OHYBOVÁ ÚNOSNOST DESEK ZTRACENÉHO BEDNĚNÍ VYROBENÝCH Z UHPFRC A VLIV DISTRIBUCE OCELOVÝCH VLÁKEN ▮ INFLUENCE OF STEEL FIBRE DISTRIBUTION ON LOAD-BEARING CAPACITY OF UHPFRC LOST SHUTTERING SLABS

Milan Rydval, Jiří Kolísko

Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) je jemnozrnný cementem pojený kompozitní materiál, který je používán po celém světě. UHPFRC spadají do široké skupiny vysokopevnostních UHPC betonů. I přes jeho používání ve světovém měřítku neexistuje jeho jednotná klasifikace. Jedním z rozhodujících parametrů je pevnost v tlaku, která také není jednoznačně určena. Obecně do skupiny UHPC spadají betony, jejichž pevnost je vyšší než 150 MPa. Oproti světovému využití UHPC ve stavební praxi si UHPC v České republice hledá cestu ke svému uplatnění. Vývoj tohoto jemnozrnného kompozitního materiálu s sebou přináší řadu technických a technologických problémů, které je třeba řešit pro zdárnou aplikaci prvků z UHPC jako stavebních dílců. Vliv distribuce vláken po výšce průřezu a její homogenita je jedním z problémů, kterému je třeba se věnovat. Mechanické vlastnosti, zejména pevnost v tahu za ohybu, mohou být negativně ovlivněny segregací vláken ke dnu formy. V článku jsou uvedeny výsledky průkazních zkoušek desek ztraceného bednění, které byly použity pro rekonstrukci mostu přes rychlostní silnici R10 poblíž Benátek nad Jizerou. Článek se nezabývá pouze ohybovými zkouškami desek, ale také kontrolou distribuce vláken po výšce průřezu a jejímu vlivu na výslednou mechanickou pevnost materiálu desek. ▮ UHPFRC is increasingly being used all around the world. Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete is fine grained cementitious composite material from the wide range of Ultra-High Performance Concrete. Uniform designation and classification does not exist for this type of material. The compressive strength is one of the significant parameter for UHPC materials but even that is not uniformly defined. Compressive strength greater than 150 MPa can generally characterize this type of material. UHPC is used more widely around the world than in the Czech Republic. The development of this type of material is associated with a number of technical and technological problems that need to be solved before using this material at real constructions and real parts of structures. Homogeneity of the steel fibre distribution at cross section is one of those problems. Mechanical properties, especially flexural bending strength, could be negatively affected by segregation of fibres to the bottom of the formwork. Results of validation tests of permanent formwork slabs made from UHPC that were used for the reconstruction of the bridge near Benatky nad Jizerou are presented in this paper. The paper describes not only bending tests on the slabs but it also describes the method of checking the steel fibre homogeneity and its impact on load bearing capacity of the slabs.

UHPFRC je relativně novým jemnozrnným kompozitním materiálem, jehož pevná a zároveň křehká matrice je vyztužena kovovými vlákny. Tento materiál vznikl postupnou modifikací betonu běžného, zejména v souvislosti s rozvojem stavební chemie. Od běžných betonů se UHPFRC liší použitím jemného kameniva, $d_{max} \leq 4$ mm, které spolu s cementovým pojivem a dalšími jemnými fillery jsou skládány tak, aby granulometrická křivka byla co nejplynulejší. Další odlišností ve složení směsi je nízká hodnota vodního součinitele (cca 0,2 až 0,3) a použití vysoce účinných superplastifikátorů.

V celosvětovém měřítku prozatím neexistuje jednotný a všeobecně uznávaný předpis, který by tento typ materiálu blíže specifikoval. Toto je částečně dáno rozdílným stupněm vývoje a také rozdílnou kvalitou vstupních surovin v jednotlivých zemích, kde je tento materiál nejen vyvíjen ale i aplikován v reálných stavbách nebo stavebních dílcích.

