

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:

Čakš, D. 2013. Analiza novega hladilnega stolpa v Šoštanju na vpliv vetra. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Brank, B.): 144 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:

Čakš, D. 2013. Analiza novega hladilnega stolpa v Šoštanju na vpliv vetra. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Brank, B.): 144 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  
GRADBENIŠTVA  
KONSTRUKCIJSKA SMER

Kandidatka:

**DITKA ČAKŠ**

**ANALIZA NOVEGA HLADILNEGA STOLPA V  
ŠOŠTANJU NA VPLIV VETRA**

Diplomska naloga št.: 3299/KS

**ANALYSIS OF THE NEW COOLING TOWER IN  
ŠOŠTANJ ON WIND ACTIONS**

Graduation thesis No.: 3299/KS

**Mentor:**

prof. dr. Boštjan Brank

**Predsednik komisije:**

izr. prof. dr. Janko Logar

**Član komisije:**

izr. prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov

Ljubljana, 26. 04. 2013

## **STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA**

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

**IZJAVE**

Podpisana **Ditka Čakš** izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom »**Analiza novega hladilnega stolpa v Šoštanju na vpliv vetra**«.

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

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

Ljubljana, 14.4.2013

---

(podpis)

## **BIBLIOGRAFSKODOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

<b>UDK:</b>	<b>519.61/.64:624.07(497.4Šoštanj)(043.2)</b>
<b>Avtor:</b>	<b>Ditka Čakš</b>
<b>Mentor:</b>	<b>prof. dr. Boštjan Brank, univ. dipl. inž.grad.</b>
<b>Naslov:</b>	<b>Analiza novega hladilnega stolpa v Šoštanju na vpliv vetra</b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>144 str., 59 pregl., 14 graf., 68 sl., 70 en.</b>
<b>Ključne besede:</b>	<b>hladilni stolp, obtežba vetra, VGB-R 610 e, 2010 edition, SIST EN 1991-1-4:2005</b>

### **Izvodček**

Diplomska naloga obravnava vpliv vetra na novi hladilni stolp v Šoštanju. Podrobno je opisan postopek določitve obtežbe vetra glede na smernico VGB-R 610 e, 2010 edition ter standard SIST EN 1991-1-4:2005, narejena pa je tudi primerjava postopka izračuna obtežbe na različna načina. Računska analiza je narejena s programom SAP2000, v12.0.0, v katerem sta modelirani dve mreži z različnim številom končnih elementov. Uporabljenih je več vrst analiz - linearna statična analiza za določitev notranjih sil ter armature, linearna uklonska analiza za določitev uklonskih faktorjev ter modalna analiza za določitev lastnih nihajnih oblik in frekvenc. Delovanje vetra je obravnavano v 64 različnih smereh, na podlagi katerih je določena najbolj neugodna smer.

Diplomska naloga je razdeljena na 4 dele. V prvem delu je opisano teoretično ozadje o hladilnih stolpih ter o delovanju vetra na konstrukcijo. Drugi del opisuje geometrijo obravnavanega hladilnega stolpa ter uporabljene materiale. Tretji del predstavlja postopek določitve obtežbe, ki deluje na hladilni stolp. Kot najpomembnejša obtežba je izbrana obtežba vetra. V zadnjem delu pa so prikazani rezultati različnih analiz.

**BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION**

**UDK:** 519.61/.64:624.07(497.4Šoštanj)(043.2)

**Avtor:** Ditka Čakš

**Mentor:** prof. Boštjan Brank, Ph.D.

**Naslov:** Analysis of the new cooling tower in Šoštanj on wind actions

**Obseg in oprema:** 144 p., 59 tab., 14 graph., 68 fig., 70 eq.

**Ključne besede:** cooling tower, wind actions, VGB-R 610 e, 2010 edition, SIST EN 1991-1-4:2005

**Abstract**

In this Graduation Thesis the wind action on the new cooling tower in Šoštanj is considered. The procedure for determining wind loads is described in detail according to guideline VGB-R 610 e, 2010 edition and standard SIST EN 1991-1-4:2005. A comparison of different procedures for determining wind actions is made. For analysis a computer program SAP2000, v12.0.0 is used and there are two models with different number of finite elements. Several types of analysis are used - linear static analysis to determine internal forces and reinforcement, linear buckling analysis to determine buckling factors and modal analysis to determine undamped free-vibration mode shapes and frequencies of the system. Wind action is addressed in 64 different directions and the most unfavorable direction is determined.

The diploma is divided in 4 parts. The first part describes the theoretical background of the cooling towers and wind actions on structures. The second part consists the geometry of the considered cooling tower and material used. The third part presents a procedure for determining the loads on the cooling tower. Wind load is chosen as a main load. The last part shows the results of different analyses.

## ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju Boštjanu Branku, ki mi je v času nastajanja diplomske naloge nudil nasvete in strokovno pomoč.

Za pomoč se prav tako zahvaljujem Jaki Dujcu ter Dušanu Žagarju in vsem ostalim, ki so mi pomagali in me spodbujali pri pisanju diplomske naloge.

Posebna zahvala gre članom moje družine in Juretu, ker so mi vedno stali ob strani in me vsa leta študija podpirali.

Prav tako se zahvaljujem tudi vsem prijateljem in sošolcem za nepozabna študijska leta.

**KRATICE IN OKRAJŠAVE**

D	- lastna teža
MSN	- mejno stanje nosilnosti
MSU	- mejno stanje uporabnosti
m1	- mreža 1
m2	- mreža 2
NDCT ŠOŠTANJ unit 6	- Civil Permit Design for the Construction of the Natural Draft Cooling Tower Šoštanj Unit 6 Slovenia, 2010
Re	- Reynolds-ovo število
SIST EN 1991-1-4:2005	- Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije - 1-4. del: Splošni vplivi - Obtežbe vetra (SIST EN 1991-1-4:2005)
St	- Strouhal-ovo število
VGB-R 610 e, edition 2010	- Structural Design of Cooling Towers, Guideline on Structural Design, Calculation, Engineering and Construction of Cooling Towers, VGB-R 610 e, 2010 edition
$W_e$	- obtežba vetra; pritisk, ki deluje na zunanji del lupine
$W_i$	- obtežba vetra; pritisk - srk, ki deluje na notranji del lupine



## KAZALO VSEBINE

<b>1</b>	<b>UVOD .....</b>	<b>1</b>
1.1	Splošno .....	1
1.2	Namen in cilji.....	1
1.3	Sestava diplomske naloge .....	2
<b>2</b>	<b>HLADILNI STOLPI .....</b>	<b>3</b>
2.1	Splošno o hladilnih stolpih.....	3
2.2	Zgodovina hladilnih stolpov .....	4
2.3	Geometrija .....	6
<b>3</b>	<b>PROBLEMATIKA DELOVANJA VETRA NA HLADILNE STOLPE.....</b>	<b>9</b>
3.1	Problem pojava pulzirajočega vrtinčenja .....	9
3.1.1	Reynolds-ovo število .....	10
3.1.2	Mehanizem delovanja pojava pulzirajočega vrtinčenja .....	13
3.1.3	Frekvenca pojava pulzirajočega vrtinčenja.....	13
3.2	Problem ojačanja vetra zaradi bližnjih zgradb .....	14
3.3	Priporočila iz knjige VGB-R 610 e, 2010 edition .....	15
<b>4</b>	<b>HLADILNI STOLP ŠOŠTANJ.....</b>	<b>17</b>
4.1	Opis sestavnih delov .....	19
4.1.1	Lupina .....	19
4.2	Materiali .....	25
4.2.1	Beton .....	25
4.2.2	Jeklo .....	26
4.3	Obtežba, ki jo mora prenesti konstrukcija.....	26
4.3.1	Lastna teža .....	26
4.3.2	Obtežba vetra .....	27
<b>5</b>	<b>DOLOČITEV PRITISKA VETRA NA ŠOŠTANJSKI HLADILNI STOLP .....</b>	<b>28</b>
5.1	Zunanji in notranji pritisk vetra po VGB-R 610 e, 2010 edition.....	28
5.1.1	Koeficient zunanjega obročnega pritiska .....	29
5.1.2	Dinamični koeficient .....	31
5.1.3	Interferenčni koeficient .....	33
5.1.4	Pritisk vetra .....	36
5.2	Zunanji in notranji pritisk vetra po SIST EN 1991-1-4:2005 .....	40
5.2.1	Koeficienti zunanjega pritiska.....	41
5.2.2	Pritisk vetra .....	45

5.2.3	Konstrukcijski faktor .....	53
5.2.4	Vpliv sosednjih stavb.....	59
5.3	Primerjava obtežbe vetra glede na VGB-R 610 e in SIST EN 1991-1-4:2005.....	60
5.3.1	Koeficient zunanjega pritiska.....	60
5.3.2	Pritisk vetra .....	61
5.3.3	Faktor, ki zajema dinamični vpliv .....	62
5.3.4	Faktor, ki zajema vpliv sosednjih stavb.....	62
<b>6</b>	<b>MODELI ZA ANALIZO Z METODO KONČNIH ELEMENTOV .....</b>	<b>63</b>
6.1	Uporabljene mreže .....	63
6.1.1	Mreža 1 .....	63
6.1.2	Mreža 2 .....	68
6.1.2.1	Mreža brez luknje .....	68
6.1.2.2	Mreža z luknjo .....	72
6.1.2.3	Mreža z zvezno spremenljivo debelino .....	74
6.2	Materiali .....	74
6.3	Lastna teža .....	74
6.4	Zunanji pritisk vetra po VGB-R 610 e, 2010 edition .....	75
6.5	Notranji srk po VGB-R 610 e, 2010 edition.....	77
6.6	Varnostni faktorji za material in obtežne kombinacije .....	77
6.6.1	Mejno stanje nosilnosti - MSN .....	78
6.6.2	Mejno stanje uporabnosti - MSU .....	79
6.7	Podatki za določitev armature po VGB-R 610 e, 2010 edition .....	79
6.7.1	Minimalna armatura.....	79
6.7.2	Splošne zahteve.....	80
6.7.3	Material .....	80
6.7.4	Razmik armature .....	80
6.7.5	Spoji.....	80
6.7.6	Spodnji in zgornji rob.....	81
6.7.7	Dovoljena odstopanja pri gradnji .....	81
6.7.8	Pregled minimalnih vrednosti .....	82
6.7.9	Interferenčni faktor .....	82
<b>7</b>	<b>REZULTATI ANALIZE Z METODO KONČNIH ELEMENTOV .....</b>	<b>84</b>
7.1	Uklonske oblike in uklonski faktorji pri lastni teži.....	84
7.1.1	Mreža 1, material C30/37 .....	85
7.1.2	Mreža 1, material C35/45 .....	87
7.1.3	Mreža 2, material C30/37 .....	89

7.1.4	Mreža 2, material C35/45 .....	91
7.1.5	Mreža 2 z luknjo, material C30/37 .....	93
7.1.6	Mreža 2 z luknjo, material C35/45 .....	96
7.1.7	Primerjava rezultatov .....	99
7.1.7.1	Enaka mreža, različni materiali.....	99
7.1.7.2	Enak material, različni mreži .....	101
7.1.7.3	Mreža z luknjo, različni materiali.....	103
7.1.7.4	Mreža z luknjo in brez luknje .....	104
7.2	Lastne nihajne oblike in frekvence .....	106
7.3	Uklonske oblike in uklonski faktorji pri lastni teži in vetru .....	110
7.4	Notranje sile .....	113
7.4.1	Notranje sile zaradi lastne teže .....	114
7.4.1.1	Sila F11 v obročni smeri zaradi lastne teže .....	115
7.4.1.2	Sila F22 v meridionalni smeri zaradi lastne teže.....	116
7.4.2	Notranje sile zaradi vetra.....	117
7.4.2.1	Sila F11 v obročni smeri zaradi vetra .....	119
7.4.2.2	Sila F22 v meridionalni smeri zaradi vetra .....	120
7.4.3	Notranje sile zaradi lastne teže in vetra .....	121
7.5	Natezne napetosti v betonu (potencialna mesta razpok) .....	123
7.6	Armatura .....	125
7.6.1	Armatura v obročni smeri .....	126
7.6.2	Armatura v meridionalni smeri.....	133
7.6.3	Primerjava količine armature .....	139
<b>8</b>	<b>ZAKLJUČEK .....</b>	<b>141</b>
	<b>VIRI IN LITERATURA .....</b>	<b>142</b>

**KAZALO PREGLEDNIC**

Preglednica 3-1: Strouhalovo število .....	14
Preglednica 4-1: Tehnični podatki bloka 6.....	18
Preglednica 4-2: Spreminjanje polmera z višino.....	20
Preglednica 4-3: Spreminjanje debeline lupine z višino.....	21
Preglednica 4-4: Zaščitna plast armature.....	26
Preglednica 5-1: Podatki za izračun koeficienta zunanjšega obročnega pritiska .....	30
Preglednica 5-2: Krivulje porazdelitve pritiska .....	30
Preglednica 5-3: Funkcije krivulje porazdelitve na posameznih odsekih.....	30
Preglednica 5-4: Podatki za izračun dinamičnega koeficienta .....	32
Preglednica 5-5: Podatki o premerih lupine.....	34
Preglednica 5-6: Podatki o kotlovnici.....	35
Preglednica 5-7: Podatki o strojnici .....	36
Preglednica 5-8: Osnovna hitrost vetra .....	37
Preglednica 5-9: Določitev pritiska $q_b$ .....	37
Preglednica 5-10: Pritisk vetra za obravnavani stolp po VGB-R 610 e, 2010 edition .....	37
Preglednica 5-11: Podatki za izračun $Re$ na višini 10m.....	41
Preglednica 5-12: Koeficient zunanjšega pritiska brez toka na prostem robu.....	42
Preglednica 5-13: Podatki za faktor prostega roba.....	43
Preglednica 5-14: Dolžina hrapavosti za kategorijo terena II.....	47
Preglednica 5-15: Podatki za izračun pritiska vetra .....	48
Preglednica 5-16: Vrednosti $v_{sunki}$ na različnih višinah .....	49
Preglednica 5-17: Temeljne vrednosti osnovne hitrosti vetra $v_{b,0}$ glede na Evrokod 1.....	49
Preglednica 5-18: Primerjava povprečne hitrosti vetra $v_m$ na višini 10m .....	50
Preglednica 5-19: Pritisk vetra po SIST EN 1991-1-4:2005.....	51
Preglednica 5-20: Podatki za izračun $c_s c_d$ .....	58
Preglednica 6-1: Povprečna debelina lupine .....	65
Preglednica 6-2: Povprečna debelina lupine .....	69
Preglednica 6-3: Varnostni faktorji .....	77
Preglednica 6-4: Delni materialni faktor.....	78
Preglednica 6-5: Kontrola dolžine razpok.....	79
Preglednica 7-1: Uklonski faktorji - m1, C30/37.....	85
Preglednica 7-2: Slike uklonskih oblik .....	86
Preglednica 7-3: Uklonski faktorji - m1, C35/45.....	87
Preglednica 7-4: Slike uklonskih oblik .....	88
Preglednica 7-5: Uklonski faktorji - m2, C30/37.....	89
Preglednica 7-6: Slike uklonskih oblik .....	90
Preglednica 7-7: Uklonski faktorji - m2, C35/45.....	91
Preglednica 7-8: Slike uklonskih oblik .....	92
Preglednica 7-9: Uklonski faktorji - m2 z luknjo, C30/37.....	93
Preglednica 7-10: Slike uklonskih oblik .....	94
Preglednica 7-11: Uklonski faktorji - m2 z luknjo, C35/45.....	96
Preglednica 7-12: Slike uklonskih oblik .....	97
Preglednica 7-13: Primerjava uklonskih faktorjev pri različnih materialih, m1 .....	99
Preglednica 7-14: Primerjava uklonskih faktorjev pri različnih materialih, m2 .....	100

Preglednica 7-15: Primerjava uklonskih faktorjev pri različnih mrežah, C30/37 .....	101
Preglednica 7-16: Primerjava uklonskih faktorjev pri različnih mrežah, C35/45 .....	102
Preglednica 7-17: Primerjava uklonskih faktorjev pri različnih materialih, m2 z luknjo .....	103
Preglednica 7-18: Primerjava uklonskih faktorjev pri mreži z luknjo in mreži brez .....	104
Preglednica 7-19: Primerjava uklonskih faktorjev pri mreži z luknjo in mreži brez .....	105
Preglednica 7-20: Nihajni časi in frekvence.....	107
Preglednica 7-21: Efektivne mase.....	107
Preglednica 7-22: Primerjava nihajnih časov in frekvenc .....	109
Preglednica 7-23: Notranje sile zaradi lastne teže .....	114
Preglednica 7-24: Notranje sile zaradi obtežbe vetra .....	118
Preglednica 7-25: Notranje sile zaradi lastne teže in vetra .....	121
Preglednica 7-26: Podatki za izračun povečanja minimalne obročne armature zaradi interference.....	128
Preglednica 7-27: Armatura v obodni smeri .....	129
Preglednica 7-28: Armatura v meridionalni smeri.....	134
Preglednica 7-29: Obtežne kombinacije NDCT .....	139

**KAZALO SLIK**

Slika 2-1: Termoelektrana z izpustom prečiščenih dimnih plinov.....	4
Slika 2-2: Razvoj hladilnih stolpov.....	5
Slika 2-3: Porušitev hladilnega stolpa v Ferrybridge Power Station.....	6
Slika 2-4: Hiperboloid opisan z ravnimi črtami.....	6
Slika 2-5: Hiperboloid.....	7
Slika 2-6: Hladilni stolp.....	8
Slika 2-7: Sestavni deli hiperboličnega stolpa.....	8
Slika 3-1: Pojav pulzirajočega vrtinčenja.....	9
Slika 3-2: Sprememba toka glede na $Re$ .....	11
Slika 3-3: Brazda in mejna plast.....	11
Slika 3-4: Tok v okolici konstrukcije.....	12
Slika 3-5: Mehanizem pojava pulzirajočega vrtinčenja.....	13
Slika 3-6: Vpliv zgradbe na veter.....	15
Slika 4-1: Blok 6 v obratovanju - računalniška simulacija.....	17
Slika 4-2: Izgled stolpa, računalniška simulacija.....	17
Slika 4-3: Lokacija hladilnega stolpa.....	18
Slika 4-4: Hladilni stolp.....	20
Slika 4-5: Ojačitveni "U" obroč.....	23
Slika 4-6: Pozicija odprtine.....	24
Slika 4-7: Sprememba debeline lupine v okolici luknje v vetrikalni smeri in po obodu.....	24
Slika 4-8: Stebri.....	25
Slika 5-1: Minimum pritiska vetra v odvisnosti faktorja hrapavosti površine.....	29
Slika 5-2: Krivulje porazdelitve pritiska.....	31
Slika 5-3: Dinamični koeficient.....	32
Slika 5-4: Spremembe pri računu dinamičnega koeficienta.....	33
Slika 5-5: Interferenčni koeficient.....	35
Slika 5-6: Koeficient zunanjega pritiska brez toka na prostem robu.....	42
Slika 5-7: Faktor prostega roba.....	44
Slika 5-8: Kategorija terena II.....	46
Slika 5-9: Območje faktorja hrapavosti.....	48
Slika 5-10: Temeljne vrednosti osnovne hitrosti vetra $v_{b,0}$ glede na Evrokod 1.....	49
Slika 5-11: Koeficient sile za cilindre brez toka na prostem robu.....	55
Slika 5-12: Enostranska varianca spektra.....	56
Slika 5-13: Vpliv velikih in občutno višjih sosednjih stavb po SIST EN 1991-1-4:2005.....	59
Slika 5-14: Vpliv bližnjih stavb in drugih ovir po SIST EN 1991-1-4:2005.....	59
Slika 6-1: Mreža 1.....	64
Slika 6-2: Mreža 1, pogled od zgoraj.....	64
Slika 6-3: Povprečna debelina.....	67
Slika 6-4: Mreža 2.....	68
Slika 6-5: Mreža 2 - pogled od zgoraj.....	69
Slika 6-6: Mreža 2 z luknjo.....	73
Slika 6-7: Mreža 2 z luknjo - pogled od zgoraj.....	73
Slika 6-8: Luknja.....	74
Slika 6-9: Delovanje vetra v smeri "60".....	75

Slika 6-10: Smeri vetra.....	76
Slika 6-11: Obtežba notranjega pritiska vetra - srk.....	77
Slika 6-12: Pregled minimalnih vrednosti armature po VGB-R 610 e, 2010 edition .....	82
Slika 7-1: Prva nihajna oblika.....	108
Slika 7-2: Šesta nihajna oblika - torzijska nihajna oblika .....	108
Slika 7-3: Uklonska oblika pri vetru v smeri "60" - uklonska oblika z najmanjšim uklonskim faktorjem.....	111
Slika 7-4: Uklonske oblike in uklonski faktorji pri lastni teži in vetru .....	112
Slika 7-5: Notranje sile za elemente tipa "Shell" .....	113
Slika 7-6: F11 .....	116
Slika 7-7: F11 v okolici stebrov .....	116
Slika 7-8: F22 .....	117
Slika 7-9: F11 .....	119
Slika 7-10: F22.....	120
Slika 7-11: M11 ter M22.....	122
Slika 7-12: Pomiki pri kombinaciji lastne teže in vetra .....	123
Slika 7-13: $\sigma_{max}$ na zunanji površini lupine .....	124
Slika 7-14: $\sigma_{max}$ na notranji površini lupine .....	124
Slika 7-15: $\sigma_{max}$ na zunanji površini lupine, meja $f_{ctm}$ .....	125
Slika 7-16: $\sigma_{max}$ na notranji površini lupine, meja $f_{ctm}$ .....	125
Slika 7-17: Armatura .....	126
Slika 7-18: Obročna armatura na zunanji strani lupine.....	127
Slika 7-19: Obročna armatura na notranji strani lupine.....	127
Slika 7-20: Meridionalna armatura na zunanji strani lupine .....	134
Slika 7-21: Meridionalna armatura na notranji strani lupine .....	134

**KAZALO GRAFIKONOV**

Grafikon 4-1: Spreminjanje polmera z višino .....	21
Grafikon 4-2: Spreminjanje debeline lupine z višino .....	23
Grafikon 5-1: $c_{pe}(\Theta)$ za obravnavan hladilni stolp po VGB-R 610 e, 2010 edition .....	31
Grafikon 5-2: Pritisk vetra za obravnavani stolp po VGB-R 610 e, 2010 edition .....	40
Grafikon 5-3: Faktor prostega roba za obravnavani hladilni stolp .....	44
Grafikon 5-4: Koeficient zunanje pritiska za obravnavani stolp po SIST EN 1991-1-4:2005 .....	44
Grafikon 5-5: Vrednosti različnih hitrosti vetra na različnih višinah .....	50
Grafikon 5-6: Pritisk vetra po SIST EN 1991-1-4:2005 .....	53
Grafikon 5-7: Primerjava zunanjih koeficientov .....	60
Grafikon 5-8: Primerjava pritiska vetra .....	61
Grafikon 7-1: Količina obročne armature po višini .....	133
Grafikon 7-2: Količina meridianske armature po višini .....	138
Grafikon 7-3: Primerjava obročne armature .....	140
Grafikon 7-4: Primerjava meridianske armature .....	140



## 1 UVOD

### 1.1 Splošno

Veter je naravno gibanje zraka, do katerega pride zaradi razlike zračnih pritiskov, tako v vertikalni kot v horizontalni smeri, pri različno segretem površju in ozračju. Zrak se premika od visokega pritiska k nizkemu, veter tako nastane zaradi izenačevanja zračnega pritiska.

Hitrosti vetra naraščajo z višino, to pa je pomembno predvsem pri visokih stavbah kot so npr. hladilni stolpi. Površinski veter deluje do višine 100m, odvisen pa je predvsem od lastnosti površja Zemlje. Pritisk vetra, ki deluje na konstrukcijo, je odvisen od različnih faktorjev, ki zajemajo geometrijo obravnavane konstrukcije, vpliv drugih konstrukcij in ovir v protiveterni smeri ter ortografsko razgibanosti in hrapavosti terena, ki vplivata na smer in hitrost vetra.

Obtežba vetra je pomembna pri dimenzioniranju lupine. Veter se spreminja tako v vertikalni kot v obodni smeri. Vpliv vetra se poda z ekvivalentno statično obtežbo, na lupino pa deluje zunanji in notranji pritisk.

Hladilni stolpi spadajo med tanke lupinaste konstrukcije. Lupinaste konstrukcije so konstrukcijski elementi, pri katerih se obtežba na podpore prenaša pretežno z membranskim napetostnim stanjem. Membransko stanje napetosti je stanje, kjer so upogibne in prečne notranje količine zanemarljivo majhne. Velika nosilnost tankih lupin je posledica njihove ukrivljenosti.

### 1.2 Namen in cilji

Diplomska naloga obravnava vpliv vetra na nov hladilni stolp v Šoštanju. V ta namen je na podlagi VGB-R 610 e, 2010 edition ter SIST EN 1991-1-4:2005 določena obtežba vetra. Narejena je tudi primerjava obtežb vetra. S programom SAP2000 v12.0.0 je modeliran hladilni stolp. Obravnavani sta dve različni mreži. S pomočjo različnih analiz so določene notranje sile, količina potrebne armature, nihajni časi ter uklonske oblike in faktorji.

Cilji diplomske naloge:

- spoznati in preučiti trenutno veljavne standarde za projektiranje konstrukcij na obtežbo vetra
- spoznati postopek izračuna obtežbe vetra
- primerjati različne načine izračuna obtežbe
- preveriti obnašanje lupine z odprtino za dimne pline in brez nje

- preveriti ali je v lupini res membransko napetostno stanje
- določiti količino armature
- ugotoviti ali je veter res najpomembnejša obtežba

### 1.3 Sestava diplomske naloge

Diplomska naloga je sestavljena iz 8. poglavij. V prvem poglavju je predstavljen problem ter cilji diplomske naloge.

V drugem poglavju so predstavljene osnovne lastnosti hladilnih stolpov, njihova geometrija ter zgodovina.

Tretje poglavje obravnava delovanje vetra in pojave ter probleme, ki so s tem povezani in jih je potrebno upoštevati pri izračunu obtežbe.

V četrtem poglavju je podana geometrija hladilnega stolpa v Šoštanju, materiali, ki so uporabljeni ter obtežba, ki jo mora prenesti konstrukcija.

Peto poglavje opisuje dva različna računa obtežbe vetra glede na VGB-R 610 e, 2010 edition ter SIST EN 1991-1-4:2005. Narejena je tudi primerjava postopkov izračuna in velikosti obtežbe.

V šestem poglavju so predstavljene različne mreže, uporabljene za analizo. Podane so vse obtežbe, ki so bile upoštevane in uporabljene obtežne kombinacije. Po VGB-R 610 e, 2010 edition pa so povzete tudi zahteve za določitev armature.

Sedmo poglavje podaja rezultate različnih analiz. Predstavljene so uklonske oblike in faktorji pri lastni teži za različne materiale ter mreže in uklonske oblike ter faktorji pri obtežbi vetra v 64 različnih smereh in lastni teži. Za potrebe izračuna koeficientov za obtežbo vetra so določene lastne nihajne oblike in frekvence. Izračunane so notranje sile za lastno težo, veter ter kombinacijo obeh, določena pa je tudi potrebna armatura.

Zadnje, osmo poglavje povzema ugotovitve ter podaja zaključke opravljenih analiz.

## 2 HLADILNI STOLPI

### 2.1 Splošno o hladilnih stolpih

Hladilni stolpi so visoke, tanke lupine iz armiranega betona. So konstrukcije, s katerimi se odpadna toplota, ki nastaja med tehnološkim procesom, odvaja v atmosfero. Hladilni stolpi bistveno pripomorejo k učinkoviti rabi energije in zaščiti okolja. Takšne konstrukcije se najpogosteje pojavljajo pri naftni rafineriji, kemičnih tovarnah in termoelektrarnah. (Gould, P. L., Krätzig, W. B. 1999)

Glede na pretok zraka ločimo stolpe na naravni vlek ter stolpe, kjer se vlek ustvari mehansko. Pri naravnem vleku razlika v tlaku toplega zraka v stolpu in hladnega zraka zunaj ustvari naravni vlek v notranjosti stolpa. Topel zrak se dviga, hladen zrak pa neprekinjeno prihaja v lupino. Mehansko je vlek ustvarjen s pomočjo ventilatorjev. Pojavlja pa se tudi kombinacija, kjer je naravni vlek še dodatno ojačan s pomočjo ventilatorjev.

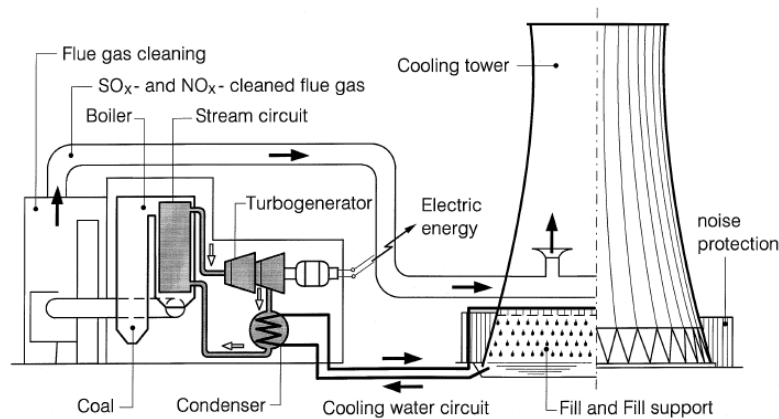
Glede na način prenosa toplote hladilne stolpe delimo na t.i. "moker" in "suh" tip hladilnega stolpa. Obstajajo pa tudi hibridi.

Pri mokrem tipu hladilnega stolpa pride segreta voda v direktni kontakt s hladnejšim zrakom. Pride do izhlapevanja in ohlajanja, ohlajena voda pa se zbere v vodnem bazenu. Ta voda se nato ponovno uporabi.

Pri suhem tipu hladilnega stolpa gre za konvekcijsko hlajenje, do katerega pride pri prenosu toplote skozi površino, ki ločuje vodo ter zrak. Uparjanje v tem primeru ni prisotno. V primerjavi z mokrim tipom pride tu le do 30% toplotnega izkoristka. Vendar pa je suh tip stolpov boljši za okolje.

Delovanje hladilnega stolpa je prikazano na sliki 2-1. V termoelektrarnah turbogeneratorje, ki proizvajajo električno energijo, poganja para. Ob koncu tega procesa se para kondenzira in reciklira. Vendar pa je pri takšnem procesu potrebna velika količina hladilne vode, ki se ohlaja v hladilnem stolpu.

Oblika lupine določa način prenašanja obtežbe. Uveljavila se je predvsem hiperboloidna oblika hladilnih stolpov. Omogoča stabilnost konstrukcije ob majhni količini uporabljenega materiala. Oblika pripomore tudi pri naravnem vleku, tako da se poveča tudi učinkovitost hlajenja. Podrobnejše je takšna oblika predstavljena v poglavju 2.3.



Slika 2-1: Termoelektrarna z izpustom prečiščenih dimnih plinov  
(Gould, P. L., Krätzig, W. B. 1999, str 4)

Modernejše elektrarne, pri katerih je omogočeno čiščenje dimnih plinov, hladilne stolpe sočasno uporabljajo tudi kot industrijski dimnik.

Najvidnejši del hladilnih stolpov je lupina, ki je podprta s stebri. Le ti so lahko diagonalni, meridijanski ali navpični in omogočajo pretok zraka. Lahko so prefabricirani ali narejeni na mestu gradnje. Lupina je grajena s pomočjo opaža, ki se postopoma dviguje. Posamezni deli naj bi bili višine največ 2m.

Debelina lupine naj ne bi bila manjša od 16 do 18cm, zaradi povečanja trajnosti lupine ter da se zagotovi zadostna zaščitna plast za armaturo. Poleg tega mora biti lupina še dodatno ojačana na spodnjem in zgornjem delu. Za dodatno stabilnost se lahko lupina ojača še z dodatnimi zunanji ali notranji obroči.

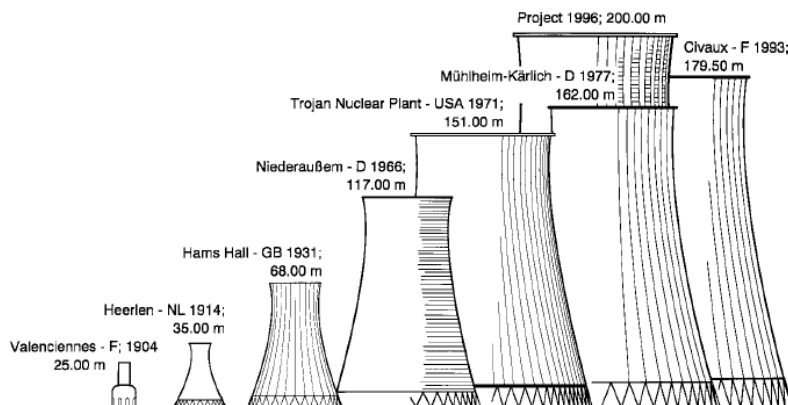
Pri hladilnih stolpih je pomembna tudi korozija, saj so neprestano v stiku z vodo ter dimnimi plini. Izbira pravega materiala je bistvenega pomena, poleg tega pa je potrebna še dodatna zaščita z zaščitnimi premazi.

## 2.2 Zgodovina hladilnih stolpov

Hladilne naprave so se začele uporabljati ob koncu 19. stoletja. Prvi hiperboloidni hladilni stolp se je začel graditi že leta 1914 in je bil visok 35m. Obliko sta leta 1918 patentirala nizozemska arhitekta Van Iterson in Kuypers. (Gould, P. L., Krätzig, W. B. 1999.)

Sledil je relativno hiter razvoj, ki so ga omogočale nove tehnologije gradnje, boljši materiali, povečana moč termoelektrarn ter izboljšana tehnologija pridobivanja elektrike, razvijajoče se znanje o projektiranju in naravovarstvene zahteve. Okoli leta 1930 sta tako kapaciteta kot višina stolpov narasli. Dosežena je bila višina 65m. Prvi stolp, ki je presegal 100m je bil zgrajen v Veliki Britaniji - High Marnham Power Station. Do leta 1984 je bilo na svetu okoli

160 hladilnih stolpov, višjih od 100m. V začetku 21. stoletja pa je bil v Nemčiji - Niederaussem Power Station zgrajen prvi stolp, ki presega 200m.



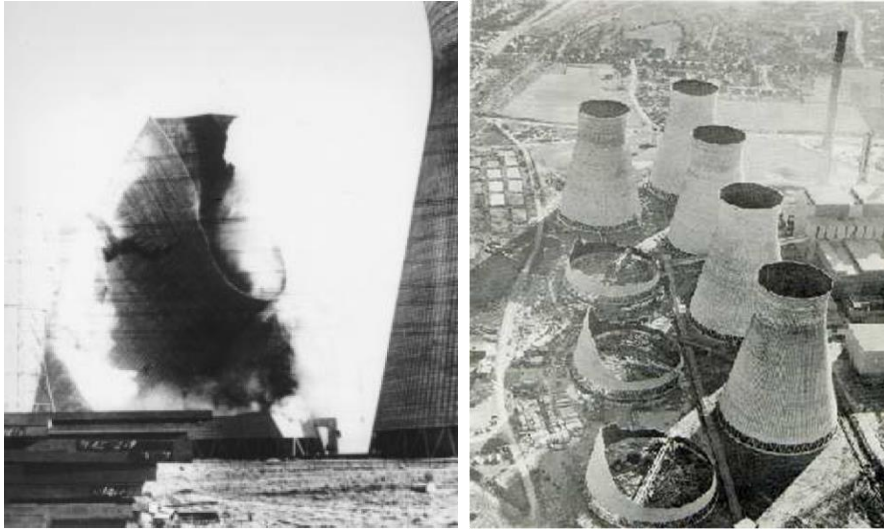
Slika 2-2: Razvoj hladilnih stolpov  
(Gould, P. L., Krätzig, W. B. 1999, str 4)

Razvoj pa je s sabo prinesel tudi posledice. Današnji stolpi so varne in vzdržljive konstrukcije, če so pravilno načrtovane in grajene. A da so dosegli takšno stopnjo, je bilo potrebno ogromno izkušenj, predvsem na porušeni in hudo poškodovanih konstrukcijah iz preteklosti.

Največja porušitev se je zgodila leta 1965 v Ferrybridge Power Station. Pri visokih hitrostih vetra so se porušili trije od osmih 114m visokih stolpov. Ostalih 5 je bilo zelo poškodovanih. Stolpi so se porušili kljub temu, da naj bi bili sposobni prenesti tudi visoke hitrosti vetra. Porušitve so bile posledice pulzirajočih vrtincev vetra. Kasneje so ponovno zgradili vseh 8 stolpov. Ta nesreča ter mnoge druge (Ardeer, Velika Britanija - 1973, Bouchain, Francija - 1979 ter Fiddler's Ferry, Velika Britanija - 1984) pa so pripomogle k natančnejšemu preučevanju obnašanja hladilnih stolpov ter razvoju in sprejetju predpisov za zagotavljanje stabilnosti hladilnih stolpov.

Ob preučevanju nesreč so prišli do ugotovitev, da imajo nesreče vsaj štiri skupne lastnosti (Gould, P. L., Krätzig, W. B. 1999.):

- maksimalna projektna vrednost vetra je bila pogosto podcenjena, posledično pa je bila rezerva glede varnosti pri vetru nezadostna
- učinek sosednjih stavb, ki vodi do višjih hitrosti vetra ter pojava pulzirajočega vrtinčenja, je bil zanemarjen
- obširni deli lupine so bili ojačani samo v enem glavnem sloju (v dveh ortogonalnih smereh) ali pa je bilo ojačanje na dveh nivojih (na notranji in zunanji strani lupine) nezadostno
- lupine niso imele ojačitve na zgornjem delu ali pa je bila le ta prešibka, da bi zagotovila zadostno ojačitev za dinamične vplive vetra

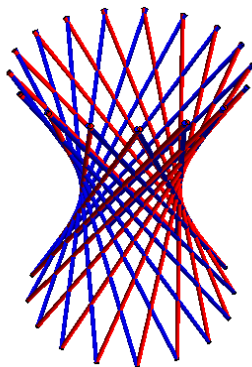


Slika 2-3: Porušitev hladilnega stolpa v Ferrybridge Power Station  
(Gould, P. L., Krätzig, W. B. 1999, str 10)

Poleg naštetih primerov porušitve so bile opažene poškodbe na konstrukcijah mnogih hladilnih stolpov. Seveda so vidne poškodbe znak, da je stabilnost lupine ter posledično varnost ogrožena. Zato pa je še toliko bolj pomembno, da so stolpi narejeni glede na zahtevane predpise, ki zagotavljajo zadostno varnost ter stabilne konstrukcije v času življenjske dobe objekta. Kljub temu, da se je v razvitejših državah gradnja hladilnih stolpov zmanjšala, pa se razvoj in raziskave na tem področju še vedno nadaljujejo.

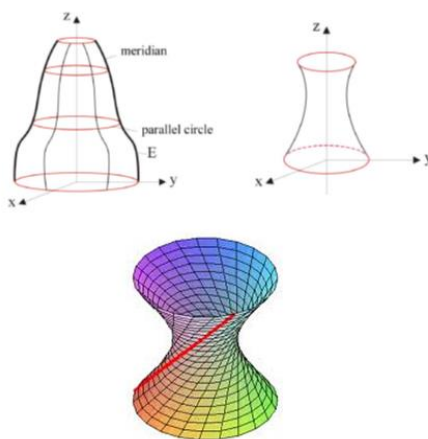
### 2.3 Geometrija

Hladilni stolpi spadajo v skupino tankih lupin. Oblika lupine je t.i. enodelni hiperboloid. Hiperboloidi so rotacijske ploskve, ki se lahko opišejo z ravnimi črtami.



Slika 2-4: Hiperboloid opisan z ravnimi črtami  
(*Skewer hyperboloid*, 2013)

Lupino dobimo z rotacijo hiperboloida  $R = f(Z)$  okoli vertikalne osi Z. Dimenzije se ponavadi podajajo na srednji ploskvi lupine, lahko pa tudi na zunanjem ali notranjem robu lupine. Možnih je več variacij hiperboloida, med drugim imata lahko hiperbola nad grlom in pod grlom različne konstante. Oblika lupine je določena glede na konstrukcijske in tehnološke zahteve.



Slika 2-5: Hiperboloid  
(Brank, B., 2012)

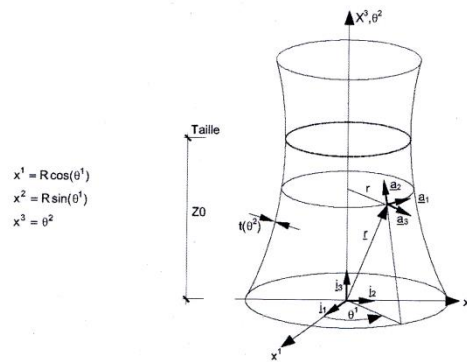
Po definiciji hiperboloida je le ta opisan z enačbo:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1 \quad (2-1)$$

Izhodišče koordinatnega sistema je postavljeno v središče horizontalnega prečnega prereza, na višini grla. V horizontalni smeri so lahko prečni prerezi krožne ali eliptične oblike, v vertikalni smeri prečni prerez določa hiperbola. Konstante  $a$ ,  $b$  in  $c$  določajo, kako je hiperboloid raztegnjen v  $x$ ,  $y$  ter  $z$  smeri. Za hiperboloid, ki ima v horizontalni smeri krožen prečni prerez velja, da je  $a = b$ .

Enačba meridiana je podana z enačbo (2-2) (NDCT ŠOŠTANJ unit 6, 2010, str. 56).

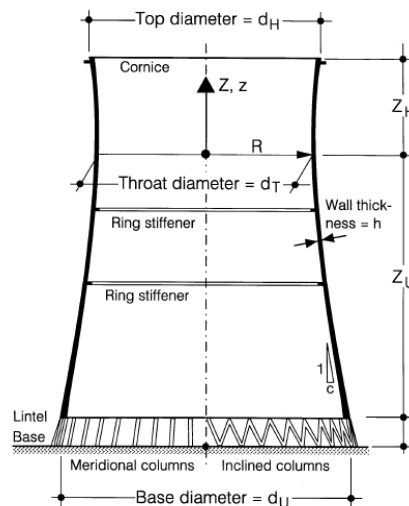
$$f(z, r) = az^2 + 2b zr + r^2 + 2dz + 2er + f = 0 \quad (2-2)$$



Slika 2-6: Hladilni stolp  
(NDCT ŠOŠTANJ unit 6, 2010, str. 56)

Hiperboloidne konstrukcije imajo negativno Gaussovo ukrivljenost. Ukrivljenost omogoča, da se na pretežnem delu lupine obtežba prenaša z osnimi oz. membranskimi silami, momenti pa so zanemarljivi. Momenti so večji le na nekaterih delih lupine, kot npr. ob podporah in prostih robovih ter ob odprtinah.

Sestavni deli hiperboloidne lupine hladilnega stolpa so predstavljeni na sliki 2-7.



Slika 2-7: Sestavni deli hiperboličnega stolpa  
(Gould, P. L., Krätzig, W. B. 1999, str. 11)

Poleg lupine so zelo pomembni stebri, s katerimi so zagotovljene potrebne odprtine za dotok zraka. Preklade na spodnjem delu ali ojačani spodnji del lupine služi za porazdelitev koncentriranih reakcij, ki so posledica vpetja stebrov v lupino. Zgornji venec je podobno kot spodnji del lupine ojačan, da poveča togost lupine in preprečuje ovalizacijo lupine.

