

4. vaja:

DIMENZIONIRANJE BETONSKIH ELEMENTOV S POMOČJO MODELOV Z RAZPORAMI IN VEZMI

ENOOSNO EKSCENTRIČNO OBTEŽEN TEMELJ

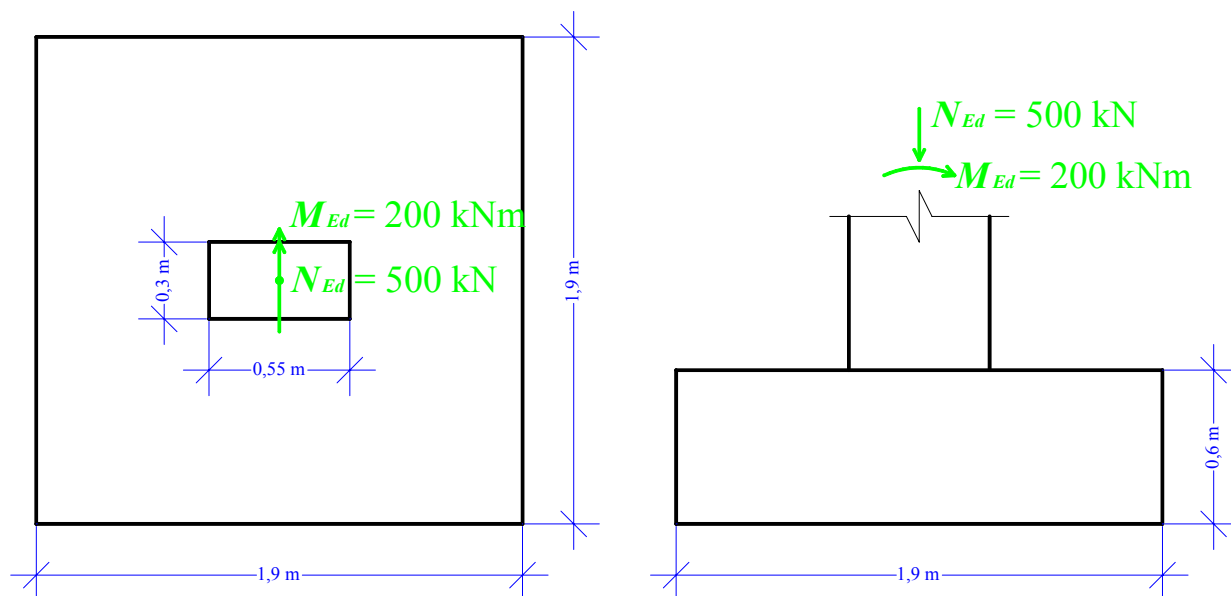
1 Opis projektne naloge

1.1 Konstrukcija

Točkovni temelj obtežen z ekscentrično osno silo bomo dimenzionirali z uporabo metode z razporami in vezmi. Predlagani tridimenzionalni model razpor in vezi sledi razporedu napetosti v konstrukciji. Pomembna je določitev zadostnega sidranja nateznih palic stebrov, ki morajo biti povezani z vezmi na dnu temelja.

1.2 Geometrija in obtežba

Geometrija temelja in projektne sile so prikazane na sliki 1.



Slika 1 Geometrija temelja in projektne sile.

1.3 Materiali

Beton $f_{ck} = 20 \text{ MPa}$

$$f_{cd} = f_{ck} / 1,5 = 20 / 1,5 = 13,33 \text{ MPa}$$

Armatura $f_{yk} = 500 \text{ MPa}; f_{yd} = f_{yk} / 1,15 = 500 / 1,15 = 435 \text{ MPa}$

2 Projektiranje

Postopek projektiranja vsebuje naslednje korake:

- 1. korak: Določitev ravnotežja zunanjih sil.
- 2. korak: Oblikovanje modela razpor in vezi, ki sledi notranjim napetostim.
- 3. korak: Določitev količine armature.
- 4. korak: Dimenzioniranje vozlišč in preverjanje napetosti v njih.
- 5. korak: Razporeditev armature.

