SZERKEZETÉPÍTÉS I. NGB_SE008_1

TERVEZÉSI SEGÉDLET

ELŐFESZÍTETT VASBETON TARTÓ TERVEZÉSE

1.Adatok

1.1.Anyagjellemzők

Beton: *C40/50*

nyomószil. karakt.értéke $f_{ck} = 40N/mm^2$ $\quad f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_M = 1{,}5} \frac{40}{} = 26{,}67N/mm^2$

húzószil. várható értéke $f_{ctm} = 3{,}5N/mm^2$

rug. mod. várható értéke $E_{cm} = 35000kN/mm^2$

rug.mod. karakt.értéke $E_{cd} = \frac{E_{cm}}{\gamma_c} = \frac{35000}{1{,}5} = 23333{,}3kN/mm^2$

beton határösszenyomódása $\varepsilon_{cu} = 3{,}5\%o$

Betonacél: *B500*

folyáshatár karakt. értéke $f_{yk} = 500N/mm^2$ $\quad f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_M = 1{,}15} \frac{500}{} = 434{,}78N/mm^2$

rug.modulus $E_s = 200000N/mm^2$

rugalmas nyúlás határa $\varepsilon_{sy} = \frac{f_{yd}}{E_s} = \frac{434{,}78}{200} = 2{,}17\%o$

határnyúlás karakt. értéke $\varepsilon_{su} = 50\%o$

Feszítőpászma *Fp100/1770-R2*

a pászma jelölésében:

100 - 1 db pászma keresztmetszeti területe $A_{p100} = 100mm^2$

1770 - a pászma szakítószilárdságának karakt.értéke f_{pk}

R” - a relaxációs osztály (R2=stabilizált, feszültség alatt megeresztett acél)

az 1‰-es (0,1 %-os) egyezményes folyáshatárhoz tartozó feszültség: $f_{p0,1k} = 1500N/mm^2$

a folyáshatár tervezési értéke $f_{p0,1d} = \frac{f_{p0,1k}}{\gamma_s} = \frac{1500}{1{,}15} = 1304{,}35N/mm^2$

feszítőpászmák névleges külső átmérője $\phi_p = 12{,}9mm$

rug.modulus $E_p = 195kN/mm^2$

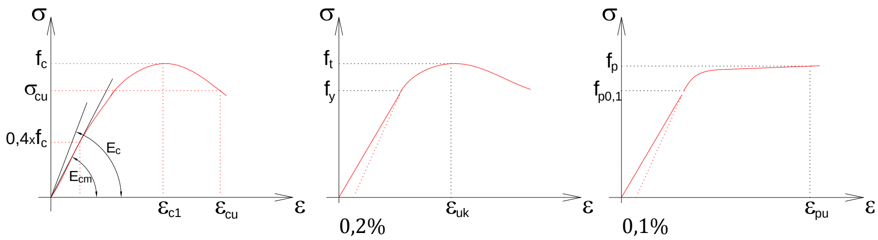
a rugalmas nyúlás határa $\varepsilon_{py} = \frac{f_{pd}}{E_s} = \frac{1304{,}35}{195} = 6{,}69\%o$

határnyúlás $\varepsilon_{pu} = 35\%o$

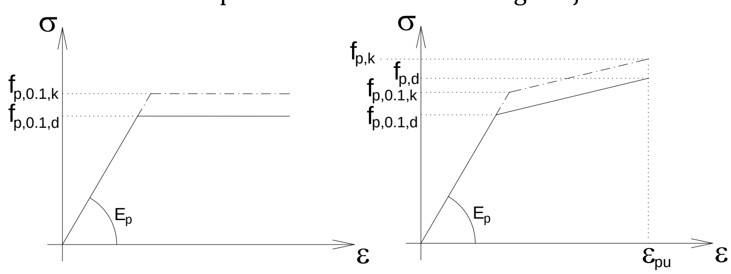
Jel	f_{pk} [N/mm²]	$f_{p0,1,k}$ [N/mm²]	f_{pd} [N/mm²]	Φ [mm]	A_p [mm²]
Fp 55/1770	1770	1500	1304.3	9.6	55
Fp 100/1770	1770	1500	1304.3	12.9	100
Fp 150/1770	1770	1500	1304.3	15.7	150
Fp 55/1860	1860	1580	1373.9	9.6	55
Fp 139/1860	1860	1580	1373.9	15.2	139
Fp 150/1860	1860	1580	1373.9	15.7	150

Feszítőpászmák szilárdsági- és keresztmetszeti értékei

Beton Betonacél Feszítőpászma

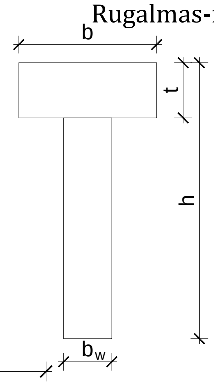


Feszítőpászmák idealizált σ-ε diagramja



Rugalmas-képlékeny Rugalmas-felkeményedő

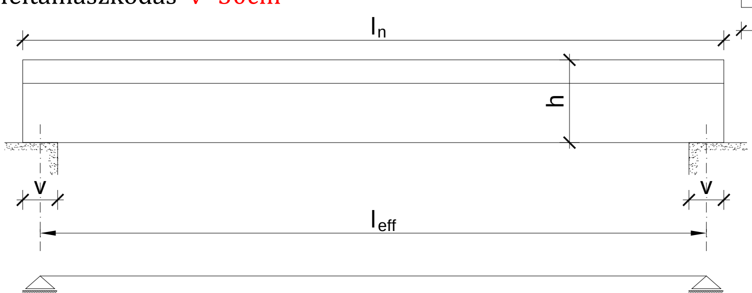
1.2. Keresztmetszeti adatok



fejlemez szélessége b=500mm
tartó magassága h=1400mm
fejlemez vastagsága t=240mm
gerinc vastagsága b_w=200mm

1.3. Statikai váz

tartóhossz l_n=12m
feltámaszkodás v=30cm



fesztávolság számítása: $l_{eff} = l_n - 2 \cdot \min\left(\frac{v}{2};\frac{h}{2}\right) = 15{,}0 - 2 \cdot \min(0{,}15;0{,}55) = 11{,}7m$

1.4. Terhek

- gerendák egymástól való távolsága a=4,2 m
- az állandó teher alapértéke $g_{áll,k}$=7,7 kN/m²
  (szigetelés, burkolat, gépészet súlya)
- az esetleges teher alapértéke q_k=3,0 kN/m²
  (C kategória: gyülekezésre szolgáló terület)
- a feszített tartó **önsúlyának** meghatározása :

vasbeton térfogatsúlya ρ_{vb} =25kN/m³

önsúly alapértéke / karakterisztikus értéke:

$$g_k = [b \cdot t + (h-t) \cdot b_w] \cdot \rho_{vb} = [0{,}5 \cdot 0{,}24 + (1{,}4 - 0{,}24) \cdot 0{,}2] \cdot 25 = 8{,}8 kN/m$$

- az állandó alapértéke (karakt. értéke):

$$g_{áll,k} = 7{,}7 \cdot 4{,}2 = 32{,}34\ kN/m \qquad \gamma_G = 1{,}35$$

- az esetleges teher alapértéke (karakt. értéke):

$$q_k = 3{,}0 \cdot 4{,}2 = 12{,}6\ kN/m \qquad \gamma_Q = 1{,}5 \quad \psi_1 = 0{,}7 \quad \psi_2 = 0{,}6$$

2. Mértékadó terhek és igénybevételek

2.1. Vizsgálati állapotok

t_1 időpont – feszítőerő ráengedése

t_2 időpont – átmeneti állapot (szállítás, szerelés)

t_3 időpont – végleges állapot

- magasépítési feszített tartóknál csak t_1 és t_3 időpontot ellenőrizzük

2.2. Mértékadó terhek

t_1 időpont: $g_k = 8{,}8 kN/m$

t_3 időpont: végleges állapot

teherbírás számításhoz: tartós és ideiglenes terv helyzet, teherbírási határáll.

$$p_d = \gamma_G \cdot \left(g_k + g_{áll,k}\right) + \gamma_Q \cdot q_k = 1{,}35 \cdot \left(8{,}8 + 32{,}34\right) + 1{,}5 \cdot 12{,}6 = 74{,}4 kN/m$$

tartó repedezettségi állapotának vizsgálatához: használhatósági, gyakori kombináció

$$p_{ser,b} = g_k + g_{áll,k} + \psi_1 \cdot q_k = 8{,}8 + 32{,}34 + 0{,}7 \cdot 12{,}6 = 49{,}96 kN/m$$

lehajlás számításhoz: használhatósági, kvázi-állandó kombináció

$$p_{ser,c} = g_k + g_{áll,k} + \psi_2 \cdot q_k = 8{,}8 + 32{,}34 + 0{,}6 \cdot 12{,}6 = 48{,}7 kN/m$$

2.3. Mértékadó igénybevételek

t_1 időpont: feszítőerő ráengedésekor, tartóközépen

$$M_k^g = \frac{8{,}8 \cdot 11{,}7^2}{8} = 150{,}6\ kNm$$

t_3 időpont: végleges állapot, tartóközépen

teherbírás számításhoz: $M_{Ed} = \dfrac{74{,}4 \cdot 11{,}7^2}{8} = 1273\ kNm$

repedezettségi áll.hoz: $M_{ser,b} = \dfrac{49{,}96 \cdot 11{,}7^2}{8} = 854{,}9\ kNm$

lehajlás számításához: $M_{ser,c} = \dfrac{48{,}7 \cdot 11{,}7^2}{8} = 833{,}3\ kNm$

t_3 időpont: végleges állapot, tartóvégen mértékadó nyíróerő

$$V_{Ed} = \frac{74{,}4 \cdot 11{,}7}{2} = 435{,}2\ kN$$

3.A vasalás mennyiségének meghatározása (lágyvas és feszítőpászma)

