

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STAVEBNÍ

CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Ing. Lukáš Vráblík, Ph.D.

K otázce dlouhodobých ztrát předpětí betonových konstrukcí

About the long-term prestressing losses in concrete structures

Summary:

Reliable design of prestressed concrete elements and structures must be based on the accurate determination of prestressing force (including losses and their time development) to satisfy stress as well as deformation limits. Commonly used obsolete computational routines and methods neglect or incorrectly describe real effects and the results obtained by analysis based on these methods are thus necessarily wrong – great differences from results obtained by measurements on real structures have been found.

One of the most important factors which provide perfect performance of prestressed concrete structures (serviceability, loading capacity, durability) is a real and correct assessment of prestressing values – i.e. development of prestressing losses. Prestressing losses may be divided into two basic groups. The first one – short-term (technological) losses (e.g. losses due to friction, movement of tendons in anchorages) appeared between the time of prestressing and time of anchoring. The second group includes the long-term prestressing losses appearing between the time of anchoring and the analysed time, or at the final time of the operation life (e.g. losses due to creep, shrinkage and steel stress relaxation). It is evident that due to long-term character of this type of losses, their correct prediction has to be based on the true mathematical models for description of rheological properties of materials – concrete (creep and shrinkage) and steel (stress relaxation).

Prestressing losses undoubtedly play significant role for the reliable design of prestressed concrete structures. Results confirm the essential importance (especially for unevenly distributed prestressing tendons in the cross section) of the effects of creep, shrinkage and cross section warping for reliable determination of prestress losses; so it will be appropriate to define a new component of the prestress loss – the prestress loss due to cross section warping enlarged by the creep effect.

Souhrn:

Jedním z nejvýznamnějších faktorů ovlivňujících současný vývoj návrhu konstrukcí z předpjatého betonu je důraz na jejich kvalitu s ohledem na mezní stavy použitelnosti, na trvanlivost a na jejich bezporuchový provoz při zaručení přiměřené údržby, tj. údržby s malými náklady a s minimálním narušením jejich provozuschopnosti. V případě mostních konstrukcí z předpjatého betonu (nejmasivnější předpjaté betonové konstrukce na velká rozpětí přenášející obrovská zatížení) je z hlediska použitelnosti, provozuschopnosti, dlouhodobé spolehlivosti a životnosti vysoce aktuální otázka trvalého růstu deformací v čase. Zkušenosti ukazují na často větší hodnoty skutečných průhybů oproti predikci stanovené dosavadními výpočetními postupy a na jejich dlouhodobý nárůst v čase.

Chování a působení předpjatých betonových konstrukcí (z hlediska deformací, napětí, vnitřních sil) je založeno na společném působení vnějších zatížení a "vnitřních" silových účinků vyvozených předpětím. Tyto účinky ve své podstatě působí proti sobě - účinek vnějšího zatížení je v určité míře redukován právě působením předpětí. Míra redukce vnějšího zatížení tak určuje chování konstrukce, například z hlediska deformací.

Zcela zásadní roli v tomto hrají dlouhodobé ztráty předpětí. Porovnány jsou matematické modely relaxace předpínací výtzuže, jak ty, které jsou obsaženy v návrhových normách a doporučeních, tak i modely, které vystihují reálný průběh a velikost relaxace v souladu s výsledky měření na reálných konstrukcích. Dále je pak detailně studována ztráta předpětí vlivem dotvarování betonu, zejména s ohledem na reálné působení a chování betonového průřezu.

Klíčová slova:

Ztráty předpětí, beton, dotvarování, smršťování, relaxace, deplanace průřezu, mezní stavy použitelnosti

Keywords:

Prestressing losses, concrete, creep, shrinkage, relaxation, cross section warping, service limit states

Obsah:

1.	Úvod	- 6 -
2.	Ztráty předpětí v důsledku relaxace předpínací výtuzže	- 7 -
3.	Dlouhodobé ztráty předpětí v důsledku dotvarování a smršťování betonu a deplanace průřezu	- 11 -
4.	Závěr	- 18 -
	Literatura	- 19 -

1. Úvod

K dosažení požadovaného působení prvků a konstrukcí z předpjatého betonu (velikostí a rozložení napětí a deformací, včetně jejich časového vývoje) je nezbytné zajistit potřebný účinek předpětí – jak z hlediska velikosti předpínací síly v okamžiku vnesení předpětí, tak i z hlediska jejího časového vývoje ovlivněného dlouhodobými ztrátami.

Význam této skutečnosti nebyl dosud plně doceňován – mění-li se napjatost předpjaté konstrukce (závisející zcela zásadně na předpětí), tak to – pokud nenastanou viditelné poruchy – pozornosti obvykle uniká. Zcela jiná situace je však např. při sledování vývoje průhybů předpjatých mostů velkých rozpětí - ztráty předpětí se zde dramaticky projeví změnou (obvykle nárůstem) deformací, které jsou jasně patrné a měřitelné.

Při analýze významných předpjatých konstrukcí se složitým prostorovým charakterem působení jsou mnohdy používány jednoduché předpoklady (např. hypotéza o zachování rovinnosti průřezů, nerealistické modely predikce vývoje dotvarování a smršťování betonu).

Napětí v konstrukci a deformace (průhyby, natočení) jsou z hlediska velikosti ztrát předpětí velmi citlivé, neboť jejich výsledná velikost je dána rozdílem velkých čísel (účinku vnějšího zatížení a opačně působícího ekvivalentního zatížení závislého na skutečné velikosti předpětí konstrukce) a relativně velmi malá odchylka od předpokládané hodnoty některého z těchto účinků má velký význam pro výsledek. Obvyklé výpočetní postupy zanedbávající nebo nevystihující věrně všechny účinky mohou vést k zcela chybným závěrům, kdy i jen malá odchylka v jednotlivých dílčích složkách může vést k propastným rozdílům výsledků od skutečnosti (porovnání například s výsledky měření na reálných konstrukcích).

