

# PRAKTICKÁ ZKUŠENOST S VÝROBOU A DOPRAVOU UHPC ■ PRACTICAL EXPERIENCE WITH PRODUCING AND TRANSPORT OF UHPC

Robert Coufal, Jan L. Vítek,  
Alena Procházková

V roce 2014 byla otevřena zavěšená lávka přes Labe v Čelákovících, kde byl pro segmentovou mostovku použit ultra-vysokohodnotný beton UHPC. Lávka je zajímavá jak z pohledu návrhu a provedení, tak z pohledu prvního použití materiálu UHPC pro nosnou konstrukci v ČR. Tento článek se zabývá vývojem a materiálovými charakteristikami UHPC z lokálních surovin u místního výrobce betonu. Hlavní část je věnována praktickým zkušenostem s výrobou, dopravou a ukládkou UHPC, stejně jako vyhodnocení naměřených výsledků. ■ A suspension footbridge over the Labe river where ultra-high performance concrete (UHPC) was used for a precast bridge deck was opened in 2014. The footbridge is interesting from a design and execution point of view as well as being of the first use of UHPC for a load carrying structure in the Czech Republic. This article focuses on development and material parameters of UHPC from local sources in the local producer of concrete. The main part of the article deal with practical experiences concerning producing, transporting and casting of UHPC, as well as with the evaluation of measured results.

## CO TO JE UHPC – INSPIRACE VE SVĚTĚ

UHPC je mezinárodně používaná zkratka pro ultra-vysokohodnotný beton (ultra-high performance concrete). Vzhledem k častému vyztužení rozptýlenou výztuží se vyskytuje i zkratka UHPFRC,

tzv. ultra-vysokohodnotný vlákný vyztužený beton (ultra-high performance fibre reinforced concrete). Dále v článku se bude zkratka UHPC používat všeobecně pro materiál s rozptýlenou výztuží i bez ní.

Přesná specifikace vlastností UHPC není v normě pro výrobu betonu (ČSN EN 206) dána. Specifikace vlastností jsou uvedeny v různých národních směrnících a dokumentech. Např. francouzská doporučení pro ultra-vysokohodnotné vlákný vyztužený betonu uvádí následující parametry [1]:

- charakteristická pevnost v tlaku 150 až 250 MPa,
- vysoká reziduální pevnost v tahu dosažená vysokou dávkou drátků (více než 2 % objemově),
- návrh směsi a vysoký obsah pojiva, který eliminuje kapilární porozitu, znamenající vysokou odolnost drátků uvnitř UHPFRC,
- samohojící vlastnosti (zarůstání trhlin) zajišťují dlouhodobé udržení pevnosti v tahu za předpokladu, že je dodržena limitní šíře trhlin,
- pevnost matrice v prostém tahu vyšší než 7 MPa.

Dále je možné čerpat z doporučení od Federal Highway Administration (USA), kde má UHPC následující specifikaci:

- jemnozrnný kompozitní materiál s cementovým pojivem,
- vodopojivový součinitel nižší než 0,25,