→M_{Ed} nyomaték felvétele csak lágyvasbetétekkel (feltételezzük, hogy $x_c<t$, és az acélbetétek képlékenyek, megfolynak)

hasznos magasság közelítő felvétele: $d = 0{,}9 \cdot h = 0{,}9 \cdot 1400 = 1260mm$

nyomatéki egyenlet a húzott vasak súlypontjára:

$$M_{Ed} = b \cdot x_c \cdot f_{cd} \cdot \left[d - \frac{x_c}{2}\right] \quad \rightarrow \quad 1273 \cdot 10^6 = 500 \cdot x_c \cdot 26{,}67 \cdot \left[1260 - \frac{x_c}{2}\right]$$

$$-6667{,}5 \cdot x_c^2 + 16802100 \cdot x_c - 1273 \cdot 10^6 = 0 \quad \rightarrow x_c = 78{,}25mm \left(x_{c,2} = 2441{,}8mm\right)$$

$$x_c = 78{,}25mm \ < t = 250mm \quad \rightarrow \ feltételezés \ jó \ volt$$

$$\xi_c = \frac{x_c}{d} = \frac{78{,}25}{1260} = 0{,}062 < \xi_{c0} = \frac{560}{700 + f_{yd}} = \frac{560}{700 + 434{,}78} = 0{,}493 \rightarrow$$

feltételezés jó volt, acélok megfolynak

az M_{Ed} nyomaték felvételéhez szükséges lágyvas mennyisége: vetületi egyenletből

$$A_{s,szüks,teljes} = \frac{b \cdot x_c \cdot f_{cd}}{f_{yd}} = \frac{500 \cdot 78{,}25 \cdot 26{,}67}{434{,}78} = 2399{,}6 \ mm^2$$

Ez a teljes vasalási szükséglet lágyvasban kifejezve.

→lágyvas és feszítőbetét együttes alkalmazása: a lágyvas A_s és feszítőbetét A_p által felvett **húzóerők arányát feszítési fokkal** írhatjuk le, magasépítési szerkezeteknél X=0,7..0,8 körüli érték alkalmazása eredményezi a leggazdaságosabb megoldást, most legyen X=0,7

$$\mathrm{X} = \frac{A_p \cdot f_{pd}}{A_p \cdot f_{pd} + A_s \cdot f_{yd}} = \frac{H_p}{H_p + H_s} = \frac{H_p}{H_{teljes}} \quad \rightarrow H_p = \mathrm{X} \cdot H_{teljes} \quad H_s = (1 - \mathrm{X}) \cdot H_{teljes}$$

innen:

$$\mathrm{H_{s,szüks}} = (1 - \mathrm{X}) \cdot \mathrm{H_{teljes}}$$

$$\mathrm{A_{s,szüks}} \cdot \mathrm{f_{yd}} = (1 - \mathrm{X}) \cdot \mathrm{A_{s,szüks,teljes}} \cdot \mathrm{f_{yd}} \qquad /{:}\mathrm{f_{yd}}$$

$$A_{s,szüks} = (1 - 0{,}7) \cdot 2399{,}6 = 719{,}88 \ mm^2$$

alkalmazott lágyvas mennyiség: $A_{s,alk} = 3 \cdot \frac{d^2 \cdot \pi}{4} = 3 \cdot \frac{18^2 \cdot \pi}{4} = 763 \ mm^2 \quad 3\phi 18$

fenti egyenletből:

$$\mathrm{H_{p,szüks}} = \mathrm{X} \cdot \mathrm{H_{teljes}}$$

$$\mathrm{A_{s,szüks}} \cdot \mathrm{f_{pd}} = \mathrm{X} \cdot \mathrm{A_{s,szüks,teljes}} \cdot \mathrm{f_{yd}} \qquad /{:}\mathrm{f_{pd}}$$

$$A_{p,szüks} = \mathrm{X} \cdot A_{s,szüks} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{pd}} = 0{,}7 \cdot 2399{,}6 \cdot \frac{434{,}78}{1304{,}35} = 559{,}9 \ mm^2$$

alkalmazott: $A_{p,alk} = 6 \cdot 100 = 600 \ mm^2 \quad 6 \ db \ Fp100/1770$

választott kezdeti feszítési feszültség:

$$\sigma_{p0} = 1200 N/mm^2 < \min\begin{pmatrix} 0{,}75 \cdot f_{pk} = 0{,}75 \cdot 1770 = 1327{,}5 \ N/mm^2 \\ 0{,}85 \cdot f_{p,0.1,k} = 0{,}85 \cdot 1500 = 1275 \ N/mm^2 \end{pmatrix}$$

4.A tartó teherbírásának ellenőrzése

4.1.A keresztmetszet vasalása

A szükséges *betonfedés* értékének számítása:

környezeti osztály: XC3 (mérséklet relatív páratartalmú épületekben lévő beton)

szerkezeti osztály: S4 (50 éves tervezett élettartam)

tapadási követelmények miatt szükséges minimális betonfedés: $c_{\min,b} = d_s = 18mm$

környezeti feltételtől függő min. betonfedés: $c_{\min,dur} = 25mm$

a minimális betonfedés: $c_{\min} = \max\lfloor c_{\min,b}; c_{\min dur} \;;10mm\rfloor = 25mm$

betonfedés növekmény az elhelyezési bizonytalanság miatt

(feszített szerkezetek esetén lehet 5 mm is az előregyártás jobb minőségellenőrzése miatt):

$\Delta c_{dev} = 5mm$

betonfedés számítási értéke: $c = c_{\min} + \Delta c_{dev} = 30mm$

Acélbetétek illetve feszítőpászmák közötti minimális távolságok számítása:

az adalékanyag max. szemátmérője: $d_g = 16mm$

lágyvasak közötti min. távolság $\Delta s = \max\lfloor d_s; d_g + 5mm;20mm\rfloor = 21mm$

a pászmák átmérője:

$d_p = 12{,}9mm$

pászmák közti min. vízszintes távolság $\Delta p_y = \max\lfloor 2\cdot d_p; d_g + 5mm;20mm\rfloor = 26mm$

pászmák közti min. függőleges távolság $\Delta p_z = \max\lfloor 2\cdot d_p; d_g \rfloor = 26mm$

alkalmazott kengyelátmérő: $\phi_k = 8mm$

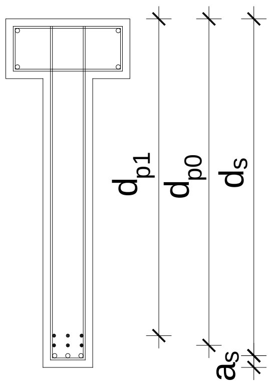
A lágyvasak és a pászmák súlyponti távolságai:

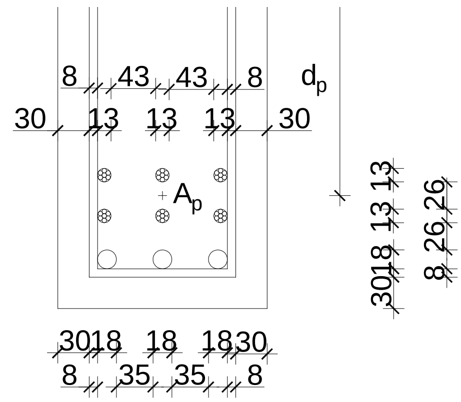
$$a_s = c + \phi_k + \frac{d_s}{2} = 30 + 8 + \frac{18}{2} = 47mm \qquad d_s = h - a_s = 1400 - 47 = 1353mm$$

$$d_{p0} = h - a_s - \frac{d_s}{2} - \Delta p_z - \frac{d_{p0}}{2} = 1400 - 47 - \frac{18}{2} - 26 - \frac{12{,}9}{2} = 1312mm \quad A_{p0} = 300mm^2$$

$$d_{p1} = d_{p0} - \frac{d_{p0}}{2} - \Delta p_z - \frac{d_{p0}}{2} = 1312 - \frac{12{,}9}{2} - 26 - \frac{12{,}9}{2} = 1273mm \quad A_{p0} = 300mm^2$$

<u>A vasalás kialakítása:</u>





A vasalási kép kialakításakor ellenőrizni kell a lágyvasak és a pászmák közti távolságokat:

$35\ \text{mm} \geq \Delta s_{max} = 21\ \text{mm}$

$43\ \text{mm} \geq \Delta p_y = 26\ \text{mm}$

$26\ \text{mm} \geq \Delta p_z = 26\ \text{mm}$

$$A_p = 600mm^2$$

A pászmákat a súlypontjukban összevonjuk:

$$d_p = \frac{d_{p0} + d_{p1}}{2} = \frac{1312 + 1273}{2} = 1292mm$$

4.2. Kezdeti állapot ellenőrzése (feszítőerő ráengedésének pill.)

t_1 időpont: **szélsőszál feszültségek ellenőrzése tartóvégen és tartóközépen**
önsúly alapértékére és a kezdeti feszítőerőre
rugalmas-repedésmentes km. figyelembevételével I. fesz.áll.