1. korak: Določitev ravnotežja zunanjih sil

Privzamemo predpostavko, da je temelj togo telo. Ravnotežje v temeljni ploskvi dosežemo z računom rezultante osnih sil v stebru in reakcije podlage, ki deluje na stiku s temeljem. V tem primeru lastne teže temelja ni potrebno upoštevati.

Analiza prečnega prereza stebra

$$\varepsilon_c / \varepsilon_s = -3,5 \text{ ‰} / 5 \text{ ‰}$$

$$h = 0,55 \text{ m}$$

$$z - z_s = 0,189 \text{ m}$$

$$a = 0,05 \text{ m}$$

$$x = 0,206 \text{ m}$$

$$d = 0,50 \text{ m}$$

$$N_{Ed} = 500 \text{ kN}$$

$$k_h = 0,276$$

$$M_{Ed} = 200 \text{ kNm}$$

$$k_x = 0,412$$

$$N_{Ed} = -N_c + N_s$$

$$k_s = 1,207 = k_z^{-1}$$

$$M_{Ed} = z \cdot N_c - z_s \cdot N_{Ed} = k_z \cdot d \cdot N_c - (0,5 \cdot d - a) \cdot N_{Ed}$$

$$z = 0,414 \text{ m}$$

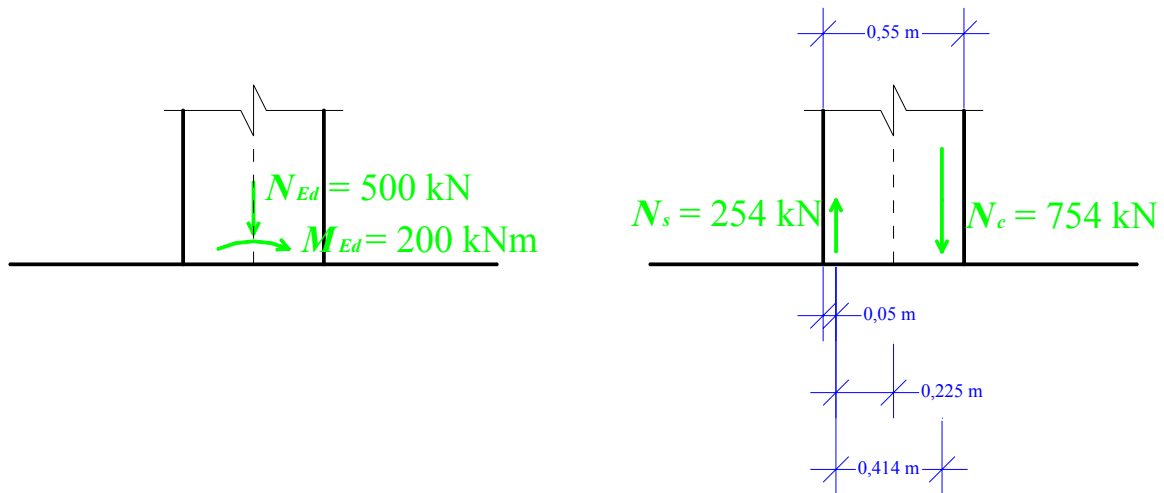
$$N_c = [M_{Ed} - (0,5 \cdot d - a) \cdot N_{Ed}] / (k_z \cdot d) = 754 \text{ kN}$$

