

STATIČKI PRORAČUN KUPOLE POSEBNE GEOMETRIJE

Autori: Ivan Volarić, struč. spec. ing. aedif.

Zagreb, Siječanj 2017.



TEHNIČKI OPIS KONSTRUKCIJE

OPIS PROJEKTNOG ZADATKA

Projektni zadatak prema kojem je izrađen projekt sadrži nekoliko bitnih dijelova. Izabrani materijal je lamelirano lijepljeno drvo, maksimalna visina objekta je 9,0 metara, raspon 23,0 metara, a lokacija za koju je projekt predviđen je Tuhelj (Hrvatska). Objekt kružnog tlocrta, ima bazensku namjenu a konstrukcija mora biti atraktivna.

DIMENZIJE OBJEKTA

Tlocrte dimenzije objekta određene su prema zadanim uvjetima te je promjer konstrukcije mjereno osno 22,11 metara. Visina objekta od kote zaravnatog terena je 8,77 metara.

POKROV

Projektirani pokrov objekta je staklo debljine 24 milimetra.

SEKUNDARNA KONSTRUKCIJA

Sekundarna konstrukcija tj. podrožnice ili međuelementi mogu se tako nazvati samo uvjetno, iz razloga što ravnopravno sudjeluju kod prijenosa opterećenja i stabilnosti konstrukcije. Podrožnice se nalaze između glavnih okvira na razmaku od cca. 3,20 metra, te su upuštene između okvira. Raspon podrožnica razlikuje se te ovisi u položaju u konstrukciji. Podružnice su projektirane od lameliranog drva GL32h dimenzija poprečnog presjeka 16 centimetara X 20 centimetara. Lamelirano lijepljeno drvo mora biti vlažnosti manje od 18 % kako bi imalo projektirana svojstva.

GLAVNA NOSIVA KONSTRUKCIJA

Glavnu nosivu konstrukciji čine lamelirani lukovi GL32h posebne geometrije dimenzija poprečnog presjek 20 centimetara X 50 centimetara. Lukovi su raspoređeni po opsegu kružnice sa razmakom 2,95 metara. Lamelirano lijepljeno drvo mora biti vlažnosti manje od 18 % kako bi imalo projektirana svojstva.



VJETROVNI SPREG

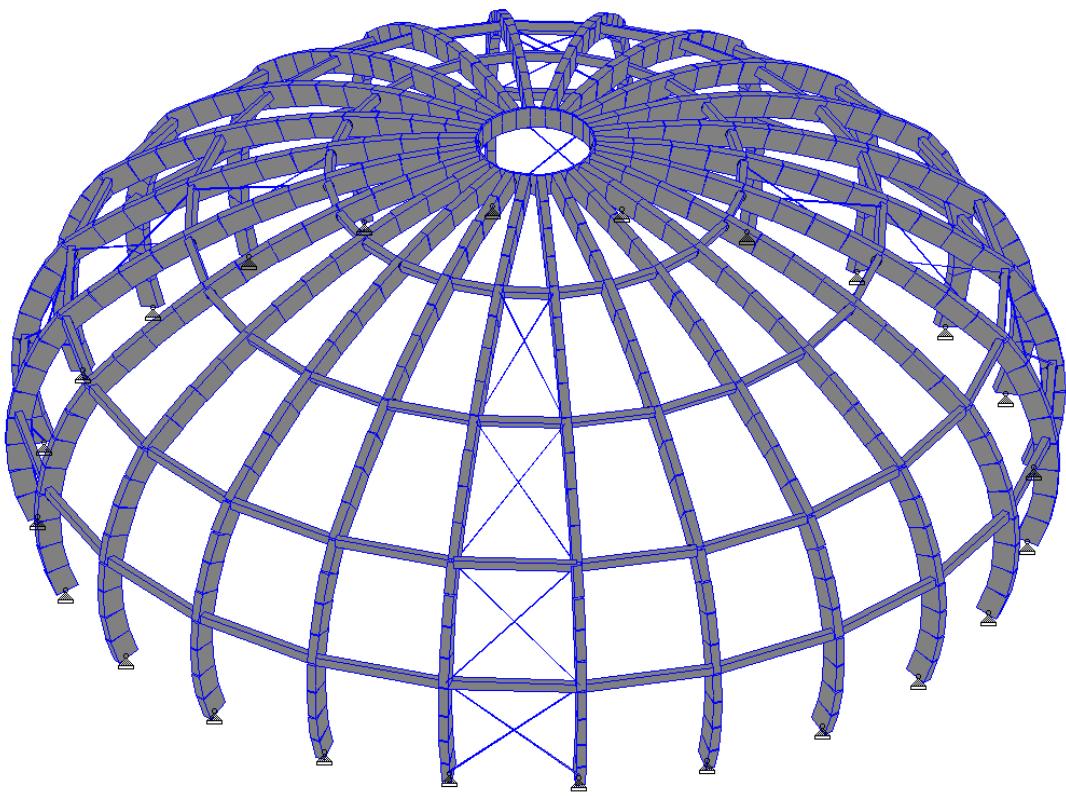
Vjetrovni spreg se nalazi između glavnih nosača, a na cijelom objektu postoje 4 vjetrovna sprega, koji su međusobno udaljeni 17,70 metara te tako stabiliziraju glavne nosače. Spregovi su kružnog poprečnog presjeka promjera 20 milimetara, a isti su pričvršćeni na glavni nosač pomoću čeličnih ploča.

ZAŠTITA KONSTRUKCIJE

Drvene elemente konstrukcije potrebno je prije montaže zaštiti od nametnika te utjecaja vlage. Drvo je materijala kod kojeg se nosivost smanjuje povećanjem vlažnosti, te elemente ne smijemo prije montaže položiti izravno na zemlju, beton, ili ih ostaviti nezaštićene na kiši. Prije montaže drvene elemente je potrebno premazati impregnacijom tipa Belinka Belles kako bi se zaštitili od nametnika, nakon toga napraviti dva premaza tankoslojnom lazurom tipa Belinka Belton, te na kraju jedan finalni premaz debeloslojnom lazurom tipa Belinka Beltop. Moguće je koristiti i premaze drugih proizvođača koji imaju jednakovrijedna svojstva. Čelični elementi i spajala moraju biti vruće pocinčana, te nisu potrebni naknadni premazi.



STATIČKI PRORAČUN KUPOLE POSEBNE GEOMETRIJE



Slika 1 Prikaz statickog modela kupole posebne geometrije

Analiza opterećenja

Stalno opterećenje

Staklo debljine 24mm [0.024 × 25] 0.60 kN/m²

Instalacije 0.10 kN/m²

Σ 0.70 kN/m²

Promjenjivo opterećenje

Snijeg

Lokacija objekta Tuhelj 168 metara nad morem



Formula za izračun:

$$s = \mu_i \times c_e \times c_t \times s_k$$

s_k =karakteristična vrijednost opterećenja snijega na tlo prema karti III zona

$$s_k = 1.25 \text{ kN/m}^2$$

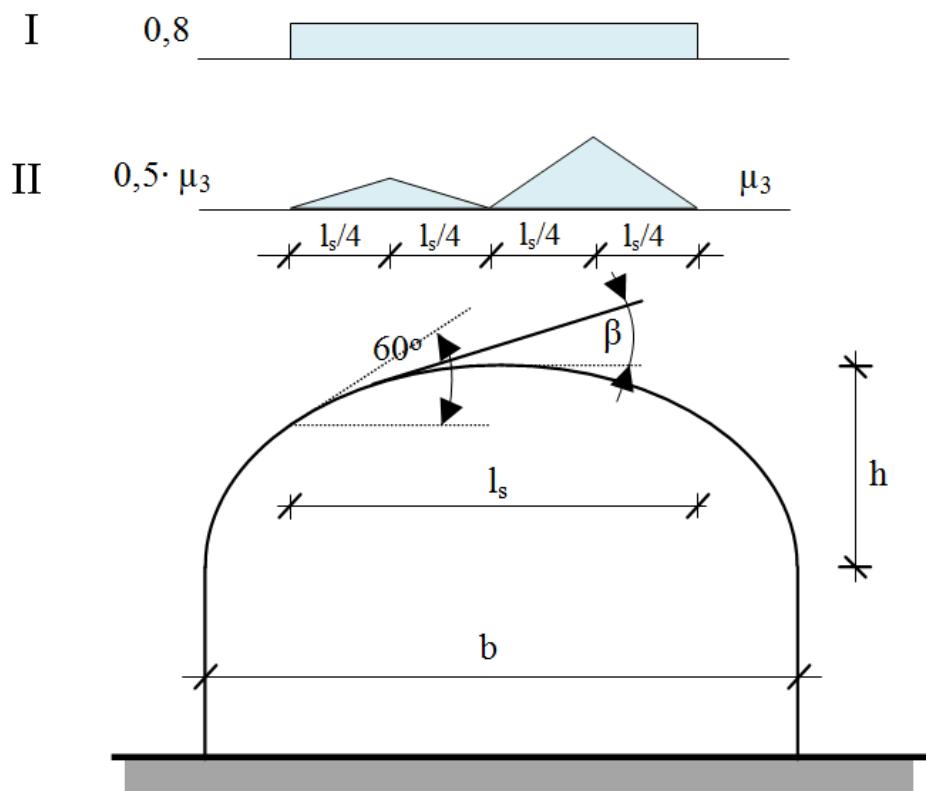
c_e =koeficijent izloženosti

$$c_e = 1$$

c_t =koeficijent topline

$$c_t = 1$$

μ_i =koeficijent oblika za cilindrične krovove

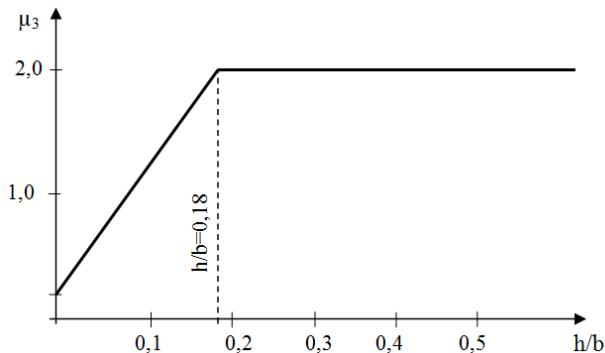


Slika 2 Parametri za određivanje koeficijenta oblika kod cilindričnih krovova

$$\mu_{ii}=0.8 \text{ (koeficijent oblika za varijantu I)}$$



Koeficijent oblika za varijantu II određuje se pomoću dijagrama:



Dijagram 1 Ovisnost koeficijenta oblika kod cilindričnih krovova o odnosu b/h

h=visina kupole

h=3.80 m

b=promjer kupole

b=20.00 m

Odnos h/b za očitavanje dijagonala

$$\frac{h}{b} = 0.19$$

$$l_s = 2 \times h = 7.6 \text{ m}$$

$\mu_{II}=2.0$ (koeficijent oblika za varijantu II)

