konstantna po višini rezervoarja. Razlika nastane zaradi različnega uklonskega redukcijske faktorja χ , ki pa se v elastičnem območju pri različnih vitkosti zelo malo spreminja. Izkoriščenosti po posameznih segmentih so podane v preglednici 5.3.

Preglednica 5.3: Izkoriščenost po segmentih rezervoarja

| Segment | Izkoriščenost σ_{ed}/σ_{rd} |
|---------|---|
| 1. | 2,04 |
| 2. | 2,04 |
| 3. | 2,04 |
| 4. | 2,05 |
| 5. | 2,07 |

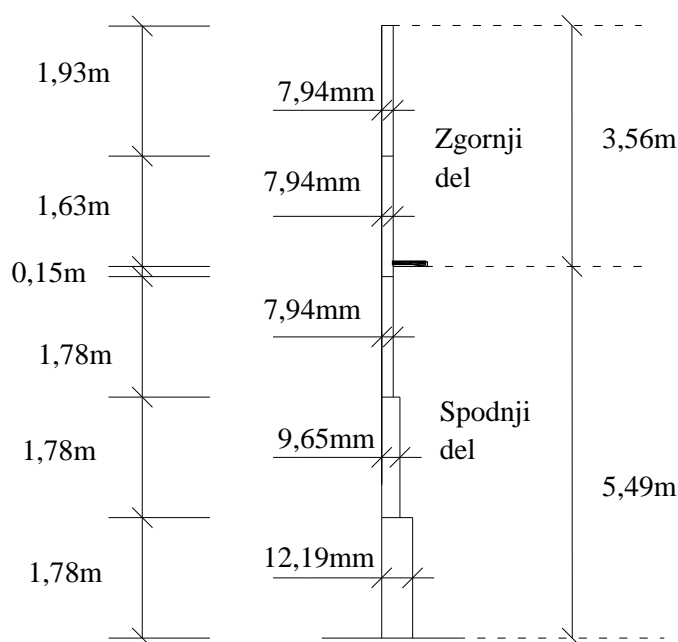
Iz dobljenih rezultatov sledi, da rezervoar potrebuje ojačitve.

5.2.3.2 Ena ojačitev

Dobljena razdalja l_{eff} pri računu nadomestnega rezervoarja, predstavlja velikost uklonskega vala, ki se pojavi v rezervoarju pri vertikalnem uklonu. Ojačitev mora biti znotraj tega območja. Izračunana nadomestna dolžina je znašala $l_{eff} = 7,95m$. Zaradi želje po primerjavi standardov ojačitev postavimo na mesto, ki ga je določil Evropski standard, to je:

$$H_{OJ} = 3,56m.$$

Predpostavimo, da je ojačitev dovolj toga, da preprečuje radialne pomike rezervoarja, torej imamo na mestu ojačitve robni pogoj tipa BC2. Sedaj imamo rezervoar sestavljen iz dveh delov (slika 5.8). Zgornjega, velikega $l_1 = 3,56m$ in spodnjega velikosti $l_2 = 5,49m$. Vsak del posebej obravnavamo kot samostojen rezervoar. Zanimivejši bo zgornji del, kjer je večja verjetnost, da pride do uklona.



Slika 5.8: Shema območij rezervoarja z eno ojačitvijo po priporočilih ECCS

5.2.3.2.1 Zgornji del

Zgornji del zajema dva segmenta prvotnega rezervoarja. Segmenta sta enake debeline $t_l = 7,94\text{mm}$, zato lahko ta del kontroliramo z enačbami za kontrolo uklona rezervoarjev konstantne debeline.

5.2.3.2.1.1 Uklon v obodni smeri

Najprej je potrebno preveriti v kateri razred spada po velikosti:

$$\omega = \frac{l}{\sqrt{rt}},$$

$$\omega = \frac{3560}{\sqrt{19500 \times 7,94}},$$

$$\omega = 9,04.$$

Na obeh robovih imamo robne pogoje tip BC2, zato so faktorji, ki zajemajo vpliv robnih pogojev:

$$C_\theta = 1,0,$$

$$C_{\theta_s} = 1,0 + \frac{3}{\omega^{1,35}} = 1,0 + \frac{3}{9,04^{1,35}} = 1,15.$$

Zgornji del spada med kratke segmente saj:

$$\frac{\omega}{C_\theta} = \frac{9,04}{1,0} = 9,04 < 20.$$

Enačba kritične uklonske obodne napetosti je tako:

$$\sigma_{\theta, Rcr} = 0,92E \frac{C_{\theta_s} t}{\omega r},$$

$$\sigma_{\theta, Rcr} = 0,92 \times 21000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \times \frac{1,15}{9,04} \times \frac{0,794\text{cm}}{1950\text{cm}},$$

$$\sigma_{\theta, Rcr} = 1,00 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}.$$

Kritična obodna napetost se nam je povečala za več kot faktor 2.

Za račun odpornosti potrebujemo vitkost segmenta:

$$\lambda_{\theta} = \sqrt{\frac{f_{y,k}}{\sigma_{\theta,Rcr}}},$$
$$\lambda_{\theta} = \sqrt{\frac{24 \frac{kN}{cm^2}}{1 \frac{kN}{cm^2}}},$$
$$\lambda_{\theta} = 4,90.$$

Vrednosti ostalih faktorjev so:

$$\alpha_{\theta} = 0,65,$$
$$\lambda_{\theta 0} = 0,40,$$
$$\beta = 0,60,$$
$$\eta = 1,0.$$

Meja elastičnega uklona je:

$$\lambda_{p,\theta} = \sqrt{\frac{\alpha}{1-\beta}} = \sqrt{\frac{0,65}{1-0,60}} = 1,27.$$

Rezervoar spada v območje elastičnega uklona, zato je faktor redukcije izračunamo z :

$$\chi_{\theta} = \frac{\alpha_{\theta}}{\lambda_{\theta}^2} = \frac{0,65}{4,90^2} = 0,027.$$

Reducirana nosilnost je:

$$\sigma_{\theta,Rd} = \frac{\chi_{\theta} f_{y,k}}{\gamma_{M1}} = \frac{0,027 \times 24 \frac{kN}{cm^2}}{1,15},$$
$$\sigma_{\theta,Rd} = 0,56 \frac{kN}{cm^2}.$$

Izkoriščenost je:

$$\frac{\sigma_{\theta,Ed}}{\sigma_{\theta,Rd}} = \frac{0,47 \frac{kN}{cm^2}}{0,56 \frac{kN}{cm^2}} = 0,84.$$

5.2.3.2.1.2 Uklon v vertikalni smeri

Po velikosti zgornji del spada med srednje dolge segmente:

$$1,7 \leq \omega \leq 0,5 \frac{r}{t},$$

$$1,7 \leq 9,05 \leq 0,5 \frac{19500\text{mm}}{7,94\text{mm}} = 1228.$$

Faktor, ki zajema vpliv velikosti rezervoarja je zato $C_x = 1,0$.

Kritična vertikalna uklonska napetost je:

$$\sigma_{x,Rcr} = 0,605 \times E \times C_x \times \frac{t}{r},$$

$$\sigma_{x,Rcr} = 0,605 \times 21000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \times 1,0 \times \frac{7,94\text{mm}}{19500\text{mm}},$$

$$\sigma_{x,Rcr} = 5,17 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}.$$

Ostali faktorji, ki jih potrebujemo za izračun redukcijskega faktorja uklona χ_x so:

$$\lambda_{0,x} = 0,2,$$

$$\beta_x = 0,60,$$

$$\eta_x = 1,00,$$

ter elastični redukcijski faktor nepopolnosti:

$$\alpha_x = \frac{0,62}{1 + 1,91 \left(\frac{1}{Q} \sqrt{\frac{r}{t}} \right)^{1,44}},$$

$$\alpha_x = \frac{0,62}{1 + 1,91 \left(\frac{1}{25} \sqrt{\frac{19500\text{mm}}{7,94\text{mm}}} \right)^{1,44}},$$

$$\alpha_x = 0,101.$$

pri čemer je vrednost prametra izdelave Q, zaradi B razreda znašala Q=25.

Mejna vitkost, ki loči območje elastičnega uklona znaša:

$$\lambda_{p,x} = \sqrt{\frac{\alpha_x}{1 - \beta_x}},$$

$$\lambda_{p,x} = \sqrt{\frac{0,101}{1 - 0,60}},$$

$$\lambda_{p,x} = 0,50.$$

Vitkost segmenta znaša:

$$\lambda_x = \sqrt{f_{yk} / \sigma_{x,Rcr}},$$
$$\lambda_x = \sqrt{\frac{24 \frac{kN}{cm^2}}{5,17 \frac{kN}{cm^2}}},$$
$$\lambda_x = 2,15.$$

Glede na vitkost, pride v rezervoarju do elastičnega uklona, saj je:

$$\bar{\lambda}_{p,x} \leq \bar{\lambda}_x,$$
$$0,50 \leq 2,15.$$

Redukcijski faktor uklona je zato:

$$\chi_x = \frac{\alpha_x}{\lambda_x^2},$$
$$\chi_x = \frac{0,101}{2,15^2},$$
$$\chi_x = 0,022,$$

in končno uklonska odpornost na uklon v vertikalni smeri:

$$\sigma_{x,Rd} = \chi_x f_y / \gamma_{M1},$$
$$\sigma_{x,Rd} = 0,022 \times \frac{24 \frac{kN}{cm^2}}{1,15},$$
$$\sigma_{x,Rd} = 0,45 \frac{kN}{cm^2}.$$

5.2.3.2.1.3 Račun napetosti

Odpornost mora biti večja od vertikalnih napetosti, ki nastanejo v rezervoarju, kot posledica lastne teže stene rezervoarja in teže strehe:

$$\sigma_{x,Ed} = \sigma_{t,Ed} + \sigma_{r,Ed},$$

pri čemer je

$\sigma_{t,Ed}$ vertikalna napetost, kot posledica lastne teže stene rezervoarja,

$\sigma_{r,Ed}$ vertikalna napetost, kot posledica lastne teže strehe rezervoarja,

$$\begin{aligned}\sigma_{t,k} &= \rho \times h, \\ \sigma_{t,k} &= 78 \times 10^{-6} \frac{kN}{cm^3} \times 356 cm, \\ \sigma_{t,k} &= 0,028 \frac{kN}{cm^2}.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{r,k} &= \frac{G_{r,k}}{t}, \\ \sigma_{r,k} &= \frac{2,3 \times 10^{-2} \times \frac{kN}{cm}}{0,794 cm}, \\ \sigma_{r,k} &= 0,029.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{x,Ed} &= 1,35 \times \sigma_{t,k} + 1,35 \times \sigma_{r,k}, \\ \sigma_{x,Ed} &= 1,35 \times 0,028 \frac{kN}{cm^2} + 1,35 \times 0,029 \frac{kN}{cm^2}, \\ \sigma_{x,Ed} &= 0,077 \frac{kN}{cm^2}.\end{aligned}$$

Tudi v vertikalni smeri mejne napetosti niso prekoračene. Izkoriščenost je:

$$\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}} = \frac{0,077 \frac{kN}{cm^2}}{0,45 \frac{kN}{cm^2}} = 0,17.$$

5.2.3.2.1.4 Interakcija

Ker se nam pojavijo napetosti v več kot eni smeri maksimalni vrednosti še kombiniramo z interakcijsko enačbo. Vrednosti pomožnih faktorjev so:

$$\begin{aligned}k_x &= 1,25 + 0,75 \chi_x = 1,25 + 0,75 \times 0,027 = 1,27, \\ k_\theta &= 1,25 + 0,75 \chi_\theta = 1,25 + 0,75 \times 0,027 = 1,27, \\ k_i &= (\chi_x \chi_\theta)^2 = (0,027 \times 0,027)^2 \approx 0.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}} \right)^{k_x} - k_i \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}} \right) \left(\frac{\sigma_{\theta,Ed}}{\sigma_{\theta,Rd}} \right) + \left(\frac{\sigma_{\theta,Ed}}{\sigma_{\theta,Rd}} \right)^{k_\theta} + \left(\frac{\tau_{x\theta,Ed}}{\tau_{x\theta,Rd}} \right)^{k_\tau} &\leq 1,0, \\ \left(\frac{0,077}{0,45} \right)^{1,27} - 0 \times \left(\frac{0,077}{0,45} \right) \left(\frac{0,47}{0,56} \right) + \left(\frac{0,47}{0,56} \right)^{1,27} &\leq 1,0, \\ 0,91 &\leq 1,0.\end{aligned}$$

Napetostna kontrola se izide, kar pomeni, da je območje nad ojačitvijo uklonsko odporno.

5.2.3.2.2 Spodnji del

Potrebno je preveriti še uklonsko odpornost območja pod ojačitvijo. Spodnji del je velikosti 5490mm in spremenljive debeline. Dimenzije so podane v preglednici 5.4:

Preglednica 5.4: Dimenzije območja rezervoarja pod prvo ojačitvijo

| i | višina [mm] | debelina [mm] |
|----|-------------|---------------|
| 1. | 150 | 7,94 |
| 2. | 1780 | 7,94 |
| 3. | 1780 | 9,65 |
| 4. | 1780 | 12,19 |

Ta del kontroliramo po enačbah za rezervoar spremenljive debeline. Rezervoar prevedemo na nadomestni rezervoar, ki ima sprva tri segmente in nato na rezervoar konstantne debeline in nadomestne dolžine.

Velikost prvega nadomestnega segmenta l_a sega do polovice celotne višine in znaša:

$$\rightarrow l_a = h / 2 = 2,75m.$$

Ostala dva segmenta sta enake velikosti:

$$\begin{aligned} l_b &= l_c = 0,5 \times (h - l_a), \\ l_b &= l_c = 0,5 \times (5,49m - 2,75m), \\ l_b &= l_c = 1,38m. \end{aligned}$$

V naslednjem koraku določimo debelino posameznega segmenta:

$$\begin{aligned} t_a &= \frac{1}{2,75m} \times (0,15m \cdot 7,94mm + 1,73m \cdot 7,94mm + 0,87m \cdot 9,65m), \\ t_a &= 8,48mm. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t_b &= \frac{1}{1,38m} \times (0,86m \cdot 9,65mm + 0,52m \cdot 12,19mm), \\ t_b &= 10,61mm. \end{aligned}$$

$$t_c = \frac{1}{1,38m} \times (1,38m \cdot 12,19mm),$$

$$t_c = 12,19mm.$$

Sodelujočo višino določimo s pomočjo faktorja κ , ki ga določimo glede na razmerje debelin nadomestnih segmentov:

$$l_a / L = 2,75m / 5,49m = 0,5,$$

$$t_c / t_a = 12,19mm / 8,48mm = 1,44,$$

$$t_b / t_a = 10,61mm / 8,48mm = 1,25,$$

→ $\kappa = 0,69$.

$$l_{eff} = 2,75m / 0,69,$$

$$l_{eff} = 3,99m.$$

5.2.3.2.2.1 Uklon v obodni smeri

Odpornost na uklon v obodni smeri izračunamo tako, da najprej izračunamo kritično napetost nadomestnega dela, ter nato kritično uklonsko napetost pretvorimo za vsak segment posebej.

Po velikosti, nadomestna višina rezervoarja spada med kratke:

$$\omega_{eff} = \frac{2750mm}{\sqrt{19500mm \times 7,94mm}},$$

$$\omega_{eff} = 6,99.$$

Ker rezervoar spada med kratke, faktor C_{θ} izračunamo po naslednji enačbi:

$$C_{\theta_s} = 1,0 + \frac{3}{\omega^{1,35}} = 1,0 + \frac{3}{6,99^{1,35}} = 1,2.$$

Kritično uklonsko napetost nadomestnega dela izračunamo po naslednji enačbi:

$$\sigma_{\theta Rcr,eff} = 0,92 \times 21000 \frac{kN}{cm^2} \times \frac{1,0}{6,99} \frac{7,94mm}{19500mm},$$

$$\sigma_{\theta Rcr,eff} = 1,35 \frac{kN}{cm^2}.$$

Kritične uklonske napetosti posameznih segmentov so:

$$\begin{aligned}\sigma_{\theta Rcr,1} &= \left(\frac{7,94mm}{7,94mm} \right) \times 1,35 \frac{kN}{cm^2} = 1,35 \frac{kN}{cm^2}, \\ \sigma_{\theta Rcr,2} &= \left(\frac{7,94mm}{7,94mm} \right) \times 1,35 \frac{kN}{cm^2} = 1,35 \frac{kN}{cm^2}, \\ \sigma_{\theta Rcr,3} &= \left(\frac{7,94mm}{9,65mm} \right) \times 1,35 \frac{kN}{cm^2} = 1,11 \frac{kN}{cm^2}, \\ \sigma_{\theta Rcr,4} &= \left(\frac{7,94mm}{12,19mm} \right) \times 1,35 \frac{kN}{cm^2} = 0,87 \frac{kN}{cm^2}.\end{aligned}$$

Z znano kritično uklonsko napetostjo lahko izračunamo vitkosti:

$$\begin{aligned}\lambda_{\theta,1} &= \sqrt{\frac{24 \frac{kN}{cm^2}}{1,35 \frac{kN}{cm^2}}} = 4,22, \\ \lambda_{\theta,2} &= \sqrt{\frac{24 \frac{kN}{cm^2}}{1,35 \frac{kN}{cm^2}}} = 4,22, \\ \lambda_{\theta,3} &= \sqrt{\frac{24 \frac{kN}{cm^2}}{1,11 \frac{kN}{cm^2}}} = 4,65, \\ \lambda_{\theta,4} &= \sqrt{\frac{24 \frac{kN}{cm^2}}{0,87 \frac{kN}{cm^2}}} = 5,25.\end{aligned}$$

Za vse segmente velja, da je po vitkosti v elastičnem območju uklona. Redukcijski faktor uklona je zato:

$$\begin{aligned}\chi_1 &= \frac{0,65}{4,38^2} = 0,036, \\ \chi_2 &= \frac{0,65}{4,38^2} = 0,036, \\ \chi_3 &= \frac{0,65}{4,65^2} = 0,030, \\ \chi_4 &= \frac{0,65}{5,25^2} = 0,024,\end{aligned}$$

in odpornost na uklon v obodni smeri:

$$\sigma_{\theta Rd,1} = \frac{0,036 \times 24 \frac{kN}{cm^2}}{1,15} = 0,75 \frac{kN}{cm^2},$$

$$\sigma_{\theta Rd,2} = \frac{0,036 \times 24 \frac{kN}{cm^2}}{1,15} = 0,75 \frac{kN}{cm^2},$$

$$\sigma_{\theta Rd,3} = \frac{0,030 \times 24 \frac{kN}{cm^2}}{1,15} = 0,63 \frac{kN}{cm^2},$$

$$\sigma_{\theta Rd,4} = \frac{0,024 \times 24 \frac{kN}{cm^2}}{1,15} = 0,50 \frac{kN}{cm^2}.$$

Odpornost mora biti večja od napetosti, ki se pojavijo v steni rezervoarja:

$$\frac{\sigma_{\theta,Ed,1}}{\sigma_{\theta,Rd,1}} = \frac{0,47 \frac{kN}{cm^2}}{0,75 \frac{kN}{cm^2}} = 0,63,$$

$$\frac{\sigma_{\theta,Ed,2}}{\sigma_{\theta,Rd,2}} = \frac{0,47 \frac{kN}{cm^2}}{0,75 \frac{kN}{cm^2}} = 0,63,$$

$$\frac{\sigma_{\theta,Ed,2}}{\sigma_{\theta,Rd,2}} = \frac{0,39 \frac{kN}{cm^2}}{0,63 \frac{kN}{cm^2}} = 0,62,$$

$$\frac{\sigma_{\theta,Ed,2}}{\sigma_{\theta,Rd,2}} = \frac{0,31 \frac{kN}{cm^2}}{0,50 \frac{kN}{cm^2}} = 0,62.$$

Vsi segmenti zadostijo napetostni kontroli.

5.2.3.2.2.2 Uklon v vertikalni smeri

Območje pod ojačitvijo je potrebno preveriti tudi na uklon v vertikalni smeri. Postopek za rezervoarje s spremenljivo debelino je tak, da za vsak segment predpostavimo višino enako celotni višini. Debelina segmenta ostane nespremenjena. Dimenzije območja so podane v preglednici 5.5.

Preglednica 5.5: Dimenzije območja pod prvo ojačitvijo za kontrolo uklona v vertikalni smeri

| i | višina [mm] | debelina [mm] |
|----|-------------|---------------|
| 1. | 5490 | 7,94 |
| 2. | 5490 | 7,94 |
| 3. | 5490 | 9,65 |
| 4. | 5490 | 12,19 |

Brezdimenzijski faktor za vsak segment posebej znaša:

$$\omega_1 = \frac{5490\text{mm}}{\sqrt{19500\text{mm} \times 7,94\text{mm}}} = 13,95,$$
$$\omega_2 = \frac{5490\text{mm}}{\sqrt{19500\text{mm} \times 7,94\text{mm}}} = 13,95,$$
$$\omega_3 = \frac{5490\text{mm}}{\sqrt{19500\text{mm} \times 9,65\text{mm}}} = 12,66,$$
$$\omega_4 = \frac{5490\text{mm}}{\sqrt{19500\text{mm} \times 12,19\text{mm}}} = 11,26.$$

Vse segmenti spadajo po velikosti med srednje dolge:

$$1,7 \leq \omega \leq 0,5 \frac{r}{t},$$
$$1,7 \leq \omega \leq 0,5 \frac{19500\text{mm}}{7,94\text{mm}} = 1228.$$

Faktor, ki zajema vpliv velikosti je zato $C_x = 1,0$.

Vrednost kritične uklonske napetosti je:

$$\sigma_{x,Rcr,1} = 0,605 \times 21000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \times 1,0 \times \frac{7,94\text{mm}}{19500\text{mm}} = 5,17 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2},$$
$$\sigma_{x,Rcr,2} = 0,605 \times 21000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \times 1,0 \times \frac{7,94\text{mm}}{19500\text{mm}} = 5,17 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2},$$
$$\sigma_{x,Rcr,3} = 0,605 \times 21000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \times 1,0 \times \frac{9,65\text{mm}}{19500\text{mm}} = 6,29 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2},$$
$$\sigma_{x,Rcr,4} = 0,605 \times 21000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \times 1,0 \times \frac{12,19\text{mm}}{19500\text{mm}} = 7,94 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}.$$

Ostali faktorji, potrebni za račun redukcijskega faktorja so:

$$\lambda_{0,x} = 0,2,$$

$$\beta_x = 0,60,$$

$$\eta_x = 1,00,$$

$$\alpha_{x,1} = \frac{0,62}{1+1,91\left(\frac{1}{25}\sqrt{\frac{19500mm}{7,94mm}}\right)^{1,44}} = 0,101,$$

$$\alpha_{x,2} = \frac{0,62}{1+1,91\left(\frac{1}{25}\sqrt{\frac{19500mm}{7,94mm}}\right)^{1,44}} = 0,101,$$

$$\alpha_{x,3} = \frac{0,62}{1+1,91\left(\frac{1}{25}\sqrt{\frac{19500mm}{9,65mm}}\right)^{1,44}} = 0,114,$$

$$\alpha_{x,3} = \frac{0,62}{1+1,91\left(\frac{1}{25}\sqrt{\frac{19500mm}{12,19mm}}\right)^{1,44}} = 0,130.$$

Ker imajo segmenti različne debeline, je zato tudi elastični redukcijski faktor nepopolnosti različen in posledično mejna vitkost elastičnega uklona:

$$\lambda_{p,x,1} = \sqrt{\frac{0,101}{1-0,60}} = 0,50,$$

$$\lambda_{p,x,2} = \sqrt{\frac{0,101}{1-0,60}} = 0,50,$$

$$\lambda_{p,x,3} = \sqrt{\frac{0,114}{1-0,60}} = 0,53,$$

$$\lambda_{p,x,4} = \sqrt{\frac{0,130}{1-0,60}} = 0,57.$$

Kar pa nima vpliva, saj so vsi segmenti vitki, torej pride do elastičnega uklona:

$$\lambda_{x,1} = \sqrt{\frac{24 \frac{kN}{cm^2}}{5,17 \frac{kN}{cm^2}}} = 2,15,$$

$$\lambda_{x,2} = \sqrt{\frac{24 \frac{kN}{cm^2}}{5,17 \frac{kN}{cm^2}}} = 2,15,$$

$$\lambda_{x,3} = \sqrt{\frac{24 \frac{kN}{cm^2}}{6,29 \frac{kN}{cm^2}}} = 1,95,$$

$$\lambda_{x,4} = \sqrt{\frac{24 \frac{kN}{cm^2}}{7,94 \frac{kN}{cm^2}}} = 1,74.$$

Redukcijski faktorji uklona posameznega segmenta so tako:

$$\chi_{x,1} = \frac{0,101}{2,15^2} = 0,022,$$

$$\chi_{x,2} = \frac{0,101}{2,15^2} = 0,022,$$

$$\chi_{x,3} = \frac{0,101}{1,95^2} = 0,027,$$

$$\chi_{x,4} = \frac{0,101}{1,74^2} = 0,033,$$

in uklonska odpornost:

$$\sigma_{x,Rd,1} = 0,022 \times \frac{24 \frac{kN}{cm^2}}{1,15} = 0,45 \frac{kN}{cm^2},$$

$$\sigma_{x,Rd,2} = 0,022 \times \frac{24 \frac{kN}{cm^2}}{1,15} = 0,45 \frac{kN}{cm^2},$$

$$\sigma_{x,Rd,3} = 0,027 \times \frac{24 \frac{kN}{cm^2}}{1,15} = 0,56 \frac{kN}{cm^2},$$

$$\sigma_{x,Rd,4} = 0,033 \times \frac{24 \frac{kN}{cm^2}}{1,15} = 0,69 \frac{kN}{cm^2}.$$

5.2.3.2.2.3 Račun napetosti

Ta mora biti večja od vertikalnih napetosti, ki se pojavijo na dnu posameznega segmenta. Teža stene rezervoarja se z višino povečuje:

$$\begin{aligned}\sigma_{t,k,i} &= \rho \times h_i, \\ \sigma_{t,k,1} &= 78 \times 10^{-6} \frac{kN}{cm^3} \times 371cm = 0,028 \frac{kN}{cm^2}, \\ \sigma_{t,k,2} &= 78 \times 10^{-6} \frac{kN}{cm^3} \times 549cm = 0,043 \frac{kN}{cm^2}, \\ \sigma_{t,k,3} &= 78 \times 10^{-6} \frac{kN}{cm^3} \times 727cm = 0,057 \frac{kN}{cm^2}, \\ \sigma_{t,k,4} &= 78 \times 10^{-6} \frac{kN}{cm^3} \times 905cm = 0,071 \frac{kN}{cm^2}.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{r,k,i} &= \frac{G_{r,k}}{t_i}, \\ \sigma_{r,k,1} &= \frac{2,3 \times 10^{-2} \times \frac{kN}{cm}}{0,794cm} = 0,029 \frac{kN}{cm}, \\ \sigma_{r,k,2} &= \frac{2,3 \times 10^{-2} \times \frac{kN}{cm}}{0,794cm} = 0,029 \frac{kN}{cm}, \\ \sigma_{r,k,3} &= \frac{2,3 \times 10^{-2} \times \frac{kN}{cm}}{0,965cm} = 0,024 \frac{kN}{cm}, \\ \sigma_{r,k,4} &= \frac{2,3 \times 10^{-2} \times \frac{kN}{cm}}{1,219cm} = 0,019 \frac{kN}{cm}.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{x,Ed,i} &= 1,35 \times \sigma_{t,k,i} + 1,35 \times \sigma_{r,k,i}, \\ \sigma_{x,Ed,1} &= 1,35 \times 0,028 \frac{kN}{cm^2} + 1,35 \times 0,029 \frac{kN}{cm^2} = 0,077 \frac{kN}{cm^2}, \\ \sigma_{x,Ed,2} &= 1,35 \times 0,043 \frac{kN}{cm^2} + 1,35 \times 0,029 \frac{kN}{cm^2} = 0,097 \frac{kN}{cm^2}, \\ \sigma_{x,Ed,3} &= 1,35 \times 0,057 \frac{kN}{cm^2} + 1,35 \times 0,024 \frac{kN}{cm^2} = 0,109 \frac{kN}{cm^2}, \\ \sigma_{x,Ed,4} &= 1,35 \times 0,071 \frac{kN}{cm^2} + 1,35 \times 0,019 \frac{kN}{cm^2} = 0,122 \frac{kN}{cm^2}.\end{aligned}$$

Vse napetosti so veliko manjše od odpornosti posameznega segmenta. Izkoriščenost je:

$$\frac{\sigma_{x,Ed,1}}{\sigma_{x,Rd,1}} = \frac{0,077 \frac{kN}{cm^2}}{0,45 \frac{kN}{cm^2}} = 0,17,$$

$$\frac{\sigma_{x,Ed,2}}{\sigma_{x,Rd,2}} = \frac{0,097 \frac{kN}{cm^2}}{0,45 \frac{kN}{cm^2}} = 0,22,$$

$$\frac{\sigma_{x,Ed,2}}{\sigma_{x,Rd,2}} = \frac{0,109 \frac{kN}{cm^2}}{0,56 \frac{kN}{cm^2}} = 0,19,$$

$$\frac{\sigma_{x,Ed,2}}{\sigma_{x,Rd,2}} = \frac{0,122 \frac{kN}{cm^2}}{0,69 \frac{kN}{cm^2}} = 0,18.$$

V nobenem segmentu ni prekoračena uklonska nosilnost v vertikalni smeri.

