ZTRÁTY PŘEDPĚTÍ V PRVCÍCH A KONSTRUKCÍCH Z PŘEDPJATÉHO BETONU V DŮSLEDKU RELAXACE NAPĚTÍ PŘEDPÍNACÍ VÝZTUŽE ▮ PRESTRESS LOSSES IN PRESTRESSED CONCRETE ELEMENTS AND STRUCTURES DUE TO STRESS RELAXATION IN PRESTRESSING STEEL

Lukáš Vráblík, Vladimír Křístek, Jan Loško

Správný návrh předpjatého betonového prvku, popřípadě celé konstrukce, je založen na stanovení adekvátní velikosti předpínací síly, včetně jejího časového vývoje. Cílem příspěvku je zhodnocení přístupů ke stanovení velikosti úbytku předpínací síly vlivem relaxace oceli. ▮ Design of prestressed concrete elements and structures is based on the determination of adequate prestressing force (including losses and their time development) to satisfy stress as well as deformation limits. The intention of the paper is to assess the approaches to evaluation of prestressing steel relaxation.

Pro dosažení požadovaného působení prvků a konstrukcí z předpjatého betonu (velikostí a rozložení napětí a deformací, včetně jejich časového vývoje) je nutné zajistit potřebný účinek předpětí – jak velikost předpínací síly v okamžiku vnesení předpětí, tak i její časový vývoj ovlivněný dlouhodobými ztrátami.

Jak napětí v konstrukci, tak i 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 i 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 (což prokazuje např. porovnání s výsledky měření na reálných konstrukcích [3]).

Z výše uvedeného je proto evidentní, že pro zajištění náležité funkce předpjatých konstrukcí (únosnosti, provozuschopnosti, trvanlivosti a spolehlivosti) je nezbytné 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 systému. 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 ověřili na realizované konstrukci – např. 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 předpětí je pro jejich stanovení rozhodující správný popis reologických vlastností materiálů – betonu (z hlediska dotvarování a smršťování) a předpínací výztuže (z hlediska relaxace).

ZTRÁTY PŘEDPĚTÍ V DŮSLEDKU RELAXACE NAPĚTÍ PŘEDPÍNACÍ VÝZTUŽE

Relaxace napětí v oceli zásadně ovlivňuje dlouhodobé chování předpjatého prvku. Jedná se o duální jev k dotvarování – při konstantní deformaci (protažení 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.

Velmi důležitá je také závislost ztráty napětí relaxací předpínací výztuže na teplotě materiálu – pro teploty vyšší než 50 °C je nutné vlastnosti materiálu ověřit měřením. Pro postihnutí vlivu zvýšené teploty na průběh ztráty napětí relaxací předpínací výztuže (např. zvýšení teploty během ošetřování betonového prvku propařováním) je dle [4] čl. 10.3.2.1 zavedena ekvivalentní doba t_{eq} zvětšující časový interval t, po kterou relaxace působí. Ekvivalentní doba t_{eq} [h] může být stanovena dle vztahu:

$$t_{eq} = \frac{1{,}14^{T_{Max}-20}}{T_{Max}-20} \sum_{i=1}^{n} \left(T_{(\Delta t_i)} - 20\right) \Delta t_i \quad , \qquad (1)$$

kde T_{Max} je maximální teplota [°C] v průběhu ošetřování, $T_{(\Delta ti)}$ je teplota [°C] v časovém intervalu Δt_i [h]; platí pro $T_{(\Delta ti)} > 20^{o}$.