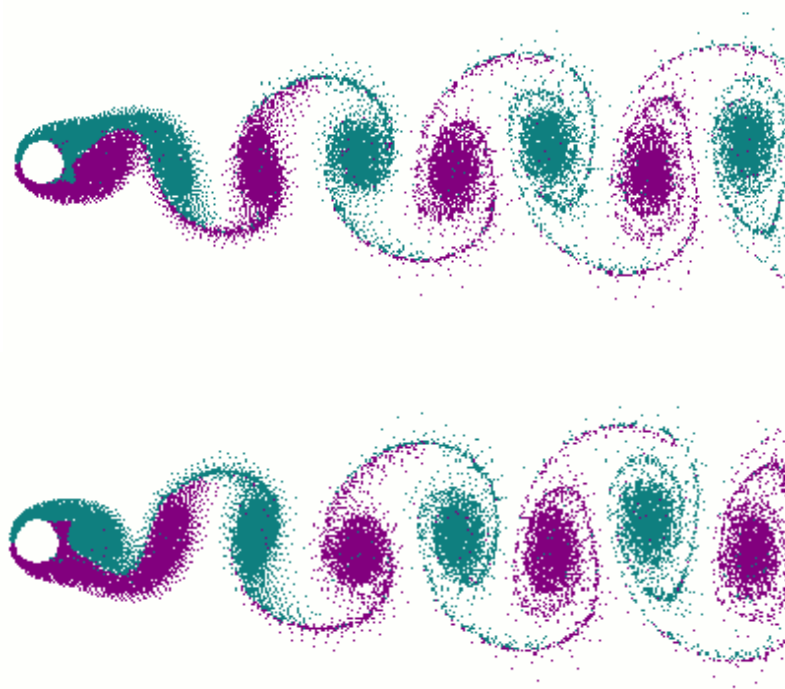


### 3 PROBLEMATIKA DELOVANJA VETRA NA HLADILNE STOLPE

Pritisk vetra, ki deluje na konstrukcijo, je odvisen od različnih faktorjev. Pomembne so tako karakteristike približujočega se vetra, kot geometrija obravnavane konstrukcije ter druge konstrukcije v protiveterni smeri. Pritisk vetra ni enakomeren, precej se spreminja, na kar pa lahko vplivajo še sunki vetra, lokalni pojav pulzirajočega vrtinčenja in vogali konstrukcij.

#### 3.1 Problem pojava pulzirajočega vrtinčenja

V dinamiki tekočin je "vortex shedding" ali pojav pulzirajočega vrtinčenja pojav, kjer pride do nihanja nestalnega toka, to pa se zgodi, ko tekočina (npr. voda ali zrak) teče mimo cilindrične konstrukcije pri določeni hitrosti. Pri takšnem toku se ustvarijo vrtinci v smeri toka za objektom. Tok niha v vzorcu imenovanem "Von Karmanovi vrtinci"; gre za ponavljajoč vzorec vrtinčenja, prikazan na sliki 3-1. Na tej sliki je tok na straneh prikazan z dvema različnima barvama, da so vrtinci, ki nihajo iz ene strani na drugo, bolj vidni. Tekočina, ki teče mimo objekta, ustvarja izmenične, pulzirajoče vrtince nizkega pritiska. Te cone z nizkim pritiskom pa povzročijo, da se objekt pomika v smeri proti njim. Poveča se obtežba pravokotno na smer vetra. Pulzirajoče vrtinčenje je pomembno predvsem pri visokih zgradbah, kot so npr. hladilni stolpi.



Slika 3-1: Pojav pulzirajočega vrtinčenja  
(Vortex shedding, 2013)

Če frekvenca vrtincev, ki se pojavijo v smeri delovanja vetra za stolpom, sovpada s frekvenco konstrukcije, pride do pojava resonance, konstrukcija pa lahko začne nekontrolirano nihati. Pride lahko celo do porušitve konstrukcije.

Kriterij za pojav pulzirajočega vrtinčenja po SIST EN 1991-1-4:2005

- učinke pojava je potrebno preučiti, če je razmerje med dimenzijami najmanjšega in največjega prečnega prereza, ki ležita v ravnini pravokotni na veter, večje kot 6
- učinke pojava ni potrebno preučiti če:

$$v_{crit,i} > 1,25v_m \quad (3-1)$$

Kjer je:

$v_{crit,i}$  - kritična hitrost vetra za nihajno obliko  $i$ , definirana kot hitrost vetra, pri kateri je frekvenca pulzirajočega vrtinčenja enaka  $i$ -ti naravni frekvenci konstrukcije

$$v_{crit,i} = \frac{bn_{i,y}}{St} \quad (3-2)$$

$b$  - referenčna širina prečnega prereza, kjer pride do resonance zaradi pulzirajočega vrtinčenja, za krožne konstrukcije referenčna širina zunanega premera

$n_{i,y}$  - naravna frekvenca obravnavane  $i$ -te nihajne oblike

$St$  - Strouhal-ovo število, normirana frekvenca pulzirajočega vrtinčenja, odvisna od  $Re$







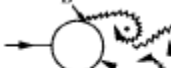


$v_m$  - karakteristična povprečna hitrost vetra v časovnem obdobju 10 min v prečnem prerezu, kjer pride do pojava pulzirajočega vrtinčenja

Pojav pulzirajočega vrtinčenja se ponavadi zgodi pri stalnem neprekinjenem vetru pri kritični hitrosti. Kritična hitrost ni nujno velika, vendar pa se vibracije ne pojavijo, če hitrost ne preseže 5m/s. Pojav se nadaljuje tudi ob spreminjanju kritične hitrosti vetra, a če se ta spremeni za več kot 20%, se vrtinčenje ustavi. Če je hitrost vetra večja kot 15m/s je ponavadi veter preveč turbulenten in do pojava ne pride. (Giosan, I., Eng, P)

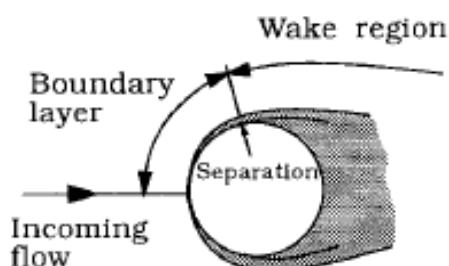
### 3.1.1 Reynolds-ovo število

Brezdimenzionalna vrednost, ki opisuje tok okoli gladkega cilindra, je odvisna od Reynolds-ovega števila -  $Re$ . Tok se z višanjem  $Re$  precej spreminja, kot je prikazano na sliki

3-2. Pri tem se ustvarita dva območja v toku - mejna plast in brazda. Brazda je dolžine približno premera  $b$ , mejna plast pa se pojavi na zelo majhnem območju  $\delta$ .

a)		No separation. Creeping flow	$Re < 5$
b)		A fixed pair of symmetric vortices	$5 < Re < 40$
c)		Laminar vortex street	$40 < Re < 200$
d)		Transition to turbulence in the wake	$200 < Re < 300$
e)		Wake completely turbulent. A: Laminar boundary layer separation	$300 < Re < 3 \times 10^5$  Subcritical
f)		A: Laminar boundary layer separation B: Turbulent boundary layer separation; but boundary layer laminar	$3 \times 10^5 < Re < 3.5 \times 10^5$ Critical (Lower transition)
g)		B: Turbulent boundary layer separation; the boundary layer partly laminar partly turbulent	$3.5 \times 10^5 < Re < 1.5 \times 10^6$ Supercritical
h)		C: Boundary layer com- pletely turbulent at one side	$1.5 \times 10^6 < Re < 4 \times 10^6$ Upper transition
i)		C: Boundary layer comple- tely turbulent at two sides	$4 \times 10^6 < Re$ Transcritical

Slika 3-2: Sprememba toka glede na  $Re$   
 (Fem Unicamp. Flow around a cylinder in steady current, 2013, str.2)



Slika 3-3: Brazda in mejna plast  
 (Fem Unicamp. Flow around a cylinder in steady current, 2013, str.3)

Pri majhnih vrednostih  $Re$  se odlepljanje ne pojavi. Prvo odlepljanje se zgodi pri  $Re = 5$ . Pri  $5 < Re < 40$  se pojavi par statičnih vrtincev v brazdi. Dolžina teh vrtincev narašča z višanjem  $Re$ . Pri višjih  $Re$  vrtinci postanejo nestabilni, to pa pripelje do pojava imenovanega pulzirajoče vrtinčenje. Za števila  $40 < Re < 200$  so vrtinci laminarni, vrtinčenje pa je dvodimenzionalno. Ko se  $Re$  še poveča, se pojavijo turbulence v brazdi. To se zgodi med  $200 < Re < 300$ . Pri večanju  $Re$  se turbulenca postopoma pojavlja tudi v mejnem območju. Za  $4 \times 10^5 < Re$  je turbulenca prisotna na obeh straneh ter v mejnem območju in brazdi.

Pojav pulzirajočega vrtinčenja je za krožne konstrukcije odvisen od Reynolds-ovega števila  $Re$  pri kritični hitrosti vetra  $v_{crit,i}$ .

$$Re(v_{crit,i}) = \frac{bv_{crit,i}}{\nu} \quad (3-3)$$

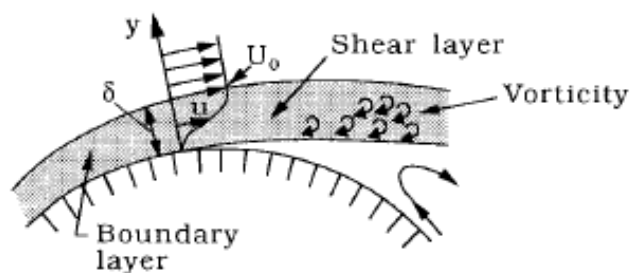
Pri čemer je:

$b$  - premer

$\nu$  - kinematična gostota zraka,  $\nu = 15 \cdot 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$

$v_{crit,i}$  - kritična hitrost vetra

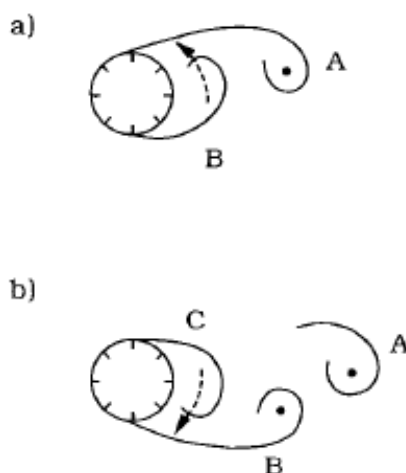
Pulzirajoči vrtinci se začno pojavljati pri  $Re > 40$ , predvidoma okoli  $Re = 47$ . Okoli te vrednosti  $Re$  se mejno območje pri cilindričnih konstrukcijah odlepi. Formira se strižna plast, kot je prikazano na sliki 3-4. Ta strižna plast pa nato formira vrtince za konstrukcijo.



Slika 3-4: Tok v okolici konstrukcije  
(Fem Unicamp. Flow around a cylinder in steady current, 2013, str.7)

### 3.1.2 Mehanizem delovanja pojava pulzirajočega vrtinčenja

Par vrtincev, ki se pojavi za konstrukcijo pri številu  $Re > 40$ , ni stabilen. Eden vrtinec iz para postane večji. Slika 3-5 prikazuje par vrtincev. Ko večji vrtinec, na sliki označen z A, postane dovolj velik, za sabo čez turbulentno območje potegne nasprotni vrtinec B. Vrtinec A se vrti v smeri ure, vrtinec B pa v nasprotni smeri ure. Ko se vrtinec B približa vrtincu A, prekine dotok in vrtinec A se odlepi od mejne plasti. Tak vrtinec je nato prost in potuje naprej po toku. Po odlepitvi vrtinca A se na njegovem mestu formira nov vrtinec, označen s C. Postopek se ponovi, le da je sedaj močnejši vrtinec B. Proces se nato ponavlja vsakič, ko se vrtinec odlepi, to odlepljanje pa se dogaja enkrat na eni, drugič na drugi strani cilindrične konstrukcije. Pojav lahko preprečimo tako, da onemogočimo odlepljanje vrtincev.



Slika 3-5: Mehanizem pojava pulzirajočega vrtinčenja  
(Fem Unicamp. Flow around a cylinder in steady current, 2013, str.8)

### 3.1.3 Frekvenca pojava pulzirajočega vrtinčenja

Frekvenca pulzirajočega vrtinčenja, normirana s hitrostjo  $v$  in premerom  $b$ , je odvisna od  $Re$ .

$$St = St(Re)$$

(3-4)

St lahko izrazimo iz izraza (3-2).

$$St = \frac{bn_{i,y}}{v_{crit,i}} \quad (3-5)$$

Pulzirajoče vrtinčenje se pojavi pri  $Re > 40$ , frekvenca pa je takrat približno enaka 0,1. Z večanjem  $Re$  se povečuje tudi  $St$ .

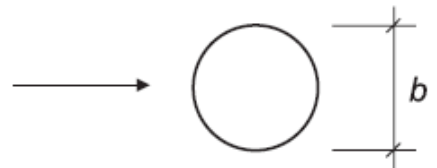
Za konstrukcije s hrapavo površino, je pri  $St$  potrebno upoštevati tudi relativno hrapavost.

$$St = St\left(Re, \frac{k_s}{b}\right) \quad (3-6)$$

Kjer je :

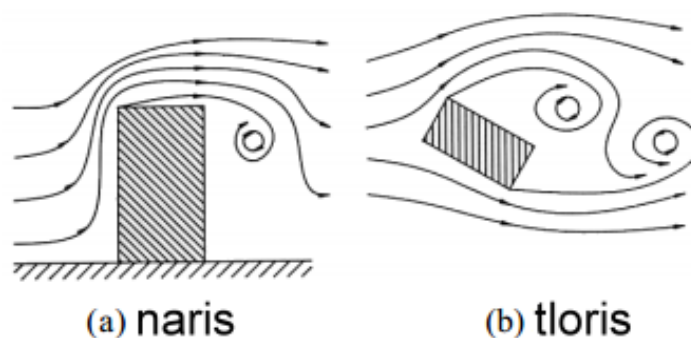
$k_s$  - ekvivalentna Nikuradse-ova relativna hrapavost za cilindrično površino

Preglednica 3-1: Strouhalovo število

Prečni prerez	St
krožni 	0,18 za $Re < 3 \times 10^5$ 0,25 za $Re > 3 \times 10^5$

### 3.2 Problem ojačanja vetra zaradi bližnjih zgradb

Obnašanje vetra v okolici visokih zgradb, ki stojijo v skupini, je lahko povsem drugačno, kot če bi veter deloval le na eno samo konstrukcijo. Konstrukcije, ki stojijo na poti vetra, lahko bistveno spremenijo (zmanjšajo ali zvečajo) obtežbo vetra na opazovano konstrukcijo.



Slika 3-6: Vpliv zgradbe na veter  
(Mendis, P, et al. 2007)

Veter v spodnjih plasteh atmosfere je v veliki meri odvisen od interakcije s površjem. Povprečna hitrost vetra z višino navadno narašča, medtem ko sunki z višino pojemajo. Nekatere konstrukcije, predvsem tiste, ki so visoke in vitke, se dinamično obnašajo zaradi učinkov vetra.

### 3.3 Priporočila iz knjige VGB-R 610 e, 2010 edition

Structural Design of Cooling Towers, Guideline on Structural Design, Calculation, Engineering and Construction of Cooling Towers, VGB-R 610 e, 2010 edition vsebuje priporočila o vplivih, obtežnih kombinacijah, projektiranju ter gradnji hladilnih stolpov. Primerna je za različne armiranobetonske hladilne stolpe, ki se lahko med sabo razlikujejo tako po višini kot po obliki.

Obtežba vetra se glede na VGB-R 610 e, 2010 edition poda kot površinski pritisk, ki deluje na lupino iz zunanje in notranje strani.

Zunanji pritisk  $w_e$  je sestavljen iz štirih koeficientov, ki so odvisni od višine nad terenom z ter obodnega kota  $\Theta$ . Račun pritiska in vseh koeficientov je prikazan v poglavju 5.1.

Koeficient zunanjega obročnega pritiska  $c_{pe}(\Theta)$  določa porazdelitev pritiska vetra v obodni smeri. Odvisen je od hrapavosti površine. Določi se s pomočjo standardiziranih krivulj porazdelitve pritiska, kjer je z analitičnimi funkcijami izražena razporeditev pritiska v treh območjih. Račun koeficienta je pojasnjen v poglavju 5.1.1.

Za določitev dinamičnega koeficienta  $\phi$ , ki upošteva resonančne vibracije zaradi vetra, je potrebno določiti najnižjo naravno frekvenco lupine. S pomočjo te frekvence se iz grafa razbere dinamični koeficient. Določitev koeficienta je prikazana v poglavju 5.1.2.

Interferenčni koeficient  $F_i$  zajema povečanje obtežbe vetra zaradi bližnjih stavb. Račun se razlikuje, če so v okolici hladilnega stolpa drugi stolpi ali zgradbe. Potrebno je določiti parameter oddaljenosti, s katerim se nato iz grafa razbere mejne vrednosti tega parametra s katerimi se izračuna interferenčni koeficient. Postopek je opisan v poglavju 5.1.3.

Pritisk vetra  $q_b(z)$  se določi glede na teren in hitrost vetra. Za različne kategorije terena ter osnovne hitrosti vetra in sunke so določene enačbe za pritisk vetra zaradi sunkov vetra. Pritisk vetra je določen v poglavju 5.1.4.

Notranji pritisk vetra  $w_i$  določajo trije koeficienti. Notranji pritisk vetra ima negativno vrednost, na lupino deluje srk. Račun pritiska in koeficientov je prikazan v poglavju 5.1.

Koeficient notranjega obročnega pritiska  $c_{pi}$  je konstantna vrednosti in znaša -0,5.

Interferenčni koeficient  $F_i$  je enak kot interferenčni koeficient pri določanju zunanjega pritiska vetra.

Pritisk vetra  $q_b(z=H)$  je enak pritisku vetra določenega na zgornjem robu lupine, torej na višini  $H$  pri obtežbi zunanjega pritiska vetra. Za celotno višino lupine se vzame vrednost določena na zgornjem robu.

Ker so vsi trije koeficienti za določitev notranjega pritiska konstantni tako po višini kot po obodu, je tudi vrednost notranjega pritiska konstantna po obodu in višini.



## 4 HLADILNI STOLP ŠOŠTANJ

Zgodovina Termoelektrarne Šoštanj sega v čas po drugi svetovni vojni, ko so zaradi velike potrebe po električni energiji ter zalog premoga v Šaleški dolini sprejeli odločitev o gradnji. Zgrajenih je bilo pet blokov, od tega so trenutno v obratovanju le še trije. Blok 6, h kateremu spada hladilni stolp, obravnavan v tej diplomski nalogi, bo sčasoma nadomestil vse ostale bloke. Za enako količino proizvedene energije, naj bi blok 6 porabil 30 odstotkov manj premoga in s tem tudi znižal skupne emisije v okolje. Poskusno naj bi začeli obratovati v maju 2015, njegova kapaciteta pa naj bi bila 600MW. (Termoelektrarna Šoštanj, 2013)



Slika 4-1: Blok 6 v obratovanju - računalniška simulacija  
(Te Šoštanj, 2013)



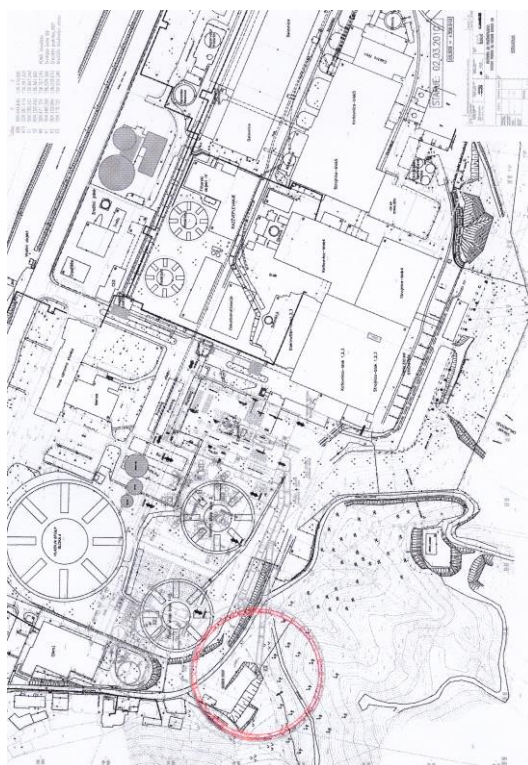
Slika 4-2: Izgled stolpa, računalniška simulacija  
(Te Šoštanj, 2013)

Hladilni stolp v Šoštanju je ti. hiperboloidna tanka lupina, kot material pa je uporabljen armiran beton. Je najvišji tovrstni energetski objekt v Sloveniji. Spada med mokri tip hladilnega stolpa na naravni vlek.

Tehnični podatki bloka 6 so predstavljeni v preglednici 4-1.

Preglednica 4-1: Tehnični podatki bloka 6  
(Te Šoštanj, 2013)

<b>Moč na pragu</b>	545,5MW
<b>Specifična poraba na pragu</b>	8.451kJ/kWh
<b>Cena premoga</b>	23,18€/t (2,25€/GJ)
<b>Ure obratovanja s polno močjo</b>	6.500 ur/letno
<b>Število zaposlenih</b>	200
<b>Življenjska doba</b>	40 let
<b>Emisija CO<sub>2</sub></b>	0,87kg/kWh
<b>Pridobljeno uporabno dovoljene</b>	Predvideno februar 2016



Slika 4-3: Lokacija hladilnega stolpa  
(NDCT ŠOŠTANJ unit 6, 2010, str. 55)

## 4.1 Opis sestavnih delov

Hladilni stolp lahko razdelimo na zunanji del - lupino, ter notranji del - hladilni sistem in sistem za distribucijo vode.

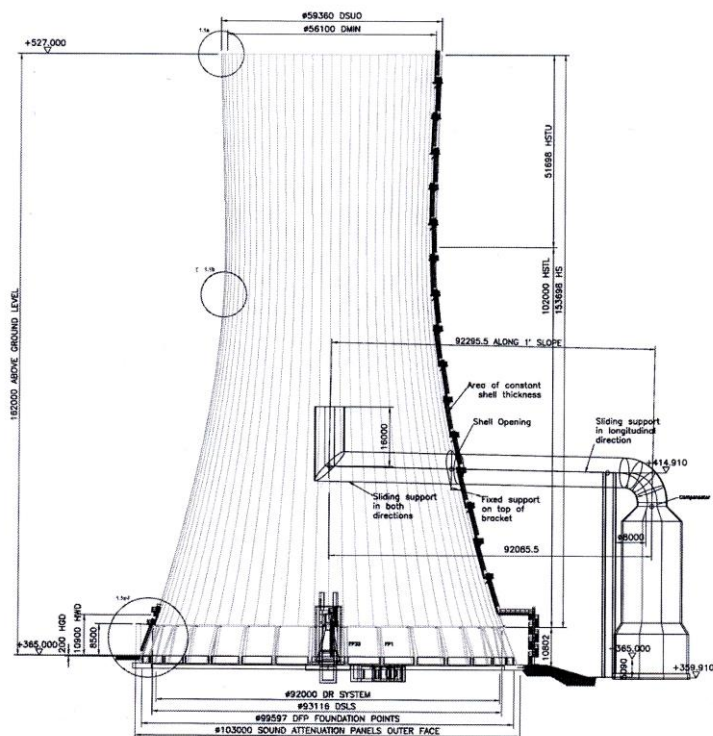
Hladilni stolp sestavljajo:

- lupina
- cevi za distribucijo vode
- notranja podporna konstrukcija
- bazen za vodo
- cevi za dotok vroče vode
- cevi za odtok hladne vode
- razpršišče
- cev za dovod dimnih plinov

### 4.1.1 Lupina

V diplomski nalogi se bomo osredotočili na zunanji del, ki ga predstavlja hiperboloidna lupina - hiperboloid. Vsi podatki o geometriji in materialu, navedeni v tej diplomski nalogi in uporabljeni pri analizi, so povzeti po NDCT ŠOŠTANJ unit 6.

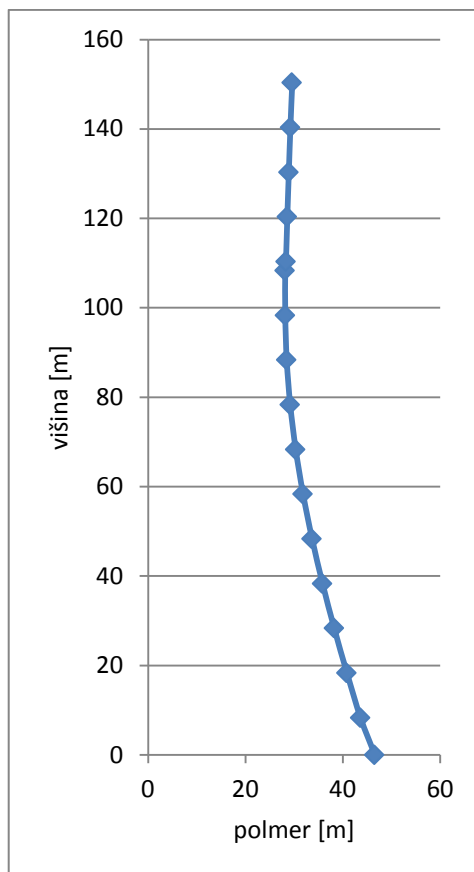
Višina celotnega stolpa je 162m nad zgornjim nivojem terena, lupina je visoka 153,698m in je podprta z 32 stebri. Stebri imajo višino 10,802m in so delno vkopani v teren. Del stebrov, ki je nad terenom, meri 8,302m. Premer stolpa spodaj je 99,597m, premer spodnjega dela lupine je 93,116m, premer grla 56,29m, premer zgornjega dela lupine pa 59,18m. Preglednica 4-2 ter grafikon 4-1 prikazujeta spreminjanje polmera glede na višino lupine.



Slika 4-4: Hladilni stolp  
(NDCT ŠOŠTANJ unit 6, 2010, str. 53)

Preglednica 4-2: Spreminjanje polmera z višino  
(NDCT ŠOŠTANJ unit 6, 2010, str. 57)

Višina stolpa [m]	Polmer [m]	Premer [m]
8,302	46,558	93,116
18,302	43,622	87,244
28,302	40,834	81,668
38,302	38,222	76,444
48,302	35,822	71,644
58,302	33,673	67,346
68,302	31,82	63,64
78,302	30,306	60,612
88,302	29,173	58,346
98,302	28,45	56,9
108,302	28,153	56,306
110,302	28,145	56,29
120,302	28,294	56,588
130,302	28,572	57,144
140,302	28,883	57,766
150,302	29,206	58,412
162	29,59	59,18



Grafikon 4-1: Spreminjanje polmera z višino

Debelina lupine se prav tako spreminja z višino, maksimalna debelina je 1,06m, minimalna pa 0,18m, kar je razvidno tudi iz preglednice 4-3 in grafikona 4-2. Višine podane v preglednici 4-3, so višine same lupine, pri čemer je 0m = 8,302m nad zgornjo višino terena.

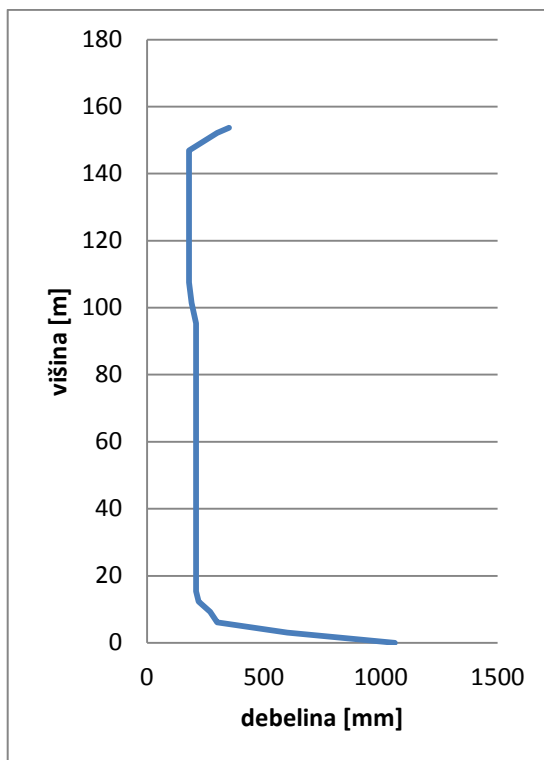
Preglednica 4-3: Spreminjanje debeline lupine z višino  
(NDCT ŠOŠTANJ unit 6, 2010, str. 58)

Višina lupine [m]	Radij [m]	Debelina lupine [mm]
153,698	29,59	351
152,148	29,539	300
146,905	29,276	180
144,476	29,287	180
141,402	29,187	180
138,328	29,087	180
135,254	28,988	180
132,18	28,889	180
129,106	28,792	180

se nadaljuje...

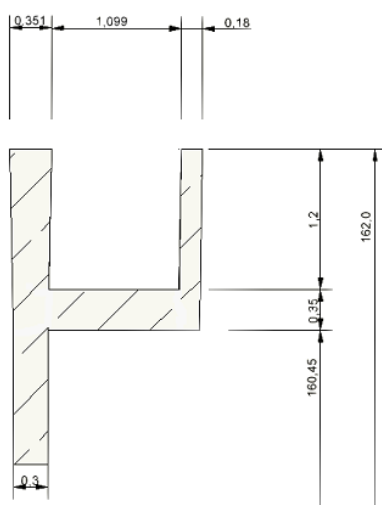
... nadaljevanje Preglednice 4-3

126,032	28,696	180
122,958	28,601	180
119,884	28,509	180
116,81	28,421	180
113,736	28,338	180
110,662	28,262	180
107,588	28,199	180
104,514	28,157	185
101,44	28,145	190
98,367	28,172	200
95,293	28,24	210
92,219	28,347	210
89,145	28,496	210
86,071	28,684	210
82,997	28,912	210
79,923	29,18	210
76,849	29,487	210
73,775	29,832	210
70,701	30,214	210
67,627	30,632	210
64,553	31,086	210
61,479	31,573	210
58,405	32,093	210
55,331	32,645	210
52,257	33,227	210
49,183	33,838	210
46,109	34,476	210
43,035	35,141	210
39,961	35,83	210
36,887	36,544	210
33,813	37,28	210
30,74	38,037	210
27,666	38,814	210
24,592	39,611	210
21,518	40,425	210
18,444	41,257	210
15,37	42,105	210
12,296	42,968	220
9,222	43,846	270
6,148	44,737	300
3,074	45,641	600
0	46,558	1060



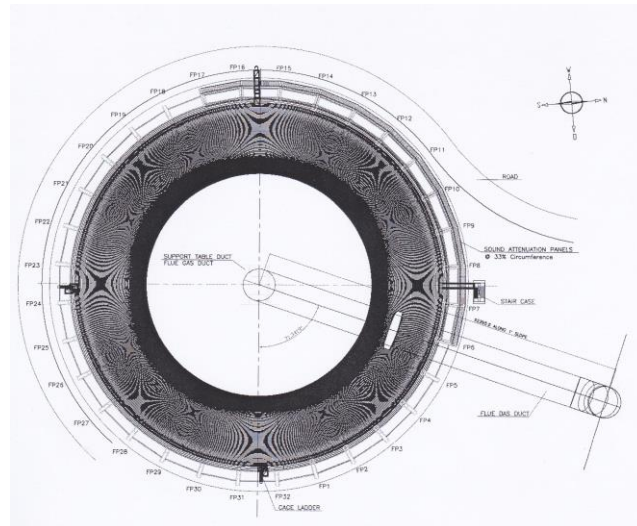
Grafikon 4-2: Spreminjanje debeline lupine z višino

V spodnji obroč lupine se vpenjajo stebri, debelina lupine je povečana, s čimer se zagotovi potrebno ojačanje. Na zgornjem delu lupine je obroč oblike "U", ki prav tako zagotavlja potrebno ojačitev zgornjega dela, hkrati pa služi kot hodnik za kontrolo na zgornjem delu lupine in dostop do svetlobnega sistema.

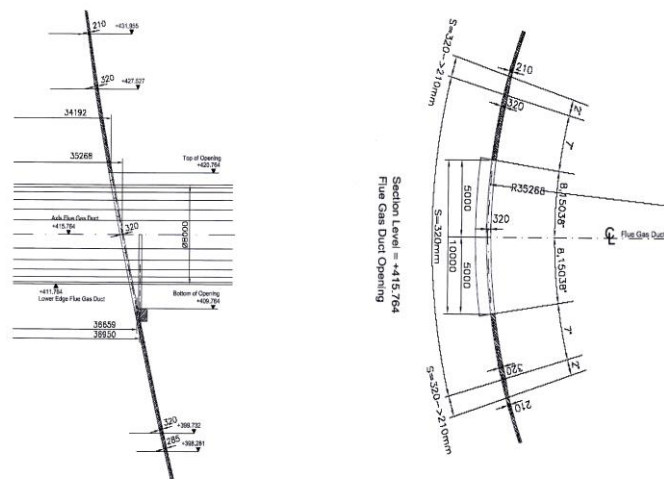


Slika 4-5: Ojačitveni "U" obroč

V lupini je odprtina za dovod dimnih plinov v velikosti približno 10 x 11m. Luknja se nahaja na nadmorski višini +414,91m oz. na višini 49,91m, glede na spodnjo višino terena. V okolici luknje je lupina ojačana, tako z debelino betona kot s količino armature. Ojačitev je takšna, da je obnašanje lupine z luknjo enako tistemu brez (NDCT ŠOŠTANJ unit 6, 2010, str. 7)



Slika 4-6: Pozicija odprtine  
(NDCT ŠOŠTANJ unit 6, 2010, str. 54)



Slika 4-7: Sprememba debeline lupine v okolici luknje v vertikalni smeri in po obodu  
(NDCT ŠOŠTANJ unit 6, 2010, str. 61 in str. 63)

Lupino podpira 32 meridijskih stebrov, ki so polno vpeti v lupino ter v temeljni obroč. Stebri so pravokotnega prečnega prereza, ki se z višino spreminja - zmanjšuje. Spodaj imajo stebri širino 2,725m, zgoraj pa 1,0m. Debelina je povsod 1,1m. Vertikalna projekcija višine stebra je 10,802m, 8,302m stebra je nad terenom.





- karakteristična natezna trdnosti:  $f_{ctm} = 2,9\text{MN/m}^2$
- elastični modul:  $E_{cm} = 33000\text{ MN/m}^2$

- beton trdnostnega razreda C35/45:

- karakteristična tlačna trdnost:  $f_{ck} = 45\text{MN/m}^2$
- karakteristična natezna trdnosti:  $f_{ctm} = 3,8\text{MN/m}^2$
- elastični modul:  $E_{cm} = 34000\text{ MN/m}^2$

Potrebna zaščitna plast armature je v skladu z Eurocodom 2 ter VGB-R 610 e, edition 2010.

Preglednica 4-4: Zaščitna plast armature

	$c_{min}$ [mm]	$\Delta c_{dev}$ [mm]	$c_{nom}$ [mm]
<b>Lupina</b>	30	5	35
<b>Stebri</b>	40	10	50

#### 4.2.2 Jeklo

Material, uporabljen za armiranje je S 500 B.

- karakteristična tlačna trdnost:  $f_{yk} = 500\text{MN/m}^2$
- karakteristična natezna trdnosti:  $f_{tk} = 540\text{MN/m}^2$
- elastični modul:  $E_s = 210000\text{ MN/m}^2$

#### 4.3 Obtežba, ki jo mora prenesti konstrukcija

Na lupino lahko deluje več različnih obtežb. Najbolj pogoste so lastna teža (D), stalna obtežba, veter (W), potresna obtežba (E), temperaturne spremembe (T), obremenitve med gradnjo (C), posedki tal (S)... Za dimenzioniranje lupine je potrebno narediti več različnih obtežnih kombinacij v skladu s standardi ter poiskati najbolj neugodno. Obtežne kombinacije so predstavljene v poglavju 6.6.

V diplomski nalogi smo se osredotočili na lastno težo in obtežbo vetra.

##### 4.3.1 Lastna teža

Lastna teža zajema težo lupine ter reber. Za račun je bila uporabljena specifična lastna teža armiranega betona in armature.

- stebri:  $25\text{kN/m}^3$
- lupina:  $25,5\text{kN/m}^3$  - vključena tudi teža reber
- jeklo:  $77\text{kN/m}^3$

#### 4.3.2 Obtežba vetra

Obtežba vetra je zelo pomembna obtežba pri dimenzioniranju lupine. Razlogov za to je več. Količina armature, ki je večja od minimalno potrebne armature, se pogosto kontrolira glede na razliko med nategom zaradi obtežbe vetra ter tlakom zaradi lastne teže. Pritisk vetra je poleg tega spremenljiv tako v vertikalni kot tudi v obodni smeri. Sprememba v vertikalni smeri je v veliki meri odvisna od regionalnih klimatskih razmer ter nepravilnosti terena. Pritisk v obodni smeri pa je močno povezan s hrapavostjo površine lupine. Potrebno pa je omeniti tudi dodatne učinke vetra, kot npr. srk v notranjosti lupine, vpliv skupine zgradb na veter ter dinamične učinke zaradi vetra. (Gould, P. L., Krätzig, W. B., 1999)

Vpliv vetra se zaradi lažjega računanja poda z ekvivalentno statično obtežbo izraženo kot površinski pritisk. Na lupino deluje pritisk vetra na zunanjo površino, ki ga označimo z  $w_e$ , ter pritisk, ki deluje na notranjo površino lupine in ga označimo z  $w_i$ . Pritisk, ki deluje v smeri proti lupini je definiran kot pozitiven pritisk.

Za obtežne kombinacije se za obtežbo vetra  $W$  uporabi najbolj neugodna kombinacija obtežbe zaradi zunanjega pritiska  $W_e$  ter obtežbe zaradi notranjega pritiska  $W_i$ .

Izračun obtežbe vetra, vključno z izračunom vseh koeficientov je bil v tej diplomski nalogi izveden v skladu s knjigo "Structural Design of Cooling Towers, VGB-R 610 e, 2010 edition". Narejena je bila tudi primerjava z obtežbo vetra po SIST EN 1991-1-4:2005.

Veter predstavlja najpomembnejšo obtežbo za dimenzioniranje lupine v tej diplomski nalogi. Izračun obtežbe vetra je predstavljen v poglavju 5.

Opomba: VGB-R 610 e, 2010 edition razlikuje med pritiskom vetra na površino, ki je označen z  $w$  ter obtežbo vetra zaradi pritiska vetra, ki je označena z  $W$

## 5 DOLOČITEV PRITISKA VETRA NA ŠOŠTANJSKI HLADILNI STOLP

Pritisk vetra, ki deluje na lupino hladilnega stolpa je izračunan na dva načina - glede na VGB-R 610 e, 2010 edition ter SIST EN 1991-1-4:2005. Za izračune (uklonska analiza, notranje sile...) so uporabljene vrednosti dobljene iz VGB-R 610 e, 2010 edition, račun po SIST EN 1991-1-4:2005 pa služi predvsem za primerjavo velikosti obtežbe.

### 5.1 Zunanji in notranji pritisk vetra po VGB-R 610 e, 2010 edition

Zunanji pritisk vetra  $w_e(z, \Theta)$  je določen kot:

$$w_e(z, \Theta) = c_{pe}(\Theta)\varphi F_i q_b(z) \quad (5-1)$$

Pri čemer je:

$z$  - višina nad terenom, pri čemer je nadmorska višina  $+360,00\text{m} = \pm 0,00\text{m}$

$\Theta$  - razdalja med smerjo vetra in izbrano smerjo v prečnem prerezu izražena s kotom; obodni kot

$c_{pe}$  - koeficient zunanjega obročnega pritiska odvisen od kota  $\Theta$

$\varphi$  - dinamični koeficient

$F_i$  - interferenčni koeficient

$q_b$  - pritisk vetra odvisen od višine  $z$

Notranji pritisk je določen kot:

$$w_i = c_{pi} F_i q_b(H) \quad (5-2)$$

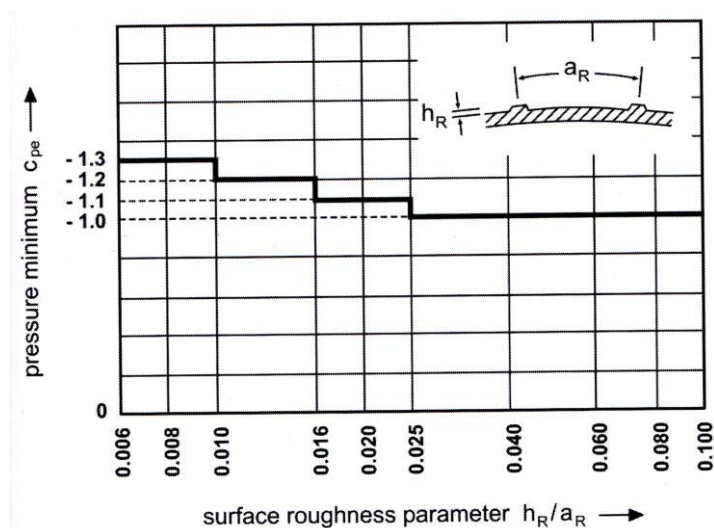
Pri čemer je:

$c_{pi}$  - koeficient notranjega obročnega pritiska, ki je po predpostavki konstanten ter negativen - srk; privzeta vrednost znaša  $-0,5$

$q_b(H)$  - pritisk vetra določen pri višini  $z = H$

### 5.1.1 Koeficient zunanega obročnega pritiska

Porazdelitev pritiska vetra v obodni smeri je določena glede na šest standardiziranih krivulj porazdelitve pritiska.  $c_{pe}(\Theta)$  predstavlja idealizirano porazdelitev pritiska vetra v obodni smeri.



