

# ULTRAVYSOKOPEVNOSTNÍ BETON V PREFABRIKACI

## ■ ULTRAHIGHSTRENGTH CONCRETE IN PREFABRICATION

Jan Tichý, Alain Štěrba, Vladislav Trefil, Ivo Žaloudek

Článek popisuje důležité odlišnosti ultravysokopevnostních betonů proti běžným a vysokopevnostním betonům z hlediska složení receptury a výroby a uvádí výsledky zkoušek pevnosti v tlaku, tahu a tahu za ohybu měřených na trámečcích připravených ze směsí různého složení a modelové zkoušky nosníku z vybrané receptury UHPC. ■ *Dissimilarities of ultrahighstrength concrete and common and highstrength concretes with focus on their mix composition and production are described in the article. Results of experimental measurements of concrete strength in compression and tension are presented and the load-deflection diagram of the experimental beam prepared from selected concrete mix is described.*

Pro své technické, ekonomické a ekologické výhody jsou ultravysokopevnostní betony (dále jen UHPC) zkoumány a používány více než čtvrt století. U nás se UHPC až na výjimky nepoužívají. Proto jsou betonové konstrukce hodně robustní, což má negativní vliv na životní prostředí (zvyšování vypouštění CO<sub>2</sub> do ovzduší). Jednou z možností, kde lze UHPC využít, je prefabrikace.

Měrné náklady na složky UHPC se sice oproti běžnému betonu zhruba ztrojnásobí, očekáváme však snížení kubatury až na polovinu. Hlavním přínosem kromě zlepšení životního a pracovního prostředí bude zvýšení užitných vlastností a trvanlivosti, zvláště v podmínkách vysoce agresivního prostředí.

V příspěvku jsou ukázány výsledky iniciativního vyhledávacího řešení, které započalo zkouškami samotného betonu. Je na co navazovat. V české technické literatuře jsou to např. příspěvky [1] až [5]. V Evropě jsou to hlavně dva směry:

- „škola“ charakterizovaná osobou Prof. Michaela Schmidta [6 až 8], která využívá zpravidla kamenivo do 8 mm,
- velmi jemnozrnny beton typu „reaktivní práškový beton – RPC, Ductal“, o kterém v češtině nejpodrobněji referuje příspěvek [9]. Tento beton je zvláště silně vyztužen drátky, a má proto velmi vysokou pevnost v tahu (nad 10 MPa).

Mimo Evropu se UHPC dynamicky rozvíjí hlavně v USA, Japonsku, Koreji a Austrálii.

### VÝHODY UHPC A DŮVODY PRO JEHO POUŽÍVÁNÍ

Pro svou vysokou pevnost (pevnost v tlaku nad 150 MPa, pevnost v tahu za ohybu nad 15 MPa) se UHPC uplatňuje především tam, kde je možné snížit hmotnost (rozměry) a vyloučit nebo omezit klasickou ocelovou výztuž. Nejde přitom pouze o snížení pracnosti. Přínosem může být i použití UHPC s cílem omezit šířku mikrotrhlinek, a tím zvýšit spolehlivost z hlediska mezních stavů použitelnosti.

Uvedené případy se netýkají pouze monolitického betonu. UHPC byl využit i v prefabrikaci. Podle [4] bylo např. pro letiště Haneda v Tokijském zálivu vyrobeno 6 900 předem předpjatých žebírkových panelů rozměrů 7,82 × 3,61 × 0,25 m (celkem 192 000 m<sup>2</sup>), kterými byla dosažena úspora 56 % vlastní hmotnosti, a tím i úspora na spodních ocelových konstrukcích a na zakládání.

U uvedeného příkladu (letiště Haneda) se počítá se zvýšením trvanlivosti na dvě stě let, a to v agresivním přímořském

prostředí. Ještě přínosnější je využití UHPC pro konstrukce přímo ohrožené agresivními roztoky.

Zvýšení trvanlivosti spolu se zmenšením objemu konstrukcí má příznivý vliv také na trvale udržitelné životní prostředí. V Německu proto napomáhá rozvoji UHPC i velkoryse dotovaný program „Nachhaltiges Bauen mit UHPC“, který lze volně přeložit jako „ekologické stavění s UHPC“. Na programu financovaném podle [8] Deutsche Forschungsgemeinschaft částkou 10 milionů € se podílí osmnáct výzkumných pracovišť v širokém spektru od výzkumu materiálů až po návrhové postupy (včetně modelů).