Djelovanje snijega po m^2 tlocrtno:

$$s_I = 0.8 \times 1 \times 1 \times 1.25 = 1 \text{ kN/m}^2$$

$$s_{II,lijevo} = 1 \times 1 \times 1 \times 1.25 = 1.25 \text{ kN/m}^2$$

$$s_{II,desno} = 2 \times 1 \times 1 \times 1.25 = 2.50 \text{ kN/m}^2$$

Vjetar

Vanjski tlak

Formula za izračun pritiska vjetra na vanjsku oblogu konstrukcije:

$$w_e = q_p \times c_e(z) \times c_{pe}$$



q_p =vršni tlak srednje brzine vjetra

$v_{b,0}$ =osnovna brzina vjetra (očitano iz karte)

$v_{b,0}=25 \text{ m/s}$

ρ = gustoća zraka

$\rho=1.25 \text{ kN/m}^2$

$$q_p = \frac{\rho}{2} \times v_{b,0}^2 = \frac{1.25}{2 \times 1000} \times 25^2 = 0.39 \text{ kN/m}^2$$

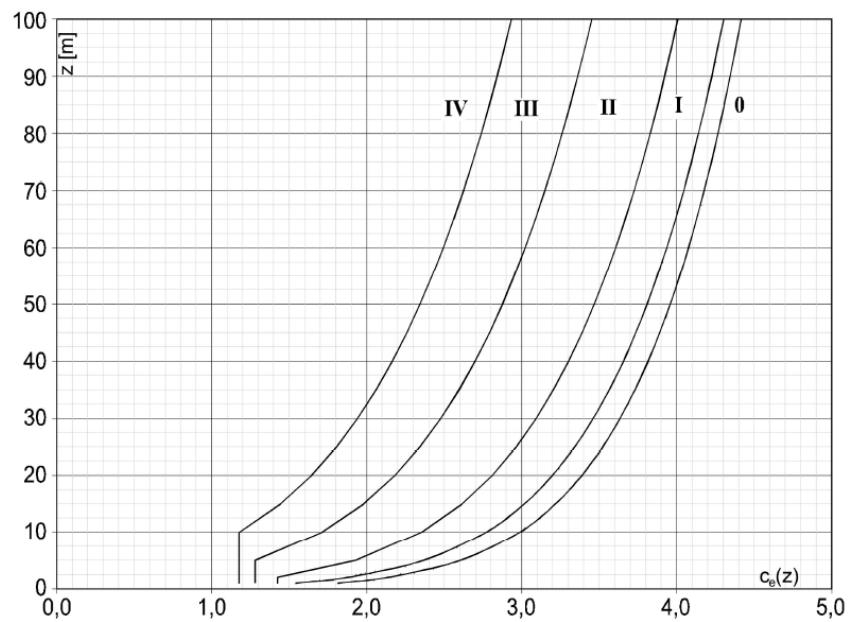
$c_e(z)$ =koeficijent izloženosti

II kategorija terena sa niskom vegetacijom

z =visina objekta

$z=9.10 \text{ m}$

Koeficijent izloženosti određuje se pomoću dijagrama:



Dijagram 2 Ovisnost koeficijenta izloženosti o visini objekta te vrsti terena

$c_e(z)=2.30$



Koeficijent vanjskog tlaka za kružne valjke izračunava se pomoću Reynoldsovog broja

b=promjer valjka

b=20 m

v=kinematska viskoznost zraka

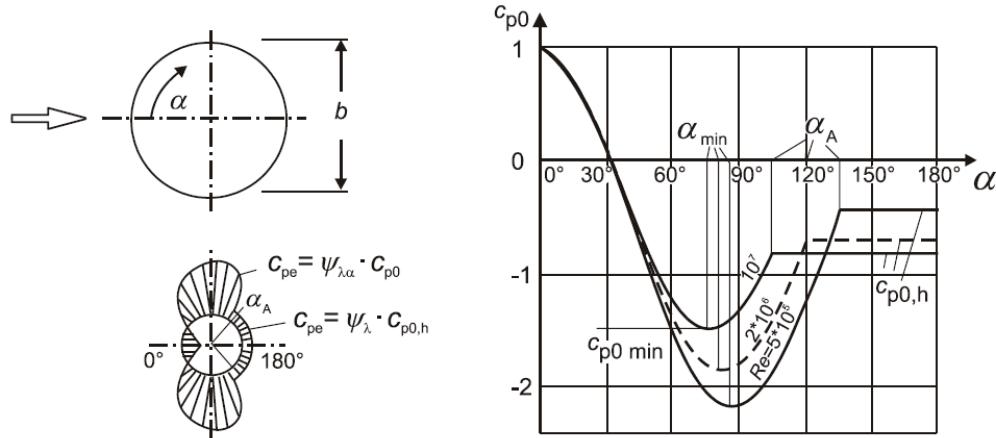
v=15 x 10⁻⁶ m²/s

v_(ze)=vršna brzina vjetra na visini ze

v_(ze)=25 m/s

$$R_e = \frac{b \times v_{(ze)}}{v} = 3.33 \times 10^7$$

Za pojedini položaj u prostoru vrši se očitavanje u dijagramu vrijednosti koeficijenta vanjskog tlaka bez toka preko slobodnog kraja ($c_{p,0}$)



Dijagram 3 Raspodjela tlaka za kružne valjke za različite vrijednosti Reynoldsova brojeva i bez učinka kraja

Faktor učinka kraja ($\psi_{\lambda\alpha}$) u proračunu uzet 1 kako bi bili na strani sigurnosti

Koeficijent vanjskog tlaka za kružne valjke (c_{pe}) izračunava se pomoću formule:

$$c_{pe} = c_{p,0} \times \psi_{\lambda\alpha}$$



Očitane vrijednosti $c_{p,0}$ sa izračunom koeficijenta vanjskog tlaka c_{pe} za pojedini kut

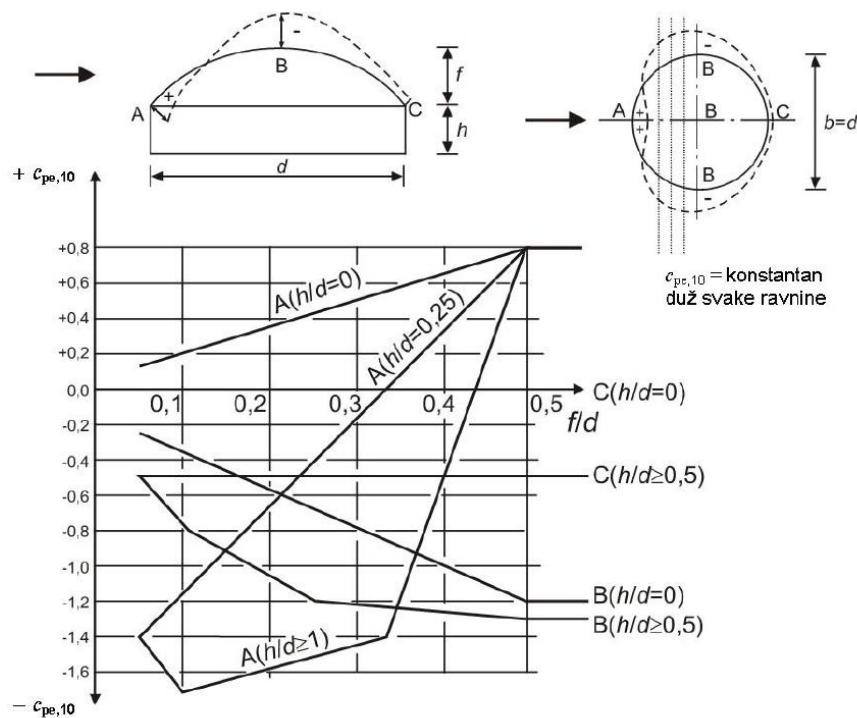
α (°)	$C_{p,0}$	$\Psi_{\lambda\alpha}$	c_{pe}
0	1	1	1
15	0.70	1	0.70
30	0.10	1	0.10
45	-0.60	1	-0.60
60	-1.20	1	-1.20
75	-1.50	1	-1.50
90	-1.30	1	-1.30
105	-0.8	1	-0.8
120	-0.8	1	-0.8
135	-0.8	1	-0.8
150	-0.8	1	-0.8
165	-0.8	1	-0.8
180	-0.8	1	-0.8

Pritisak vjetra na vanjske zidne površine za pojedini kut

α (°)	q_p (kN/m ²)	$C_e(z)$	c_{pe}	$w_e = q_p \times c_e(z) \times c_{pe}$ (kN/m ²)
0	0.39	2.30	1	0.897
15	0.39	2.30	0.70	0.627
30	0.39	2.30	0.10	0.089
45	0.39	2.30	-0.6	-0.538
60	0.39	2.30	-1.20	-1.076
75	0.39	2.30	-1.50	-1.345
90	0.39	2.30	-1.30	-1.166
105	0.39	2.30	-0.80	-0.717
120	0.39	2.30	-0.80	-0.717
135	0.39	2.30	-0.80	-0.717
150	0.39	2.30	-0.80	-0.717
165	0.39	2.30	-0.80	-0.717
180	0.39	2.30	-0.80	-0.717



Koeficijent vanjskog tlaka za kupole sa kružnom osnovicom određuje se pomoću dijagrama



Dijagram 4 Preporučene vrijednosti koeficijenta vanjskog tlaka za kupole s kružnom osnovicom

h =visina zidova objekta

$h=5.00 \text{ m}$

f =visina kupole

$f=3.77 \text{ m}$

d =promjer kupole

$d=20.00 \text{ m}$

Odnos h/d za očitavanje dijagrama

$$\frac{h}{d} = 0.25$$

Odnos f/d za očitavanje dijagrama

$$\frac{f}{d} = 0.19$$



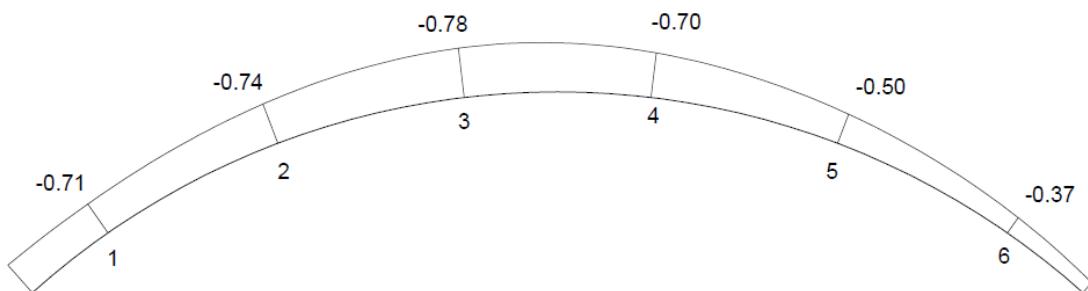
Očitane vrijednosti c_{pe} :

točka A= -0.70

točka B= -0.80

točka C= -0.25

Približne vrijednosti c_{pe} u pojedinim točkama za daljnji proračun



Slika 3 Raspodjela koeficijenta vanjskog tlaka po krovnoj konstrukciji

Pritisak vjetra na krovne površine u pojedinoj točki

Područje	q_p (kN/m ²)	$C_e(z)$	c_{pe}	$w_e = q_p \times c_e(z) \times c_{pe}$ (kN/m ²)
1	0.39	2.30	-0.71	-0.64
2	0.39	2.30	-0.74	-0.66
3	0.39	2.30	-0.78	-0.70
4	0.39	2.30	-0.70	-0.63
5	0.39	2.30	-0.50	-0.45
6	0.39	2.30	-0.37	-0.33

Unutarnji pritisak

Formula za izračun pritiska vjetra na unutarnju oblogu konstrukcije:

$$w_i = q_p \times c_e(z) \times c_{pi}$$



q_p =vršni tlak srednje brzine vjetra

$v_{b,0}$ =osnovna brzina vjetra (očitano iz karte)

$v_{b,0}=25 \text{ m/s}$

ρ = gustoća zraka

$\rho=1.25 \text{ kN/m}^2$

$$q_p = \frac{\rho}{2} \times v_{b,0}^2 = \frac{1.25}{2 \times 1000} \times 25^2 = 0.39 \text{ kN/m}^2$$

$c_e(z)$ =koeficijent izloženosti

II kategorija terena sa niskom vegetacijom

z =visina objekta

$z=9.10 \text{ m}$

Koeficijent izloženosti određuje se pomoću Dijagrama 9

$c_e(z)=2.30$

c_{pi} =koeficijent unutarnjeg tlaka

$c_{pi1}=0.35$

$c_{pi2}=-0.50$

Iznosi koeficijenta unutarnjeg tlaka (c_{pi}) odabrani najnepovoljniji kako bi bili na strani sigurnosti.