Slika 5-1: Minimum pritiska vetra v odvisnosti faktorja hrapavosti površine (VGB-R 610 e, 2010 edition, str. 21)

Za določitev ustrezne krivulje je potreben izračun faktorja hrapavosti površine  $h_R/a_R$ , kjer je

$h_R$  - povprečna višina reber določena na tretini višine lupine

$a_R$  - povprečna razdalja med rebri

$$a_R = \frac{2\pi R}{N} \quad (5-3)$$

$N$  - število reber

$R$  - polmer lupine na tretini višine

$$\frac{h_R}{a_R} \quad (5-4)$$

## Podatki za obravnavan hladilni stolp

Preglednica 5-1: Podatki za izračun koeficienta zunanjega obročnega pritiska

<b>h<sub>R</sub></b>	40 mm
<b>a<sub>R</sub></b>	2,2247m
<b>N</b>	94
<b>R</b>	33,3m

$$a_R = \frac{2\pi R}{N} = \frac{2\pi 33,3}{94} = 2,2247\text{m}$$

$$\frac{h_R}{a_R} = \frac{40}{2224,7} = 0,01798$$

Iz preglednice 5-2 je razvidno, da je za hladilni stolp v Šoštanju primerna krivulja K 1.1

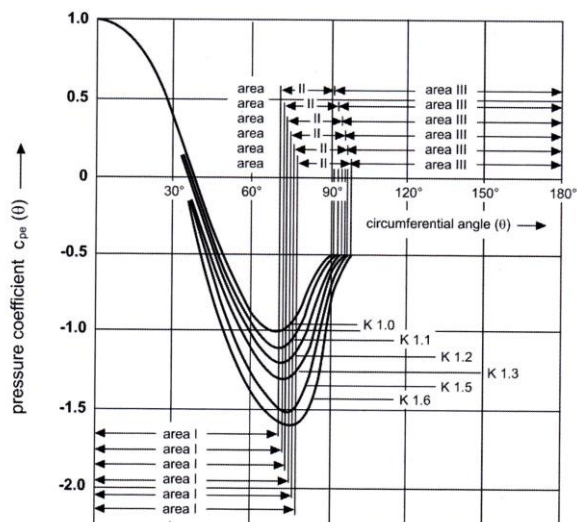
Preglednica 5-2: Krivulje porazdelitve pritiska  
(VGB-R 610 e, 2010 edition, str. 22)

Surface	Roughness parameter $h_R/a_R$	Pressure minimum min $c_{pe}$	Distribution curve
With ribs	0,025 ... 0,100	-1,0	K 1.0
	0,016 ... 0,025	-1,1	K 1.1
	0,010 ... 0,016	-1,2	K 1.2
	0,006 ... 0,010	-1,3	K 1.3
Without ribs	Off-shutter finish	-1,5	K 1.5
	smooth	-1,6	K1.6

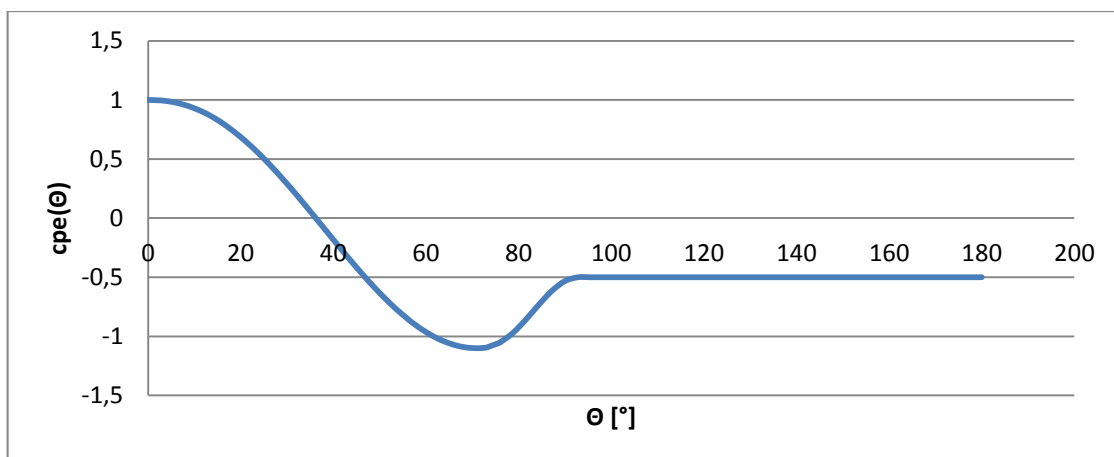
Krivulje porazdelitve pritiska so opisane s tremi analitičnimi funkcijami. V preglednici 5-3 so prikazane te funkcije za krivuljo K 1.1.

Preglednica 5-3: Funkcije krivulje porazdelitve na posameznih odsekih  
(VGB-R 610 e, 2010 edition, str. 23)

Curve	Pressure minimum	Area I $0^\circ \leq \theta \leq 71^\circ$	Area II $71^\circ \leq \theta \leq 93^\circ$	Area III $93^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$	$c_f$
K 1.1	-1,1	$1 - 2,1 \left( \sin \frac{90}{71} \theta \right)^{2,239}$	$-1,1 + 0,6 \left( \sin \left( \frac{90}{22} (\theta - 71) \right) \right)^{2,395}$	-0,5	0,64



Slika 5-2: Krivulje porazdelitve pritiska (VGB-R 610 e, 2010 edition, str. 22)



Grafikon 5-1:  $c_{pe}(\theta)$  za obravnavan hladilni stolp po VGB-R 610 e, 2010 edition

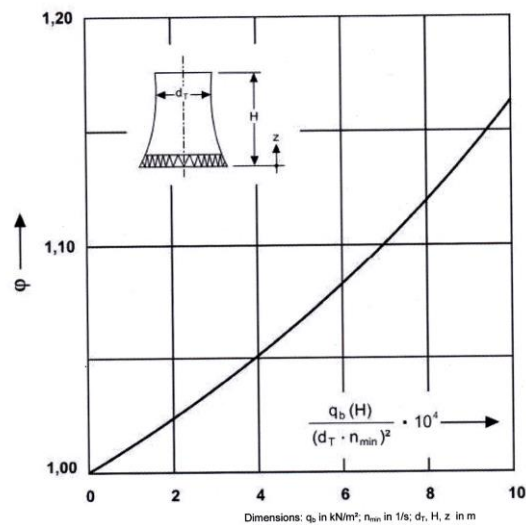
### 5.1.2 Dinamični koeficient

Nihanje vetra lahko povzroča resonančne vibracije, ki jih upoštevamo s povečanjem ekvivalentne statične obtežbe. Dinamični koeficient  $\phi$  se določi iz slike 5-3.

$n_{min}$  - najnižja naravna frekvenca lupine, vključno s podporami in temeljenjem

$d_T$  - premer grla

H - višina lupine



Slika 5-3: Dinamični koeficient  
 (VGB-R 610 e, 2010 edition, str. 26)

$$\frac{q_b(H)}{(d_T n_{\min})^2} 10^4 \quad (5-5)$$

Podatki za obravnavani hladilni stolp

Preglednica 5-4: Podatki za izračun dinamičnega koeficienta

$d_T$	56,3m
$q_b(H)$	1,319034 $\text{kN/m}^2$
$n_{\min}$	1,1159
$\frac{q_b(H)}{(d_T n_{\min})^2} 10^4$	3,341863
$\varphi$	1,041

$$\frac{q_b(H)}{(d_T n_{\min})^2} 10^4 = \frac{1,319034}{(56,3 \cdot 1,1159)^2} 10^4 = 3,341863$$

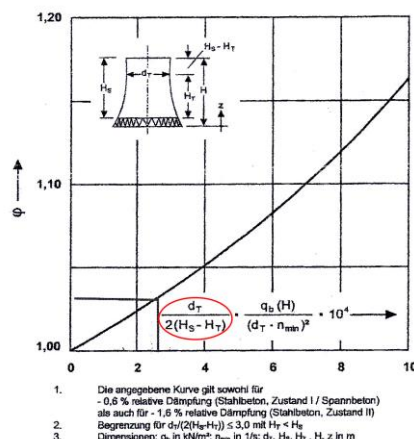
$q_b$  na višini  $H$  je določen v poglavju 5.1.4.

$n_{\min}$  je določen pri nihanju lupine zaradi lastne teže s pomočjo modalne analize. Rezultati analize so predstavljeni v poglavju 7.2

V primerjavi s projektno dokumentacijo, kjer je bila za projektiranje uporabljena VGB-R 610 e, 2005 edition, pride z VGB-R 610 e, 2010 edition do sprememb pri računu dinamičnega koeficienta.



Opomba 1: V projektni dokumentaciji je bil v izračunu dinamičnega koeficienta še dodatni člen, označen na sliki 5-4. Vrednost tega dodatnega člena za obravnavani stolp znaša približno 0,5. Izračunani dinamični faktor tako znaša 1,03, za nadaljnje izračune pa je uporabljena vrednost 1,05.



Slika 5-4: Spremembe pri računu dinamičnega koeficienta (NDCT ŠOŠTANJ unit 6, 2010, str. 98)

Opomba 2: Izračun  $n_{\text{min}}$  v tej diplomski nalogi ni povsem korekten. Za izračun  $n_{\text{min}}$  naj bi bilo v modelu upoštevano tudi temeljenje, kar pa v našem modelu ni. Tako je dobljena minimalna naravna frekvenca kar za 13,1% večja kot v projektni dokumentaciji. Vrednost  $\phi$ , razbrana iz slike 5-3, znaša 1,041. Tako kot v projektni dokumentaciji je za nadaljnje izračune v tej nalogi upoštevana vrednost  $\phi = 1,05$ .

### 5.1.3 Interferenčni koeficient

V okolici hladilnega stolpa so lahko tudi druge konstrukcije, drugi stolpi ali druge stavbe. Te stavbe lahko vplivajo na veter v okolici; imajo svoja " vetrna polja", ki spremenijo potek vetra. Takšne spremembe upoštevamo s povečanjem pritiska vetra, pri tem pa je odvisno kakšna je stavba, ki vpliva nanj ter koliko je oddaljena.

Interferenčni koeficient  $F_i$  poveča obtežbo vetra, ki bi delovala na hladilni stolp, če v njegovi okolici ne bi bilo drugih stavb. Povečana obtežba se mora upoštevati za dimenzioniranje lupine in podpornih konstrukcij, vključno s temelji, ni pa je potrebno upoštevati pri kontroli nosilnosti tal.

Interferenčni koeficient se določi z upoštevanjem parametra oddaljenosti  $a/d_m$  in vrste konstrukcije - zgradbe ali stolpi. V primeru obravnavanega stolpa bodo v bližnji okolici stale samo zgradbe.

a - oddaljenost konstrukcije

$d_m$  - povprečen premer

$$d_m = \frac{(d_u + d_T)}{2} \quad (5-6)$$

$d_u$  - premer spodnjega roba lupine

$d_T$  - premer grla

Preglednica 5-5: Podatki o premerih lupine

$d_u$	93,116m
$d_T$	56,3m
$d_m$	74,708m

$d_m$  se izračuna po enačbi (5-6)

$$d_m = \frac{(d_u + d_T)}{2} = \frac{93,116 + 56,3}{2} = 74,708\text{m}$$

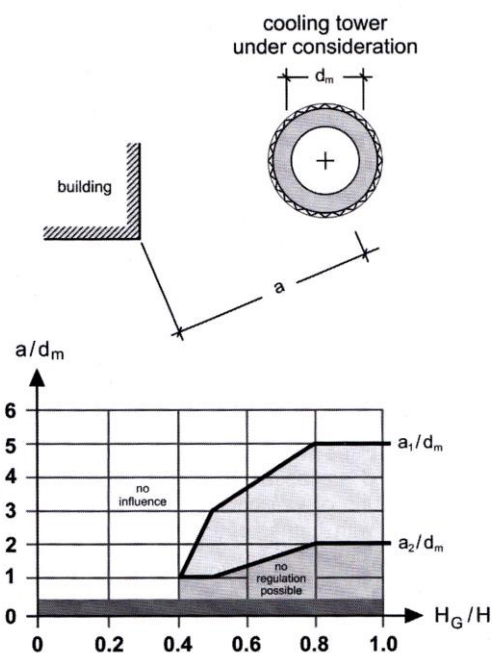
Vrednost parametra oddaljenosti je lahko:

1.  $\frac{a}{d_m} > \frac{a_1}{d_m} \rightarrow F_i = 1$

2.  $\frac{a}{d_m} < \frac{a_2}{d_m} \rightarrow$  interferenčni koeficient ni določen, saj v tem primeru ne moremo določiti globalne vrednosti koeficienta, potrebna je podrobnejša analiza, npr. v vetrnem tunelu

3.  $\frac{a_1}{d_m} > \frac{a}{d_m} > \frac{a_2}{d_m} \rightarrow F_i$  se določi iz enačbe (5-7)

$$F_i = 1 + 0,1 \left( \frac{a_1}{d_m} - \frac{a}{d_m} \right) \geq 1,0 \quad (5-7)$$



Slika 5-5: Interferenčni koeficient  
 (VGB-R 610 e, 2010 edition, str. 29)

V primeru, da je sosednja konstrukcija neka stavba, se lahko interferenca zanemari, če je ta stavba nižja kot 40% višine hladilnega stolpa.

Če je v okolici več visokih konstrukcij, je potrebna podrobnejša analiza učinkov interference. Če je več primerov interference, se upošteva najbolj neugoden.

V primeru obravnavanega stolpa sta v bližini 2 zgradbi - strojnica ter kotlovnica. Za potrebe dejanskega dimenzioniranja je bila izvedena podrobnejša analiza. Podjetje Turboinštitut d.d je opravilo numerične simulacije vetra. Ugotovitve so bile upoštevane tudi v tej diplomski nalogi.

Podatki o sosednjih stavbah

Preglednica 5-6: Podatki o kotlovnici

<b>Kotlovnica</b>	
<b>H</b>	162m
<b>0,4H</b>	64m < 115m
<b>H<sub>g</sub></b>	115m
<b>a</b>	105,1m
<b>a/d<sub>m</sub></b>	1,40681
<b>H/H<sub>g</sub></b>	0,70988
<b>a<sub>1</sub>/d<sub>m</sub></b>	4,4
<b>a<sub>2</sub>/d<sub>m</sub></b>	1,7
<b>F<sub>i</sub></b>	1,3

Račun  $F_i$  se izvede po enačbi (5-7).

$$F_i = 1 + 0,1 \left( \frac{a_1}{d_m} - \frac{a}{d_m} \right) = 1 + 0,1(4,4 - 1,40681) = 1,299 \geq 1,0$$

Preglednica 5-7: Podatki o strojnici

<b>Strojnica</b>	
<b>H</b>	162m
<b>0,4H</b>	64m <83m
<b>Hg</b>	83m
<b>a</b>	84,5m
<b>a/d<sub>m</sub></b>	1,13107
<b>H/Hg</b>	0,70988
<b>a<sub>1</sub>/d<sub>m</sub></b>	3,1
<b>a<sub>2</sub>/d<sub>m</sub></b>	1,1
<b>F<sub>i</sub></b>	1,2

Račun  $F_i$  se izvede po enačbi (5-7)

$$F_i = 1 + 0,1 \left( \frac{a_1}{d_m} - \frac{a}{d_m} \right) = 1 + 0,1(3,1 - 1,13107) = 1,197 \geq 1,0$$

H - višina hladilnega stolpa

Hg - višina sosednje zgradbe

Numerične simulacije vetra v okolici hladilnega stolpa so pokazale, da se od terena, ki je 5m nižje kot hladilni stolp, pa do višine 65m upošteva dinamični koeficient določen zaradi kotlovnice, od višine 65m pa do višine 167m (5m + 162m = višina stolpa) pa se upošteva dinamični koeficient določen glede na strojnico. Takšna razporeditev koeficientov je bila upoštevana tudi pri določitvi obtežbe v tej diplomski nalogi. (NDCT ŠOŠTANJ unit 6, 2010, str. 16)

#### 5.1.4 Pritisk vetra

Pritisk vetra je odvisen od geografske lokacije in terena. Osnova za določanje pritiska zaradi sunkov vetra je povečanje napetosti zaradi sunkov vetra, ki so določeni s pomočjo teorije naključnih vibracij, nato pa prevedeni na ekvivalentno obtežbo. Resonančne vibracije lupine pri tem niso upoštevane, obravnavane so pri računu dinamičnega koeficienta.

Pritiski zaradi sunkov vetra so preračunani na 0,02 (2%) letno tveganje za prekoračitev oz. na povratno dobo 50let.

V februarju 2010 je bilo podano strokovno mnenje, na podlagi katerega je bila določena hitrost sunkov vetra  $v_{\text{sunki}}$ . (NDCT ŠOŠTANJ unit 6, 2010, str. 16)

Preglednica 5-8: Osnovna hitrost vetra  
 (NDCT ŠOŠTANJ unit 6, 2010, str. 16)

$v_{\text{sunki}}$	33,33m/s na višini 10m
<b>Faktor pomembnosti</b>	1
<b>Kategorija terena</b>	II

Preglednica 5-9: Določitev pritiska  $q_b$   
 (VGB-R 610 e, 2010 edition, str. 25)

Kategorija terena	Povprečna hitrost vetra $v_m$ [m/s]	Hitrost sunkov $v_{\text{sunki}}$ [m/s]	Pritisk vetra zaradi sunkov $q_b$ [kN/m <sup>2</sup> ]
II	$22,5 \left(\frac{z}{10}\right)^{0,16}$	$33,8 \left(\frac{z}{10}\right)^{0,11}$	$0,71 \left(\frac{z}{10}\right)^{0,22}$

Glede na VGB-R 610 e, 2010 edition, je torej pritisk vetra določen kot:

$$q_b(z) = 0,71 \left(\frac{z}{10}\right)^{0,22} \quad (5-8)$$

V preglednici 5-10 so podane vrednosti pritiska vetra na različnih višinah lupine, ki so bile uporabljene pri izračunu obtežbe vetra. Pritisk vetra se določi glede na višino nad terenom, kota terena pa je 5m nižje kot lupina.

Preglednica 5-10: Pritisk vetra za obravnavani stolp po VGB-R 610 e, 2010 edition

Višina stolpa [m]	Višina glede na teren [m]	$q_b(z)$ [kN/m <sup>2</sup> ]
8,302	13,302	0,755997007
9,0705	14,0705	0,765396453
9,839	14,839	0,774403609
10,6075	15,6075	0,783053949
11,376	16,376	0,791378179
12,1445	17,1445	0,799403067
12,913	17,913	0,807152099
13,6815	18,6815	0,814646006
14,45	19,45	0,821903182
15,2185	20,2185	0,828940033

se nadaljuje...

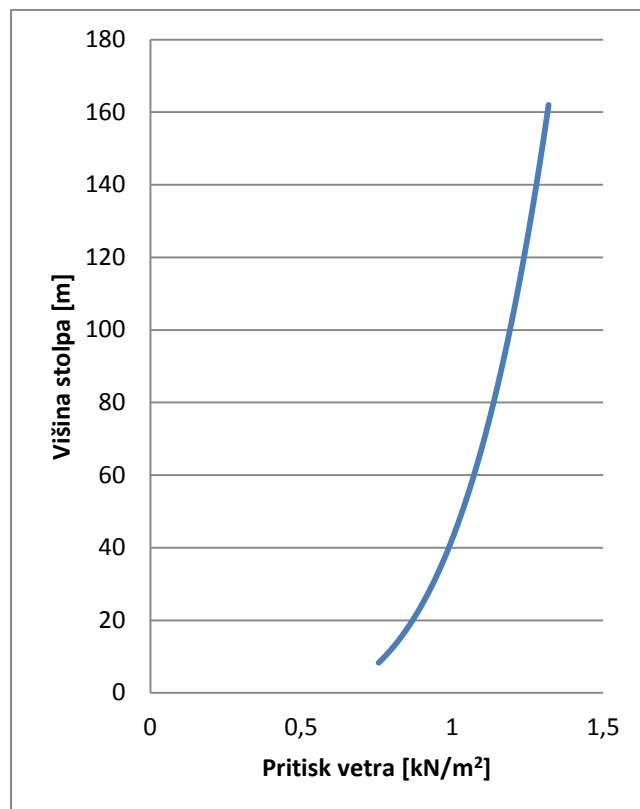
...nadaljevanje Preglednice 5-10

15,987	20,987	0,835771252
16,7555	21,7555	0,842410059
17,524	22,524	0,848868392
18,2925	23,2925	0,855157072
19,061	24,061	0,861285938
19,8295	24,8295	0,867263968
20,598	25,598	0,873099373
21,3665	26,3665	0,87879969
22,135	27,135	0,88437185
22,9035	27,9035	0,889822245
23,672	28,672	0,895156781
26,746	31,746	0,915440098
29,82	34,82	0,934244775
32,894	37,894	0,95179594
35,968	40,968	0,968269376
39,042	44,042	0,98380516
42,115	47,115	0,998512191
45,189	50,189	1,012493463
48,263	53,263	1,025821946
51,337	56,337	1,038563287
54,411	59,411	1,050773372
57,485	62,485	1,062500196
60,559	65,559	1,073785312
63,633	68,633	1,084664946
66,707	71,707	1,095170887
69,781	74,781	1,105331197
72,855	77,855	1,115170778
75,929	80,929	1,12471184
79,003	84,003	1,133974279
82,077	87,077	1,142975995
85,151	90,151	1,151733156
88,225	93,225	1,160260414
91,299	96,299	1,168571095
94,373	99,373	1,176677359
97,447	102,447	1,184590329
100,521	105,521	1,192320213
103,595	108,595	1,1998764
104,3635	109,3635	1,201739336
105,132	110,132	1,203592089
105,9005	110,9005	1,205434785
106,669	111,669	1,207267548

se nadaljuje...

...nadaljevanje Preglednice 5-10

107,43725	112,43725	1,209089907
108,2055	113,2055	1,210902581
108,97375	113,97375	1,212705684
109,742	114,742	1,214499332
110,5105	115,5105	1,216284216
111,279	116,279	1,218059861
112,0475	117,0475	1,219826377
112,816	117,816	1,221583868
113,5845	118,5845	1,223332441
114,353	119,353	1,225072196
115,1215	120,1215	1,226803236
115,89	120,89	1,22852566
118,964	123,964	1,235331104
122,038	127,038	1,242006164
125,112	130,112	1,248556403
128,186	133,186	1,254987024
131,26	136,26	1,261302897
134,334	139,334	1,267508592
137,408	142,408	1,273608397
140,482	145,482	1,27960635
143,556	148,556	1,285506249
146,63	151,63	1,291311677
149,704	154,704	1,297026018
152,778	157,778	1,302652469
155,207	160,207	1,307038186
156,08083	161,08083	1,308603259
156,95467	161,95467	1,310161742
157,8285	162,8285	1,311713661
158,70233	163,70233	1,313259098
159,57617	164,57617	1,314798131
160,01308	165,01308	1,315565241
160,23154	165,23154	1,315948211
160,45	165,45	1,316330786
160,625	165,625	1,316636968
160,8375	165,8375	1,317008421
161,225	166,225	1,317684823
162	167	1,319033946



Grafikon 5-2: Pritisk vetra za obravnavani stolp po VGB-R 610 e, 2010 edition

## 5.2 Zunanji in notranji pritisk vetra po SIST EN 1991-1-4:2005

V primerjavi z VGB-R 610 e, 2010 edition, ki je namenjen projektiranju različnih hladilnih stolpov na različne obtežne primere, med drugim tudi veter, SIST EN 1991-1-4:2005 določa učinke vetra na različne konstrukcije ali dele konstrukcij, z maksimalno višino in razponom do 200m.

Glede na SIST EN 1991-1-4:2005, člen 5.2, je pritisk vetra, ki deluje na zunanjo površino konstrukcije, določen z naslednjo enačbo:

$$w_e = c_{pe} q_p(z_e) \quad (5-9)$$

Pri čemer je:

$q_p(z_e)$  - pritisk zaradi maksimalne hitrosti vetra

$z_e$  - referenčna višina za zunanji pritisk, enaka maksimalni višini nad nivojem terena do obravnavanega področja



$c_{pe}$  - koeficient zunanjega pritiska

Notranji srk je določen v členu 5.2 kot:

$$w_i = c_{pi} q_p(z_i) \quad (5-10)$$

Pri čemer je:

$q_p(z_i)$  - pritisk zaradi maksimalne hitrosti vetra

$z_i$  - referenčna višina za notranji pritisk, enaka je višini konstrukcije

$c_{pi}$  - koeficient notranjega pritiska določen v členu 7., za odprte silose in dimnike je  
 $c_{pi} = -0,6$

### 5.2.1 Koeficienti zunanjega pritiska

Koeficienti zunanjega pritiska za krožne cilindre so odvisni od Reynolds-ovega števila  $Re$  pri referenčni višini  $z_e$ , definiranega v izrazu (5-11).

$$Re = \frac{bv(z_e)}{\nu} \quad (5-11)$$

Pri tem je:

$b$  - premer

$\nu$  - kinematična gostota zraka,  $\nu = 15 \cdot 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$

$v(z_e)$  - maksimalna hitrost vetra pri višini  $z_e$

Podatki za obravnavan stolp

Preglednica 5-11: Podatki za izračun  $Re$  na višini 10m

<b><math>b_{10m}</math></b>	92,10m
<b><math>v(10m)</math></b>	33,3m/s
<b><math>\nu</math></b>	$15 \cdot 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$
<b><math>Re</math></b>	$20,45 \cdot 10^7$

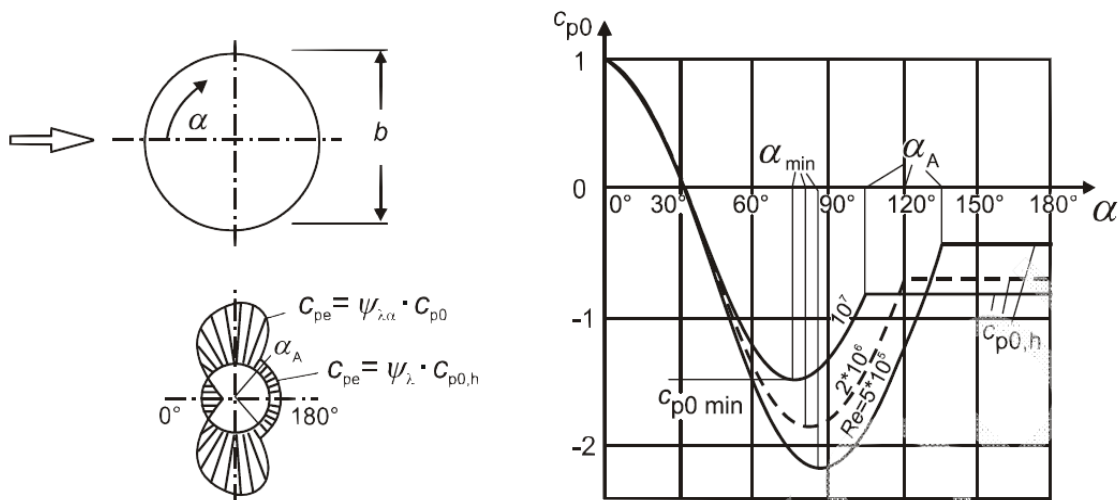
$$Re = \frac{bv(z_e)}{v} = \frac{92,1 \cdot 33,3}{15 \cdot 10^{-6}} = 20,45 \cdot 10^7$$

Koeficient zunanega pritiska je določen z enačbo (5-12).

$$c_{pe} = c_{p,0} \Psi_{\lambda\alpha} \quad (5-12)$$

Pri čemer je:

$c_{p,0}$  - koeficient zunanega pritiska brez toka na prostem robu, določen za različna Reynolds-ova števila v odvisnosti kota  $\alpha$ , kot prikazuje Slika 5-6



Slika 5-6: Koeficient zunanega pritiska brez toka na prostem robu  
(SIST EN 1991-1-4: 2005, str. 70)

Preglednica 5-12: Koeficient zunanega pritiska brez toka na prostem robu  
(SIST EN 1991-1-4: 2005, str. 71)

Re	$\alpha_{\min}$	$c_{p0,\min}$	$\alpha_A$	$c_{p0,h}$
$5 \cdot 10^5$	85	-2,2	135	-0,4
$2 \cdot 10^6$	80	-1,9	120	-0,7
$10^7$	75	-1,5	105	-0,8

Kjer je:

$\alpha_{\min}$  - pozicija najmanjšega pritiska

$c_{p0,\min}$  - vrednost najmanjšega koeficienta pritiska

$\alpha_A$  - pozicija odlepljanja

$c_{p0,h}$  - osnovni koeficient pritiska

Tipične vrednosti so podane v preglednici 5-12, vmesne vrednosti pa se lahko določijo z linearno interpolacijo. Vrednosti iz preglednice so določene glede na ekvivalentno hrapavost  $k/b$ , ki je manjša od  $5 \cdot 10^{-4}$ . Za gladek beton  $k$  znaša 0,2mm, za grob beton pa 1,0mm.

$\Psi_{\lambda\alpha}$  - faktor prostega roba, določen z izrazom (5-13)

$$\begin{aligned} \Psi_{\lambda\alpha} &= 1, & \text{za } 0^\circ \leq \alpha \leq \alpha_{\min} \\ \Psi_{\lambda\alpha} &= \Psi_\lambda + (1 - \Psi_\lambda) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} \left(\frac{\alpha - \alpha_{\min}}{\alpha_A - \alpha_{\min}}\right)\right), & \text{za } \alpha_{\min} < \alpha < \alpha_A \\ \Psi_{\lambda\alpha} &= \Psi_\lambda, & \text{za } \alpha_A \leq \alpha \leq 180^\circ \end{aligned} \quad (5-13)$$

Kjer je:

$\alpha_A$  - položaj odlepljanja

$\Psi_\lambda$  - faktor prostega roba za elemente s tokom na prostem robu, odvisen od efektivne vitkosti  $\lambda$

Za krožne cilindre velja:

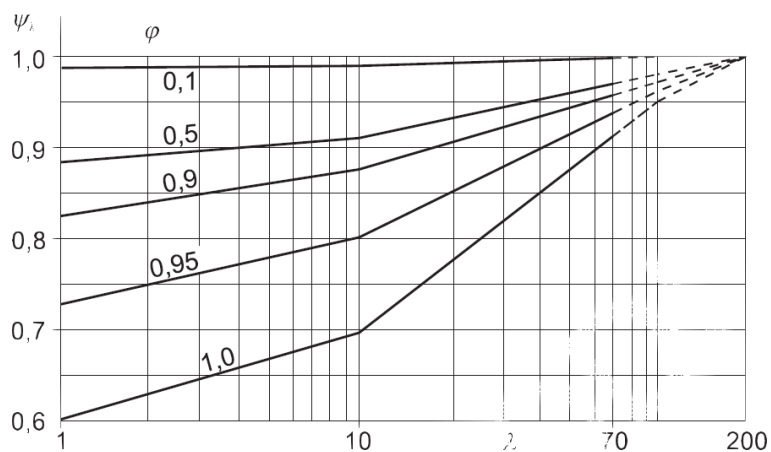
$$\begin{aligned} l \geq 50m & \quad \min \left\{ \begin{array}{l} \lambda = 0,7 \frac{l}{b} \\ \lambda = 70 \end{array} \right\} \\ l < 15m & \quad \min \left\{ \begin{array}{l} \lambda = \frac{l}{b} \\ \lambda = 70 \end{array} \right\} \end{aligned} \quad (5-14)$$

Podatki za obravnavan stolp

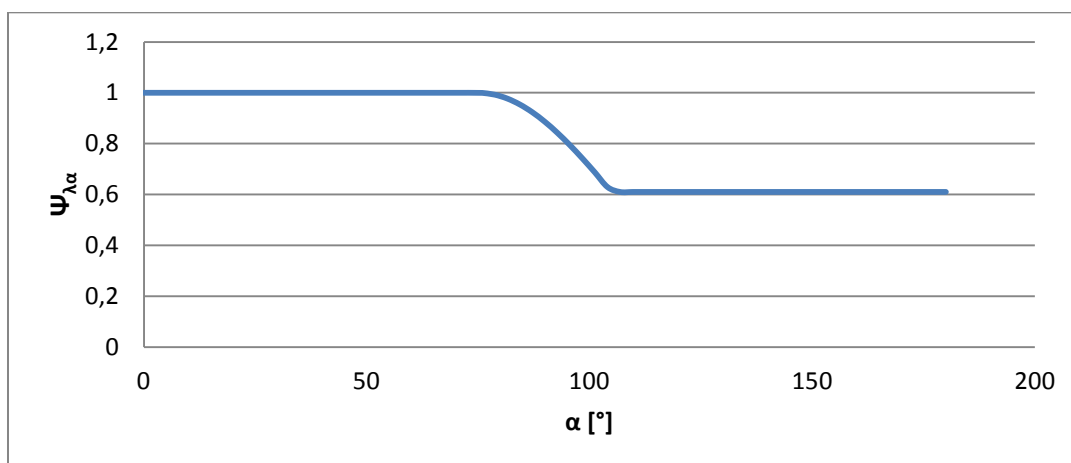
Preglednica 5-13: Podatki za faktor prostega roba

$b_{\max}$	93,116m
$l$	153,698m
$\lambda$	1,155
$\varphi$	1
$\Psi_\lambda$	0,61

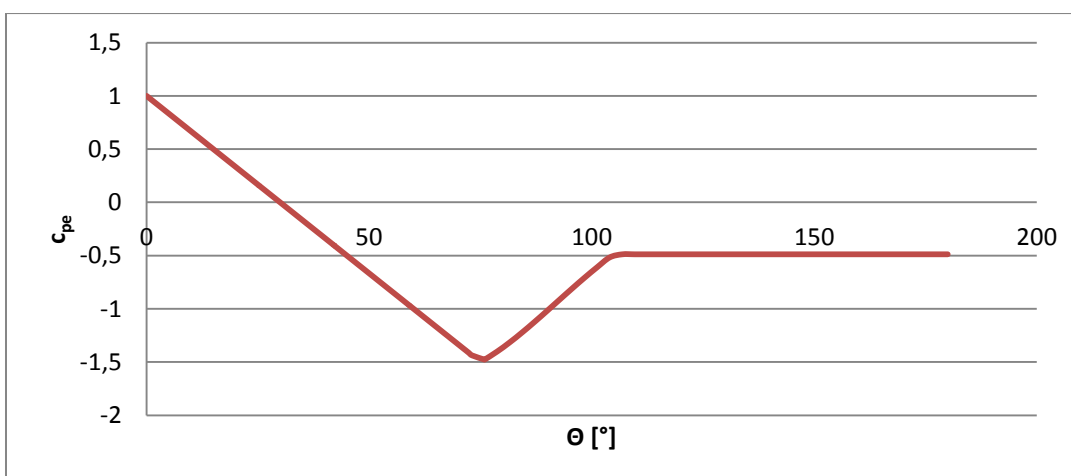
$$l \geq 50m: \lambda = 0,7 \frac{l}{b} = 0,7 \frac{153,698}{93,116} = 1,155$$



Slika 5-7: Faktor prostega roba  
(SIST EN 1991-1-4: 2005, str. 81)



Grafikon 5-3: Faktor prostega roba za obravnavani hladilni stolp



Grafikon 5-4: Koeficient zunanje pritiska za obravnavani stolp po SIST EN 1991-1-4:2005

## 5.2.2 Pritisk vetra

Odziv konstrukcije se določi glede na pritisk vetra pri maksimalni hitrosti  $q_p$  na referenčni višini.  $q_p$  je odvisen od vetrne klime, hrapavosti terena in hribovitosti. Enak je pritisku pri povprečni hitrosti vetra ter prispevkom kratkotrajnih nihanj pritiska.

Pritisk pri maksimalni hitrosti vetra je določen z izrazom (5-15).

$$q_p(z) = [1 + 7I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \rho v_m^2(z) = c_e(z) \cdot q_b \quad (5-15)$$

Kjer je:

$\rho$  - gostota zraka, odvisna od nadmorske višine, temperature in pritiska, določena v Nacionalnem dodatku; priporočena vrednost je  $1,25 \text{ kg/m}^3$

$c_e(z)$  - faktor izpostavljenosti

$$c_e(z) = \frac{q_p(z)}{q_b} \quad (5-16)$$

$q_b$  - osnovni pritisk vetra

$$q_b = \frac{1}{2} \rho v_b^2 \quad (5-17)$$

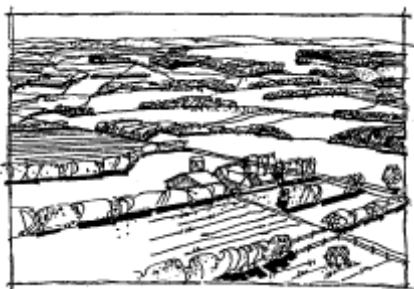
$v_b$  - osnovna hitrost vetra je temeljna osnovna hitrost vetra modificirana glede na smer vetra in letni čas na 10m in pri kategoriji terena II

$$v_b = c_{dir} c_{season} v_{b,0} \quad (5-18)$$

$v_{b,0}$  - temeljna osnovna hitrost vetra je 10 minutna povprečna hitrost vetra pri neodvisni smeri vetra, na višini 10m pri odprtem terenu z nizko vegetacijo in redkimi ovirami, ki so med seboj oddaljene vsaj 20 višin ovire (kar ustreza kategoriji terena II) preračunana na 2% letno tveganje za prekoračitev

$c_{dir}$  - faktor smeri delovanja, priporočena vrednost za Slovenijo v Nacionalnem dodatku  
 $c_{dir} = 1$

$c_{\text{season}}$  - faktor vpliva letnega časa, priporočena vrednost za Slovenijo v Nacionalnem dodatku  $c_{\text{season}} = 1$



Slika 5-8: Kategorija terena II  
(SIST EN 1991-1-4: 2005, str. 92)

$I_v(z)$  - intenziteta turbulence na višini  $z$  je določena kot standardna deviacija turbulence deljena s povprečno hitrostjo vetra

Turbulentna komponenta hitrosti vetra ima srednjo vrednost 0 in standardno deviacijo  $\sigma_v$

$$\sigma_v = k_r v_b k_I \quad (5-19)$$

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{k_I}{c_0(z) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad \text{za } z_{\min} \leq z \leq z_{\max}$$

$$I_v(z) = I_v(z_{\min}) \quad z < z_{\min} \quad (5-20)$$

$k_I$  - faktor turbulence, vrednost podana v Nacionalnem dodatku, priporočena vrednost  $k_I = 1$

$v_m(z)$  - povprečna hitrost vetra na višini  $z$  nad terenom je odvisna od hrapavosti terena, ortografije in osnovne hitrosti vetra  $v_b$

$$v_m(z) = c_r(z) c_0(z) v_b \quad (5-21)$$

$c_0(z)$  - faktor ortografije;

V primeru, da relief poveča hitrost vetra za več kot 5% je potrebno to upoštevati s faktorjem ortografije. Učinek hribovitosti se lahko zanemari, če je povprečen nagib

terena manjši kot 3°. Upošteva se lahko teren dolžine do 10 višin izolirane ortografske značilnosti.

$c_r(z)$  - faktor hrapavosti terena upošteva spremenljivost povprečne hitrosti vetra zaradi višine nad terenom in hrapavosti terena pred konstrukcijo v smeri vetra

$$\begin{aligned}c_r(z) &= k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right), & z_{min} \leq z \leq z_{max} \\c_r(z) &= c_r(z_{min}), & z \leq z_{min}\end{aligned}\tag{5-22}$$

$z_0$  - dolžina hrapavosti, odvisna od kategorije terena

$z_{0,II}$  - dolžina hrapavosti za kategorijo terena II,  $z_{0,II} = 0,05\text{m}$

$z_{min}$  - minimalna višina, odvisna od kategorije terena

$z_{max}$  - maksimalna višina, privzame se 200m

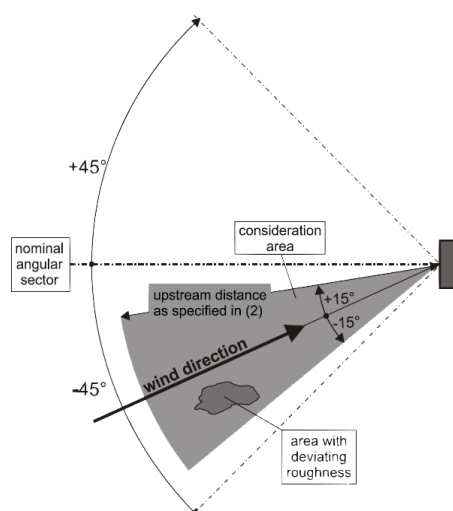
$k_r$  - faktor terena odvisen od dolžine hrapavosti  $z_0$

$$k_r = 0,19 \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07}\tag{5-23}$$

Preglednica 5-14: Dolžina hrapavosti za kategorijo terena II  
(SIST EN 1991-1-4: 2005, str. 20)

Kategorija terena		$z_0$ [m]	$z_{min}$ [m]
II	Območje z nizko vegetacijo kot npr. trava in redkimi ovirami (drevesa, zgradbe) z medsebojno oddaljenostjo vsaj 20 kratnik višine ovire	0,05	2

Hrapavost terena za določeno smer je odvisna od hrapavosti tal in razdalje z enotno hrapavostjo površine glede na smer vetra. Majhna območja (manj kot 10% izbranega območja) z odstopajočo hrapavostjo se lahko zanemarijo.



Slika 5-9: Območje faktorja hrapavosti  
(SIST EN 1991-1-4: 2005, str. 21)

Podatki za izračun pritiska vetra

Preglednica 5-15: Podatki za izračun pritiska vetra

$\rho$	1,25kg/m <sup>3</sup>
$c_{dir}$	1
$c_{season}$	1
$k_l$	1
$c_r(z)$	$0,19 \cdot \ln\left(\frac{z}{0,05}\right)$
$z_0$	0,05m
$z_{0,II}$	0,05m
$z_{min}$	2m
$z_{max}$	200m
$k_r$	0,19
$c_0$	1
$I_v(z)$	$\frac{1}{\ln\left(\frac{z}{0,05}\right)}$

V preglednici 5-16 je podana hitrost sunkov vetra na različnih višinah. Hitrost sunkov na višini 10m je bila uporabljena za račun pritiskov po VGB-R 610 e, 2010 edition. Vendar pa hitrost sunkov za račun pritiska vetra po SIST EN 1991-1-4:2005 ni primerna, saj za račun potrebujemo temeljno osnovno, osnovno ali povprečno hitrost vetra.



Preglednica 5-16: Vrednosti  $v_{\text{sunki}}$  na različnih višinah  
 (NDCT ŠOŠTANJ unit 6, 2010, str. 16)

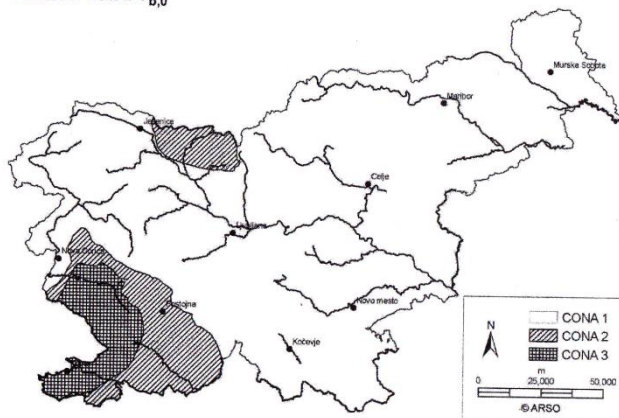
Višina [m]	$v_{\text{sunki}}$ [m/s]
10	33,33
20	35,82
50	39,09
100	41,54
150	42,98
170	43,24

Glede na Evrokod 1 - Osnove projektiranja in vplivi na konstrukcije se lahko določi temeljna vrednost osnovne hitrosti vetra  $v_{b,0}$ , ki je v preglednici 5-17 podana za različna območja Slovenije in različne nadmorske višine.

