



ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE
STAVEBNÁ FAKULTA

Katedra stavebných konštrukcií a mostov



VÝPOČET PREDOM PREDPÄTÉHO STREŠNÉHO NOSNÍKA HALY

(Učebná pomôcka)

Vypracoval: Ing. Peter Koteš, PhD.

Žilina, 2006

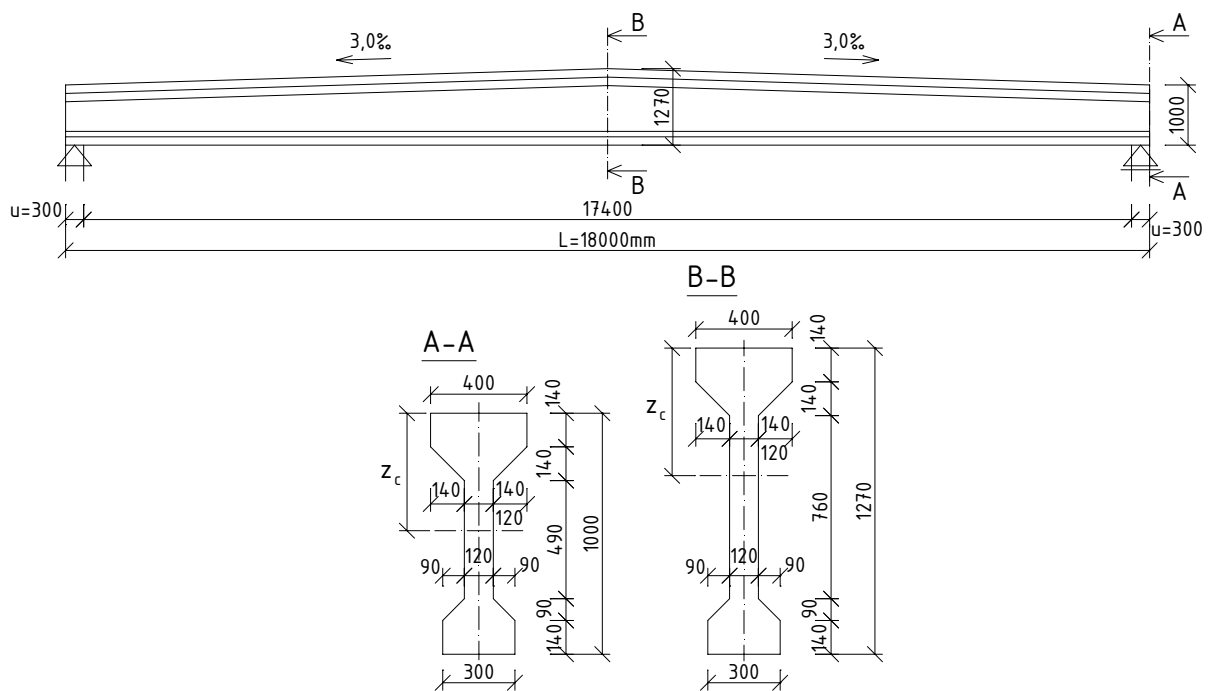
OBSAH:

1. Predpoklady výpočtu.....	2
2. Geometria nosníka.....	2
3. Zaťaženie nosníka	2
3.1 Stále zaťaženie – charakteristická hodnota	2
3.2 Premenné zaťaženie – charakteristická hodnota	3
3.3 Kombinácie zaťažení.....	3
4. Výpočet prierezových síl.....	3
5. Materiálové charakteristiky.....	3
6. Prierezové charakteristiky – betónový prierez	4
7. Návrh predpínacej sily	5
8. Prierezové charakteristiky – ideálny prierez	6
9. Podrobné posúdenie	7
9.1 Výpočet strát predpätia.....	7
9.1.1 Straty - okamžité	7
9.1.2 Straty - dlhodobé	7
9.2 Posúdenie prierezu	11
9.2.1 Posúdenie prierezu v čase vnesenia predpätia – $t_0 = 5$ dní – posúdenie vzniku trhlín – štádium predpínania.....	11
9.2.2 Posúdenie v štádiu používania – $t_\infty = 50$ rokov – posúdenie vzniku trhlín.....	14
9.2.3 Posúdenie na medzi únosnosti - odolnosť v ohybe	14
9.2.4 Posúdenie na šmyk	15
Literatúra	18

1. PREDPOKLADY VÝPOČTU

Úlohou je navrhnuť strešný predpätý nosník tvaru I dĺžky 18 m (obr. 1). Nosník je vyrobený z betónu triedy C 40/50 (betón STN EN 206-1 - C 40/50 – XC1 - D_{max} 22 – S3) a je predpätý stabilizovanými lanami ϕ LS 15,5/1800 MPa. Uvažované prostredie XC1 predstavuje suché prostredie vo vnútri budovy s relatívnou vlhkosťou vzduchu RH 30 až 60% (vplyv karbonatizácie na koróziu výstuže). Vnesenie predpätia sa predpokladá pri dosiahnutí minimálne 75% priemernej 28-dňovej pevnosti betónu. Návrhová životnosť konštrukcie je 50 rokov. Návrh a posúdenie predom predpätého strešného nosníka je spracovaný podľa zásad navrhovania platnej normy EN 1992-1-1 (Eurokód 2) [1,2]. Uvažuje sa, že nosníky preberajú zaťaženie z predpätých stropných panelov typu GOLDBECK SPA 450/20 04, dĺžky 4,5m (nosníky sú navzájom vzdialené 4,5m) a hrúbky 200mm.

2. GEOMETRIA NOSNÍKA



Obr. 1 Geometria nosníka

Dĺžka uloženia nosníka: $u = 0,30$ m

Teoretické rozpätie nosníka: $l_{\text{eff}} = L - 2 \cdot \frac{u}{2} = 18000 - 2 \cdot \frac{300}{2} = 17700\text{mm} = 17,70\text{m}$

3. ZAŤAŽENIE NOSNÍKA

Osová vzdialenosť nosníkov – $a = 4,5$ m

3.1 Stále zaťaženie – charakteristická hodnota

- Vlastná tiaž nosníka:	- prierez v podpere	$g_{0,1,k} = 5,303$ kN/m'
	- prierez v uprostred rozpätia	$g_{0,2,k} = 6,113$ kN/m'
	- priemerná hodnota	$g_{0,k} = 5,955$ kN/m'

- Strešný plášť (odhad 25 kg/m²): $0,25[\text{kN}/\text{m}^2] \cdot a[\text{m}] = 0,25 \cdot 4,5$ $g_{1,k} = 1,125 \text{ kN/m}'$

- Strešné predpäté panely – Goldbeck SPA 450/20 04 [3]: $2,70 \text{ kN/m}^2$
 $2,70[\text{kN}/\text{m}^2] \cdot a[\text{m}] = 2,70 \cdot 4,5$ $g_{2,k} = 12,15 \text{ kN/m}'$

3.2 Premenné zaťaženie – charakteristická hodnota

- Zaťaženie snehom – IV. sneh. obl. $\rightarrow s_k = 1,0 \text{ kN/m}^2$: $s_k \cdot a = 1,0 \cdot 4,5$ $q_k = 4,50 \text{ kN/m}'$

3.3 Kombinácie zaťaženií

- Kvázi-stála hodnota zaťaženia:

$$f_{qp} = g_{0,k} + g_{1,k} + g_{2,k} = 5,955 + 1,125 + 12,15 = 19,23 \text{ kN/m}'$$

