

# ZAVÁDZANIE EN 1992-1-1: „NAVRHOVANIE BETÓNOVÝCH KONŠTRUKCIÍ“ DO PRAXE – PREDPÄTIE

## INTRODUCTION OF EN 1992-1-1 TO PRACTICE – PRESTRESSING



ĽUDOVÍT FILLO,  
JAROSLAV HALVONÍK

Príspevok je pokračovaním série článkov, uverejnených v tomto časopise v roku 2003. Táto časť sa zaoberá otázkami navrhovania **predpätých** betónových prvkov s ilustratívnym príkladom návrhu vopred predpätého strešného panelu podľa normy EN1992-1-1.

*This article follows a set of papers, published in this journal in 2003. This part is dealing with the design of prestressed concrete members and includes an illustrative example of the design of pre-stressed roof panel according to EN1992-1-1.*

Spoločná európska norma [1] EN 1992-1-1 Navrhovanie betónových konštrukcií, v snahe o zjednotenie prístupu k navrhovaniu betónových konštrukcií, pokrýva prostý, vystužený a predpätý betón spoločným názvom – **konštrukčný betón**.

Kritériá **plného, obmedzeného a čiastočného predpätia** sa nahrádzajú definovanými požiadavkami na trvanlivosť a použiteľnosť prvkov v závislosti od prostredia. V súvislosti s týmito požiadavkami nie je vždy nutné a hospodárne vylúčiť ťahové napätia z prierezu. Namiesto toho je možné navrhovať betonársku a predpätú oceľ v istej kombinácii.

Predpätáť je možno nielen súdržnými, ale aj nesúdržnými predpätacími jednotkami. Tieto sú uložené vo vnútri betónového prierezu v ochranných obaloch vyplnených mazivom, prípadne káble môžu prebiehať tiež mimo betónový prierez – tzv. voľná výstuž, ktorá je spojená s konštrukciou len v mieste kotiev a deviátorov.

O predpätí sa hovorí v EN 1992-1-1 v článkoch: 2.3.2.2 Zmrašťovanie a dotvarovanie; 2.4.2.2 Koeficient spoľahlivosti pri predpätí; 3.3 Predpätacia oceľ – Vlastnosti, relaxácia, pevnosť, ťažnosť, únava, predpoklady návrhu, ochrana; 3.4 Zariadenia na predpätanie – Kotvy a spojky – mechanické vlastnosti, kotvenie výstuže, kotevné zariadenia a kotevné

oblasti. Vonkajšie nesúdržné výstuže; 5.10 Predpäté prvky a konštrukcie – Max. predpätacia sila, obmedzenie napätia v betóne. Okamžité straty. Dlhodobé straty. Zohľadnenie predpätia pri analýze. Účinky predpätia pri MS – únosnosti. Účinky predpätia pri MS – použiteľnosti a únavy; 6.8.4 Únava – posúdenie predpätacej výstuže; 8.10 Predpätacie ocele – Usporiadanie predpätacej ocele a trubiek pre predpätáciu výstuže. Kotvenie okamžite predpätanej výstuže. Kotevné oblasti dodatočne predpätých prvkov. Kotvy a spojky pre predpätaciu výstuž. Deviátory.

### PREDPÄTACIA SILA

#### Prípustné napätie predpätacej výstuže

Napätie v predpätacej výstuži nesmie prekročiť nasledovné hodnoty:

Počas predpätania:

$$\sigma_{p,max} = \min\{0,8 f_{pk}; 0,9 f_{p0,1k}\} \quad (1)$$

Po vnesení predpätia:

$$\sigma_{pm0}(x) = \min\{0,75 f_{pk}; 0,85 f_{p0,1k}\} \quad (2)$$

Veľkosť koeficientov pri charakteristickej hodnote pevnosti predpätacej výstuže  $f_{pk}$  resp. pri charakteristickej hodnote pevnosti predpätacej výstuže pri trvalej pomerej deformácii 0,1 %  $f_{p0,1k}$  sú odporúčané a môžu byť upravené v Národných prílohách (NP).

#### Prípustné napätie v betóne

Tlakové napätie od predpätacej sily a iných zaťažení je treba obmedziť, aby nevznikali pozdĺžne trhliny. Napätie v betóne nesmie prekročiť hodnotu

$$\sigma_c < 0,6 f_{ck}(t) \quad (3)$$

kde  $f_{ck}(t)$  je charakteristická hodnota tlakovej pevnosti betónu v čase predpätania.

Pri vopred predpätých prvkoch pri vnesení predpätacej sily môže byť hranica zvýšená na hodnotu

$$\sigma_c < 0,7 f_{ck}(t) \quad (4)$$

Minimálna trieda betónu pre predpäté prvky nie je uvádzaná priamo. Príloha E uvádza tzv. indikatívne pevnosti betónu z hľadiska trvanlivosti.

Tab.1 Odporúčané minimálne triedy pevnosti betónu [1] Príloha E

Tab.1 Recommended minimum strength classes [1] Annex E

Trieda betónu	Triedy prostredia definované v Tab. 4.1 [1]
C20/25	XC1
C25/30	XC2, XF2
C30/37	XC3, XC4, XD, XD2, XS1, XF3, XA1, XA2
C35/45	XD3, XS2, XS3, XA3

### ZMENY NAPÄTIA V PREDPÄTACEJ VÝSTUŽI

Okamžité straty predpätia vznikajú počas predpätania vplyvom:

- pružnej deformácie betónu nosníka pri postupnom predpätaní DPB,
- trenia medzi výstužou a kanálikom DPB,
- pokľzu v kotvení VPB, DPB.
- relaxácie výstuže VPB.