Pritisak vjetra na unutarnje površine

$q_p (\text{kN/m}^2)$	$c_e(z)$	c_{pi}	$w_e=q_p \times c_e(z) \times c_{pi} (\text{kN/m}^2)$
0.39	2.30	0.35	0.31
0.39	2.30	-0.50	-0.45



Preračunavanje opterećenja

Kako bi se opterećenja (stalno, snijeg i vjetra) zadala u statičkom modelu izvršeno je preračunavanje površinskih opterećenja u linijska.

Površine na kojima djeluju opterećenja:

Oznaka	Skica	Površina m ²
1		2.57
2		4.97
3		7.31
4		7.17
5		7.36

Stalno opterećenje-preračunavanje u linijsko

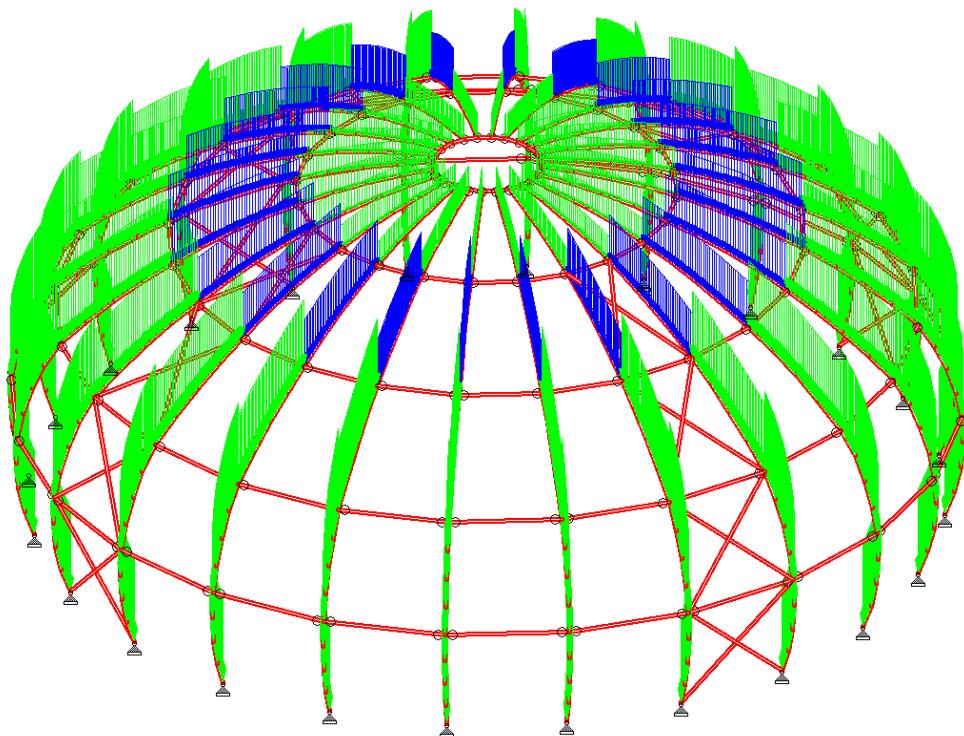
$$G_{k1} = \frac{2.57 \times 0.70}{3.22} = 0.56 \text{ kN/m}$$

$$G_{k2} = \frac{4.97 \times 0.70}{3.23} = 1.08 \text{ kN/m}$$

$$G_{k3} = \frac{7.31 \times 0.70}{3.22} = 1.59 \text{ kN/m}$$

$$G_{k4} = \frac{7.17 \times 0.70}{2.62} = 1.92 \text{ kN/m}$$

$$G_{k5} = \frac{7.36 \times 0.70}{2.61} = 1.97 \text{ kN/m}$$



Slika 4 Stalno opterećenje zadano na statičkom modelu

Promjenjivo opterećenje-preračunavanje u linijsko

Snijeg - preračunavanje u linijsko

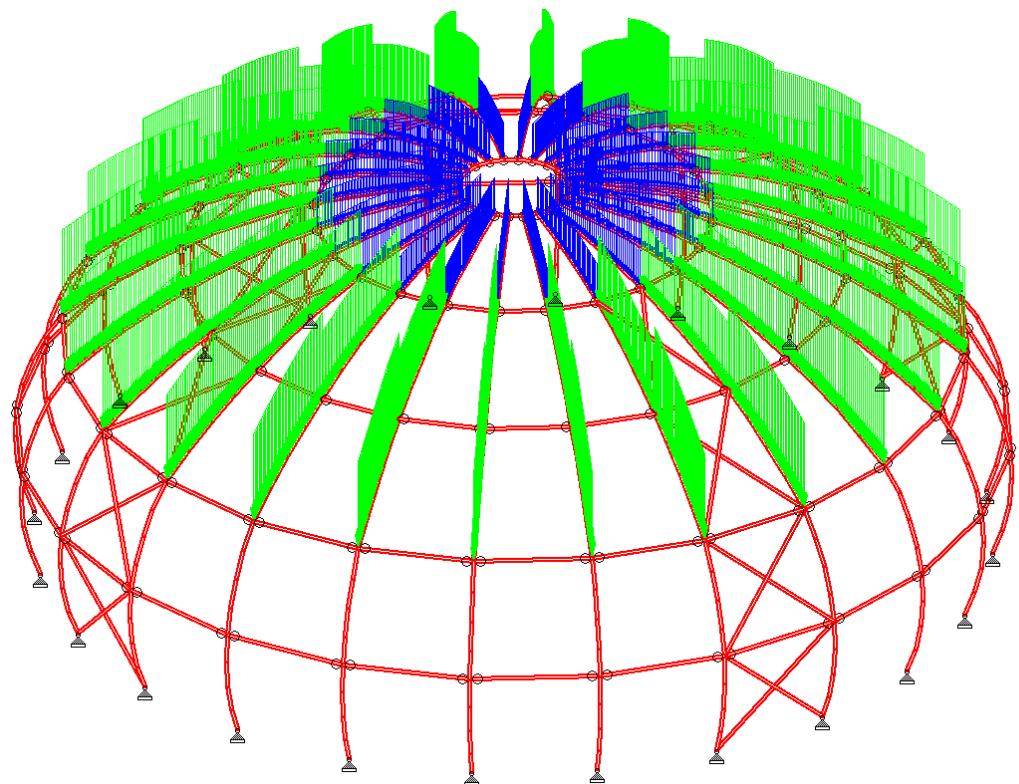
$$s_{kl, \text{područje } 1} = \frac{[(2.57 \times 1) \times \cos 11^\circ]}{3.22} = 0.78 \text{ kN/m}$$

$$s_{kl, \text{područje } 2} = \frac{[(4.97 \times 1) \times \cos 23^\circ]}{3.23} = 1.42 \text{ kN/m}$$

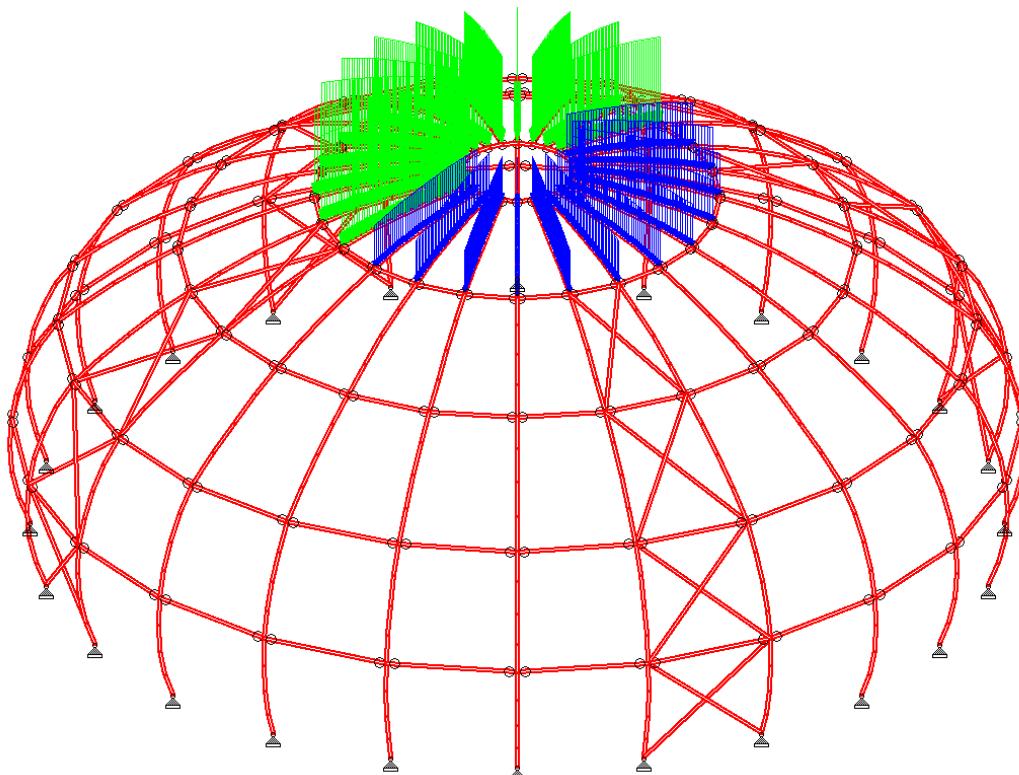
$$s_{kl, \text{područje } 3} = \frac{[(7.31 \times 1) \times \cos 36^\circ]}{3.22} = 1.84 \text{ kN/m}$$

$$s_{kll, \text{područje } 1, \text{lijevo}} = \frac{[(2.57 \times 0.625) \times \cos 11^\circ]}{3.22} = 0.48 \text{ kN/m}$$

$$s_{kll, \text{područje } 1, \text{desno}} = \frac{[(2.57 \times 1.25) \times \cos 11^\circ]}{3.22} = 0.97 \text{ kN/m}$$



