

T A
Č R

Program **Alfa**

PŘÍJEMCE PODPORY:



KLOKNERŮV ÚSTAV, ČVUT V PRAZE

DALŠÍ ÚČASTNÍCI PROJEKTU

SKANSKA

 **BASF**
The Chemical Company



EV. Č. PROJEKTU: TA01010269

Název projektu:

**APLIKOVANÝ VÝZKUM ULTRAVYSOKOHODNOTNÉHO
BETONU (UHPC) PRO PREFABRIKOVANÉ PRVKY STAVEB**

METODIKA 3

**METODIKA PRO VÝROBU PRVKŮ Z UHPC A
PRO KONTROLU JEJICH PROVEDENÍ**

VERZE 2015

Vypracoval:

Ing. Jan Tichý, CSc.

Doc. Ing. Jiří Kolísko, Ph.D.

Ing. Miroslav Vokáč, Ph.D.

Ing. David Čítek

Ing. Vladislav Trefil

Ing. Milan Kalný

V Praze 30. 6.2015

Obsah

1.	Úvod	3
2.	Příklady složení a vstupní suroviny	3
3.	Výroba UHPC	6
3.1	Přejímka a skladování surovin	6
3.2	Dávkování a míchání	6
3.3	Zkoušky UHPC	8
3.3.1	Zkoušky čerstvého UHPC	8
3.3.2	Kontrolní zkoušky ztvrdlého UHPC	10
4.	Výroba prvků z UHPC	11
4.1	Zpracování Technologického předpisu - TePř.....	11
4.2	Pravidla pro přípravu forem a bednění.....	12
4.3	Ověření způsobu výroby – výroba typového prvku a jeho zkouška únosnosti... 12	
4.3.1	Postupy ukládání UHPC do formy.....	12
4.3.2	Vliv konzistence a formy na výsledný povrch	13
4.3.3	Ověření rovnoměrnosti rozptýlení vláken na hotovém výrobku.....	14
4.3.4	Ošetřování.....	14
4.3.5	Další opatření	16
5.	Realizace konstrukcí a konstrukčních prvků z UHPC.....	17
5.1	Mostní konstrukce	17
5.2	Pozemní stavby.....	30
5.3	Inženýrské konstrukce	32
5.4	Rekonstrukce.....	35
5.5	Konstrukční prvky.....	36
5.6	Fasády	36
6.	Bibliografie	39

„Metodika pro výrobu prvků z UHPC a pro kontrolu jejich provedení“

byla vytvořena s finanční podporou TA ČR“.

1. ÚVOD

Tato metodika vznikla s cílem vytvořit první podklad v rámci ČR pro možné využívání nového moderního cementového materiálu, který je v literatuře a v mezinárodním kontextu označován jako „*Ultra-High Performance Concrete*“ (UHPC), pro stavební konstrukce. Metodika vznikla v rámci řešení projektu TAČR TA01010269 Aplikovaný výzkum ultravysokohodnotného betonu pro prefabrikované prvky. Tato metodika navazuje a v některých směrech rozšiřuje metodiku „*METODIKA 1 - Metodika pro návrh UHPC a pro materiálové zkoušky*“^[59], která byla zpracována v rámci téhož projektu.

Odvětví vývoje a používání UHPC je velmi intenzivně rozvíjeno v rámci řady zemí celého světa. Např. v Německé spolkové republice (viz [19]) bylo zestátních prostředků věnováno od roku 2006 do roku 2013 na výzkum v této oblasti přibližně 12 mil. EUR (tj. cca více než 300 mil. Kč). Ani přes toto mezinárodní úsilí neexistují prozatím obecně přijímané, ustálené a akceptované předpisy pro navrhování a využívání tohoto materiálu. V řadě zemí je to prozatím řešeno metodickými dokumenty reflektujícími místní podmínky.

UHPC se významně liší od běžného betonu. Kromě vysoké dávky cementu (600 - 1000 kg/m³) obsahují pouze jemnozrné kamenivo (běžně zrnitost do 1 mm), vlákna (mikrovlákna s průměrem do 0,3 mm a délky do 20 mm), mikroplniva (příměsi), vysoké dávky přísad (superplastifikátory a další). Vyznačují se nízkou hodnotou vodního součinitele (w/c je do cca 0,25) a vysokým obsahem kovových nebo polymerních vláken (obsah 1 – 3 % objemu směsi).

Materiály UHPC (Ultra High Performance Concrete) jsou kromě své specificky jemnozrné struktury zejména vysokopevnostní kompozity na bázi cementu dosahující vysoké pevnosti v tlaku. Obvyklou hranicí uváděnou v zahraniční literatuře je 150 MPa a více. Mají vysokou reziduální pevnost v tahu či v tahu za ohybu po vzniku trhliny s vysokou lomovou energií, a vysokou duktilitou.

2. PŘÍKLADY SLOŽENÍ A VSTUPNÍ SUROVINY

UHPC se skládá z portlandského cementu, jemného písku, různých typů příměsí (mikrofillerů jako např. křemičitý úlet, mletý vápenec atd.), přísad vysoce redukujících množství vody (superplastifikátory), dlších přísad upravujících tuhnutí, reologii apod. a vláken (obvykle ocelových mikrovláken délky do 20 mm a průměru do 0,3 mm) a vody. V *METODICE 1*^[59] jsou jednotlivé vstupní materiály a požadavky na ně rozebírány podrobněji.

V závislosti na surovinových zdrojích kameniva jsou používány i hrubé kamenivo nicméně musí být velmi kvalitní (vysoká pevnost a trvanlivost) a zrnitost obvykle nepřesahuje 8 mm. Používána může být rozdílná kombinace dostupných materiálů v závislosti na aplikaci a dodavateli materiálu UHPC. Složení je výsledkem mnoha laboratorních testů. Tabulka 1^[19] uvádí typické složení UHPC materiálu.

Tabulka 1. Typické složení UHPC materiálu

Materiál	kg/m³	Hmotnostní %
Portlandský cement	712	28,5
Drobné kamenivo	1020	40,8
Křemičitý úlet	231	9,3
Křemenná moučka	211	8,4
Přísada redukující vodu	30,7	1,2
Urychlovač	30	1,2
Ocelová vlákna	156	6,2
Voda	109	4,4

Maximální velikost drobného kameniva 1 mm

Pomocí optimalizace cementové matrice s ohledem na tlakovou pevnost, objemovou hmotnost, tekutost v kombinaci s ocelovými vlákny (vysoké pevnosti a malého průměru) a zajištění co nejvyšší mechanické vazby mezi ocelovými vlákny a cementovou maticí, lze dosahovat 28 denní tlakové pevnosti až 200 MPa a to bez proteplování.

