Nyomott oszlopok számítása EC2 szerint (mintapéldák)

1. Központosan nyomott oszlop

Központosan nyomott az oszlop ha $e_c = 0$ (e_c : elsőrendű, vagy kezdeti külpontosság).

Megjegyzés:

Az EC2 szerint nincs központosan nyomott oszlop, a külpontosságnövekményeket mindig figyelembe kell venni. Ebből az eljárásból került levezetésre a φ-s módszer.

$\frac{l_0}{h} < 26$ esetén alkalmazható az eljárás

$l_0 =$ kihajlási hossz

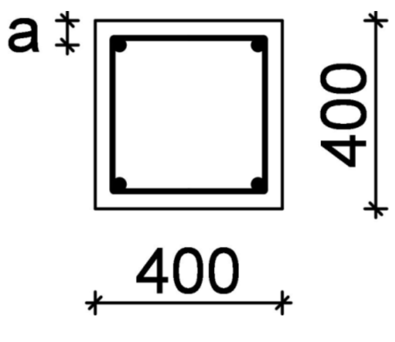
$$N_{Rd} = \varphi * N_u'$$

$$N_u' = A_c * f_{cd} + A_S * f_{yd}$$

1.1. Példa: Négyzet keresztmetszetű oszlop ellenőrzése

1.1.1. Kiindulási adatok:

Anyagminőségek: B500; C20/25



a = betontakarás + kengyelátmérő + fővas átmérő/2

$$a = 20\ mm + 10\ mm + \frac{20mm}{2} = 40\ mm$$

$$d = 400\ mm - 40\ mm = 360\ mm$$

$$N_{Ed} = 1900\ kN$$

$$l_0 = 3000\ mm$$

1.1.2. Szükséges vasmennyiség számítása

$$N_{Ed} = \varphi * N_u'$$

$$N_u' = A_c * f_{cd} + A_S * f_{yd}$$

$$N_{Ed} = \varphi * N_u' = \varphi * (A_c * f_{cd} + A_S * f_{yd})$$

$$\frac{N_{Ed}}{\varphi} = A_c * f_{cd} + A_S * f_{yd}$$

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\varphi} - A_c * f_{cd}}{f_{yd}} = \frac{\frac{N_{Ed}}{\varphi} - b * h * f_{cd}}{f_{yd}} = A_S$$

φ *közelítő* értékének számítása :

$\alpha = l_o/h = 3000/400 = 7{,}5 < 12{,}0$

téglalap keresztmetszet, 2 két sávban elhelyezett vasalás

beton: C20/25

$\varphi = 0{,}86$ (táblázatból)

$h = 400\ mm$

$\varphi_{\max} = 0{,}81$ (táblázatból)

$\varphi = 0{,}81$

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{y_S} = \frac{500}{1{,}5} = 434{,}78\,N/mm^2$$

$$f_{cd} = \alpha * \frac{f_{ck}}{y_c} = 1{,}0 * \frac{20}{1{,}5} = 13{,}33\,N/mm^2$$

$$A_S^{'} = \frac{\frac{N_{Ed}}{\varphi} - b * h * f_{cd}}{f_{yd}} = \frac{\frac{1900 * 10^3 N}{0{,}81} - 13{,}33 N/mm^2 * 400mm * 400mm}{434{,}78 N/mm^2} = 489{,}6mm^2$$

Alkalmazott vasalás: 4 db ø 14 = 616 mm^2

$$A_S \min = \max\begin{cases} 0{,}1(N_{Ed}/f_{yd}) = 0{,}1(1900 * 10^3 N/434{,}78\,N/mm^2) = 437mm^2 \\ 0{,}003A_C = 0{,}003 * 400mm * 400mm = 480{,}0mm^2 \end{cases}$$

1.1.3. Ellenőrzés

$$N_W = b * h * f_{cd} + A_S|\sigma_S| = 400mm * 400mm * 13{,}33N/mm^2 + 616mm^2 * 434{,}78N/mm^2 = 2400{,}6kN$$

$$N_{Rd} = \varphi * N_W = 0{,}81 * 2400{,}6kN = 1944{,}5kN > N_{Ed} = 1900kN \ \rightarrow \text{megfelel}$$

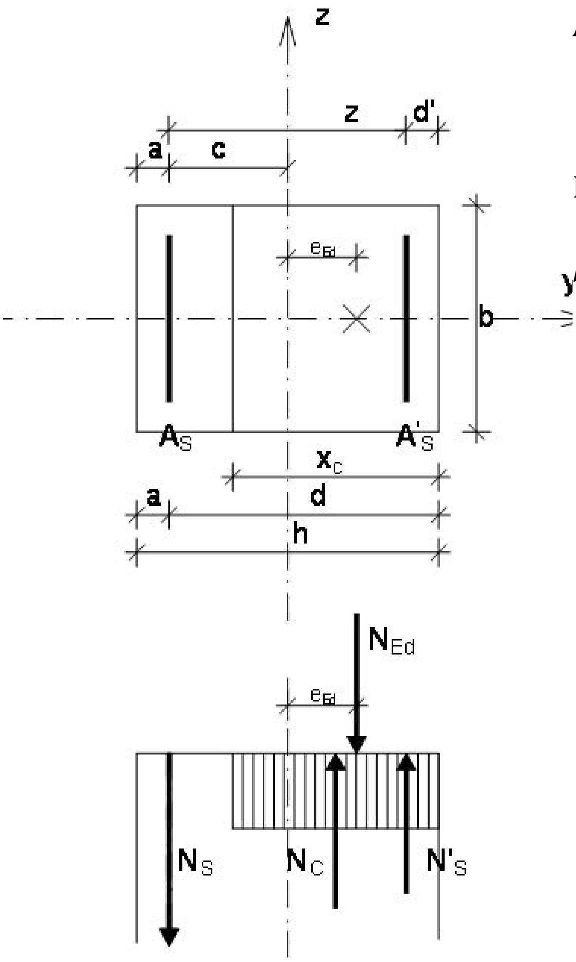
2. Külpontosan nyomott oszlop (kiskülpontos nyomás)

2.1. Példa: Tervezzük meg az alábbi nyomott oszlop szükséges vasalását!

Megjegyzés:

Feladatainkat szimmetriasíkban működő N_{Ed} erőre végezzük el, csak egyik tengely irányú külpontosságot vizsgálva. Konkrét tervezési feladatnál azonban a külpontosságnövekményeket mindkét tengely irányában figyelembe kell venni!

2.1.1. Kiindulási adatok



Anyagminőségek: B500; C20/25

$N_{Ed} = 1500kN$; $M_{Ed} = 85kNm$

Betontakarás: $c_{nom} = 20{,}0mm$

$b = 300mm$; $h = 400mm$

$f_{ck} = 20\,N/mm^2$; $f_{yk} = 500\,N/mm^2$

$l_0 = 3000mm$

$$a \cong betontakarás + kengyel + \frac{vasátmérő}{2} = 20mm + 10m$$

$$+\frac{20mm}{2} = 40mm$$

$$d = h - a = 400mm - 40mm = 360mm$$

$$d' = 40mm$$

$$z = d - d' = 360mm - 40mm = 320mm$$

$$c = \frac{z}{2} = \frac{320mm}{2} = 160mm$$

2.1.2. Anyagjellemzők számítása

A beton nyomószilárdságának tervezési értéke: $f_{cd} = \dfrac{f_{ck}}{\gamma_c} = \dfrac{20\,N/mm^2}{1{,}5} = 13{,}33\,N/mm^2$

A betonacél folyáshatárának tervezési értéke: $f_{yd} = \dfrac{f_{yk}}{\gamma_S} = \dfrac{500\,N/mm^2}{1{,}15} = 434{,}8\,N/mm^2$

2.1.3. Külpontosság számítása

Kezdeti külpontosság: $e_e = \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}} = \frac{85 * 10^9\, Nmm}{1500 * 10^3\, N} = 56{,}7mm$

Külpontosságnövekmények (*közelítő képlet* alapján: kezdeti görbeség + másodrendű hatás)

$$e_i + e_2 = 0{,}05d + \frac{l_0}{400} + 0{,}05\left(\frac{l_0}{10d}\right)^2 d = 0{,}05 * 360mm + \frac{3000mm}{400} + 0{,}05\left(\frac{3000mm}{10 * 360mm}\right)^2 360mm = 38{,}0mm$$

A külpontosság tervezési értéke: $e_{Ed} = e_e + e_i + e_2 = 56{,}7mm + 38{,}0mm = 94{,}7mm$

2.1.4. Szükséges vasmennyiség meghatározása

$$\xi_{c0} = \frac{560}{f_{yd} + 700} = \frac{560}{434{,}8 + 700} = 0{,}493$$

$$x_{c0} = \xi_{c0} * d = 0{,}493 * 360mm = 177{,}65mm$$

Nyomott betonöv teljes kihasználtságához tartozó nyomaték:

$$M_0 = b * x_{c0} * f_{cd}\left(d - \frac{x_{co}}{2}\right) = 300mm * 177{,}65mm * 13{,}33\, N/mm^2 \left(360mm - \frac{177{,}65mm}{2}\right) =$$
$$= 192{,}70kNm$$