Preglednica 5-17: Temeljne vrednosti osnovne hitrosti vetra  $v_{b,0}$  glede na Evrokod 1  
 (Beg, B., Pogačnik, A., 2009, str. 1-69)

Cona	Opis	Nadmorska višina [m]	$v_{b,0}$ [m/s]
1	Večina Slovenije	Pod 800	20
		800 - 1600	25
		1600 - 2000	30
		Nad 2000	40
2	Trnovski gozd, Notranjska, Karavanke	Pod 1600	25
		1600 - 2000	30
		Nad 2000	40
3	Primorje, Kras, del Vipavske doline	-	30

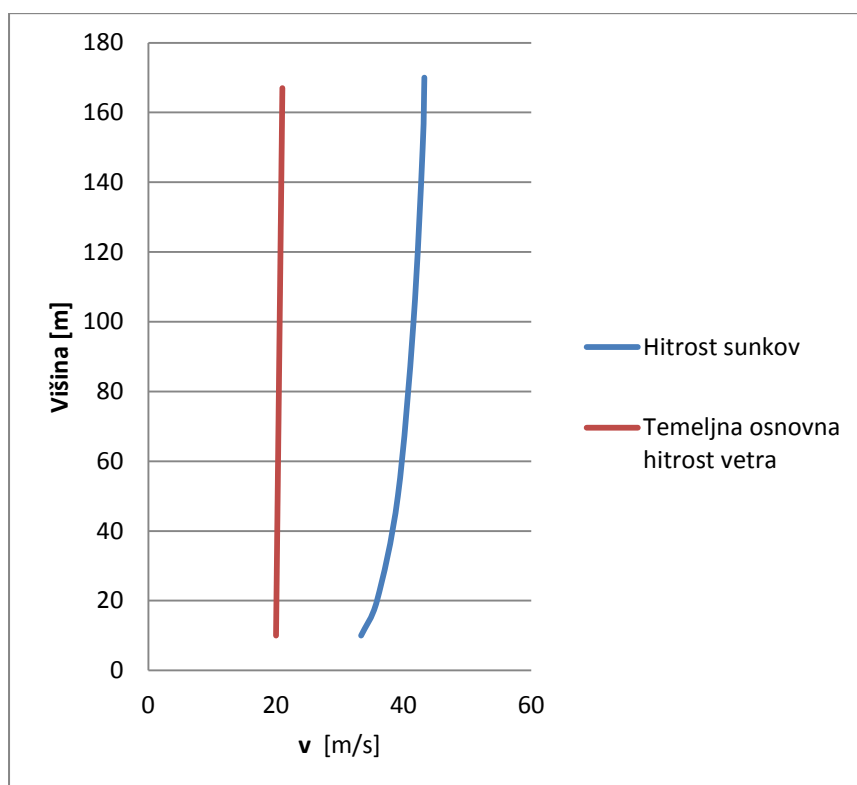
Cone z enako temeljno vrednostjo osnovne hitrosti vetra  $v_{b,0}$



Slika 5-10: Temeljne vrednosti osnovne hitrosti vetra  $v_{b,0}$  glede na Evrokod 1  
 (Beg, B., Pogačnik, A., 2009, str. 1-69)

Šoštanj leži v coni 1 na nadmorski višini 358,7m, torej je temeljna osnovna hitrost vetra  $v_{b,0} = 20\text{m/s}$ .

Grafikon 5-5 prikazuje različne hitrosti vetra v okolici hladilnega stolpa. Vrednosti med seboj niso primerljive, saj gre za povsem različne količine, s pomočjo katerih se glede na različna standarda izračuna pritisk vetra. Hitrost sunkov se potrebuje pri izračunu pritiska vetra zaradi sunkov glede na VGB-R 610 e, 2010 edition. Glede na SIST EN 1991-1-4:2005 se na podlagi temeljne osnovne hitrosti izračuna osnovna hitrost, iz nje pa povprečna hitrost vetra, ki se uporabi za račun maksimalnega pritiska vetra, ki deluje na stolp.



Grafikon 5-5: Vrednosti različnih hitrosti vetra na različnih višinah

Pri obeh načinih izračuna pritiska pa lahko določimo povprečno hitrost vetra  $v_m$  na višini 10m. Razlika med vrednostima je 9,3%.

Preglednica 5-18: Primerjava povprečne hitrosti vetra  $v_m$  na višini 10m

Višina z [m]	$v_m$ [m/s] glede na SIST EN 1991-1-4:2005	$v_m$ [m/s] glede na VGB-R 610 e, 2010 edition
10	20,134	22,187

V preglednici 5-19 so podane vrednosti pritiska vetra na različnih višinah stolpa v skladu z računom po SIST EN 1991-1-4:2005.

Preglednica 5-19: Pritisk vetra po SIST EN 1991-1-4:2005

Višina stolpa [m]	Višina glede na teren [m]	$q_b(z)$ [kN/m <sup>2</sup> ]
8,302	13,302	0,635446
9,0705	14,0705	0,645016
9,839	14,839	0,654155
10,6075	15,6075	0,662904
11,376	16,376	0,671299
12,1445	17,1445	0,67937
12,913	17,913	0,687145
13,6815	18,6815	0,694646
14,45	19,45	0,701896
15,2185	20,2185	0,708912
15,987	20,987	0,715712
16,7555	21,7555	0,722309
17,524	22,524	0,728718
18,2925	23,2925	0,73495
19,061	24,061	0,741017
19,8295	24,8295	0,746927
20,598	25,598	0,752692
21,3665	26,3665	0,758317
22,135	27,135	0,763812
22,9035	27,9035	0,769184
23,672	28,672	0,774437
26,746	31,746	0,794391
29,82	34,82	0,812873
32,894	37,894	0,830121
35,968	40,968	0,846322
39,042	44,042	0,861622
42,115	47,115	0,876135
45,189	50,189	0,889966
48,263	53,263	0,903189
51,337	56,337	0,91587
54,411	59,411	0,928067
57,485	62,485	0,939826
60,559	65,559	0,951189
63,633	68,633	0,962191
66,707	71,707	0,972864
69,781	74,781	0,983234
72,855	77,855	0,993327

se nadaljuje...

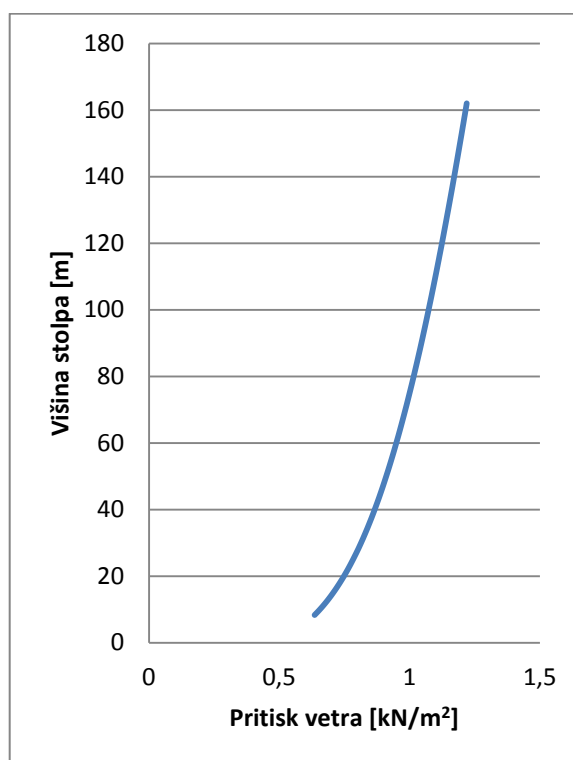
... nadaljevanje Preglednice 5-19

75,929	80,929	1,003162
79,003	84,003	1,01276
82,077	87,077	1,022137
85,151	90,151	1,031308
88,225	93,225	1,040287
91,299	96,299	1,049087
94,373	99,373	1,057719
97,447	102,447	1,066193
100,521	105,521	1,074519
103,595	108,595	1,082705
104,3635	109,3635	1,084731
105,132	110,132	1,086748
105,9005	110,9005	1,088758
106,669	111,669	1,09076
107,4373	112,4373	1,092753
108,2055	113,2055	1,094738
108,9738	113,9738	1,096716
109,742	114,742	1,098687
110,5105	115,5105	1,10065
111,279	116,279	1,102607
112,0475	117,0475	1,104556
112,816	117,816	1,106499
113,5845	118,5845	1,108434
114,353	119,353	1,110362
115,1215	120,1215	1,112284
115,89	120,89	1,114199
118,964	123,964	1,121793
122,038	127,038	1,129287
125,112	130,112	1,136686
128,186	133,186	1,143993
131,26	136,26	1,151214
134,334	139,334	1,158352
137,408	142,408	1,165411
140,482	145,482	1,172395
143,556	148,556	1,179307
146,63	151,63	1,18615
149,704	154,704	1,192927
152,778	157,778	1,19964
155,207	160,207	1,204902
156,0808	161,0808	1,206786
156,9547	161,9547	1,208666

se nadaljuje...

... nadaljevanje Preglednice 5-19

157,8285	162,8285	1,21054
158,7023	163,7023	1,21241
159,5762	164,5762	1,214276
160,0131	165,0131	1,215207
160,2315	165,2315	1,215672
160,45	165,45	1,216137
160,625	165,625	1,216509
160,8375	165,8375	1,216961
161,225	166,225	1,217784
162	167	1,219427



Grafikon 5-6: Pritisk vetra po SIST EN 1991-1-4:2005

### 5.2.3 Konstrukcijski faktor

Konstrukcijski faktor  $c_s c_d$  upošteva učinek vetra zaradi nesočasnega pritiska pri maksimalni hitrosti vetra ( $c_s$ ) in učinek vibracij konstrukcije zaradi turbulence ( $c_d$ ).

Konstrukcijski faktor se lahko razdeli na faktor velikosti  $c_s$  in dinamični faktor  $c_d$ . Ali se faktor računa skupaj ali ločeno je določeno v Nacionalnem dodatku.

Za dimnike z okroglim prečnim prerezom in višino manjšo kot 60m in 6,5-kratnim premerom, je vrednost  $c_s c_d$  enaka 1.

Konstrukcijski faktor se izračuna kot:

$$c_s c_d = \frac{1 + 2k_p I_v(z_s) \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7I_v(z_s)} \quad (5-24)$$

Kjer je:

$z_s$  - referenčna višina za določanje konstrukcijskega faktorja

$$z_s = 0,6h \geq z_{min} \quad (5-25)$$

$k_p$  - faktor največje vrednosti

$$k_p = \max \left\{ \frac{\sqrt{2 \ln(\nu T)} + 0,6}{3} \right\} \quad (5-26)$$

$T$  - povprečni čas pri povprečni hitrosti vetra;  $T = 600s$

$\nu$  - "up-crossing" frekvenca,  $\nu \geq 0,08Hz$

$$\nu = n_{1,x} \sqrt{\frac{R^2}{B^2 + R^2}} \quad (5-27)$$

$n_{1,x}$  - naravna frekvenca konstrukcije

$I_v$  - intenziteta turbulence, določena v poglavju 5.2.2

$R^2$  - faktor resonančne odzivnosti

$$R^2 = \frac{\pi^2}{2\delta} S_L(z_s, n_{1,x}) R_h(\eta_h) R_b(\eta_b) \quad (5-28)$$

$\delta$  - skupni logaritemski dekrement dušenja

$$\delta = \delta_s + \delta_a + \delta_d \quad (5-29)$$

$\delta_s$  - logaritemski dekrement konstrukcijskega dušenja: za betonske stolpe in dimnike  
 $\delta_s = 0,03$

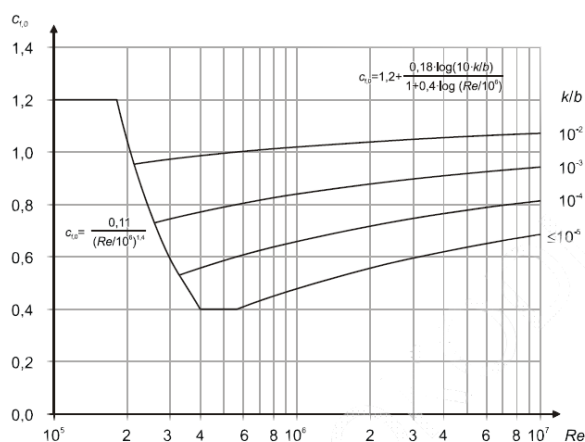
$\delta_a$  - logaritemski dekrement aerodinamičnega dušenja za osnovno obliko

$$\delta_a = \frac{c_f \rho b v_m(z_s)}{2n_1 m_e} \quad (5-30)$$

$c_f$  - koeficient sile za vpliv vetra

$$c_f = c_{f,0} \Psi_\lambda \quad (5-31)$$

$c_{f,0}$  - koeficient sile za cilindre brez toka na prostem robu



Slika 5-11: Koeficient sile za cilindre brez toka na prostem robu  
(SIST EN 1991-1-4: 2005, str. 72)

$\Psi_\lambda$  - faktor prostega roba, odvisen od efektivne vitkosti  $\lambda$ , določen v poglavju 5.2.1

$m_e$  - ekvivalentna masa na enoto dolžine za osnovno obliko

$\delta_d$  - logaritemski dekrement dušenja zaradi posebnih naprav

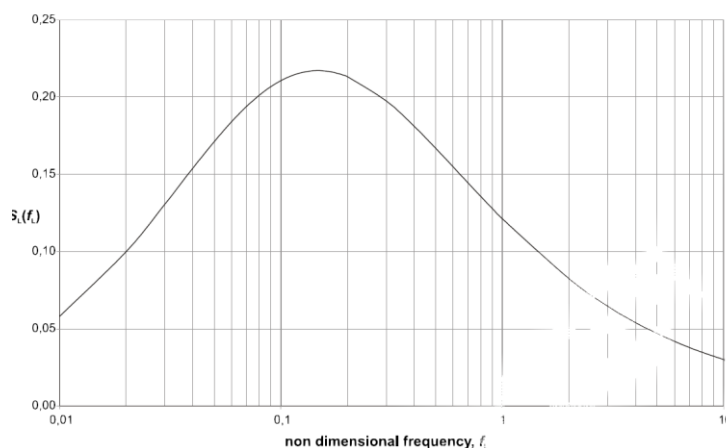
$S_L$  - brezdimenzionalna funkcija gostote spektralne moči izraža porazdelitev pritiska vetra pri različnih frekvencah

$$S_L(z, n) = \frac{n \cdot S_v(z, n)}{\sigma_v^2} = \frac{6,8 f_L(z, n)}{(1 + 10,2 f_L(z, n))^{5/3}} \quad (5-32)$$

$S_v(z, n)$  - enostranska varianca spektra

$f_L(z, n)$  - brezdimenzionalna frekvenca, določena z naravno frekvenco  $n = n_{1,x}$  [Hz], pomnoženo z lestvico dolžin turbulence  $L(z)$  in deljeno s povprečno hitrostjo  $v_m(z)$

$$f_L(z, n) = \frac{nL(z)}{v_m(z)} \quad (5-33)$$



Slika 5-12: Enostranska varianca spektra  
(SIST EN 1991-1-4: 2005, str. 103)

$R_h, R_b$  - aerodinamične vstopne funkcije

$$R_h = \frac{1}{\eta_h} - \frac{1}{2\eta_h^2} (1 - e^{-2\eta_h}) \quad (5-34)$$

$$\eta_h = \frac{4,6h}{L(z_s)} f_L(z_s, n_{1,x}) \quad (5-35)$$

$$R_b = \frac{1}{\eta_b} - \frac{1}{2\eta_b^2} (1 - e^{-2\eta_b}) \quad (5-36)$$



$$\eta_b = \frac{4,6b}{L(z_s)} f_L(z_s, n_{1,x}) \quad (5-37)$$

$B^2$  - faktor ozadja, upošteva nepopolno povezavo med pritiskom in površino konstrukcije; na varni strani smo, če vzamemo  $B^2 = 1$

$$B^2 = \frac{1}{1 + 0,9 \left( \frac{b+h}{L(z_s)} \right)^{0,63}} \quad (5-38)$$

b - širina konstrukcije

h - višina konstrukcije

$L(z_s)$  - lestvica dolžin turbulence na referenčni višini  $z_s$

Lestvica dolžin turbulence  $L(z)$  predstavlja povprečno velikost sunkov pri naravnih vetrovih. Izračuna se s pomočjo izraza (5-39), ki velja za  $z < 200\text{m}$ .

$$\begin{aligned} L(z) &= L_t \left( \frac{z}{z_t} \right)^\alpha, & z \geq z_{min} \\ L(z) &= L(z_{min}) & z < z_{min} \end{aligned} \quad (5-39)$$

Pri tem je:

$z_t$  - referenčna višina,  $z_t = 200\text{m}$

$L_t$  - referenčna lestvica dolžin,  $L_t = 300\text{m}$

$$\alpha = 0,67 + 0,05 \ln(z_0) \quad (5-40)$$

$z_0$  - dolžina hrapavosti, odvisna od kategorije terena,  $z_0 = 0,05\text{m}$

$z_{min}$  - minimalna višina, odvisna od kategorije terena,  $z_{min} = 2\text{m}$

Faktor velikosti  $c_s$  upošteva zmanjšanje vpliva vetra zaradi nesočasnega pojavljanja največjega pritiska vetra na površino. Določi se lahko kot:

$$c_s = \frac{1 + 7I_v(z_s)\sqrt{B^2}}{1 + 7I_v(z_s)} \quad (5-41)$$

Dinamični faktor  $c_d$  upošteva povečanje vpliva zaradi vibracij, ki so posledica turbulence pri resonanci konstrukcije. Določi se kot:

$$c_d = \frac{1 + 2k_p I_v(z_s)\sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7I_v(z_s)\sqrt{B^2}} \quad (5-42)$$

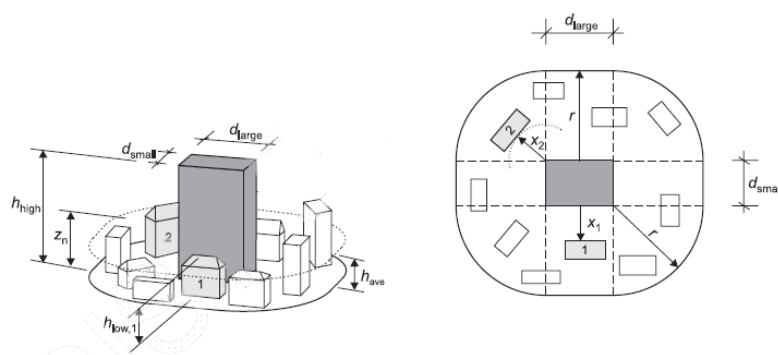
Preglednica 5-20: Podatki za izračun  $c_s c_d$

$z_s$	97,2
$k_p$	3,396
$T$	600
$\nu$	0,287
$n_{1,x}$	1,1159
$I_v(z_s)$	0,132
$R^2$	0,038
$\delta$	0,030
$\delta_s$	0,03
$\delta_\alpha$	$6,78 \cdot 10^{-6}$
$\delta_d$	0
$c_f$	$3,91 \cdot 10^{-5}$
$c_{f,0}$	$6,404 \cdot 10^{-5}$
$\Psi_\lambda$	0,61
$\rho$	1,25
$b(z_s)$	28,496
$v_m(z_s)$	60,284
$m_e$	5541,962
$S_L$	0,036
$fl$	7,712
$L(z_s)$	206,113
$L_t$	300
$z_t$	200
$\alpha$	0,520
$z_0$	0,05
$R_h$	0,036
$\eta_h$	27,883
$R_b$	0,183
$\eta_b$	4,904
$B^2$	0,539
$c_s c_d$	0,874
$c_s$	0,872
$c_d$	1,002

## 5.2.4 Vpliv sosednjih stavb

Vpliv velikih in občutno višjih sosednjih stavb

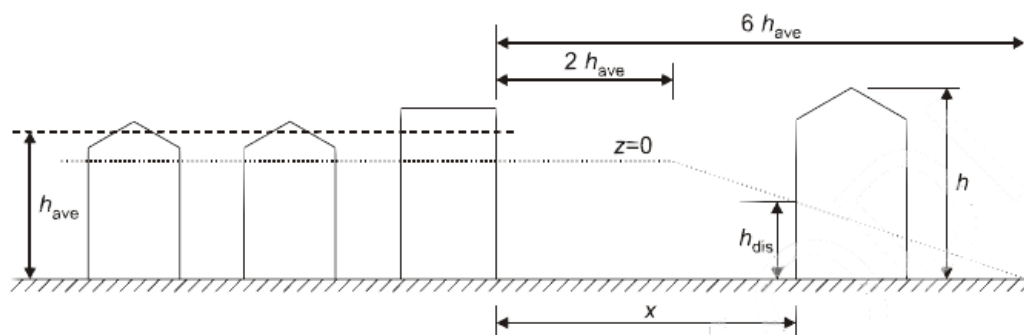
Če konstrukcija stoji v bližini sosednjih stavb, ki so vsaj dvakrat višje kot so povprečno visoke sosednje stavbe, potem je lahko takšna konstrukcija izpostavljena povečani hitrosti vetra. V tem primeru se za dimenzioniranje nižjih sosednjih stavb upošteva pritisk vetra pri maksimalni hitrosti na referenčni višini  $z_n$ . Postopek izračuna je opisan v SIST EN 1991-1-4:2005, aneks A, člen 4., vendar pa v primeru hladilnega stolpa ne pride v poštev, saj je najvišja stavba v okolici ravno hladilni stolp.



Slika 5-13: Vpliv velikih in občutno višjih sosednjih stavb po SIST EN 1991-1-4:2005 (SIST EN 1991-1-4:2005, str. 100)

Vpliv bližnjih stavb in drugih ovir

Za stavbe v območju terena kategorije IV, stavbah, ki so blizu skupaj ter pri drugih ovirah je potrebno je upoštevati učinek bližnjih stavb in ovir. To se naredi z višanjem nivoja terena na višino  $h_{dis}$ . Postopek izračuna je opisan v SIST EN 1991-1-4:2005, aneks A, člen 5., vendar pa v primeru hladilnega stolpa takšno višanje nivoja terena ni smiselno, saj bi na ta način zmanjšali pritisk vetra pri maksimalni hitrosti in posledično zmanjšali obtežbo.



Slika 5-14: Vpliv bližnjih stavb in drugih ovir po SIST EN 1991-1-4:2005 (SIST EN 1991-1-4:2005, str. 100)

### 5.3 Primerjava obtežbe vetra glede na VGB-R 610 e in SIST EN 1991-1-4:2005

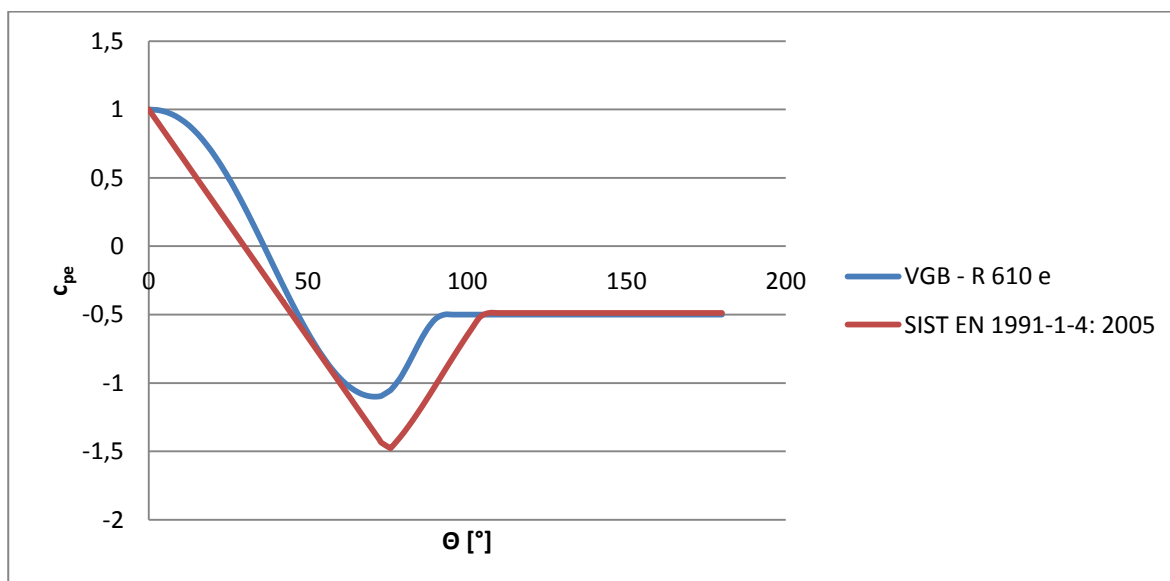
V nadaljevanju je predstavljena razlika pri obtežbi vetra na hladilni stolp glede na obravnavano smernico in standard. Primerjava pokaže, da je obtežba vetra dobljena po SIST EN 1991-1-4:2005 v primerjavi z obtežbo po VGB-R 610 e, 2010 edition manjša.

#### 5.3.1 Koeficient zunanje pritiska

Pri VGB-R 610 e, 2010 edition se  $c_{pe}(\theta)$  določi na podlagi faktorja hrapavosti površine, s katerim se določi ena izmed šestih porazdelitvenih krivulj. Krivulje so razdeljene na 3 območja, vrednost koeficienta pa je podana s funkcijami.

V SIST EN 1991-1-4: 2005 je  $c_{pe}$  določen na podlagi različnih Re števil in v odvisnosti od dveh koeficientov, koeficienta zunanje pritiska brez toka na prostem robu ter faktorja prostega roba. Podane so tipične vrednosti koeficienta zunanje pritiska v treh točkah, ostale vrednosti pa se določijo z linearno interpolacijo.

Na grafikonu 5-7 so podane vrednosti koeficienta zunanje pritiska v obeh primerih. Razlika je med 3 območji ( $0^\circ - 71^\circ$ ,  $71^\circ - 93^\circ$  ter  $93^\circ - 180^\circ$ ) glede na VGB-R 610 e, 2010 edition in tremi točkami ( $0^\circ$ ,  $75^\circ$  ter  $105^\circ$ ) po SIST EN 1991-1-4:2005. Opaziti je tudi linearno razporeditev koeficienta po SIST EN 1991-1-4:2005 ter krivuljo glede na VGB-R 610 e, 2010 edition.



Grafikon 5-7: Primerjava zunanjih koeficientov

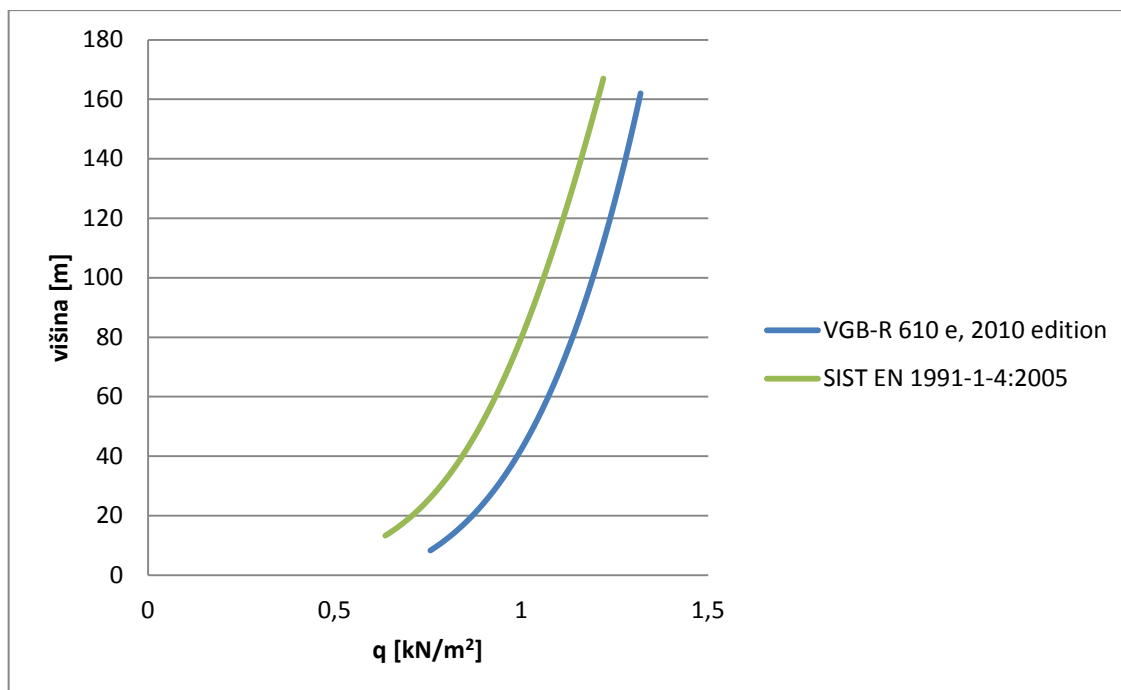
### 5.3.2 Pritisk vetra

Glede na VGB-R 610 e, 2010 edition je pritisk vetra določen v odvisnosti od terena in osnovne hitrosti vetra. Podana je enačba (5-8), ki podaja razporeditev pritiskov zaradi sunkov vetra po višini lupine.

Po SIST EN 1991-1-4:2005 se določi pritisk vetra pri maksimalni hitrosti na referenčni višini. Pri tem je potrebno upoštevati različne faktorje, ki upoštevajo smer vetra, letni čas, ortografijo, hrapavost terena, turbulenco...

Primerjavo postopka izračuna pritiska vetra ne moremo narediti, saj je v VGB-R 610 e, 2010 edition enačba za račun pritiska podana glede na kategorijo terena in povprečno hitrost, tako da ni povsem jasno, kaj vse je upoštevano pri računu. Račun po SIST EN 1991-1-4:2005 je precej bolj kompleksen, potrebno je določiti več različnih hitrosti vetra ter več različnih faktorjev, na podlagi katerih nato določimo pritisk vetra. Med sabo pa lahko primerjamo vrednosti pritiska, ki so izračunane na različna načina.

V grafikonu 5-8 je podana primerjava dobljenih vrednosti pritiska vetra na različnih višinah stolpa. Vidimo lahko, da so vrednosti, dobljene po VGB-R 610 e, 2010 edition večje, tako da smo v primerjavi z SIST EN 1991-1-4:2005 na varni strani. Največja razlika med izračunanimi vrednostmi je 15,95% na spodnjem robu lupine, razlika pa se proti vrhu lupine zmanjšuje.



Grafikon 5-8: Primerjava pritiska vetra

V poglavju 5.2.2 je narejena tudi primerjava različnih hitrosti vetra uporabljenih pri obeh načinih izračuna pritiska vetra.

### 5.3.3 Faktor, ki zajema dinamični vpliv

Po VGB-R 610 e, 2010 edition dinamični vpliv zajema dinamični faktor. Določi se ga s pomočjo najnižje naravne frekvence lupine. Dobljena vrednost znaša  $\varphi = 1,05$ .

Po SIST EN 1991-1-4:2005 je učinek vibracij konstrukcije zajet v konstrukcijskem faktorju  $c_s c_d$ . Konstrukcijski faktor lahko ločimo na dva dela, kjer  $c_d$  predstavlja dinamični del. Konstrukcijski faktor znaša  $c_s c_d = 0,874$ , ločeno računani dinamični faktor pa  $c_d = 1,002$ .

### 5.3.4 Faktor, ki zajema vpliv sosednjih stavb

Glede na VGB-R 610 e, 2010 edition vpliv sosednjih stavb zajema interferenčni koeficient  $F_i$ . Le ta se določi s pomočjo parametra oddaljenosti in je odvisen od tipa konstrukcije v bližini. V okolici hladilnega stolpa bosta stali dve visoki konstrukciji - kotlovnica višine 115m ter strojnica višine 83m. S pomočjo numeričnih simulacij je bilo določeno, da se do višine 65m nad spodnjim nivojem terena upošteva interferenčni faktor  $F_i = 1,3$ , izračunan zaradi kotlovnice, nad to višino pa interferenčni faktor  $F_i = 1,2$ , zaradi strojnice.

V SIST EN 1991-1-4:2005 se lahko upošteva vpliv sosednjih stavb, ki so bistveno višje od obravnavanih stavb v okolici ali pa bližnjih stavb in drugih ovir, ki so zelo skupaj. Prvi primer ni primeren, saj je ravno hladilni stolp največja stavba v okolici, drugi primer pa zmanjšuje vpliv vetra na hladilni stolp, tako da vpliva sosednjih stavb po SIST EN 1991-1-4:2005 nismo upoštevali.

## 6 MODELI ZA ANALIZO Z METODO KONČNIH ELEMENTOV

Računska analiza konstrukcije je opravljena s programom SAP2000, v12.0.0. SAP2000 je program podjetja Computers and Structures, ki omogoča analizo konstrukcij po metodi končnih elementov. Zajema velik razpon različnih analiz, od linearno elastičnih do kompleksnejših materialno nelinearnih analiz, stabilnostnih analiz, modalnih analiz... (SAP2000, 2012)

Za potrebe diplomske naloge so uporabljene linearna statična analiza, modalna analiza ter linearizirana uklonska analiza konstrukcije.

### 6.1 Uporabljene mreže

Za analizo sta uporabljeni dve različni mreži prostorskega modela celotne konstrukcije s ploskovnimi končnimi elementi za lupino in linijskimi elementi s spremenljivo širino za stebre. Izbrani ploskovni elementi so pri obeh mrežah tipa "shell-thick". Vsi ploskovni končni elementi so štirikotne oblike, tudi pri mreži, ki je dodatno zgoščena.

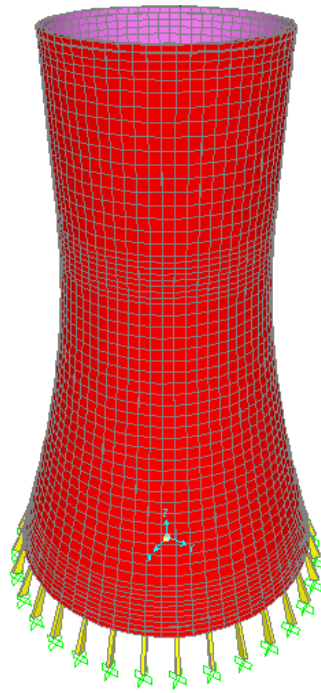
#### 6.1.1 Mreža 1

Mreža ima po višini 62 končnih elementov, po obodu pa 64 končnih elementov; skupaj torej 3968 končnih elementov. Dimenzije končnih elementov so prilagojene spremembi debeline lupine ter stičiščem stebrov in lupine. Mreža je posledično spodaj, pri grlu in zgoraj gostejša. Spodnji del je po višini sestavljen iz 10 končnih elementov višine 1,537m in povprečne širine med 4,14 in 4,5m odvisno od polmera lupine. Na tem delu se debelina lupine iz 1,06m zmanjša na 0,21m. V spodnjem srednjem delu je mreža po višini razdeljena na 26 končnih elementov, ki imajo višino 3,074m in povprečno širino med 4,14m in 2,77m, odvisno od polmera lupine. Na tem delu je lupina povsod debela 0,21m. Pri grlu lupine pride zopet do spremembe debeline lupine iz 0,21m na 0,18m. Na tem delu je mreža zopet zgoščena, tako da je po višini 8 končnih elementov, ki so visoki približno 1,537m in široki povprečno med 2,27 in 2,77m. Na zgornjem srednjem delu je debelina lupine konstantna in meri 0,18m. Po višini je mreža tu razdeljena na 13 končnih elementov, ki merijo 3,074m v višino in povprečno med 2,76m in 2,86m v širino, odvisno od polmera lupine. Zgornji del lupine sestavlja 5 končnih elementov. Na tem delu se pojavi tudi "U" hodnik, zaradi česar je mreža na tem delu precej neenakomerno razdeljena, najmanjša višina končnega elementa je samo 0,17m, največja pa 1,77m. Širine so odvisne od polmera lupine in povprečno merijo med 2,87m in 2,88m. Debelina lupine se na tem delu poveča iz 0,18m na 0,351m.

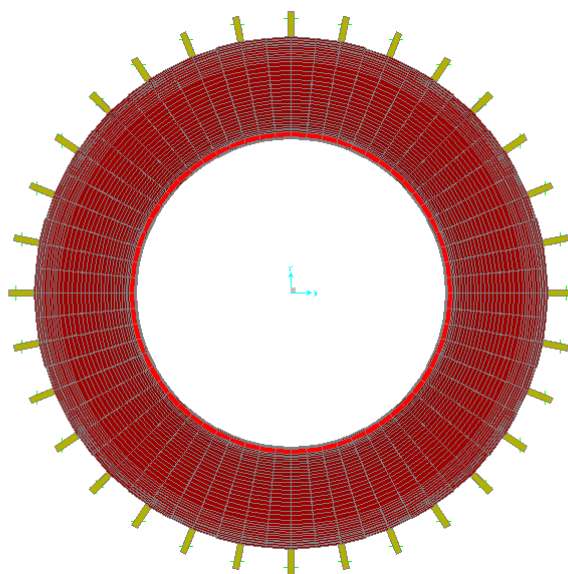
Lupina je podprta z 32 meridijskimi stebri, ki imajo spremenljiv prečni prerez. Spodaj, kjer so polno vpeti, merijo 2,725m x 1,1m. Zgoraj merijo 1,0m x 1,1m.

Na zgornjem delu je lupina ojačana z "U"pohodnim obročem. Obroč v višino meri 1,2m, širok je 1,099m, debelina notranje stene je 0,18m, tla pa so debela 0,35m.

Pri tej mreži odprtina za dimne pline v lupini ni upoštevana.



Slika 6-1: Mreža 1



Slika 6-2: Mreža 1, pogled od zgoraj



Zaradi lažjega podajanja je namesto spremenljive debeline končnih elementov podana povprečna debelina, kot prikazuje preglednica 6-1 ter slika 6-3.

Preglednica 6-1: Povprečna debelina lupine

Višina lupine [m]	Višina stolpa [m]	Radij [m]	Debelina [mm]	Povprečna debelina [mm]
153,698	162	29,59	351	325,5
152,148	160,45	29,539	300	280
150,4003	158,7023	29,43611	260	240
148,6527	156,9547	29,33215	220	200
146,905	155,207	29,276	180	180
144,476	152,778	29,287	180	
141,402	149,704	29,187	180	
138,328	146,63	29,087	180	
135,254	143,556	28,988	180	
132,18	140,482	28,889	180	
129,106	137,408	28,792	180	
126,032	134,334	28,696	180	
122,958	131,26	28,601	180	
119,884	128,186	28,509	180	
116,81	125,112	28,421	180	
113,736	122,038	28,338	180	
110,662	118,964	28,262	180	
107,588	115,89	28,199	180	
106,051	114,353	28,17484	182,5	183,75
104,514	112,816	28,157	185	186,25
102,977	111,279	28,14661	187,5	188,75
101,44	109,742	28,145	190	192,5
99,9035	108,2055	28,15333	195	197,5

se nadaljuje...

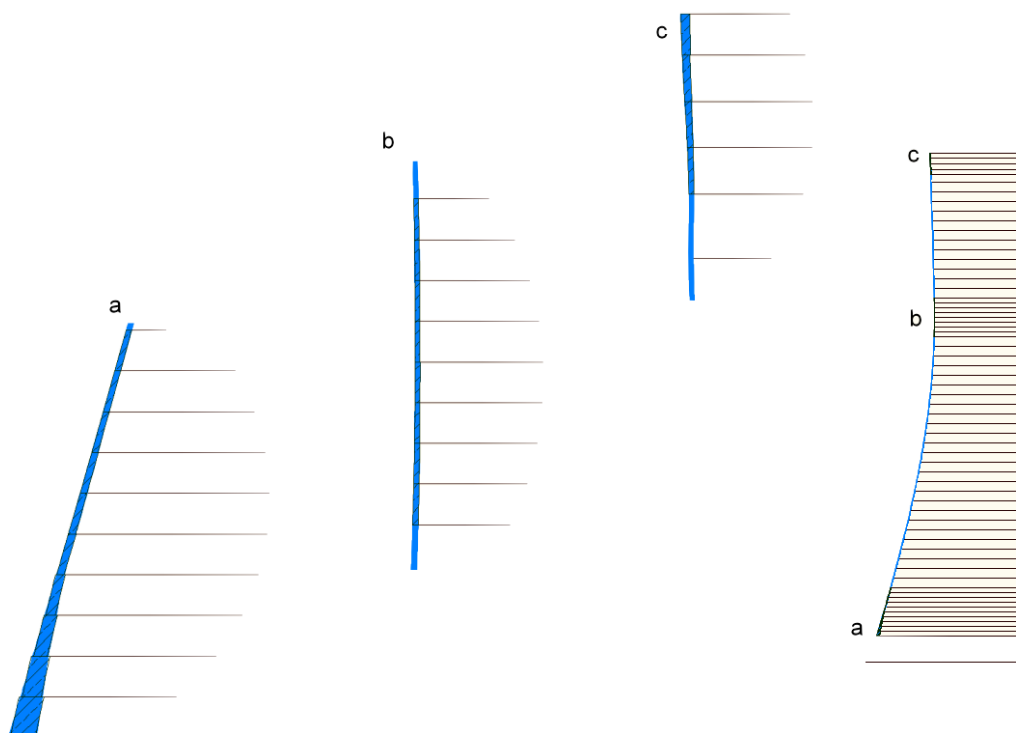
...nadaljevanje Preglednice 6-1

98,367	106,669	28,172	200	202,5
96,83	105,132	28,20106	205	207,5
95,293	103,595	28,24	210	210
92,219	100,521	28,347	210	
89,145	97,447	28,496	210	
86,071	94,373	28,684	210	
82,997	91,299	28,912	210	
79,923	88,225	29,18	210	
76,849	85,151	29,487	210	
73,775	82,077	29,832	210	
70,701	79,003	30,214	210	
67,627	75,929	30,632	210	
64,553	72,855	31,086	210	
61,479	69,781	31,573	210	
58,405	66,707	32,093	210	
55,331	63,633	32,645	210	
52,257	60,559	33,227	210	
49,183	57,485	33,838	210	
46,109	54,411	34,476	210	
43,035	51,337	35,141	210	
39,961	48,263	35,83	210	
36,887	45,189	36,544	210	
33,813	42,115	37,28	210	
30,74	39,042	38,037	210	
27,666	35,968	38,814	210	
24,592	32,894	39,611	210	
21,518	29,82	40,425	210	
18,444	26,746	41,257	210	
15,37	23,672	42,105	210	212,5
13,833	22,135	42,5346	215	217,5
12,296	20,598	42,968	220	232,5
10,759	19,061	43,40525	245	257,5

se nadaljuje...

... nadaljevanje Preglednice 6-1

9,222	17,524	43,846	270	277,5
7,685	15,987	44,28991	285	292,5
6,148	14,45	44,737	300	375
4,611	12,913	45,18736	450	525
3,074	11,376	45,641	600	715
1,537	9,839	46,09789	830	945
0	8,302	46,558	1060	



Slika 6-3: Povprečna debelina

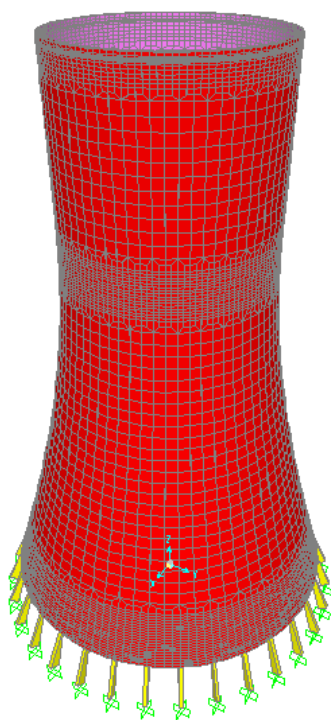
## 6.1.2 Mreža 2

### 6.1.2.1 Mreža brez luknje

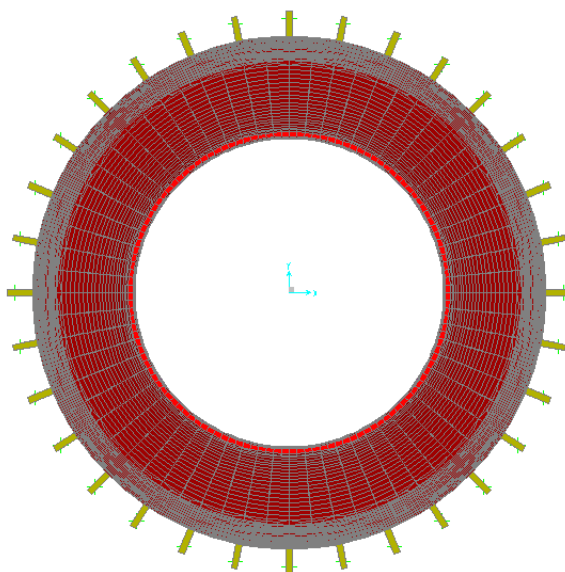
Ker ima mreža 1 določene pomanjkljivosti, smo se odločili za izboljšano mrežo 2. V spodnjem delu, kjer so vpeti stebri, v zgornjem delu, ki je dodatno ojačan s pohodnim "U" obročem ter v srednjem delu, kjer pride do spremembe debeline, je mreža dvakrat bolj zgoščena tako v vertikalni kot tudi v obodni smeri. Zaradi zgostitve so med deli mreže narejeni prehodi.

