

Detailní pokyny pro vypracování příkladu P (pomůcka ke cvičení BK02)

1) Návrh rozměrů T-průřezu

Výška vazníku:	$h = ((1/8) - (1/10)) \cdot L_1$	zaokrouhlit na 10 cm
Šířka stojiny vazníku	$b_w = \min((1/5) \cdot h; 220\text{mm})$	zaokrouhlit na celé cm
Výška horní příruby	$h_f = \min((1/6) \cdot h; 200\text{mm})$	zaokrouhlit na celé cm
Délka konzoly „T“	$k_t = \min((1/15) \cdot h; 80\text{mm})$	zaokrouhlit na celé cm

2) Spočítat průřezové charakteristiky vazníku a velikost jádra průřezu

Plocha průřezu	A_c	
Poloha těžiště (od horních / dolních vláken)	e_h	e_d
Moment setrvačnosti	I_c	
Průřezový modul horní / dolní	$W_h = I_c / e_h$;	$W_d = I_c / e_d$
Velikost jádra - horní / dolní jádrová úsečka	$r_h = W_d / A_c$	$r_d = W_h / A_c$

3) Stanovení krytí vzhledem k zadanému stupni vlivu prostředí pro betonářskou i předpínací výztuž

4) Stanovení maximální šířky trhliny pro danou třídu prostředí

Stupeň vlivu prostředí	Železobetonové prvky a prvky předpjaté nesoudržnou výztuží	Prvky předpjaté soudržnou výztuží
	Kvazi-stálá kombinace zatížení	Častá kombinace zatížení
X0, XC1	0,4 ¹	0,2
XC2, XC3, XC4	0,3	0,2 ²
XD1, XD2, XD3, XS1, XS2, XS3		dekomprese
POZNÁMKA 1 Pro stupně vlivu prostředí X0, XC1 nemá šířka trhliny vliv na trvanlivost a uvedená hodnota má zajistit přijatelný vzhled. Pokud nejsou kladeny požadavky na vzhled, lze uvedenou hodnotu zvětšit.		
POZNÁMKA 2 Pro tyto stupně vlivu prostředí má být kromě toho posouzena dekomprese při kvazi-stálé kombinaci zatížení.		

Předem předpjatý nosník → výztuž je kotvena soudržností.

5) Návrhové materiálové vlastnosti – beton, betonářská výztuž, předpínací výztuž

U předpínací výztuže uvažovat

$f_{pk} = 1770 \text{ MPa}$, $f_{p,0.2,k} = 1570 \text{ MPa}$, $f_{p,0.1,k} = 0,95 \cdot 1570 \text{ MPa}$, případně podle zadání, či produktových listů předpínacího systému

6) Zatížení – do tabulky + kombinace

- Pro MSÚ podle rovnice 6.10a/b pro kategorii E
- Pro MSP charakteristická kombinace f_k a kvazistálá kombinace f_{qp}

7) Kontrola rozměrů vazníku (*Empirické ověření, zda vazník vyhoví.*)

- Kontrola MSP – omezení napětí v horních i dolních vláknech

$$\sigma_{ck,h} = \frac{M_{Ek}}{I_c} \cdot e_h \leq 0,7 f_{ck}$$

$$\sigma_{ck,d} = \frac{M_{Ek}}{I_c} \cdot e_d \leq 0,6 f_{ck}$$

$$\sigma_{ck,h} = \frac{M_{qp}}{I_c} \cdot e_h \leq 0,45 f_{ck}$$

$$\sigma_{ck,d} = \frac{M_{qp}}{I_c} \cdot e_d \leq 0,45 f_{ck}$$

b. Kontrola MSÚ – výška vazníku

$$h = \alpha \cdot \sqrt{\frac{M_{Ed}}{\beta \cdot b_v \cdot f_{cd}}}$$

$$\alpha = 1$$

$$\beta = \frac{1}{7} \text{ (pro T průřez)}$$

8) Návrh předpětí

a. Maximální napětí při napínání (napínací napětí)

$$\sigma_{p,max} = \min(0,8f_{pk}; 0,9f_{p,0,1,k})$$

b. Maximální napětí po vnesení předpětí

$$\sigma_{p,m0} = \min(0,75f_{pk}; 0,85f_{p,0,1,k})$$

f_{pk} a $f_{p,0,1,k}$ – jsou materiálové charakteristiky předpínací oceli – viz individuální zadání

c. Návrh předpínací síly

$P_{K,\infty} = P_{p,\infty} = (\sigma_{ck,d} / (1 + e_p/r)) \cdot A_c$, pokud umístíme na hranu jádra, můžeme dále upravit, viz níže.

