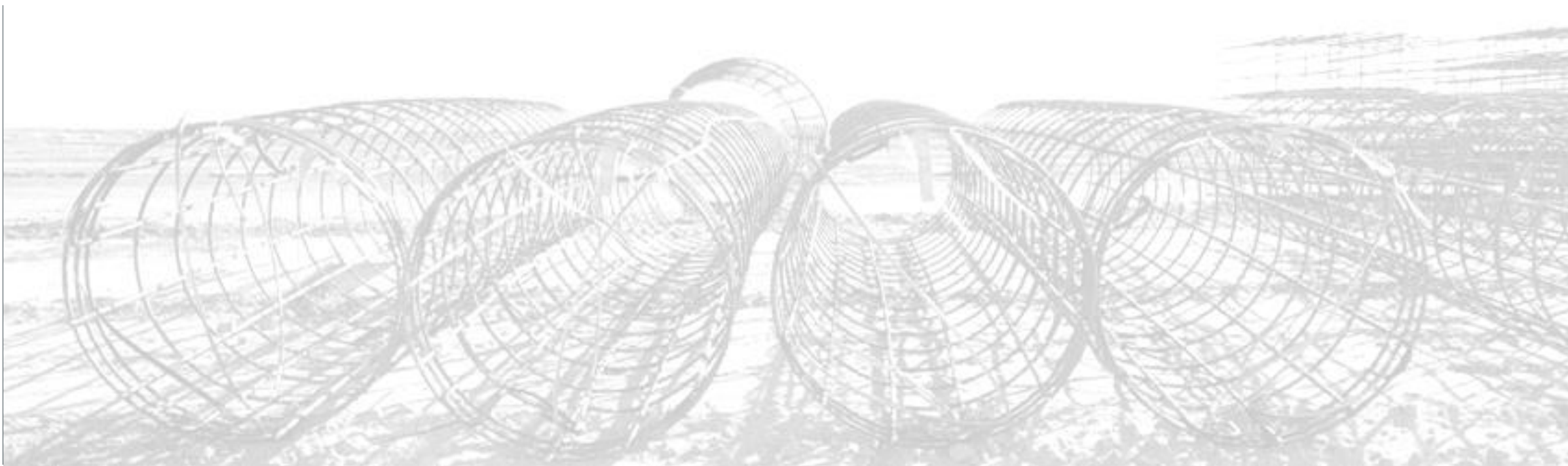


PŘEDPJATÝ BETON – ZTRÁTY PŘEDPĚTÍ

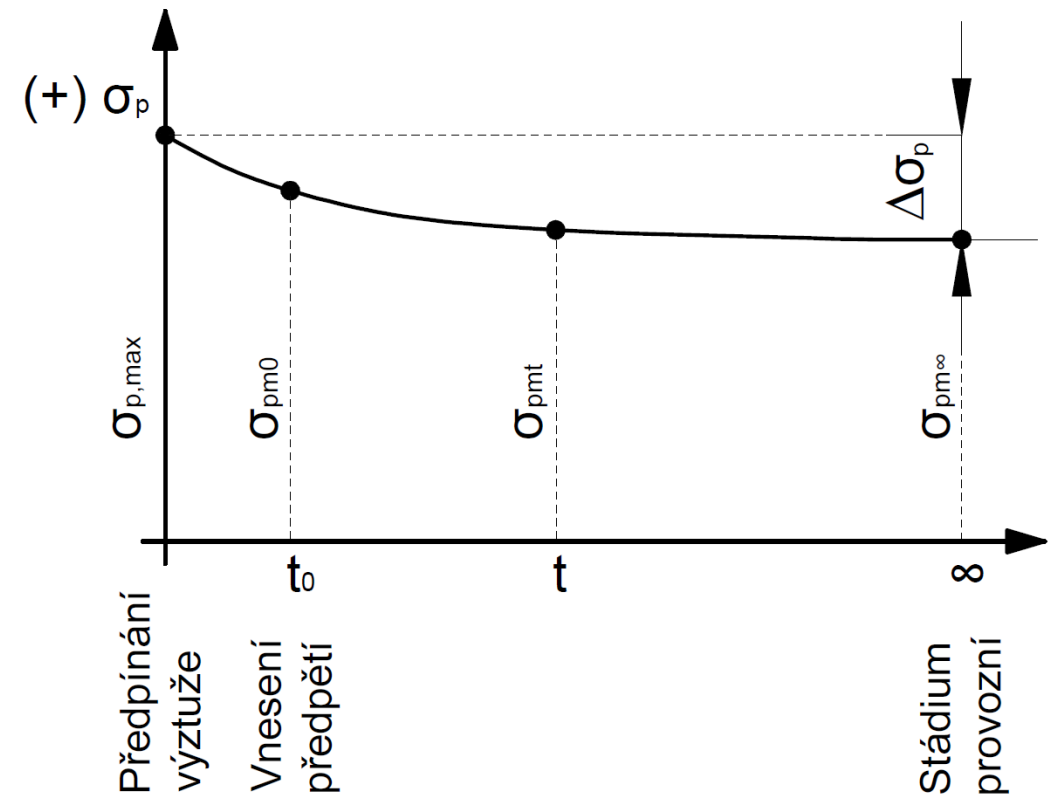
133BOKO – BETONOVÉ A OCELOVÉ KONSTRUKCE | 2023

