

4. vaja: PROJEKTIRANJE STRIŽNO OBREMENJENIH ARMIRANO BETONSKIH ELEMENTOV

4.1 Prečna sila

4.1.1 Napetosti

Armiranobetonski prerez prevzame strižno silo s strižnimi napetostmi, razporejenimi po celotnem prerezu. Pri glavnih nateznih napetostih, ki so manjše od natezne trdnosti betona, beton nosi obtežbo. Na mestih, kjer je natezna trdnost betona presežena, se pojavijo v betonu poševne razpoke glede na os nosilca.

Glavne napetosti so

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_{xx}}{2} \pm \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\sigma_{xx}^2 + 4 \cdot \tau_{zx}^2} \quad (4.1)$$

in so za kot φ nagnjene glede na os x

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2 \cdot \tau_{zx}}{\sigma_{xx}}. \quad (4.2)$$

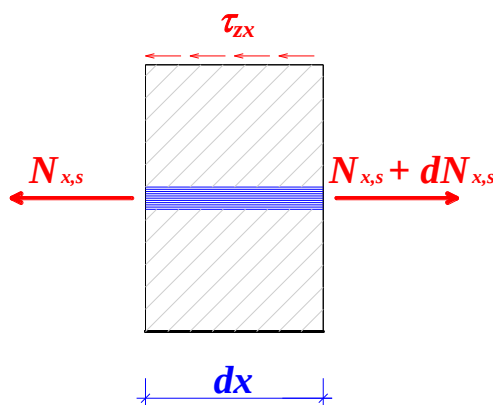
V nevtralni osi so normalne napetosti

$$\sigma_{xx} = 0 \quad (4.3)$$

in glavne napetosti

$$\sigma_{1,2} = \pm \tau_{zx}. \quad (4.4)$$

Normalna napetost σ_{xx} , je napetost, ki deluje v ravnini z normalo v smeri osi x . Smer napetosti je vzporedna smeri osi x . Strižna napetost τ_{xz} , je napetost, ki deluje v ravnini z normalo v smeri osi x . Smer napetosti je vzporedna smeri osi z . Smer napetosti τ_{zx} je napetost, ki deluje v ravnini z normalo v smeri osi z . Smer napetosti je vzporedna smeri osi x . Iz ravnotežja elementa sledi, da sta omenjeni napetosti enaki.



Slika 1 Delček nosilca v vzdolžnem prerezu.

Iz ravnotežja vodoravnih sil delujočih na majhen delček nosilca sledi

$$\tau_{zx} \cdot dx \cdot b = dN_{x,s}. \quad (4.5)$$

Oсна sila v armaturi je enaka

$$N_{x,s} = \frac{M_y}{z}. \quad (4.6)$$

Prečna sila je enaka odvodu upogibnih momentov po vzdolžni osi

$$V_z = \frac{dM_y}{dx}. \quad (4.7)$$

Iz izrazov (4.6) in (4.7) sledi

$$dM_y = V_z \cdot dx = dN_{x,s} \cdot z. \quad (4.8)$$

Sprememba vodoravne sile v armaturi je enaka

$$dN_{x,s} = \frac{dM_y}{z} = \tau_{zx} \cdot dx \cdot b. \quad (4.9)$$

Strižna napetost pa je

$$\tau_{zx} = \frac{dM_y}{z \cdot dx \cdot b} = \frac{V}{z \cdot b}. \quad (4.10)$$

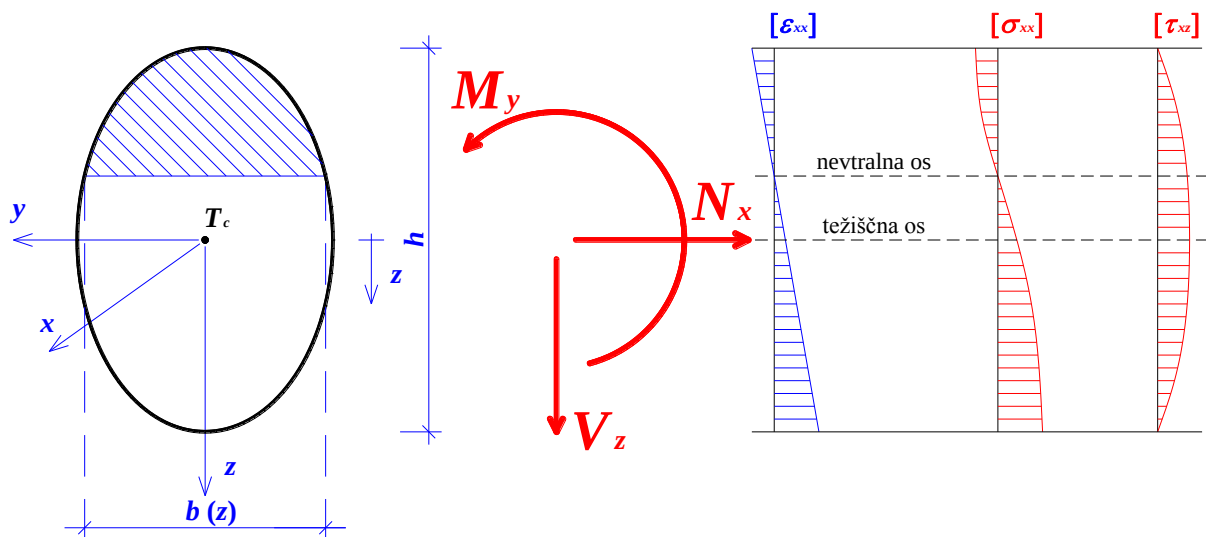
4.1.2 Nerazpokan prečni prerez

V homogenem, nerazpokanem prerezu so strižne napetosti τ_{xz} , τ_{zx} enake

$$\tau_{xz}(z) = \tau_{zx}(z) = \frac{V_z \cdot S_y^*(z)}{I_y \cdot b(z)}, \quad (4.11)$$

pri čemer je

$V_z \dots$	prečna sila v smeri osi z ,
$S_y^* \dots$	statični moment dela prečnega prereza nad obravnavano osjo, okrog osi y , na težišče celotnega prereza,
$I_y \dots$	vztrajnostni moment obravnavanega prereza okrog osi y ,
$b(z) \dots$	širina prečnega prereza v obravnavani osi.

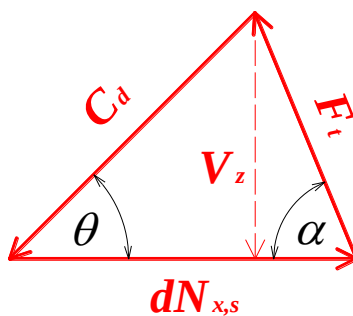


Slika 2 Homogen prečni prerez.

4.1.3 Razpokan prečni prerez

V razpokani konstrukciji prevzemajo prečne sile:

- nerazpokani del betona,
- trenje v razpoki,
- možnični vpliv armature v betonu,
- mehanizem ravninskega paličja,
- ločni vpliv, ki se pojavil v betonu.



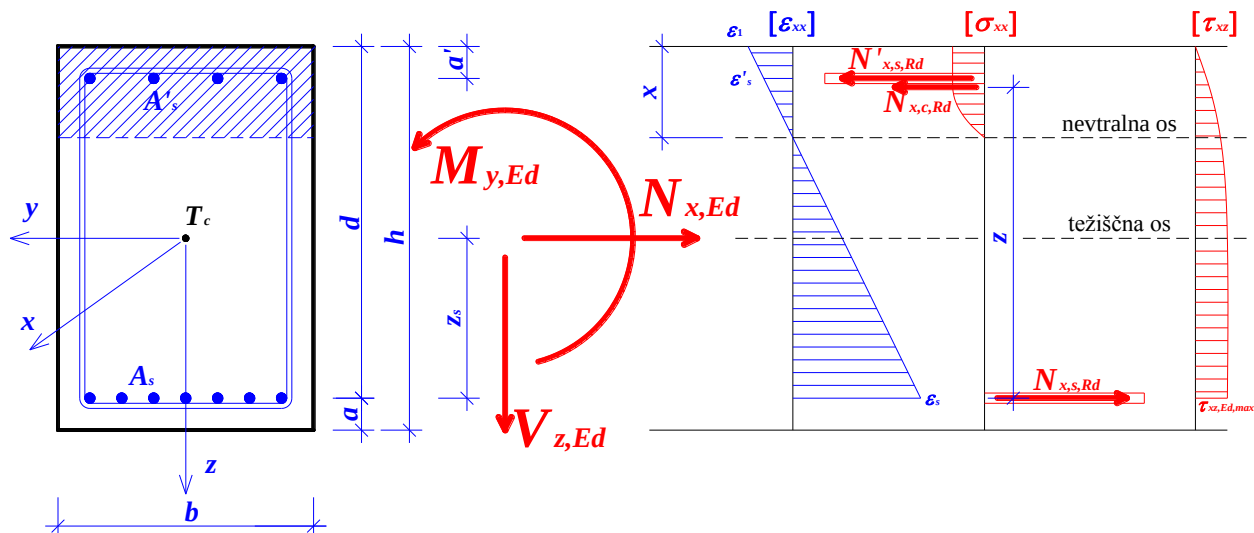
Slika 3 Mehanizem ravninskega paličja.

V razpokanem prerezu so strižne napetosti τ_{xz} enake

$$\tau_{xz} = \frac{V_z}{z \cdot b(z)}, \quad (4.12)$$

pri čemer je

z ... ročica notranjih sil.



Slika 4 Razpokan prečni prerez.

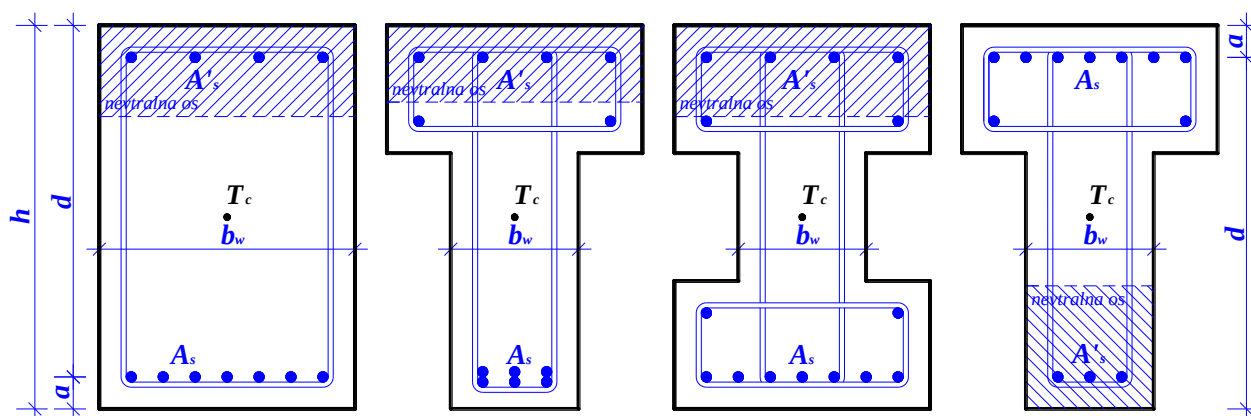
Največja projektna strižna napetost je enaka

$$\tau_{xz,Ed,max} = \tau_{Ed} = \frac{V_{z,Ed}}{z \cdot b_w}, \quad (4.13)$$

pri čemer je

b_w ... najmanjša širina prečnega prereza med nevtralno osjo in natezno armaturo.