Poznámka: VPB – vopred predpätý betón, DPB – dodatočne predpätý betón.

- Stratu z postupného predpätania možno uvážiť ako priemernú hodnotu

$$\Delta\sigma_{et} = E_p \sum \frac{j\Delta\sigma_c(t)}{E_{cm}(t)}, \quad (5)$$

kde  $\Delta\sigma_c(t)$  je zmena napätia betónu v úrovni ťažiska výstuží predpätaných v čase  $t$ ;  $j = (n-1)/2n$ , kde  $n$  je počet rovnakých výstuží postupne napätaných,  $j = 1$  pri zmene stáleho zaťaženia nastupujúceho po predpätaní.

- Stratu trením možno určiť zo vzorca:

$$\Delta\sigma_\mu(x) = \sigma_0 \left[ 1 - e^{-\mu(\theta+Kx)} \right] \quad (6)$$

kde  $\mu$  je koeficient trenia medzi výstužou a kanálikom (tab. 2),  $\theta$  je suma uhlov oblúkov zakrivených úsekov výstuže na

	Vnútnomé káble	Vonkajšie nesúdržné káble			
		Ocelový kanálik/B	HDPE kanálik/B	Ocelový kanálik/M	HDPE kanálik/M
Drôty fahané za studena	0,17	0,25	0,14	0,18	0,12
Lana	0,19	0,24	0,12	0,16	0,10
Rebierkové prúty	0,65	-	-	-	-
Hladké kruhové tyče	0,33				

B – bez maziva, M – s mazivom

Tab. 2 Koeficienty trenia  $\mu$  pre dodatočne predpínané káble

Tab. 2 Friction coefficients  $\mu$  of post-tensioned tendons

dĺžke  $x$ ,  $k$  sú nerovnosti káblového kanálika v dôsledku bodových podopretí na jednotkovú dĺžku (0,005 až 0,01),  $x$  je vzdialenosť pozdĺž lana od bodu predpínania k bodu posudzovania.

**Dlhodobé straty** vznikajú v dôsledku zmeny dĺžky betónového prvku od zmršťovania a dotvarovania a tiež dôsledkom relaxácie ocele pod napätím.

Pomerne stlačenie betónového prvku v časovom intervale  $(t, t_0)$  v dôsledku uvedených vplyvov určíme zo vzorca (7) kde  $\sigma_{c0}$  je napätie v betóne v úrovni výstuže od kvazi-stálej kombinácie zaťaženia, s počiatočným predpäťm,  $\Delta\sigma_c(t, t_0)$  je zmena napätia v betóne v časovom intervale  $(t, t_0)$ ,  $\varphi(t, t_0)$  je koeficient dotvarovania v čase  $t$  pre nástup zaťaženia v čase  $t_0$ ,  $\varepsilon_{cs}(t, t_0)$  je hodnota pomernej deformácie od zmršťovania a  $\chi$  je koeficient stárnutia betónu ( $\chi = 0,8$ ).

Pri predpäťi súdržnou výstužou sa predpokladá, že zmena pomernej deformácie betónu v úrovni výstuže  $\Delta\varepsilon_{cp}$ , a príslušnej výstuže je rovnaká. Spolu so stratou z relaxácie výstuže možno celkovú časovo závislú stratu vyjadriť vzorcom:

$$\Delta\varepsilon_{cp} = \sigma_{c0} \frac{\varphi(t, t_0)}{E_c} + \Delta\sigma_c(t, t_0) \frac{1 + \chi\varphi(t, t_0)}{E_c} + \varepsilon_{cs}(t, t_0) \quad (7)$$

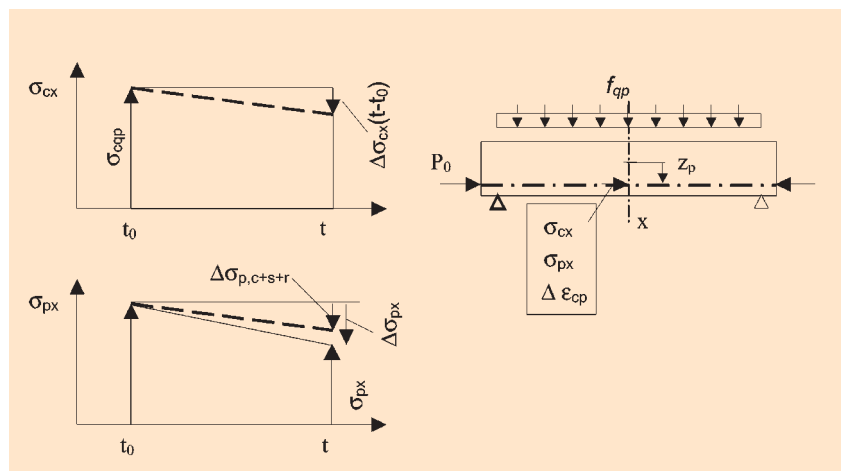
$$\Delta\sigma(t, t_0) = \Delta\sigma_{p,c+s+r} A_p \left( \frac{1}{A_c} + \frac{z_p^2}{I_c} \right) \quad (9)$$

$$\Delta\sigma_{p,c+s+r} = \frac{\frac{E_p}{E_{cm}} \varphi(t, t_0) \sigma_{c,qp} + \varepsilon_{cs} E_p + 0,8 \Delta\sigma_{pr}}{1 + \frac{E_p}{E_{cm}} \frac{A_p}{A_c} \left( 1 + \frac{A_c}{I_c} z_p^2 \right) [1 + 0,8 \varphi(t, t_0)]} \quad (10)$$

$$\Delta\sigma_{p,c+s+r} = E_p \Delta\varepsilon_{cp} + 0,8 \Delta\sigma_{pr} \quad (8)$$

