

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:

Hlastec, J. 2012. Projektiranje jeklenih valjastih rezervoarjev. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Beg, D.): 34 str.

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:

Hlastec, J. 2012. Projektiranje jeklenih valjastih rezervoarjev. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Beg, D.): 34 pp.

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 ŠTUDIJ
PRVE STOPNJE
GRADBENIŠTVA

Kandidat:

JAN HLASTEC

**PROJEKTIRANJE JEKLENIH VALJASTIH
REZERVOARJEV**

Diplomska naloga št.: 4/B-GR

DESIGN OF STEEL CYLINDRICAL TANKS

Graduation thesis No.: 4/B-GR

Mentor:
prof. dr. Darko Beg

Predsednik komisije:
izr. prof. dr. Janko Logar

Somentor:
asist. dr. Franc Sinur

Član komisije:
doc. dr. Tomo Cerovšek

Ljubljana, 18. 09. 2012

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Podpisani JAN HLASTEC izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom:
»PROJEKTIRANJE JEKLENIH VALJASTIH REZERVOARJEV«.

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

Slovenske Konjice 1.9.2012

Jan Hlastec

BIBLIOGRAFSKO DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	624.014.2:624.074.4(043.2)
Avtor:	Jan Hlastec
Mentor:	prof. dr. Darko Beg
Somentor:	asist. dr. Franc Sinur
Naslov:	Projektiranje jeklenih valjastih rezervoarjev
Tip dokumenta:	Diplomsko delo – univerzitetni študij
Obseg in oprema:	34 str., 10 pregl., 19 sl., 61 en.
Ključne besede:	jekleni rezervoarji, SIST EN 1993-1-6, nosilnost in stabilnost jeklenih lupinastih konstrukcij, mejno stanje nosilnosti LS1, mejno stanje stabilnosti LS3

Izvleček

V diplomskem delu je obravnavano področje jeklenih lupinastih konstrukcij. Predstavil sem postopek projektiranja jeklenih valjastih rezervoarjev po Evrokod standardu. Obravnavano je plastično mejno stanje nosilnosti in mejno stanje stabilnosti jeklenih lupinastih konstrukcij. V programskem okolju Matlab je izdelan program za izračun jeklenih valjastih rezervoarjev za mejna stanja nosilnosti in stabilnosti.

Poudarek diplomske naloge je na razumevanju postopka projektiranja jeklenih valjastih rezervoarjev in izdelavi računalniškega programa v programskem okolju Matlab. Izdelan program je uporabljen pri izračunu konkretnega primera rezervoarja in se lahko uporablja kot pomoč pri projektiranju rezervoarjev v praksi.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 624.014.2:624.074.4(043.2)
Author: Jan Hlastec
Supervisor: prof. Darko Beg, Ph. D.
Cosupervisor: assist. Franc Sinur, Ph. D.
Title: Design of steel cylindrical tanks
Document type: Graduation Thesis – University studies
Scope and tools: 34 p., 10 tab., 19 fig., 61 eq.
Keywords: steel tanks, SIST EN 1993-1-6, strength and stability of steel shell structures, plastic limit state LS1, buckling limit state LS3

Abstract:

The thesis deals with the area of steel shell structures. Presented is the design process of steel cylindrical tanks using Eurocode standards. I dealt with the plastic limit states and stability limit state of steel shell structures. A program for the calculation of cylindrical steel tanks for the limit state of strength and stability is made in Matlab.

The focus of this work is on understanding the design process of cylindrical steel tanks and creating a computer program in Matlab. Created program is used in the calculation of the practical case and can be used as an aid in the design of tanks in practice.

ZAHVALA

Za pomoč pri razumevanju študijskega gradiva se zahvaljujem mentorju prof. dr. Darku Begu, za pomoč pri izdelavi računalniškega programa pa se iskreno zahvaljujem somentorju asist. dr. Francu Sinurju.

Zahvaljujem se tudi staršem, ki so mi omogočili študij in vsem bližnjim, ki so mi pri študiju stali ob strani.

KAZALO VSEBINE

Stran za popravke	I
Izjave	II
Bibliografsko dokumentacijska stran in izvleček	III
Bibliographic-documentalistic information and abstract	IV
Zahvala.....	V
1 UVOD	1
1.1 O rezervoarjih	1
2 PROJEKTIRANJE JEKLENIH VALJASTIH REZERVOARJEV	2
2.1 Vplivi na rezervoarje	2
2.1.1 Določitev obtežb	2
2.1.2 Lastna teža	2
2.1.3 Obtežba shranjene tekočine	2
2.1.4 Teža snega	2
2.1.5 Obtežba vetra	3
2.2 Obtežne kombinacije	5
2.2.1 Določitev kombinacij	5
2.2.2 Osnovna kombinacijska enačba	5
2.2.3 Obtežna kombinacija za kontrolo plastičnega mejnega stanja nosilnosti LS1	5
2.2.4 Obtežna kombinacija za kontrolo stabilnosti konstrukcije LS3.....	6
2.3 Projektne napetosti	7
2.3.1 Določitev napetosti.....	7
2.4 Kontrola plastifikacije	9
2.4.1 Membranska teorija	9
2.4.2 Linearno elastična analiza	9
2.5 Kontrola stabilnosti LS3	10
2.5.1 Stabilnost konstrukcije	10
2.5.2 Geometrijske karakteristike in odstopanja pri izdelavi rezervoarjev.....	11
2.5.2.1 Robni pogoji	11
2.5.2.2 Odmik od pravilne ukrivljenosti rezervoarja	11
2.5.2.3 Naključna ekscentričnost	12

2.5.2.4	Izbokline.....	12
2.5.3	Projektne vrednosti napetosti in projektna odpornost.....	13
2.5.4	Omejitve napetosti.....	14
2.6	Rezervoarji s konstantno debelino plašča	15
2.6.1	Določitev kritični uklonskih napetosti	15
2.6.2	Kritične vertikalne uklonske napetosti.....	16
2.6.2.1	Vertikalni uklonski parametri	16
2.6.3	Kritične obodne uklonske napetosti	17
2.6.3.1	Obodni uklonski parametri	19
2.6.4	Kritične strižne uklonske napetosti	20
2.6.4.1	Strižni uklonski parametri.....	21
2.6.5	Kombinacija vertikalnih, obodnih in strižnih napetosti	21
2.7	Rezervoarji s spremenljivo debelino plašča	22
2.7.1	Kritične vertikalne uklonske napetosti.....	22
2.7.2	Kritične obodne uklonske napetosti	22
2.7.2.1	Omejitve napetosti	24
2.7.3	Kritične strižne uklonske napetosti	24
3	PRIMER IZRAČUNA Z IZDELANIM PROGRAMOM	25
3.1	O programu	25
3.2	Vnos podatkov	25
3.3	Račun obtežb	29
3.4	Kontrola nosilnosti LS1	29
3.5	Kontrola stabilnosti LS3.....	30
3.6	Omejitve programa.....	32
4	ZAKLJUČEK.....	33
VIRI.....		34

KAZALO SLIK

Slika 1:	Razdelitev Slovenije na cone za določitev obtežbe snega na tleh (SIST EN 1991-1-3:2004/A101:2008)	3
Slika 2:	Razdelitev slovenije na vetrne cone (SIST EN 1991-1-4:2005/0A101:2007)	4
Slika 3:	Določitev osnih napetosti (SIST EN 1993-1-6:2007, Dodatek A)	8
Slika 4:	Določitev obodnih napetosti (SIST EN 1993-1-6:2007, Dodatek A)	8
Slika 5:	Določitev strižnih napetosti zaradi torzije (SIST EN 1993-1-6:2007, Dodatek A) .	8
Slika 6:	Robni pogoji (SIST EN 1993-1-6:2007)	11
Slika 7:	Primeri odstopanja ukrivljenosti (SIST EN 1993-1-6:2007)	12
Slika 8:	Geometrija rezervoarja (SIST EN 1993-1-6:2007, Dodatek D).....	15
Slika 9:	Pretvorba vpliva vetra (SIST EN 1993-1-6:2007, Dodatek D)	20
Slika 10:	Območje interakcije (SIST EN 1993-1-6:2007, Dodatek D)	21
Slika 11:	Pretvorba cilindra s spremenljivo višino (SIST EN 1993-1-6:2007, Dodatek D) .	23
Slika 12:	Diagrami za določitev faktorja κ (SIST EN 1993-1-6:2007, Dodatek D)	23
Slika 13:	Slika rezervoarja	25
Slika 14:	Podatki o geometriji rezervoarja in materialu.....	26
Slika 15:	Obtežbe pri kontroli nosilnosti.....	27
Slika 16:	Obtežbe pri kontroli stabilnosti.....	28
Slika 17:	Podatki o lokaciji rezervoarja	29
Slika 18:	Kontrola nosilnosti	30
Slika 19:	Kontrola stabilnosti	32

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1:	Opis kategorij terena (SIST EN 1991-1-4).....	4
Preglednica 2:	Vrednosti delnih varnostnih faktorjev za vplive lastne teže, vetra in snega (SIST EN 1990:2004)	6
Preglednica 3:	Vrednosti delnih varnostnih faktorjev za obtežbe tekočin na rezervoarje (SIST EN 1993-4-2).....	7
Preglednica 4:	Kombinacijski faktorji za karakteristično, pogosto in navidezno stalno obtežno kombinacijo (EN 1990:2004, EN 1991-1-3, EN 1991-1-4).....	7
Preglednica 5:	Vrednosti parametra Q (SIST EN 1993-1-6:2007)	17
Preglednica 6:	Vrednosti faktorja $C_{\theta s}$ (SIST EN 1993-1-6:2007).....	18
Preglednica 7:	Vrednosti faktorja C_{θ} (SIST EN 1993-1-6:2007).....	18
Preglednica 8:	Vrednosti faktorja α_{θ} (SIST EN 1993-1-6:2007)	19
Preglednica 9:	Vrednosti faktorja α_{τ} (SIST EN 1993-1-6:2007).....	21
Preglednica 10:	Izračunane vrednosti obtežb	29

»Ta stran je namenoma prazna«

1 UVOD

V diplomski nalogi bom predstavil postopek dimenzioniranja vertikalnih jeklenih valjastih rezervoarjev po standardu EN 1993-1-6, ki podaja osnovna pravila projektiranja jeklenih lupinastih konstrukcij. Omejil se bom na analizo rezervoarjev, ki so s togimi ojačitvami razdeljeni na polja. Vsako polje lahko obravnavamo kot posamezen rezervoar, ki izpolnjuje zahteve glede robnih pogojev za poenostavljene analize. V programskem okolju MATLAB bom izdelal program za izvajanje kontrole dopustnih napetosti na meji elastičnosti (LS1) in kontrole stabilnosti konstrukcije (LS3).

1.1 O REZERVOARJIH

Rezervoar je lupinasta konstrukcija namenjena shranjevanju tekočin. V diplomski nalogi so obravnavani rezervoarji, ki imajo plašč sestavljen iz več jeklenih segmentov različnih višin in debelin. Plašč rezervoarja je lahko s togimi ojačitvami razdeljen na polja, ki jih obravnavamo kot samostojne cilindre, ali pa so dodane sekundarne ojačitve, ki povečajo stabilnost plašča. Glede na pritrditev rezervoarja na temeljno podlago, ločimo več primerov robnih pogojev.

V času obratovanja je rezervoar izpostavljen obremenitvam, ki so posledica lastne teže, hidrostatičnih pritiskov shranjene tekočine, obtežbe snega in vetra. V zaprtih rezervoarjih lahko pri hitrem praznjenju pride do pojava vakuuma. V splošnem mora biti rezervoar dimenzioniran tako, da prenese vse navedene obtežbe in izjemne obtežbe kot so potres in požar. Izpolnjeni morajo biti splošni pogoji varnosti, ki so podani v standardu SIST EN 1990.

V diplomski nalogi so obravnavani enostavni obtežni primeri, sestavljeni iz obtežbe zaradi lastne teže, shranjene tekočine, teže snega in vetra. Predpostavljeno je osno simetrično obtežno in napetostno stanje odprtih rezervoarjev s streho.

2 PROJEKTIRANJE JEKLENIH VALJASTIH REZERVOARJEV

2.1 VPLIVI NA REZERVOARJE

2.1.1 Določitev obtežb

Diplomska naloga je omejena na določitev obtežb zaradi lastne teže in teže snega, obtežbe vetra in shranjene tekočine. Glede na lastnosti rezervoarja (premer, višina, oblika strehe, ojačitve) izračunamo obremenitve, ki so posledica lastne teže. Obtežbo snega in vetra določimo na podlagi standarda SIST EN 1991, ki podaja postopke, enačbe in različne koeficiente za določitev velikosti obremenitev. Obtežbe zaradi shranjene tekočine in v primeru zaprtih rezervoarjev tudi vakuum obravnava standard SIST EN 1993-4-2, ki pokriva področje jeklenih rezervoarjev.