Na mestih, kjer je prečni prerez zožan, so strižne napetosti večje.



Slika 5 Najmanjša širina prečnega prereza med nevtralno osjo in natezno armaturo.

4.1.4 Računski postopek v skladu s predpisom Evrokod 2

Znana projektna strižna obremenitev ne sme presegati mejne strižne nosilnosti prečnega prereza

$$V_{Ed} \leq V_{Rd}, \quad (4.14)$$

pri čemer je

V_{Ed} ... mejna strižna obremenitev prečnega prereza,

$V_{Rd,max}$... največja projektna strižna odpornost armiranobetonskega elementa, ki je omejena z drobljenjem tlačnih razpor oziroma diagonal,

$V_{Rd,c}$... projektna strižna odpornost betonskega elementa brez strižne armature,

$V_{Rd,s}$... projektna strižna odpornost vgrajene plastificirane strižne armature.

Kadar mejna strižna obremenitev prečnega prereza presega največjo projektno strižno odpornost armiranobetonskega elementa

$$V_{Ed} > V_{Rd,max}, \quad (4.15)$$

je potrebno povečati betonski prerez ali uporabiti višji trdnostni razred betona.

Če mejna strižna obremenitev prečnega prereza ne presega projektne strižne odpornosti betonskega elementa brez strižne armature

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,c}, \quad (4.16)$$

računska strižna armatura ni potrebna. Taka področja armiranobetonskega elementa v skladu s točko 9.2.2 v predpisu Eurokod 2 armiramo z minimalno strižno armaturo.

Če je mejna strižna obremenitev prečnega prereza večja kot projektna strižna odpornost betonskega elementa brez strižne armature

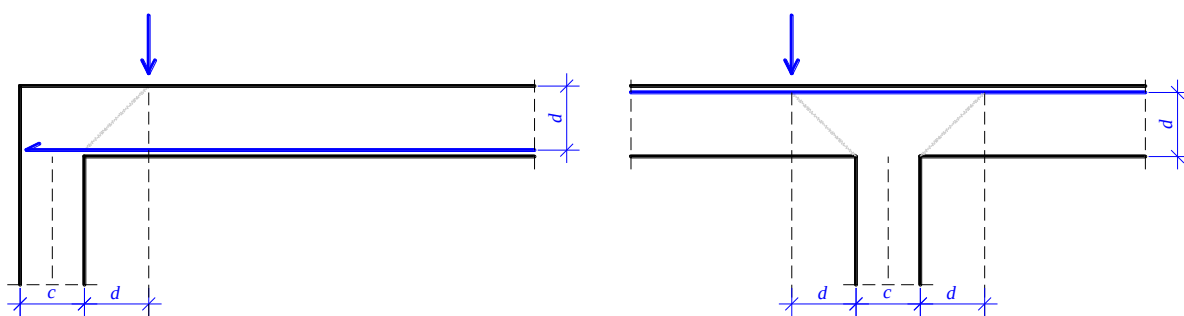
$$V_{Ed} > V_{Rd,c}, \quad (4.17)$$

je strižna armatura potrebna. Iz pogoja

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,s} \quad (4.18)$$

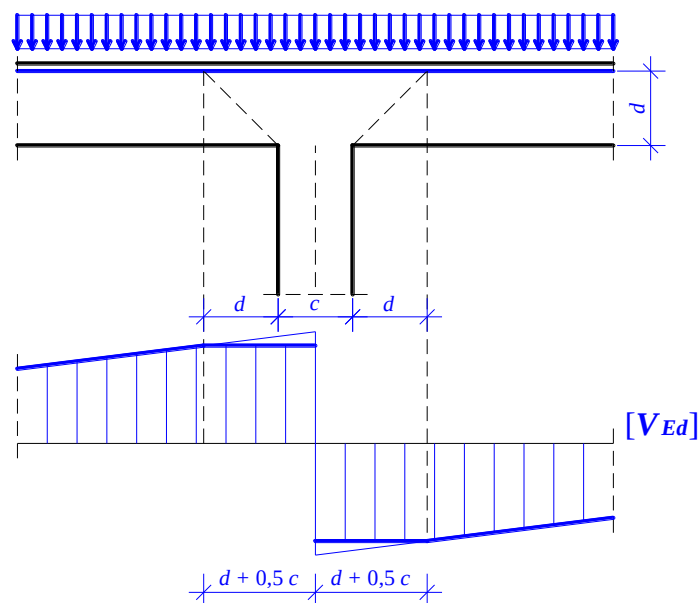
določimo potrebno strižno armaturo in dodatno vzdolžno armaturo zaradi strižnih napetosti k vzdolžni armaturi, ki so jo določili zaradi osno-upogibnega napetostnega stanja.

Del točkovnih sil, ki delujejo blizu podpor, se prenaša neposredno v podpore.



Slika 6 Točkovne sile blizu podpor.

V elementih, ki so izpostavljeni pretežno enakomerno razporejeni obtežbi, je kritični prerez za statično višino d oddaljen od roba podpore.



Slika 7 Redukcija prečnih sil.

Prečna sila, ki jo lahko prenese betonski element brez strižne armature

$$V_{Rd,c} = \max \left\{ \left[C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck} [\text{MPa}])^{\frac{1}{3}} + k_1 \cdot \sigma_{cp} \right] \cdot b_w \cdot d, \right. \\ \left. (v_{min} + k_1 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d \right. \quad (4.19)$$

pri čemer je

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d [\text{mm}]}} \leq 2,0, \quad (4.20)$$

$$\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot d} \leq 0,02, \quad (4.21)$$

A_{sl} ... prečni prerez vzdolžne natezne armature zaradi upogiba,

b_w ... najmanjša širina nateznega dela prečnega prereza betona v milimetrih.

Prispevek osne sile k strižni nosilnosti betona je enak

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed} [\text{N}]}{A_c [\text{mm}^2]} \leq 0,2 \cdot f_{cd} [\text{MPa}]. \quad (4.22)$$

Tlačne napetosti so napetosti pozitivnega predznaka. A_c je prečni prerez betona.

$$C_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c}, \quad (4.23)$$

pri čemer je materialni varnostni faktor za beton $\gamma_c=1,5$.

$$v_{min} = 0,035 \cdot k^{\frac{3}{2}} \cdot (f_{ck} [\text{MPa}])^{\frac{1}{2}} \quad (4.24)$$

in priporočena vrednost

$$k_1 = 0,15. \quad (4.25)$$

Strižna armatura

Strižno armaturo določimo iz pogoja (4.18). Projektna strižna odpornost vgrajene plastificirane strižne armature je

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot (\operatorname{ctg} \theta + \operatorname{ctg} \alpha) \cdot \sin \alpha, \quad (4.26)$$

pri čemer je

$$z = 0,9 \cdot d, \quad (4.27)$$

$$\operatorname{ctg} \theta = 1, \quad (4.28)$$

$s \dots$ razdalja med poševnimi palicami oziroma vzdolžna razdalja med vertikalnimi stremenji,

$f_{ywd} \dots$ projektna meja elastičnosti strižne armature.

Vsaj 50% sile V_{Ed} morajo prevzeti vertikalna stremenja. Ostali del sile lahko prevzamejo poševno krivljene palice vzdolžne armature.

Projektna strižna odpornost vgrajene vertikalne plastificirane strižne armature, $\alpha = 90^\circ$, je

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd}. \quad (4.29)$$

Projektna strižna odpornost vgrajene vertikalne plastificirane strižne armature, $\alpha \neq 90^\circ$, je

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot (1 + \operatorname{ctg} \alpha) \cdot \sin \alpha. \quad (4.30)$$

Minimalna strižna armatura

Minimalna strižna armatura pri nosilcih je

$$A_{sw,min} = \rho_{w,min} \cdot s \cdot b_w \cdot \sin \alpha, \quad (4.31)$$

$$\rho_{w,min} = \frac{0,08 \cdot \sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}}. \quad (4.32)$$

Vzdolžni razmak strižnih stremen

Vzdolžni razmak strižnih stremen ne sme biti večji kot

$$s_{l,max} = 0,75 \cdot d \cdot (1 + \operatorname{ctg} \alpha). \quad (4.33)$$

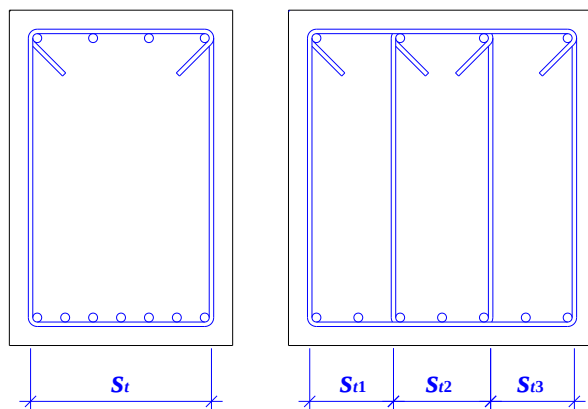
Vzdolžni razmak poševno krivljenih palic ne sme biti večji kot

$$s_{b,max} = 0,6 \cdot d \cdot (1 + \operatorname{ctg} \alpha). \quad (4.34)$$

Prečna medsebojna razdalja krakov skupine strižnih stremen

Prečna medsebojna razdalja krakov skupine strižnih stremen ne sme biti večja kot

$$s_{t,max} = 0,75 \cdot d \leq 600 \text{ mm} . \quad (4.35)$$



Slika 8 Prečna medsebojna razdalja krakov skupine strižnih stremen.

