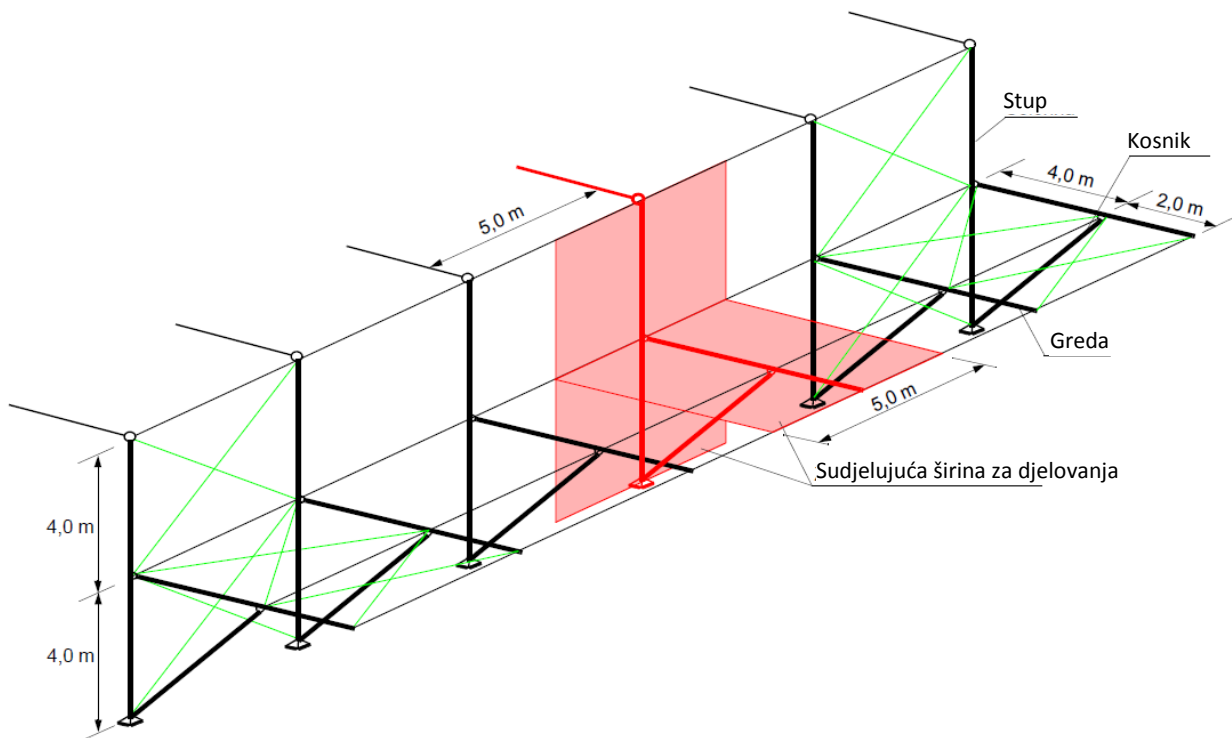
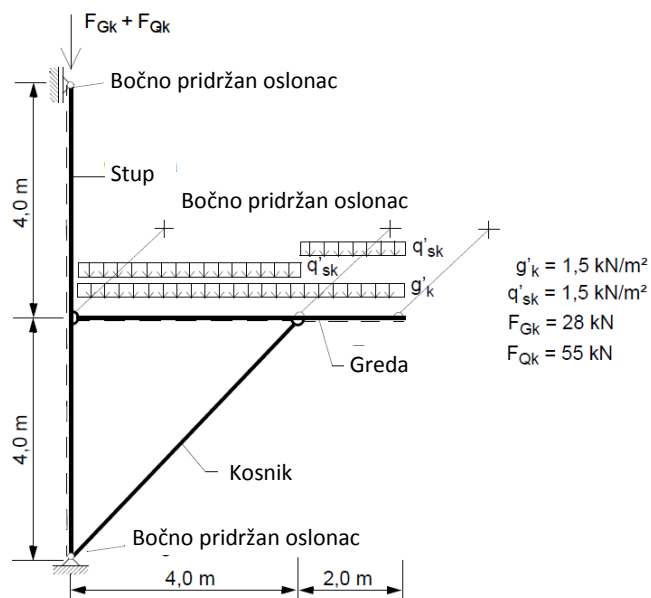


1. Primjer proračuna graničnih stanja nosivosti elemenata i spojeva prema normi HRN EN 1995-1-1

Treba proračunati granična stanja nosivosti elemenata i karakterističnih priključaka konstrukcije prikazane na slici 4. Shema opterećenja i način oslanjanja prikazani su na slici 5.



Slika 4: Aksonometrijski prikaz konstrukcije s drvenim veznim sustavom



Slika 5: Prikaz opterećenja, oslanjanja i bočnih pridržanja elemenata glavnog veznog sustava

2.1 Svojstva materijala, utjecaji okruženja na svojstva i opterećenje

Razred uporabe: 2 (natkrivena konstrukcija)

$$k_{\text{mod}} = 0,9$$

$$k_{\text{def}} = 0,8$$

Parcijalni koeficijenti za materijal:

$$\gamma_M = 1,30 \text{ (GSN)}$$

$$\gamma_M = 1,0 \text{ (GSU)}$$

Proračunska svojstva materijala:

Razred čvrstoće lijepljenog lameliranog drva: GL 24h

$$f_{m,d} = 0,9 \cdot 24,0 / 1,30 = 16,62 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{v,d} = 0,9 \cdot 2,7 / 1,30 = 1,87 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{t,0,d} = 0,9 \cdot 16,5 / 1,30 = 11,42 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{c,0,d} = 0,9 \cdot 24,0 / 1,30 = 16,62 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{c,90,d} = 0,9 \cdot 2,7 / 1,30 = 1,87 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{0,mean} = 11600 \text{ N/mm}^2$$

$$G_{mean} = 720 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{0,05} = 9400 \text{ N/mm}^2$$

$$G_{0,05} \approx 0,8 G_{mean} = 580 \text{ N/mm}^2$$

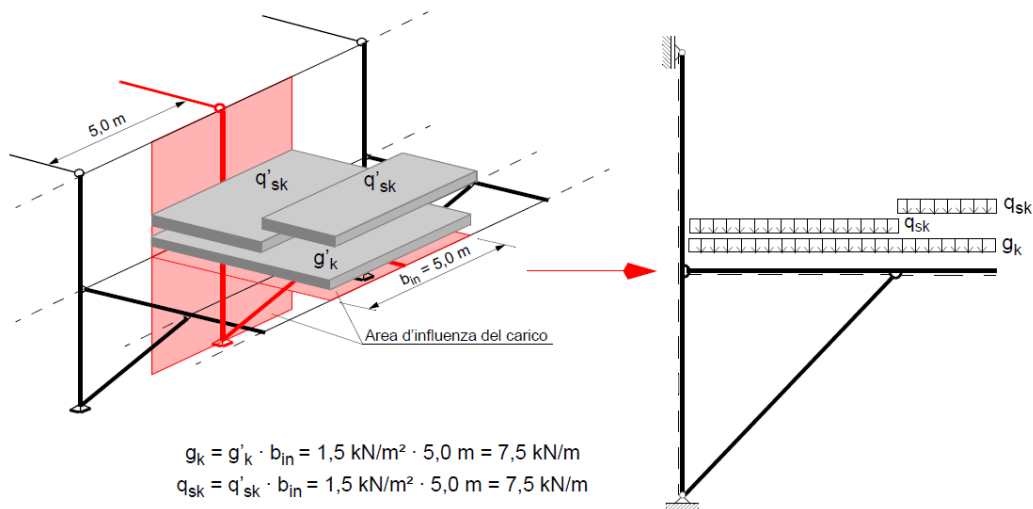
Geometrijski podaci presjeka:

Stup: $b/h = 180/660 \text{ mm}$ jednodijelni presjek

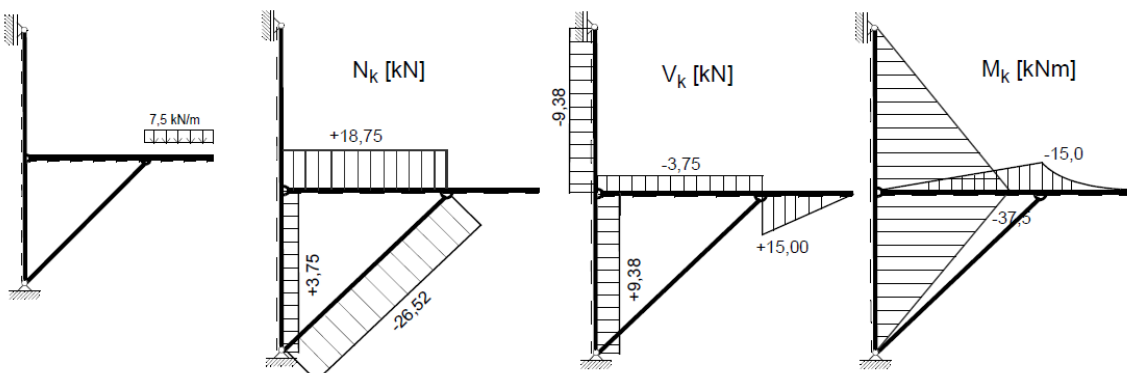
Greda: $2xb/h = 2 \times 100/280 \text{ mm}$ dvodijelni presjek

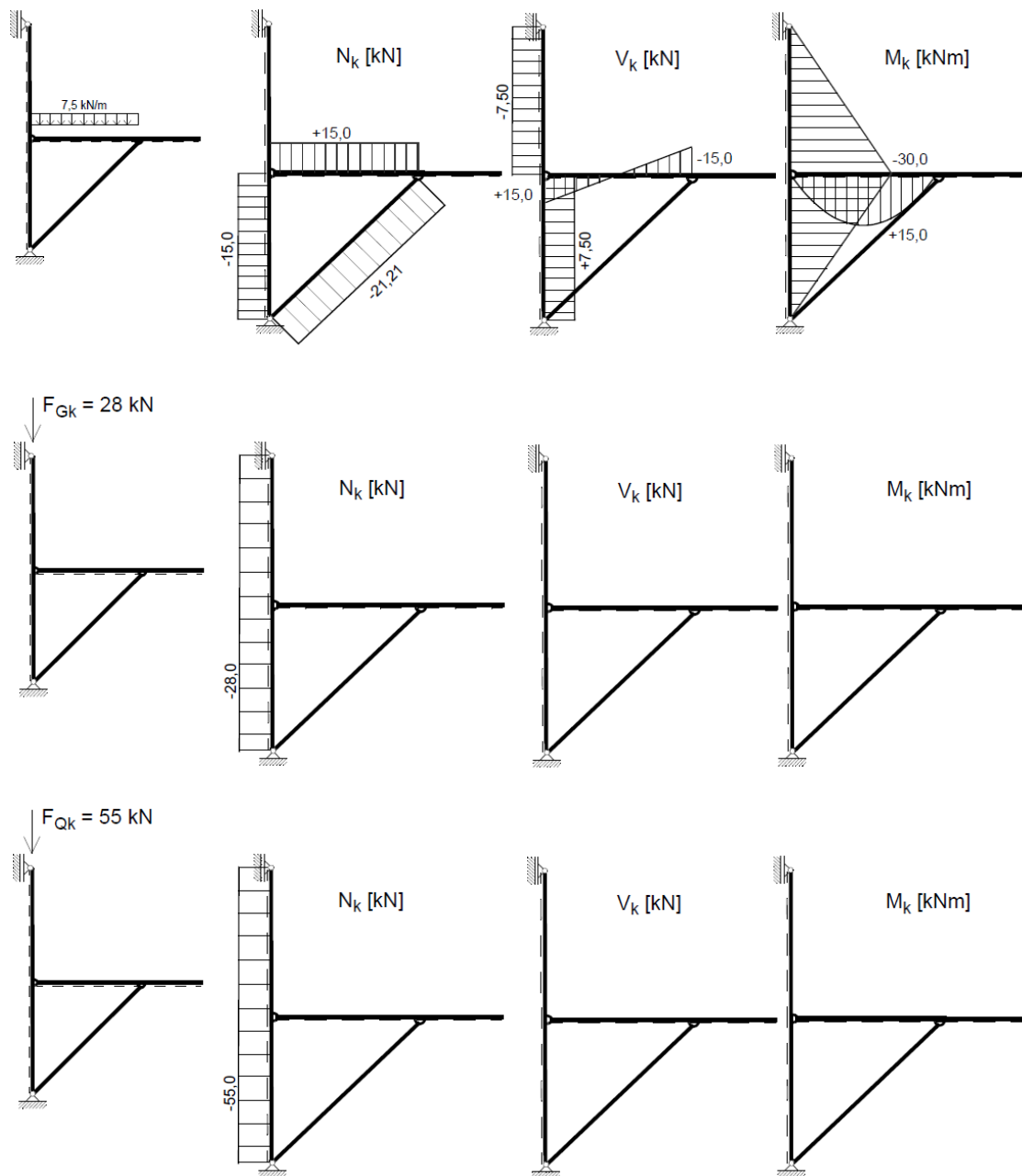
Kosnik: $b/h = 180/180 \text{ mm}$ jednodijelni presjek