Na spodnjem delu mreže je po višini 20 končnih elementov, po obodu pa 128 končnih elementov, ki imajo višino 0,7685m, v širino pa povprečno merijo med 2,25m in 2,07m. Spodnji srednji del je enak kot pri mreži 1, le da so končni elementi na spodnji meji in na meji pri grlu, kjer je mreža zopet gostejša, dodatno razdeljeni, da ni plavajočih robov. Pri grlu se mreža zgosti, tako da je po višini 16 končnih elementov, ki v višino merijo 0,7685m, v širino pa povprečno 1,38m. Zgornji srednji del je enak kot pri mreži 1, le da so končni elementi na meji med grlom in zgornjim delom dodatno razdeljeni, zaradi prehoda med različno gostoto mrež. Zgornji del je po višini sestavljen iz 12 končnih elementov, ki pa so med sabo precej različni. Najmanjši ima višino le 0,17m, največji pa 0,87m. V širino povprečno merijo med 1,43m in 1,44m.

Stebri in "U" obroč so enakih dimenzij kot pri mreži 1.



Slika 6-4: Mreža 2



Slika 6-5: Mreža 2 - pogled od zgoraj

Zaradi lažjega podajanja je namesto spremenljive debeline končnih elementov podana povprečna debelina, kot prikazuje preglednica 6-2.

Preglednica 6-2: Povprečna debelina lupine

Višina lupine [m]	Višina stolpa [m]	Radij [m]	Debelina [mm]	Povprečna debelina [mm]
153,698	162	29,59	351,00	
				338,250
152,923	161,225	29,57153	325,50	319,000
152,5355	160,8375	29,54736	312,50	309,075
152,323	160,625	29,54736	305,65	302,825
152,148	160,45	29,539	300,00	297,500
151,9295	160,2315	29,52787	295,00	292,500
151,7111	160,0131	29,51606	290,00	285,000
151,2742	159,5762	29,49075	280,00	270,000
150,4003	158,7023	29,43611	260,00	250,000
149,5265	157,8285	29,38121	240,00	230,000

se nadaljuje...

... nadaljevanje Preglednice 6-2

148,6527	156,9547	29,33215	220,00	
147,7788	156,0808	29,29505	200,00	210,000
146,905	155,207	29,276	180,00	190,000
144,476	152,778	29,287	180,00	
141,402	149,704	29,187	180,00	
138,328	146,63	29,087	180,00	
135,254	143,556	28,988	180,00	
132,18	140,482	28,889	180,00	
129,106	137,408	28,792	180,00	
126,032	134,334	28,696	180,00	
122,958	131,26	28,601	180,00	
119,884	128,186	28,509	180,00	
116,81	125,112	28,421	180,00	
113,736	122,038	28,338	180,00	
110,662	118,964	28,262	180,00	
107,588	115,89	28,199	180,00	180
106,8195	115,1215	28,1862	181,25	180,625
106,051	114,353	28,17484	182,50	181,875
105,2825	113,5845	28,16506	183,75	183,125
104,514	112,816	28,157	185,00	184,375
103,7455	112,0475	28,15079	186,25	185,625
102,977	111,279	28,14661	187,50	186,875
102,2085	110,5105	28,14462	188,75	188,125
101,44	109,742	28,145	190,00	189,375
100,6718	108,9738	28,14789	192,50	191,250
99,9035	108,2055	28,15333	195,00	193,750
99,13525	107,4373	28,16136	197,50	196,250
98,367	106,669	28,172	200,00	198,750
				201,250

se nadaljuje...

... nadaljevanje Preglednice 6-2

97,5985	105,9005	28,18526	202,50	
				203,750
96,83	105,132	28,20106	205,00	
				206,250
96,0615	104,3635	28,21934	207,50	
				208,750
95,293	103,595	28,24	210,00	
92,219	100,521	28,347	210,00	
89,145	97,447	28,496	210,00	
86,071	94,373	28,684	210,00	
82,997	91,299	28,912	210,00	
79,923	88,225	29,18	210,00	
76,849	85,151	29,487	210,00	
73,775	82,077	29,832	210,00	
70,701	79,003	30,214	210,00	
67,627	75,929	30,632	210,00	
64,553	72,855	31,086	210,00	
61,479	69,781	31,573	210,00	
58,405	66,707	32,093	210,00	
55,331	63,633	32,645	210,00	
52,257	60,559	33,227	210,00	
49,183	57,485	33,838	210,00	
46,109	54,411	34,476	210,00	
43,035	51,337	35,141	210,00	
39,961	48,263	35,83	210,00	
36,887	45,189	36,544	210,00	
33,813	42,115	37,28	210,00	
30,74	39,042	38,037	210,00	
27,666	35,968	38,814	210,00	
24,592	32,894	39,611	210,00	
21,518	29,82	40,425	210,00	
18,444	26,746	41,257	210,00	
				210
15,37	23,672	42,105	210,00	
				211,250
14,6015	22,9035	42,31933	212,50	
				213,750
13,833	22,135	42,5346	215,00	
				216,250
13,0645	21,3665	42,75082	217,50	
				218,750

se nadaljuje...

... nadaljevanje Preglednice 6-2

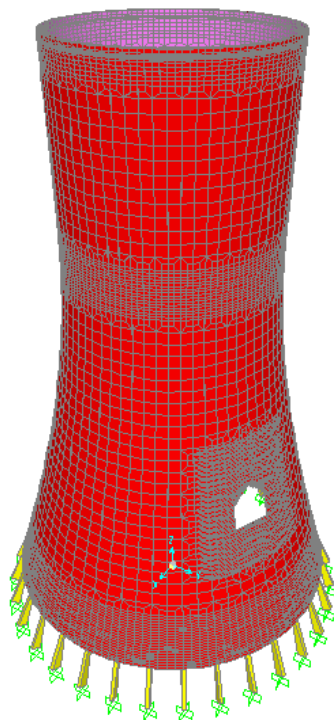
12,296	20,598	42,968	220,00	
				226,250
11,5275	19,8295	43,18616	232,50	
				238,750
10,759	19,061	43,40525	245,00	
				251,250
9,9905	18,2925	43,62521	257,50	
				263,750
9,222	17,524	43,846	270,00	
				273,750
8,4535	16,7555	44,06757	277,50	
				281,250
7,685	15,987	44,28991	285,00	
				288,750
6,9165	15,2185	44,51305	292,50	
				296,250
6,148	14,45	44,737	300,00	
				337,500
5,3795	13,6815	44,96177	375,00	
				412,500
4,611	12,913	45,18736	450,00	
				487,500
3,8425	12,1445	45,41377	525,00	
				562,500
3,074	11,376	45,641	600,00	
				657,500
2,3055	10,6075	45,86904	715,00	
				772,500
1,537	9,839	46,09789	830,00	
				887,500
0,7685	9,0705	46,32754	945,00	
				1002,500
0	8,302	46,558	1060,00	

### 6.1.2.2 Mreža z luknjo

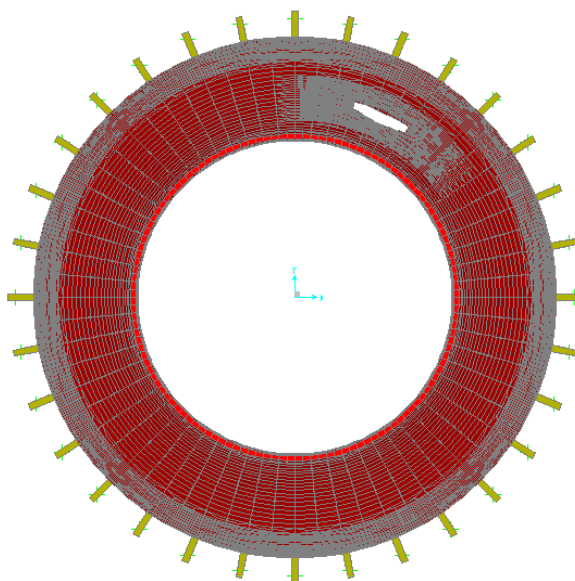
Mreža z luknjo je v vsem enaka mreži 2 brez luknje, le da je v lupini narejena luknja za dovod dimnih plinov. Luknja je velika približno 11m x 10m. Spodnja polovica luknje je pravokotne oblike, zgornja pa polkrožne. Središče luknje se nahaja na 64,69° glede na izbrano smer 0°. Spodnji rob luknje je na višini 49,764m nad terenom, ki je 5m pod stolpom, zgornji pa na 60,764m. Lupina v okolici luknje je odebeljena. Odebelitev se na zgornji strani luknje začne 11,19m nad luknjo, na višini 71,955m, debelina pa se iz 0,21m zveča na 0,32m. Na spodnjem delu se odebelitev začne na višini 38,281m, torej 11,483m pod luknjo in se tako kot zgoraj iz 0,21m odebeli na 0,32m. Na vsaki strani luknje je lupina ravno tako odebeljena.



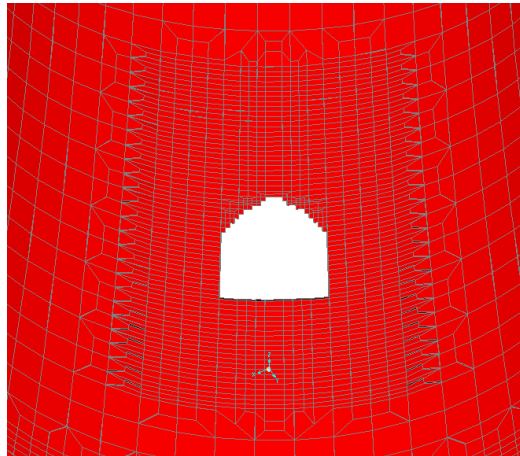
Odebelitev se začne cca 6,80m na vsako stran luknje in se postopoma poveča iz 0,21m na 0,32m. V tem delu je mreža precej zgoščena, posamezni končni elementi imajo višino cca 0,5m in povprečno širino med 1,86m in 1,50m.



Slika 6-6: Mreža 2 z luknjo



Slika 6-7: Mreža 2 z luknjo - pogled od zgoraj



Slika 6-8: Luknja

### 6.1.2.3 Mreža z zvezno spremenljivo debelino

Mreža je v vsem enaka mreži z luknjo, vendar pa je naknadno spremenjena debelina. Pri tej mreži debelina ni podana kot povprečna debelina pri posameznih elementih. Z uporabo funkcij "Joint Pattern" ter "Area Thickness Overwrites" je za vsako vozlišče podana dejanska debelina lupine.

## 6.2 Materiali

V projektni dokumentaciji je bilo zapisano, da sta bila za lupino uporabljena materiala C30/37 ter C35/45, za stebre pa material C35/45. Lastnosti materialov so podrobneje opisane v poglavju 4.2. Ker ni definirano na katerih delih lupine je uporabljen kateri material, smo naredili več ločenih primerov analize, kjer smo kot material celotne lupine enkrat podali slabši, drugič pa boljši material. Rezultati so predstavljeni v poglavju 7.1.

## 6.3 Lastna teža

Program Sap2000 pri vsakem novem modelu avtomatsko ustvari obtežni primer imenovan "Dead", kjer upošteva lastno težo elementov glede na podano specifično lastno težo materiala.

## 6.4 Zunanji pritisk vetra po VGB-R 610 e, 2010 edition

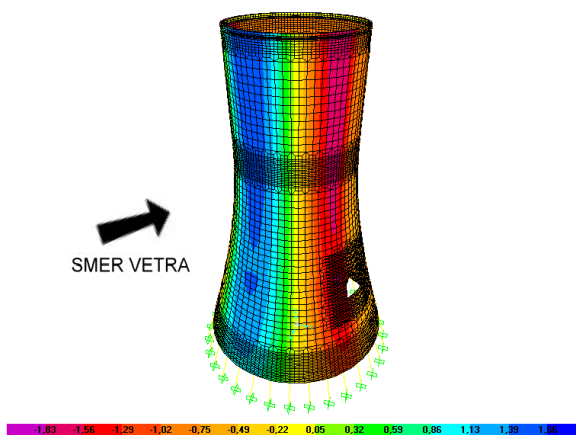
V poglavju 5.1 je opisano, kako se določi obtežba vetra, izračunani pa so tudi že posamezni faktorji. Zunanji pritisk vetra določa enačba (5-1). V odvisnosti od kota  $\theta$  ter višine  $z$  lahko zunanji pritisk vetra določimo kot:

$$\begin{aligned}w_e(z, \theta) &= c_{pe}(\theta) \cdot 1,05 \cdot 1,3 \cdot 0,71 \left(\frac{z}{10}\right)^{0,22} && ; z = \{0m, 65m\}, \theta = \{0^\circ, 180^\circ\} \\ &= 0,96915 \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{0,22} \\ &= 0,5840 \cdot c_{pe}(\theta) \cdot z^{0,22} \\ w_e(z, \theta) &= c_{pe}(\theta) \cdot 1,05 \cdot 1,2 \cdot 0,71 \left(\frac{z}{10}\right)^{0,22} && ; z = \{65m, 167m\}, \theta = \{0^\circ, 180^\circ\} \\ &= 0,8946 \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{0,22} \\ &= 0,5390 \cdot c_{pe}(\theta) \cdot z^{0,22}\end{aligned}$$

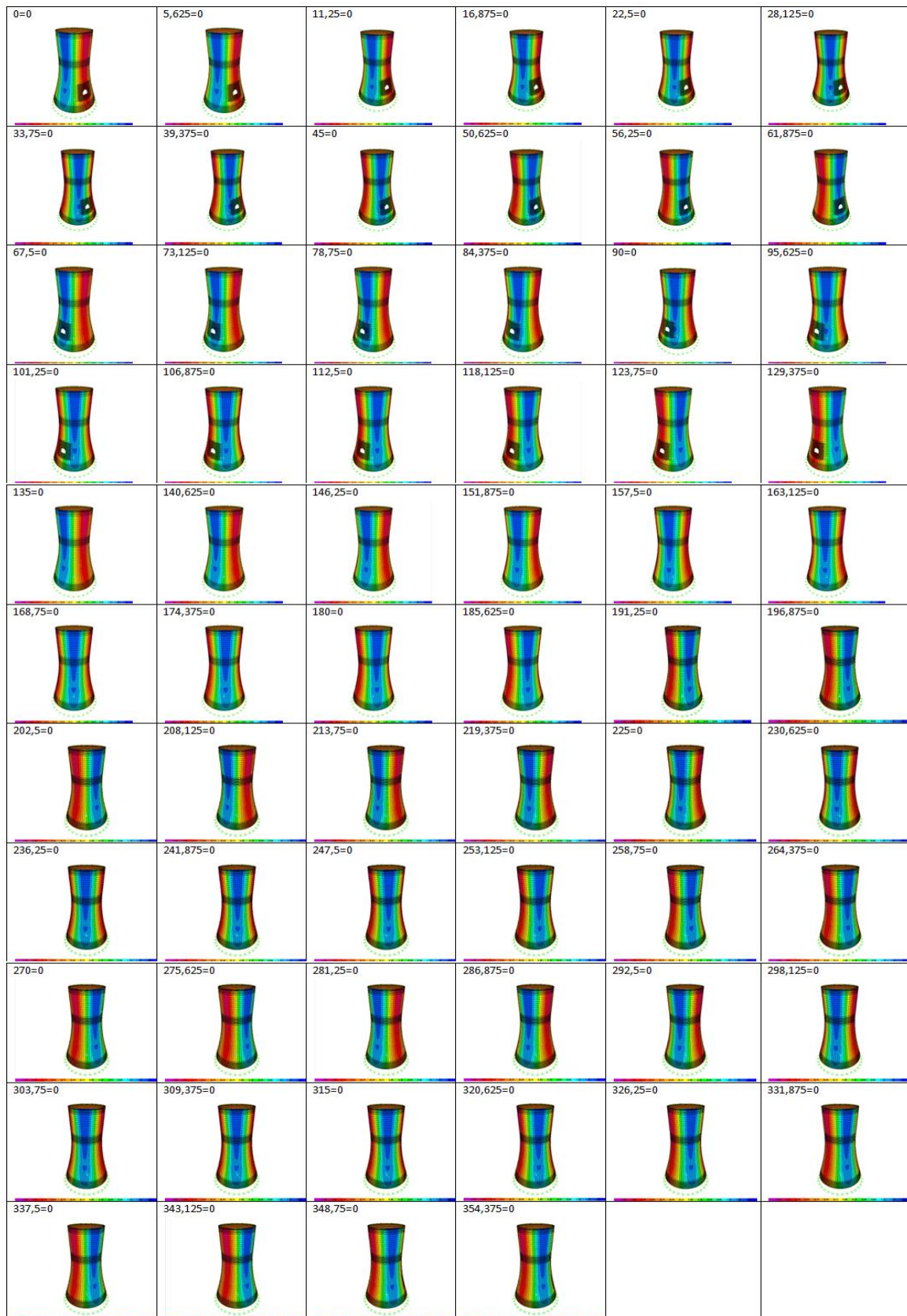
(6-1)

Na modelu je podanih 64 različnih obtežnih primerov vetra. Veter je podan v smereh, ki se med seboj razlikujejo za  $5,625^\circ$ . Polovica obtežnih primerov deluje na lupini neposredno nad stebri, polovica primerov pa na polovici razpona med stebri. Slika 6-10 prikazuje različne obtežne primere, kjer veter deluje v različnih smereh. Podane so tudi smeri delovanja vetra glede na izbrano začetno smer  $0^\circ$ .

Rezultati analize so podani v poglavju 7.



Slika 6-9: Delovanje vetra v smeri "60"



Slika 6-10: Smeri vetra

## 6.5 Notranji srk po VGB-R 610 e, 2010 edition

V poglavju 5.1 je opisan postopek izračuna notranjega srka. Vrednost srka je konstantna in je enaka po celotnem obodu lupine. Sprememba se pojavi le zaradi interferenčnega koeficienta, ki se spremeni pri višini 65m od spodnjega nivoja terena. Vrednost obtežbe srka je določena z enačbo (5-2). Za obravnavani stolp vrednost srka znaša:

$$w_i = -0,5 \cdot 1,3 \cdot 0,71 \left(\frac{167}{10}\right)^{0,22} = -0,8574 \text{ kN/m}^2 \quad ; z = \{0\text{m}, 65\text{m}\}$$

$$w_i = -0,5 \cdot 1,2 \cdot 0,71 \left(\frac{167}{10}\right)^{0,22} = -0,7914 \text{ kN/m}^2 \quad ; z = \{65\text{m}, 167\text{m}\}$$

(6-2)



Slika 6-11: Obtežba notranjega pritiska vetra - srk

## 6.6 Varnostni faktorji za material in obtežne kombinacije

Obtežne kombinacije so bile narejene v skladu z VGB-R 610 e, 2010 edition. Upoštevani so bili varnostni faktorji podani v preglednici 6-3.

Preglednica 6-3: Varnostni faktorji  
 (VGB-R 610 e, 2010 edition, str. 33)

Obtežba	Delni varnostni faktor		Kombinacijski faktor		
	$\gamma_G$	$\gamma_Q$	$\Psi_0$	$\Psi_1$	$\Psi_2$
<b>Lastna teža D</b>	1,00/1,35	-	-	-	-
<b>Veter W (<math>W_e, W_i</math>)</b>	-	0/1,50	0,6	0,5	0

Pri stalnih in začasnih projektnih stanjih za MSN se upošteva naslednja kombinacija:

$$\sum_{j>1} \gamma_{G,j} D_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i>1} \gamma_{Q,i} \Psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (6-3)$$

Pri MSU se kot pogosta kombinacija vzame:

$$\sum_{j>1} D_{k,j} + \Psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i>1} \Psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (6-4)$$

Za preverjanje uklonske stabilnosti se upošteva naslednja kombinacija:

$$\gamma_B (D + W_e + W_i); \gamma_B \geq 5 \quad (6-5)$$

### 6.6.1 Mejno stanje nosilnosti - MSN

Za mejno stanje nosilnosti pri stalnih in začasnih projektnih stanjih velja naslednja obtežna kombinacija, ki sledi iz enačbe (6-3).

$$\begin{aligned} & 1,35D + 1,5W_e + 1,5 \cdot 0,6W_i \\ & = 1,35D + 1,5W_e + 0,9W_i \end{aligned} \quad (6-6)$$

Za material se upoštevajo delni materialni faktorji, podani v preglednici 6-4.

Preglednica 6-4: Delni materialni faktor  
(VGB-R 610 e, 2010 edition, str. 34)

Projektno stanje	Beton	Jeklo
	$\gamma_c$	$\gamma_s$
Stalno in začasno	1,5	1,15

## 6.6.2 Mejno stanje uporabnosti - MSU

Pri MSU je potrebna kontrola razpok. Za običajne hladilne stolpe kontrola napetosti in kontrola deformacij nista bistveni za MSU, zato jih v nadaljevanju ne bomo preverjali.

Kontrola dolžine razpok je odvisna od razreda izpostavljenosti konstrukcije. Za hladilne stolpe je potrebno kontrolirati razpoke v lupini, podporah ter temeljenju. Mejne vrednosti so prikazane v preglednici 6-5.

Preglednica 6-5: Kontrola dolžine razpok  
(VGB-R 610 e, 2010 edition, str. 35)

	<b>Največja dovoljena dolžina razpok [mm]</b>
<b>Lupina</b>	0,20
<b>Podpore in temeljenje</b>	0,30

Upoštevana obtežna kombinacija sledi iz enačbe (6-4):

$$\begin{aligned} D + 0,5W_e + 0W_i \\ = D + 0,5W_e \end{aligned} \quad (6-7)$$

## 6.7 Podatki za določitev armature po VGB-R 610 e, 2010 edition

### 6.7.1 Minimalna armatura

Stopnja minimalne armature v meridionalni smeri za prosto stoječe hladilne stolpe v razmerju do dejanske debeline je:

$$\rho_M = 0,3\%A_c \quad (6-8)$$

Kjer je:

$A_c$  - betonski prečni prerez

Za obodno smer velja:

$$\begin{aligned}\rho_R &= 0,3\% A_c && \text{za spodnjo polovico lupine} \\ \rho_R &= 0,4\% A_c && \text{za zgornjo polovico lupine}\end{aligned}\tag{6-9}$$

### 6.7.2 Splošne zahteve

Armatura je potrebno zagotoviti na notranji in zunanji strani lupine hladilnega stolpa. Potrebne so horizontalne (obodna armatura) in vertikalne (meridionalna armatura) ojačitvene palice. Zunanja in notranja mreža naj si bosta podobni kar se le da, po potrebi so dovoljene tudi razlike. V večini lupine je meridionalna armatura znotraj, obročna pa zunaj. Na spodnjem robnem območju pa je potrebno meridionalno armaturo položiti na zunanjo stran in zapreti obročno armaturo, razen če je obročna armatura na notranji strani fiksirana na kak drug primeren način ali pa so izvedeni dodatni izračuni.

### 6.7.3 Material

Material mora biti v skladu z veljavnimi standardi. Pri tem mora veljati, da je minimalen premer uporabljenih palic 8mm. Iz gradbenih razlogov je priporočljivo da se uporabijo palice s premerom najmanj 10mm za meridionalno armaturo, razen če so sprejeti učinkoviti ukrepi, ki preprečijo nihanje prosto stoječih palic.

### 6.7.4 Razmik armature

Maksimalni razmik med individualnimi armaturnimi palicami je omejen na 20cm za meridionalno armaturo in 15cm za obodno armaturo.

### 6.7.5 Spoji

Spoji armature so razporejeni v rednih intervalih pri meridionalni armaturi in na splošno nerednih intervalih pri obodni armaturi. Spoji se izvedejo s prekrivanjem v skladu z veljavnimi standardi.



Transverzalna razdalja med armaturnimi palicami v bližini spojev, dolžina in razporeditev spojev v vzdolžni smeri naj bodo v skladu s standardi za pretežno statično obtežbo. Meridionalna armatura je lahko urejena v skupine po največ 5 palic s spoji na isti višini. Spoji sosednjih skupin so ustrezno razporejeni v vzdolžni (meridionalni) smeri. Ne več kot 50% palic naj bo spojenih v enem prečnem prerezu tako v obodni kot v meridionalni smeri.

### 6.7.6 Spodnji in zgornji rob

Spodnji in zgornji rob lupine je potrebno ojačati s primernimi robnimi palicami. Če ni narejena podrobnejša analiza, je togost zgornjega dela zasnovana z uporabo razmerja podanega v naslednji enačbi:

$$\frac{I_x}{r_H} = 0,003m^2 \quad (6-10)$$

Kjer je:

$I_x$  - vztrajnostni moment nerazpokanega armiranega betonskega prereza, sestavljenega iz zgornjega ojačanega dela in podpornih delov lupine (ob predpostavki povprečne debeline lupine) v razmerju vertikalne sredinske linije

$r_H$  - polmer lupine na zgornjem robu

### 6.7.7 Dovoljena odstopanja pri gradnji

Debelina lupine

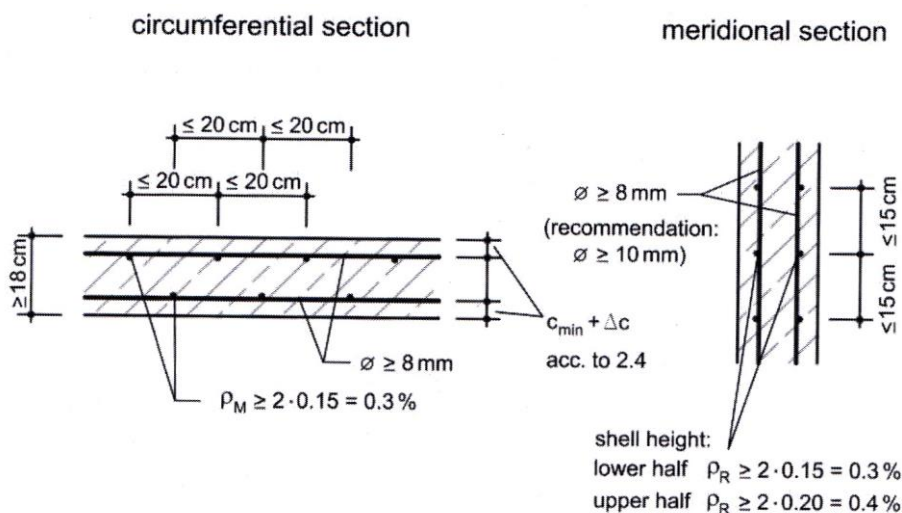
Dejanska debelina lupine ne sme biti manjša kot določena debelina lupine in lahko preseže določeno debelino lupine za 10%.

Začetne nepopolnosti srednje ravnine lupine

Nepopolnostim bi se bilo potrebno izogniti. Če se vseeno pojavijo, amplituda največje začetne nepopolnosti v srednji ravnini lupine ne sme biti presežena za polovico debeline lupine ali 10cm. Odstopanja od načrtovane geometrije med gradnjo morajo biti popravljena na takšen način, da je največja razlika v kotu, tako v meridionalni kot v obodni smeri, ne preseže 1,5% (1,5cm/m).

### 6.7.8 Pregled minimalnih vrednosti

Minimalne vrednosti so predstavljene na sliki 6-12.



Slika 6-12: Pregled minimalnih vrednosti armature po VGB-R 610 e, 2010 edition (VGB-R 610 e, 2010 edition, str. 41)

### 6.7.9 Interferenčni faktor

Učinki interference se upoštevajo s povečanjem obtežbe vetra, če pa je potrebno se lahko poveča še razmerje minimalne armature  $\rho_R$  za obročno armaturo v spodnji polovici lupine.

Razmerje armature je:

$$\rho_R = \frac{a_{SR}}{h} [\%] \quad (6-11)$$

Pri tem je:

$a_{SR}$  - skupna količina obročne armature v prečnem prerezu [ $\text{cm}^2/\text{m}$ ]

$h$  - debelina lupine [cm]

Količine minimalne armature v zgornji polovici lupine ni potrebno povečati zaradi zahteve v poglavju 6.7.1.

Pri interferenci zaradi sosednjih stavb se lahko razmerje minimalne armature  $\rho_R$  v obodni smeri v spodnji polovici lupine izračuna po določitvi  $\frac{a_1}{d_m}$  ter  $\frac{a_2}{d_m}$ .

$$\rho_R = 0,1 \left( 3 + \frac{\left( \frac{a_1}{d_m} - \frac{a_2}{d_m} \right)}{3} \right) \% \geq 0,3\%$$

(6-12)

## 7 REZULTATI ANALIZE Z METODO KONČNIH ELEMENTOV

### 7.1 Uklonske oblike in uklonski faktorji pri lastni teži

Analiza je bila narejena s programom SAP2000 v 12.0.0. Z linearno uklonsko analizo iščemo velikost obtežbe, pri kateri bo prišlo do uklona. Iščemo rešitev posplošenega problema lastnih vrednosti:

$$[K - \lambda_i G(r)]\Psi_i = 0 \quad (7-1)$$

Pri čemer je:

$K$  - linearna togostna matrika

$G(r)$  - geometrijsko nelinearna togostna matrika zaradi vektorja obtežbe  $r$

$\lambda_i$  - lastne vrednosti - uklonski faktor

$\Psi_i$  - pripadajoči lastni vektorji - uklonska oblika

Par lastna vrednost - lastni vektor predstavlja uklonsko obliko konstrukcije. Oblike so oštevilčene od 1 do  $n$ . Lastno vrednost  $\lambda$  imenujemo uklonski faktor, ki nam pove, kolikokrat moramo pomnožiti obtežbo  $r$ , da povzročimo uklonsko nestabilnost pri izbrani obliki. Faktor je lahko manjši od 1 (obtežba povzroči uklon), večji od ena (obtežba ne povzroči uklona) ali negativen (nasprotna obtežba povzroči uklon).

Analiza je narejena na šestih različnih primerih. V prvih dveh primerih je izbrana mreža 1, primera pa se razlikujeta v izbiri materiala. V prvem primeru je izbran material C30/37, v drugem primeru pa C35/45. V tretjem in četrtem primeru je izbrana mreža 2 brez luknje, primera pa se zopet razlikujeta le v materialu. V petem in šestem primeru je izbrana mreža 2 z luknjo, primera pa se zopet razlikujeta v izbranem materialu.

V vseh primerih je kot obtežba podana le lastna teža, pomnožena z varnostnim faktorjem  $\gamma_G = 1,35$ .

V poglavju 7.1.7 je narejena primerjava dobljenih rezultatov za različne mreže ter različne materiale.

### 7.1.1 Mreža 1, material C30/37

Izbrana je mreža 1, uporabljen material pa je beton C30/37.

Rezultati analize so predstavljeni v preglednici 7-1. Vidimo lahko, da sta si po dve uklonski obliki podobni, imata celo enak uklonski faktor. Primerjava slik pokaže, da so oblike res enake, pride le do rotacije horizontalnih valov glede na izhodišče. Slike v preglednici 7-2 zato prikazujejo vsako drugo uklonsko obliko. Prikazane so slike prvih 10 uklonskih oblik.

Preglednica 7-1: Uklonski faktorji - m1, C30/37

<b>Mreža 1 - brez luknje - lastna teža - material c30/37</b>			
<b>Uklonska oblika</b>	<b>Št valov vertikalno</b>	<b>Št valov horizontalno</b>	<b>Faktor</b>
1	2	6	10,633137
2	2	6	10,633137
3	3	7	10,920890
4	3	7	10,920890
5	2	5	11,088153
6	2	5	11,088153
7	3	8	11,870072
8	3	8	11,870072
9	2	9	13,449420
10	2	9	13,449420
11	3	7	14,779181
12	3	7	14,779181
13	3	6	15,323411
14	3	6	15,323411
15	2	10	15,490658
16	2	10	15,490658
17	3	8	15,656778
18	3	8	15,656778
19	3	9	16,923341
20	3	9	16,923341

Preglednica 7-2: Slike uklonskih oblik

Uklonska oblika	Faktor	Slika - merilo 1:2000
1 Št valov: V2 H6	10,633137	
3 Št valov: V3 H7	10,92089	
5 Št valov: V2 H5	11,088153	
7 Št valov: V3 H8	11,870072	
9 Št valov: V2 H9	13,44942	

### 7.1.2 Mreža 1, material C35/45

Uporabljena je mreža 1, izbrani material pa je C35/45.

Rezultati analize so predstavljeni v preglednici 7-3. Vidimo lahko, da sta si po dve uklonski obliki podobni, imata celo enak uklonski faktor. Primerjava slik pokaže, da so oblike res enake, pride le do rotacije horizontalnih valov glede na izhodišče. Slike v preglednici 7-4 zato prikazujejo vsako drugo uklonsko obliko. Prikazane so slike prvih 10 uklonskih oblik.

Preglednica 7-3: Uklonski faktorji - m1, C35/45

<b>Mreža 1 - brez luknje - lastna teža - material c35/45</b>			
<b>Uklonska oblika</b>	<b>Št valov vertikalno</b>	<b>Št valov horizontalno</b>	<b>Faktor</b>
1	2	6	10,922274
2	2	6	10,922274
3	3	7	11,226573
4	3	7	11,226573
5	2	5	11,370078
6	2	5	11,370078
7	3	8	12,213211
8	3	8	12,213211
9	2	9	13,846440
10	2	9	13,846440
11	3	7	15,220685
12	3	7	15,220685
13	3	6	15,768730
14	3	6	15,768730
15	2	10	15,953804
16	2	10	15,953804
17	3	8	16,126218
18	3	8	16,126218
19	3	9	17,432841
20	3	9	17,432841

Preglednica 7-4: Slike uklonskih oblik

Uklonska oblika	Faktor	Slika - merilo 1:2000
1 Št valov: V2 H6	10,92227	
3 Št valov: V3 H7	11,22657	
5 Št valov: V2 H5	11,37008	
7 Št valov: V3 H8	12,21321	
9 Št valov: V2 H9	13,84644	



### 7.1.3 Mreža 2, material C30/37

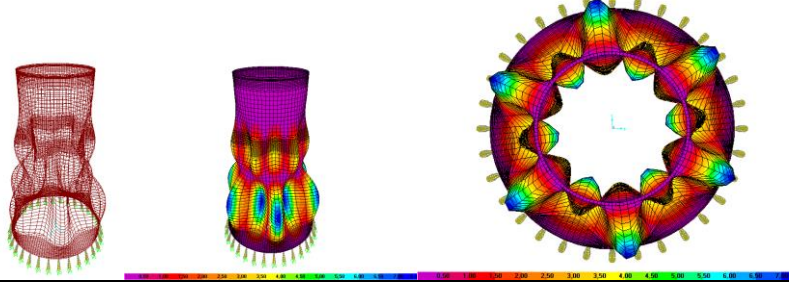
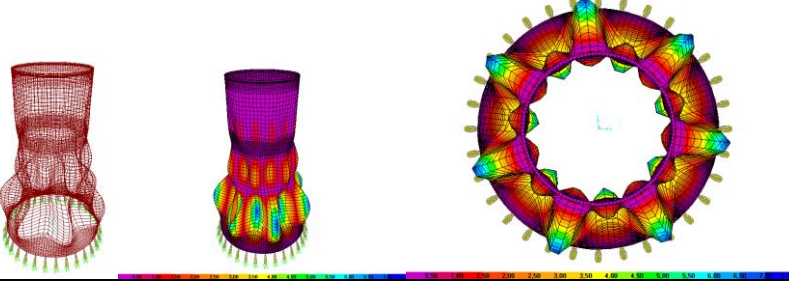
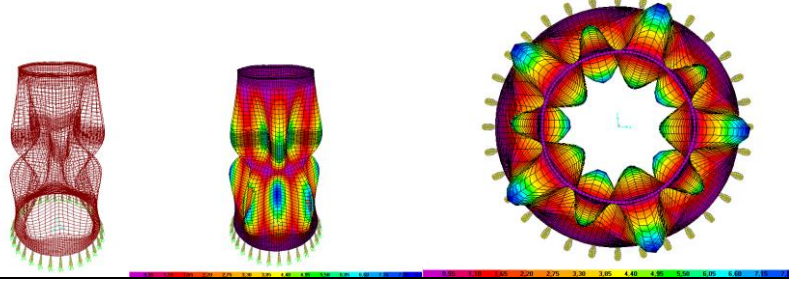
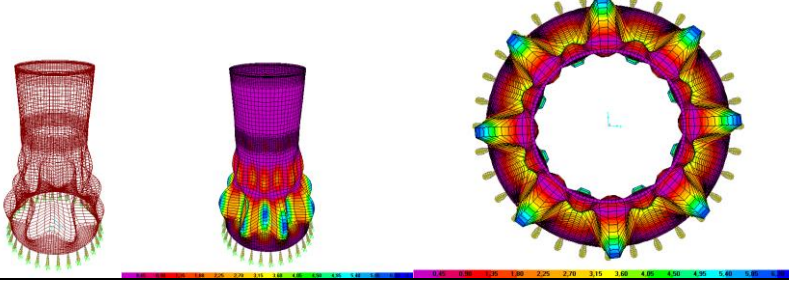
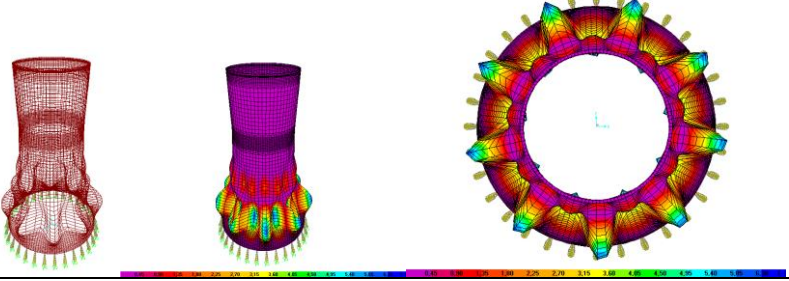
V analizi je upoštevana mreža 2 brez luknje. Material je C30/37.

Rezultati analize so predstavljeni v preglednici 7-5. Še vedno sta si po dve uklonski obliki med sabo podobni, vendar pa je pri uklonskem faktorju že opazna sprememba pri zadnjih decimalkah. Pri podobnih uklonskih oblikah pride do rotacije horizontalnih valov glede na izhodišče. Slike v preglednici 7-6 prikazujejo vsako drugo uklonsko obliko, ker so si med sabo podobne. Prikazane so slike prvih 10 uklonskih oblik.

Preglednica 7-5: Uklonski faktorji - m2, C30/37

<b>Mreža 2 - brez luknje - lastna teža - material c30/37</b>			
<b>Uklonska oblika</b>	<b>Št valov vertikalno</b>	<b>Št valov horizontalno</b>	<b>Faktor</b>
1	2	6	10,435465
2	2	6	10,435470
3	3	7	10,679892
4	3	7	10,679893
5	2	5	10,893893
6	2	5	10,893922
7	3	8	11,493269
8	3	8	11,493269
9	2	9	12,823166
10	2	9	12,823166
11	2	10	14,448242
12	2	10	14,448242
13	3	7	14,509862
14	3	7	14,509867
15	3	6	15,088688
16	3	6	15,088689
17	4	8	15,366618
18	4	8	15,366622
19	2	11	16,276534
20	2	11	16,276534

Preglednica 7-6: Slike uklonskih oblik

Uklonska oblika	Faktor	Slika - merilo 1:2000
1 Št valov: V2 H6	10,435465	
3 Št valov: V3 H7	10,679892	
5 Št valov: V2 H5	10,893893	
7 Št valov: V3 H8	11,493269	
9 Št valov: V2 H9	12,823166	

#### 7.1.4 Mreža 2, material C35/45

Pri analizi je bila uporabljena mreža 2 brez luknje, izbrani material pa je C35/45.

Rezultati analize so predstavljeni v preglednici 7-7. Še vedno sta si po dve uklonski obliki med sabo podobni, vendar pa je pri uklonskem faktorju že opazna sprememba pri zadnjih decimalkah. Pri podobnih uklonskih oblikah pride do rotacije horizontalnih valov glede na izhodišče. Slike v preglednici 7-8 prikazujejo vsako drugo uklonsko obliko, ker so si med sabo podobne. Prikazane so slike prvih 10 uklonskih oblik.

Preglednica 7-7: Uklonski faktorji - m2, C35/45

<b>Mreža 2 - brez luknje - lastna teža - material c35/45</b>			
<b>Uklonska oblika</b>	<b>Št valov vertikalno</b>	<b>Št valov horizontalno</b>	<b>Faktor</b>
1	2	6	10,719105
2	2	6	10,719110
3	3	7	10,978450
4	3	7	10,978452
5	2	5	11,171699
6	2	5	11,171729
7	3	8	11,824763
8	3	8	11,824763
9	2	9	13,200772
10	2	9	13,200772
11	2	10	14,879317
12	2	10	14,879317
13	3	7	14,944119
14	3	7	14,944125
15	3	6	15,528545
16	3	6	15,528546
17	4	8	15,828443
18	4	8	15,828446
19	2	11	16,765850
20	2	11	16,765850

Preglednica 7-8: Slike uklonskih oblik

Uklonska oblika	Faktor	Slika - merilo 1:2000
1 Št valov: V2 H6	10,719105	
3 Št valov: V3 H7	10,978450	
5 Št valov: V2 H5	11,171699	
7 Št valov: V3 H8	11,824763	
9 Št valov: V2 H9	13,200772	

### 7.1.5 Mreža 2 z luknjo, material C30/37

V analizi je uporabljena mreža 2 z luknjo, izbrani material pa je C30/37.

Rezultati analize so predstavljeni v preglednici 7-9. Podobno kot pri mreži brez luknje, sta si po dve uklonski obliki med sabo podobni. Razlika v uklonskem faktorju med podobnimi oblikami je pri tem večja.

