

SZERKEZETÉPÍTÉS I. NGB_SE008_1

TERVEZÉSI SEGÉDLET

ELŐFESZÍTETT VASBETON TARTÓ TERVEZÉSE

1. Adatok

1.1. Anyagjellemzők

Beton: C40/50

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

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

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

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

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

Betonacél: B500

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

$$\text{rug.modulus } E_s = 200000 \text{ N/mm}^2$$

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

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

Feszítópákszma Fp100/1770-R2

a pászma jelölésében:

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

$$1770 \quad - \text{ a pászma szakítószilárdságának karakt.értéke } f_{pk}$$

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

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

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

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

$$\text{rug.modulus } E_p = 195 \text{ kN/mm}^2$$

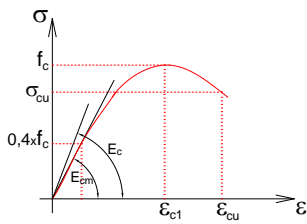
$$\text{a rugalmas nyúlás határa } \varepsilon_{py} = \frac{f_{pd}}{E_s} = \frac{1304,35}{195} = 6,69\%$$

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

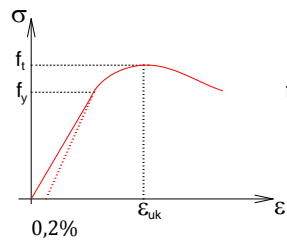
Jel	f_{pk} [N/mm ²]	$f_{p0,1k}$ [N/mm ²]	f_{pd} [N/mm ²]	Φ [mm]	A_p [mm ²]
Fp 55/1770	1770	1500	1304.3	9.6	55
Fp 100/1770	1770	1500	1304.3	12.9	100
Fp 150/1770	1770	1500	1304.3	15.7	150
Fp 55/1860	1860	1580	1373.9	9.6	55
Fp 139/1860	1860	1580	1373.9	15.2	139
Fp 150/1860	1860	1580	1373.9	15.7	150

Feszítópászmák szilárdsági- és keresztmetszeti értékei

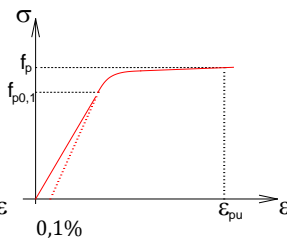
Beton



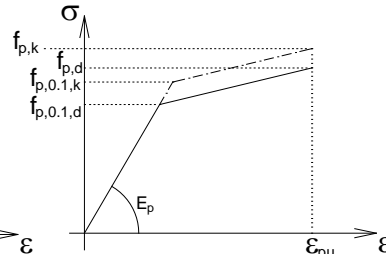
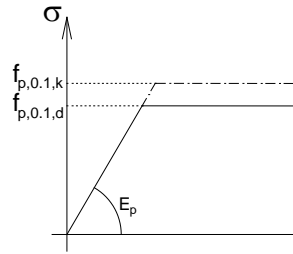
Betonacél



Feszítópázsma



Feszítópázsma idealizált σ - ϵ diagramja

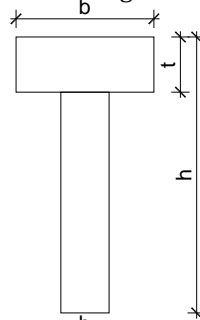


Rugalmas-képlékeny

Rugalmas-felkeményedő

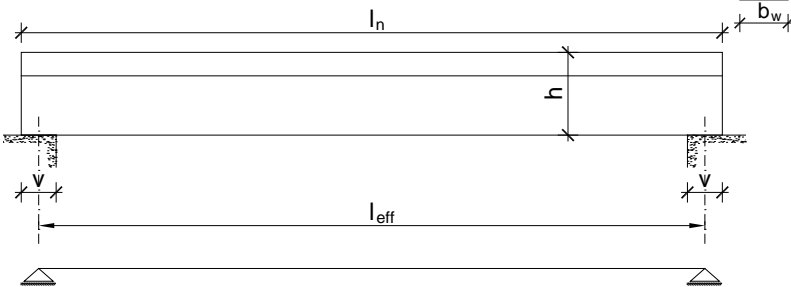
1.2. Keresztmetszeti adatok

felemez szélessége $b=500\text{mm}$
 tartó magassága $h=1400\text{mm}$
 felemez vastagsága $t=240\text{mm}$
 gerinc vastagsága $b_w=200\text{mm}$



1.3. Statikai váz

tartóhossz $l_n=12\text{m}$
 feltámaszkodás $v=30\text{cm}$



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

1.4. Terhek

- gerendák egymástól való távolsága $a=4,2\text{ m}$
- az állandó teher alapértéke $g_{all,k}=7,7\text{ kN/m}^2$
(szigetelés, burkolat, gépészet súlya)
- az esetleges teher alapértéke $q_k=3,0\text{ kN/m}^2$
(C kategória: gyülekezésre szolgáló terület)