2.2 Karakteristična opterećenja i unutrašnje sile



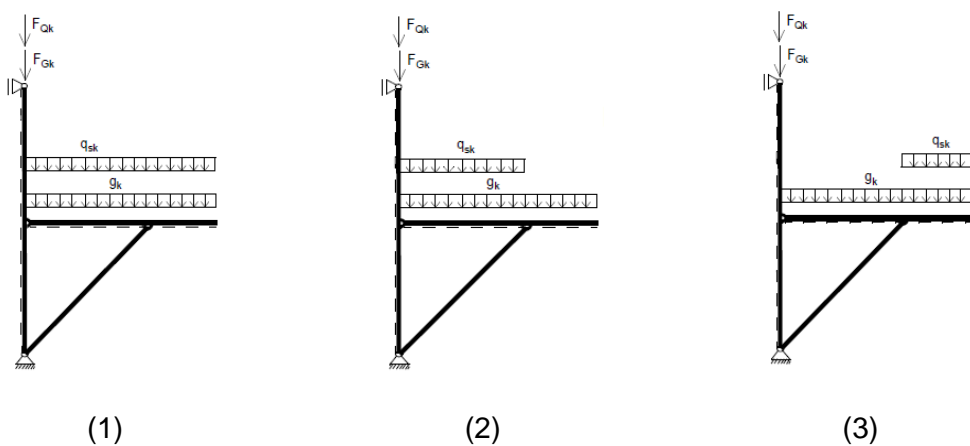
Slika 3: Karakteristične vrijednosti opterećenja /m¹ grede – stalno (g_k) i kratkotrajno promjenjivo djelovanje (q_{sk})





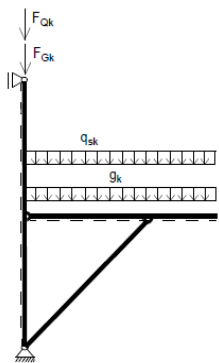
Slika 4: Unutrašnje sile i momenti savijanja od pojedinačnih karakterističnih opterećenja

2.3 Proračunske kombinacije



Slika 5: Modeli opterećenja za proračunske kombinacije (1), (2) i (3) s jednim promjenjivim djelovanjem

2.3.1 Proračunska kombinacija 1



Stup:

$$N_d(I) = 1,35 \cdot (-28,0) + 1,5 \cdot (-55,0) = -120,30 \text{ kN}$$

$$N_d(II) = 1,35 \cdot (-28,0 - 15,0 + 3,75) + 1,5 \cdot (-55,0 - 15,0 + 3,75) = -152,36 \text{ kN}$$

$$V_d = 1,35 \cdot (7,5 + 9,38) + 1,5 \cdot (7,5 + 9,38) = 48,11 \text{ kN}$$

$$M_d = 1,35 \cdot (-30,0 - 37,5) + 1,5 \cdot (-30,0 - 37,5) = -192,38 \text{ kNm}$$

Kosnik:

$$N_d = 1,35 \cdot (-21,21 - 26,52) + 1,5 \cdot (-21,21 - 26,52) = -136,03 \text{ kN}$$

Greda:

$$N_d = 1,35 \cdot (15,0 + 18,75) + 1,5 \cdot (15,0 + 18,75) = 96,19 \text{ kN}$$

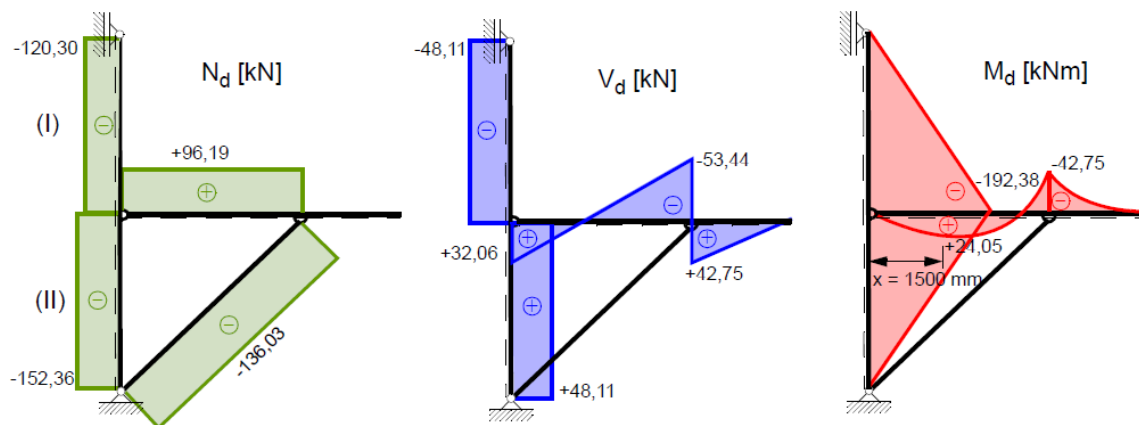
$$V_{d,B} = 1,35 \cdot (15,0 - 3,75) + 1,5 \cdot (15,0 - 3,75) = 32,06 \text{ kN}$$

$$V_{d,D,I} = 1,35 \cdot (-15,0 - 3,75) + 1,5 \cdot (-15,0 - 3,75) = -53,44 \text{ kN}$$

$$V_{d,D,d} = 1,35 \cdot (15,0) + 1,5 \cdot (15,0) = 42,75 \text{ kN}$$

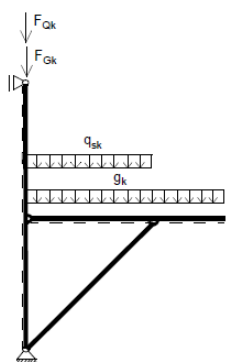
$$M_{d,D} = 1,35 \cdot (-15,0) + 1,5 \cdot (-15,0) = -42,75 \text{ kNm}$$

$$M_{d,max} = (1,35 + 1,5) \cdot ((15,0 - 3,75)^2 / (2 \cdot 7,5)) = 24,05 \text{ kNm}$$



Slika 6: Unutrašnje sile i momenti savijanja za proračunsku kombinaciju (1)

2.3.2 Proračunska kombinacija 2



Stup:

$$N_d(I) = 1,35 \cdot (-28,0) + 1,5 \cdot (-55,0) = -120,30 \text{ kN}$$

$$N_d(II) = 1,35 \cdot (-28,0 - 15,0 + 3,75) + 1,5 \cdot (-55,0 - 15,0) = -157,99 \text{ kN}$$

$$V_d = 1,35 \cdot (7,5 + 9,38) + 1,5 \cdot (7,5) = 34,04 \text{ kN}$$

$$M_d = 1,35 \cdot (-30,0 - 37,5) + 1,5 \cdot (-30,0) = -136,13 \text{ kNm}$$

Kosnik:

$$N_d = 1,35 \cdot (-21,21 - 26,52) + 1,5 \cdot (-21,21) = -96,25 \text{ kN}$$

Greda:

$$N_d = 1,35 \cdot (15,0 + 18,75) + 1,5 \cdot (15,0) = 68,06 \text{ kN}$$

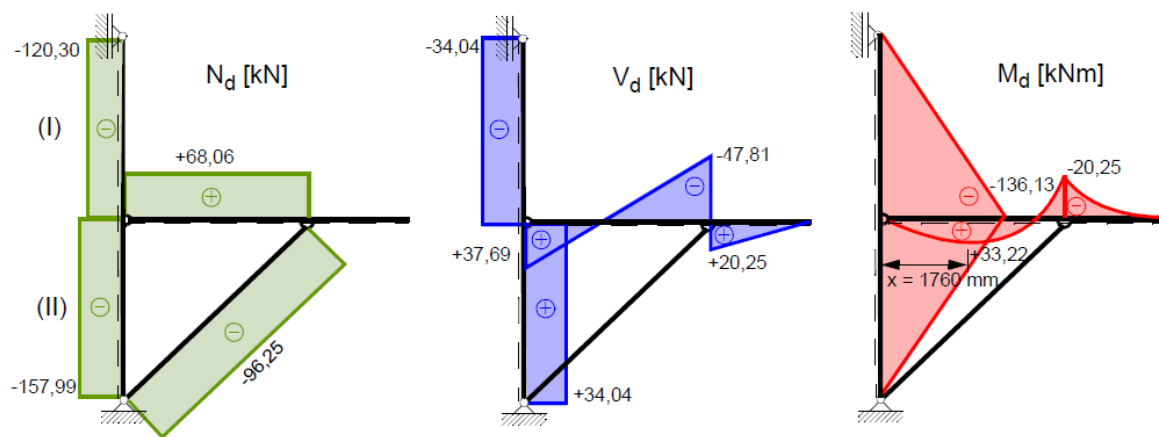
$$V_{d,B} = 1,35 \cdot (15,0 - 3,75) + 1,5 \cdot (15,0) = 37,69 \text{ kN}$$

$$V_{d,D,l} = 1,35 \cdot (-15,0 - 3,75) + 1,5 \cdot (-15,0) = -47,81 \text{ kN}$$

$$V_{d,D,d} = 1,35 \cdot (15,0) + 1,5 \cdot (0) = 20,25 \text{ kN}$$

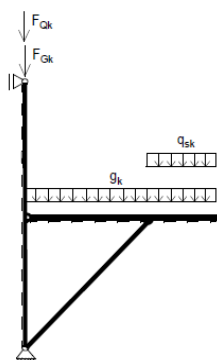
$$M_{d,D} = 1,35 \cdot (-15,0) + 1,5 \cdot (0) = -20,25 \text{ kNm}$$

$$M_{d,max} = 37,69 \cdot 1,76 - (1,35 + 1,5) \cdot 7,5 \cdot (1,76^2/2) = 33,22 \text{ kNm}$$



Slika 7: Unutrašnje sile i momenti savijanja za proračunsku kombinaciju (2)