Proto mezi nejzávažnější faktory pro zajištění náležité funkce předpjatých konstrukcí (únosnosti, provozuschopnosti, trvanlivosti a spolehlivosti) náleží spolehlivé stanovení skutečné hodnoty předpětí, tj. vývoje jeho ztrát. V současné době běžná návrhová praxe předpjatých konstrukcí definuje dvě základní kategorie ztrát předpětí.

Krátkodobé ztráty - tzv. technologické ztráty; jedná se o změny předpětí projevující se na konstrukci mezi okamžikem napínání a zakotvením předpínací výztuže. Nejdůležitějšími zástupci těchto ztrát pro dodatečně předpínaný prvek je ztráta třením a pokluzem v kotvě. Označení technologické odpovídá podstatě těchto ztrát, které jsou významně ovlivněny technologickými vlastnostmi předpínacího

systemu. Jejich analytický popis je téměř od počátku používání předpjatého betonu velmi přesně znám, rozhodující jsou tak vstupní data, jejichž správná hodnota by vždy měla vycházet z podkladů dodavatele předpínacího systému. Na projektantovi a zhotoviteli pak je, aby si své předpoklady z výpočtu ověřil na realizované konstrukci – například měřením protažení lana během napínání.

Dlouhodobé ztráty - jedná se o změny velikosti předpínací síly mezi okamžikem zakotvení předpínací výztuže a sledovaným časem, respektive předpokládaným koncem životnosti konstrukce. Vzhledem k dlouhodobému charakteru ztrát je pro jejich stanovení rozhodující správný popis reologických vlastností materiálů – betonu (z hlediska dotvarování a smršťování) a předpínací výztuže (z hlediska relaxace).

2. ZTRÁTY PŘEDPĚTÍ V DŮSLEDKU RELAXACE PŘEDPÍNAČÍ VÝZTUŽE

Relaxace napětí v oceli zásadně ovlivňuje dlouhodobé chování předpjatého prvku. Jedná se o duální jev k dotvarování – při konstantní deformaci (protahování výztuže) klesá velikost napětí a tudíž i velikost předpínací síly, resp. účinek předpětí. Kapacita a časový vývoj relaxace závisí na mechanických vlastnostech použité oceli ovlivněných výrobním procesem a na technologickém postupu předpínání.

Výsledky prováděných měření na významných mostních konstrukcích a provedených výpočetních analýz ukazují, že právě podceněná ztráta předpětí relaxací je jednou z významných příčin nadměrných, v čase se zvětšujících deformací těchto konstrukcí. Mezi odbornou veřejností je všeobecně známo, že předpisy pro stanovení relaxace předpínací výztuže podle normy ČSN 73 6207 (Tab. 1) pro navrhování předpjatých betonových mostních konstrukcí jsou chybné a nekorespondují s reálnými vlastnostmi používaných ocelí. Tato norma rozlišovala velikost konečného úbytku napětí vlivem relaxace jako násobku počátečního napětí podle toho, zda se jedná o dráty nepopouštěné, popouštěné, nebo stabilizované, popřípadě o žebírkové tyče. Předpokládá se, že konečného úbytku napětí je dosaženo po 1 roce od napnutí. Dále norma definovala časovou závislost úbytku napětí. Tato

závislost však již není funkcí použitého materiálu ani úrovně napětí v předpínací oceli (vzhledem k mezi $\sigma_{0,2}$).

Nově platná norma ČSN EN 1992-1-1 přistupuje k otázce relaxace napětí předpínací výztuže mnohem důkladněji (obr. 1). Stanovuje tzv. třídy rela-
kačního chování a pro jejich popis odlišné matematické vyjádření :

- *třída 1* – dráty nebo lana s normální relaxací (1)
- *třída 2* – dráty nebo lana s nízkou relaxací (2)
- *třída 3* – za tepla válcované a upravené tyče (3).

Pro každou třídu je definován funkční předpis popisující vývoj v čase t (konečná hodnota se definuje pro čas 500 000 hodin, což odpovídá cca 57 letům) v závislosti na hodnotě ρ_{1000} (ztráta napětí relaxací po 1000 hodi-
nách pro úroveň počátečního napětí $0,7 f_{pk}$) a poměru počátečního napětí v předpínací výztuži σ_{pm0} (napětí v předpínací výztuži po proběhnutých
krátkodobých ztrátách) k hodnotě její charakteristické pevnosti f_{pk} .

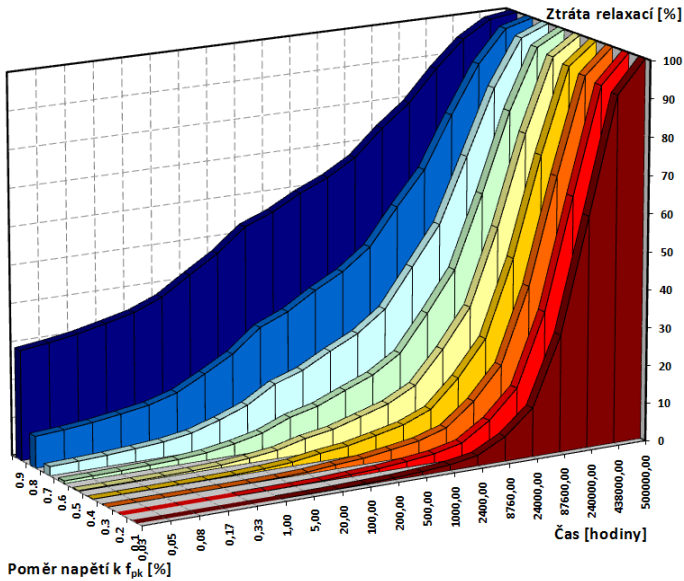
$$\Delta\sigma_{p,r} = \sigma_{pm0} \cdot 5,39 \cdot 8 \cdot e^{6,7 \cdot \frac{\sigma_{pm0}}{f_{pk}}} \left(\frac{t}{1000} \right)^{0,75} \left(1 - \frac{\sigma_{pm0}}{f_{pk}} \right) \cdot 10^{-5} \quad (1)$$