Dodatna vzdolžna armatura

Dodatno vzdolžno armaturo določimo z izrazom

$$\Delta A_s = \frac{1}{2} \cdot \frac{|V_{Ed}|}{\sigma_s} \cdot (\text{ctg } \theta - \text{ctg } \alpha) . \quad (4.36)$$

Pri poševnih palicah pod kotom 45° dodatna vzdolžna armatura ni potrebna

$$\Delta A_s = 0 . \quad (4.37)$$

Pri vertikalnih stremenih je dodatna vzdolžna armatura enaka

$$\Delta A_s = \frac{|V_{Ed}|}{2 \cdot \sigma_s} . \quad (4.38)$$

Tlačne diagonale

Mejna strižna obremenitev prečnega prereza ne sme presegati največje projektne strižne odpornosti armiranobetonskega elementa

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,max} , \quad (4.39)$$

pri čemer je

$$V_{Rd,max} = \alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot \nu \cdot f_{cd} \cdot \frac{\text{ctg } \theta + \text{ctg } \alpha}{1 + \text{ctg}^2 \theta} \quad (4.40)$$

in redukcijski faktor trdnosti za strižno razpokan beton

$$\nu_1 = \nu = 0,6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck} [\text{MPa}]}{250} \right) . \quad (4.41)$$

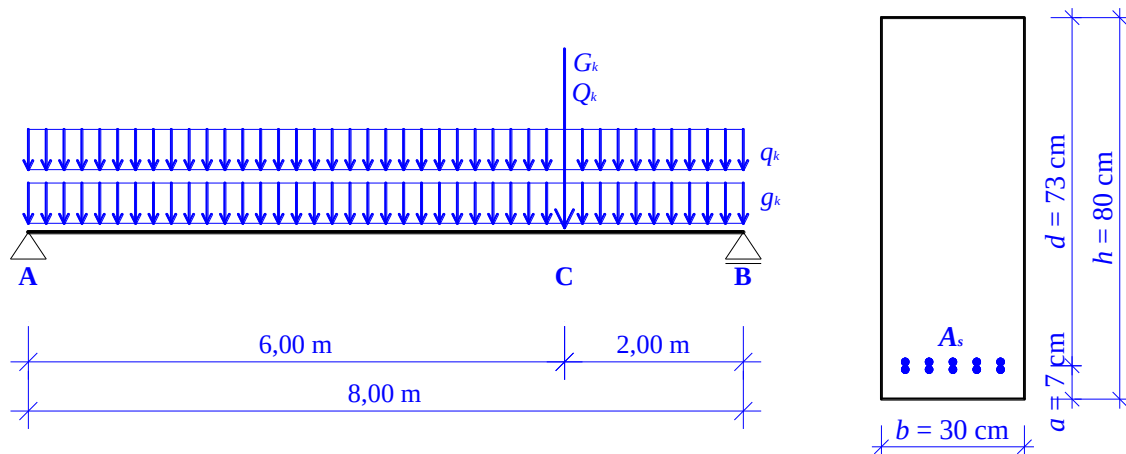
V koeficientu α_{cw} je zajeto vzajemno delovanje napetosti v tlačnem pasu in kakršne koli nanešen osne tlačne napetosti. Za konstrukcije brez prednapenjanja je $\alpha_{cw} = 1,0$. Za druge primere so vrednosti navedene v poglavju 6.2.3 predpisa Evrokod 2.

Pri vertikalnih stremenih ali pri kombinaciji vertikalnih stremen in poševno krivljenih palic je

$$\operatorname{ctg} \alpha = 0. \quad (4.42)$$

4.1.5 Računski primer: prostoležeči nosilec, konstantne višine

Določite strižno armaturo v prostoležečem armiranobetonskem nosilcu konstantne višine, dolžine 8 m, iz betona C30/37 in armature S500, na sliki 40. Prečni prerez betonskega elementa je pravokotnik, širine 30 cm in višine 80 cm. Prerez vzdolžne armature ob podpori je 20 cm^2 . Nosilec je obtežen z konstantno zvezno razporejeno lastno težo, velikosti 25 kN/m , in konstantno zvezno razporejeno spremenljivo obtežbo, velikosti 33 kN/m , ter dvema točkovnima obtežbama, ki sta od leve podpore oddaljeni 6 m. Sila lastne teže je 120 kN , sila spremenljive obtežbe pa 200 kN .



Slika 9 Prostoležeči armiranobetonski nosilec konstantne višine.

Beton	C30/37 ... $f_{ck} = 3 \text{ kN/m}^2$, $\alpha_{cc} f_{cd} = 2 \text{ kN/m}^2$
Armatura	S500 ... $f_{sy} = 50 \text{ kN/m}^2$, $f_{yd} = 43,48 \text{ kN/m}^2$
Stalna obtežba	$g_k = 25 \text{ kN/m}$, $G_k = 120 \text{ kN}$
Spremenljiva	$q_k = 33 \text{ kN/m}$, $Q_k = 200 \text{ kN}$
Širina podpore	$c_A = c_B = 20 \text{ cm}$

Računska obtežba / Projektna obtežba

Največje prečne sile se pojavijo ob podporah in na mestih točkovnih vnosov obtežbe v konstrukcijo. Najbolj neugoden računski primer pri računu prečnih sil na prostoležečem nosilcu je, kadar je na nosilcu vsa možna obtežba, pomnožena z večjimi obtežnimi varnostnimi faktorji.

$$g_{Ed} + q_{Ed} = 1,35 \cdot 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}} + 1,5 \cdot 33 \frac{\text{kN}}{\text{m}} = 83,25 \frac{\text{kN}}{\text{m}}, \quad (4.43)$$

$$G_{Ed} + Q_{Ed} = 1,35 \cdot 120 \text{ kN} + 1,5 \cdot 200 \text{ kN} = 462 \text{ kN}. \quad (4.44)$$

Reakcije v podporah

$$\sum H_x = 0 \Rightarrow A_x = 0, \quad (4.45)$$

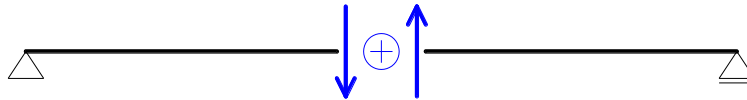
$$\sum M_{y,A} = 0 \Rightarrow B_{z,Ed} \cdot l_{AB} - (g_{Ed} + q_{Ed}) \cdot \frac{l_{AC}^2}{2} - (G_{Ed} + Q_{Ed}) \cdot l_{AC} = 0, \quad (4.46)$$

$$B_{z,Ed} = (g_{Ed} + q_{Ed}) \cdot \frac{l_{AC}^2}{2 \cdot l_{AB}} + (G_{Ed} + Q_{Ed}) \cdot \frac{l_{AC}}{l_{AB}} = 83,25 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot \frac{(6\text{m})^2}{2 \cdot 8\text{m}} + 462\text{kN} \cdot \frac{6\text{m}}{8\text{m}} = 679,5\text{kN}, \quad (4.47)$$

$$\sum V_z = 0 \Rightarrow A_{z,Ed} - (g_{Ed} + q_{Ed}) \cdot l_{AB} - (G_{Ed} + Q_{Ed}) + B_{z,Ed} = 0, \quad (4.48)$$

$$A_{z,Ed} = (g_{Ed} + q_{Ed}) \cdot l_{AB} + (G_{Ed} + Q_{Ed}) - B_{z,Ed} = 83,25 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot 8\text{m} + 462\text{kN} - 679,5\text{kN} = 448,5\text{kN}. \quad (4.49)$$

Notranje prečne sile



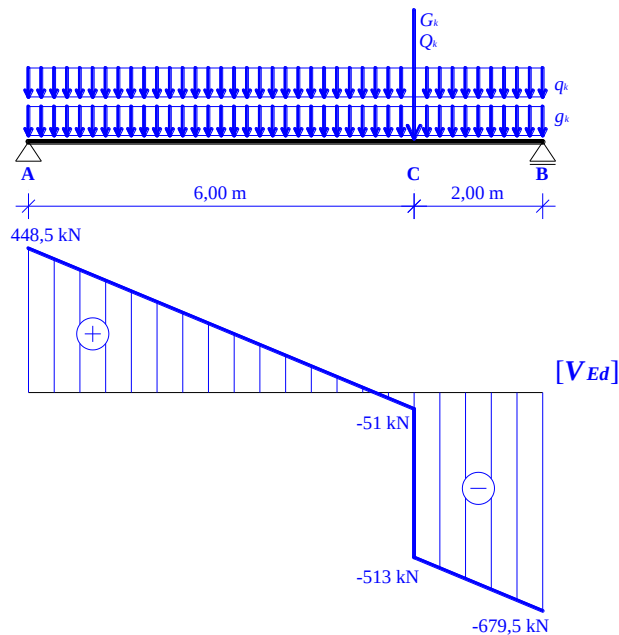
Slika 10 Pozitivna smer prečnih sil.

$$V_{A,Ed} = A_{z,Ed} = 448,5\text{kN}, \quad (4.50)$$

$$V_{B,Ed} = -B_{z,Ed} = -679,5\text{kN}, \quad (4.51)$$

$$V_{CL,Ed} = A_{z,Ed} - (g_{Ed} + q_{Ed}) \cdot l_{AC} = 448,5\text{kN} - 83,25 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot 6\text{m} = -51,0\text{kN}, \quad (4.52)$$

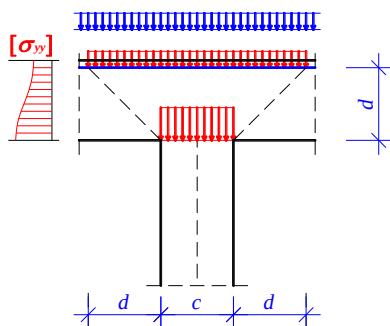
$$V_{CD,Ed} = A_{z,Ed} - (g_{Ed} + q_{Ed}) \cdot l_{AC} - (G_{Ed} + Q_{Ed}) = 448,5\text{kN} - 83,25 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot 6\text{m} - 462\text{kN} = -513,0\text{kN}. \quad (4.53)$$



Slika 11 Diagram prečnih sil.

Reducirane prečne sile ob podporah

V primeru neposrednega podpiranja nosilca lahko, zaradi ugodnega vpliva tlakov v prečni smeri, v območju podpor prečne sile zmanjšamo.



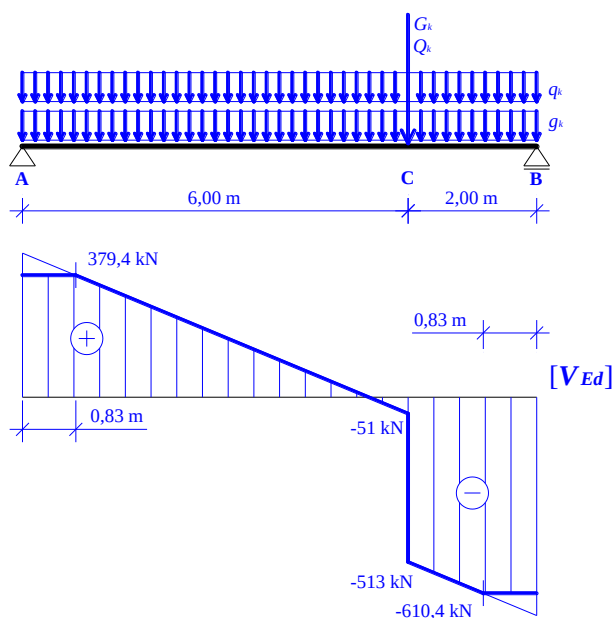
Slika 12 Območje podpore.

$$x_1 = \frac{c}{2} + d = \frac{0,20\text{m}}{2} + 0,73\text{m} = 0,83\text{m}, \quad (4.54)$$

$$|\Delta V_{Ed}| = (g_{Ed} + q_{Ed}) \cdot x_1 = 83,25 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot 0,83\text{m} = 69,1\text{kN}, \quad (4.55)$$

$$V_{A,Ed}^* = V_{A,Ed} - |\Delta V_{Ed}| = 448,5\text{kN} - 69,1\text{kN} = 379,4\text{kN}, \quad (4.56)$$

$$V_{B,Ed}^* = V_{B,Ed} + |\Delta V_{Ed}| = -679,5\text{kN} + 69,1\text{kN} = -610,4\text{kN}. \quad (4.57)$$



Slika 13 Diagram prečnih sil, reduciranih ob podporah.