2.3.3 Proračunska kombinacija 3



Stup:

$$N_d(I) = 1,35 \cdot (-28,0) + 1,5 \cdot (-55,0) = -120,30 \text{ kN}$$

$$N_d(II) = 1,35 \cdot (-28,0 - 15,0 + 3,75) + 1,5 \cdot (-55,0 + 3,75) = -129,86 \text{ kN}$$

$$V_d = 1,35 \cdot (7,5 + 9,38) + 1,5 \cdot (9,38) = 36,86 \text{ kN}$$

$$M_d = 1,35 \cdot (-30,0 - 37,5) + 1,5 \cdot (-37,5) = -147,38 \text{ kNm}$$

Kosnik:

$$N_d = 1,35 \cdot (-21,21 - 26,52) + 1,5 \cdot (-26,52) = -104,22 \text{ kN}$$

Greda:

$$N_d = 1,35 \cdot (15,0 + 18,75) + 1,5 \cdot (18,75) = 73,69 \text{ kN}$$

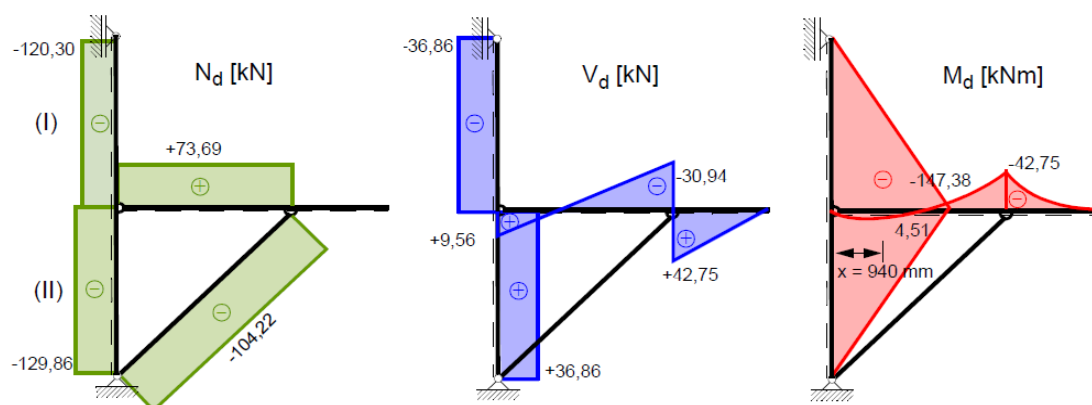
$$V_{d,B} = 1,35 \cdot (15,0 - 3,75) + 1,5 \cdot (-3,75) = 9,56 \text{ kN}$$

$$V_{d,D,I} = 1,35 \cdot (-15,0 - 3,75) + 1,5 \cdot (-3,75) = -30,94 \text{ kN}$$

$$V_{d,D,d} = 1,35 \cdot (15,0) + 1,5 \cdot (15,0) = 42,75 \text{ kN}$$

$$M_{d,D} = 1,35 \cdot (-15,0) + 1,5 \cdot (-15,0) = -42,75 \text{ kNm}$$

$$M_{d,max} = 9,56 \cdot 0,94 - 1,35 \cdot 7,5 \cdot (0,94^2/2) = 4,51 \text{ kNm}$$



Slika 8: Unutrašnje sile i momenti savijanja za proračunsku kombinaciju (3)

2.4 Provjere graničnih stanja nosivosti elemenata

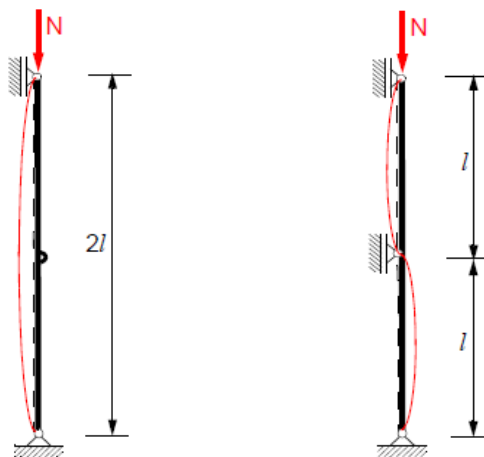
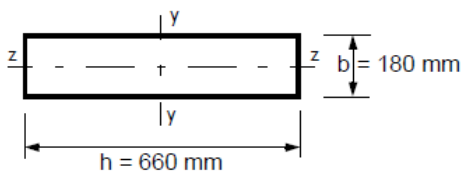
2.4.1 Stup

2.4.1.1 Geometrijski podaci

$$A = b \cdot h = 180 \cdot 660 = 1,19 \cdot 10^5 \text{ mm}^2$$

$$l_{i,y} = 2 \cdot l = 2 \cdot 400 = 800 \text{ mm}$$

$$l_{i,z} = l = 400 \text{ mm}$$



Slika 9: Dimenzije presjeka i duljine izvijanja za izvijanje u ravnini ($l_{i,y}$) i bočno izvijanje ($l_{i,z}$)

$$W_y = \frac{b \cdot h^2}{6} = \frac{180 \cdot 600^2}{6} = 1,31 \cdot 10^7 \text{ mm}^3$$

$$W_z = \frac{h \cdot b^2}{6} = \frac{600 \cdot 180^2}{6} = 3,56 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

$$I_y = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{180 \cdot 600^3}{12} = 4,31 \cdot 10^9 \text{ mm}^4$$

$$I_z = \frac{h \cdot b^3}{12} = \frac{600 \cdot 180^3}{12} = 3,21 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$$

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{4,31 \cdot 10^9}{1,19 \cdot 10^5}} = 190 \text{ mm}$$

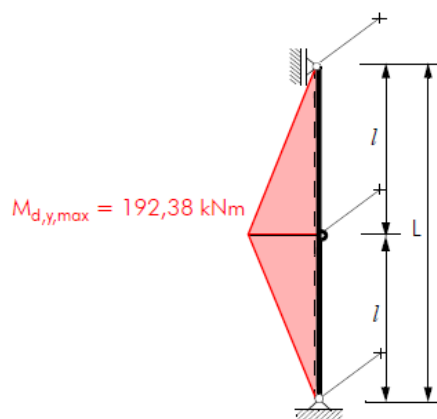
$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} = \sqrt{\frac{3,21 \cdot 10^8}{1,19 \cdot 10^5}} = 52 \text{ mm}$$

Razmak bočnih pridrzanja:

$$a = a_{\max} = l = 4000 \text{ mm}$$

Proračunska duljina savijanja za opterećenje u težištu presjeka:

$$l_{ef} = 4000 \text{ mm}$$



Slika 10: Bočna pridrzanja stupa – spriječeno bočno torzijsko izvijanje na osloncima i u čvoru B

2.4.1.2 Provjera stabilnosti stupa napregnutog na kombinirani tlak i savijanje

Učinak osne tlačne sile na stabilnost

$$\lambda_y = \frac{l_{i,y}}{i_y} = \frac{8000}{190} = 42$$

vitkost za izvijanje u ravnini

$$\lambda_z = \frac{l_{i,z}}{i_z} = \frac{4000}{52} = 77$$

vitkost za bočno izvijanje

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{42}{\pi} \sqrt{\frac{24,0}{9400}} = 0,68 > 0,3 \text{ relativna vitkost za izvijanje u ravni}$$

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{77}{\pi} \sqrt{\frac{24,0}{9400}} = 1,24 > 0,3 \quad \text{relativna vitkost za bočno izvijanje}$$

Faktori izvijanja:

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} = \frac{1}{0,75 + \sqrt{0,75^2 - 0,68^2}} = 0,94$$

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} = \frac{1}{1,32 + \sqrt{1,32^2 - 1,24^2}} = 0,56$$

$$k_y = 0,5 \left(1 + \beta_c (\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2 \right) = 0,5 \cdot (1 + 0,1 \cdot 0,38 + 0,68^2) = 0,75$$

$$k_z = 0,5 \left(1 + \beta_c (\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2 \right) = 0,5 \cdot (1 + 0,1 \cdot 0,94 + 1,24^2) = 1,32$$

$\beta_c = 0,1$ faktor ravnosti za lijepljeno lamelirano drvo

$$N_{c,0,d} = |N_{d,max}| = 152,36 \text{ kN} \quad \text{proračunska kombinacija (1)}$$

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{152,36 \cdot 10^3}{1,19 \cdot 10^5} = 1,28 \text{ N/mm}^2$$

$$N_{c,0,d} = |N_{d,max}| = 157,99 \text{ kN} \quad \text{proračunska kombinacija (2)}$$

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{157,99 \cdot 10^3}{1,19 \cdot 10^5} = 1,33 \text{ N/mm}^2$$

Učinak savijanja na stabilnost

Kritični moment savijanja:

$$M_{y,crit} = \frac{\pi}{l_{ef}} \cdot \sqrt{(E_{0,05} I_z) \cdot (G_{0,05} I_{tor})} = \frac{\pi \cdot \sqrt{3,02 \cdot 6,19 \cdot 10^{23}}}{4000} = 107,31 \cdot 10^7 \text{ Nmm}$$

$$\eta = \frac{1}{3} \cdot \left[1 - 0,63 \cdot \left(\frac{b}{h} \right) + 0,052 \cdot \left(\frac{b}{h} \right)^2 \right] = \frac{1 - 0,63 \cdot 0,273 + 0,052 \cdot 0,273^2}{3} = 0,277$$

$$I_{tor} = \eta \cdot b^3 \cdot h = 0,277 \cdot 180^3 \cdot 660 = 1067552902 \text{ mm}^4$$

$$E_{0,05} I_z = 9400 \cdot 320760000 = 3,02 \cdot 10^{12} \text{ Nmm}^2$$

$$G_{0,05} I_{tor} = 580 \cdot 1067552902 = 6,19 \cdot 10^{11} \text{ Nmm}^2$$

Kritično naprezanje savijanja prema klasičnoj teoriji stabilnosti:

$$\sigma_{m,crit} = \frac{M_{y,crit}}{W_y} = \frac{107,31 \cdot 10^7}{1,31 \cdot 10^7} = 82,12 \text{ N/mm}^2$$

Relativna vitkost pri savijanju i faktor bočnog torzijskog izvijanja:

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} = \sqrt{\frac{24,0}{82,12}} = 0,54 < 0,75 \quad \rightarrow \quad k_{crit} = 1,0$$

$$M_{y,d} = |M_{d,max}| = 192,38 \text{ kNm} \quad \text{proračunska kombinacija (1)}$$

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{192,38 \cdot 10^6}{1,31 \cdot 10^7} = 14,72 \text{ N/mm}^2$$

$$M_{y,d} = |M_{d,max}| = 136,13 \text{ kNm} \quad \text{proračunska kombinacija (2)}$$

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{136,13 \cdot 10^6}{1,31 \cdot 10^7} = 10,42 \text{ N/mm}^2$$

Provjera stabilnosti stupa napregnutog kombiniranim tlakom i savijanjem

$$M_{y,d} = |M_{d,max}| = 192,38 \text{ kNm} \quad \text{proračunska kombinacija (1)}$$

$$N_{c,0,d} = |N_{d,max}| = 152,36 \text{ kN}$$

$$\left(\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} f_{m,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} f_{c,0,d}} \leq 1 \quad \text{provjera stabilnosti izvan ravnine}$$

$$\left(\frac{14,72}{1,0 \cdot 16,62} \right)^2 + \frac{1,28}{0,56 \cdot 16,62} = 0,78 + 0,14 = 0,92 < 1$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad \text{provjera stabilnosti u ravnini}$$

$$\frac{1,28}{0,94 \cdot 16,62} + \frac{14,72}{16,62} = 0,08 + 0,89 = 0,97 < 1$$

2.4.1.3 Provjera otpornosti presjeka u čvoru B na kombinirani tlak i savijanje

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1$$

Proračunska naprezanja u priključku B izvedenom mehaničkim spajalima treba odrediti s neto geometrijskim vrijednostim presjeka, A_{net} , $W_{y,net}$