5.2.3.2.2.4 Interakcija

Če primerjamo izkoriščenosti in uklonske redukcijske faktorje uklona v vertikalni in obodni smeri območja nad in pod ojačitvijo vidimo, da je, kar je tudi logično, bolj kritično območje nad ojačitvijo. Zato na tem mestu ne izvedem interakcije napetosti za posamezne segmente pod ojačitvijo, saj kontroli zadosti že najbolj kritičen segment t.j. območje nad ojačitvijo. Za primerjavo je bila interakcija izvedena le v najbolj obremenjenem segmentu. To je drugi po vrsti.

$$k_x = 1,25 + 0,75 \chi_x = 1,25 + 0,75 \times 0,022 = 1,27,$$

$$k_\theta = 1,25 + 0,75 \chi_\theta = 1,25 + 0,75 \times 0,036 = 1,28,$$

$$k_i = (\chi_x \chi_\theta)^2 = (0,022 \times 0,034)^2 \approx 0.$$

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}} \right)^{k_x} - k_i \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}} \right) \left(\frac{\sigma_{\theta,Ed}}{\sigma_{\theta,Rd}} \right) + \left(\frac{\sigma_{\theta,Ed}}{\sigma_{\theta,Rd}} \right)^{k_\theta} \leq 1,0,$$

$$\left(\frac{0,097}{0,45} \right)^{1,28} - 0 \times \left(\frac{0,097}{0,45} \right) \left(\frac{0,47}{0,63} \right) + \left(\frac{0,47}{0,75} \right)^{1,27} \leq 1,0,$$

$$0,69 \leq 1,0.$$

5.2.3.3 Zaključek

Ugotovimo, da je po Evropskih priporočilih ECCS ena ojačitev postavljena na mesto, ki jo določa EN 14015 dovolj za zagotovitev stabilnosti rezervoarja. Izkoriščenost je v delu nad ojačitvijo enaka 0,91,

v delu pod njo pa 0,69. Iz tega bi lahko sklepali, da ojačitev glede na kontrolo po Evropskih priporočilih ECCS ni postavljena na idealno mesto, saj bi v takem primeru dobili približno enako izkoriščenost. Računska postopka se razlikujeta, zato tudi različen rezultat. V nadaljevanju je idealna pozicija ojačitve izračunana tudi numerično.

5.2.4 Povzetek in primerjava standardov

Pri primerjavi standardov na referenčnem primeru vidimo, da se rezultati razlikujejo. Čeprav se Evropski standard EN 14015 in Ameriški API650 po vsebini zelo malo razlikujeta, je rezultat različen. Postopka se razlikujeta v računu največje neojačene stene rezervoarja, ki po Evropskem standardu znaša 6,85m, po Ameriškem pa 9,50m. Račun nadomestne višine rezervoarja je po obeh standardih enak in znaša 7,1m.

Po Evropskem standardu tako potrebujemo eno ojačitev, dočim te po Ameriškem standardu ne potrebujemo. Potrebujemo jo tudi po zahtevah Evropskih priporočilih ECCS. Kljub temu, če bolje pogledamo rezultat standarda EN14015 vidimo, da je pogojem skoraj zadoščeno že brez dodatne ojačitve. Dejanska neojačena dolžina je za samo 4% daljša od maksimalne dovoljene. Po priporočilih ECCS dobimo najbolj konservativne rezultate, saj so brez ojačitve dovoljene napetosti kar dvakrat prekoračene. V primeru ene ojačitve pa napetostna izkoriščenost znaša 0,93, kar je ravno pod varno mejo.

Dobljene rezultate bo zanimivo primerjati z numerično analizo, ki omogoča natančnejši vpogled v dejansko napetostno stanje rezervoarja.

V preglednici 5.6 so predstavljene izkoriščenosti in normirane višine po posameznih standardih. Razen po Evropskih priporočilih ECCS, kjer je podana napetostna izkoriščenost je v ostalih primerih podano razmerje med dejansko in maksimalno nepodprto razdaljo stene rezervoarja.

Preglednica 5.6: Primerjava med standardi

| Standard | Število ojačitev | Območje | Velikost območja | Izkoriščenost napetosti | Normirana višina |
|------------------|------------------|---------|------------------|-------------------------|------------------|
| EN14015 | 0 | 1 | 9,05m | / | 1,04 |
| | 1 | 1 | 3,56m | / | 0,53 |
| | | 2 | 5,49m | / | 0,80 |
| API650 | 0 | 1 | 9,05m | / | 0,75 |
| ECCS 5th Edition | 1 | 1 | 3,56m | 0,93 | / |
| | | 2 | 5,49m | 0,69 | / |

5.3 Trenutno stanje

Tekom let se je zaradi korozije debelina stene rezervoarja drastično zmanjšala. Relativno in tudi absolutno se je najbolj stanjšal ravno vrhnji del rezervoarja, ki je bil že v začetnem stanju zaradi svoje debeline najbolj kritičen.

V preglednici 5.7 so podane trenutne dimenzije rezervoarja, ter delež zmanjšanja debeline zaradi korozije.

Preglednica 5.7: Dimenzije rezervoarja v trenutnem stanju

| Višina segmenta [mm] | Začetna debelina [mm] | Trenutna debelina [mm] | Zmanjšanje debeline |
|----------------------|-----------------------|------------------------|---------------------|
| 1930 | 7,94 | 5,6 | 29% |
| 1780 | 7,94 | 5,5 | 30% |
| 1780 | 7,94 | 6,9 | 13% |
| 1780 | 9,65 | 9 | 7% |
| 1780 | 12,19 | 11,3 | 7% |

Pričakovati je, da bomo potrebovali dodatne ojačitve. Zaradi zahteve Evropskih priporočil, da mora biti vsak segment enake ali večje debeline od vrhnjega segmenta in strmenja po primerjavi standardov na enakem rezervoarju, korigiramo debelino prvega segmenta na $t_l = 5,5\text{mm}$. Zaradi te majhne poenostavitve smo na varni strani, saj rezervoarju nismo povečali odpornosti, bistveno pa je tudi nismo zmanjšali.

5.3.1 EC14015

5.3.1.1 Primarna ojačitev

Tako kot v začetnem, tudi v trenutnem stanju primarna ojačitev po zahtevah standarda ni potrebna. Kljub temu je ta nameščena za prevzem horizontalne reakcije teže strehe.

5.3.1.2 Sekundarna ojačitev

Nadomestna višina rezervoarja, bo zaradi spremenjenih debelin drugačna kot v začetnem stanju:

$$H_{e,i} = h_i \times \left(\frac{5,5\text{mm}}{e_i} \right)^{\frac{5}{2}},$$

$$H_{e,1} = 1,93\text{m} \times \left(\frac{5,5\text{mm}}{5,5\text{mm}} \right)^{\frac{5}{2}} = 1,93\text{m},$$

$$H_{e,2} = 1,78\text{m} \times \left(\frac{5,5\text{mm}}{5,5\text{mm}} \right)^{\frac{5}{2}} = 1,78\text{m},$$

$$H_{e,3} = 1,78\text{m} \times \left(\frac{5,5\text{mm}}{6,9\text{mm}} \right)^{\frac{5}{2}} = 1,01\text{m},$$

$$H_{e,4} = 1,78\text{m} \times \left(\frac{5,5\text{mm}}{9\text{mm}} \right)^{\frac{5}{2}} = 0,52\text{m},$$

$$H_{e,5} = 1,78\text{m} \times \left(\frac{5,5\text{mm}}{11,3\text{mm}} \right)^{\frac{5}{2}} = 0,29\text{m}.$$

Skupna višina nadomestnega rezervoarja je tako:

$$H_E = \sum_i H_{e,i},$$

$$H_E = 1,93\text{m} + 1,78\text{m} + 1,01\text{m} + 0,52\text{m} + 0,29\text{m},$$

$$H_E = 5,53\text{m}.$$

Največja razdalja neojačene stene rezervoarja se bo prav tako zmanjšala, saj se je spremenila debelina najtanjšega segmenta:

$$H_p = K \times \left(\frac{e_{\min}^5}{D^3} \right)^{0,5},$$

$$K = \frac{95000}{3,563 \times V_w^2 + 580 \times p_v},$$

$$K = \frac{95000}{3,563 \times \left(45 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2 + 580 \times 5\text{mbar}},$$

$$K = 9,39.$$

$$H_p = 9,39 \times \left(\frac{(5,5\text{mm})^5}{(39\text{m})^3} \right)^{0,5},$$

$$H_p = 2,73\text{m}.$$

Glede na dobljene vrednosti moramo višino rezervoarja razdeliti na tri območja, oziroma potrebujemo dve ojačitvi:

$$\begin{aligned}n &= H_E / H_p, \\n &= 5,53 / 2,73, \\n &= 2,03.\end{aligned}$$

Postavimo jih enakomerno po višini nadomestnega rezervoarja:

$$\begin{aligned}l_{OJ} &= 5,53m / 3, \\H_{OJ,1} &= 1,84m, \\H_{OJ,2} &= 3,68m.\end{aligned}$$

Obe ojačitvi ležita v območju prvih dveh segmentov, kjer je debelina enaka minimalni, zato korekcija pozicije ni potrebna:

$$h_1 + h_2 = 1,93m + 1,78m = 3,71m > H_{OJ,2} = 3,68m.$$

Preveriti je potrebno le, da ojačitev ne leži znotraj območja 150mm okoli horizontalnega spoja segmentov. Območje okoli prvega spoja, kjer ni zaželeno imeti ojačitve je:

$$h_1 \pm 0,15m = 1,93m \pm 0,15m = 1,78m \sim 2,08m.$$

Ker prvotna pozicija ojačitve leži znotraj tega območja, je treba pozicijo korigirati. Ojačitev postavim na zgornjo mejo območja, saj tako zmanjšam velikost najbolj kritičnega območja. Nova pozicija ojačitve je:

$$H_{oj,1} = 1,78m.$$

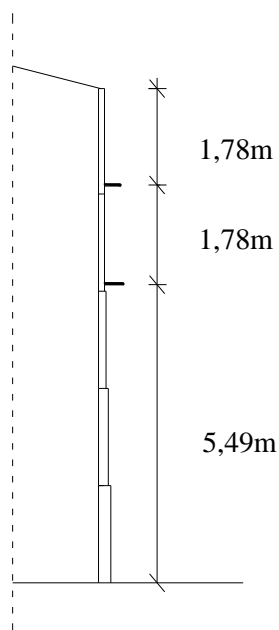
Prav tako prvotna pozicija druge ojačitve leži znotraj območja 150mm okoli spoja drugega in tretjega segmenta:

$$h_1 + h_2 \pm 0,15m = 1,93m + 1,78m \pm 0,15m = 3,56m \sim 3,86m.$$

Tudi tu ojačitev premaknemo na zgornjo mejo območja in sicer na koto:

$$H_{oj,2} = 3,56m.$$

Po zahtevah Evropskega standarda potrebujemo v trenutnem stanju dve ojačitvi na pozicijah $H_{oj,1} = 1,78\text{m}$ in $H_{oj,2} = 3,56\text{m}$ od zgornjega roba navzdol (slika 5.9). Prerez ojačitve je vezan na radij rezervoarja, ki se glede na začetno stanje ni spremenil. Minimalen odpornostni moment ojačitve tako ostaja $533,3\text{cm}^3$.



Slika 5.9: Pozicija ojačitev po EN14015

5.3.1.3 Normirana višina

Enako kot pri trenutnem stanju, tudi tu podajam normirano višino, ozirom razmerje med dejansko neojačeno razdaljo in največjo dovoljeno neojačeno razdaljo. Indeksi predstavljajo število ojačitev:

$$\text{brez ojačitve: } \eta_0 = \frac{H_{E,0}}{H_p} = \frac{5,53\text{m}}{2,73\text{m}} = 2,03,$$

$$1 \text{ ojačitev: } \eta_1 = \frac{H_{E,1}}{H_p} = \frac{2,77\text{m}}{2,73\text{m}} = 1,01,$$

$$2 \text{ ojačitvi: } \eta_2 = \frac{H_{E,2}}{H_p} = \frac{1,78\text{m}}{2,73\text{m}} = 0,35.$$

5.3.2 API 650

5.3.2.1 Primarna ojačitev

Rezervoar ima nameščeno primarno ojačitev za prevzem horizontalne reakcije teže strehe.

5.3.2.2 Sekundarna ojačitev

Višina nadomestnega rezervoarja je enaka tisti izračunani po Evropskem standardu:

$$H_E = 5,53m.$$

Se pa razlikuje račun največje dovoljene neojačene dolžine stene rezervoarja:

$$H_p = 9,47 \times t \times \sqrt{\left(\frac{t}{D}\right)^3} \times \left(\frac{190}{V_w}\right)^2,$$
$$H_p = 9,47 \times 5,5mm \times \sqrt{\left(\frac{5,5mm}{39m}\right)^3} \times \left(\frac{190 \frac{km}{h}}{162 \frac{km}{h}}\right)^2,$$
$$H_p = 3,79m.$$

Po izračunanih vrednostih potrebujemo eno ojačitev, ki jo postavimo na sredino nadomestnega rezervoarja:

$$l_{OJ} = 5,53m / 2,$$
$$H_{OJ,1} = 2,77m.$$

Ker je ojačitev v območju segmenta z najmanjšo debelino, ni potrebna korekcija pozicije. Preveriti je potrebno le še, da ojačitev ne leži znotraj območja 150mm okoli horizontalnega spoja sosednjih segmentov.

Območje okoli spoja prvega in drugega segmenta se razteza na:

$$h_1 \pm 0,15m = 1,93m \pm 0,15m = 1,78m \sim 2,08m,$$

območje okoli drugega segmenta pa okoli

$$h_1 + h_2 \pm 0,15m = 1,93m + 1,78m \pm 0,15m = 3,56m \sim 3,86m.$$

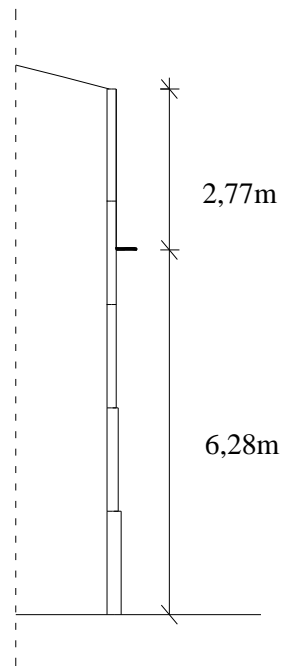
Kot vidimo pozicija ojačitve ni v okolici horizontalnih spojev. Izračunana pozicija ustreza zahtevam (slika 5.10).

Minimalni odpornosti moment ojačitve je določen z naslednjo enačbo:

$$Z = \frac{D^2 H_p}{17} \left(\frac{V}{190} \right)^2,$$

$$Z = \frac{(39m)^2 \cdot 2,77m}{17} \left(\frac{162 \frac{km}{h}}{190 \frac{km}{h}} \right)^2,$$

$$Z = 180170mm^3.$$



Slika 5.10: Pozicija ojačitev po API650

5.3.2.3 Normirana višina

Po enakem postopku kot za Evropski standard tudi tu predstavimo normirano višino:

$$\text{brez ojačitve: } \eta_0 = \frac{H_{E,0}}{H_p} = \frac{5,53m}{3,79m} = 1,46,$$

$$1 \text{ ojačitev: } \eta_1 = \frac{H_{E,1}}{H_p} = \frac{2,77m}{3,79m} = 0,73.$$

5.3.3 ECCS 5th Edition

5.3.3.1 Obstoječe stanje

Za račun rezervoarja v trenutnem stanju sledimo postopku, ki smo ga uporabili za začetno stanje. Obtežbe se niso spremenile, so pa se spremenile notranje napetosti, kot posledica spremenjenih debelin. Notranje obodne napetosti zaradi vpliva vetra so tako:

$$\begin{aligned}\sigma_{\theta,Ed,1} &= 0,000191 \frac{kN}{cm^2} \times \frac{19500mm}{5,5mm} = 0,68 \frac{kN}{cm^2}, \\ \sigma_{\theta,Ed,2} &= 0,000191 \frac{kN}{cm^2} \times \frac{19500mm}{5,5mm} = 0,68 \frac{kN}{cm^2}, \\ \sigma_{\theta,Ed,3} &= 0,000191 \frac{kN}{cm^2} \times \frac{19500mm}{6,9mm} = 0,54 \frac{kN}{cm^2}, \\ \sigma_{\theta,Ed,4} &= 0,000191 \frac{kN}{cm^2} \times \frac{19500mm}{9mm} = 0,41 \frac{kN}{cm^2}, \\ \sigma_{\theta,Ed,5} &= 0,000191 \frac{kN}{cm^2} \times \frac{19500mm}{11,3mm} = 0,33 \frac{kN}{cm^2}.\end{aligned}$$

Ker smo že v začetnem stanju po zahtevah ECCS priporočil potrebovali eno ojačitev, bomo sedaj, ko so debeline še manjše, potrebovali najmanj eno ojačitev. Zato kontrola za rezervoar brez ojačitve ni izvedena, saj bi dobili rezultat, da je ojačitev potrebna. Ker je bila kontrola po ECCS priporočilih v začetnem stanju najbolj konservativna je pričakovati, da bomo za trenutno stanje potrebovali najmanj dve ojačitvi. Kljub temu zaradi primerjave z ostalima dvema standardom izvedemo tudi kontrolo za samo eno ojačitev. Ker smo po Ameriškem API standardu dobili, eno ojačitev, po Evropskem pa dve, bomo najprej z ECCS priporočili preverili API standard in v primeru, da potrebujemo dve ojačitvi, le-te postavili na mesti izračunani po Evropskem standardu EN14015.

5.3.3.2 1 ojačitev

Ojačitev je postavljena na mesto, ki smo ga določili po Ameriškem API standardu:

$$H_{OJ,1} = 2,77m.$$

Enako pozicijo bi dobili tudi z računom po Evropskem standardu EN14015 v primeru, da bi potrebovali samo eno ojačitev.

Predpostavimo, da je ojačitev dovolj toga, da preprečuje radialne pomike, ter tako predstavlja robni pogoj tipa BC2. Ojačitev rezervoar razdeli na dva dela. Zgornji del velikosti $L_1 = 2,77m$ in spodnji velikosti $L_2 = 6,28m$. Vsak del posebej obravnavamo kot samostojen rezervoar.

5.3.3.2.1 Zgornji del

Zgornji del je sestavljen iz dveh segmentov debeline 5,5mm, zato ga preverimo po enačbah za rezervoarje konstantne debeline. Dimenzije so podane v preglednici 5.8.

Preglednica 5.8: Dimenzije območja nad prvo ojačitvijo

| i | višina [mm] | debelina [mm] |
|----|-------------|---------------|
| 1. | 1930 | 5,5 |
| 2. | 840 | 5,5 |
| Σ | 2770 | 5,5 |

5.3.3.2.1.1 Uklon v obodni smeri

Po velikosti zgornji del spada med kratke segmente, saj je:

$$\omega = \frac{2770\text{mm}}{\sqrt{19500\text{mm} \times 5,5\text{mm}}},$$

$$\omega = 8,46.$$

Faktorja, ki zajemata vpliv robnih pogojev, kjer imamo na obeh robovih robne pogoje tipa BC2, sta enaka:

$$C_{\theta} = 1,0,$$

$$C_{\theta_s} = 1,0 + \frac{3}{\omega^{1,35}} = 1,0 + \frac{3}{8,46^{1,35}} = 1,17.$$

Torej je:

$$\frac{\omega}{C_{\theta}} = \frac{8,46}{1,0} = 8,46 < 20.$$

Enačba kritične uklonske obodne napetosti je tako:

$$\sigma_{\theta, Rcr} = 0,92 \times 21000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \times \frac{1,17}{8,46} \times \frac{0,55\text{cm}}{1950\text{cm}},$$

$$\sigma_{\theta, Rcr} = 0,75 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}.$$

V primerjavi z začetnim stanjem, se nam je kritična napetost zmanjšala za 25%.

Vitkost segmenta je naslednja:

$$\lambda_{\theta} = \sqrt{\frac{24 \frac{kN}{cm^2}}{0,75 \frac{kN}{cm^2}}},$$
$$\lambda_{\theta} = 5,64.$$

Meja elastičnega uklona je enaka kot v začetnem stanju. Redukcijski faktor nepopolnosti, se prav tako ni spremenil:

$$\alpha_{\theta} = 0,65.$$

Zaradi večje vitkosti, se redukcijski faktor uklon poveča in znaša:

$$\chi_{\theta} = \frac{\alpha_{\theta}}{\lambda_{\theta}^2} = \frac{0,65}{5,64^2} = 0,02.$$

Reducirana nosilnost je tako:

$$\sigma_{\theta,Rd} = \frac{\chi_{\theta} f_{y,k}}{\gamma_{M1}} = \frac{0,02 \times 24 \frac{kN}{cm^2}}{1,15},$$
$$\sigma_{\theta,Rd} = 0,42 \frac{kN}{cm^2}.$$

Zgornji del rezervoarja torej ne ustreza zahtevam Evropskih priporočil ECCS. Obodne napetosti, kot posledica vetrne obtežbe prekoračijo uklonsko odpornost rezervoarja. Izkoriščenost je:

$$\frac{\sigma_{\theta,Ed}}{\sigma_{\theta,Rd}} = \frac{0,68 \frac{kN}{cm^2}}{0,42 \frac{kN}{cm^2}} = 1,62.$$

Kot ukrep uvedemo dodatno ojačitev.

5.3.3.3 2 ojačitvi

Ojačitvi postavimo na poziciji izračunani po Evropskem standardu EN14015:

$$H_{OJ,1} = 1,78m,$$

$$H_{OJ,2} = 3,56m.$$

Rezervoar je sedaj razdeljen na tri območja, ki jih omejujejo ojačitve in robovi rezervoarja. Ojačitvi sta togi, tako da vsako območje posebej obravnavamo kot samostojen rezervoar.

5.3.3.3.1 Prvo območje

Prvo območje se razteza od zgornjega roba pa do prve ojačitve. Dimenzije so podane v preglednici 5.9.

Preglednica 5.9: Dimenzije območja nad prvo ojačitvijo

| i | [mm] | [mm] |
|----|------|------|
| 1. | 1780 | 5,5 |

Ker se debelina tekom območja ne spreminja, ga preverimo s predpisi za konstantno debelino.