Tabulka 3 ukazuje poměry jedné z možných záměsí, které byly navrženy a studovány v rámci projektu TAČR TA 01010269 řešeného týmem pod vedením pracovníků Kloknerova ústavu, ČVUT v Praze.

Tabulka 2. Hmotnostní poměry UHPC

Materiál	kg/m³	Hmotnostní %
Portlandský cement 42,5 R	700	28,6
Drobné kamenivo – písek frakce 0-2 mm	1160	47,3
Mikrofilery = křemičitý úlet a struska	250	10,2
Superplatifikátor	30	1,2
Ocelová vlákna	150	6,1
Voda	160	6,5
Vodní součinitel	0,23	

Ze zkušeností vyplývá, že v podmínkách ČR je možno míchat UHPC v míchačkách s nuceným způsobem míchání klasických betonáren. Schopnost a účinnost konkrétní míchačky je však nutno ověřit a je nutno počítat s tím, že míchání bude vyžadovat delší dobu.

Ve spojených státech byl míchán UHPC v míchačkách s nuceným způsobem míchání běžných betonáren^[19]. Tabulka 3 ukazuje poměry jedné záměsí.

Tabulka 3. Hmotnostní poměry UHPC

Materiál	Poměry
Portlandský cement	1
Drobné kamenivo = jemný písek zrnitosti do 0,2 mm	0,92
Křemičitý úlet	0,25
Skelný prach	0,25
Superplatifikátor	0,0108
Ocelová vlákna	0,22 až 0,31
Voda	0,18 až 0,20

Schmidt a kolektiv popsali dva poměry složek pro most v Německu^[62]. První záměs obsahovala 1100 kg/m³ cementu, 26 % křemičitého úletu jako procentový podíl obsahu cementu, křemenný písek, 6 % ocelových vláken z objemu, přísadu redukující množství vody a měla vodní součinitel 0,14. Druhá záměs obsahovala 1437 kg/m³ cementu a 9 % kombinace ocelové vlny a ocelových vláken.

Další potenciální složení UHPC, jak jsou souhrnně komentovány v podkladu [19], jsou uváděny v následujících tabulkách.

Ve studii trvanlivosti UHPC Teichmann a Schmidt použili směsné poměry dle tabulky 4. Záměs 1 měla maximální kamenivo velikosti 8 mm ve formě písku. Záměs 2 měla maximální kamenivo zrnitosti do 8 mm ve formě basaltu.

Tabulka 4. UHPC směsné proporce Teichmanna a Schmidta^[19]

Materiál	Záměs 1	Záměs 2
	kg/m ³	kg/m ³
Cement	733	580
Křemičitý úlet	230	177
Jemnozrný křemen typ 1	183	131
Jemnozrný křemen typ 2	0	325
Superplatifikátor	32,9	33,4
Písek	1008	354
Bazalt	0	711
Ocelová vlákna	194	192
Voda	161	141
Vodní součinitel	0,19	0,21

Vědci z americké Army Corps of Engineers Engineer Research and Development Center pojednali o třídě UHPC materiálů. Poměry tohoto UHPC jsou prezentovány v tabulce 5.

Tabulka 5. UHPC směsné hmotnostní poměry Cor-Tuf

Materiál	Poměry
Portlandský cement	1
Písek	0,967
Křemenná moučka	0,277
Křemičitý úlet	0,389
Superplatifikátor	0,0171
Ocelová vlákna	0,31
Voda	0,208
Vodní součinitel	0,21

Vědci vedení Rossim v Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) v Paříži vyvinuli třídu UHPC materiálu s odkazem na CEMTEC_{multiscale}^[63]. Poměry tohoto UHPC jsou v tabulce 6.

Tabulka 6. UHPC směsné poměry CEMTEC_{multiscale}^[63]

Materiál	kg/m³
Portlandský cement	1050
Drobné kamenivo = písek	514
Křemičitý úlet	268
Přísada redukující vodu	44
Ocelová vlákna	858
Voda	180
Vodní součinitel	0,17

Pro výrobu UHPC je nutno použít takové materiály, které optimálním způsobem spolehlivě zabezpečují jeho požadované vlastnosti, především pevnost, duktilitu, trvanlivost, permeabilitu, modul pružnostiapod.

Jednotlivé materiály jsou uvedeny v *METODICE I*^[59] podrobněji. Současné jsou v ní uváděny i standardy, které popisují jejich vlastnosti, metody jejich zkoušení případně požadavky na tyto materiály.

3. VÝROBA UHPC

3.1 PŘEJÍMKA A SKLADOVÁNÍ SUROVIN

Volba konkrétního typu surovin vyplyne z vývojových a průkazných testů. Pro přejímku a skladování většiny surovin používaných při výrobě UHPC platí obvyklé postupy jako u výroby transportbetonu. Jsou kontrolovány dokumenty spojené s jednotlivými dodávkami surovin a provádí se vizuální kontrola. Typy a rozsahy kontrol a přejímacích postupů je nutno sestavit do interní dokumentace producenta UHPC. V případě pochybnosti se ověří vlastnosti surovin dle odpovídajících standardů pro materiál. S ohledem na velmi vysokou citlivost čerstvé směsi UHPC na obsah vody je nezbytné velmi pečlivě sledovat vlhkosti dávkovaných složek a to zejména kameniva. Proto jsou pro výrobu UHPC velmi často využívány zdroje sušeného drobného kameniva a mikrofilérů, aby bylo možno zajistit konstantní dávkování vody a tím i výslednou zpracovatelnost a mechanicko fyzikální vlastnosti. Proto je nutno vytvořit vhodné podmínky aby nedošlo ke zvlhnutí kameniva a mikrofilérů.

3.2 DÁVKOVÁNÍ A MÍCHÁNÍ

Proces míchání a přípravy UHPC vyžaduje s ohledem na množství složek, rozdílnou zrnitost ve srovnání s běžným betonem a jiné reologické vlastnosti čerstvé směsi (obvykle se chová jako SCC) rozdílný přístup, než je obvyklý pro běžné betony. Výsledné chování v čerstvém stavu a v zatvrdlém stavu je procesem míchání významně ovlivněn a je nezbytné mít tuto proceduru zvládnutou.