Pro ukázku závažnosti tohoto jevu uvažujme jednoduchý příklad. Betonový předem předpjatý prvek ošetřovaný po dobu Δt_i = 24 h propařováním. Teplota betonu (včetně zabetonované předpínací výztuže) dosáhne T_{Max} = 50 °C. Časový interval t pro výpočet relaxace předpínací výztuže by tak měl být zvětšen o ekvivalentní dobu t_{eq} dle (1):

$$t_{eq} = \frac{1{,}14^{50-20}}{50-20} \sum_{i=1}^{1} (50-20)\cdot 24 = \frac{1{,}14^{30}}{30} \cdot 30 \cdot 24 =$$

$$= 1\,223\ [\text{h}] \cong 51\ [\text{dnů}] \qquad (2)$$

Toto může být zcela zásadní hlavně v raných stářích působení předpjatého prvku, kdy (vzhledem k charakteru průběhu nárůstu relaxace napětí v čase) dosahuje ztráta předpětí relaxací s uvážením působení zvýšené teploty několikanásobně větších hodnot než při zanedbání tohoto jevu. Důležité je upozornit, že účinek teploty na zvýšenou relaxaci předpínací výztuže se v čase postupně vytrácí (opět vzhledem k charakteru časového vývoje relaxace).

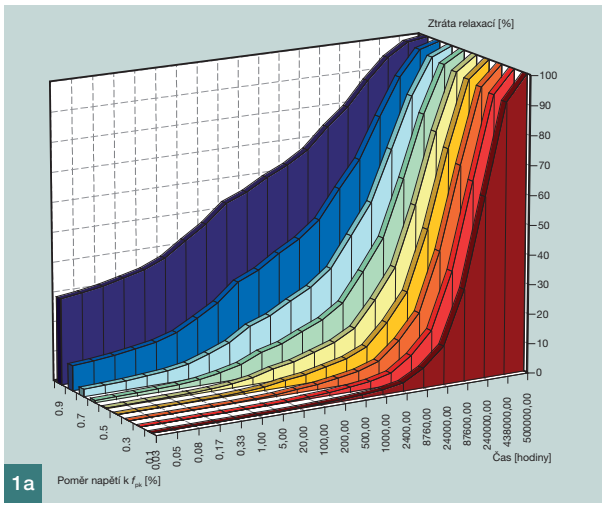
Výsledky prováděných měření na významných mostních konstrukcích [3] a provedených výpočetních analýz [2] ukazují, že právě podceněná ztráta předpětí relaxací je jednou z významných příčin nadměrných, v čase se zvětšujících de-

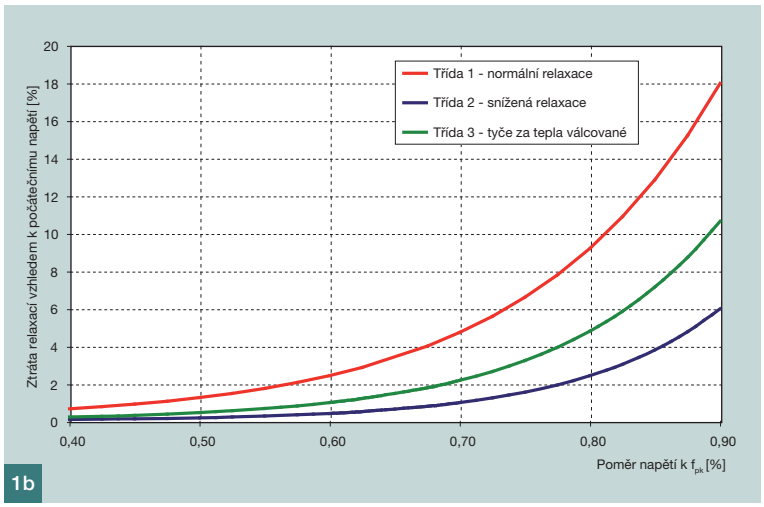
formací těchto konstrukcí. Mezi odbornou veřejností je všeobecně známo, že předpisy pro stanovení relaxace předpínací výztuže podle normy ČSN 73 6207 (tab. 1) pro navrhování předpjatých betonových mostních konstrukcí jsou chybné a nekorespondují s reálnými vlastnostmi používaných ocelí. Tato norma rozlišovala 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 jednom 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 [4] přistupuje k otázce relaxace napětí předpínací výztuže mnohem důkladněji (obr. 1). Stanovuje tzv. třídy relaxačního chování:

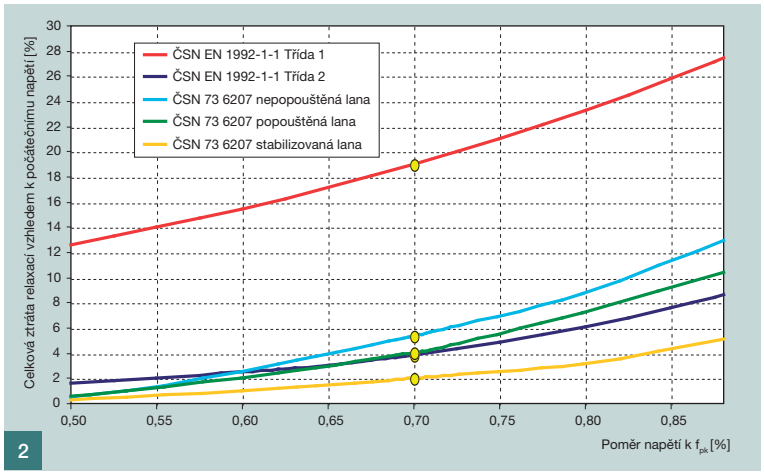
- třída 1 – dráty nebo lana s normální relaxací, vztah (3),
- třída 2 – dráty nebo lana s nízkou relaxací, vztah (4),
- třída 3 – za tepla válcované a upravené tyče, vztah (5).

Pro každou třídu je definován funkční předpis popisující vývoj v čase t (konečná hodnota se definuje pro čas 500 000 h, což odpovídá cca 57 letům) v závislosti na hodnotě ρ_{1000} (ztráta napětí relaxací po 1 000 h pro úroveň počátečního napětí 0,7 f_{pk}) a poměru počátečního napětí v předpínací výztuži σ_{pm0} k hodnotě její charakteristické pevnosti f_{pk}.



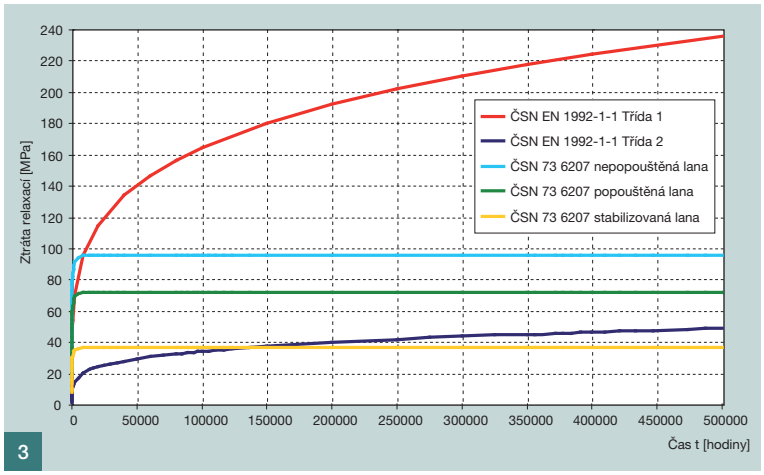


Obr. 1a, b Relaxace napětí předpínací výztuže po 1 000 h (cca 42 dnů) podle ČSN EN 1992-1-1 – vliv velikosti počátečního napětí na časový vývoj ztráty relaxací a na její velikost ▮ Fig. 1a, b The prestressing steel stress relaxation after 1000 hours (42 days) according to ČSN EN 1992-1-1 – the effect of initial stress on the prestressing loss time development and its magnitude



Obr. 2 Porovnání celkové ztráty předpětí relaxací podle různých normových předpisů ▮ Fig. 2 Comparison of the total prestressing loss due to relaxation according to different standard regulations

Obr. 3 Porovnání časového vývoje úbytku napětí v předpínací výztuži vlivem relaxace pro počáteční napětí σ_{pm0} = 0,7 f_{pk} ▮ Fig. 3 The comparison of the time development of prestressing steel stress decrease due to relaxation for initial stress σ_{pm0} = 0,7 f_{pk}