Slika 5 Snijeg s_{kl} zadan na statickom modelu



Slika 6 Snijeg s_{kII} zadan na statickom modelu



Vjetar – preračunavanje u linijsko

Vanjski tlak zidovi

α ($^{\circ}$)	w_e [kN/m 2]	Razmak stupova (m)	$w_e \times 2.80$ [kN/m]
0	0.897	2.80	2.51
15	0.627	2.80	1.75
30	0.089	2.80	0.24
45	-0.538	2.80	-1.50
60	-1.076	2.80	-3.01
75	-1.345	2.80	-3.75
90	-1.166	2.80	-3.26
105	-0.717	2.80	-2.00
120	-0.717	2.80	-2.00
135	-0.717	2.80	-2.00
150	-0.717	2.80	-2.00
165	-0.717	2.80	-2.00
180	-0.717	2.80	-2.00

Vanjski tlak kupola

Područje	w_e [kN/m 2]	površina [m 2]	dužina [m]	$\frac{w_e \times 7}{3.2}$ [kN/m]
1	-0.64	7.00	3.20	-0.64
2	-0.66	7.00	3.20	-0.66
3	-0.70	7.00	3.20	-0.70
4	-0.63	7.00	3.20	-0.63
5	-0.45	7.00	3.20	-0.45
6	-0.33	7.00	3.20	-0.33

Unutarnji tlak w_{i1}

$$w_{i1,1} = \frac{2.57 \times 0.31}{3.22} = 0.25 \text{ kN/m}$$

$$w_{i1,2} = \frac{4.97 \times 0.31}{3.23} = 0.48 \text{ kN/m}$$



$$w_{i1,3} = \frac{7.31 \times 0.31}{3.22} = 0.70 \text{ kN/m}$$

$$w_{i1,4} = \frac{7.17 \times 0.31}{2.62} = 0.85 \text{ kN/m}$$

$$w_{i1,5} = \frac{7.36 \times 0.31}{2.61} = 0.87 \text{ kN/m}$$

Unutarnji podtlak w_{i2}

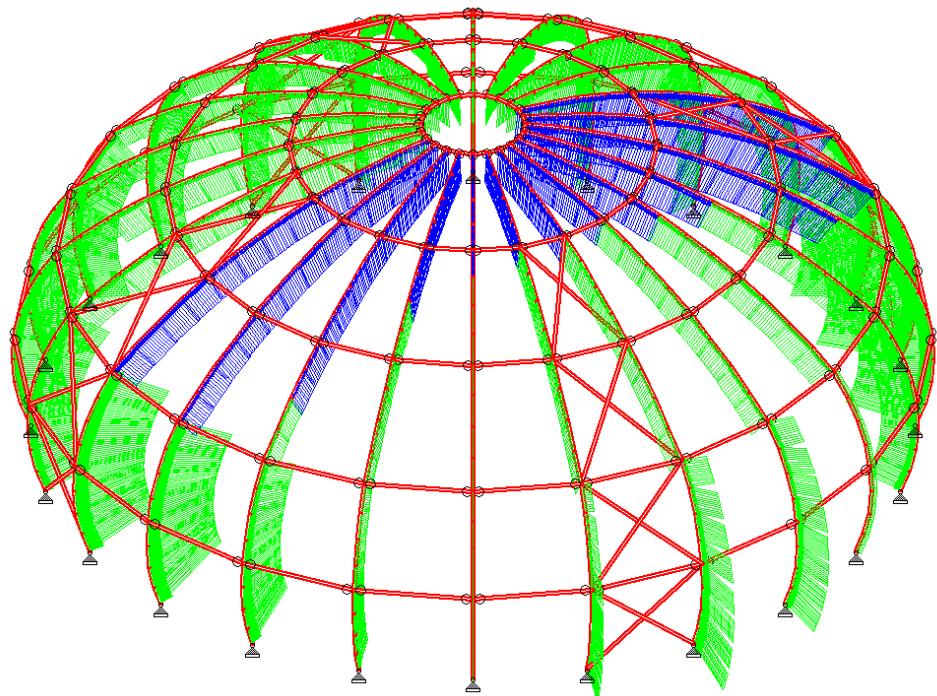
$$w_{i2,1} = \frac{2.57 \times (-0.45)}{3.22} = -0.36 \text{ kN/m}$$

$$w_{i2,2} = \frac{4.97 \times (-0.45)}{3.23} = -0.69 \text{ kN/m}$$

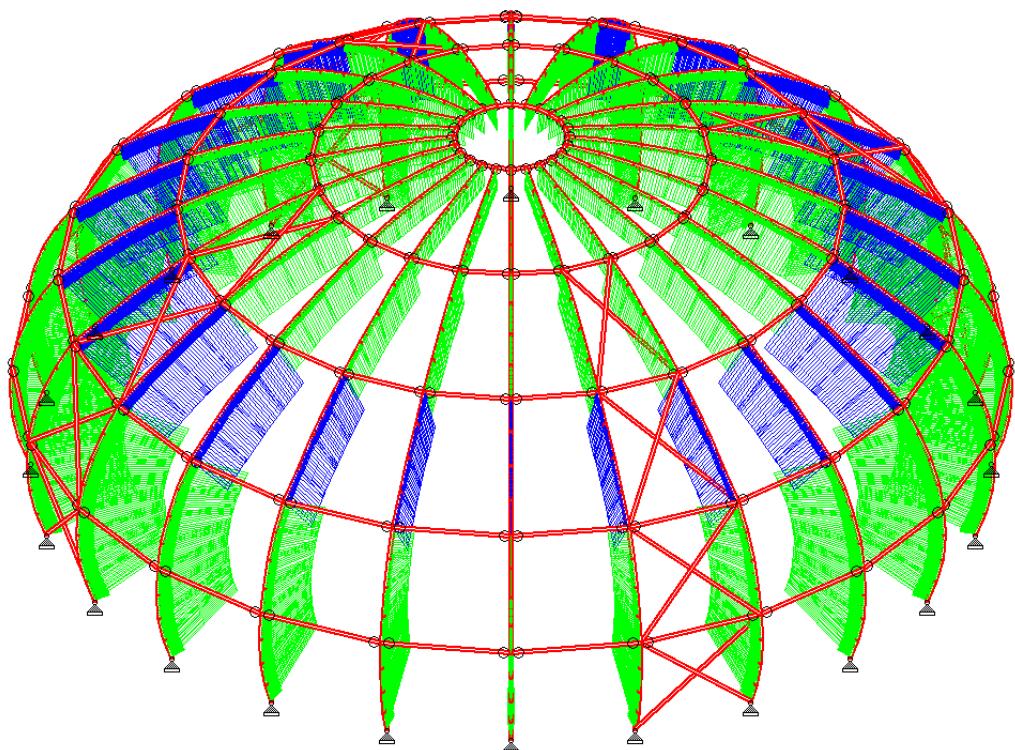
$$w_{i2,3} = \frac{7.31 \times (-0.45)}{3.22} = -1.02 \text{ kN/m}$$

$$w_{i2,4} = \frac{7.17 \times (-0.45)}{2.62} = -1.23 \text{ kN/m}$$

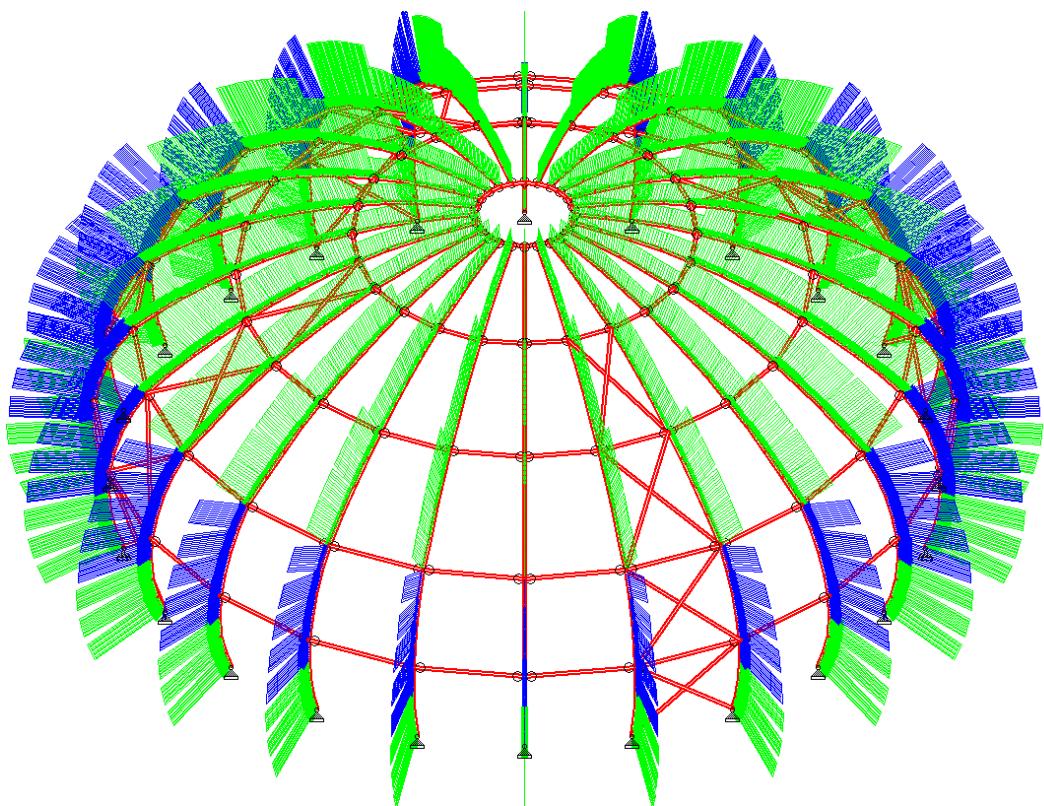
$$w_{i2,5} = \frac{7.36 \times (-0.45)}{2.61} = -1.27 \text{ kN/m}$$



Slika 7 Vanjski tlak zadan na statičkom modelu



Slika 8 Unutarnji tlak zadan na statičkom modelu



Slika 9 Unutarnji podtlak zadan na statičkom modelu



Kombinacije opterećenja

Granično stanje nosivosti

101.	STALNO + SNIJEG 1	1.35 + 1.5
102.	STALNO + SNIJEG 2	1.35 + 1.5
103.	STALNO + VJETAR	1.0 + 1.5
104.	STALNO + VJETAR + UNUTARNJI TLAK	1.0 + 1.5 + 1.5
105.	STALNO + VJETAR + UNUTARNJI PODTLAK	1.0 + 1.5 + 1.5
106.	STALNO + SNIJEG 1 + VJETAR + UNUTARNJI PODTLAK	1.35 + 1.5 + 0.6 x 1.5 + 0.6 x 1.5
107.	STALNO + SNIJEG 2 + VJETAR + UNUTARNJI PODTLAK	1.35 + 1.5 + 0.6 x 1.5 + 0.6 x 1.5
108.	STALNO + VJETAR + UNUTARNJI TLAK+ SNIJEG 1	1.0 + 1.5 + 1.5 + 0.7 x 1.5
109.	STALNO + VJETAR + UNUTARNJI TLAK+ SNIJEG 2	1.0 + 1.5 + 1.5 + 0.7 x 1.5

Granično stanje uporabljivosti

Klasa uporabljivosti 3 (bazenska konstrukcija)

Koeficijenti deformacije (k_{def}) za pojedino opterećenje:

$$k_{def} (\text{stalno})=2.00$$

$$k_{def} (\text{sniјeg})=0.70$$

$$k_{def} (\text{vjetar})=0.30$$

Koeficijent kombinacije

$$\Psi_0 (\text{sniјeg})=0.70$$

$$\Psi_0 (\text{vjetar})=0.60$$

Koeficijent sigurnosti (γ) za sva opterećenja iznosi 1

201.	STALNO + SNIJEG 1	(1+2) + (1+0.7)
202.	STALNO + SNIJEG 2	(1+2) + (1+0.7)
203.	STALNO + VJETAR	(1+2) + (1+0.3)
204.	STALNO + VJETAR + UNUTARNJI TLAK	(1+2) + (1+0.3) + (1+0.3)
205.	STALNO + VJETAR + UNUTARNJI PODTLAK	(1+2) + (1+0.3) + (1+0.3)
206.	STALNO + SNIJEG 1 + VJETAR + UNUTARNJI PODTLAK	(1+2) + (1+0.7) + (1+0.6x0.3) + (1+0.6x0.3)
207.	STALNO + SNIJEG 2 + VJETAR + UNUTARNJI PODTLAK	(1+2) + (1+0.7) + (1+0.6x0.3) + (1+0.6x0.3)
208.	STALNO + VJETAR + UNUTARNJI TLAK+ SNIJEG 1	(1+2) + (1+0.3) + (1+0.3) + (1+0.7x0.7)
209.	STALNO + VJETAR + UNUTARNJI TLAK+ SNIJEG 2	(1+2) + (1+0.3) + (1+0.3) + (1+0.7x0.7)



Napomena: prilikom unosa koeficijenata za Granično stanje uporabljivosti uvršteni su k_{def} i ψ_0 kako bi program izračunao finalni progib konstrukcije.