Prečna sila strižno nearmiranega elementa

$$C_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c} = \frac{0,18}{1,5} = 0,12, \quad (4.58)$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{730}} = 1,52, \quad (4.59)$$

$$\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot d} = \frac{20\text{cm}^2}{30\text{cm} \cdot 73\text{cm}} = 0,0091, \quad (4.60)$$

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed} [\text{N}]}{A_c [\text{mm}^2]} = \frac{0\text{N}}{300\text{mm} \cdot 730\text{mm}} = 0\text{MPa}, \quad (4.61)$$

$$v_{min} = 0,035 \cdot 1,52^{\frac{3}{2}} \cdot 30^{\frac{1}{2}} = 0,359, \quad (4.62)$$

$$V_{Rd,c} = \left[C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck} [\text{MPa}])^{\frac{1}{3}} + k_1 \cdot \sigma_{cp} \right] \cdot b_w \cdot d =$$

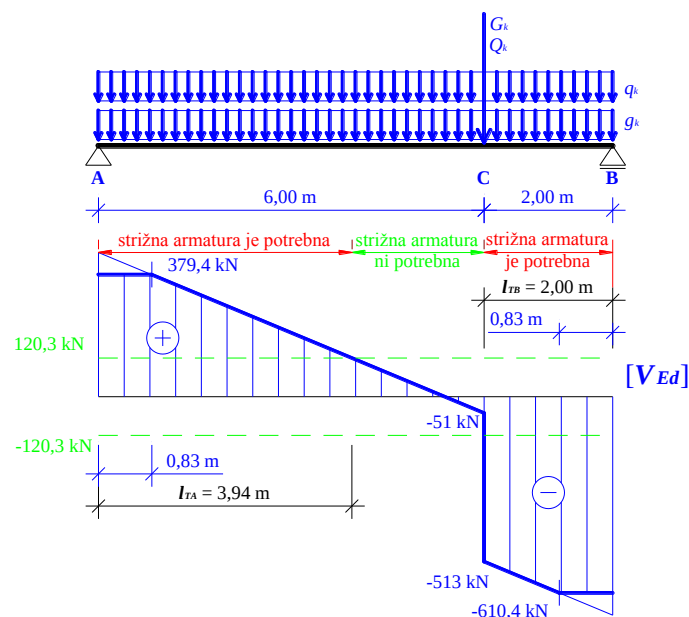
$$= \left[0,12 \cdot 1,52 \cdot (100 \cdot 0,0091 \cdot 30)^{\frac{1}{3}} + 1,5 \cdot 0 \right] \cdot 300 \cdot 730 = 120,3\text{kN},$$

$$V_{Rd,c} = (v_{min} + k_1 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d = (0,359 + 0,15 \cdot 0) \cdot 300 \cdot 730 = 78,6\text{kN}, \quad (4.63)$$

$$V_{Rd,c,max} = 120,3\text{kN}.$$

Če je V_{Ed} večji kot $V_{Rd,c}$, določimo potrebno strižno armaturo za prečno silo V_{Ed} , ki ne sme presegati vrednosti $V_{Rd,s}$.

Območje potrebnega strižnega armiranja



Slika 14 Območje potrebnega strižnega armiranja.

Razdaljo med podporo A in območjem, kjer strižno armiranje ni potrebno, izračunamo iz ravnotežnega pogoja

$$V_{A,Ed} - (g_{Ed} + q_{Ed}) \cdot l_{TA} = V_{Rd,c,max} \quad (4.64)$$

in je enaka

$$l_{TA} = \frac{V_{A,Ed} - V_{Rd,c,max}}{g_{Ed} + q_{Ed}} = \frac{448,5\text{kN} - 120,3\text{kN}}{83,25 \frac{\text{kN}}{\text{m}}} = 3,94\text{m}. \quad (4.65)$$

Razdalja med podporo B in območjem, kjer strižno armiranje ni potrebno, je

$$l_{TB} = 2\text{m}. \quad (4.66)$$

Na območju, med levo podporo in mestom, ki je za razdaljo l_{TA} oddaljeno od leve podpore, in na območju, med desno podporo in mestom, ki je za razdaljo l_{TB} oddaljeno od desne podpore, je strižna armatura računsko potrebna.

a) Vertikalna stremena so edina strižna armatura

Minimalna strižna armatura v obravnavanem nosilcu je

$$\rho_{w,min} = \frac{0,08 \cdot \sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}} = \frac{0,08 \cdot \sqrt{30\text{MPa}}}{500\text{MPa}} = 0,00088, \quad (4.67)$$

$$\frac{A_{sw,min}}{s} = \rho_{w,min} \cdot b_w \cdot \sin \alpha = 0,00088 \cdot 30\text{cm} \cdot \sin 90^\circ = 0,0263 \frac{\text{cm}^2}{\text{cm}} = 2,63 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}}. \quad (4.68)$$

Vzdolžni razmak strižnih stremen ne sme biti večji kot

$$s_{1,max} = 0,75 \cdot d \cdot (1 + \text{ctg} \alpha) = 0,75 \cdot 73\text{cm} \cdot (1 + \text{ctg} 90^\circ) = 54,75\text{cm}. \quad (4.69)$$

Izberemo armaturne palice premera 8 mm

$$A_{sw,1} = \frac{n \cdot \pi \cdot d^2}{4} = \frac{n \cdot \pi \cdot (0,8\text{mm})^2}{4} = 1,005\text{cm}^2. \quad (4.70)$$

Vzdolžni razmak strižnih stremen je

$$s_1 = \frac{A_{sw,1}}{\frac{A_{sw,min}}{s}} = \frac{1,0\text{cm}^2}{2,63 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}}} = 0,3824\text{m} = 38,24\text{cm} < s_{1,max} = 54,75\text{cm} \rightarrow \text{izberemo } s_1 = 30\text{cm}. \quad (4.71)$$

V območju nosilca, kjer je $l_{TA} = 3,94\text{ m} \leq x \leq l - l_{TB} = 8\text{ m} - 2\text{ m} = 6\text{ m}$, strižna armatura računsko ni potrebna, zato nosilec v območju, kjer je $4\text{ m} \leq x \leq 6\text{ m}$, armiramo z minimalno strižno armaturo, **2-strižna stremena $\phi 8 / 30\text{ cm}$.**

Prečna medsebojna razdalja krakov skupine strižnih stremen ne sme biti večja kot

$$s_{t,max} = 0,75 \cdot d = 0,75 \cdot 73\text{cm} = 54,75\text{cm} < 60\text{cm}. \quad (4.72)$$

Pogoj (4.72) bo pri vseh izbirah stremen izpolnjen, saj širina prečnega prereza b ne presega vrednosti $s_{t,max}$.

Podpora A

Strižna armatura

Reducirana prečna sila je večja od prečne sile, ki jo lahko prenese betonski element brez strižne armature

$$V_{A,Ed}^* = 379,4\text{kN} > V_{Rd,c,max} = 120,3\text{kN}, \quad (4.73)$$

zato je potrebna strižna armatura. Izberemo vertikalna stremena, kjer je $\alpha = 90^\circ$. Izberemo razdaljo med stremeni $s = 15\text{cm}$. Potrebno strižno armaturo določim iz pogoja

$$V_{A,Ed}^* = V_{Rd,s}, \quad (4.74)$$

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot 0,9 \cdot d \cdot f_{ywd}, \quad (4.75)$$

in je enaka

$$A_{sw} = \frac{V_{Rd,s} \cdot s}{0,9 \cdot d \cdot f_{ywd}} = \frac{379,4\text{kN} \cdot 15\text{cm}}{0,9 \cdot 73\text{cm} \cdot 43,48 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}} = 1,99\text{cm}^2. \quad (4.76)$$

Izberem štiristrižno streme $n = 4$

$$A_{sw,1} = \frac{A_{sw}}{n} = \frac{1,99\text{cm}^2}{4} = 0,498\text{cm}^2. \quad (4.77)$$

V območju nosilca, kjer je $0\text{ m} \leq x \leq 2\text{ m}$, izberemo **4-strižna stremena $\phi 8 / 15\text{ cm}$** .

Premer ene palice stremena je

$$A_{sw,1,A} = 0,50\text{cm}^2. \quad (4.78)$$

Delež strižne armature ob podpori A je

$$\rho_{w,A} = \frac{A_{sw,A}}{s \cdot b_w \cdot \sin \alpha} = \frac{\frac{n \cdot \pi \cdot d^2}{4}}{s \cdot b_w \cdot \sin \alpha} = \frac{4 \cdot \pi \cdot (0,8\text{cm})^2}{4 \cdot 15\text{cm} \cdot 30\text{cm} \cdot \sin 90^\circ} = 0,00446 > \rho_{w,min} = 0,00088. \quad (4.79)$$

Dodatna vzdolžna armatura

Dodatna vzdolžna armatura je enaka

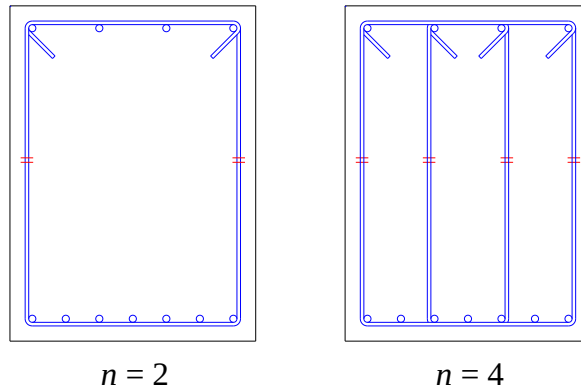
$$\Delta A_s = \frac{|V_{Ed}|}{2 \cdot \sigma_s} = \frac{V_{A,Ed}^*}{2 \cdot \sigma_s} = \frac{379,4\text{kN}}{2 \cdot 43,48 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}} = 4,4\text{cm}^2. \quad (4.80)$$

Tlačne diagonale

Mejna strižna obremenitev prečnega prereza ne sme presegati največje projektne strižne odpornosti armiranobetonskega elementa, ki je enaka

$$V_{Rd,max} = \alpha_{cw} \cdot b_w \cdot 0,9 \cdot d \cdot 0,6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck} [\text{MPa}]}{250}\right) \cdot f_{cd} \cdot \frac{\text{ctg } \theta + \text{ctg } \alpha}{1 + \text{ctg}^2 \theta} = \quad (4.81)$$

$$= 1 \cdot 30 \text{ cm} \cdot 0,9 \cdot 73 \text{ cm} \cdot 0,6 \cdot \left(1 - \frac{30}{250}\right) \cdot 2 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \cdot \frac{\text{ctg } 45^\circ + \text{ctg } 90^\circ}{1 + \text{ctg}^2 45^\circ} = 1040,7 \text{ kN} > V_{A,Ed}^* = 379,4 \text{ kN}$$



Slika 15 Dvostrizno in štiristrizno streme.