Z tuzemských i zahraničních zkušeností vyplývá, že UHPC lze míchat v míchačce s nuceným mícháním, které jsou používány v klasických míchacích centrech betonáren. Nicméně je třeba vzít v úvahu, že UHPC má v porovnání s konvenčním betonem zcela jiné reologické chování a složení a pro dostatečné zamíchání vyžaduje výrazně vyšší energii. Je nutno počítat s tím, že čas míchání bude prodloužen. Toto zvýšení dodávané energie v kombinaci s omezeným nebo

odstraněným hrubým kamenivem a nízkým obsahem vody činí nezbytným použití upravených procedur k zajištění toho, že u UHPC dojde k dokonalému promíšení složek a také, že nedojde během míchání vlivem vysoké koheze s měšik jejímu přehřátí. Toho lze docílit použitím speciálních vysoko-energetických míchaček nebo snížením teploty složek. Lze také upravit teplotu vody např. ledem a to až na 0°C. Nejvhodnější pro výrobu UHPC jsou specializované vysokootáčkové míchačky s nuceným mícháním. Použije-li se míchací centrum běžně pro výrobu standardního betonu je nutno počítat s tím, že doba míchání může být výrazně vyšší (cca 2 až 6 x) než u výroby běžných betonů vzhledem k výrazně viskoznějšímu chování materiálu UHPC. Vhodný typ míchacího zařízení je nutno prověřit a případně zvolit vhodnou míchačku s intenzivním nuceným způsobem míchání (např. planetová).

Dávkování a míchání UHPC pro výrobu dílců vychází z laboratorních zkoušek. Při nich se odzkouší, jaké pořadí vstupních materiálů a doby míchání jednotlivých intervalů je potřebné, aby čerstvý UHPC byl homogenní s vhodnou konzistencí pro výrobu hotových dílců. Rozdílnost intenzit míchání mezi laboratorními zařízeními a reálnými míchačkami může být velmi výrazná. Proto je nutné prověřit způsoby míchání na předpokládaném výrobním zařízení a na něm stanovit postupy dávkování a míchací doby pro dosažení vhodné konzistence a homogenity. Konkrétní proceduru míchání navržené receptury je nutno odzkoušet a modifikovat tak, aby byla v použitém zařízení proveditelná. Doba míchání může být výrazně ovlivněna také např. zvýšením rychlosti míchačky.

S ohledem na možnosti vyrábět z UHPC subtilní prvky lze předpokládat, že spotřeba materiálu nebude tak významná. Z toho vyplývá, že i s relativně malým míchacím zařízením bude možno vyrábět velké prvky. Pro menší objemy výroby lze použít i menších přenosných míchaček s objemem výroby např. 0,1-0,2 m³. Avšak vždy musí být použito zařízení s nuceným mícháním a účinnost a opakovatelnost výroby musí být prověřena praktickými zkouškami.

Vlákna se obvykle dávkuje na závěr. S ohledem na relativně vysokou dávku (120 kg/m³ a více) se musí dávkovat postupně, při míchání všech složek UHPC, aby nevznikaly shluky spojených vláken. Po vsypání všech vláken do míchačky se celý obsah míchá ještě stanovenou dobu z ověřovacích testů.

Z uvedeného vyplývá, že proces dávkování a míchání UHPC je daleko složitější než je tomu u běžného betonu. Také je daleko náročnější na přesnost dávek a dob míchání jednotlivých intervalů.

Dávkování složek se provádí s přesností ± 1 % hmotnosti dávkovaného množství. Velmi citlivý je UHPC na dávkování záměsové vody. Kontrolu dávky vody lze obtížně dosáhnout při dávkování kameniva s přirozenou vlhkostí, např. z běžných otevřených skládek. Sledování vlhkosti dávkovaného kameniva není běžné a zcela jednoduché. Proto je výhodné používat kamenivo vysušené nebo uložené ve stabilních podmínkách bez přímého působení klimatu, např. deště.

Významnou roli při výrobě hraje i teplota dávkovaných složek. Lze doporučit ověřit vliv teploty (zejména teploty dávkovaných složek) na výsledné reologické chování i mechanické vlastnosti. Praktické zkušenosti ukázaly, že nižší teploty složek nemusí být na závadu výsledných vlastností čerstvého i ztvrdlého UHPC.

Na každý druh dílců z UHPC si musí výrobce zpracovat zpracovat podrobný interní (neveřejný) firemní technologický předpis výroby (TePř) včetně kontrolního a zkušebního plánu (KZP). Výrobní postupy jsou výsledkem náročných poloprovozních a ověřovacích zkoušek na reálném zařízení. Pro účely dodavatelско odběratelských vztahů mezi investorem

a dodavatelem UHPC je tedy přípustné, aby veřejná dokumentace neobsahovala, např. detailní složení receptury, přesné specifikace průběhu míchání a další detaily z výroby.

3.3 ZKOUŠKY UHPC

Pro testy kontroly kvality UHPC se obecně používají stejné nebo podobné zkoušky, jako jsou používané pro konvenční betony nebo malty. Jsou měřeny vlastnosti jak čerstvého, tak ztvrdlého betonu. V některých případech je však nutný jistá modifikace. Jak se ukazuje, jedná se zejména u testů vlastností čerstvého UHPC a jeho zpracovatelnosti a dále normami prozatím nepopsaná je oblast sledování rovnoměrnosti a všesměrnosti rozptýlení ocelových vláken.

3.3.1 ZKOUŠKY ČERSTVÉHO UHPC

Pro průkazní i kontrolní zkoušky se konzistence čerstvého UHPC provádí běžnou metodou rozlitím, např. Abramsova kužele podle ČSN EN 12350-8. Podrobně uvádí Metodika 1. Vzhledem k potřebě velkého množství materiálu UHPC na tento test a zejména s ohledem na jemnozrnnost UHPC se pro účely kontroly výroby ukazuje jako použitelná náhrada menšími kužely, u kterých je provedení testu rychlejší a jednodušší. Na obr. 3 je zkouška čerstvého UHPC při výrobě dílců v provozovně rozlitím pomocí kužele pro zkoušení zpracovatelnosti malty dle EN 1015-3. Limitní hranice konzistence se však musí stanovit v laboratorních a při poloprovozních zkouškách. Limitní hodnota se uvede do kontrolního a zkušebního plánu, aby bylo možno výrobu sledovat a hodnotit.