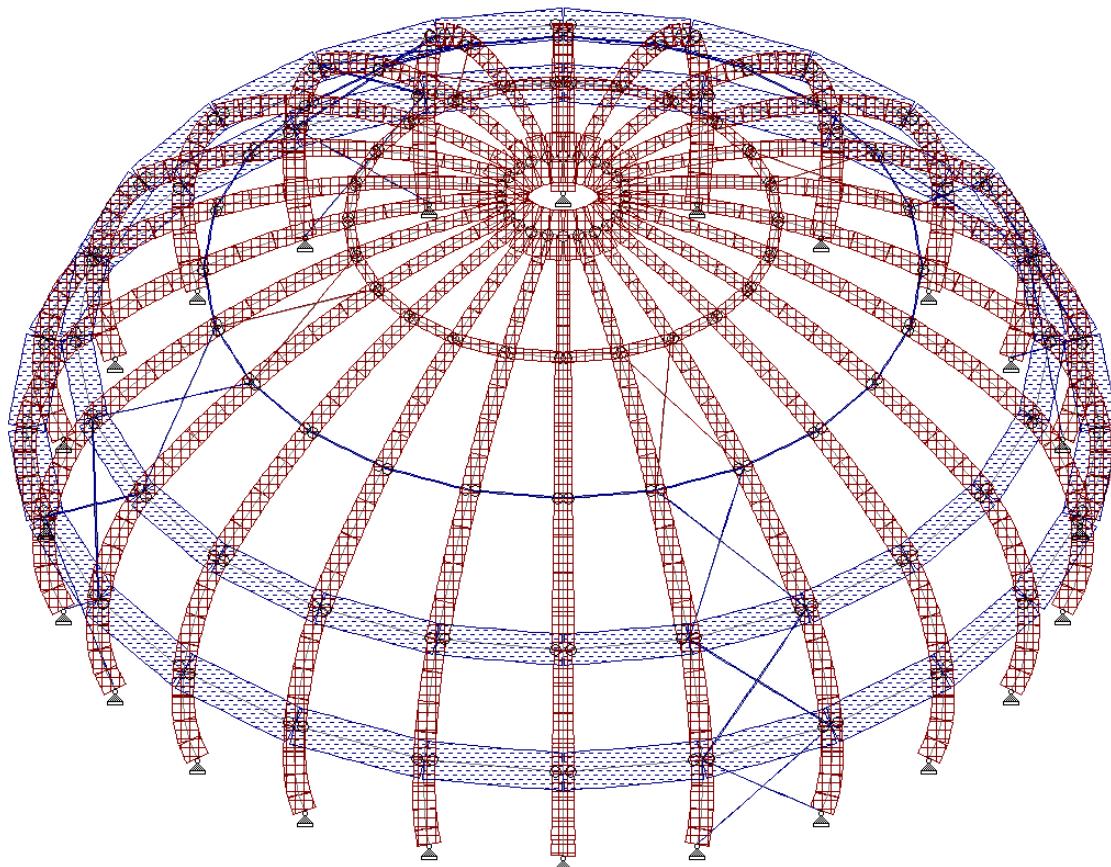
Formule za izračun finalnih progiba:

$$u_{fin,G} = u_{inst,G} \times (1 + k_{def}) \quad \text{za stalno djelovanje}$$

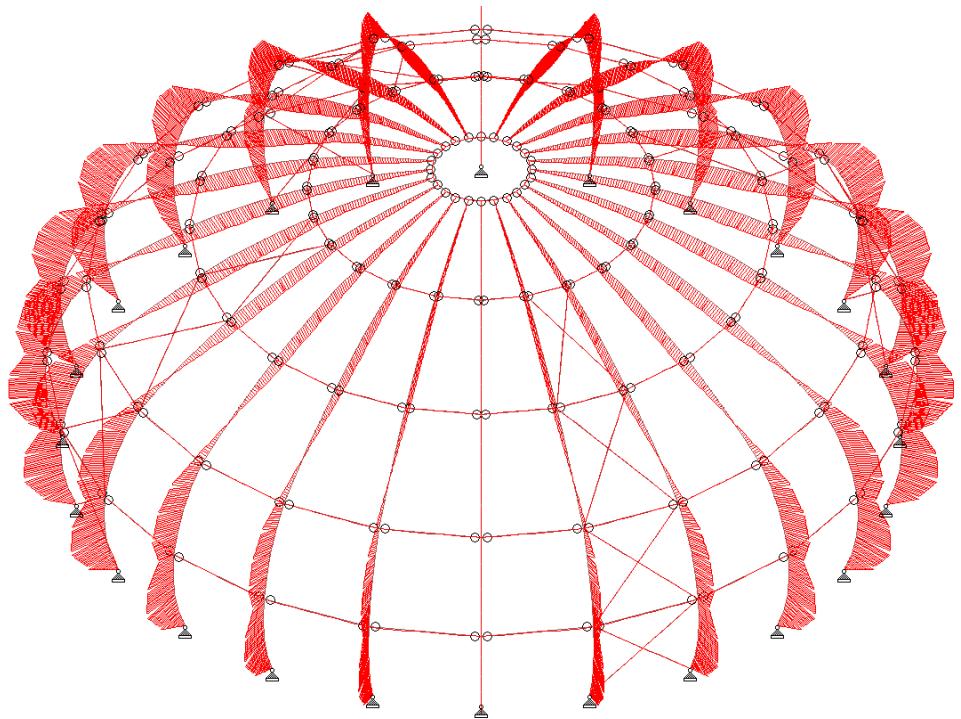
$$u_{fin,Q} = u_{inst,Q} \times (1 + \psi_{2,1} \times k_{def}) \quad \text{za promjenjivo djelovanje}$$

Dijagrami naprezanja za pojedinu kombinaciju opterećena

Stalno + Snijeg 1 (Kombinacija 101)

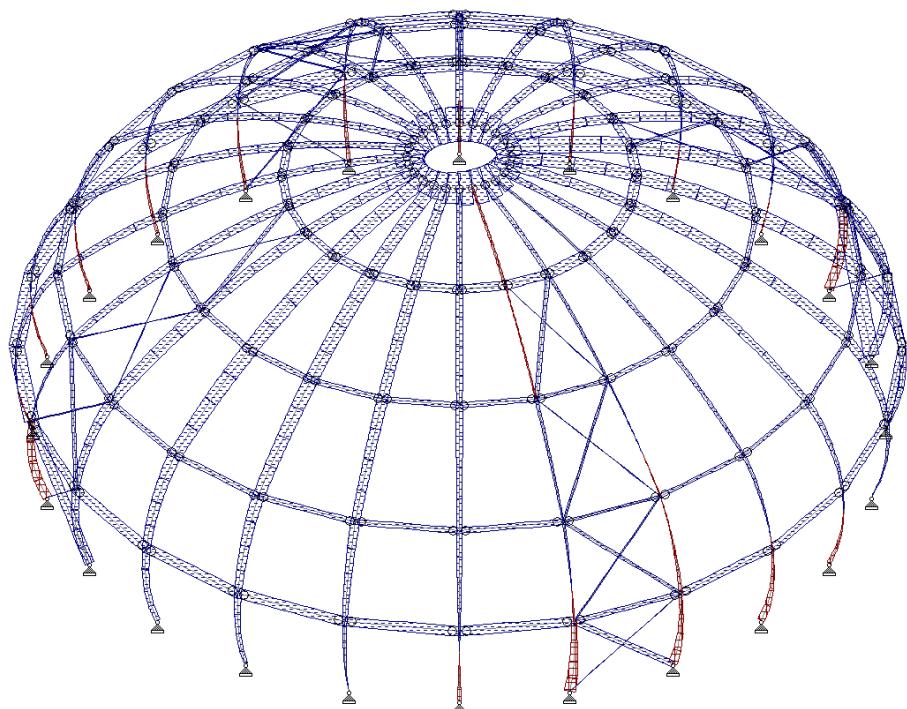


Slika 10 N_d dijagram za kombinaciju 101

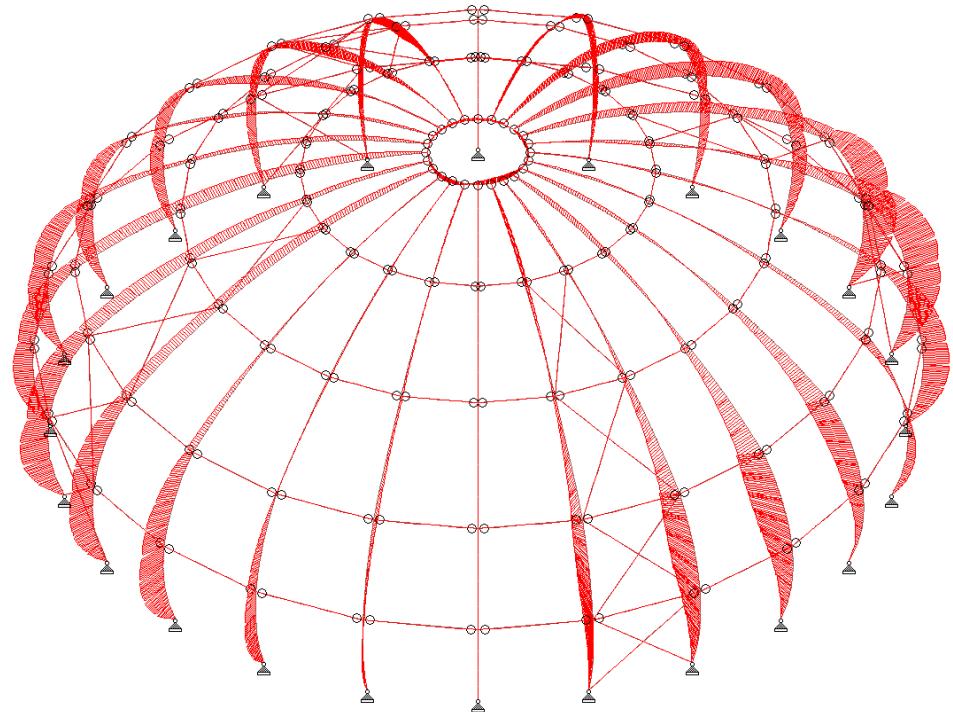


Slika 11 $M_{y,d}$ dijagram za kombinaciju 101

Stalno + Vjetar + Unutarnji tlak (Kombinacija 105)