- Charakteristická hodnota zaťaženia:

$$f_k = (g_{0,k} + g_{1,k} + g_{2,k}) + q_k = (5,955 + 1,125 + 12,15) + 4,5 = 23,73 \text{ kN/m}'$$

- Návrhová hodnota zaťaženia:

$$f_d = \gamma_G \cdot (g_{0,k} + g_{1,k} + g_{2,k}) + \gamma_Q \cdot q_k = 1,35 \cdot (5,955 + 1,125 + 12,15) + 1,5 \cdot 4,5 = 32,711 \text{ kN/m}'$$

4. VÝPOČET PRIEREZOVÝCH SÍL

- Kvázi-stála hodnota zaťaženia:

$$M_{qp} = \frac{1}{8} \cdot f_{qp} \cdot l_{\text{eff}}^2 = \frac{1}{8} \cdot 19,23 \cdot 17,7^2 = 753,071 \text{ kNm}$$

$$V_{qp} = \frac{1}{2} \cdot f_{qp} \cdot l_{\text{eff}} = \frac{1}{2} \cdot 19,23 \cdot 17,7 = 170,186 \text{ kN}$$

- Charakteristická hodnota zaťaženia:

$$M_k = \frac{1}{8} \cdot f_k \cdot l_{\text{eff}}^2 = \frac{1}{8} \cdot 23,73 \cdot 17,7^2 = 929,296 \text{ kNm}$$

$$V_k = \frac{1}{2} \cdot f_k \cdot l_{\text{eff}} = \frac{1}{2} \cdot 23,73 \cdot 17,7 = 210,011 \text{ kN}$$

- Návrhová hodnota zaťaženia:

$$M_d = \frac{1}{8} \cdot f_d \cdot l_{\text{eff}}^2 = \frac{1}{8} \cdot 32,711 \cdot 17,7^2 = 1281,004 \text{ kNm}$$

$$V_d = \frac{1}{2} \cdot f_d \cdot l_{\text{eff}} = \frac{1}{2} \cdot 32,711 \cdot 17,7 = 289,492 \text{ kN}$$

5. MATERIÁLOVÉ CHARAKTERISTIKY

Pri návrhu strešného nosníka je použitý betón triedy C 40/50 a predpínacie laná typu ϕ LS 15,5/1800. Materiálové charakteristiky sú dané v tab. 1.

Tab. 1. Charakteristiky materiálov

Betón: C 40/50				Predpínacia oceľ: ϕ LS 15,5/1800		
f_{ck} [MPa]	f_{cm} [MPa]	f_{ctm} [MPa]	E_{cm} [GPa]	f_{pk} [MPa]	$f_{p0,1k}$ [MPa]	E_p [GPa]
40,0	48,0	3,5	35,0	1800	1566	195

Betón:

Parciálny súčiniteľ spoľahlivosti materiálu: $\gamma_c = 1,50$

Charakteristická pevnosť (5% kvantil) betónu v ťahu:

$$f_{ctk0,05} = 0,7 \cdot f_{ctm} = 0,7 \cdot 3,5 = \underline{\underline{2,45 \text{ MPa}}}$$

Návrhová pevnosť betónu v tlaku: $f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 1,0 \cdot \frac{40}{1,5} = \underline{\underline{26,67 \text{ MPa}}}$

Návrhová pevnosť betónu v ťahu: $f_{ctd} = \alpha_{ct} \cdot \frac{f_{ctk0,05}}{\gamma_c} = 1,0 \cdot \frac{2,45}{1,5} = \underline{\underline{1,63 \text{ MPa}}}$

Návrhová hodnota modulu pružnosti betónu: $E_{cd} = \frac{E_{cm}}{\gamma_c} = \frac{35}{1,5} = \underline{\underline{23,33 \text{ GPa}}}$

Predpínacia oceľ:

Parciálny súčiniteľ spoľahlivosti materiálu: $\gamma_s = 1,15$

Návrhová pevnosť predpínacej ocele v ťahu: $f_{pd} = \frac{f_{p0,1k}}{\gamma_s} = \frac{1566}{1,15} = \underline{\underline{1361,74 \text{ MPa}}}$

Max. napätie pri vnesení predpätia do betónu:

$$\begin{aligned} \sigma_{p,mo} &= \min(0,75 \cdot f_{pk}; 0,85 \cdot f_{p0,1k}) = \\ &= \min(0,75 \cdot 1800; 0,85 \cdot 1566) = \\ &= \min(1350; 1331) \text{ MPa} = \underline{\underline{1331,0 \text{ MPa}}} \end{aligned}$$

Max. napätie vo výstuži ihneď po napnutí:

$$\begin{aligned} \sigma_{p,max} &= \min(0,8 \cdot f_{pk}; 0,9 \cdot f_{p0,1k}) = \\ &= \min(0,8 \cdot 1800; 0,9 \cdot 1566) = \\ &= \min(1440; 1409) \text{ MPa} = \underline{\underline{1409,0 \text{ MPa}}} \end{aligned}$$

6. PRIEREZOVÉ CHARAKTERISTIKY – BETÓNOVÝ PRIEREZ

Pri návrhu predpínacej výstuže sa zatiaľ uvažuje len s betónovým prierezom - nie s ideálnym prierezom. Prierezové charakteristiky betónového prierezu bez predpínacej ocele sú dané v tab. 2.

Tab. 2 Prierezové charakteristiky betónového prierezu

	A_c [m ²]	I_c [m ⁴]	$z_{c,h}$ [m]	$z_{c,d}$ [m]	$W_{y,h}$ [m ³]	$W_{y,d}$ [m ³]
V podpere	0,2121	0,02442	0,455	0,545	0,05367	0,04481
V strede rozpätia	0,2445	0,046179	0,582	0,688	0,07935	0,06712

Poznámka: V nasledujúcich výpočtoch budú charakteristiky prierezov rozlíšené pomocou pridania dolného indexu: p – prierez v podpere; s – prierez v strede rozpätia.

Krytie výstuže:

$$c_{\min} \geq \begin{cases} c_{\min,b} = \phi = 15,5\text{mm} \\ d_g = 16\text{mm} \\ c_{\min,dur} + \Delta c_{dur,\gamma} - \Delta c_{dur,st} - \Delta c_{dur,add} = 30 + 0 - 0 - 0 = 30\text{mm} \\ 10\text{mm} \end{cases} \Rightarrow c_{\min} = 30\text{mm}$$

$$\Delta c_{dev} = 5\text{mm (prefabrikát)}$$

$$c_{nom} = c_{\min} + \Delta c_{dev} = 30 + 5 = \underline{\underline{35\text{mm}}}$$

$$\text{Ťažisko výstuže: } a_p = c_{nom} + \phi_p / 2 = 35 + 15,5 / 2 = \underline{\underline{43\text{mm}}}$$

7. NÁVRH PREDPÍNACEJ SILY

Odhadovaná excentricita predpínacej výstuž:

$$e_p = h_s - a_p - z_{c,h,s} = 1,27 - 0,043 - 0,582 = \underline{\underline{0,645\text{m}}}$$

Napätie v spodných vláknoch – štádium ∞ :

$$\sigma_{cb} = -\frac{P_{k,inf(t=\infty)}}{A_{c,s}} - \frac{P_{k,inf(t=\infty)} \cdot e_p}{W_{y,d,s}} + \frac{M_{qp}}{W_{y,d,s}} \leq 0 \quad (\text{predpoklad plného predpätia})$$