Jak jsou a budou vyvíjeny různé varianty UHPC pro různá uplatnění, bude potřeba také alternativních testů zpracovatelnosti. Pro tuhé, nesamozhutnitelné UHPC bude vhodná metoda sednutí kužele dle ČSN EN 12350-2^[32].

Kromě zkoušky čerstvého UHPC rozlitím Abramsova nebo kužele na maltu lze konzistenci měřit zkouškou „J-Ring“. Zkouška se provádí pouze pro ty UHPC, které mají maximální zrno kameniva větší než 4 mm. Tato zkouška je vhodná pro odhalení blokace čerstvého UHPC s případnou klasickou betonářskou nebo předpínací výztuží.



Obr. 3: Kontrolní zkouška čerstvého UHPC rozlitím s využitím kužele na testy malty dle EN 1015-3

Dalšími kontrolními zkouškami čerstvého UHPC je zkouška:

- a) teploty čerstvé směsi,
- b) objemové hmotnosti čerstvého UHPC podle ČSN EN 12350 – 6,
- c) informativně - zkouška obsahu vzduchu podle ČSN EN 12350 -7.

Tyto zkoušky se provádějí současně. Obvykle v 8-mi litrovém hrnci se zjišťuje hmotnost a pak obsah vzduchu v čerstvém betonu. S ohledem na vysokou hutnost a nízkou permeabilitu nesouvisí odolnost UHPC proti mrazu a CH.R.L. s obsahem vzduchu a tento test je nutno vnímat informativně pro případnou korekci výroby tak, aby bylo dosahováno maximální objemové hmotnosti. Rozdíl proti průkazní zkoušce by u objemové hmotnosti neměl být o více jak ± 2 %. Zkouška objemové hmotnosti čerstvého betonu je znázorněna na obrázku č. 4.

Počáteční a konečné doby tuhnutí UHPC mohou být delší než ty, které byly zjištěny u mnoha konvenčních cementových materiálů. Doby tuhnutí jsou vysoce ovlivněny teplotou ošetřování. Využitelná pro tento účel je zkušební metoda dle ČSN 731332^[64] zjišťující odolnost proti penetraci. Odpovídající doba tuhnutí se pohybuje od 5 do 20 hodin, nicméně její hodnota je závislá na účelu použití materiálu UHPC.

Další doprovodné zkoušky či kontrolní postupy mohou zahrnovat sledování:

- a) vodního součinitele – měření dle ČSN 731314 nebo výpočtem ze záznamu dávkování,
- b) ověření objemové změny čerstvé směsi UHPC v nestandardizovaných korýtkových zkušebních zařízeních jako informativní podklad pro zhodnocení rizik vzniku trhlin v plastickém stavu nebo těsně po zahájení tuhnutí a tvrdnutí UHPC,
- c) ověření celkového obsahu vláken zkouškou rozplavením známého objemu čerstvého betonu a vážením získaných vláken.

Volba a provedení těchto doprovodných zkoušek je závislá na konkrétních prvcích a podmínkách jejich výroby.



Obr. 4: Zjištění objemové hmotnosti čerstvého UHPC v hrnci pro měření obsahu vzduchu podle ČSN EN 12350-7

3.3.2 KONTROLNÍ ZKOUŠKY ZTVRDLÉHO UHPC

Pro výrobu je nutno zpracovat kontrolní a zkušební plán (příklad viz příloha 1). Rozsah a typy zkoušek je nutno stanovit na základě zvoleného rozsahu betonáží a typu prvků a smluvního ujednání. Lze doporučit se řídit doporučeními v Metodice 1.

Mezi zkoušky ztvrdlého UHPC patří zjišťování válcové a krychelné pevnosti, pevnost betonu v tahu za ohybu a příčném tahu, modul pružnosti, objemová hmotnost, hloubka průsaku tlakovou vodou, odolnost povrchu proti vodě, mrazu a CH.R.L. a případně další specifické zkoušky. To může být například rychlost nárůstu pevností v počátečních fázích tvrdnutí, vývin hydratačního tepla nebo smršťování a dotvarování betonu.

Většinu těchto zkoušek se doporučuje provést při průkazních zkouškách UHPC. Ne všechny tyto zkoušky jsou ale vhodné pro kontrolní zkoušky ztvrdlého betonu v provozovně při výrobě dílců z UHPC. Ať už z hlediska pracnosti nebo dlouhé délky trvání.

Jako kontrolní výrobní zkoušky mechanických vlastností v provozovně se doporučuje zejména:

- 1) Válcová pevnost ztvrdlého UHPC v tlaku podle ČSN EN 12390 – 3 a to na válcích se štíhlostním poměrem 1:2 (min. průměr 100 mm) nebo na menších tělesech jako krychle o hraně 100 mm nebo trámečcích 40x40x160 mm. Při průkazní zkoušce musí být stanoven upřesňující koeficient mezi válcovou pevností a pevností na menších tělesech (krychle o hraně 100 mm nebo i trámečcích 40x40x160 mm). Současně s touto zkouškou se provádí také zkouška objemové hmotnosti ztvrdlého betonu podle ČSN EN 12390 – 7. Z praktických důvodů se doporučuje měřit krátkodobou pevnost v tlaku kvůli odformování a expedici dílců na skládku.
- 2) Pevnost v tahu za ohybu dle ČSN EN 196-1^[20] na trámečcích 40x40x160 mm nebo na trámčích 100x100x400 dle EN 12390-3^[43]. Při průkazní zkoušce je nutno zjistit upřesňující koeficient mezi pevností v tahu za ohybu zjištěnou na trámčích 150x50x700 mm a pevností na menších tělesech. Je totiž ověřeno, že utrámeců 40x40x160 dojde k usměrnění kovových vláken a je na nich dosahováno 1,5-2 x vyšší pevnosti v tahu za ohybu ve srovnání s velkými trámcí.
- 3) Kontrola homogenity rozptýlení vláken. Zkoušky tohoto typu nejsou prozatím standardizovány. S ohledem na průkaznost lze doporučit provedení optické kontroly četnosti vláken na doprovodných samostatných zkušebních tělesech (normové či nenormové válce, krychle). Ty jsou po zatvrdnutí opět rozříznuty a opticky je zkontrolována četnost vláken na jednotkovou plochu v dané výšce vzorku. Postup měření vyvinutý v KÚ je popsán v člancích [15],[17]. Na základě zkušeností lze konstatovat, že u stabilní směsi UHPC je rozdíl v četnosti vláken mezi spodní čtvrtinou krychle o hraně 150 mm a horní čtvrtinou této krychle při plnění ve dvou vrstvách bez následné vibrace do max. 10 %. Vyšší hodnota již značí výrazné riziko segregace vláken.