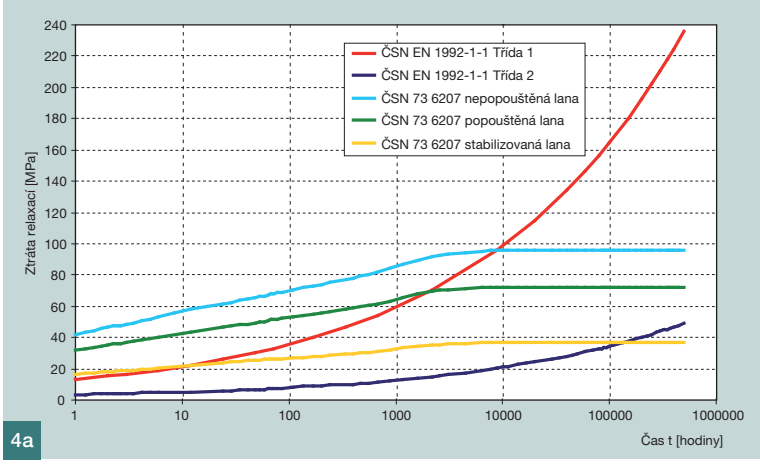


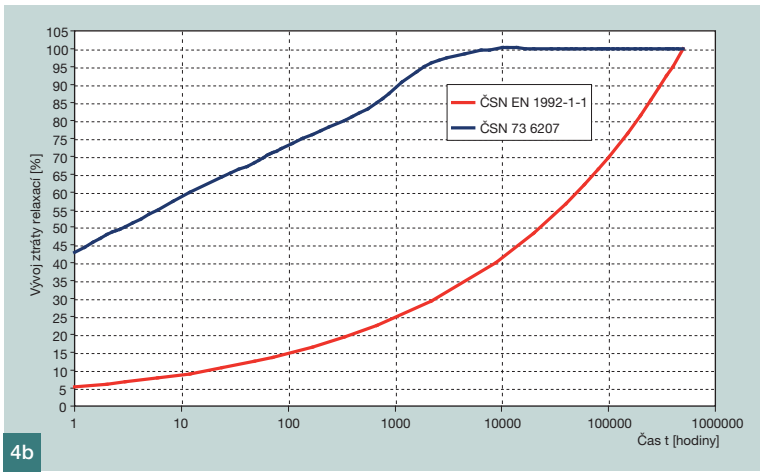
Tab. 1 Porovnání velikosti celkového úbytku napětí vlivem relaxace podle různých normových předpisů ▮ Tab. 1 Comparison of the total stress decrease according to different standard regulations

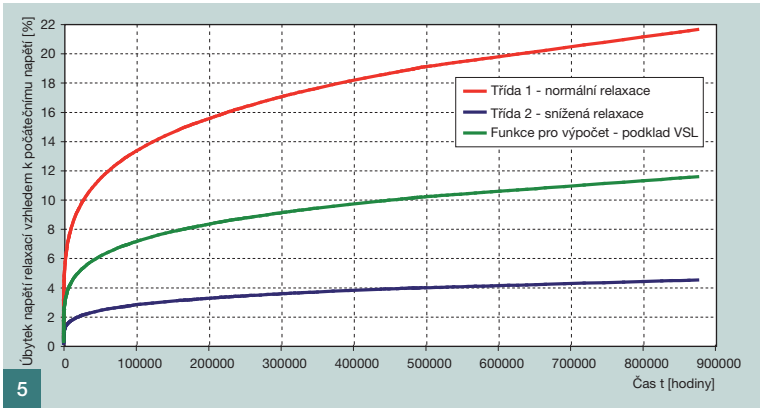
Výpočet podle ČSN 73 6207		
nepopouštěné	popouštěné	stabilizované
95,1 MPa	71,7 MPa	35,8 MPa
Výpočet podle ČSN EN 1992-1-1		
třída 1	třída 2	
235,4 MPa	48,3 MPa	

Obr. 4a, b Porovnání časového vývoje úbytku napětí v předpínací výztuži vlivem relaxace pro počáteční napětí $\sigma_{pm0} = 0{,}7\ f_{pk}$ podle různých normových předpisů, logaritmické měřítko časové osy ▮ Fig. 4a, b Comparison of the time development of prestressing steel stress decrease due to relaxation for initial stress $\sigma_{pm0} = 0{,}7\ f_{pk}$ according to different standard regulations, logarithmic scale of the time axis