$$z_s = 0,225 \text{ m}$$

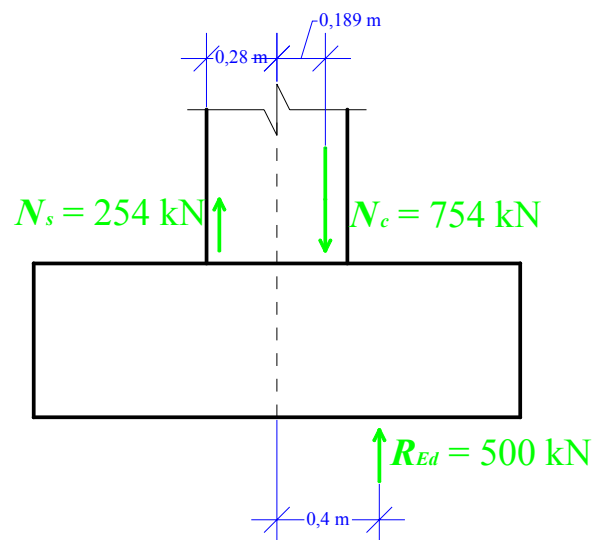
$$N_s = N_c - N_{Ed} = 254 \text{ kN}$$

Rezultanti osnih sil N_c in N_s v stiku stebra s temeljem sta dobljeni iz analize prikazane na sliki 2. Ravnotežje zunanjih sil je prikazano na sliki 3. Ekscentričnost rezultante je

$$e = M_d / N_d = 200 \text{ kNm} / 500 \text{ kN} = 0,40 \text{ m}.$$



Slika 2 Rezultanti osnih sil v stiku stebra s temeljem.

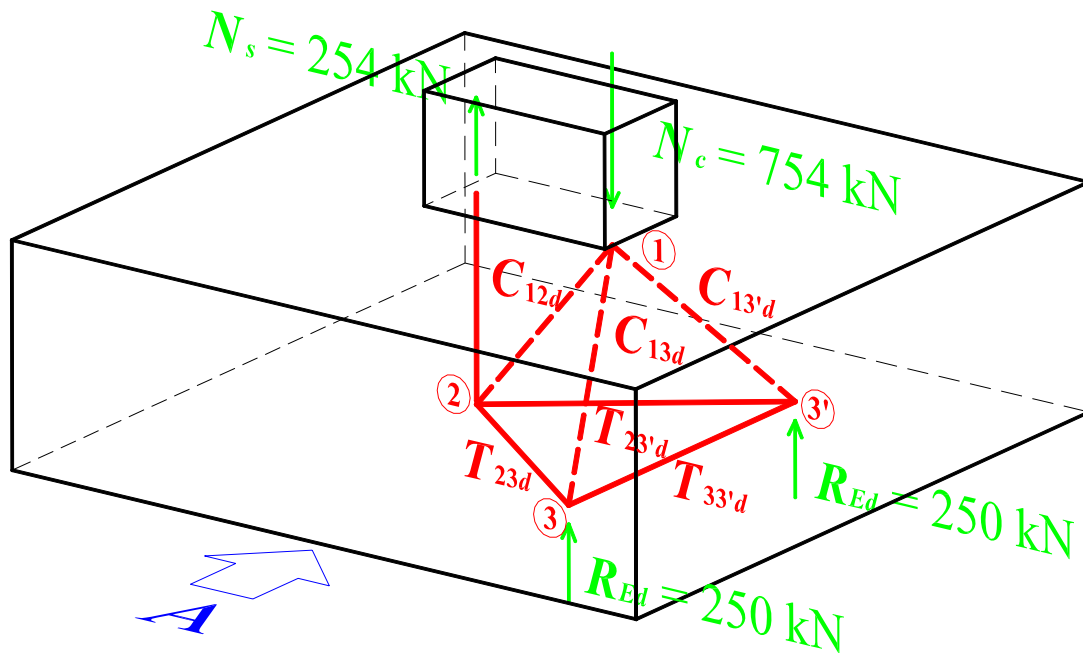


Slika 3 Ravnotežje zunanjih sil.

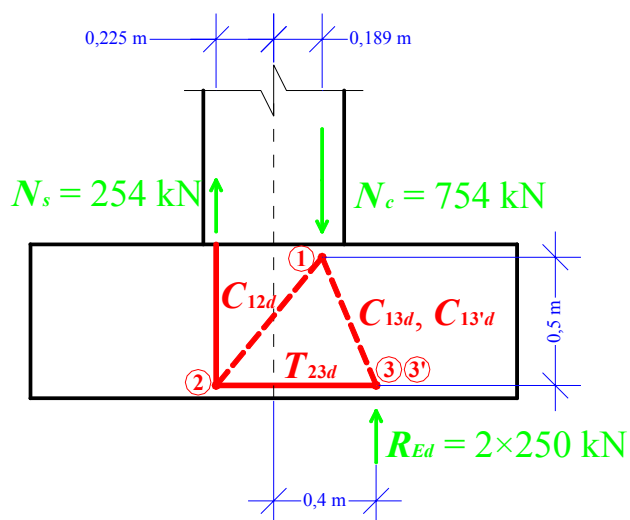
2. korak: Oblikovanje modela razpor in vezi, ki sledi notranjim napetostim

Tridimenzionalni model razpor in vezi, ki idealizirano prikazuje prenos sil po temelju prikazujeta sliki 4 in 5.