ING. JOSEF NOVÁK, PH.D. | KATEDRA BETONOVÝCH A ZDĚNÝCH KONSTRUKCÍ | FAKULTA STAVEBNÍ ČVUT V PRAZE



PŘEDPÍNACÍ SÍLA

- Předpínací síla se mění během životnosti konstrukce a po délce kabelu
- Ověření MSÚ a MSP v různých stádiích životnosti konstrukce:
 - Počáteční stádium (stav před, v průběhu a bezprostředně po vnesení předpětí)
 - Průběh výstavby
 - Provozní stav



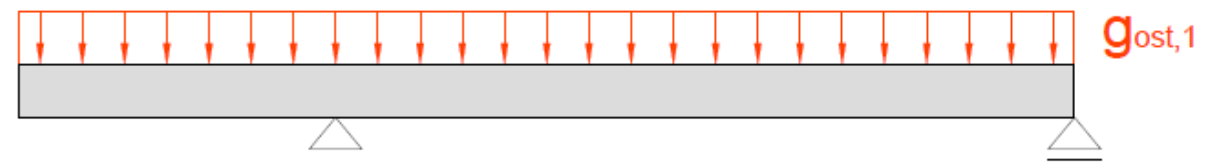
PŘEDPÍNACÍ SÍLA – POČÁTEČNÍ STÁDIUM

- Před vnesením předpětí nutné zajistit kvalitní ošetřování betonu (smršťování, vývoj mechanických vlastností betonu)
- V průběhu předpínání dochází k největšímu namáhání předpínací výztuže a betonu v podkotevní oblasti.
- Po vnesení předpětí je úroveň předpětí stále ještě veliká a z předpokládaného provozního zatížení je konstrukce obvykle vystavena pouze vlastní tíze.

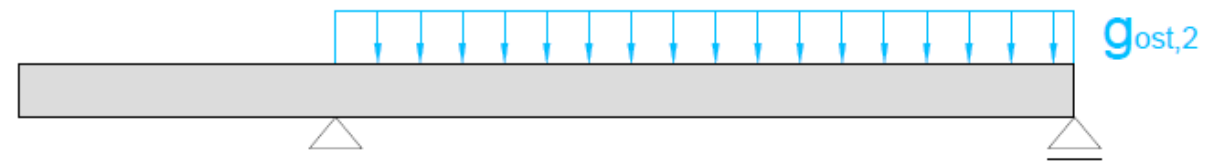
PŘEDPÍNACÍ SÍLA – STÁDIUM VÝSTAVBY

- Stádium, kdy dochází k aplikaci ostatního stálého zatížení, případně skladování stavebního materiálu.
- Možný vznik nepřijatelného namáhání, které povede ke vzniku trhlin

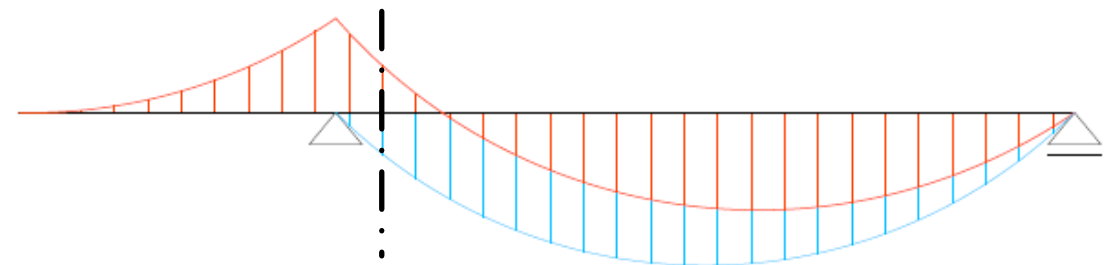
Působení ostatního zatížení po ukončení výstavby



Postupné vkládání ostatního stálého zatížení (skladování materiálu)



Ohybové momenty



ZTRÁTY PŘEDPĚTÍ – PŘEDEM PŘEDPJATÉ PRVKY

Okamžité ztráty

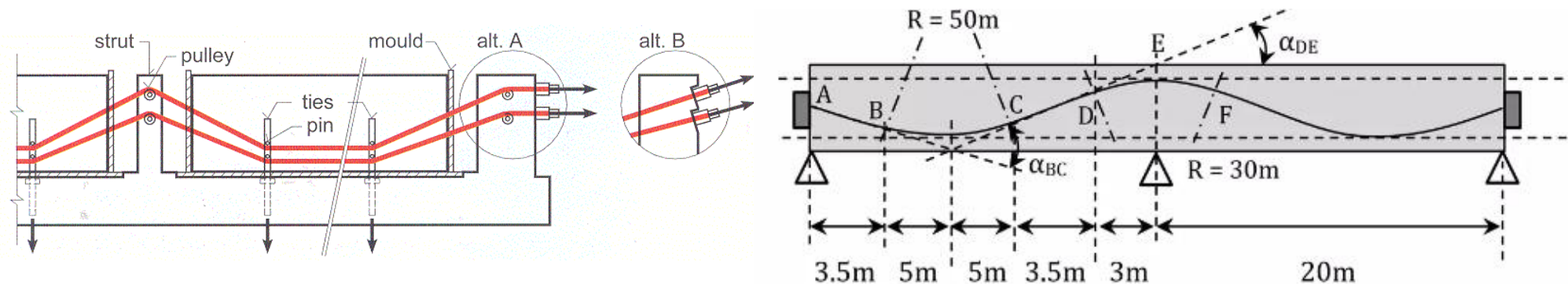
- Ztráty vyvozené pružnou deformací betonu
- Ztráty vyvozené krátkodobou relaxací
- Ztráty vyvozené tření
- Ztráty vyvozené pokluzem v kotvení
- Ztráty vyvozené přetvořením opěrného zařízení
- Ztráty vyvozené postupným předpínáním
- Ztráty vyvozené rozdílem teplot
- Ztráty vyvozené otláčením betonu