Obr. 5 Porovnání úbytku napětí v předpínací výztuži vlivem relaxace pro počáteční napětí $\sigma_{pm0} = 0{,}7\ f_{pk}$ podle normových předpisů a podkladů dodavatele ▮ Fig. 5 Comparison of prestressing steel stress decrease for initial stress $\sigma_{pm0} = 0{,}7\ f_{pk}$ according to different standard and contractor regulations







Literatura:
[1] *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
[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] *Vodsloň J.:* Časový vývoj trvalých průhybů velkých mostů z předpjatého betonu; Zprávy o výsledcích dlouhodobých sledování vybraných mostů pozemních komunikací za roky 1995–2008
[4] ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí, Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby
[5] *Vráblík L., Loško J, Křístek V.:* K otázce stanovení ztrát předpětí v prvcích a konstrukcích z předpjatého betonu, časopis Beton TKS 4/2009

$$\Delta\sigma_{p,r} = \sigma_{pm0}\, 5{,}39 \cdot 8\, e^{6{,}7\frac{\sigma_{pm0}}{f_{pk}}} \left(\frac{t}{1000}\right)^{0{,}75\left(1-\frac{\sigma_{pm0}}{f_{pk}}\right)} 10^{-5} \qquad (3)$$

$$\Delta\sigma_{p,r} = \sigma_{pm0}\, 0{,}66 \cdot 2{,}5\, e^{9{,}1\frac{\sigma_{pm0}}{f_{pk}}} \left(\frac{t}{1000}\right)^{0{,}75\left(1-\frac{\sigma_{pm0}}{f_{pk}}\right)} 10^{-5} \qquad (4)$$

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

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} = 1 770 MPa, mez $\sigma_{0,2}$ = 1 570 MPa. Počáteční napětí uvažujeme σ_{pm0} = 1 239 MPa (odpovídá 0,7násobku pevnosti f_{pk}, resp. cca 0,8násobku 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 h (cca 57 let). Porovnání časového vývoje je ukázáno na obr. 3 a 4.

Nezbytné je ale poznamenat, že i postupy pro stanovení úbytku napětí v předpínací výztuži vlivem relaxace dle [4] nejsou zcela přesné. Použitelné jsou ve fázi projektu konstrukce, kdy není přesně znám 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. Na obr. 5 je ukázáno porovnání vývoje relaxace napětí v předpínací výztuži dle normových předpisů podle [4] a podkladů konkrétního dodavatele předpínacího systému.

Projektant však obvykle dostane pouze hodnotu konečného úbytku napětí vlivem relaxace z definované počáteční hodnoty napětí (obvykle jako poměr k f_{pk}). Pro popis relaxačního chování oceli je poté možno využít funkci založenou na předpisech definovaných v [4], jejich tvar je však zobecněn do formy:

$$\Delta\sigma_{p,r} = \sigma_{pm0}\, A\, e^{B\frac{\sigma_{pm0}}{f_{pk}}} \left(\frac{t}{1000}\right)^{0,75\left(1-\frac{\sigma_{pm0}}{f_{pk}}\right)} 10^{-5}\,, \qquad (6)$$

součinitele *A* a *B* jsou stanoveny s ohledem na konečný úbytek napětí v předpínací výztuži vlivem relaxace pro definovanou počáteční úroveň napětí a na jeho reálný vývoj (hledání afinního tvaru k definovaným normovým průběhům).

Pro tento zpřesněný postup lze s výhodou použít např. metody matematické regrese – na tomto základě byl na pracovišti autorů vytvořen jednoduchý výpočetní nástroj v prostředí Excel umožňující popsat reálné chování předpínací výztuže s ohledem na relaxaci za daných počátečních a okrajových podmínek; tato výpočetní pomůcka je k dispozici k volnému používání.