Model na sliki 4 predstavlja najverjetnejši in najbolj naraven tok sil v betonskem temelju, ob tem da v vezeh T_{23d} in $T_{23'd}$ lahko zadoščamo ravnotežju le z ustrezno količino potrebne armature.

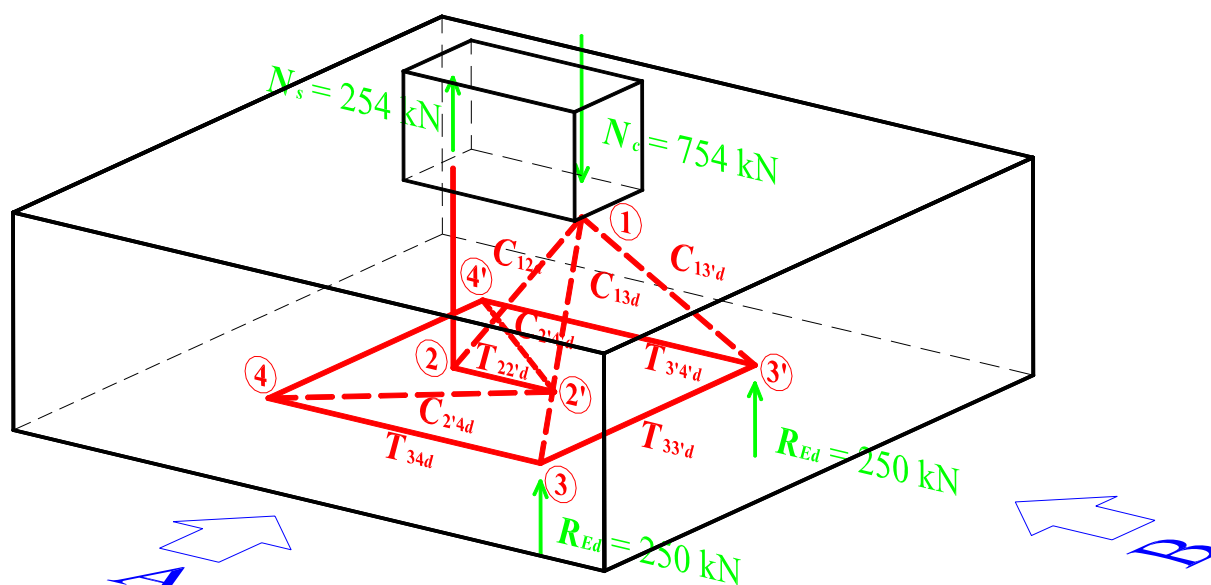


Slika 4 Začetni tridimenzionalni model razpor in vezi.



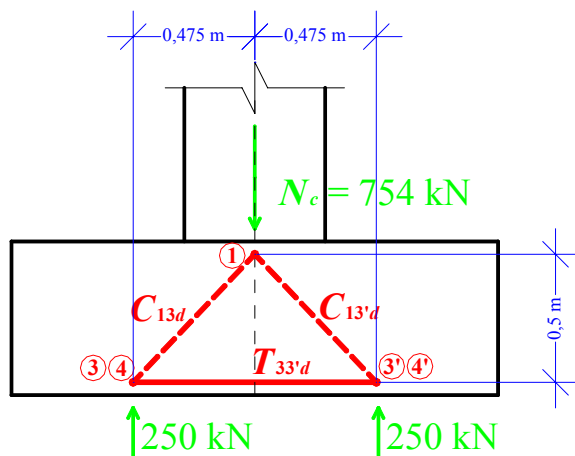
Slika 5 Model razpor in vezi v dveh dimenzijah – prečni prerez temelja.