Dlouhodobé ztráty

- Ztráty vyvozené dotvarováním betonu
- Ztráty vyvozené smršťováním betonu
- Ztráty vyvozené relaxací výztuže

ZTRÁTY TŘENÍM

- Především u dodatečně předpjatého betonu, kdy při napínání dochází ke tření mezi kabelem a stěnami kabelového kanálku.
- Velikost ztráty třením se skládá:
 - Ztráta třením vyvolané trasou kabelu (obecně nepřímé úseky, oblouky apod.)
 - Ztráta třením vyvolaná nežádoucím zvlněním kabelu



ZTRÁTA TŘENÍM VYVOLANÁ TRASOU KABELU

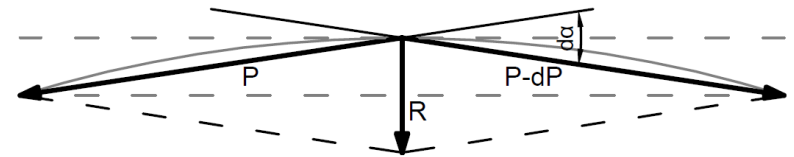
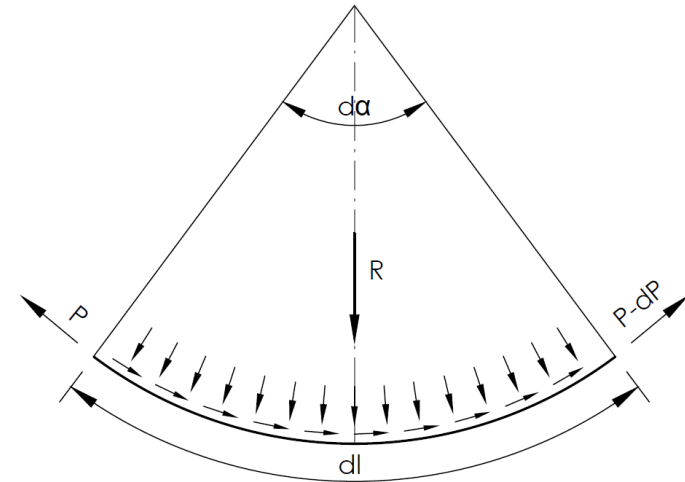
- Vzniká v nepřímých úsecích kabelu
- Předpokládají se velké poloměry oblouků

$$\sin\left(\frac{d\alpha}{2}\right) = \left(\frac{d\alpha}{2}\right)$$

- Radiální síla vychází z rovnováhy sil

$$R = P * d\alpha$$

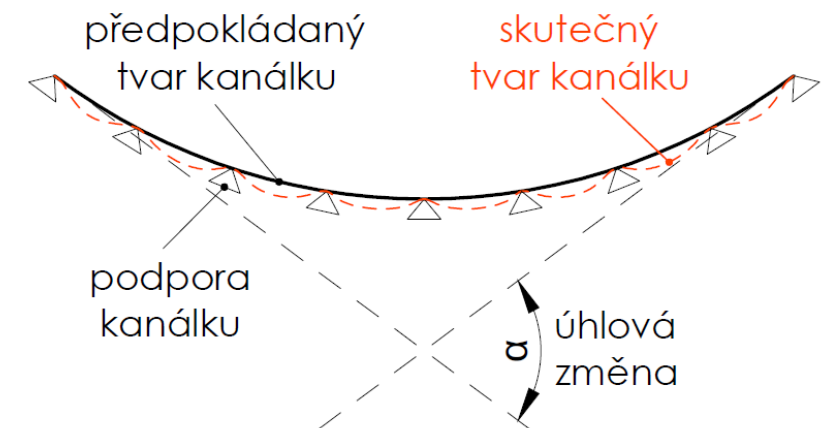
$$dP = -\mu * P * d\alpha$$



ZTRÁTA TŘENÍM VYVOLANÁ NEŽÁDOUCÍM ZVLNĚNÍM KABELU

- Poloha kabelového kanálku fixována distančními mřížkami – deformace pod vlastní tíhou
- Nežádoucí změna kabelu na délce dl vyjádřena jako $k * dl$, kde k je empiricky stanovená nezamýšlená úhlová změna na jednotku délky.

$$dP = -\mu * P * k * dl$$



ZTRÁTA TŘENÍM

- Celková změna předpínací síly po délce kabelu se stanoví:

- $$dP = -\mu * P * d\alpha - \mu * k * P * dl \quad \rightarrow \quad \int_{P_A}^{P_B} \frac{1}{P} dP = -\mu \int_0^{\alpha} d\alpha - \mu * k \int_0^l dl$$

$$\Delta\sigma_{p\mu,l} = -\sigma_{p0,0} * (1 - e^{-\mu(\alpha+k*l)})$$

$\sigma_{p0,0}$ – Napětí v kabelu vyvozené předpínací pistolí při předpínání (před zakotvením) v průřezu „0“ pod kotvou na napínaném konci

α – Celková zamýšlená úhlová změna po délce kabelu l

l – Celková délka kabelu od napínaného konce po vyšetřovaný bod

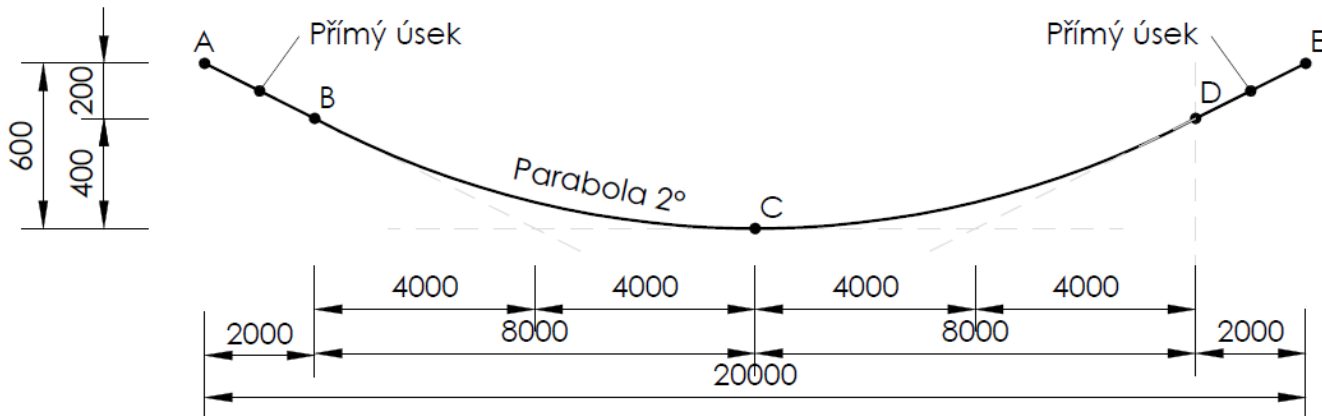
ZTRÁTA TŘENÍM – SOUČINITEL TŘENÍ

- Hodnota μ – povrch, typ a průměr předpínacích vložek, přítomnost maziva
- Hodnota k – kvalita provádění, vzdálenost distančníků, stupeň vibrace, typ a obal kanálku (pro běžné případy v rozmezí 0,005-0,01 m⁻¹)

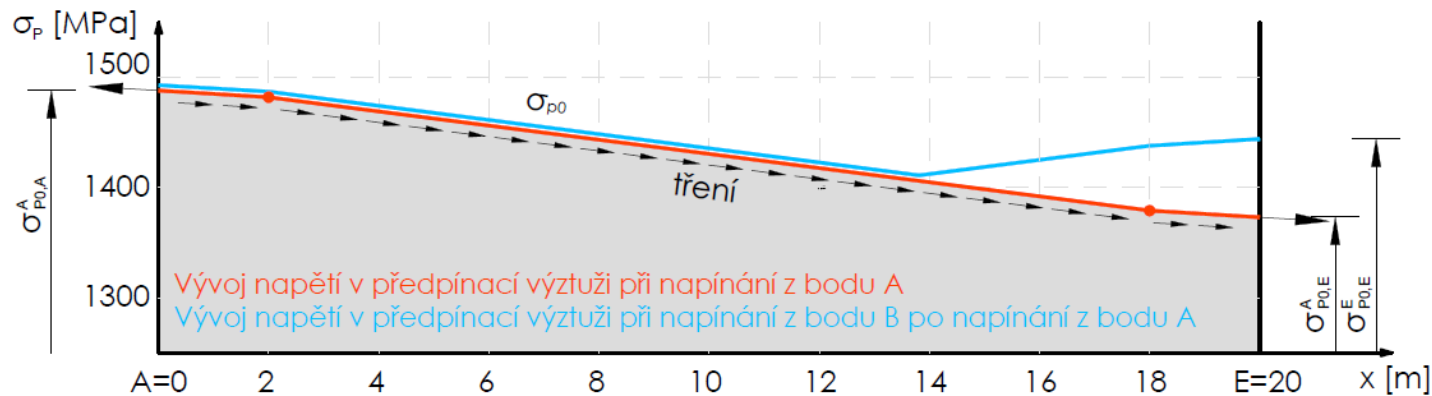
Typ výztuže	Vnitřní předpínací vložky	Vnější nesoudržné předpínací vložky			
		Ocelové kanálky		HDPE kanálky	
		bez maziva	s mazivem	bez maziva	s mazivem
Dráty tažené za studena	0,17	0,25	0,14	0,18	0,12
Lana	0,19	0,24	0,12	0,16	0,10
Žebírkové tyče	0,65	-	-	-	-
Hladké kruhové tyče	0,33	-	-	-	-