### VÝVOJ RECEPTURY UHPC V NAŠICH PODMÍNKÁCH

#### Složky betonu, jejich spolupůsobení a obsah

##### Cement

O vhodnosti cementu pro UHPC nerozhoduje pouze jeho pevnostní třída. Pevnost UHPC významně ovlivňuje i vodnáročnost cementu.

Není třeba se omezovat jen na portlandské cementy. V současnosti jsou v zahraničí vyráběny speciální vysoce účinné cementy. Jedním z příkladů je cement Nanodur (CEM II/B-S 52,5 R) obsahující též mimořádně jemné (10 až 100 μm) syntetické oxidy křemíku, které reagují s hydroxidem vápenatým rychleji než běžný křemičitý úlet.

Obecně je obsah cementu závislý na obsahu ostatních moučkových zrn a na D<sub>max</sub> kameniva. U jemnozrnnych betonů s D<sub>max</sub> = 0,5 mm byl použit podle [6] i obsah 900 kg/m<sup>3</sup> (při obsahu mikrosiliky 225 kg/m<sup>3</sup>). S tímto cementem byl vyroben beton, jehož 28denní pevnost v tlaku na zlomcích trámečků 40 × 40 × 160 mm byla 190 MPa; odpovídající pevnost v tahu za ohybu byla 23 MPa. K dosažení uvedených pevností přispěl „koktejl“ drátků (61 kg/m<sup>3</sup> krátkých a 41 kg/m<sup>3</sup> dlouhých).

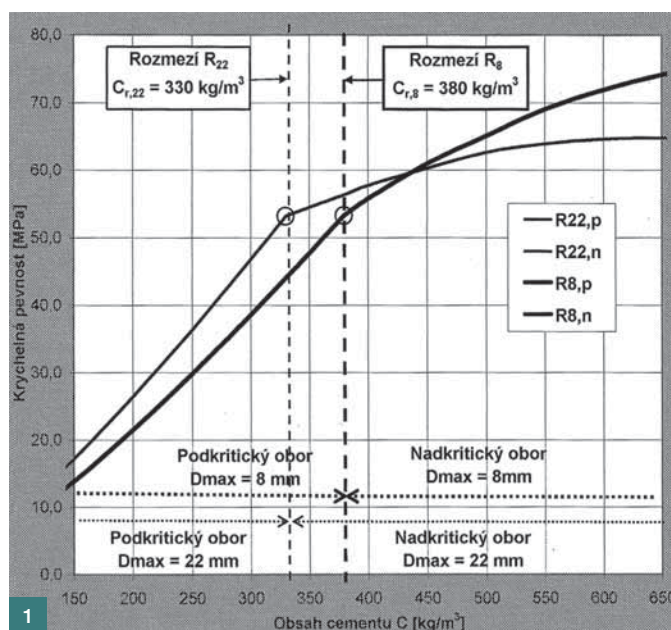
##### Příměsi

S cílem vázat málo pevné produkty hydratace – Ca(OH)<sub>2</sub> – do odolnějších a pevnějších struktur obsahuje UHPC vhodné pucolány, zpravidla křemičitý úlet. Obsah křemičitého úletu přitom překračuje běžnou horní mez dávkování (10 % hm. cementu). Podle [6] největší pevnost UHPC 225 MPa byla dosažena při použití 177 kg/m<sup>3</sup> mikrosiliky a 580 kg/m<sup>3</sup> CEM I 52,5 R HS-NA, tedy podíl mikrosiliky 31 % hm.

Uvedený nejpevnější beton, který byl vyroben z kameniva s D<sub>max</sub> = 8 mm, obsahoval navíc dalších 456 kg/m<sup>3</sup> inertních příměsí; celkový obsah moučky (do 0,125 mm) byl v tomto betonu kolem 1 050 kg/m<sup>3</sup>. Dalším úkolem příměsí je totiž zlepšit zrnitost pevných složek betonu v oblasti nejjemnějších zrn. Bylo prokázáno, že takto získanou větší hutností lze dosáhnout zvětšení pevnosti betonu i bez dalšího snížení vodního součinitele. Proto se kladně mohou uplatnit i téměř inertní příměsi druhu I, tzv. nanopříměsi.