$$\Delta\sigma_{p,r} = \sigma_{pm0} \cdot 0,66 \cdot 2,5 \cdot e^{9,1 \cdot \frac{\sigma_{pm0}}{f_{pk}}} \left(\frac{t}{1000} \right)^{0,75} \left(1 - \frac{\sigma_{pm0}}{f_{pk}} \right) \cdot 10^{-5} \quad (2)$$

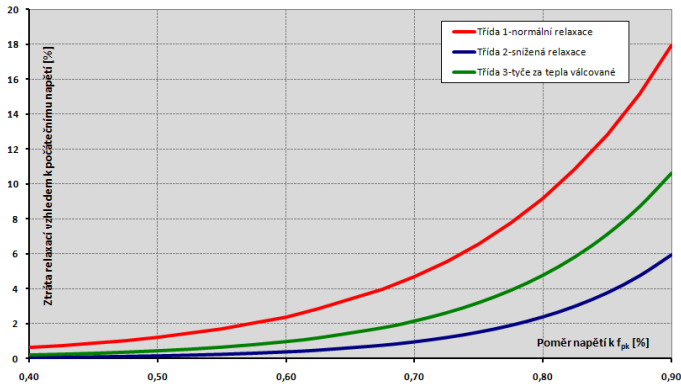
$$\Delta\sigma_{p,r} = \sigma_{pm0} \cdot 1,98 \cdot 4 \cdot e^{8 \cdot \frac{\sigma_{pm0}}{f_{pk}}} \left(\frac{t}{1000} \right)^{0,75} \left(1 - \frac{\sigma_{pm0}}{f_{pk}} \right) \cdot 10^{-5} \quad (3)$$

Výpočet podle ČSN 73 6207		
<i>nepouštížené</i>	<i>popouštížené</i>	<i>stabilizované</i>
95,1 MPa	71,7 MPa	35,8 MPa
Výpočet podle ČSN EN 1992-1-1		
<i>třída 1</i>	<i>třída 2</i>	
235,4 MPa	48,3 MPa	

Tab. 1 Porovnání velikosti celkového úbytku napětí vlivem relaxace podle různých normových předpisů



Poměr napětí k f_{pk} [%]

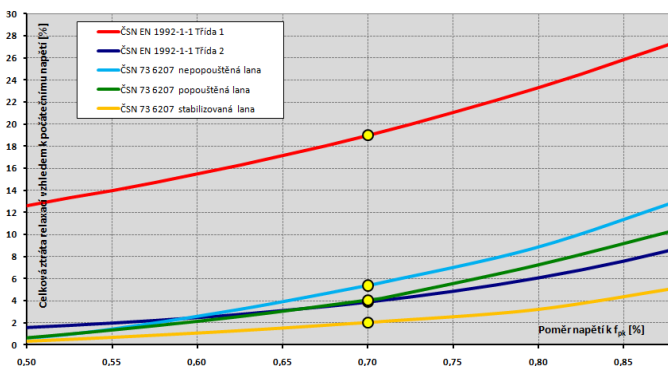


Obr. 1 Relaxace napětí předpínací výztuže po 1000 hodinách (cca 42 dnů) podle ČSN EN 1992-1-1 – vliv velikosti počátečního napětí na časový vývoj ztráty relaxací a na její velikost

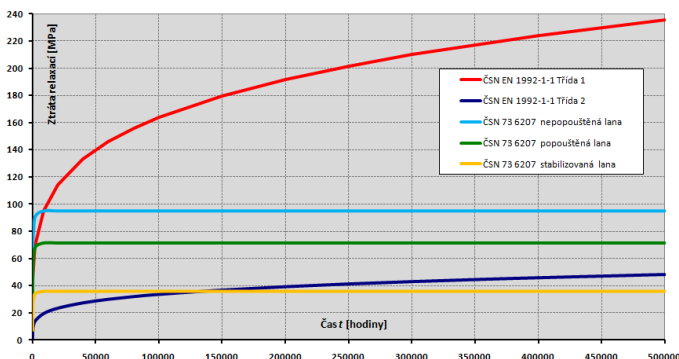
Dramatické rozdíly ve výsledcích stanovení celkové ztráty předpětí relaxací předpínací výztuže při postupu podle jednotlivých funkčních předpisů jsou shrnuty v Tab.1 a na Obr. 2. Uvažována je ocel předpínací výztuže 1570/1770 – pevnost $f_{pk} = 1770$ MPa, mez $\sigma_{0,2} = 1570$ MPa. Počáteční napětí uvažujeme $\sigma_{pmo} = 1239$ MPa (odpovídá 0,7 násobku pevnosti f_{pk} , resp. cca 0,8 násobku meze $\sigma_{0,2}$).

Patrný je zásadní rozdíl mezi hodnotami stanovenými podle jednotlivých předpisů, zejména při srovnání lan z výztuže s normální relaxací, resp. bez jakýchkoliv úprav pro její snížení - Třída 1 (podle ČSN EN 1992-1-1) a tzv. nepopouštěná lana (podle ČSN 73 6207).