Relaxáciu ovplyvňuje aj redukcia pomernej deformácie od zmršťovania a dotvarovania, ktorá sa zohľadňuje koeficientom 0,8. Potom zo vzťahu (9)

Po dosadení jednotlivých častí dostávame vzorec (10), kde  $\sigma_{c,qp}$  je napätie v betóne v úrovni výstuže od vlastnej tiaže, počiatočného predpäťia a ďalšieho kvazi-stáleho účinku zaťaženia podľa štádia posudzovania;  $\varepsilon_{cs}$  je absolútna hodnota pomernej deformácie od zmršťovania;  $\Delta\sigma_{pr}$  je absolútna hodnota zmeny napätia vo výstuži v mieste  $x$  v čase  $t$ , následkom relaxácie predpínacej ocele. Určí sa pre  $\sigma_p$  ( $G + P_{m0} + \psi_2 Q$ ).



Obr. 1 Výpočet dlhodobých strát  
Fig. 1 Calculation of time dependent losses

točné zaťaženie alebo ako podiel únosnosti prierezu.

**MEZDNÉ STAVY  
POUŽÍVATEĽNOSTI**

Účinok predpínacej sily sa uvažuje ako účinok vonkajšieho zaťaženia. Určíme dve charakteristické hodnoty predpínacej sily pre priaznivé alebo nepriaznivé pôsobenie, tzv. dolnú a hornú hodnotu,  $r_{inf}$  resp.  $r_{sup}$  ako doplnkový prvok spoľahliv-

**ÚČINKY PREDPÄTIA**

Predpínacie sily spôsobujú v prvkoch pozdĺžne a priečne pretvorenia. Ak je týmto deformáciám bránené (napr. staticky neurčité, spojité nosníky) vzniká sekundárny účinok predpäťia. Ak však simulujeme účinnok predpäťia silami v kotvení a radiálnymi silami v zakrivených častiach lana, ktoré spolu s reakciami tvoria samozáťažný stav, premietne sa celkový účinok predpäťia do vnútorných síl.

Strednú hodnotu predpínacej sily v čase  $t$ , vo vzdialenosti  $x$  od aktívneho miesta predpínania vypočítame podľa vzorca:

$$P_{m,t}(x) = P_{max} - A_p \sum |\Delta\sigma_i|, \quad (11)$$

kde  $\sum |\Delta\sigma_i|$  je suma absolútnych hodnôt okamžitých a dlhodobých strát,  $P_{max}$  je maximálna sila v aktívnom mieste predpínania.

Účinky predpäťia sa posudzujú diferencovane pri medznom stave použiteľnosti a pri medznom stave únosnosti. Vnútnomé sily od predpäťia sa uvažujú v rovnovážnych podmienkach ako doda-

Kombinácia zafaženia ⇒	Skoro stála	Častá	Skoro stála
Trieda prostredia ↓	Betonárska oceľ a nesúdržná predpínacia výstuž	Súdržná predpínacia výstuž	
XC1	0,4 mm	0,2 mm	D
XC2 – XC4 XD1 – XD2	0,3 mm		

Tab. 3 Odporúčané hodnoty  $w_{max}$  [1] 7.3  
Tab. 3 Recommended values of  $w_{max}$  [1] 7.3

vosti. Platí to zvlášť pri zohľadnení staticky neurčitého pôsobenia predpätia.

$$P_{k,sup} = r_{sup} P_{m,t}(x) \quad (12)$$

$$P_{k,inf} = r_{inf} P_{m,t}(x) \quad (13)$$

Odporúčané hodnoty:

- pre vopred predpäté a nesúdržné výstuže  $r_{sup} = 1,05$ ;  $r_{inf} = 0,95$ ,
- pre dodatočné predpätie – súdržné výstuže  $r_{sup} = 1,10$ ;  $r_{inf} = 0,90$ .

Príslušné okrajové vlákna kritického prierezu sa posudzujú na základe prostredia a spôsobu predpätia podľa tabuľky 3, kde sa uvádza prípustná šírka trhliny resp. kritérium vzniku ťahových napätí „D“.

- D (dekompresia) – výstuž aj kanálik leží min. 25 mm vo vnútri tlakovej oblasti.
- Korózia vyvolaná karbonatizáciou XC1 – stále suché alebo mokré prostredie, XC2–XC4 – premenné suché a mokré prostredie.
- Korózia vyvolaná chloridmi XD.

### MEZDNÉ STAVY ÚNOSNOSTI

Účinok predpätia sa uvažuje na strane únosnosti prierezu. Predpínacia oceľ pôsobí ako výstuž vysokej pevnosti. Rozptyl predpínacej sily sa zanedbáva. Návrhová hodnota predpínacej sily sa určí zo strednej hodnoty  $P_{d,t}(x) = \gamma_p P_{m,t}(x)$ , pričom čiastkový koeficient spoľahlivosti  $\gamma_p = 1,0$  ([1]2.4.2.2).

Pri výpočte zvýšenia napätia v **nesúdržnej výstuži** je treba zohľadňovať deformáciu celého nosníka. Uvažujeme s priemernými hodnotami vlastností materiá-

Obr. 3 Dĺžkové parametre prenosu predpätia vopred predpínaných nosníkov

Fig. 3 Transfer of prestress in pre-tensioned elements; length parameters

lov. Návrhovú hodnotu zvýšenia napätia vo výstuži určíme:

$$\Delta\sigma_{pd} = \Delta\sigma_p \gamma_{\Delta P} \quad (14)$$

Odporúčané hodnoty pre dolnú a hornú hodnotu koeficienta spoľahlivosti sú 0,8 a 1,2.