### KAMENIVO A JEHO MAXIMÁLNÍ ZRNO D<sub>MAX</sub>

Na rozdíl od běžných betonů hraje u UHPC velkou roli i pevnost kameniva (nad 200 MPa) a jeho soudržnost s pojivovou složkou. Při výběru kameniva proto záleží nejen na jeho pev-



Obr. 1 Schéma závislosti pevnosti betonů na obsahu cementu a  $D_{max}$  v podkritickém a nadkritickém oboru ■ Fig. 1 Diagram of the relationship of the strength of concrete and amount of cement and  $D_{max}$

nosti, ale i na jeho afinitě k pojivovému tmelu; proto samozřejmě i na jeho čistotě.

Zcela jinak než u běžných betonů se uplatňuje i horní mez nejhrubší frakce kameniva,  $D_{max}$ . U běžných betonů je třeba k dosažení stejné pevnosti zvětšovat obsah cementu s nepřímou závislostí na  $D_{max}^n$ , kde  $n$  je zpravidla mírně menší než 0,2. U betonů s nízkým vodním součinitelem uvedená závislost neplatí. Jako vždy se uplatňuje více vlivů. Zde bude uvedena pouze Štěrbova ilustrace za pomoci obr. 1. Tato ilustrace platí v zásadě pro všechny betony většiny konzistencí. Podmínkou je přizpůsobení zhuštění použité konzistence. Další podmínkou platnosti ilustrace je neměnná zrnitost kameniva. Působí i další specifické i obecné vlivy, např. stěnový účinek.

Podstatou ilustrace je rozlišení dvou oborů závislosti pevnosti betonu na cementovém součiniteli. Rozmezím mezi oběma obory je kritický obsah pojiva, při kterém se dosahuje maximální hutnost všech pevných složek betonu.

V podkritickém oboru je obsah vody téměř nezávislý na obsahu pojiva. Podkritický obor se vyznačuje nezávislostí obsahu vody na vodonáročnosti pojiva.

V nadkritickém oboru platí opak. Aby byla dodržena předepsaná konzistence, je třeba zvětšovat obsah vody, a to v závislosti na přírůstku obsahu pojiva proti kritické hodnotě odpovídající rozmezí. Od uvedeného rozmezí se začíná postupně uplatňovat i vodonáročnost pojiva. V závislosti na přírůstku obsahu cementu roste i smrštění a klesá modul přetvárnosti. Rozdíly proti vztahu v podkritické oblasti se zmírňují působením účinné plastifikační přísady nebo mimořádně účinným zhuštěním.

### Přísady

Hromadnější praktické využívání UHPC je bez jakostních novodobých plastifikačních přísad nemyslitelné. Na rozdíl od obyčejných i vysokopevnostních betonů jsou uváděny i nezvykle vysoké obsahy novodobých přísad (na bázi PCE

Číslo záměsí	487	621	786	792		
Datum	19.5.09	1.7.09	21.8.09	26.8.09		
Složky směsi						
CEM A	kg	700				
CEM B	kg		650			
CEM C	kg			730 732		
Microsilika	Elkem 500 DOZ	kg	200	100	150	150
Superplastifikační přísada	Glenium ACE 30	kg	35,1			
	Glenium ACE 430	kg		28	47,2	47,3
Přísada proti smršťování	Rheocure SFR 2	kg				7,6
Vlastnosti TB						
po 7 dnech rozměry tělesa						
Statický modul pružnosti		GPa			42	
Pevnost v tlaku	40 x 40 x 160 mm	MPa	94	104	101	103
Pevnost v tahu za ohybu	40 x 40 x 160 mm	MPa	9,8	26	20	21
po 28 dnech						
Pevnost v tlaku	40 x 40 x 160 mm	MPa	127	150		
Pevnost v tahu za ohybu	40 x 40 x 160 mm	MPa		40		

Tab. 1 Vývoj při optimalizaci receptur, některé výsledky zkoušek ■ Tab. 1 Development of the mix formulation, some of test results

apod.). Vyskytují se i obsahy kolem 30 kg/m<sup>3</sup>, které odpovídají 5 % hmotnosti cementu, případně 2,9 % hmotnosti všech zrn do 0,125 mm.