5.3.3.3.1.1 Uklon v obodni smeri

Območje spada po velikosti med kratke, saj je še manjše kot tisto pri eni ojačitvi. Vseeno za račun kritične uklonske obodne napetosti potrebujemo naslednje parametre:

$$\omega = \frac{1780}{\sqrt{19500 \times 5,5}},$$

$$\omega = 5,44,$$

in

$$C_{\theta_s} = 1,0 + \frac{3}{\omega^{1,35}} = 1,0 + \frac{3}{5,44^{1,35}} = 1,30.$$

Kritična uklonska obodna napetost je:

$$\sigma_{\theta, Rcr} = 0,92 \times 21000 \frac{kN}{cm^2} \times \frac{1,30}{5,44} \times \frac{0,55cm}{1950cm},$$

$$\sigma_{\theta, Rcr} = 1,30 \frac{kN}{cm^2}.$$

Kritična napetost se je skoraj podvojila v primerjavi z zgornjim območjem pri samo eni ojačitvi. Pri tem smo razdaljo med ojačitvijo in zgornjim robom zmanjšali za 30%.

Vitkost segmenta je:

$$\lambda_{\theta} = \sqrt{\frac{24 \frac{kN}{cm^2}}{1,30 \frac{kN}{cm^2}}},$$
$$\lambda_{\theta} = 4,30.$$

Rezervoar spada v območje elastičnega uklona, faktor redukcije je zato:

$$\chi_{\theta} = \frac{\alpha_{\theta}}{\lambda_{\theta}^2} = \frac{0,65}{4,30^2} = 0,035.$$

Reducirana nosilnost je:

$$\sigma_{\theta,Rd} = \frac{0,035 \times 24 \frac{kN}{cm^2}}{1,15},$$
$$\sigma_{\theta,Rd} = 0,73 \frac{kN}{cm^2}.$$

Odpornost je večja od obodnih napetosti. Izkoriščenosti je:

$$\frac{\sigma_{\theta,Ed}}{\sigma_{\theta,Rd}} = \frac{0,68 \frac{kN}{cm^2}}{0,73 \frac{kN}{cm^2}} = 0,93.$$

5.3.3.3.1.2 Uklon v vertikalni smeri

Po velikosti spada med srednje dolge segmente:

$$1,7 \leq \omega \leq 0,5 \frac{r}{t},$$
$$1,7 \leq 5,44 \leq 0,5 \frac{19500mm}{5,5mm} = 1773.$$

Faktor C_x je zato enak ena in kritična vertikalna uklonska napetost enaka:

$$\sigma_{x,Rcr} = 0,605 \times E \times C_x \times \frac{t}{r},$$
$$\sigma_{x,Rcr} = 0,605 \times 21000 \frac{kN}{cm^2} \times 1,0 \times \frac{5,5mm}{19500mm},$$
$$\sigma_{x,Rcr} = 3,58 \frac{kN}{cm^2}.$$

Ostali faktorji potrebni za izračun redukcijskega faktorja uklona so:

$$\lambda_{0,x} = 0,2,$$

$$\beta_x = 0,60,$$

$$\eta_x = 1,00.$$

Elastični redukcijski faktor nepopolnosti je enak:

$$\alpha_x = \frac{0,62}{1 + 1,91 \left(\frac{1}{25} \sqrt{\frac{19500 \text{ mm}}{5,5 \text{ mm}}} \right)^{1,44}},$$

$$\alpha_x = 0,162.$$

Mejna vitkost elastičnega uklona je:

$$\lambda_{p,x} = \sqrt{\frac{0,162}{1 - 0,60}},$$

$$\lambda_{p,x} = 0,64.$$

Vitkost segmenta pa:

$$\lambda_x = \sqrt{\frac{24 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{3,58 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}},$$

$$\lambda_x = 2,59.$$

V segmentu pri do elastičnega uklona, redukcijski faktor je enak:

$$\chi_x = \frac{\alpha_x}{\lambda_x^2},$$

$$\chi_x = \frac{0,162}{2,59^2},$$

$$\chi_x = 0,024.$$

Uklonska odpornost na uklon v vertikalni smeri je:

$$\begin{aligned}\sigma_{x,Rd} &= \chi_x f_y / \gamma_{M1}, \\ \sigma_{x,Rd} &= 0,024 \times \frac{24 \frac{kN}{cm^2}}{1,15}, \\ \sigma_{x,Rd} &= 0,50 \frac{kN}{cm^2}.\end{aligned}$$

5.3.3.3.1.3 Račun napetosti

Vertikalna napetost na dnu segmenta kot posledica lastne teže je:

$$\begin{aligned}\sigma_{t,k} &= \rho \times h, \\ \sigma_{t,k} &= 78 \times 10^{-6} \frac{kN}{cm^3} \times 178 cm, \\ \sigma_{t,k} &= 0,014 \frac{kN}{cm^2}.\end{aligned}$$

Napetosti zaradi obtežbe strehe pa:

$$\begin{aligned}\sigma_{r,k} &= \frac{G_{r,k}}{t}, \\ \sigma_{r,k} &= \frac{2,3 \times 10^{-2} \times \frac{kN}{cm}}{0,55 cm}, \\ \sigma_{r,k} &= 0,042 \frac{kN}{cm}.\end{aligned}$$

Projektna vrednost napetosti na dnu segmenta je tako:

$$\begin{aligned}\sigma_{x,Ed} &= 1,35 \times \sigma_{t,k} + 1,35 \times \sigma_{r,k}, \\ \sigma_{x,Ed} &= 1,35 \times 0,014 \frac{kN}{cm^2} + 1,35 \times 0,042 \frac{kN}{cm^2}, \\ \sigma_{x,Ed} &= 0,076 \frac{kN}{cm^2}.\end{aligned}$$

Tudi v vertikalni smeri napetosti niso prekoračene. Izkoriščenost je:

$$\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}} = \frac{0,076 \frac{kN}{cm^2}}{0,50 \frac{kN}{cm^2}} = 0,15.$$

5.3.3.3.1.4 Interakcija

Ker se nam pojavijo napetosti v več kot eni smeri, napravimo še interakcijo med njimi:

$$k_x = 1,25 + 0,75\chi_x = 1,25 + 0,75 \times 0,024 = 1,27,$$

$$k_\theta = 1,25 + 0,75\chi_\theta = 1,25 + 0,75 \times 0,035 = 1,28,$$

$$k_i = (\chi_x \chi_\theta)^2 = (0,024 \times 0,035)^2 \approx 0.$$

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}} \right)^{k_x} - k_i \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}} \right) \left(\frac{\sigma_{\theta,Ed}}{\sigma_{\theta,Rd}} \right) + \left(\frac{\sigma_{\theta,Ed}}{\sigma_{\theta,Rd}} \right)^{k_\theta} + \left(\frac{\tau_{x\theta,Ed}}{\tau_{x\theta,Rd}} \right)^{k_\tau} \leq 1,0,$$

$$\left(\frac{0,076}{0,50} \right)^{1,27} - 0 \times \left(\frac{0,076}{0,50} \right) \left(\frac{0,68}{0,73} \right) + \left(\frac{0,68}{0,73} \right)^{1,28} \leq 1,0,$$

$$1,0 \leq 1,0.$$

Napetostna kontrola se ravno izide, kar pomeni, da je območje nad prvo ojačitvijo stabilno. Če upoštevamo da je drugo območje popolnoma enakih dimenzij a z večjo vertikalno obremenitvijo kot posledico lastne teže stene rezervoarja, lahko pridemo do zaključka, da se kontrola tam ne bo izšla.

Kljub temu zaradi kontrole standardov preverimo tudi drugo in tretje območje. S tem bomo preverili ali so pozicije ojačitev idealne, ali bi mogoče z drugačno postavitvijo dosegli zadostno uklonsko odpornost rezervoarja.

5.3.3.3.2 Drugo območje

Drugo območje predstavlja prostor med obema ojačitvama. Je velikosti 1780mm. Prav tako kot prvo območje so vsi segmenti konstantne debeline. Dimenzije so območja so v preglednici 5.10.

Preglednica 5.10: Dimenzije območja med prvo in drugo ojačitvijo

| i | višina [mm] | debelina [mm] |
|----|-------------|---------------|
| 1. | 150 | 5,5 |
| 2. | 1630 | 5,5 |
| Σ | 1780 | 5,5 |

Prvo in drugo območje sta glede na uklonsko odpornost popolnoma enaka, saj sta enake velikosti in enake debeline. Spremeni se le izkoriščenost, saj se poveča vertikalna napetost na račun lastne teže stene rezervoarja.

5.3.3.3.2.1 Račun napetosti

$$\sigma_{t,k} = 78 \times 10^{-6} \frac{kN}{cm^3} \times 356cm,$$

$$\sigma_{t,k} = 0,028 \frac{kN}{cm^2}.$$

Projekta vrednost napetosti na dnu območja je tako večja:

$$\sigma_{x,Ed} = 1,35 \times 0,028 \frac{kN}{cm^2} + 1,35 \times 0,042 \frac{kN}{cm^2},$$

$$\sigma_{x,Ed} = 0,095 \frac{kN}{cm^2}.$$

Izkoriščenost v vertikalni smeri se tako malenkost poveča:

$$\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}} = \frac{0,095 \frac{kN}{cm^2}}{0,50 \frac{kN}{cm^2}} = 0,19.$$

5.3.3.3.2 Interakcija

Interakcija napetosti je večja od ena:

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}} \right)^{k_x} - k_i \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}} \right) \left(\frac{\sigma_{\theta,Ed}}{\sigma_{\theta,Rd}} \right) + \left(\frac{\sigma_{\theta,Ed}}{\sigma_{\theta,Rd}} \right)^{k_\theta} + \left(\frac{\tau_{x\theta,Ed}}{\tau_{x\theta,Rd}} \right)^{k_\tau} \leq 1,0,$$

$$\left(\frac{0,095}{0,50} \right)^{1,27} - 0 \times \left(\frac{0,095}{0,50} \right) \left(\frac{0,68}{0,73} \right) + \left(\frac{0,68}{0,73} \right)^{1,28} \leq 1,0,$$

$$1,03 \leq 1,0.$$

Območje med ojačitvami torej ne zadošča stabilnostnim kontrola Evropskega priporočila ECCS. Izkoriščenost je skoraj enaka kot v prvem območju.

5.3.3.3.3 Tretje območje

Tretje območje predstavlja predel rezervoarja pod drugo ojačitvijo. Je velikosti 5490mm in spremenljive debeline. Dimenzije so podane v preglednici 5.11.

Preglednica 5.11: Dimenzije območja pod drugo ojačitvijo

| i | [mm] | [mm] |
|----|------|------|
| 1. | 150 | 5,5 |
| 2. | 1780 | 6,9 |
| 3. | 1780 | 9,0 |
| 4. | 1780 | 11,3 |

5.3.3.3.3.1 Uklon v obodni smeri

Rezervoar prevedemo na nadomestni rezervoar treh debelin in nato na rezervoar enotne debeline in nadomestne dolžine.

Prvi nadomestni segment sega do zgornjega roba prvega dejanskega segmenta, ki ima debelino večjo kot 1,5-kratnik najmanjše debeline, to je:

$$1,5 \times 5,5 \text{ mm} = 8,25 \text{ mm}.$$

V našem primeru je to do zgornjega roba tretjega segmenta:

$$l_a = 0,15 \text{ m} + 1,78 \text{ m},$$

$$l_a = 1,93 \text{ m} \leq h / 2 = 2,745 \text{ m}.$$

Ker je nadomestni segment večji od tretjine celotnega območja:

$$l_a = 1,930 \text{ m} > L / 3 = 5,49 \text{ m} / 3 = 1,83 \text{ m},$$

sta ostala dva nadomestna segmenta enake velikosti:

$$l_b = l_c = 0,5 \times (5,490 \text{ m} - 1,930 \text{ m}),$$

$$l_b = l_c = 1,78 \text{ m}.$$

Debeline nadomestnih segmentov so naslednje:

$$t_a = \frac{1}{1,93 \text{ m}} \times (0,15 \text{ m} \cdot 5,5 \text{ mm} + 1,78 \text{ m} \cdot 6,9 \text{ mm}),$$

$$t_a = 6,79 \text{ mm}.$$

$$t_b = \frac{1}{1,78 \text{ m}} \times (1,78 \text{ m} \cdot 9 \text{ mm}),$$

$$t_b = 9 \text{ mm}.$$

$$t_c = \frac{1}{1,78 \text{ m}} \times (1,78 \text{ m} \cdot 11,3 \text{ mm}),$$

$$t_c = 11,3 \text{ mm}.$$

Nato izračunamo razmerja potrebna za določitev κ :

$$l_a / L = 1,93 \text{ m} / 5,49 \text{ m} = 0,35,$$

$$t_c / t_a = 11,3 \text{ mm} / 6,79 \text{ mm} = 1,66,$$

$$t_b / t_a = 9 \text{ mm} / 6,79 \text{ mm} = 1,33,$$

→ $\kappa = 0,69$.

Nadomesten rezervoar je debeline 6,79mm in velikosti:

$$l_{eff} = 1,93m / 0,69,$$
$$l_{eff} = 2,80m.$$

Segment je po velikosti kratek:

$$\omega_{eff} = \frac{2800mm}{\sqrt{19500mm \times 6,79mm}},$$
$$\omega_{eff} = 7,69.$$

Ker območje spada med kratke, in za robne pogoje predpostavimo tip BC2 na obeh straneh, je faktor:

$$C_{\theta s} = 1,0 + \frac{3}{7,69^{1,35}} = 1,19.$$

Kritična uklonska napetost nadomestnega rezervoarja je tako:

$$\sigma_{\theta Rcr,eff} = 0,92 \times 21000 \frac{kN}{cm^2} \times \frac{1,19}{7,69} \frac{6,79mm}{19500mm},$$
$$\sigma_{\theta Rcr,eff} = 1,04 \frac{kN}{cm^2}.$$

Kritične uklonske napetosti posameznih segmentov so:

$$\sigma_{\theta Rcr,1} = \left(\frac{6,79mm}{5,5mm} \right) \times 1,04 \frac{kN}{cm^2} = 1,28 \frac{kN}{cm^2},$$
$$\sigma_{\theta Rcr,2} = \left(\frac{6,79mm}{6,9mm} \right) \times 1,04 \frac{kN}{cm^2} = 1,03 \frac{kN}{cm^2},$$
$$\sigma_{\theta Rcr,3} = \left(\frac{6,79mm}{9mm} \right) \times 1,04 \frac{kN}{cm^2} = 0,78 \frac{kN}{cm^2},$$
$$\sigma_{\theta Rcr,4} = \left(\frac{6,79mm}{11,3mm} \right) \times 1,04 \frac{kN}{cm^2} = 0,62 \frac{kN}{cm^2}.$$

Z znano uklonsko kritično napetostjo izračunamo vitkosti:

$$\lambda_{\theta,1} = \sqrt{\frac{24 \frac{kN}{cm^2}}{1,28 \frac{kN}{cm^2}}} = 4,33,$$

$$\lambda_{\theta,2} = \sqrt{\frac{24 \frac{kN}{cm^2}}{1,03 \frac{kN}{cm^2}}} = 4,83,$$

$$\lambda_{\theta,3} = \sqrt{\frac{24 \frac{kN}{cm^2}}{0,78 \frac{kN}{cm^2}}} = 5,55,$$

$$\lambda_{\theta,4} = \sqrt{\frac{24 \frac{kN}{cm^2}}{0,62 \frac{kN}{cm^2}}} = 6,22.$$

V vseh segmentih pride do elastičnega uklona, zato redukcijski faktor določimo na naslednji način:

$$\chi_1 = \frac{0,65}{4,33^2} = 0,035,$$

$$\chi_2 = \frac{0,65}{4,83^2} = 0,028,$$

$$\chi_3 = \frac{0,65}{5,55^2} = 0,021,$$

$$\chi_4 = \frac{0,65}{6,22^2} = 0,017.$$

Odpornost na uklon v obodni smeri je tako:

$$\sigma_{\theta Rd,1} = \frac{0,035 \times 24 \frac{kN}{cm^2}}{1,15} = 0,73 \frac{kN}{cm^2},$$

$$\sigma_{\theta Rd,2} = \frac{0,028 \times 24 \frac{kN}{cm^2}}{1,15} = 0,58 \frac{kN}{cm^2},$$

$$\sigma_{\theta Rd,3} = \frac{0,021 \times 24 \frac{kN}{cm^2}}{1,15} = 0,44 \frac{kN}{cm^2},$$

$$\sigma_{\theta Rd,4} = \frac{0,017 \times 24 \frac{kN}{cm^2}}{1,15} = 0,35 \frac{kN}{cm^2}.$$

Izkoriščenost v posameznih segmentih je naslednja:

$$\frac{\sigma_{\theta,Ed,1}}{\sigma_{\theta,Rd,1}} = \frac{0,68 \frac{kN}{cm^2}}{0,73 \frac{kN}{cm^2}} = 0,93,$$
$$\frac{\sigma_{\theta,Ed,2}}{\sigma_{\theta,Rd,2}} = \frac{0,54 \frac{kN}{cm^2}}{0,58 \frac{kN}{cm^2}} = 0,93,$$
$$\frac{\sigma_{\theta,Ed,3}}{\sigma_{\theta,Rd,3}} = \frac{0,41 \frac{kN}{cm^2}}{0,44 \frac{kN}{cm^2}} = 0,93,$$
$$\frac{\sigma_{\theta,Ed,4}}{\sigma_{\theta,Rd,4}} = \frac{0,33 \frac{kN}{cm^2}}{0,35 \frac{kN}{cm^2}} = 0,94.$$

V tretjem območju napetosti sicer niso prekoračen, bi pa te bile, ko bi kombinirali vertikalne in obodne napetosti. Izkoriščenost v obodni smeri je enaka, v vertikalni smeri pa bi se še povečala, tako da interakcija ne bi bila zadoščena.

5.3.3.3.4 Komentar

Kot vidimo pride do prekoračitve napetosti v vseh treh območjih. To pomeni, da tudi z različno postavitvijo ojačitev ne bi dosegli zadostne uklonske odpornosti rezervoarja. Z drugačno pozicijo ojačitve bi sicer eno območje skrajšali a s tem drugo povečali, in mu s tem še poslabšali uklonsko odpornost. Izkoriščenosti so približno enake, zato lahko sklepamo, da je postavitev ojačitev po Ameriškem in Evropskem standardu prava.

Kot naslednji ukrep uvedemo novo ojačitev.

5.3.3.4 3 ojačitve

Za pomoč pri poziciji ojačitev se poslužimo postopka, ki je podan v Ameriškem API oziroma Evropskem EN14015 standardu. Po slednjih je nadomestni rezervoar imel višino $H_E = 5,53\text{m}$. Če slednjo razdelimo na 4 enake dele dobimo enakomerno razdaljo med ojačitvami v velikosti $H_{oj} = 1,38\text{m}$. Pozicije ojačitev na nadomestnem rezervoarju so tako:

$$H_{oj,1} = 1,38m,$$

$$H_{oj,2} = 2,76m,$$

$$H_{oj,3} = 4,15m.$$

Prvi dve ojačitvi ležita na segmentu z najmanjšo debelino, tako da korekcija pozicije ni potrebno. Je pa ta potrebna pri tretji ojačitvi, saj je postavljena v tretjem segmentu, debeline 6,9mm. Če od pozicije ojačitve odštejemo velikosti prvih dveh segmentov dobimo razdaljo, ki leži v tretjem segmentu in jo je potrebno korigirati:

$$4,15m - 1,93m - 1,78m = 0,44m.$$

Korekcijo izvedemo z obrnjeno enačbo, ki smo jo pred tem uporabili za pretvorbo na nadomestne segmente:

$$h_3 = 0,44m \times \left(\frac{6,9mm}{5,5mm} \right)^{2,5},$$

$$h_3 = 0,78m.$$

$$H_{OJ,3} = h_1 + h_2 + h_3,$$

$$H_{OJ,3} = 1,93m + 1,78m + 0,78m, ,$$

$$H_{OJ,3} = 4,49m.$$

Pozicije ojačitev na dejanskem rezervoarju so tako:

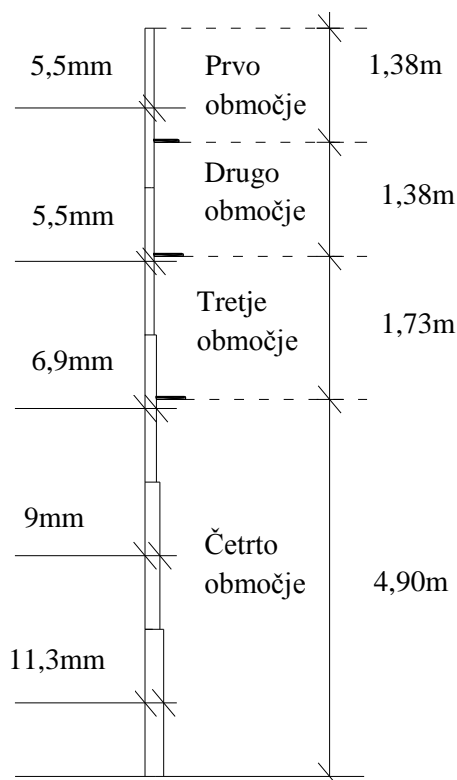
$$H_{OJ,1} = 1,38m,$$

$$H_{OJ,2} = 2,76m,$$

$$H_{OJ,3} = 4,49m.$$

Nobena od ojačitev ne leži v območju 150mm okoli horizontalnih spojev.

Rezervoar imamo sedaj razdeljen na štiri dele (slika 5.11). Predpostavimo, da so ojačitve toge, zato vsako del obravnavamo posebej kot samostojen rezervoar.



Slika 5.11: Shema treh ojačitev po priporočilih ECCS

5.3.3.4.1 Prvo območje

Prvo območje je del rezervoarja od zgornjega roba pa do prve ojačitve. Dimenzije so v preglednici 5.12.

Preglednica 5.12: Dimenzije območja nad prvo ojačitvijo

| i | [mm] | [mm] |
|----|------|------|
| 1. | 1380 | 5,5 |

Debelina se tekom območja ne spreminja, zato ga preverimo z enačbami za rezervoar konstantne debeline.

5.3.3.4.1.1 Uklon v obodni smeri

Območje spada po velikosti med kratke, saj je manjše od tistega pri dveh ojačitvah:

$$\omega = \frac{1380}{\sqrt{19500 \times 5,5}},$$
$$\omega = 4,21,$$

$$C_{\theta_s} = 1,0 + \frac{3}{\omega^{1,35}} = 1,0 + \frac{3}{4,21^{1,35}} = 1,43.$$

Kritična uklonska obodna napetost je:

$$\sigma_{\theta,Rcr} = 0,92 \times 21000 \frac{kN}{cm^2} \times \frac{1,43}{4,21} \times \frac{0,55cm}{1950cm},$$

$$\sigma_{\theta,Rcr} = 1,85 \frac{kN}{cm^2}.$$

Vitkost segmenta je:

$$\lambda_{\theta} = \sqrt{\frac{24 \frac{kN}{cm^2}}{1,85 \frac{kN}{cm^2}}},$$

$$\lambda_{\theta} = 3,60.$$

Še vedno smo v območju elastičnega uklona, faktor redukcije je tako:

$$\chi_{\theta} = \frac{\alpha_{\theta}}{\lambda_{\theta}^2} = \frac{0,65}{3,60^2} = 0,050.$$

Reducirana nosilnost je:

$$\sigma_{\theta,Rd} = \frac{0,05 \times 24 \frac{kN}{cm^2}}{1,15},$$

$$\sigma_{\theta,Rd} = 1,05 \frac{kN}{cm^2}.$$

Izkoriščenost se je pričakovano zmanjšala:

$$\frac{\sigma_{\theta,Ed}}{\sigma_{\theta,Rd}} = \frac{0,68 \frac{kN}{cm^2}}{1,05 \frac{kN}{cm^2}} = 0,65.$$

5.3.3.4.1.2 Uklon v vertikalni smeri

Ker območje še vedno spada med srednje veliko, tudi faktor C_x ostaja enak in ker se debelina ni spremenila, tudi kritična vertikalna uklonska napetost ostaja nespremenjena:

$$\sigma_{x,Rcr} = 3,58 \frac{kN}{cm^2}.$$

Prav tako se ni spremenila vitkost segmenta in s tem redukcijski faktor χ_x , kot tudi ne uklonska odpornost na uklon v vertikalni smeri:

$$\sigma_{x,Rd} = 0,50 \frac{kN}{cm^2}.$$

5.3.3.4.1.3 Račun napetosti

Vertikalna napetost, kot posledica lastne teže se je zmanjšala:

$$\sigma_{t,k} = 78 \times 10^{-6} \frac{kN}{cm^3} \times 138cm,$$
$$\sigma_{t,k} = 0,011 \frac{kN}{cm^2}.$$

Projektna napetost je tako:

$$\sigma_{x,Ed} = 1,35 \times 0,011 \frac{kN}{cm^2} + 1,35 \times 0,042 \frac{kN}{cm^2},$$
$$\sigma_{x,Ed} = 0,072 \frac{kN}{cm^2}.$$

Izkoriščenost v vertikalni smeri je:

$$\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}} = \frac{0,072 \frac{kN}{cm^2}}{0,50 \frac{kN}{cm^2}} = 0,14.$$

5.3.3.4.1.4 Interakcija

Ko opravimo interakcijo med napetostma dobimo:

$$k_x = 1,25 + 0,75 \chi_x = 1,25 + 0,75 \times 0,024 = 1,27,$$
$$k_\theta = 1,25 + 0,75 \chi_\theta = 1,25 + 0,75 \times 0,050 = 1,29,$$
$$k_i = (\chi_x \chi_\theta)^2 = (0,024 \times 0,050)^2 \approx 0.$$

$$\left(\frac{0,072}{0,50} \right)^{1,27} - 0 \times \left(\frac{0,072}{0,50} \right) \left(\frac{0,68}{1,05} \right) + \left(\frac{0,68}{1,05} \right)^{1,28} \leq 1,0,$$
$$0,66 \leq 1,0.$$

Napetostna kontrola se izide, območje je uklonsko odporno.