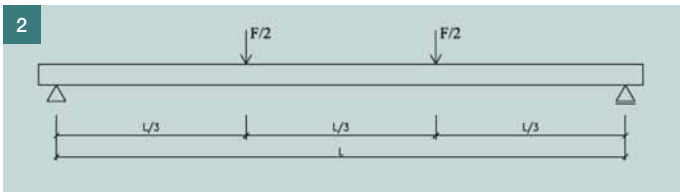
Vzhledem k sbližování jednotlivých názorů lze tento typ betonu charakterizovat pevností v tlaku na válcích, která by měla být minimálně 150 MPa, resp. např. dle doporučení FHWA [9] také 126 MPa. V národních doporučeních, jako např. AFGC [1], JSCE [2], Deutscher Ausschuss für Stahlbeton [3], Beton-Kalender [8], se liší i velikostí zkušebních těles, na kterých je tato mez stanovena. Obecně by ale tato hodnota pevnosti v tlaku měla být stanovena na válcových zkušebních tělesech s poměrem průměru k výšce od 1:2 po 1:3.

Dalším charakteristickým parametrem pro UHPC je pevnost v tahu, která je nejčastěji nahrazována pevností v tahu za ohybu. I u této zkoušky se ovšem hodnoty pevnosti při vzniku trhliny liší a také způsob zkoušení je odlišný.

Nejen vzhledem k těmto ale i dalším užitným parametrům je UHPFRC využitelný pro výrobu subtilnějších konstrukčních prvků a při vhodně navrženém tvaru prvku a jeho umístění v konstrukci také pro výrobu prvků bez běžné ocelářské výztuže nebo s jejím omezením. Ve světě je tento materiál používán pro reálné konstrukce a konstrukční prvky. V České republice již také začíná získávat prostor při reál-

1

Obr. 1 Instalace desek ztraceného bednění z materiálu na bázi UHPFRC na mostním objektu přes silnici R10 poblíž Benátek nad Jizerou ▮ Fig. 1 Installation of bridge slabs of permanent formwork made of UHPC on the reconstructed bridge in Benatky nad Jizerou



Obr. 2 Schéma uspořádání zatěžovací zkoušky desek ztraceného bednění ve čtyřbodovém ohybu ▮ Fig. 2 Four-point bending test arrangement of UHPFRC lost shuttering slabs

ných aplikacích, jakou je např. lávka pro pěší v Čelákovicích (*viz Beton TKS 4/2014, str. 10-18, pozn. red.*).

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Vlastnosti a dávkování jednotlivých složek, stabilita směsi vůči segregaci, technologie výroby a lidský faktor ovlivňují výsledné mechanické vlastnosti Ultra-High Performance Concrete (UHPC). Všechny výše uvedené faktory ovlivňují také míru homogenity distribuce vláken po výšce průřezu, která ovlivňuje mechanické pevnosti, zejména pevnost v tahu, resp. pevnost v tahu za ohybu.

Při návrhu prvků z tohoto typu materiálu lze jako podkladu využít řadu publikací, jako např. Model Code [4], doporučení AFGC [1] nebo Deutscher Ausschuss für Stahlbeton [3] ad. V těchto významných publikacích a doporučeních jsou shrnuty výsledky několikaletého vývoje UHPC ve světě, ale nezabývají se metodami kontroly homogenity distribuce vláken a hodnocením jejího vlivu na výsledné mechanické parametry. Ve francouzském doporučení AFGC [1] je stanovována hodnota *K*-faktoru, který by měl postihnout rozdílné rozložení vláken v prvku.

V tomto článku je popsána mikroskopická metoda kontroly distribuce vláken a její vliv na ohybovou únosnost desek o rozměrech 1 × 1,6 m a tloušťce 20 mm, které byly po obvodu a ve středu vyztuženy žebry o výšce 60 mm (včetně tloušťky desky) a byly vyrobeny z jemnozrnného kompozitního materiálu na bázi UHPFRC [5]. Tento typ desek byl po provedení všech zkoušek využit při rekonstrukci mostu přes rychlostní silnici R10 poblíž Benátek nad Jizerou. Desky z materiálu na bázi UHPFRC byly použity jako ztracené bednění u spřažené ocelobetonové mostní konstrukce (obr. 1).

ZKOUŠKY DESEK V OHYBU

V běžném závodě na výrobu prefabrikátů byly vyrobeny zkušební desky ztraceného bednění o rozměru 1 × 1,6 m a tloušťce 20 mm, symetricky vyztužené po obvodě a ve středu žebry o celkové výšce 60 mm, v příčném směru bylo středové žebro vysoké 40 mm.

Desky byly převezeny do laboratoře Kloknerova ústavu ČVUT v Praze, kde byly zkoušeny ve čtyřbodovém ohybu. Rychlost zatěžování do dosažení meze pevnosti a vzniku makrotrhliny byla 0,01 mm/s posunu pístu hydraulického válce. Po porušení desky a dosažení meze pevnosti byla rychlost posunu pístu zvýšena na hodnotu 0,02 až 0,03 mm/s. Celková doba zatěžování byla 30 min.