Preglednica 7-9: Uklonski faktorji - m2 z luknjo, C30/37

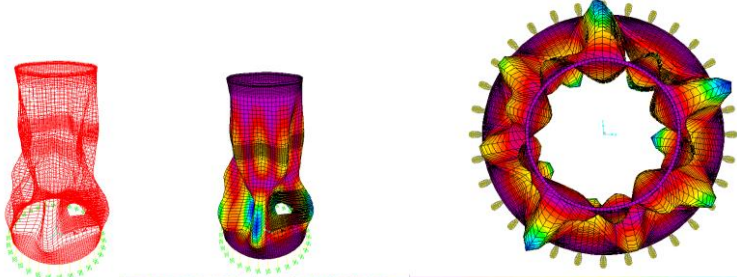
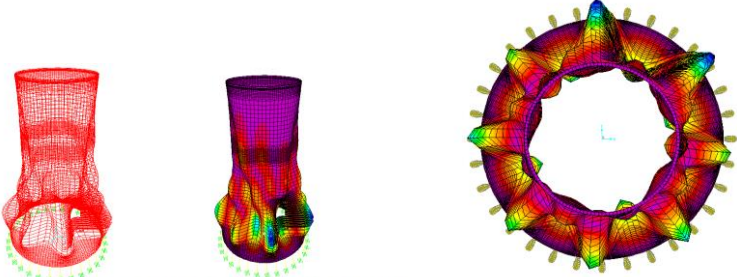
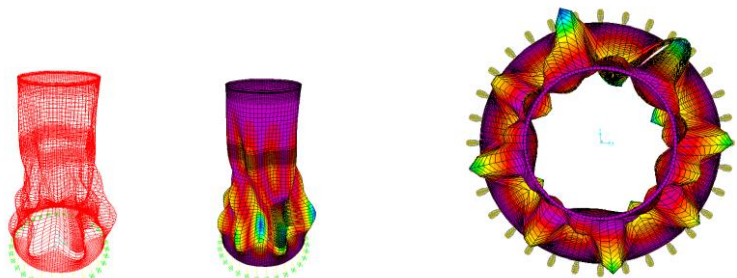
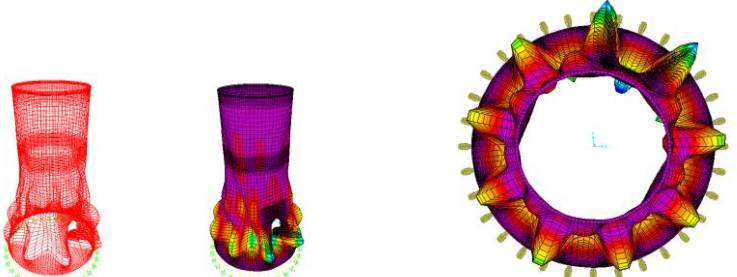
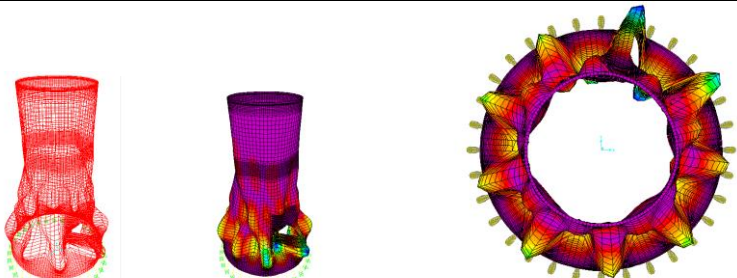
<b>Mreža 2 - z luknjo - lastna teža - material c35/45</b>			
<b>Uklonska oblika</b>	<b>Št valov vertikalno</b>	<b>Št valov horizontalno</b>	<b>Faktor</b>
1	2	6	10,52562
2	2	6	10,52672
3	2	5	10,67079
4	2	5	10,77406
5	2	7	11,16317
6	2	7	11,16435
7	3	8	11,84386
8	3	8	12,05902
9	3	9	13,01763
10	3	9	13,09444
11	3	10	14,00411
12	3	10	14,11044
13	3	7	14,36982
14	3	7	14,56374
15	3	6	14,8424
16	3	6	14,85957
17	4	8	15,2881
18	4	11	15,56145
19	4	11	15,5759
20	4	8	15,67323

Preglednica 7-10: Slike uklonskih oblik

Uklonska oblika	Faktor	Slika - merilo 1:2000
1 Št valov: V2 H6	10,52562	
2 Št valov: V2 H6	10,52672	
3 Št valov: V2 H5	10,67079	
4 Št valov: V2 H5	10,77406	
5 Št valov: V2 H7	11,16317	

se nadaljuje...

... nadaljevanje Preglednice 7-10

<p>6 Št valov: V2 H7</p>	<p>11,16435</p>	
<p>7 Št valov: V3 H8</p>	<p>11,84386</p>	
<p>8 Št valov: V3 H8</p>	<p>12,05902</p>	
<p>9 Št valov: V3 H9</p>	<p>13,01763</p>	
<p>10 Št valov: V3 H9</p>	<p>13,09444</p>	

### 7.1.6 Mreža 2 z luknjo, material C35/45

V analizi je uporabljena mreža 2 z luknjo, izbrani material pa je C35/45.

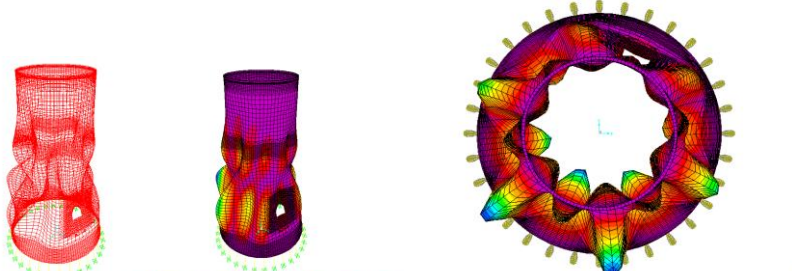
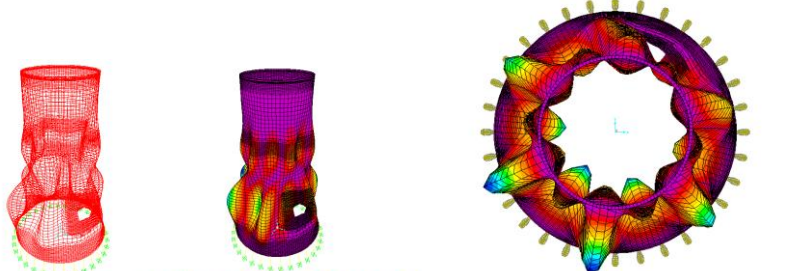
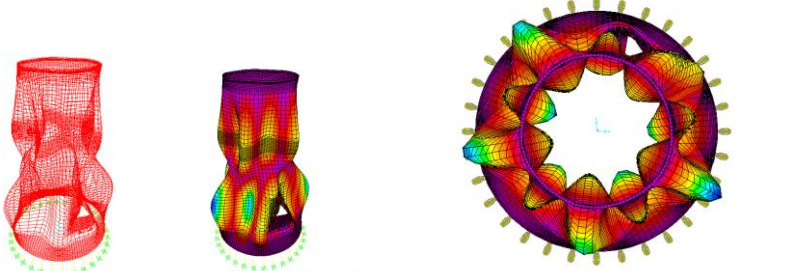
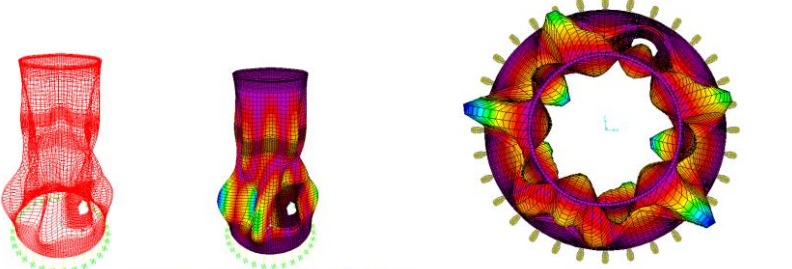
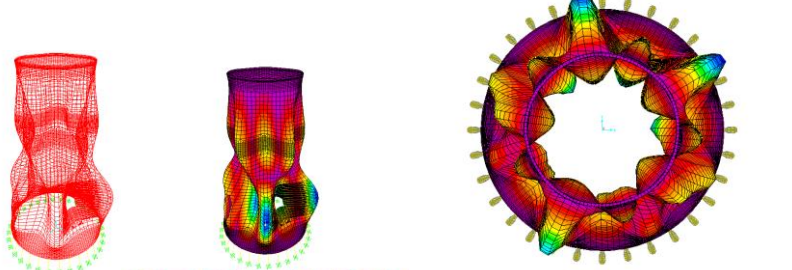
Rezultati analize so predstavljeni v preglednici 7-11. Podobno kot pri mreži brez luknje, sta si po dve uklonski obliki med sabo podobni. Razlika v uklonskem faktorju med podobnimi oblikami je pri tem večja.

Preglednica 7-11: Uklonski faktorji - m2 z luknjo, C35/45

<b>Mreža 2 - z luknjo - lastna teža - material c35/45</b>			
<b>Uklonska oblika</b>	<b>Št valov vertikalno</b>	<b>Št valov horizontalno</b>	<b>Faktor</b>
1	2	6	10,813483
2	2	6	10,815380
3	2	5	10,951535
4	2	5	11,066182
5	2	7	11,463271
6	2	7	11,477901
7	3	8	12,182924
8	3	8	12,401622
9	3	9	13,399162
10	3	9	13,475744
11	3	10	14,422194
12	3	10	14,531238
13	3	7	14,797597
14	3	7	14,999764
15	3	6	15,276944
16	3	6	15,295402
17	4	8	15,745964
18	4	11	16,029114
19	4	11	16,044035
20	4	8	16,144640

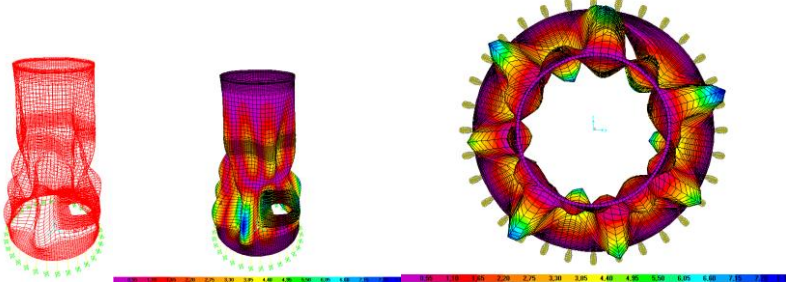
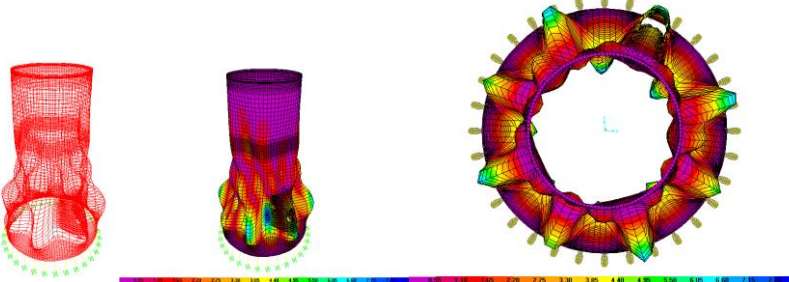
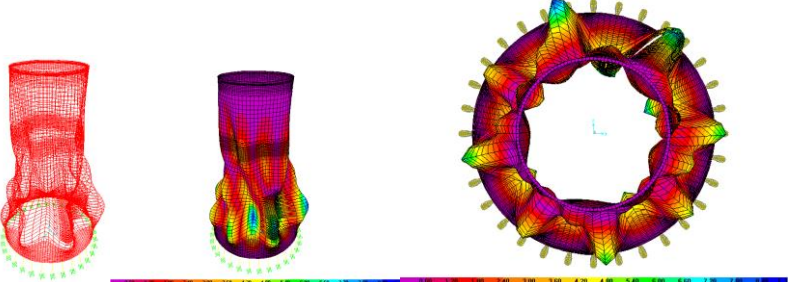
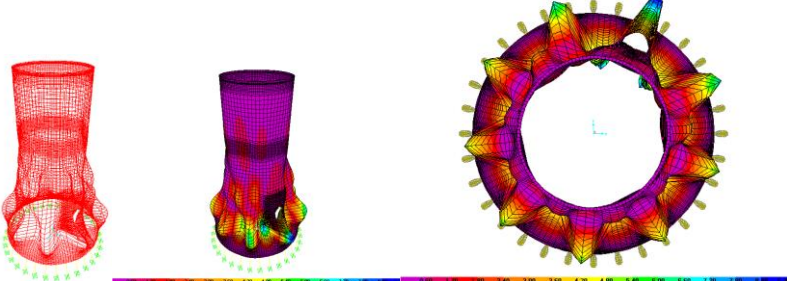
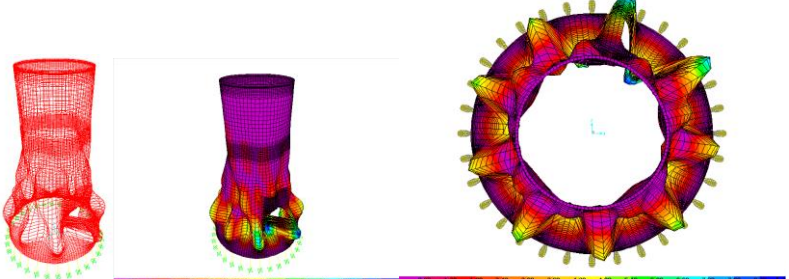


Preglednica 7-12: Slike uklonskih oblik

Uklonska oblika	Faktor	Slika - merilo 1:2000
1 Št valov: V2 H6	10,813483	
2 Št valov: V2 H6	10,81538	
3 Št valov: V2 H5	10,951535	
4 Št valov: V2 H5	11,066182	
5 Št valov: V2 H7	11,463271	

se nadaljuje...

... nadaljevanje Preglednice 7-12

6 Št valov: V2 H7	11,477901	
7 Št valov: V3 H8	12,182924	
8 Št valov: V3 H8	12,401622	
9 Št valov: V3 H9	13,399162	
10 Št valov: V3 H9	13,475744	

## 7.1.7 Primerjava rezultatov

V nadaljevanju je narejena primerjava vpliva različnih mrež in različnih materialov na uklonski faktor zaradi lastne teže. Primerjava je narejena tudi za mrežo z luknjo in brez.

### 7.1.7.1 Enaka mreža, različni materiali

Pričakovano je, da bo boljši material povečal uklonski faktor - boljši material, večja obtežba je potrebna za uklon. Zanimalo nas je predvsem, kolikšen bo ta vpliv ter kakšen je vpliv mreže na povečanje faktorja.

#### 7.1.7.1.1 M1

Preglednica 7-13: Primerjava uklonskih faktorjev pri različnih materialih, m1

Uklonska oblika	C30/37			C35/45			Razlika med faktorjema [%]
	Št valov vertikalno	Št valov horizontalno	Faktor	Št valov vertikalno	Št valov horizontalno	Faktor	
1	2	6	10,63314	2	6	10,92227	2,647223
2	2	6	10,63314	2	6	10,92227	2,647223
3	3	7	10,92089	3	7	11,22657	2,722852
4	3	7	10,92089	3	7	11,22657	2,722852
5	2	5	11,08815	2	5	11,37008	2,479534
6	2	5	11,08815	2	5	11,37008	2,479534
7	3	8	11,87007	3	8	12,21321	2,809572
8	3	8	11,87007	3	8	12,21321	2,809572
9	2	9	13,44942	2	9	13,84644	2,867307
10	2	9	13,44942	2	9	13,84644	2,867307
11	3	7	14,77918	3	7	15,22069	2,900684
12	3	7	14,77918	3	7	15,22069	2,900684
13	3	6	15,32341	3	6	15,76873	2,824064
14	3	6	15,32341	3	6	15,76873	2,824064
15	2	10	15,49066	2	10	15,9538	2,903044
16	2	10	15,49066	2	10	15,9538	2,903044
17	3	8	15,65678	3	8	16,12622	2,911036
18	3	8	15,65678	3	8	16,12622	2,911036
19	3	9	16,92334	3	9	17,43284	2,922645
20	3	9	16,92334	3	9	17,43284	2,922645

Iz preglednice 7-13 je razvidno, da je pri boljšem materialu uklonski faktor za 2,5 - 3,0% večji kot pri slabšem materialu. Opazimo lahko tudi, da se vpliv materiala povečuje z višjo uklonsko obliko.

### 7.1.7.1.2 M2

Preglednica 7-14: Primerjava uklonskih faktorjev pri različnih materialih, m2

c30/37				c35/45			Razlika med faktorjema [%]
Uklonska oblika	Št valov vertikalno	Št valov horizontalno	Faktor	Št valov vertikalno	Št valov horizontalno	Faktor	
1	2	6	10,43547	2	6	10,719105	2,646116
2	2	6	10,43547	2	6	10,719110	2,646115
3	3	7	10,67989	3	7	10,978450	2,719491
4	3	7	10,67989	3	7	10,978452	2,7195
5	2	5	10,89389	2	5	11,171699	2,486694
6	2	5	10,89392	2	5	11,171729	2,486697
7	3	8	11,49327	3	8	11,824763	2,803388
8	3	8	11,49327	3	8	11,824763	2,803388
9	2	9	12,82317	2	9	13,200772	2,860484
10	2	9	12,82317	2	9	13,200772	2,860484
11	2	10	14,44824	2	10	14,879317	2,897142
12	2	10	14,44824	2	10	14,879317	2,897142
13	3	7	14,50986	3	7	14,944119	2,905872
14	3	7	14,50987	3	7	14,944125	2,905878
15	3	6	15,08869	3	6	15,528545	2,832571
16	3	6	15,08869	3	6	15,528546	2,83257
17	4	8	15,36662	4	8	15,828443	2,917691
18	4	8	15,36662	4	8	15,828446	2,917684
19	2	11	16,27653	2	11	16,765850	2,918528
20	2	11	16,27653	2	11	16,765850	2,918528

Podobno kot pri mreži 1, lahko tudi tu vidimo, da boljši material poveča uklonski faktor za 2,5 - 3,0%. Povečanje faktorja zaradi materiala je večje pri višjih uklonskih oblikah.

Iz primerjave preglednice 7-13 in preglednice 7-14 sledi, da material C35/45 v primerjavi z materialom C30/37 uklonski faktor poveča za 2,5 - 3%. Na povečanje faktorja zaradi materiala različni mreži nimata bistvenega vpliva.

### 7.1.7.2 Enak material, različni mreži

Po pričakovanjih naj bi boljša mreža dala natančnejši rezultat. V nadaljevanju je predstavljen vpliv mreže na uklonski faktor zaradi lastne teže.

#### 7.1.7.2.1 C30/37

Preglednica 7-15: Primerjava uklonskih faktorjev pri različnih mrežah, C30/37

m1				m2				Razlika med faktorjema [%]
Uklonska oblika	Št valov vertikalno	Št valov horizontalno	Faktor	Uklonska oblika	Št valov vertikalno	Št valov horizontalno	Faktor	
1	2	6	10,63314	1	2	6	10,435465	1,859019
2	2	6	10,63314	2	2	6	10,435470	1,858972
3	3	7	10,92089	3	3	7	10,679892	2,206762
4	3	7	10,92089	4	3	7	10,679893	2,206752
5	2	5	11,08815	5	2	5	10,893893	1,75196
6	2	5	11,08815	6	2	5	10,893922	1,751698
7	3	8	11,87007	7	3	8	11,493269	3,174395
8	3	8	11,87007	8	3	8	11,493269	3,174395
9	2	9	13,44942	9	2	9	12,823166	4,656364
10	2	9	13,44942	10	2	9	12,823166	4,656364
11	3	7	14,77918	13	3	7	14,509862	1,822286
12	3	7	14,77918	14	3	7	14,509867	1,822253
13	3	6	15,32341	15	3	6	15,088688	1,531793
14	3	6	15,32341	16	3	6	15,088689	1,531787
15	2	10	15,49066	11	2	10	14,448242	6,72932
16	2	10	15,49066	12	2	10	14,448242	6,72932
17	3	8	15,65678	17	4	8	15,366618	1,853255
18	3	8	15,65678	18	4	8	15,366622	1,853229
19	3	9	16,92334					
20	3	9	16,92334					
				19	2	11	16,276534	
				20	2	11	16,276534	

V preglednici 7-15 lahko vidimo, da je pri boljši, gostejši mreži uklonski faktor manjši. Primerjava pokaže, da je prvih 10 uklonskih oblik med sabo podobnih ne glede na mrežo, pojavijo se le rotacije valov glede na izbrano izhodišče. Pri višjih uklonskih oblikah (11-18) so si oblike med seboj podobne, vendar pa pri različnih mrežah nastopajo na različnih mestih in imajo različne faktorje, poleg tega pa lahko pride tudi do rotacije valov glede na izbrano izhodišče. V tabeli so med sabo primerjani faktorji pri podobnih oblikah. Zadnji dve obliki sta

pri različnih mrežah povsem različni. Pri gostejši mreži se pri določenih uklonskih oblikah (17, 18) pojavi dodatni val v vertikalni smeri.

### 7.1.7.2.2 C35/45

Preglednica 7-16: Primerjava uklonskih faktorjev pri različnih mrežah, C35/45

m1				m2				Razlika med faktorjema [%]
Uklonska oblika	Št valov vertikalno	Št valov horizontalno	Faktor	Uklonska oblika	Št valov vertikalno	Št valov horizontalno	Faktor	
1	2	6	10,922274	1	2	6	10,719105	1,860135
2	2	6	10,922274	2	2	6	10,719110	1,860089
3	3	7	11,226573	3	3	7	10,978450	2,210140
4	3	7	11,226573	4	3	7	10,978452	2,210122
5	2	5	11,370078	5	2	5	11,171699	1,744746
6	2	5	11,370078	6	2	5	11,171729	1,744482
7	3	8	12,213211	7	3	8	11,824763	3,180556
8	3	8	12,213211	8	3	8	11,824763	3,180556
9	2	9	13,846440	9	2	9	13,200772	4,663061
10	2	9	13,846440	10	2	9	13,200772	4,663061
11	3	7	15,220685	13	3	7	14,944119	1,817040
12	3	7	15,220685	14	3	7	14,944125	1,817001
13	3	6	15,768730	15	3	6	15,528545	1,523173
14	3	6	15,768730	16	3	6	15,528546	1,523166
15	2	10	15,953804	11	2	10	14,879317	6,734989
16	2	10	15,953804	12	2	10	14,879317	6,734989
17	3	8	16,126218	17	4	8	15,828443	1,846527
18	3	8	16,126218	18	4	8	15,828446	1,846509
19	3	9	17,432841					
20	3	9	17,432841					
				19	2	11	16,765850	
				20	2	11	16,765850	

Podobno kot v poglavju 7.1.7.2.1 je tudi tu uklonski faktor pri gostejši mreži manjši. Prvih 10 uklonskih oblik je med sabo podobnih pri obeh mrežah, pojavijo se le rotacije valov glede na izbrano izhodišče. Tudi tu so si pri višjih uklonskih oblikah (11-18) oblike med seboj podobne, vendar pa pri različnih mrežah nastopajo na različnih mestih in imajo različne faktorje, poleg tega pa lahko pride tudi do rotacije valov glede na izbrano izhodišče. V tabeli so med sabo primerjani faktorji pri podobnih oblikah. Zadnji dve obliki sta pri različnih mrežah povsem različni. Pri gostejši mreži se pri določenih uklonskih oblikah (17, 18) pojavi dodatni val v vertikalni smeri.

Če primerjamo preglednici 7-15 in 7-16 lahko opazimo, da se faktor podobno zmanjšuje pri obeh materialih. Primerjava med mrežama pri različnih materialih pokaže, da je sprememba faktorja pri različnih mrežah podobna pri različnih materialih. Material tako ne vpliva na spremembo faktorja zaradi različnih mrež.

### 7.1.7.3 Mreža z luknjo, različni materiali

Podobno kot pri mreži brez luknje je pričakovano, da bodo pri boljšem materialu večji uklonski faktorji.

Preglednica 7-17: Primerjava uklonskih faktorjev pri različnih materialih, m2 z luknjo

Uklonska oblika	C30/37			C35/45			Razlika med faktorjema [%]
	Št valov vertikalno	Št valov horizontalno	Faktor	Št valov vertikalno	Št valov horizontalno	Faktor	
1	2	6	10,52562	2	6	10,813483	2,662065
2	2	6	10,52672	2	6	10,815380	2,669014
3	2	5	10,67079	2	5	10,951535	2,563531
4	2	5	10,77406	2	5	11,066182	2,639817
5	2	7	11,16317	2	7	11,463271	2,617979
6	2	7	11,16435	2	7	11,477901	2,731797
7	3	8	11,84386	3	8	12,182924	2,783084
8	3	8	12,05902	3	8	12,401622	2,762542
9	3	9	13,01763	3	9	13,399162	2,847469
10	3	9	13,09444	3	9	13,475744	2,829588
11	3	10	14,00411	3	10	14,422194	2,898893
12	3	10	14,11044	3	10	14,531238	2,895803
13	3	7	14,36982	3	7	14,797597	2,890861
14	3	7	14,56374	3	7	14,999764	2,906892
15	3	6	14,8424	3	6	15,276944	2,84445
16	3	6	14,85957	3	6	15,295402	2,849418
17	4	8	15,2881	4	8	15,745964	2,907793
18	4	11	15,56145	4	11	16,029114	2,917585
19	4	11	15,5759	4	11	16,044035	2,917807
20	4	8	15,67323	4	8	16,144640	2,919947

Boljši material podobno kot pri mreži 1 ter mreži 2 brez luknje poveča uklonski faktor za 2,6 - 3%. Povečanje faktorja zaradi materiala je večje pri višjih uklonskih oblikah.

#### 7.1.7.4 Mreža z luknjo in brez luknje

Predpostavljeno je, da luknja ne vpliva bistveno na obnašanje lupine, zato je pričakovano, da se bodo pri mreži brez luknje in pri mreži z luknjo pojavile podobne uklonske oblike pri podobnih uklonskih faktorjih.

##### 7.1.7.4.1 C30/37

Preglednica 7-18: Primerjava uklonskih faktorjev pri mreži z luknjo in mreži brez

brez				z				Razlika med faktorjema [%]
Uklonska oblika	Št valov vertikalno	Št valov horizontalno	Faktor	Uklonska oblika	Št valov vertikalno	Št valov horizontalno	Faktor	
1	2	6	10,43547	1	2	6	10,52562	0,856539
2	2	6	10,43547	2	2	6	10,52672	0,866804
3	3	7	10,67989	5	2	7	11,16317	4,329175
4	3	7	10,67989	6	2	7	11,16435	4,339304
5	2	5	10,89389	3	2	5	10,67079	2,047973
6	2	5	10,89392	4	2	5	10,77406	1,100311
7	3	8	11,49327	7	3	8	11,84386	2,960132
8	3	8	11,49327	8	3	8	12,05902	4,691533
9	2	9	12,82317	9	3	9	13,01763	1,493813
10	2	9	12,82317	10	3	9	13,09444	2,071643
11	2	10	14,44824	11	3	10	14,00411	3,073952
12	2	10	14,44824	12	3	10	14,11044	2,338001
13	3	7	14,50986	13	3	7	14,36982	0,965157
14	3	7	14,50987	14	3	7	14,56374	0,369891
15	3	6	15,08869	15	3	6	14,8424	1,632276
16	3	6	15,08869	16	3	6	14,85957	1,518469
17	4	8	15,36662	17	4	8	15,2881	0,510939
18	4	8	15,36662	20	4	8	15,67323	1,956222
19	2	11	16,27653	18	4	11	15,56145	4,393337
20	2	11	16,27653	19	4	11	15,5759	4,304559

Iz preglednice je razvidno, da se pri mreži z in brez luknje pojavljajo podobne uklonske oblike, le da nastopajo na različnih mestih. Pri določenih oblikah (5, 6) je pri mreži z luknjo manj valov v vertikalni smeri, pri določenih (9, 10, 11, 12, 18, 19) pa več. Narejena je primerjava podobnih uklonskih faktorjev, ki se pri mreži z luknjo in pri mreži brez razlikujejo za do 4,7%.



### 7.1.7.4.2 C35/45

Preglednica 7-19: Primerjava uklonskih faktorjev pri mreži z luknjo in mreži brez

brez				z				Razlika med faktorjema [%]
Uklonska oblika	Št valov vertikalno	Št valov horizontalno	Faktor	Uklonska oblika	Št valov vertikalno	Št valov horizontalno	Faktor	
1	2	6	10,719105	1	2	6	10,813483	0,872781
2	2	6	10,719110	2	2	6	10,81538	0,890121
3	3	7	10,978450	5	2	7	11,463271	2,543532
4	3	7	10,978452	6	2	7	11,477901	2,667491
5	2	5	11,171699	3	2	5	10,951535	0,245162
6	2	5	11,171729	4	2	5	11,066182	0,792776
7	3	8	11,824763	7	3	8	12,182924	2,939861
8	3	8	11,824763	8	3	8	12,401622	4,65148
9	2	9	13,200772	9	3	9	13,399162	1,480615
10	2	9	13,200772	10	3	9	13,475744	2,040496
11	2	10	14,944119	11	3	10	14,422194	3,072204
12	2	10	14,944125	12	3	10	14,531238	2,339348
13	3	7	15,528545	13	3	7	14,797597	0,980466
14	3	7	15,528546	14	3	7	14,999764	0,370933
15	3	6	14,879317	15	3	6	15,276944	1,620248
16	3	6	14,879317	16	3	6	15,295402	1,50139
17	4	8	15,828443	17	4	8	15,745964	0,521081
18	4	8	15,828446	20	4	8	16,144640	1,958508
19	2	11	16,765850	18	4	11	16,029224	4,394266
20	2	11	16,765850	19	4	11	16,044035	4,305269

Podobno kot pri materialu C30/37 je tudi tu razvidno, da se pri mreži z in brez luknje pojavljajo podobne uklonske oblike, le da so na različnih mestih. Pri določenih oblikah (5, 6) je pri mreži z luknjo manj valov v vertikalni smeri, pri določenih (9, 10, 11, 12, 18, 19) pa več. Narejena je primerjava podobnih uklonskih faktorjev, ki se pri mreži z luknjo in pri mreži brez razlikujejo za do 4,7%.

## 7.2 Lastne nihajne oblike in frekvence

Za določitev lastnih nihajnih oblik in frekvenc je bila uporabljena modalna analiza. Lastne frekvence so potrebne za izračun dinamičnega koeficienta pri obtežbi vetra. Pri analizi je bila izbrana mreža 2 z luknjo ter material C35/45.

Za določitev lastnih nihajnih oblik je bila v programu Sap2000 uporabljena linearna modalna analiza tipa "Eigenvector". Ta analiza določa nihajne oblike in frekvence pri nedušenem nihanju. Z njo dobimo dober vpogled v obnašanje konstrukcije.

Analiza lastnih vrednosti temelji na rešitvi posplošenega problema lastnih vrednosti:

$$[K - \Omega^2 M]\Phi = 0 \quad (7-2)$$

Pri čemer je:

K - togostna matrika

M - masna matrika

$\Omega^2$  - diagonalna matrika lastnih vrednosti - lastna frekvenca

$\Phi$  - matrika pripadajočih lastnih vektorjev - lastna nihajna oblika

Vsak par lastna vrednost - lastni vektor imenujemo naravna nihajna oblika konstrukcije. Oblike so razvrščene in so označene od 1 do n. V programu lahko določimo število iskanih nihajnih oblik, konvergenco in velikostni razred frekvenc, ki nas zanimajo.

Lastna vrednost pri neki nihajni obliki je kvadrat krožne frekvence  $\omega$  pri tej obliki. Frekvenca  $f$  in nihajni čas  $T$  sta z nihajno obliko povezana z naslednjimi enačbami:

$$T = \frac{1}{f} \quad (7-3)$$

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (7-4)$$

Preglednica 7-20: Nihajni časi in frekvence

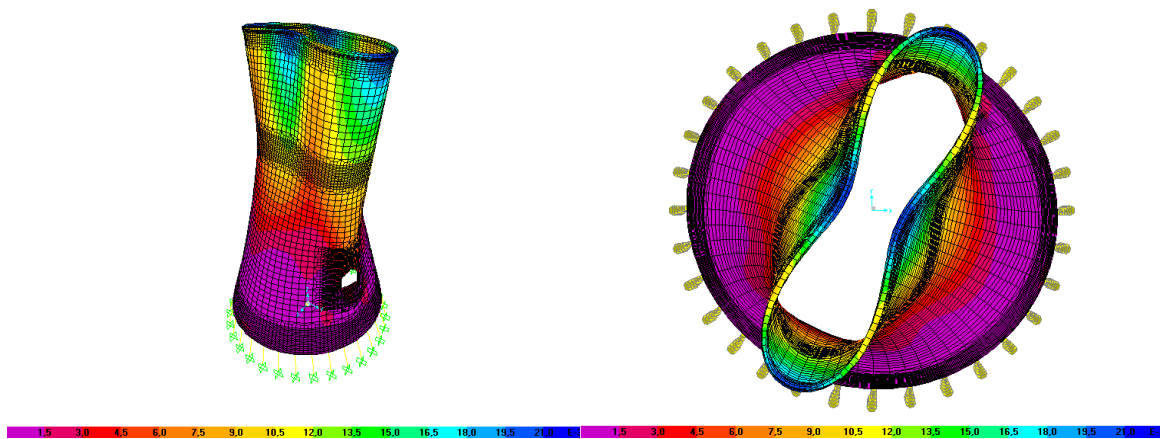
	T [s]	Frekvenca [ $s^{-1}$ = Hz]	Krožna frekvenca [ $s^{-1}$ = Hz]
1	0,896113	1,1159	7,0116
2	0,891116	1,1222	7,0509
3	0,852451	1,1731	7,3707
4	0,850509	1,1758	7,3876
5	0,824743	1,2125	7,6184
6	0,823393	1,2145	7,6308
7	0,81877	1,2213	7,6739
8	0,774379	1,2914	8,1138
9	0,768202	1,3017	8,1791
10	0,694746	1,4394	9,0439
11	0,693098	1,4428	9,0654
12	0,681766	1,4668	9,216
13	0,67898	1,4728	9,2539
14	0,674464	1,4827	9,3158
15	0,672715	1,4865	9,34
16	0,592874	1,6867	10,598
17	0,592609	1,6875	10,603
18	0,58246	1,7169	10,787
19	0,581415	1,7199	10,807
20	0,577739	1,7309	10,875

V preglednici 7-20 so predstavljeni dobljeni nihajni časi in nihajne frekvence. Za račun dinamičnega koeficienta po VGB-R 610 e, 2010 edition je bila uporabljena prva frekvenca  $f = 1,1159\text{Hz}$ .

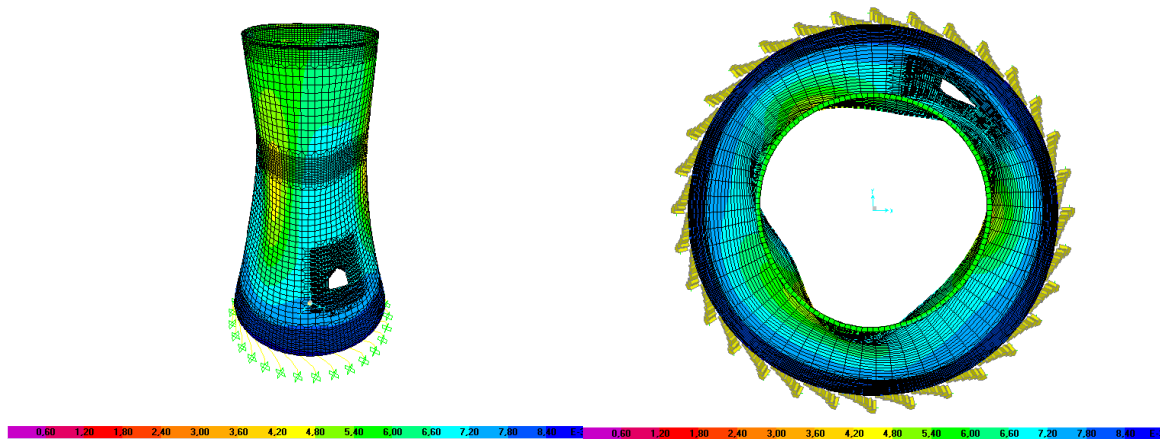
Preglednica 7-21: Efektivne mase

Mode	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ	RX	RY	RZ	SumRX	SumRY	SumRZ
	Sec	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
1	0,896113	2,17E-05	9,68E-05	5,54E-06	0,00002166	0,0000968	0,000005538	0,00015	0,00003329	6,643E-10	0,00015	0,00003329	6,643E-10
2	0,891116	8,78E-07	2,16E-07	2,11E-11	0,00002254	0,00009702	0,000005538	9,711E-08	3,72E-07	0,000005806	0,00015	0,00003366	0,000005807
3	0,852451	0,00017	3,71E-05	2,88E-11	0,00019	0,00013	0,000005538	0,00002116	0,00009643	0,00309	0,00017	0,00013	0,00309
4	0,850509	2,74E-05	0,00012	5,64E-07	0,00022	0,00026	0,000006103	0,00012	0,00002659	1,694E-10	0,00029	0,00016	0,00309
5	0,824743	4,27E-05	0,0002	2,73E-06	0,00026	0,00045	0,000008833	0,00021	0,00004598	0,000005098	0,0005	0,0002	0,0031
6	0,823393	0,00023	5,11E-05	9,42E-12	0,00049	0,0005	0,000008833	0,00002249	0,0001	0,95057	0,00052	0,0003	0,95367
7	0,81877	1,71E-05	3,86E-06	1,34E-11	0,00051	0,00051	0,000008833	3,754E-06	0,00001632	0,04347	0,00052	0,00032	0,99714
8	0,774379	0,00029	6,35E-05	1,18E-10	0,0008	0,00057	0,000008833	0,00004035	0,00019	0,00132	0,00057	0,00051	0,99846
9	0,768202	4,45E-06	1,96E-05	9,51E-07	0,0008	0,00059	0,000009783	9,487E-07	2,282E-07	6,579E-10	0,00057	0,00051	0,99846
10	0,694746	6,06E-05	0,00028	2,86E-06	0,00086	0,00087	0,00001264	0,00035	0,00007678	2,773E-09	0,00092	0,00058	0,99846
11	0,693098	7,78E-05	1,59E-05	3,1E-10	0,00094	0,00089	0,00001264	5,038E-06	0,00002715	0,000008438	0,00092	0,00061	0,99847
12	0,681766	0,00164	0,00037	1,71E-13	0,00258	0,00126	0,00001264	0,00023	0,00103	0,00024	0,00116	0,00165	0,9987
13	0,67898	0,00041	0,00181	2,88E-07	0,00299	0,00307	0,00001293	0,00118	0,00027	5,725E-10	0,00234	0,00191	0,9987
14	0,674464	5,48E-05	0,00024	7,24E-07	0,00305	0,00331	0,00001365	0,00023	0,000005086	6,63E-11	0,00257	0,00196	0,9987
15	0,672715	0,00019	4,21E-05	7,11E-12	0,00323	0,00335	0,00001365	0,00002253	0,00009857	0,00001401	0,00259	0,00206	0,99872
16	0,592874	0,78399	0,18136	3,24E-11	0,78722	0,18472	0,00001365	0,10164	0,4395	0,0001	0,10423	0,44156	0,99882
17	0,592609	0,17949	0,77551	4,34E-07	0,96671	0,96022	0,00001409	0,4403	0,10194	4,003E-09	0,54453	0,5435	0,99882
18	0,58246	0,00242	0,011	5,35E-06	0,96913	0,97123	0,00001944	0,00443	0,00097	1,708E-12	0,54896	0,54447	0,99882
19	0,581415	0,00012	2,01E-05	2,74E-10	0,96926	0,97125	0,00001944	0,00001665	0,00009327	2,096E-09	0,54897	0,54456	0,99882
20	0,577739	3,16E-07	1,77E-06	2,17E-06	0,96926	0,97125	0,0000216	0,00004232	9,213E-06	1,014E-11	0,54902	0,54457	0,99882

Iz preglednice 7-21, kjer lahko vidimo razmerja efektivnih mas, je razvidno, da se pri vseh oblikah pojavlja kombinacija translatornega pomika in torzijskega zasuka. Iz tabele je opaziti, da je 6. nihajna oblika pretežno torzijska okoli globalne osi Z ( $RZ = 95,06\%$ ), pri 16. nihajni obliki pride predvsem do translatornega pomika v globalni smeri X ( $UX = 78,40\%$ ), pri 17. nihajni obliki pa do translatornega pomika v globalni smeri Y ( $UY = 77,55\%$ ).



Slika 7-1: Prva nihajna oblika



Slika 7-2: Šesta nihajna oblika - torzijska nihajna oblika

Preglednica 7-22 podaja nihajne čase in frekvence, glede na projektno dokumentacijo. Pojavijo se razlike, ki pa jih pripisujemo različnim modelom. V tej diplomski nalogi v modelu ni bilo upoštevano temeljenje, v projektni dokumentaciji pa je bilo. Poleg tega je kot prva torzijska nihajna oblika v projektni dokumentaciji navedena oblika 25 ( $n_{rot} = 1,74\text{Hz}$ ).

Preglednica 7-22: Primerjava nihajnih časov in frekvenc  
 (NDCT ŠOŠTANJ unit 6, 2010, str. 95)

	T NDCT [s]	T diplomska [s]	Frekvenca NDCT [s <sup>-1</sup> = Hz]	Frekvenca diplomska [s <sup>-1</sup> = Hz]	Krožna frekvenca NDCT [s <sup>-1</sup> = Hz]	Krožna frekvenca diplomska [s <sup>-1</sup> = Hz]
1	1,0315	0,896113	0,96942	1,1159	6,0911	7,0116
2	1,0269	0,891116	0,97376	1,1222	6,1183	7,0509
3	0,98617	0,852451	1,014	1,1731	6,3713	7,3707
4	0,97945	0,850509	1,021	1,1758	6,415	7,3876
5	0,94438	0,824743	1,0589	1,2125	6,6533	7,6184
6	0,93879	0,823393	1,0652	1,2145	6,6929	7,6308
7	0,87425	0,81877	1,1441	1,2213	7,1886	7,6739
8	0,86156	0,774379	1,1607	1,2914	7,2928	8,1138
9	0,77025	0,768202	1,2983	1,3017	8,1574	8,1791
10	0,75596	0,694746	1,3228	1,4394	8,3115	9,0439
11	0,72836	0,693098	1,3729	1,4428	8,6264	9,0654
12	0,72242	0,681766	1,3842	1,4668	8,6974	9,216
13	0,71267	0,67898	1,4032	1,4728	8,8164	9,2539
14	0,7093	0,674464	1,4098	1,4827	8,8582	9,3158
15	0,70228	0,672715	1,4239	1,4865	8,9468	9,34
16	0,69072	0,592874	1,4478	1,6867	9,0965	10,598
17	0,64946	0,592609	1,5397	1,6875	9,6745	10,603
18	0,63672	0,58246	1,5705	1,7169	9,868	10,787
19	0,60536	0,581415	1,6519	1,7199	10,379	10,807
20	0,60453	0,577739	1,6542	1,7309	10,393	10,875

Pri torzijskih nihajnih oblikah je potrebno zadostiti tudi naslednji zahtevi (NDCT ŠOŠTANJ unit 6, 2010, str. 102 oz VGB-R 610 Ue):

$$n_{rot} = n_6 = 1,2145 > 1,5 \cdot n_{min} = 1,5 \cdot 1,1159 = 1,67385$$

$$n_{rot} = n_6 = 1,2145 > 1,3$$

(7-5)

Pri tem je:

- $n_{rot}$  - frekvenca pri torzijski nihajni obliki
- $n_{min}$  - najnižja naravna nihajna frekvenca
- $n_6$  - 6. naravna nihajna frekvenca

Opomba 1: Zahteva je bila podana v "VGB Guideline "Structural Design of Coaling Towers R 610 Ue; revision for the adjustment to new national European standards", vendar te knjige nismo imeli, tako da točnih zahtev ne poznamo

Opomba 2: V VGB-R 610 e, 2010 edition je za izračun dinamičnega koeficienta potreben račun najmanjše naravne frekvence, model pa bi moral vsebovati tudi temeljenje, česar pa v našem primeru ni

Opomba 3: Zgoraj podana zahteva ni izpolnjena, vendar pa ne poznamo točne zahteve, ravno tako ne poznamo zahtev glede modela

### 7.3 Uklonske oblike in uklonski faktorji pri lastni teži in vetru

Pri preverjanju uklonske stabilnosti je bila v skladu z VGB-R 610 e, 2010 edition narejena naslednja obtežna kombinacija.

$$D + W_e + W_i \quad (7-6)$$

Pri tem mora veljati, da je dobljeni uklonski faktor večji od 5.

$$\gamma_B \geq 5 \quad (7-7)$$

Narejenih je bilo 64 obtežnih primerov. Lastna teža ter srk sta bila povsod enaka, spreminjal pa se je zunanji pritisk vetra, ki je bil podan na vsakih 5,625°. Pri vsakem obtežnem primeru je bilo izračunanih prvih 20 uklonskih oblik ter uklonskih faktorjev.