ZÁVĚR

Z výše uvedených skutečností je více než zřejmé, že pro správnou predikci úbytku napětí v předpínací výztuži způsobenou relaxací oceli by vždy měla probíhat úzká spolupráce mezi projektantem a dodavatelem předpínacího systému. Ten by měl poskytnout kompletní informace (a přijmout tak i částečnou odpovědnost) garantující relaxační vlastnosti předpínací výztuže a zaručit tak, společně s projektantem, správný (bezpečný a ekonomický) návrh konstrukce.

Výsledky byly získány v rámci řešení grantového projektu 103/08/P613 a projektu 103/08/1677 podporovaných Grantovou agenturou ČR a projektu MŠMT 1M6840770001 v rámci činnosti výzkumného centra CIDEAS.

Ing. Lukáš Vráblík, Ph.D.
e-mail: lvrablik@seznam.cz
Prof. Ing. Vladimír Křístek, DrSc.
e-mail: vladimirkristek@seznam.cz
Ing. Jan Loško
e-mail: jan.losko@fsv.cvut.cz

všichni: Fakulta stavební, ČVUT V Praze
Katedra betonových a zděných konstrukcí
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

Odborná společnost pro vědu,
výzkum a poradenství ČSSI
Komornická 15, 160 00 Praha 6
tel.: 224 354 365

BETONÁŘSKÉ DNY 2010

Ve dnech 23. a 24. listopadu t. r. se již tradičně v Kongresovém centru Aldis v Hradci Králové uskutečnila 17. Konference s mezinárodní účastí Betonářské dny 2010.

V předvečer konference se konal společenský večer v hradeckém Labyrintu divadla Drak, na kterém byly předány ceny vítězům vyhlášených soutěží. V soutěži o vynikající bakalářskou práci v kategorii Budovy si Bc. Lucie Bachová odnesla titul Vynikající bakalářská práce za „Srovnávací výpočty protlačení pomocí dostupného softwaru“ a Bc. Miloslav Janda obdržel Zvláštní cenu poroty za práci „Zesilování sloupů“. V kategorii Technologie betonu získala titul Vynikající bakalářská práce Bc. Dagmar Malá za „Návrh a realizace betonové kanoe“. Titul Vynikající diplomová práce získali Ing. Jakub Růžička za práci „Návrh přemostění řeky Ohře na přeložce silnice I/13“ v kategorii Inženýrské konstrukce a Ing. Romana Mazáčová za práci „Přilnavost sanačních malt k povrchu betonu“ v kategorii Technologie betonu. Hlavní cenu – titul Vynikající dizertační práce si odnesl Ing. Pavel Kaláb, Ph.D., za práci „Visuté střechy z předpjatého betonu“ v kategorii Navrhování a konstrukce staveb z betonu. Ve stejné kategorii získal Čestné uznání Ing. Michal Sedláček, Ph.D., za práci „Nelineární analýza betonových konstrukcí podzemních staveb“.

Během úvodního zahajovacího bloku konference byli jmenováni dva noví Čestní členové ČBS ČSSI – Ing. Jaroslav Vácha a Ing. Milan Šístek. Blok vyzvaných přednášek zahájil Ing. Kalný úvodní přednáškou „Výhled pro dopravní infrastrukturu – škrty, reformy nebo kompetentní rozhodování?“, poté následovaly přednášky Dr. Zimmermanna „First bridges in Austria from ultra high performance fibre reinforced concrete“, paní Buchin-Roulie „The strengthening of Binh Trieu Bridge in Vietnam“ a vítěze soutěže Vynikající dizertační práce Ing. Kalába „Visuté střechy z předpjatého betonu“.

Odborný program byl rozdělen do sekcí Mosty a tunely, Modelování a navrhování, Výzkum a technologie a Budovy a inženýrské konstrukce; přednášky probíhaly paralelně ve dvou sálech. Součástí konference byla výstava „Až po uši v betonu“, kde představila svou tvorbu sochařka Zuzana Čížková (viz také článek v Beton TKS 6/2007), a již tradičně i výstava odborných posterů a firem působících na trhu betonového stavebnictví v prostorách KC Aldis.

1a

1b

Obr. 1 Noví držitelé titulu Čestný člen ČBS ČSSI při přijímání ocenění, a) Ing. Jaroslav Vácha, b) Ing. Milan Šístek