Prepínacia sila potrebná na konci životnosti – štádium ∞ (po stratách):

$$\Rightarrow P_{k,inf(t=\infty)} = \frac{\frac{M_{qp}}{W_{y,d,s}}}{\left(\frac{1}{A_{c,s}} + \frac{e_p}{W_{y,d,s}}\right)} = \frac{\frac{753,071}{0,06712}}{\left(\frac{1}{0,2445} + \frac{0,645}{0,06712}\right)} = \underline{\underline{818,98\text{ kN}}}$$

Predpokladané straty napätia vo výstuži: 20%

Potrebná predpínacia sila na začiatku predpätia: $r_{k,inf} = 0,95$

$$P_0 = \frac{P_{k,inf(t=\infty)}}{r_{k,inf} \cdot (1-0,2)} = \frac{818,98}{0,95 \cdot (1-0,2)} = \underline{\underline{1077,61\text{ kN}}}$$

Návrh potrebnej plochy zvolených lán:

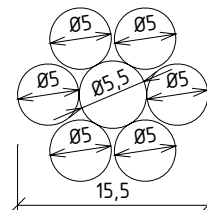
$$A_{p,n} = \frac{P_0}{\sigma_{p,m0}} = \frac{1077,61 \cdot 10^{-3}}{1331} = \underline{\underline{8,10 \cdot 10^{-4}\text{ m}^2}}$$

Plocha jedného lana:

$$A_{p,1} = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} + 6 \cdot \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} = \frac{\pi}{4} \cdot (0,0055^2 + 6 \cdot 0,005^2) = \underline{\underline{1,415 \cdot 10^{-4}\text{ m}^2}}$$

Nutný minimálny počet lán:

$$n_n = \frac{A_{p,n}}{A_{p,1}} = \frac{8,10 \cdot 10^{-4}}{1,415 \cdot 10^{-4}} = \underline{\underline{5,72\text{ ks}}}$$



Obr. 2 Prierez lana

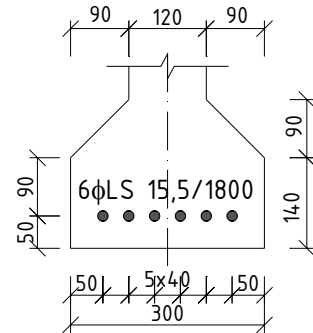
Návrh: $6\phi LS 15,5/1800$ $A_p = 6 \cdot 1,415 \cdot 10^{-4} = \underline{\underline{8,49 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2}}$

8. PRIEREZOVÉ CHARAKTERISTIKY – IDEÁLNY PRIEREZ

Zohľadnenie rozdielnej kvality materiálov betónu a ocele:

$$\alpha_p = \frac{E_p}{E_{cm}} = \frac{195}{35} = \underline{\underline{5,57}}$$

Skutočné ťažisko výstuže: $a_p = \underline{\underline{0,05 \text{ m}}}$



Obr. 3 Rozmiestnenie lán

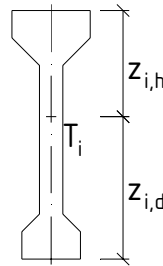
- Prierez v strede rozpätia:

$$A_{i,s} = A_{c,s} + (\alpha_p - 1) \cdot A_p = 0,2445 + (5,57 - 1) \cdot 8,49 \cdot 10^{-4} = \underline{\underline{0,2484 \text{ m}^2}}$$

$$S_{i,s} = A_{c,s} \cdot z_{c,h,s} + (\alpha_p - 1) \cdot A_p \cdot d_{p,s} = 0,2445 \cdot 0,582 + (5,57 - 1) \cdot 8,49 \cdot 10^{-4} \cdot 1,22 = \underline{\underline{0,1470 \text{ m}^3}}$$

$$z_{i,h,s} = \frac{S_{i,s}}{A_{i,s}} = \frac{0,1470}{0,2484} = \underline{\underline{0,592 \text{ m}}}$$

$$z_{i,d,s} = h_s - z_{i,h,s} = 1,27 - 0,592 = \underline{\underline{0,678 \text{ m}}}$$



$$I_{i,s} = I_{c,s} - A_{c,s} \cdot (z_{c,h,s} - z_{i,h,s})^2 + (\alpha_p - 1) \cdot A_p \cdot (d_{p,s} - z_{i,h,s})^2 =$$

$$= 0,046179 - 0,2445 \cdot (0,582 - 0,592)^2 + (5,57 - 1) \cdot 8,49 \cdot 10^{-4} \cdot (1,22 - 0,592)^2 = \underline{\underline{0,0477 \text{ m}^4}}$$

$$e_{p,s} = h_s - a_p - z_{i,h,s} = 1,27 - 0,05 - 0,592 = \underline{\underline{0,628 \text{ m}}}$$

- Prierez v mieste podpery:

$$A_{i,p} = A_{c,p} + (\alpha_p - 1) \cdot A_p = 0,2121 + (5,57 - 1) \cdot 8,49 \cdot 10^{-4} = \underline{\underline{0,2160 \text{ m}^2}}$$

$$S_{i,p} = A_{c,p} \cdot z_{c,h,p} + (\alpha_p - 1) \cdot A_p \cdot d_{p,p} = 0,2121 \cdot 0,455 + (5,57 - 1) \cdot 8,49 \cdot 10^{-4} \cdot 0,95 = \underline{\underline{0,1002 \text{ m}^3}}$$

$$z_{i,h,p} = \frac{S_{i,p}}{A_{i,p}} = \frac{0,1002}{0,2160} = \underline{\underline{0,464 \text{ m}}}$$

$$z_{i,d,p} = h_p - z_{i,h,p} = 1,00 - 0,464 = \underline{\underline{0,536 \text{ m}}}$$

$$I_{i,p} = I_{c,p} - A_{c,p} \cdot (z_{c,h,p} - z_{i,h,p})^2 + (\alpha_p - 1) \cdot A_p \cdot (d_{p,p} - z_{i,h,p})^2 =$$

$$= 0,02442 - 0,2121 \cdot (0,455 - 0,464)^2 + (5,57 - 1) \cdot 8,49 \cdot 10^{-4} \cdot (0,95 - 0,464)^2 = \underline{\underline{0,0253 \text{ m}^4}}$$

$$e_{p,p} = h_p - a_p - z_{i,h,p} = 1,00 - 0,05 - 0,464 = \underline{\underline{0,486 \text{ m}}}$$

9. PODROBNÉ POSÚDENIE

9.1 Výpočet strát predpätia

9.1.1 Straty - okamžité

- Poklz v kotve:

$$\Delta_s = 6 \text{ mm} \quad (\text{na } l = 100 \text{ m dlhom predpínacom zariadení})$$

$$\Delta\sigma_{psl} = -\frac{\Delta_s}{l} \cdot E_p = -\frac{0,006}{100} \cdot 195 \cdot 10^3 = \underline{\underline{-11,70 \text{ MPa}}}$$

$$\sigma_{p2} = \sigma_{p,max} + \Delta\sigma_{psl} = 1409 - 11,70 = \underline{\underline{1397,30 \text{ MPa}}}$$

- Relaxácia výstuže:

$$\rho_{1000} = 2,5\%; \quad t = 3 \cdot 24 = 72 \text{ hod (3 dni)}; \quad \mu_p = \frac{\sigma_{pi}}{f_{pk}} = \frac{1397,3}{1800} = 0,7763$$

$$\Delta\sigma_{pr} = -\sigma_{p2} \cdot 0,66 \cdot \rho_{1000} \cdot e^{9,1 \cdot \mu_p} \cdot \left[\frac{t}{1000} \right]^{0,75 \cdot (1 - \mu_p)} \cdot 10^{-5} =$$

$$= 1897,3 \cdot 0,66 \cdot 2,5 \cdot e^{9,1 \cdot 0,7763} \cdot \left[\frac{72}{1000} \right]^{0,75 \cdot (1 - 0,7763)} \cdot 10^{-5} = \underline{\underline{17,30 \text{ MPa}}}$$