ZTRÁTA TŘENÍM – VÝVOJ PO DÉLCE KABELU

Geometrie kabelu



Průběh napětí



Lano	S13/1860
f_{pk} [MPa]	1860
$f_{p0,1k}$ [MPa]	1670
E_p [MPa]	195 000
σ_{pmax} [MPa]	1488
μ [-]	0,2
K [m ⁻¹]	0,01

Pozice	A	B	C	D	E
X [m]	0	2	10	18	20
α_x	0	0	0,1	0,2	0,2
$\sigma_{p0,x}$ [MPa]	1488	1482	1429	1379	1374

ZTRÁTA PŘEDPĚTÍ POKLUZEM KOTVY

- V důsledku pokluzu kotevního kuželíku a lana v kotevní objímce dochází ke snížení napětí v předpínací výztuži.

- Rozlišuje se:

- Ztráta předpětí bez uvážení tření (obvykle předem předpjatý beton)

$$\Delta p_{pw} = - \frac{w * E_p}{l}$$

- Ztráta předpětí s uvážením tření (obvykle dodatečně předpjatý beton)

ZTRÁTA PŘEDPĚTÍ POKLUZEM KOTVY S UVÁŽENÍM TŘENÍM

- V důsledku pokluzu kotevního kuželíku a lana v kotevní objímce dochází ke snížení napětí v předpínací výztuži

$$\Delta\sigma_{pw} = \sigma_{pa} - \sigma_{p0}$$

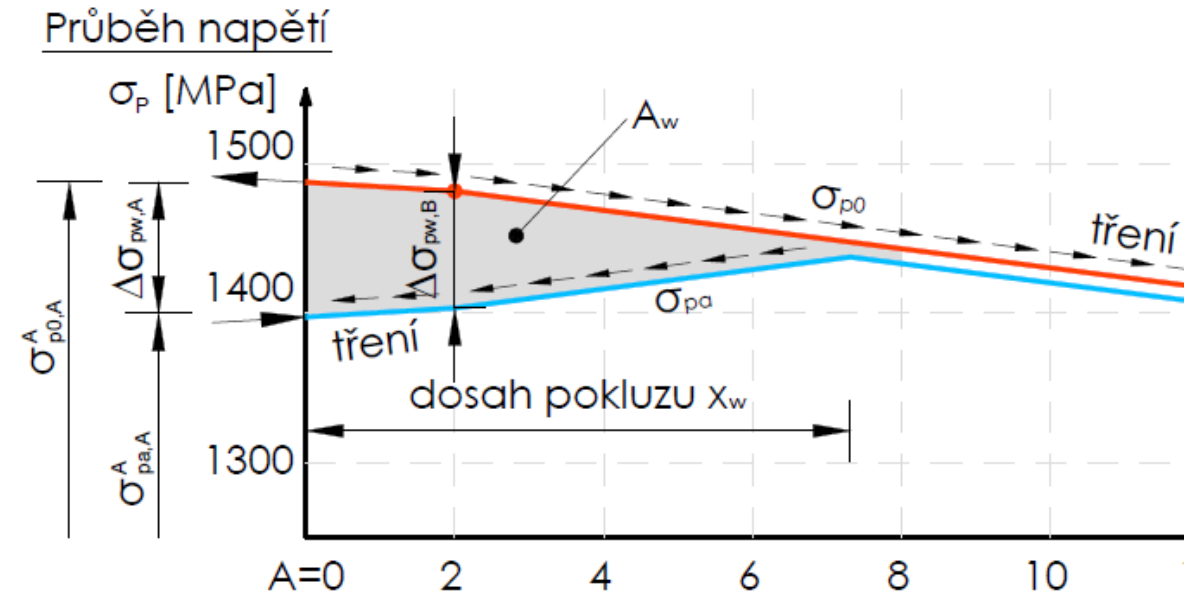
$$\sigma_{pa,x} = \sigma_{pa,A} * e^{\mu*(\alpha_x+k*x)}$$

$$\Delta\sigma_{pa,A} = \sigma_{p0,A} * e^{-2*\mu*(\alpha_w+k*x_w)}$$

$$\Delta\sigma_{pw} = \sigma_{pa,A} * e^{\mu*(\alpha_x+k*x)} - \sigma_{p0,A} * e^{-\mu*(\alpha_x+k*x)}$$

$$w = - \int_0^{l_w} \Delta\varepsilon_{pw} * dl = - \frac{1}{E_p} * \int_0^{l_w} \Delta\sigma_{pw} * dl$$

zjednodušeně: $w = \frac{1}{E_p} * A_w$



ZTRÁTA PŘEDPĚTÍ PRUŽNÝM PŘETVOŘENÍM BETONU

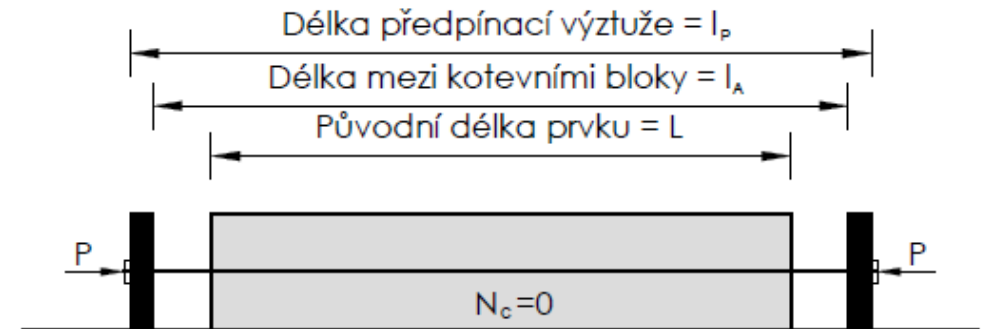
- Uvažuje se pouze u předem předpjaté betonu, kde je předpínací výztuž v okamžiku vnesení předpětí součástí prvku/konstrukce.