### Drátky

Pro ně platí téměř vše, co bylo uvedeno o plastifikačních přísadách. Opět jde hlavně o jejich kvalitu a obsah. Vyskytují se i obsahy kolem 200 kg/m<sup>3</sup> [6], jako směrný minimální obsah můžeme uvažovat hodnotu 75 kg/m<sup>3</sup>.

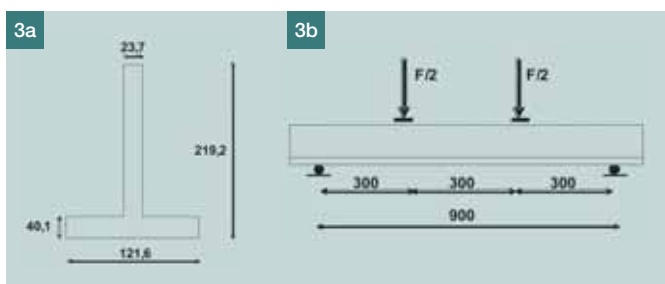
### VÝROBA UHPC

Podmínkou potřebných vlastností UHPC jsou i zvýšené nároky na míchání betonu (ověřený sled dávkování jednotlivých složek, intenzivní – případně aktivační – způsob míchání, regulace počtu otáček, prodloužení doby míchání). Na homogenitě obsahu drátků je zvláště závislá variabilita pevnosti betonu v tahu.

Samozřejmě záleží i na jakosti ošetřování. Pro intenzitu autogenního smršťování dochází k nedostatku vody pro hydrataci i v případě, že je zabráněno úniku vody z betonu. Proto je třeba betonu poskytovat vodu co nejdříve. Důvodem je i rychlý růst nepropustnosti betonu, a tím ztížení transportu ošetřovací vody do vnitřní části betonového prvku.

### VÝSLEDKY LABORATORNÍCH ZKOUŠEK

Náročnou podmínkou v zadání úkolu (výroby zajímavého prefabrikátu do Dubaje) bylo použití pojiva a kameniva pouze ze zdrojů v ČR. V průběhu zkoušek došlo k porovnání různých cementů a jejich interakce s přísadami. Další kombinace vznikly ještě použitím odlišných kameniv a příměsí. Výsledkem je poměrně obsáhlý soubor poznatků o použitých materiálech, ze kterého již lze vybrat optimální recepturu pro dosažení předem zadaných vlastností. Pro ilustraci byly vybrány některé výsledky uvedené v tab. 1., kde lze sledovat vývoj zkoušek. Ne vždy platí, že vyšší množství pojiva zajišťují potřebné pevnosti.



Obr. 2 Pohled na model zkušební nosníku a přípravu před zatěžováním (Kloknerův ústav ČVUT v Praze) ■ Fig. 2 View of the experimental beam with a test instrumentation before loading

Obr. 3 Zkušební nosník z UHPC, a) příčný řez, b) uspořádání zatěžovací zkoušky ■ Fig. 3 Experimental beam from UHPC, a) cross-section, b) schema of the load-deflection test

Obr. 4 Struktura lomové plochy zkoušených nosníků, a) receptura č. 792, b) receptura č. 621 ■ Fig. 4 Surface of the fracture of tested beams, a) mix formulation No. 792, b) mix formulation No. 621

Obr. 5 Závislost průběhu působící síly (F) a průhybu nosníku (D), a) bez drátků, b) 75 kg drátků/m<sup>3</sup>, c) 150 kg drátků/m<sup>3</sup> ■ Fig. 5 Load-deflection diagram of three tested beams made from UHPC

## MOŽNOSTI PRAKTICKÉHO POUŽITÍ

K ověření možnosti výroby tenkostěnných prvků byl zvolen jako model úsek stropního nosníku tvaru obráceného „T“. Dolní příruba měla rozměry 40 × 120 mm a stojina byla tlustá pouhých 20 mm a vysoká 180 mm. Délka celého nosníku byla 1 100 mm. Jde o obdobu nosníků používaných v kombinaci s pórobenovými nebo cihelnými tvarovkami.