- a feszített tartó **önsúlyának** meghatározása :

vasbeton térfogatsúlya $\rho_{vb}=25\text{ kN/m}^3$

önsúly alapértéke / karakterisztikus értéke:

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

- az állandó teher alapértéke (karakt. értéke):

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

- az esetleges teher alapértéke (karakt. értéke):

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

2. Mértékadó terhek és igénybevételek

2.1. Vizsgálati állapotok

t₁ időpont – feszítőerő ráengedése

t₂ időpont – átmeneti állapot (szállítás, szerelés)

t₃ időpont – végleges állapot

- magasépítési feszített tartóknál csak t₁ és t₃ időpontot ellenőrizzük

2.2. Mértékadó terhek

t₁ időpont: $g_k = 8,8 \text{ kN} / \text{m}$

t₃ időpont: végleges állapot

teherbírás számításához: tartós és ideiglenes terv helyzet, teherbírési határáll.

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

tartó repedezettségi állapotának vizsgálatához: használhatósági, gyakori kombináció

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

lehajlás számításához: használhatósági, kvázi-állandó kombináció

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

2.3. Mértékadó igénybevételek

t₁ időpont: feszítőerő ráengedésekor, tartóközépen

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

t₃ időpont: végleges állapot, tartóközépen

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

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

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

t₃ időpont: végleges állapot, tartóvégen mértékadó nyíróerő

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

3.A vasalás mennyiségének meghatározása (lágvas és feszítőpászma)

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

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

nyomatéki egyenlet a húzott vasak súlypontjára:

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

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

$x_c = 78,25 \text{ mm} < t = 250 \text{ mm} \rightarrow$ 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 lágvas mennyisége: vetületi egyenletből

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

Ez a teljes vasalási szükséglet lágvasban kifejezve.

→lágvas és feszítőbetét együttes alkalmazása: a lágvas 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 $X=0,7$

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

innen:

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

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

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

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

fenti egyenletből:

$$H_{p,szüks} = X \cdot H_{teljes}$$

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

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

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

választott kezdeti feszítési feszültség:

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

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: $c_{\min} = \max[c_{\min,b}; c_{\min,dur}; 10mm] = 25mm$

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 feszítópázmák közötti minimális távolságok számítása:

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

lágvasak közötti min. távolság $\Delta s = \max[d_s; d_g + 5mm; 20mm] = 21mm$

a pázmák átmérője:

$$d_p = 12,9mm$$

pázmák közti min. vízszintes távolság $\Delta p_y = \max[2 \cdot d_p; d_g + 5mm; 20mm] = 26mm$

pázmák közti min. függőleges távolság $\Delta p_z = \max[2 \cdot d_p; d_g] = 26mm$

alkalmazott kengyelátmérő: $\phi_k = 8mm$

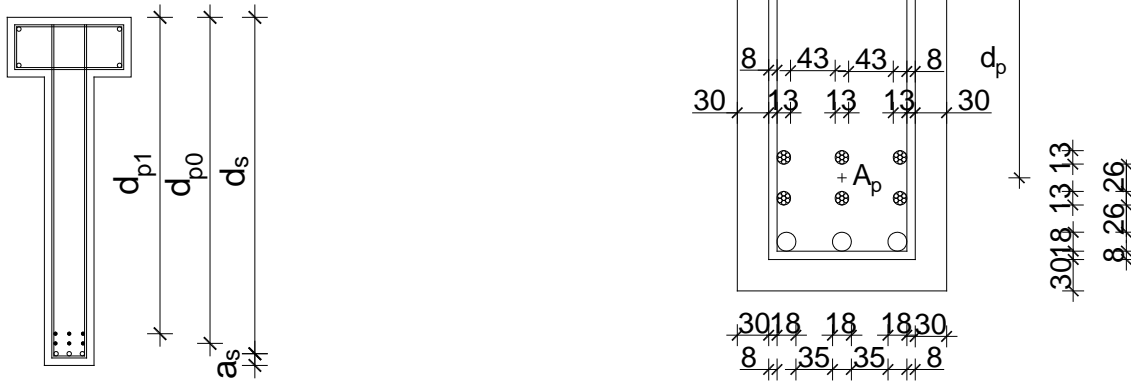
A lágvasak és a pászmaák súlyponti távolságai:

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

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

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

A vasalás kialakítása:



A vasalási kép kialakításakor ellenőrizni kell a lágvasak és a pászmaák közti távolságokat:

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

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

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

$$A_p = 600 \text{ mm}^2$$

A pászmaakat a súlypontjukban összevonjuk:

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

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/mm ²]	16	20	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
$f_{ck,cube}$ [N/mm ²]	20	25	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105
f_{cm} [N/mm ²]	24	28	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98
f_{ctm} [N/mm ²]	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/mm ²]	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

$$f_{ck0} = 30 \text{ N/mm}^2 \quad f_{cd0} = \frac{f_{ck0}}{1,5} = \frac{30}{1,5} = 20 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{ck0,05} = 2 \text{ N/mm}^2 \quad f_{cd0} = \frac{f_{ck0,05}}{1,5} = \frac{2}{1,5} = 1,33 \text{ N/mm}^2$$

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

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

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

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

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

statikai nyomaték a felső szélső szálra:

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

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

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

semleges tengely (súlypont) meghatározása:

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

inercia:

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

$$+ (\alpha_{s1} - 1) \cdot A_s \cdot (d_s - x_{i1})^2 + (\alpha_{p1} - 1) \cdot A_p \cdot (d_p - x_{i1})^2 =$$

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

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

Ellenőrzés tartóközépen:

A kezdeti feszítőerő:

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

A feszítőerő külpontossága miatti nyomaték:

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

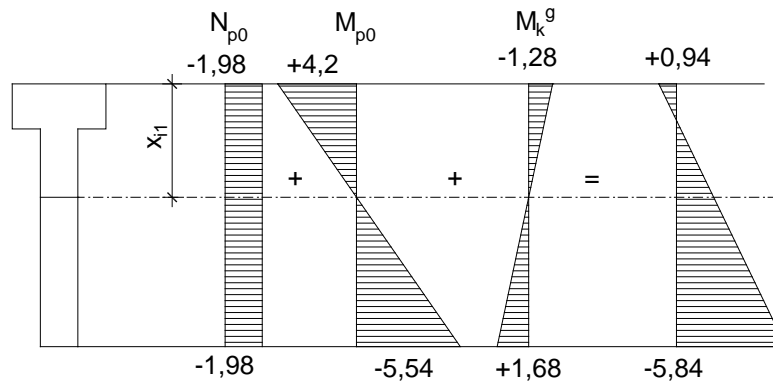
$$M_k^g = 150,6 \text{ kNm} \quad \text{önsúly karakterisztikus értékéből}$$

a beton alsó szélő szálában keletkező feszültség:

$$\begin{aligned} \sigma_c^a &= -\frac{N_{p0}}{A_{i1}} - \frac{M_{p0}}{I_{i1}} \cdot (h - x_{i1}) + \frac{M_k^g}{I_{i1}} \cdot (h - x_{i1}) = \\ &= -\frac{720 \cdot 10^3}{362960,1} - \frac{495,7 \cdot 10^6}{7,126 \cdot 10^{10}} \cdot (1400 - 603,87) + \frac{150,6 \cdot 10^6}{7,126 \cdot 10^{10}} \cdot (1400 - 603,87) = \text{a beton felső szélő szálában keletkező} \\ &= -1,98 - 5,538 + 1,683 = -5,84 \text{ N/mm}^2 < f_{cd0} = 20 \text{ N/mm}^2 \rightarrow \text{megfelel} \end{aligned}$$

feszültség:

$$\begin{aligned} \sigma_c^f &= -\frac{N_{p0}}{A_{i1}} + \frac{M_{p0}}{I_{i1}} \cdot x_{i1} - \frac{M_k^g}{I_{i1}} \cdot x_{i1} = \\ &= -\frac{720 \cdot 10^3}{362960,1} + \frac{495,7 \cdot 10^6}{7,126 \cdot 10^{10}} \cdot 603,87 - \frac{150,6 \cdot 10^6}{7,126 \cdot 10^{10}} \cdot 603,87 = \\ &= -1,98 + 4,2 - 1,28 = 0,94 \text{ N/mm}^2 < f_{ctd0} = 1,33 \text{ N/mm}^2 \rightarrow \text{megfelel} \end{aligned}$$



Ellenőrzés tartóvégen:

Szélösszál-feszültségek ellenőrzése ott, ahol a feszítőpázmák már teljesen lehorgonyzódtak a pászma tapadási szilárdsága:

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

$$\eta_{p1} = 3,2 \text{ (7eres pászmák esetén)}$$

$$\eta_1 = 0,7 \text{ (ált.esetben, ha tapadási körülmények pontosan nem ismertek)}$$

lehorgonyzási hossz alapértéke:

$$l_{pt} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot d_p \cdot \frac{\sigma_{p0}}{f_{bpt}} = 1,25 \cdot 0,19 \cdot 12,9 \cdot \frac{1200}{2,99} = 1,231 \text{ m} \quad \alpha_1 = 1,25 \text{ (hirtelen)}$$

engedik rá a tartóra a feszítőerőt)

$$\alpha_2 = 0,19 \text{ (7eres pászmák esetén)}$$

lehorgonyzási hossz tervezési értéke:

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

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

Az önsúlyból származó nyomaték nagysága a vizsgált keresztmetszetben:

$$M_g' = R_g \cdot \left(l_{ptd} - \frac{v}{2} \right) - g_k \cdot \frac{\left(l_{ptd} - \frac{v}{2} \right)^2}{2} = 51,5 \cdot \left(0,985 - \frac{0,3}{2} \right) - 8,8 \cdot \frac{(0,985 - 0,15)^2}{2} = 39,9 \text{ kNm}$$

A feszítőerő külpontossága miatti nyomaték:

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

A beton alsó szélő szálában keletkező feszültség:

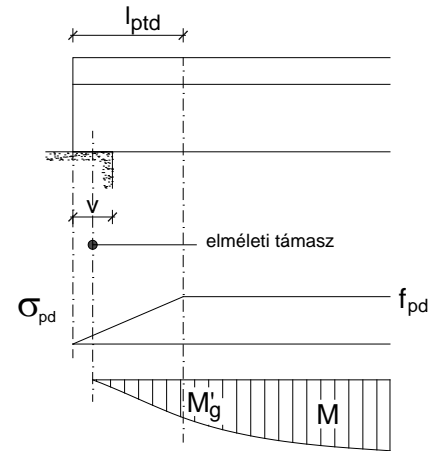
$$\begin{aligned} \sigma_c^a &= -\frac{N_{p0}}{A_{i1}} - \frac{M_{p0}}{I_{i1}} \cdot (h - x_{i1}) + \frac{M_g'}{I_{i1}} \cdot (h - x_{i1}) = \\ &= -\frac{720 \cdot 10^3}{362960,1} - \frac{495,7 \cdot 10^6}{7,126 \cdot 10^{10}} \cdot (1400 - 603,9) + \frac{39,9 \cdot 10^6}{7,126 \cdot 10^{10}} \cdot (1400 - 603,9) = \\ &= -1,98 - 5,54 + 0,45 = -7,07 \text{ N/mm}^2 < f_{cd0} = \frac{30}{1,5} = 20 \text{ N/mm}^2 \rightarrow \text{megfelel} \end{aligned}$$

A beton felső szélő szálában keletkező feszültség:

$$\begin{aligned} \sigma_c^f &= -\frac{N_{p0}}{A_{i1}} + \frac{M_{p0}}{I_{i1}} \cdot x_{i1} - \frac{M_g'}{I_{i1}} \cdot x_{i1} = \\ &= -\frac{720 \cdot 10^3}{362960,1} + \frac{495,7 \cdot 10^6}{7,126 \cdot 10^{10}} \cdot 603,9 - \frac{39,9 \cdot 10^6}{7,126 \cdot 10^{10}} \cdot 603,9 = \\ &= -1,98 + 4,2 - 0,34 = +1,88 \text{ N/mm}^2 > f_{ctd0} = 1,333 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

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

pázmák 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. $\sigma_{p0} = 1200 \text{ N/mm}^2$

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

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

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

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

$A = 0,66$ alacsony relaxációjú pázmák és huzalok esetén

$B = 9,1$ pázmák esetén (huzalok 6,7)

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

σ_{cgp0} : a betonfeszültség a kvázi-állandó tehercsoportosításból a pázmák súlypontjában

$$\begin{aligned} \sigma_{cgp0} &= -\frac{N_{p0}}{A_{i1}} - \frac{M_{p0}}{I_{i1}} \cdot (d_p - x_{i1}) + \frac{M_{ser,c}}{I_{i1}} \cdot (d_p - x_{i1}) = \\ &= -\frac{720 \cdot 10^3}{362960,1} - \frac{495,7 \cdot 10^6}{7,126 \cdot 10^{10}} \cdot (1292 - 603,9) + \frac{833,3 \cdot 10^6}{7,126 \cdot 10^{10}} \cdot (1292 - 603,9) = \\ &= -1,98 - 4,787 + 8,04 = +1,28 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

beton keresztmetszet területe:

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

statikai nyomaték a felső szélső szálra:

$$S_c = b \cdot t \cdot \frac{t}{2} + b_w \cdot (h - t) \cdot \left(\frac{h - t}{2} + t \right) =$$
$$= 500 \cdot 240 \cdot \frac{240}{2} + 200 \cdot (1400 - 240) \cdot \left(\frac{1400 - 240}{2} + 240 \right) = 204640000 \text{ mm}^3$$

A beton keresztmetszet súlypontjának meghatározása:

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

$$I_c = \frac{b \cdot t^3}{12} + b \cdot t \cdot \left(y_c - \frac{t}{2} \right)^2 + \frac{b_w \cdot (h - t)^3}{12} + b_w \cdot (h - t) \cdot \left(t + \frac{h - t}{2} - y_c \right)^2 =$$
$$= \frac{500 \cdot 240^3}{12} + 500 \cdot 240 \cdot \left(581,4 - \frac{240}{2} \right)^2$$
$$+ \frac{200 \cdot (1400 - 240)^3}{12} + 200 \cdot (1400 - 240) \cdot \left(240 + \frac{1400 - 240}{2} - 581,4 \right)^2 = 6,535 \cdot 10^{10} \text{ mm}^4$$

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

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

pázmák és beton rug. modulusának aránya

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

zsugorodásból, kúszásból és relaxációból származó veszteség

$$\Delta \sigma_{pt} = \frac{\varepsilon_{cs} \cdot E_p + 0,8 \cdot \Delta \sigma_{pr} + \alpha_p \cdot \varphi(t) \cdot |\sigma_{cgp0}|}{1 + \alpha_p \cdot \frac{A_p}{A_c} \cdot \left(1 + \frac{A_c}{I_c} \cdot z_{cp}^2 \right) \cdot (1 + 0,8 \cdot \varphi(t))}$$
$$\Delta \sigma_{pt} = \frac{0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 195000 + 0,8 \cdot 41,51 + 5,571 \cdot 2,0 \cdot 1,28}{1 + 5,571 \cdot \frac{600}{352000} \cdot \left(1 + \frac{352000}{6,535 \cdot 10^{10}} \cdot 711^2 \right) \cdot (1 + 0,8 \cdot 2,0)} = 132,7 \text{ N/mm}^2$$

a beton hőérleléséből származó veszteség

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

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

A hatásos feszítési feszültség:

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

Ahatásos feszítési feszültség hányad:

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

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

A hatásos feszítőerő:

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

4.4.A nyomatéki teherbírás ellenőrzése; végleges állapot t₃

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

vetületi egyenlet:

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

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

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

betonacél megnyúlásának ellenőrzése:

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

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

feszítópászma megnyúlásának ellenőrzése:

$$\varepsilon_p = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{d_{p0} - 1,25 \cdot x_c}{1,25 \cdot x_c} + \frac{\sigma_{pm}}{E_p} = 3,5\% \cdot \frac{1312 - 1,25 \cdot 83,6}{1,25 \cdot 83,6} + \frac{989,3}{195000} = 45,5\% \quad \varepsilon_p > \varepsilon_{pu} = 40\%, \text{ vagyis a feszítópászmák}$$

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

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.

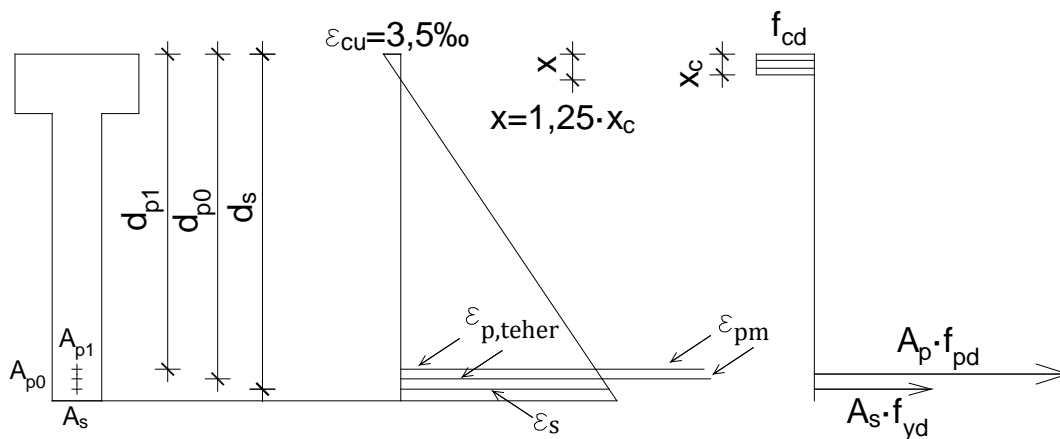
Amennyiben úgy adódik, hogy a pászmák és betonacélok rugalmasan viselkednek akkor vetületi egyenletbe:

$$f_{yd} \rightarrow \sigma_s = 560 \cdot \frac{d_s}{x_c} - 700$$

$$f_{pd} \rightarrow \sigma_p = \sigma_{pm} + 564 \cdot \frac{d_p}{x_c} - 682,5$$