Zvýšenie napätia v predpínacej nesúdržnej výstuži možno uvažovať hodnotou  $\Delta\sigma_{p,ULS} = 100$  MPa ak deformačný stav nosníka nie je známy.

Pri posúdeniach šmyku a pretlačenia, kde sa nepredpokladá dosiahnutie medze klzu predpínacej ocele, je treba zohľadniť pri určení  $P_{m,t}$  aj dlhodobé straty.

Predpínacia sila prispieva k zvýšeniu šmykovej pevnosti betónu svojou normálovou zložkou hodnotou 0,15  $\sigma_{cp}$  resp. v prípade zakrivených predpínacích výstuží svojou zvislou zložkou.

### PREDPÍNACIE VÝSTUŽE

#### Kotvenie

V kotevných oblastiach vopred predpätých nosníkov uvažujeme s:

- prenosovou dĺžkou  $\ell_{pt}$ , ktorou sa preniesie do betónu predpínacia sila  $P_{0i}$ ;
  - rozptylovou dĺžkou  $\ell_{disp}$ , ktorou sa napätia v betóne rozptýlia do lineárneho priebehu;
  - kotevnou dĺžkou  $\ell_{bpd}$ , ktorou sa preniesie do betónu sila vo výstuži  $F_{pd}$  pri MSÚ.
- Základná hodnota prenosovej dĺžky je daná

$$\ell_{pt} = \alpha_1 \alpha_2 \phi_p \sigma_{pm0} / f_{bpt} \quad (15)$$

kde  $\sigma_{pm0}$  je napätie vo výstuži po vnesení predpätia;  $\alpha_1 = 1,0$  pre postupné (graduálne) vnesenie a  $\alpha_1 = 1,25$  pre náhle vnesenie predpätia;  $\alpha_2 = 0,25$  pre káble s kruhovým pričným rezom,  $\alpha_2 = 0,19$  pre 3 a 7 drôtové laná;  $f_{bpt}$  je napätie v súdržnosti

$$f_{bpt} = \eta_{p1} \eta_1 f_{ctd}(t). \quad (16)$$

$f_{ctd}(t)$  je návrhová ťahová pevnosť betónu v čase vnesenia predpätia,  $\eta_{p1} = 2,7$  pre drôty s tvarovaným povrchom,  $\eta_{p1} = 3,2$  pre 3 a 7 drôtové laná,  $\eta_1$  je koeficient závislý od podmienok kotvenia, 1,0 pre dobré a 0,7 pre zlé podmienky.

Návrhová hodnota prenosovej dĺžky sa uvažuje hodnotou 0,8  $\ell_{pt}$  pre posúdenie miestnych napätí pri vnesení predpätia a hodnotou 1,2  $\ell_{pt}$  pre posúdenie medzných stavov únosnosti – šmyk a kotvenie.

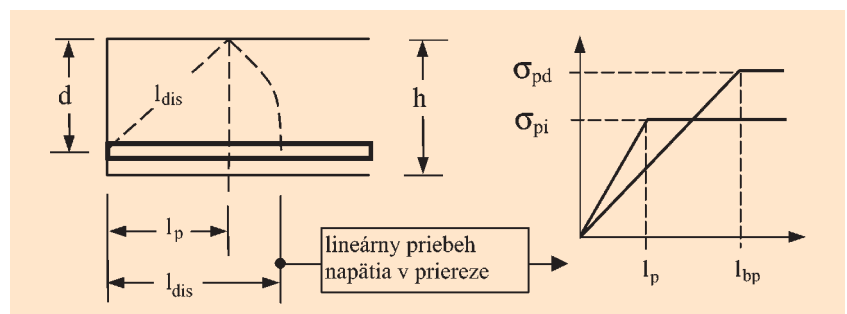
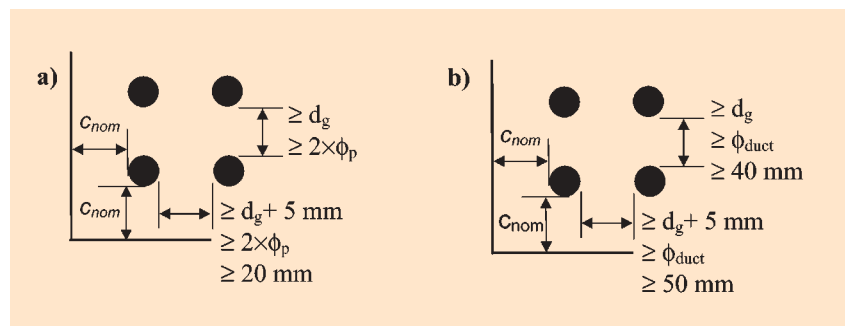
- Rozptylovú dĺžku určíme zo vzorca:

$$\ell_{disp} = \sqrt{\ell_{pt}^2 + d^2} \quad (17)$$

- Kotevnú dĺžku určíme zo vzorca (18);

Obr. 2 Minimálne svetlé vzdialenosti  
a) medzi vopred predpätou výstužou,  
b) medzi káblovými kanálikmi

Fig. 2 Minimum clear spacing  
a) between pre-tensioned tendons,  
b) between ducts



$$\ell_{bpd} = \ell_{pt2} + \alpha_2 \phi_p (\sigma_{pd} - \sigma_{pm\infty}) / f_{bpd} \quad (18)$$

Tab.4 Materiálové a prierezové charakteristiky

Tab.4 Material and sectional properties

kde  $f_{bpd}$  je napätie v súdržnosti pri medznom stave únosnosti  $f_{bpd} = \eta_{p2} \eta_1 f_{ctd} \eta_{p2} = 1,4$  pre drôty s tvarovaným povrchom,  $\eta_{p1} = 1,2$  pre 7 drôtové laná.