Domača naloga

Izberite dvostrizno streme $\phi 10$ mm in izračunajte potrebno razdaljo med stremenji.

Domača naloga

Določite strižno armaturo v območju nosilca, kjer je $2 \text{ m} \leq x \leq 4 \text{ m}$. (Merodajen je prečni prerez $x = 2 \text{ m}$.)

Podpora B*Strižna armatura*

Reducirana prečna sila je večja od prečne sile, ki jo lahko prenese betonski element brez strižne armature

$$|V_{B,Ed}^*| = 610,4 \text{ kN} > V_{Rd,c,max} = 120,3 \text{ kN}, \quad (4.82)$$

zato je potrebna strižna armatura. Izberemo vertikalna stremena, kjer je $\alpha = 90^\circ$. Izberemo razdaljo med stremeni $s = 10 \text{ cm}$. Potrebno strižno armaturo določim iz pogoja

$$|V_{B,Ed}^*| = V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot 0,9 \cdot d \cdot f_{ywd}, \quad (4.83)$$

in je enaka

$$A_{sw} = \frac{V_{Rd,s} \cdot s}{0,9 \cdot d \cdot f_{ywd}} = \frac{610,4 \text{ kN} \cdot 10 \text{ cm}}{0,9 \cdot 73 \text{ cm} \cdot 43,48 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}} = 2,14 \text{ cm}^2. \quad (4.84)$$

Izberem štiristrižno streme $n = 4$

$$A_{sw,1} = \frac{A_{sw}}{n} = \frac{2,14 \text{ cm}^2}{4} = 0,54 \text{ cm}^2 > A_{sw,1}(\phi 8 \text{ mm}) = 0,5 \text{ cm}^2. \quad (4.85)$$

Ker ne želimo palice večjega premera kot 8 mm, izračunamo potrebno razdaljo med stremeni

$$s = \frac{0,9 \cdot d \cdot f_{ywd} \cdot \frac{n \cdot \pi \cdot d^2}{4}}{V_{Rd,s}} = \frac{0,9 \cdot 73 \text{ cm} \cdot 43,48 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \cdot \frac{4 \cdot \pi \cdot (0,8 \text{ cm})^2}{4}}{610,4 \text{ kN}} = 9,4 \text{ cm}. \quad (4.86)$$

V območju nosilca, kjer je $6 \text{ m} \leq x \leq 8 \text{ m}$, izberemo **4-strižna stremena $\phi 8 / 9 \text{ cm}$** .

Delež strižne armature ob podpori B je

$$\rho_{w,B} = \frac{A_{sw,B}}{s \cdot b_w \cdot \sin \alpha} = \frac{\frac{n \cdot \pi \cdot d^2}{4}}{s \cdot b_w \cdot \sin \alpha} = \frac{\frac{4 \cdot \pi \cdot (0,8 \text{ cm})^2}{4}}{10 \text{ cm} \cdot 30 \text{ cm} \cdot \sin 90^\circ} = 0,0067 > \rho_{w,min} = 0,00088. \quad (4.87)$$

Dodatna vzdolžna armatura

Dodatna vzdolžna armatura je enaka

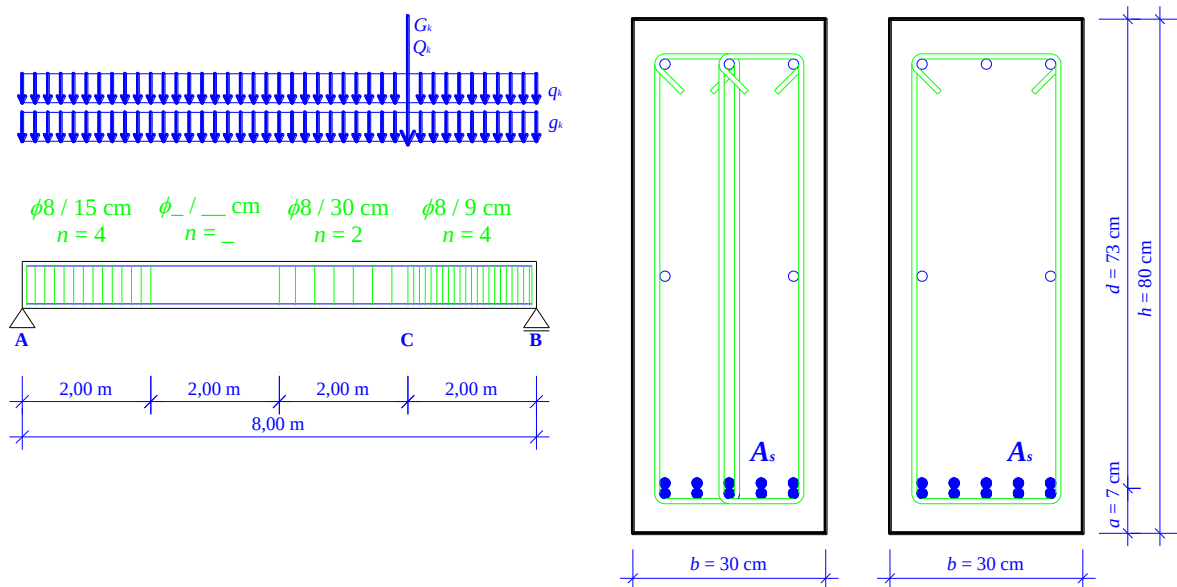
$$\Delta A_s = \frac{|V_{Ed}|}{2 \cdot \sigma_s} = \frac{|V_{B,Ed}^*|}{2 \cdot \sigma_s} = \frac{610,4 \text{ kN}}{2 \cdot 43,48 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}} = 7,02 \text{ cm}^2. \quad (4.88)$$

Tlačne diagonale

Mejna strižna obremenitev prečnega prereza ne sme presegati največje projektne strižne odpornosti armiranobetonskega elementa, ki je enaka

$$V_{Rd,max} = \alpha_{cw} \cdot b_w \cdot 0,9 \cdot d \cdot 0,6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck} [\text{MPa}]}{250}\right) \cdot f_{cd} \cdot \frac{\text{ctg} \theta + \text{ctg} \alpha}{1 + \text{ctg}^2 \theta} =$$

$$= 1 \cdot 30 \text{ cm} \cdot 0,9 \cdot 73 \text{ cm} \cdot 0,6 \cdot \left(1 - \frac{20}{250}\right) \cdot 2 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \cdot \frac{\text{ctg} 45^\circ + \text{ctg} 90^\circ}{1 + \text{ctg}^2 45^\circ} = 1040,7 \text{ kN} > |V_{B,Ed}^*| = 610,4 \text{ kN} \quad (4.89)$$



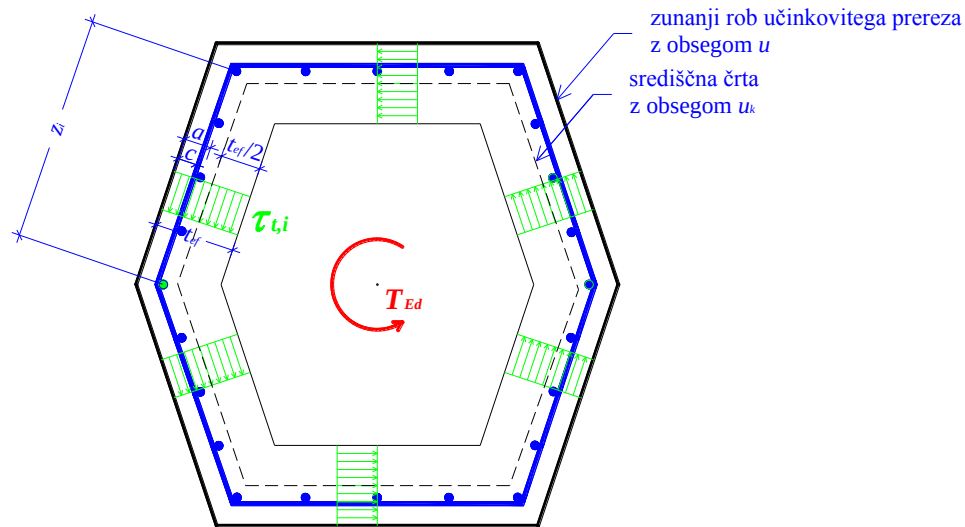
Slika 16 Obravnavani prostoležeči armiranobetonski nosilec konstantne višine.

- b) Strižno armaturo sestavljajo vertikalna stremena ($\alpha_s = 90^\circ$) in poševno krivljene palice ($\alpha_d = 45^\circ$)

4.2 Čista torzija

4.2.1 Račun po modelu zaprtega tankostenskega nosilca

Torzijsko obremenjene prečne prereze računamo po modelu zaprtega tankostenskega prereza.



Slika 17 Prečni prerez torzijsko obremenjenega elementa.

A je površina prečnega prereza, znotraj zunanjega roba učinkovitega prereza z obsegom u , A_k je površina prečnega prereza, znotraj zunanjega roba učinkovitega prereza z obsegom u_k , c je krovni sloj betona, a je najkrajša razdalja med zunanjim robom betonskega prereza in težiščem vzdolžne armature.

Učinkovita debelina stene t_{ef} ni večja od dejanske debeline stene tankostenskega prereza t

$$t_{ef} = \frac{A}{u} \leq t. \quad (4.1)$$

Armiramo jih z zaprtimi stremenji pod kotom $\alpha = 90^\circ$. Največja vzdolžna medsebojna razdalja med stremenji je

$$s_{max} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,75 \cdot \min(b, d) \cdot (1 + \operatorname{ctg} \alpha) \\ \frac{u}{8} \end{array} \right. . \quad (4.2)$$

V vsak vogal prečnega prereza postavimo vsaj eno palico. Palice porazdelimo enakomerno znotraj stremen. Največja razdalja med vzdolžnimi palicami armature je 350 mm.

Beton nosi torzijsko obremenitev, če je projektna sila strižno obremenjenega elementa

$$\frac{T_{Ed}}{T_{Rd,c}} \leq 1, \quad (4.3)$$

pri čemer so

$T_{Rd,c}$ največja torzijska odpornost elementa v obliki torzijskega momenta, ki ga prenese element v betonskih tlačnih diagonalah,

$$T_{Rd,c} = 2 \cdot f_{ctd} \cdot A_k \cdot t_{ef,min}, \quad (4.4)$$

$t_{ef,min}$ najmanjša učinkovita debelina stene dejanskemu prečnemu prerezu enakovrednega zaprtega tankostenskega prereza,
 A_k površina zaključenega poligona, ki ga omejuje sredinska črta vzdolž sten enakovrednega zaprtega tankostenskega prereza.

Kadar je

$$T_{Ed} > T_{Rd,c}, \quad (4.5)$$

so potrebne nadaljne kontrole.