Pro snímání průběhu zkoušek byly na řídicí systém napojeny snímače deformací ve středu rozpětí a u podpor a také snímač síly, a tak bylo možno průběžně sledovat deformace desek. Na obr. 2 a 3 je vidět uspořádání zkoušky a zatěžovaná deska.

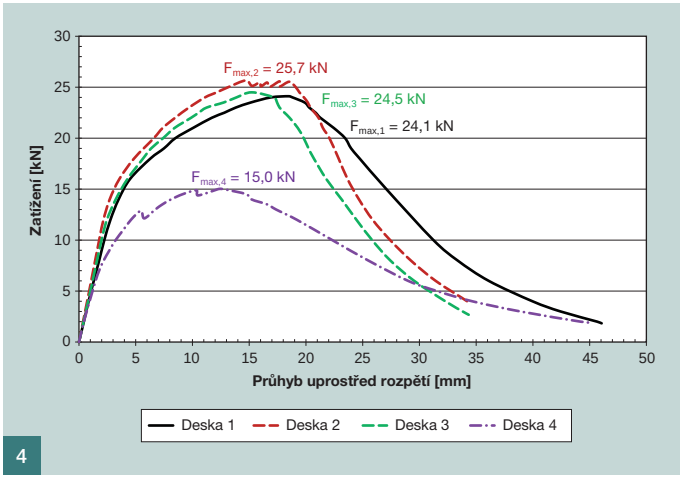
Při betonáži byly desky orientovány žebry směrem dolů, což mohlo přispět k poklesu (sednutí) drátků do žeber vlivem gravitace. Během optimalizace receptury a technologie výroby byla provedena řada kontrolních testů, které měly ověřit vhodnost zvolené technologie výroby a složení směsi.

Během pilotních testů desek ztraceného bednění bylo provedeno více než dvacet zkoušek pevnosti ve čtyřbodovém ohybu. Při zkouškách byla sledována závislost působící síly a deformace desky ve středu rozpětí. Výsledkem každé zkoušky byl pracovní diagram. Na obr. 4 jsou uvedeny pracovní diagramy několika vybraných desek, u kterých byla následně kontrolována homogenita distribuce ocelových vláken.

Během pilotních testů byl u některých desek zjištěn značný pokles v naměřených hodnotách maximální síly při porušení desky. Obvyklá únosnost desek přesahovala 20 kN. Nastaly však i případy (obr. 4), kdy došlo k významnému poklesu únosnosti. V rámci stanovení příčin byly vybrané desky použity pro kontrolu distribuce vláken po průřezu (obr. 5). Fyzikálně-mechanické vlastnosti materiálu desek jsou uvedeny v tab. 1. Testy byly prováděny na tělesech vyrobených přímo při výrobě desek, tj. mícháním v běžném provozu prefa závodu a ošetřovaných po odformování ve vodní lázni až do termínu zkoušek.

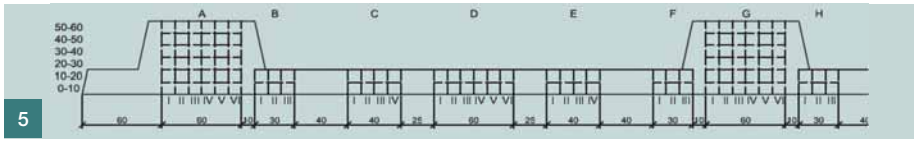
Obr. 3 Uspořádání zatěžovací zkoušky desek ztraceného bednění ▮ Fig. 3 Four-point bendig test of UHPFRC lost shuttering slabs

Obr. 4 Výsledky ohybových zkoušek u vyhodnocovaných desek ztraceného bednění z UHPFRC ▮ Fig. 4 Load – mid-span deflection relations of the four-point bending test



Tab. 1 Souhrnný přehled průměrných výsledků průkazní zkoušky UHPFRC při zahájení výroby desek ztraceného bednění ▮ Tab. 1 Summary of preliminary tests results of lost shuttering UHPFRC slabs