Betón				Predpínacia oceľ			Prierezové charakteristiky		
$f_{ck}$	$f_{cm}$	$f_{ctm}$	$E_{cm}$	$f_{pk}$	$f_{p0.1k}$	$E_p$	$A_c$	$I_c$	$t_c$
40	48	3,5	35	1860	1580	195	0,325	0,01732	0,229
[MPa]				[GPa]			[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>4</sup> ]	[m]

### PRÍKLAD NÁVRHU A POSÚDENIA PREDPÄTÉHO NOSNÍKA

Ide o návrh vopred predpätého strešného panela TT dĺžky 16 m, vyrobeného z betónu triedy C40/50 a predpätého stabilizovanými lanami ØLs 12,5 mm/1860 MPa. Uvažovaná trieda prostredia je XC3. Vnesenie predpätia sa predpokladá pri dosiahnutí minimálne 75% priemernej 28-dňovej pevnosti betónu.

Teoretické rozpätie prvku je  $\ell_{eff} = \ell_n - 2 a_e / 2 = 15,7$  m, kde  $a_e$  je dĺžka uloženia,  $a_e = 0,3$  m.

#### Zaťaženie

- Vlastná tiaž nosníka (25 kN/m<sup>3</sup>):  $g_{0,k} = 8,1$  kN/m
- Ostatné stále zaťaženie (1,5 kN/m<sup>2</sup>):  $g_{1,k} = 3,6$  kN/m
- Premenné zaťaženie (sneh 1,5 kN/m<sup>2</sup>):  $q_k = 3,6$  kN/m
- Návrhová hodnota zaťaženia:  $f_d = 1,35 \cdot (g_{0,k} + g_{1,k}) + 1,5 q_k = 21,2$  kN/m
- Charakteristická hodnota zaťaženia:  $f_k = (g_{0,k} + g_{1,k}) + q_k = 15,3$  kN/m
- Kvázi-stála hodnota zaťaženia (sneh,  $\psi_2 = 0$ ):  $f_{qp} = g_{0,k} + g_{1,k} = 11,7$  kN/m

#### Návrh predpínacej výstuže

Krytie predpínacej výstuže:

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

$$c_{nim} = \max \{c_{min,b}, c_{min,dur}\} = \max \{2 \phi_p, 30 \text{ mm}\} = 30 \text{ mm},$$

kde  $c_{min,dur}$  je stanovená pre konštrukčnú triedu S3 a triedu prostredia XC3 (tab. 4.5N [1]),  $\phi_p$  je priemer predpínacej výstuže  $\phi_p = 12,5$  mm.

Predpokladaný počet lán do jednej stojiny je 4, osová vzdialenosť lán 38 mm.

$$a_p = c_{nom} + \phi_p + a_{cfr} / 2 = 35 + 12,5 + 25,5 / 2 = 60,3 \text{ mm}$$

$$e_p = h_n - t_c - a_p = 0,74 - 0,229 - 0,06 = 0,451 \text{ m}$$

kde  $a_{cfr}$  je hrúbka betónu medzi dvomi rovnobežnými lanami (obr. 2a).

Potrebnú plochu predpínacej výstuže navrhujeme z požiadavky, aby pri pôsobení

ní stálych a dlhodobých zaťažení nenastala v kritickom priereze dekompresia:

#### Výpočet strát predpätia

Okamžité straty predpätia v prípade VPB sú ovplyvnené najmä typom výrobnjej

$$\sigma_{cl} = -\frac{P_{k,inf}}{A_c} + \frac{M_{Eqp} - P_{k,inf} e_p}{I_c} (h_n - t_c) = 0$$

$$M_{Eqp} = f_{qp} \ell_{eff}^2 / 8 = 11,33 \cdot 15,7^2 / 8 = 361,5 \text{ [kNm]}$$

$$P_{k,inf} = \frac{1}{\frac{1}{0,325} + \frac{0,451}{0,01732} (0,74 - 0,229)} \cdot \frac{0,362}{0,01732} (0,74 - 0,229) = 0,659 \text{ [MN]}$$

$$P_{m0} = \frac{P_{k,inf}}{r_{inf} (1 - \lambda_{p,\infty})} = \frac{0,659}{0,95 (1 - 0,20)} = 0,867 \text{ [MN]} \text{ (odhad dlhodobých strát 20 \%)}$$

$$\sigma_{pm0} = \min \{0,75 f_{pk}, 0,85 f_{p0.1k}\} = \min \{1395, 1343\} = 1340 \text{ [MPa]}^1)$$

$$A_{p,rqd} = P_{m0} / \sigma_{pm0} = 0,867 / 1340 = 6,47 \cdot 10^{-4} \text{ [m}^2\text{]}$$

$$n_p = A_{p,rqd} / A_{pl} = 647 / 93 = 6,96 \Rightarrow \text{návrh 8 lán} \Rightarrow A_p = 8 \cdot 93 = 744 \text{ [mm}^2\text{]}$$