Beton: C30/37 (még nem éri el a tervezett szilárdságot 40/50-et)

Szilárdsági jel	C16/20	C20/25	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60	C55/67	C60/75	C70/85	C80/95	C90/105
f_{ck} [N/mm²]	16	20	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
$f_{ck,cube}$ [N/mm²]	20	25	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105
f_{cm} [N/mm²]	24	28	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98
f_{ctm} [N/mm²]	1,9	2,2	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0
$f_{ctk,0,05}$ [N/mm²]	1,3	1,5	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,2	3,4	3,5
E_{cm} (GPa)	29	30	32	34	35	36	37	38	39	41	42	44
ε_{cu3} (‰)	3,5							3,1	2,9	2,7	2,6	2,6

$$f_{ck0} = 30\ N/mm^2 \qquad f_{cd_0} = \frac{f_{ck0}}{1{,}5} = \frac{30}{1{,}5} = 20 N/mm^2$$

$$E_{cd0} = \frac{E_{cm0}}{\gamma_c} = \frac{22}{\gamma_c} \cdot \left[\frac{f_{ck}+8}{10}\right]^{0,3} = \frac{22}{1{,}5} \cdot \left[\frac{30+8}{10}\right]^{0,3} = 21{,}89\ kN/mm^2$$

$$f_{ctk0,05} = 2\ N/mm^2 \qquad f_{ctd0} = \frac{f_{ctk0}}{1{,}5} = \frac{2}{1{,}5} = 1{,}33 N/mm^2$$

$$\alpha_{s1} = \frac{E_S}{E_{cd0}} = \frac{200}{21{,}89} = 9{,}14 \qquad \alpha_{p1} = \frac{E_p}{E_{cd0}} = \frac{195}{21{,}89} = 8{,}91$$

Ideális keresztmetszet jellemzői: rug.-repedésmentes áll, feltételezve, hogy $x_{i1} > t$

$$A_{i1} = b \cdot t + b_w \cdot (h-t) + (\alpha_s - 1) \cdot A_s + (\alpha_p - 1) \cdot A_p = 500 \cdot 240 + 200 \cdot (1400-240) +$$

$$+ (9{,}14-1) \cdot 763 + (8{,}91-1) \cdot 600 = 327768{,}4 mm^2 = 362960{,}1\ mm^2$$

statikai nyomaték a felső szélső szálra:

$$S_{i1} = b \cdot t \cdot \frac{t}{2} + b_w \cdot (h-t) \cdot \left(\frac{h-t}{2} + t\right) + (\alpha_{s1} - 1) \cdot A_s \cdot d_s + (\alpha_{p1} - 1) \cdot A_p \cdot d_p =$$

$$= 500 \cdot 240 \cdot \frac{240}{2} + 200 \cdot (1400-240) \cdot \left(\frac{1400-240}{2} + 240\right) + (9{,}14-1) \cdot 763 \cdot 1353 +$$

$$+ (8{,}91-1) \cdot 600 \cdot 1292 = 2{,}192 \cdot 10^8\ mm^3$$

semleges tengely (súlypont) meghatározása:

$$x_{i1} = \frac{S_{i1}}{A_{i1}} = \frac{2{,}192 \cdot 10^8}{362960{,}1} = 603{,}87 mm > t = 250 mm \quad \rightarrow \textit{feltételezés jó}$$

inercia:

$$I_{i1} = \frac{b \cdot t^3}{12} + b \cdot t \cdot \left(x_{i1} - \frac{t}{2}\right)^2 + \frac{b_w \cdot (h-t)^3}{12} + b_w \cdot (h-t) \cdot \left(\frac{h-t}{2} + t - x_{i1}\right)^2$$

$$+ (\alpha_{s1} - 1) \cdot A_s \cdot (d_s - x_{i1})^2 + (\alpha_p - 1) \cdot A_p \cdot (d_p - x_{i1})^2 =$$

$$\frac{500 \cdot 240^3}{12} + 500 \cdot 240 \cdot (603{,}87 - 240/2)^2 + \frac{200 \cdot (1400-240)^3}{12} + 200 \cdot (1400-240) \cdot (\frac{1400-240}{2} + 240 - 603{,}87)^2$$

$$+ (9{,}14-1) \cdot 763 \cdot (1353 - 603{,}87)^2 + (8{,}91-1) \cdot 600 \cdot (1292 - 603{,}87)^2 = 7{,}126 \cdot 10^{10} mm^4$$

Ellenőrzés tartóközépen:

A kezdeti feszítőerő:

$$N_{p0} = A_p \cdot \sigma_{p0} = 600 \cdot 1200 = 720kN$$

A feszítőerő külpontossága miatti nyomaték:

$$M_{p0} = N_{p0} \cdot e_p = A_{p0} \cdot \sigma_{p0} \cdot \left(d_p - x_{i1}\right) = 720 \cdot \left(1{,}292 - 0{,}604\right) = 495{,}7kNm$$

$M_k^g = 150{,}6kNm$ önsúly karakterisztikus értékéből

a beton alsó szélső szálában keletkező feszültség:

$$\sigma_c^a = -\frac{N_{p0}}{A_{i1}} - \frac{M_{p0}}{I_{i1}} \cdot \left(h - x_{i1}\right) + \frac{M_g^k}{I_{i1}} \cdot \left(h - x_{i1}\right) =$$

$$-\frac{720 \cdot 10^3}{362960{,}1} - \frac{495{,}7 \cdot 10^6}{7{,}126 \cdot 10^{10}} \cdot \left(1400 - 603{,}87\right) + \frac{150{,}6 \cdot 10^6}{7{,}126 \cdot 10^{10}} \cdot \left(1400 - 603{,}87\right) =$$

a beton felső szélső szálában keletkező

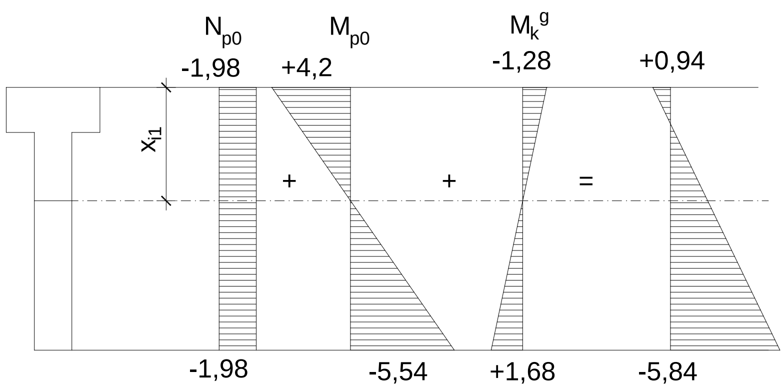
$$= -1{,}98 - 5{,}538 + 1{,}683 = -5{,}84 N/mm^2 < f_{cd_0} = 20 N/mm^2 \rightarrow megfelel$$

feszültség:

$$\sigma_c^f = -\frac{N_{p0}}{A_{i1}} + \frac{M_{p0}}{I_{i1}} \cdot x_{i1} - \frac{M_g^k}{I_{i1}} \cdot x_{i1} =$$

$$-\frac{720 \cdot 10^3}{362960{,}1} + \frac{495{,}7 \cdot 10^6}{7{,}126 \cdot 10^{10}} \cdot 603{,}87 - \frac{150{,}6 \cdot 10^6}{7{,}126 \cdot 10^{10}} \cdot 603{,}87 =$$

$$= -1{,}98 + 4{,}2 - 1{,}28 = 0{,}94 N/mm^2 < f_{ctd_0} = 1{,}33 N/mm^2 \rightarrow megfelel$$



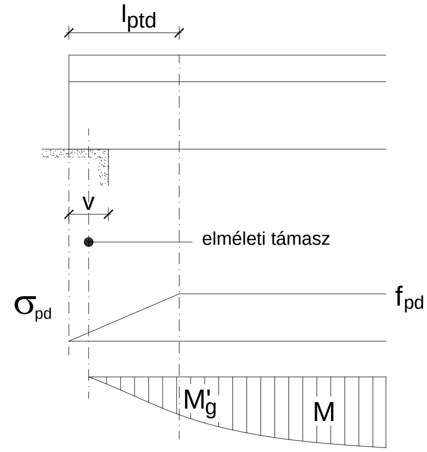
Ellenőrzés tartóvégen:

Szélsőszál-feszültségek ellenőrzése ott, ahol a feszítőpászmák már teljesen lehorgonyzódtak a pászma tapadási szilárdsága:

$$f_{bpt} = \eta_{p1} \cdot \eta_1 \cdot f_{ctd0} = 3{,}2 \cdot 0{,}7 \cdot 1{,}333 = 2{,}99\ N/mm^2$$

η_{p1}=3,2 (7eres pászmák esetén)

η_1=0,7 (ált.esetben, ha tapadási körülmények pontosan nem ismertek)



lehorgonyzási hossz alapértéke:

$$l_{pt} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot d_p \cdot \frac{\sigma_{p0}}{f_{bpt}} = 1{,}25 \cdot 0{,}19 \cdot 12{,}9 \cdot \frac{1200}{2{,}99} = 1{,}231 m$$ α_1=1,25 (hirtelen engedik rá a tartóra a feszítőerőt)

α_2=0,19 (7eres pászmák esetén)

lehorgonyzási hossz tervezési értéke:

$$l_{ptd} = 0{,}8 \cdot l_{pt} = 0{,}8 \cdot 1{,}231 = \underline{0{,}985 m}$$

Reakcióerő az önsúlyból: $R_g = \frac{g_k \cdot l_{eff}}{2} = \frac{8{,}8 \cdot 11{,}7}{2} = 51{,}5\ kN$