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

$$\begin{aligned} M_{Rd} &= b \cdot x_c \cdot f_{cd} \cdot \frac{x_c}{2} + A_s \cdot f_{yd} \cdot (d_s - x_c) + A_p \cdot f_{pd} \cdot (d_p - x_c) = \\ &= 500 \cdot 83,6 \cdot 26,67 \cdot \frac{83,6}{2} + 763 \cdot 434,78 \cdot (1353 - 83,6) + 600 \cdot 1304,35 \cdot (1292 - 83,6) = \\ &= 1413,9 \text{ kNm} > M_{Ed} = 1273,7 \text{ kNm} \rightarrow \text{megfelel} \end{aligned}$$



4.5. Nyírási vasalás tervezése

- a mértékadó nyíróerő $V_{ED}=435,2$ kN

- a húzott vasalásra (acélbetét+pászma) vonatkozó helyettesítő hasznos magasság:

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

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

A vasalás nélküli betonkeresztmetszet nyírási teherbírása:

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

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

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

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

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

$$\rho_l = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{A_{sl}}{b_w \cdot d_h} \\ 0,02 \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{0}{250 \cdot 1327} \\ 0,02 \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0 \\ 0,02 \end{array} \right\} = 0$$

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)

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

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

A tiszta betonkeresztmetszet nyírási ellenállásának alsó határa:

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

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

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

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

A nyomott ferde beton rácsrúd teherbírása:

A nyomott betonrudak θ hajlásszögének számítása:

Normál beton esetén:

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

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

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

A θ hajlásszögre vonatkozó $1,0 \leq \cot \theta \leq 2,0$ korlátozás miatt

$$\cot \theta = 2,0$$

A nyomott ferde beton rácsrúd teherbírása:

$$V_{Rd,max} = \alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd} \cdot \frac{\cot \alpha_{sw} + \cot \theta}{1 + \cot^2 \theta}$$

- $\alpha_{sw} = 90^\circ$ - a nyírési vasalás és a tartó tengelye által bezárt szög

- z: belső erőkarja, pontosabb számítás helyett megengedett:

$$z = 0,9 \cdot d_h = 0,9 \cdot 1327 = 1194 \text{ mm}$$

- $v_1 = 0,6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) = 0,6 \cdot \left(1 - \frac{40}{250}\right) = 0,504$ (hatékonysági tényező)

$$1, \text{ ha } \sigma_{cp} = 0$$

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

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

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

$$V_{Rd,max} = \alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd} \cdot \frac{\cot \alpha_{sw} + \cot \theta}{1 + \cot^2 \theta} = 1,063 \cdot 200 \cdot 1194 \cdot 0,504 \cdot 26,67 \cdot \frac{0 + 2,0}{1 + 2,0^2} = 1364,8 \text{ kN} > V_{Ed,red}$$

$$= 336,7 \text{ kN}$$

tehát a tartó nyírásra vasalható!!!

Nyírási vasalás tervezése:

- alkalmazott nyírási vasalás: kengyelezés $d_k=8\text{mm}$

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

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

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

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

Szerkesztési szabályok ellenőrzése:

Nyírási acélbetétek maximális távolsága:

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

Minimális nyírási vashányad ellenőrzése:

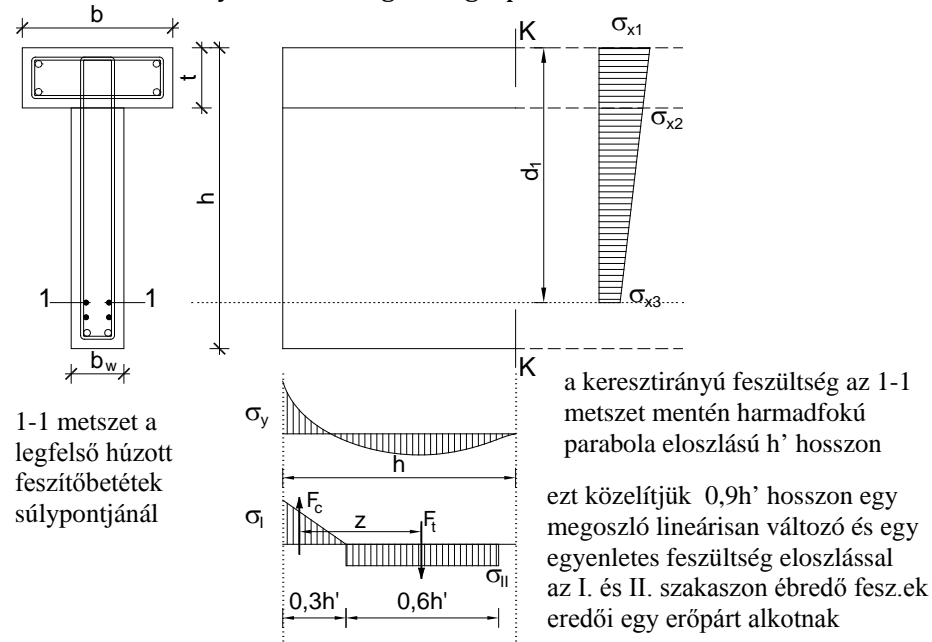
$$\rho_{alk} = \frac{A_{sw,alk}}{s_{alk} \cdot b_w \cdot \sin \alpha_{sw}} = \frac{100,5}{300 \cdot 200 \cdot 1,0} = 0,00168$$