Pro návrh uvažujeme $\sigma_{p,in} = 1342 \text{ MPa}$ a celkové ztráty předpětí 25%.

$$\sigma_{p,\infty,est} = (1 - 25\%) \cdot \sigma_{p,in}$$

Uvedený vztah pro návrh předpínací síly získáme z předpokladu, že při charakteristické kombinaci (požadavek investora) zatížení nevzniká v tažených spodních vláknech na konci životnosti tah.

K uvedenému vztahu rozkreslete napětí po průřezu od zatížení a předpínací síly.

Uvažuje se, že excentricita předpínací síly leží na kraji jádra průřezu $e_p = r_d$.

9) Návrh počtu předpínacích lan

a. Plocha výztuže

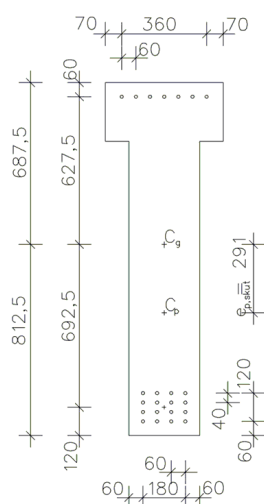
$$A_{s,req} = \frac{P_{K,\infty}}{\sigma_{p,\infty,est}}$$

b. Počet lan

$$n = \frac{A_{s,req}}{A_{s,1}}, \text{ plochu výztuže volím podle zadání (100, 140, či } 150 \text{ mm}^2 \text{).}$$

10) Stanovení rozmístění předpínací výztuže do průřezu (rozkreslit v měřítku a okótovat)

- Zohlednit těžiště předpínacích lan (= působíště předpínací síly) – viz 8)
- Zohlednit krytí – viz 3)



Při návrhu předpínací síly byla uvažována excentricita jejího působení na kraji jádra průřezu. Dodržení tohoto předpokladu odpovídajícím rozmístěním předpínací výztuže s výslednicí na kraji jádra průřezu zajistí, že:

- *nebudou vznikat tahy v horních vláknech u podpory a nebude tak nutné navrhovat separace lan ze spodních řad předpínací výztuže – při větší excentricitě skutečné než navržené,*
- *při správně odhadnutých předpínacích ztrátách na konci životnosti prvku (při jejich srovnání se ztrátami skutečnými, viz níže) nebudou vznikat tahy uprostřed nosníku na konci životnosti.*

Návrh excentricity předpínací výztuže do jádra průřezu samozřejmě není dogma, v praxi se separace spodních řad u podpory navrhuje zcela běžně.

11) Výpočet ztrát předpětí a ověření maximálního

a. Okamžité ztráty předpětí

- Ztráta pokluzem v kotevním bloku pro hodnotu $sl=2,5mm$

$$\Delta\sigma_{p,sl} = -sl \cdot E_p / L_v$$

- Ztráta krátkodobou relaxací pro předpínací lana třídy 2 (lana s nízkou relaxací)

$$\sigma_{p,r,t=3} = -0,66 \cdot \rho_{1000} \cdot e^{9,1\mu} \left(\frac{t}{1000} \right)^{0,75(1-\mu)} \cdot 10^{-5} \cdot \sigma_{pi}$$

- Ztráta pružným zkrácením betonu v okamžiku vnesení předpětí (např $t=3dny$)

$$\Delta N_{cc} = \frac{N_p A_p E_p}{A_c E_c(t) + A_p E_p}, \sigma_{p,cc} = -\frac{N_{cc}}{A_p}$$

b. Ověření maximálního napětí po vnesení předpětí

$$\sigma_{p,0} = \sigma_{p,in} + \Delta\sigma_{p,sl} + \Delta\sigma_{p,r,t=3} + \Delta\sigma_{p,cc}$$

Podle výsledku případně zmenšit napínací napětí o nejmenší možnou hodnotu pro zachování ekonomiky návrhu.

c. Dlouhodobé ztráty předpětí

- Dlouhodobá relaxace předpínací výztuže pro $t=50let$

- Ztráta dotvarování betonu pro $t=3dny$

Napětí od stálých zatížení (stálé a předpětí), výpočet napětí v místě předpínací výztuže

$$\sigma_{cp}^{g+p} = +(M_{g,k}/I_c) \cdot e_{p,dolní} - P_0/A_c - (P_0 \cdot e_{p,skut}/I_c) \cdot e_{p,dolní}$$

$$\Delta\sigma_{p,c} = E_p \cdot \frac{\sigma_{cp}^{g+p}}{E_c(3)} \cdot \varphi(18250,3)$$