Az önsúlyból származó nyomaték nagysága a vizsgált keresztmetszetben:

$$M_g' = R_g \cdot \left(l_{ptd} - \frac{v}{2} \right) - g_k \cdot \frac{\left(l_{ptd} - v/2 \right)^2}{2} = 51{,}5 \cdot \left(0{,}985 - \frac{0{,}3}{2} \right) - 8{,}8 \cdot \frac{(0{,}985 - 0{,}15)^2}{2} =$$

$$= 39{,}9\ kNm$$

A feszítőerő külpontossága miatti nyomaték:

$$M_{p0} = N_{p0} \cdot e_p = A_{p0} \cdot \sigma_{p0} \cdot (d_p - x_{i1}) = 720 \cdot (1{,}292 - 0{,}604) = 495{,}7 kNm$$

A beton alsó szélső szálában keletkező feszültség:

$$\sigma_c^a = -\frac{N_{p0}}{A_{i1}} - \frac{M_{p0}}{I_{i1}} \cdot (h - x_{i1}) + \frac{M_g'}{I_{i1}} \cdot (h - x_{i1}) =$$

$$-\frac{720 \cdot 10^3}{362960{,}1} - \frac{495{,}7 \cdot 10^6}{7{,}126 \cdot 10^{10}} \cdot (1400 - 603{,}9) + \frac{39{,}9 \cdot 10^6}{7{,}126 \cdot 10^{10}} \cdot (1400 - 603{,}9) =$$

$$= -1{,}98 - 5{,}54 + 0{,}45 = -7{,}07 N/mm^2 < f_{cd_0} = 30/1{,}5 = 20 N/mm^2 \rightarrow megfelel$$

A beton felső szélső szálában keletkező feszültség:

$$\sigma_c^f = -\frac{N_{p0}}{A_{i1}} + \frac{M_{p0}}{I_{i1}} \cdot x_{i1} - \frac{M_g'}{I_{i1}} \cdot x_{i1} =$$

$$-\frac{720 \cdot 10^3}{362960{,}1} + \frac{495{,}7 \cdot 10^6}{7{,}126 \cdot 10^{10}} \cdot 603{,}9 - \frac{39{,}9 \cdot 10^6}{7{,}126 \cdot 10^{10}} \cdot 603{,}9 =$$

$$= -1{,}98 + 4{,}2 - 0{,}34 = +1{,}88 N/mm^2 > f_{ctd0} = 1{,}333 N/mm^2$$

- tehát tartóvég megreped, de a gyakorlatban megengedett a húzószilárdság kismértékű túllépése, mivel a kialakult repedések végleges állapotban záródnak
- nagyobb mértékű különbség esetén fennáll a tönkremenetel veszélye, ennek elkerülésére a tartóvéget kiékelik vagy a pászmák egy részét lecsövezik (csőben vezetik, így az nem tudja átadni a betonra a feszítőerőt)

4.3. Feszítési feszültségek számítása

A pászmák feszítési feszültségét az alábbi (időbeli) hatások csökkentik:

- zsugorodásból származó fesz. veszteség ε_{cs}≈0,5‰ zsugorodás végértéke
- kúszásból (lassú alakvált.) származó fesz. veszteség $\varphi(t)$≈2,0 kúszási tényező
- pászmák relaxációjából származó fesz. veszteség
- hőérlelésből származó veszteség

pászmák relaxációjából származó veszteség:

$$\Delta\sigma_{pr} = A \cdot \frac{\sigma_{p0}}{1000} \cdot \rho_{1000} \cdot e^{B\cdot\mu} \cdot \left(\frac{t_p}{1000}\right)^{0,75\cdot(1-\mu)}$$

kezdeti feszítési fesz. $\sigma_{p0} = 1200\ N/mm^2$

$$\mu = \frac{\sigma_{p0}}{f_{pk}} = \frac{1200}{1770} = 0,678 \quad \frac{kezdeti\ feszítési\ feszültség}{pászma\ szakító\ szil.}$$

ρ_{1000}=0,025 a feszítőbetétek 1000 órás relaxációs vesztesége 20 °C-os tartó esetén pontosabb adat hiányában pászmák esetén 2,5‰, (huzalok 8‰)

feszítés óta eltelt idő órákban (50 éves tervezési élettartam, szökőév miatt):

$t_p = 50 \cdot 365,25 \cdot 24 = 438.300\ óra$

A=0,66 alacsony relaxációjú pászmák és huzalok esetén

B=9,1 pászmák esetén (huzalok 6,7)

$$\Delta\sigma_{pr} = 0,66 \cdot \frac{1200}{1000} \cdot 0,025 \cdot e^{9,1\cdot 0,678} \cdot \left(\frac{438300}{1000}\right)^{0,75\cdot(1-0,678)} = 41,51\ N/mm^2$$

σ_{cgp0}: a betonfeszültség a <u>kvázi-állandó</u> tehercsoportosításból a pászmák súlypontjában

$$\sigma_{cgp0} = -\frac{N_{p0}}{A_{i1}} - \frac{M_{p0}}{I_{i1}} \cdot (d_p - x_{i1}) + \frac{M_{ser,c}}{I_{i1}} \cdot (d_p - x_{i1}) =$$

$$-\frac{720\cdot 10^3}{362960,1} - \frac{495,7\cdot 10^6}{7,126\cdot 10^{10}} \cdot (1292-603,9) + \frac{833,3\cdot 10^6}{7,126\cdot 10^{10}} \cdot (1292-603,9) =$$

$$-1,98 - 4,787 + 8,04 = +1,28\ N/mm^2$$

beton keresztmetszet területe:

$$A_c = b \cdot t + b_w \cdot (h - t) = 500 \cdot 240 + 200 \cdot (1400 - 240) = 352000 mm^2$$

statikai nyomaték a felső szélső szálra:

$$S_c = b \cdot t \cdot \frac{t}{2} + b_w \cdot (h - t) \cdot \left(\frac{h - t}{2} + t \right) =$$

$$= 500 \cdot 240 \cdot \frac{240}{2} + 200 \cdot (1400 - 240) \cdot \left(\frac{1400 - 240}{2} + 240 \right) = 204640000\ mm^3$$

A beton keresztmetszet súlypontjának meghatározása:

$$y_c = \frac{S_c}{A_c} = \frac{204640000}{352000} = 581{,}4 mm$$

$$I_c = \frac{b \cdot t^3}{12} + b \cdot t \cdot \left(y_c - \frac{t}{2} \right)^2 + \frac{b_w \cdot (h - t)^3}{12} + b_w \cdot (h - t) \cdot \left(t + \frac{h - t}{2} - y_c \right)^2 =$$

$$= \frac{500 \cdot 240^3}{12} + 500 \cdot 240 \cdot (581{,}4 - \frac{240}{2})^2$$

$$+ \frac{200 \cdot (1400 - 240)^3}{12} + 200 \cdot (1400 - 240) \cdot \left(240 + \frac{1400 - 240}{2} - 581{,}4 \right)^2 = 6{,}535 \cdot 10^{10} mm^4$$

z_{cp}:a feszítőpászmák súlypontjának távolsága a beton km. súlypontjától:

$$z_{cp} = d_p - y_c = 1292 - 581{,}4 = 711{,}0\ mm$$

pászmák és beton rug. modulusának aránya

$$\alpha_p = \frac{E_p}{E_{cm}} = \frac{195}{35} = 5{,}571$$

zsugorodásból, kúszásból és relaxációból származó veszteség

$$\Delta\sigma_{pt} = \frac{\varepsilon_{cs} \cdot E_p + 0{,}8 \cdot \Delta\sigma_{pr} + \alpha_p \cdot \varphi(t) \cdot |\sigma_{cgp0}|}{1 + \alpha_p \cdot \frac{A_p}{A_c} \cdot \left(1 + \frac{A_c}{I_c} \cdot z_{cp}^2 \right) \cdot (1 + 0{,}8 \cdot \varphi(t))}$$

$$\Delta\sigma_{pt} = \frac{0{,}5 \cdot 10^{-3} \cdot 195000 + 0{,}8 \cdot 41{,}51 + 5{,}571 \cdot 2{,}0 \cdot 1{,}28}{1 + 5{,}571 \cdot \frac{600}{352000} \cdot \left(1 + \frac{352000}{6{,}535 \cdot 10^{10}} \cdot 711^2 \right) \cdot (1 + 0{,}8 \cdot 2{,}0)} = 132{,}7\ N/mm^2$$

a beton hőérleléséből származó veszteség

hőtágulási együttható $\alpha_T = 10^{-5}\ 1/{}^\circ C$; $\Delta T = 40°C$ (pontosabb adat hiányában)

$$\Delta\sigma_{p\Delta T} = \alpha_T \cdot \Delta T \cdot E_p = 10^{-5} \cdot 40 \cdot 195000 = 78\ N/mm^2$$

<u>A hatásos feszítési feszültség:</u>

$$\sigma_{pm} = \sigma_{p0} - \Delta\sigma_{pt} - \Delta\sigma_{p\Delta T} = 1200 - 132{,}7 - 78 = 989{,}3\ N/mm^2$$

Ahatásos feszítési feszültség hányad:

$$\nu = \frac{\sigma_{pm}}{\sigma_{p0}} = \frac{989{,}3}{1200} = 0{,}824 = 82{,}4\%$$

,vagyis a pászmák a kezdeti feszítési feszültség 17,5 %-át várhatóan elvesztik.