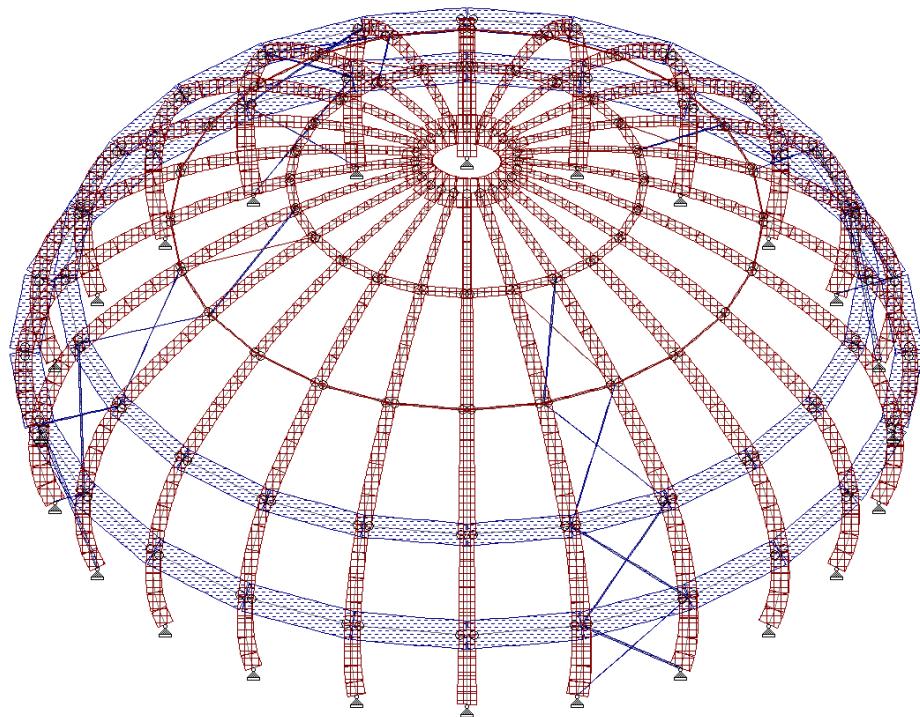


Slika 12 N_d dijagram za kombinaciju 105

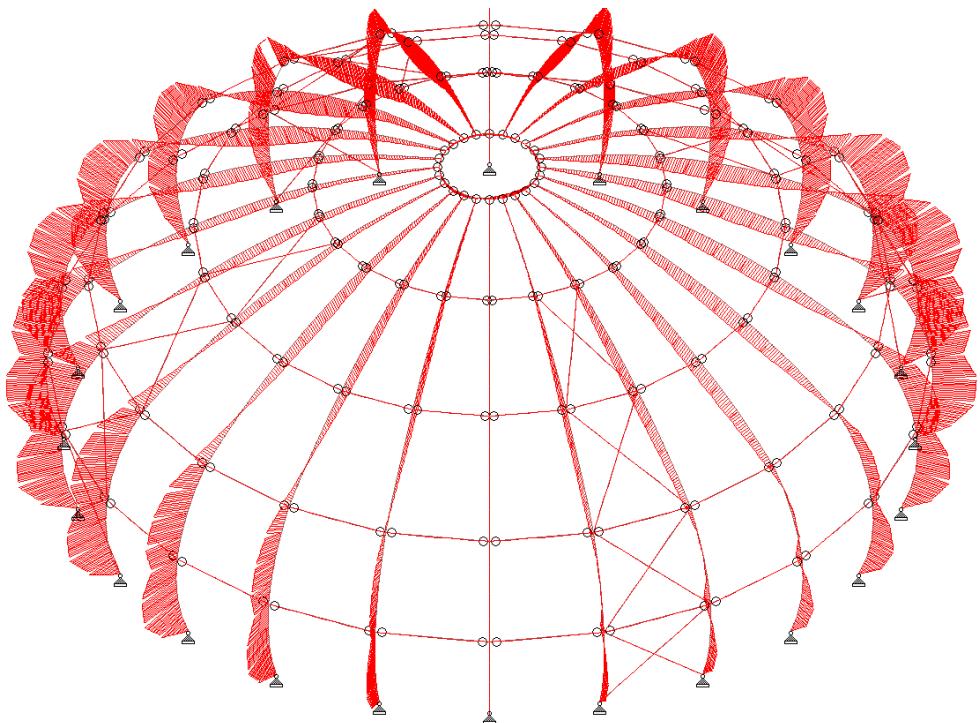


Slika 13 $M_{y,d}$ dijagram za kombinaciju 105

Stalno + Snijeg 1 + Vjetar + Unutarnji podtlak (Kombinacija 106)

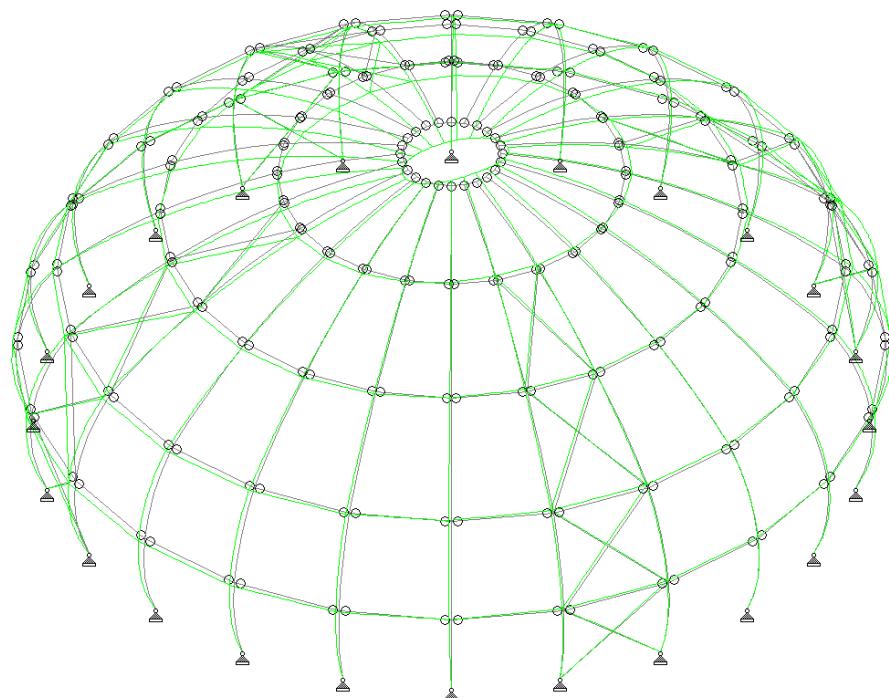


Slika 14 N_d dijagram za kombinaciju 106



Slika 15 $M_{y,d}$ dijagram za kombinaciju 106

Stalno + Snijeg 2 + Vjetar + Unutarnji podtlak (Kombinacija 207)

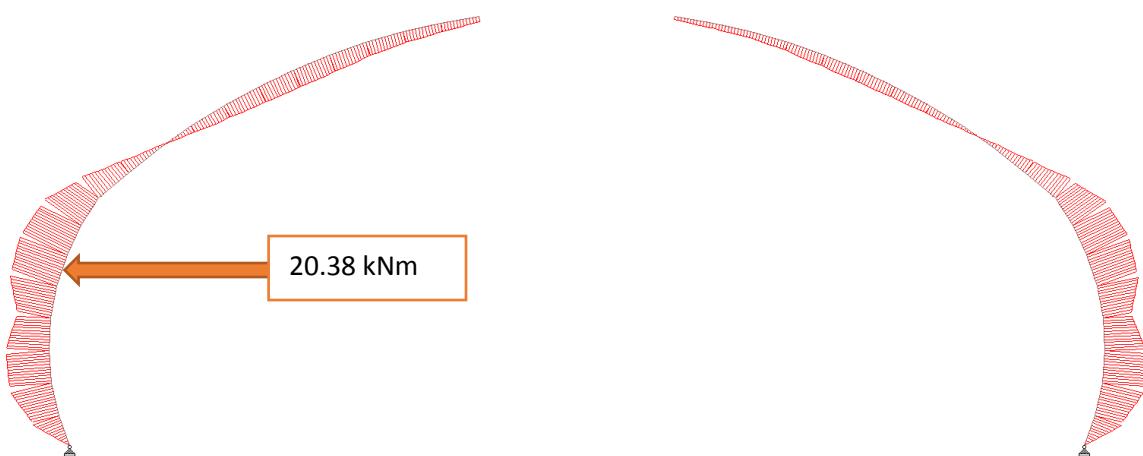


Slika 16 Dijagram pomaka za kombinaciju 207

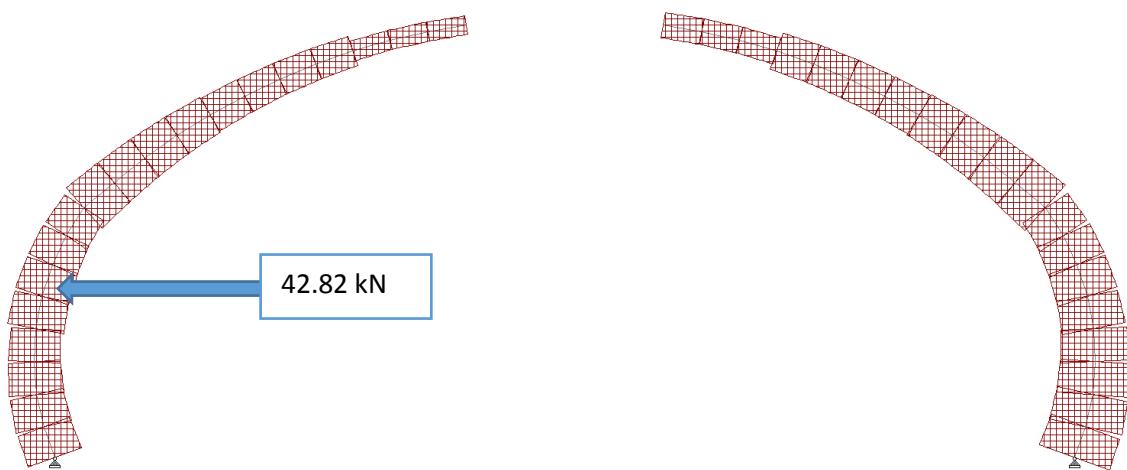
Dimenzioniranje

Glavni nosač

Najnepovoljnija kombinacija opterećenja koja djeluje na glavni nosač je 106 (Stalno + Snijeg 1 + Vjetar + Unutarnji podtlak)



Slika 17 $M_{y,d}$ dijagram na najopterećenijem glavnom nosaču za kombinaciju 106