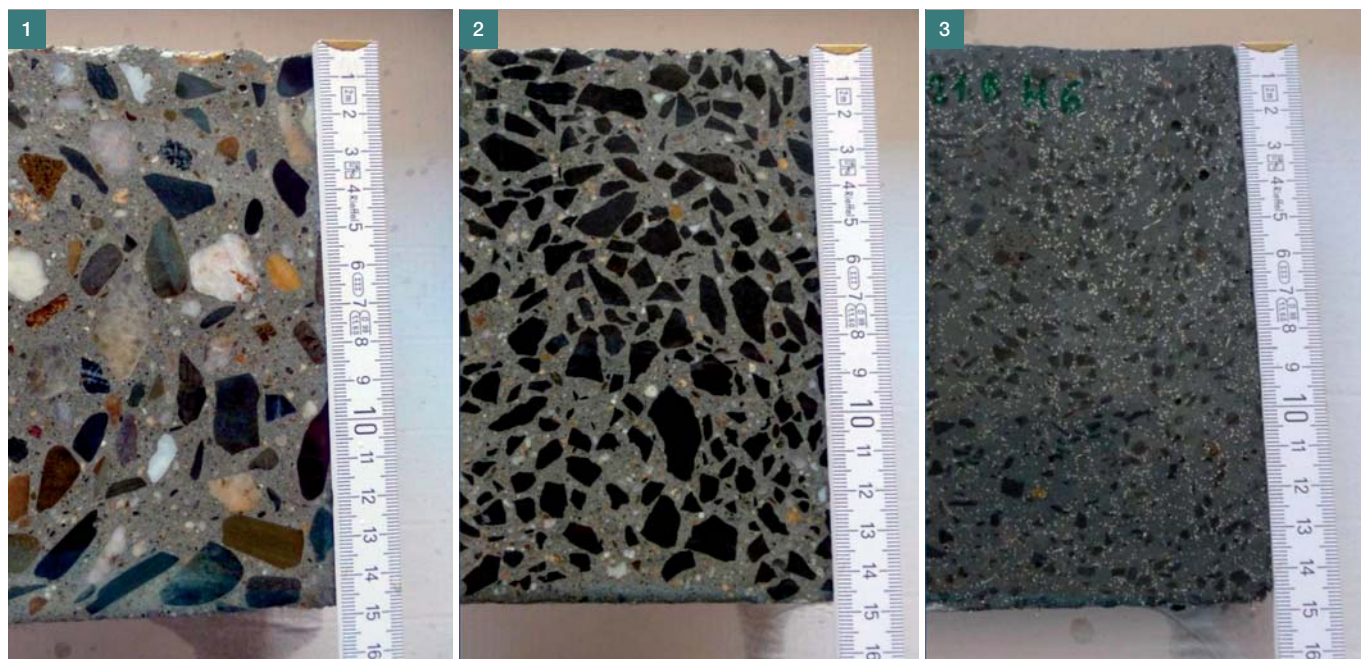
- vysoká dávka rozptýlené výztuže,
- pevnost v tlaku vyšší než 150 MPa,
- reziduální pevnost vyšší než 5 MPa,
- výrazně zvýšená trvanlivost ve srovnání s běžnými a vysokohodnotnými betony.

Další možnosti jsou německá doporučení publikovaná v Beton-Kalender 2013 [2], [3].

Obecně se předpokládá, že UHPC dosahuje pevnosti 150 MPa (měřeno na standardních válcích). Další vlastnosti jsou uvedeny orientačně, jako např. modul pružnosti cca 45 až 55 GPa. Německá doporučení kladou důraz na trvanlivost a odolnost UHPC, a proto připouštějí i nižší pevnosti. Vychází se z názoru, že UHPC má být navržen na konkrétní podmínky použití. Kde je třeba vysoká pevnost, může být požadavek i přesahující 150 MPa. Dle konstrukce je třeba rozhodnout, která vlastnost je důležitá a podle toho navrhnout UHPC pro dané konkrétní požadavky.

UHPC se tedy neliší od běžného betonu pouze vysokou pevností v tlaku (přes 150 MPa), ale hlavně celkovou skladbou směsi, která je od běžného nebo vysokopevnostního betonu velmi odlišná. Na fotografiích na obr. 1 až 3 je zachycena změna skladby směsi se zvyšující se pevností.

UHPC je jemnozrnná směs s vysokou dávkou cementu, mikrosiliky a drátků, která má vysokou hutnost bez kapilár-



ní porozity. Toto má za následek vysoké tahové pevnosti matrice a odolnosti materiálu vůči prostředí.

### LABORATORNÍ ČÁST VÝVOJE UHPC

Dodavatel betonu se začal věnovat vývoji UHPC již v roce 2011. Na začátku byl proveden předvýběr vstupních materiálů dle deklarovaných parametrů. V laboratoři byla poté ověřena vzájemná kompatibilita materiálů a následně navržena receptura ultra-vysokohodnotné malty a poté i samotného betonu. Na maltách se zkoušela pouze pevnost v tahu a tlaku na trámečcích 160 × 40 × 40 mm, konzistence a obsah vzduchu. Vzorky z UHPC malty byly teplotně ošetřovány z důvodu zkrácení doby zrání. Naměřené pevnosti v tlaku na zlomcích takto tepelně ošetřovaných trámečků se pohybovaly v rozmezí 160 až 200 MPa ve stáří 7 dnů.

Jako výchozí receptura pro návrh ultra-vysokohodnotného betonu byla použita receptura malty, která dosahovala nejlepších výsledků z pohledu pevností, zpracovatelnosti a stability. Složení betonu se od složení malty lišilo pouze tím, že část objemu malty byla nahrazena hrubým kamenivem a byly přidány drátky.