5.3.3.4.2 Drugo območje

Drugo območje predstavlja prostor med prvo in drugo ojačitvijo. Območje je velikosti 1,38m. Razteza se preko prvih dveh segmentov in je konstantne debeline 5,5mm (preglednica 5.13).

Preglednica 5.13: Dimenzije območja med prvo in drugo ojačitvijo

| i | višina [mm] | debelina [mm] |
|----|-------------|---------------|
| 1. | 550 | 5,5 |
| 2. | 830 | 5,5 |
| Σ | 1380 | 5,5 |

Prvo in drugo območje sta glede na uklonsko odpornost popolnoma enaka, saj sta enake velikosti in enake debeline. Spremeni se le izkoriščenost, saj se poveča vertikalna napetost na račun lastne teže stene rezervoarja.

5.3.3.4.2.1 Račun napetosti

$$\sigma_{t,k} = 78 \times 10^{-6} \frac{kN}{cm^3} \times 276 cm,$$

$$\sigma_{t,k} = 0,022 \frac{kN}{cm^2}.$$

Projektna napetost je zato:

$$\sigma_{x,Ed} = 1,35 \times 0,022 \frac{kN}{cm^2} + 1,35 \times 0,042 \frac{kN}{cm^2},$$

$$\sigma_{x,Ed} = 0,086 \frac{kN}{cm^2}.$$

Izkoriščenost v vertikalni smeri se tako poveča:

$$\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}} = \frac{0,086 \frac{kN}{cm^2}}{0,50 \frac{kN}{cm^2}} = 0,17.$$

5.3.3.4.2.2 Interakcija

Z interakcijo dobimo malenkost večje rezultate, ko v prvem območju:

$$\left(\frac{0,086}{0,50}\right)^{1,27} - 0 \times \left(\frac{0,086}{0,50}\right) \left(\frac{0,68}{1,05}\right) + \left(\frac{0,68}{1,05}\right)^{1,28} \leq 1,0,$$
$$0,68 \leq 1,0.$$

Tudi drugo območje zadošča stabilnostnim kontrolam Evropskega priporočila ECCS.

5.3.3.4.3 Tretje območje

Tretje območje se razteza med drugo in tretjo ojačitvijo, gledano iz vrha navzdol. Je velikosti 1,73m in spremenljive debeline. Dimenzije segmentov so v preglednici 5.14.

Preglednica 5.14: Dimenzije območja med drugo in tretjo ojačitvijo

| i | [mm] | [mm] |
|----------|-------------|-------------|
| 1. | 950 | 5,5 |
| 2. | 780 | 6,9 |

5.3.3.4.3.1 Uklon v obodni smeri

Ker imamo samo dve različni debelini, rezervoar prevedemo najprej na nadomestni rezervoar iz treh segmentov a le dveh debelin. Predpostavimo, da imata segment *a* in *b* enako debelino in velikost. Postopek je nato enak postopku za tri različne debeline.

Velikost prvega nadomestnega segmenta l_a sega do polovice celotne višine in znaša:

$$\rightarrow l_a = l_b = l_1 / 2 = 0,475m.$$

Tretji segment ostane enake velikosti:

$$l_c = 0,78m.$$

V naslednjem koraku določimo debelino posameznega segmenta:

$$t_a = t_b = 5,5mm,$$

$$t_c = 6,9mm.$$

Sodelujočo višino določimo s pomočjo faktorja κ , ki ga določimo glede na razmerje debelin nadomestnih segmentov:

$$l_a / L = 0,475m / 1,73m = 0,27,$$

$$t_c / t_a = 6,9mm / 5,5mm = 1,25,$$

$$t_b / t_a = 5,5mm / 5,5mm = 1,0,$$

→ $\kappa = 0,35$.

$$l_{eff} = 0,475m / 0,35,$$

$$l_{eff} = 1,36m.$$

Brezdimenzijski faktor velikosti znaša:

$$\omega_{eff} = \frac{1360mm}{\sqrt{19500mm \times 5,5mm}},$$

$$\omega_{eff} = 4,15,$$

$$C_{\theta_s} = 1,0 + \frac{3}{\omega^{1,35}} = 1,0 + \frac{3}{4,15^{1,35}} = 1,44.$$

Kritična uklonska napetost nadomestnega rezervoarja pa:

$$\sigma_{\theta Rcr,eff} = 0,92 \times 21000 \frac{kN}{cm^2} \times \frac{1,44}{4,15} \frac{5,5mm}{19500mm},$$

$$\sigma_{\theta Rcr,eff} = 1,89 \frac{kN}{cm^2}.$$

Sedaj lahko izračunamo kritične uklonske napetosti dejanskih segmentov:

$$\sigma_{\theta Rcr,1} = \left(\frac{5,5mm}{5,5mm} \right) \times 1,89 \frac{kN}{cm^2} = 1,89 \frac{kN}{cm^2},$$

$$\sigma_{\theta Rcr,2} = \left(\frac{5,5mm}{6,9mm} \right) \times 1,89 \frac{kN}{cm^2} = 1,51 \frac{kN}{cm^2}.$$

Vitkost segmentov je:

$$\lambda_{\theta,1} = \sqrt{\frac{24 \frac{kN}{cm^2}}{1,89 \frac{kN}{cm^2}}} = 3,56,$$

$$\lambda_{\theta,2} = \sqrt{\frac{24 \frac{kN}{cm^2}}{1,51 \frac{kN}{cm^2}}} = 3,99.$$

Redukcijski faktor uklona:

$$\chi_1 = \frac{0,65}{3,56^2} = 0,051,$$

$$\chi_2 = \frac{0,65}{3,99^2} = 0,041.$$

In odpornost na uklon v obodni smeri je:

$$\sigma_{\theta Rd,1} = \frac{0,051 \times 24 \frac{kN}{cm^2}}{1,15} = 1,06 \frac{kN}{cm^2},$$

$$\sigma_{\theta Rd,2} = \frac{0,041 \times 24 \frac{kN}{cm^2}}{1,15} = 0,85 \frac{kN}{cm^2}.$$

Nosilnost je večja od napetosti v steni rezervoarja. Izkoriščenost je:

$$\frac{\sigma_{\theta,Ed,1}}{\sigma_{\theta,Rd,1}} = \frac{0,68 \frac{kN}{cm^2}}{1,06 \frac{kN}{cm^2}} = 0,64,$$

$$\frac{\sigma_{\theta,Ed,2}}{\sigma_{\theta,Rd,2}} = \frac{0,54 \frac{kN}{cm^2}}{0,85 \frac{kN}{cm^2}} = 0,64.$$

5.3.3.4.3.2 Uklon v vertikalni smeri

Za višino posameznega segmenta predpostavimo kar višino celotnega območja (preglednica 5.15).

Preglednica 5.15: Dimenzije tretjega območja za račun uklona v vertikalni smeri

| i | višina [mm] | debelina [mm] |
|----|-------------|---------------|
| 1. | 1730 | 5,5 |
| 2. | 1730 | 6,9 |

Brezdimenzijski faktor znaša:

$$\omega_1 = \frac{1730mm}{\sqrt{19500mm \times 5,5mm}} = 5,28,$$

$$\omega_2 = \frac{1730mm}{\sqrt{19500mm \times 6,9mm}} = 4,72.$$

Faktor velikosti vpliva znaša $C_x=1,0$. Kritična uklonska napetost je tako:

$$\sigma_{x,Rcr,1} = 0,605 \times 21000 \frac{kN}{cm^2} \times 1,0 \times \frac{5,5mm}{19500mm} = 3,58 \frac{kN}{cm^2},$$

$$\sigma_{x,Rcr,2} = 0,605 \times 21000 \frac{kN}{cm^2} \times 1,0 \times \frac{6,9mm}{19500mm} = 4,50 \frac{kN}{cm^2}.$$

Ostali potrebni faktorji so:

$$\lambda_{0,x} = 0,2,$$

$$\beta_x = 0,60,$$

$$\eta_x = 1,00,$$

$$\alpha_{x,1} = \frac{0,62}{1 + 1,91 \left(\frac{1}{25} \sqrt{\frac{19500mm}{5,5mm}} \right)^{1,44}} = 0,08,$$

$$\alpha_{x,2} = \frac{0,62}{1 + 1,91 \left(\frac{1}{25} \sqrt{\frac{19500mm}{6,9mm}} \right)^{1,44}} = 0,09,$$

$$\lambda_{p,x,1} = \sqrt{\frac{0,08}{1 - 0,60}} = 0,45,$$

$$\lambda_{p,x,2} = \sqrt{\frac{0,09}{1 - 0,60}} = 0,47.$$

Vsi segmenti so vitki, zato pride do elastičnega uklona:

$$\lambda_{x,1} = \sqrt{\frac{24 \frac{kN}{cm^2}}{3,58 \frac{kN}{cm^2}}} = 2,59,$$

$$\lambda_{x,2} = \sqrt{\frac{24 \frac{kN}{cm^2}}{4,5 \frac{kN}{cm^2}}} = 2,31.$$

Redukcijski faktor uklona znaša:

$$\chi_{x,1} = \frac{0,08}{2,59^2} = 0,012,$$

$$\chi_{x,2} = \frac{0,09}{2,31^2} = 0,017,$$

in uklonska odpornost:

$$\sigma_{x,Rd,1} = 0,012 \times \frac{24 \frac{kN}{cm^2}}{1,15} = 0,25 \frac{kN}{cm^2},$$
$$\sigma_{x,Rd,2} = 0,017 \times \frac{24 \frac{kN}{cm^2}}{1,15} = 0,35 \frac{kN}{cm^2}.$$

5.3.3.4.3.3 Račun napetosti

Odpornost mora biti večja od vertikalnih napetosti na dnu posameznega segmenta:

$$\sigma_{t,k,i} = \rho \times h_i,$$
$$\sigma_{t,k,1} = 78 \times 10^{-6} \frac{kN}{cm^3} \times 373 cm = 0,029 \frac{kN}{cm^2},$$
$$\sigma_{t,k,2} = 78 \times 10^{-6} \frac{kN}{cm^3} \times 468 cm = 0,037 \frac{kN}{cm^2}.$$

$$\sigma_{r,k,i} = \frac{G_{r,k}}{t_i},$$
$$\sigma_{r,k,1} = \frac{2,3 \times 10^{-2} \times \frac{kN}{cm}}{0,55 cm} = 0,041 \frac{kN}{cm},$$
$$\sigma_{r,k,2} = \frac{2,3 \times 10^{-2} \times \frac{kN}{cm}}{0,69 cm} = 0,033 \frac{kN}{cm}.$$

$$\sigma_{x,Ed,1} = 1,35 \times 0,029 \frac{kN}{cm^2} + 1,35 \times 0,041 \frac{kN}{cm^2} = 0,095 \frac{kN}{cm^2},$$
$$\sigma_{x,Ed,2} = 1,35 \times 0,037 \frac{kN}{cm^2} + 1,35 \times 0,033 \frac{kN}{cm^2} = 0,095 \frac{kN}{cm^2}.$$

Vse napetosti so veliko manjše od odpornosti posameznega segmenta.

Izkoriščenost je:

$$\frac{\sigma_{x,Ed,1}}{\sigma_{x,Rd,1}} = \frac{0,095 \frac{kN}{cm^2}}{0,25 \frac{kN}{cm^2}} = 0,38,$$

$$\frac{\sigma_{x,Ed,2}}{\sigma_{x,Rd,2}} = \frac{0,095 \frac{kN}{cm^2}}{0,35 \frac{kN}{cm^2}} = 0,27.$$

5.3.3.4.3.4 Interakcija

Interakcija napetosti se izide.

$$\left(\frac{0,095}{0,25}\right)^{1,27} - 0 \times \left(\frac{0,095}{0,25}\right) \left(\frac{0,68}{1,06}\right) + \left(\frac{0,68}{1,06}\right)^{1,27} \leq 1,0,$$

$$0,86 \leq 1,0.$$

$$\left(\frac{0,095}{0,35}\right)^{1,27} - 0 \times \left(\frac{0,095}{0,35}\right) \left(\frac{0,54}{0,85}\right) + \left(\frac{0,54}{0,85}\right)^{1,27} \leq 1,0,$$

$$0,75 \leq 1,0.$$

5.3.3.4.4 Četrto območje

Četrto območje predstavlja predel rezervoarja pod tretjo ojačitvijo. Je velikosti 4560mm in spremenljive debeline. Dimenzije so predstavljene v preglednici 5.17.

Preglednica 5.16: Dimenzije območja pod tretjo ojačitvijo

| i | [mm] | [mm] |
|----|------|------|
| 1. | 1000 | 6,9 |
| 2. | 1780 | 9 |
| 3. | 1780 | 11,3 |

5.3.3.4.4.1 Uklon v obodni smeri

Prvi segment nadomestnega rezervoarja sega do polovice celotnega območja. Ostala dva nadomestna segmenta sta enake velikosti:

$$l_a = h / 2 = 2,280m,$$

$$l_b = l_c = 0,5 \times (4560m - 2280m),$$

$$l_b = l_c = 1,14m.$$

Debeline nadomestnih segmentov so naslednje:

$$t_a = \frac{1}{2,28m} \times (1m \cdot 6,9mm + 1,28m \cdot 9mm),$$

$$t_a = 8,08mm.$$

$$t_b = \frac{1}{1,14m} \times (0,5m \cdot 9mm + 0,64m \cdot 11,3mm),$$

$$t_b = 10,3mm.$$

$$t_c = \frac{1}{1,14m} \times (1,14m \cdot 11,3mm),$$

$$t_c = 11,3mm.$$

Nato izračunamo razmerja potrebna za določitev κ :

$$l_a / L = 2,280m / 4,560m = 0,5,$$

$$t_c / t_a = 11,3mm / 8,08mm = 1,40,$$

$$t_b / t_a = 10,3mm / 8,08mm = 1,27.$$

$$\rightarrow \kappa = 0,70$$

Nadomesten rezervoar je debeline 8,08mm in velikosti:

$$l_{eff} = 2,28m / 0,70,$$

$$l_{eff} = 3,26m.$$

Segment je po velikosti kratek:

$$\omega_{eff} = \frac{2280mm}{\sqrt{19500mm \times 8,08mm}},$$

$$\omega_{eff} = 5,74.$$

Kritična uklonska napetost nadomestnega rezervoarja je tako:

$$\sigma_{\theta Rcr,eff} = 0,92 \times 21000 \frac{kN}{cm^2} \times \frac{1,0}{5,74} \frac{8,08mm}{19500mm},$$

$$\sigma_{\theta Rcr,eff} = 1,39 \frac{kN}{cm^2}.$$

Kritične uklonske napetosti posameznih segmentov so:

$$\sigma_{\theta Rcr,1} = \left(\frac{8,08mm}{6,9mm} \right) \times 1,39 \frac{kN}{cm^2} = 1,63 \frac{kN}{cm^2},$$

$$\sigma_{\theta Rcr,2} = \left(\frac{8,08mm}{9mm} \right) \times 1,39 \frac{kN}{cm^2} = 1,25 \frac{kN}{cm^2},$$

$$\sigma_{\theta Rcr,3} = \left(\frac{8,08mm}{11,3mm} \right) \times 1,39 \frac{kN}{cm^2} = 0,99 \frac{kN}{cm^2}.$$

Z znano uklonsko kritično napetostjo izračunamo vitkosti:

$$\lambda_{\theta,1} = \sqrt{\frac{24 \frac{kN}{cm^2}}{1,63 \frac{kN}{cm^2}}} = 3,84,$$

$$\lambda_{\theta,2} = \sqrt{\frac{24 \frac{kN}{cm^2}}{1,25 \frac{kN}{cm^2}}} = 4,38,$$

$$\lambda_{\theta,3} = \sqrt{\frac{24 \frac{kN}{cm^2}}{0,99 \frac{kN}{cm^2}}} = 4,92.$$

V vseh segmentih pride do elastičnega uklona, zato redukcijski faktor določimo na naslednji način:

$$\chi_1 = \frac{0,65}{3,84^2} = 0,044,$$

$$\chi_2 = \frac{0,65}{4,38^2} = 0,034,$$

$$\chi_3 = \frac{0,65}{4,92^2} = 0,027.$$

Odpornost na uklon v obodni smeri je tako:

$$\sigma_{\theta Rd,1} = \frac{0,044 \times 24 \frac{kN}{cm^2}}{1,15} = 0,92 \frac{kN}{cm^2},$$

$$\sigma_{\theta Rd,2} = \frac{0,034 \times 24 \frac{kN}{cm^2}}{1,15} = 0,71 \frac{kN}{cm^2},$$

$$\sigma_{\theta Rd,3} = \frac{0,027 \times 24 \frac{kN}{cm^2}}{1,15} = 0,56 \frac{kN}{cm^2}.$$

Izkoriščenost v posameznih segmentih je naslednja:

$$\frac{\sigma_{\theta,Ed,1}}{\sigma_{\theta,Rd,1}} = \frac{0,54 \frac{kN}{cm^2}}{0,92 \frac{kN}{cm^2}} = 0,59,$$

$$\frac{\sigma_{\theta,Ed,2}}{\sigma_{\theta,Rd,2}} = \frac{0,41 \frac{kN}{cm^2}}{0,71 \frac{kN}{cm^2}} = 0,58,$$

$$\frac{\sigma_{\theta,Ed,3}}{\sigma_{\theta,Rd,3}} = \frac{0,33 \frac{kN}{cm^2}}{0,56 \frac{kN}{cm^2}} = 0,59.$$

Vsi segmenti zadostijo napetostni kontroli.

5.3.3.4.2 Uklon v vertikalni smeri

Območje pod ojačitvijo je potrebno preveriti tudi na uklon v vertikalni smeri. Postopek za rezervoarje s spremenljivo debelino je tak, da za vsak segment predpostavimo višino enako celotni višini. Debelina segmenta ostane nespremenjena. Podatki so v preglednici 5.18.

Preglednica 5.17: Dimenzije za kontrolo vertikalnega uklona

| i | višina [mm] | debelina [mm] |
|----|-------------|---------------|
| 1. | 4560 | 6,9 |
| 2. | 4560 | 9 |
| 3. | 4560 | 11,3 |

Brezdimenzijski faktor za vsak segment posebej znaša:

$$\omega_1 = \frac{4560mm}{\sqrt{19500mm \times 6,9mm}} = 12,43,$$

$$\omega_2 = \frac{4560mm}{\sqrt{19500mm \times 9mm}} = 10,88,$$

$$\omega_3 = \frac{4560mm}{\sqrt{19500mm \times 11,3mm}} = 9,71.$$

Vse segmenti spadajo po velikosti med srednje dolge. Faktor, ki zajema vpliv velikosti je zato $C_x = 1,0$.

Vrednost kritične uklonske napetosti je:

$$\begin{aligned}\sigma_{x,Rcr,1} &= 0,605 \times 21000 \frac{kN}{cm^2} \times 1,0 \times \frac{6,9mm}{19500mm} = 4,50 \frac{kN}{cm^2}, \\ \sigma_{x,Rcr,2} &= 0,605 \times 21000 \frac{kN}{cm^2} \times 1,0 \times \frac{9mm}{19500mm} = 5,86 \frac{kN}{cm^2}, \\ \sigma_{x,Rcr,3} &= 0,605 \times 21000 \frac{kN}{cm^2} \times 1,0 \times \frac{11,3mm}{19500mm} = 7,36 \frac{kN}{cm^2}.\end{aligned}$$

Ostali faktorji, potrebni za račun redukcijskega faktorja so:

$$\lambda_{0,x} = 0,2,$$

$$\beta_x = 0,60,$$

$$\eta_x = 1,00,$$

$$\begin{aligned}\alpha_{x,1} &= \frac{0,62}{1 + 1,91 \left(\frac{1}{25} \sqrt{\frac{19500mm}{6,9mm}} \right)^{1,44}} = 0,09, \\ \alpha_{x,2} &= \frac{0,62}{1 + 1,91 \left(\frac{1}{25} \sqrt{\frac{19500mm}{9mm}} \right)^{1,44}} = 0,109, \\ \alpha_{x,3} &= \frac{0,62}{1 + 1,91 \left(\frac{1}{25} \sqrt{\frac{19500mm}{11,3mm}} \right)^{1,44}} = 0,125.\end{aligned}$$

Ker imajo segmenti različne debeline, je zato tudi elastični redukcijski faktor nepopolnosti različen in posledično mejna vitkost elastičnega uklona:

$$\lambda_{p,x,1} = \sqrt{\frac{0,09}{1 - 0,60}} = 0,47,$$

$$\lambda_{p,x,2} = \sqrt{\frac{0,109}{1 - 0,60}} = 0,52,$$

$$\lambda_{p,x,3} = \sqrt{\frac{0,125}{1 - 0,60}} = 0,56.$$

Kar pa nima vpliva, saj so vsi segmenti vitki, torej pride do elastičnega uklona:

$$\lambda_{x,1} = \sqrt{\frac{24 \frac{kN}{cm^2}}{4,5 \frac{kN}{cm^2}}} = 2,31,$$
$$\lambda_{x,2} = \sqrt{\frac{24 \frac{kN}{cm^2}}{5,86 \frac{kN}{cm^2}}} = 2,02,$$
$$\lambda_{x,3} = \sqrt{\frac{24 \frac{kN}{cm^2}}{7,36 \frac{kN}{cm^2}}} = 1,81.$$

Redukcijski faktorji uklona posameznega segmenta so tako:

$$\chi_{x,1} = \frac{0,09}{2,31^2} = 0,017,$$
$$\chi_{x,2} = \frac{0,109}{2,02^2} = 0,027,$$
$$\chi_{x,3} = \frac{0,125}{1,81^2} = 0,034,$$

in uklonska odpornost:

$$\sigma_{x,Rd,1} = 0,017 \times \frac{24 \frac{kN}{cm^2}}{1,15} = 0,35 \frac{kN}{cm^2},$$
$$\sigma_{x,Rd,2} = 0,027 \times \frac{24 \frac{kN}{cm^2}}{1,15} = 0,56 \frac{kN}{cm^2},$$
$$\sigma_{x,Rd,3} = 0,034 \times \frac{24 \frac{kN}{cm^2}}{1,15} = 0,71 \frac{kN}{cm^2}.$$

5.3.3.4.4.3 Račun napetosti

Odpornost mora biti večja od vertikalnih napetosti, ki se pojavijo na dnu posameznega segmenta. Teža stene rezervoarja se z višino povečuje:

$$\sigma_{t,k,i} = \rho \times h_i,$$

$$\sigma_{t,k,1} = 78 \times 10^{-6} \frac{kN}{cm^3} \times 449 cm = 0,035 \frac{kN}{cm^2},$$

$$\sigma_{t,k,2} = 78 \times 10^{-6} \frac{kN}{cm^3} \times 727 cm = 0,057 \frac{kN}{cm^2},$$

$$\sigma_{t,k,3} = 78 \times 10^{-6} \frac{kN}{cm^3} \times 905 cm = 0,071 \frac{kN}{cm^2}.$$

$$\sigma_{r,k,i} = \frac{G_{r,k}}{t_i},$$

$$\sigma_{r,k,1} = \frac{2,3 \times 10^{-2} \times \frac{kN}{cm}}{0,69 cm} = 0,033 \frac{kN}{cm},$$

$$\sigma_{r,k,2} = \frac{2,3 \times 10^{-2} \times \frac{kN}{cm}}{0,9 cm} = 0,026 \frac{kN}{cm},$$

$$\sigma_{r,k,3} = \frac{2,3 \times 10^{-2} \times \frac{kN}{cm}}{1,13 cm} = 0,02 \frac{kN}{cm}.$$

$$\sigma_{x,Ed,1} = 1,35 \times 0,035 \frac{kN}{cm^2} + 1,35 \times 0,033 \frac{kN}{cm^2} = 0,092 \frac{kN}{cm^2},$$

$$\sigma_{x,Ed,2} = 1,35 \times 0,057 \frac{kN}{cm^2} + 1,35 \times 0,026 \frac{kN}{cm^2} = 0,112 \frac{kN}{cm^2},$$

$$\sigma_{x,Ed,3} = 1,35 \times 0,071 \frac{kN}{cm^2} + 1,35 \times 0,02 \frac{kN}{cm^2} = 0,123 \frac{kN}{cm^2}.$$

Vse napetosti so veliko manjše od odpornosti posameznega segmenta. Izkoriščenost je:

$$\frac{\sigma_{x,Ed,1}}{\sigma_{x,Rd,1}} = \frac{0,092 \frac{kN}{cm^2}}{0,35 \frac{kN}{cm^2}} = 0,26,$$

$$\frac{\sigma_{x,Ed,2}}{\sigma_{x,Rd,2}} = \frac{0,112 \frac{kN}{cm^2}}{0,56 \frac{kN}{cm^2}} = 0,2,$$

$$\frac{\sigma_{x,Ed,3}}{\sigma_{x,Rd,3}} = \frac{0,123 \frac{kN}{cm^2}}{0,71 \frac{kN}{cm^2}} = 0,17.$$

V nobenem segmentu ni prekoračena uklonska nosilnost v vertikalni smeri.