Ještě zřetelnější jsou rozdíly v časovém vývoji ztráty relaxací. Norma ČSN 73 6207 předpokládá, že konečného úbytku napětí v předpínací výztuži vlivem relaxace je dosaženo v jednom roce od předepnutí. Oproti tomu výpočetní postupy podle ČSN EN 1992-1-1 stanovují konečný úbytek předpětí v čase 500 000 hodin (cca 57 let). Porovnání časového vývoje je ukázáno na Obr. 3.



Obr. 2 Porovnání celkové ztráty předpětí relaxací podle různých normových předpisů



Obr. 3 Porovnání časového vývoje úbytku napětí v předpínací výztuži vlivem relaxace pro počáteční napětí

Nezbytné je ale poznamenat, že i postupy pro stanovení úbytku napětí v předpínací výztuži vlivem relaxace dle těchto nově platných normových

předpisů nejsou zcela přesné. Použitelné jsou ve fázi projektu konstrukce, kdy není znám přesně systém předpětí, který bude na konstrukci použit. Ve fázi projektu, kdy je znám konkrétní dodavatel systému předpínací výztuže (typicky ve fázi realizační dokumentace stavby - RDS) je nezbytné, aby projektant s dodavatelem spolupracoval a vyžádal si detailní informace poskytující dostatečné podklady pro predikci časového vývoje napětí v předpínací výztuži.

3. DLOUHODOBÉ ZTRÁTY PŘEDPĚTÍ V DŮSLEDKU DOTVAROVÁNÍ A SMRŠŤOVÁNÍ BETONU A DEPLANACE PRŮŘEZU

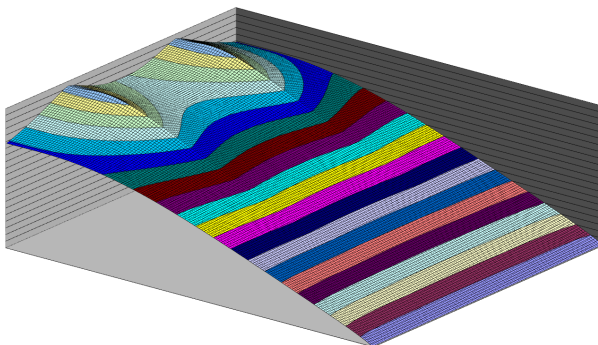
Z výsledků experimentálních studií a měření na reálných konstrukcích a jejich výpočetních analýz se potvrzuje, že v současné době používané přístupy pro kvantifikování ztrát předpětí způsobených dotvarováním a smršťováním betonu jsou nerealistické a mnohdy zavádějící, ztráty významně podceňují. Tyto postupy totiž ignorují řadu významných faktorů ovlivňujících jednak samotné dotvarování, ale i globální chování konstrukce, které tyto ztráty ovlivňuje. Zejména se jedná:

- *3D působení předpjatého prvku nebo konstrukce* - primitivní předpoklad zachování rovinnosti příčného řezu je pro současné výpočtové možnosti, kdy jsou zcela samozřejmě do výpočtů zahrnovány jevy kategorie ochabnutí smykem nebo vázaného kroucení, doprovázené deplanací průřezu, absolutně nezdůvodnitelný; jako příklad je na Obr. 4 ukázáno pole podélných posunutí bodů horní desky vyvolaných ukotvením předpínacích kabelů ve stycích desky a stěn nosníku;
- *reálný vývoj dotvarování a smršťování betonu* - pro jeho predikci musí být použity výstižné matematické modely; z tohoto hlediska se nepochybně jeví jako nejvýstižnější a prověřený model B3, popřípadě modely dle norem ČSN EN;
- *respektování reologické nehomogenity jednotlivých částí příčného řezu* - vývoj dotvarování a smršťování betonu výrazně závisí a je ovlivněn dílčími tloušťkami stěn a desek průřezu.

Nutnost respektování všech závažných faktorů byla prokázána rozsáhlou a velmi podrobnou výpočetní studií osvětlující skutečnosti rozhodné pro vývoj namáhání a deformací později (po provedené rekonstrukci) zříceného mostu mezi ostrovy Koror a Babelthuap v Palau.

Záměrem provedené analýzy bylo osvětlit tuto problematiku a napomoci k pochopení jejího významu demonstrací na případě prvku základního

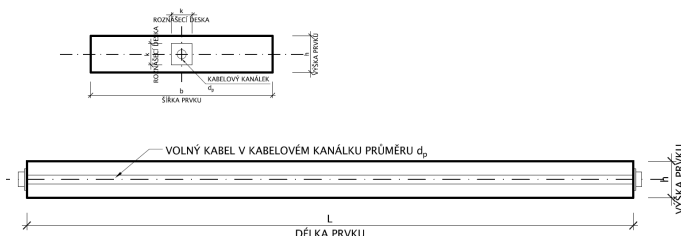
konstrukčního uspořádání, kde jevy mohou být analyzovány v ryzí analytické formě, a to záměrně - jde zejména o změnu přístupu k výpočtům ztát předpětí vlivem dotvarování betonu.