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

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

5.A tartóvég ellenőrzése

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



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

a vizsgált szakasz hossza:

$$l_{ptd} = 1,2 \cdot l_{pt} = 1,2 \cdot 1,231 \text{ m} = 1,477 \text{ m}$$

$$h' = \max \left\{ \begin{array}{l} l_{ptd} \\ \sqrt{h^2 + (0,6 \cdot l_{ptd})^2} \end{array} \right\} = \sqrt{1,4^2 + (0,6 \cdot 1,477)^2} = 1,657 \text{ m}$$

$$h' = 1,657 \text{ m}$$

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

mértékadó nyomaték a K-K metszetben:

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

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

Az ideális keresztmetszet jellemzői a végleges állapotban:

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

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

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

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

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

statikai nyomaték a felső szélső szála:

$$\begin{aligned}
S_{i3} &= b \cdot t \cdot \frac{t}{2} + b_w \cdot (h-t) \cdot \left(\frac{h-t}{2} + t \right) + (\alpha_{s3} - 1) \cdot A_s \cdot d_s + (\alpha_{p3} - 1) \cdot A_p \cdot d_p = \\
&= 500 \cdot 240 \cdot \frac{240}{2} + 200 \cdot (1400 - 240) \cdot \left(\frac{1400 - 240}{2} + 240 \right) + (8,57 - 1) \cdot 763 \cdot 1353 + \\
&+ (8,36 - 1) \cdot 600 \cdot 1292 = 2,182 \cdot 10^8 \text{ mm}^3
\end{aligned}$$

semleges tengely (súlypont) meghatározása:

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

inercia:

$$\begin{aligned}
I_{i3} &= \frac{b \cdot t^3}{12} + b \cdot t \cdot \left(x_{i3} - \frac{t}{2} \right)^2 + \frac{b_w \cdot (h-t)^3}{12} + b_w \cdot (h-t) \cdot \left(\frac{h-t}{2} + t - x_{i3} \right)^2 \\
&+ (\alpha_{s3} - 1) \cdot A_s \cdot (d_s - x_{i3})^2 + (\alpha_{p3} - 1) \cdot A_p \cdot (d_p - x_{i3})^2 = \\
&\frac{500 \cdot 240^3}{12} + 500 \cdot 240 \cdot (602,34 - 240/2)^2 + \frac{200 \cdot (1400 - 240)^3}{12} + \\
&+ 200 \cdot (1400 - 240) \cdot \left(\frac{1400 - 240}{2} + 240 - 602,34 \right)^2 + \\
&+ (8,57 - 1) \cdot 763 \cdot (1353 - 602,34)^2 + (8,36 - 1) \cdot 600 \cdot (1292 - 602,34)^2 = 7,086 \cdot 10^{10} \text{ mm}^4
\end{aligned}$$

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

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

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

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

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

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

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

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

- a vízszintes erők nyomatéka az 1-1 metszetre:

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

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

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

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

- a függőleges F_c és F_t erők karja:

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

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

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

- a szükséges vasalás mennyisége (kengyelekkel):

$$A_{s,szüks}^s = \frac{F_t}{f_{yd}} = \frac{676,5 \cdot 10^3}{434,78} = 1555,9 \text{ mm}^2 \rightarrow n = \frac{A_{s,szüks}^s}{A_{sw}} = \frac{1555,9}{100,5} = 15,5 \text{ db } n_{alk} = 16 \text{ db } 8 \text{ mm átmérőjű zárt kengyelt kell}$$

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):

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

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

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

Mértékadó nyomaték:

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

A hatásos feszítőerő:

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

Nyomaték a hatásos feszítőerőből:

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

A repesztőnyomaték nagysága:

$$M_{cr} = \frac{I_{i3}}{h - x_i} \cdot \left[f_{ctm} + \frac{N_{pm}}{A_{i3}} + \frac{M_{pm}}{I_{i3}} \cdot (h - x_{i3}) \right]$$

$$= \frac{7,581 \cdot 10^{10}}{1400 - 621,2} \cdot \left[3,5 + \frac{593,6 \cdot 10^3}{371871,3} + \frac{398,4 \cdot 10^6}{7,581 \cdot 10^{10}} \cdot (1400 - 621,2) \right] = 895,3 \text{ kNm}$$

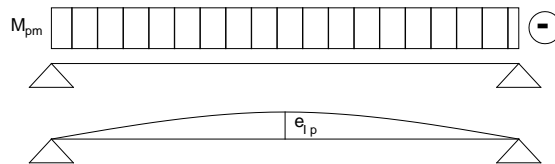
$$> M_{ser,c} = 833,3 \text{ kNm}$$

,vagyis a tartó nem reped be.