A külső erő nyomatéka a húzott oldali betonacélokra:

$$M_S = N_{Ed}\left(e_{Ed} + c\right) = 1500 * 10^3\, N\left(94{,}7mm + 160{,}0mm\right) = 382{,}05kNm$$

Nyomott betonacélokkal felveendő nyomaték:

$$\Delta M = M_S - M_0 = 382{,}05kNm - 192{,}70kNm = 189{,}35kNm$$

Szükséges nyomott betonacél mennyisége:

$$A'_S = \frac{\Delta M}{z * f_{yd}} = \frac{189{,}35 * 10^6\, Nmm}{320mm * 434{,}8\, N/mm^2} = 1360{,}90mm^2$$

Alkalmazott vasalás: 4 db ø 22 = 1520,50 mm^2

2.1.5. Ellenőrzés:

$$A_S \min = \max \begin{cases} 0{,}1 \dfrac{N_{Ed}}{f_{yd}} = 0{,}1 \dfrac{1500*10^3 N}{434{,}8\, N/mm^2} = 345 mm^2 \\ 0{,}3\% * A_C = 0{,}003*300mm*400mm = 360mm^2 \end{cases}$$

$$A_S \max = 4\% * A_C = 0{,}04*300mm*400mm = 4800mm^2$$

2.1.6. Szükséges húzott vasalás a vetületi egyenlet alapján:

$$N_C + N'_S - N_S - N_{Ed} = 0$$

$$b*x_{c0}*f_{cd} + A'_S*f_{yd} - A_S*f_{yd} - N_{Ed} = 0$$

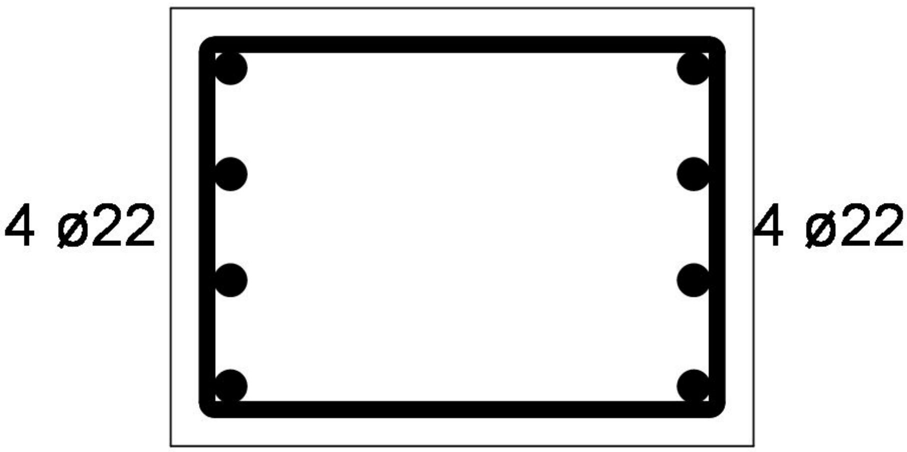
$$b*x_{c0}*f_{cd} + A'_S*f_{yd} - N_{Ed} = A_S*f_{yd}$$

$$A_S = \frac{b*x_{c0}*f_{cd} + A'_S*f_{yd} - N_{Ed}}{f_{yd}}$$

$$A_S = \frac{300mm*177{,}65mm*13{,}33\, N/mm^2 + 1360{,}90mm^2*434{,}8\, N/mm^2 - 1500*10^3 N}{434{,}8\, N/mm^2} = -454{,}62mm^2$$

Nincs szükség húzott vasalásra!

A külpontosság lehet másik irányú is, így a kialakítandó vasalás:

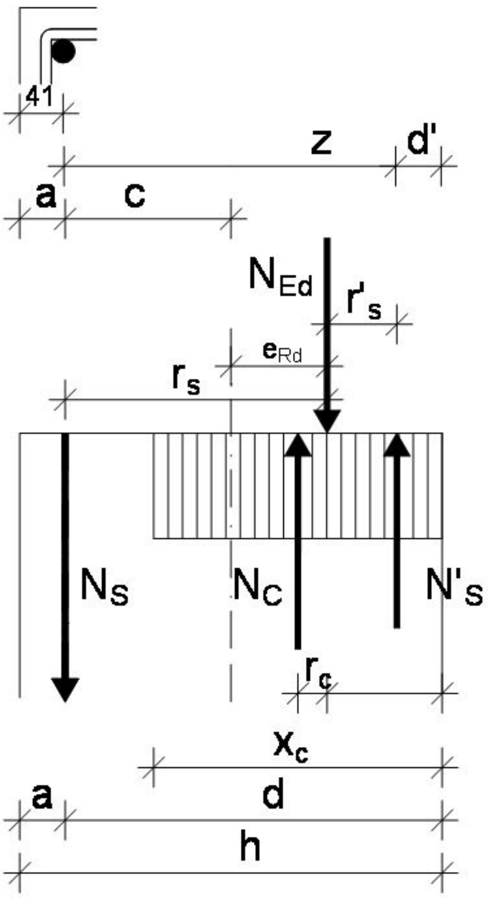


Megjegyzés:

Természetesen a számítása a „z" tengely irányában is el kellene végeznünk!

2.2. Ellenőrzés a normálerő tervezési értékéhez tartozó határkülpontosságra

2.2.1. Kiindulási adatok



$N_{Ed} = 1500kN$

$a = 20mm + 10mm + \frac{22mm}{2} = 41mm$

$d = h - a = 400mm - 41mm = 359mm$

$d' = 41mm$

$z = d - d' = 359mm - 41mm = 318mm$

$c = \frac{z}{2} = \frac{318mm}{2} = 159mm$

$A_S = A'_S = 1520{,}53mm^2$

2.2.2. Nyomott betonzóna magasságának számítása

$N_{Ed} - N_C - N'_S + N_S = 0$

$N_C = b * x_C * f_{cd}$

$N'_S = A'_S * f'_{yd}$

$N_S = A_S * f_{yd}$

$$N_{Ed} - b * x_c * f_{cd} - A'_S * f'_{yd} + A_S * f_{yd} = 1500 * 10^3 N - 300mm * x_c * 13{,}33 N/mm^2 -$$
$$-1520{,}53mm^2 * 434{,}8 N/mm \quad +1520{,}53mm^2 * 434{,}8 N/mm^2 = 0$$

$x_c = 375{,}09mm > x_{c0} = \xi_{c0} * d = 0{,}493 * 359mm = 176{,}99mm$

Mivel $x_c > x_{c0}$ ezért redukálni kell a húzott acélban keletkező feszültséget a következőképpen:

$$N_S = A_S * \sigma_S$$

$$\sigma_S = \frac{560\,N/mm}{x_c} d - 700\,N/mm^2 = \frac{560\,N/mm}{x_c} 359mm - 700\,N/mm^2$$

$$N_{Ed} - b * x_c * f_{cd} - A'_S * f'_{yd} + A_S * \sigma_S = 1500 * 10^3\,N - 300mm * x_c * 13{,}33\,N/mm^2 -$$
$$-1520{,}53mm^2 * 434{,}8\,N/mm \;\; + 1520{,}53mm^2 * \left(\frac{560\,N/mm}{x_c} 359mm - 700\,N/mm^2 \right) = 0$$

$$\left(300mm * 13{,}33N/mm^2\right) x_c^{\,2} + \left(1500 * 10^3\,N - 1520{,}53mm^2 * 434{,}8N/mm^2 - 1520{,}53mm^2 * 700N/mm^2\right) x_c +$$
$$+ 1520{,}53mm^2 * 560N/mm^2\, 359mm$$

$$3999 x_c^{\,2} + 225801{,}55 x_c - 305687351{,}2 = 0$$

$$x_c = 249{,}68mm$$

2.2.3. Határkülpontosság számítása (1)

Nyomatéki egyenlet a húzott acélbetétek súlyvonalára

$$N_{Ed}\left(e_{Rd} + c\right) = N_C\left(d - \frac{x_c}{2}\right) + A'_S * f'_{yd} * z$$

$$e_{Rd} = \frac{b * x_c * f_{cd}\left(d - \frac{x_c}{2}\right) + A'_S * f'_{yd} * z}{N_{Ed}} - c$$

$$e_{Rd} = \frac{300mm * 249{,}68mm * 13{,}33N/mm^2\left(359mm - \frac{249{,}68mm}{2}\right) + 1520{,}53mm^2 * 434{,}8N/mm \;\; * 318mm}{1500 * 10^3\,N} - 159mm$$