<u>A hatásos feszítőerő:</u>

$$N_{pm} = A_p \cdot \sigma_{pm} = 600 \cdot 989{,}3 = 593{,}6\ kN$$

4.4. A nyomatéki teherbírás ellenőrzése; végleges állapot t_3

feltételezzük, hogy x_c<t és az acélbetétek és a pászmák is megfolynak, és **rugalmas-képlékeny** pászma modellt alkalmazva!!!!
vetületi egyenlet:

$$b \cdot x_c \cdot f_{cd} - A_s \cdot f_{yd} - A_p \cdot f_{pd} = 0$$

$$500 \cdot x_c \cdot 26{,}67 - 763 \cdot 434{,}78 - 600 \cdot 1304{,}35 = 0$$

$$\rightarrow x_c = 83{,}6mm < t = 250mm \rightarrow \textit{feltételezés jó}$$

betonacél megnyúlásának ellenőrzése:

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{d_s - 1{,}25 \cdot x_c}{1{,}25 \cdot x_c} = 3{,}5\%_o \cdot \frac{1353 - 1{,}25 \cdot 83{,}6}{1{,}25 \cdot 83{,}6} = 41{,}8\%_o$$

$$\varepsilon_{sy} = 2{,}17\%_o < \varepsilon_s < \varepsilon_{su} = 50\%_o \rightarrow \textit{feltételezés jó(képlékeny)}$$

feszítőpászma megnyúlásának ellenőrzése:

$$\varepsilon_p = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{d_{p0} - 1{,}25 \cdot x_c}{1{,}25 \cdot x_c} + \frac{\sigma_{pm}}{E_p} = 3{,}5\%_o \cdot \frac{1312 - 1{,}25 \cdot 83{,}6}{1{,}25 \cdot 83{,}6} + \frac{989{,}3}{195000} = 45{,}5\%_o$$

$\varepsilon_p > \varepsilon_{pu} = 40\%_o$, vagyis a feszítőpászmák

$$\varepsilon_{py} = 6{,}69\%_o < \varepsilon_p \rightarrow \textit{feltételezés jó(képlékeny)}$$

elvileg nem felelnek meg.

Mivel a számított és megengedhető megnyúlások különbsége nem túl nagy, és a pászmák felkeményedése nem lett figyelembe véve, maradunk a választott pászmáknál. Ha esetleg több pászma alkalmazása mellett döntenénk, a korábbi számítások (de legalább a 4.4-es részhez tartozóak) megismétlése szükséges.

Amennyiben úgy adódik, hogy a pászmák és betonacélok rugalmasan viselkednek akkor vetületi egyenletbe:

$$f_{yd} \rightarrow \sigma_S = 560 \cdot \frac{d_S}{x_C} - 700$$

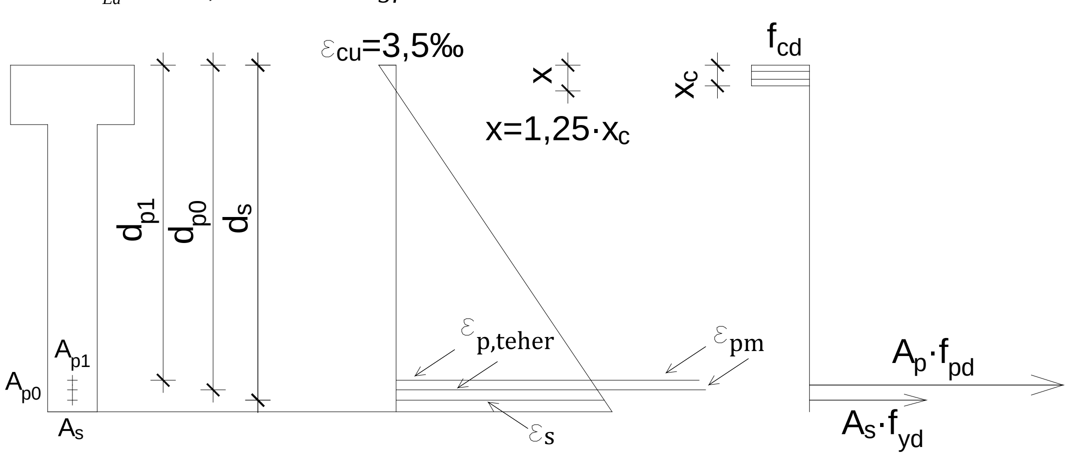
$$f_{pd} \rightarrow \sigma_P = \sigma_{pm} + 564 \cdot \frac{d_P}{x_C} - 682{,}5$$

a tartó nyomatéki teherbírása (nyomatéki egyenlet x_c-re felírva):

$$M_{Rd} = b \cdot x_c \cdot f_{cd} \cdot \frac{x_c}{2} + A_s \cdot f_{yd} \cdot (d_s - x_c) + A_p \cdot f_{pd} \cdot (d_p - x_c) =$$

$$= 500 \cdot 83{,}6 \cdot 26{,}67 \cdot \frac{83{,}6}{2} + 763 \cdot 434{,}78 \cdot (1353 - 83{,}6) + 600 \cdot 1304{,}35 \cdot (1292 - 83{,}6) =$$

$$= 1413{,}9\ kNm \quad > \quad M_{Ed} = 1273{,}7kNm \quad \rightarrow \textit{megfelel}$$



4.5. Nyírási vasalás tervezése

- a mértékadó nyíróerő V_{ED}=435,2 kN
- a húzott vasalásra (acélbetét+pászma) vonatkozó helyettesítő hasznos magasság:

$$d_h = \frac{E_s \cdot A_s \cdot d_s + E_p \cdot A_p \cdot d_p}{E_s \cdot A_s + E_p \cdot A_p} = \frac{200 \cdot 763 \cdot 1353 + 195 \cdot 600 \cdot 1292}{200 \cdot 763 + 195 \cdot 600} = 1327 mm$$

$$\mathbf{V_{Ed,red}} = V_{Ed} - p_{Ed} \cdot d_h = 435{,}2 - 74{,}4 \cdot 1{,}327 = \mathbf{336{,}7\ kN}$$

<u>**A vasalás nélküli betonkeresztmetszet nyírási teherbírása:**</u>

$$V_{Rd,c} = \max\begin{Bmatrix} \left[C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_{ck})^{1/3} + 0{,}15 \cdot \sigma_{cp}\right] \cdot b_w \cdot d_h \\ V_{Rd,c,min} = \nu_{min} \cdot b_w \cdot d_h \end{Bmatrix}$$

$$\sigma_{cp} = \min\left(\frac{N_{pm}}{A_c}; 0{,}2f_{cd}\right) = \min\left(\frac{593{,}6 \cdot 10^3}{352000}; 0{,}2 \cdot 26{,}67\right) = \min(1{,}69\,; 5{,}33) = 1{,}69\ \ N/mm^2$$

ez a tényezőt azért használjuk, mert a keresztmetszetben ható nyomóerő kedvezően hat, növeli a beton nyírási teherbírását)

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

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200\ mm}{d_h\ [mm]}} = 1 + \sqrt{\frac{200}{1327}} = 1{,}39 < 2{,}0$$

$$\rho_l = \min\begin{Bmatrix} \dfrac{A_{sI}}{b_w \cdot d_h} \\ 0{,}02 \end{Bmatrix} = \min\begin{Bmatrix} \dfrac{0}{250 \cdot 1327} \\ 0{,}02 \end{Bmatrix} = \min\begin{Bmatrix} 0 \\ 0{,}02 \end{Bmatrix} = 0$$

A_s:húzott hosszvasak azon része, amibe a megfelelően lehorgonyzott acélbetétek (a vizsgált km.-en (l_{bd}+d) távolsággal le vannak horgonyozva) és a tapadásos feszítőbetétek számíthatók be (támasz környékén biztonság javára 0)

$$f_{ck} = 25{,}0\ N/mm^2$$

$$\left[C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} + 0{,}15 \cdot \sigma_{cp}\right] \cdot b_w \cdot d_h = \left[0{,}12 \cdot 1{,}70 \cdot (100 \cdot 0 \cdot 25)^{\frac{1}{3}} + 0{,}15 \cdot 1{,}69\right] \cdot 200 \cdot 1327 = \mathbf{67{,}3\ kN}$$

A tiszta betonkeresztmetszet nyírási ellenállásának alsó határa:

$$V_{Rd,c,min} = \nu_{min} \cdot b_w \cdot d_h$$

$$\nu_{min} = 0{,}035 \cdot k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2} = 0{,}035 \cdot 1{,}39^{3/2} \cdot 40^{1/2} = 0{,}363$$

$$V_{Rd,c,min} = \nu_{min} \cdot b_w \cdot d_h = 0{,}363 \cdot 200 \cdot 1327 = 39183\ N = \mathbf{96{,}3\ kN}$$

$$\mathbf{V_{Rd,c}} = \max\begin{Bmatrix} \left[C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_{ck})^{1/3} 0{,}15 \cdot \sigma_{cp}\right] \cdot b_w \cdot d_h \\ V_{Rd,c,min} = \nu_{min} \cdot b_w \cdot d_h \end{Bmatrix} = \max\begin{Bmatrix} 67{,}3 \\ 96{,}3 \end{Bmatrix} = \mathbf{96{,}3\ kN} < \mathbf{V_{Ed,red}} = \mathbf{336{,}7\ kN}$$

A nyomott ferde beton rácsrúd teherbírása:

A nyomott betonrudak θ hajlásszögének számítása:

Normál beton esetén:

$\beta_{ct} = 2{,}4$ és $\eta_1 = 1{,}0$

$$V_c = \left[\beta_{ct} \cdot \eta_1 \cdot 0{,}1 \cdot f_{ck}^{\frac{1}{3}} \cdot (1 + 1{,}2 \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}})\right] \cdot b_w \cdot 0{,}9 \cdot d_h = \left[2{,}4 \cdot 1{,}0 \cdot 0{,}1 \cdot 40^{\frac{1}{3}} \cdot (1 + 1{,}2 \cdot \frac{1{,}69}{26{,}67})\right] \cdot 200 \cdot 0{,}9 \cdot 1327$$
$$= 210{,}96 \text{ kN}$$

$$\cot \Theta = \frac{1{,}2 + 1{,}4 \cdot \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}}}{1 - \frac{V_c}{V_{Ed,red}}} = \frac{1{,}2 + 1{,}4 \cdot \frac{1{,}69}{26{,}67}}{1 - \frac{210{,}96}{336{,}7}} = 3{,}45$$