5.3.3.4.4 Interakcija

$$k_{x,1} = 1,25 + 0,75\chi_x = 1,25 + 0,75 \times 0,017 = 1,26,$$

$$k_{x,2} = 1,25 + 0,75\chi_x = 1,25 + 0,75 \times 0,027 = 1,27,$$

$$k_{x,3} = 1,25 + 0,75\chi_x = 1,25 + 0,75 \times 0,034 = 1,28,$$

$$k_{\theta,1} = 1,25 + 0,75\chi_{\theta} = 1,25 + 0,75 \times 0,044 = 1,28,$$

$$k_{\theta,2} = 1,25 + 0,75\chi_{\theta} = 1,25 + 0,75 \times 0,034 = 1,28,$$

$$k_{\theta,3} = 1,25 + 0,75\chi_{\theta} = 1,25 + 0,75 \times 0,027 = 1,27,$$

$$1: \left(\frac{0,092}{0,35} \right)^{1,26} - 0 \times \left(\frac{0,092}{0,35} \right) \left(\frac{0,54}{0,92} \right) + \left(\frac{0,54}{0,92} \right)^{1,28} \leq 1,0,$$
$$0,69 \leq 1,0.$$

$$2: \left(\frac{0,112}{0,56} \right)^{1,27} - 0 \times \left(\frac{0,112}{0,56} \right) \left(\frac{0,41}{0,71} \right) + \left(\frac{0,41}{0,71} \right)^{1,28} \leq 1,0,$$
$$0,62 \leq 1,0.$$

$$3: \left(\frac{0,123}{0,71} \right)^{1,28} - 0 \times \left(\frac{0,123}{0,71} \right) \left(\frac{0,33}{0,56} \right) + \left(\frac{0,33}{0,56} \right)^{1,27} \leq 1,0,$$
$$0,62 \leq 1,0.$$

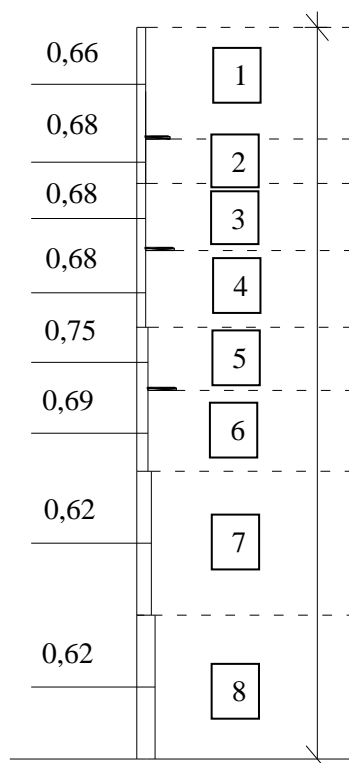
Tudi četrti segment zadosti kontroli napetosti.

5.3.3.5 Komentar

Po Evropskih priporočilih ECCS so potrebne kar tri ojačitve, za zagotovitev zadostne uklonske odpornosti rezervoarja. Izkoriščenost je po območjih skoraj enaka, kar še enkrat potrjuje pravilnost postopka za postavitve ojačitev po EN14015 oziroma API650 standardu. Izkoriščenosti po posameznih delih segmentov so podani v preglednici 5.19, ter predstavljeni tudi na sliki 5.12.

Preglednica 5.18: Izkoriščenost po segmentih rezervoarja

| Območje | Indeks dela | Dejanski segment | Debelina [mm] | Izkoriščenost napetosti |
|---------|-------------|------------------|---------------|-------------------------|
| Prvo | 1 | 1 | 5,5 | 0,66 |
| Drugo | 2 | 1 | 5,5 | 0,68 |
| | 3 | 2 | 5,5 | 0,68 |
| Tretje | 4 | 2 | 5,5 | 0,68 |
| | 5 | 3 | 6,9 | 0,75 |
| Četrto | 6 | 3 | 6,9 | 0,69 |
| | 7 | 4 | 9 | 0,62 |
| | 8 | 5 | 11,3 | 0,62 |



Slika 5.12: Izkoriščenost po območjih po Evropskih priporočilih ECCS

5.3.4 Povzetek in primerjava med standardi

Za trenutno stanje smo dobili zelo različne rezultate. Po Ameriškem standardu potrebujemo eno ojačitev, po Evropskem EN14015 dve, po Evropskih priporočilih ECCS pa kar tri. Zopet po standardu EN14015 potrebujemo eno ojačitev več kot po API650. In spet je število ojačitev potrebnih z API standardom skoraj zagotovilo zahtevam EN14015. Tokrat je bila dolžina neojačene stene rezervoarja za samo 1% daljša od maksimalne dovoljene neojačene dolžine. Z Evropskimi priporočili ECCS smo

zopet dobili najbolj konservativen rezultat. Tako v začetnem kot v trenutnem stanju se je za izbran rezervoar pokazal vzorec, da najmanj ojačitev potrebujemo po API650, najtežje pa zadostimo kontrolam Evropskega priporočila ECCS. Primerjave so podane v preglednici 5.20.

Preglednica 5.19: Primerjava med standardi za trenutno stanje

| Standard | Število ojačitev | Normirana višina |
|-----------------|-------------------------|-------------------------|
| API650 | 0 | 1,46 |
| | 1 | 0,73 |
| EN14015 | 0 | 2,03 |
| | 1 | 1,01 |
| | 2 | 0,53 |

6 NUMERIČNA ANALIZA

Za rezervoar je bila narejena tudi numerična analiza s pomočjo komercialnega programa SIMULIA Abaqus FEA za začetno in trenutno stanje. Metoda služi kot kontrola standardov in dodatna referenca za primerjavo.

Narejena je bila geometrijsko in materialno nelinearna analiza z upoštevanjem nepopolnosti, ali na kratko GMNIA analiza (»Geometrically and Materially Nonlinear analysis with Imperfections included«).

6.1 Model

Rezervoar sem modeliral kot valj s pomočjo lupinastih končnih elementov tipa SHELL.

6.2 Material

- meja plastičnosti $f_{yk} = 24 \text{ kN/cm}^2$
- meja trdnosti $f_{uk} = 36 \text{ kN/cm}^2$
- modul elastičnosti $E = 21000 \text{ kN/cm}^3$
- Poissonov količnik $\nu = 0,3$

6.3 Materialna nelinearnost

Ko v programu podajamo lastnosti materiala, posebej podamo elastični in posebej plastični del nateznega diagrama jekla. Pod funkcijo *ELASTIC podamo elastični modul in Poissonov količnik, plastični del pa zajamemo pod funkcijo *PLASTIC, kjer podamo dejansko zvezo med deformacijami in napetostmi, pri kateri upoštevamo da se pri nateznem preizkusu pri večanju deformacij, prečni prerez manjša.

Zveza, kako iz inženirskih napetosti in deformacij, kjer upoštevamo konstanten prerez pri rezultatih nateznega preizkusa, dobit dejanske vrednosti je naslednja:

$$\sigma_T = \frac{P}{A_0}(1 + \varepsilon) = \sigma(1 + \varepsilon),$$

$$\varepsilon_T = \ln(1 + \varepsilon).$$

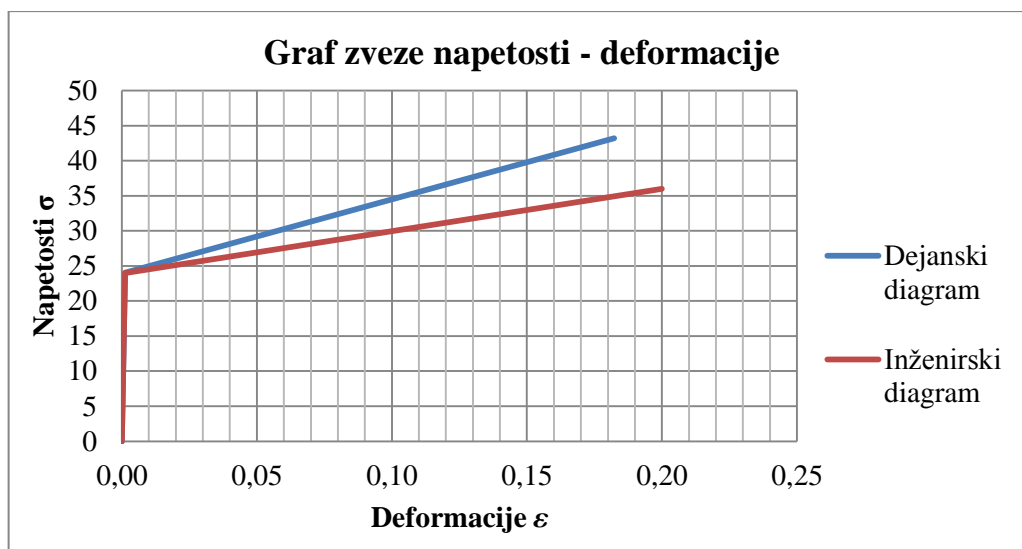
Za vhodne materialne podatke sem upošteval mejo plastičnosti pri deformaciji $\varepsilon_y = 0,11\%$, ki jo izračunamo iz znanega elastičnega modula in napetosti na meji tečenja f_y . Deformacije pri kateri dosežemo natezno trdnost sem predpostavil $\varepsilon_u = 20\%$. Za karakteristično natezno trdnost $f_{uk} = 36 \text{ kN/cm}^2$ sem dobil naslednje vrednosti:

$$\sigma_{y,TRUE} = \sigma_y (1 + \varepsilon_y),$$
$$\sigma_{y,TRUE} = 24 \frac{kN}{cm^2} (1 + 0,0011) = 24,03 \frac{kN}{cm^2}.$$

$$\sigma_{u,TRUE} = \sigma_u (1 + \varepsilon_u),$$
$$\sigma_{u,TRUE} = 36 \frac{kN}{cm^2} (1 + 0,2) = 43,20 \frac{kN}{cm^2}.$$

$$\varepsilon_{y,TRUE} = \ln(1 + \varepsilon_y),$$
$$\varepsilon_{y,TRUE} = \ln(1 + 0,0011) = 0,001,$$
$$\varepsilon_{u,TRUE} = \ln(1 + \varepsilon_u),$$
$$\varepsilon_{u,TRUE} = \ln(1 + 0,2) = 0,18.$$

Primerjava med dejanskim in inženirskim diagramom za izbrano jeklo je prikazana na grafikonu 6.1.



Grafikon 6.1: Primerjava med inženirskim in dejanskim diagramom jekla uporabljenim v Abaqusu

6.4 Geometrijska nelinearnost

Geometrijsko nelinearnost upošteva program sam, z upoštevanje teorije drugega reda, oziroma velikih pomikov.

6.5 Geometrijske nepopolnosti

Podajanje geometrijskih nepopolnosti je bolj zapleteno. Velikost, oblika in pozicija nepopolnosti močno vpliva na stabilnost konstrukcije. Zato je potrebno premisliti, kako jih zajeti. Običajno je najbolj neugoden primer, ko nepopolnosti sovpadajo z lastno izbočitveno obliko rezervoarja. V našem

primeru imamo osno simetrično konstrukcijo in obtežbo, tako da je pričakovati, da bodo tudi izbočitvene oblike osno simetrične.

Da zajamemo najbolj neugoden primer predpostavimo, da imajo nepopolnosti enako obliko kot je izbočitvena oblika rezervoarja. S tem dosežemo, da se začetne nepopolnosti pri nastopu uklona le še povečujejo.

V ta namen je najprej opravljena uklonska LBA (Linear Buckling Analysis) analiza s katero dobimo izbočitvene oblike rezervoarja. Pomike uklonskih oblik zapišemo v izhodno datoteko z ukazom *NODE FILE U . To nato s pomočjo ukaza *IMPERFECTION uvozimo v GMNIA analizo v obliki začetnih nepopolnosti. Amplitudo nepopolnosti določimo v skladu z geometrijskimi tolerancami za izbran razred izdelave rezervoarja:

$$\Delta w_{0,eq} = \max \begin{cases} \Delta w_{0,eq,1} = l_g \times U_{n1} \\ \Delta w_{0,eq,2} = n_i \times t \times U_{n2} \end{cases},$$

kjer velikost l_g določimo v skladu s poglavjem o geometrijskih tolerancah 2.3. Za faktor n_i priporočila priporočajo vrednost $n_i = 25$, parameter t je debelina segmenta. Vrednosti U_{n1} in U_{n2} preberemo iz preglednice 6.1 glede na izbran razred izdelave:

Preglednica 6.1: Priporočene vrednosti parametrov za določitev amplitude nepopolnosti

| Razred izdelave | Opis razreda | Priporočena vrednost | |
|-----------------|--------------|----------------------|----------|
| | | U_{n1} | U_{n2} |
| Razred A | odličen | 0,010 | 0,010 |
| Razred B | visok | 0,016 | 0,016 |
| Razred C | normalen | 0,025 | 0,025 |

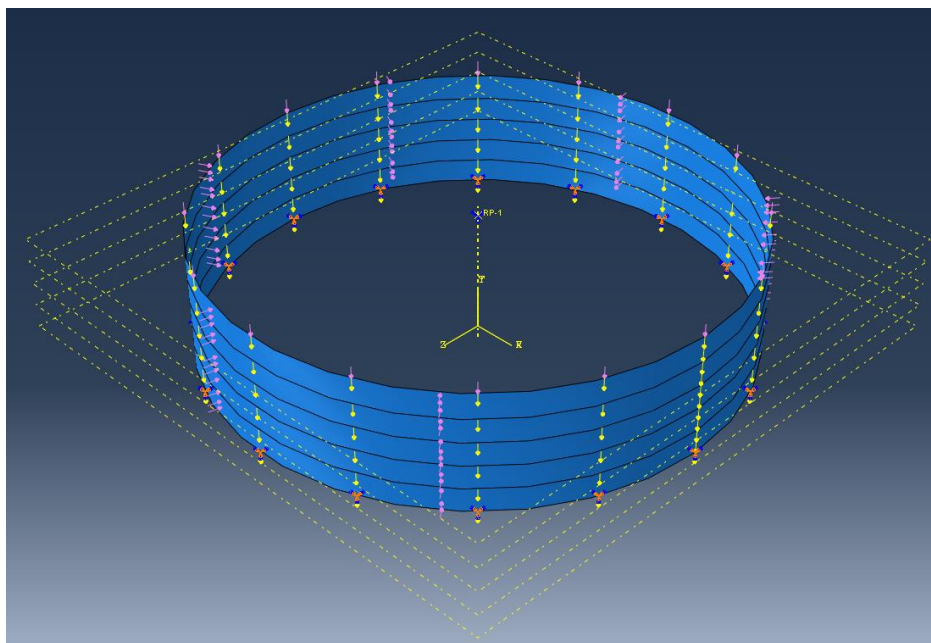
6.6 Robni pogoji

Na spodnjem robu rezervoarja sem predpostavil togo vpetje v temelje. Streho rezervoarja sem s pomočjo funkcije *RIGID BODY definiral kot diafragma, kjer vse točke zgornjega roba rezervoarja posnemajo obnašanje referenčne točke. To dosežemo s tipom povezave »Tie«. Referenčni točki sem omogočil pomike v vse smeri, preprečil pa sem vse rotacije.

6.7 Obtežba

Za stabilnosti rezervoarja je najbolj kritična situacija, ko je ta prazen. Upoštevana je bila lastna teža stene rezervoarja in strehe ter obtežba vetra. Vse tri obtežbe so prikazane na sliki 6.1:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \psi_{1,1} Q_{k,1}$$



Slika 6.1: Obtežba na rezervoarju

Vplivi na rezervoar:

- lastna teža: $G_{t,k} = 78 \text{ kN/m}^3$
- obtežba strehe: $G_{r,k} = 2,3 \text{ kN/m}$
- obtežba vetra: $Q_{w,k} = 0,000191 \text{ kN/cm}^2$

Obtežba vetra je bila izračunan v poglavju 5.2.3.1. Izračun pritiska vetra iz znane hitrosti sunka vetra $v_w = 45 \text{ m/s}$ je izvedena po standardu EN 1991-1-4.

6.8 Analize

Poleg LBA in GMNIA analize je bila izvedena še geometrijsko in materialno nelinearna analiza brez upoštevanja geometrijskih nepopolnosti ali na kratko GMNA analiza. Služi kot kontrola GMNIA analizi in prikazuje vpliv nepopolnosti na končno odpornost rezervoarja. Osnovne predpostavke analiz so podane v preglednici 6.2.

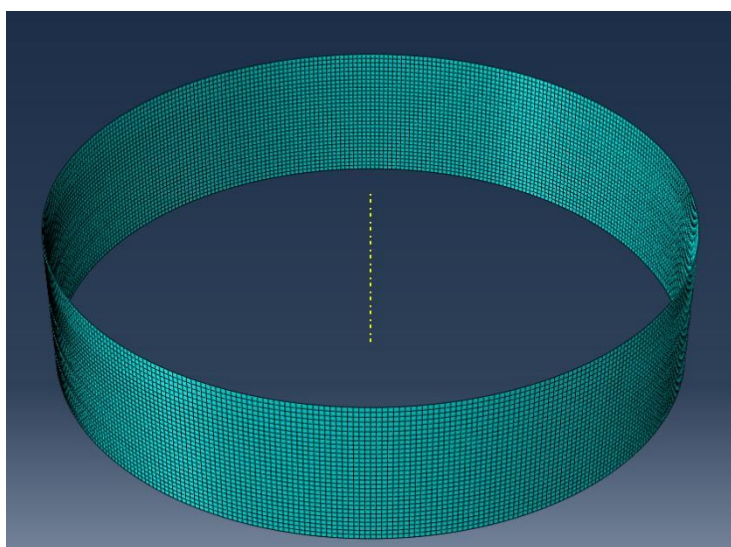
Preglednica 6.2: Predpostavke analiz

| Analiza | Teorija | Materialna zveza | Geometrija |
|---------|------------|------------------|------------|
| LBA | linearna | linearna | popolna |
| GMNA | nelinearna | nelinearna | popolna |
| GMNIA | nelinearna | nelinearna | nepopolna |

6.9 Začetno stanje

6.9.1 LBA analiza

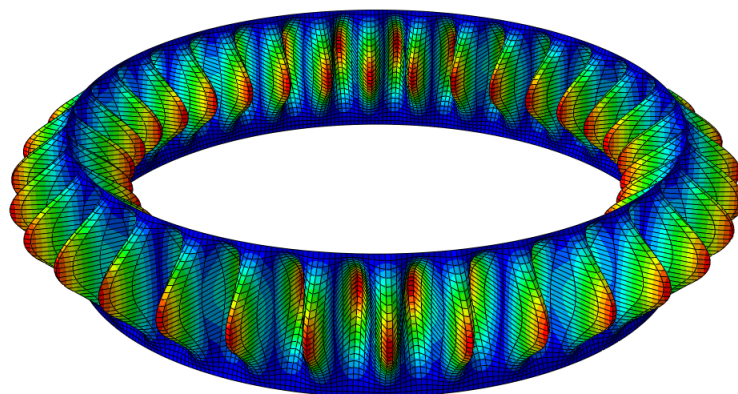
Uklonsko analizo izvedemo za začetno stanje, brez upoštevanja geometrijske in materialne nelinearnosti in brez nepopolnosti. Na sliki 6.2 je prikazan model rezervoarja in mreža končnih elementov.



Slika 6.2: Model rezervoarja

6.9.1.1 Rezultati

Na sliki 6.3 je prikazana prva izbočitvena oblika rezervoarja. Po pričakovanju so uklonske oblike osno simetrične. Prvih deset uklonskih oblik je skoraj enake oblike in velikosti, razlikuje se le mesto izbočitvenih valov, ki se rotirajo tekom oboda rezervoarja.



Slika 6.3: Prva izbočitvena oblika rezervoarja v začetnem stanju

Rezultat LBA analize so lastne vrednosti, ki predstavljajo razmerje med elastično kritično uklonsko napetostjo izbrane uklonske oblike in dejansko napetostjo v rezervoarju, kot posledico obtežbe. Vrednost mora biti večja od ena, saj to pomeni, da so napetosti v rezervoarju manjše od kritičnih. Lastna vrednost prve izbočitvene oblike znaša:

$$\lambda_1 = 1,29.$$

Velikost lastnih vrednosti se z vsako višjo uklonsko obliko večja. Vendar so si vse uklonske oblike, izjemno podobne, zato je tudi lastna vrednost desete izbočitvene oblike praktično enaka prvi:

$$\lambda_{10} = 1,30.$$

Obravnavan rezervoar ima že v začetnem stanju lastne vrednosti, ki so večje od ena. To pomeni, da med delovanjem projektne obtežbe ne pride do idealnega elastičnega uklona.

Dobljene pomike pri prvi uklonski obliki izvozimo in uporabimo za začetne nepopolnosti pri GMNIA analizi.

6.9.2 GMNIA analiza

Obliko začetnih nepopolnosti uvozimo iz uklonske analize. Amplitudo določimo z geometrijskimi tolerancami za izbran razred izdelave. V našem primeru rezervoar spada v B razred izdelave:

$$l_g = 2,3(l^2rt)^{0,25} \leq r,$$

$$l_g = 2,3\left((1780\text{mm})^2 \times 19500\text{mm} \times 7,94\text{mm}\right)^{0,25},$$

$$l_g = 1925\text{mm}.$$

$$\Delta w_{0,eq,1} = 1925\text{mm} \times 0,016,$$

$$\Delta w_{0,eq,1} = 31\text{mm},$$

$$\Delta w_{0,eq,2} = 25 \times 7,94\text{mm} \times 0,016,$$

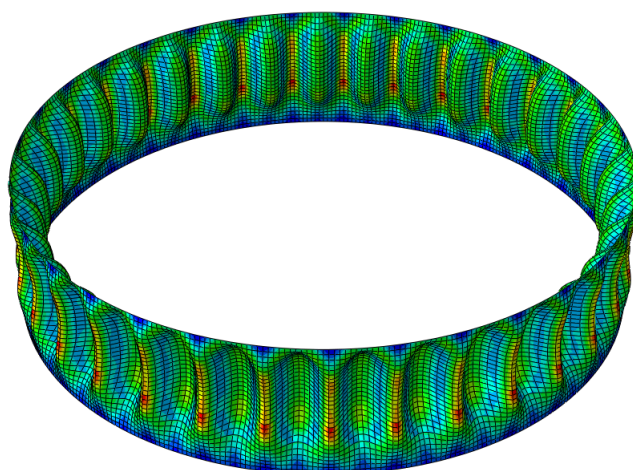
$$\Delta w_{0,eq,2} = 3\text{mm}.$$

$$\Delta w_{0,eq} = \max \begin{cases} \Delta w_{0,eq,1} = 31\text{mm} \\ \Delta w_{0,eq,2} = 3\text{mm} \end{cases},$$

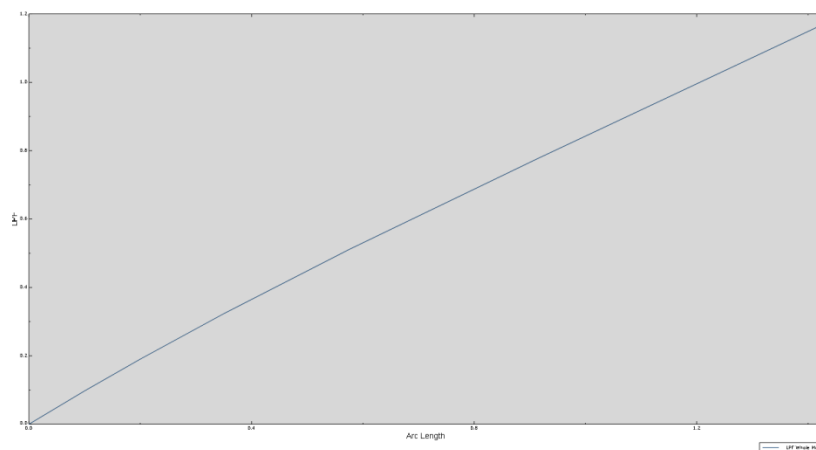
$$\Delta w_{0,eq} = 31\text{mm}.$$

6.9.2.1 Rezultati

Na sliki 6.4 je prikazan potek napetosti na deformirani obliki rezervoarja. Vidimo, da nepopolnosti narekujejo deformacijsko obliko. Maksimalne napetosti po Von Misesu znašajo 8,67 kN/cm². Napetosti so pod mejo tečenja, tako da v rezervoarju ne pride do plastifikacije. Največji pomik znaša 48mm.

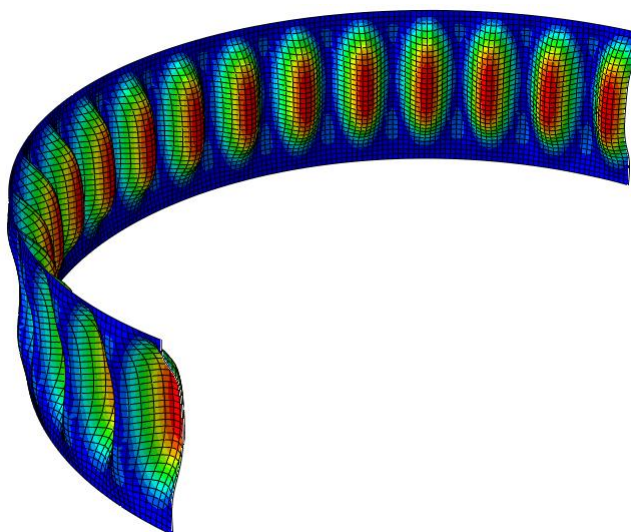


Slika 6.4: Potek napetosti v rezervoarju po GMNIA analizi



Slika 6.5: Graf nanašanja obtežbe na model

Slika 6.5 prikazuje LPF faktor (»Load Proportion Factor«), ki predstavlja delež nanesene obtežbe v odvisnosti od pomikov. Ker smo v elastičnem stanju je graf linearen. Na sliki 6.6 so prikazani pomiki.



Slika 6.6: Deformacijska oblika rezervoarja pri GMNIA analizi

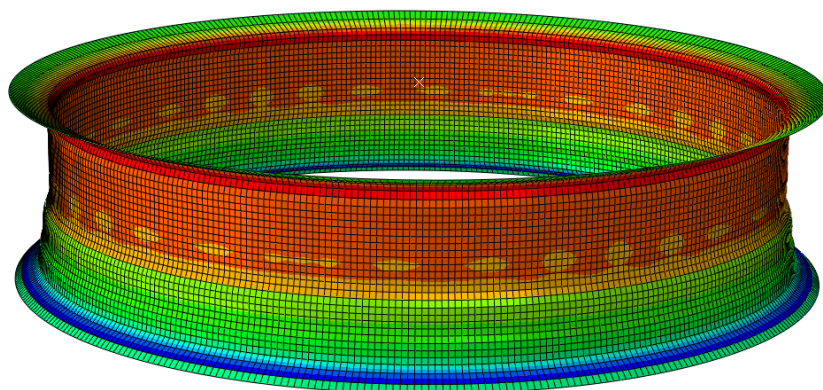
Izkoriščenost kot razmerje med napetostjo po von Misesu v najbolj obremenjeni točki in napetostjo na meji tečenja je enaka:

$$\eta = \frac{\sigma_{vM}}{f_{yk} / \gamma_{M1}} = \frac{8,67 \frac{kN}{cm^2}}{24 \frac{kN}{cm^2} / 1,15} = 0,42.$$

6.9.3 GMNA analiza

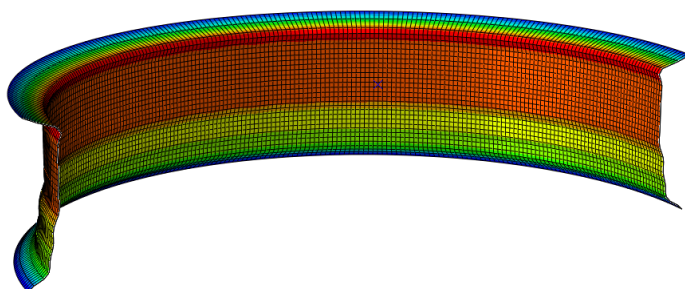
Za kontrolo opravimo še geometrijsko in materialno nelinearno analizo brez upoštevanja nepopolnosti (GMNA), da vidimo kakšen vpliv imajo nepopolnosti.