$e_{Rd} = 136{,}72mm > e_{Ed} = 94{,}70mm \rightarrow$ megfelel

2.2.3. Határkülpontosság számítása (2)

A geometriai középpontra felírt nyomatéki egyenlet

$$M_{Rd} = N_C\left(\frac{h}{2} - \frac{x_c}{2}\right) + N'_S\left(\frac{h}{2} - d'\right) + N_S\left(\frac{h}{2} - a\right)$$

$$M_{Rd} = b * x_c * f_{cd}\left(\frac{h}{2} - \frac{x_c}{2}\right) + A'_S\, f'_{yd}\left(\frac{h}{2} - d'\right) + A_S * \sigma_S\left(\frac{h}{2} - a\right)$$

$$\sigma_S = \frac{560}{x_c} d - 700 = \frac{560 N/mm^2}{249{,}68 mm} 359 mm - 700 N/mm^2 = 105{,}19 N/mm^2$$

$$M_{Rd} = 300 mm * 249{,}68 mm * 13{,}33 N/mm^2\left(\frac{400 mm}{2} - \frac{249{,}68 mm}{2}\right) +$$

$$+1520{,}53 mm^2\, 434{,}8 N/mm^2\left(\frac{400 mm}{2} - 41 mm\right) + 1520{,}53 mm^2\, 105{,}19 N/mm^2\left(\frac{400 mm}{2} - 41 mm\right)$$

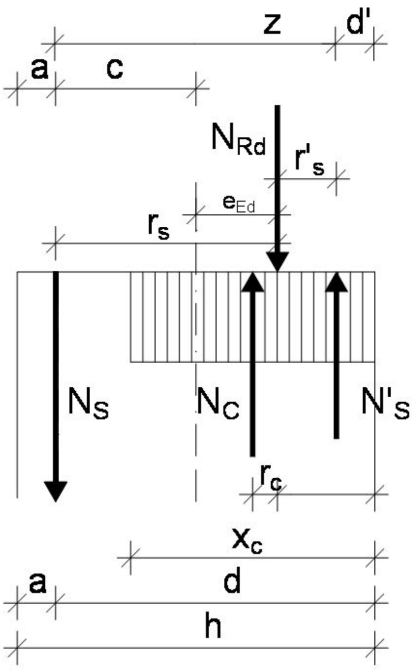
$$M_{Rd} = 205{,}626 kNm$$

$$e_{Rd} = \frac{M_{Rd}}{N_{Ed}} = \frac{205{,}626 * 10^6\, Nmm}{1500 * 10^3\, N} = 137{,}08 mm$$

$e_{Rd} = 137{,}08 mm$ > $e_{Ed} = 94{,}70 mm$ → megfelel

2.3. Ellenőrzés a mértékadó külpontossághoz tartozó határerőre

2.3.1. Kiindulási adatok



$$e_{Ed} = 94{,}70mm$$

$$a = 20mm + 10mm + \frac{22mm}{2} = 41mm$$

$$d = h - a = 400mm - 41mm = 359mm$$

$$d' = 41mm$$

$$z = d - d' = 359mm - 41mm = 318mm$$

$$c = \frac{z}{2} = \frac{318mm}{2} = 159mm$$

$$A_S = A'_S = 1520{,}53mm^2$$

2.3.2. Erőkarok számítása N_{Rd} támadáspontjától

$$r_S = \left(\frac{h}{2} - a\right) + e_{Ed} = \left(\frac{400mm}{2} - 41mm\right) + 94{,}7mm = 253{,}7mm$$

$$r'_S = \left(\frac{h}{2} - d'\right) - e_{Ed} = \left(\frac{400mm}{2} - 41mm\right) - 94{,}7mm = 64{,}3mm$$

$$r_C = \frac{x_c}{2} - \left(\frac{h}{2} - e_{Ed}\right) = \frac{x_c}{2} - \left(\frac{400mm}{2} - 94{,}7mm\right) = \frac{x_c}{2} - 105{,}3mm$$

2.3.3. Nyomott betonzóna magasságának számítása

Nyomaték az erő támadáspontjára

$$-N_S * r_S + N_C * r_C - N'_S * r'_S = 0$$

$$-A_S * f_{yd} * r_S + b * x_C * f_{cd} * r_C - A'_S * f'_{cd} * r'_S = 0$$

$$1520{,}53mm^2 * 434{,}8N/mm^2 * 253{,}7mm + 300mm * x_C * 13{,}33N/mm^2\left(\frac{x_C}{2} - 105{,}3mm\right) -$$

$$-1520{,}53mm^2 * 434{,}8N/mm^2 * 64{,}3mm = 0$$

$$2000x_C{}^2 - 421494{,}6x_C - 210238209{,}1 = 0$$

$$x_c = 446{,}28mm > x_{c0} = \xi_{c0} * d = 0{,}493 * 359mm = 176{,}99mm$$

Mivel $x_c > x_{c0}$ ezért redukálni kell a húzott acélban keletkező feszültséget a következőképpen:

$$\sigma_S = \frac{560\,N/mm}{x_c} d - 700\,N/mm^2 = \frac{560\,N/mm}{x_c} 359mm - 700\,N/mm^2$$

$$-N_S * r_S + N_C * r_C - N'_S * r'_S = 0$$

$$-A_S * \sigma_S * r_S + b * x_C * f_{cd} * r_C - A'_S * f'_{cd} * r'_S = 0$$

$$-1520{,}53mm^2 \left(\frac{560N/mm^2}{x_C} 359mm - 700N/mm^2 \right) * 253{,}7mm + 300mm * x_C * 13{,}33N/mm^2 \left(\frac{x_C}{2} - 105{,}4mm \right) -$$
$$-1520{,}53mm^2 * 434{,}8N/mm^2 * 64{,}3mm = 0$$

$$-38786137 + 135049{,}2x_C - 210{,}8x_C^2 - 21260{,}53x_C + x_C^3 = 0$$

$$x_C^3 - 210{,}8x_C^2 + 113788{,}69x_C - 38786137 = 0$$

$x_C = 286{,}4mm \quad > x_{c0} = \xi_{c0} * d = 0{,}493 * 359mm = 176{,}99mm$,vagyis a feltételezésünk jó volt.

2.3.4. Határerő számítása

Vetületi egyenletből N_{Rd} számítható

$$N_C + N'_S - N_S - N_{Rd} = 0$$

$$N_{Rd} = N_C + N'_S - N_S$$

$$N_{Rd} = b * x_C * f_{cd} + A'_S * f'_{yd} - A_s * \sigma_S$$

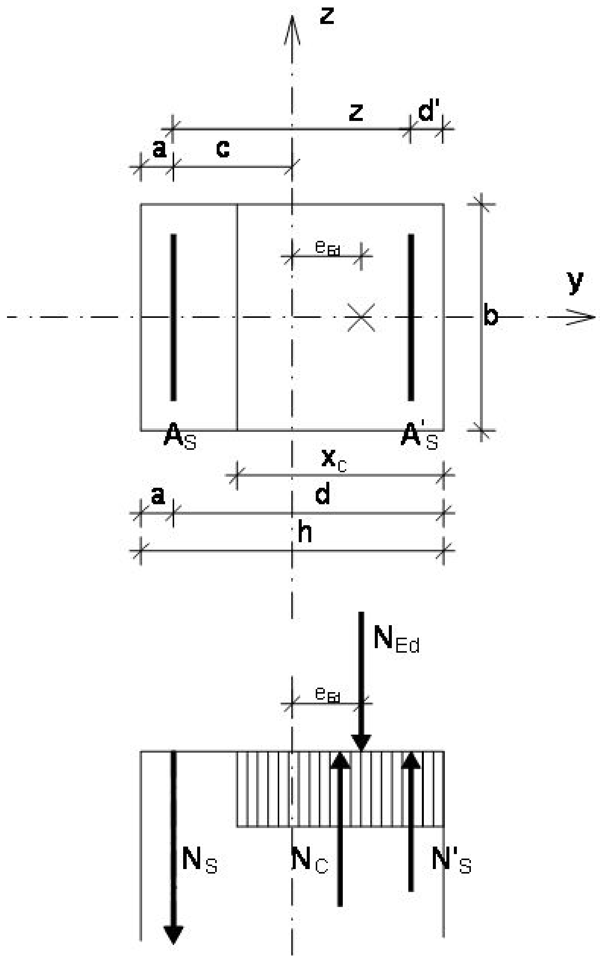
$$N_{Rd} = b * x_C * f_{cd} + A'_S * f'_{yd} - A_s * \left(\frac{560}{x_C} d - 700 \right)$$

$$N_{Rd} = 300mm * 286{,}4mm * 13{,}33N/mm^2 + 1520{,}53mm^2 * 434{,}8N/mm^2 -$$
$$-1520{,}53mm^2 \left(\frac{560N/mm}{286{,}4mm} * 359mm - 700N/mm^2 \right) = 1803{,}5kN$$