2.1.2 Lastna teža (SIST EN 1991-1-1)

Za določitev lastne teže plašča rezervoarja je upoštevana prostorninska teža jekla $\gamma = 78,5 \text{ kN/m}^3$. Lastno težo strehe rezervoarja ocenimo na podlagi premera rezervoarja in izvedbe strešne konstrukcije.

2.1.3 Obtežba shranjene tekočine

Obtežbo, ki jo določa shranjena tekočina, določimo iz podatkov o njeni prostorninski teži in višine polnjenja. Velikost obtežbe shranjene tekočine se po višini rezervoarja spreminja linearno.

2.1.4 Teža snega (SIST ENV 1991-1-3)

Velikost obtežbe snega določimo s pomočjo standarda SIST EN 1991. Glede na lokacijo rezervoarja (nadmorska višina in snežna cona) s pomočjo podanih izrazov najprej določimo karakteristično vrednost obtežbe snega na tleh s_k . Kadar se rezervoar nahaja na območju, kjer ne pričakujemo izjemnih snežnih dogodkov, določimo vrednost obtežbe snega na strehi rezervoarja po izrazu:

$$s = \mu_i * C_e * C_t * s_k,$$

kjer je

μ_i oblikovni koeficient obtežbe snega,

C_e koeficient izpostavljenosti,

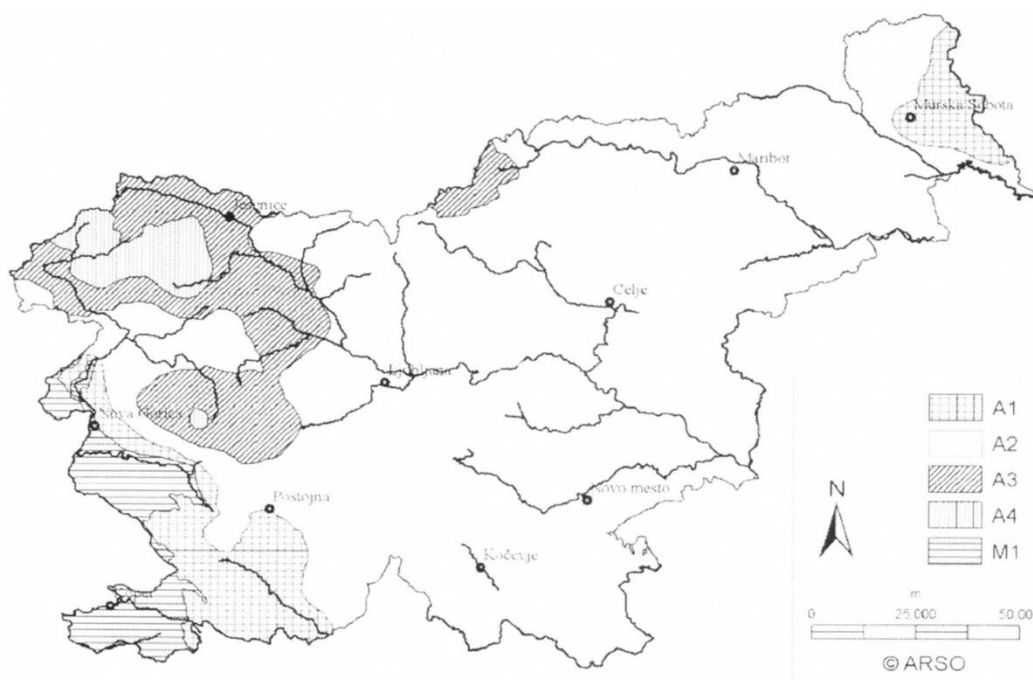
C_t toplotni koeficient,

s_k karakteristična obtežba snega na tleh.

Pri izdelavi programa sem predpostavil naslednje vrednosti koeficientov: $\mu_i=0.8$, $C_e=1$ in $C_t=1$.

Iz vrednosti obtežbe snega na strehi lahko določimo vpliv snega na plašč rezervoarja.

Na spodnji sliki je prikazana razdelitev Slovenije na snežne cone, na podlagi katerih je določena karakteristične vrednosti obtežbe snega na tleh.



Slika 1: Razdelitev Slovenije na cone za določitev obtežbe snega na tleh (SIST EN 1991-1-3:2004/A101:2008)

2.1.5 Obtežba vetra

(SIST EN 1991-1-4)

Območje Slovenije je razdeljeno na tri vetrne cone, kjer je za vsako cono glede na nadmorsko višino podana temeljna vrednost osnovne hitrosti vetra $v_{b,0}$, na podlagi katere določimo osnovno hitrost vetra v_b :

$$v_b = c_{dir} * c_{season} * v_{b,0},$$

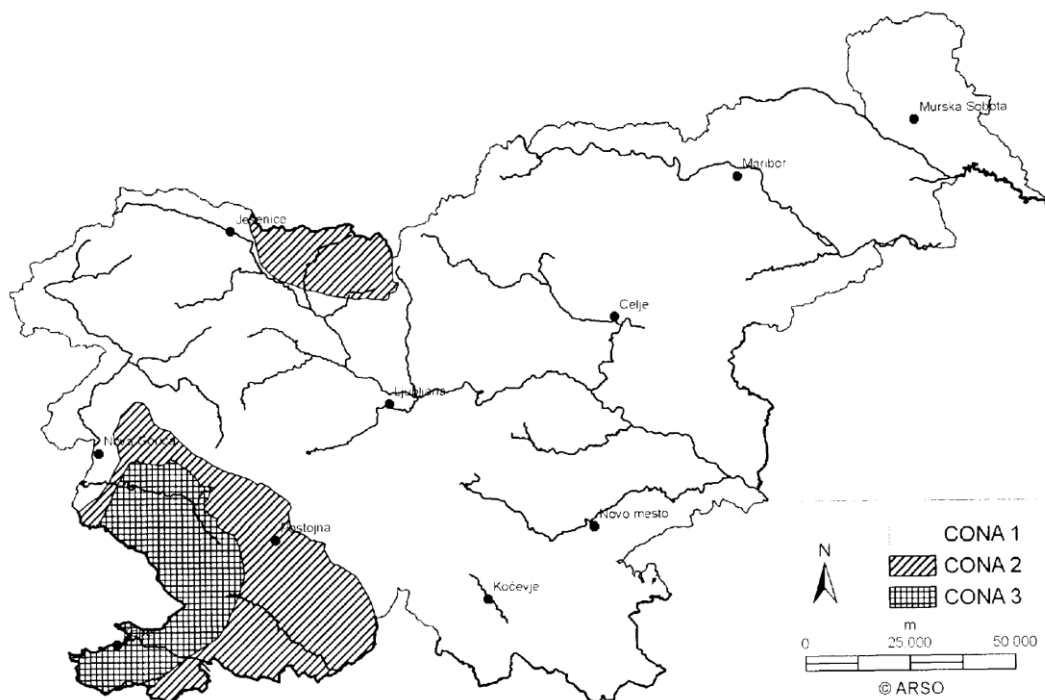
kjer sta koeficienta

c_{dir} koeficient zaradi spreminjanja smeri vetra, priporočena vrednost je 1 in

c_{season} koeficient zaradi spreminjanja vetra v letnih časih, priporočena vrednost je 1.

Lokacijo, kjer se bo nahajal rezervoar, lahko uvrstimo v eno izmed petih kategorij terena.

Razdelitev Slovenije na vetrne cone je prikazana na spodnji sliki.



Slika 2: Razdelitev Slovenije na vetrne cone (SIST EN 1991-1-4:2005/OA101:2007)

Pri določanju vpliva vetra na konstrukcijo je pomembna tudi kategorija terena, s katero opišemo izpostavljenost konstrukcije.

Preglednica 1: Opis kategorij terena (SIST EN 1991-1-4)

Kategorija terena	
0	Morsko ali obalno področje, izpostavljeno proti odprtemu morju.
I	Jezersko ali ravninsko področje z zanemarljivim rastlinjem in brez ovir.
II	Področje z nizkim rastjem (trava) in posameznimi ovirami (drevesi, stavbami) na razdalji najmanj 20 višin ovir.
III	Področja z običajnim rastlinjem ali stavbami ali s posameznimi ovirami na razdalji največ 20 višin ovir (vasi, podeželsko okolje, stalni gozd).
IV	Področje, kjer je najmanj 15% površine pokrite s stavbami s povprečno višino več kot 15 m.

Srednjo hitrost vetra $v_m(z)$, ki je odvisna od hrapavosti in hribovitosti terena in se v splošnem spreminja z višino konstrukcije, določimo s pomočjo izraza:

$$v_m(z) = c_r(z) * c_0(z) * v_b,$$

kjer je v koeficientih $c_r(z)$ in $c_0(z)$ upoštevana kategorija terena. Ob upoštevanju intenzitete vetrne turbulence $I_v(z)$ in gostote zraka ρ pa določimo tlak pri največji hitrosti ob sunkih vetra q_p , ki je osnova za izračun tlaka vetra na zunanje in notranje površine konstrukcij:

$$q_p(z) = [1 + 7 * I_v(z)] * 0.5 * \rho * v_m^2(z).$$

2.2 OBTEŽNE KOMBINACIJE

(SIST EN 1990)

2.2.1 Določitev kombinacij

S pomočjo splošne formule določimo kombinacijo vplivov za stalna in začasna projektna stanja. Vplive, ki delujejo na konstrukcijo, razdelimo glede na čas trajanja obtežbe. Ločimo stalne ter prevladujoče in spremljajoče spremenljive vplive. Projektne vrednosti vplivov, ki jih izračunamo po kombinacijski formuli, se za kontrolo nosilnosti materiala razlikujejo od vrednosti vplivov za kontrolo stabilnosti konstrukcije, saj so za posamezno vrsto kontrole merodajna različna obtežna stanja.

2.2.2 Osnovna kombinacijska enačba:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} * G_{k,j} \text{ "+" } \gamma_{Q,1} * Q_{k,1} \text{ "+" } \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} * \psi_{0,i} * Q_{k,i}$$

$G_{k,j}$ stalni vplivi,

$Q_{k,1}$ prevladujoči spremenljivi vplivi,

$Q_{k,i}$ spremljajoči spremenljivi vplivi,

$\gamma_{G,j}$, $\gamma_{Q,1}$, $\gamma_{Q,i}$ varnostni faktorji za stalne ter prevladujoče in spremljajoče spremenljive vplive,

$\psi_{0,i}$ kombinacijski faktor.

2.2.3 Obtežna kombinacija za kontrolo plastičnega mejnega stanja nosilnosti LS1

V kontroli obravnavamo stanje, pri katerem vsi možni vplivi povzročajo največje vertikalne in obodne napetosti. V obtežni kombinaciji upoštevamo lastno težo plašča in strehe rezervoarja, ki sta pomnoženi z delnim varnostnim faktorjem za stalne vplive $\gamma_{G,j}$. Shranjena tekočina sega do največje višine polnjenja $H_{p,max}$ in predstavlja koristno obtežbo,

zato je pomnožena z varnostnim faktorjem γ_F . Zaradi majhne verjetnosti hkratnega delovanja predstavlja obtežba snega spremljajočo obtežbo, zato njene vrednosti poleg varnostnega faktorja $\gamma_{Q,i}$ pomnožimo še s kombinacijskim koeficientom $\psi_{0,i}$.

$$\gamma_G * (G_{\text{plašča}} + G_{\text{strehe}}) + \gamma_F * Q_{\text{tekočine}} + \gamma_Q * \psi_0 * Q_{\text{sneg}}$$

2.2.4 Obtežna kombinacija za kontrolo stabilnosti konstrukcije LS3

V kontroli stabilnosti plašča rezervoarja obravnavamo prazen rezervoar. Upoštevamo lastno težo rezervoarja in strehe, ki predstavljata stalni vpliv, ter zunanji pritisk vetra na plašč rezervoarja in notranji srk, ki predstavljata prevladujoči spremenljivi vpliv. Spremljajoči spremenljivi vpliv predstavlja vpliv snega na strehi rezervoarja. Preverimo tudi obtežno kombinacijo, v kateri sneg predstavlja prevladujoči spremenljivi vpliv, veter pa spremljajoči spremenljivi vpliv.