Zkouška	Příslušná norma	Průměrná dosažená hodnota
Konzistence sednutí rozlitím v čase 25 min [mm]	ČSN EN 12350-8	810
Objemová hmotnost čerstvé směsi [kg/m^3]	ČSN EN 12350-6	2 450
Válcová pevnost v tlaku po 28 dnech [MPa]	ČSN EN 12390-3	125
Modul pružnosti po 28 dnech [GPa]	ČSN ISO 6784	45
Pevnost v tahu za ohybu po 28 dnech, trámce 150 x 150 x 700 mm se zářezem [MPa]	ČSN EN 14651+A1	13,9
Reziduální pevnost v tahu za ohybu σ_1 po 28 dnech pro CMOD 1 mm [MPa]	ČSN EN 14651+A1	9,5
Reziduální pevnost v tahu za ohybu σ_4 po 28 dnech pro CMOD 4 mm [MPa]	ČSN EN 14651+A1	4,9
Hloubka průsaku tlakovou vodou [mm]	ČSN EN 12390-8	0,5
Odpad při odolnosti proti CHRL [g/m^2], metoda C, 125 cyklů	ČSN 72 1326	18



5

Obr. 5 Schéma sektorů pro vyhodnocení homogenity distribuce vláken na deskách ztraceného bednění vyrobených z UHPFRC, celkem provedeno vyhodnocení ve 188 sektorech (62 % celkové řezné plochy)
▮ Fig. 5 Subsectors scheme used for controlling homogeneity of steel fibre distribution at cross section of lost shuttering slabs, 62 % of cross section was controlled

Obr. 6 Distribuce drátků u desky 2 v poloze, v které byly zkoušeny, F_{max} = 25,7 kN ▮ Fig. 6 Steel fibre distribution in slab 2 in four-point bending test position, F_{max} = 25.7 kN

Obr. 7 Distribuce drátků u desky 4 v poloze, v které byly zkoušeny, F_{max} = 15 kN
▮ Fig. 7 Steel fibre distribution in slab 4 in four-point bending test position, F_{max} = 15 kN

KONTROLA HOMOGENITY OCELOVÝCH VLÁKEN PO VÝŠCE PRŮŘEZU

Homogenita distribuce ocelových vláken je jedním z faktorů ovlivňujících výsledné mechanické parametry prvků vyrobených z UHPFRC. Distribuce vláken je jedním z parametrů, který není závislý na stáří betonu a lze ji kontrolovat jak u čerstvé směsi, tak u ztvrdlého kompozitu pomocí nedestruktivních i destruktivních zkoušek [6].

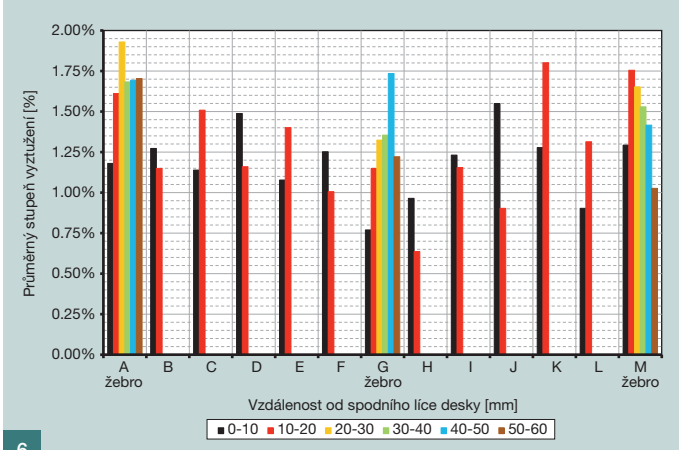
Mikroskopická metoda kontroly distribuce vláken použitá v tomto projektu spadá do skupiny destruktivních zkoušek, jelikož pro její provedení je potřeba odebrat vzorek z prvku, případně z konstrukce. Při kontrole homogenity ocelových vláken u desek ztraceného bednění byla tato metoda použita po statické zkoušce pevnosti v tahu za ohybu, a to snímáním řezné plochy vytvořené poblíž makrotrhliny. Celkem bylo pro kontrolu vybráno šest desek tak, aby jedna polovina z nich měla vyhovující pevnost a druhá polovina pevnost nevyhovující.

Desky byly po provedení zkoušky v ohybu rozřezány pilou s diamantovým kotoučem poblíž vzniklé makrotrhliny. Na řezné ploše byl vytvořen rastr sektorů o velikosti 100 mm^2 po celé délce desky, včetně ztužujících žeber (obr. 5).