$N_{Rd} = 1803{,}5kN > N_{Ed} = 1500kN \rightarrow$ megfelel

2.4. Tervezés szimmetrikus vasalással

2.4.1. Kiindulási adatok



Anyagminőségek: B500; C20/25

$N_{Ed} = 1500kN$; $e_{Ed} = 100mm$

Betontakarás: $c_{nom} = 20{,}0mm$

$b = 300mm; h = 400mm$

$f_{ck} = 20\,N/mm^2$; $f_{yk} = 500\,N/mm^2$

$l_0 = 3000mm$

$a \cong 50mm$

$d = h - a = 400mm - 50mm = 350mm$

$d' = 50mm$

$z = d - d' = 350mm - 50mm = 300mm$

$$c = \frac{h}{2} - a = \frac{400mm}{2} - 50mm = 150mm$$

2.4.2. Anyagjellemzők számítása

A beton nyomószilárdságának tervezési értéke: $f_{cd} = \dfrac{f_{ck}}{\gamma_c} = \dfrac{20\,N/mm^2}{1{,}5} = 13{,}33\,N/mm^2$

A betonacél folyáshatárának tervezési értéke: $f_{yd} = \dfrac{f_{yk}}{\gamma_S} = \dfrac{500\,N/mm^2}{1{,}15} = 434{,}8\,N/mm^2$

2.4.3 Szükséges vasmennyiség meghatározása

$$\xi_{c0} = \frac{560}{f_{yd} + 700} = \frac{560}{434{,}8 + 700} = 0{,}493$$

$$\xi_{c0}' = \frac{560}{400 - f_{yd}} = \frac{560}{700 - 434{,}8} = 2{,}112$$

$$x_{c0} = \xi_{c0} * d = 0{,}493 * 350mm = 172{,}55mm$$

2.4.4. Nyomott betonzóna magasságának számítása

Vetületi egyenlet

$$N_C + N'_S - N_S - N_{Ed} = 0$$

$$b * x_C * f_{cd} + A'_S * f_{yd} - A_S * f_{yd} - N_{Ed} = 0$$

Mivel $A_S = A'_S$, ezért az egyenlet egyszerűsíthető

$$b * x_C * f_{cd} - N_{Ed} = 0$$

$$b * x_C * f_{cd} = N_{Ed}$$

$$x_C = \frac{N_{Ed}}{b * f_{cd}} = \frac{1500 * 10^3 N}{300mm * 13{,}33 N/mm^2} = 375{,}10mm$$

$$x_c = 375{,}010m > x_{c0} = \xi_{c0} * d = 0{,}493 * 350mm = 172{,}55mm$$

Mivel $x_c > x_{c0}$ ezért redukálni kell a húzott acélban keletkező feszültséget a következőképpen:

$$N_S = A_S * \sigma_S$$

$$\sigma_S = \frac{560\, N/mm}{x_c} d - 700\, N/mm^2 = \frac{560\, N/mm}{x_c} 359mm - 700\, N/mm^2$$

Vetületi egyenlet

$$b * x_C * f_{cd} + A'_S * f_{yd} - A_S * \sigma_S - N_{Ed} = 0$$

$$300mm * x_c * 13{,}33\, N/mm^2 + A'_S * 434{,}8\, N/mm^2 - A_S * \left(\frac{560\, N/mm}{x_c} 350mm - 700\, N/mm^2 \right) - 1500 * 10^3 N = 0$$

$$4000 x_C + 434{,}8 A_S - \frac{196000 A_S}{x_C} + 700 A_S - 1500000 x_C = 0$$

$$4000 x_C{}^2 + (434{,}8 A_S + 700 A_S - 1500000) x_C - 196000 A_S = 0$$

$$4000x_C^{\,2} + 1134{,}8A_S * x_C - 1500000x_C - 196000A_S = 0$$

Nyomatéki egyenlet a húzott vasak súlyvonalára

$$b * x_C * f_{cd}\left(d - \frac{x_C}{2}\right) + A'_S * f_{yd} * z - N_{Ed}\left(e_{Ed} + c\right) = 0$$

$$300mm * x_C * 13{,}33N/mm^2\left(400mm - \frac{x_C}{2}\right) + A_S * 434{,}8N/mm^2 * 300mm - 1500 * 10^3 N * \left(100mm + 150mm\right) = 0$$

$$-2000x_C^{\,2} + 1400000x_C + 130440A_S - 375000000 = 0$$

$$130440A_S = 2000x_C^{\,2} - 1400000x_C + 375000000 = 0$$

$$A_S = 0{,}01533{,}x_C^{\,2} - 10{,}7329x_C + 2874{,}885$$

Mivel a vetületi és a nyomatéki egyenlet is A_S-re rendezhető, így a két egyenletet egymással egyenlővé téve a következőt kapjuk

$$\frac{4000x_C^{\,2} - 1500000x_C}{196000 - 1134{,}8x_C} = 0{,}01533x_C^{\,2} - 10{,}7329x_C + 2874{,}885$$

$$\frac{3{,}52485x_C^{\,2} - 1321{,}81882x_C}{172{,}71766 - x_C} = 0{,}01533x_C^{\,2} - 10{,}7329x_C + 2874{,}885$$

$$3{,}52485x_C^{\,2} - 1321{,}81882x_C = 2{,}64828x_C^{\,2} - 1853{,}76137x_C + 496543{,}41 - 0{,}015333x_C^{\,3} +$$
$$+10{,}7329x_C^{\,2} - 2874{,}885x_C$$

$$0{,}015333x_C^{\,3} - 9{,}85633x_C^{\,2} + 3406{,}82755x_C - 496543{,}41 = 0$$

A harmadfokú egyenlet megoldható Newton-módszerrel. Az x_C-t becsüljük. Értéke várhatóan $x_{C0} = 172{,}55mm$ és $d = 350mm$ közé esik, és d-hez lesz közelebb. Első közelítésben felvesszük a két érték számtani közepében, d felé kerekítve.

$$\frac{x_{c0} + d}{2} = \frac{172{,}55 + 350}{2} = 261{,}275$$

$$f(x_C) = 0{,}015333x_C^{\,3} - 9{,}85633x_C^{\,2} + 3406{,}82755x_C - 496543{,}41$$

$$f'(x_C) = 0{,}046x_C^{\ 2} - 19{,}71266x_C + 3406{,}82755$$

$$x_{C1} = 265mm$$

Behelyettesítve $x_{C1} = 265mm$ -t

$$f(x_{C1}) = 0{,}015333 * 265^3 - 9{,}85633 * 265^2 + 3406{,}82755 * 265 - 496543{,}41$$

$$f(x_{C1}) = 285341{,}38 - 692160{,}77 + 902809{,}30 - 496543{,}41 = -553{,}50$$

$$f'(x_{C1}) = 0{,}046 * 265^2 - 19{,}71266 * 265 + 3{,}40682755$$

$$f'(x_{C1}) = 3230{,}35 - 5223{,}85 + 3406{,}83 = 1413{,}33$$

$$\Delta x_{C1} = \frac{f(x_{C1})}{f'(x_{C1})} = \frac{-553{,}50}{1413{,}33} = -0{,}391mm$$

$$x_{C2} = x_{C1} - \Delta x_{C1} = 265 - (-0{,}391) = 265{,}391mm$$

Behelyettesítve $x_{C2} = 265{,}391mm$ -t

$$f(x_{C2}) = 0{,}015333 * 265{,}391^3 - 9{,}85633 * 265{,}391^2 + 3406{,}82755 * 265{,}391 - 496543{,}41$$

$$f(x_{C2}) = 286606{,}28 - 694204{,}81 + 904141{,}37 - 496543{,}41 = -0{,}57$$

$$f'(x_{C2}) = 0{,}046 * 265{,}391^2 - 19{,}71266 * 265{,}391 + 3{,}40682755$$

$$f'(x_{C1}) = 3239{,}89 - 5231{,}56 + 3406{,}83 = 1415{,}16$$

$$\Delta x_{C2} = \frac{f(x_{C2})}{f'(x_{C2})} = \frac{-0{,}57}{1415{,}16} = -0{,}0004mm$$

$$x_{C3} = x_{C2} - \Delta x_{C2} = 265{,}391 - (-0{,}004) = 265{,}3914mm$$

Mivel a Newton-módszer második lépésénél is jelentéktelen a a különbség, ezért $x_{C3} = 265{,}39mm$ -nek elfogadható.

2.4.6. Szükséges vasmennyiség számítása

Korábban a vetületi és a nyomatéki egyenletből is kifejeztük A_S -t. Ha jól számoltunk, akkor $x_C = 265{,}39mm$ -t behelyettesítve mindkét egyenlet ugyanazt az eredményt adja.