Zanimalo nas je tudi, kako na rezultate vpliva različno podajanje debeline lupine. Najprej je bila debelina podana kot povprečna debelina posameznih končnih elementov, nato pa je bila podana še z uporabo funkcije "Joint Pattern" za vsako vozlišče, s čimer smo dobili zvezno spremenljivo debelino.

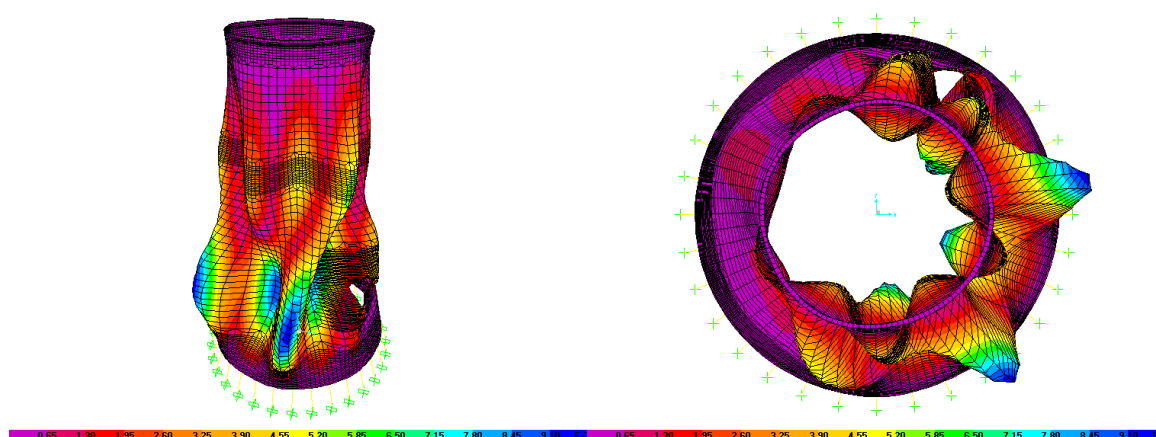
Največji faktor za debelino podano kot povprečno debelino končnih elementov je izračunan pri smeri  $39,375^\circ$  glede na izhodišče in znaša  $\gamma_{B,max} = 11,590$ , najmanjši pa pri  $337,5^\circ$  in znaša  $\gamma_{B,min} = 11,248$ . Razlika med njima je 3,0%. Vsi izračunani uklonski faktorji so večji od 5 in tako izpolnjujejo pogoj, izražen v (7-7).

Največji faktor za zvezno podano debelino je  $\gamma_{B,max} = 11,597$ , nahaja se je na istem mestu kot pri povprečno podani debelini, ravno tako pa najmanjši faktor, ki znaša  $\gamma_{B,min} = 11,287$ . Razlika med njima je 2,7%. Vsi izračunani uklonski faktorji tudi v tem primeru izpolnjujejo pogoj (7-7), saj so vsi večji od 5.

Primerjava vseh faktorjev pri različno podanih debelinah lupine pokaže, da se le ti med sabo razlikujejo za največ 0,6%. Razlika je pri izbrani mreži minimalna iz česar lahko sklepamo, da je mreža primerno zgoščena, na mestih, kjer se spreminja debelina in da je za to mrežo ustrezno tudi podajanje povprečne debeline končnih elementov, saj tak način podajanja ne vpliva na rezultate.

Slika 7-4 prikazuje prve uklonske oblike in pripadajoče uklonske faktorje. Zgornji uklonski faktor je izračunan pri povprečni debelini, spodnji pa pri zvezno podani. Zraven so pripisane še smeri delovanja vetra glede na izbrano izhodišče.

V projektni dokumentaciji je podanih 32 različnih obtežnih primerov, s korakom  $11,25^\circ$ . Veter deluje na sredini razpona med stebri. Kot najneugodnejša smer se izkaže smer  $270^\circ$  glede na izbrano izhodišče (za  $5,625^\circ$  zamaknjeno glede na izhodišče izbrano v tej diplomski nalogi;  $270^\circ = 264,375^\circ$ ). Najnižji izračunan uklonski faktor je  $\gamma_{B,min,NDCT} = 9,52$ . (NDCT ŠOŠTANJ unit 6, 2010, str. 90, 91)



Slika 7-3: Uklonska oblika pri vetru v smeri "60" - uklonska oblika z najmanjšim uklonskim faktorjem



Slika 7-4: Uklonske oblike in uklonski faktorji pri lastni teži in vetru



## 7.4 Notranje sile

Notranje sile se izračunajo s pomočjo linearne statične analize. Pri tem se rešuje sistem linearnih enačb:

$$Ku = r$$

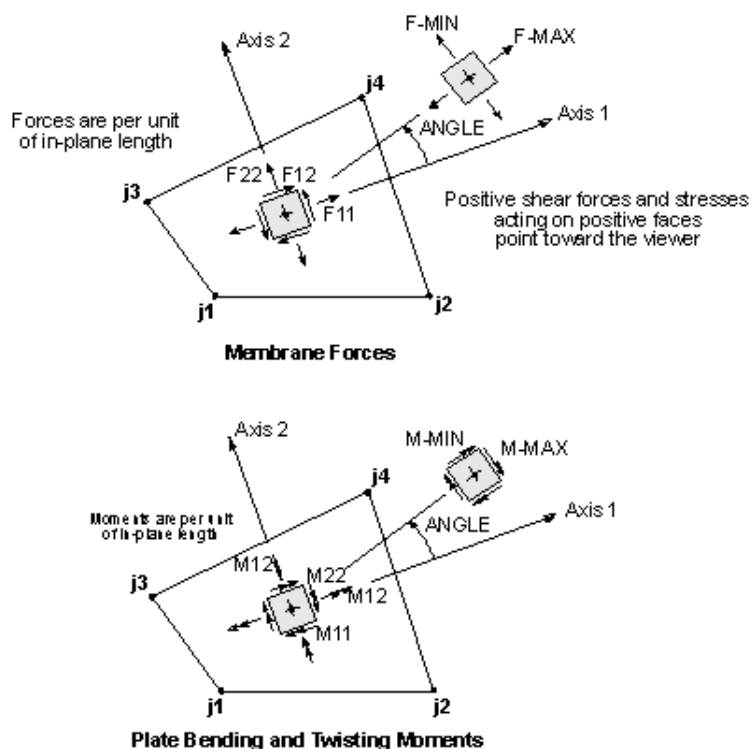
(7-8)

Pri čemer je:

K - linearna togostna matrika konstrukcije

r - vektor zunanje obtežbe

u - vektor rezultirajočih pomikov



Slika 7-5: Notranje sile za elemente tipa "Shell"  
(SAP2000, 1998)

### 7.4.1 Notranje sile zaradi lastne teže

Pri izračunu notranjih sil zaradi lastne teže se kot obtežba upošteva lastna teža, pomnožena z delnim varnostnim faktorjem  $\gamma_G = 1,35$ .

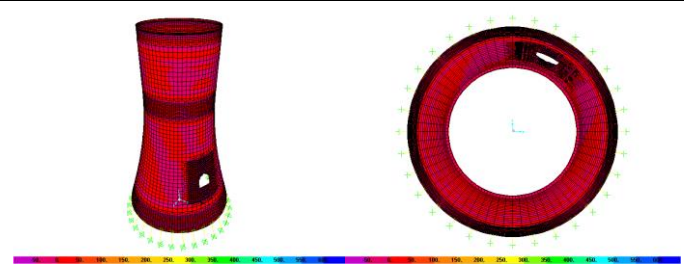
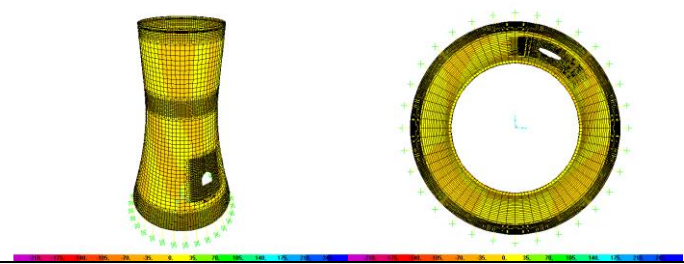
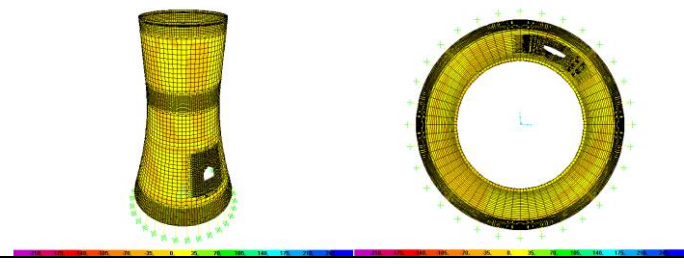
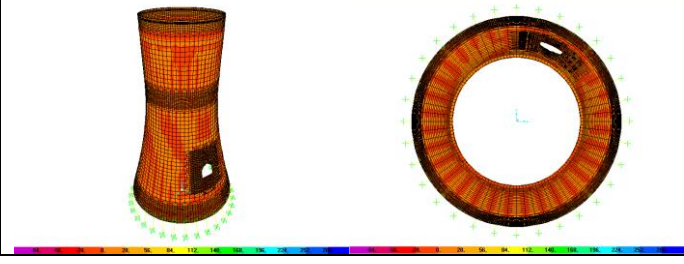
Rezultati so predstavljeni v preglednici 7-23.

Preglednica 7-23: Notranje sile zaradi lastne teže

Sila/ Moment	Slika	Max vrednost	Min vrednost
F11 [kN/m]		976,977	-4035,085
F22 [kN/m]		1433,956	-5832,511
F12 [kN/m]		1661,505	-1657,337
M11 [kNm/m]		265,827	-105,050

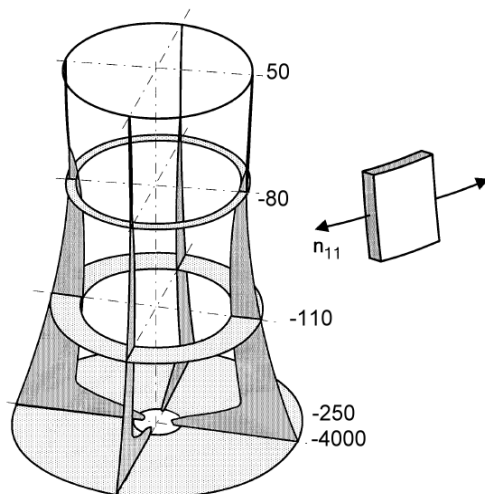
se nadaljuje...

...nadaljevanje Preglednice 7-23

M22 [kNm/m]		628,849	-78,362
M12 [kNm/m]		233,147	-228,016
V13 [kN/m]		224,220	-228,285
V23 [kN/m]		302,668	-94,764

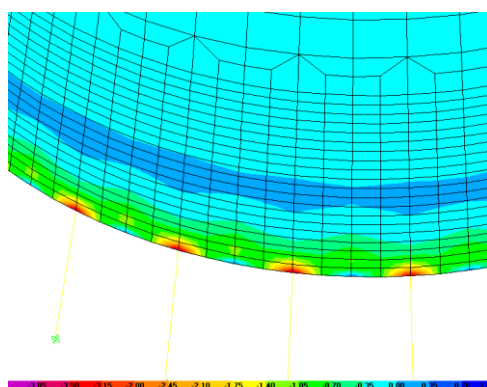
#### 7.4.1.1 Sila F11 v obročni smeri zaradi lastne teže

Slika 7-6 prikazuje velikosti F11 zaradi lastne teže po višini lupine v obodni smeri. Najmanjša vrednost sile  $F11_{\min} = -4035,085$  kN/m podana v preglednici 7-23 se pojavi točno nad vpetjem stebra, kot prikazuje slika 7-7. Na sredini razponov med stebri je vrednost sile pozitivna in znaša med 200 in 500 kN/m. Že na višini cca 10m je velikost sile precej manjša in znaša okoli -250 kN/m, nato pa se velikost sile postopoma zmanjšuje, še vedno pa ostaja negativna. Pozitivna sila se pojavi v zgornji četrtini lupine. Na zgornjem robu lupine je vrednosti sile pozitivna in znaša okoli 50 kN/m. Največja vrednost sile  $F11_{\max} = 976,977$  kN/m se pojavi v okolici odprtine.



Slika 7-6: F11

(Gould, P. L., Krätzig, W. B. 1999, str 17, številke vrednosti so izračunane v tej diplomski nalogi)

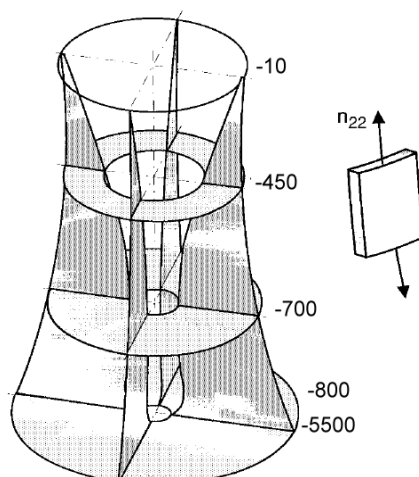


Slika 7-7: F11 v okolici stebrov

Rezultati pokažejo, da je večina lupine v obodni smeri izpostavljena tlaku, izjema je le zgornji del, kjer se v obodni smeri pojavi nateg.

#### 7.4.1.2 Sila F22 v meridionalni smeri zaradi lastne teže

Slika 7-8 prikazuje velikosti F22 zaradi lastne teže po višini lupine v meridionalni smeri. Najmanjša vrednost sile  $F22_{\min} = -5832,511$  kN/m podane v preglednici 7-23 se pojavi točno nad vpetjem stebra. Na sredini razponov med stebri je vrednost sile pozitivna, tam se pojavi tudi največja vrednost sile  $F22_{\max} = 1433,956$  kN/m. Že na višini cca 10m je velikost sile precej manjša in znaša okoli -800 kN/m, nato pa se velikost sile postopoma zmanjšuje, še vedno pa ostaja negativna. Na zgornjem robu lupine je vrednosti sile še vedno negativna in znaša okoli -10 kN/m.



Slika 7-8: F22

(Gould, P. L., Krätzig, W. B. 1999, str 19, številke vrednosti so izračunane v tej diplomski nalogi)

Rezultati pokažejo, da je vsa lupina v meridionalni smeri izpostavljena tlaku.

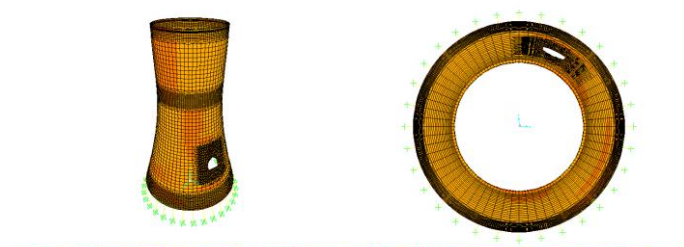
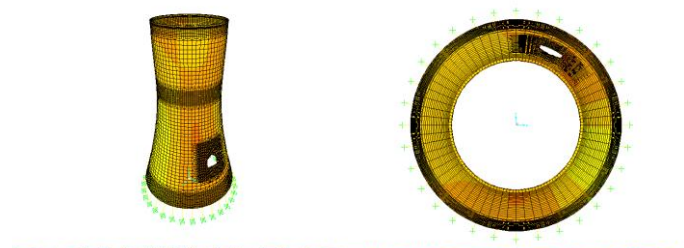
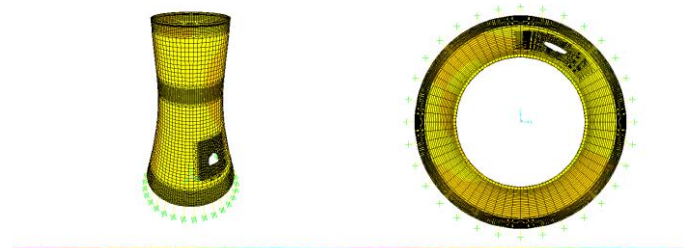
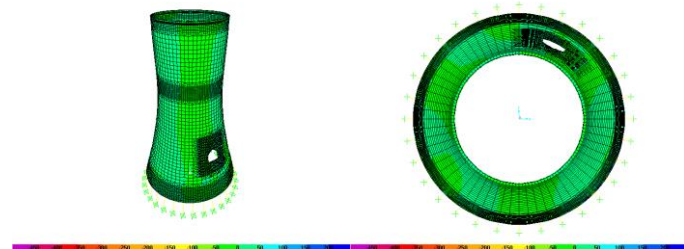
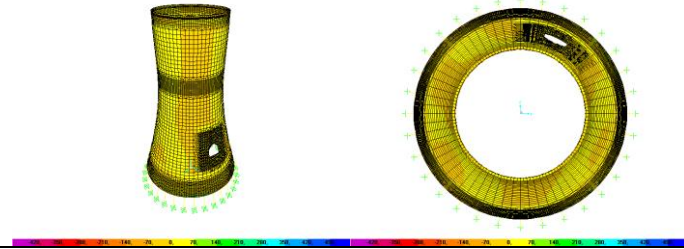
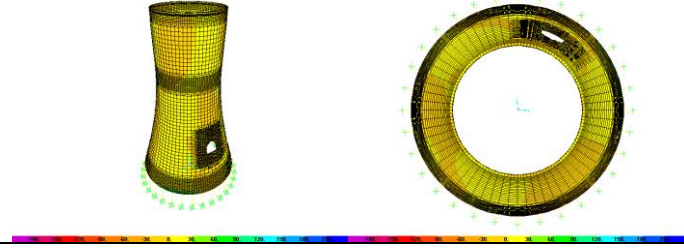
Vidimo lahko, da je večina lupine v obodni in meridionalni smeri v tlaku, le na zgornji del lupine v obodni smeri deluje nateg.

#### 7.4.2 Notranje sile zaradi vetra

Pri izračunu notranjih sil zaradi vetra se kot obtežba upošteva veter, ki deluje v najbolj neugodni smeri glede na rezultate dobljene z uklonsko analizo. Obtežba vetra je pomnožena z delnim varnostnim faktorjem  $\gamma_Q = 1,5$ .

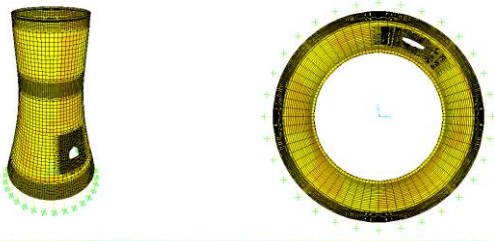
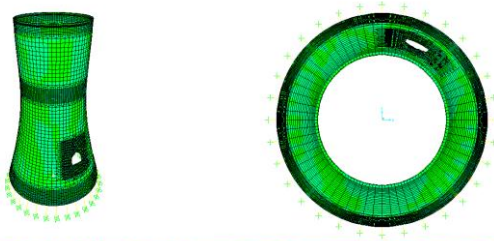
Rezultati so predstavljeni v preglednici 7-24.

Preglednica 7-24: Notranje sile zaradi obtežbe vetra

Sila/ Moment	Slika	Max vrednost	Min vrednost
F11 [kN/m]		5454,502	-2851,374
F22 [kN/m]		5684,403	-3648,411
F12 [kN/m]		2200,879	-2231,333
M11 [kNm/m]		220,804	457,923
M22 [kNm/m]		525,541	-476,610
M12 [kNm/m]		205,691	-200,471

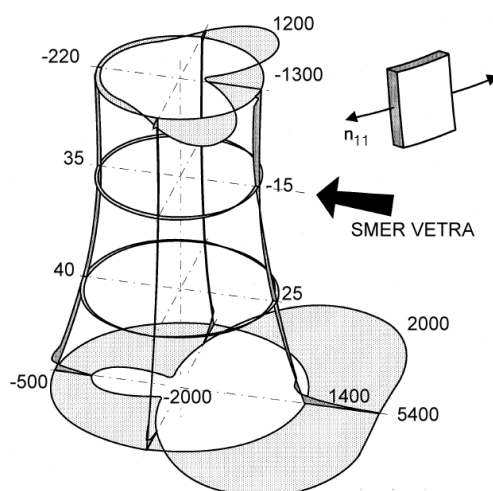
se nadaljuje...

...nadaljevanje Preglednice 7-24

V13 [kN/m]		368,148	-367,809
V23 [kN/m]		226,429	-564,576

#### 7.4.2.1 Sila F11 v obročni smeri zaradi vetra

Slika 7-9 prikazuje vrednosti sile F11 zaradi vetra v obodni smeri. Glavna smer delovanja vetra je ravno nad stebrom, tam se na spodnjem robu lupine pojavi tudi največja vrednost sile  $F_{11_{max}} = 5684,403$  kN/m. Tako v obodni kot v meridionalni smeri na spodnjem robu se nato vrednost sile F11 zmanjšuje. Na zgornji četrtini lupine pri smeri delovanja vetra je sila negativna, ravno tako je negativna na zgornji strani lupine na nasprotni smeri delovanja vetra. V srednjem delu lupine na nasprotni strani delovanja vetra je sila pozitivna, na spodnjem robu na nasprotni strani delovanja vetra pa je sila negativna. Pozitivna sila se pojavi še na zgornjem delu lupine levo in desno od smeri delovanja vetra.



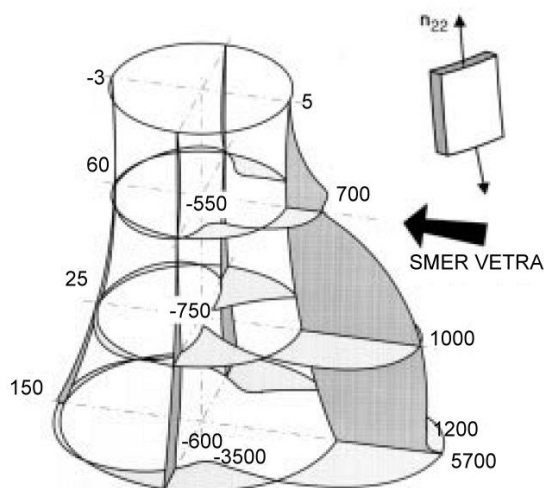
Slika 7-9: F11

(Gould, P. L., Krätzig, W. B. 1999, str 19, številске vrednosti so izračunane v tej diplomski nalogi)

Pri delovanju vetra se v obodni smeri v lupini pojavi tako tlak, kot nateg.

#### 7.4.2.2 Sila F22 v meridionalni smeri zaradi vetra

Slika 7-10 prikazuje vrednosti sile F22 zaradi vetra v obodni smeri. Glavna smer delovanja vetra je ravno nad stebrom, tam se na spodnjem robu lupine pojavi tudi največja vrednost sile  $F22_{max} = 5454,502$  kN/m. V meridionalni smeri nato velikost sile pada, vendar pa je povsod po višini pozitivna. V obodni smeri vrednost ravno tako pada in je celo negativna. Najmanjša sila  $F22_{min} = -3648,411$  kN/m se pojavi točno nad stebrom pri vpetju in je povsod po višini v tem prerezu negativna. Na nasprotni smeri lupine kot deluje veter, je vrednost sil precej manjša in večinoma pozitivna.



Slika 7-10: F22

(Gould, P. L., Krätzig, W. B. 1999, str 20, številne vrednosti so izračunane v tej diplomski nalogi)

Podobno kot v obodni smeri je tudi v meridionalni smeri zaradi obtežbe vetra prisoten tako tlak kot nateg.

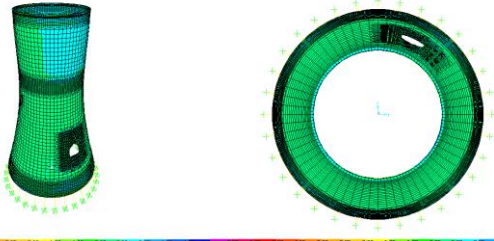
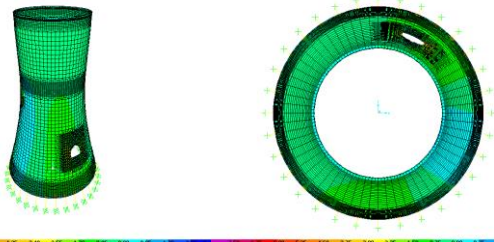
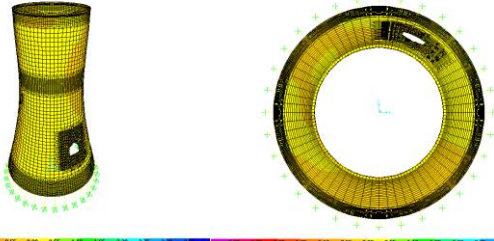
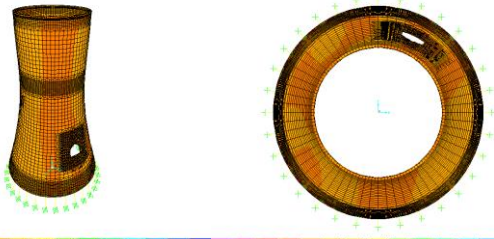
Zaradi vetra se v lupini tako v meridionalni kot v obodni smeri pojavita tlak in nateg.



### 7.4.3 Notranje sile zaradi lastne teže in vetra

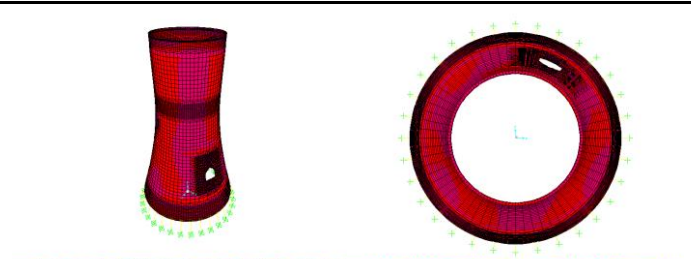
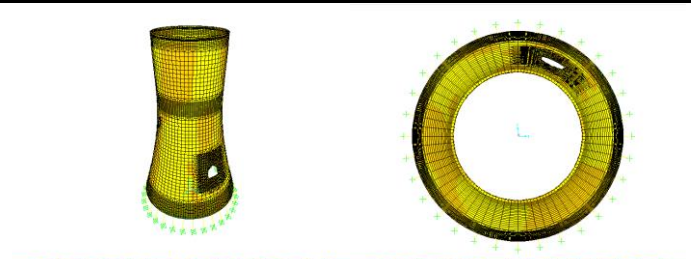
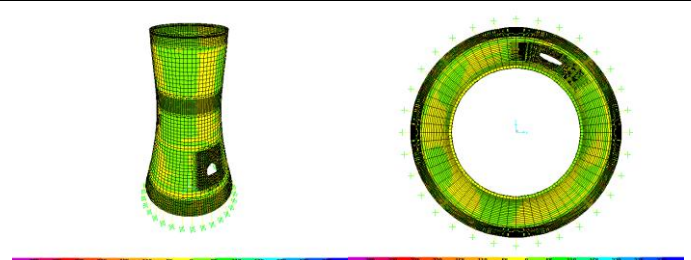
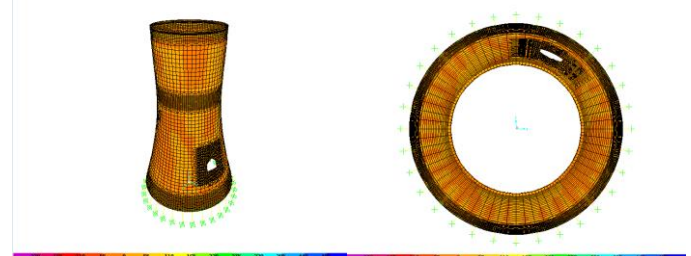
Pri izračunu notranjih sil zaradi lastne teže in vetra je upoštevana kombinacija podana v izrazu (6-6). Lastna teža je pomnožena z delnim varnostnim faktorjem  $\gamma_G = 1,35$ , za srk je upoštevana kombinacijska vrednost  $\gamma_Q \Psi_0 = 0,6 \cdot 1,5 = 0,9$ , prevladujoča obtežba pa je zunanji pritisk vetra, pomnožen z delnim varnostnim faktorjem  $\gamma_Q = 1,5$ .

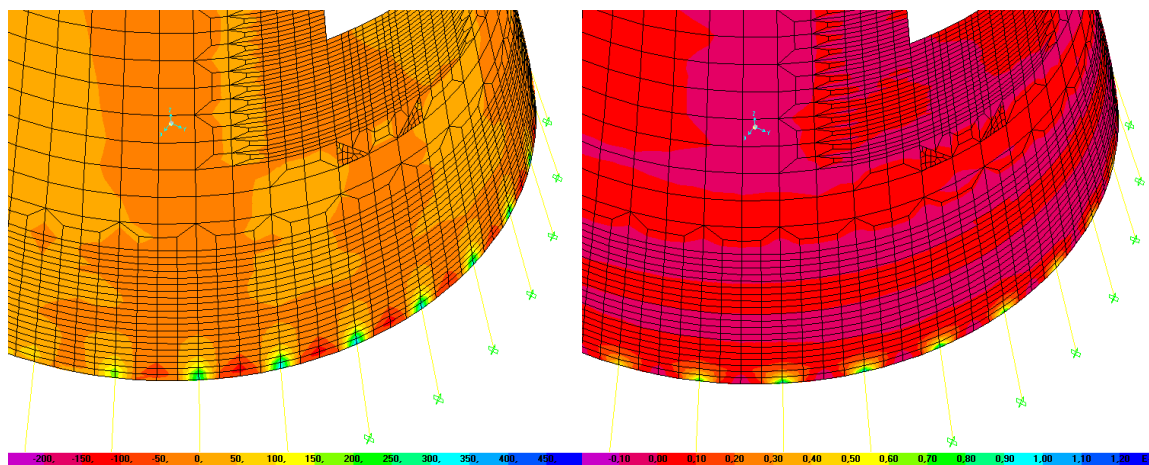
Preglednica 7-25: Notranje sile zaradi lastne teže in vetra

Sila/ Moment	Slika	Max vrednost	Min vrednost
F11 [kN/m]		2094,829	-6825,164
F22 [kN/m]		2951,424	-9335,140
F12 [kN/m]		3656,197	-3769,471
M11 [kNm/m]		464,148	-233,420

se nadaljuje...

... nadaljevanje Preglednice 7-25

M22 [kNm/m]		1107,051	-188,898
M12 [kNm/m]		405,276	-400,579
V13 [kN/m]		360,464	-398,938
V23 [kN/m]		521,814	-269,010

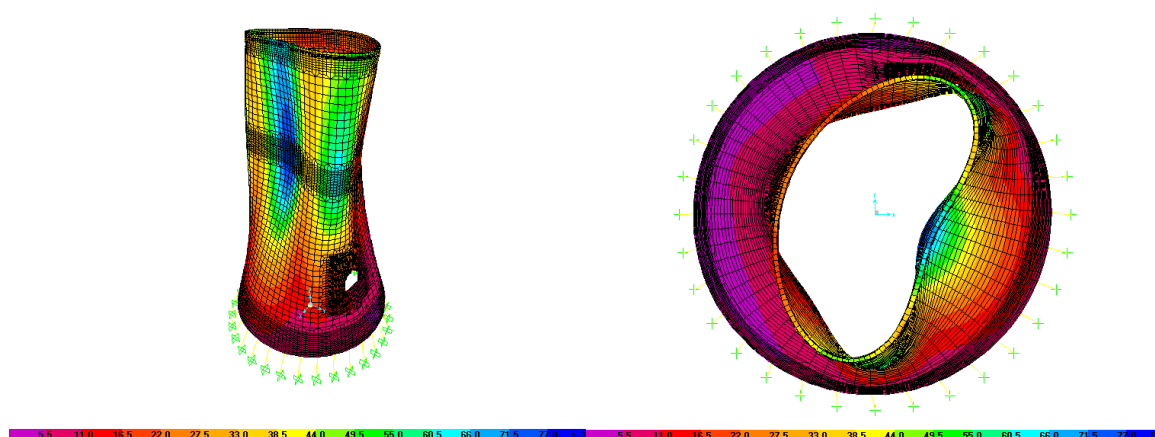


Slika 7-11: M11 ter M22

V poglavjih 7.4.1 ter 7.4.2 je bil podan komentar o velikosti in razporeditvi sil, ne pa momentov. Razlog za to je preprost. Po večini lupine sta tako M11 kot M22 zanemarljiva, pojavi se skoraj membransko stanje (samo sile). Vrednosti momentov so med -10 kNm/m ter 10 kNm/m, večinoma se sučejo okoli  $\pm 0$  kNm/m. Momenti so pomembni predvsem pri vpetju, ker se pojavijo tako minimalne (na sredini razponov med stebri) kot maksimalne vrednosti (nad stebri).

## 7.5 Natezne napetosti v betonu (potencialna mesta razpok)

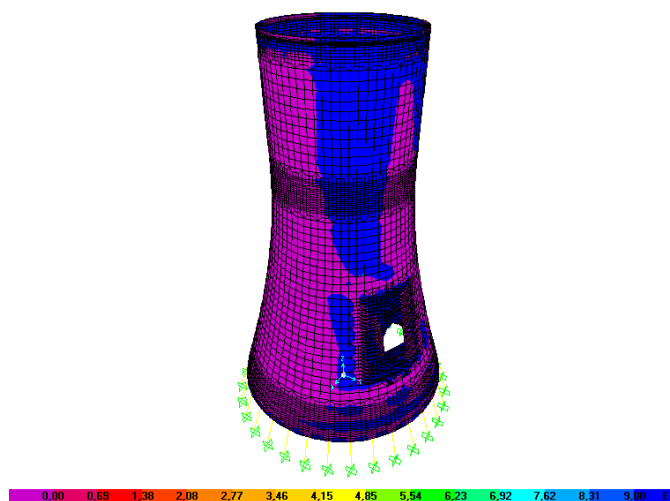
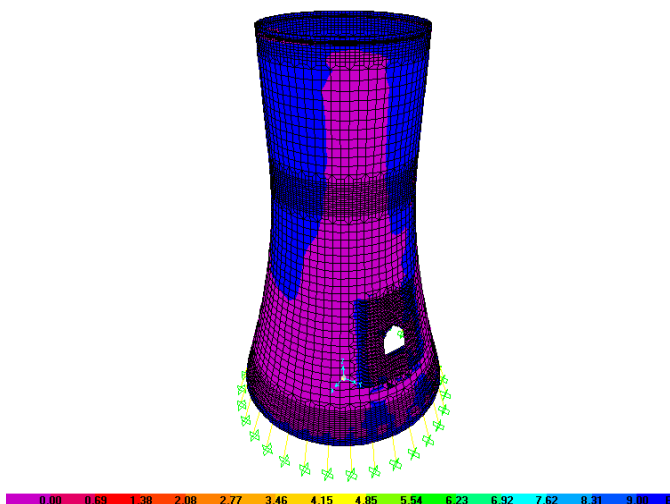
Po VGB-R 610 e, 2010 edition pri MSU za običajne hladilne stolpe kontrola napetosti ter deformacij nista bistveni. Potrebno pa je preveriti dolžine razpok. Zahteve glede dolžine razpok so podane v preglednici 6-5.



Slika 7-12: Pomiki pri kombinaciji lastne teže in vetra

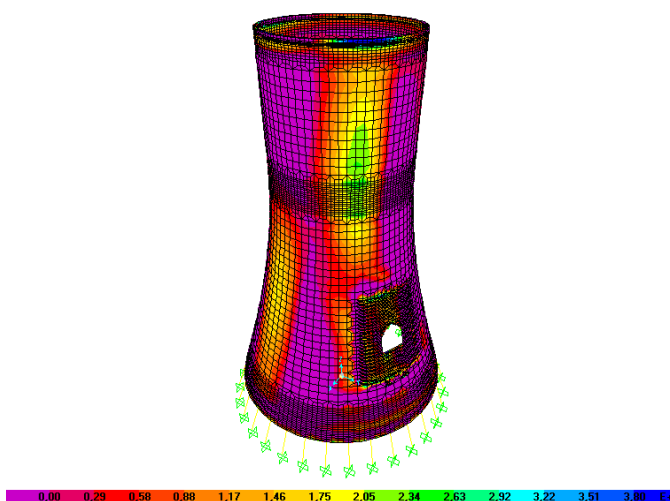
Razpoke se v betonu lahko pojavijo na mestih, kjer se v betonu pojavi nateg. Napetosti je potrebno kontrolirati po celotnem betonskem prerezu oz. na zunanji in notranji površini lupine. Potrebno je narediti obtežno kombinacijo, podano v izrazu (6-7), kjer je lastna teža pomnožena z delnim varnostnim faktorjem  $\gamma_G = 1,0$ , za srk je upoštevana navidezno stalna vrednost  $\Psi_2 = 0$ , zunanji pritisk vetra pa se upošteva s pogosto vrednostjo  $\Psi_1 = 0,5$ .

Na slikah 7-13 in 7-14 so podane napetosti na notranji in zunanji površini lupine. Vrednosti obarvane z vijolično so negativne, vrednosti obarvane z modro pa pozitivne. Mesta, kjer je  $\sigma_{\max}$  pozitivna - zgornji del lupine, spodnji rob lupine ter lupina v okolici odprtine, so potencialna mesta za nastanek razpok, potrebno pa je preveriti ali napetosti presežejo karakteristično natezno trdnost betona.

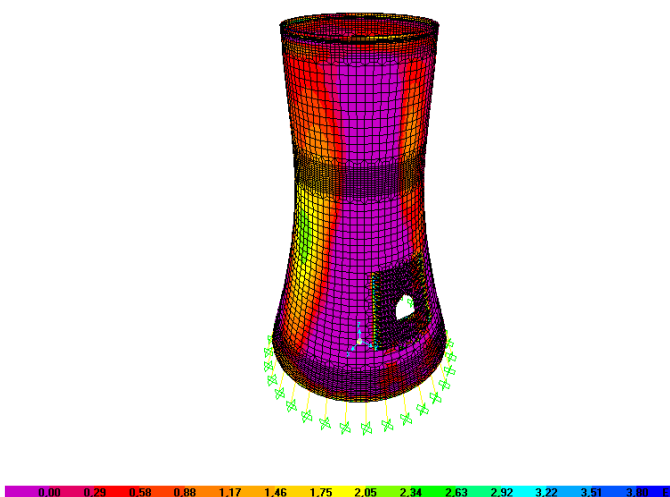
Slika 7-13:  $\sigma_{\max}$  na zunanji površini lupineSlika 7-14:  $\sigma_{\max}$  na notranji površini lupine

Karakteristična natezna trdnost je podana v poglavju 4.2.1 in za izbran material C35/45 znaša  $f_{ctm} = 3,8\text{MN/m}^2$ . Na slikah 7-15 ter 7-16 so vrednosti, ki presegajo karakteristično natezno trdnost obarvane z modro, vijolična barva pa predstavlja mesta, kjer so napetosti negativne. Na zunanji površini lupine se mesta, kjer je presežena karakteristična natezna trdnost, pojavijo samo na zgornjem robu lupine, povsod drugje pa ne. Na notranji površini lupine nikjer ni presežena karakteristična natezna trdnost.

Razpoke se torej lahko pojavijo le na zunanji površini lupine na zgornjem robu.



Slika 7-15:  $\sigma_{\max}$  na zunanji površini lupine, meja  $f_{ctm}$



Slika 7-16:  $\sigma_{\max}$  na notranji površini lupine, meja  $f_{ctm}$

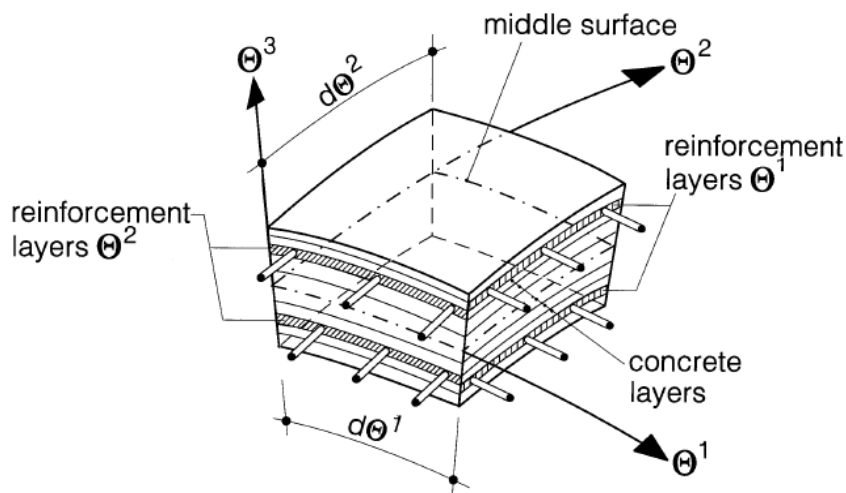
## 7.6 Armatura

Določitev armature je narejena s programom SAP2000, s pomočjo linearne statične analize. V programu je potrebno določiti položaj armature, v našem primeru na notranji in zunanji strani lupine v dveh smereh. Določi se tudi krovní sloj, ki je bil podan v skladu z zahtevani podanimi v preglednici 4-4. Program nato s funkcijo "Concrete design" poda armaturo v obliki barvnih diagramov.

V preglednicah 7-27 ter 7-28 je podana armatura na zunanji in notranji strani lupine v obodni in meridionalni smeri. Pri tem so vrednosti armature na neki višini določene kot maksimalna izračunana vrednost armature na tej višini.

Preverjena je tudi stopnja minimalne armature za meridionalno in obodno smer ter za vpliv interference, glede na enačbe (6-8), (6-9) ter (6-12).

V poglavju 6.7.2 je podana tudi zahteva, da mora biti količina armature na zunanji in notranji strani lupine čim bolj podobna. V preglednici 7-27 in 7-28 so podane izračunane vrednosti potrebne količine armature na notranji in zunanji strani lupine, ki pa se med seboj razlikujejo. Da pa bi zadostili tudi pogoju podobnosti mrež na zunanji in notranji strani, bi bilo potrebno še povečati količino armature.



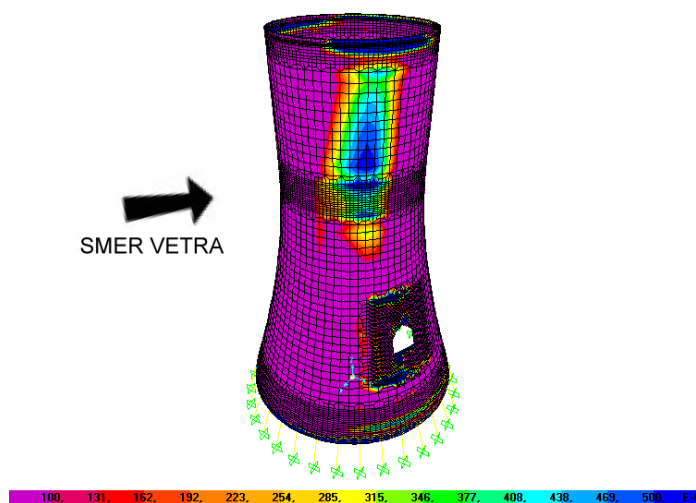
Slika 7-17: Armatura  
(Gould, P. L., Krätzig, W. B. 1999, str 24)

### 7.6.1 Armatura v obročni smeri

Slika 7-18 prikazuje količino obročne armature na zunanji strani lupine. Pri tem so vrednosti, ki so manjše od  $1\text{cm}^2/\text{m}$  označene z vijolično, vrednosti večje kot  $5\text{cm}^2/\text{m}$  pa z modro barvo. Vrednosti podane v preglednici 7-27, so maksimalne vrednosti določene na izbrani višini lupine.