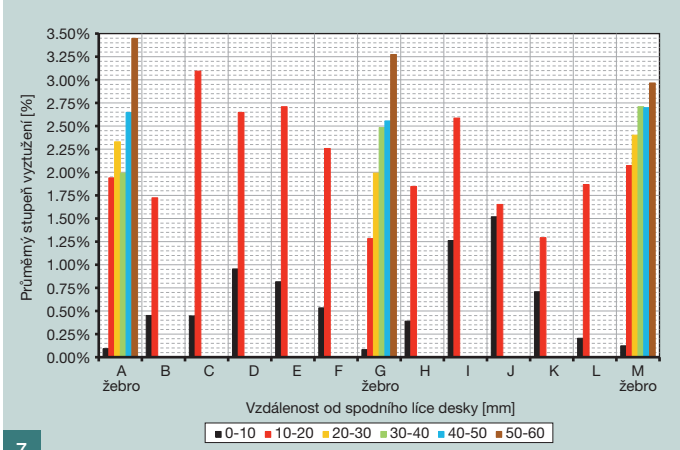
Kontrola distribuce drátků byla prováděna pomocí mikroskopu na zhruba 2/3 celkové řezné plochy. Po vytvoření sektorů byl povrch namáčen a snímán digitálním mikroskopem a poté bylo pomocí grafického programu stanovováno množství drátků v příslušném sektoru. Při snímání byl povrch 30krát zvětšen. Během snímání byly zkoušeny i další úpravy povrchu tak, aby byly drátky rozpoznatelné od kameniva. Grafy na obr. 6 a 7 zobrazují výsledky kontroly distribuce vláken na řezných plochách desek ztraceného bednění.

Z grafu na obr. 6 je patrné, že u desky 2 byly drátky rovnoměrněji rozloženy nejen v desce tloušťky 20 mm, ale také ve ztužujících žebrech, která tvořila při výrobě dno formy. Průměrný stupeň vyztužení u vrchního (vzdušného) líce desky, vzdálenost od spodního líce desky 0 až 10 mm, černá, při výrobě odpovídal průměru 1,2 % stupně vyztužení. Tato oblast by se dala charakterizovat jako tahová oblast při zkoušení desek. Obdobných hodnot bylo dosaženo i ve větších vzdálenostech od spodního líce desky, který během výroby byl horním, upravovaným lícem desky. Tomuto rovnoměrnému rozložení odpovídala maximální dosažená tlačná síla 25,7 kN.

U desky 4 (obr. 7) je patrné, že došlo k výraznému sednutí drátků ke dnu formy – do ztužujících žeber. Při stejném dávkování drátků jako u desky 2 (1,5 % objemového procenta na 1 m^3 směsi) byl průměrný stupeň vyztužení pouhých 0,67 %. S narůstající vzdáleností od spodního líce se tento průměr zvyšoval až do hodnoty 3,23 %. Při takto nerovnoměrném rozložení vláken, kdy v tahové oblasti byl stupeň vyztužení pouhých 0,67 % a v tlakové oblasti 3,23 %, byla dosažena maximální síla 15 kN, což je o 40 % méně než u desky 2 s rovnoměrným rozdělením vláken. Průměrný stupeň vy-



6



7

Literatura:
[1] AFGC/SETRA: Bétons fibrés à ultra-hautes performances, Recommandations, Documents scientifiques et techniques, Association Française de Génie Civil, Setra, 2013
[2] JSCE-USC: Recommendations for Design and Construction of Ultra-High Strength Fiber-Reinforced Concrete Structures – Draft
[3] *Schmidt M. a kol.*: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Sachstandsbericht Ultrahochfester Beton, Berlin, 2008, ISBN 978-3-410-65045-4
[4] *fib* Bulletin 55: Model Code 2010, First complete draft – Volume 1, 2010, ISBN 978-2-88394-095-6
[5] *Rydval M., Kolísko J., Vokáč M., Huňka P.*: An assessment of the steel fibre distribution to load bearing capacity of lost shuttering slabs made from UHPFRC, Marseille, Francie: RILEM Proc. PRO 87, 2013, ISBN 978-2-35158-130-8
[6] *Kolísko J., Rydval M., Huňka P.*: UHPC – Assessing the Distribution of the Steel Fibre and Homogeneity of the Matrix, Tel Aviv, Israel: Proc. of *fib* Symp. Tel Aviv 2013, ISBN 978-965-92039-01
[7] *Kolísko J., Tichý J., Kalný M., Huňka P., Hájek P., Trefil V.*: Vývoj ultra vysokohodnotného betonu (UHPC) na bázi surovin dostupných v ČR, Praha: Beton TKS 2012 příloha, str. 50–56, ISSN 1213-3116
[8] *Fehling E., Schmidt M., Walraven J., Leutbecher T., Fröhlich S.*: Ultra High Performance Concrete UHPC – Beton-Kalender, Ernst & Sohn, Darmstatd, Germany 2014, ISBN 978-3-433-03087-5
[9] Design Guide for Precast UHPC Waffle Deck Panel System, including Connections, Publication No. FHWA-HIF-13-032, June 2013