Další kontrolní zkoušky mechanickofyzikálních parametrů se provádějí pouze v odůvodněných případech a to po konzultaci s projektantem (např. modul pružnosti nebo smršťování ztvrdlého UHPC, vodotěsnost či CH.R.L.) např. při výrobě předpínaných prvků. Rozsahy a četnosti by měly být uvedeny v KZP.

4. VÝROBA PRVKŮ Z UHPC

Výroba dílců neboli prvků z UHPC v provozovně může nastat až po důkladném ověření receptury UHPC v laboratoři a vhodnosti použití této receptury pro ten který dílec. Před započítáním výroby je nutné zvážit veškeré okolnosti, které mají na výsledné vlastnosti prvku vliv. Kromě běžných a známých vlivů působících v případě klasického betonu, jako je např. materiál formy, způsob dopravy čerstvé směsi, ukládání, hutnění a ošetřování, manipulace s hotovým prvkem atd., je velmi podstatným faktorem při výrobě UHPC tvar formy a z něj plynoucí způsoby lití a ukládání. Tento proces zásadním způsobem ovlivňuje směřování rozptýlené vlákně výztuže. Její poloha a usměrnění zásadním způsobem ovlivňuje mechanické vlastnosti v tahu v konkrétním místě prvku. Proto je také v související Metodice 1^[52] uveden postup, jakým lze ověřit a případně do návrhu a posuzování prvku vložit i vliv postupu betonáže na skutečné mechanické vlastnosti. Tyto důležité náležitosti je třeba před započítáním výroby shrnout do interního technologického předpisu výroby (TePř).

4.1 ZPRACOVÁNÍ TECHNOLOGICKÉHO PŘEDPISU -TePř

Kvalita hotových dílců z UHPC závisí na mnoha faktorech plynoucích jak ze samotné směsi UHPC tak z výroby prvku. Na každý druh dílců z UHPC je doporučeno výrobcí kromě své interní a neveřejné podrobné technické dokumentace obsahující veškeré detaily, zpracovat technologický předpis výroby (TePř) včetně kontrolního a zkušebního plánu (KZP).

TePř vychází z ustanovení technických kvalitativních podmínek ŘSD, pokud jsou prvky určeny na stavby pozemních komunikací MD ČR. Dále navazuje na další platné normy, jakými jsou ČSN EN 206, ČSN EN 13 670 a případně na Model Code 2010, fib, final draft 09/2011.

TePř uvádí v souladu s technickou dokumentací technické požadavky pro výrobu konkrétních prvků z UHPC na daný objekt a kontrolní výrobní zkoušky. Jeho účelem je popsat závazné postupy výroby prvků ve výrobě. TePř se vztahuje na výrobu uvedených dílců. Zahrnuje výrobu, dopravu a ukládání čerstvého UHPC, včetně jeho následného ošetřování. Dále se TePř zabývá dalšími technologickými procesy, které na sebe bezprostředně navazují a to na přípravu forem, odformování, manipulaci a skladování dílců.

S ohledem na komplikovanost materiálu UHPC i samotné výroby je postup výroby obvykle součástí celkového knowhow výrobce UHPC. Výrobní postupy jsou výsledkem náročných poloprovozních a ověřovacích zkoušek na reálném zařízení. Proto je přípustné, aby neobsahoval např. detailní složení receptury, přesné specifikace průběhu míchání a další detaily z výroby, které dodavatel prvku a výrobce materiálu může pokládat za své knowhow.

Dodržení TePř zajišťuje pro výrobu prvků potřebnou technickou úroveň a požadovanou jakost prací. Proto s TePř musí být před započítáním výroby obeznámeni všichni zainteresovaní pracovníci výroby a podepsat, že se všemi kapitolami TePř byli seznámeni, že jim porozuměli a že jim byly zodpovězeny případné nejasnosti.

TePř platí pro všechny pracovníky provozovny, ve které bude výroba uskutečněna. Vedoucí příslušné provozovny je povinen obeznámit se zněním TePř prokazatelným způsobem všechny své podřízené. Platnost TePř začíná datem účinnosti, uvedeným na titulní straně. Informativní vzor obsahu TePř je uveden v příloze 1.

4.2 PRAVIDLA PRO PŘÍPRAVU FOREM A BEDNĚNÍ

Z technické dokumentace na prvek vzejdou pravidla pro přípravu forem, případně dalšího bednění. Podle požadavku na opakovatelnost se forma zhotovuje buď ocelová nebo ocelová v kombinaci s dalšími typy materiálů jako je dřevo či plast (překližka, vodovzdorná překližka, lamino atd.), či plast nebo matrice pro tvarování povrchů. Příprava formy před výrobou prvků zahrnuje zpravidla tyto činnosti:

- řádné zbavení formy od veškerých zbytků ztvrdlého betonu a nečistot z předešlé výroby,
- kontrola tvaru a rozměrů (zejména u dřevěných forem),
- utěsnění formy a kontrola těsnosti formy,
- nanesení odformovacího prostředku,
- zajištění formy proti zdeformování tíhou směsi,
- osazení manipulačních závěsů dílců podle technické dokumentace.

V závislosti na způsobu případné instalace betonářské výztuže nebo prvků pro předpětí soudržností nebo dodatečné předpětí se příprava forem řídí ustanoveními a požadavky platné ČSN EN 13670.