6.9.3.1 Rezultati



Slika 6.7: Potek napetosti po rezervoarju pri GMNA analiz

Na sliki 6.7 vidimo, da je deformacijska oblika rezervoarja popolnoma drugačna, kot pri upoštevanju nepopolnosti. Vidimo, da nepopolnosti narekujejo deformacijsko obliko pri GMNIA analizi. Kot je razvidno na sliki 6.8 pa tu deformacijsko obliko narekuje konstanten pritisk vetra z zunanje strani. Pomiki so pričakovano manjši, prav tako napetosti. Največje napetosti so v bližini zgornjega roba rezervoarja in znašajo $0,49\text{kN/cm}^2$. Največji pomik je prav tako v bližini zgornjega roba in velikosti $0,67\text{mm}$ (slika 6.9).



Slika 6.8: Deformacijska oblika rezervoarja po GMNA analizi

Za dane rezultate lahko opravimo hitro kontrolo maksimalnih napetosti:

$$\sigma_{Ed} = q_{w,d} \times \frac{r}{t_1},$$

$$\sigma_{Ed} = 0,000191 \frac{kN}{cm^2} \times \frac{1950cm}{0,794cm},$$

$$\sigma_{Ed} = 0,47 \frac{kN}{cm^2}.$$

Razliko lahko pripišemo vplivu robnih pogojev zgornjega roba rezervoarja.



Slika 6.9: Pomik po višini rezervoarja

Rezervoar je v elastičnem stanju, pomiki so majhni, tako da razlike med GMNA analizo in linearno analizo ni. Kot že rečeno pa veliko razliko naredi upoštevanje nepopolnosti.

6.9.4 Primerjava rezultatov in komentar

Numerična analiza je pokazala, da rezervoar v začetnem stanju ne potrebuje ojačitev. S tem se je potrdil izračun po Ameriškem standardu API. Ostala dva standarda Evropski EN14015 in Evropska priporočila ECCS sta bolj konservativna in s tem na varni strani, saj z računom po njih potrebujemo eno ojačitev. Primerjava je predstavljena v preglednici 6.3.

Preglednica 6.3: Primerjava različnih analiz

| Analiza | Število ojačitev | Mesto ojačitve | Izkoriščenost | Normirana višina |
|-------------------|------------------|-------------------------|---------------|------------------|
| API650 | 0 | / | / | 0,75 |
| EN14015 | 1 | H _{oj} = 3,56m | / | 0,53 |
| ECCS 5th Edition | 1 | H _{oj} = 3,56m | 0,91 | / |
| Numerična analiza | 0 | / | 0,42* | / |

*Vrednost predstavlja razmerje med največjo napetostjo v rezervoarju po von Misesovem kriteriju in napetostjo na meji tečenja

6.9.5 Kontrola postavitve ojačitev

Kljub temu, da za rezervoar po numerični analizi ne potrebujemo ojačitve, sem opravil še nekaj analiz, za preveriti točnost postopka postavitve ojačitev po Evropskem standardu EN14015 oziroma Ameriškem API650.

6.9.5.1 Pozicija ojačitev

Glede na Evropski standard EN14015 mora ojačitev imeti minimalen odpornostni moment 53300mm^3 . Izberem ojačitev pravokotnega prečnega prereza, dimenzij $150\text{mm} \times 15\text{mm}$, z odpornostnim momentom 56250mm^3 .

Numerično idealno pozicijo ojačitve določimo s pomočjo uklonske LBA analize. Kot rezultat analize je lastna vrednost, ki predstavlja razmerje med uklonsko kritično napetostjo in napetostmi v rezervoarju kot posledico obtežb. Večja kot je vrednost lambda, bolj je rezervoar odporen na izgubo stabilnosti. Za primerjavo sem ojačitev postavil na tri različna mesta in primerjal izračunane lastne vrednosti.

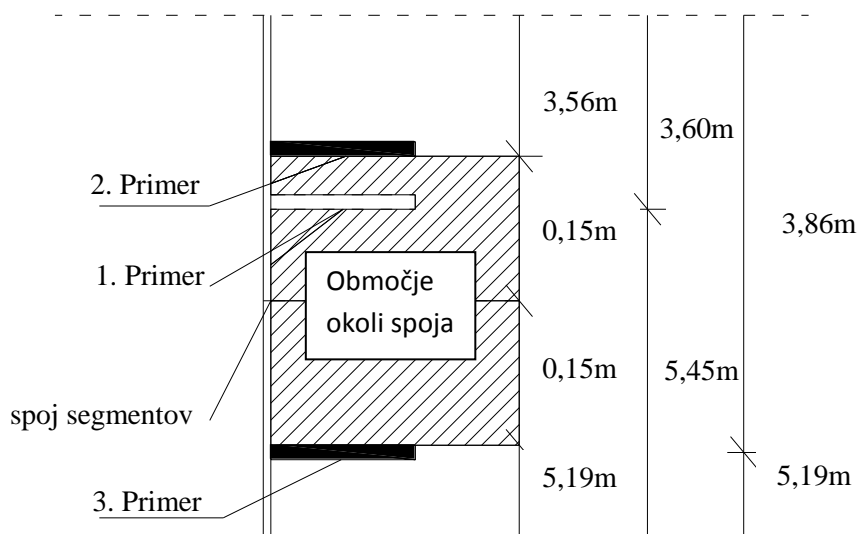
Z Evropskim standardom smo že določili mesto ojačitve. Idealna pozicija ojačitve je v okolici horizontalnega spoja drugega in tretjega segmenta. Ker je bila izračunana vrednost znotraj območja 150mm okoli spoja, smo morali zaradi zahtev standarda to mesto korigirati. Preveriti je potrebno, ali je bolje ojačitev postaviti pod ali nad spoj segmentov. Te tri pozicije sem preveril numerično. Shematično so prikazane na sliki 6.10.

Kot referenčna pozicija nam služi mesto, ki smo ga izračunali po Evropskem standardu EN14015, $H_{OJ} = 3,60\text{m}$. Drugi primer je, ko smo ojačitev premaknili nad izračunano vrednost. Pozicija je enaka izbrani korigirani vrednosti po EN14015 $H_{OJ} = 3,56\text{m}$. Kot tretjo možnost sem ojačitev premaknil na prvo možno pozicijo pod spoj segmentov, to je 150mm pod spoj, na pozicijo $H_{OJ} = 3,86\text{m}$:

$$1)H_{OJ} = 3,60\text{m},$$

$$2)H_{OJ} = 3,56\text{m},$$

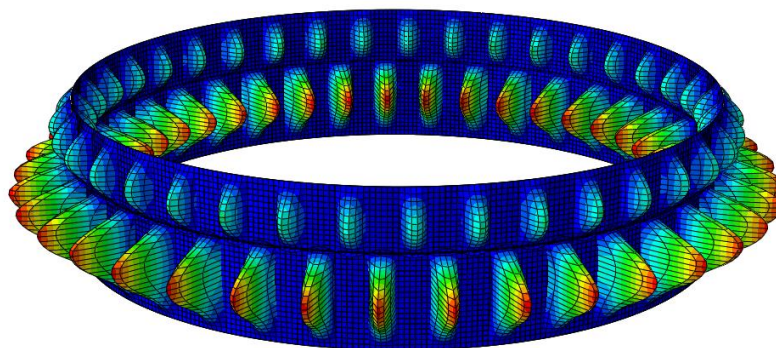
$$3)H_{OJ} = 3,86\text{m}.$$



Slika 6.10: Shema različnih primerov postavitve ojačitev

6.9.5.1.1 1. Primer

Ojačitev je oddaljena 3,60m od zgornjega roba, na mesto izračunano po Evropskem standardu EN 1405.



Slika 6.11: Prva izbočitvena oblika rezervoarja z ojačitvijo na $H=3,60m$

Na sliki 6.11 vidimo, da se uklonski valovi pri prvi uklonski obliki pojavijo v območju pod ojačitvijo. Lastna vrednost prve uklonske oblike znaša:

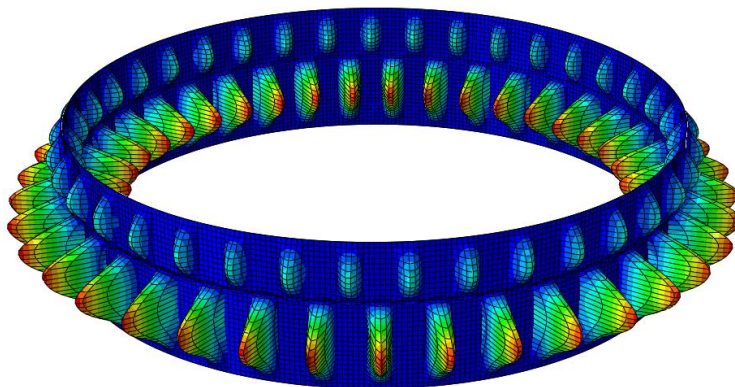
$$\lambda_1 = 2,59.$$

6.9.5.1.2 2. Primer

Ojačitev postavimo na zgornji rob območja 150mm okoli spoja drugega in tretjega segmenta. To je prva pozicija nad spojem, ki ustreza zahtevam Evropskega standarda. Ojačitev je oddaljena 3,56m od zgornjega roba.

Ker smo ojačitev premaknili navzgor je izbočitvena oblika enaka prejšnji, uklonski valovi so se pojavili pod ojačitvijo (slika 6.12), lastna vrednost pa se je malenkost zmanjšala:

$$\lambda_1 = 2,56.$$



Slika 6.12: Prva izbočitvena oblika rezervoarja z ojačitvijo na $H=3,56\text{m}$

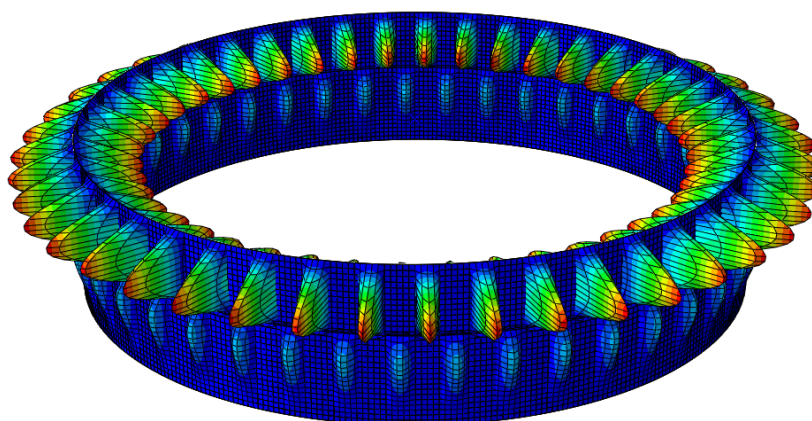
Iz tega sledi da smo s spremembo uklonsko odpornost rezervoarja poslabšali.

6.9.5.1.3 3. Primer

Ojačitev postavimo na spodnji rob območja 150mm okoli horizontalnega spoja segmentov. Ojačitev je oddaljena 3,86m od zgornjega roba. To je prva pozicija pod spojem, ki ustreza zahtevam Evropskega standarda.

Uklonski valovi nastanejo v predelu nad ojačitvijo (slika 6.13). Lastna vrednost prve uklonske oblike znaša:

$$\lambda_1 = 2,50.$$



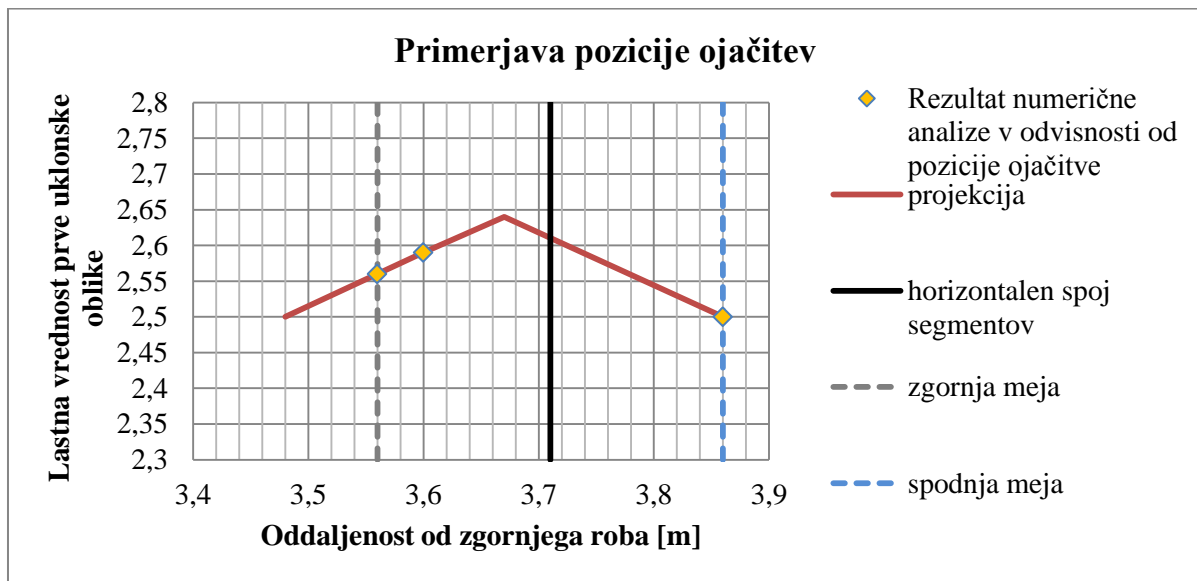
Slika 6.13: Prva izbočitvena oblika rezervoarja z ojačitvijo na $H=3,86\text{m}$

Tudi v tem primeru smo s premikom pozicije ojačitve uklonsko odpornost rezervoarja poslabšali.

6.9.5.2 Komentar

S premikanjem ojačitve v vertikalni smeri, spreminjamo uklonsko odpornost rezervoarja. Pozicija ojačitve določa v katerem območju bo prišlo do uklonskih valov. Bodisi nad ojačitvijo bodisi pod ojačitvijo. Idealna pozicija ojačitve bi bila tista, pri kateri bi hkrati prišlo do uklona pod in nad ojačitvijo. V prvem primeru, ko smo imeli ojačitev postavljeno na prvotno mesto izračunano z Evropskim standardom En14015, je do uklona prišlo v območju pod ojačitvijo. Ko smo ojačitev premaknili navzdol (3. primer), je do uklona prišlo v območju nad ojačitvijo. Torej je idealno mesto ojačitve nekje med tema dvema pozicijama, torej med $H_{OJ} = 3,60\text{m}$ in $H_{OJ} = 3,86\text{m}$. Ker pa je potrebno upoštevati zahteve standarda in ojačitev postaviti izven območja 150mm okoli spoja horizontalnih segmentov, primerjamo 2. in 3. primer, ko smo enkrat postavili ojačitev na zgornji rob tega območja, drugič pa na spodnji rob. Izkaže se, da ima rezervoar s postavljeno ojačitvijo nad spojem, večjo uklonsko odpornost. Izkaže se tudi točnost postopka določitve mesta ojačitve po Evropskem oziroma Ameriškem standardu. Numerično smo dobili praktično enake rezultate kot z enačbami standarda. Najbolj ugodna pozicija ojačitev po obeh postopkih je sovpadala.

Na grafikonu 6.2 so prikazani rezultati numerične analize. Rumene pike predstavljajo lastne vrednosti za izbrano pozicijo ojačitve. Za lažjo predstavo je narisana še pozicija ojačitve (črno), ter območje znotraj katerega ni priporočeno imeti ojačitve (modra in siva). Z rdečo črto je narisana projekcija, kako bi se spreminjala odpornost rezervoarja glede na pozicijo ojačitve, če bi bila zveza linearna.



Grafikon 6.2: Primerjava pozicij ojačitev

6.10 Trenutno stanje

Za trenutno stanje smo z računom po standardih dobili zelo različne rezultate. Po Ameriškem standardu smo potrebovali eno ojačitev, po Evropskem EN14015 dve, po Evropskih priporočili ECCS pa kar tri. Zanimivo bo videti, koliko ojačitev potrebujemo z numerično analizo.

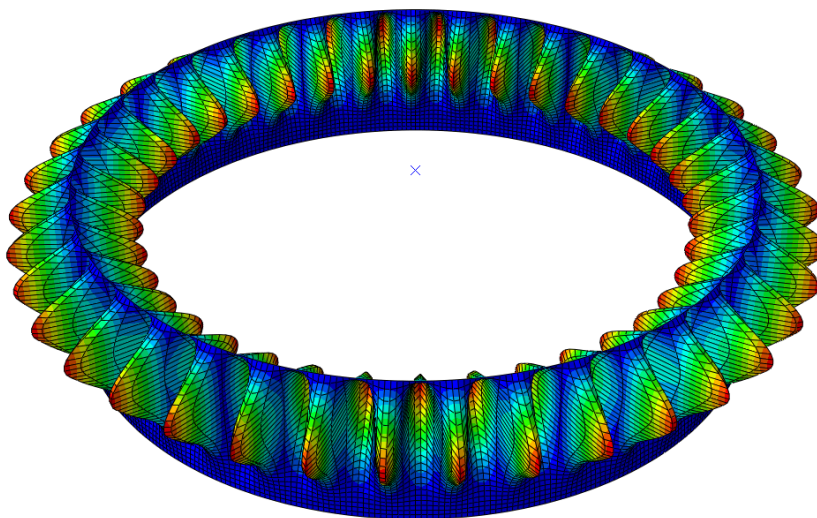
6.10.1 LBA analiza

Kot za začetno stanje, tudi tu najprej izvedemo uklonsko analizo, katere rezultat je lastna vrednost in izbočitvena oblika.

V začetnem stanju je bila lastna vrednosti $\lambda=1,29$. Ker ima rezervoar v trenutnem stanju občutno manjšo debelino je pričakovati, da bo sedaj vrednost manjša od ena.

Prva izbočitvena oblika je prikazana na sliki 6.14. Lastna vrednost prve uklonske oblike znaša:

$$\lambda_1 = 0,728.$$

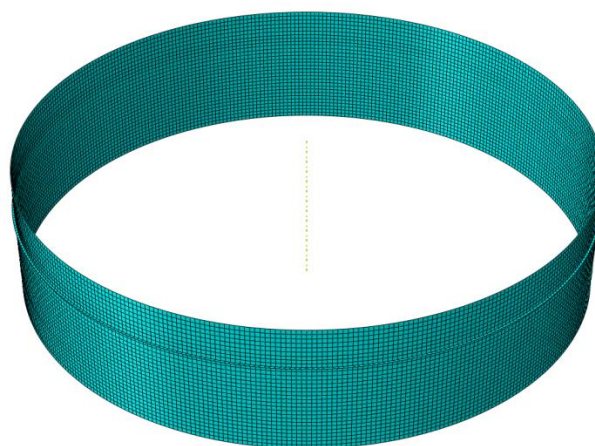


Slika 6.14: Prva izbočitvena oblika rezervoarja v trenutnem stanju

Pod delovanjem polne obtežbe pride do idealno elastičnega uklona. Kot ukrep za zvišanje uklonske odpornosti namestimo ojačitev.

6.10.1.1 1 ojačitev

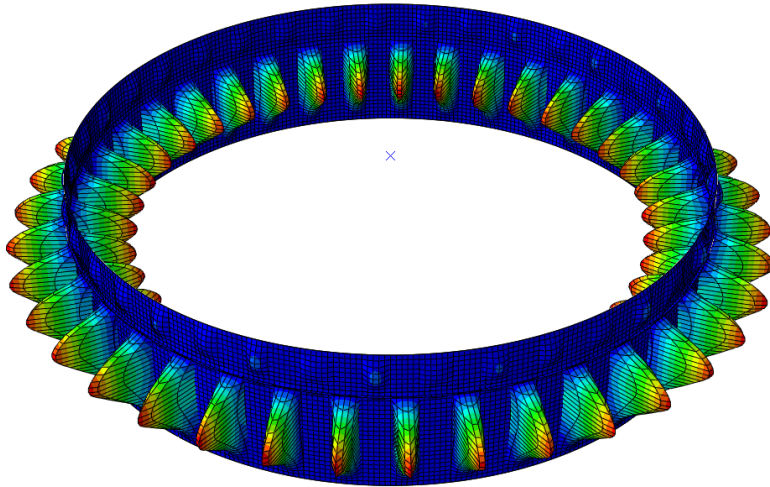
Ker smo v začetnem stanju pokazali točnost računa pozicije ojačitve po EN14015 oziroma API650 standardu, prvo ojačitev postavimo na mesto izračunano s slednjima. V primeru ene ojačitve bi bila ojačitev postavljena na višini 2,77m od zgornjega roba. Računski model je prikazan na sliki 6.15.



Slika 6.15: Model rezervoarja z dodano ojačitvijo

Lastna vrednost prve uklonske oblike znaša:

$$\lambda_1 = 1,481.$$



Slika 6.16: Prva izbočitvena oblika rezervoarja z dodano ojačitvijo v trenutnem stanju

Po numerični analizi že ena ojačitev zadostuje za prevzem idealnega elastičnega uklona. Do uklona pride v območju pod ojačitvijo (slika 6.16). Dobljene pomike izvozimo v nov model na katerem bomo opravili GMNIA analizo.

6.10.2 GMNIA analiza

Obliko začetnih nepopolnosti narekuje uklonska analiza, amplitudo pa določimo glede na izbran razred izdelave:

$$l_g = 2,3(l^2rt)^{0,25} \leq r,$$

$$l_g = 2,3\left((1780\text{mm})^2 \times 19500\text{mm} \times 5,5\text{mm}\right)^{0,25},$$

$$l_g = 1756\text{mm}.$$

$$\Delta w_{0,eq,1} = 1756\text{mm} \times 0,016,$$

$$\Delta w_{0,eq,1} = 28\text{mm},$$

$$\Delta w_{0,eq,2} = 25 \times 5,5\text{mm} \times 0,016,$$

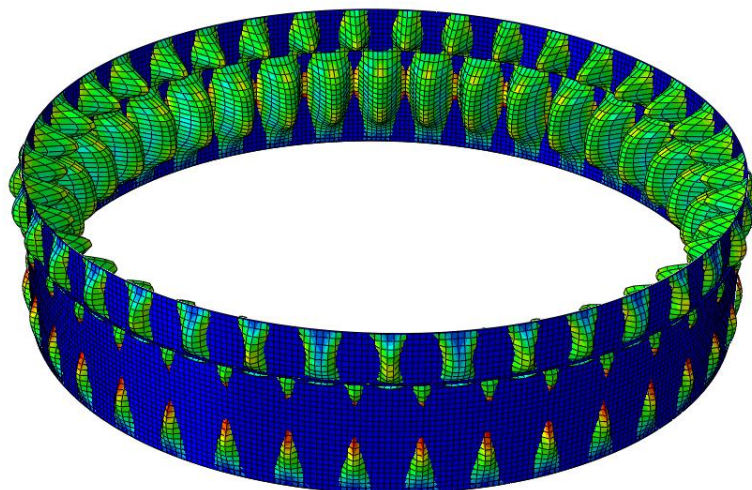
$$\Delta w_{0,eq,2} = 2,2\text{mm}.$$

$$\Delta w_{0,eq} = \max \begin{cases} \Delta w_{0,eq,1} = 28\text{mm} \\ \Delta w_{0,eq,2} = 2,2\text{mm} \end{cases},$$

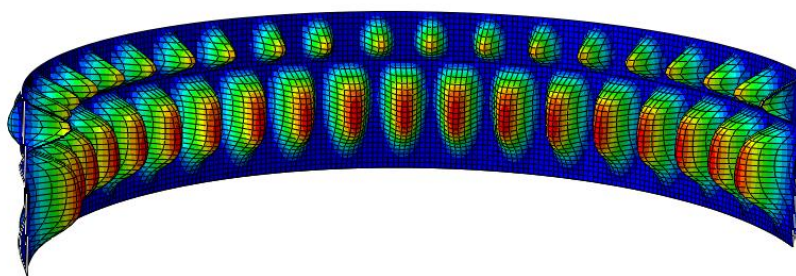
$$\Delta w_{0,eq} = 28\text{mm}.$$

6.10.2.1 Rezultati

Na sliki 6.17 je prikazan potek napetosti na deformiranem rezervoarju. Maksimalne napetosti po von Misesu znašajo 6kN/cm^2 . V rezervoarju ne pride do plastifikacije.



Slika 6.17: Potek napetosti po GMNIA analizi



Slika 6.18: Deformacijska oblika rezervoarja po GMNIA analizi

Vidimo, da deformacijsko obliko narekujejo začetne nepopolnosti (slika 6.18). Do največjega pomika pride v območju pod ojačitvijo in sicer znaša 27mm .