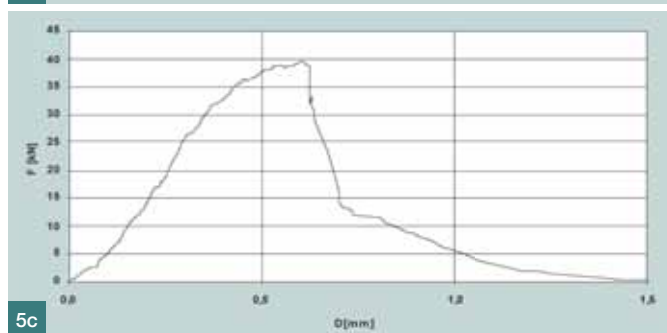
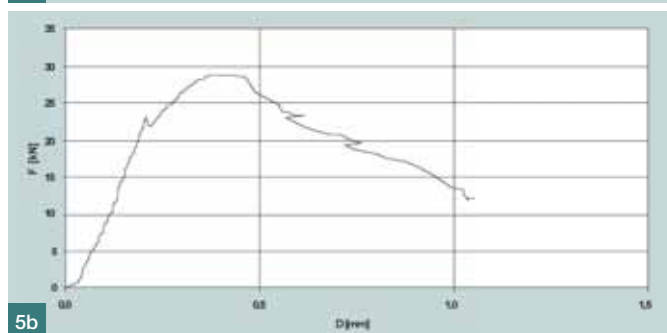
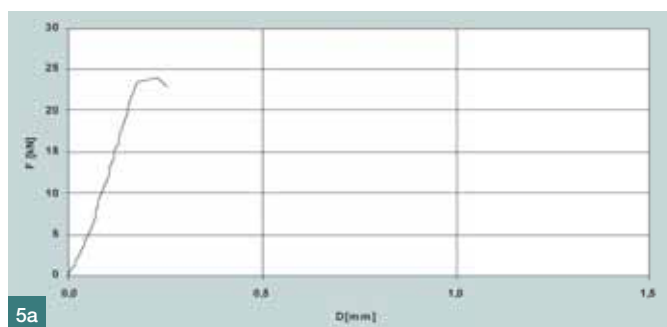
Byly provedeny zkoušky nosníku na únosnost v tahu za ohybu ve stáří 7 a 28 dní a současně byl měřen průběh deformací (obr. 2).

Č. záměsí			489	621	722	784	792
<b>Vlastnosti UHPC</b>							
po 7 dnech rozměry tělesa							
Pevnost v tlaku	100 x 100 mm	MPa	98	77	93	103	103
Pevnost v tahu za ohybu	40 x 40 x 160 mm	MPa	15	13	18	20	21
po 28 dnech							
Pevnost v tlaku	100 x 100 mm	MPa	157	121	121	151	147
Pevnost v tlaku	40 x 40 x 160 mm	MPa	146	104	104	140	129
Pevnost v tahu za ohybu	40 x 40 x 160 mm	MPa	41	26	24	25	23
Odolnost vůči CH.R.L.	100 x 100 mm	g/m <sup>2</sup>					136
Voděodolnost	100 x 100 mm	mm					12
Materiálové náklady	40 x 40 x 160 mm	Kč/m <sup>3</sup>	18 600	5 064	5 959	10 691	13 374

Tab. 2 Vlastnosti zkušebních trámečků z jednotlivých receptur UHPC a porovnání jejich ceny ■ Tab. 2 Characteristics of the tested beams prepared from different mixes of UHPC and comparison of their prices

Číslo záměsí			792	621	621	621
dávka tzv. „koktejlu drátků“	kg/m <sup>3</sup>		75	0	75	150
<b>Vlastnosti UHPC</b>						
po 7 dnech						
Síla při vzniku první trhlinky	kN		18	24,7	22,93	15–20
Maximální dosažená síla	kN		23,08	24,7	29,03	39,55
Pevnost v tlaku	MPa		100,8	88	101,3	87,8
Pevnost v příčném tahu	MPa		8,2	7,6	8,8	8,6
Statický modul pružnosti	GPa		42	37,5	39	39
Materiálové náklady	Kč/m <sup>3</sup>		13 374	5 064	8 425	11 286

Tab. 3 Výsledky zkoušek nosníků z UHPC různých receptur a porovnání jejich cen ■ Tab. 3 Test results of the beams of various mixes of UHPC and comparison of their prices