Vendar pa trikotna razporeditev vezi zahteva zelo specifičen in nepraktičen raspored armature. Za rešitev tega problema privzamemo nov tridimenzionalni model, ki je prikazan na sliki 6. Nov model lahko preprosto konstruiramo s pravokotno razporeditvijo armature, sestavljeno iz palic vzporednih zunanjim stranem temelja. Novi vozlišči 4 in 4' sta postavljeni na sredo polovice temelja, armatura med njima je upoštevana v palici T_{44d} . V vozlišču 2 se vez ukrivi, kar prikazuje slika 11, in armatura je sidrana za zavojem v vozlišču 2' s sidrno dolžino $l_{b,net} = 22,5$ cm.



Slika 6 Drugi tridimenzionalni model razpor in vezi.

Da je pregledneje, rezultante napetosti določamo iz idealiziranih ploskovnih modelov. Prvi tloris je prikazan na sliki 7, pri čemer sta kota $\theta_{4h} = 39,6^\circ$ in $\theta_{3h} = 66,1^\circ$. Drugi model ustreza pogledu A na tridimenzionalni model in je prikazan na sliki 8, pri čemer sta kota $\theta_2 = 50,4^\circ$ in $\theta_3 = 67,1^\circ$. In končno, tretji, popolnoma simetričen ploskovni model, je oblikovan na sliki 9 in ustreza pogledu B na tridimenzionalni model.



Slika 9 Model razpor in vezi v dveh dimenzijah – prečni prerez temelja – pogled v smeri B.

Račun sil v modelu razpor in vezi se začne z ravnotežjem v vozlišču 3 kot je prikazano na sliki 8:

$$T_{34d} = 250 \text{ kN} \cdot (0,4 \text{ m} - 0,189 \text{ m}) / 0,50 \text{ m} = 105,4 \text{ kN}.$$

V prečni smeri zahtevana armatura v vezi $T_{33'd}$ je lahko izračunana iz idealiziranega dvodimenzionalnega modela nosilca na sliki 9:

$$T_{33'd} / 250 \text{ kN} = 0,475 \text{ m} / 0,50 \text{ m} \Rightarrow T_{33'd} = 237,5 \text{ kN}.$$

Iz tlorisa na sliki 7 je razvidno, da mora biti sila C_{13d} v ravnotežju z vezema T_{34d} in $T_{33'd}$. Združimo ju v silo T_{3d}

$$T_{3d} = \sqrt{T_{34d}^2 + T_{33'd}^2} = \sqrt{(105,4 \text{ kN})^2 + (237,5 \text{ kN})^2} = 259,8 \text{ kN}$$

in v vertikalni ravnini, vsebujoč še razpore C_{13d} in reakcijo zemljine $R_d/2$, iz ravnotežja sil sledi

$$C_{13d} = \sqrt{\left(\frac{R_d}{2}\right)^2 + T_{3d}^2} = \sqrt{(250 \text{ kN})^2 + (259,8 \text{ kN})^2} = 360,6 \text{ kN}.$$

Iz ravnotežja v vozlišču 2 na sliki 8 izračunamo

$$C_{12d} = \frac{T_d}{\sin \theta_2} = \frac{254 \text{ kN}}{\sin 50,4^\circ} = 219,9 \text{ kN}.$$

Naslednji korak sledi iz računa vodoravnega ravnotežja. Vidimo, da sta razpore C_{24d} in $C_{24'd}$ simetrični, iz česar sledi, da mora biti vodoravna rezultanta iz računa C_{12d} deljena z dve (slika 7)

$$C_{24d} = C_{24'd} = \frac{C_{12d}}{2} \cdot \frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_{4h}} = \frac{219,9 \text{ kN}}{2} \cdot \frac{\sin 50,4^\circ}{\sin 39,6^\circ} = 91,0 \text{ kN}.$$