Slika 18 N_d dijagram na najopterećenijem glavnom nosaču za kombinaciju 106

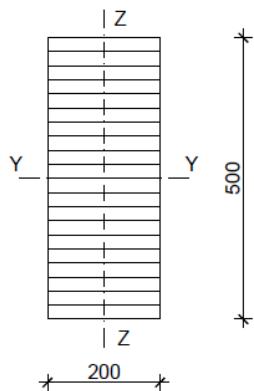
Maksimalna kombinacija djelovanja sa kojima se ulazi u proračun:

$$N_d = 42.82 \text{ kN} \text{ (tlak)}$$

$$M_{y,d} = 20.38 \text{ kNm}$$



Dimenzije poprečnog presjeka 200 mm x 500 mm



$$A = 200 \times 500 = 100000 \text{ mm}^2$$

$$W_Y = \frac{200 \times 500^2}{6} = 8333333.33 \text{ mm}^2$$

$$W_z = \frac{500 \times 200^2}{6} = 3333333.33 \text{ mm}^2$$

Duljina izvijanja Z

$$l_{ef,z} = 3220 \text{ mm}$$

Duljina izvijanja Y

$$l_{ef,y} = 1.4 \times 15000 = 21000 \text{ mm}$$

Srednji modul posmika za lamalirano drvo GL32h

$$G_{mean} = 850 \text{ N/mm}^2$$

Srednji modul elastičnosti za lamalirano drvo GL32h

$$E_{0,mean} = 13700 \text{ N/mm}^2$$

Karakteristični modul elastičnosti za lamalirano drvo GL32h

$$E_{0,05} = 11100 \text{ N/mm}^2$$

Karakteristična čvrstoća na savijanje za lamalirano drvo GL32h

$$f_{m,k} = 32 \text{ N/mm}^2$$

Karakteristična čvrstoća na tlak paralelno sa vlakancima za lamalirano drvo GL32h

$$f_{c,0,k} = 29 \text{ N/mm}^2$$



Koeficijent sigurnosti za materijal

$$\gamma_m = 1.3$$

Koeficijent kodifikacije za 3 klasu (Bazenska konstrukcija) srednje trajno djelovanje

$$k_{mod} = 0.65$$

Izrazi kod djelovanja savijanja sa bočnim izvijanjem i tlakom paralelno sa vlakancima:

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \times f_{c,0,d}} \right) + \left(\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit,y} \times f_{m,y,d}} \right) \leq 1$$

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \times f_{c,0,d}} \right) + \left(k_m \times \frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit,y} \times f_{m,y,d}} \right) \leq 1$$

Savijanje Y + bočno izvijanje

$$\sigma_{m,crit,y} = \frac{\pi \times b^2 \times E_{0,05}}{I_{eff,y} \times h} \times \sqrt{\frac{G_{mean}}{E_{0,mean}}} = 215.80 \text{ N/mm}^2$$

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit,y}}} = 0.39$$

$$\lambda_{rel,m} \leq 0.75 \rightarrow k_{crit,y} = 1$$

$$f_{m,d} = k_{mod} \times \frac{f_{m,k}}{\gamma_m} = 16 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{y,d}}{W_y} = 2.44 \text{ N/mm}^2$$

Tlak paralelno sa vlakancima + izvijanje Z

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{A} = 0.43 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{c,0,d} = k_{mod} \times \frac{f_{c,0,k}}{\gamma_m} = 14.5 \text{ N/mm}^2$$

$$\lambda_z = \frac{l_{eff,z}}{l_{min}} = 55.70$$



$$\sigma_{c,crit,z} = \frac{\pi^2 \times E_{0,05}}{\lambda_z^2} = 35.28 \text{ N/mm}^2$$

$$\lambda_{rel,z} \sqrt{\frac{f_{c,o,k}}{\sigma_{c,crit,z}}} = 0.91$$

$\beta_c = 0.1$ za lamelirao drvo

$$k_z = 0.5 \times [1 + \beta_c \times (\lambda_{rel,z} - 0.5) + \lambda_{rel,z}^2] = 0.94$$

$$\frac{1}{k_{c,z}} = k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2} = 1.17$$

$$k_{c,z} = 0.85$$

Tlak paralelno sa vlakancima + izvijanje Y

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{A} = 0.43 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{c,0,d} = k_{mod} \times \frac{f_{c,0,k}}{\gamma_m} = 14.5 \text{ N/mm}^2$$

$$\lambda_y = \frac{l_{ef,y}}{l_{min}} = 145.32$$

$$\sigma_{c,crit,y} = \frac{\pi^2 \times E_{0,05}}{\lambda_y^2} = 5.18 \text{ N/mm}^2$$

$$\lambda_{rel,y} \sqrt{\frac{f_{c,o,k}}{\sigma_{c,crit,y}}} = 2.36$$

$\beta_c = 0.1$ za lamelirao drvo

$$k_y = 0.5 \times [1 + \beta_c \times (\lambda_{rel,y} - 0.5) + \lambda_{rel,y}^2] = 3.38$$

$$\frac{1}{k_{c,y}} = k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2} = 5.79$$

$$k_{c,y} = 0.17$$



Dokaz nosivosti

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \times f_{c,0,d}} \right) + \left(\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit,y} \times f_{m,y,d}} \right) \leq 1$$

$$\left(\frac{0.43}{0.85 \times 14.5} \right) + \left(\frac{2.44}{1 \times 16} \right) \leq 1$$

$$0.32 \leq 1$$

Koeficijent pravokutnog poprečnog presjeka

$$K_m = 0.7$$

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \times f_{c,0,d}} \right) + \left(K_m \times \frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit,y} \times f_{m,y,d}} \right) \leq 1$$

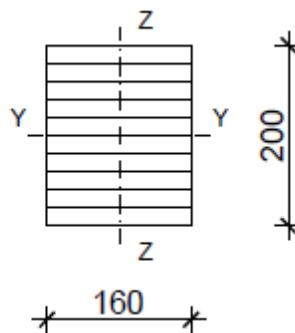
$$\left(\frac{0.43}{0.17 \times 14.5} \right) + \left(0.7 \times \frac{2.44}{1 \times 16} \right) \leq 1$$

$$0.14 \leq 1$$

Presjek zadovoljava iskoristivost 32 %

Horizontalni element

Dimenziije poprečnog presjeka 160 mm x 200 mm



$$A = 160 \times 200 = 32000 \text{ mm}^2$$

$$A_{neto} = 160 \times 200 \times 0.8 = 25600 \text{ mm}^2$$

Najnepovoljnija kombinacija opterećenja koja djeluje na horizontalni element je 101 (Stalno + Snijeg 1)



Maksimalna vlačna sila sa kojom se ulazi u proračun:

$$N_d = 92.80 \text{ kN (vlak)}$$

Karakteristična čvrstoća na vlak paralelno sa vlakancima za lamalirano drvo GL32h

$$f_{t,0,k} = 22.5 \text{ N/mm}^2$$

Koeficijent sigurnosti za materijal

$$\gamma_m = 1.3$$

Koeficijent kodifikacije za 3 klasu (Bazenska konstrukcija) srednje trajno djelovanje

$$k_{mod} = 0.65$$

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{N_d}{A_{neto}} = 3.63 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{t,0,d} = k_{mod} \times \frac{f_{t,0,k}}{\gamma_m} = 11.25 \text{ N/mm}^2$$

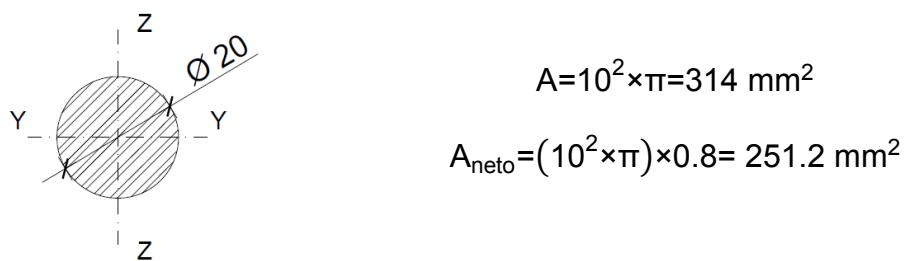
$$\sigma_{t,0,d} \leq f_{t,0,d}$$

$$3.63 \text{ N/mm}^2 \leq 11.25 \text{ N/mm}^2$$

Presjek zadovoljava iskoristivost 32 %

Spreg

Dimenzija poprečnog presjeka puni čelik $\varnothing 20 \text{ mm S235}$





Najnepovoljnija kombinacija opterećenja koja djeluje na horizontalni element je 108 (Stalno + Vjetar + Unutarnji tlak + Snijeg 1)

Maksimalna vlačna sila sa kojom se ulazi u proračun:

$$N_d = 23.09 \text{ kN (vlak)} = N_{sd}$$

Granica popuštanja za čelik S235

$$f_y = 235 \text{ N/mm}^2$$

Vlačna čvrtoća za čelik S235

$$f_u = 360 \text{ N/mm}^2$$

Koeficijent sigurnosti za poprečni presjek

$$\gamma_{m,0} = 1.1$$

Koeficijent sigurnosti za neto poprečni presjek

$$\gamma_{m,2} = 1.25$$

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \times f_y}{\gamma_{m,0}} = 67081 \text{ N} \rightarrow 67.08 \text{ kN}$$

$$N_{sd} \leq N_{pl,Rd}$$

$$23.09 \text{ kN} \leq 67.08 \text{ kN}$$

$$N_{u,Rd} = \frac{0.9 \times A_{neto} \times f_u}{\gamma_{m,2}} = 65111 \text{ N} \rightarrow 65.11 \text{ kN}$$

$$N_{sd} \leq N_{u,Rd}$$

$$23.09 \text{ kN} \leq 65.11 \text{ kN}$$

Presjek zadovoljava iskoristivost 35 %



Stakleni panel

Širina panela

b=2.60 m

Visina panela

h=3.20 m

Debljina panela (žareno staklo)

d=0.024 m

Površina panela

A=8320000 mm²

Karakteristično djelovanje vjetra koje djeluje na panel

W_k=1.65 kN/m² = Q_k

Karakteristična otpornost na savijanje

f_{g,k}=45 N/mm²

Parcijalni faktor za staklo

γ_{M,A}=1.80

Faktor utjecaja površine

k_{sp}=1.0

Faktor trajanja opterećenja

k_{mod}=0.74

Koeficijent sigurnosti za djelovanje vjetra (GSN)

γ_d=1.30

Koeficijent sigurnosti za djelovanje vjetra (GSU)