Največja izkoriščenost je tako:

$$\frac{\sigma_{vM,Ed}}{f_{y,d}} = \frac{6 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{21,8 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}} = 0,28.$$

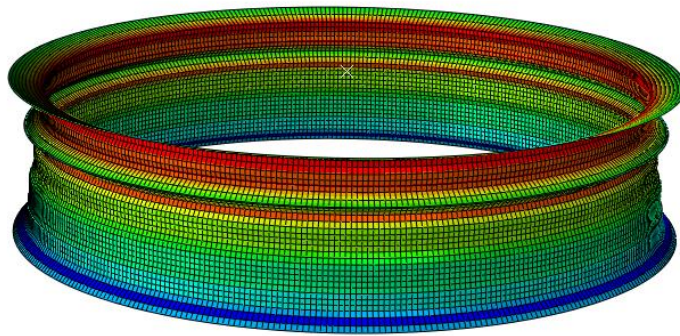
Rezultati GMNIA analize so pokazali, da za trenutno stanje zadostuje že ena dodana ojačitev.

6.10.3 GMNA analiza

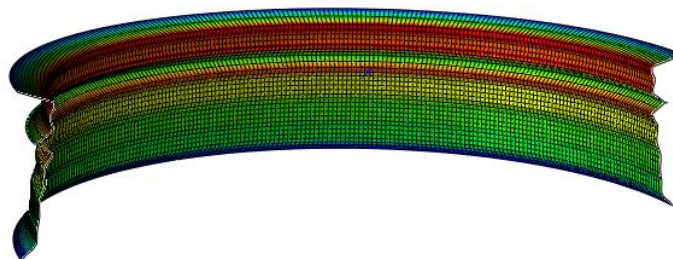
Enako kot pri začetnem stanju za kontrolo opravimo še GMNA analizo, kot kontrolo GMNIA analizi.

6.10.3.1 Rezultati

Tudi tu je deformacijska oblika popolnoma drugačna, kot če upoštevamo nepopolnosti (slika 6.19). Tudi pomiki in napetosti so občutno manjše. Na sliki 6.20 vidimo, da največje vrednosti dobimo v bližini zgornjega roba. Največja napetosti po von Misesu znaša 1kN/cm^2 , največji pomik pa $0,97\text{mm}$. Dodana ojačitev je v svoji okolici vidno zmanjšala pomike, kar je razvidno na sliki 6.21.



Slika 6.19: Potek napetosti po GMNA analizi



Slika 6.20: Deformacijska oblika po GMNA analizi

Na tem mestu ne moremo narediti hitre kontrole maksimalnih napetosti, kot smo to naredili pri začetnem stanju. Te se pojavijo namreč v območju med ojačitvijo in zgornjim robom, ki je sorazmerno kratek, tako da kotelna enačba ne pride v poštev. Na maksimalne vrednosti imajo, zaradi kratke dolžine območja, vpliv robni pogoji in sama ojačitev:



Slika 6.21: Pomiki tekom višine rezervoarja

$$\sigma_{Ed} = q_{w,d} \times \frac{r}{t_1},$$
$$\sigma_{Ed} = 0,000191 \frac{kN}{cm^2} \times \frac{1950cm}{0,55cm},$$
$$\sigma_{Ed} = 0,68 \frac{kN}{cm^2}.$$

6.10.4 Primerjava rezultatov in komentar

V primerjavi začetnega in trenutnega stanja vidimo, da je imela korozija in s tem posledično manjšanje debeline stene rezervoarja velik vpliv na uklonsko odpornost rezervoarja. Po numerični analizi v začetnem stanju nismo potrebovali ojačitve, dočim to potrebujemo v trenutnem stanju. To samo potrjuje dejstvo, da je potrebno take objekte redno pregledovati in meriti stopnjo korozivnosti.

Rezultati numerične analize so enako kot pri začetnem stanju sovpadali z rezultatom računa po Ameriškem standardu API650. Ostala dva standarda, EN14015 in Evropska priporočila ECCS imata konservativnejši pristop, saj tako kot za začetno stanju tudi pri trenutnem dobimo večje število zahtevanih ojačitev. Tako v začetnem kot v trenutnem stanju, smo z numerično analizo dobili najmanj potrebnih ojačitev. Če rezultate pogledamo malo širše vidimo, da pri standardu EN14015 skoraj zadostimo pogojem z eno ojačitvijo, in enako priporočilom ECCS z dvema. Kljub temu primerjava normirane višine pokaže odstopanje za več kot 25% med standardoma. V preglednici 6.4 so prikazane izkoriščenosti in normirane višine po različnih standardih za različno število ojačitev. V primeru priporočil ECCS je prikazana le izkoriščenost najbolj kritičnega območja.

Seveda so standardi in priporočila pisani za širok nabor rezervoarjev različnih dimenzij, tako da težko na tem mestu ovrednotimo točnost standarda na podlagi računa samo enega rezervoarja.

Preglednica 6.4: Primerjava različnih analiz za trenutno stanje

| Analiza | Število ojačitev | Izkoriščenost napetosti | Normirana višina |
|-------------------|------------------|-------------------------|------------------|
| API650 | 1 | / | 0,73 |
| EN14015 | 1 | / | 1,01 |
| | 2 | / | 0,53 |
| ECCS 5th Edition | 1 | 1,62 | / |
| | 2 | 1,05 | / |
| | 3 | 0,75 | / |
| Numerična analiza | 1 | 0,28* | / |

* Vrednost predstavlja razmerje med največjo dobljeno napetostjo v rezervoarju po von Misesovem kriteriju in mejo tečenja f_y .

7 PROGRAM ZA RAČUN STABILNOSTI REZERVOARJEV »BuckleTank«

7.1 Uvod

Glavna ideja diplomske naloge je bila izdelava računalniškega programa, s pomočjo katerega bi se poenostavil in olajšal račun stabilnosti rezervoarja. Kot je razvidno iz gornjih računov je postopek, še posebej tisti po Evropskih priporočilih ECCS 5th Edition zelo dolg in zamuden. Račun s pomočjo računalnika omogoči hitrejše izračune kot tudi hitro spreminjanje posameznih parametrov in spremljanje njihovih vplivov na končen rezultat.

Program omogoča tudi generiranje vhodnih podatkov za numerično GMNIA analizo s programom SIMULIA Abaqus FEA. Vhodne podatke program generira v primerno obliko in samodejno zažene numerično analizo. Pri tem nam pokaže tudi vmesne rezultate s pomočjo katerih lahko preverimo točnost računa in izberemo na kakšen način bomo upoštevali nepopolnosti.

Program sem izdelal v programskem okolju Matlab R2013a. Program sloni na x86 arhitekturi, zato ga je mogoče uporabljati tako z 32 kot tudi z 64-bitnimi operacijskimi sistemi Windows.

Program omogoča računanje po standardih, ki so zajeti v tej diplomski nalogi. To so Evropski standard EN1405, Ameriški API650 ter Evropska priporočila ECCS 5th Edition. Zasnovan je v duhu čim bolj enostavne uporabe.

Privzet jezik je angleški, to pa zaradi večje prepoznavnosti in želje po čim večji uporabi programa.

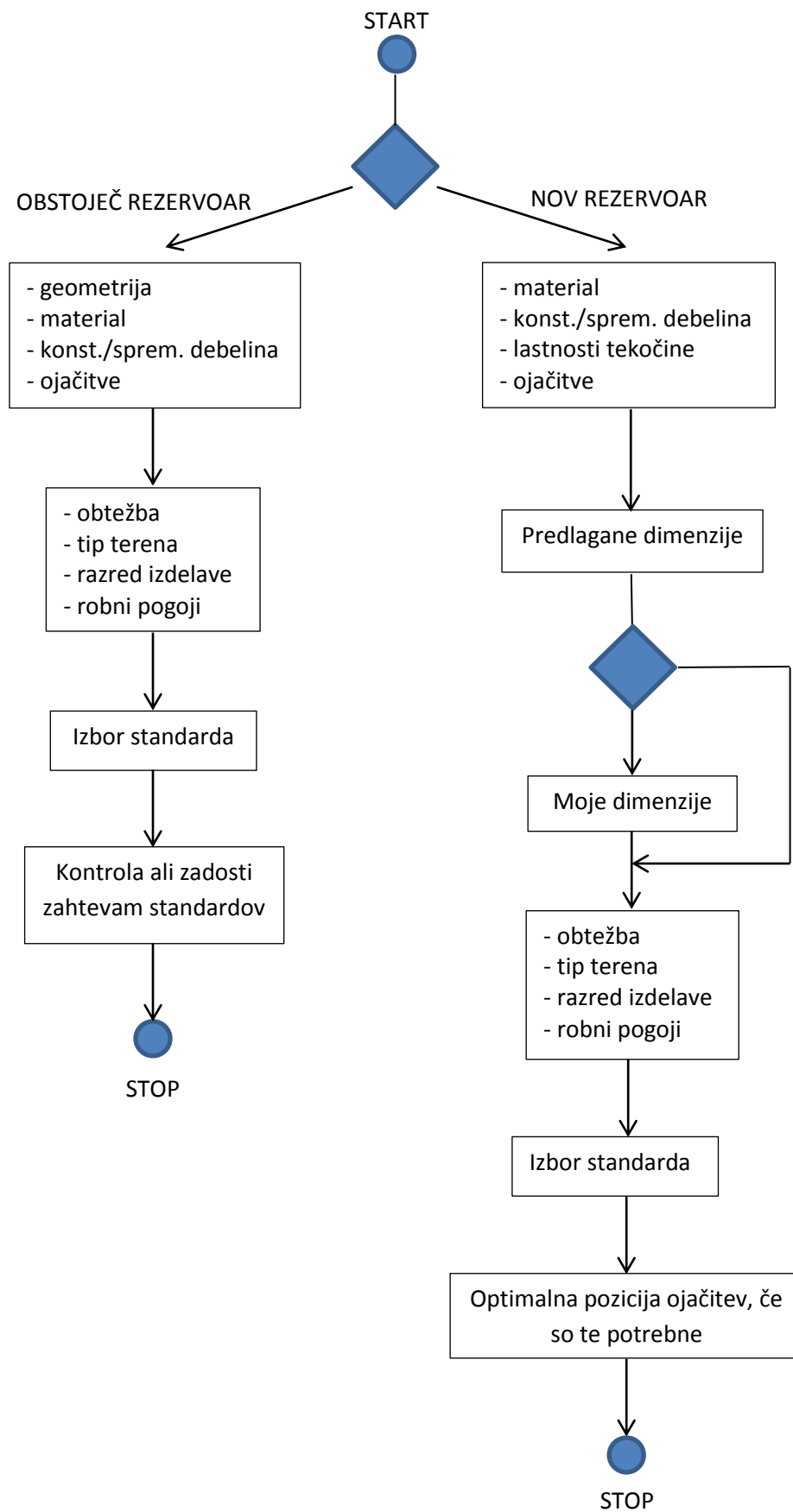
Sam program je zasnovan tako, da uporabnika vodi skozi šest zavihkov na katerih uporabnik poda geometrijske podatke, obtežbo, robne pogoje in način računa, ter na koncu predstavi rezultate.

Ker okolje Matlab nima vgrajene možnosti dela z zavihki, sem program zasnoval tako, da sem vsak zavihek posebej oblikoval kot 'UIPanel', znotraj katerega sem oblikoval gumbe, tekst in polja za vnos podatkov. Da posnema delo zavihkov, ob zagonu program postavi »UIPanel« drug za drugega, in jim določi velikost prvega. Z gumbi »Next« in »Back« prehajamo med zavihki. To sem dosegel tako, da z gumbi upravljamo vidljivost posameznega »UIPanela«.

Ker je v standardih tudi nekaj grafov, za katere niso podane enačbe za njihov izračun, je bilo potrebno grafe parametrizirati. To sem naredil tako, da sem sliko uvozil v program Autocad, ter jo postavil v izhodišče koordinatnega sistema. Po grafu sem narisal točke, od katerih sem nato s funkcijo »Eattext« izvozil koordinate, ter jih shranil v Excel datoteko. Potrebno je bilo še urediti razmerje, saj bila slika povečana. Glede na vhodne podatke nato Matlab izbere pravi nabor točk, iz njih nariše krivuljo, ter odčita vrednosti pri zahtevanem x-u. Grafi, ki jih je bilo potrebno parametrizirati so: graf za določanje faktorja izpostavljenosti C_e , po Evropskem standardu, ki zajema vpliv vetra na konstrukcije EN1991-1-4, grafe za določanje parametra κ , za račun nadomestne višine pri rezervoarjih spremenljive debeline

po Evropskih priporočilih ECCS, ter graf za določitev minimalne togosti ojačitve γ_{CR}^* prav tako po Evropskih priporočilih ECCS.

7.2 Shema delovanja programa

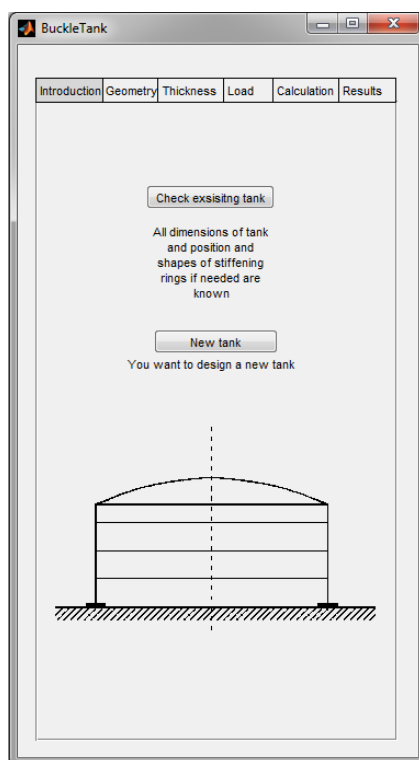


7.3 Delovanje

7.3.1 Račun po enačbah standardov

Program sem zasnoval tako, da se na začetku deli v dva dela. Na del kjer kontroliramo obstoječ rezervoar in na del, kjer projektiramo nov rezervoar. Pri kontroli obstoječega rezervoarja je bilo potrebno vse enačbe obrniti.

Na prvem zavihku (slika 7.1) izberemo ali bomo preverili rezervoar, za katerega poznamo vse dimenzije in postavitve ojačitev, če so te prisotne ali pa bomo projektirali nov rezervoar, za katerega nam program sam predlaga dimenzije.



Slika 7.1: Prvi zavihek

Na drugem zavihku (slika 7.2) podamo osnovne dimenzije rezervoarja. Če smo izbrali, da preverjamo obstoječ rezervoar podamo samo višino rezervoarja, radij, mejo tečenja izbranega jekla ter modul elastičnosti. V primeru da projektiramo nov rezervoar poleg zgornjih podatkov dodamo še prostorninsko težo tekočine v rezervoarju, ter višino zgornjega roba polnjenja. Program nato sam predlaga začetne dimenzije rezervoarja, glede na obodne napetosti, kot posledica hidrostatičnega tlaka:

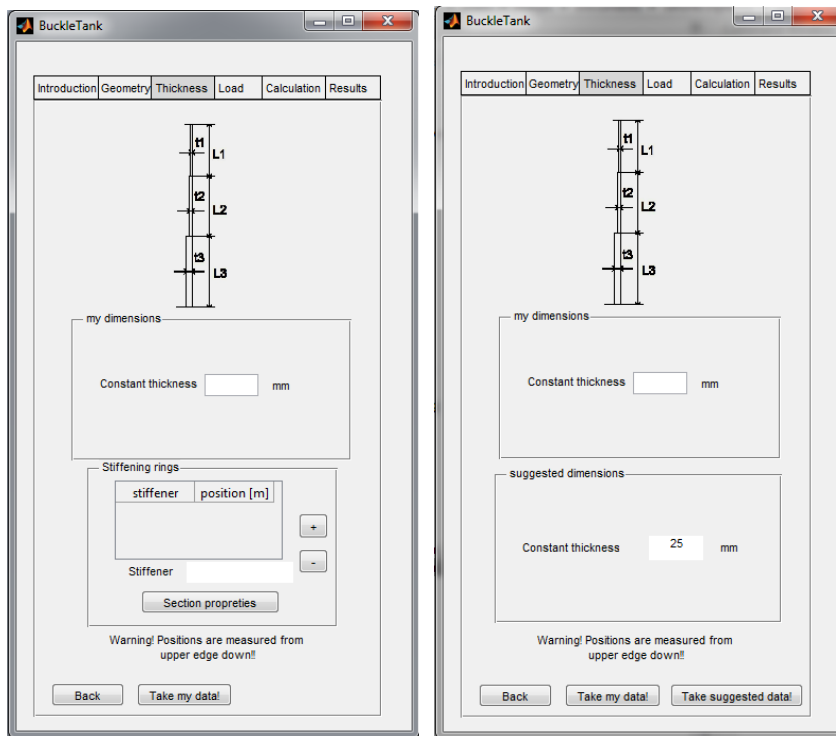
$$\sigma_{\theta}(z) = (h_{liq} - z) \times \gamma_{liq} \times \frac{r}{t(z)} \leq f_{yk}$$

pri čemer z predstavlja višino od dna rezervoarja pa do izbrane točke.



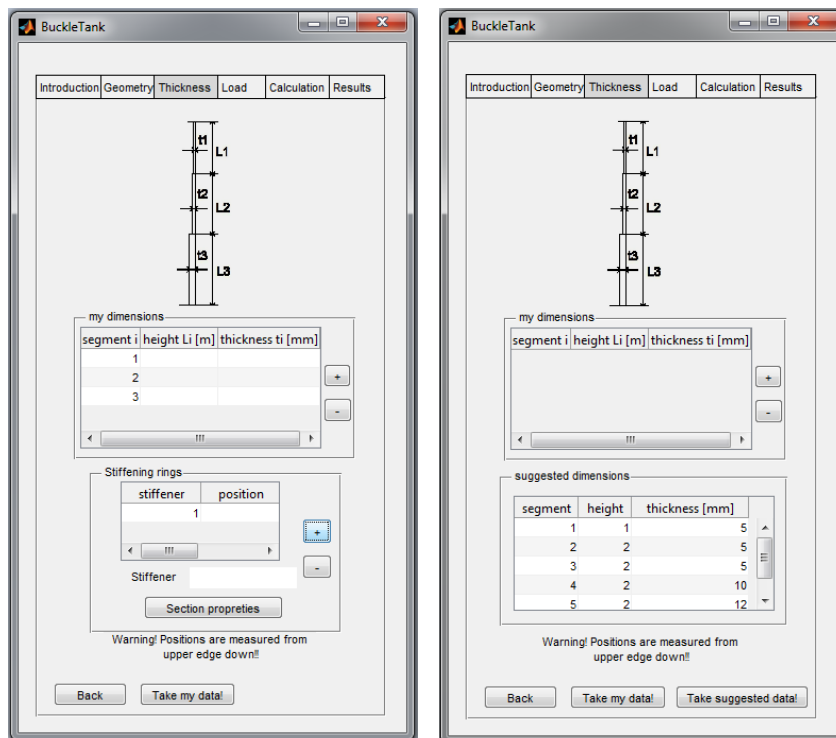
Slika 7.2: Drugi zavihek pri kontroli obstoječega rezervoarja (levo) in pri projektiranju novega rezervoarja (desno)

Program je zasnovan tako, da če uporabnik izrecno ne izbere, da želi rezervoar konstantne debeline, razdeli višino rezervoarja na segmente višine 2m. Za vsak segment nato posebej preveri obodne napetosti na dnu, kot posledico hidrostatičnega tlaka in določi debelino stene. Če uporabnik izbere konstantno debelino, debelino celotnega rezervoarja narekuje napetost na spodnjem robu rezervoarja (slika 7.3).



Slika 7.3: Tretji zavihek pri kontroli obstoječega (levo) in pri projektiranju novega rezervoarja (desno)

Program debeline zaokroži na prvo višjo vrednost standardnih debelin: 5/10/12/15/20/25mm.

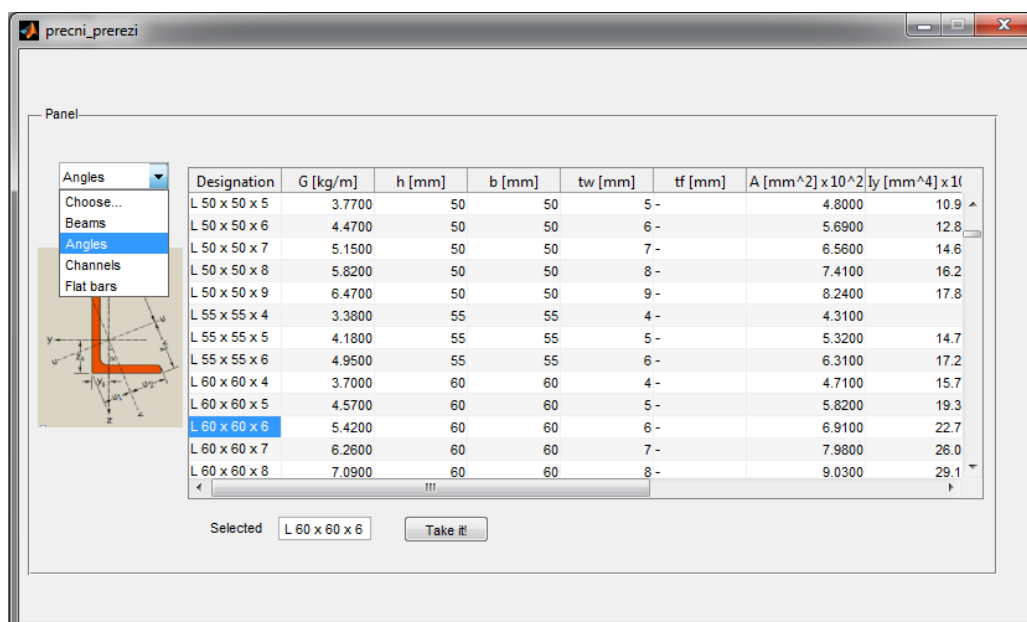


Slika 7.4: Tretji zavihek pri kontroli obstoječega rezervoarja (levo) in pri projektiranju novega rezervoarja (desno)

Predlagane dimenzije poda v tabeli. Uporabniku ostaja še vedno možnost, da poda svoje dimenzije, ki jih zapiše v tabelo (slika 7.4).

V primeru kontrole obstoječega rezervoarja, imamo poleg tabele za vnos dimenzij segmentov, na voljo tudi tabelo za vnos pozicije ojačitev. V ta namen sem izdelal tudi gumba s katerimi dodajamo oziroma brišemo vrstice v tabeli.

Z pritiskom na gumb »Section properties« se nam odpre novo okno (slika 7.5) v katerem izberemo obliko in dimenzijo ojačitve.

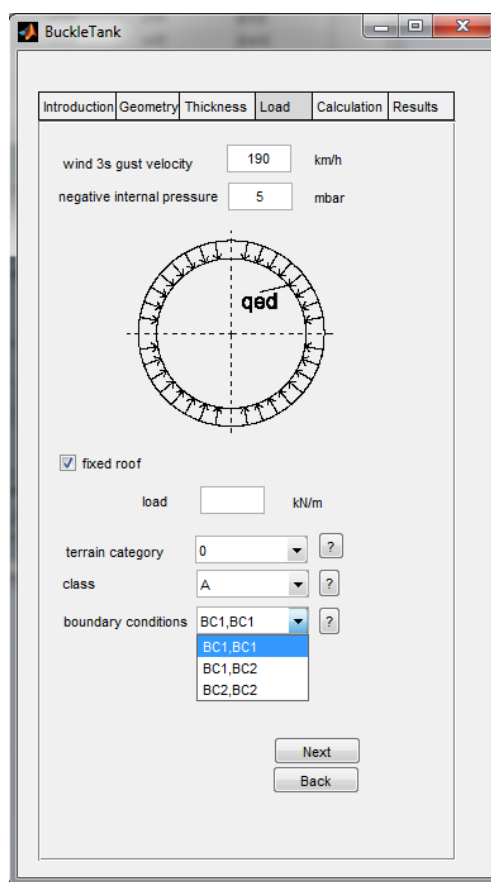


Slika 7.5: Baza ojačitev

Za ta namen sem izdelal bazo podatkov, znotraj katere uporabnik enostavno izbira med različnimi oblikami profilov, ter nato izbere želen profil. Podatke sem dobil iz spleta [18]

Na voljo je baza prečnih prerezov, ki zajema I-profile, L-kotnike, U-profile ter ojačitve pravokotnega prereza. Poleg osnovnih dimenzij sta v tabeli podana še vztrajnostni in odpornostni moment, ki olajšata izbiro primerne ojačitve.

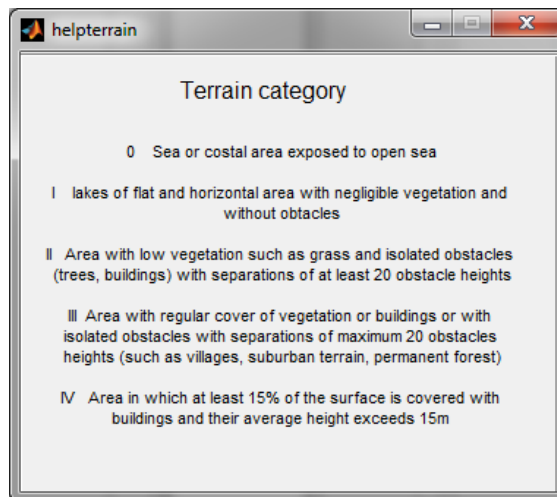
V četrtem zavihku podamo podatke o obtežbi (slika 7.6).