In končno pogledimo še v vozlišče 2 na sliki 8

$$T_{44'd} = C_{24d} \cdot \sin \theta_{4h} = 91,0 \text{ kN} \cdot \sin 39,6^\circ = 57,9 \text{ kN}.$$

3. korak: Določitev količine armature

Celotna vzdolžna armatura, dobljena iz predhodnih izračunov, je

$$A_{34s} = \frac{T_{34d}}{f_{yd}} = \frac{105,4 \text{ kN}}{435 \text{ MPa}} = 242,2 \text{ mm}^2,$$

$$A_{33's} = \frac{T_{33'd}}{f_{yd}} = \frac{237,5 \text{ kN}}{435 \text{ MPa}} = 546,0 \text{ mm}^2,$$

$$A_{44's} = \frac{T_{44'd}}{f_{yd}} = \frac{57,9 \text{ kN}}{435 \text{ MPa}} = 133,2 \text{ mm}^2.$$

Privzamemo, da je sodelujoča širina vsake vezi enaka polovici širine temelja $b = 0,95 \text{ m}$. Področje armiranja $A_{33'd}$ privzamemo po celotnem območju

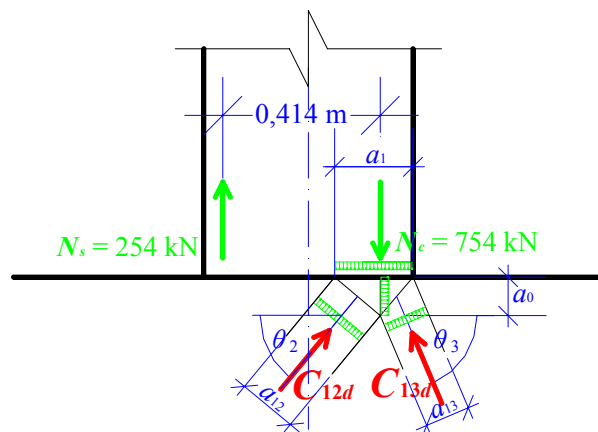
$$a_{33's} = \frac{A_{33's}}{b} = \frac{546,0 \text{ mm}^2}{0,95 \text{ m}} = 574,7 \text{ mm}^2/\text{m} \rightarrow \phi 16 \text{ mm} / 20 \text{ cm}.$$

4. korak: Dimenzioniranje vozlišč in preverjanje napetosti v njih

Računsko kontrolo v območju vozlišč izvršimo le za vodilni vozlišči 1 in 2. Vozlišča 3, 3', 4 in 4' so rezultat poenostavitve pri oblikovanju modela in niso dejanska vozlišča, ker v njih ni koncentracije napetosti.

Vozlišče 1: Vozlišče 1 je troosno tlačeno vozlišče, ki ga lahko upoštevamo na poenostavljen način kot ravninsko vozlišče CCC [Slaich et al., Design and detailing of structural concrete using strut-and-tie models, The Structural Engineer, Vol. 69, No. 6, 1991] (slika 10). V omenjenem primeru projektno tlačno trdnost betona povečamo

$$f_{cs,eff} = 1,0 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \cdot f_{cd} = 1,0 \cdot \left(1 - \frac{30}{250}\right) \cdot 20 \text{ MPa} = 17,60 \text{ MPa}.$$



Slika 10 Vozlišče 1.

Geometrija omenjenega vozlišča je določena z naslednjimi merami

$$a_0 = \max(a_1 \cos \theta_2 \sin \theta_2, a_1 \cos \theta_3 \sin \theta_3) = 0,101 \text{ m},$$

$$a_1 = 0,206 \text{ m},$$

pri čemer dobimo vrednost $a_1 = x$ iz analize prečnega prereza stebra,

$$\theta_2 = 50,4^\circ, \theta_3 = 67,1^\circ,$$

$$a_{12} = a_1 \cdot \left(\frac{\tan \theta_2}{\tan \theta_2 + \tan \theta_3} \right) \cdot \sin \theta_2 + a_0 \cdot \cos \theta_2 = 0,118 \text{ m},$$

$$a_{13} = a_1 \cdot \left(\frac{\tan \theta_3}{\tan \theta_2 + \tan \theta_3} \right) \cdot \sin \theta_3 + a_0 \cdot \cos \theta_3 = 0,165 \text{ m}.$$