Na tomto laboratorně vyrobeném betonu se zkoušely nejenom pevnosti v tlaku a tahu ale i další parametry betonu, např. smrštění nebo rychlost pronikání chloridů. Zkušební tělesa betonu po dobu zrání nebyla teplotně ošetřena. Parametry konečné laboratorní směsi UHPC betonu jsou uvedeny v tab. 1.

Z tab. 1 je vidět, že pevnosti v tlaku na krychlích o hraně 100 mm jsou jen mírně vyšší než pevnosti na válcích (o 2,5 %). Při uvážení používaného přepočtu 0,95krát krychelná pevnost na 100 mm krychlích = krychel-

Obr. 1 Řez běžným betonem ■

Fig. 1 Cross-section of standard concrete

Obr. 2 Řez vysokopevnostním betonem ■

Fig. 2 Cross-section of high strength concrete

Obr. 3 Řez UHPC ■ Fig. 3 Cross-section of UHPC

Obr. 4 UHPC malta při plnění zkušební nádoby ■ Fig. 4 UHPC mortar at the time of pouring into a testing container

Obr. 5 UHPC při míchání v laboratorní míchačce ■ Fig. 5 UHPC during mixing in a laboratory mixer

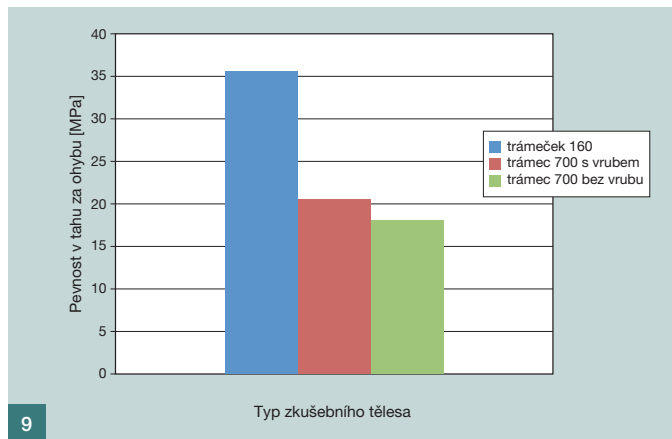
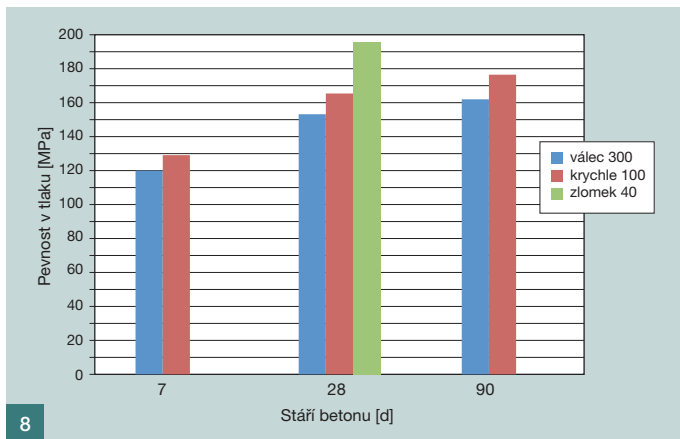
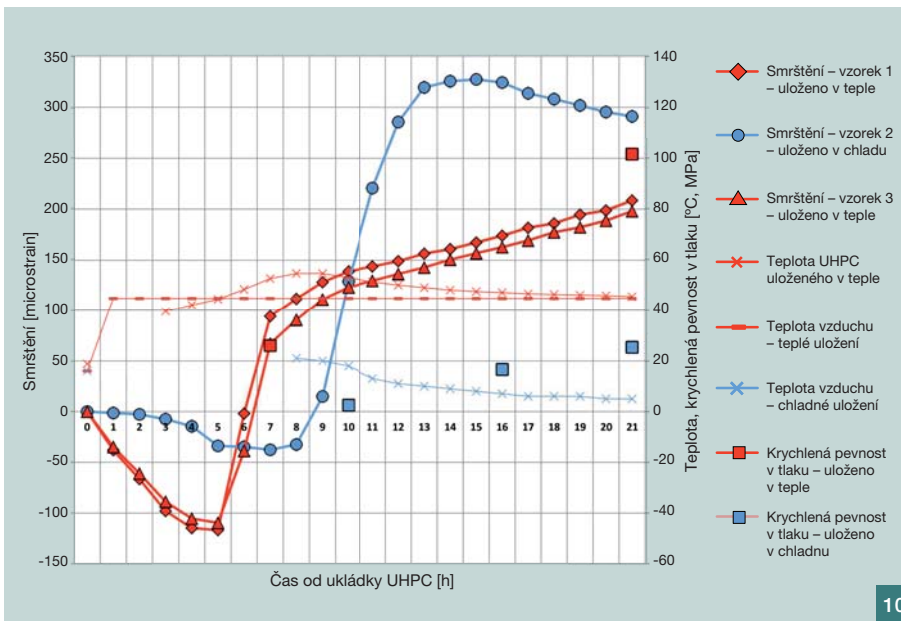
Obr. 6 UHPC při zkoušce rozlivu přes J-ring ■ Fig. 6 UHPC during slump flow through J-ring