Napätie v čase transferu:

$$\sigma_{p,m} = \sigma_{p,max} + \Delta\sigma_{psl} + \Delta\sigma_{pr} = 1409 - 11,7 - 11,3 = \underline{\underline{1380,0 \text{ MPa}}} > \sigma_{p,m0} = 1331 \text{ MPa}$$

Maximálne prípustné napätie po transfere sily je $\sigma_{p,m0} = 1331 \text{ MPa}$. Z tohto dôvodu je potrebné znížiť napätie tak, aby po okamžitých stratách toto napätie nebolo väčšie ako

$$\sigma_{p,max} = 1331 + 11,7 + 17,3 = \underline{\underline{1360,0 \text{ MPa}}}$$

9.1.2 Straty - dlhodobé

- Zmrašťovanie betónu:

$t_s = 1$ deň (po 1 dni začína zmrašťovanie)

$t_\infty = 18250$ dní (50 rokov)

RH = 40% (relatívna vlhkosť)

$$RH_0 = 100\%$$

$$f_{cm} = 48 \text{ MPa} > 35 \text{ MPa}$$

$$\alpha_{ds1} = 6 \text{ (cement triedy R – rýchlotuhnúci bet.)}$$

$$\alpha_{ds2} = 0,11$$

$$f_{cm0} = 10 \text{ MPa}$$

$$\beta_{RH} = 1,55 \cdot \left[1 - \left(\frac{RH}{RH_0} \right)^3 \right] = 1,55 \cdot \left[1 - \left(\frac{40}{100} \right)^3 \right] = 1,415$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{cd,\infty} &= 0,85 \cdot \left[(220 + 110 \cdot \alpha_{ds1}) \cdot e^{\left(-\alpha_{ds2} \cdot \frac{f_{cm}}{f_{cm0}} \right)} \right] \cdot 10^{-6} \cdot \beta_{RH} = \\ &= 0,85 \cdot \left[(220 + 110 \cdot 6) \cdot e^{\left(-0,11 \cdot \frac{48}{10} \right)} \right] \cdot 10^{-6} \cdot 1,415 = 0,00064 \end{aligned}$$

$$u_c = 0,4 + 2 \cdot 0,14 + 2 \cdot 0,2 + 2 \cdot 0,76 + 2 \cdot 0,13 + 0,3 = 3,44 \text{ m}$$

$$h_0 = \frac{2 \cdot A_{c,s}}{u_c} = \frac{2 \cdot 0,2445}{3,44} = 0,1422 \text{ m} = 142,2 \text{ mm} \Rightarrow k_n = 0,9367$$

$$\beta_{td}(t_\infty, t_s) = \frac{t_\infty - t_s}{t_\infty - t_s + 0,04 \cdot \sqrt{h_0^3}} = \frac{18250 - 1}{18250 - 1 + 0,04 \cdot \sqrt{142,2^3}} = 0,9963$$

Pomerné pretvorenie od zmrašťovania z vysychania:

$$\varepsilon_{cd}(t_\infty, t_s) = \varepsilon_{cd,\infty} \cdot \beta_{td}(t_\infty, t_s) \cdot k_n = -0,00064 \cdot 0,9963 \cdot 0,9367 = \underline{\underline{-0,000597}}$$

$$\varepsilon_{ca,\infty} = -2,5 \cdot (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6} = -2,5 \cdot (40 - 10) \cdot 10^{-6} = 7,5 \cdot 10^{-5}$$

$$\beta_{sa}(t) = 1 - e^{-0,2 \cdot \sqrt{t}} = 1 - e^{-0,2 \cdot \sqrt{18250}} = 0,9999 \doteq 1,0$$

$$\varepsilon_{ca}(t_\infty, t_s) = \varepsilon_{ca,\infty} \cdot \beta_{sa}(t) = 7,5 \cdot 10^{-5} \cdot 1,0 = \underline{\underline{-0,000075}}$$

Celkové pomerné pretvorenie od zmrašťovania:

$$\varepsilon_{cs}(t_\infty, t_s) = \varepsilon_{cd}(t_\infty, t_s) + \varepsilon_{ca}(t_\infty, t_s) = -0,000597 + (-0,000075) = \underline{\underline{-6,72 \cdot 10^{-4}}}$$

$$\Delta \sigma_{ps} = E_p \cdot \varepsilon_{cs}(t_\infty, t_s) = 195000 \cdot (-6,72 \cdot 10^{-4}) = \underline{\underline{-131,04 \text{ MPa}}}$$

- Dotvarovanie betónu:

$t_0 = 5$ dní (čas vnesenia predpätia)

$t_1 = 30$ dní (čas pôsobenia druhej časti zať. $g_1 + g_2$)

$t_\infty = 18250$ dní (50 rokov)

$$\alpha_1 = \left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0,7} = \left[\frac{35}{48} \right]^{0,7} = 0,8016$$

$$\alpha_2 = \left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0,2} = \left[\frac{35}{48} \right]^{0,2} = 0,9388$$

$$\alpha_3 = \left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0,5} = \left[\frac{35}{48} \right]^{0,5} = 0,8539$$

$$\beta_{(f_{cm})} = \frac{16,80}{\sqrt{f_{cm}}} = \frac{16,80}{\sqrt{48}} = 2,4249$$

$$\beta(t_0) = \frac{1}{(0,1+t_0^{0,2})} = \frac{1}{(0,1+5^{0,2})} = 0,6757$$

$$\beta(t_1) = \frac{1}{(0,1+t_1^{0,2})} = \frac{1}{(0,1+30^{0,2})} = 0,4821$$

$$\varphi_{RH} = \left[1 + \frac{\left(1 - \frac{RH}{100}\right)}{0,1 \cdot \sqrt[3]{h_0}} \cdot \alpha_1 \right] \cdot \alpha_2 = \left[1 + \frac{\left(1 - \frac{40}{100}\right)}{0,1 \cdot \sqrt[3]{142,2}} \cdot 0,8016 \right] \cdot 0,9388 = 1,8038$$

$$\varphi_0(t_\infty, t_0) = \varphi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0) = 1,8038 \cdot 2,4249 \cdot 0,6757 = \underline{\underline{2,9556}}$$

$$\varphi_0(t_\infty, t_1) = \varphi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_1) = 1,8038 \cdot 2,4249 \cdot 0,4821 = \underline{\underline{2,1087}}$$

$$\beta_H = 1,5 \cdot \left[1 + (0,012 \cdot RH)^{18} \right] \cdot h_0 + 250 \cdot \alpha_3 \leq 1500 \cdot \alpha_3$$

$$\beta_H = 1,5 \cdot \left[1 + (0,012 \cdot 40)^{18} \right] \cdot 142,2 + 250 \cdot 0,8539 \leq 1500 \cdot 0,8539$$

$$426,78 < 1280,9$$

$$\beta(t_\infty - t_0) = \left[\frac{(t_\infty - t_0)}{\beta_H + t_\infty - t_0} \right]^{0,3} = \left[\frac{(18250 - 5)}{426,78 + 18250 - 5} \right]^{0,3} = \underline{\underline{0,9931}}$$

$$\beta(t_\infty - t_1) = \left[\frac{(t_\infty - t_1)}{\beta_H + t_\infty - t_1} \right]^{0,3} = \left[\frac{(18250 - 36)}{426,78 + 18250 - 36} \right]^{0,3} = \underline{\underline{0,9936}}$$