4.3 OVĚŘENÍ ZPŮSOBU VÝROBY –VÝROBA TYPOVÉHO PRVKU A JEHO ZKOUŠKA ÚNOSNOSTI

Ověření způsobu výroby typového prvku zahrnuje činnosti, kterými jsou:

- ověření možnosti uložení navrženého čerstvého UHPC do zvolené formy,
- ověření konzistence a typu zvoleného materiálu formy a odbedňovacího prostředku vzhledem k požadovanému charakteru povrchů,
- ověření rovnoměrnosti rozptýlení vláken v hotovém prvku.

Všechny tyto činnosti probíhají v provozovně při započetí výroby požadovaného prvku.

4.3.1 POSTUPY UKLÁDÁNÍ UHPC DO FORMY

S ohledem na unikátní reologické vlastnosti umožňující připravovat velmi subtilní prvky je vhodné v poloprovozních podmínkách ověřit zpracovatelnost a postupy ukládání čerstvého UHPC do zvolené formy. Způsoby dopravy a ukládání nejsou dopředu nijak limitovány.

Zkušenosti s ukládáním čerstvého UHPC je možno shrnout takto:

- Obvykle se materiál UHPC chová jako samozhutnitelný beton a do forem se ukládá litím.
- Betonování z UHPC vyztuženého vláknou vyžaduje speciální přípravu a plánování ve smyslu jehoukládání, postupových směrů ukládání do forem, napojování vrstev a styčných ploch a pracovních spár.

- Uložení UHPC by mělo následovat okamžitě po míchání. Odklad či nějaké pozastavení (např. z důvodu vyčkávání na shromáždění více záměsí vzhledem k velikosti formy a delší době míchání) musí být řádně připraveno. Během prodloužené doby by UHPC nemělo být umožněno vysychání směsi a je nezbytné sledovat případné nastartování procesu tuhnutí a tvrdnutí. Obvykle je vhodné zpracovat čerstvé UHPC nejpozději do 90 minut od namíchání.
- UHPC mají sklon k projevům reologického chování podobného jako u konvenčních samozhutitelných betonů, díky čemuž je nutno zvažovat rizika segregace složek a je možné, že budou nutná dodatečná opatření umožňující betonování.
- Vnitřní vibrování UHPC není obecně doporučováno kvůli vyztužení vlákniny a riziku narušení homogenity tohoto vyztužení. Omezené vnější vibrování formy může být provedeno jako prostředek usnadnění úniku zachyceného vzduchu

Při první zkušební výrobě se musí ověřit vhodnost způsobu dopravy čerstvého UHPC z míchačky k formě. Při tom je podstatná doba přepravy od míchačky k formě, kde se požadovaný prvek má vyrábět a jakým prostředkem bude čerstvý UHPC dopravován. Sleduje se zejména náchylnost směsi k segregaci drátek, rozmíšení, či odlučování vody.

Při samotném ukládání do forem je nutno sledovat a odzkoušet jak čerstvý UHPC do jednotlivých částí forem zatéká, zde je třeba volit nějakou formu hutnění a jakými prostředky jej provádět, jestli celou formu je možno plnit čerstvým UHPC najednou nebo po vrstvách, jestli při plnění nedochází k segregaci čerstvého UHPC a další činnosti. Pokud se čerstvý UHPC ukládá do formy po vrstvách, je nezbytné následnou zkušebníhotového prvku ověřit, jestli nedošlo k vytvoření pracovní spáry mezi jednotlivými vrstvami a narušení mechanických vlastností prvku.

Podstatné je znát z doby návrhu směsi a laboratorních experimentů charakteristiky náběhu tuhnutí a tvrdnutí a ty je nezbytné také v této fázi ověřit.

Metoda uložení UHPC má vliv na orientaci a rozptýlení vláken v samotném prvku^{[3][10][12],[15],[17]}. Orientace vláken má velmi výrazný vliv na chování materiálu a tedy i prvku v tahu. Orientace vláken v zásadě neovlivňuje vznik první trhliny od zatížení (tj. pevnost matrice), ale má významný účinek na mezní pevnosti v tahu za ohybu (tj. když již jsou aktivovaná vlákna). Zkušenosti získané v rámci projektu TA01010269 ukázaly, že výsledná pevnost prvku založeného pouze na únosnosti matrice vyztužené pouze vlákny, byla u materiálu s nevhodně rozptýlenými vlákny až o 50 % nižší než u prvku s vlákny správně rozptýlenými.

Orientace vláken ale nemá významný vliv na tlakovou pevnost a modul pružnosti.

4.3.2 VLIV KONZISTENCE A FORMY NA VÝSLEDNÝ POVRCH

Jemnozrnnost UHPC a reologické vlastnosti umožňuje vytvářet prvky s velmi kvalitní povrchovou strukturou i ve velmi náročných tvarových uspořádáních forem. Požadovaný charakter povrchu prvku je kromě řady dalších vlivů velmi podstatně závislý na použité konzistenci UHPC. Ze zkušenosti vyplývá, že i relativně malá změna v konzistenci velmi výrazně ovlivní strukturu povrchu. Jiné požadavky na konzistenci čerstvého UHPC budou u plošných prvků, jiné u svislých prvků a jiné u tvarově náročných prvků, například s úkosy, či

zalomeními. Také závisí konzistence na tom, jestli se do prvku vkládá další výztuž, jestli nedochází k blokaci na střetu s výztuží.

Měření konzistence lze provádět standardizovaným postupem rozlitím kuželem dle ČSN EN 12390-8. S ohledem na velmi jemnozrný charakter UHPC a na základě zkušeností se pro rychlou výrobní kontrolu osvědčila jako rychlá a jednoduchá zkouška čerstvého UHPC při výrobě dílců v provozovně zkouška rozliti pomocí výrazně menšího kužele dle ČSN 1015-3. Na základě laboratorních a následně provozních zkušeností lze stanovit velmi úzkou hodnotu tolerance rozliti, která zajistí kvalitu budoucího povrchu hotového prvku. Tuto limitu je nutno stanovit jak na základě laboratorních, tak zejména poloprovozních zkoušek s reálnými formami.

Vliv tymateriálu a odformovacího prostředku je nutno opět ověřit poloprovozním testem.