Obr. 4 Neplatnost předpokladu zachování rovinnosti příčného řezu – nerovnoměrný vodorovný podélný posun po šířce horní desky komorového mostu

Výpočetní analýza - tenký deskový prvek

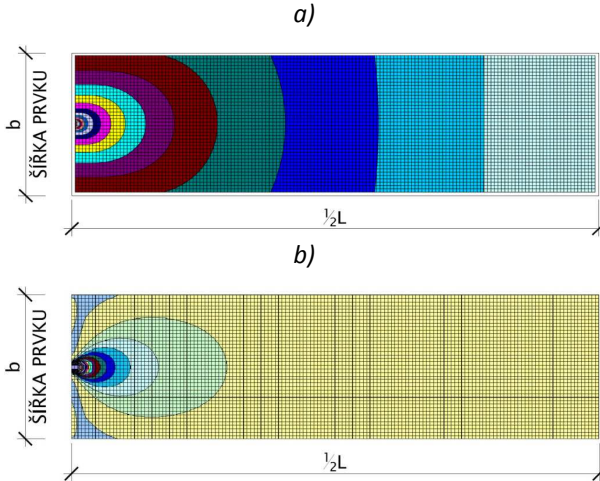
Analyzováno je nejjednodušší tvarové uspořádání – tenký deskový prvek (Obr. 5) obdélníkového tvaru (šířka b a výška průřezu h) délky L předepnutý přímým předpínacím kabelem vedeným v kanálku průměru d_p ve střednicové ploše prvku v jeho podélné ose. Ve snaze o co největší zjednodušení problému je uvažováno předpětí nesoudržným kabelem – přenos předpínací síly je realizován pouze v místě kotvení – uvažována je příložná kotva s roznášecí deskou ve tvaru čtverce o délce hrany k (Obr.).



Obr. 5 Tenký deskový prvek - schéma řešené konstrukce

Nejprve je vhodné osvětlit reálné chování konstrukčního prvku v okamžiku zavedení předpětí - stav napětí a deformace vyvolaný předpětím realizovaným jednotlivými izolovaně rozmístěnými předpínacími jednotkami. Jde o klasickou úlohu teorie pružnosti, řešenou již v dávnější minulosti (např. aplikací teorie lomenic). Pole deformací jsou pro tento počáteční stav ukázána na Obr. 4 - je zřejmé „zatlačení“ v působišti předpínací

síly (kotvení předpětí) do prvku, tj. nesplnění předpokladu zachování rovinnosti průřezu prvku, běžně používaného v projektové praxi, což znamená nárůst zkrácení předpínací jednotky a tedy i nárůst ztráty předpětí; význam tohoto jevu významně narůstá s poměrem vzájemné vzdálenosti kabelů a délky prvku.



Obr. 4 a) Poměrné stlačení ve směru podélné osy, b) Pole odpovídajících podélných normálových napětí

Na základě analýzy pole podélných normálových napětí (Obr. 4b) bylo shledáno, že vliv nerovinného chování příčného řezu na změny předpětí lze - ve snaze o aplikovatelnost v projektové praxi - aproximovat pomocí analytických předpisů. Použito je roznášení napětí od předpětí z dosedací plochy roznášecí desky kotvy až na plnou plochu příčného řezu popsané gradientem ($n:1$). Vzduřující plocha $A_{c,vz}$ (část průřezu, ve které jsou uvažována rovnoměrně rozložená napětí od předpětí) narůstá nespojitě (Obr. 5) se vzdáleností x od místa kotvení (použité symboly odpovídají označení z Obr. a Obr. 5):

- pro $x = 0$ (těsně pod kotvou, resp. roznášecí deskou):

$$A_{(0)c,vz} = k^2 - \frac{\pi d_p^2}{4}, \quad (4)$$

- pro $0 < x \leq x_h$ (nárůst plochy ve vodorovném i svislém směru):

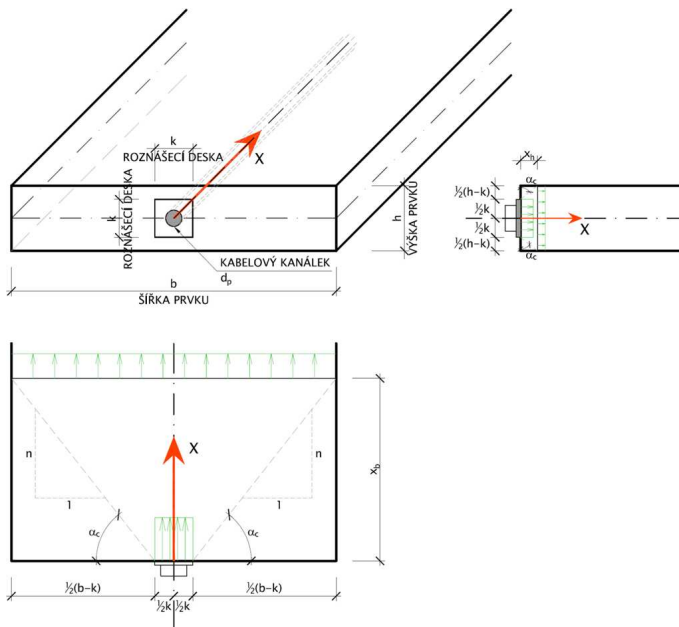
$$A_{(1)c,vz}(x) = \left(k + 2\frac{x}{n}\right)^2 - \frac{\pi d_p^2}{4}, \quad (5)$$

- pro $x_h < x \leq x_b$ (působí celá výška průřezu h , nárůst plochy ve vodorovném směru):

$$A_{(2)c,vz}(x) = h \left(k + 2 \frac{x}{n} \right) - \frac{\pi d_p^2}{4}, \quad (6)$$

- pro $x > x_b$ (působí celá plocha prvku, vzdorující plocha je konstantní):

$$A_{(3)c,vz} = bh - \frac{\pi d_p^2}{4}. \quad (7)$$



Obr. 5 Roznos zatížení v prvku – nárůst vzdorující plochy průřezu

Dalším krokem studie je sledování časového vývoje přetvoření betonového prvku zatíženého axiální předpínací tlakovou silou.