Primerjava z notranjimi silami pokaže, da se največje vrednosti obročne armature na zunanji strani pojavijo na mestih, kjer so vrednosti notranje sile  $F_{11}$  zaradi vetra pozitivne. Največje količine armature so tako na zgornjem delu lupine levo in desno od smeri delovanja vetra ter na spodnjem robu.

Primerjava s pomiki pokaže, da se na mestih, kjer je potrebna obročna armatura na zunanji strani, pojavijo nategi na zunanji strani.

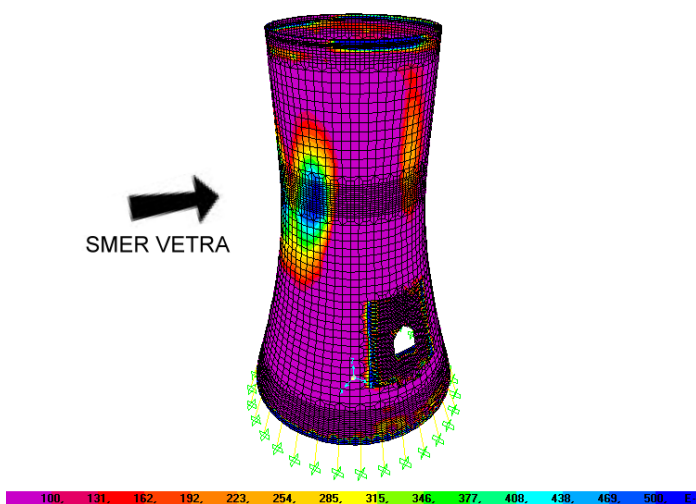


Slika 7-18: Obročna armatura na zunanji strani lupine

Slika 7-19 prikazuje količino obročne armature na notranji strani lupine. Pri tem so vrednosti, ki so manjše od  $1\text{cm}^2/\text{m}$  označene z vijolično, vrednosti večje kot  $5\text{cm}^2/\text{m}$  pa z modro barvo. Vrednosti podane v preglednici 7-27, so maksimalne vrednosti določene na izbrani višini lupine.

Največje vrednosti armature se pojavijo na srednjem delu lupine točno v smeri delovanja vetra. Večje vrednosti armature se pojavijo še zadaj na straneh lupine. Primerjava z notranjimi silami F11 zaradi vetra pokaže, da so tam vrednosti negativne.

Primerjava s pomiki pokaže, da so tam veliki pomiki, pojavijo pa se nategi na notranji strani lupine.



Slika 7-19: Obročna armatura na notranji strani lupine

V preglednici 7-27 so podane vrednosti armature na notranji in zunanji strani lupine, ter stopnja minimalne armature v celotnem prerezu. S sivo barvo je označena količina potrebne armature.

Minimalna armatura v obodni smeri je določena z zahtevo izraženo v enačbi (6-9), kjer je minimalna armatura na zgornji polovici enaka 0,4% betonskega prereza, na spodnji polovici pa 0,3% betonskega prereza.

Zaradi interference je potrebno preveriti še povečanje minimalne obročne armature, na spodnji polovici lupine, kot je podano v izrazu (6-12).

Preglednica 7-26: Podatki za izračun povečanja minimalne obročne armature zaradi interference

z [m]	{0, 60} *60 = 65m nad spodnjim nivojem terena
a/d <sub>m</sub>	1,40681
a <sub>1</sub> /d <sub>m</sub>	4,4
ρ <sub>R</sub> [%]	0,4
z [m]	{60, $\frac{162}{2} = 81$ }
a/d <sub>m</sub>	1,13107
a <sub>1</sub> /d <sub>m</sub>	3,1
ρ <sub>R</sub> [%]	0,366

$$\rho_R = 0,1 \left( 3 + \frac{(4,4 - 1,40681)}{3} \right) \% = 0,3998\%$$

$$\rho_R = 0,1 \left( 3 + \frac{(3,1 - 1,13107)}{3} \right) \% = 0,3656\%$$

Zaradi interference je na spodnjem delu lupine potrebno povečati minimalno količino armature za 0,1% (lupina med višino 60m in 81m) ter za 0,066% (lupina pod 60m). Količina armature, ki je potrebna zaradi interference je podana v preglednici 7-27.



Preglednica 7-27: Armatura v obodni smeri

Višina stolpa [m]	Povprečna debelina [mm]	Povprečen polmer [m]	Ac [m <sup>2</sup> ]	Obseg [m]	Ac/obseg Ac/m [m <sup>2</sup> /m]	MIN ARM 0,4%Ac (zg) 0,3%Ac (sp) [cm <sup>2</sup> /m]	Int. faktor 0,4%Ac (sp)	SAP zunaj [cm <sup>2</sup> /m]	SAP znotraj [cm <sup>2</sup> /m]	SAP skupaj [cm <sup>2</sup> /m]
162										
161,225	338,25	29,58	62,51	184,8	0,338	13,53	13,53	26,11	18,31	44,42
160,838	319	29,56	58,93	184,73	0,319	12,76	12,76	22,35	14,4	36,75
160,625	309,075	29,55	57,08	184,68	0,309	12,36	12,36	20,56	11,54	32,1
160,45	302,825	29,54	55,92	184,67	0,303	12,11	12,11	19,19	12,1	31,29
160,232	297,5	29,53	54,93	184,63	0,297	11,90	11,90	17,17	10,8	27,97
160,013	292,5	29,52	53,99	184,57	0,293	11,70	11,70	15,33	9,28	24,61
159,576	285	29,5	52,58	184,48	0,285	11,40	11,40	13,69	8,12	21,81
158,702	270	29,46	49,75	184,28	0,27	10,80	10,80	10,74	5,74	16,48
157,829	250	29,41	46	183,99	0,25	10,00	10,00	6,29	3,65	9,94
156,955	230	29,36	42,26	183,73	0,23	9,20	9,20	3,38	2,85	6,23
156,081	210	29,31	38,54	183,52	0,21	8,40	8,40	1,91	5,1	7,01
155,207	190	29,29	34,85	183,41	0,19	7,60	7,60	2,31	4,63	6,94
152,778		29,28	33,01	183,42	0,18	7,20	7,20	5,24	1,3	6,54
149,704		29,24	32,96	183,14	0,18	7,20	7,20	4,77	1,46	6,23
146,63		29,14	32,85	182,51	0,18	7,20	7,20	4,36	1,46	5,82
143,556		29,04	32,74	181,88	0,18	7,20	7,20	4,61	1,58	6,19
140,482		28,94	32,63	181,26	0,18	7,20	7,20	4,7	1,79	6,49
137,408	180	28,84	32,52	180,64	0,18	7,20	7,20	4,72	1,96	6,68
		28,74	32,41	180,04	0,18	7,20	7,20	4,89	2,17	7,06

se nadaljuje...

... nadaljevanje Preglednice 7-27

134,334		28,65	32,3	179,44	0,18	7,20	7,20	4,99	2,36	7,35
131,26		28,56	32,19	178,85	0,18	7,20	7,20	5,06	2,43	7,49
128,186		28,47	32,09	178,29	0,18	7,20	7,20	5,22	3,18	8,4
125,112		28,38	31,99	177,75	0,18	7,20	7,20	5,38	3,9	9,28
122,038		28,3	31,9	177,25	0,18	7,20	7,20	5,38	4,53	9,91
118,964		28,23	31,83	176,81	0,18	7,20	7,20	6,21	4,84	11,05
115,89										
	180,625	28,19	31,89	176,57	0,181	7,23	7,23	5,9	5,07	10,97
115,122										
	181,875	28,18	32,1	176,49	0,182	7,28	7,28	5,62	5,13	10,75
114,353										
	183,125	28,17	32,31	176,42	0,183	7,33	7,33	5,16	5,14	10,3
113,585										
	184,375	28,16	32,52	176,36	0,184	7,37	7,37	4,83	5,14	9,97
112,816										
	185,625	28,15	32,73	176,31	0,186	7,43	7,43	4,57	5,13	9,7
112,048										
	186,875	28,15	32,94	176,28	0,187	7,48	7,48	4,4	5,11	9,51
111,279										
	188,125	28,15	33,16	176,25	0,188	7,52	7,52	4,27	5,09	9,36
110,511										
	189,375	28,14	33,38	176,24	0,189	7,57	7,57	4,15	5,08	9,23
109,742										
	191,25	28,15	33,71	176,25	0,191	7,65	7,65	4,15	5,32	9,47
108,974										
	193,75	28,15	34,15	176,27	0,194	7,75	7,75	4,09	5,31	9,4
108,206										
	196,25	28,16	34,6	176,3	0,196	7,85	7,85	4,06	5,36	9,42
107,437										
	198,75	28,17	35,05	176,35	0,199	7,95	7,95	4,11	5,39	9,5
106,669										
	201,25	28,18	35,5	176,42	0,201	8,05	8,05	4,34	5,42	9,76
105,901										
	203,75	28,19	35,96	176,5	0,204	8,15	8,15	4,56	5,88	10,44
105,132										
	206,25	28,21	36,42	176,6	0,206	8,25	8,25	4,87	5,52	10,39
104,364										
	208,75	28,23	36,89	176,72	0,209	8,35	8,35	5,49	5,67	11,16

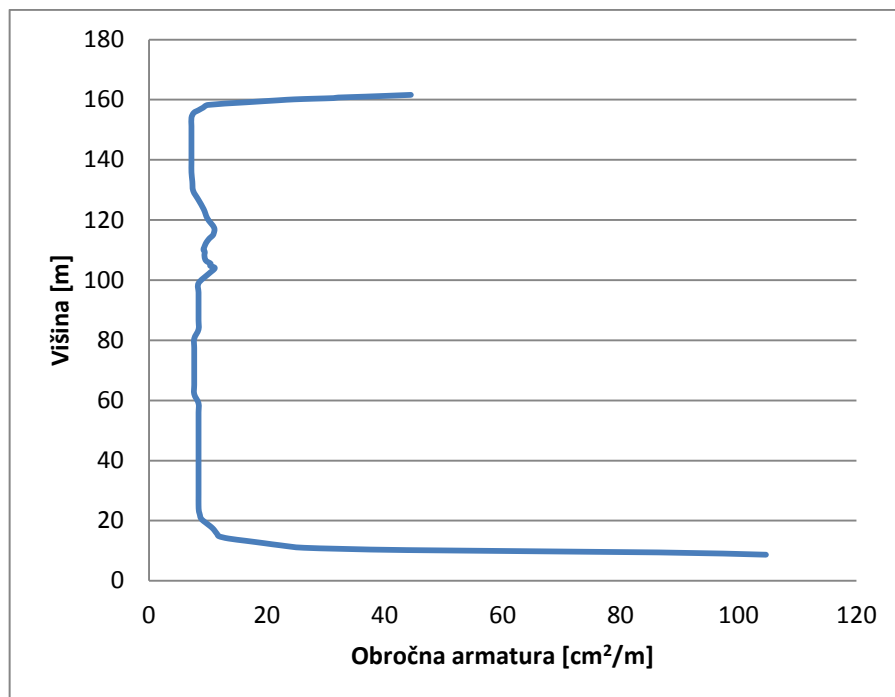
se nadaljuje...

... nadaljevanje Preglednice 7-27

103,595										
100,521		28,29	37,19	177,11	0,21	8,40	8,40	5,03	5,06	10,09
97,447		28,42	37,36	177,92	0,21	8,40	8,40	3,31	4,94	8,25
94,373		28,59	37,59	178,98	0,21	8,40	8,40	3,31	4,36	7,67
91,299		28,8	37,86	180,28	0,21	8,40	8,40	2,72	4,56	7,28
88,225		29,05	38,19	181,84	0,21	8,40	8,40	1,98	4,05	6,03
85,151		29,33	38,57	183,65	0,21	8,40	8,40	1,5	3,71	5,21
82,077		29,66	39	185,7	0,21	8,40	8,40	1,1	3,35	4,45
79,003		30,02	39,48	187,98	0,21	6,30	7,69	<1	3	
75,929		30,42	40	190,49	0,21	6,30	7,69	<1	2,62	
72,855		30,86	40,58	193,23	0,21	6,30	7,69	<1	1,84	
69,781		31,33	41,2	196,19	0,21	6,30	7,69	<1	1,36	
66,707		31,83	41,86	199,35	0,21	6,30	7,69	<1	<1	
63,633		32,37	42,57	202,72	0,21	6,30	7,69	<1	<1	
60,559		32,94	43,32	206,28	0,21	6,30	7,69	<1	<1	
57,485		33,53	44,11	210,03	0,21	6,30	8,40	<1	<1	
54,411		34,16	44,93	213,96	0,21	6,30	8,40	<1	<1	
51,337		34,81	45,79	218,05	0,21	6,30	8,40	<1	<1	
48,263		35,49	46,68	222,3	0,21	6,30	8,40	<1	<1	
45,189		36,19	47,61	226,71	0,21	6,30	8,40	<1	<1	
42,115		36,91	48,57	231,27	0,21	6,30	8,40	<1	<1	
39,042		37,66	49,55	235,96	0,21	6,30	8,40	<1	<1	
35,968		38,43	50,56	240,77	0,21	6,30	8,40	<1	<1	
32,894		39,21	51,6	245,72	0,21	6,30	8,40	<1	<1	
29,82		40,02	52,66	250,78	0,21	6,30	8,40	<1	<1	
26,746		40,84	53,75	255,95	0,21	6,30	8,40	<1	<1	
		41,68	54,86	261,23	0,21	6,30	8,40	2,19	<1	
23,672										
	211,25	42,21	55,89	264,56	0,211	6,34	8,45	2,19	1,47	3,66
22,9035										
	213,75	42,43	56,84	265,9	0,214	6,41	8,55	1,39	1,59	2,98
22,135										
	216,25	42,64	57,79	267,25	0,216	6,49	8,65	1,1	1,59	2,69
21,3665										
	218,75	42,86	58,76	268,61	0,219	6,56	8,75	<1	1,3	
20,598										
	226,25	43,08	61,08	269,95	0,226	6,79	9,05	<1	<1	
19,8295										
	238,75	43,3	64,77	271,28	0,239	7,16	9,55	<1	<1	

se nadaljuje...





Grafikon 7-1: Količina obročne armature po višini

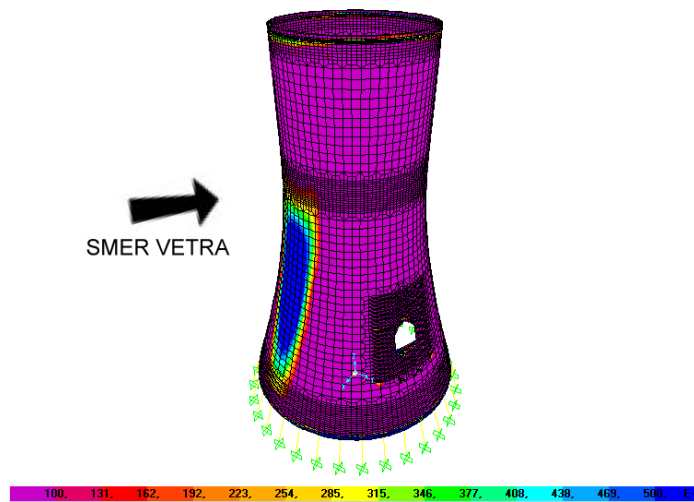
## 7.6.2 Armatura v meridionalni smeri

Slika 7-20 prikazuje količino meridionalne armature na zunanji strani lupine. Pri tem so vrednosti, ki so manjše od  $1\text{cm}^2/\text{m}$  označene z vijolično, vrednosti večje kot  $5\text{cm}^2/\text{m}$  pa z modro barvo. Vrednosti podane v preglednici 7-28, so maksimalne vrednosti določene na izbrani višini lupine.

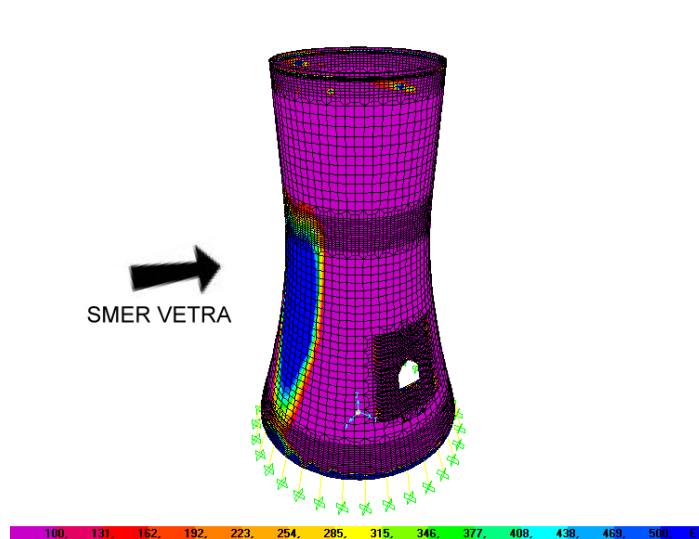
Slika 7-21 prikazuje količino meridionalne armature na notranji strani lupine. Pri tem so vrednosti, ki so manjše od  $1\text{cm}^2/\text{m}$  označene z vijolično, vrednosti večje kot  $5\text{cm}^2/\text{m}$  pa z modro barvo. Vrednosti podane v preglednici 7-28, so maksimalne vrednosti določene na izbrani višini lupine.

Primerjava z notranjimi silami pokaže, da se največje vrednosti meridionalne armature na zunanji in notranji strani pojavijo na mestih, kjer so vrednosti notranje sile F22 zaradi vetra pozitivne. Največje količine meridionalne armature so tako na spodnjem delu lupine v smeri delovanja vetra.

Primerjava s pomiki pokaže, da so na spodnjem delu lupine v smeri delovanja vetra, kjer se pojavijo tudi največje vrednosti meridionalne armature na zunanji in notranji strani lupine, pomiki največji.



Slika 7-20: Meridionalna armatura na zunanji strani lupine



Slika 7-21: Meridionalna armatura na notranji strani lupine

Preglednica 7-28: Armatura v meridionalni smeri

Višina stolpa [m]	Povprečna debelina [mm]	Povprečen polmer [m]	Višina h KE [m]	Ac [m <sup>2</sup> ]	Ac/h Ac/m [m <sup>2</sup> /m]	MIN ARM 0,3%Ac 0,4%Ac [cm <sup>2</sup> /m]	SAP zunaj [cm <sup>2</sup> /m]	SAP znotraj [cm <sup>2</sup> /m]	SAP skupaj [cm <sup>2</sup> /m]
162									
161,225	338,25	29,58	0,775	0,26	0,338	10,15	2,19	2,35	4,54
160,838	319	29,56	0,387	0,12	0,319	9,57	4,67	5,30	9,97

se nadaljuje...

...nadaljevanje Preglednice 7-28

160,625	309,075	29,55	0,213	0,07	0,309	9,27	8,13	5,30	13,43
160,45	302,825	29,54	0,175	0,05	0,303	9,08	8,13	2,45	10,58
160,232	297,5	29,53	0,219	0,07	0,297	8,92	4,79	<1	4,79
160,013	292,5	29,52	0,218	0,06	0,292	8,77	3,85	<1	3,85
159,576	285	29,50	0,437	0,12	0,285	8,55	3,72	<1	3,72
158,702	270	29,46	0,874	0,24	0,270	8,10	3,72	<1	3,72
157,829	250	29,41	0,874	0,22	0,250	7,50	3,10	<1	3,10
156,955	230	29,36	0,874	0,20	0,230	6,90	1,76	3,25	5,01
156,081	210	29,31	0,874	0,18	0,210	6,30	1,97	3,25	5,22
155,207	190	29,29	0,874	0,17	0,190	5,70	1,86	2,32	4,18
152,778		29,28	2,429	0,44	0,180	5,40	<1	<1	
149,704		29,24	3,074	0,55	0,180	5,40	<1	<1	
146,63		29,14	3,074	0,55	0,180	5,40	<1	<1	
143,556		29,04	3,074	0,55	0,180	5,40	<1	<1	
140,482		28,94	3,074	0,55	0,180	5,40	<1	<1	
137,408		28,84	3,074	0,55	0,180	5,40	<1	<1	
134,334		28,74	3,074	0,55	0,180	5,40	<1	<1	
131,26		28,65	3,074	0,55	0,180	5,40	<1	<1	
128,186		28,56	3,074	0,55	0,180	5,40	<1	<1	
125,112		28,47	3,074	0,55	0,180	5,40	<1	<1	
122,038		28,38	3,074	0,55	0,180	5,40	<1	<1	
118,964		28,30	3,074	0,55	0,180	5,40	<1	1,28	1,28
115,89		28,23	3,074	0,55	0,180	5,40	1,29	2,41	3,70
115,122	180								
114,353	180,625	28,19	0,768	0,14	0,181	5,42	1,53	2,22	3,75
	181,875	28,18	0,769	0,14	0,182	5,46	1,65	2,59	4,24

se nadaljuje...

...nadaljevanje Preglednice 7-28

113,585	183,125	28,17	0,769	0,14	0,183	5,49	1,79	2,86	4,65
112,816	184,375	28,16	0,769	0,14	0,184	5,53	1,92	3,14	5,06
112,048	185,625	28,15	0,768	0,14	0,186	5,57	2,04	3,38	5,42
111,279	186,875	28,15	0,769	0,14	0,187	5,61	2,17	3,64	5,81
110,511	188,125	28,15	0,769	0,14	0,188	5,64	2,31	3,87	6,18
109,742	189,375	28,14	0,769	0,15	0,189	5,68	2,42	4,10	6,52
108,974	191,25	28,15	0,768	0,15	0,191	5,74	2,54	4,31	6,85
108,206	193,75	28,15	0,768	0,15	0,194	5,81	2,64	4,52	7,16
107,437	196,25	28,16	0,768	0,15	0,196	5,89	2,76	4,72	7,48
106,669	198,75	28,17	0,768	0,15	0,199	5,96	2,86	4,92	7,78
105,901	201,25	28,18	0,769	0,15	0,201	6,04	2,97	5,11	8,08
105,132	203,75	28,19	0,769	0,16	0,204	6,11	3,12	5,35	8,47
104,364	206,25	28,21	0,769	0,16	0,206	6,19	3,13	5,67	8,80
103,595	208,75	28,23	0,768	0,16	0,209	6,26	3,32	6,18	9,50
100,521		28,29	3,074	0,65	0,210	6,30	3,77	6,61	10,38
97,447		28,42	3,074	0,65	0,210	6,30	4,10	7,18	11,28
94,373		28,59	3,074	0,65	0,210	6,30	4,85	7,75	12,60
91,299		28,80	3,074	0,65	0,210	6,30	5,49	8,21	13,70
88,225		29,05	3,074	0,65	0,210	6,30	6,05	8,57	14,62
85,151		29,33	3,074	0,65	0,210	6,30	6,53	8,82	15,35
82,077		29,66	3,074	0,65	0,210	6,30	6,95	9,04	15,99
79,003		30,02	3,074	0,65	0,210	6,30	7,29	9,18	16,47
75,929	210	30,42	3,074	0,65	0,210	6,30	7,58	9,19	16,77

se nadaljuje...



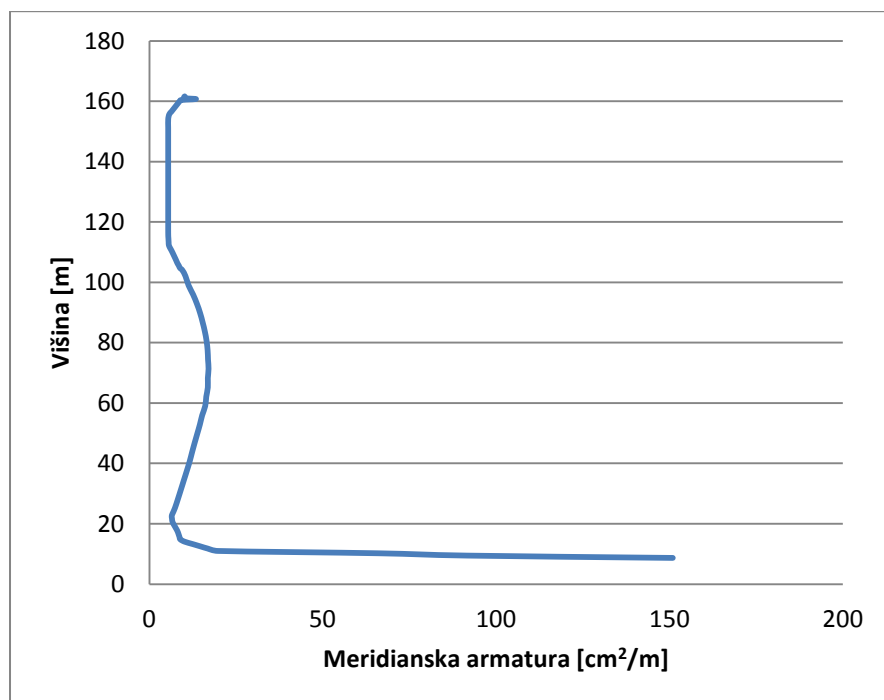
... nadaljevanje Preglednice 7-28

72,855		30,86	3,074	0,65	0,210	6,30	7,70	9,19	16,89	
69,781		31,33	3,074	0,65	0,210	6,30	7,87	9,17	17,04	
66,707		31,83	3,074	0,65	0,210	6,30	7,87	8,96	16,83	
63,633		32,37	3,074	0,65	0,210	6,30	7,87	8,96	16,83	
60,559		32,94	3,074	0,65	0,210	6,30	7,95	8,43	16,38	
57,485		33,53	3,074	0,65	0,210	6,30	7,74	8,34	16,08	
54,411		34,16	3,074	0,65	0,210	6,30	7,51	7,69	15,20	
51,337		34,81	3,074	0,65	0,210	6,30	7,24	7,30	14,54	
48,263		35,49	3,074	0,65	0,210	6,30	6,91	6,87	13,78	
45,189		36,19	3,074	0,65	0,210	6,30	6,57	6,44	13,01	
42,115		36,91	3,074	0,65	0,210	6,30	6,16	6,12	12,28	
39,042		37,66	3,073	0,65	0,210	6,30	5,88	5,70	11,58	
35,968		38,43	3,074	0,65	0,210	6,30	5,50	5,26	10,76	
32,894		39,21	3,074	0,65	0,210	6,30	5,07	4,85	9,92	
29,82		40,02	3,074	0,65	0,210	6,30	4,66	4,42	9,08	
26,746		40,84	3,074	0,65	0,210	6,30	4,23	4,00	8,23	
		41,68	3,074	0,65	0,210	6,30	3,98	3,37	7,35	
23,672										
	211,25	42,21	0,769	0,16	0,211	6,34	3,25	3,37	6,62	
22,9035										
	213,75	42,43	0,769	0,16	0,214	6,41	3,25	3,01	6,26	
22,135										
	216,25	42,64	0,769	0,17	0,216	6,49	3,12	2,82	5,94	
21,3665										
	218,75	42,86	0,769	0,17	0,219	6,56	3,12	2,59	5,71	
20,598										
	226,25	43,08	0,769	0,17	0,226	6,79	3,12	2,39	5,51	
19,8295										
	238,75	43,30	0,769	0,18	0,239	7,16	3,12	2,18	5,30	
19,061										
	251,25	43,52	0,769	0,19	0,251	7,54	3,06	1,99	5,05	
18,2925										
	263,75	43,74	0,769	0,20	0,264	7,91	2,91	2,09	5,00	
17,524										
	273,75	43,96	0,769	0,21	0,274	8,21	2,57	2,38	4,95	
16,7555										
	281,25	44,18	0,769	0,22	0,281	8,44	2,00	3,07	5,07	
15,987		288,75	44,40	0,769	0,22	0,289	8,66	1,18	3,92	5,10

se nadaljuje...

...nadaljevanje Preglednice 7-28

15,2185									
	296,25	44,63	0,769	0,23	0,296	8,89	<1	4,81	
14,45									
	337,5	44,85	0,769	0,26	0,338	10,13	<1	5,05	
13,6815									
	412,5	45,07	0,769	0,32	0,413	12,38	<1	5,26	
12,913									
	487,5	45,30	0,769	0,37	0,487	14,62	<1	5,51	
12,1445									
	562,5	45,53	0,769	0,43	0,563	16,88	<1	10,92	
11,376									
	657,5	45,76	0,769	0,51	0,657	19,72	2,42	13,12	15,54
10,6075									
	772,5	45,98	0,769	0,59	0,773	23,18	10,82	55,09	65,91
9,839									
	887,5	46,21	0,769	0,68	0,888	26,63	36,59	55,09	91,68
9,0705									
	1002,5	46,44	0,769	0,77	1,003	30,07	79,71	71,23	150,94
8,302									



Grafikon 7-2: Količina meridianske armature po višini

### 7.6.3 Primerjava količine armature

V poglavju 7.6 je podana količina armature določene na podlagi izračunov namenjenih za to diplomsko nalogo. Pri tem je upoštevana obtežna kombinacija podana v izrazu (6-6) ter v poglavju 7.3 določena najbolj neugodna smer delovanja vetra.

V nadaljevanju je narejena primerjava s količino armature določene v projektni dokumentaciji. V projektni dokumentaciji je narejenih 19 različnih obtežnih kombinacij, kjer je kot obtežba poleg vetra in lastne teže podan še potres, temperaturne spremembe (pozimi, poleti, med delovanjem) in krčenje (NDCT ŠOŠTANJ unit 6, 2010, str. 266 in 271).

Za obročno armaturo so se kot merodajne izkazale naslednje kombinacije: 18, 7, 18, 11, 12 ter 6, ki so razvrščene po višini od spodaj navzgor. Na največjem delu lupine je bila merodajna obtežna kombinacija 11.

Za meridiansko armaturo so se kot merodajne izkazale kombinacije 11, 9, 3, 1, 3, 1, 9, 11, 5, 6, 8 ter 12. Na spodnjem delu je bila na večjem delu merodajna kombinacija 3, na zgornjem pa kombinacija 9.

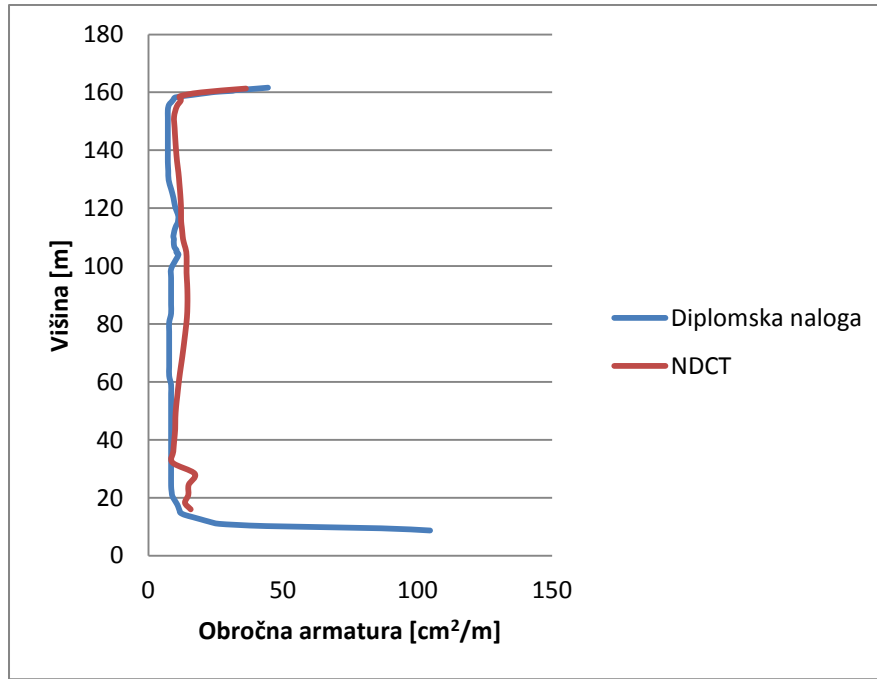
Preglednica 7-29: Obtežne kombinacije NDCT  
(NDCT ŠOŠTANJ unit 6, 2010, str. 266)

Obtežna kombinacija	Lastna teža	Veter	Temperatura med obratovanjem	Temperatura poleti	Temperatura pozimi	Skrčki	Potres
1	1	1,6	0	0	0	0	0
3	1	1,6	0	0	0	1,03	0
5	1	0,96	1,03	0	0	0	0
6	1,35	0,96	1,03	0	0	0	0
7	1	0,96	1,03	0	0	1,03	0
8	1,35	0,96	1,03	0	0	1,03	0
9	1	0,96	0	1,03	0	0	0
11	1	0,96	0	1,03	0	1,03	0
12	1,35	0,96	0	1,03	0	1,03	0
18	1	0	1,03	0	0	0	1

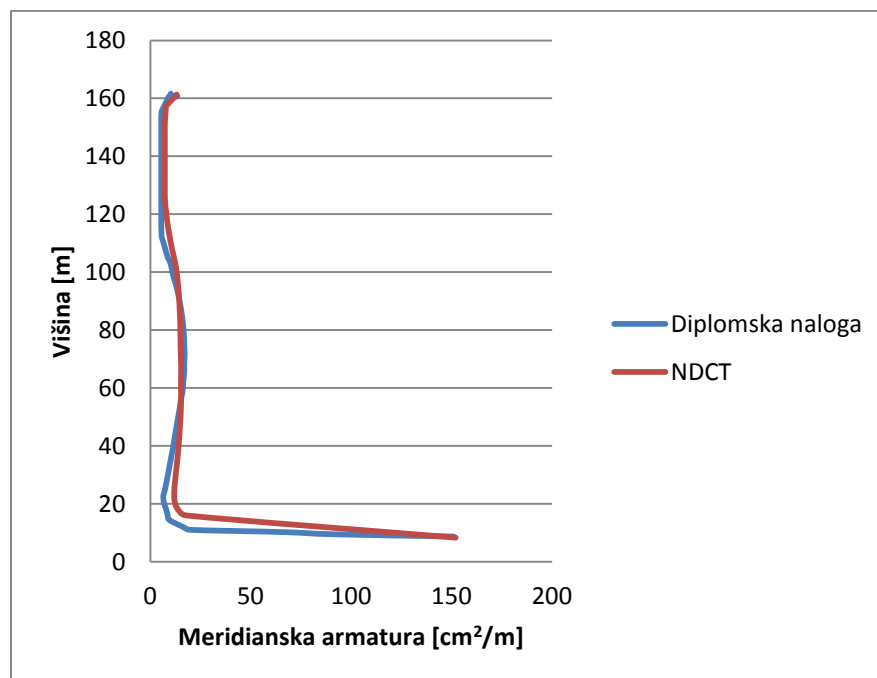
Primerjava na grafikonu 7-4 pokaže, da se meridianska armatura po celotni višini precej ujema. V tej diplomski nalogi je kot prevladujoča obtežba izbran veter, vidimo pa lahko, da je pri obtežni kombinaciji 3, ki se pojavi predvsem na spodnjem delu lupine, prevladujoča obtežba ravno tako veter. Pri obtežni kombinaciji 9, ki prevladuje na zgornjem delu lupine, veter sicer ni prevladujoča obtežba, vendar pri količini armature ne pride do bistvene razlike. Iz tega lahko sklepamo, da temperatura in skrčki, ki se pojavijo tako v kombinaciji 3 in 9, v meridionalni smeri nimajo bistvenega vpliva na količino armature.

Iz grafikona 7-3 je razvidno, da do večjih razlik pride pri količini armature v obročni smeri. Tako kot pri armaturi v meridionalni smeri, je bila kot prevladujoča obtežba v tej diplomski nalogi izbran veter. Iz projektne dokumentacije pa sledi, da je po večini lupine merodajna

obtežba kombinacija 11, kjer se poleg vetra, ki ni prevladujoča obtežba, kot obtežba upošteva še temperatura in skrčki. Iz tega lahko sklepamo, da imata temperatura in skrčki večji vpliv v obročni smeri.



Grafikon 7-3: Primerjava obročne armature



Grafikon 7-4: Primerjava meridianske armature

## 8 ZAKLJUČEK

V diplomski nalogi je obravnavan hladilni stolp v Šoštanju. Kot glavna obtežba je izbrana obtežba vetra, ki je določena glede na psmernico VGB-R 610 e, 2010 edition ter standard SIST EN 1991-1-4:2005.

Obtežba vetra po VGB-R 610 e, 2010 edition je podana kot ekvivalentna statična obtežba, ki deluje na zunanjo in notranjo površino lupine. Pritisk na zunanjo površino lupine sestavljajo 4 faktorji, ki zajemajo hrapavost površine in porazdelitev pritiska vetra v obodni smeri (koeficient zunanjega obročnega pritiska), dinamičen vpliv (dinamični koeficient), vpliv sosednjih stavb (interferenčni koeficient) ter pritisk vetra. Pritisk na notranjo površino lupine je konstanten po obodu, v meridionalni smeri pa se spremeni le zaradi interference.

Račun obtežbe po SIST EN 1991-1-4:2005 je precej bolj kompleksen in poleg zgoraj naštetih vplivov upošteva še hrapavost terena, hribovitost, turbulenco, smer vetra, letni čas....

Primerjava obtežb pokaže, da je obtežba dobljena s SIST EN 1991-1-4:2005 manjša. Za nadaljnji račun je uporabljena obtežba po VGB-R 610 e, 2010 edition.

Narejena je primerjava vpliva različnih mrež ter različnih materialov na rezultate. Boljši material za 2,5% - 3% poveča uklonski faktor, boljša mreža pa zniža uklonski faktor. Pri tem so si uklonske oblike med sabo podobne, pride lahko le do manjše rotacije.

Predpostavka, da luknja na obnašanje lupine, zaradi oddebelitve lupine v okolici luknje, nima bistvenega vpliva, se zkaže za resnično. Pri uklonu se pojavljajo podobne uklonske oblike, uklonski faktorji pa se med sabo razlikujejo do 4,7%.

Pri preverjanju uklonske stabilnosti je narejenih 64 obtežnih primerov, kjer veter deluje v različnih smereh. Pri tem je polovica primerov takšnih, da veter deluje nad stebri, polovica pa da deluje na sredini razponov med stebri. Določena je najbolj neugodna smer s katero so nato določene notranje sile in količina armature.

Izkaže se, da v večini lupine velja membransko napetostno stanje. Povsod, razen na spodnjem in zgornjem robu ter v okolici lupine, so momenti zanemarljivo majhni.

Določena je količina obročne in meridionalne armature za obtežno kombinacijo, kjer je prevladujoča obtežba veter. Narejena je tudi primerjava s količinami armature iz projektne dokumentacije, kjer so poleg vetra upošteevane še druge obtežbe. Armaturi iz diplomske naloge in projektne dokumentacije v meridionalni smeri se skoraj ujemata. Veter ima v tej smeri velik pomen za količino armature.

## VIRI IN LITERATURA

### Uporabljeni viri

Beg, D. (ur), Pogačnik, A. (ur). 2009. Priročnik za projektiranje gradbenih konstrukcij po Evrokod standardih. Ljubljana, Inženirska zbornica Slovenije: 1077 str.

Brank, B. 2012. Hladilni stolpi: analiza obnašanja konstrukcije. Osebna komunikacija. (2. 10. 2012.)

*NDCT ŠOŠTANJ unit 6:*

Brank, B. 2012. Civil Permit Design for the Construction of the Natural Draft Cooling Tower Šoštanj Unit 6 Slovenia. 2010. Osebna komunikacija. (2. 10. 2012.)

Gould, P. L., Krätzig, W. B. 1999. Cooling Tower Structures. Structural Engineering Handbook. Boca Raton, CRC Press LLC: 35 str.

Giosan, I., Eng, P. Vortex Shedding Introduced Loads on Free Standing Structures. Structural Vortex Shedding Response Estimation Methodology and Finite Element Simulation: 42 str.

Mendis, P., Ngo, t., Haritos, N., Hira, A., Samali, B., Cheung, J. 2007. Wind Loading on Tall Buildings. EJSE Special Issue: Loading on Structures: 14 str.

SAP2000 Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures. Basic Analysis Reference. 1998. Computers and Structures Inc. Berkeley, California: 96 str.

*VGB-R 610 e, 2010 edition:*

Structural Design of Cooling Towers, Guideline on Structural Design, Calculation, Engineering and Construction of Cooling Towers, VGB-R 610 e, 2010 edition. 2010. VGB PowerTech: 59 str.

### Ostali viri

Busch, D., Harte, R., Krätzig, W. B., Montag, U. 2002. New natural draft cooling tower of 200m of height. Engineering Structures 24 (2002): 1509–1521.

Concrete Shell Reinforcement Design. Technical Note. Design Information. 2006. Computers and Structures Inc. Berkeley, California: 9 str.

CSI Analysis Reference Manual for SAP2000, ETABS and SAFE. 2007. Computers and Structures Inc. Berkeley, California: 470 str.

Rajar, R. 1997. Hidromehanika. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 235 str.

SAP2000 Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures. Concrete design manual. 2000. Computers and Structures Inc. Berkeley, California: 198 str.

### Uporabljeni internetni viri

*Fem Unicamp. Flow around a cylinder in steady current. 2013:*

[http://www.fem.unicamp.br/~phoenics/SITE\\_PHOENICS/AULAS/GRADE%20&%20MALHA/wake%20of%20bodies%206248\\_chap01.pdf](http://www.fem.unicamp.br/~phoenics/SITE_PHOENICS/AULAS/GRADE%20&%20MALHA/wake%20of%20bodies%206248_chap01.pdf) (Pridobljeno 15.1.2013.)

*KLM Technology Group. Engineering design Guidelines. 2013:*

<http://kolmetz.com/pdf/EDG/ENGINEERING%20DESIGN%20GUIDELINES%20-%20Cooling%20Towers%20-%20Rev01.pdf> (Pridobljeno 3.2.2013.)

*Hyper1. 2013:*

<http://www.math.umn.edu/~rogness/quadratics/hyper1.shtml> (Pridobljeno 7.3.2013.)

*SAP2000. 2012:*

<http://www.csiberkeley.com/sap2000> (Pridobljeno 5.12.2012.)

*Skewer hyperboloid. 2013:*

<http://www.georgehart.com/skewers/skewer-hyperboloid.html> (Pridobljeno 7.3.2013.)

*Te Šoštanj. 2013:*

<http://www.te-sostanj.si/en/> (Pridobljeno 24.1.2013.)

*Vortex shedding. 2013:*

[http://en.wikipedia.org/wiki/Vortex\\_shedding](http://en.wikipedia.org/wiki/Vortex_shedding) (Pridobljeno 3.1.2013.)

### Ostali internetni viri

*Desastres. 2013:*

<http://desastres.usac.edu.gt/documentos/pdf/eng/doc12107/doc12107-1.pdf>  
(Pridobljeno 3.2.2013.)

*How to predict the start of vortex shedding. 2013:*

<http://www.brighthubengineering.com/fluid-mechanics-hydraulics/118359-how-to-predict-the-start-of-vortex-shedding/> (20.1.2013.)

*Iawe. Wind and tall buildings. 2013:*

<http://www.iawe.org/Proceedings/5EACWE/K01.pdf> (Pridobljeno 25.1.2013.)

*Termoelektrarna Šoštanj. 2013:*

[http://sl.wikipedia.org/wiki/Termoelektrarna\\_Šoštanj](http://sl.wikipedia.org/wiki/Termoelektrarna_Šoštanj) (Pridobljeno 24.1.2013.)

*Termoelektrarna Šoštanj blok 6. 2013:*

[http://sl.wikipedia.org/wiki/Termoelektrarna\\_Šoštanj\\_blok\\_6](http://sl.wikipedia.org/wiki/Termoelektrarna_Šoštanj_blok_6) (Pridobljeno 24.1.2013.)

## **Standardi**

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