A θ hajlásszögre vonatkozó $1{,}0 \leq \cot \Theta \leq 2{,}0$ korlátozás miatt

$\cot \Theta = 2{,}0$

A nyomott ferde beton rácsrúd teherbírása:

$$V_{Rd,max} = \alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot \nu_1 \cdot f_{cd} \cdot \frac{\cot \alpha_{sw} + \cot \theta}{1 + \cot^2 \theta}$$

- $\alpha_{sw} = 90°$ - a nyírási vasalás és a tartó tengelye által bezárt szög

- z:belső erők karja, pontosabb számítás helyett megengedett:

  $z = 0{,}9 \cdot d_h = 0{,}9 \cdot 1327 = 1194 \text{ mm}$
- $\nu_1 = 0{,}6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) = 0{,}6 \cdot \left(1 - \frac{40}{250}\right) = 0{,}504$ (hatékonysági tényező)

- $$\alpha_{cw} = \begin{cases} 1, \text{ha } \sigma_{cp} = 0 \\ 1 + \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}}, \text{ha } 0 \leq \sigma_{cp} \leq 0{,}25 \cdot f_{cd} \\ 1{,}25, \text{ha } 0{,}25 \cdot f_{cd} \leq \sigma_{cp} \leq 0{,}5 \cdot f_{cd} \\ 2{,}5 \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}}\right), \text{ha } 0{,}5 \cdot f_{cd} \leq \sigma_{cp} \leq f_{cd} \end{cases}$$

  Mivel $0 \leq \sigma_{cp} = 1{,}69 \leq 0{,}25 \cdot 26{,}67 = 6{,}7$

  $$\alpha_{cw} = 1 + \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}} = 1 + \frac{1{,}69}{26{,}67} = 1{,}063$$

$$\mathbf{V_{Rd,max}} = \alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot \nu_1 \cdot f_{cd} \cdot \frac{\cot \alpha_{sw} + \cot \theta}{1 + \cot^2 \theta} = 1{,}063 \cdot 200 \cdot 1194 \cdot 0{,}504 \cdot 26{,}67 \cdot \frac{0 + 2{,}0}{1 + 2{,}0^2} = \mathbf{1364{,}8\ kN} > \mathbf{V_{Ed,red}}$$
$$= \mathbf{336{,}7\ kN}$$

tehát a tartó nyírásra vasalható!!!

Nyírási vasalás tervezése:

- alkalmazott nyírási vasalás: kengyelezés d_k=8mm
- a nyírási acél /kengyel km.-i területe: $A_{s,w} = 2 \cdot \frac{d_k^2 \cdot \pi}{4} = 2 \cdot \frac{8^2 \cdot \pi}{4} = 100{,}5\ mm^2$

$$V_{Rd,s} = \frac{z}{s} \cdot A_{sw} \cdot f_{ywd} \cdot (\cot \alpha_{sw} + \cot \theta) \cdot \sin\alpha_{sw}$$

$$s_{szüks} = \frac{z}{V_{Ed,red}} \cdot A_{sw} \cdot f_{ywd} \cdot (\cot \alpha_{sw} + \cot \theta) \cdot \sin\alpha_{sw} = \frac{1194}{336{,}7 \cdot 10^3} \cdot 100{,}5 \cdot 434{,}78 \cdot (0 + 2{,}0) \cdot 1{,}0 = 309{,}9\ \mathrm{mm}$$

$$s_{alk} = 300\ \mathrm{mm}$$

Szerkesztési szabályok ellenőrzése:

Nyírási acélbetétek maximális távolsága:

$$s_{s,max} = 0{,}75 \cdot d_h = 0{,}75 \cdot 1194 = 895{,}5\ \mathrm{mm} > s_{alk} = 300\ \mathrm{mm}\ \text{megfelel}$$

Minimális nyírási vashányad ellenőrzése:

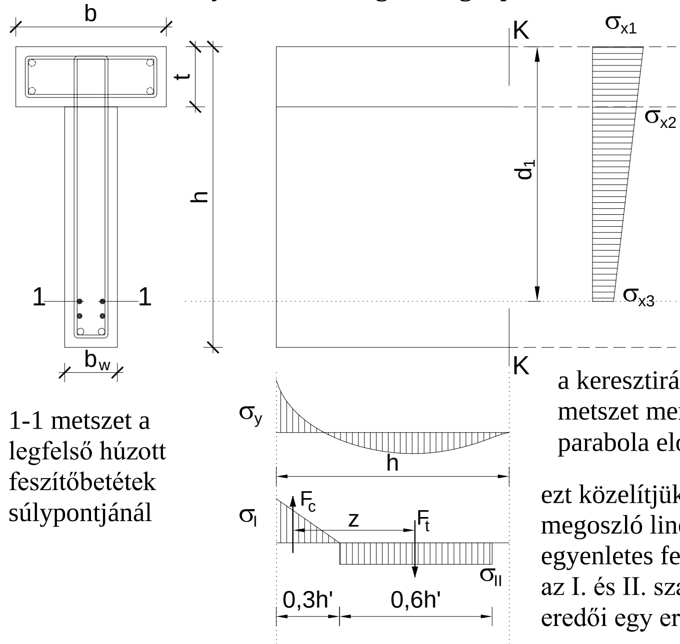
$$\rho_{alk} = \frac{A_{sw,alk}}{s_{alk} \cdot b_w \cdot \sin\alpha_{sw}} = \frac{100{,}5}{300 \cdot 200 \cdot 1{,}0} = 0{,}00168$$

$$\rho_{w,min} = \max\left(\frac{0{,}08 \cdot \sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}}; 0{,}001\right) = \max\left(\frac{0{,}08 \cdot \sqrt{40}}{500}; 0{,}001\right) = \max(0{,}001; 0{,}001) = 0{,}001$$

$$\rho_{alk,1} = 0{,}00168 > \rho_{w,min} = 0{,}001\ \text{megfelel}$$

5.A tartóvég ellenőrzése

a tartóvégen a feszítőbetétek lehorgonyzásának következtében a tartó tengelyére merőleges σ_y húzófeszültségek alakulnak ki, melyek a tartóvéget megrepeszthetik



a keresztirányú feszültség az 1-1 metszet mentén harmadfokú parabola eloszlású h' hosszon

ezt közelítjük 0,9h' hosszon egy megoszló lineárisan változó és egy egyenletes feszültség eloszlással az I. és II. szakaszon ébredő fesz.ek eredői egy erőpárt alkotnak

- a nyírófeszültség elhanyagolása esetén ezen erőpár nyomatékának kell egyensúlyoznia a K-K metszetben fellépő tengelyirányú σ_x feszültségek 1-1 metszet feletti részének nyomatékát → ebből a feltételből határozható meg az F_t keresztirányú húzóerő

a vizsgált szakasz hossza:

$$h' = \max \begin{vmatrix} l_{ptd} = 1{,}2 \cdot l_{pt} = 1{,}2 \cdot 1{,}231m = 1{,}477m \\ \sqrt{h^2 + (0{,}6 \cdot l_{ptd})2} = \sqrt{1{,}4^2 + (0{,}6 \cdot 1{,}477)^2} = 1{,}657m \end{vmatrix}$$

$h' = 1{,}657$ m

a K-k metszet távolsága az elméleti támasztól: $\xi = h' - {}^{v}\!/_{2} = 1{,}657 - {}^{0{,}3}\!/_{2} = 1{,}507m$

mértékadó nyomaték a K-K metszetben:

$$M_{Ed}^{\xi} = \frac{p_d \cdot l_{eff}}{2} \cdot \xi - \frac{p_d \cdot \xi^2}{2} = \frac{74{,}4 \cdot 11{,}7}{2} \cdot 1{,}507 - \frac{74{,}4 \cdot 1{,}507^2}{2} = 571{,}4kNm$$

1-1 metszet távolsága felső szélső száltól: $d_1 = d_{p1} = 1273$ mm

Az ideális keresztmetszet jellemzői a végleges állapotban:

$$E_{cd} = 23333{,}3kN / mm^2$$

$$\alpha_{s3} = \frac{E_s}{E_{cd0}} = \frac{200000}{23333{,}3} = 8{,}57 \qquad \alpha_{p3} = \frac{E_p}{E_{cd0}} = \frac{195000}{23333{,}3} = 8{,}36$$