V 1. kroku (čas t_p) je betonový prvek (geometrie dle Obr.) předpnut předpínací silou velikosti P_0 (Obr. 8) vyvozenou protažením volného kabelu původní délky $L_{KAB,in}$ o délku ΔL_{KAB} . Kabel je vedený v kabelovém kanálku průměru d_p , zakotvený je do konstrukce pomocí příložné kotvy. Do betonového prvku je tak vnesena normálová síla $N_{p,0}$ (znaménko minus značí tlak):

$$N_{p,0} = -P_0 = -A_p \cdot E_p \cdot \varepsilon_{p,0}, \quad (8)$$

kde A_p je plocha oceli předpínacího kabelu,

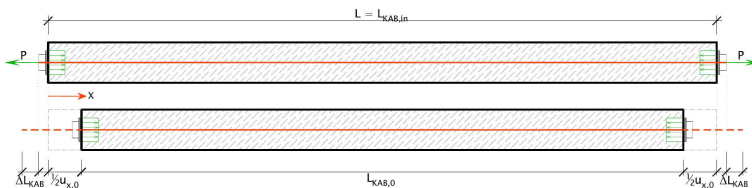
E_p je modul pružnosti oceli předpínací výztuže,
 $\varepsilon_{p,0}$ je počáteční přetvoření předpínací výztuže popsané
vztahem:

$$\varepsilon_{p,0} = \frac{2\Delta L_{KAB}}{L_{KAB,in}} \quad (9)$$

Působící normálová síla $N_{p,0}$ vyvodí v čase vnesení předpětí t_p v prvku poměrné přetvoření ε_{c,t_p} , které je s uvážením nerovinného chování průřezu (viz výše), funkcí vzdálenosti od konce prvku x :

$$\varepsilon_{c,t_p}(x) = \frac{N_{p,0}}{E_c(t_p) \cdot A_{c,vz}(x)} = \frac{-A_p \cdot E_p \cdot \varepsilon_{p,0}}{E_c(t_p) \cdot A_{c,vz}(x)}, \quad (10)$$

kde $E_c(t_p)$ je modul pružnosti betonového prvku v čase přede-
pnutí t_p .



Obr. 8 Vnesení předpínací síly do prvku, počáteční deformace

Dojde tak k pružnému zkrácení prvku, které lze za předpokladu symetrie a homogenity konstrukce a zanedbání ztrát předpětí (uvážena konstantní předpínací síla P_0 po celé délce kabelu) stanovit podle vztahu:

$$u_{x,0} = 2 \cdot \int_0^{\frac{L}{2}} \frac{N_{p,0}}{E_c(t_p) \cdot A_{c,vz}(x)} dx = \frac{-2 \cdot A_p \cdot E_p \cdot \varepsilon_{p,0}}{E_c(t_p)} \cdot \int_0^{\frac{L}{2}} \frac{1}{A_{c,vz}(x)} dx \quad (11)$$

Po přede-
pnutí a zakotvení je délka prvku a tudíž i předpínacího kabelu zakotveného mezi konce prvku:

$$L_{KAB,0} = L_{KAB,in} - u_{x,0} = L - u_{x,0} \quad (12)$$

Při uvážení zjednodušujícího předpokladu, že síla $N_{p,0}$ je v celém inter-
valu mezi časem přede-
pnutí t_p a uvažovaným koncem životnosti prvku t_∞ konstantní (zanedbání dlouhodobých ztrát předpětí), v čase t_∞ tak naroste počáteční přetvoření v důsledku dotvarování a smršťování na hodnotu:

$$\varepsilon_{c,t_\infty}(x) = \frac{N_{p,0}}{E_c(t_p) \cdot A_{c,vz}(x)} \cdot [1 + \varphi(t_\infty, t_p)] + \varepsilon_{shr}(t_\infty, t_p), \quad (13)$$

kde $\varphi(t_\infty, t_p)$ je součinitel dotvarování mezi časem t_∞ a časem t_p ,

$\varepsilon_{shr}(t_\infty, t_p)$ je přetvoření od smrštění mezi časem t_∞ a časem t_p .

Samotný účinek dotvarování a smršťování na poměrné přetvoření prvku je tak možné popsat vztahem:

$$\varepsilon_{c,creep,shr}(x) = \frac{N_{p,0}}{E_c(t_p) \cdot A_{c,vz}(x)} \cdot [\varphi(t_\infty, t_p)] + \varepsilon_{shr}(t_\infty, t_p). \quad (14)$$

Zkrácení (změna délky) prvku a předpínacího kabelu (za předpokladu dokonale tuhého zakotvení kabelu do čel betonového prvku) vlivem dotvarování a smršťování je pak dána:

$$u_{x,creep,shr} = 2 \cdot \int_0^{\frac{L-1}{2}u_{x,0}} \frac{N_{p,0}}{E_c(t_p) \cdot A_{c,vz}(x)} \cdot \varphi(t_\infty, t_p) dx + \int_0^{L-u_{x,0}} \varepsilon_{shr}(t_\infty, t_p) dx, \quad (15)$$

což je možné při předpokladu reologické homogenity konstrukce zjednodušit na vztah:

$$u_{x,creep,shr} = \frac{2N_{p,0}}{E_c(t_p)} \cdot \varphi(t_\infty, t_p) \cdot \int_0^{\frac{L-1}{2}u_{x,0}} \frac{1}{A_{c,vz}(x)} dx + \varepsilon_{shr}(t_\infty, t_p) \cdot (L - u_{x,0}). \quad (16)$$

Vztah (16) popisuje, jak bylo uvedeno výše, zkrácení betonového prvku a tím i na jeho koncích tuze zakotveného kabelu vlivem dotvarování a smršťování. Předpětí je realizováno poměrným protažením kabelu (rovnice (9)) $\varepsilon_{p,0}$. Tím, jak dochází k zpětnému zkracování kabelu, zmenšuje se hodnota tohoto počátečního přetvoření až na hodnotu $\varepsilon_{p,\infty}$:

$$\varepsilon_{p,\infty} = \varepsilon_{p,0} + \frac{u_{x,creep,shr}}{L_{KAB,0}}. \quad (17)$$