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{c,0,d}}{A_{net}} = \frac{152,36}{(660 - 3 \cdot 16) \cdot 180} = \frac{152360}{110160} = 1,38 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{y,d}}{W_{y,net}} \approx \frac{192,38 \cdot 10^6}{\frac{(660 - 3 \cdot 16)^2 \cdot 180}{6}} = \frac{14,72}{0,86} = 17,12 \text{ N/mm}^2$$

$$\left(\frac{1,38}{16,62}\right)^2 + \frac{17,12}{16,62} = 0,01 + 1,03 = 1,04 > 1^1$$

$$M_{y,d} = |M_{d,max}| = 192,38 \text{ kNm}$$

proračunska kombinacija (1)

$$N_{c,0,d} = |N_{d,max}| = 152,36 \text{ kN}$$

2.4.1.4 Provjera posmične otpornosti na osloncima stupa

$$V_d = |V_{d,max}| = 48,11 \text{ kN}$$

proračunska kombinacija (1)

$$\tau_{v,d} = 1,5 \cdot \frac{V_d}{b_{ef} \cdot h} = 1,5 \cdot \frac{48,11 \cdot 10^3}{(0,67 \cdot 180) \cdot 660} = 0,91 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_{v,d} = 0,91 \text{ N/mm}^2 < f_{v,d} = 1,87 \text{ N/mm}^2$$

2.4.2 Kosnik

2.4.2.1 Geometrijski podaci

Duljina i razmak bočnih pridržanja:

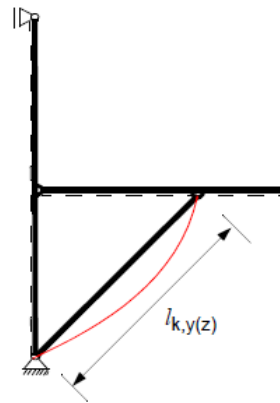
$$l = a = 5657 \text{ mm}$$

Duljine izvijanja i proračunska duljina savijanja:²

$$l_{i,y} = l_{i,z} = 4000\sqrt{2} = 5657 \text{ mm}$$

$$a = l_{ef} = 5657 \text{ mm}$$

Dimenzije presjeka: $b/h = 180/180 \text{ mm/mm}$



Slika 11: Duljine izvijanja kosnika

$$A = 180 \cdot 180 = 3,24 \cdot 10^4 \text{ mm}^2$$

$$W_y = W_z = \frac{180 \cdot 180^2}{6} = 9,72 \cdot 10^5 \text{ mm}^3$$

$$I_y = I_z = \frac{180 \cdot 180^3}{12} = 8,75 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$$

$$i_y = i_z = \sqrt{\frac{I_y(z)}{A}} = 0,289 \cdot 180 = 52 \text{ mm}$$

¹ Oslabljenja presjeka zbog priključka dijagonala sprega (bočno pridržan presjek) zanemarena su jer se pretpostavlja da se u takvom priključku primjenjuju sitna spajala (npr. dijagonale sprega su čavlane čelične trake).

² U provjeri stabilnosti treba uzeti u obzir ekscentricitet zbog posrednog priključka kosnika na dvodijelnu gredu (slike 12 i 13).

2.4.2.2 Provjera stabilnosti kosnika napretnutog kombiniranim tlakom i savijanjem

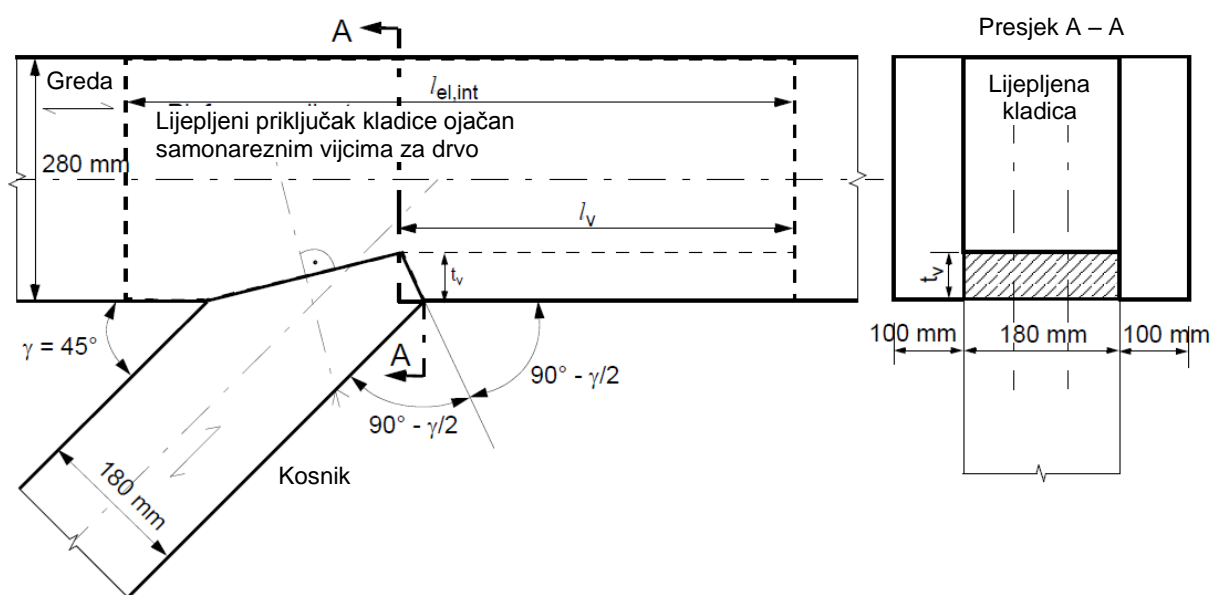
$$N_{c,0,d} = |N_{d,max}| = 136,03 \text{ kN}$$

proračunska kombinacija (1)

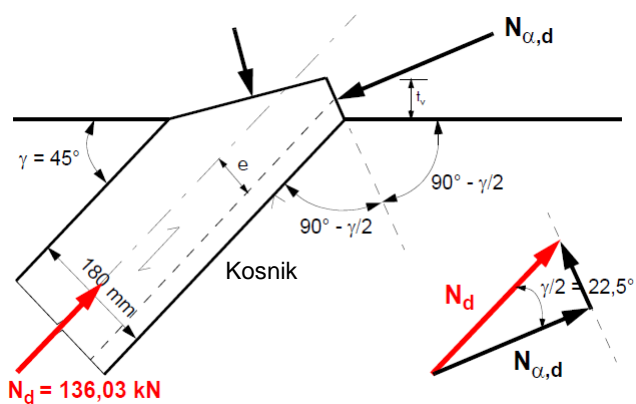
$$\sigma_{c,0,d} = \frac{136,03 \cdot 10^3}{3,24 \cdot 10^4} = 4,20 \text{ N/mm}^2$$

$$M_{y,d} = N_{c,0,d} \cdot e / 2 = 136,03 \cdot 0,055 / 2 = 136,03 \cdot 0,0275 = 3,74 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{3,74}{9,72 \cdot 10^5} = 3,85 \text{ N/mm}^2$$



Slika 12: Posredni tesarski priljučak kosnika na dvodijelnu grede – zasijecanje kladice



$$\frac{e}{2} = \frac{\left(\frac{h}{2}\right) - \left(\frac{t_v}{2}\right)}{2} = \frac{\left(\frac{180}{2}\right) - \left(\frac{70}{2}\right)}{2} = 27,5 \text{ mm}$$

Slika 13: Ekscentričnost sile na čelu zasjeka

Učinak osne tlačne sile na stabilnost

$$\lambda_y = \lambda_z = \frac{5657}{52} = 109$$

vitkosti za izvijanje u ravnini i bočno izvijanje

$$\lambda_{rel,y} = \lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_{y(z)}}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{109}{\pi} \sqrt{\frac{24,0}{9400}} = 1,75 > 0,3 \quad \text{relativne vitkosti}$$

Faktori izvijanja:

$$k_{c,y} = k_{c,z} = \frac{1}{k_{y(z)} + \sqrt{k_{y(z)}^2 - \lambda_{rel,y(z)}^2}} = \frac{1}{2,1 + \sqrt{2,1^2 - 1,75^2}} = 0,31$$

$$k_y = k_z = 0,5 \left(1 + \beta_c (\lambda_{rel,y(z)} - 0,3) + \lambda_{rel,y(z)}^2 \right) = 0,5 \cdot (1 + 0,1 \cdot 1,45 + 1,75^2) = 2,1$$

$$\beta_c = 0,1$$

za lijepljeno lamelirano drvo

Učinak savijanja na stabilnost

Kritični moment savijanja:

$$M_{y,crit} = \frac{\pi}{I_{ef}} \cdot \sqrt{(E_{0,05} I_z) \cdot (G_{0,05} I_{tor})} = \frac{\pi \cdot \sqrt{8,22 \cdot 856,47 \cdot 10^{19}}}{5657} = 208,43 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$\eta = \frac{1}{3} \cdot \left[1 - 0,63 \cdot \left(\frac{b}{h} \right) + 0,052 \cdot \left(\frac{b}{h} \right)^2 \right] = \frac{1 - 0,63 \cdot 1,0 + 0,052 \cdot 1,0^2}{3} = 0,141$$

$$I_{tor} = \eta \cdot b^3 \cdot h = 0,277 \cdot 180^4 = 147,67 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

$$E_{0,05} I_z = 9400 \cdot 8,75 \cdot 10^7 = 8,22 \cdot 10^{11} \text{ Nmm}^2$$

$$G_{0,05} I_{tor} = 580 \cdot 147,67 \cdot 10^6 = 856,47 \cdot 10^8 \text{ Nmm}^2$$

Kritično naprezanje savijanja prema klasičnoj teoriji stabilnosti:

$$\sigma_{m,crit} = \frac{M_{y,crit}}{W_y} = \frac{208,43 \cdot 10^6}{9,72 \cdot 10^5} = 214,44 \text{ N/mm}^2$$

Relativna vitkost pri savijanju i faktor bočnog torzijskog izvijanja:

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} = \sqrt{\frac{24,0}{214,44}} = 0,33 < 0,75 \quad \rightarrow \quad k_{crit} = 1,0$$

Provjera stabilnosti kosnika napregnutog kombiniranim tlakom i savijanjem

$$\left(\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \cdot (k_h \cdot f_{m,d})} \right)^2 + \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} f_{c,0,d}} \leq 1 \quad \text{provjera stabilnosti izvan ravnine}$$

$$\left(\frac{3,85}{1,0 \cdot 1,1 \cdot 16,62} \right)^2 + \frac{4,20}{0,31 \cdot 16,62} = 0,04 + 0,82 = 0,86 < 1$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{k_h \cdot f_{m,d}} \leq 1$$