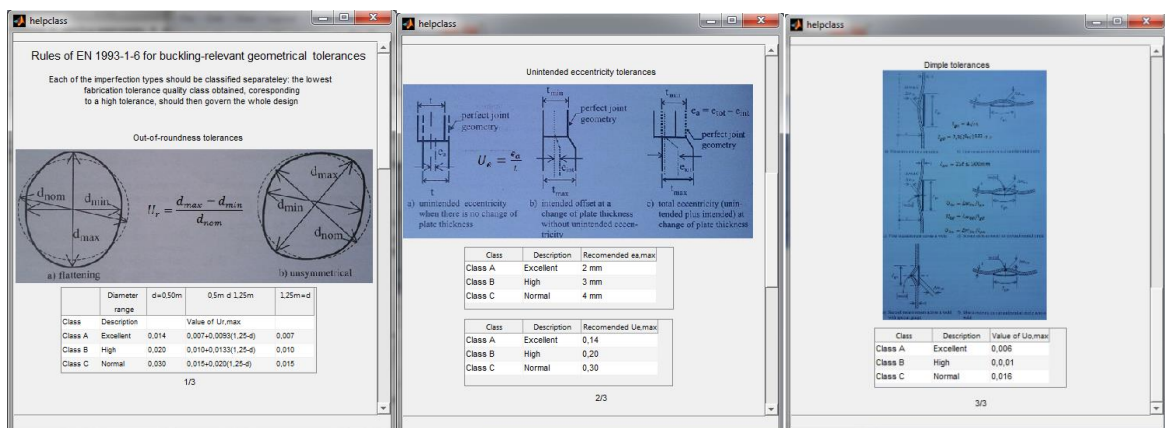
Slika 7.6: Četrti zavihek

Podati je potrebno hitrost sunka vetra, ter notranji podtlak, ki negativno vpliva na stabilnost konstrukcije. Program z enačbami standarda EN1991-1-4 pretvori hitrost sunka vetra v enakomeren porazdeljen pritisk okoli oboda rezervoarja, ki ga potrebujemo za račun po Evropskih priporočilih ECCS 5th.

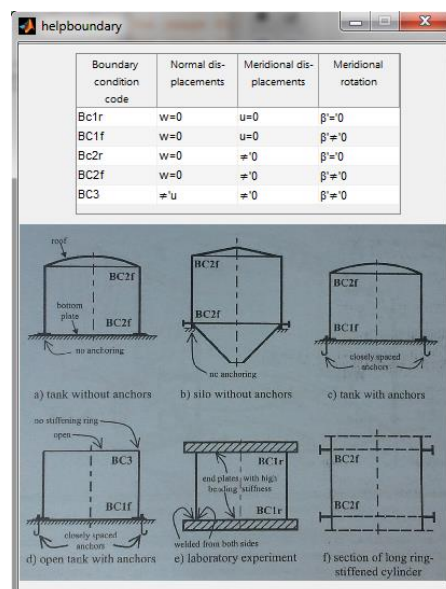
V spodnjem delu izberemo tipologijo terena (slika 7.7), ki jo potrebujemo za račun pritiska vetra, razred izdelave rezervoarja (slika 7.8) in tip robnih pogojev (slika 7.9). Poleg vsakega izbora je na voljo tudi gumb s podrobnejšo obrazložitvijo vsake izmed možnosti.



Slika 7.7: Podrobnejši opis kategorije terena

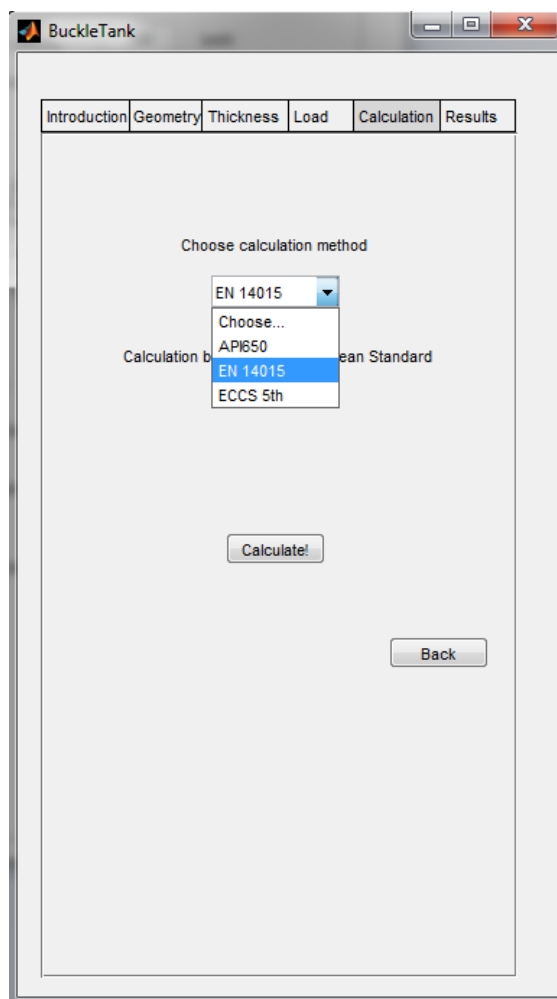


Slika 7.8: Podrobnejši opis izbire razreda izdelave



Slika 7.9: Podrobnejši opis robnih pogojev

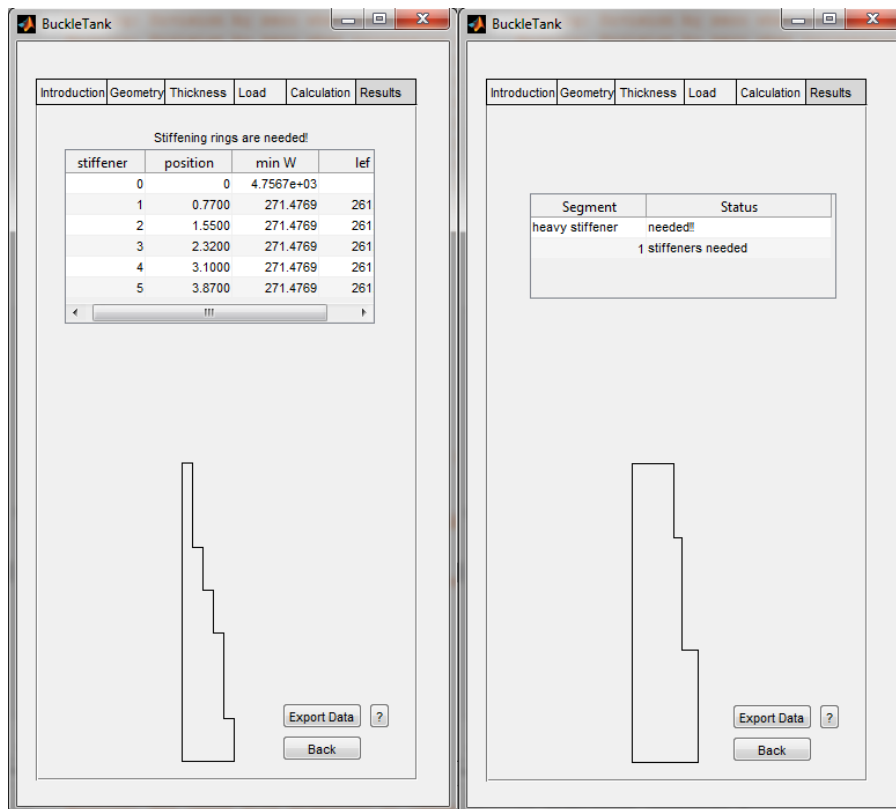
Na petem zavihku (slika 7.10) izberemo, po katerem standardu želimo rezervoar preveriti/dimenzionirati. Na voljo imamo tri možnosti. Ameriški API650, Evropski EN14015, ter Evropska priporočila ECCS 5th Edition.



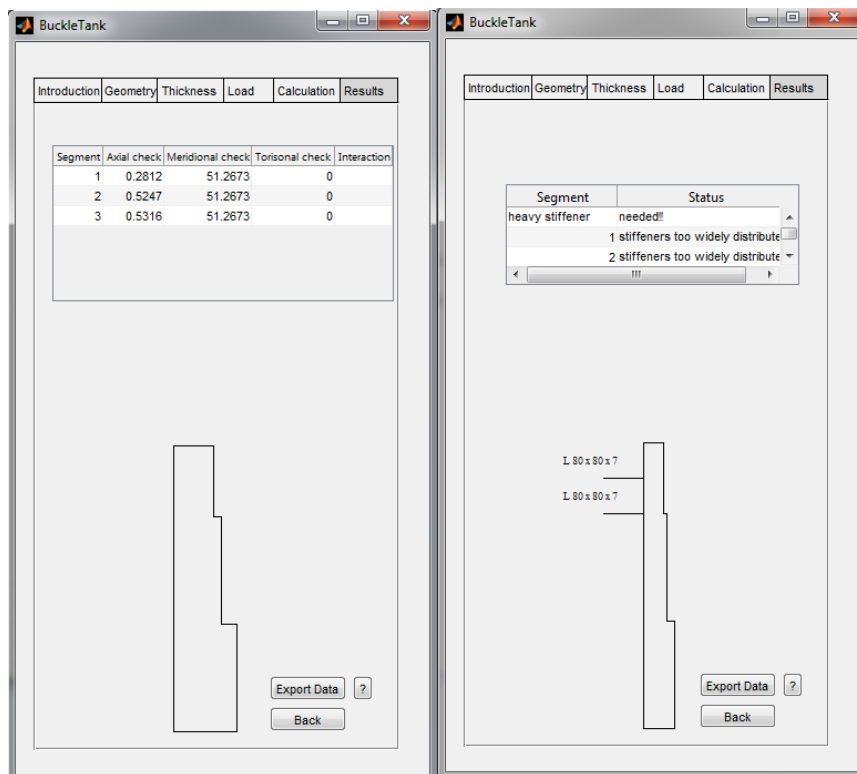
Slika 7.10: Peti zavihkek

S pritiskom na gumb »Calculate!« oziroma »Check!« v primeru kontrole obstoječega rezervoarja, se izvede račun po izbranem standardu.

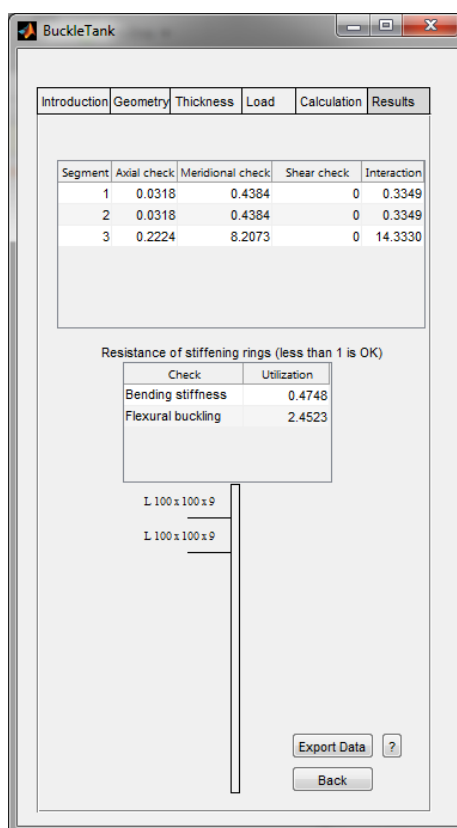
Na zadnjem zavihku (slika 7.11 – 7.13) so predstavljeni rezultati in shematski izris rezervoarja. Pri projektiranju novega rezervoarja po API standardu oziroma EN14015 nam program izpiše mesta na katerih, če seveda, potrebujemo ojačitev, ter njihov minimalen odpornostni moment. Pri kontroli obstoječega rezervoarja po zadnjih dveh standardih, pa nam pove, ali imamo dovolj ojačitev, oziroma ali jih sploh potrebujemo.



Slika 7.11: Predlagana mesta ojačitev novega rezervoarja (levo) in kontrola obstoječega (desno) po EN14015



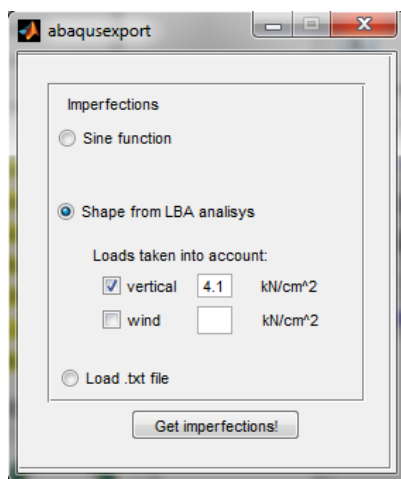
Slika 7.12: Kontrola obstoječega rezervoarja brez ojačitev po ECCS (levo) in API650 (desno)



Slika 7.13: Kontrola stene rezervoarja in ojačitve po priporočilih ECCS 5th Edition

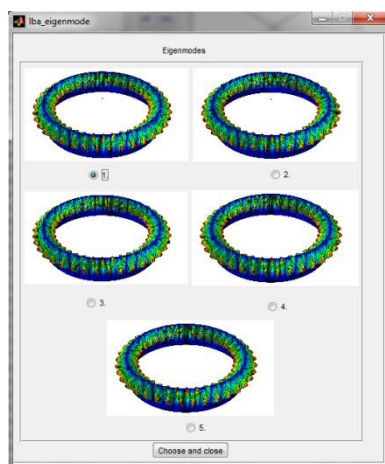
7.3.2 Numerična analiza

Kot dodatno možnost program omogoča tudi generiranje vhodnih podatkov za račun s programom za numerično analizo SIMULIA Abaqus FEA. Program nas vodi skozi več oken preko katerih dodajamo manjkajoče podatke za GMNIA analizo. S pritiskom na gumb »Export Data« se nam odpre novo pogovorno okno (slika 7.14)(abaqusexport.m).



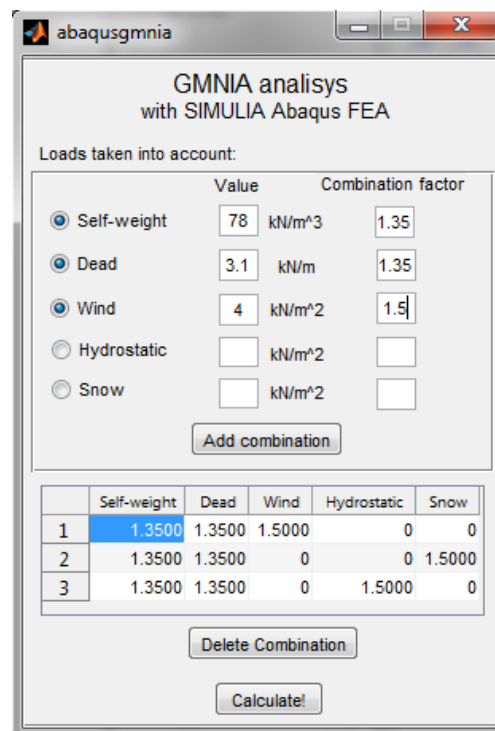
Slika 7.14: Način zajema nepopolnosti

Znotraj tega okna uporabnik izbere na kakšen način bo zajel nepopolnosti. Na izbiro ima tri možnosti. Nepopolnosti lahko na primer aproksimira s sinusno krivuljo. V tem primeru poda število valov in amplitudo. Druga možnost je, da za nepopolnosti privzame kar uklonsko obliko rezervoarja. V tem primeru se izvede uklonska LBA analiza, katere grafični rezultat se nam prikaže v nove oknu (slika 7.15) (Iba_eigenmode.m). Pred tem moramo še podati velikost vertikalne in vetrne obtežbe, ki bo upoštevana v analizi. Izriše se prvih pet uklonskih oblik med katerimi uporabnik izbere eno. S klikom na gumb »Choose and close« se pomiki zapišejo kot nepopolnosti v vhodno datoteko za GMNIA analizo.



Slika 7.15: Rezultat LBA analize in izbira uklonske oblike

Tretja izmed možnosti za podajanje nepopolnost pa je iz lastne datoteke, v kateri imamo shranjene podatke o nepopolnostih. S pritiskom na gumb »Get imperfestions!« se nam odpre še zadnje okno (slika 7.16) v katerem podamo velikost obtežb in obtežne kombinacije. Okno sem zasnoval tako, da uporabnik sam izbira med obtežbami, ki jih bo vključil v kombinacije. Na voljo ima izbiro med lastno težo, stalno obtežbo, pritiskom vetra, hidrostatičim pritiskom ter obtežbo snega. Poleg izbrane obtežbe poda še velikost le te in pa velikost obtežnega faktorja. Kombinacije se izpišejo v tabeli. Mogoča je tudi naknadna sprememba kombinacij s pritiskom na gumb »Delete Combination«. Ko so obtežne kombinacije podane s pritiskom na gumb »Calculate!« zaženemo Abaqus z generiranimi vhodnimi podatki za GMNIA analizo.



Slika 7.16: Podajanje obtežb in obtežnih kombinacij

8 ZAKLJUČEK

Zaradi ekonomske upravičenosti je večina jeklenih rezervoarjev sestavljena iz segmentov različnih debelin. Debelino stene rezervoarja narekuje hidrostatičen pritisk tekočine in s tem natezne napetosti. Tako imajo zgornji segmenti debelino samo nekaj milimetrov. Zaradi velikega razmerja med radijem in debelino stene so taka območja občutljiva na uklon, oziroma tlačne napetosti. Najbolj neugodno stanje je takrat, ko je rezervoar prazen in nanj deluje obtežba vetra. Povečanje uklonske odpornosti rezervoarja najbolj ekonomično dosežemo z uporabo obročnih ojačitev [16].

V diplomski nalogi sem analiziral in primerjal različne metode za kontrolo stabilnosti jeklenih rezervoarjev. Za dodatno kontrolo sem s programom Abaqus izvedel še materialno in geometrijsko nelinearno analizo z upoštevanjem nepopolnosti (GMNIA). Primerjava metod na referenčnem rezervoarju v začetnem in trenutnem stanju je pokazala zelo različne rezultate. V začetnem stanju sem po Ameriškem API standardu in numerični analizi zadostil pogojem brez dodane ojačitve. Po EN14015 in priporočilih ECCS pa je potrebna dodatna ojačitev. Tudi v končnem stanju sta rezultata po API standardu in numerični analizi sovpadala, saj je bila potrebna ena ojačitev. Po EN4015 sta bile potrebne dve, po priporočilih ECCS pa kar tri.

Iz rezultatov lahko sklepamo, da je končni rezultat v obliki potrebnih ojačitev, po Ameriškem API standardu najbližje numerični analizi. Prav tako se je tudi izkazalo, da je v obeh primerih standard EN14015 skoraj zagotovil pogojem za število ojačitev enako Ameriškem API standardu. Normirana višina je bila v obeh primerih prekoračena za samo nekaj odstotkov. Rezultati po priporočilih ECCS pa so se izkazali za najbolj konservativne, saj je bilo tako v začetnem kot trenutnem stanju potrebno postaviti eno oziroma kar dve ojačitvi več kot pri numerični analizi. Enake rezultate je sicer dobil tudi avtor primerjave dveh večjih rezervoarjev radija 47m in 88m [15].

Za različne rezultate je več vzrokov. Primerjavo sem opravil samo na enem referenčnem rezervoarju. Za verodostojnejšo primerjavo bi bilo potrebno zajeti večje število rezervoarjev različnih dimenzij, konstantne in spreminjajoče se debeline. Referenčen rezervoar spada po višini med kratke rezervoarje velikega radija. Standardi podajajo univerzalne enačbe, ki morajo veljati za vse tipe rezervoarjev. Posledica tega je, da so pri nekaterih tipih rezervoarja bolj natančni pri drugih pa bolj konservativni.

Ameriški API in Evropski EN14015 ne omogočata vpogled v ozadje enačb. Podani so le empirični izrazi v katere podamo debeline, višine in radij rezervoarja, ter hitrost sunka vetra. Rezultat tudi ni izkoriščenost mejnih napetosti, tako da ne vemo kolikšna je uklonska odpornost rezervoarja, ampak le največja dovoljena nepodprta višina stene rezervoarja. Priporočila ECCS so bolj podrobna. Rezultat je napetostna kontrola. Eksplicitno upoštevajo tudi nepopolnosti z različnimi razredi kakovosti izdelave. A kljub temu so ti rezultati najbolj konservativni. Ena od možnosti je tudi, da ravno zaradi upoštevanja nepopolnosti. Na veliko izkoriščenost vpliva tudi dejstvo, da smo med seboj kombinirali maksimalne vrednosti napetosti. Po ECCS priporočilih smo za posamezna območja dobili zelo velike vitkosti in posledično majhne redukcijske faktorje uklona. Reducirana nosilnost je tako bila le nekaj procentov napetosti na meji tečenja.

Za referenčen rezultat sem privzel rezultat numerične analize. Ampak tudi ta ni enak dejanski odpornosti rezervoarja, saj je bilo upoštevanih nekaj poenostavitvev. Pritisk vetra po obodu rezervoarja je bil predpostavljen kot konstanten. Dejansko se spreminja iz pozitivne vrednosti na privetni strani do srka na zavetrni strani rezervoarja. Prav tako strehe nismo modelirali, ampak smo jo ponazorili le z diafragmo in linijsko obtežbo na zgornjem robu. V primeru, ko ima rezervoar streho, nanj deluje tudi

pritisk vetra, ki je za stabilnost neugoden. Študija primerjav različnih modelov je pokazala znižanje odpornosti v primeru upoštevanja strehe v modelu in realnejši odziv konstrukcije [19]. Smo pa po drugi strani upoštevali najbolj neugodno obliko nepopolnosti, in sicer obliko enako uklonski obliki rezervoarja.

Z numerično analizo sem pokazal pravilnost postopka določitve pozicije ojačitev po Ameriškem API oziroma Evropskem EN14015 standardu. Postopka sta sicer identična, rezervoar pa prevedeta na nadomesten rezervoar z empirično enačbo. Ojačitev postavljena na mesto izračunano po zgornjih standardih sovpada z največjo idealno elastično kritično uklonsko napetostjo. Majhna razlika nastane edino zaradi zahteve standardov po izogibanju postavitve ojačitve v območje 150mm okoli horizontalnega spoja segmentov. Ta je verjetno navedena zaradi izogibanja konicam napetosti, ki se že tako pojavijo v okolici spremembe debeline stene rezervoarja.

Kot že rečeno bi bilo potrebno standarde primerjati na večjem številu rezervoarjev različnih debelin in radijev. V pomoč nam je tudi program »BuckleTank«, ki sem ga izdelal tekom diplomske naloge. Omogoča nam hitro kontrolo stabilnosti, po omenjenih treh standardih, kot tudi generiranje vhodnih podatkov in zagon numerične analize v programu Abaqus.

Iz primerjave lahko sklepamo, da je kontrola po Ameriškem API650 standardu najbolj uporabna in točna. Enostavnost enačb omogoča tudi hiter izračun. Velika pomanjkljivost je, kot že rečeno, da nimamo vpogleda v ozadje enačb. Račun po enačbah priporočil ECCS je zelo dolgotrajen in vsaj za moj referenčni primer ni dal zadovoljivih rezultatov. Evropski EN14015 se od API650 razlikuje le po računu največje dovoljene nepodprte višine rezervoarja, ki pa je bila v obeh primerih manjša in konservativnejša od Ameriškega standarda.

VIRI

[1] MERO ČR, a.s. 2014.

<http://www.mero.cz/en/provoz/rozsireni-ctr-nelahozeves/> (Pridobljeno 9. 10. 2014.)

[2] Steel Tank Institute. 2014.

<https://www.steeltank.com/Portals/0/FIELD%20ERECT%20SECTION/Philadelphia%20Case%20Study.pdf> (Pridobljeno 4. 10. 2014.)

[3] Petron Emirates Contracting & Manufacturing. 2014.

<http://www.petronemirates.com/servtanks.htm> (Pridobljeno 9. 10. 2014.)

[4] University of Puerto Rico at Mayagüez. 2014.

<http://lef.uprm.edu/Failure%20of%20two%20Tanks/Examples%20Wind.html> (Pridobljeno 9. 10. 2014.)

[5] Muhendislik Grubu. 2014.

<http://www.muhendislikgrubu.com/storage1.html> (Pridobljeno 9. 10. 2014.)

[6] Rotter, J.M. (ur.). 2008. Buckling of Steel Shells, European Design Recommendation, N°125, 5th edition. European Convention for Constructional Steelwork.

[7] BS EN 14015:2004. Specification for the design and manufacture of site built, vertical, cylindrical, flat-bottomed, above ground, welded, steel tanks for the storage of liquids at ambient temperature and above

[8] API650:2013. Welded Tanks for Oil Storage, Twelfth Edition, American Petroleum Institute, Washington.

[9] SIST EN 1991-1-1:2004. Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije – 1-1.del: Splošni vplivi – Gostote, lastna teža, koristne obtežbe stavb. Ljubljana, Slovenski inštitut za standardizacijo.

[10] SIST EN 1991-1-4:2005. Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije – 1-4.del: Splošni vplivi – Obtežba vetra. Ljubljana, Slovenski inštitut za standardizacijo. Ljubljana, Slovenski inštitut za standardizacijo.

[11] SIST EN 1993-1-6:2007. Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij – 1-6del: Trdnost in stabilnost lupinastih konstrukcij. Ljubljana, Slovenski inštitut za standardizacijo.

[12] SIST EN 1993-4-2:2007 Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij – 4.2.del: Rezervoarji. Ljubljana, Slovenski inštitut za standardizacijo.

[13] Lemák, D., Studnička, J. 2005. Influence of Ring Stiffeners on a Steel Cylindrical Shell. Acta Polytechnica Vol 45 No. 1, Czech Technical University in Prague: str. 56 – 63.

- [14] Baniotopoulos, C., Lavasas, I. 2009. Background document, Design of Stiffening Rings, HISTWIN WP1.6. Hamburg, GLWIND.
<http://www.statika.gr/arthra/histwin/wp/stiff-rings.pdf> (Pridobljeno 16. 10. 2014.)
- [15] Maraveas, C., Miamis, K. 2013. Shell Buckling evaluation of thin-walled steel tanks filled at low liquid level according to current design codes. V: Proceedings of the Annual Stability Conference, Missouri, ZDA: str. 710 – 724.
- [16] Brown, C.J. (ur.), Nielsen J. (ur.). 1998. Silos – Fundamentals of theory, behaviour and design. London, E&FN SPON: 836 str.
- [17] Teng, J.G. (ur.), Rotter, J.M. (ur.). 2004. Buckling of Thin Metal Shells. London, Spon Press: 493 str.
- [18] ArcelorMital. 2014.
http://www.constructalia.com/english/products/structures/steel_sections_and_merchant_bars#.VDMQWhYYrsU (Pridobljeno 6. 10. 2014.)
- [19] Godoy, L. A., Mendez-Degró, J. C. 2001. Buckling of aboveground storage tanks with conical roof, Thin-Walled Structures: 661 - 668.