Največja nosilnost strižno obremenjenega elementa, s projektno silo T_{Ed} – čista torzija, je omejena z nosilnostjo tlačnih diagonal

$$\frac{T_{Ed}}{T_{Rd,max}} \leq 1. \quad (4.6)$$

Dodatno vzdolžno armaturo določimo iz pogoja

$$\frac{\sum A_{sl} \cdot f_{yd}}{u_k} = \frac{T_{Ed}}{2 \cdot A_k} \cdot \operatorname{ctg} \theta. \quad (4.7)$$

$\sum A_{sl}$ je celotna dodatna vzdolžna armatura, ki se enakomerno razporedi po celotnem obodu prečnega prereza

$$\sum A_{sl} = \frac{T_{Ed} \cdot u_k}{2 \cdot A_k \cdot f_{yd}} \cdot \operatorname{ctg} \theta. \quad (4.8)$$

Stremensko armaturo določimo iz pogoja

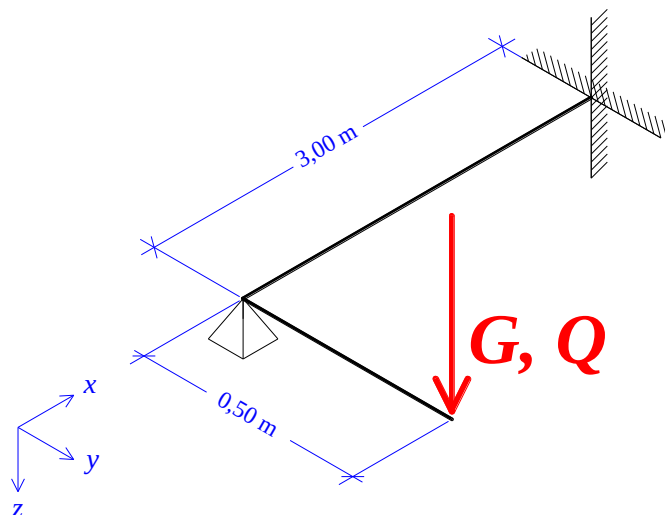
$$T_{Ed} \leq 2 \cdot A_k \cdot f_{ywd} \frac{A_{sw}}{s} \cdot \operatorname{ctg} \theta \quad (4.9)$$

in je

$$A_{sw} \geq \frac{T_{Ed} \cdot s}{2 \cdot A_k \cdot f_{ywd} \cdot \operatorname{ctg} \theta}. \quad (4.10)$$

4.2.2 Računski primer: vrtljivo in togo vpet nosilec, konstantne višine

Določite strižno armaturo v torzijsko obremenjenem armiranobetonskem nosilcu konstantne višine, dolžine 3 m, iz betona C30/37 in armature S500, na sliki 56. Nosilec je levo vrtljivo podprt, desno pa togo. Prečni prerez betonskega elementa je kvadrat, s stranico 30 cm. Nosilec je obtežen z dvema točkovnima obtežbama, ki delujeta na ročici 0,5 m od leve podpore. Sila lastne teže je 30 kN, sila spremenljive obtežbe pa 20 kN.



Slika 18 Vrtljivo in togo vpet armiranobetonski nosilec konstantne višine.

Beton	C30/37 ... $f_{ck} = 3 \text{ kN/m}^2$, $\alpha_{cc} f_{cd} = 2 \text{ kN/m}^2$
Armatura	S500 ... $f_{sy} = 50 \text{ kN/m}^2$, $f_{yd} = 43,48 \text{ kN/m}^2$
Stalna obtežba	$G_k = 30 \text{ kN}$
Spremenljiva	$Q_k = 20 \text{ kN}$

Računska obtežba / Projektna obtežba

4.3 Torzija in prečna sila

Največja nosilnost strižno obremenjenega elementa, s projektnima silama V_{Ed} in T_{Ed} je omejena z nosilnostjo tlačnih diagonal

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}} + \frac{T_{Ed}}{T_{Rd,max}} \leq 1, \quad (4.1)$$

pri čemer so

$V_{Rd,max}$ največja strižna odpornost elementa v obliki prečne sile, ki jo prenese element pred drobljenjem tlačne diagonale v formiranem loku pri strižnem mehanizmu,

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot 0,9 \cdot d \cdot \nu_1 \cdot f_{cd}}{\cos \theta + \tan \theta}, \quad (4.2)$$

$T_{Rd,max}$ največja torzijska odpornost elementa v obliki torzijskega momenta, ki ga prenese element v betonskih tlačnih diagonalah,

$$T_{Rd,max} = 2 \cdot \nu \cdot \alpha_{cw} \cdot f_{cd} \cdot A_k \cdot t_{ef,i} \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta, \quad (4.3)$$

$t_{ef,i}$ učinkovita debelina stene dejanskemu prečnemu prerezu enakovrednega zaprtega tankostenskega prereza,

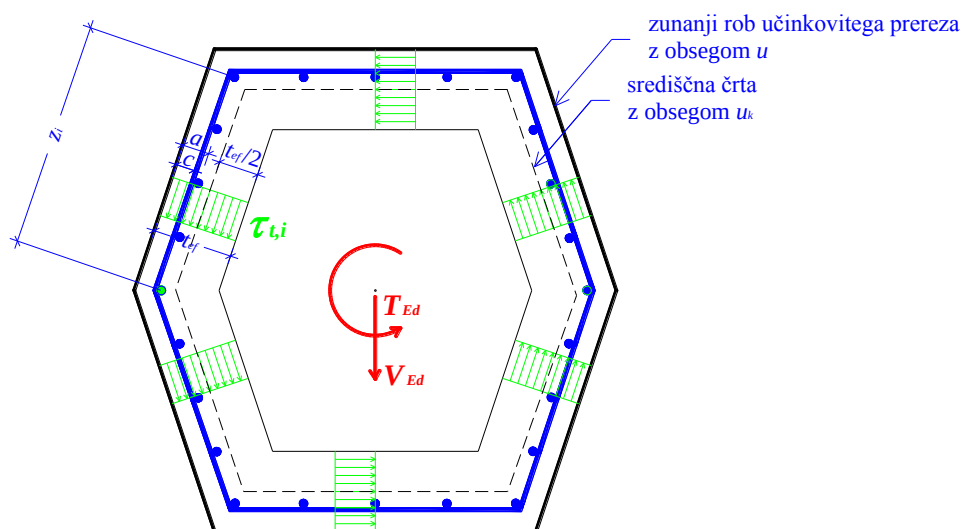
A_k površina zaključenega poligona, ki ga omejuje sredinska črta vzdolž sten enakovrednega zaprtega tankostenskega prereza,

θ kot med betonsko tlačno razporo in vzdolžno osjo nosilca, pri hkratnem učinkovanju prečne sile in torzijskega momenta privzamemo enak naklon tlačne razpore

$$1 \leq \tan \theta \leq 2,5 \\ 21,8^\circ \leq \theta \leq 45^\circ. \quad (4.4)$$

Strižni tok v steni prečnega prereza, ki je obremenjen s čisto torzijo, je enak

$$\tau_{t,i} \cdot t_{ef,i} = \frac{T_{Ed}}{2 \cdot A_k}. \quad (4.5)$$



Slika 19 Prečni prerez strižno obremenjenega elementa, s prečno silo in torzijskim momentom.

Če je pri približno pravokotnem prečnem prerezu strižno in torzijsko obremenjenega elementa izpolnjen pogoj

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,c}} + \frac{T_{Ed}}{T_{Rd,c}} \leq 1, \quad (4.6)$$

zadostuje vgradnja minimalne strižne armature.

$V_{Rd,c}$ projektna strižna odpornost betonskega elementa v obliki prečne sile, ki jo prenese element brez strižne armature

$$V_{Rd,c} = \left[C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} + k_1 \cdot \sigma_{cp} \right] \cdot b_w \cdot d \geq (v_{\min} + k_1 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d, \quad (4.7)$$

$T_{Rd,c}$ torzijski moment, pri katerem se v betonu pojavijo razpoke

$$T_{Rd,c} = 2 \cdot A_k \cdot t_{ef,i} \cdot f_{ctd}. \quad (4.8)$$

Če pogoj (6) ni izpolnjen, je potrebna strižna armatura za

prečno silo

$$\frac{A_{sw}}{s_r} = \frac{V_{Ed}}{0,9 \cdot d \cdot f_{ywd} \cdot \operatorname{ctg} \alpha}. \quad (4.9)$$

in za torzijski moment

$$\left(\frac{A_{sw}}{s_r} \right)_i = \frac{V_{Ed,i}}{z_i \cdot f_{ywd} \cdot \operatorname{ctg} \alpha}, \quad (4.10)$$

pri čemer so

A_{sw} ploščina prečnega prereza strižne armature,

$A_{sw,i}$ ploščina prečnega prereza strižne armature v i -ti steni enakovrednega zaprtega tankostenskega prereza, pri čemer je strižna armatura pravokotna na vzdolžno os nosilca,

$V_{Ed,i}$ strižna sila v i -ti steni enakovrednega zaprtega tankostenskega prereza zaradi torzijske obremenitve

$$V_{Ed,i} = \tau_{t,i} \cdot t_{ef,i} \cdot z_i = \frac{T_{Ed}}{2 \cdot A_k} \cdot z_i. \quad (4.11)$$

Ploščina prečnega prereza vzdolžne armature, ki je potrebna za prevzem torzijske obremenitve

$$\sum A_{sl} = \frac{T_{Ed} \cdot u_k}{2 \cdot A_k \cdot f_{yd}} \cdot \operatorname{ctg} \theta, \quad (4.12)$$

pri čemer je

u_k obseg ploskve A_k , zaključenega poligona, ki ga omejuje sredinska črta vzdolž sten enakovrednega zaprtega tankostenskega prereza.