#### Overenie ohybovej odolnosti

$$M_{Ed,max} = f_d \ell_{eff}^2 / 8 = 21,24 \cdot 15,7^2 / 8 = 654,4 \text{ [kNm]}$$

$$f_{cd} = f_{ck} / \gamma_C = 40 / 1,5 = 26,7 \text{ [MPa]} \quad (f_{pd} = f_{p0.1k} / \gamma_S = 1580 / 1,15 = 1374 \text{ [MPa]})$$

$$F_{pd} = A_p f_{pd} = 0,000744 \cdot 1374 = 1,022 \text{ [MN]}$$

$$x_u = \frac{F_{pd}}{\lambda b_{eff} f_{cd}} = \frac{1,022}{0,8 \cdot 2,39 \cdot 26,7} = 0,02 \text{ [m]}$$

$$z = h_n - a_p - 0,5 \cdot \lambda x_u = 0,74 - 0,061 - 0,008 = 0,671 \text{ [m]}$$

$$M_{Rd} = F_{pd} z = 0,686 \text{ [MNm]} \geq M_{Ed,max} = 0,655 \text{ [MNm]}$$

$\alpha_e = E_p / E_{cm}$	$A_p$	$A_{ci}$	$I_{ci}$	$t_{ci}$	$e_{pi}$
5,571	744	0,328	0,0180	0,234	0,446
-	[mm <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>4</sup> ]	[m]	[m]

Tab. 5 Ideálne prierezové charakteristiky

Tab. 5 Gross sectional properties

linky a spôsobom predpínania. Obyčajne sú menšie ako rozdiel medzi maximálnym prípustným napätím na predpínacej pištoli  $\sigma_{pmax}$  a maximálnym dovoleným napätím v čase transferu  $\sigma_{pm0}$ . Preto ďalej predpokladáme, že predpínacie napätie v čase transferu je 1340 MPa. V našom prípade napätie  $\sigma_{pm0}$  nezahŕňa stratu z pružného pretvorenia prvku. Tú zohľadníme uvážením ideálnych prierezových charakteristík (tab. 5).

### Dlhodobé straty predpätia od relaxácie výstuže

$$\sigma_{pi} = \sigma_{pm0} = 1340 \text{ MPa}^1)$$

$$\mu = \sigma_{pi} / f_{pk} = 1340 / 1860 = 0,72$$

Predpínaciu výstuž tvoria laná s nízkou relaxáciou (trieda 2), pre ktoré je možné stratu po 1000 hodinách uvažovať  $\rho_{1000} = 2,5\%$ .

Poznámka 1: Pri stanovení hodnoty napätia  $\sigma_{pi}$  je možné zohľadniť aj stratu z pružného pretvorenia prvku.

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

$$= 1340 \left[ 0,66 \cdot 2,5 e^{9,1 \cdot 0,72} \left( 500000 / 1000 \right)^{0,75(1-0,72)} \right] \cdot 10^{-5} = 57,1 \text{ [MPa]}$$

### Dlhodobé straty predpätia od zmršťovania a dotvarovania betónu

Predpokladáme vnútorné prostredie s RH = 50 %. Vnesenie predpätia sa uskutoční pri dosiahnutí 75 % pevnosti betónu, čo pri použití rýchlo tuhnúceho cementu CEM I 42,5R zodpovedá chemickému veku betónu cca  $t_0 = 5$  dní. Začiatok pôsobenia ostatných stálych zaťažení predpokladáme pri chemickom veku betónu  $t_1 = 30$  dní.

• Dĺžka obvodu prierezu vystaveného prostrediu  $u = 7580$  mm

$$h_0 = 2A_{ci} / u = 2 \cdot 325000 / 7580 = 86 \text{ [mm]} \Rightarrow k_h = 1,0 \text{ z tab. 3.3 [1]}$$

• Z tab. 3.2 [1] pre betón C40/50 a RH = 50 % je

$$\varepsilon_{cd,\infty} = k_h \varepsilon_{cd0} = 0,00044,$$

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2,5(f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6} = 0,000075$$

$$\varepsilon_{sc} = \varepsilon_{cd}(\infty) + \varepsilon_{ca}(\infty) = 0,000444 + 0,000075 = 0,000515$$

• Z obr. 3.1 [1] pre betón C40/50, RH = 50 % a  $h_0 = 86$  mm je  $\varphi(\infty,5) = 2,45$  a  $\varphi(\infty,30) = 2,0$ .

• Napätie v betóne od predpínacej sily a vlastnej tiaže nosníka v mieste  $x = 0,5 \ell_{eff}$ .

• Pevnosť betónu v súdržnosti:

$$f_{bpt} = \eta_{p1} \eta_1 f_{ctd}(t_0) = 3,2 \cdot 1,0 \cdot 1,225 = 3,92 \text{ [MPa]}$$

$$f_{ctd}(t_0) = 0,7 \cdot f_{ctm}(t_0) / \gamma_c = 0,7 \cdot 0,75 \cdot 3,5 / 1,5 = 1,225 \text{ [MPa]}$$