4.3.3 OVĚŘENÍ ROVNOMĚRNOSTI ROZPTÝLENÍ VLÁKEN NA HOTOVÉM VÝROBKU

Homogenita distribuce vláken je jedním ze základních parametrů určující finální mechanické vlastnosti prvků vyrobených z UHPC. Ze zkušeností je známo, že konzistence UHPC a zpracování může distribuci zásadně ovlivnit. Distribucia homogenitu obsahu vláken ve vztahu ke konzistenci lze přesněji stanovit v zásadě pouze na ztvrdlém UHPC. Prvním krokem je ověření ve fázi průkazní zkoušky na standardních tělesech (válce, krychle), která se rozříznou a optickými metodami se ověří, zda nedochází k segregaci vláken. Nedestruktivní měření jsou prozatím ve vývojových stádiích a běžně nejsou dostupná.

V rámci poloprovozních zkoušek lze doporučit zjištění nerovnoměrného rozptýlení vláken na hotovém prvku a to na jeho výřezu. Jinou metodou, která umožní jisté ověření, je kontrola na doprovodných samostatných zkušebních tělesech, jak je popsáno v bodě 3 kapitoly 3.3. Krychle či válce jsou po zatvrdnutí rozříznuty a opticky je zkontrolována četnost vláken na jednotkovou plochu v dané výšce vzorku. Postup měření vyvinutý v KÚ je popsán v článkách [15],[17]. Na základě zkušeností lze konstatovat, že u stabilní směsi UHPC je rozdíl v četnosti vláken mezi spodní čtvrtinou krychle o hraně 150 mm a horní čtvrtinou této krychle při plnění ve dvou vrstvách bez následné vibrace do max. 10 %. Vyšší hodnota již značí výrazné riziko segregace vláken.

Současně s měřením rovnoměrnosti rozptýlení drátků je nutno měřit i konzistenci, např. rozlitím kužele dle EN 1015-3. Tím se ověří, jaká je limitní konzistence pro segregaci (sedání) a kde je hranice, kdy k segregaci nedochází. Z toho lze pak určit úzké rozhraní konzistence, které je pak nutno dodržovat při kontrole výroby UHPC a prvků. Tím se předejde k nežádoucí segregaci vláken v čerstvém UHPC.

4.3.4 OŠETŘOVÁNÍ

Zásadní pro správný výsledek je ošetřování hotového prvku z UHPC. V rámci ošetřování jsou rozhodující primárně dva faktory a to teplota a vlhkost. Jako u jakéhokoli cementového kompozitního materiálu, udržování vhodné teploty je pro dosažení požadovaného náběhu vlastností rozhodující. U UHPC je velmi důležité z důvodu nízkého obsahu vody, eliminace úbytku počáteční vody uzavřením systému nebo udržováním vysoké vlhkosti prostředí.

Při ošetřování UHPC je nutno vzít v úvahu jeho specifické chování v plastickém stavu před začátkem tuhnutí a tvrdnutí, kdy se může chovat dlouho jako viskozni hmota. S tím souvisí rizika vzniku různých poruch jako trhliny, segregace složek, odlučování vody atd.. V této fázi je nutno udržovat vhodné teplotu (doporučeno teploty nad +5°C) a zajistit, aby nedošlo ke ztrátě záměšové vody, nedošlo k otřesům, teplotním šokům atd..

Fáze ošetřování po začátku tuhnutí a tvrdnutí probíhá v závislosti na tom, zda je vyžadováno zrychlené dosažení jednotlivých materiálových charakteristik. Znamená to, že může a nemusí zahrnovat prostředí se zvýšenou teplotou a vysokou vlhkostí.

Při požadavku na běžný náběh vlastností je nutno udržovat prvek po dostatečně dlouhou dobu ve vlhkém prostředí a vhodné teplotě. Informativně lze uvažovat dobu a způsoby ošetřování dle požadavku ČSN EN 13670. Nicméně je nezbytné si ověřit specifika daného materiálu a prvku a tomu přizpůsobit i jeho ošetřování, aby na prvcích nevznikly případné poruchy plynoucí ze ztráty vody, rychlé hydratace, či vývinu hydratačního tepla.

UHPC je materiál, který významně reaguje na teplotní ošetřování v prvních dnech po výrobě a mechanické vlastnosti UHPC mohou být značně zvýšeny proteplováním po zatvrdnutí. Měření prováděná v rámci projektu TAČR TA 01010269 řešeném v Kloknerově ústavu, ČVUT v Praze potvrdily nárůst pevnosti oproti referenčnímu neošetřovanému materiálu. Při ošetřování materiálu 80 hodin při teplotě 80 °C zahájeném 3 dny po výrobě došlo k navýšení pevnosti v tahu za ohybu o cca 25% a navýšení pevnosti v tlaku o cca 10%.

Výzkum provedený Graybealem^[61] informuje o rozsáhlém programu zaměřeném na určení materiálových vlastností UHPC pomocí čtyř rozdílných ošetřovacích procedur po zatvrdnutí. Ty zahrnují ošetřování parou při 90 °C nebo 60 °C po dobu 48 hodin, začíná se 24 hodin po vybetonování; ošetřování parou při 90 °C, se začátkem po 15 dnech standardního ošetřování; a ošetřování ve standardních laboratorních teplotách až do doby testování. Tyto tři metody ošetřování parou zvyšují naměřené tlakové pevnosti a moduly pružnosti, snižují dotvarování, v podstatě odstraňují smršťování při vysychání, snižují propustnost chloridových iontů a zvyšují odolnost vůči oděru. Zlepšení dosažené pomocí nižší teploty páry a opožděného ošetření parou bylo nepatrně menší než dosažené pomocí ošetření parou při vyšších teplotách. Vzorky ošetřené parou při 90 °C po 24 hodinách dosáhly své plné tlakové pevnosti během 4 dnů po vybetonování.

Podklad [19] informuje o řadě výsledků zabývajících se vlivem zvýšených teplot při ošetřování na výsledné mechanické vlastnosti. Např. že Heinz a Ludwig ukázali, že proteplování při teplotách mezi 65 a 180 °C zvýší tlakovou pevnost ve 28 dnech na 280 MPa v porovnání s pevnostmi 178 a 189 MPa při ošetřování při 20 °C. Vyšší teploty ošetřování vyvolávají vyšší pevnosti v tlaku. Navíc jsou pevnosti na konci ošetřování při 48 hodinách od betonování stejné jako odpovídající ve 28 dnech. Autoři také došli k závěru, že proteplování 90 °C nepředstavuje žádné riziko z hlediska opožděného tvoření ettringitu. Schachinger a kolektiv objevili, že počáteční ošetřování při 20 °C po dobu 5 dní následované ošetřováním teplotou od 0 do 65 °C bylo nejpříznivější kombinací k dosažení vysokých pevností ve stáří do 28 dní. Pevností v tlaku v rozmezí 250 až 300 MPa bylo dosaženo ve stáří od 6 do 8 let. Heinz a kolektiv dosáhli pevností v tlaku vyšších než 200 MPa ve stáří 24 hodin po 8 hodinách uložení při 20 °C následovaném 8 hodinami při 90 °C ve vodě. Delší doby počátečního uložení nebo proteplení vyvolávají vyšší pevnosti, jestliže byla v UHPC obsažena rozemletá vysokopecní struska. Autoři získali nejvyšší pevnosti zahrnutím létavého popílku a autoklávováním UHPC 8 hodin při 150 °C.