Dodatna natezna sila, ki jo v vzdolžni natezni armaturi povzroča prečna sila V_{Ed} , je

$$\Delta F_{td} = 0,5 \cdot V_{Ed} \cdot (\operatorname{ctg} \theta - \operatorname{ctg} \alpha) \quad (4.13)$$

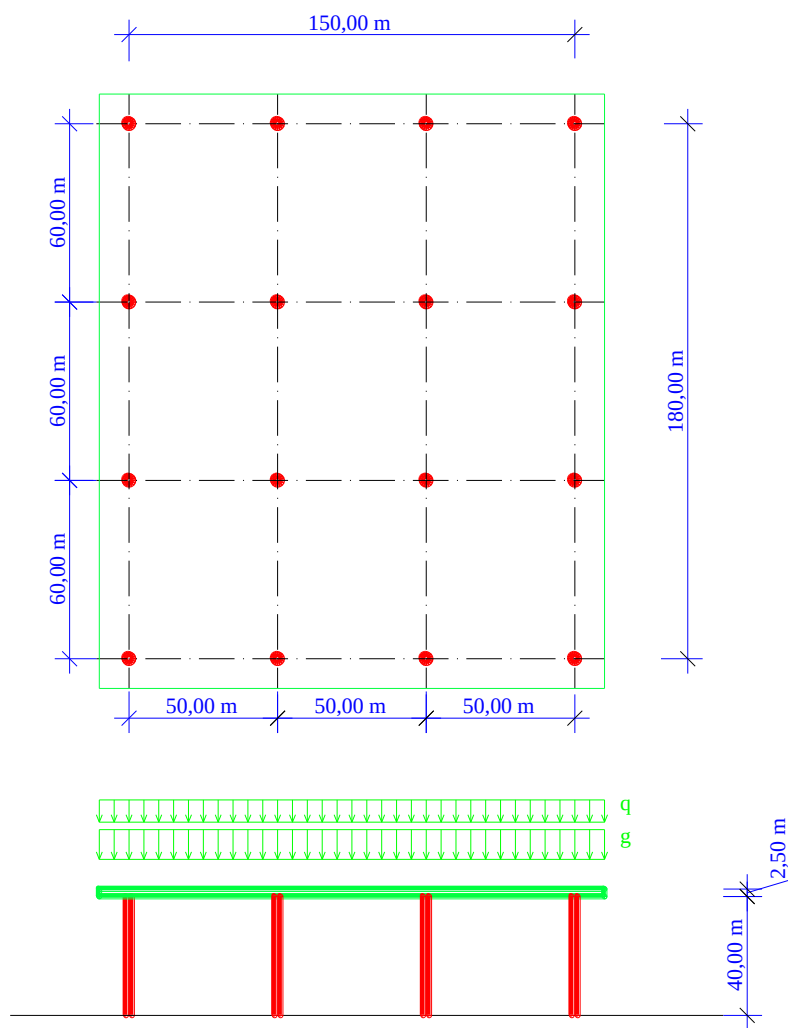
pri čemer je

α kot med strižno armaturo in vzdolžno osjo nosilca.

4.4 Preboj plošče

V proizvodnem obratu armiranobetonski stebri, okroglega prečnega prereza s premerom $c = 30$ cm, na medsebojni razdalji $l_y = 5$ m v smeri y oziroma $l_z = 6$ m v smeri z , podpirajo stropno konstrukcijo – armiranobetonsko masivno ploščo, debeline $h = 25$ cm. Odmik težišča natezne armature od nateznega roba plošče je $a = 4$ cm. Trdnostni razred vseh armiranobetonskih elementov je C 30/37 in so armirani z jeklom, trdnostnega razreda S 500. Stropna plošča je armirana z obojestransko nosilno armaturo $\phi 12/10$ cm, površine $a_{sy} = a_{sz} = 11,3$ cm²/m. Lastna teža stropne konstrukcije je $g = 8$ kN/m², koristna pa $q = 5$ kN/m².

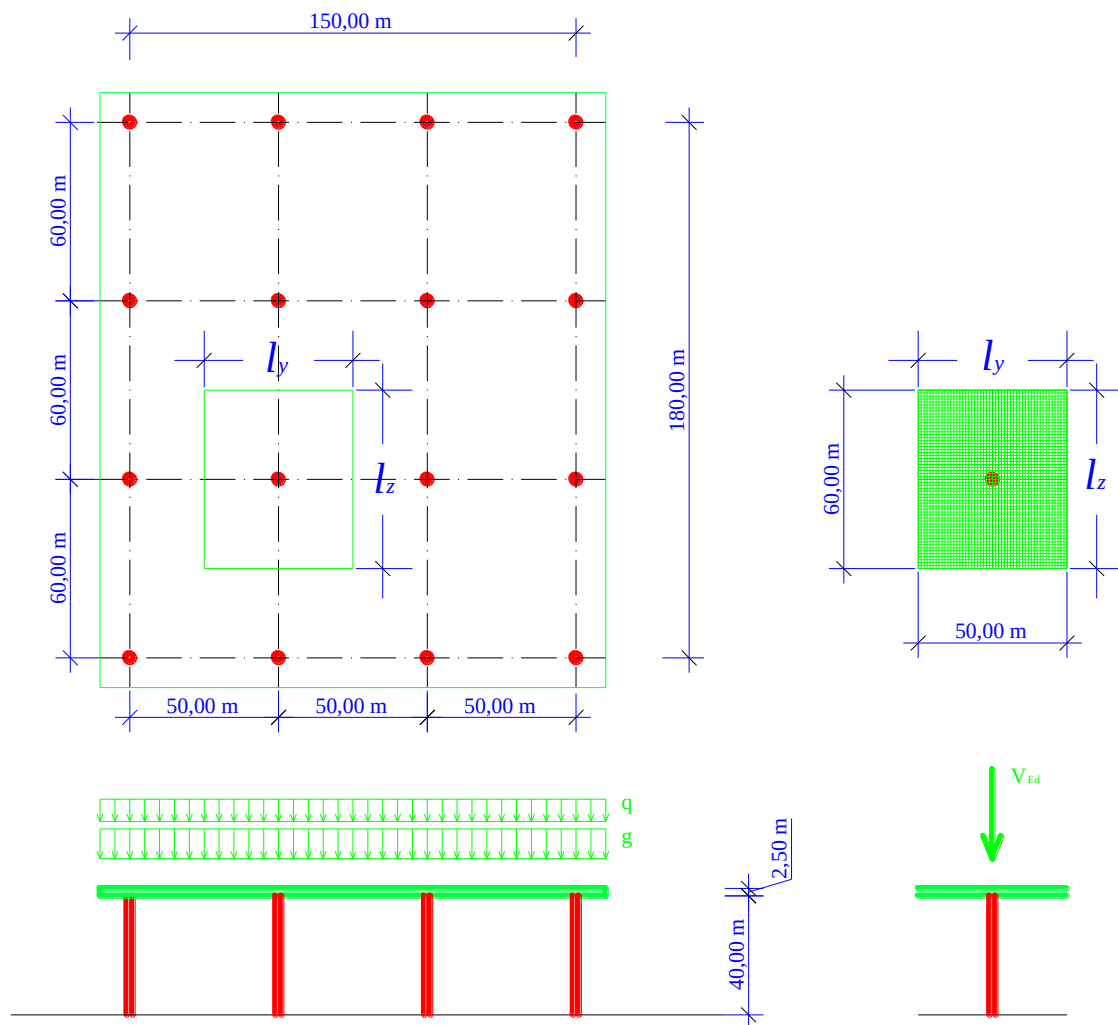
PROIZVODNI OBRAT s 4 x 4 stebri



Slika 20 Tloris in prečni prerez proizvodnega obrata.

Obstaja nevarnost preboja plošče nad notranjimi stebri.

PROIZVODNI OBRAT s 4 x 4 stebri



Slika 21 Obtežba.

Projektna obremenitev je

$$V_{Ed} = (\gamma_g \cdot g + \gamma_q \cdot q) \cdot l_y \cdot l_z = \left(1,35 \cdot 8 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} + 1,5 \cdot 5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right) \cdot 5\text{m} \cdot 6\text{m} = 549\text{kN}. \quad (4.14)$$

Karakteristična trdnost uporabljenega betona C 30/37 je

$$f_{ck} = 30\text{MPa},$$

projektna pa

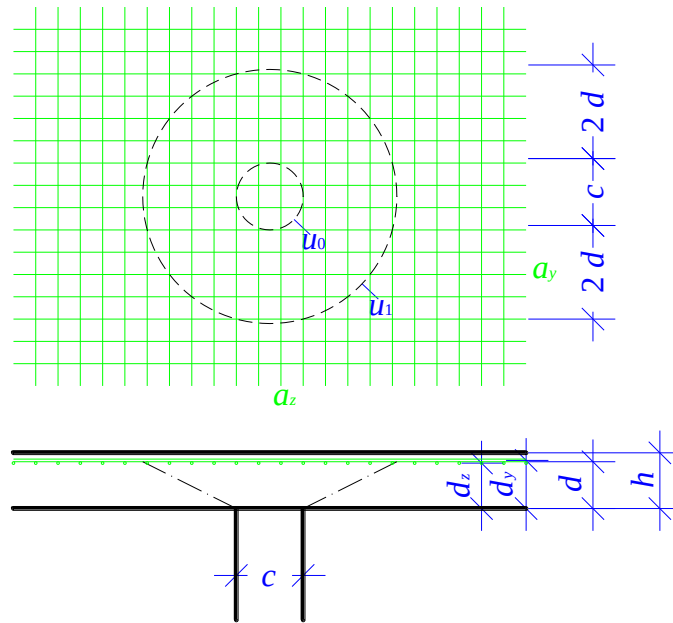
$$f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 1,0 \cdot \frac{30\text{MPa}}{1,5} = 20\text{MPa}. \quad (4.15)$$

Karakteristična trdnost uporabljene armature S 500 je

$$f_{yk} = 500\text{MPa},$$

projektna pa

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{500 \text{ MPa}}{1,15} = 434,8 \text{ MPa.} \quad (4.16)$$



Slika 22 *Tloris in prerez objekta v stičišču notranjega stebra in plošče s porušnim stožcem, ki je posledica preboja plošče nad stebrom.*

Debelina plošče je

$$h = 25 \text{ cm},$$

statična višina pa

$$d_{eff} = h - a = 25 \text{ cm} - 4 \text{ cm} = 21 \text{ cm}, \quad (4.17)$$

$$d_y = d_{eff} - \frac{\phi}{2} = 21 \text{ cm} - \frac{1,2 \text{ cm}}{2} = 20,4 \text{ cm}, \quad (4.18)$$

$$d_z = d_{eff} + \frac{\phi}{2} = 21 \text{ cm} + \frac{1,2 \text{ cm}}{2} = 21,6 \text{ cm}. \quad (4.19)$$

Koeficienta armiranja z glavno natezno armaturo v območju širine stebra v posamezni smeri in po $3d$ na vsako stran znašata

$$\rho_{ly} = \frac{a_{sy}}{d_y} = \frac{11,3 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}}}{20,4 \text{ cm}} = 0,554\%, \quad (4.20)$$

$$\rho_{lz} = \frac{a_{sz}}{d_z} = \frac{11,3 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}}}{21,6 \text{ cm}} = 0,523\%. \quad (4.21)$$

Račun strižnih napetosti v območjih, kjer obstaja možnost preboja, obsega tri kontrole:

- a) po obodu stebra oziroma po obodu kontrolne ploskve ne sme biti presežena največja prebojna strižna napetost

$$v_{Ed} < v_{Rd,max},$$

- b) strižna armatura proti preboju plošče ni potrebna, če velja

$$v_{Ed} < v_{Rd,c},$$

- c) če je $v_{Ed} > v_{Rd,c}$, je potrebno zagotoviti strižno armaturo proti preboju iz pogoja

$$v_{Ed} \leq v_{Rd,cs},$$

pri čemer so

$v_{Rd,max}$ največja prebojna strižna odpornost vzdolž obravnavanega kontrolnega prereza pri plošči,

v_{Rdc} projektna vrednost prebojne strižne odpornosti vzdolž obravnavanega kontrolnega prereza pri plošči brez strižne armature proti preboju,

v_{Rdcs} projektna vrednost prebojne strižne odpornosti vzdolž obravnavanega kontrolnega prereza pri plošči s strižno armaturo proti preboju.