- Ztráta smršťování betonu pro $t=3dny$

$$\Delta\sigma_{p,s} = E_p \cdot \varepsilon_c^s(t)$$

d. Ověření napětí v předpínací výztuži na konci životnosti (ověřit odhad ztrát)

$$\sigma_{p,\infty} = \sigma_{p,0} + \Delta\sigma_{p,sl} + \Delta\sigma_{p,cc} + \Delta\sigma_{p,r,t=\infty} + \Delta\sigma_{p,c} + \Delta\sigma_{p,s}$$

12) Posouzení na MSP

Vzhledem ke specifikům předpjatého betonu je posouzení MSP nutné provést ve dvou místech (uprostřed pole a nad podporou) a ve dvou časech (v okamžiku vnesení předpětí (uvedení do provozu) a na konci životnosti prvku).

Posudek proběhne podle požadavku investora, při charakteristické kombinaci v MSP nesmí vznikat žádné tahy. Dále bude ověřeno lineární dotvarování pro kvazi-stálou kombinaci zatížení.

- Posouzení v čase uvedení do provozu
- Posouzení na konci životnosti ($t=50let$)

13) Posouzení na MSÚ

- a. Tlaková síla v betonu je stejná jako tahová síla v předpínací výztuži

Dále je třeba určit výšku tlačené oblasti a zároveň s ní i vnitřní síly, tlakové i tahové. Při určování ohybového momentu na mezi únosnosti nebude do výpočtu zahrnuta běžná betonářská výztuž.

$$F_{pd} = N_{pd}, N_{pd} = n \cdot A_{p,s,1} \cdot f_{pd}$$

$A_{p,s,1}$ je plocha jednoho lana, n je počet předpínacích lan a f_{pd} je návrhová pevnost předpínací výztuže.

$$F_{cd} = b \cdot x \cdot \eta \cdot f_{cd} = N_{pd}$$

- b. Výška tlačené oblasti

$$x = \frac{N_{pd}}{b_p \cdot \eta \cdot f_{cd}}$$

Pokud výška tlačené oblasti je více než výška horní příruby, musí být vztah pro výpočet výšky tlačené oblasti upraven.

$$x = x' + h_p, x' = \frac{F_{pd} - b_p \cdot h_p \cdot f_{cd}}{b_v \cdot f_{cd}}$$

b_v je šířka vazníku, b_p je šířka horní příruby a h_p je výška horní příruby.

- c. Rameno vnitřních sil

$$z = d_p - C_{\lambda x} = C_g + e_{p,skut} - C_{\lambda x}$$

C_g je vzdálenost těžiště vazníku od horních vláken, $e_{p,skut}$ je rozdíl poloh těžišť předpínací výztuže a vazníku, $C_{\lambda x}$ je vzdálenost těžiště tlačené oblasti ($\lambda \cdot x$) od horních vláken.

- d. Ohybový moment únosnosti

$$M_{Rd} = F_{pd} \cdot z, M_{Ed} \leq M_{Rd}$$

- e. Ověření zplastizování předpínací výztuže

Při dosažení maximálního přetvoření v betonu je třeba ověřit, zda dojde k zplastizování předpínací výztuže. V tomto příkladu je uvažován pracovní diagram předpínací výztuže s vodorovnou plastickou větví (která nemá mezní protažení), kdy ke zplastizování dochází po překročení poměrné deformace o velikosti $\varepsilon = f_{pd}/E_p = 1\,297/200\,000 = 6,5\text{‰}$.

Přetvoření betonu v místě předpínací výztuže

$$\varepsilon_c^p = \frac{\sigma_c^p}{E_{cm}}$$

Napětí v betonu v místě předpínací výztuže (na konci životnosti)

$$\sigma_c^p = -\frac{N_{p-}}{A_c} - \frac{M_{p-}}{W_c^p}$$

Normálová síla od zvedaných kabelů (na konci životnosti)

$$N_{p-} = A_p \cdot \sigma_{p-}$$

Staticky určitý moment od zvedaných kabelů (na konci životnosti)