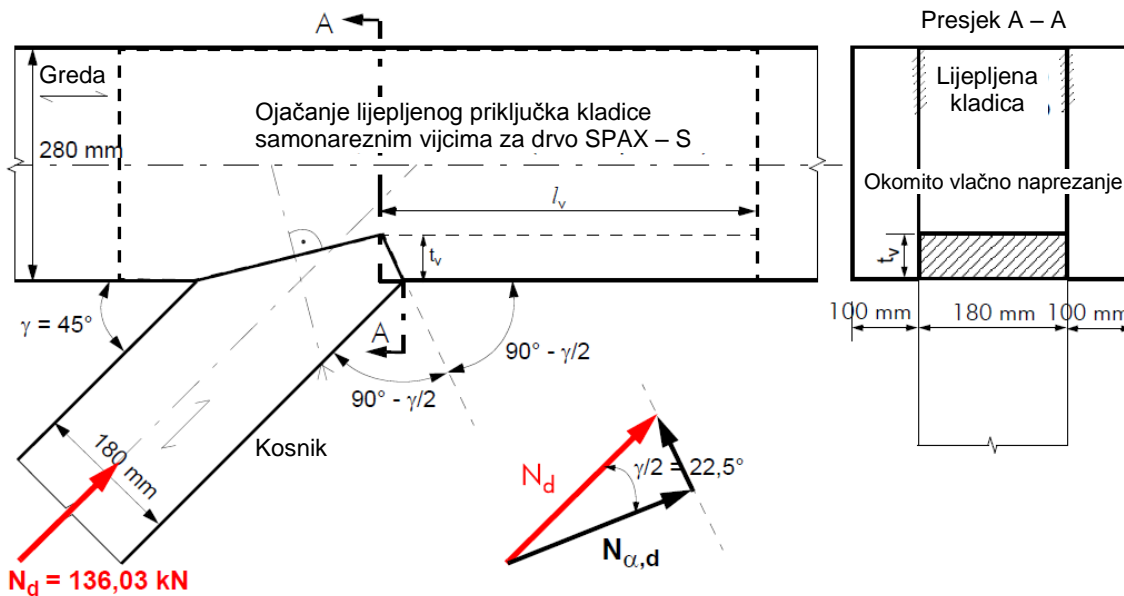
provjera stabilnosti u ravnini

$$\frac{4,20}{0,31 \cdot 16,62} + \frac{3,85}{1,1 \cdot 16,62} = 0,82 + 0,21 = 1,03 > 1$$

Faktor veličine k_h (za visinu $h = 180 \text{ mm} < 600 \text{ mm}$):

$$k_h = \min \left\{ \left(\frac{600}{h} \right)^{0,1}, 1,1 \right\} = \min \left\{ 1,13, 1,1 \right\} = 1,1$$

2.4.2.3 Provjera posrednog priključka kosnika na gredu u čvoru B



Slika 14: Posredni priključak kosnika – geometrija i sile u zasjeku u simetrali kuta

$$N_{c,0,d} = N_d = 136,03 \text{ kN}$$

$$N_{c,\alpha,d} = N_{\alpha,d} = N_d \cdot \cos \frac{\gamma}{2} = 136,03 \cdot \cos \left(\frac{45^\circ}{2} \right) = 125,68 \text{ kN}$$

Ograničenje dubine zasijecanja i odabrana dubina zasijecanja:

$$t_v \leq \frac{h}{4} = \frac{280}{4} \leq 70 \text{ mm}$$

$$t_v = 70 \text{ mm}$$

Ploština čela zasjeka:

$$A_1 = b \cdot \frac{t_v}{\cos \frac{\gamma}{2}} = 180 \cdot \frac{70}{\cos \left(\frac{45^\circ}{2} \right)} = 1,36 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

Provjera otpornosti čela zasjeka na tlak pod kutom $\alpha = \gamma/2 = 22,5^\circ$ na vlakanca:

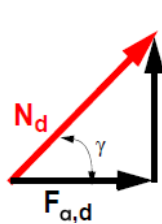
$$\sigma_{c,\alpha,d} \leq f_{c,\alpha,d}$$

$$\sigma_{c,\alpha,d} = \frac{125,68}{1,36 \cdot 10^4} = 9,24 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{c,\alpha,d} = \frac{f_{c,0,d}}{k_{c,90} f_{c,90,d} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} = \frac{16,62}{1,5 \cdot 1,87 \cdot \sin^2 22,5^\circ + \cos^2 22,5^\circ} = 9,55 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{c,\alpha,d} = 9,24 \text{ N/mm}^2 < f_{c,\alpha,d} = 9,55 \text{ N/mm}^2$$

Provjera otpornosti na posmik paralelno s vlakancima:



$$\tau_{v,d} = \frac{F_{\alpha,d}}{k_{cr} \cdot b \cdot l_v} \leq f_{v,d}$$

$$F_{\alpha,d} = N_d \cdot \cos \gamma = 136,03 \cdot \cos 45^\circ = 96,19 \text{ kN}$$

Ograničenja duljine posmika:

$$l_{v,\min} = 200 \text{ mm} \quad l_{v,\max} \leq 8 t_v = 8 \cdot 70 = 560 \text{ mm}$$

Povjera otpornosti na proračunskoj duljini posmika $l_{v,ef} = 430 \text{ mm}$:

$$\frac{F_{\alpha,d}}{k_{cr} \cdot b \cdot l_{v,ef}} = \frac{96,19}{0,67 \cdot 180 \cdot 430} = 1,85 \text{ N/mm}^2 < 1,87 \text{ N/mm}^2$$

2.4.3 Greda

2.4.3.1 Geometrijski podaci

Dimenzije dvodijelnog presjeka: $2xb/h = 2 \times 100/280 \text{ mm/mm}$

$$A = 2 \cdot 100 \cdot 280 = 5,6 \cdot 10^4 \text{ mm}^2$$

$$W_y = 2 \cdot \frac{100 \cdot 280^2}{6} = 2,61 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

$$I_y = 2 \cdot \frac{100 \cdot 280^3}{12} = 3,66 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$$

³ Faktor kojim se uzima u obzir učinak konfiguracije opterećenja, mogućnosti cijepanja i stupnja tlačnog deformiranja na proračunsku čvrstoću tlaka okomito na vlakanca: $k_{c,90} = 1,5$ (za masivno meko drvo kladice).

2.4.3.2 Provjera kombinirano napregnute grede savijanjem i vlakom

$$N_{t,0,d} = |N_{d,max}| = 96,19 \text{ kN} \quad \text{proračunska kombinacija (1)}$$

$$M_{y,d} = M_d = 24,05 \text{ kNm}$$

Moment savijanja zbog ekscentričnosti vlačne sile u presjeku s najvećim momentom savijanja:

$$e = \frac{x}{I} \cdot \left[\left(\frac{h}{2} \right) - \left(\frac{t_v}{2} \right) \right] = \frac{1500}{4000} \cdot \left[\left(\frac{280}{2} \right) - \left(\frac{70}{2} \right) \right] = 39,4 \text{ mm}$$

$$M_{y,e,d} = N_d \cdot e = 96,19 \cdot 0,0394 = 3,79 \text{ kNm}$$

$$\sum M_{y,d} = 24,05 + 3,79 = 27,84 \text{ kNm}$$

Provjera otpornosti presjeka kombinirano napretnog na savijanje i vlak:

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{k_h \cdot f_{m,d}} \leq 1,0$$

$$\frac{1,72}{11,42} + \frac{10,67}{1,08 \cdot 16,62} = 0,15 + 0,59 = 0,74 < 1$$

Faktor veličine k_h (za visinu $h = 280 \text{ mm} < 600 \text{ mm}$):

$$k_h = \min \left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{600}{h} \right)^{0,1} \\ 1,1 \end{array} \right. = 1,08$$

$$M_{y,d} = M_d = 33,89 \text{ kNm} \quad \text{proračunska kombinacija (2)}$$

$$N_{t,0,d} = |N_{d,max}| = 68,06 \text{ kN}$$

Moment savijanja zbog ekscentričnosti vlačne sile u presjeku s najvećim momentom savijanja:

$$e = \frac{x}{I} \cdot \left[\left(\frac{h}{2} \right) - \left(\frac{t_v}{2} \right) \right] = \frac{1760}{4000} \cdot \left[\left(\frac{280}{2} \right) - \left(\frac{70}{2} \right) \right] = 46,2 \text{ mm}$$

$$M_{y,e,d} = N_d \cdot e = 68,06 \cdot 0,0462 = 3,14 \text{ kNm}$$

$$\sum M_{y,d} = 33,89 + 3,14 = 37,03 \text{ kNm}$$

Provjera otpornosti presjeka kombinirano napretnog na savijanje i vlak:

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{k_h \cdot f_{m,d}} \leq 1,0$$

$$\frac{1,22}{11,42} + \frac{14,17}{1,08 \cdot 16,62} = 0,11 + 0,79 = 0,90 < 1$$

$$M_{y,d} = M_d = 42,75 \text{ kN}$$

proračunska kombinacija (3)

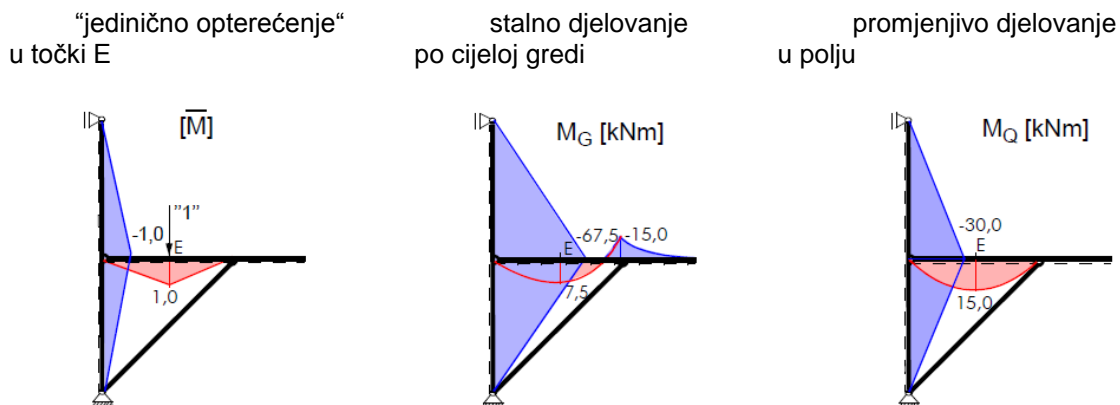
$$N_{t,0,d} = 0 \text{ kN}$$

Provjera se može zanemariti.

2.5 Provjere graničnih stanja uporabljivosti

2.5.1 Provjera progiba grede u polju

Proračun metodom virtualnog rada (zanemaruje se učinak posmika):



Slika 15: Dijagrami momenata savijanja

$$w_G = \frac{1 \cdot 10^{12}}{E_{0,mean} \cdot I_{y,B}^{grede}} \cdot \left[\frac{15,0 \cdot 1,0 \cdot 4,0}{2,4} + \frac{(-15,0) \cdot 1,0 \cdot 4,0}{4} \right] + \frac{1 \cdot 10^{12}}{E_{0,mean} \cdot I_y^{stupa}} \cdot \left[2 \cdot \frac{(-67,0) \cdot (-1,0) \cdot 4,0}{3} \right] =$$

$$= \frac{1 \cdot 10^{12}}{11600 \cdot 3,66 \cdot 10^8} \cdot [10,0] + \frac{1 \cdot 10^{12}}{11600 \cdot 4,31 \cdot 10^9} \cdot [180,0] = 6,0 \text{ mm}$$

$$w_Q = \frac{1 \cdot 10^{12}}{E_{0,mean} \cdot I_{y,B}^{grede}} \cdot \left[\frac{5}{12} \cdot 15,0 \cdot 1,0 \cdot 4,0 + \frac{1}{4} \right] + \frac{1 \cdot 10^{12}}{E_{0,mean} \cdot I_y^{stupa}} \cdot \left[2 \cdot \frac{1}{3} \cdot (-30,0) \cdot (-1,0) \cdot 4,0 \right] =$$

$$= \frac{1 \cdot 10^{12}}{11600 \cdot 3,66 \cdot 10^8} \cdot [25,0] + \frac{1 \cdot 10^{12}}{11600 \cdot 4,31 \cdot 10^9} \cdot [80,0] = 7,8 \text{ mm}$$

Trenutni progib u polju grede od stalnog i jednog promjenjivog djelovanja:

$$w_{inst} = w_{inst,G} + w_{inst,Q} \leq L / 300$$

$$w_{inst} = 6,0 + 7,8 = 13,8 \text{ mm} > 4000 / 300 = 13,3 \text{ mm}$$

Konačni neto progib u polju grede od stalnog i jednog promjenjivog djelovanja:

$$w_{net,fin} = w_{fin,G} + w_{fin,Q} = w_{inst} + w_{creep} \leq L / 150$$

$$w_{net,fin} = w_{fin,G} + w_{fin,Q} = w_{inst} + w_{creep} = w_{inst} + (w_{inst,G} \cdot k_{def} + w_{inst,Q} \cdot \psi_2 \cdot k_{def}) \leq L / 150$$