Tab. 1 Parametry konečné laboratorní směsi ■ Tab. 1 Parameters of final laboratory composition

| Charakteristika   | Hodnota |
|---|---------|
| Rozliv Abramsovým kuzelem [mm]  | 790     |
| Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]  | 2 499   |
| Pevnost v tlaku, krychle o hraně 100 mm [MPa]   | 168,5   |
| Pevnost v tlaku, trámečky 160 mm [MPa]  | 182,5   |
| Pevnost v tlaku, válce 300 mm [MPa]   | 164,4   |
| Pevnost v tahu za ohybu, trámec 700 mm – 4b [MPa]   | 10,5    |
| Odolnost proti mrazu a rozmrazovacím látkám dle DIN CEN/TS 12390-9:2006 [g/m <sup>2</sup> ] | 37,4    |
| Hloubka průniku chloridů dle DAfStb publication nbr. 510 [mm]                               | 0       |



Firemní prezentace



ná pevnost na 150 mm krychlích, nám krychelná pevnost (150 mm) vychází dokonce méně, než je válcová pevnost.

U těchto betonů tedy nelze uvažovat se standardním poměrem mezi krychelnou a válcovou pevností. Při počátečních zkouškách materiálu je nutné stanovit pevnosti betonu na různých tělesech.

**PŘEVOD LABORATORNÍ RECEPTURY DO PRAXE**

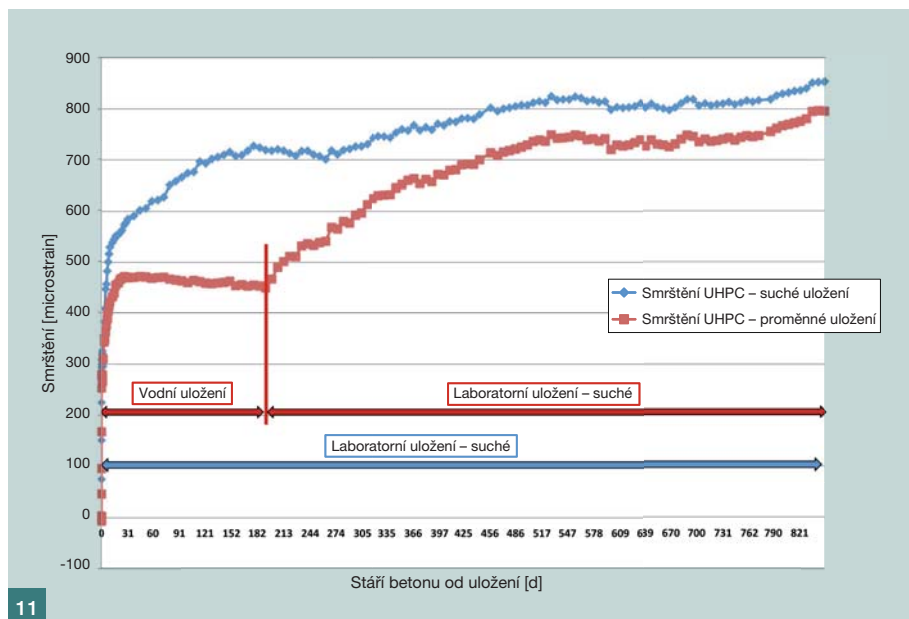
Výsledky receptur z laboratoře byly nadějně, a tak se přistoupilo k jejich aplikaci na reálných betonárnách výrobce betonu. Brzy se ukázalo, že výroba UHPC je značně odlišná od výroby běžných betonů. Zároveň se ukázalo, že finální receptura UHPC navržená v laboratoři se sice namíchat dá, ale z hlediska technologie výroby na betonárně, dopravy autodomíchávačem a ukládky bez vibrace není vhodná. Důvodem byl zvolený typ cementu, který nadměrně zvyšoval teplotu čerstvé směsi při dlouhém míchání v míchacím jádře, jehož objem několikanásobně převyšoval objem laboratorního zařízení.