A vetületi egyenlet szerint

$$A_S = \frac{4000x_C{}^2 - 1500000x_C}{196000 - 1134{,}8x_C} = \frac{4000 * 265{,}39^2 - 1500000 * 265{,}39}{196000 - 1134{,}8 * 265{,}39} = \frac{-116357591{,}6}{-105164{,}57} = 1106{,}43mm^2$$

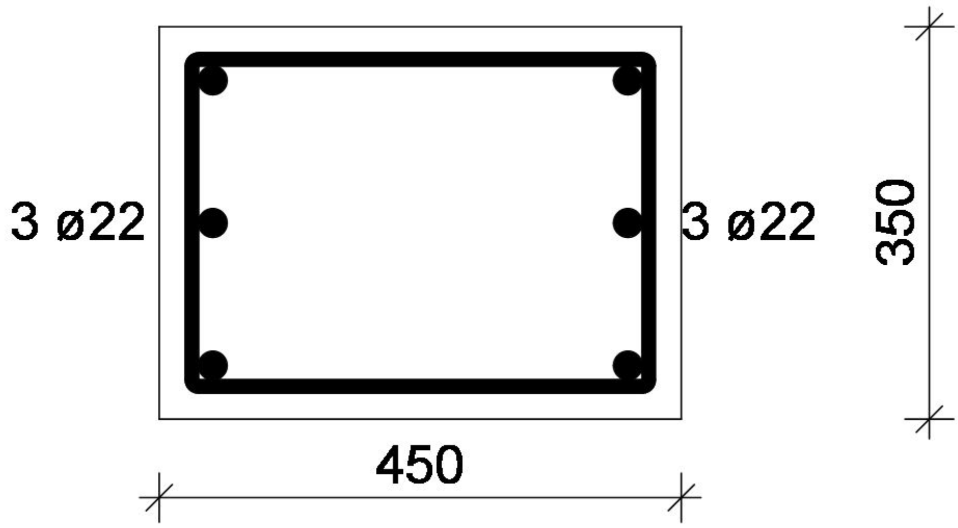
$$A_S = \frac{4000 * 265{,}39^2 - 1500000 * 265{,}39}{196000 - 1134{,}8 * 265{,}39} = \frac{-116357591{,}6}{-105164{,}57} = 1106{,}43mm^2$$

A nyomatéki egyenlet szerint

$$A_S = 0{,}01533{,}x_C{}^2 - 10{,}7329x_C + 2874{,}885$$

$$A_S = 0{,}015333 * 265{,}39^2 - 10{,}7329 * 265{,}39 + 2874{,}885 = 1106{,}41mm^2$$

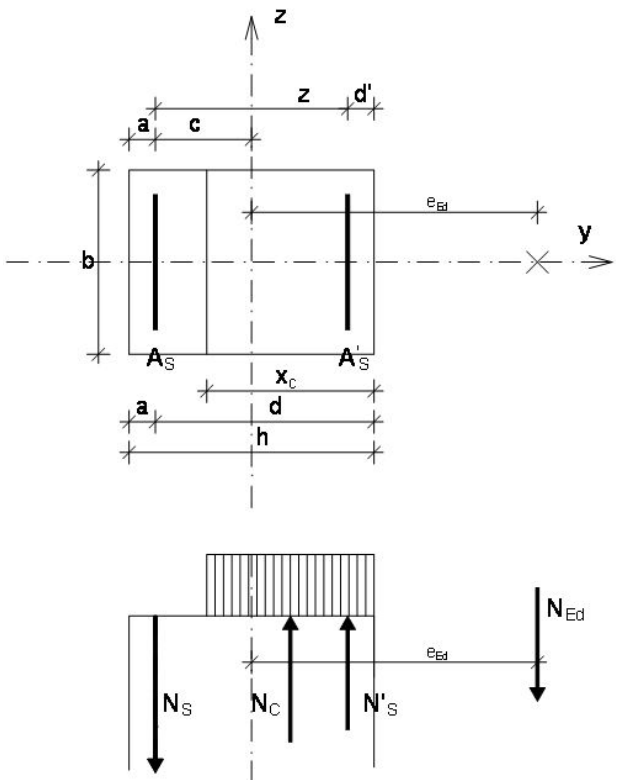
Alkalmazott vasalás: $A_S = A'_S$ = 3 db ø 22 = 1140,4 mm^2



3. Külpontosan nyomott oszlop számítása (nagykülpontos nyomás)

3.1. Példa: Tervezzük meg az alábbi nyomott oszlop szükséges vasalását!

3.1.1. Kiindulási adatok:



Anyagminőségek: B500; C20/25

$N_{Ed} = 800kN$

Betontakarás: $c_{nom} = 20,0mm$

$b = 350mm$; $h = 450mm$

$f_{ck} = 20\,N/mm^2$; $f_{yk} = 500\,N/mm^2$

$l_0 = 3000mm$

$a \cong 50mm$

$d = h - a = 450mm - 50mm = 400mm$

$d' = 50mm$

$z = d - d' = 400mm - 50mm = 350mm$

$c = \frac{z}{2} = \frac{350mm}{2} = 175mm$

3.1.2. Anyagjellemzők számítása

A beton nyomószilárdságának tervezési értéke: $f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{20\,N/mm^2}{1,5} = 13,33\,N/mm^2$

A betonacél folyáshatárának tervezési értéke: $f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_S} = \frac{500\,N/mm^2}{1,15} = 434,8\,N/mm^2$

3.1.3. Külpontosság számítása

Kezdeti külpontosság: $e_e = 300mm$

Külpontosságnövekmények (közelítő képlet alapján: kezdeti görbeség + másodrendű hatás)

$$e_i + e_2 = 0,05d + \frac{l_0}{400} + 0,05\left(\frac{l_0}{10d}\right)^2 d = 0,05 * 400mm + \frac{3000mm}{400} + 0,05\left(\frac{3000mm}{10 * 400mm}\right)^2 400mm = 38,75mm$$

A külpontosság tervezési értéke: $e_{Ed} = e_e + e_i + e_2 = 300mm + 38,75mm = 338,75mm$

3.1.4. Szükséges vasmennyiség meghatározása

$$\xi_{c0} = \frac{560}{f_{yd} + 700} = \frac{560}{434{,}8 + 700} = 0{,}493$$

$$x_{c0} = \xi_{c0} * d = 0{,}493 * 400mm = 197{,}20mm$$

Nyomott betonöv teljes kihasználtságához tartozó nyomaték:

$$M_0 = b * x_{c0} * f_{cd}\left(d - \frac{x_{co}}{2}\right) = 350mm * 197{,}20mm * 13{,}33\,N/mm^2\left(400mm - \frac{197{,}20mm}{2}\right) =$$
$$= 277{,}30kNm$$

A külső erő nyomatéka a húzott oldali betonacélokra:

$$M_S = N_{Ed}(e_{Ed} + c) = 800 * 10^3\,N(338{,}75mm + 175mm) = 411{,}0kNm$$

Nyomott betonacélokkal felveendő nyomaték:

$$\Delta M = M_S - M_0 = 411{,}0kNm - 277{,}3kNm = 133{,}45kNm$$

Szükséges nyomott betonacél mennyisége:

$$A'_S = \frac{\Delta M}{z * f_{yd}} = \frac{133{,}45 * 10^6\,Nmm}{350mm * 434{,}8\,N/mm^2} = 876{,}94mm^2$$

Alkalmazott vasalás: 3 db ø 20 = 942,50 mm^2

3.1.5. Nyomott betonzóna tényleges magassága

Nyomatéki egyenlet a húzott vasak súlyvonalára

$$M_S = b * x_C * f_{cd}\left(d - \frac{x_C}{2}\right) + A'_S * f'_{yd} * z - N_{Ed}(c + e_{Ed}) = 0$$

$$350mm * x_C * 13{,}33N/mm^2\left(400 - \frac{x_C}{2}\right) + 942{,}50mm^2 * 434{,}8N/mm^2 * 350mm -$$
$$-800 * 10^3\,N((175mm + 338{,}75mm) = 0$$

$$-2333{,}33x_C{}^2 + 1866666{,}67x_C + 267570350 = 0$$

$$x_C{}^2 - 800x_C + 114673{,}01 = 0$$

$$x_C = 187{,}10mm \;<\; x_{c0} = 197{,}20mm$$

3.1.6. Szükséges húzott vasalás a vetületi egyenlet alapján:

$$N_C + N'_S - N_S - N_{Ed} = 0$$

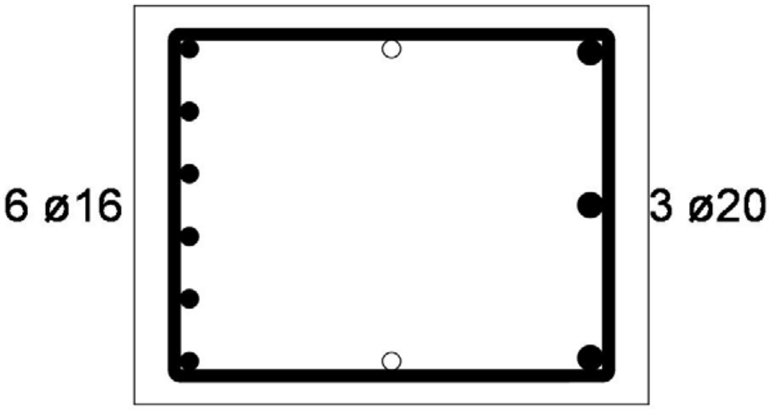
$$b * x_C * f_{cd} + A'_S * f_{yd} - A_S * f_{yd} - N_{Ed} = 0$$