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

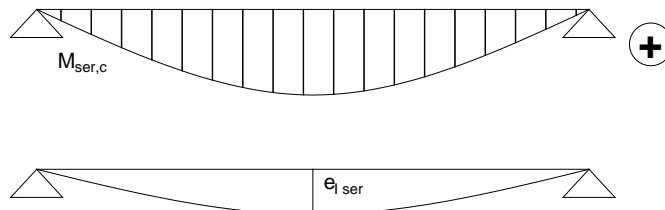
Feszítésből számított lehajlás:

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



Külső terhekből számított lehajlás:

$$e_{1ser} = \frac{5}{48} \cdot \frac{M_{ser,c} \cdot l_{eff}^2}{E_{c,eff} \cdot I_{i3}} = \frac{5}{48} \cdot \frac{833,3 \cdot 10^6 \cdot 11700^2}{12700 \cdot 7,581 \cdot 10^{10}} = +12,34 \text{ mm}$$



A teljes lehajlás repedésmentes állapotban:

$$e_l = e_{1p} + e_{1ser} = -7,08 + 12,34 = 5,26 \text{ mm} < \frac{l_{eff}}{250} = \frac{11700}{250} = 46,8 \text{ mm}$$

,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.

$$\frac{M_{ser,c} - M_{pm}(x_{III})}{N_{pm}} = \frac{I_{III}(x_{III})}{S_{III}(x_{III})} \quad 1$$

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 számítással² 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:

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

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

$$e_{II} = e_{IIp} + e_{IIser}$$

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

$$\beta = 0,5 \text{ (tartós terhelés)}$$

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 (repsztonyomaték 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:

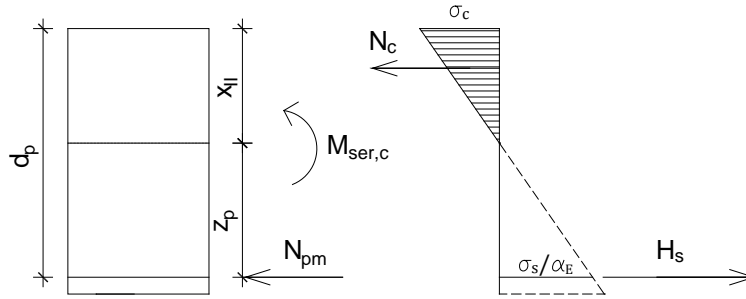
$$x_c = h$$

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

$$I_{II} = \frac{(b-) \cdot t^3}{3} + \frac{b_w \cdot x_{III}^3}{3} + (b - b_w) \cdot t \cdot \left(x_{III} - \frac{t}{2}\right)^2 +$$
$$+ \alpha_{s3} \cdot A_s \cdot (d_s - x_{III})^2 + \alpha_{p3} \cdot A_p \cdot (d_p - x_{III})^2$$

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:

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

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

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

Nyomatéki egyenlet:

$$\begin{aligned} M_{ser,c} - N_{pm} \cdot (d_p - x_{II}) &= N_c \cdot \frac{2}{3} \cdot x_{II} + H_s \cdot (d_p - x_{II}) = \sigma_c \cdot \frac{b \cdot x_{II}}{2} \cdot \frac{2}{3} \cdot x_{II} + \frac{\sigma_c}{x_{II}} \cdot (d_p - x_{II}) \cdot A_s \cdot \alpha_E \cdot (d_p - x_{II}) \\ &= \sigma_c \cdot \frac{b \cdot x_{II}^2}{3} + \frac{\sigma_c}{x_{II}} \cdot (d_p - x_{II})^2 \cdot A_s \cdot \alpha_E = \frac{\sigma_c}{x_{II}} \cdot \frac{b \cdot x_{II}^3}{3} + \frac{\sigma_c}{x_{II}} \cdot (d_p - x_{II})^2 \cdot A_s \cdot \alpha_E = \frac{\sigma_c}{x_{II}} \cdot I_c + \frac{\sigma_c}{x_{II}} \cdot I_s \cdot \alpha_E \\ &= \frac{\sigma_c}{x_{II}} \cdot (I_c + I_s \cdot \alpha_E) = \frac{\sigma_c}{x_{II}} \cdot I_{III} \end{aligned}$$

Átalakítva az egyenletet az alábbi összefüggésre jutunk:

$$M_{ser,c} - N_{pm} \cdot (d_p - x_{II}) = \frac{\sigma_c}{x_{II}} \cdot I_{III} \quad (2)$$

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

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