V primeru zaprtih rezervoarjev je poleg opisanih obtežb potrebno upoštevati tudi vakuum, ki lahko nastane zaradi hitrega praznjenja rezervoarja. Pri zaprtih rezervoarjih veter ne povzroča notranjega srka, ampak samo zunanji pritisk na plašč rezervoarja.

$$\gamma_G * (G_{\text{plašča}} + G_{\text{strehe}}) + \gamma_Q * \psi_0 * Q_{\text{sneg}} + \gamma_Q * (Q_{\text{veter}} + Q_{\text{veter,podtlak}})$$

$$\gamma_G * (G_{\text{plašča}} + G_{\text{strehe}}) + \gamma_Q * Q_{\text{sneg}} + \gamma_Q * \psi_0 * (Q_{\text{veter}} + Q_{\text{veter,podtlak}})$$

Preglednica 2: Vrednosti delnih varnostnih faktorjev za vplive lastne teže, vetra in snega (SIST EN 1990:2004)

Projektna situacija	Mejno stanje nosilnosti MSN	
	Stalna obtežba (γ_G)	Spremenljiva obtežba (γ_Q)
Osnovna		
Ugoden vpliv	1,0	0
Neugoden vpliv	1,35	1,5

Preglednica 3: Vrednosti delnih varnostnih faktorjev za obtežbe tekočin na rezervoarje (SIST EN 1993-4-2)

	Priporočene vrednosti γ_F za spremenljive vplive tekočine
Strupene, eksplozivne, nevarne tekočine	1,4
Vnetljive tekočine	1,3
Ostale tekočine	1,2

Preglednica 4: Kombinacijski faktorji za karakteristično, pogosto in navidezno stalno obtežno kombinacijo (EN 1990:2004, EN 1991-1-3, EN 1991-1-4)

	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Kategorija E	1	0,9	0,8
Sneg	0,6	0,2	0
Veter	0,6	0,5	0

2.3 PROJEKTNE NAPETOSTI

(SIST EN 1993-1-6:2007, Dodatek A)

2.3.1 Določitev napetosti

Pri analizi rezervoarjev sem se omejil na uporabo membranske teorije, pri kateri določamo projektne vrednosti napetosti na podlagi elastičnih analiz. Na podlagi teorema spodnje meje lahko ocenimo konzervativno vrednost napetosti pri plastični porušitvi, ne moremo pa predvideti obnašanja materiala v plastičnem območju. Izrazi za račun projektne vrednosti napetosti, ki so v splošnem odvisni od izbrane analize, so zato zapisani v oblikah, ki veljajo samo za linearno elastično področje materiala.

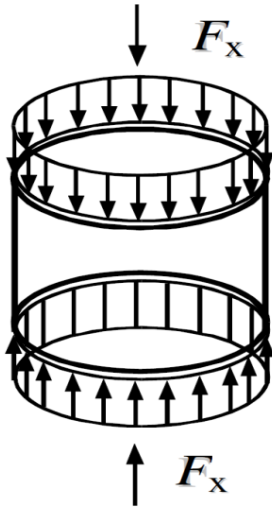
Linearno elastična analiza lupinastih konstrukcij je prav tako poenostavljena metoda analize, vendar so pri robnih pogojih dopuščeni tudi majhni upogibi, pri čemer mora konstrukcija kot celota ostati nedeformirana.

Zaradi privzetih poenostavitev pri obtežbah, ki delujejo na rezervoar, se v stenah rezervoarja pojavijo samo vertikalne in obodne napetosti.

Vertikalne napetosti povzročajo lastna teža plašča in strehe rezervoarja ter obtežba snega na strehi. Obodne napetosti pa so posledica obtežbe shranjene tekočine in pritiska vetra na plašč rezervoarja.

Standard obravnava tudi vertikalne napetosti zaradi globalnega deformiranja rezervoarja in trenja med plaščem rezervoarja in shranjenim medijem. Strižne napetosti pa nastanejo zaradi torzijskega deformiranja rezervoarja (τ).

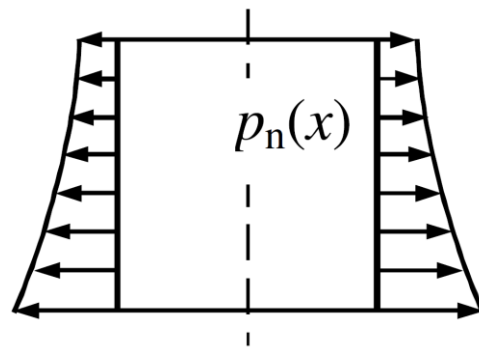
Postopek določitve napetosti v lupini rezervoarja in njihove rezultante nam nazorno podaja standard SIST EN 1993-1-6 v Dodatku A, točka A.1.



$$F_x = 2\pi r P_x, \quad \sigma_x = -\frac{F_x}{2\pi r t}$$

Slika 3: Določitev osnih napetosti

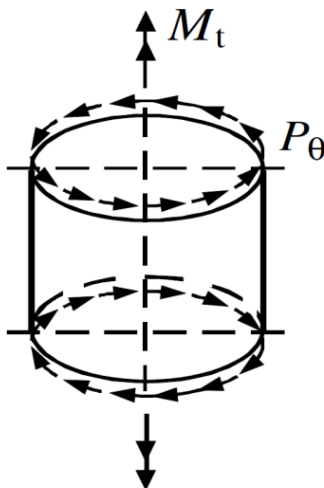
(SIST EN 1993-1-6:2007, Dodatek A)



$$\sigma_\theta(x) = p_n(x) \frac{r}{t}$$

Slika 4: Določitev obodnih napetosti

(SIST EN 1993-1-6:2007, Dodatek A)



$$M_t = 2\pi r^2 P_\theta, \quad \tau = \frac{M_t}{2\pi r^2 t}$$

Slika 5: Določitev strižnih napetosti zaradi torzije

(SIST EN 1993-1-6:2007, Dodatek A)

Glede na debelino stene rezervoarja določimo rezultante napetosti $n_{x,Ed} = \sigma_x * t$, $n_{\theta,Ed} = \sigma_{\theta} * t$ in $n_{x\theta,Ed} = \sigma_{\tau} * t$, kjer je t debelina stene ali segmenta rezervoarja.

2.4 KONTROLA PLASTIFIKACIJE LS1 (EN 1993-1-6:2007, točka 6)

2.4.1 Membranska teorija

Analizo napetosti v rezervoarju lahko izvedemo s pomočjo membranske teorije, ko sta geometrija rezervoarja in obtežba enakomerni in brez skokov ali koncentriranih obtežb, ter ko so robni pogoji takšni, da je omogočen nemoten prenos obtežbe v lupinasto konstrukcijo rezervoarja in naprej v podpore brez nevarnosti pojava uklona. Enačbe veljajo za rezervoarje, ki so osno podprti na enem robu, dopuščeni so radialni pomiki in zasuki na obeh robovih. V splošnem rezultante napetosti pri poenostavljeni membranski teoriji $n_{x,Ed}$, $n_{\theta,Ed}$, in $n_{x\theta,Ed}$ združimo v ekvivalentno projektno napetost:

$$\sigma_{eq,Ed} = \frac{1}{t} * \sqrt{(n_{x,Ed}^2 + n_{\theta,Ed}^2 - n_{x,Ed} * n_{\theta,Ed} + 3n_{x\theta,Ed}^2)}$$

2.4.2 Linearno elastična analiza

Analiza temelji na linearnih materialnih zakonih jekla, zato smo pri računu omejeni na majhne deformacije. Polje membranskih in upogibnih napetosti, ki jih dobimo pri analizi, zadošča pogoju primarnih in sekundarnih napetosti. Rezultanto napetosti $\sigma_{eq,Ed}$ izračunamo kot von Misesovo primerjalno napetost:

$$\sigma_{eq,Ed} = \sqrt{\sigma_{x,Ed}^2 + \sigma_{\theta,Ed}^2 - \sigma_{x,Ed} * \sigma_{\theta,Ed} + 3(\tau_{x\theta,Ed}^2 + \tau_{xn,Ed}^2 + \tau_{\theta n,Ed}^2)}$$

V primeru spremenljive debeline plašča rezervoarja določimo napetosti za posamezno debelino segmenta na njenem spodnjem robu, saj pri tem upoštevamo lastno težo obravnavanega segmenta in večjo vrednost napetosti zaradi obtežbe shranjene tekočine, ki narašča od vrha proti dnu rezervoarja.

Ekvivalentna projektna napetost oziroma von Misesova primerjalna napetost je določena na podlagi projektnih vrednosti obremenitev, ki so določene kot vsota istosmiselnih projektnih vrednosti obremenitev.

Projektna vrednost odpora materiala je določena kot:

$$f_{eq,Rd} = f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0}}$$

kjer sta

f_{yk} karakteristična napetost tečenja, odvisna od kvalitete materiala in

γ_{M0} delni varnostni faktor, priporočena vrednost je 1,0.

Predpostavimo, da je nosilnost materiala izčrpana, ko je zaradi obremenitev v pločevini dosežena napetost na meji tečenja. Za vsako obtežno kombinacijo mora biti izpolnjen pogoj, da je projektna vrednost napetosti v vsaki točki obravnavanega rezervoarja manjša od projektne vrednosti odpora materiala:

$$\sigma_{eq,Ed} \leq f_{eq,Rd} \cdot$$

V primeru, ko je plašč rezervoarja narejen iz enega samega segmenta ali pa so vsi segmenti enake debeline, mora biti izpolnjen pogoj plastifikacije na dnu rezervoarja. Če pa obravnavamo rezervoar s spremenljivo debelino stene plašča, mora biti pogoj izpolnjen za vsak segment posebej, in sicer na spodnjem robu posameznega segmenta.

Kadar projektna vrednost napetosti presega projektno vrednost odpora materiala, moramo postopno izbirati večje debeline segmentov in postopek kontrole izvajati, dokler pogoj ne bo izpolnjen.

Kadar pa je projektna vrednost odpornosti materiala veliko večja od projektne vrednosti napetosti zaradi zunanjih obremenitev, postopno zmanjšujemo debelino segmentov, da je pogoj še vedno izpolnjen. S tem dosežemo optimalno izkoriščenost materiala.

2.5 KONTROLA STABILNOSTI LS3

(EN 1993-1-6:2007, točka 8)

2.5.1 Stabilnost konstrukcije

Mejno stanje izgube stabilnosti konstrukcije je doseženo, ko pride na delu ali celotni konstrukciji rezervoarja do nenadnih velikih pomikov, ki so posledica izgube stabilnosti zaradi tlačnih ali strižnih napetosti v plašču rezervoarja. Konstrukcija ni več sposobna prevzeti obremenitev, kar lahko vodi do popolne porušitve.

Kontrola stabilnosti plašča rezervoarja temelji na določitvi kritičnih uklonskih napetosti v vertikalni in obodni smeri, s pomočjo katerih določimo projektno vrednost uklonske odpornosti posameznih segmentov ali polj plašča rezervoarja.

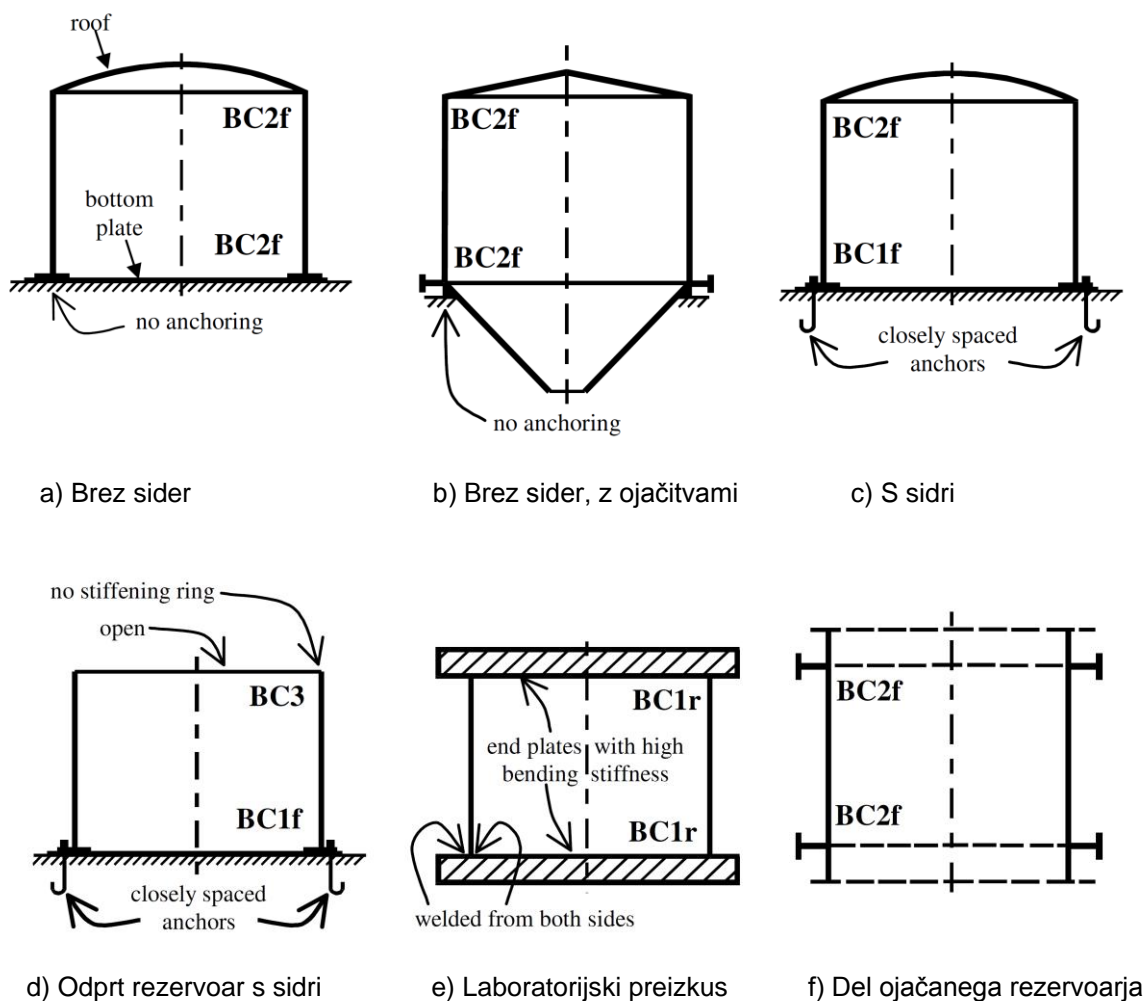
Pomembno vlogo pri določitvi kritičnih uklonskih napetosti imajo robni pogoji, ki definirajo posamezna polja plašča rezervoarja. V diplomski nalogi so obravnavani rezervoarji, pri katerih je upoštevana predpostavka, da so dodane ojačitve toge.