• Dĺžka potrebná na vnesenie predpínacej sily do prvku:

$$\ell_{pt} = \alpha_1 \alpha_2 \phi_p \sigma_{pm0} / f_{bpt} = 1,0 \cdot 0,19 \cdot 12,5 \cdot 1340 / 3,92 = 812 \text{ [mm]}$$

$$P_{m0} = \sigma_{pm0} A_p = 1340 \cdot 0,000744 = 0,997 \text{ [MN]}$$

$$M_{Eg0} = 0,250 \text{ [MNm]} \quad (M_{Eg1} = 0,111 \text{ [MNm]})$$

$$\sigma_{c,pgo} = -\frac{P_{m0}}{A_{ci}} + \frac{M_{Eg0} - P_{m0} e_{pi}}{I_{ci}} e_{pi} = -7,872 \text{ [MPa]} \quad (\sigma_{c,g1} = 2,737 \text{ [MPa]})$$

$$\Delta\sigma_{p,s+c+r} = \frac{-\varepsilon_{cs} E_p + \alpha_e \varphi(\infty,5) \sigma_{c,pgo} - 0,8 \Delta\sigma_{pr}}{1 + \lambda(\infty,5)} + \frac{\alpha_e \varphi(\infty,30) \sigma_{c,g1}}{1 + \lambda(\infty,30)}$$

$$\lambda(\infty,5) = \alpha_e \frac{A_p}{A_{ci}} \left( 1 + \frac{A_{ci}}{I_{ci}} e_{pi}^2 \right) [1 + 0,8 \varphi(\infty,5)] = 0,173 \quad [\lambda(\infty,30) = 0,152]$$

$$\Delta\sigma_{p,s+c+r} = -216,1 + 26,5 = -189,6 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_{pm\infty} = \sigma_{pm0} + \Delta\sigma_{p,s+c+r} = 1340 - 190 = 1150 \text{ [MPa]}$$

• Dolná hodnota dĺžky potrebnej na vnesenie predpätia:

$$\ell_{pt1} = 0,8 \ell_{pt} = 650 \text{ [mm]}$$

• Horná hodnota dĺžky potrebnej na vnesenie predpätia:

$$\ell_{pt2} = 1,2 \ell_{pt} = 975 \text{ [mm]}$$

• Kritický prierez:

$$x = \ell_{pt1} - 0,50 \text{ m} = 0,15 \text{ m}$$

$$\sigma_c(x, z) = -\frac{P_{k,sup}}{A_{ci}} + \frac{M_{Eg0}(x) - P_{k,sup} e_{pi}}{I_{ci}} (z - t_{ci})$$

$$\sigma_c(x, h_n) = |-16,8| \text{ MPa} \leq 0,7 f_{ck}(t_0) = 0,7 \cdot 28 = 19,6 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_c(x, 0) = 2,9 \text{ MPa} > f_{ctm}(t_0) = 0,75 \cdot 3,5 = 2,6 \text{ [MPa]}$$

(vznik trhliny sa očakáva),

### Overenie trvanlivosti konštrukcie

V štádiu predpínania musíme posúdiť maximálne tlakové napätia v úrovni predpínacej výstuže. Pri absencii hornej predpínacej výstuže posudzujeme horné ťahové napätia v betóne z hľadiska vzniku trhliny. Trhliny sú príčinou zmeny prierezových charakteristík, čo vedie ku nárastu tlakových napätí v dolných vláknach prvku. Súčasne môžu nepriaznivo ovplyvniť premenlivosť vzopätí nosníkov. Posúdenie robíme v prierezoch, kde predpokladáme plné rozvinutie predpínacej sily. Teoretické rozpätie pre posúdenie bolo určené z polohy závesných hákov.

Vzdialenosť závesných hákov je 0,50 m od čela nosníka:

$$\ell_{eff0} = 16 - 2 \cdot 0,50 = 15,0 \text{ [m]}$$

kde je  $P_{k,sup} = r_{sup} \sigma_{pm0} A_p = 1,05 \cdot 1340 \cdot 0,000744 = 1,047$  [MN],  $f_{ck}(t_0) = 0,75 f_{cm} - 8$  MPa =  $0,75 \cdot 48 - 8 = 28$  [MPa]

V **štádiu užívania** posudzujeme napätia v betóne od stálych a dlhodobých zložiek zaťaženia, pričom predpínacia výstuž musí ležať najmenej 25 mm vo vnútri tlačeneho betónu.

$$\sigma_c(0,5 \ell_{eff}, z) = -\frac{P_{k,inf}}{A_{ci}} + \frac{M_{Eqp} - P_{k,inf} e_{pi}}{I_{ci}} (z - t_{ci}) = -2,5 \text{ MPa} \leq 0 \text{ MPa}$$

kde je  $z = h_n - c_{nom} + 25$  mm = 730 [mm],  $P_{k,inf} = r_{inf} \sigma_{pm\infty} A_p = 0,95 \cdot 1150 \cdot 0,000744 = 0,812$  [MN].

Súčasne šírka trhliny od častej kombinácie zaťaženia  $w_k \leq 0,2$  mm. V tomto prípade je výhodné overiť, či vôbec trhlina vznikne. Trhlinu očakávame, ak maximálne napätie v betóne pri charakteristickej kombinácii zaťaženia prekročí hodnotu  $f_{ctm}$ .

$$\sigma_c(0,5 \ell_{eff}, h_n) = -\frac{P_{k,inf}}{A_{ci}} + \frac{M_{Ek} - P_{k,inf} e_{pi}}{I_{ci}} (h_n - t_{ci}) = 0,6 \text{ [MPa]} < f_{ctm} = 3,5 \text{ [MPa]}$$

kde je  $M_{Ek} = f_k \ell_{eff}^2 / 8 = 15,33 \cdot 15,7^2 / 8 = 472,3$  [kNm]