Velikost předpínací síly P_∞ v čase t_∞ je pak dána vztahem:

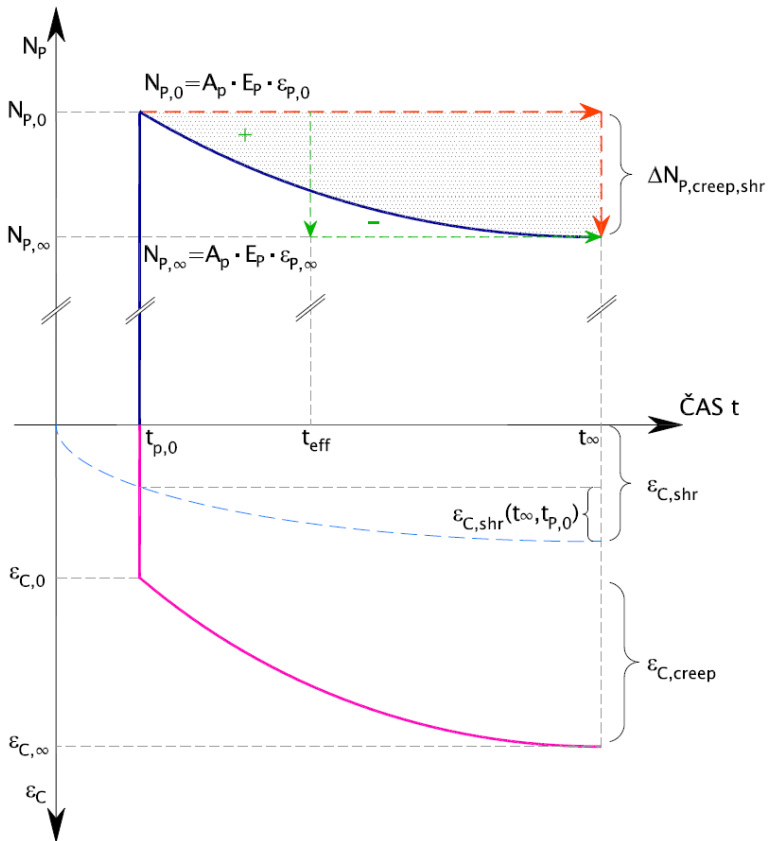
$$P_\infty = A_p \cdot E_p \cdot \varepsilon_{p,\infty}. \quad (18)$$

Při řešení změny předpínací síly vlivem dotvarování a smršťování dle výše popsané zjednodušené metody se v souladu s Obr. 6 dopouštíme chyby (vyšrafovaná část grafu). Reálný plynulý průběh časového vývoje předpínací síly (popsaný tmavě modrou křivkou) nahrazujeme jednou diskrétní změnou v čase t_∞ . Bylo však prokázáno, že velikost této chyby není pro praktické výpočty zásadní (jedná se o relativně malou změnu velké hodno-

ty) – při použití přesnějšího řešení (časovou diskretizací) by úbytek předpí-
nací síly vycházel o něco menší.

Určitým zpřesněním, které neznamená podstatné zvýšení náročnosti
řešení, je použití tzv. metody efektivního času (na Obr. 6 zelená čárkovaná
křivka).

Určitým zjednodušením je i oddělené řešení účinků reologických změn
betonu (smršťování a dotvarování) a oceli (relaxace) na vývoj velikosti
předpínací síly. Ve skutečnosti jsou tyto jevy provázány a vzájemně spolu-
působí. Pro správný popis a vystižení tohoto spolupůsobení by bylo nutné
použít přesnější metodu řešení – např. již zmiňovanou metodu časové
diskretizace.



Obr. 6 Princip výpočtu změny předpětí vlivem dotvarování a smršťování

4. ZÁVĚR

V rámci celé výzkumné činnosti zabývající se danou problematikou bylo kromě teoretických analýz shromážděno množství údajů o chování značného počtu předpjatých komorových mostů velkých rozpětí. Tyto výsledky byly podrobně analyzovány a porovnány s teoretickými predikcemi. Současně byly sledovány mosty, které jsou ve výstavbě. Byl vytvořen ucelený jednotný nástroj zahrnující metody matematické analýzy, výpočtové programy a doporučení pro návrh předpjatých komorových mostů velkých rozpětí nevykazujících problémy z hlediska únosnosti a použitelnosti. To vše při respektování jejich prostorového působení, změn statického systému během výstavby a v prostoru a čase proměnných reologických faktorů, jejichž matematický model respektuje poslední výsledky materiálového výzkumu. Výsledky řešení - metodika výpočtů, zobecnění výsledků a praktická doporučení – nacházejí rozsáhlé uplatnění pro spolehlivý a hospodárný návrh předpjatých mostů a pro vyloučení problémů dlouhodobé použitelnosti.

Dále byla předmětem řešení identifikace požadavků na návrh konstrukcí, příprava teoretických podkladů a shromažďování dalších informací a materiálů o provedených a stavěných mostech a měření na konstrukcích, aktualizace materiálových modelů na základě měření na skutečných konstrukcích. Práce teoretického charakteru se soustředily zejména na zpřesněné výpočtové modely, výstižnější popis chování materiálů – zejména z hlediska dlouhodobých přetvoření. Byly realizovány parametrické studie a jejich vyhodnocení, vytvořeny nové a zpřesněné metod statické analýzy konstrukcí zahrnující 3D působení, vlivy změn statického působení v průběhu výstavby a reologických faktorů, vlivu imperfekcí či vlivu postupné degradace konstrukce. Takto získané výsledky byly využity při výpočetních analýzách a návrzích skutečných mostů.