Pred kontrolo stabilnosti je potrebno oceniti kvaliteto izdelave plašča rezervoarja. Preveriti je potrebno simetričnost rezervoarja in morebitno ekscentričnost pri spajanju segmentov plašča rezervoarja. Postopek določitve parametrov, ki vplivajo na izbiro razreda kvalitete izdelave, je predstavljen v nadaljevanju.

2.5.2 Geometrijske karakteristike in odstopanja pri izdelavi rezervoarjev

2.5.2.1 Robni pogoji

(EN 1993-1-6:2007, Slika 8.1)



Slika 6: Robni pogoji (SIST EN 1993-1-6:2007)

2.5.2.2 Odmik od pravilne ukrivljenosti rezervoarja:

Velikost odstopanja U_r od pravilne ukrivljenosti rezervoarja se določi z izrazom:

$$U_r = \frac{d_{\max} - d_{\min}}{d_{\text{nom}}}$$

kjer so

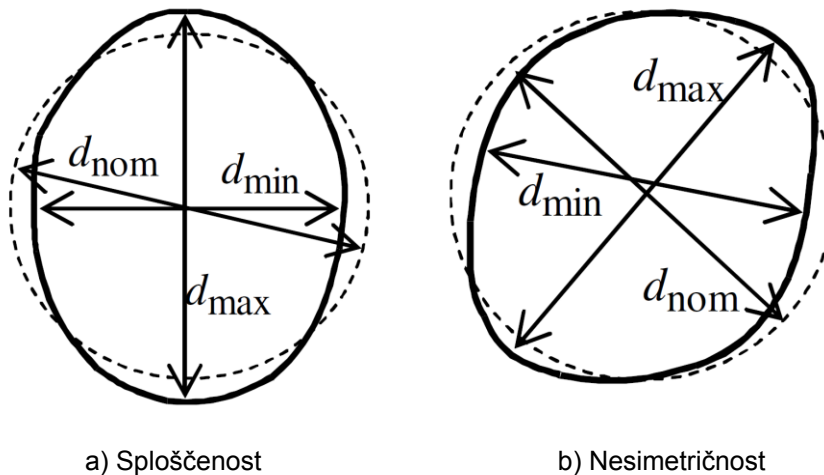
d_{\max} največji izmerjeni notranji premer,

d_{\min} najmanjši izmerjeni notranji premer,

d_{nom} nominalni notranji premer.

Parameter U_r mora biti manjši od največjega dovoljenega odstopanja ukrivljenosti rezervoarja, ki je določen na podlagi razreda kvalitete izvedbe rezervoarja:

$$U_r \leq U_{r,\text{max}} \cdot$$



Slika 7: Primeri odstopanja ukrivljenosti (SIST EN 1993-1-6:2007)

2.5.2.3 Naključna ekscentričnost:

Glede na razred kvalitete izvedbe se določi največjo dovoljeno ekscentričnost spojev segmentov v plašču rezervoarja.

Vrednost naključne ekscentričnosti U_e ne sme biti večja od največje dovoljene ekscentričnosti $U_{e,\text{max}}$.

$$U_e \leq U_{e,\text{max}} \cdot$$

2.5.2.4 Izbokline:

Kontrolo izboklin je potrebno preveriti v vertikalni, v obodni smeri ter preko zvarov. Izmerjene vrednosti velikosti izboklin v vertikalni smeri U_{0x} , obodni smeri $U_{0\theta}$ in U_{0w} ne smejo biti večje od največje dovoljene velikosti izbokline $U_{0,\text{max}}$, ki se določi glede na razred kvalitete izdelave:

$$U_{0x} \leq U_{0,\text{max}}, \quad U_{0\theta} \leq U_{0,\text{max}} \text{ in } \quad U_{0w} \leq U_{0,\text{max}} \cdot$$

2.5.3 Projektne vrednosti napetosti in projektna odpornost

(EN 1993-1-6:2007, točka 8.5)

Za določitev napetosti, ki so posledica zunanje obremenitve, uporabimo projektne vrednosti napetosti $\sigma_{x,Ed}$, $\sigma_{\theta,Ed}$ in $\tau_{x\theta,Ed}$, ki smo jih določili z linearno elastično analizo. V primeru osno simetričnih pogojev obtežbe in podpiranja lahko uporabimo tudi projektne vrednosti napetosti, ki smo jih določili z membransko teorijo lupinastih konstrukcij. V analizi stabilnosti konstrukcije se tlačne napetosti upoštevajo s pozitivnim predznakom.

Projektna odpornost se določi na podlagi uklonskih napetosti z izrazi:

$$\sigma_{x,Rd} = \frac{\sigma_{x,Rk}}{\gamma_{M1}}, \quad \sigma_{\theta,Rd} = \frac{\sigma_{\theta,Rk}}{\gamma_{M1}}, \quad \tau_{x\theta,Rd} = \frac{\tau_{x\theta,Rk}}{\gamma_{M1}},$$

kjer γ_{M1} predstavlja delni faktor za uklonsko odpornost, priporočena vrednost faktorja $\gamma_{M1}=1,1$.

Karakteristične uklonske napetosti določimo z redukcijo karakteristične napetosti na meji tečenja z uklonskim koeficientom χ :

$$\sigma_{x,Rk} = \chi_x * f_{yk}, \quad \sigma_{\theta,Rk} = \chi_{\theta} * f_{yk}, \quad \tau_{x\theta,Rk} = \frac{\chi_{\tau} * f_{yk}}{\sqrt{3}}.$$

Uklonski redukcijski koeficienti χ_x , χ_{θ} in χ_{τ} so določeni kot funkcija relativne vitkosti plašča rezervoarja:

$$\chi = \begin{cases} 1, & \lambda \leq \lambda_0 \\ 1 - \beta \left(\frac{\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0}{\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_0} \right)^{\eta}, & \bar{\lambda}_0 \leq \bar{\lambda} \leq \bar{\lambda}_p \\ \frac{\alpha}{\bar{\lambda}^2}, & \bar{\lambda}_p \leq \bar{\lambda} \end{cases}$$

α je redukcijski faktor elastične nepopolnosti,

β je faktor plastičnega območja,

η je interakcijski eksponent,

$\bar{\lambda}_0$ je tlačna meja relativne vitkosti.

Vrednosti teh parametrov podaja standard v Dodatku D.

Vrednost plastične meje relativne vitkosti $\bar{\lambda}_p$ določimo kot:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha}{1-\beta}}.$$

Parametri relativne vitkosti za druge komponente napetosti določimo po naslednjih enačbah:

$$\bar{\lambda}_x = \sqrt{\frac{f_{yk}}{\sigma_{x,Rcr}}}, \quad \bar{\lambda}_\theta = \sqrt{\frac{f_{yk}}{\sigma_{\theta,Rcr}}}, \quad \bar{\lambda}_\tau = \sqrt{\frac{f_{yk}/3}{\tau_{x\theta,Rcr}}}.$$

2.5.4 Omejitve napetosti

Uklon konstrukcije ni posledica samo prevelikih napetosti, vendar se v okviru membranske teorije lahko zagotovi varnost konstrukcije tako, da omejimo projektne vrednosti napetosti, ki se pojavijo v plašču rezervoarja. Omejitve projektnih napetosti ne zajemajo upogibnih napetosti zaradi lokalnih obtežb in temperaturnih vplivov, zato standard opozarja, da je za ta stanja potrebno izvesti dodatne kontrole.

Odvisno od obtežnega in napetostnega stanja je potrebno izpolniti pogoje omejitve za eno oziroma več napetosti:

$$\sigma_{x,Ed} \leq \sigma_{x,Rd}, \quad \sigma_{\theta,Ed} \leq \sigma_{\theta,Rd}, \quad \tau_{x\theta,Ed} \leq \tau_{x\theta,Rd}.$$

Kadar se zaradi obtežbe, ki deluje na konstrukcijo, pojavi več kot ena, za uklon pomembnih napetosti, je potrebno preveriti interakcijo projektnih vrednosti napetosti po naslednji enačbi:

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

Napetosti, ki nastopajo v zgornji enačbi, predstavljajo tlačne napetosti, ki pomembno vplivajo na stabilnost konstrukcije. V primeru, da je katera izmed napetosti natezna, se v izrazu uporabi, kot da je njena vrednost enaka 0.

Uklonski interakcijski koeficienti se določijo po naslednjih izrazih:

$$k_x = 1,0 + \chi_x^2,$$

$$k_\theta = 1,0 + \chi_\theta^2,$$

$$k_\tau = 1,5 + 0,5 * \chi_\tau^2,$$

$$k_i = (\chi_x * \chi_\theta)^2.$$

2.6 REZERVOARJI S KONSTANTNO DEBELINO PLAŠČA

(EN 1993-1-6:2007, Dodatek D.1)

2.6.1 Določitev kritičnih uklonskih napetosti

Obravnavamo rezervoarje, ki so med ojačitvami narejeni iz enega samega segmenta ali več segmentov enake debeline. Pri določitvi parametrov stabilnosti in kritičnih uklonskih napetosti upoštevamo vrednost modula elastičnosti $E = 21 \cdot 10^7 \text{ kN/m}^2$. Izrazi za uklonske kritične napetosti veljajo za rezervoarje oziroma segmente, ki izpolnjujejo pogoje glede zahtevanih robnih pogojev.

Karakteristična višina cilindra, ki določa ali je rezervoar oziroma polje rezervoarja kratko, srednje dolgo ali dolgo, je določena z brezdimenzijskim dolžinskim parametrom ω :

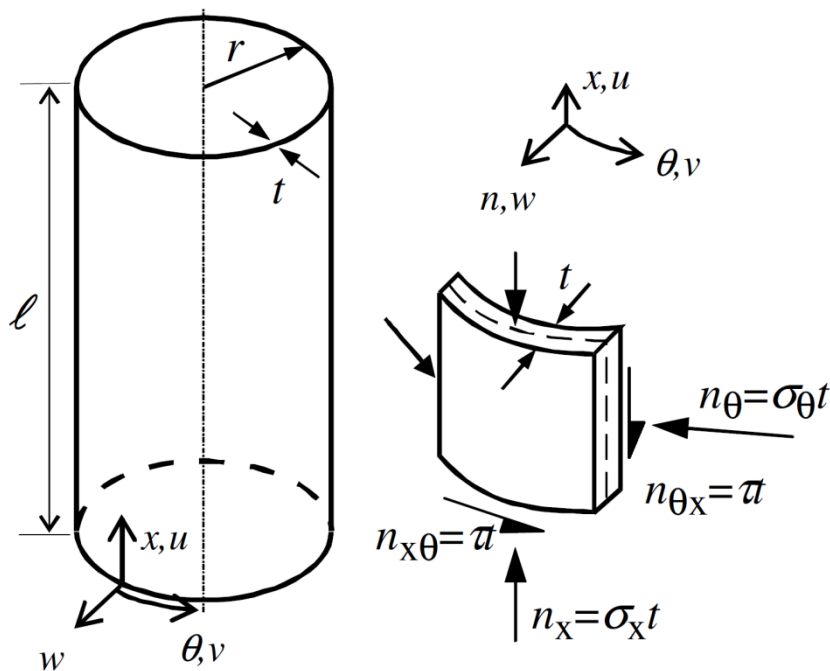
$$\omega = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{r}{t}}$$

kjer je:

l višina polja,

t debelina segmenta,

r polmer rezervoarja.