Pojedinačni učinci stalnog i promjenjivih djelovanja:

- Konačni progib od stalnog djelovanja, G:

$$w_{fin,G} = w_{inst,G} \cdot (1 + k_{def})$$

- Konačni progib od vodećeg promjenjivog djelovanja, Q = Q₁

$$w_{fin,Q_1} = w_{inst,Q_1} \cdot (1 + \psi_{2,1} k_{def})$$

$$w_{net,fin} = w_{inst} + (w_{inst,G} \cdot 0,8 + w_{inst,Q} \cdot 0 \cdot 0,8) \leq L / 150$$

$$\psi_2 = 0 \quad (\text{tablica 5, za kratkotrajno promjenjivo djelovanje})$$

$$k_{def} = 0,8 \quad (\text{tablica 1, za razred uporabe 2 i tablica 4, za LLD})$$

$$w_{net,fin} = 13,8 + (6,0 \cdot 0,8) = 13,8 + 4,8 = 18,6 \text{ mm} < L / 150 = 4000 / 150 = 26,7 \text{ mm}$$

2.5.2 Provjera horizontalnog pomaka stupa u čvoru B

Proračun metodom virtualnog rada (uzima se u obzir učinak posmika):

$$w_G = w_Q = \frac{1}{E_{0,mean} \cdot I_y^{stupa}} \cdot \left[2 \cdot 4,0 \cdot \frac{1}{3} \cdot (2,0 \cdot (-67,5)) \right] + \frac{1}{G_{mean} \cdot A^{stupa}} \cdot [2 \cdot 4,0 \cdot (-0,5) \cdot 16,88]$$

$$w_G = w_Q = \frac{1 \cdot 10^{12}}{11600 \cdot 4,31 \cdot 10^9} \cdot [-360] + \frac{1 \cdot 10^6}{720 \cdot \frac{1,19 \cdot 10^5}{1,2}} \cdot [-67,52] = -8,15 \text{ mm}$$

Trenutni horizontalni pomak stupa od stalnog i jednog promjenjivog djelovanja:

$$w_{inst} = w_{inst,G} + w_{inst,Q} \leq L / 300$$

$$w_{inst} = 2 \cdot 8,15 = 16,3 \text{ mm} < 8000 / 300 = 26,7 \text{ mm}$$

Konačni neto horizontalni pomak od stalnog i jednog promjenjivog djelovanja:

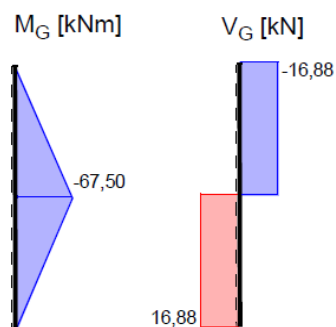
$$w_{net,fin} = w_{fin,G} + w_{fin,Q} = w_{inst} + w_{creep} \leq L / 150$$

$$w_{net,fin} = w_{fin,G} + w_{fin,Q} = w_{inst} + w_{creep} = w_{inst} + (w_{inst,G} \cdot k_{def} + w_{inst,Q} \cdot \psi_2 \cdot k_{def}) \leq L / 150$$

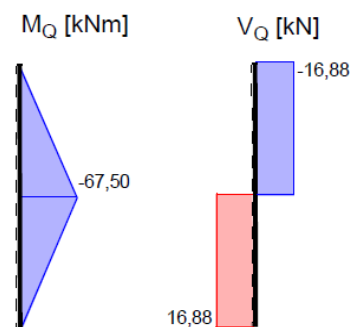
$$w_{net,fin} = w_{inst} + (w_{inst,G} \cdot 0,8 + w_{inst,Q} \cdot 0 \cdot 0,8) \leq L / 150$$

$$w_{\text{net,fin}} = 16,3 + (8,15 \cdot 0,8) = 16,3 + 6,5 = 22,8 \text{ mm} < L/150 = 8000/150 = 53,3 \text{ mm}$$

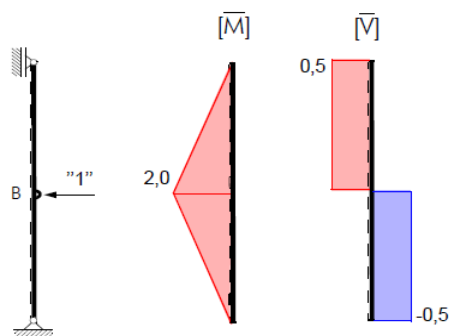
stalno djelovanje



promjenjivo djelovanje
po cijeloj gredi



“jedinično opterećenje“ u čvoru B



Slika 16: Dijagrami momenata savijanja i poprečnih sila

NAPOMENA: S obzirom da su dijagrami momenata od stalnog djelovanja jednaki onima od promjenjivih djelovanja, proračun se može provesti superpozicijom. Proračun deformiranja od stalnog i promjenjivog djelovanja treba provesti posebno.

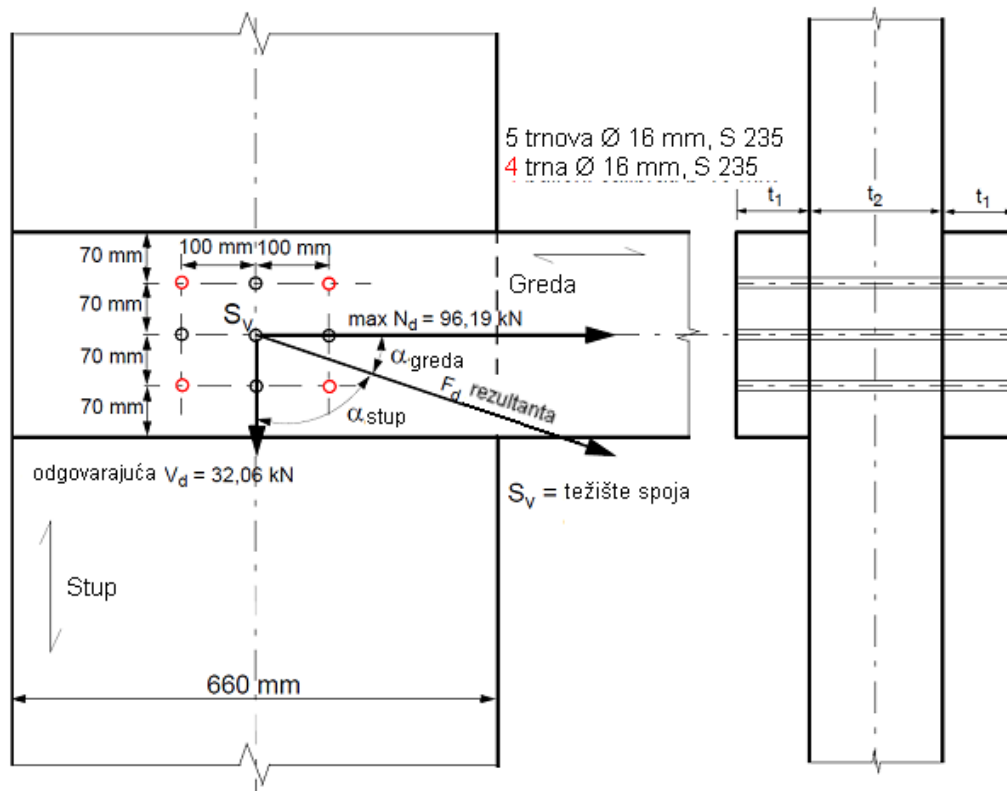
2.6 Proračun priključaka s mehaničkim spajalima

Za priključak grede na stup u čvoru B (slika 17) i priključak kosnika na gredu u čvoru D (slika 19), izveden je trnovima kvalitete čelik S 235 treba odrediti nosivost spajala.

Karakteristična vlačna čvrstoća čelika S 235: $f_{u,k} = 360 \text{ N/mm}^2$.

Karakteristična gustoća LL drva razreda čvrstoće GL 24 H: $\rho_k = 380 \text{ kg/m}^3$.

2.6.1 Priključak dvodijelne grede na stup u čvoru B

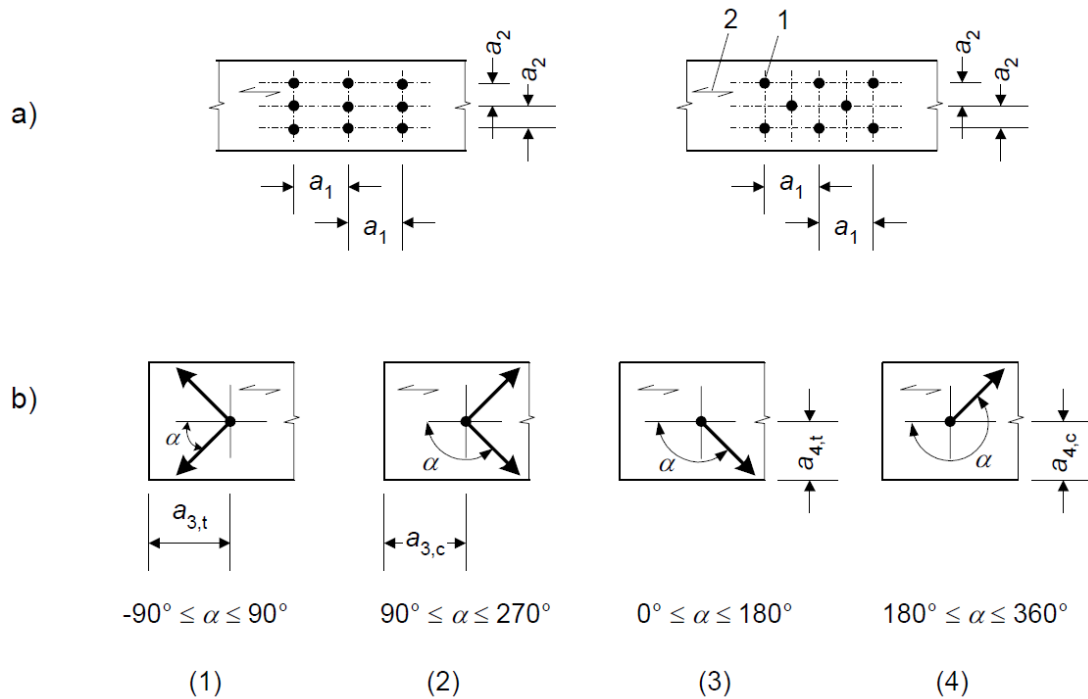


Slika 17: Priključak dvodijelne grede na stup štapastim mehaničkim spajalima (trnovi)

Razmaci spajala

Tablica 10: Najmanji razmaci trnova i udaljenosti od ruba i kraja (prema dijelu Tablici 8.5 u normi EN 1995-1-1)

Razmaci i udaljenosti od ruba/kraja	Kut	Najmanji razmaci ili udaljenosti od ruba/kraja
a_1 (paralelno s vlakancima)	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$(3 + 2 \cos \alpha) d$
a_2 (okomito na vlakanca)	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$3d$
$a_{3,t}$ (opterećeni kraj)	$-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	$\max (7d; 80 \text{ mm})$
$a_{3,c}$ (neopterećeni kraj)	$90^\circ \leq \alpha < 150^\circ$	$\max [(a_{3,t} \sin \alpha) d; 3d]$
	$150^\circ \leq \alpha < 210^\circ$	$3d$
	$210^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$	$\max [(a_{3,t} \sin \alpha) d; 3d]$
$a_{4,t}$ (opterećeni rub)	$0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$	$\max [(2 + 2 \sin \alpha) d; 3d]$
$a_{4,c}$ (neopterećeni rub)	$180^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$3d$