Samostatná část byla a stále je věnována příspěvku dotvarování betonu a deplanace průřezu k dlouhodobým ztrátám předpětí. Při prostorovém působení betonových konstrukcí, zahrnujícím též jev ochabnutí smykem vznikají – kromě ohybového chování – další charakteristické stavy: zkrucování, deformace tvaru průřezu a deplanace, kdy průřez přestává být rovinný. Důsledkem je, že délková deformace míst ukotvení přepínacího prvku je rozdílná od deformace průměrné, založené na předpokladu zachování rovinnosti průřezů. Tento jev, který po ukotvení nabývá vlivem dotvarování betonu, může vyvolat významně větší ztráty předpětí než při použití klasických přístupů, založených na předpokladu zachování rovinnosti průřezů.

Výsledky odvozené metody řešení určují příspěvek dotvarování betonu a deplanace průřezu k ztrátám předpětí, a to v závislosti na délce a rozmístění předpínacích prvků.

LITERATURA

- [1] Bažant, Z.P., Baweja, S.: *Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures: ModelB3*; Materials and Structures 28, 1995
- [2] Bažant, Z.P., Li, G. H., Yu, Q., Klein, G., Křístek, V.: *Explanation of Excessive Long-Time Deflections of Collapsed Record-Span Box Girder Bridge in Palau*; CONCREEP8, Ise Shima, Japonsko, září-říjen 2008
- [3] Křístek, V.: *Teorie výpočtu komůrkových nosníků*, SNTL Praha, 1974
- [4] Křístek, V., Vráblík, L., Bažant, Z. P.: *Misprediction of long-time deflections of prestressed box girders: Causes, remedies and tendon layout*; CONCREEP8, Ise Shima, Japonsko, září-říjen 2008
- [5] Vodsoň J.: *Časový vývoj trvalých průhybů velkých mostů z předpjatého betonu*; Zprávy o výsledcích dlouhodobých sledování vybraných mostů pozemních komunikací za roky 1995 – 2008
- [6] ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2: *Navrhování betonových konstrukcí Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*

Ing. Lukáš Vráblík, Ph.D.

OSOBNÍ ÚDAJE	Ing. Lukáš Vráblík, Ph.D. narozen 18.7.1980
VZDĚLÁNÍ	Autorizovaný inženýr v oboru mosty a inženýrské konstrukce, 2008 ČVUT v Praze, Fakulta stavební, obor Konstrukce a dopravní stavby, obhajoba disertační práce 2007 (Ph.D.) ČVUT v Praze, Fakulta stavební, obor Konstrukce a dopravní stavby, 1998 - 2004 (Ing.)
ZAMĚSTNÁNÍ	2004 - ČVUT Fakulta stavební, Katedra betonových a zděných konstrukcí - vědecká a pedagogická činnost 2004 - projektant, zodpovědný projektant mostních a inženýrských konstrukcí
PEDAGOGICKÁ PRAXE	- přednášky a vedení předmětů bakalářského a magisterského studia (133BK5C, 133SBK, 133BEK3, 133BK4K, 133CST5) - vedení diplomových a bakalářských prací - školitel doktorského studia (4 studenti v prezenční formě studia) - v rámci doktorského studia vedení cvičení v předmětech zaměřených na betonové konstrukce a teorii konstrukcí.
VĚDECKÁ ČINNOST	Vědecko-výzkumná činnost v oblasti dlouhodobého chování předpjatých mostů velkých rozpětí, do tvarování a smršťování betonu, matematického modelování materiálů.
PUBLIKACE	Za dobu doktorského studia a vědecké činnosti více jak 40 publikací v odborných časopisech (českých a zahraničních) a na konferencích, 3 vyzvané přednášky na zahraničních univerzitách, 1 vyzvaná přednáška na tuzemské konferenci.

NEJVÝZNAMNĚJŠÍ PUBLIKACE:

- [1] Křístek V., Vráblík L.: *Curved bridges: effect of changes of structural system*, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Bridge Engineering, www.bridgesjournal.com, volume 162, issue BE4, December 2009
- [2] Křístek V., Vráblík L.: *Optimization of Tendon Layout to avoid Excessive Deflections of Long-span Prestressed Concrete Bridges*, Concrete Engineering International, The Concrete Society, Great Britain, 2007
- [3] Vráblík L.: *Serviceability as a significant factor of the bridge life-cycle*, vyzvaná přednáška - Civil and Environmental Engineering Seminar, Mc Cormick Institute, Northwestern University, Evanston, Illinois USA, 18. září 2009
- [4] Křístek V., Vráblík L., Bažant Z. P., Li G. H., Yu Q.: *Misprediction of long-time deflections of prestressed box girders: Causes, remedies and tendon layout effect*, Creep, shrinkage and durability mechanics of concrete and concrete structures, 8th International Conference on Creep, Shrinkage and Durability of Concrete and Concrete Structures, Ise-Shima, Japonsko, září 2008
- [5] Bittnar Z., Vráblík L., Křístek V., Polák M.: *Role of distortional and warping stiffness of end regions at 3D performance of concrete bridges*, International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences, Phuket, Thajsko, duben 2009
- [6] Vráblík L., Loško J., Křístek V.: *K otázce ztrát předpětí v prvcích a konstrukcích z předpjatého betonu*, BETON TKS, ročník 9, číslo 4, srpen 2009
- [7] Vráblík L.: *About Normal (and Abnormal) Deflections of Longspan Concrete Bridges, The free cantilevers construction method for concrete bridges, prestressing*; vyzvané přednášky Politecnico di Milano, Itálie, prosinec 2006