γ_d=0.9



Modul elastičnosti

$$E=70000 \text{ N/mm}^2$$

Granično stanje nosivosti:

$$f_{g,d} = \frac{k_{mod} \times k_{s,p} \times f_{g,k}}{\gamma_{M,A}} = 18.5 \text{ N/mm}^2$$

$$F_d = \gamma_d \times Q_k = 2.15 \text{ kN/mm}^2$$

$$p^* = \left(\frac{A}{4 \times h^2} \right)^2 \times \frac{F_d}{E} = 0.40$$

$$\lambda = \frac{b}{h} = 0.81$$

$$k_1 = 0.30$$

$$\sigma_{max} = k_1 \times \frac{A}{h^2} \times F_d = 9.29 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{max} \leq f_{g,d}$$

$$9.29 \text{ N/mm}^2 \leq 18.50 \text{ N/mm}^2$$

Presjek zadovoljava iskoristivost 50 %

Granično stanje uporabljivosti:

$$F_d = \gamma_d \times Q_k = 1.49 \text{ kN/mm}^2$$

$$w_d = \frac{b}{100} = 26 \text{ mm}$$

$$p^* = \left(\frac{A}{4 \times h^2} \right)^2 \times \frac{F_d}{E} = 0.12$$

$$\lambda = \frac{b}{h} = 0.81$$

$$k_4 = 0.04$$

$$w_{max} = k_4 \times \frac{A^2}{h^3} \times \frac{F_d}{E} = 4.24 \text{ mm}$$



$$W_{\max} \leq W_d$$

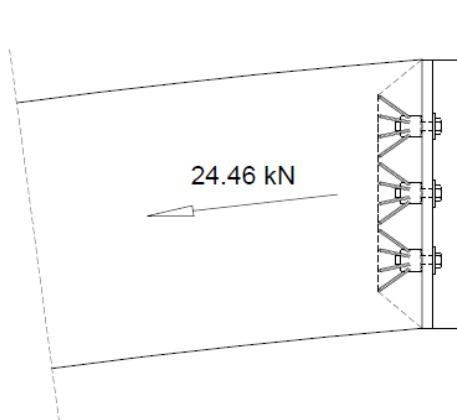
$$4.24 \text{ mm} \leq 26 \text{ mm}$$

Presjek zadovoljava iskoristivost 15 %

Detalji

Spoj glavnog nosača na čelični prsten

Maksimalna vlačna sila sa kojom se ulazi u proračun:



$$N_d = 24.46 \text{ kN} \text{ (vlak)}$$

Odabrano spajalo Sihga moždanik IdeFix IF 408



Slika 19 Moždanik Sihga IdeFix IF

Karakteristična otpornost jednog moždanika očitana iz kataloga proizvođača

$$R_k = 35.58 \text{ kN}$$

Projektirana otpornost jednog moždanika

$$R_d = k_{\text{mod}} \times \frac{R_k}{\gamma_m} = 17.79 \text{ kN}$$



Odabрано 3 moždanika u spoju

$$R_{d(3)} = 53.37 \text{ kN}$$

$$N_d \leq R_{d(3)}$$

$$35.58 \text{ kN} \leq 53.37 \text{ kN}$$

Spajala zadovoljavaju iskoristivost 66 %

Vijak za spajanje moždanika odabran M 16 KV 8.8.

$$F_{t,Rd} = \frac{0.9 \times A_s \times f_{ub}}{\gamma_{mb}} = 115.77 \text{ kN}$$

Odabрано 3 vijka u spoju

$$F_{t,Rd(3)} = 347.32 \text{ kN}$$

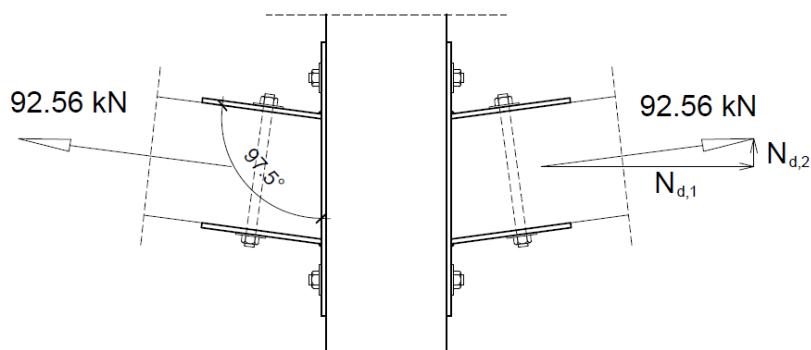
$$N_d \leq N_{t,Rd(3)}$$

$$24.46 \text{ kN} \leq 347.32 \text{ kN}$$

Spajala zadovoljavaju iskoristivost 7 %

Spoj horizontalnog elementa i glavnog nosača

Maksimalna vlačna sila sa kojom se ulazi u proračun:





$$N_d = 92.56 \text{ kN (vlak)}$$

N_d silu rastavljamo da dvije komponente $N_{d,1}$ i $N_{d,2}$

$$N_{d,1} = N_d \times \cos 7.5^\circ = 91.76 \text{ kN}$$

$$N_{d,2} = N_d \times \sin 7.5^\circ = 12.08 \text{ kN}$$

Kod analize vijaka na ploči glavnog nosača vrijednosti $N_{d,1}$ i $N_{d,2}$ množimo sa 2

Spoj čelične ploče i glavnog nosača odabранa 4 vijaka M 16 KV 8.8.

Otpornost na posmik

$$F_{v,Rd} = \frac{0.6 \times f_{ub} \times A_s}{Y_{Mb}} = 77.18 \text{ kN}$$

$$F_{v,Rd(4)} = 308.73 \text{ kN}$$

$$2 \times N_{d,2} = 24.16 \text{ kN}$$

$$2 \times N_{d,2} \leq F_{v,Rd(4)}$$

$$24.46 \text{ kN} \leq 308.73 \text{ kN}$$

Spajala zadovoljavaju iskoristivost 8 %

Otpornost na vlak

$$F_{t,Rd} = \frac{0.9 \times f_{ub} \times A_s}{Y_{Mb}} = 115.77 \text{ kN}$$

$$F_{t,Rd(4)} = 463.10 \text{ kN}$$

$$2 \times N_{d,1} = 183.52 \text{ kN}$$

$$2 \times N_{d,1} \leq F_{t,Rd(4)}$$

$$183.52 \text{ kN} \leq 463.10 \text{ kN}$$

Spajala zadovoljavaju iskoristivost 39 %



Spoj čelične ploče i horizontalnog elementa odabrana 2 vijaka M 16 KV 8.8.

$$N_d = 92.56 \text{ kN}$$

Otpornost na posmik

$$F_{v,Rd} = \frac{0.6 \times f_{ub} \times A_s}{\gamma_{Mb}} = 77.18 \text{ kN}$$

$$F_{v,Rd(2)} = 154.36 \text{ kN}$$

$$N_d \leq F_{v,Rd(2)}$$

$$92.56 \text{ kN} \leq 154.36 \text{ kN}$$

Spajala zadovoljavaju iskoristivost 59 %

Otpornost na pritisak po omotaču rupe ploče d=8 mm

$$e_1 = 83 \text{ mm}$$

$$d_0 = 18 \text{ mm}$$

$$p_1 = \infty \rightarrow \text{jedan red rupa}$$

$$f_{ub} = 800 \text{ N/mm}^2$$

$$f_y = 360 \text{ N/mm}^2$$

$$\alpha = 1 \text{ (mjerodavna najmanja vrijednost)}$$

$$\frac{e_1}{3 \times d_0} = 1.54$$

$$\frac{p_1}{3 \times d_0} - \frac{1}{4} = \infty$$

$$\frac{f_{ub}}{f_y} = 2.22$$

1

$$F_{b,Rd} = \frac{2.5 \times \alpha \times f_u \times d \times t}{\gamma_{Mb}} = 103.68 \text{ kN}$$

$$F_{b,Rd(4)} = 414.72 \text{ kN}$$

$$N_d \leq F_{b,Rd(4)}$$

$$92.56 \text{ kN} \leq 414.72 \text{ kN}$$

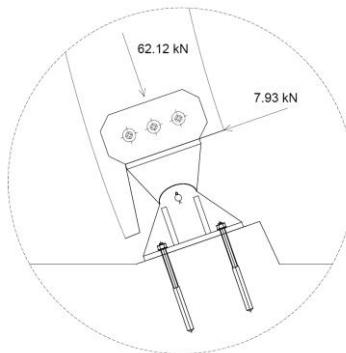
Spajala zadovoljavaju iskoristivost 22 %



Spoj glavnog nosača na temelj

Maksimalna tlačna sila sa kojom se ulazi u proračun:

$$N_d = \sqrt{62.12^2 + 7.93^2} = 62.63 \text{ kN}$$



Otpornost na posmik trna promjera 25mm

$$F_{v,Rd} = \frac{0.6 \times f_{ub} \times A_s}{\gamma_{Mb}} = 188.49 \text{ kN}$$

$$N_d \leq F_{v,Rd}$$

$$62.63 \text{ kN} \leq 188.49 \text{ kN}$$

Spajala zadovoljavaju iskoristivost 33 %

Otpornost na pritisak po omotaču rupe gornje ploče d=20 mm

$$e_1 = 50 \text{ mm}$$

$$d_0 = 25 \text{ mm}$$

$$p_1 = \infty \rightarrow \text{jedna rupa}$$

$$f_{ub} = 800 \text{ N/mm}^2$$

$$f_y = 360 \text{ N/mm}^2$$

$$\alpha = 0.66 \quad (\text{mjerodavna vrijednost}) \quad \text{najmanja}$$

$$\frac{e_1}{3 \times d_0} = 0.66$$

$$\frac{p_1}{3 \times d_0} - \frac{1}{4} = \infty$$

$$\frac{f_{ub}}{f_y} = 2.22$$

1



$$F_{b,Rd} = \frac{2.5 \times \alpha \times f_u \times d \times t}{\gamma_{Mb}} = 237.60 \text{ kN}$$

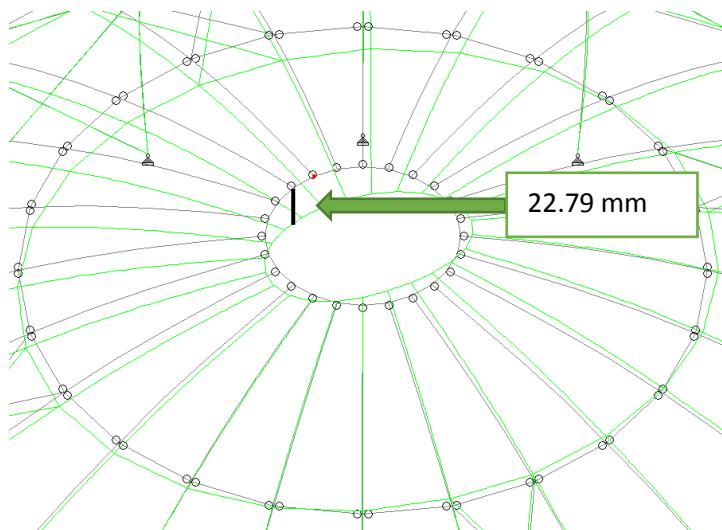
$$N_d \leq F_{b,Rd}$$

$$62.63 \text{ kN} \leq 237.60 \text{ kN}$$

Spajala zadovoljavaju iskoristivost 26 %

GSU - progib kupole posebne geometrije

Najnepovoljnija kombinacija opterećenja kod koje dolazi do najvećeg pomaka je 207
(Stalno + Snijeg 2 + Vjetar + Unutarnji podtlak)



Slika 10 Maksimalni progib sustava-kombinacija opterećenja 207

Maksimalni konačni progib

$$u_{fin} = 22.79 \text{ mm}$$

Maksimalni dopušteni progib l/200

$$l/200 = 100 \text{ mm}$$

$$u_{fin} \leq l/200$$

$$22.79 \text{ mm} \leq 100 \text{ mm}$$

Progib zadovoljava