Bylo tedy nutné zahájit optimalizaci složení UHPC na betonárně, zaměřenou na využitelnost materiálu pro plánované uplatnění. Byly odzkoušeny různé typy cementů a mikrosiliky, různé dávky superplastifikátoru a různé poměry složek. Jako nejdůležitější se ukázala záměna cementu za cement s nižší reaktivitou a optimalizace technologie míchání z pohledu časování navažování různých složek a doby jejich míchání. Celkově bylo na betonárně namícháno přes 30 zkušebních záměsů. Vyhodnocení těchto záměsů není náplní tohoto článku.

Finální receptura byla přizpůsobena požadavkům vyplývajícím z výroby UHPC pro lávku v Čelákovcích [4]. UHPC musel být vyrobitelný na běžné betonárně, při běžném provozu. Dále musel být UHPC přepravitelný autodomíchávačem na vzdálenost 26 km i v letním období. V neposlední řadě musel být UHPC v samozhutnitelné konzistenci, s co nejnižší viskozitou, ale bez segregace. Z hlediska mechanických parametrů byla vyžadována krychelná pevnost v tlaku 130 MPa

a 15 MPa v tahu za ohybu na 700mm trámci, zatěžovaném tříbodovým ohybem.

Pevnostní parametry konečné receptury v tlaku jsou uvedeny v grafu na obr. 8. Pevnosti ve 28 dnech se pohybují v rozmezí 153 až 195 MPa v závislosti na použitém zkušebním tělese. V souladu s předpoklady a výsledky z laboratoře jsou největší naměřené pevnosti v tlaku na zlomcích trámčků o rozměrech 160 x 40 x 40 mm. Naopak nejmenší pevnosti jsou naměřeny na válcích. Z pohledu výroby zkušebních těles a jejich zkoušení se ukázalo jako nevhodnější provádět kontrolní zkoušky na krychlích o hraně 100 mm. U válců je nutno upravit tlačné plochy zkušebního tělesa, což je finančně náročné a způsob úpravy ovlivňuje naměřený výsledek. U krychlí o hraně 150 mm je problém s nedostatkem dostatečně výkonných lisů dostupných v laboratořích v ČR. Zlomky trámčků, kde na tlak zkoušíme vzorky s tlačnou plochou 40 x 40 mm, jsou příliš malé vzhledem k složení směsi a geometrii konstrukce. Modul pruž-



nosti na válci o výšce 300 mm činil 48,5 GPa a na trámci o délce 400 mm 50 GPa.

Pevnostní parametry konečné receptury v tahu jsou uvedeny v grafu na obr. 9. Pevnosti v tahu za ohybu stanovené na trámečcích délky 160 mm jsou výrazně vyšší než pevnosti v tahu na trémci o délce 700 mm. Nejnižší pevnost je na trámci o délce 700 mm bez zářezu zatěžovaném čtyřbodovým ohybem. Zároveň byl při této zkoušce zjištěn největší rozptyl výsledků.

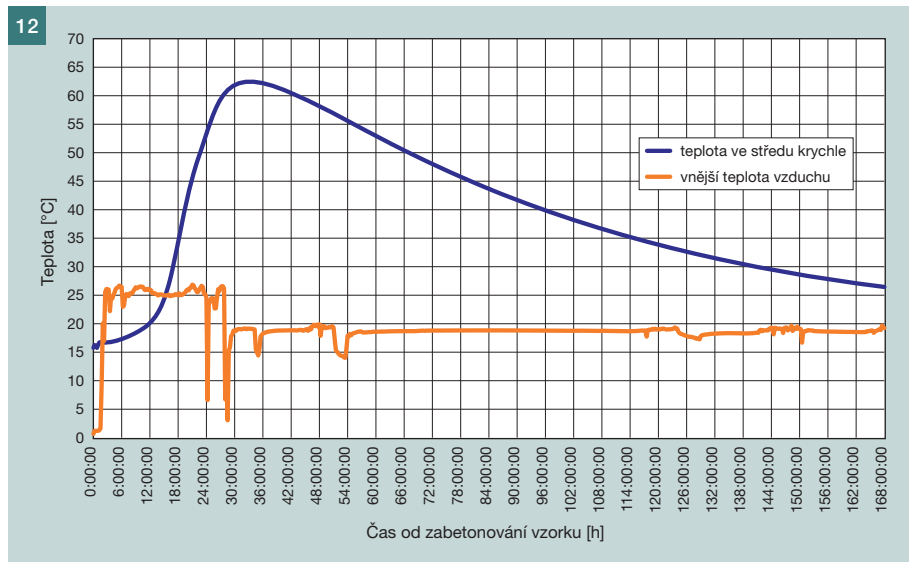
Projektem byla zadána požadovaná hodnota pevnosti v tahu za ohybu při třibodovém ohybu, proto byl materiál dále touto metodou zkoušen. Na fotografii na obr. 7 je vidět únosnost 15 mm silné desky z UHPC vyztužené drátky, bez prutové výztuže.