$$\Delta N_c = P - \Delta P \quad | \quad \Delta \varepsilon_p = \frac{\Delta P}{A_p * E_p} = \Delta \varepsilon_c = \frac{\Delta N_c}{A_c * E_c}$$

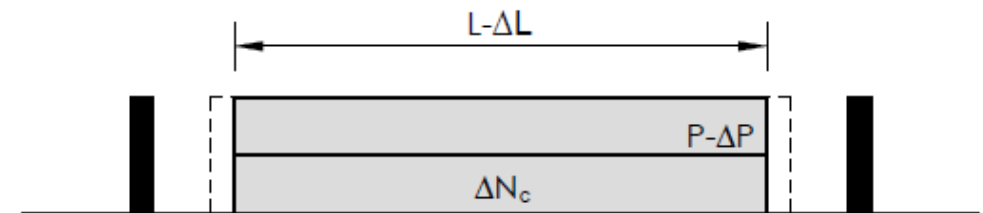
$$v = \frac{A_p * E_p}{A_c * E_c} \rightarrow \Delta P = P - \frac{P}{(1 + v)} = P * \frac{v}{1 + v}$$

$$\Delta \sigma_{pe} = -\sigma_p * \frac{v}{1 + v}$$

Stav před vnesením předpětí



Stav po vnesení předpětí



ZTRÁTA PŘEDPĚTÍ POSTUPNÝM PŘEDPÍNÁNÍM

- Projevuje se u dodatečně předpjatého betonu v důsledku okamžitého pružného přetvoření betonu a postupného předpínání kabelů.

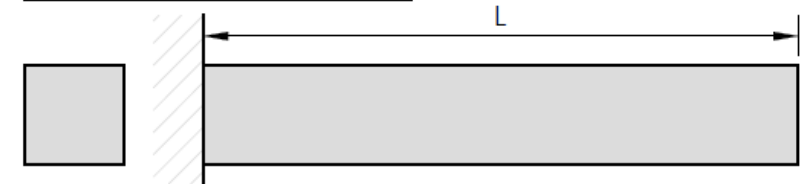
$$\Delta_j \varepsilon_p = -\frac{\Delta_j P}{E_p * \frac{A_p}{m}} \quad | \quad \Delta_j \varepsilon_c = -\frac{P - (j - 1) * \Delta_j P}{A_c * E_c}$$

$$\sum_{j=1}^m (j - 1) * \Delta_j P = P * v * \sum_{j=1}^m \frac{(j - 1)}{m + (j - 1) * v} = \frac{P_a * v}{m} * \sum_{j=1}^{m-1} \frac{j}{m + j * v}$$

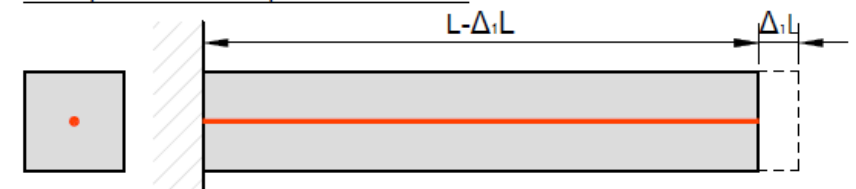
- Průměrná ztráta předpětí ve výztuži o celkové ploše A_p

$$\Delta \sigma_{pep} = \sigma_{pa} * \frac{v}{m} * \sum_{j=1}^{m-1} \frac{j}{m + j * v}$$