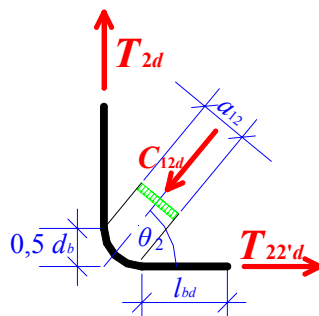
Privzamemo, da je širina vozlišča enaka širini stebra $b = 0,30 \text{ m}$. Tlačne napetosti so

$$\sigma_{1cd} = \frac{N_c}{b \cdot a_1} = \frac{754 \text{ kN}}{0,30 \text{ m} \cdot 0,206 \text{ m}} = 12,21 \text{ MPa} > f_{cs,eff},$$

$$\sigma_{12cd} = \frac{C_{12d}}{b \cdot a_{12}} = \frac{219,9 \text{ kN}}{0,30 \text{ m} \cdot 0,118 \text{ m}} = 6,21 \text{ MPa} < f_{cs,eff},$$

$$\sigma_{13cd} = \frac{C_{13d} + C_{13'd}}{b \cdot a_{13}} = \frac{360,6 \text{ kN} + 274,3 \text{ kN}}{0,30 \text{ m} \cdot 0,165 \text{ m}} = 12,82 \text{ MPa} = f_{cs,eff}.$$

Vozlišče 2: Vozlišče 2 je TTC vozlišče [Slaich et al., Design and detailing of structural concrete using strut-and-tie models, The Structural Engineer, Vol. 69, No. 6, 1991] (slika 11). Slika 11 prikazuje vozlišče 2 na simetrični ravnini. Sidranje armature iz stebra določimo po navodilih Evrokoda 2.



Slika 11 Vozlišče 2.

V omenjenem primeru projektno tlačno trdnost betona zmanjšamo

$$f_{cs,eff} = 0,75 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \cdot f_{cd} = 0,75 \cdot \left(1 - \frac{30}{250}\right) \cdot 20 \text{ MPa} = 11,62 \text{ MPa}.$$

Projektno potrebna armatura v stebru je

$$A_{2s} = \frac{N_s + C_{12d} \cdot \sin \theta_2}{f_{yd}} = \frac{254 \text{ kN} + 219,9 \text{ kN} \cdot \sin 50,4^\circ}{435 \text{ MPa}} = 974,0 \text{ mm}^2 \rightarrow 4 \phi 20 \text{ mm},$$

ki jo po Evrokodu 2 nad dnom temelja krivimo

$$d_b \geq 7 \phi = 7 \cdot 20 \text{ mm} = 140 \text{ mm},$$

FIP pa priporoča

$$d_b \geq 10 \phi = 10 \cdot 20 \text{ mm} = 200 \text{ mm},$$

izberemo

$$d_b = 200 \text{ mm},$$

in sidramo

$$l_{b,rqd} = \frac{\phi}{4} \cdot \frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}} = \frac{20 \text{ mm}}{4} \cdot \frac{\frac{219,9 \text{ kN} \cdot \cos 50,4^\circ}{4 \cdot \pi \cdot \left(\frac{20 \text{ mm}}{4}\right)^2}}{2,25 \cdot \frac{2,9 \text{ MPa}}{1,5}} = 228,1 \text{ mm},$$

$$l_{bd} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 l_{b,rqd} = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,7 \cdot 1 \cdot 228,1 \text{ mm} = 159,7 \text{ mm},$$