$$M_{p-} = N_{p-} \cdot e_{p,skut}$$

Průřezový modul betonu k místu předpětí

$$W_c^p = \frac{I_c}{e_{p,skut}}$$

Přetvoření předpínací výztuže

$$\varepsilon_p = \frac{\sigma_{p-}}{E_p}$$

Přírůstek poměrného přetvoření předpínací výztuže

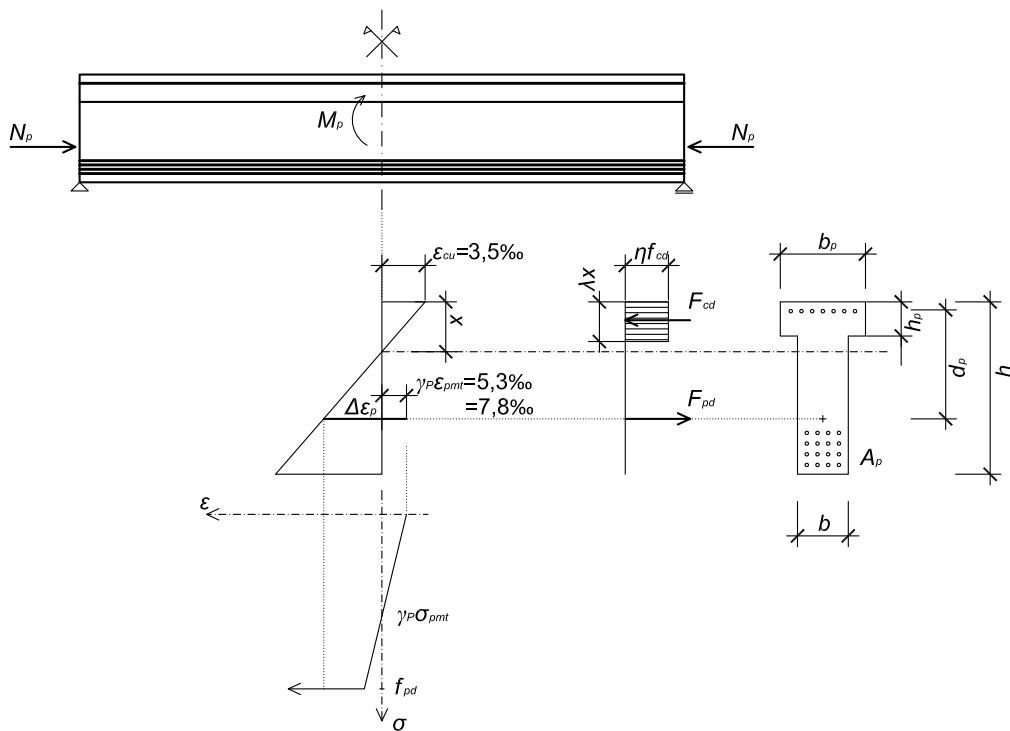
Přírůstek poměrného přetvoření propínací výztuže při dosažení meze únosnosti ($\varepsilon_{cu}=3,5\%$). Vychází z podobnosti trojúhelníků

$$\Delta\varepsilon_p = \frac{\varepsilon_{cu}}{\lambda \cdot x} \cdot (d_p - x)$$

Výsledné přetvoření v předpínací výztuži a rozhodnutí, zda výztuž zplastizuje

$$\Sigma\varepsilon_p = \varepsilon_c^p + \varepsilon_p + \Delta\varepsilon_p$$

Ilustrace metody mezního přetvoření



f. Smyk

Jedná se o posouzení prvku bez ohybových trhlin (nad podporou) na mezi únosnosti.

i. Posouvající síla

$$V_{Ed} = \frac{1}{2} \cdot f_{sd} \cdot L_v$$

ii. Složky návrhového napětí

Napětí od předpětí (na konci životnosti)

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{p-}}{A_c}$$

Smykové napětí (na konci životnosti)

$$\tau_{cp} = k \cdot \frac{V_{Ed}}{A_c}$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d_p}} = 1 + \sqrt{\frac{200}{987,5}} = 1,5 \leq 2,0$$

iii. Posouzení

Aby bylo možné v prvku ponechat pouze konstrukční smykovou výztuž je potřeba aby byl splněn následující vztah

$$\tau_{cp} \leq f_{cvd}$$

Limitní tlakové napětí v betonu

$$\sigma_{c,lim} = f_{cd} - 2\sqrt{f_{ctd} \cdot (f_{ctd} + f_{cd})}$$

Návrhová tahová pevnost betonu

$$f_{ctd} = \frac{2,5}{1,5} = 1,7 \text{ MPa}$$

Pokud $\sigma_{cp} < \sigma_{c,lim}$

$$f_{cvd} = \sqrt{f_{ctd}^2 + \sigma_{cp} \cdot f_{ctd} \tau_{cp}} = 2,1 \leq 3,5 = f_{cvd} \quad [\text{MPa}]$$

Pokud vyhovuje, v prvku stačí navrhnout pouze konstrukční smykovou výztuž

V případě že by $\sigma_{cp} > \sigma_{c,lim}$ pak únosnost betonu ve smyku je dána vztahem

$$f_{cvd} = \sqrt{f_{ctd}^2 + \sigma_{cp} \cdot f_{ctd} - \left(\frac{\sigma_{cp} - \sigma_{c,lim}}{2}\right)^2}$$