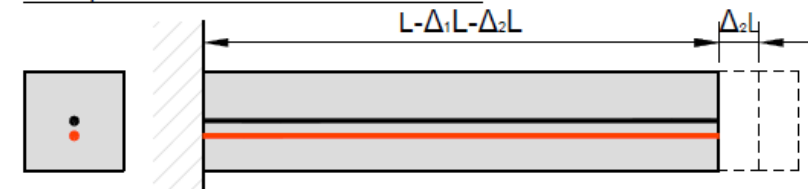
Stav před vnesením předpětí



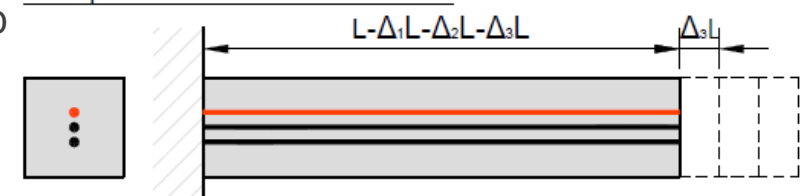
Stav po zakotvení prvního kabelu



Stav po zakotvení druhého kabelu

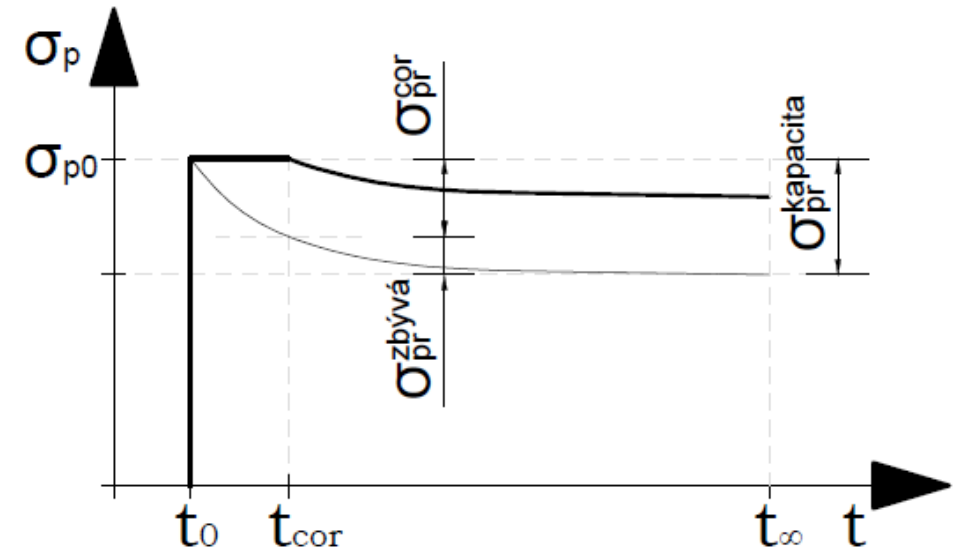


Stav po zakotvení třetího kabelu



ZTRÁTA PŘEDPĚTÍ RELAXACÍ PŘEDPÍNACÍ VÝZTUŽE

- Projevy relaxace výztuže lze snížit vhodnou volbou materiálu (předpínací výztuž s nízkou relaxací) nebo technologickým opatřením při předpínání, tzv. korekce relaxace podržením napětí.



ZTRÁTA PŘEDPĚTÍ RELAXACÍ PŘEDPÍNACÍ VÝZTUŽE

- Ztráta relaxací může být získána z protokolů certifikačních zkoušek nebo definována procentním poměrem změny předpínacího napětí a k počátečnímu předpínacímu napětí.

$$\text{Třída 1: } \frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 5,39 * \rho_{1000} * e^{6,7*\mu} * \left(\frac{t}{1000}\right)^{0,75*(1-\mu)} * 10^{-5} ; \rho_{1000} = 8\%$$

$$\text{Třída 2: } \frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 0,66 * \rho_{1000} * e^{9,1*\mu} * \left(\frac{t}{1000}\right)^{0,75*(1-\mu)} * 10^{-5} ; \rho_{1000} = 2,5\%$$

$$\text{Třída 3: } \frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 1,98 * \rho_{1000} * e^{8,0*\mu} * \left(\frac{t}{1000}\right)^{0,75*(1-\mu)} * 10^{-5} ; \rho_{1000} = 4,0\%$$

$$\mu = \frac{\sigma_{AI}}{f_{pk}}$$

ZTRÁTA PŘEDPĚTÍ PŘETVOŘENÍM OPĚRNÉHO ZAŘÍZENÍ

- Projevuje se u kotevních bloků s nízkou tuhostí u postupného předpínání předpínací výztuže u předem předpjatých prvků.

$$\varepsilon_p = -\frac{\Delta l_p}{l_p} \rightarrow \varepsilon_{p1} = \frac{\varepsilon_p}{m} \text{ (při lineárně pružném chování)} \rightarrow \Delta\sigma_{pA1} = E_p * \varepsilon_{p1} = -E_p * \frac{\Delta l_p}{l_p * m}$$

- Celková ztráta v i-tém laně:

$$\Delta\sigma_{pA}^i = \sum_{j=i+1}^m -E_p * \frac{\Delta l_p}{l_p * m} = -E_p * \frac{m-i}{m} * \frac{\Delta l_p}{l_p}$$

- Průměrná ztráta v každém laně po postupném všech lan (m):

$$\Delta\sigma_{pA} = \frac{1}{m} * \sum_{j=i+1}^m \left(-E_p * \frac{m-i}{m} * \frac{\Delta l_p}{l_p} \right) = -E_p * \frac{m-1}{2 * m} * \frac{\Delta l_p}{l_p}$$

ZTRÁTA PŘEDPĚTÍ ZPŮSOBENÁ ROZDÍLEM TEPLOT

- Obvykle u předem předpjatých prvků, u kterých se uplatní tepelné ošetřování.
- Tepelným ošetřováním dochází ke zmenšení tahového namáhání předpínacích vložek a omezenému roztažení betonu, čímž vzniká specifická ztráta předpětí ΔP_{θ} .

$$\Delta P_{\theta} = 0,5 * A_p * E_p * \alpha_c * (T_{max} - T_0)$$

A_p Průřezová plocha předpínacích vložek

E_p Modul pružnosti předpínacích vložek

α_c Součinitel teplotní délkové roztažnosti

$T_{max} - T_0$ Rozdíl mezi maximální a počáteční teplotou betonu u předpínacích vložek