#### Overenie šmykovej odolnosti

Šmykovú odolnosť overujeme v priereze, v ktorom priesečník priamky vychádzajúcej od líca podpory pod 45°, pretína ťažiskovú os prvku. Poloha kritického rezu:

$$x = h_n - t_c + a_\ell - a_\ell / 2 = 0,74 - 0,229 + 0,30 / 2 = 0,331 \text{ [m]}$$

$$\alpha_\ell = (x + a_\ell / 2) / \ell_{pt2} = (0,661 + 0,15) / 0,975 = 0,83$$

$$P_{k,inf} = r_{inf} A_{p,sup} \sigma_{pm\infty} (x) = 0,95 \cdot 6,0000093 \cdot 1121 = 0,594 \text{ [MN]} \text{ (2 separované laná)}$$

$$\sigma_{cp} = N_{Ed} / A_c = \gamma_p P_{k,inf} (x) / A_c = 1,0 \cdot 0,594 / 0,325 = 1,83 \text{ [MPa]} \text{ (tlak)}$$

$$f_{ctd} = 0,7 f_{ctm} / \gamma_c = 1,633 \text{ [MPa]}$$

$$\alpha_\ell = (x + a_\ell / 2) / \ell_{pt2} = (0,661 + 0,15) / 0,975 = 0,83$$

$$V_{Rd,c} = \frac{I_c b_w}{S_{c,max}} \sqrt{(f_{ctd})^2 + \alpha_\ell \sigma_{cp} f_{ctd}} \geq V_{Ed}(x) = f_d (0,5 \ell_{eff} - x)$$

$$V_{Rd,c} = \frac{0,01732 \cdot 0,24}{0,033} \cdot \sqrt{1,633^2 + 0,83 \cdot 1,83 \cdot 1,633} = 0,233 \text{ [MN]} > 0,154 \text{ [MN]}$$

#### Literatúra:

- [1] EN 1992-1-1 Eurocode 2: Design of concrete structures. Brussels: CEN, 225 s.
- [2] FILLO Ľ.: Predpätie, in EC2: Navrhování betonových konstrukcí. Eurocode 2, Praha, 10/2003. p. 45–53
- [3] ZILCH K., ROGGE A.: Bemessung der Stahlbeton-und Spanbetonbauteile... In: Beton Kalender 1. Karlsruhe: Ernst & Sohn, 2002, s. 217–361

Prof. Ing. Ľudovít Fillo, PhD.  
Doc. Ing. Jaroslav Halvoník, PhD.  
Stavebná fakulta STU v Bratislave  
Radlinského 11, 813 68 Bratislava, SK  
tel.: +421 2 5296 1749,  
fax: +421 2 5296 7027  
e-mail: fillo@svf.stuba.sk,  
halvonik@svf.stuba.sk  
www.svf.stuba.sk

## ING. KAREL ŽOFKA, 1922 AŽ 2003

Karel Žofka byl původem z rodu jihočeských lesníků (pradědeček ve službách rodu Este si přivezl prababičku z Modeny). Léta druhé světové války strávil nasazen v německém Kielu jako kreslič a konstruktér s příležitostným výdělkem barového klavíristy. Po válce po krátkém intermezzu v leteckém ústavu v Letňanech absolvoval v roce 1950 na ČVUT v Praze obor KD.

V roce 1949 nastupuje v Báňských projektech v Praze a záhy se stává vedoucím oddělení statiky. Po roce 1959 odchází do Sdružení maltovin a po dvou letech do IPS Praha, kde se opět stává vedoucím oddělení statiky. Malá ochota brát politickou situaci jako neměnnou realitu ho však po dvou letech opět nutí měnit místo. Typické bylo jeho shrnutí: „nejhorší chybou socialismu je, že bere lidem osobní iniciativu“. Od roku 1965 se stává výzkumným pracovníkem VÚPS Praha. Není mu povoleno obhájit vědecké práce, přesto uplatní svůj teoretický potenciál i praktickou zkušenost na vývoji vícepodlažních průmyslových staveb, teorii plechobetonových desek soustavy VIP a zejména vlastní kombinované ocelo-betonové soustavy VKS s patentovaným předpjatým styčnickem železobetonových sloupů a ocelových průvlaků. V této soustavě pak realizuje mimo jiné Technolen v Lomnici nad Popel-



kou, Lázeňský dům v Luhačovicích, třídírnou zásilek ČSP v Praze-Malešicích a konstrukci kulturního domu v Teplicích podle projektu arch. Hubáčka (BETON TKS 5 a 6/2002).

Celý život hraje na klavír, miluje cestování – s vozem Aero 662, všemožně udržovaným při životě, je léta členem klubu Aero, miluje knihy, které vášnivě sbírá a čte. K cestám po vlastech Českých časem přibýly cesty po Evropě, zvláště po památkách Itálie.

V důchodu pobýl jen krátce. Po roce 1989 začal opět projektovat ve společné kanceláři se synem. Po sedmdesátce se přeorientoval na počítačovou statiku, nový počítač si pořídil po osmdesátce a poslední projekt, více než stostránkový výpočet ocelové haly pro Nohel Garden, dokončil den před smrtí.

Obdivuhodná byla jeho vytrvalá aktivita až profesní při organizování Konzultačního sboru poradců při ČSSI, v kauze Karlova mostu atd., či občanská pro radnici v Mníšku, kam se z Prahy odstěhoval. Zprostředkoval vystupování studentů pražské konzervatoře na mníšeckém zámku, hrál s vnučkou skladby pro klavír a zobcovou flétnu, příležitostně doučoval studenty, z abonementních koncertů se s manželkou vracel posledním nočním autobusem.

Jeho náhlý odchod všechny zaskočil. Veliký nezaplňený prostor se pozvolna plní laskavými vzpomínkami.

Prof. Ing. Bohumír Voves, DrSc.