Súčiniteľ dotvarovania:

$$\varphi(t_\infty, t_0) = \varphi(t_\infty, t_0) \cdot \beta(t_\infty - t_0) = 2,9556 \cdot 0,9931 = \underline{\underline{2,935}}$$

$$\varphi(t_\infty, t_1) = \varphi(t_\infty, t_1) \cdot \beta(t_\infty - t_1) = 2,1087 \cdot 0,9936 = \underline{\underline{2,095}}$$

- Relaxácia výstuže:

$$\mu_p = \frac{\sigma_{p,m0}}{f_{pk}} = \frac{1331}{1800} = 0,7394$$

$$\rho_{1000} = 2,5\%$$

$$t = 72 \text{ hod (3 dni);}$$

$$t_\infty = 438000 \text{ hod (50 rokov)}$$

$$\begin{aligned}\Delta\sigma_{pr} &= -\sigma_{pi} \cdot 0,66 \cdot \rho_{1000} \cdot e^{9,1 \cdot \mu_p} \cdot \left[\left(\frac{t_\infty}{1000} \right)^{0,75 \cdot (1-\mu_p)} - \left(\frac{t}{1000} \right)^{0,75 \cdot (1-\mu_p)} \right] \cdot 10^{-5} = \\ &= -1331,0 \cdot 0,66 \cdot 2,5 \cdot e^{9,1 \cdot 0,7394} \cdot \left[\left(\frac{438000}{1000} \right)^{0,75 \cdot (1-0,7394)} - \left(\frac{72}{1000} \right)^{0,75 \cdot (1-0,7394)} \right] \cdot 10^{-5} = \\ &= \underline{\underline{-49,29 \text{ MPa}}}\end{aligned}$$

Charakteristická hodnota momentu od vlastnej tiaže:

$$M_{g_0}(x) = \frac{1}{8} \cdot g_0 \cdot l_{\text{eff}}^2 = \frac{1}{8} \cdot 5,955 \cdot 17,7^2 = \underline{\underline{233,205 \text{ kNm}}}$$

$$P_{m0} = \sigma_{p,m0} \cdot A_p = 1331,0 \cdot 8,49 \cdot 10^{-4} = \underline{\underline{1130,0 \text{ kN}}}$$

$$z_{pi} = e_{ps} = \underline{\underline{0,628 \text{ m}}}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{cgp} &= -\frac{P_{m0}}{A_{i,s}} - \frac{P_{m0} \cdot e_{p,s}}{I_{i,s}} \cdot z_{pi} + \frac{M_{g_0}(x)}{I_{i,s}} \cdot z_{pi} = \\ &= -\frac{1130 \cdot 10^{-3}}{0,2484} - \frac{1130 \cdot 10^{-3} \cdot 0,628}{0,0477} \cdot 0,628 + \frac{233,205 \cdot 10^{-3}}{0,0477} \cdot 0,628 = \underline{\underline{-1082 \text{ MPa}}}\end{aligned}$$

Charakteristická hodnota momentu iba od druhej časti stáleho zaťaženia (g_1+g_2):

$$M_{g_1}(x) = \frac{1}{8} \cdot (g_{1,k} + g_{2,k}) \cdot l_{\text{eff}}^2 = \frac{1}{8} \cdot (1,125 + 12,15) \cdot 17,7^2 = \underline{\underline{519,87 \text{ kNm}}}$$

$$\sigma_{cg1} = \frac{M_{g_1}(x)}{I_{i,s}} \cdot z_{pi} = \frac{519,87 \cdot 10^{-3}}{0,0477} \cdot 0,628 = \underline{\underline{6,84 \text{ MPa}}}$$

Celkové straty od dotvarovania, zmrašťovania a dlhodobej relaxácie sa môžu vyjadriť súčasne:

$$\begin{aligned}\Delta\sigma_{p,csr} &= \frac{\Delta\sigma_{p,s} + 0,8 \cdot \Delta\sigma_{pr} + \alpha_p \cdot \varphi_0(t_\infty, t_0) \cdot \sigma_{cgp}}{1 + \alpha_p \cdot \frac{A_p}{A_{i,s}} \cdot \left[1 + \frac{A_{i,s}}{I_{i,s}} \cdot e_{p,i}^2 \right] \cdot (1 + 0,8 \cdot \varphi_0(t_\infty, t_0))} + \\ &+ \frac{\alpha_p \cdot \varphi_0(t_\infty, t_1) \cdot \sigma_{cg1}}{1 + \alpha_p \cdot \frac{A_p}{A_{i,s}} \cdot \left[1 + \frac{A_{i,s}}{I_{i,s}} \cdot e_{p,i}^2 \right] \cdot (1 + 0,8 \cdot \varphi_0(t_\infty, t_1))} = \\ &= \frac{-131,04 + 0,8 \cdot (-49,29) + 5,57 \cdot 2,935 \cdot (-10,82)}{1 + 5,57 \cdot \frac{8,49 \cdot 10^{-4}}{0,2484} \cdot \left[1 + \frac{0,2484}{0,0489} \cdot 0,628^2 \right] \cdot (1 + 0,8 \cdot 2,935)} + \\ &+ \frac{5,57 \cdot 2,095 \cdot 6,84}{1 + 5,57 \cdot \frac{8,49 \cdot 10^{-4}}{0,2484} \cdot \left[1 + \frac{0,2484}{0,0489} \cdot 0,628^2 \right] \cdot (1 + 0,8 \cdot 2,095)} = \underline{\underline{-222,32 \text{ MPa}}}\end{aligned}$$

Napätie vo výstuži na konci životnosti:

$$\sigma_{p,m\infty} = \sigma_{p,max} + \Delta\sigma_{psl} + \Delta\sigma_{pr} + \Delta\sigma_{p,csr} = 1360 - 11,7 - 17,3 - 222,32 = \underline{\underline{1108,68 \text{ MPa}}}$$

Dlhodobé straty predstavujú $\frac{222,32}{1360} = 0,1635 = 16,4\%$ a celkové straty predstavujú

$$\frac{222,32 + 11,7 + 17,3}{1360} = 0,1848 = 18,5\%$$

9.2 Posúdenie prierezu

9.2.1 Posúdenie prierezu v čase vnesenia predpätia – $t_0 = 5$ dní – posúdenie vzniku trhlin – štádium predpínania

$$\alpha = 1,0 \text{ (pre } t < 28 \text{ dní)}$$

$$\eta_{p1} = 3,2$$

$$\alpha_1 = 1,0$$

$$\alpha_{ct} = 1,0 \text{ (dobré kotevné podmienky)}$$

$$\eta_{p2} = 1,0$$

$$\alpha_2 = 0,19$$

$$s = 0,2$$

$$r_{sup} = 1,05$$

$$\phi_p = 15,5 \text{ mm}$$

$$\beta_{cc}(t_0) = e^{s \left[1 - \left(\frac{28}{t_0} \right)^{0,5} \right]} = e^{0,2 \left[1 - \left(\frac{28}{5} \right)^{0,5} \right]} = 0,7609 \text{ (pri teplote cca } 20^\circ\text{C bude pevnosť betónu } 76,1\% \text{ z 28-dňovej pevnosti, čo je viac ako predpokladaných } 75\%)$$

Návrhová pevnosť v ťahu:

$$f_{ctd}(t_0) = \alpha_{ct} \cdot [\beta_{cc}(t)]^\alpha \cdot \frac{f_{ctk0,05}}{\gamma_c} = 1,0 \cdot [0,7609]^{1,0} \cdot \frac{2,45}{1,5} = \underline{\underline{1,243 \text{ MPa}}}$$