Premer osnovnega kontrolnega obsega znaša

$$D = c + 2 \cdot 2 \cdot d = 30\text{cm} + 2 \cdot 2 \cdot 21\text{cm} = 114\text{cm}, \quad (4.22)$$

osnovni kontrolni obseg pa

$$u_1 = \pi \cdot D = \pi \cdot 1,14\text{m} = 3,58\text{m}.$$

Obseg ob obodu notranjega stebra je

$$u_0 = \pi \cdot c = \pi \cdot 0,30\text{m} = 0,94\text{m}. \quad (4.23)$$

Projektna vrednost prebojne strižne odpornosti vzdolž obravnavanega kontrolnega prereza pri plošči brez strižne armature proti preboju je

$$v_{Rd,c} = C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck} [\text{MPa}])^{\frac{1}{3}} + k_1 \cdot \sigma_{cp} \geq v_{min} + k_1 \cdot \sigma_{cp}, \quad (4.24)$$

pri čemer so

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d [\text{mm}]}} = 1 + \sqrt{\frac{200}{210}} = 1,976 \leq 2,0, \quad (4.25)$$

$$\rho_l = \sqrt{\rho_{ly} \cdot \rho_{lz}} = \sqrt{0,00554 \cdot 0,00523} = 0,00539 \leq 0,02, \quad (4.26)$$

$$\sigma_{cp} = \frac{\sigma_{cy} + \sigma_{cz}}{2} = 0, \quad (4.27)$$

$$\sigma_{cy} = \frac{N_{Ed,y}}{A_{cy}} = 0, \quad (4.28)$$

$$\sigma_{cz} = \frac{N_{Ed,z}}{A_{cz}} = 0, \quad (4.29)$$

$N_{Ed,y}$ in $N_{Ed,z}$ vzdolžni sili po celotni širini dela plošče med notranjimi stebri,

$$C_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c} = \frac{0,18}{1,5} = 0,12, \quad (4.30)$$

$$k_1 = 0,1,$$

$$v_{min} = 0,035 \cdot k^{\frac{3}{2}} \cdot f_{ck}^{\frac{1}{2}} = 0,035 \cdot 1,976^{\frac{3}{2}} \cdot 30^{\frac{1}{2}} = 0,532 \text{ MPa}. \quad (4.31)$$

Projektna vrednost prebojne strižne odpornosti vzdolž obravnavanega kontrolnega prereza pri plošči brez strižne armature proti preboju je

$$v_{Rd,c} = 0,12 \cdot 1,976 \cdot (100 \cdot 0,00539 \cdot 30)^{\frac{1}{3}} + 0,1 \cdot 0 = 0,600 \text{ MPa} > 0,532 \text{ MPa}, \quad (4.32)$$

Projektna vrednost prebojne strižne napetosti vzdolž kontrolnega prereza pri plošči je

$$v_{Ed} = \beta \cdot \frac{V_{Ed}}{u_1 \cdot d}, \quad (4.33)$$

pri notranjih stebrih je koeficient, ki upošteva vpliv ekscentrične obremenitve plošče zaradi momentov, ki se preko stebrov prenesejo v ploščo, enak $\beta = 1,15$, in je

$$v_{Ed} = 1,15 \cdot \frac{549 \text{ kN}}{3,58 \text{ m} \cdot 0,21 \text{ m}} = 0,839 \text{ MPa}. \quad (4.34)$$

Ker je

$$v_{Ed} = 0,839 \text{ MPa} > v_{Rd,c} = 0,600 \text{ MPa}, \quad (4.35)$$

je potrebna strižna armatura.

Preverimo odpornost glede tlačnih razpor, pri čemer je merodajen prerez ob stebri

$$v_{Ed} = \beta \cdot \frac{V_{Ed}}{u_0 \cdot d} \leq v_{Rd,max}, \quad (4.36)$$

$$v_{Ed} = 1,15 \cdot \frac{549 \text{ kN}}{0,94 \text{ m} \cdot 0,21 \text{ m}} = 3,19 \text{ MPa}, \quad (4.37)$$

$$v_{Rd,max} = 0,5 \cdot \nu \cdot f_{cd}, \quad (4.38)$$

$$\nu = 0,6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck} [\text{MPa}]}{250} \right) = 0,6 \cdot \left(1 - \frac{30}{250} \right) = 0,528, \quad (4.39)$$

$$v_{Rd,max} = 0,5 \cdot 0,528 \cdot 20 \text{ MPa} = 5,28 \text{ MPa}, \quad (4.40)$$

$$v_{Ed} = 3,19 \text{ MPa} < v_{Rd,max} = 5,28 \text{ MPa}. \quad (4.41)$$

Pogoj je izpolnjen.

Obseg, pri katerem strižna armatura proti preboju ni več potrebna, je

$$u_{out} = \beta \cdot \frac{V_{Ed}}{v_{Rd,c} \cdot d} = 1,15 \cdot \frac{549 \text{ kN}}{0,600 \text{ MPa} \cdot 0,21 \text{ m}} = 5,01 \text{ m}. \quad (4.42)$$

Radius tega obsega znaša

$$r_{out} = \frac{u_{out}}{2 \cdot \pi} = \frac{5,01 \text{ m}}{2 \cdot \pi} = 0,80 \text{ m}. \quad (4.43)$$

Potrebno strižno armaturo izračunamo iz pogoja

$$v_{Rd,cs} = 0,75 \cdot v_{Rd,c} + 1,5 \cdot \frac{d}{s_r} \cdot A_{sw} \cdot f_{ywd,ef} \cdot \frac{1}{u_1 \cdot d} \cdot \sin \alpha \geq v_{Ed}, \quad (4.44)$$

pri čemer je efektivna projektna trdnost strižne armature

$$f_{ywd,ef} = 250 + 0,25 \cdot d [\text{mm}] \leq f_{ywd} [\text{MPa}], \quad (4.45)$$

$$f_{ywd,ef} = 250 + 0,25 \cdot 210 \text{ mm} = 302,5 \text{ MPa} < 434,8 \text{ MPa}, \quad (4.46)$$

in potrebna vertikalna strižna armatura, $\alpha = 90^\circ$, po kontrolnem obodu je

$$\frac{A_{sw}}{s_r} = \frac{v_{Ed} - 0,75 \cdot v_{Rd,c}}{1,5 \cdot f_{ywd,ef} \cdot \frac{1}{u_1} \cdot \sin \alpha} = \frac{0,84 \text{ MPa} - 0,75 \cdot 0,599 \text{ MPa}}{1,5 \cdot 302,5 \text{ MPa} \cdot \frac{1}{3,58 \text{ m}} \cdot \sin 90^\circ} = 0,0031 \frac{\text{m}^2}{\text{m}} = 0,31 \frac{\text{cm}^2}{\text{cm}}. \quad (4.47)$$

Kadar je potrebna strižna armatura, je prerez enega stremena $A_{sw,min}$ podan z izrazom

$$A_{sw,min} \cdot \frac{2 \cdot \sin \alpha + \cos \alpha}{s_r \cdot s_t} \geq 0,08 \cdot \frac{\sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}}. \quad (4.48)$$

Izberemo palice, premera 8 mm

$$A_{sw1} = \frac{\pi \cdot \phi^2}{4} = \frac{\pi \cdot (0,8 \text{ cm})^2}{4} = 0,50 \text{ cm}^2 \quad (4.49)$$

in je radialna razdalja med stremeni enaka

$$s_r = \frac{n \cdot A_{sw1}}{A_{sw}} = \frac{9 \cdot 0,50 \text{ cm}^2}{0,31 \frac{\text{cm}^2}{\text{cm}}} = 14,52 \text{ cm} \cong 15 \text{ cm}. \quad (4.50)$$

Tangencialna razdalja med stremeni na kontrolnem obodu mora zadoščati pogoju

$$s_t \leq 2 \cdot d = 2 \cdot 21 \text{ cm} = 42 \text{ cm}, \quad (4.51)$$

zato je potrebno število palic na kontrolnem obodu

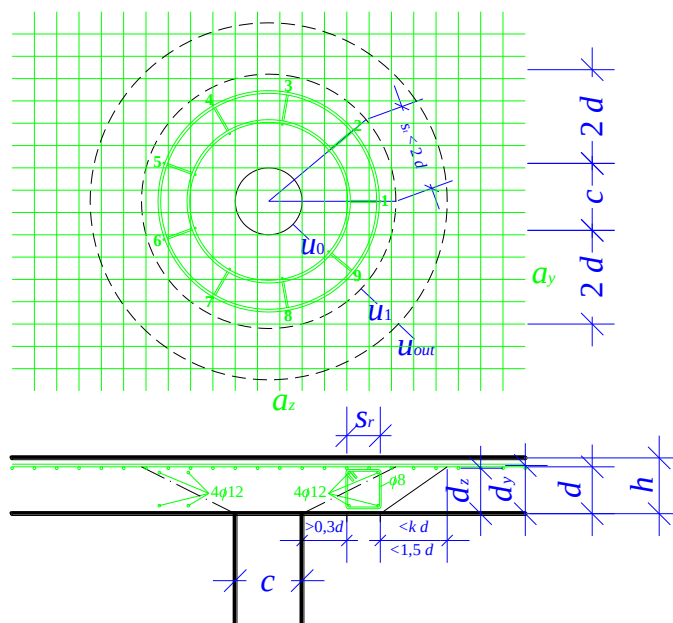
$$n \geq \frac{u_1}{2 \cdot d} = \frac{358 \text{ cm}}{2 \cdot 21 \text{ cm}} = 8,52. \quad (4.52)$$

Izberemo 9 palic in tangencialna razdalja med stremeni na kontrolnem obodu je

$$s_t = 2 \cdot \frac{D}{2} \cdot \sin \frac{360^\circ}{2 \cdot n} = 2 \cdot \frac{114 \text{ cm}}{2} \cdot \sin \frac{360^\circ}{2 \cdot 9} = 39,0 \text{ cm}. \quad (4.53)$$

Pogoju (4.48) je zadoščeno

$$0,50 \text{ cm}^2 \cdot \frac{2 \cdot \sin 90^\circ + \cos 90^\circ}{15 \text{ cm} \cdot 39 \text{ cm}} = 0,00171 > 0,08 \cdot \frac{\sqrt{30}}{500} = 0,00088. \quad (4.54)$$



Slika 23 Tloris in prerez objekta v stičišču notranjega stebra in plošče s stremensko armaturo proti preboju plošče nad stebrom.

4.4.1 Domači nalogi

Ali obstaja nevarnost preboja plošče z enakimi podatki, kot so v rešeni vaji, le da so stebri in plošča iz armiranega betona trdnostnega razreda C90/105?

Izračunajte najmanjšo debelino plošče, pri kateri strižna armatura proti preboju plošče ne bi bila potrebna. Ostali podatki so enaki kot v rešeni vaji. Upoštevajte povečanje lastne teže armiranobetonske plošče, katere specifična gostota je 25 kN/m^3 .