## Literatura:

- [1] *Hela R., Bodnářová L., Maršálová J.*: Nové materiály – Nové druhy a technologie betonu, Beton TKS 2/2003
- [2] *Vítek J. L.*: Betonové mosty – minulost a budoucnost, Beton TKS 4/2008
- [3] *Schmidt M., Teichmann T.*: Ultra vysokohodnotný beton: základna udržitelných konstrukcí, Beton TKS 2/2008
- [4] *Kalný M., Šrůma V.*: Nové realizace konstrukcí z vysokohodnotného betonu – Poznatky z HSC/HPC symposia v Tokiu 2008, 8. konference Technologie betonu 2009
- [5] *Hájek P., Fiala C., Kynčlová M.*: Enviromentální aspekty využití vláknobetonů v konstrukcích budov, 15. Betonářské dny 2009
- [6] *Schmidt M., Geisenhanslücke C.*: Optimierung der Zusammensetzung des Feinkorns von Ultra-Hochleistungs- und von selbstverdichtendem Beton 05/2005
- [7] *Schmidt M., Herget E.*: Bauen mit ultrahochfestem Beton – Aktueller Stand und Ausblick aus der Sicht der Wissenschaft und der Praxis, Neu-Ulm, Kongressunterlagen, 51. Beton Tage, 13.–15. Februar 2007
- [8] *Schmidt M.*: Ultrahochfester Beton in Deutschland und der Welt – Stand der Forschung, technische Regelwerke und praktische Anwendung, Neu-Ulm, Kongressunterlagen, 53. Beton Tage, 10.–12. Februar. 2009
- [9] *Rebentrost M., Smíšek P.*: Reaktivní jemnozrnný beton Ductal, Beton TKS 5/2007

## VÝSLEDKY

Tab. 2, tab 3, obr. 4, obr. 5

## ZÁVĚR

Dosavadní činností bylo potvrzeno, že vysoké požadavky na UHPC lze splnit i za použití běžně dostupných složek betonu. Dalším přínosem bylo ověření, že je reálné vyrobit i velmi tenkostěnný modelový prvek bez použití vibrace nebo jiného způsobu ztuhnutí.

V další etapě budou práce zaměřeny jak na technologii betonu, tak i na spolupráci s projektanty. Dílčím cílem je vytipovat konstrukční prvky, u kterých budou v maximální míře uplatněny specifické výhody UHPC, např. jejich vysoká odolnost proti vlivům zvláště agresivního prostředí, a tím i ekonomické a ekologické přínosy výroby těchto prvků. Proto se činnost zaměří i na potenciální přínosy UHPC vyplývající z eliminace velké tloušťky krycí vrstvy betonářské výztuže u obyčejných i vysokopevnostních betonů.

Ing. Jan Tichý, CSc.

Skanska, a. s., závod Prefa  
Líbalova 1/2348, 149 00 Praha 4 – Chodov  
tel.: 737 256 886

e-mail: jan.tichy@skanska.cz, www.skanska.cz/prefa



Ing. A. Štěrba

Loudin a spol., s. r. o., Křivá 8, 130 00 Praha 3  
tel.: 266 314 854, e-mail: a.sterba@volny.cz, www.loudin.eu



Ing. Vladislav Trefil

tel.: 602 286 758, e-mail: vladislav.trefil@basf.com

Ing. Ivo Žaloudek

tel.: 602 180 422, e-mail: ivo.zaloudek@basf.com

oba: BASF Stavební hmoty ČR, s. r. o.  
F. V. Veselého 2760/7, hala D2, 193 00 Praha 9  
www.basf-cc.cz



Klademe důraz na vysokou kvalitu, stále rozvíjíme nové materiály a technologie v oblasti prefabrikace, samozřejmě je ochrana životního prostředí.

## Prefabrikovaná lávka pro pěší a cyklisty v Lovosicích

Vyrábíme a dodáváme transportbeton a prefabrikáty včetně montáže pro stavby dopravní, inženýrské, průmyslové, občanské a bytové.

Nabízíme komplexní služby dle požadavku zákazníka, od projekční a předvýrobní přípravy až po samotnou realizaci staveb.

Skanska a.s., závod Prefa  
Líbalova 1/2348  
149 00 Praha 4 – Chodov  
Tel.: +420 267 095 755  
Fax: +420 267 095 575  
skanska.pre@skanska.cz

**SKANSKA**

www.skanska.cz