Slika 8: Geometrija rezervoarja (SIST EN 1993-1-6:2007)

2.6.2 Kritične vertikalne uklonske napetosti

Kadar cilinder izpolnjuje pogoj:

$$\frac{r}{t} \leq 0,03 \frac{E}{f_{yk}}, \text{ ni potrebna kontrola vertikalnega uklona plašča rezervoarja.}$$

Kritično vertikalno uklonsko napetost določimo glede na dolžinski parameter cilindra:

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

$$C_x = \begin{cases} 1,36 - \frac{1,83}{\omega} + \frac{2,07}{\omega^2} & \text{za } \omega \leq 1,7 \text{ (kratki rezervoarji)} \\ 1 & \text{za } 1,7 \leq \omega \leq 0,5 \frac{r}{t} \text{ (srednje dolgi rezervoarji)}, \\ C_{xN} & \text{za } \omega > 0,5 \frac{r}{t} \text{ (dolgi rezervoarji)} \end{cases}$$

$$C_{xN} > \begin{cases} 1 + \frac{0,2}{C_{xb}} \left[1 - 2\omega \frac{t}{r} \right], \\ 0,60 \end{cases}$$

koeficient C_{xb} je odvisen od robnih pogojev na zgornjem in spodnjem robu rezervoarja in

$$\text{velja: } C_{xb} = \begin{cases} 6 \text{ za } BC 1, BC 1 \\ 3 \text{ za } BC 1, BC 2 \\ 1 \text{ za } BC 2, BC 2 \end{cases}$$

2.6.2.1 Vertikalni uklonski parametri

Redukcijski faktor vertikalne elastične nepopolnosti α_x določimo po izrazu:

$$\alpha_x = \frac{0,64}{(1+1,91(\Delta w_k/t)^{1,44})^2}$$

Δw_k v izrazu predstavlja karakterističen odmik nepopolnosti, ki je odvisen od razreda kvalitete izvedbe.

$$\Delta w_k = \frac{1}{Q} * t * \sqrt{\frac{r}{t}}$$

Parameter kvalitete izdelave rezervoarja je določen za posamezen razred kvalitete izdelave.

Preglednica 5: Vrednosti parametra Q (SIST EN 1993-1-6:2007)

Razred kvalitete izdelave	Opis kvalitete	Q
Razred A	Odlična	40
Razred B	Visoka	25
Razred C	Normalna	16

Priporočene vrednosti za tlačno mejo relativne vitkosti $\bar{\lambda}_{x0}$, faktor plastičnega območja β in interakcijski koeficient η so:

$$\bar{\lambda}_{x0} = 0,20, \quad \beta = 0,60, \quad \eta = 1,0.$$

2.6.3 Kritične obodne uklonske napetosti

Izrazi za kritične obodne tlačne napetosti veljajo za vse vrste robnih pogojev.

Kadar cilindar izpolnjuje pogoj:

$$\frac{r}{t} \leq 0,21 \sqrt{\frac{E}{f_{yk}}},$$

ni potrebna kontrola obodnega uklona plašča rezervoarja.

Za kratke cilindre, ki so določeni z izrazom;

$$\frac{\omega}{c_{\theta}} < 20,$$

izračunamo kritično obodno uklonsko napetost po enačbi:

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

Faktor zunanjega uklonskega pritiska za kratke cilindre $C_{\theta s}$ določimo glede na robne pogoje iz Preglednice 6, ki jo podaja standard.

Preglednica 6: Vrednosti faktorja $C_{\theta s}$ (SIST EN 1993-1-6:2007)

Primer	Rob rezervoarja	Robni pogoj	Vrednost $C_{\theta s}$
1	rob 1, rob 1	BC 1, BC 1	$1,5 + \frac{10}{\omega^2} - \frac{5}{\omega^3}$
2	rob 1, rob 2	BC 1, BC 2	$1,25 + \frac{8}{\omega^2} - \frac{4}{\omega^3}$
3	rob 1, rob 2	BC 2, BC 2	$1,0 + \frac{3}{\omega^{1,35}}$
4	rob 1, rob 2	BC 1, BC 3	$0,6 + \frac{1}{\omega^2} - \frac{0,3}{\omega^3}$

Za srednje dolge cilindre, ki izpolnjujejo pogoj:

$$20 \leq \frac{\omega}{C_{\theta}} \leq 1,63 \frac{r}{t},$$

izračunamo kritično obodno uklonsko napetost po enačbi:

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

Faktor zunanega uklonskega pritiska za srednje dolge cilindre C_{θ} določimo glede na robne pogoje iz spodnje preglednice, ki jo podaja standard:

Preglednica 7: Vrednosti faktorja C_{θ} (SIST EN 1993-1-6:2007)

Primer	Rob rezervoarja	Robni pogoj	Vrednost C_{θ}
1	rob 1, rob 2	BC 1, BC 1	1,5
2	rob 1, rob 2	BC 1, BC 2	1,25
3	rob 1, rob 2	BC 2, BC 2	1,0
4	rob 1, rob 2	BC 1, BC 3	0,6
5	rob 1, rob 2	BC 2, BC 3	0
6	rob 1, rob 2	BC 3, BC 3	0

Za dolge cilindre, ki so določeni z izrazom:

$$\frac{\omega}{C_{\theta}} > 1,63 \frac{r}{t},$$

izračunamo kritično obodno uklonsko napetost po enačbi:

$$\sigma_{\theta, Rcr} = E \left(\frac{t}{r} \right)^2 \left[0,257 + 2,03 \left(\frac{C_{\theta} r}{\omega t} \right)^4 \right].$$

2.6.3.1 Obodni uklonski parametri

Redukcijski faktor obodne elastične nepopolnosti α_θ določimo glede na razred kvalitete izdelave:

Preglednica 8: Vrednosti faktorja α_θ (SIST EN 1993-1-6:2007)

Razred kvalitete izdelave	Opis kvalitete	α_θ
Razred A	Odlična	0,75
Razred B	Visoka	0,65
Razred C	Normalna	0,50

Priporočene vrednosti za tlačno mejo relativne vitkosti $\bar{\lambda}_{\theta 0}$, faktor plastičnega območja β in interakcijski koeficient η so:

$$\bar{\lambda}_{\theta 0} = 0,40, \quad \beta = 0,60, \quad \eta = 1,0.$$

Glede na dolžinski parameter cilindra ω in faktor zunanlega uklonskega pritiska C_θ , določimo koeficient k_w , s katerim pretvorimo spremenljiv vpliv pritiska vetra na obod rezervoarja v enakomerno porazdeljen zunanji pritisk vetra q_{eq} .

$$q_{eq} = k_w * q_{w,max},$$

$q_{w,max}$ predstavlja največji pritisk vetra, k_w pa določimo po enačbi:

$$k_w = 0,46 \left(1 + 0,1 \sqrt{\frac{C_\theta r}{\omega t}} \right).$$

pri čemer velja omejitev: $0,65 \leq k_w \leq 1,0$.

Za odprte rezervoarje, pri katerih se pojavi tudi notranji srk, določimo vpliv vetra na plašč rezervoarja kot vsoto zunanlega pritiska vetra in notranjega srka na plašč rezervoarja.

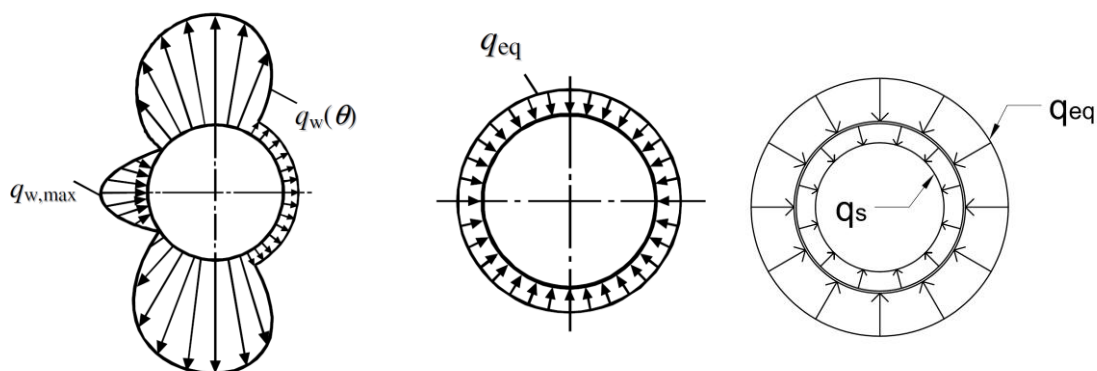
Projektne obodne napetosti, ki jih povzroča veter določimo po enačbi:

$$\sigma_{\theta,Ed} = (q_{eq} + q_s) \frac{r}{t}.$$

q_s predstavlja notranji srk zaradi vetra pri odprtih rezervoarjih.

$$q_s = 0,4 * q_{eq}.$$

Slika 9 prikazuje pretvorbo spremenljivega vpliva vetra na enakomeren vpliv na plašč rezervoarja. Pri kontroli stabilnosti plašča odprtih rezervoarjev se zunanjemu pritisku q_{eq} doda še vpliv notranjega srka q_s .



Slika 9: Pretvorba vpliva vetra (SIST EN 1993-1-6:2007, Dodatek D)

2.6.4 Kritične strižne uklonske napetosti

Izrazi za kritične strižne napetosti veljajo samo v primerih, ko je na obeh robovih izpolnjen robni pogoj BC 1 ali BC 2, kot je definirano na Sliki 7.

Kadar cilindar izpolnjuje pogoj:

$$\frac{r}{t} \leq 0,16 \left[\frac{E}{f_{yk}} \right]^{0,67},$$

ni potrebna kontrola strižnega uklona plašča rezervoarja.

Kritično strižno uklonsko napetost izračunamo po izrazu:

$$\tau_{x\theta, Rcr} = 0,75 E C_{\tau} \sqrt{\frac{1}{\omega} \left(\frac{t}{r} \right)}.$$

Za kratke cilindre, ki so določeni z izrazom:

$$\omega < 10,$$

določimo faktor C_{τ} :

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

Za srednje dolge cilindre, ki izpolnjujejo pogoj:

$$10 \leq C_{\tau} \leq 8,7 \frac{r}{t},$$

je faktor C_{τ} določen: $C_{\tau}=1,0$.

Za dolge cilindre, ki so določeni z izrazom:

$$\omega > 8,7 \frac{r}{t},$$

določimo faktor C_τ :

$$C_\tau = \frac{1}{3} \sqrt{\omega \frac{t}{r}}$$

2.6.4.1 Strižni uklonski parametri

Redukcijski faktor strižne elastične nepopolnosti α_τ določimo glede na razred kvalitete izdelave:

Preglednica 9: Vrednosti faktorja α_τ (SIST EN 1993-1-6:2007)

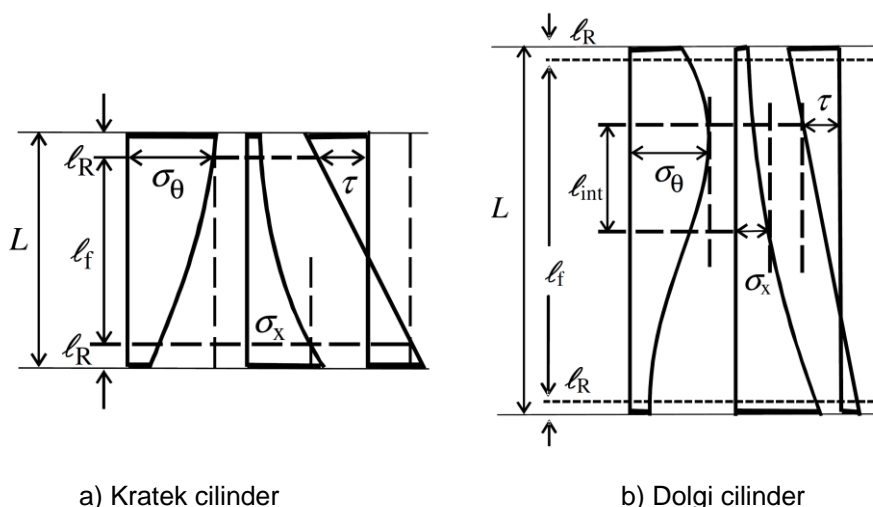
Razred kvalitete izdelave	Opis kvalitete	α_τ
Razred A	Odlična	0,75
Razred B	Visoka	0,65
Razred C	Normalna	0,50

Priporočene vrednosti za tlačno mejo relativne vitkosti $\bar{\lambda}_{\tau 0}$, faktor plastičnega območja β in interakcijski koeficient η so:

$$\bar{\lambda}_{\tau 0} = 0,40, \quad \beta = 0,60, \quad \eta = 1,0.$$

2.6.5 Kombinacija vertikalnih, obodnih in strižnih napetosti

Interakcijo vseh treh membranskih napetosti preverimo v vseh točkah cilindra razen na območju robov. Standard določa velikost odmika od robov l_R . Razdalja l_f določa območje znotraj mej cilindra, kjer izvedemo kontrolo interakcije. Slika 10 prikazuje potek napetosti in območje interakcije v kratkih in dolgih cilindrih.



Slika 10: Območje interakcije (SIST EN 1993-1-6:2007)

2.7 REZERVOARJI S SPREMENLJIVO DEBELINO PLAŠČA

(EN 1993-1-6:2007, Dodatek D.2)

Obravnavamo primer, ko se debelina plašča rezervoarja spreminja po višini.