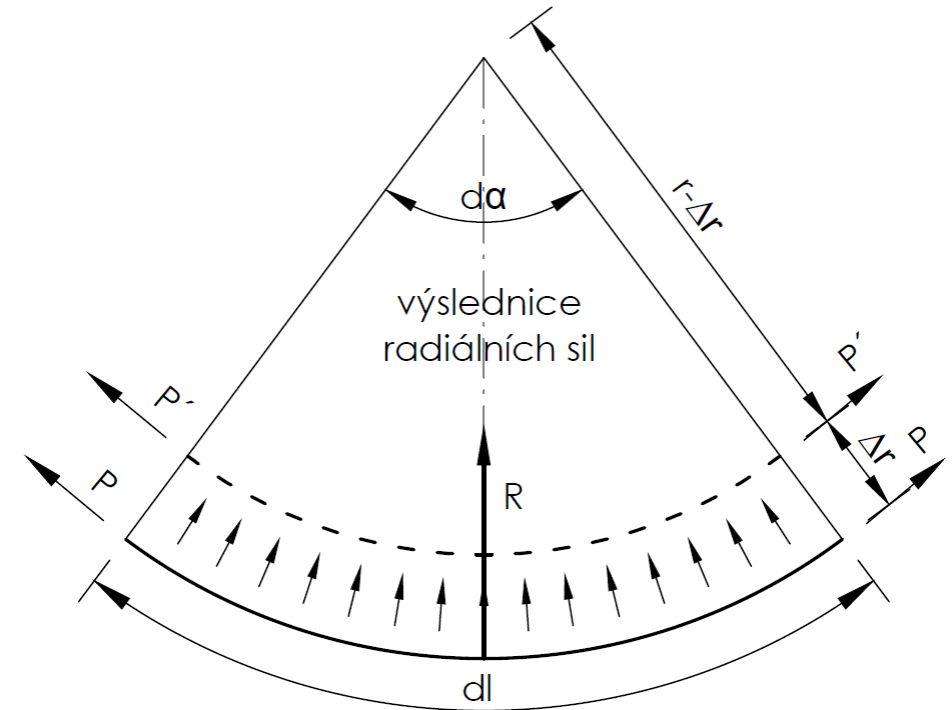
ZTRÁTA PŘEDPĚTÍ OTLAČENÍM BETONU

- Specifická ztráta předpětí, která se projevuje u konstrukcí předpínaných ovíjením s malým poloměrem ovinutí.

$$\Delta l = (r - \Delta r) * d\alpha - r * d\alpha = -\Delta r * d\alpha$$

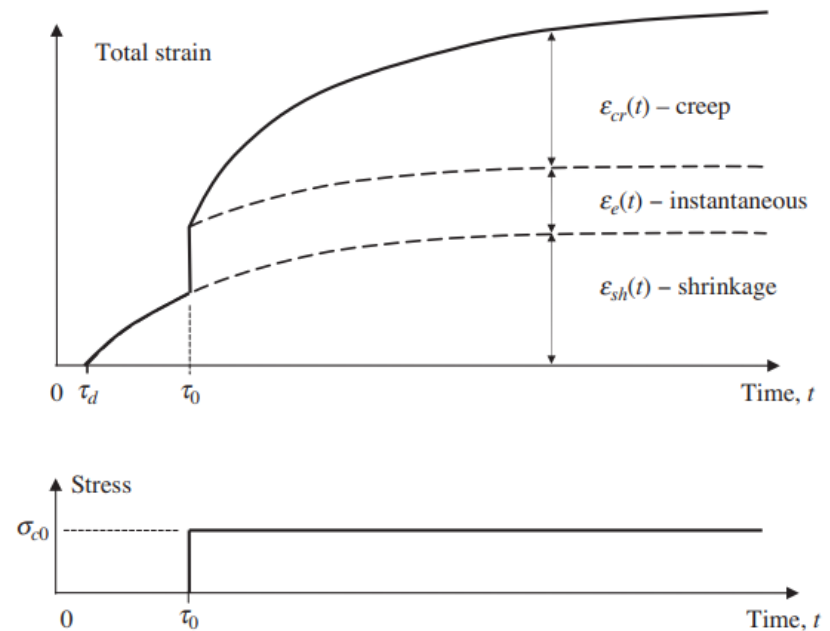
$$\Delta\sigma_{p0} = E_p * \frac{-\Delta r * d\alpha}{r * d\alpha} = -E_p * \frac{\Delta r}{r}$$

- Obvykle ztráty předpětí zohledněny empirickou hodnotou $\Delta\sigma_{p0} = -30$ MPa pro poloměry ovinutí $r \leq 1,5$ m



ZTRÁTA PŘEDPĚTÍ DOTVAROVÁNÍM A SMRŠŤOVÁNÍM BETONU

- Smršťování a dotvarování betonu patří k velmi složitým jevům.
- V důsledku dotvarování a smršťování může dojít ke zvětšování deformací konstrukce a k přerozdělení napětí mezi jednotlivými nosnými prvky.





DĚKUJI ZA POZORNOST



ZDROJE

[01] Jaroslav Navrátil, Předpjaté betonové konstrukce. Akademické nakladatelství CERM s.r.o., Brno.