$$b * x_C * f_{cd} + A'_S * f_{yd} - N_{Ed} = A_S * f_{yd}$$

$$A_S = \frac{b * x_C * f_{cd} + A'_S * f_{yd} - N_{Ed}}{f_{yd}}$$

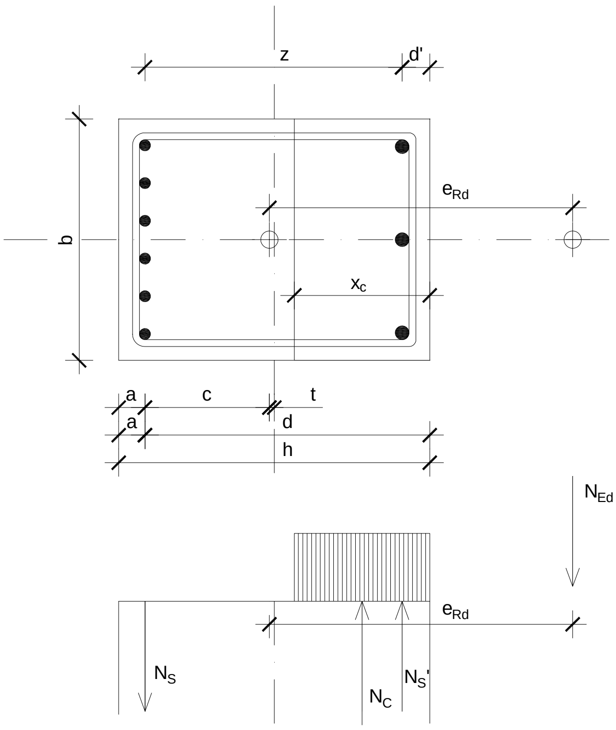
$$A_S = \frac{350mm * 187{,}10mm * 13{,}33\,N/mm^2 + 942{,}50mm^2 * 434{,}8\,N/mm^2 - 800 * 10^3\,N}{434{,}8\,N/mm^2} = 1110{,}20mm^2$$

Alkalmazott vasalás: 4 db ø 20 = 1256,0 mm^2, de hogy különbözzön a nyomott vasalástól, ezért inkább 6 db ø 16 = 1206,4 mm^2.



3.2. Ellenőrzés mértékadó erőhöz tartozó határkülpontosságra

3.2.1. Kiindulási adatok



Anyagminőségek: B500; C20/25

$$N_{Ed} = 800kN = 800000N$$

$$a = c_{nom} + d_{kengyel} + \frac{d_{főőva}}{2} =$$

$$20mm + 10mm + \frac{16mm}{2} = 38mm$$

$$d = h - a = 450mm - 38mm = 412mm$$

$$d' = c_{nom} + d_{kengyel} + \frac{d_{főőva}}{2}$$

$$= 20mm + 10mm + \frac{20mm}{2} = 40mm$$

$$z = d - d' = 412mm - 40mm = 372mm$$

Alkalmazott vasalás: 3 db ø 20 = 942 mm^2 és 6 db ø 16 = 1206,4 mm^2.

Mivel ebben az esetben a keresztmetszet vasalása asszimmetrikus, a geometriai és a teherbírási középpontok nem esnek egy pontba. Asszimmetrikus vasalás esetén mindig meg kell határozni a teherbírási középpontot, és ettől a ponttól kell mérni a külpontosságot.
Szimmetrikus **vasalás esetén ez nem okoz külön problémát, hiszen a geometriai és a teherbírási középpontok egybeesnek.**

A (nyomási) teherbírási középpont helyzetének meghatározása

A tiszta nyomáshoz tartozó maximális nyomóerő:

$$|\sigma_s| = \min\{f_{yd}; 400\ \mathrm{N/mm^2}\} = \min\{434{,}8; 400\ \mathrm{N/mm^2}\}$$

$$N_{Rd,1} = b \cdot h \cdot f_{cd} + (A_s + A_s') \cdot |\sigma_s| = 350 \cdot 450 \cdot 13{,}33 + (1206 + 942) \cdot 400 = 2959{,}5\ \mathrm{kN}$$

A nyomatéki teherbírás a geometriai középpontban:

$$M_{Rd,1,geom} = A_s \cdot |\sigma_s| \cdot \left(d - \frac{h}{2}\right) - A_s' \cdot |\sigma_s| \cdot \left(\frac{h}{2} - d'\right)$$

$$= 1206 \cdot 400 \cdot \left(412 - \frac{450}{2}\right) - 942 \cdot 400 \cdot \left(\frac{450}{2} - 40\right) = 20{,}5\ \mathrm{kNm}$$

A teherbírási középpont geometriai középponttól mért távolsága:

$$t = \frac{M_{Rd,1,geom}}{N_{Rd,1}} = \frac{20{,}5\ \mathrm{kNm}}{2959{,}5\ \mathrm{kN}} = 7\ \mathrm{mm}$$

A teherbírási középpont távolsága a húzott vasak súlyvonalától:

$$c = \frac{h}{2} - a - t = \frac{450}{2} - 38 - 7 = 180\ \mathrm{mm}$$

3.2.2. Nyomott betonzóna magasságának számítása

$$N_{Ed} - N_C - N'_S + N_S = 0$$

$$N_C = b * x_C * f_{cd} = 350 * x_C * 13{,}33 = 4665{,}5 * x_C$$

$$N'_S = A'_S * f'_{yd} = 942 * 434{,}8 = 409562{,}8N$$

$$N_S = A_S * f_{yd} = 1206 * 434{,}8 = 524344{,}7N$$

$$N_{Ed} - b * x_c * f_{cd} - A'_S * f'_{yd} + A_S * f_{yd} = 800000N - 4665{,}5 * x_C - 409562{,}8N + 524344{,}7N = 0$$

$$x_c = 196{,}07mm < x_{c0} = \xi_{c0} * d = 0{,}493 * 412mm = 203{,}12mm$$

Mivel x_c < x_{c0} ezért az acélbetétek folyási állapotban vannak. Nincs szükség a húzott acélban keletkező feszültség redukciójára-

3.2.3. Határkülpontosság számítása

Nyomatéki egyenlet a húzott acélbetétek súlyvonalára

$$N_{Ed}(e_{Rd} + c) = N_C\left(d - \frac{x_c}{2}\right) + A'_S * f'_{yd} * z$$

$$e_{Rd} = \frac{b * x_c * f_{cd}\left(d - \frac{x_c}{2}\right) + A'_S * f'_{yd} * z}{N_{Ed}} - c$$

$$e_{Rd} = \frac{350mm * 196{,}07mm * 13{,}33N/mm^2\left(412mm - \frac{196{,}07mm}{2}\right) + 942{,}5mm^2 * 434{,}8N/mm \ * 372mm}{800 * 10^3 N} - 180mm$$

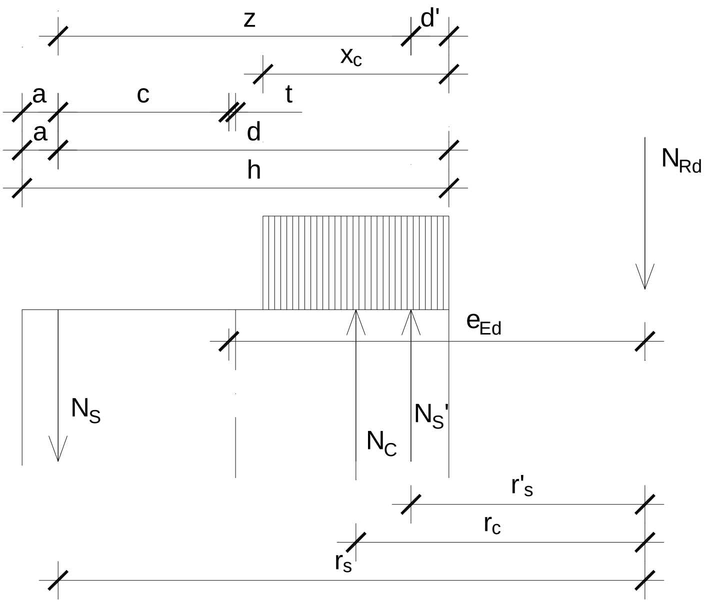
$e_{Rd} = 369{,}2mm$ > $e_{Ed} = 338{,}75mm$ → megfelel