2.7.1 Kritične uklonske vertikalne napetosti

Vsak segment j z višino l_j obravnavamo kot samostojni cilinder z debelino stene $t=t_j$ in višino $l=L$. Postopek izračuna kritičnih osnih uklonskih napetosti je enak postopku za rezervoarje s konstantno debelino plašča rezervoarja. Izjema je vrednost koeficienta, kjer je konzervativno privzeta vrednost $C_{xb}=1,0$.

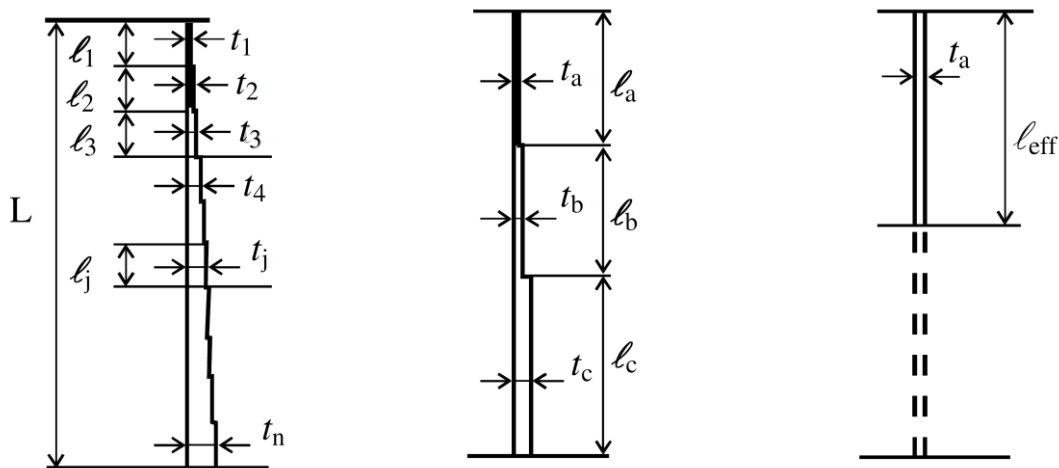
2.7.2 Kritične obodne uklonske napetosti

Glede na število segmentov, iz katerih je sestavljen plašč rezervoarja ali polje med ojačitvami, je določen postopek pretvorbe segmentov z različnimi debelinami na ekvivalentni cilinder s konstantno debelino stene in efektivno višino. Razdelitev plašča rezervoarja na polja je mogoča zaradi predpostavke, da so dodane ojačitve absolutno toge.

1. Če je cilinder sestavljen iz treh segmentov z različnimi debelinami sten, se izvede postopek pretvorbe cilindra z realnimi segmenti po točkah 4) do 7).
2. Če je cilinder sestavljen iz segmentov, ki imajo enako debelino sten, se izvede postopek, ki velja za cilindre s konstantno debelino plašča.
3. Če je cilinder sestavljen iz dveh segmentov z različnima debelinama sten, se izvede postopek po točkah 4) do 7), kjer imata dva od treh fiktivnih segmentov enako višino in debelino.
4. Če je cilinder sestavljen iz več kot treh segmentov z različnimi debelinami sten, se najprej pretvori na ekvivalentni cilinder, sestavljen iz treh segmentov a , b , c . Višina zgornjega segmenta l_a lahko sega do zgornjega roba segmenta, ki ima 1,5 krat večjo debelino stene, hkrati pa ne sme biti večja od polovice celotne višine cilindra. Dolžini ostalih dveh fiktivnih segmentov se določita po enačbah:

$$l_b = l_a \text{ in } l_c = L - 2l_a, \quad \text{če velja } l_a \leq L/3$$

$$l_b = l_c = 0,5(L - l_a), \quad \text{če velja } L/3 \leq l_a \leq L/2.$$



a) Rezervoar s spremenljivo debelino plašča b) Ekvivalentni cilindar iz treh segmentov c) Ekvivalenten cilindar z eno debelino stene

Slika 11: Pretvorba cilindra s spremenljivo višino (SIST EN 1993-1-6:2007)

5. Fiktivne debeline sten cilindra t_a , t_b in t_c določimo kot povprečje debelin realnih segmentov znotraj fiktivnih segmentov a, b in c z utežjo:

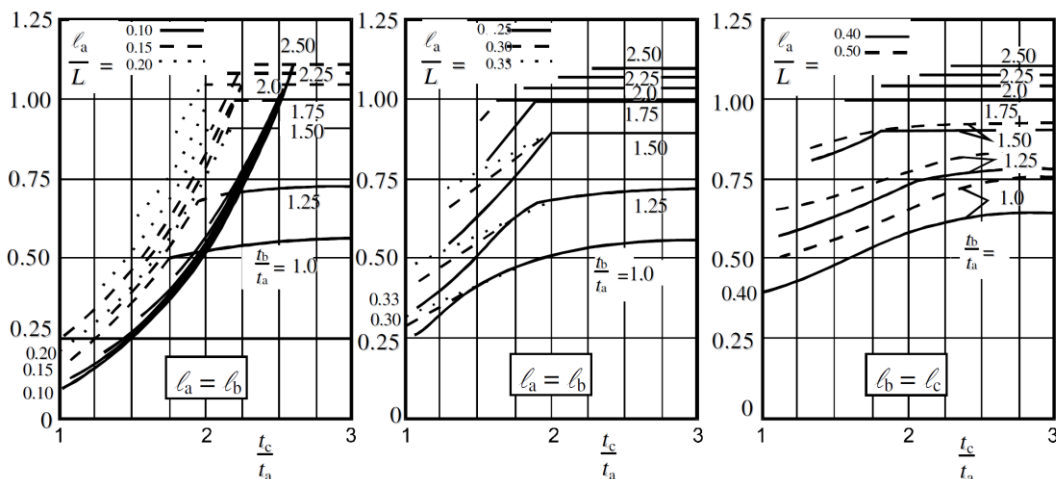
$$t_a = \frac{1}{l_a} \sum_a l_j * t_j,$$

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

$$t_c = \frac{1}{l_c} \sum_c l_j * t_j.$$

6. Cilinder s tremi segmenti (fiktivnimi ali realnimi) pretvorimo na ekvivalenten cilindar s konstantno debelino stene $t=t_a$ in efektivno dolžino l_{eff} .

$l_{eff} = l_a / \kappa$, kjer κ predstavlja brezdimenzijski faktor za pretvorbo dolžine cilindra, ki jo na podlagi razmerja debelin in dolžin segmenta in fiktivnega cilindra odčitamo iz diagramov, ki so prikazani na Sliki 12.



Slika 12: Diagrami za določitev faktorja κ (SIST EN 1993-1-6:2007)

7. Za kratke in srednje dolge segmente cilindra določimo kritično obodno uklonsko napetost za vsak segment j začetnega cilindra po enačbi:

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

kjer $\sigma_{\theta, Rcr, eff}$ predstavlja kritično obodno uklonsko napetost, ki jo izračunamo po postopku za cilindre s konstantno fiktivno debelino t_a in efektivno dolžino l_{eff} . V izračunu uporabimo vrednost koeficienta $C_{\theta}=1,0$.

8. Karakteristična višina segmenta j je določena z brezdimenzijskim parametrom ω_j :

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

9. Za dolge segmente cilindra, ki so določeni z izrazom:

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

izračunamo kritično obodno uklonsko napetost po enačbi:

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

2.7.2.1 Omejitve napetosti

Za vsak segment rezervoarja mora biti izpolnjen splošni pogoj glede omejitve napetosti:

$$\sigma_{\theta, Ed, j} \leq \sigma_{\theta, Rcr, j}.$$

$\sigma_{\theta, Ed, j}$ predstavlja obodno tlačno membransko napetost, v vsakem segmentu rezervoarja

$\sigma_{\theta, Rcr, j}$ pa kritično obodno napetost, ki jo določimo za vsak segment posebej.

2.7.3 Kritične strižne uklonske napetosti

Postopek določitve kritičnih strižnih napetosti v rezervoarju s spremenljivo debelino sten je enak postopku določitve kritičnih obodnih napetosti, kjer v računu uporabimo enačbe za strižne napetosti.

3 PRIMER IZRAČUNA Z IZDELANIM PROGRAMOM

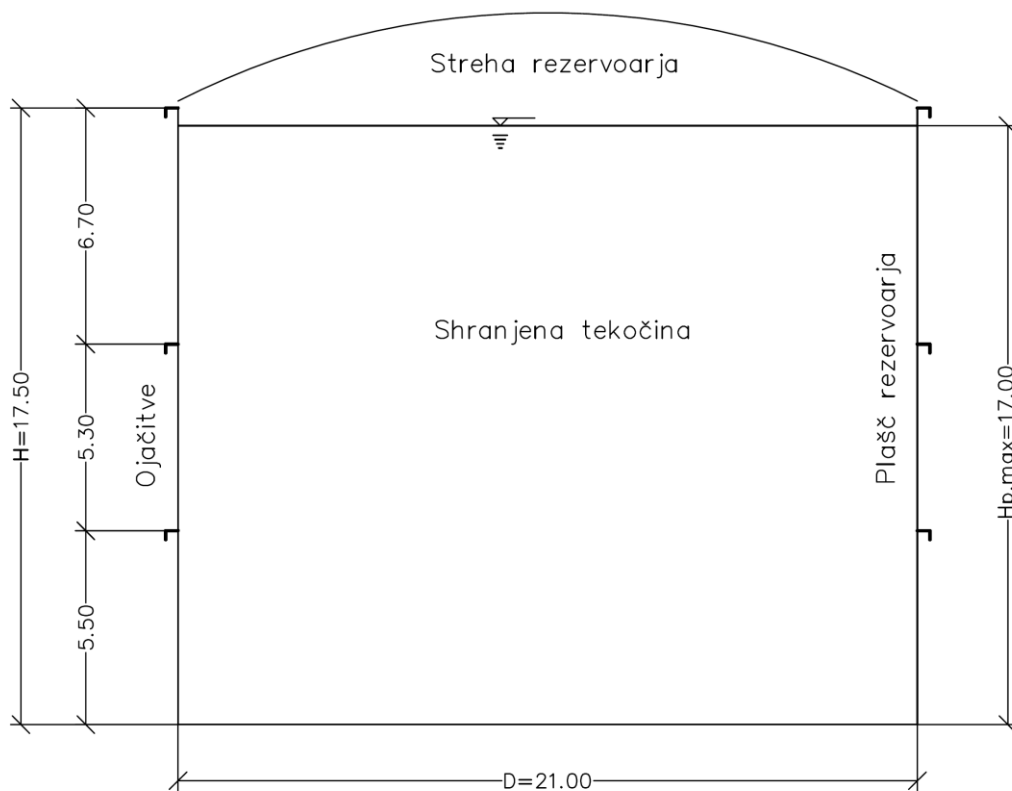
3.1 O PROGRAMU

V programskem okolju Matlab je izdelan program za projektiranje pokončnih jeklenih valjastih rezervoarjev po Evrokod standardu. Pri izdelavi programa je uporabljen postopek in enačbe, ki so predstavljene v tem diplomskem delu. Program je skladno s postopkom razdeljen na več sklopov, kjer se izračunajo vrednosti, ki so pomembne za nadaljnjo analizo rezervoarjev.

Uporabnik vnese podatke o geometrijskih karakteristikah konstrukcije in lokaciji, kjer se bo rezervoar nahajal, program pa glede na podane podatke določi velikosti obtežb in izvede kontrolo nosilnosti LS1 in kontrolo stabilnosti konstrukcije LS3. Rezultat analize je primerjava matrik napetosti zaradi zunanjih obtežb in dovoljene napetosti, ki jih material oziroma konstrukcija prenese, ne da bi pri tem prišlo do poškodb ali izgube stabilnosti.

3.2 PODATKI O REZERVOARJU

Za kontrolo delovanja izdelanega programa sem izbral odprt rezervoar, ki je prikazan na Sliki 13. Za kontrolo nosilnosti LS1 obravnavamo rezervoar napolnjen do največje višine polnjenja $H_{p,max}$, kontrolo stabilnosti pa izvedemo na praznem rezervoarju.



Slika 13: Slika rezervoarja

Izbrane so geometrijske in materialne karakteristike rezervoarja:

Premer	$D = 21 \text{ m}$,
višina	$H = 17.5 \text{ m}$,
največja višina polnjenja	$H_p = 17 \text{ m}$,
karakteristična meja plastičnega tečenja	$f_{yk} = 35.5 * 10^4 \text{ kN/m}^2$,
modul elastičnosti	$E = 21 * 10^7 \text{ kN/m}^2$.

Plašč rezervoarja je sestavljen iz segmentov različnih višin in debelin, njihove vrednosti pa zapišemo v matrični obliki.

Matrika višin segmentov $h = [2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 1.5] \text{ m}$,

matrika debelin segmentov $t = [0.015, 0.015, 0.015, 0.012, 0.01, 0.009, 0.009, 0.008, 0.007] \text{ m}$.