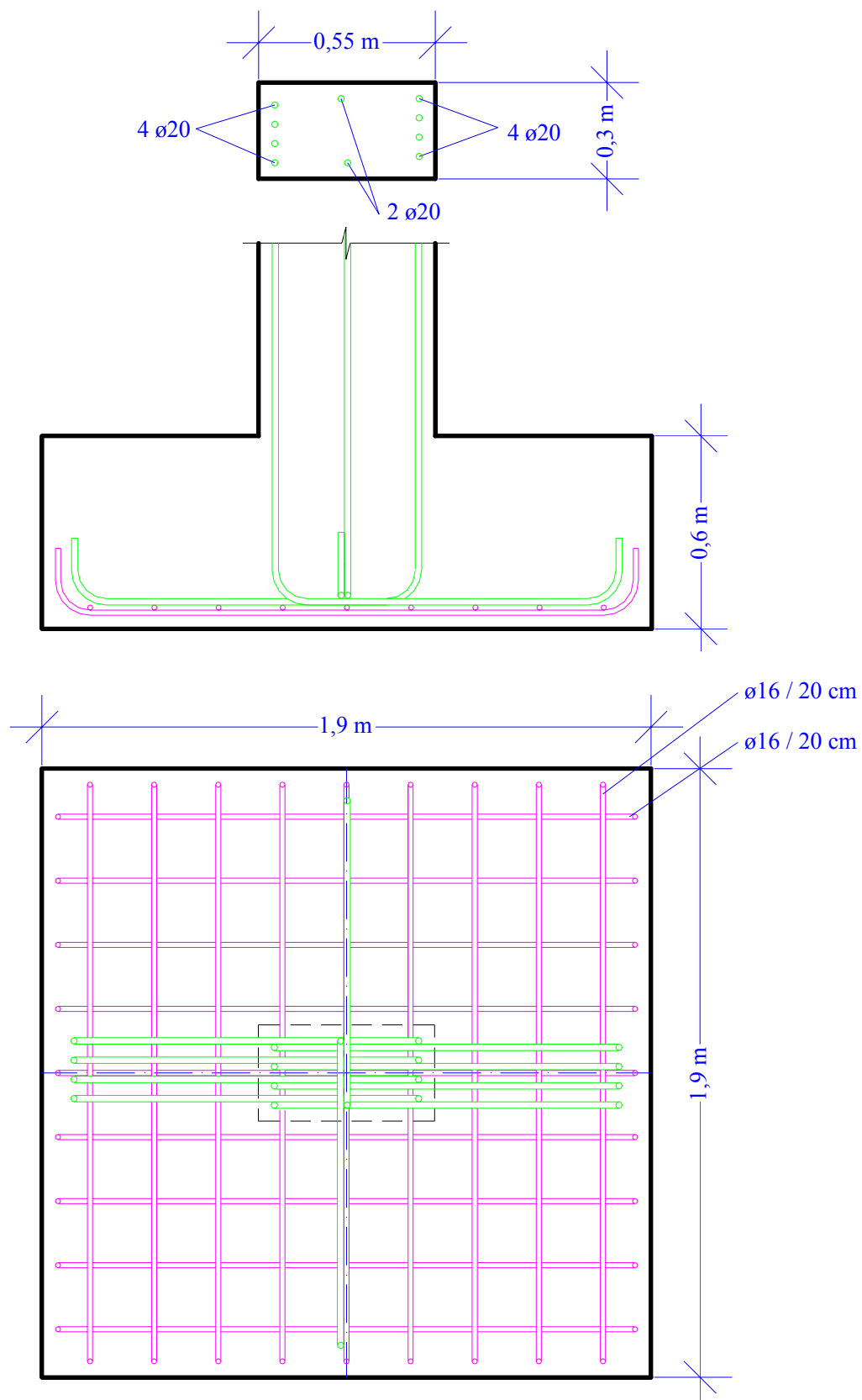
$$l_{b,\min} = \max\{0,3l_{b,rqd}; 10\phi; 100 \text{ mm}\} = 200 \text{ mm}.$$

Izbrana sidrna dolžina je 225 mm.

Tlačne napetosti so

$$\sigma_{12cd} = \frac{C_{12d}}{b \cdot a_{12}} = \frac{219,9 \text{ kN}}{0,30 \text{ m} \cdot 0,13 \text{ m}} = 5,64 \text{ MPa} < f_{cs,eff}.$$

5. korak: Razporeditev armature



Slika 12 Razporeditev armature.