3.3. Ellenőrzés mértékadó külpontossághoz tartozó határerőre

3.3.1. Kiindulási adatok

$A_S = 1206{,}4mm^2$; $A'_S = 942{,}5mm^2$

$e_{Ed} = 338{,}75mm$



$$a = 20mm + 10mm + \frac{16mm}{2} = 38mm$$

$$d = h - a = 450mm - 38mm = 412mm$$

$$d' = 20mm + 10mm + \frac{20mm}{2} = 40mm$$

$$z = d - d' = 412mm - 40mm = 372mm$$

$t = 7mm$

$c = 180mm$

(számítása ld. 3.2.1.)

$$x_{c0} = \xi_{c0} * d = 0{,}493 * 412mm = 203{,}12mm$$

3.3.2. Erőkarok számítása N_{Rd} támadáspontjától

$$r_S = e_{Ed} + c = 338{,}75mm + 180mm = 519mm$$

$$r'_S = e_{Ed} - \frac{h}{2} - t + d' = 338{,}75mm - \frac{450}{2} - 7mm + 40mm = 147mm$$

$$r_C = e_{Ed} - \frac{h}{2} - t + \frac{x_C}{2} = 338{,}75mm - \frac{450mm}{2} - 7mm + \frac{x_C}{2} = 107mm + \frac{x_C}{2}$$

3.3.3. Nyomott betonzóna magasságának számítása

Nyomaték az erő támadáspontjára

$$-N_S * r_S + N_C * r_C + N'_S * r'_S = 0$$

$$-A_S * f_{yd} * r_S + b * x_C * f_{cd} * r_C + A'_S * f'_{cd} * r'_S = 0$$

$$-1206{,}4mm^2 * 434{,}8N/mm^2 * 519mm + 350mm * x_C * 13{,}33N/mm^2 * \left(107mm + \frac{x_C}{2}\right) +$$

$$942{,}5mm^2 * 434{,}8N/mm^2 * 147mm = 0$$

$$2333{,}33x_C^{\ 2} + 499686x_C - 211992411 = 0$$

$$x_C^{\ 2} + 214{,}2x_C - 90854 = 0$$

$$x_c = 213mm < x_{c0} = \xi_{c0} * d = 0{,}493 * 412mm = 203{,}13mm$$

3.3.4. Határerő számítása

Vetületi egyenletből N_{Rd} számítható

$$N_C + N'_S - N_S - N_{Rd} = 0$$

$$N_{Rd} = N_C + N'_S - N_S$$

$$N_{Rd} = b * x_c * f_{cd} + A'_S * f'_{yd} - A_s * f_{yd}$$

$$N_{Rd} = 350mm * 213mm * 13{,}33N/mm^2 + 942{,}5mm^2 * 434{,}8N/mm^2 -$$
$$-1206{,}4mm \ \ * 434{,}8N/mm^2 = 878{,}3kN$$

$$N_{Rd} = 878{,}3kN > N_{Ed} = 800kN \ \rightarrow \text{megfelel}$$

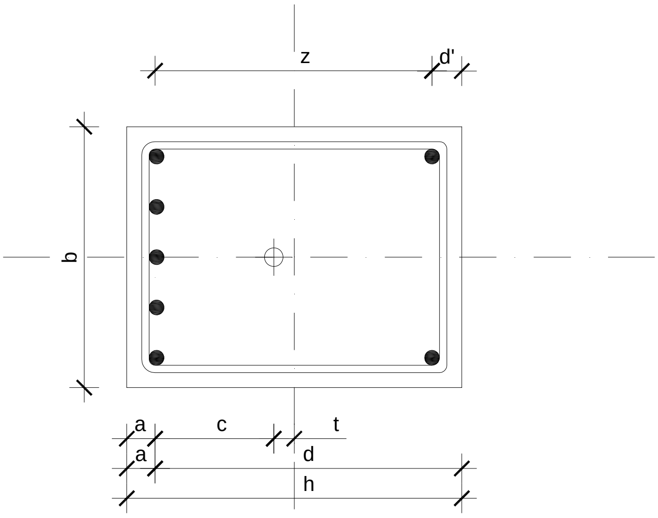
4. Teherbírási vonal (közelítő): Rajzolja fel az alábbi keresztmetszet közelítő teherbírási vonalát!

4.1. Kiindulási adatok

Anyagminőségek: B500; C16/20

Betontakarás: $c_{nom} = 20{,}0mm$

$b = 300mm$; $h = 500mm$



$$f_{ck} = 16\,N/mm^2\ ;\ f_{yk} = 500\,N/mm^2$$

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{16\,N/mm^2}{1{,}5} = 10{,}67\,N/mm^2$$

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_S} = \frac{500\,N/mm^2}{1{,}15} = 434{,}78\,N/mm^2$$

$$\xi_{c0} = \frac{560}{f_{yd} + 700} = \frac{560}{434{,}8 + 700} = 0{,}493$$

$$A_S = 5\text{ db ø }20 = 1571mm^2$$
$$A'_S = 2\text{ db ø }20 = 628mm^2$$

$$a = c_{nom} + d_{kengyel} + \frac{d_{főőva}}{2} =$$
$$= 20mm + 10mm + \frac{20mm}{2} = 40mm$$

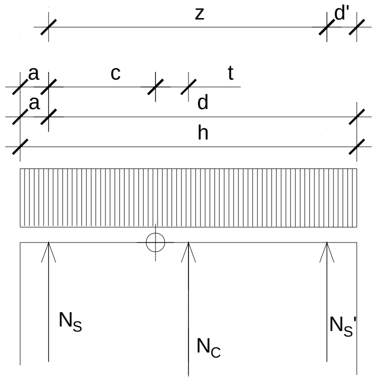
$$d = h - a = 500mm - 40mm = 460mm$$

$$d' = c_{nom} + d_{kengyel} + \frac{d_{főőva}}{2} =$$
$$= 20mm + 10mm + \frac{20mm}{2} = 40mm$$

$$z = d - a = 460mm - 40mm = 420mm$$

4.2.A (nyomási) teherbírási középpont helyzetének meghatározása

A tiszta nyomáshoz tartozó maximális nyomóerő:



$|\sigma_s| = \min\{f_{yd}; 400\ N/mm^2\} = \min\{434{,}8; 400\ N/mm^2\}$

$N_{Rd,1} = N_c + N_s + N_s' = b \cdot h \cdot f_{cd} + (A_s + A_s') \cdot |\sigma_s|$

$= 300 \cdot 500 \cdot 10{,}7 + (1571 + 628) \cdot 400 = 2480\ kN$

A nyomatéki teherbírás a geometriai középpontban:

$M_{Rd,1,geom} = A_s \cdot |\sigma_s| \cdot (d - \frac{h}{2}) - A_s' \cdot |\sigma_s| \cdot (\frac{h}{2} - d')$

$= 1571 \cdot 400 \cdot (460 - \frac{500}{2}) - 628 \cdot 400 \cdot (\frac{500}{2} - 40)$

$= 79\ kNm$

A teherbírási középpont geometriai középponttól mért távolsága:

$t = \frac{M_{Rd,1,geom}}{N_{Rd,1}} = \frac{79\ kNm}{2480\ kN} = 32\ mm$

A teherbírási középpont távolsága a húzott vasak súlyvonalától:

$c = \frac{h}{2} - a - t = \frac{500}{2} - 40 - 32 = 178\ mm$

Szimmetrikus vasalás esetén értelemszerűen t=0 és $c = \frac{h}{2} - a$

4.3. Az 1-es jelű pont számítása (maximális nyomóerőhöz tartozó pont)

$M_{Rd1} = 0$

$N_{Rd,1} = 2480\ kN$

4.4. A 2-es jelű pont számítása (maximális nyomatékhoz tartozó pont)

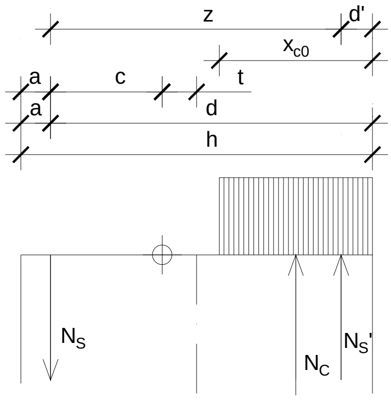
$x_C = x_{C0}$

$x_{C0} = \xi_{C0} * d = 0{,}493 * 460mm = 227mm$

Vetületi egyenlet:

$N_{Rd2} = N_c + N_s' - N_s = b * x_{C0} * f_{cd} + A'_S * f'_{yd} - A_S * f_{yd}$

$N_{Rd2} = 300 * 227 * 10{,}67 + 628 * 434{,}78 - 1571 * 434{,}78 = 317kN$



Szimmetrikus vasalás esetén a betonacélokhoz tartozó tagok kiesnek az egyenletből.