V primeru, da ima rezervoar tudi streho, je potrebno vnesti podatek o lastni teži strehe.

$F_{gs} = 350 \text{ kN}$.

Plašč rezervoarja je s togimi ojačitvami razdeljen na polja, ki so pri kontroli stabilnosti obravnavana kot posamezni cilindri.

Matrika višin ojačitev $h_{oj} = [0, 5.5, 10.8, 17.5] \text{ m}$.

Slika 14 prikazuje zapis podatkov o rezervoarju v računalniškem programu. Za lažje razumevanje so vsem podatkom dodani komentarji s kratkim opisom.

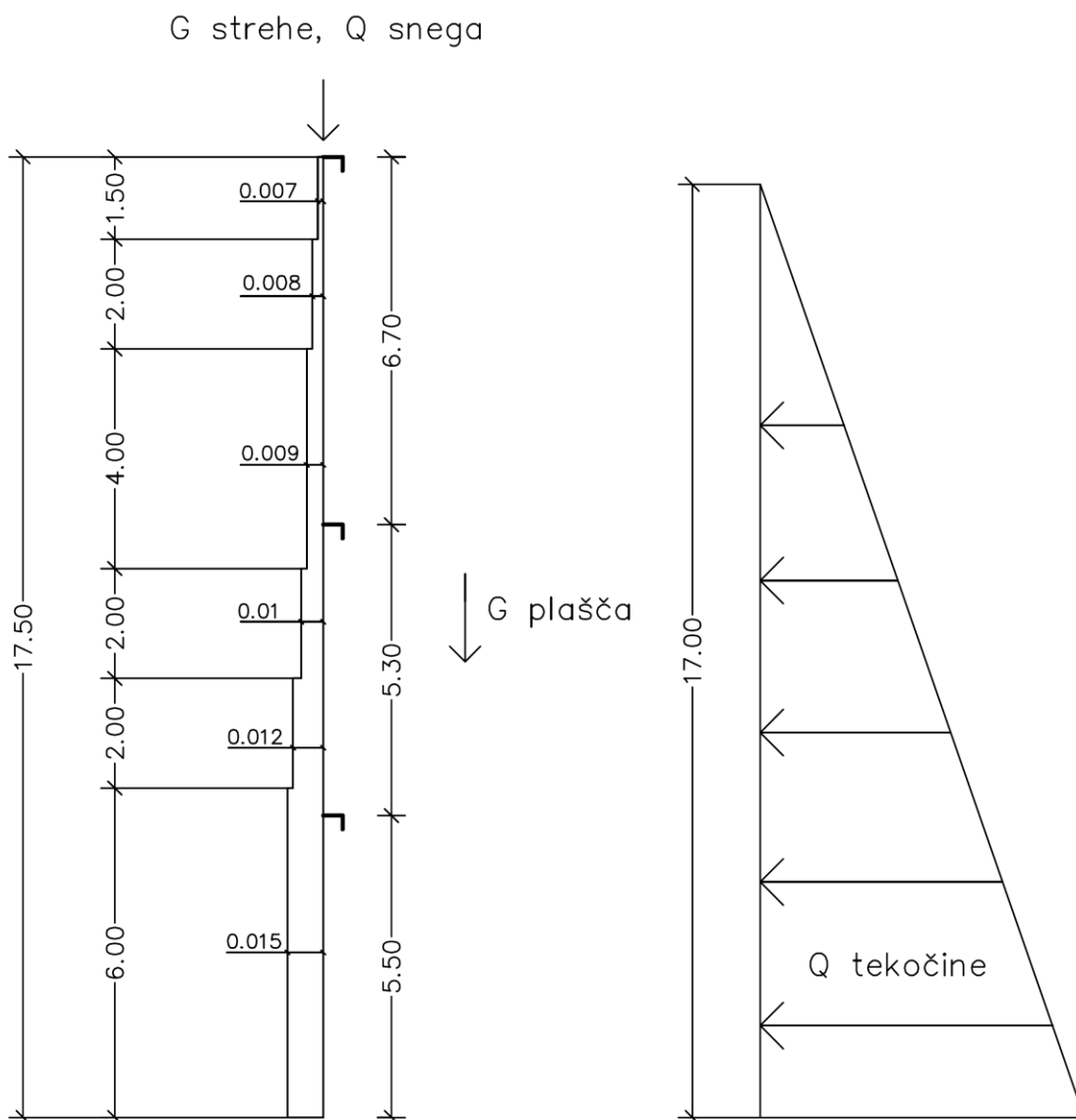
```
%% GEOMETRIJA IN MATERIAL
D=21; %premer rezervoarja [m]
H=17.5; %visina rezervoarja [m]
Hp=17; %visina polnjenja [m]
h=[2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 1.5]; %visina segmentov v plascu rezervoarja s konstantno debelino [m]
t=[0.015, 0.015, 0.015, 0.012, 0.01, 0.009, 0.009, 0.008, 0.007]; %debelina segmentov v plascu rezervoarja [m]
hoj=[0,5.5,10.8,17.5]; %razporeditev ojačitev [m]

fyk=355000; %karakteristična napetost na meji tečenja [kN/m^2]
E=210000000; %modul elasticnosti [kN/m^2]
Fv=0; %vakuum
Fgs=350; %teza strehe [kN]

ro=78.50; %specifična gostota [kN/m^3]
rot=10; %specifična gostota shranjene tekocine [kN/m^3]
roz=0.00125; % gostota zraka [kN/m^3]
alfa=10; %naklon strehe rezervoarja [°]
```

Slika 14: Podatki o geometriji rezervoarja in materialu

Slika 15 prikazuje prerez obravnavanega rezervoarja in obtežbe, ki delujejo nanj za primer kontrole nosilnosti.

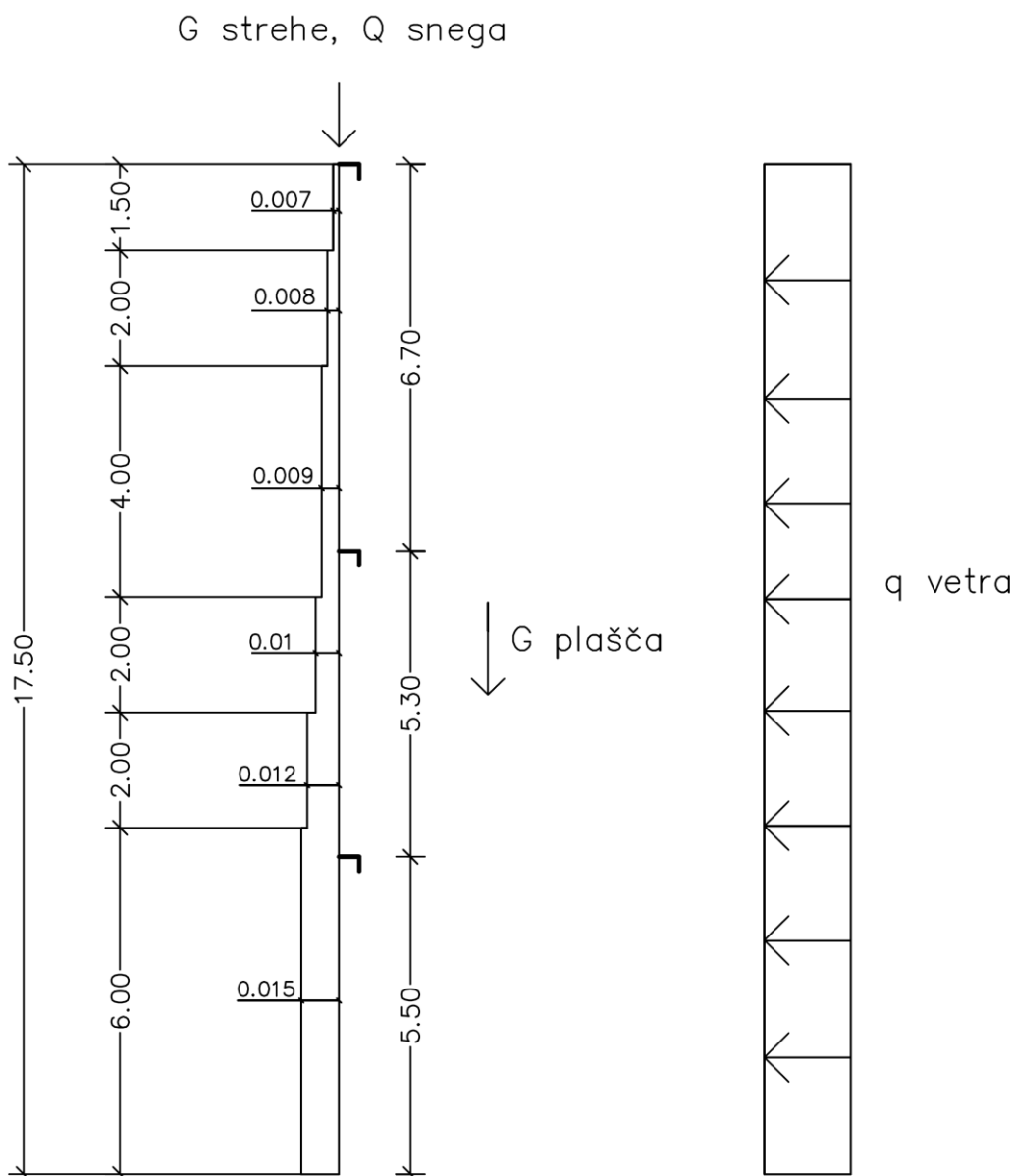


Slika 15: Obtežbe pri kontroli nosilnosti

Za kontrolo nosilnosti je obravnavano obtežno stanje, ki v splošnem predstavlja največjo obremenitev na plašč rezervoarja. Upoštevane so obtežbe lastne teže plašča in strehe rezervoarja, obtežba snega na strehi ter koristna obtežba shranjene tekočine.

Za kontrolo stabilnosti rezervoarja je obravnavan primer, ko je rezervoar izpostavljen obtežbam zaradi lastne teže plašča in strehe rezervoarja, obtežbe snega in vetra. V obtežbi vetra je zajet zunanji tlak in notranji srk zaradi vetra pri odprtem rezervoarju, ki sem ga izbral za kontrolo programa. V primeru zaprtega rezervoarja bi upoštevali samo zunanji pritisk vetra in vakuum.

Kontrolo stabilnosti izvedemo za primera, ko obtežba snega predstavlja prevladujočo in za primer, ko prevladujočo obtežbo predstavlja veter. Slika 16 prikazuje prerez plašča rezervoarja in obtežbe, ki jih upoštevamo pri kontroli stabilnosti.



Slika 16: Obtežbe pri kontroli stabilnost

3.3 RAČUN OBTEŽB

Za določitev velikosti predpostavljenih obtežb, ki jim bo izpostavljen rezervoar je potrebno vnesti podatke o lokaciji, kjer se bo nahajal rezervoar. Slika 17 prikazuje del kode programa, kjer uporabnik poda podatke o lokaciji rezervoarja. Račun obtežb se nanaša na standard SIST EN 1991, na podlagi katerega se izračunajo vrednosti obtežb snega in vetra.

```
%% LOKACIJA
A=100;          %nadmorska visina
%Veter
veterna_cona=3; %cona 1-večina Slovenije, cona
                %2-Trnovski gozd, Notranjska, Karavanke, cona
                %3- Primorje, Kras in del Vipavske doline
kategorija_terena=3;
%Sneg
cona_sneg='A1';
mi=0.8;        %koeficient naklona strehe
```

Slika 17: Podatki o lokaciji rezervoarja

Program izračuna vrednosti obtežb, ki se uporabijo v obtežnih kombinacijah za posamezno kontrolo. Preglednica 10 prikazuje vrednosti lastne teže rezervoarja s streho, obtežbe snega, vetra in shranjene tekočine na dnu rezervoarja. Vpliv vetra $q_{p,max}$ predstavlja največji tlak vetra na plašč rezervoarja, ki se v postopku kontrole stabilnosti pretvori na ekvivalenten zunanji tlak, h kateremu se prišteje še vrednost notranjega srka.