Ideális keresztmetszet jellemzői: rug.-repedésmentes áll, feltételezve, hogy $x_{i1} > t$

$$A_{i3} = b \cdot t + b_w \cdot (h - t) + (\alpha_s - 1) \cdot A_s + (\alpha_{p3} - 1) \cdot A_p = 500 \cdot 240 + 200 \cdot (1400 - 240) +$$

$$+ (8{,}57 - 1) \cdot 763 + (8{,}36 - 1) \cdot 600 = 362194{,}4mm^2$$

statikai nyomaték a felső szélső szálra:

$$S_{i3} = b \cdot t \cdot \frac{t}{2} + b_w \cdot (h-t) \cdot \left(\frac{h-t}{2} + t \right) + (\alpha_{s3} - 1) \cdot A_s \cdot d_s + (\alpha_{p3} - 1) \cdot A_p \cdot d_p =$$

$$= 500 \cdot 240 \cdot \frac{240}{2} + 200 \cdot (1400 - 240) \cdot \left(\frac{1400 - 240}{2} + 240 \right) + (8{,}57 - 1) \cdot 763 \cdot 1353 +$$

$$+ (8{,}36 - 1) \cdot 600 \cdot 1292 = 2{,}182 \cdot 10^8 \ mm^3$$

semleges tengely (súlypont) meghatározása:

$$x_{i3} = \frac{S_{i3}}{A_{i3}} = \frac{2{,}192 \cdot 10^8}{36219{,}4} = 602{,}34 mm > t = 250 mm \quad \rightarrow \textit{feltételezés jó}$$

inercia:

$$I_{i3} = \frac{b \cdot t^3}{12} + b \cdot t \cdot \left(x_{i3} - \frac{t}{2} \right)^2 + \frac{b_w \cdot (h-t)^3}{12} + b_w \cdot (h-t) \cdot \left(\frac{h-t}{2} + t - x_{i3} \right)^2$$

$$+ (\alpha_{s3} - 1) \cdot A_s \cdot (d_s - x_{i3})^2 + (\alpha_{p3} - 1) \cdot A_p \cdot (d_p - x_{i3})^2 =$$

$$\frac{500 \cdot 240^3}{12} + 500 \cdot 240 \cdot (602{,}34 - 240/2)^2 + \frac{200 \cdot (1400 - 240)^3}{12} +$$

$$+ 200 \cdot (1400 - 240) \cdot (\frac{1400 - 240}{2} + 240 - 602{,}34)^2 +$$

$$+ (8{,}57 - 1) \cdot 763 \cdot (1353 - 602{,}34)^2 + (8{,}36 - 1) \cdot 600 \cdot (1292 - 602{,}34)^2 = 7{,}086 \cdot 10^{10} mm^4$$

A vízszintes feszültségek értékei (rugalmas-repedésmentes áll. feltételezésével)

$M_{pm} = N_{pm} \cdot (d_p - x_{i3}) = 593{,}6 \cdot (1{,}292 - 0{,}602) = 409{,}6\ \mathrm{kNm}$

$$\sigma_{x1} = -\frac{N_{pm}}{A_{i3}} + \frac{M_{pm}}{I_{i3}} \cdot x_{i3} - \frac{M_{Ed}^{\xi}}{I_{i3}} \cdot x_{i3} =$$

$$-\frac{593{,}6 \cdot 10^3}{362194{,}4} + \frac{(409{,}6 - 571{,}4) \cdot 10^6}{7{,}086 \cdot 10^{10}} \cdot 602{,}3 = -3{,}02\ N/mm^2$$

$$\sigma_{x2} = -\frac{N_{pm}}{A_{i3}} + \frac{M_{pm}}{I_{i3}} \cdot (x_{i3} - t) - \frac{M_{Ed}^{\xi}}{I_{i3}} \cdot (x_{i3} - t) =$$

$$-\frac{593{,}6 \cdot 10^3}{362194{,}4} + \frac{(409{,}6 - 571{,}4) \cdot 10^6}{7{,}086 \cdot 10^{10}} \cdot (602{,}3 - 240) = -2{,}47\ N/mm^2$$

$$\sigma_{x3} = -\frac{N_{pm}}{A_{i3}} - \frac{M_{pm}}{I_{i3}} \cdot (d_1 - x_{i3}) + \frac{M_{Ed}^{\xi}}{I_{i3}} \cdot (d_1 - x_{i3}) =$$

$$-\frac{593{,}6 \cdot 10^3}{362194{,}4} + \frac{(-409{,}6 + 571{,}4) \cdot 10^6}{7{,}086 \cdot 10^{10}} \cdot (1273 - 602{,}3) = -0{,}10\ N/mm^2$$

- a vízszintes erők nyomatéka az 1-1 metszetre:

$$M_x = b \cdot t \cdot \sigma_{x2} \cdot \left(d_1 - \frac{t}{2}\right) + b \cdot t \cdot \frac{\sigma_{x1} - \sigma_{x2}}{2} \cdot \left(d_1 - \frac{t}{3}\right) +$$

$$+ b_w \cdot (d_1 - t) \cdot \sigma_{x3} \cdot \left(\frac{d_1 - t}{2}\right) + b_w \cdot (d_1 - t) \cdot \left(\frac{\sigma_{x2} - \sigma_{x3}}{2}\right) \cdot \frac{2 \cdot (d_1 - t)}{3} =$$

$$500 \cdot 240 \cdot 2{,}47 \cdot \left(1273 - \frac{240}{2}\right) + 500 \cdot 240 \cdot \frac{3{,}02 - 2{,}47}{2} \cdot \left(1273 - \frac{240}{3}\right) +$$

- a függőleges F_c és F_t erők karja:

$$+ 200 \cdot (1273 - 240) \cdot 0{,}10 \cdot \left(\frac{1273 - 240}{2}\right) + 200 \cdot (1273 - 240) \cdot \left(\frac{2{,}47 - 0{,}10}{2}\right) \cdot \frac{2 \cdot (1273 - 240)}{3} =$$

$$341{,}8 \cdot 10^6 + 39{,}4 \cdot 10^6 + 10{,}67 \cdot 10^6 + 168{,}6 \cdot 10^6 = 560{,}42 kNm$$

$z = 0{,}5 \cdot h' = 0{,}5 \cdot 1{,}657 = 0{,}829\ \mathrm{m}$

$$M_x = F_t \cdot z \quad \rightarrow \quad F_t = \frac{M_x}{z} = \frac{560{,}42}{0{,}829} = 676{,}5 kN$$

- a szükséges vasalás mennyisége (kengyelekkel):

$$A_{s,szüks}^{s} = \frac{F_t}{f_{yd}} = \frac{676{,}5 \cdot 10^3}{434{,}78} = 1555{,}9 mm^2 \quad \rightarrow n = \frac{A_{s,szüks}^{s}}{A_{sw}} = \frac{1555{,}9}{100{,}5} = 15{,}5 db$$

n_{alk}=16db 8mm átmérőjű zárt kengyelt kell a II. szakasz mentén egyenletesen elhelyezni

6.A tartó lehajlásának számítása

A lehajlás számítását **kvázi-állandó teherkombinációból** származó igénybevételekre kell elvégezni. Először megvizsgáljuk, hogy bereped-e a tartó, vagyis meghatározzuk a repesztőnyomaték nagyságát.
Az ideális keresztmetszet jellemzői a végleges állapotban, rugalmas-repedésmentes állapotot feltételezve (ld. 5. fejezet):
semleges tengely:

$x_{i3} = 621{,}2 mm$

$A_{i3} = 371871{,}3 mm^2$

$I_{i3} = 7{,}581 \cdot 10^{10} mm^4$

Mértékadó nyomaték:

$M_{ser,c} = 833{,}3\ kNm$

A hatásos feszítőerő:

$N_{pm} = 593{,}6\ kN$

Nyomaték a hatásos feszítőerőből:

$M_{pm} = 398{,}4\ \mathrm{kNm}$

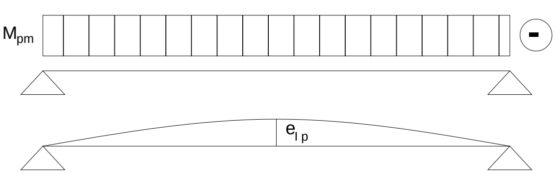
A repesztőnyomaték nagysága:

$$M_{cr} = \frac{I_{i3}}{h - x_i} \cdot \left[f_{ctm} + \frac{N_{pm}}{A_{i3}} + \frac{M_{pm}}{I_{i3}} \cdot (h - x_{i3}) \right]$$
$$= \frac{7{,}581 \cdot 10^{10}}{1400 - 621{,}2} \cdot \left[3{,}5 + \frac{593{,}6 \cdot 10^3}{371871{,}3} + \frac{398{,}4 \cdot 10^6}{7{,}581 \cdot 10^{10}} \cdot (1400 - 621{,}2) \right] = 895{,}3\ \mathrm{kNm}$$
$$> M_{ser,c} = 833{,}3\ \mathrm{kNm}$$

,vagyis a tartó nem reped be.
A tartó lehajlását két részből, a feszítésből és a külső terhekből származó lehajlásokból határozzuk meg.

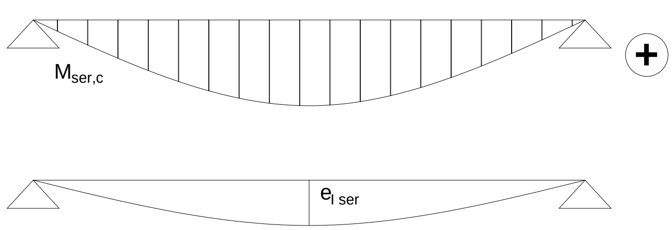
Feszítésből számított lehajlás:

$$e_{I\,p} = -\frac{1}{8} \cdot \frac{M_{pm} \cdot l_{eff}^{\,2}}{E_{c,eff} \cdot I_{i3}} = -\frac{1}{8} \cdot \frac{398{,}4 \cdot 10^6 \cdot 11700^2}{12700 \cdot 7{,}581 \cdot 10^{10}} = -7{,}08\ \mathrm{mm}$$



Külső terhekből számított lehajlás:

$$e_{I\,ser} = \frac{5}{48} \cdot \frac{M_{ser,c} \cdot l_{eff}^{\,2}}{E_{c,eff} \cdot I_{i3}} = -\frac{5}{48} \cdot \frac{833{,}3 \cdot 10^6 \cdot 11700^2}{12700 \cdot 7{,}581 \cdot 10^{10}} = +12{,}34\mathrm{mm}$$



A teljes lehajlás repedésmentes állapotban:

$$e_I = e_{Ip} + e_{I\,ser} = -7{,}08 + 12{,}34 = 5{,}26\ \mathrm{mm} < \frac{l_{eff}}{250} = \frac{11700}{250} = 46{,}8\ \mathrm{mm}$$

,vagyis a tartó lehajlásra megfelel.