Legenda:

- | | |
|---------------------|-----------------------|
| (1) opterećeni rub | (2) neopterećeni rub |
| (3) opterećeni kraj | (4) neopterećeni kraj |
| 1 spajalo | 2 smjer vlakancaca |

Slika 18: Definicije razmaka spajala

Razmaci trnova definirani prema kutu sile u odnosu na vlakanca grede, $\alpha_{grede} = 18,43^\circ$:

$$a_1 = 100 \text{ mm} > (3 + 2 |\cos \alpha_{grede}|) d = (3 + 2 \cdot \cos 18,43^\circ) \cdot d = 78,4 \text{ mm}$$

$$a_2 = 70 \text{ mm} > 3 d = 3 \cdot 16 = 48 \text{ mm}$$

$$a_{3,t} = 230 \text{ mm} > \max(7 d, 80 \text{ mm}) = 7 \cdot 16 = 112 \text{ mm}$$

$$a_{4,t} = 70 \text{ mm} > \max[(2 + 2 \sin \alpha_{grede}) d, 3 d] = 3 \cdot 16 = 48 \text{ mm}$$

$$a_{4,c} = 70 \text{ mm} > 3 d = 3 \cdot 16 = 48 \text{ mm}$$

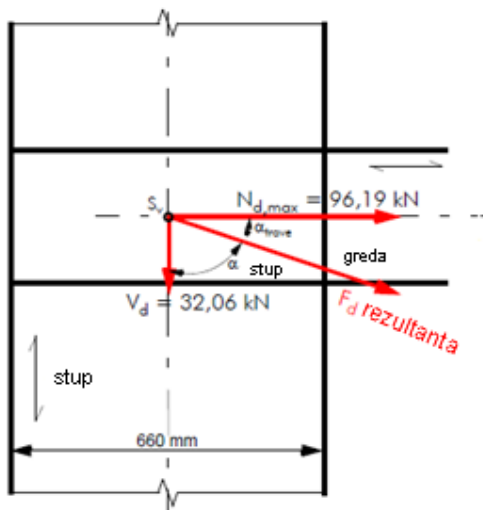
Razmaci trnova definirani prema kutu sile u odnosu na vlakanca stupa, $\alpha_{stupa} = 71,57^\circ$:

$$a_1 = 70 \text{ mm} > (3 + 2 |\cos \alpha_{stupa}|) d = (3 + 2 \cdot \cos 71,57^\circ) \cdot d = 58,1 \text{ mm}$$

$$a_2 = 100 \text{ mm} > 3 d = 3 \cdot 16 = 48 \text{ mm}$$

$$a_{4,t} = 230 \text{ mm} > \max[(2 + 2 \sin \alpha_{stupa}) d, 3 d] = 3,9 \cdot 16 = 62 \text{ mm}$$

$$a_{4,c} = 230 \text{ mm} > 3 d = 3 \cdot 16 = 48 \text{ mm}$$



Sile u priključku grede – proračunska kombinacija (1):

$$N_d = N_{d,max} = 96,19 \text{ kN}$$

$$V_d = 36,03 \text{ kN}$$

Rezultanta F_d :

$$F_d = \sqrt{N_{d,max}^2 + V_d^2} = \sqrt{96,19^2 + 32,06^2} = 101,4 \text{ kN}$$

Kut rezultante F_d u odnosu na vlakanca grede:

$$\alpha_{\text{gređa}} = \arctan\left(\frac{V_d}{N_{d,max}}\right) = \arctan\left(\frac{32,06}{96,19}\right) = 18,43^\circ$$

Kut rezultante F_d u odnosu na vlakanca stupa:

$$\alpha_{\text{stup}} = \arctan\left(\frac{N_{d,max}}{V_d}\right) = \arctan\left(\frac{96,19}{32,06}\right) = 71,57^\circ$$

Slika 19: Naprezanje u priključku – kut rezultante u odnosu na vlakanca elemenata

Karakteristične čvrstoće po plaštu rupe (LLD):

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha}$$

$$f_{h,0,k} = 0,082 (1 - 0,01 d) \rho_k = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot 16) \cdot 380 = 26,2 \text{ N/mm}^2$$

$$k_{90} = \begin{cases} 1,35 + 0,015 d & \text{za meko drvo} \\ 1,30 + 0,015 d & \text{za lameliranu furnirsku građu (engl. LVL)} \\ 0,90 + 0,015 d & \text{za tvrdo drvo} \end{cases}$$

$$k_{90} = 1,35 + 0,015 \cdot 16 = 1,59$$

$f_{h,0,k}$ karakteristična čvrstoća po plaštu rupe paralelno s vlakancima, u N/mm^2

ρ_k karakteristična gustoća drva, u kg/m^3

α kut opterećenja prema vlakancima

d promjer trna, u mm.

1) Za gredu:

$$f_{h,1,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \sin^2 \alpha_{\text{gređa}} + \cos^2 \alpha_{\text{gređa}}} = \frac{26,2}{1,59 \cdot (\sin 18,43^\circ)^2 + (\cos 18,43^\circ)^2} = 24,7 \text{ N/mm}^2$$

2) Za stup:

$$f_{h,2,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \sin^2 \alpha_{\text{stupa}} + \cos^2 \alpha_{\text{stupa}}} = \frac{26,2}{1,59 \cdot (\sin 71,57^\circ)^2 + (\cos 71,57^\circ)^2} = 17,1 \text{ N/mm}^2$$

Omjer čvrstoća po plaštu rupe drvenih elemenata:

$$\beta = \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}} = \frac{f_{h,2,\alpha,k}}{f_{h,1,\alpha,k}} = \frac{17,1}{24,7} = 0,69$$

Karakteristični moment popuštanja (trnovi):

$$M_{y,Rk} = 0,3 f_{u,k} d^{2,6} = 0,3 \cdot 360 \cdot 16^{2,6} = 145927 \text{ Nmm}$$

gdje je:

$f_{u,k}$ karakteristična vlačna čvrstoća, u N/mm^2

d promjer trna, u mm.

Karakteristična nosivost jednog bočno opterećenog spajala u jednoj posmičnoj ravnini:

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} f_{h,1,k} t_1 d & \text{(g)} \\ 0,5 f_{h,2,k} t_2 d & \text{(h)} \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & \text{(j)} \\ 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & \text{(k)} \end{cases}$$

gdje su:

$F_{v,Rk}$ karakteristična nosivost u jednoj posmičnoj ravnini jednog spajala;

t_i debljina drva (ploče) ili dubina prodora spajala, gdje i jest 1 ili 2 (točke od 8.3 do 8.7, norma HRN EN 1995-1-1);

$f_{h,i,k}$ karakteristična čvrstoća po plaštu rupe u drvenom elementu i ;

d promjer spajala;

$M_{y,Rk}$ karakteristični moment popuštanja spajala;

$F_{ax,Rk}$ karakteristična osna nosivost na izvlačenja spajala: za trnove, $F_{ax,Rk} = 0$.

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} 24,7 \cdot 100 \cdot 16 & \text{(g)} \\ 0,5 \cdot 17,1 \cdot 180 \cdot 16 & \text{(h)} \\ 1,05 \cdot \frac{24,7 \cdot 100 \cdot 16}{2 + 0,69} \cdot \left[\sqrt{2 \cdot 0,69 \cdot (1 + 0,69) + \frac{4 \cdot 0,69 \cdot (2 + 0,69) \cdot 145927}{24,7 \cdot 100^2 \cdot 16}} - 0,69 \right] + 0 & \text{(j)} \\ 1,15 \sqrt{\frac{2 \cdot 0,69}{1 + 0,69}} \sqrt{2 \cdot 145927 \cdot 24,7 \cdot 16} + 0 & \text{(k)} \end{cases}$$

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} 39520 & \text{(g)} \\ 24624 & \text{(h)} \\ 14260 & \text{(j)} \\ 11161 & \text{(k)} \end{cases} = 11161 \text{ N}$$

Potreban broj trnova u redu:

Za jedan red s n vijaka paralelan s vlakancima, nosivost paralelno s vlakancima treba proračunati s proračunskim brojem vijaka, n_{ef} , gdje je:

$$n_{ef} = \min \begin{cases} n \\ n^{0,9} \sqrt[4]{\frac{a_1}{13d}} \end{cases}$$

a_1 razmak trnova u smjeru vlakana

d promjer trna

n broj trnova u jednom redu.

Za opterećenja okomita na vlakanca proračunski broj spajala treba odrediti prema izrazu:

$$n_{ef} = n$$

Za kutove između opterećenja i vlakana $0^\circ < \alpha < 90^\circ$, n_{ef} smije se odrediti linearnom interpolacijom prethodna dva izraza, za nosivost paralelno s vlakancima i okomito na vlakanca.

Proračunski broj trnova n_{ef} u jednom redu za gredu:

$$\alpha_{grede} = 18,43^\circ$$

$$a_1 = 100 \text{ mm}$$

$$n_{ef} = n^{0,9} \sqrt[4]{\frac{a_1}{13d}} \cdot \frac{90^\circ - \alpha_{grede}}{90^\circ} + n \cdot \frac{\alpha_{grede}}{90^\circ} = 3^{0,9} \sqrt[4]{\frac{100}{13 \cdot 16}} \cdot \frac{90^\circ - 18,43^\circ}{90^\circ} + 3 \cdot \frac{18,43^\circ}{90^\circ} = 2,39 < n = 3$$

Proračunski broj trnova n_{ef} u jednom redu za stup:

$$\alpha_{stupa} = 71,57^\circ$$

$$a_1 = 70 \text{ mm}$$

$$n_{ef} = n^{0,9} \sqrt[4]{\frac{a_1}{13d}} \cdot \frac{90^\circ - \alpha_{stupa}}{90^\circ} + n \cdot \frac{\alpha_{stupa}}{90^\circ} = 3^{0,9} \sqrt[4]{\frac{70}{13 \cdot 16}} \cdot \frac{90^\circ - 71,57^\circ}{90^\circ} + 3 \cdot \frac{71,57^\circ}{90^\circ} = 2,80 < n = 3$$

Proračunska nosivost bočno opterećenih trnova u priključku:

$$F_{v,Rk} = 11161 \text{ N} \quad \text{karakteristična nosivost jednog trna u jednoj posmičnoj ravni}$$

$$\sum F_{v,Rk} = 2 \cdot F_{v,Rk} = 22322 \text{ N} \quad \text{karakteristična nosivost dvoreznog jednog trna u redu}$$

Karakteristična i proračunska nosivost bočno opterećenih trnova u gredi:

Karakteristična nosivost jednog reda dvoreznih trnova u gredi

$$n_{ef,grede} \cdot \sum F_{v,Rk} = 2,39 \cdot 22322 = 53348 \text{ N}$$

Karakteristična nosivost tri reda dvoreznih trnova u gredi (slika 17)

$$\sum F_{v,Rk,grede} = 3 \cdot (n_{ef,grede} \cdot \sum F_{v,Rk}) = 3 \cdot (2,39 \cdot 22322) = 160045 \text{ N}$$

Proračunska nosivost dvoreznih bočno opterećenih trnova u gredi:

$$\sum F_{v,Rd,grede} = k_{mod} \frac{\sum F_{v,Rk,grede}}{\gamma_M} = 0,9 \cdot \frac{160045}{1,3} = 110801 \text{ N/mm}^2$$

Karakteristična i proračunska nosivost bočno opterećenih trnova u stupu:

Karakteristična nosivost jednog reda dvoreznih trnova u stupu

$$n_{ef,stupa} \cdot \sum F_{v,Rk} = 2,80 \cdot 22322 = 62502 \text{ N}$$

Karakteristična nosivost tri reda dvoreznih trnova u stupu (slika 17):

$$\sum F_{v,Rk,stupa} = 3 \cdot (n_{ef,stupa} \cdot \sum F_{v,Rk}) = 3 \cdot (2,80 \cdot 22322) = 187505 \text{ N}$$

Proračunska nosivost dvoreznih bočno opterećenih trnova u stupu:

$$\sum F_{v,Rd,stupa} = k_{mod} \frac{\sum F_{v,Rk,stupa}}{\gamma_M} = 0,9 \cdot \frac{187505}{1,3} = 129811 \text{ N/mm}^2$$

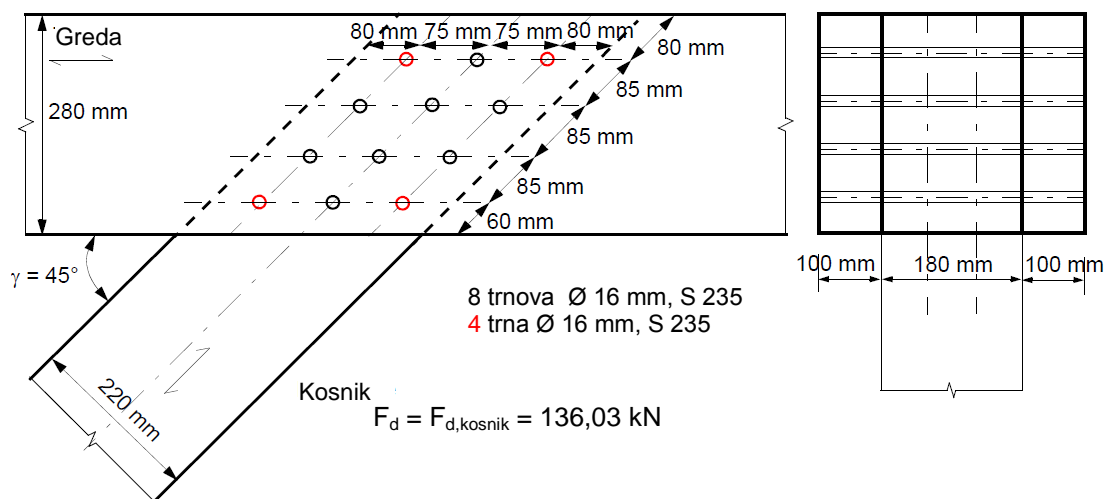
Provjera nosivosti priključka:

$$F_d = \max N_d = 101,40 \text{ N} \quad \sum F_{v,Rd} = \min \begin{cases} \sum F_{v,Rk,grede} \\ \sum F_{v,Rk,stupa} \end{cases} = \min \begin{cases} 110801 \text{ N} \\ 129811 \text{ N} \end{cases} = 110801 \text{ N}$$

$$\frac{F_d}{\sum F_{v,Rd}} = \frac{101,40 \cdot 10^3}{110801} = 0,92 < 1$$

2.6.2 Mehanički priključak kosnika na dvodijelnu gredu u čvoru D

Slika 20:



Priključak kosnika na dvodijelnu gredu trnovima

Razmaci trnova u priključku:

Razmaci trnova definirani prema kutu sile u odnosu na vlakanca grede, $\alpha_{grede} = 45^\circ$:

$$a_1 = 75 \text{ mm} > (3 + 2 |\cos \alpha_{grede}|) d = (3 + 2 \cdot \cos 45^\circ) \cdot d = 70,6 \text{ mm}$$

$$a_2 = 70 \text{ mm} > 3 d = 3 \cdot 16 = 48 \text{ mm}$$

$$a_{4,t} = 57 \text{ mm} > \max \left[(2 + 2 \sin \alpha_{grede}) d; 3 d \right] = (2 + 2 \sin 45^\circ) \cdot 16 = 54,6 \text{ mm}$$

$$a_{4,c} = 50 \text{ mm} > 3 d = 3 \cdot 16 = 48 \text{ mm}$$

Razmaci trnova definirani prema kutu sile u odnosu na vlakanca kosnika, $\alpha_{kosnika} = 0^\circ$:

$$a_1 = 85 \text{ mm} > (3 + 2 |\cos \alpha_{kosnika}|) d = (3 + 2 \cdot \cos 0^\circ) \cdot d = 80 \text{ mm}$$

$$a_2 = 53 \text{ mm} > 3 d = 3 \cdot 16 = 48 \text{ mm}$$

$$a_{3,c} = 80 \text{ mm} > 3 d = 3 \cdot 16 = 48 \text{ mm}$$

$$a_{4,t} = 56 \text{ mm} > \max \left[(2 + 2 \sin \alpha_{stupa}) d; 3 d \right] = 3 \cdot 16 = 48 \text{ mm}$$

$$a_{4,c} = 56 \text{ mm} > 3 d = 3 \cdot 16 = 48 \text{ mm}$$

Karakteristične čvrstoće po plaštu rupe (LLD):

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha}$$

$$f_{h,0,k} = 0,082 (1 - 0,01 d) \rho_k = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot 16) \cdot 380 = 26,2 \text{ N/mm}^2$$

$$k_{90} = 1,35 + 0,015 \cdot d = 1,35 + 0,015 \cdot 16 = 1,59$$

1) Za gredu:

$$f_{h,1,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \sin^2 \alpha_{\text{grede}} + \cos^2 \alpha_{\text{grede}}} = \frac{26,2}{1,59 \cdot (\sin 45^\circ)^2 + (\cos 45^\circ)^2} = 20,2 \text{ N/mm}^2$$

2) Za kosnik:

$$f_{h,2,\alpha,k} = f_{h,0,k} = 26,2 \text{ N/mm}^2$$

Omjer čvrstoća po plaštu rupe drvenih elemenata:

$$\beta = \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}} = \frac{f_{h,2,\alpha,k}}{f_{h,1,\alpha,k}} = \frac{26,2}{20,2} = 1,30$$

Karakteristični moment popuštanja (trnovi):

$$M_{y,Rk} = 0,3 f_{u,k} d^{2,6} = 0,3 \cdot 360 \cdot 16^{2,6} = 145927 \text{ Nmm}$$

Karakteristična nosivost jednog bočno opterećenog spajala u jednoj posmičnoj ravnini:

$$F_{V,Rk} = \min \begin{cases} f_{h,1,k} t_1 d & \text{(g)} \\ 0,5 f_{h,2,k} t_2 d & \text{(h)} \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & \text{(j)} \\ 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & \text{(k)} \end{cases}$$

$$F_{ax,Rk} = 0$$

$$F_{V,Rk} = \min \begin{cases} 20,2 \cdot 100 \cdot 16 & \text{(g)} \\ 0,5 \cdot 26,2 \cdot 180 \cdot 16 & \text{(h)} \\ 1,05 \cdot \frac{20,2 \cdot 100 \cdot 16}{2 + 1,30} \cdot \left[\sqrt{2 \cdot 1,30 \cdot (1 + 1,30) + \frac{4 \cdot 0,69 \cdot (2 + 1,30) \cdot 145927}{20,2 \cdot 100^2 \cdot 16}} - 1,30 \right] + 0 & \text{(j)} \\ 1,15 \sqrt{\frac{2 \cdot 1,30}{1 + 1,30}} \sqrt{2 \cdot 145927 \cdot 20,2 \cdot 16} + 0 & \text{(k)} \end{cases}$$

$$F_{V,Rk} = \min \begin{cases} 32339 & \text{(g)} \\ 37691 & \text{(h)} \\ 19592 & \text{(j)} \\ 11869 & \text{(k)} \end{cases} = 11869 \text{ N}$$

Potreban broj trnova u redu:

Proračunski broj trnova n_{ef} u jednom redu za gredu:

$$\alpha_{grede} = 45^\circ$$

$$a_1 = 75 \text{ mm}$$

$$n_{ef} = n^{0,9} \sqrt[4]{\frac{a_1}{13d}} \cdot \frac{90^\circ - \alpha_{grede}}{90^\circ} + n \cdot \frac{\alpha_{grede}}{90^\circ} = 3^{0,9} \sqrt[4]{\frac{75}{13 \cdot 16}} \cdot \frac{90^\circ - 45^\circ}{90^\circ} + 3 \cdot \frac{45^\circ}{90^\circ} = 2,54 < n = 3$$

Proračunski broj trnova n_{ef} u jednom redu za kosnik:

$$\alpha_{kosnika} = 0^\circ$$

$$a_1 = 80 \text{ mm}$$

$$n_{ef} = n^{0,9} \sqrt[4]{\frac{a_1}{13d}} \cdot \frac{90^\circ - \alpha_{kosnika}}{90^\circ} + n \cdot \frac{\alpha_{kosnika}}{90^\circ} = 4^{0,9} \sqrt[4]{\frac{80}{13 \cdot 16}} \cdot \frac{90^\circ - 0^\circ}{90^\circ} + 4 \cdot \frac{0^\circ}{90^\circ} = 2,78 < n = 4$$

Proračunska nosivost bočno opterećenih trnova u priključku:

$$F_{V,Rk} = 11869 \text{ N} \quad \text{karakteristična nosivost jednog trna u jednoj posmičnoj ravlini}$$

$$\sum F_{V,Rk} = 2 \cdot F_{V,Rk} = 23738 \text{ N} \quad \text{karakteristična nosivost dvoreznog jednog trna u redu}$$

Karakteristična i proračunska nosivost bočno opterećenih trnova u gredi:

Karakteristična nosivost jednog reda dvoreznih trnova u gredi

$$n_{\text{ef,grede}} \cdot \sum F_{v,Rk} = 2,54 \cdot 23738 = 60327 \text{ N}$$

Karakteristična nosivost četiri reda dvoreznih trnova u gredi

$$\sum F_{v,Rk,grede} = 4 \cdot (n_{\text{ef,grede}} \cdot \sum F_{v,Rk}) = 4 \cdot 60327 = 241307 \text{ N}$$

Proračunska nosivost dvoreznih bočno opterećenih trnova u gredi:

$$\sum F_{v,Rd,grede} = k_{\text{mod}} \frac{\sum F_{v,Rk,grede}}{\gamma_M} = 0,9 \cdot \frac{241307}{1,3} = 166799 \text{ N/mm}^2$$

Karakteristična i proračunska nosivost bočno opterećenih trnova u kosniku:

Karakteristična nosivost jednog reda dvoreznih trnova u kosniku

$$n_{\text{ef,kosnik}} \cdot \sum F_{v,Rk} = 2,78 \cdot 23738 = 66088 \text{ N}$$

Karakteristična nosivost tri reda dvoreznih trnova u kosniku:

$$\sum F_{v,Rk,kosnika} = 3 \cdot (n_{\text{ef,kosnika}} \cdot \sum F_{v,Rk}) = 3 \cdot 66088 = 198265 \text{ N}$$

Proračunska nosivost dvoreznih bočno opterećenih trnova u kosniku:

$$\sum F_{v,Rd,kosnika} = k_{\text{mod}} \frac{\sum F_{v,Rk,kosnika}}{\gamma_M} = 0,9 \cdot \frac{198265}{1,3} = 137261 \text{ N/mm}^2$$

Provjera nosivosti priključka:

$$F_d = \max N_d = 136,03 \text{ N} \quad \sum F_{v,Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} \sum F_{v,Rk,grede} \\ \sum F_{v,Rk,kosnika} \end{array} \right. = \min \left\{ \begin{array}{l} 166799 \text{ N} \\ 137261 \text{ N} \end{array} \right. = 137261 \text{ N}$$

$$\frac{F_d}{\sum F_{v,Rd}} = \frac{136,03 \cdot 10^3}{137261} = 0,99 < 1$$