Preglednica 10: Izračunane vrednosti obtežb

F_g	1018	[kN]
F_s	342,84	[kN]
$q_{p,max}$	1,17	[kN/m ²]
$Q_{tekočine}$	170	[kN/m ²]

3.4 KONTROLA NOSILNOSTI LS1

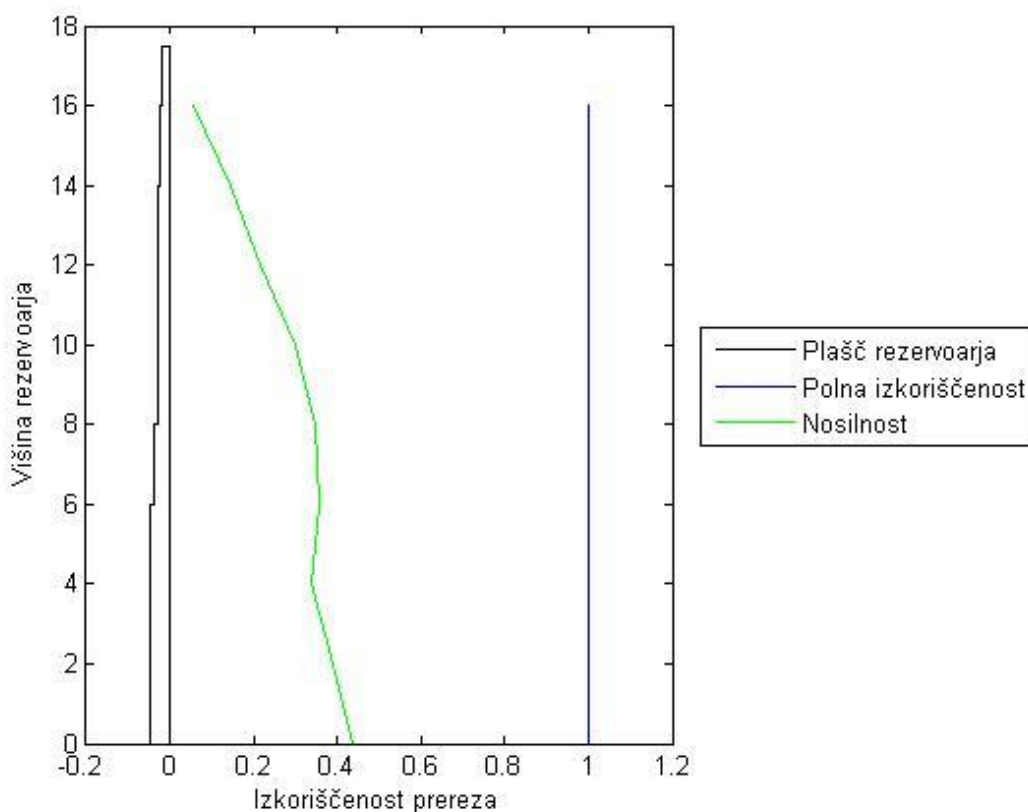
Ob upoštevanju merodajne obtežne kombinacije se določijo napetosti, ki se pojavijo v plašču rezervoarja. Napetosti določimo s poenostavljeno membransko teorijo. Izračunane vertikalne in obodne napetosti združimo v nadomestno ekvivalentno napetost $\sigma_{eq,Ed}$, za vsak segment rezervoarja od spodaj navzgor.

Izračunane vrednosti primerjamo z nosilnostjo materiala, ki je določena s projektno vrednostjo meje plastičnega tečenja f_{yd} .

Vrednosti $\sigma_{eq,Ed} = [1.56; 1.37; 1.19; 1.26; 1.24; 1.07; 0.77; 0.52; 0.20] * 10^5 \text{ kN/m}^2$ predstavljajo nadomestne projektne vrednosti obremenitve plašča rezervoarja po segmentih.

Odpornost materiala $f_{eq,Rd} = [3.55] * 10^5 \text{ kN/m}^2$ predstavlja največjo možno napetost, ki jo material še prenese, ne da bi prišlo do poškodb konstrukcije.

Slika 17 prikazuje izkoriščenost materiala in potek napetosti po višini plašča rezervoarja. Napetosti so izračunane na spodnjem robu vsakega segmenta, saj je s tem zajeta lastna teža posameznega segmenta.



Slika 18: Kontrola nosilnosti

Ker razmerje med projektnimi vrednostmi obremenitev in projektnimi vrednostmi odpornosti materiala v nobeni točki plašča rezervoarja ni večje od 1.0, je kontroli napetosti LS1 zadoščeno.

3.5 KONTROLA STABILNOST LS3

Kontrola stabilnosti rezervoarja je razdeljena na kontrolo vertikalne in obodne stabilnosti. Glede na merodajno obtežno kombinacijo se določi najbolj neugodno napetostno stanje, za katero se izvede tudi kontrola stabilnosti.

V kontroli osne stabilnosti se določi kritična vertikalna uklonska napetost, na podlagi katere se izračuna osna odpornost za vsak segment posebej.

$$\sigma_{x,Rd} = [3.33, 3.33, 3.33, 2.38, 1.81, 1.54, 1.54, 1.28, 1.04] * 10^4 \text{ kN/m}^2$$

se primerja z osno obremenitvijo segmentov v obtežnem primeru, ko je veter prevladujoča spremenljiva obtežba:

$$\sigma_{x,Ed1} = [2.18, 1.97, 1.75, 1.93, 2.06, 2.05, 1.84, 1.83, 1.85] * 10^3 \text{ kN/m}^2$$

in v primeru, ko obtežba snega predstavlja prevladujočo spremenljivo obtežbo:

$$\sigma_{x,Ed2} = [2.39, 2.17, 1.96, 2.19, 2.37, 2.40, 2.19, 2.22, 2.30] * 10^3 \text{ kN/m}^2.$$

Za kontrolo osne stabilnosti plašča rezervoarja je kritičen obtežni primer, ko obtežba snega predstavlja prevladujoč spremenljivi vpliv.

Program glede na podatke o ojačitvah in debelinah segmentov izračuna nadomestne debeline in efektivne dolžine polj med ojačitvami. Ker se polja med ojačitvami razlikujejo glede na dolžino in debelino segmentov, pride pri računu kritičnih uklonskih napetosti v obodni smeri do skokov vrednosti. Kritično obodno uklonsko napetost, na podlagi katere določimo projektno vrednost obodne odpornosti, izračuna program za vsak segment posebej.

$$\sigma_{\theta,Rd} = [1.52, 1.52, 1.52, 1.91, 1.72, 1.43, 1.14, 0.86, 0.75] * 10^4 \text{ kN/m}^2,$$

ki jo primerjamo z obodnimi obremenitvami rezervoarja, glede na obtežno kombinacijo, ko veter predstavlja prevladujočo spremenljivo obtežbo:

$$\sigma_{\theta,Ed,1} = [1.73, 1.73, 1.73, 2.16, 2.59, 2.88, 2.88, 3.24, 3.70] * 10^3 \text{ kN/m}^2,$$

prevladujoča spremenljiva obtežba je obtežba snega:

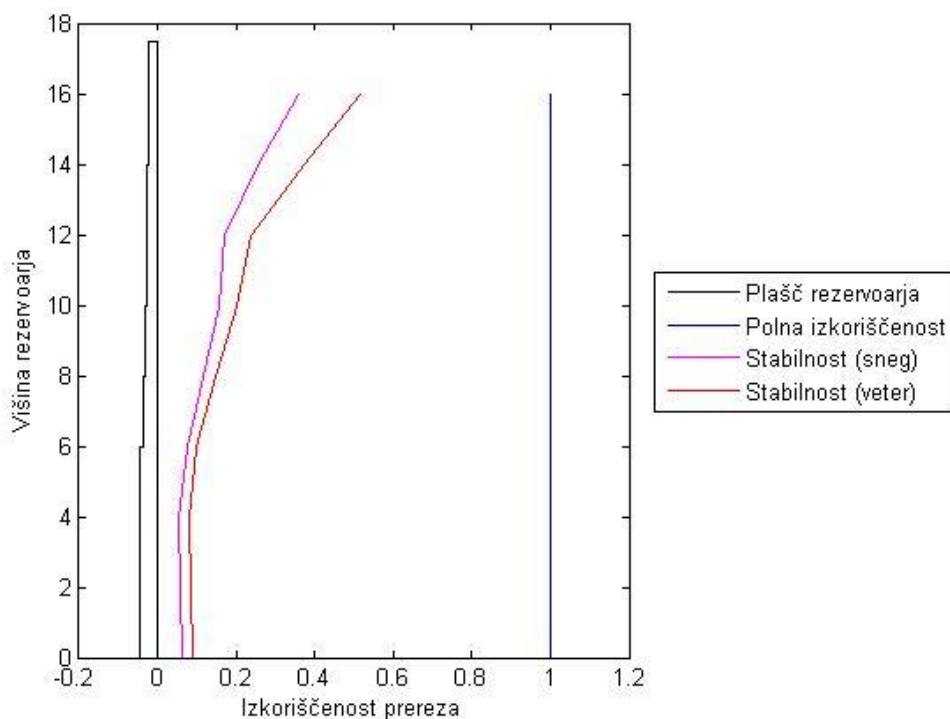
$$\sigma_{\theta,Ed,2} = [1.04, 1.04, 1.04, 1.29, 1.55, 1.73, 1.73, 1.94, 2.22] * 10^3 \text{ kN/m}^2.$$

V kontroli obodne stabilnosti je kritičen obtežni primer, ko prevladujoč spremenljivi vpliv predstavlja veter.

Iz izračunanih vertikalnih in obodnih napetosti je razvidno, da sta za obravnavani primer rezervoarja izpolnjeni obe kontroli stabilnosti plašča rezervoarja.

Kljub izpolnjenima pogojevima vertikalne in obodne stabilnosti standard zahteva tudi kontrolo stabilnosti pri interakciji vseh vrst napetosti. V interakcijski enačbi so upoštevani uklonski interakcijski koeficienti, ki so tako kot napetosti določeni za vsak segment. Enačbe za njihov izračun so povzete po standardu SIST EN 1993-1-6.

Slika 19 prikazuje potek izkoriščenosti prereзов pri interakciji osnih in obodnih napetosti.



Slika 19: Kontrola stabilnosti

Izkaže se, da je tudi v primeru interakcije zadoščeno kontroli stabilnosti. Iz Slike 18 in Slike 19 je razvidno, da izbrane dimenzije segmentov plašča rezervoarja niso določene optimalno, saj je izkoriščenost prereзов zelo majhna. Prednost računalniškega programa je v tem, da v primeru napačne izbire dimenzij postopek izračuna večkrat ponovimo, dokler ne določimo dimenzij segmentov, ki bi bili pri zahtevani varnosti rezervoarjev tudi zadostno izkoriščeni.

3.6 OMEJITVE PROGRAMA

Program je izdelan v okviru diplomske naloge in služi za kontrolo predstavljenih postopkov projektiranja jeklenih valjastih rezervoarjev po Evrokod standardu. Delovanje programa je omejeno na področje linearne elastičnosti materiala, privzete pa so tudi poenostavitve, ki so bile opisane v predstavitvi postopka projektiranja jeklenih rezervoarjev.

Naloga uporabnika je ocena smiselnosti vhodnih podatkov in presoja izračunanih rezultatov, saj lahko program kljub neustreznim podatkom izvede izračun, rezultati pa ne ustrezajo dejanski kontroli jeklenih valjastih rezervoarjev.

4 ZAKLJUČEK

Ob izdelavi diplomske naloge sem podrobno spoznal postopek projektiranja in kontrole, ki so potrebne za analizo jeklenih lupinastih konstrukcij. Zaradi pomanjkanja znanja sem pri analizi konstrukcij obravnaval le poenostavljeni metodi, ki sta omejeni na linearno elastično območje obnašanja materiala. Obravnaval sem poenostavljeno membransko teorijo in linearno elastično teorijo.

Bistvo diplomske naloge je bila izdelava računalniškega programa v programskem okolju Matlab, kjer sem se naučil osnov programiranja in uporabe programskega okolja v inženirske namene. Program omogoča izvedbo analize jeklenih valjastih rezervoarjev po postopkih, ki sem jih spoznal pri študiju standardov.

S pomočjo računalniškega programa lahko hitro in enostavno preverimo odzive konstrukcije pri spremembah geometrije, obtežbe ali lokacije rezervoarjev. Program omogoča natančen izračun in je zasnovan tako, da lahko uporabnik izvaja optimizacijo konstrukcije jeklenih valjastih rezervoarjev.

Pri izdelavi diplomske naloge sem dobil vpogled v postopek projektiranja jeklenih konstrukcij od določitev obtežbe do kontrole nosilnosti in stabilnosti. Spoznal sem prednosti računalniških programov, s pomočjo katerih si inženirji v praksi lahko olajšajo delo.

Menim, da sem pri izdelavi računalniškega programa in diplomske naloge pridobil znanje, ki ga bom lahko koristno uporabil pri nadaljnjem študiju in kasneje v praksi.

VIRI

Gorenc, B. 2003. Račun jeklenih rezervoarjev po standardu ENV 1993-1-6. Diplomatska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba B. Gorenc): 178 str.

SIST EN 1990:2004. Osnove projektiranja konstrukcij.

SIST EN 1991-1-1:2004. Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije 1-1. del: Splošni vplivi – Prostorninske teže, lastna teža, koristne obtežbe stavb.

SIST EN 1991-1-3:2004. Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije 1-3. del: Splošni vplivi – Obtežbe snega.

SIST EN 1991-1-4:2005. Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije 1-4. del: Splošni vplivi – Obtežbe vetra.

SIST EN 1993-1-6:2007. Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij 1-6. del: Trdnost in stabilnost lupinastih konstrukcij.

SIST EN 1993-4-2:2001. Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij 4-2. del: Rezervoarji.