Nyomatéki egyenlet a teherbírási középpontra:

$$M_{Rd2} = b * x_{C0} * f_{cd}\left(\frac{h}{2} - \frac{x_{C0}}{2} + t\right) + A_S * f_{yd} * c + A'_S * f'_{yd}(z - c)$$

$$M_{Rd2} = 300mm * 227mm * 10{,}67N/mm^2\left(\frac{500mm}{2} - \frac{227}{2} + 32\right) +$$

$$+ 1571mm^2 * 434{,}78N/mm * 178 + 628mm^2 * 434{,}78N/mm^2(420 - 178mm)$$

$M_{Rd2} = 310kNm$

4.5. A 3-as jelű pont számítása (tiszta hajlítás)

$$N_{Rd3} = 0$$

Vetületi egyenlet (nyomott betonzóna magasságának számítása):

$$x_c \cdot b \cdot f_{cd} + A_s' \cdot f_{yd} - A_s \cdot f_{yd} = 0$$

$$x_c = \frac{A_s \cdot f_{yd} - A_s' \cdot f_{yd}}{b \cdot f_{cd}} = \frac{1571 \cdot 434{,}78 - 628 \cdot 434{,}78}{300 \cdot 10{,}67} = 128 \text{ mm}$$

$x_c = 128$ mm < $x_{C0} = \xi_{C0} * d = 0{,}493 * 460mm = 227mm$, vagyis a húzott oldali betonacélok megfolynak.

Nyomatéki egyenlet a teherbírási középpontra:

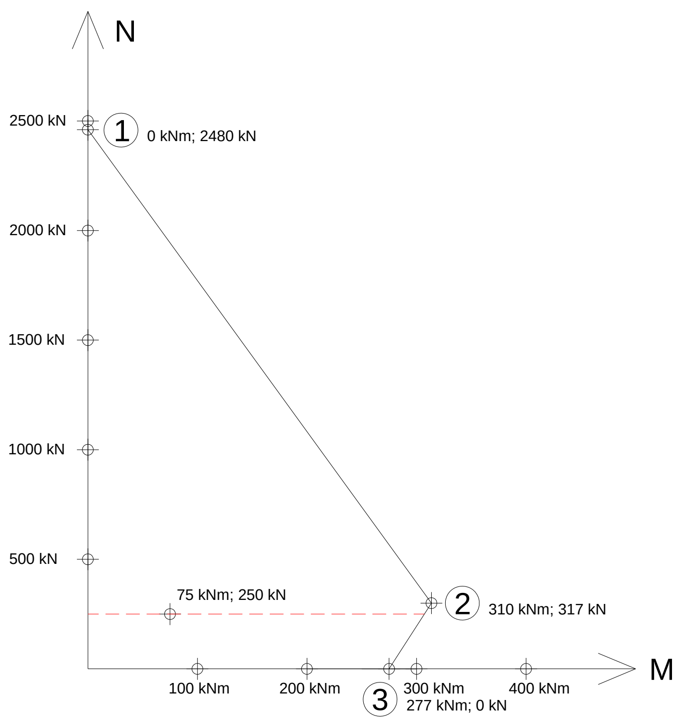
$$M_{Rd3} = b * x_C * f_{cd}\left(\frac{h}{2} - \frac{x_C}{2} + t\right) + A_S * f_{yd} * c + A'_S * f'_{yd}(z - c)$$

$$M_{Rd2} = 300 * 128 * 10{,}67\left(\frac{500}{2} - \frac{128}{2} + 32\right) + 1571 * 434{,}78 * 178 + 628 * 434{,}78(420 - 178)$$

$$M_{Rd2} = 277kNm$$

Szimmetrikus vasalás esetén x_c=0 és a betonhoz tartozó tag kiesik a nyomatéki egyenletből.

4.6. Ellenőrizzük az „x" síkban ható nyomóerőre a keresztmetszetet!



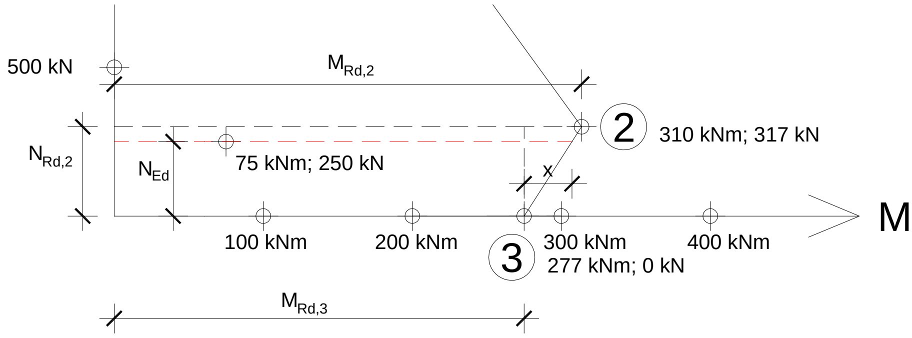
$$N_{Ed} = 250kN \; ; \; e_{Ed} = 300mm$$

$$M_{Ed} = N_{Ed} * e_{Ed} = 250kN * 0{,}3m = 75kNm$$

Mivel az N-M koordináta-rendszerben felvett (N_{Ed};M_{Ed}) pont a teherbírási vonalon belül esik, a keresztmetszet erre a terhelési esetre megfelel.

Az $N_{Ed} = 300kN$ erőhöz tartozó nyomaték meghatározása a teherbírási vonalon:

Háromszögek hasonlóságából:



$$\frac{x}{N_{Ed}} = \frac{M_{Rd,2} - M_{Rd,3}}{N_{Rd,2}}$$

$$x = \frac{M_{Rd,2} - M_{Rd,3}}{N_{Rd,2}} \cdot N_{Ed}$$

$$M_{Rd} = x + M_{Rd,3} = \frac{M_{Rd,2} - M_{Rd,3}}{N_{Rd,2}} \cdot N_{Ed} + M_{Rd,3} = \frac{310-277}{317} \cdot 250 + 277 = 303 \text{ kNm} > M_{Ed} = 75 \text{ kNm}$$

megfelel

4.7. Határozzuk meg az $N_{Ed} = 250kN$ erőhöz tartozó határkülpontosságot a közelítő teherbírási vonal alapján!

$$M_{Rd} = 303kNm$$

$$e_{Rd} = \frac{M_{Rd}}{N_{Ed}} = \frac{303 * 10^6 Nmm}{250 * 10^3 N} = 1212mm > e_{Ed} = 300mm$$

4.8. Határozzuk meg az $e_{Ed} = 300mm$ külpontossághoz tartozó határerőt a közelítő teherbírási vonal alapján!

$$\tan\alpha = \frac{M_{Rd}}{N_{Rd}} = \frac{N_{Rd} \cdot e_{Ed}}{N_{Rd}} = e_{Ed} = 0{,}3$$

$\alpha = 16{,}7°$ (az egyenes függőleges tengellyel bezárt szöge)

$$\tan\beta = \frac{M_{Rd,2}}{N_{Rd,2}} = \frac{310}{317} = 0{,}98$$

$\beta = 44°$

Mivel $\alpha < \beta$, tudjuk, hogy az egyenes a felső részen metszi a teherbírási vonalat.

Ezt egy már megrajzolt teherbírási vonalon szerkesztéssel (külön számítás nélkül) is könnyen megállapíthatjuk, pl. ha összekötjük az origót a már meglévő (N_{Ed}, M_{Ed}) ponttal, hiszen ebben az esetben is az e_{Ed}-t jelentő egyenest rajzoljuk.

$$M_{Rd} = N_{Rd} \cdot e_{Ed}$$

M_{Rd} másképpen felírva (teherbírási vonal alapján):

$$M_{Rd} = M_{Rd,2} - x$$

Háromszögek hasonlóságából:

$$\frac{x}{N_{Rd} - N_{Rd,2}} = \frac{M_{Rd,2}}{N_{Rd,1} - N_{Rd,2}}$$

$$x = (N_{Rd} - N_{Rd,2}) \cdot \frac{M_{Rd,2}}{N_{Rd,1} - N_{Rd,2}} = (N_{Rd} - 317) \cdot \frac{310}{2480 - 317} = 0{,}1433\ N_{Rd} - 45{,}4$$

$$M_{Rd} = M_{Rd,2} - x = 310 - (0{,}1433\ N_{Rd} - 45{,}4) = -0{,}1433\ N_{Rd} + 355{,}4$$

és

$$M_{Rd} = N_{Rd} \cdot e_{Ed} = 0{,}3\ N_{Rd}$$

így

$$0{,}3\ N_{Rd} = -0{,}1433\ N_{Rd} + 355{,}4$$

$$\mathbf{N_{Rd} = 802\ kN > N_{Ed} = 250\ kN}$$