Pevnosť v súdržnosti:

$$f_{bpt} = \eta_{p1} \cdot \eta_{p2} \cdot f_{ctd}(t_0) = 3,2 \cdot 1,0 \cdot 1,243 = \underline{\underline{3,98 \text{ MPa}}}$$

Kotevná dĺžka:

$$l_{pt} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \phi_p \cdot \frac{\sigma_{p,m0}}{f_{bpt}} = 1,0 \cdot 0,19 \cdot 15,5 \cdot \frac{1331}{3,98} = \underline{\underline{985 \text{ mm}}}$$

Kotevná dĺžka v štádiu predpínania: $l_{pt1} = 0,8 \cdot l_{pt} = 0,8 \cdot 985 = \underline{\underline{788 \text{ mm}}}$

Napätie po okamžitých stratách (max $\sigma_{p,m0}$):

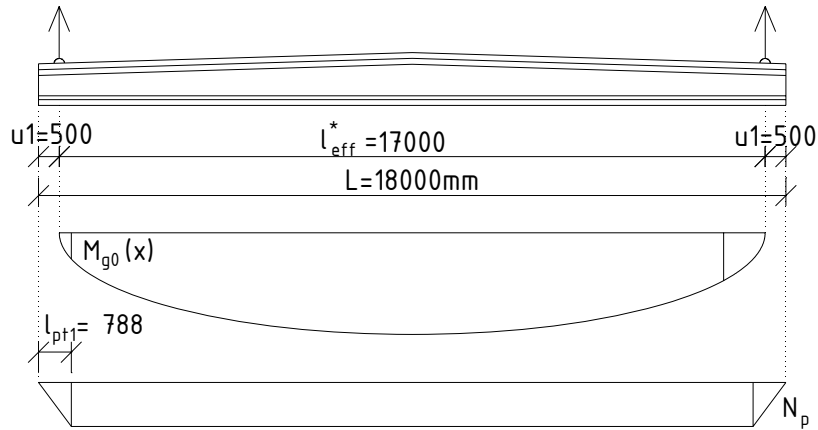
$$\sigma_p(t_0) = \sigma_{p,max} + \Delta\sigma_{psl} + \Delta\sigma_{pr} = \sigma_{p,m0} = \underline{\underline{1331,0 \text{ MPa}}}$$

Sila vo výstuži:

$$P_{k,sup} = r_{sup} \cdot \sigma_p(t_0) \cdot A_p = 1,05 \cdot 1331,0 \cdot 8,49 \cdot 10^{-4} = \underline{\underline{1,18652 \text{ MN}}} = \underline{\underline{1186,52 \text{ kN}}}$$

Miesto „x“ pre výpočet momentu:

$$x = l_{pt1} - u1 = 0,788 - 0,5 = \underline{\underline{0,288 \text{ m}}}$$



Obr. 4 Štádium predpínania - miesto posúdenia

Moment na konci kotevnej dĺžky l_{pt1} od vlastnej tiaže nosníka:

$$M_{g_0}(x) = \frac{1}{2} \cdot g_{ok} \cdot x \cdot (l_{eff}^* - x) = \frac{1}{2} \cdot 5,955 \cdot 0,288 \cdot (17,0 - 0,288) = \underline{\underline{14,33 \text{ MPa}}}$$

Poznámka: Nebudeme uvažovať s presnými charakteristikami prierehového rezu v mieste „x“, stačí keď použijeme charakteristiky prierezu v podpere.

Musí platiť:

- pre horné vlákna:

$$\sigma_{c,h} = -\frac{P_{k,sup}}{A_{i,p}} + \frac{P_{k,sup} \cdot e_{p,p}}{W_{i,h,p}} - \frac{M_{g_0}(x)}{W_{i,h,p}} \leq \begin{cases} 0 & (\text{nevznikne ťah}) \\ f_{ctm}(t_0) & (\text{je prípustný aj krátkodobý vznik ťahu}) \end{cases}$$

- pre dolné vlákna:

$$\sigma_{c,d} = \left| -\frac{P_{k,sup}}{A_{i,p}} - \frac{P_{k,sup} \cdot e_{p,p}}{W_{i,d,p}} + \frac{M_{g_0}(x)}{W_{i,d,p}} \right| \leq 0,7 \cdot f_{ck}(t_0) \quad (\text{vopred predpätý beton})$$

$$W_{i,h,p} = \frac{I_{i,p}}{Z_{i,h,p}}; \quad W_{i,d,p} = \frac{I_{i,p}}{Z_{i,d,p}};$$

$$f_{ctm}(t_0) = \beta_{cc}(t_0) \cdot f_{ctm} = 0,7609 \cdot 3,5 = \underline{\underline{2,66 \text{ MPa}}}$$

$$f_{ck}(t_0) = \beta_{cc}(t_0) \cdot f_{ck} = 0,7609 \cdot 40 = \underline{\underline{30,44 \text{ MPa}}}$$

$$\sigma_{c,h} = -\frac{1186,52 \cdot 10^{-3}}{0,2160} + \frac{1186,52 \cdot 10^{-3} \cdot 0,486}{0,02353} \cdot 0,464 - \frac{14,33 \cdot 10^{-3}}{0,02353} \cdot 0,464 = \underline{\underline{5,59 \text{ MPa}}} > 2,66 \text{ MPa}$$

- Nevyhovuje

$$\sigma_{c,d} = \left| -\frac{1186,52 \cdot 10^{-3}}{0,2160} - \frac{1186,52 \cdot 10^{-3} \cdot 0,486}{0,02353} \cdot 0,536 - \frac{14,33 \cdot 10^{-3}}{0,02353} \cdot 0,536 \right| =$$

$$= \underline{\underline{-18,30 \text{ MPa}}} < 30,44 \text{ MPa}$$

- Vyhovuje

Ťahové napätie v horných vláknach sú väčšie ako je pevnosť v ťahu, preto je treba separáciou lán posunúť miesto plne rozvinutej predpínacej sily, aby väčší moment vyvolal väčšie tlakové napätia v horných vláknach. Pre známu pevnosť betónu v ťahu môžeme z predchádzajúcej rovnice vypočítať miesto, kde ohybový moment zabráni vzniku trhlín.

$$-\frac{1186,52 \cdot 10^{-3}}{0,2160} + \frac{1186,52 \cdot 10^{-3} \cdot 0,486}{0,02353} \cdot 0,464 - \frac{M_{g0}(x)}{0,02353} \cdot 0,464 = 2,66 \text{ MPa}$$

$$\Rightarrow M_{g0}(x) = 163,19 \text{ kNm} \Rightarrow M_{g0}(x) = \frac{1}{2} \cdot g_{0k} \cdot x \cdot (1-x) = 163,19 \text{ kNm} \Rightarrow x = 4,32 \text{ m}$$

Počet lán, ktoré potrebujeme separovať:

$$-\frac{P_{k,sup}^*}{0,2160} + \frac{P_{k,sup}^* \cdot 0,486}{0,02353} \cdot 0,464 - \frac{14,33 \cdot 10^{-3}}{0,02353} \cdot 0,464 \leq 2,66 \text{ MPa}$$

$$\Rightarrow P_{k,sup}^* \leq 589,98 \text{ kN} \Rightarrow A_p^* \leq \frac{P_{k,sup}^*}{r_{sup} \cdot \sigma_p(t_0)} = \frac{589,98}{1,05 \cdot 1331} = 4,22 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$n_p^* \leq \frac{A_p^*}{A_{p,l}} = \frac{4,22 \cdot 10^{-4}}{1,415 \cdot 10^{-4}} = \underline{\underline{2,98 \text{ ks}}} \Rightarrow \text{Počet lán, ktoré treba}$$