V rámci počátečních zkoušek byly měřeny i objemové změny a vývoj teplot během hydratace. Zásadní vliv

na průběh smrštění a vývoj pevností měla teplota uložení (obr. 10).

Beton uložený v chladu byl uložen ve venkovním prostředí, kde teplota kolísala od 20 do 5 °C. Beton uložený v teple byl uložen v laboratorní sušárně, ochráněný před ztrátou vlhkosti. Teplota byla nastavená na 45 °C. Teplota betonu v teplém uložení byla měřena vpichovacím teploměrem v krychli o hraně 150 mm. Z grafu na obr. 10 je patrný výrazný nárůst krátkodobé pevnosti, daný zvýšenou teplotou uložení. Beton uložený v teple měl již po 21 h krychelnou pevnost v tlaku přes 100 MPa, oproti 25 MPa ve stejném čase u betonu uloženého v chladu.

Dále je vidět zřetelná změna průběhu objemových změn ohřivaných vzorků oproti vzorku v chladu. Objemové změny byly měřeny tenzometry zabetonovanými ve válcích o výšce



Obr. 7 Únosnost 15 mm silné desky z UHPC v tahu za ohybu ■ Fig. 7 Bending strength of a 15 mm thick plate made of UHPC

Obr. 8 Pevnosti konečné receptury vyrobené na betonárně v tlaku ■ Fig. 8 Compression strength of final composition, made at concrete plant

Obr. 9 Pevnosti konečné receptury vyrobené na betonárně v tahu za ohybu ■ Fig. 9 Strength in tension during bending of final composition made at concrete plant

Obr. 10 Objemové změny a vývoj pevnosti v závislosti na teplotě uložení ■ Fig. 10 Shrinkage and strength development in different curing temperatures

Obr. 11 Dlouhodobé objemové změny ■ Fig. 11 Long-term shrinkage

Obr. 12 Průběh teplot UHPC v izolované krychli ■ Fig. 12 UHPC temperature in time in an insulated box

300 mm. Vzorky byly po celou dobu zkoušky v plastové formě. Vzorky uložené v teple nejdříve nabývaly (vlivem ohřevu směsi) a v okamžiku začátku hydratace se začaly prudce smršťovat. Tento skok činil zhruba 0,2 mm/m za 2 h. Poté se rychlost smršťování ustálila na cca 0,08 mm/m za 10 h. Oproti tomu počáteční skok u UHPC v chladu činil 0,35 mm/m za 5 h. Těchto poznatků bylo využito při ošetřování segmentů z UHPC pro lávku.

V grafu na obr. 11 jsou znázorněny dlouhodobé objemové změny UHPC. Modře je značené smrštění vzorku uloženého v suchém prostředí a červeně vzorku, který byl nejdříve uložen ve vodě a poté vyndán do suchého laboratorního prostředí. Celková doba měření je cca 800 dní. Měření objemových změn stále pokračují. UHPC oproti běžnému betonu vykazuje výrazný nárůst autogenního smrštění na úkor smrštění z vysychání. Celkové smrštění činí přes 0,8 mm/m ve stáří 800 dní, což je více než u běžných betonů. V případě výroby prefabrikátů z UHPC tato negativní vlastnost nemá vliv na kvalitu panelů, protože 70 % smrštění proběhne do 30 dnů od uložení betonu, a tedy i do osazení do konstrukce.