Amennyiben a tartó bereped, úgy meg kell határozni mind a repedésmentes (e_I), mind a berepedt tartó lehajlásait (e_{II}).

A berepedt tartó lehajlásának számításakor ki kell számolni először az x_{iII} nyomott betonzóna magasságát.

Mivel a tartóra nemcsak külső normálerő (feszítőerő), hanem külső nyomaték (feszítőerő külpontossága miatt) is hat, az x_{iII} értékét csak harmadfokúra összefüggésre egyenlettel lehet meghatározni.

$$\frac{M_{ser,c} - M_{pm}(x_{iII})}{N_{pm}} = \frac{I_{iII}\ (x_{iII})}{S_{iII}\ (x_{iII})}$$ [1]

,ahol az összefüggés részei az alábbi módon írhatóan fel:

$$M_{ser,c} - M_{pm} = M_{ser,c} - N_{pm} \cdot (d_p - x_{iII})$$

$$S_{iII} = b \cdot t \cdot \left(x_{iII} - \frac{t}{2} \right) + \frac{b_w \cdot (x_{iII} - t)^2}{2} - \alpha_{s3} \cdot A_s \cdot (d_s - x_{iII}) - \alpha_{p3} \cdot A_p \cdot (d_p - x_{iII})$$

$$I_{iII} = \frac{(b - b_w) \cdot t^3}{12} + \frac{b_w \cdot x_{iII}{}^3}{3} + (b - b_w) \cdot t \cdot \left(x_{iII} - \frac{t}{2} \right)^2 +$$

$$+ \alpha_{s3} \cdot A_s \cdot (d_s - x_{iII})^2 + \alpha_{p3} \cdot A_p \cdot (d_p - x_{iII})^2$$

Behelyettesítés és rendezés után harmadfokú összefüggésre jutunk, melyből Newton-módszerrel vagy számítógépes számítással[2] ki lehet fejezni az x_{iII} értékét.

Miután az x_{iII}-t visszahelyettesítettük az inercia (I_{iII}) képletébe, felírhatjuk a berepedt tartó lehajlását is a repedésmentes állapothoz hasonló képletekkel:

$$e_{II\,p} = -\frac{1}{8} \cdot \frac{M_{pm} \cdot l_{eff}{}^2}{E_{c,eff} \cdot I_{iII}}$$

$$e_{II\,ser} = \frac{5}{48} \cdot \frac{M_{ser,c} \cdot l_{eff}{}^2}{E_{c,eff} \cdot I_{iII}}$$

$$e_{II} = e_{II\,p} + e_{II\,ser}$$

[1] képlet levezetése ld. Melléklet

[2] http://www.1728.org/cubic.htm

A keresztmetszetre ható teljes nyomatéki igénybevétel:
$M_{q,p} = M_{ser,c} - N_{pm} \cdot (d_p - x_{iII})$
A betonacélokban ébredő feszültség nagysága:
$\sigma_{sII} = \alpha_{s3} \cdot \frac{M_{q,p}}{I_{iII}} \cdot (d_p - x_{iII})$
A tartó tényleges lehajlását az alábbi összefüggéssel számítjuk:

$$e = (1 - \zeta) \cdot e_I + \zeta \cdot e_{II}$$

, ahol a ζ tényező meghatározása az alábbi összefüggés szerint történik:

$$\zeta = 1 - \beta \cdot \left(\frac{\sigma_{sr}}{\sigma_{sII}}\right)^2$$

, ahol

$\beta = 0{,}5$ (tartós terhelés)

σ_{sII} a betonacélokban ébredő feszültség a vizsgált teherkombináció (kvázi-állandó) hatására

(előző lépésekben meghatároztuk)

σ_{sr} a betonacélokban ébredő feszültség a berepedt keresztmetszetben azon teherszinten, melyen a repedés bekövetkezik (repesztőnyomaték hatására)

A σ_{sr} meghatározásához először szükség van az x_{iII}' nyomott betonzóna magasságára az

$$\frac{M_{cr} - M_{pm}(x_{iII}')}{N_{pm}} = \frac{I_{iII}\ (x_{iII}')}{S_{iII}\ (x_{iII}')}$$

összefüggésből (az előző számításhoz hasonlóan).

Miután kifejeztük x_{iII}'-t, a betonacél feszültség meghatározható:

$M_{q,p}' = M_{cr} - N_{pm} \cdot (d_p - x_{iII}')$
$\sigma_{sr} = \alpha_{s3} \cdot \frac{M_{q,p}'}{I_{iII}} \cdot (d_p - x_{iII}')$
A ζ tényező meghatározása után ellenőrizhető a tartó tényleges lehajlása:

$$e = (1 - \zeta) \cdot e_I + \zeta \cdot e_{II} < \frac{l_{eff}}{250}$$

7.A tartó repedezettségi állapotának számítása

Dekompressziós nyomaték számítása:

semleges tengely:

$x_c = h$

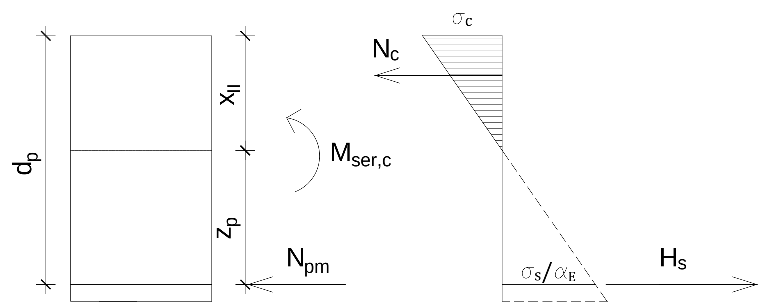
$$S_{II} = b_w \cdot h \cdot \frac{h}{2} + (b - b_w) \cdot t \cdot \frac{t}{2} + (\alpha_{s3} - 1) \cdot A_s \cdot d_s - (\alpha_{p3} -) \cdot A_p \cdot d_p$$

$$I_{II} = \frac{(b-) \cdot t^3}{3} + \frac{b_w \cdot x_{iII}{}^3}{3} + (b - b_w) \cdot t \cdot \left(x_{iII} - \frac{t}{2} \right)^2 +$$

$$+ \alpha_{s3} \cdot A_s \cdot (d_s - x_{iII})^2 + \alpha_{p3} \cdot A_p \cdot (d_p - x_{iII})^2$$

MELLÉKLET

Nyomott betonzóna magasságának meghatározása normálerővel és nyomatékkal terhelt, II. feszültségi állapotú keresztmetszetben



Vetületi egyenlet:

$$N_{pm} = N_c - H_s$$

A koncentrált erőket a feszültségek segítségével írjuk fel:

$$N_c = \sigma_c \cdot \frac{b \cdot x_{II}}{2} = \frac{\sigma_c}{x_{II}} \cdot \frac{b \cdot x_{II}^2}{2} = \frac{\sigma_c}{x_{II}} \cdot S_c$$

$$H_s = \frac{\sigma_c}{x_{II}} \cdot (d_p - x_{II}) \cdot A_s \cdot \alpha_E = \frac{\sigma_c}{x_{II}} \cdot S_s \cdot \alpha_E$$

$$N_{pm} = \frac{\sigma_c}{x_{II}} \cdot (S_c - S_s \cdot \alpha_E) = \frac{\sigma_c}{x_{II}} \cdot S_{iII} \qquad (1)$$

Nyomatéki egyenlet:

$$M_{ser,c} - N_{pm} \cdot \left(d_p - x_{II}\right) = N_c \cdot \frac{2}{3} \cdot x_{II} + H_s \cdot \left(d_p - x_{II}\right) = \sigma_c \cdot \frac{b \cdot x_{II}}{2} \cdot \frac{2}{3} \cdot x_{II} + \frac{\sigma_c}{x_{II}} \cdot \left(d_p - x_{II}\right) \cdot A_s \cdot \alpha_E \cdot \left(d_p - x_{II}\right)$$

$$= \sigma_c \cdot \frac{b \cdot x_{II}^2}{3} + \frac{\sigma_c}{x_{II}} \cdot \left(d_p - x_{II}\right)^2 \cdot A_s \cdot \alpha_E == \frac{\sigma_c}{x_{II}} \cdot \frac{b \cdot x_{II}^3}{3} + \frac{\sigma_c}{x_{II}} \cdot \left(d_p - x_{II}\right)^2 \cdot A_s \cdot \alpha_E = \frac{\sigma_c}{x_{II}} \cdot I_c + \frac{\sigma_c}{x_{II}} \cdot I_s \cdot \alpha_E$$

$$= \frac{\sigma_c}{x_{II}} \cdot (I_c + I_s \cdot \alpha_E) = \frac{\sigma_c}{x_{II}} \cdot I_{iII}$$

Átalakítva az egyenletet az alábbi összefüggésre jutunk:

$$M_{ser,c} - N_{pm} \cdot \left(d_p - x_{II}\right) = \frac{\sigma_c}{x_{II}} \cdot I_{iII} \qquad (2)$$

Elosztva a (2) egyenletet az (1)-vel:

$$\frac{M_{ser,c} - M_{pm}(x_{iII})}{N_{pm}} = \frac{I_{iII}\ (x_{iII})}{S_{iII}\ (x_{iII})}$$