ztužení byl stanoven podle vztahu (1):

$$\rho_{\text{prům}} = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \frac{mA_s}{A_c} \right) \times 100\ [\%]\ , \qquad (1)$$

kde n je počet sektorů v dílčích oblastech (A až M) a vzdálenostech od dna formy (0 až 60 mm), m je počet drátků ve vyhodnocovaném sektoru, A_s plocha jednoho drátku a A_c je plocha vyšetřovaného sektoru.

ZÁVĚR

Vývoj a reálná aplikace prvků z jemnozrnného cementem pojeného kompozitního materiálu vyztuženého ocelovými drátky (UHPC) s sebou přináší řadu technických a technologických problémů, které je třeba řešit. Jedním z technologických problémů je potenciální možnost segregace vláken jak vlivem gravitace, tak vlivem stability směsi vůči segregaci drátků ke dnu formy.

Jak ukazuje prezentovaný případ, segregace vláken může nepříznivě ovlivnit výsledné mechanické parametry. Z našich praktických výsledků a zkušeností s tímto jemnozrnným materiálem plyne, že k segregaci dochází nejen vlivem gravitace a stabilitou směsi, ale také při nedodržení pravidel návrhu receptury a pravidel při provádění prvků z tohoto materiálu.

Během pilotních a kontrolních testů byl vytvořen technologický předpis, dle kterého byla řízena výroba všech desek tak, aby je bylo možné kvantifikovaně posoudit a porovnat s teoretickými předpoklady a bezpečně použít při rekonstrukci mostu přes rychlostní silnici R10 poblíž Benátek nad Jizerou, pod kterým nebyl během realizace opravy přerušen provoz.

Dostupné návrhové zahraniční přístupy jsou si vědomy problematiky homogenity distribuce vláken po průřezu a do výpočtů zavádějí upřesňující koeficienty, které jsou zjišťovány experimentálními přístupy a postihují rizika nerovnoměrného rozdělení vláken v konstrukci. Segregace vláken ke dnu formy je jedním z fenoménů, který je nutno brát při výrobě UHPFRC v potaz a v zásadě, jak ukazují naše praktické zkušenosti, i fenoménem řešitelným. Kromě vhodného složení receptury je také nutné navrhnout technologii výroby a důsledně dodržovat pracovní kázeň při zacházení s tímto moderním, jemnozrnným cementem pojeným, kompozitním materiálem.

Celosvětově rychle se množící a šířící aplikace tohoto high-tech materiálu je důkazem toho, že UHPC je možné využít nejen v laboratorních podmínkách, ale i mimo ně.

Tato práce vznikla na základě finanční podpory Grantové agentury České republiky financováním z grantového projektu GAČR 13-15175S „Prvky z funkčně vrstvených vláknocementových kompozitů“.

Ing. Milan Rydval
e-mail: milan.rydval@klok.cvut.cz

doc. Ing. Jiří Kolísko, Ph.D.
e-mail: jiri.kolisko@klok.cvut.cz

oba: Kloknerův ústav ČVUT v Praze
Šolínova 7, 166 08 Praha 6

BETOSAN®
DRŽITEL CERTIFIKÁTU ČSN EN ISO 9001 A 14001
alternativa, kterou oceníte
Tmelení, těsnění, injektáže
PRUŽNÉ TMELY PRO TĚSNĚNÍ PROSTUPŮ A DILATACÍ
TMELY NA BÁZI MS POLYMERŮ
LEPÍCÍ TMELY
NÁHRADA SILIKONŮ
PRŮTAŽNOST AŽ 300 %
www.betosan.cz
OBCHODNĚ-TECHNICKÁ KANCELÁŘ
Nová cesta 291/40 tel./fax: 241 431 212
140 00 Praha 4 e-mail: praha@betosan.cz
Firemní prezentace