UHPC není navržen pro využití v masivních konstrukcích. Přesto byl změřen průběh teploty v tepelně izolované krychli pro srovnání s betony běžnými. Průběh teploty je v grafu na obr. 12. Dle zkušeností tento model reprezentuje průběh teploty v jádru zhruba 1 m silné desky. Maximální dosažená teplota je sice velmi vysoká, ovšem v porovnání s běžnými betony s poloviční



13



15



14

Obr. 13 Plnění formy betonem UHPC ■  
Fig. 13 Pouring of UHPC into the mould

Obr. 14 Plnění formy segmentu ze dvou autodomíchávačů zároveň ■  
Fig. 14 Concrete casting into the mould from two truck mixers at the same time

Obr. 15 Improvizovaná zatěžovací zkouška segmentu ■ Fig. 15 Improvised loading test of precast element

Obr. 16 Hotová lávka z UHPC v Čelákovících ■ Fig. 16 Finished footbridge of UHPC in Čelákovice

dávkou cementu je nárůst maximální teploty nízký (o cca 10 °C).

Zkoušky odolnosti UHPC provedené v rámci počátečních i kontrolních zkoušek prokázaly nesrovnatelně lepší odolnosti, než je běžné u standardních betonů. Při opakovaných zkouškách odolností vůči zmrazování a rozmrazování dle ČSN 73 1326, při prodlouženém cyklování na 300 cyklů (běžně 75 pro XF4 metodou C), činily odpady řádově desítky gramů na m<sup>2</sup>, což je na hranici měřitelnosti pro tuto metodu (pro XF4 je stanoveno maximum 1 000 g/m<sup>2</sup>). Maximální průsaky dle ČSN EN 12 390-8 činily vždy 0 mm. Nejprůsavnějším kritériem dle normy ČSN EN 206-1/Z3 je přítom 20 mm. Dá se tedy říci, že UHPC má odolnosti mimo měřitelný rozsah současných metod.

#### VÝROBA, DOPRAVA A UKLÁDKA UHPC

Vlastní výroba betonu UHPC pro segmenty lávky v Čelákovících probíhala na betonárně dodavatele betonu v Praze Troji. Věžová betonárna je vybavena dvouhřídelovým míchacím jádrem o objemu 3 m<sup>3</sup>. Na betonárně je možnost skladovat vstupní suroviny včetně kameniva v sílech, kde jsou chráněny před vlhkostí. Dávkování suchých materiálů je pro tento typ betonu výhodné. Na velmi přesném dávkování

vody a kvalitě vstupních surovin je založen úspěch výroby UHPC. Přes veškeré moderní vybavení betonárny, včetně její plně automatizace, bylo nutné některé vstupní suroviny dávkovat ručně (drátky).

Beton byl nakládán do autodomíchávačů a jako transportbeton byl přepravován do výroby segmentů v Brandýse nad Labem. Míchací proces jedné záměsi o velikosti 1 m<sup>3</sup> trval celkem 12 min. Na výrobu jednoho prefabrikátu bylo potřeba namíchat 4 m<sup>3</sup> betonu, dopraveného dvěma autodomíchávači. Namíchání 4 m<sup>3</sup> tedy trvalo necelou hodinu.

UHPC byl vyráběn v samozhutnitelné konzistenci. Rozliv byl měřen běžným Abramsovým kuzelem, v klasické poloze. Během této zkoušky se dále vizuálně sledovala stabilita směsi a rozložení drátků ve směsi. Kromě rozlití se sledoval také čas T500, jako index viskozity. Hodnota T500 udává dobu, za jak dlouho dosáhne směs rozlití 500 mm. Jako ideální pro plnění prefabrikátu byl stanoven čas T500 v rozmezí 8 až 12 s. Tento čas se ukázal být důležitějším, než konečné rozlití směsi. Jako kontrolní těleso pro pevnost v tlaku byla zvolena krychle o hraně 100 mm. Krychelná pevnost byla zkoušena z každého autodomíchávače jak na betonárně, tak na stavbě.

Na stavbě byl UHPC ukládán z obou autodomíchávačů zároveň a beton sám plnil formu (obr. 13 a 14). Kontrolními otvory se pouze sledovalo, zda nedochází k blokadě materiálu. Po skončení betonáže proběhlo zaplachtování a segment se začal teplotně ošetřovat, pro zvýšení obrátkovosti formy.

Z výsledků kontrolních zkoušek vyplývá, že beton ve všech případech splnil požadavky projektu. I přes dohled technologa nad každým mícháním UHPC byl rozptýl výsledků vyšší, než je běžné u standardního betonu. Při přípravě tohoto typu betonu je tedy nutno počítat s vyšší rezervou v pevnosti pro rozptýl při kontrolních zkouškách.

Průměrná krychelná pevnost v tlaku po 28 dnech činila přes 150 MPa a v 90 dnech 160 MPa. V 90 dnech už pevnost jednotlivých výsledků neklesala pod 150 MPa. Zkoušky odolnosti betonu (CHRL, průsak) vyhověly s výraznou rezervou a bez odchylek v čase.