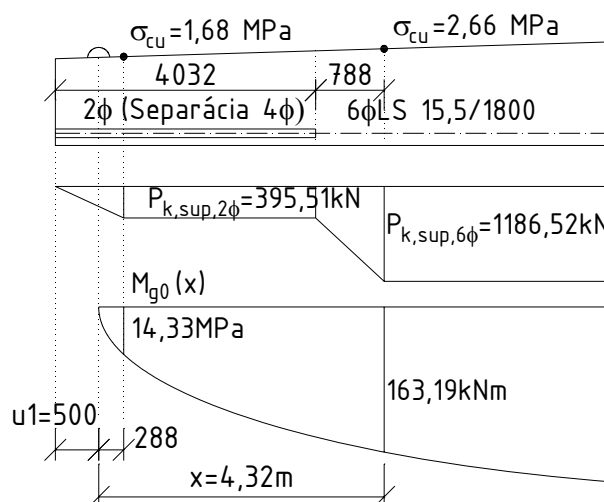
nechať súdržné $n^* = \underline{\underline{2 \text{ ks}}}$

Počet lán, ktoré treba separovať: $n = 6 - n^* = 6 - 2 = \underline{\underline{4 \text{ ks}}}$

$$P_{k,sup,2\phi} = 1,05 \cdot 1331 \cdot 2 \cdot 1,415 \cdot 10^{-4} = \underline{\underline{395,51 \text{ kN}}}$$

$$P_{k,sup,4\phi} = 1,05 \cdot 1331 \cdot 4 \cdot 1,415 \cdot 10^{-4} = \underline{\underline{791,01 \text{ kN}}}$$

$$P_{k,sup,6\phi} = 1,05 \cdot 1331 \cdot 6 \cdot 1,415 \cdot 10^{-4} = \underline{\underline{1186,52 \text{ kN}}}$$



Obr. 5 Štádium predpínania – napätia v horných vláknach prierezu pri separácii 4 ϕ LS

Overenie:

$$\sigma_{c,h} = -\frac{395,51 \cdot 10^{-3}}{0,2160} + \frac{395,51 \cdot 10^{-3} \cdot 0,486}{0,02353} \cdot 0,464 - \frac{14,33 \cdot 10^{-3}}{0,02353} \cdot 0,464 = \underline{\underline{1,68 \text{ MPa}}} < 2,66 \text{ MPa}$$

- Vyhovuje

9.2.2 Posúdenie v štádiu používania – $t_{\infty} = 50$ rokov – posúdenie vzniku trhlin

$$\gamma_{k,inf} = 0,95$$

$$\sigma_{p,m\infty} = 1108,68 \text{ MPa}$$

$$P_{k,inf} = \gamma_{inf} \cdot \sigma_{p,m\infty} \cdot A_p = 0,95 \cdot 1108,68 \cdot 10^3 \cdot 8,49 \cdot 10^{-4} = \underline{\underline{894,21 \text{ kN}}}$$

$$M_k = 929,296 \text{ kNm (vid' str. 3)}$$

Musí platiť:

- pre horné vlákna:

$$\sigma_{c,h} = \left| -\frac{P_{k,inf}}{A_{i,s}} + \frac{P_{k,inf} \cdot e_{p,s}}{I_{i,s}} \cdot z_{i,h,s} - \frac{M_k}{I_{i,s}} \cdot z_{i,h,s} \right| \leq 0,7 \cdot f_{ck}$$

$$\sigma_{c,h} = \left| -\frac{894,21 \cdot 10^{-3}}{0,2484} + \frac{894,21 \cdot 10^{-3} \cdot 0,628}{0,0477} \cdot 0,592 - \frac{929,296 \cdot 10^{-3}}{0,0477} \cdot 0,592 \right| =$$

$$= \underline{\underline{|-8,16| \text{ MPa}}} \leq 0,7 \cdot 40 = 28 \text{ MPa}$$

- Vyhovuje

- pre dolné vlákna:

$$\sigma_{c,d} = -\frac{P_{k,inf}}{A_{i,s}} - \frac{P_{k,inf} \cdot e_{p,s}}{I_{i,s}} \cdot z_{i,h,s} + \frac{M_k}{I_{i,s}} \cdot z_{i,h,s} \leq f_{ctm} \text{ (obmedzené predpätie)}$$

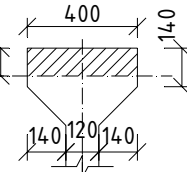
$$\sigma_{c,d} = -\frac{894,21 \cdot 10^3}{0,2484} - \frac{894,21 \cdot 10^3 \cdot 0,628}{0,0477} \cdot 0,592 + \frac{929,296 \cdot 10^{-3}}{0,0477} \cdot 0,592 =$$

$$= 0,964 \text{ MPa} < f_{ctm} = 3,5 \text{ MPa}$$

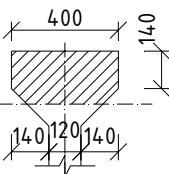
- Vyhovuje

9.2.3 Posúdenie na medzi únosnosti - odolnosť v ohybe

V kritickom priereze (v strede rozpätia) predpokladáme rovnomerné rozdelenie normálových napätí v betóne po výške. Treba zistiť výšku tlačeneho betónu. Vzhľadom na priečny rez prierezu predpokladáme, že tlačenná časť betónu je v hornej konštantnej časti pásnice

$$0,8 \cdot x_u = \frac{F_{pd}}{b_{eff} \cdot f_{cd}} \leq 0,14 \text{ m} \Leftrightarrow 0,8 \cdot x_u \leq 0,14 \text{ m}$$


alebo zasahuje do časti, kde sa prierez zužuje

$$0,8 \cdot x_u = \frac{F_{pd}}{b_{eff} \cdot f_{cd}} > 0,14 \text{ m} \Leftrightarrow 0,8 \cdot x_u > 0,14 \text{ m}$$


Ak by ani tento predpoklad nebol správny, potom by tlačenná časť zasahovala do stojiny.

$$f_{pd} = \underline{\underline{1361,74 \text{ MPa}}} \quad (\text{vid' str. 4})$$

$$F_{pd} = A_p \cdot f_{pd} = 8,49 \cdot 10^{-4} = 1,15612 \text{ MN} = \underline{\underline{1156,12 \text{ kN}}}$$

$$0,8 \cdot x_u = \frac{F_{pd}}{b_{\text{eff}} \cdot f_{cd}} = \frac{1,15612}{0,4 \cdot 26,67} = \underline{\underline{0,108 \text{ m}}} < 0,14 \text{ m} - \text{tlačená časť betónu je v hornej pásnici.}$$

Podmienka spoľahlivosti medzného stavu únosnosti:

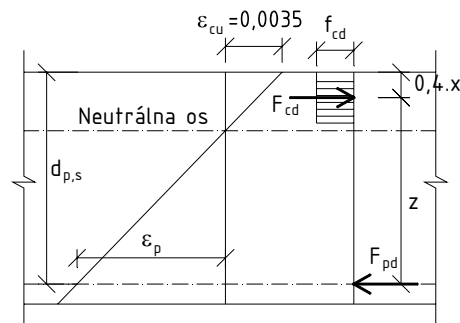
$$z = d_{p,s} - 0,4 \cdot x_u$$

$$M_{Rd} = F_{pd} \cdot (d_{p,s} - 0,4 \cdot x_u) \geq M_d$$

$$M_{Rd} = 1156,12 \cdot \left(1,22 - \frac{0,108}{2} \right) =$$

$$= \underline{\underline{1348,04 \text{ kNm}}} > M_d = 1281,004 \text{ kNm}$$

- Vyhovuje



Obr. 6 Ohybová odolnosť v kritickom priereze

9.2.4 Posúdenie na šmyk

$$V_d(x) = \frac{1}{2} \cdot f_d \cdot (l_{\text{eff}} - 2 \cdot x) = \frac{1}{2} \cdot 32,711 \cdot (17,7 - 2 \cdot 0,686) = \underline{\underline{267,05 \text{ kN}}}$$

$$I_{i,p} = 0,0253 \text{ m}^4 \quad (\text{vid' str. 6})$$

$$b_w = 0,12 \text{ m}$$

$$d_{p,p} = 0,95 \text{ m}$$

$$z_1 = z_{i,d,p} = 0,536 \text{ m}$$

$$z_i = z_{i,h,p} = 0,464 \text{ m}$$

$$\alpha_p = 5,57$$

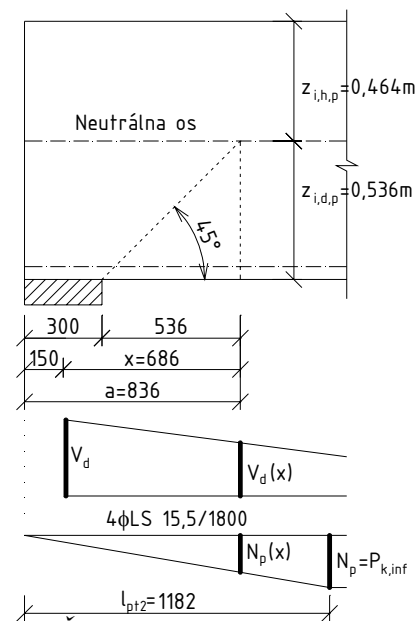
$$S_c = \left(0,12 + \frac{b_w}{2} \right) \cdot \frac{z_1^2}{2} = \left(0,12 + \frac{0,12}{2} \right) \cdot \frac{0,536^2}{2} = 0,0259 \text{ m}^3$$

Plocha všetkých predpínacích lán, ktoré pôsobia v danom priereze - 2φ zo 6φ):

$$A_{p,\text{sup}} = 2 \cdot A_{p1} = 2 \cdot 1,415 \cdot 10^{-4} = 2,83 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Statický moment plochy ideálneho prierezu ku neutrálnej osi:

$$S_i = S_c + (\alpha_p - 1) \cdot A_{p,\text{sup}} \cdot (d_{p,p} - z_i) = 0,0259 + (5,57 - 1) \cdot 2,83 \cdot 10^{-4} \cdot (0,95 - 0,464) = 0,265 \text{ m}^3$$



Obr. 7 Šmyková odolnosť prvku bez priečnej výstuže

$$\left. \begin{aligned} l_{pt2} &= 1,2 \cdot l_{pt} = 1,2 \cdot 0,985 = 1,182\text{m} \\ a &= u + z_{i,d,p} = 300 + 536 = 836\text{mm} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \alpha_c = \frac{a}{l_{pt2}} = \frac{0,836}{1,182} = 0,707$$

$$P_{k,inf} = \sigma_{p,m\infty} \cdot A_{p,sup} \cdot r_{k,inf} = 1108,68 \cdot 2,83 \cdot 10^{-4} \cdot 1,05 = \underline{\underline{329,44 \text{ kN}}}$$

Napätie v mieste posúdenia:

$$\sigma_{cp} = \frac{P_{k,inf}}{A_{i,p}} = \frac{0,32944}{0,2160} = \underline{\underline{1,525 \text{ MPa}}}$$

- Posúdenie:

Musí platiť: $V_d(x) \leq V_{Rd,ct}$

$$\begin{aligned} V_{Rd,ct} &= \frac{I_{i,p} \cdot b_w}{S_i} \cdot \sqrt{(f_{ctd})^2 + \alpha_c \cdot \sigma_{cp} \cdot f_{ctd}} = \frac{0,0253 \cdot 0,12}{0,0265} \cdot \sqrt{1,63^2 + 0,707 \cdot 1,5258 \cdot 1,63} = \\ &= 0,240707 \text{ MN} = \underline{\underline{240,71 \text{ kN}}} < V_d(x) = 267,05 \text{ kN} \end{aligned}$$

- *nevyhovuje* – treba navrhnúť šmykovú výstuž

- Návrh šmykovej výstuže:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{S_s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot g(\theta) \geq (V_d(x) - V_{Rd,ct}) \Rightarrow \text{z toho}$$

$$\Rightarrow S_s = \frac{A_{sw} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot g(\theta)}{(V_d(x) - V_{Rd,ct})} \Rightarrow \text{volím: } \phi_{tr} = 10 \text{ mm}$$

$$n_s = 2 \text{ strižný} \Rightarrow A_{sw} = 1,57 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

obmedzenie:

$$1 \leq \cot g(\theta) \leq 2,5$$

$$\Rightarrow \theta = 21,8^\circ \sim 45^\circ \Rightarrow \text{volím } \theta = 36^\circ$$

oceľ 10505 (R) \Rightarrow

$$f_{ywd} = f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{490}{1,15} = 426,09 \text{ MPa}$$

$$z = 0,9 \cdot d_{p,p} = 0,9 \cdot 0,95 = 0,855 \text{ m}$$

$$\Rightarrow S_s = \frac{1,57 \cdot 10^{-4} \cdot 0,855 \cdot 426,09 \cdot 10^3 \cdot \cot g(36^\circ)}{(267,05 - 240,71)} = \underline{\underline{2,99 \text{ m}}}$$

Návrh: $S_s = 0,2 \text{ m}; \phi_{tr} = 10 \text{ mm}; n_s = 2 \text{ strižný}$

Kontrola tlakovej diagonály:

$$\sigma_{cp} = \underline{\underline{1,525 \text{ MPa}}} \leq 0,25 \cdot f_{cd} = 0,25 \cdot 26,67 = 6,67 \text{ MPa}$$

$$\Rightarrow \alpha_{cw} = 1 + \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}} = 1 + \frac{1,525}{26,67} = 1,06$$

$$v_1 = v = 0,6 \cdot \left[1 - \frac{f_{ck}}{250} \right] = 0,6 \cdot \left[1 - \frac{40}{250} \right] = 0,504$$

Musí platit:

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v \cdot f_{cd}}{(\cot g(\theta) - \operatorname{tg}(\theta))} \geq V_d(x)$$

$$V_{Rd,max} = \frac{1,06 \cdot 0,12 \cdot 0,855 \cdot 0,504 \cdot 26,67 \cdot 10^3}{(\cot g(36^\circ) + \operatorname{tg}(36^\circ))} = \underline{\underline{695,16 \text{ kN}}} > V_d(x) = 267,05 \text{ kN}$$

- Vyhovuje

LITERATÚRA

- [1] EN 1992-1-1: *Navrhovanie betónových konštrukcií. Časť 1: Obecné pravidlá a pravidlá pre pozemné stavby*. December 2004
- [2] Bilčík, J. – Fillo, Ľ. – Halvoník, J.: *Betónové konštrukcie, Navrhovanie podľa EN 1992-1-1*, Betoning, s.r.o., Bratislava, 2005, 314 s.
- [3] *Stropný systém GOLDBECK – Technické a statické parametry – Předpjaté stropní panely výšky 200 mm – SPA 450/20 04, dĺžky 4,5m.*