#### ZÁVĚR

Výroba UHPC je složitý proces. Parametry UHPC závisí na volbě složek. Výběr vhodného cementu je jednou, ale nikoli jedinou základní podmínkou pro dosažení vysoké pevnosti. Dalším neméně důležitým faktorem je nastave-



ní křivky zrnitosti kompletní směsi včetně pojiva. Granulometrie všech složek směsi a jejich kombinace je zásadní pro dosažení optimálního vyplnění prostoru. Složení konkrétní směsi je výsledkem dlouhodobého zkoušení. Dále je třeba směs modifikovat dle typu použitých vláken.

Samozhutnitelná forma UHPC je poměrně častá, protože zjednodušuje ukládání směsi. V případě betonu vyvíjeného pro transportbeton je nutné požadovat delší dobu zpracovatelnosti. To se v případě popsaného betonu podařilo.

Při výrobě prvků z UHPC je třeba předem ověřit postupy betonáže. Největší problém je zajištění rovnoměrného rozmístění a orientace vláken. Zkušenosti z betonáže u nás i v zahraničí ukazují, že postup betonáže může ovlivnit orientaci vláken významně, což může mít za následek rozdílné mechanické vlastnosti – zejména tahovou pevnost v různých směrech. U konstrukcí, kde jsou mechanické vlastnosti důležité pro funkci prvku, je nutné provádět příslušná experimentální ověření nejen vlastního betonu, ale i konkrétních konstrukčních prvků. Dále je třeba respektovat vliv autogenního smršťování, který je podstatně významnější než u vysokopevnostních betonů.

Příslušná doporučení pro taková ověření lze převzít ze zahraničí [1], [2], [3]. V současné době se v rámci výzkumných projektů připravují podobná doporučení pro ČR.

Protože jsou zkušenosti s UHPC jako novým materiálem omezené, lze doporučit spíše konzervativní návrhy konstrukcí s důrazem na robustnost. Tak lze zajistit, že, i v případě nesplnění některých předpokladů, konstrukce nebude pravděpodobně ohrožena z hlediska bezpečnosti ani z hlediska použitelnosti.

V článku jsou uvedeny některé výsledky získané při řešení projektu č. FR T13/531 podporovaného MPO.

#### Literatura:

- [1] Documents scientifiques et techniques Betons Fibres Á Ultra-Hautes Performances – Recommandations, Edition révisée, Juin 2013
- [2] Beton-Kalender 2013, Teil 2, IX Ultra-hochfester Beton UHPC, Ernst & Sohn, 2013, 117–240 (něm.)
- [3] Ultra High Performance Concrete UHPC, Beton-Kalender, Wiley, Ernst & Sohn, 2014 (angl.)
- [4] Kalný M., Komanec J., Vitek J. L., Brož R., Koukolík P., Coufal R.: Lávka přes Labe v Čelákovících – první nosná konstrukce z UHPC v ČR, Beton TKS 4/2014, p. 10–18

#### Lávka z UHPC v Čelákovících

|                                |   |
|--------------------------------|---|
| Investor                       | Město Čelákovice                              |
| Projekt konstrukce             | Pontex, s. r. o.                              |
| Dodavatel                      | Metrostav, a. s., Divize 5                    |
| Návrh směsi a dodavatel betonu | TBG Metrostav, s. r. o.                       |
| Výstavba                       | podzim 2012 až prosinec 2013                  |
| Slavnostní otevření            | červen 2014                                   |
| Konečná cena                   | 40,98 mil. Kč (z toho dotace 10 mil. Kč SFDI) |

Ing. Robert Coufal, Ph.D.  
TBG Metrostav, s. r. o.  
Rohanské nábř. 68, 186 00 Praha 8  
tel.: 221 709 709  
e-mail: robert.coufal@tbg-beton.cz  
www.tbgmetrostav.cz



prof. Ing. Jan L. Vitek,  
CSc., FEng.  
Metrostav, a. s.  
Koželužská 2450/4, Praha 8  
Stavební fakulta ČVUT v Praze  
tel: 266 019 461  
e-mail: vitek@metrostav.cz



Ing. Alena Procházková  
TBG Metrostav, s. r. o.  
Rohanské nábř. 68  
186 00 Praha 8  
tel.: 221 709 710  
e-mail: alena.prochazkova@tbg-beton.cz