4.3.5 DALŠÍ OPATŘENÍ

Výroba prvků z UHPC vyžaduje odborně zdatný personál, který si je vědom unikátnosti vyráběného materiálu. S ohledem na složitost je i jednotková cena UHPC několikanásobně vyšší než u běžného betonu.

Nebedněné povrchy se upravují známými a běžně dostupnými technologiemi hlazení, tj. různé typy hladítek nejlépe kovová či plastová.

Oprava vadně vyrobeného prvku z UHPC je s ohledem na extrémně vysoké mechanické vlastnosti velmi obtížná. V závislosti na zjištěném problému je nutno zvážit přístup. Estetické vady lze opravit běžnými technikami sanace betonu PCC maltami. Mechanické vlastnosti UHPC jsou významně lepší než jakákoli sanční PCC malty. Nelze tedy vyloučit zhoršenou soudržnost a v žádném případě nemůže být tato oprava pevnostní.

U nového prvku se před jeho praktickou aplikací a nebo před zavedení do seriové výroby provede typová zatěžovací zkouška. Zkouška se provede klasickým způsobem dle platných standardů v závislosti na typu prvku. Pro zkoušku se musí připravit program zatěžovací zkoušky, která popíše návrhové předpoklady a hodnoty deformací, kterých má být dosaženo pro působící zatížení. Zkoušku musí provést odborná organizace nejlépe akreditovaná laboratoř. Zkouška prvku se provádí pokudmožno do porušení. Ukáže-li se to technicky nemožné nebo nevhodné pak se zatěžování provede na zvolenou zatěžovací úroveň. Zkouška slouží k potvrzení návrhových předpokladů a skutečného chování prvku.

5. REALIZACE KONSTRUKCÍ A KONSTRUKČNÍCH PRVKŮ Z UHPC

V současnosti je materiál UHPC intenzivně rozvíjen po celém světě a byl využit na řadě konstrukcí v Severní Americe, Japonsku, Austrálii a západní Evropě. Také v ČR již našel tento typ materiálu své uplatnění na mostě v Benátkách nad Jizerou a unikátní lávce pro pěší v Čelákovících. Nejčastěji nachází uplatnění v mostních konstrukcích, hlavně u lávek pro pěší, ale jsou známy i aplikace v konstrukcích pozemních staveb, např. jako prefabrikované stěnové panely (Aubervilliers, Francie).

Na těchto konstrukcích je s výhodou využíváno unikátních vlastností UHPC, tj. vysoké mechanické parametry a vysoká trvanlivost. Tyto vlastnosti umožňují navrhovat a vyrábět velmi subtilní (lehké) a trvanlivé konstrukce běžných i neobvyklých architektonických tvarů. V konečném důsledku dochází k úsporám množství používaných materiálů a k usnadnění výstavby např. možností využívat lehčích dopravních a zvedacích prostředků.

5.1 MOSTNÍ KONSTRUKCE

V mostním stavitelství se používá UHPC jak pro hlavní nosné části konstrukcí, tak pro nenosné prvky vybavení mostů. V současné době je známé použití UHPC na následujících prvcích:

- Nosníky – tvaru T, I, PI, komorové
- Spřahující desky roštových konstrukcí
- Podélné spáry mezi nosníky
- Desky z UHPC jako ztracené bednění pro betonáž spřahující desky
- Římsy
- Spřažení nosníku s deskou.

Česká republika

Rekonstrukce mostu v Benátkách nad Jizerou (2012), materiál vyvinut v Kloknerově ústavu, ČVUT v Praze

V rámci rekonstrukce zpřaženěnosní konstrukce v Benátkách nad Jizerou byly z materiálu UHPC navrženy a vyrobeny desky ztraceného bednění. Tvar desek byl 1x1,6 m a desky byly na rozpon 1,6 m. Tloušťka desky 20 mm s výztužnými žebry výšky 40 a 60 mm. Desky neobsahovaly žádnou dodatečnou betonářskou výztuž. Na desky byly následně úspěšně aplikovány výztuž mostovky i beton desky bez jakéhokoli dodatečného podepření. Jednalo se o první praktickou aplikaci UHPC v ČR.



Obr. 5 Instalace desek ztraceného bednění mostovky Benátky nad Jizerou, ČR zdroj [16]

Zavěšená lávka pro pěší v Čelákovících, materiál TBG Metrostav

První mostní konstrukce – lávka pro pěší navržena a provedena z UHPC v ČR. Celkem bylo použito 190 m³ UHPC vyvinutého TBG Metrostav. Celková délka 242 m s hlavním polem 156 m a krajními poli 43 m. Jená se o segmentovou konstrukci. Segmenty byly z výroby dopravovány na staveniště lodí. Segmenty pro hlavní pole se zvedaly přímo z lodí pomocí speciálního vozíku, který se pohyboval po už hotové části mostu. Pro střed hlavního pole se použil krátký segment a zabetonovaly se uzavírací spáry pomocí čerstvého betonu. Nosná konstrukce lávky byla dokončena v prosinci 2013. Lávka byla zkolaudována a uvedena do provozu v dubnu 2014.



Obr. 6 Lávka pro pěší v Čelákovících, zdroj [83]

Francie

Foot bridge Chryso plant in Sermaises, Rhodia (2007)

Lávka pro pěší v chemické továrně Chryso. UHPC byl zde použit z důvodu vyšší únosnosti a lepší odolnosti proti požáru oproti tradičním dřevěným a ocelovým konstrukcím [72]. Speciálně odolnost proti ohni je v tomto případě důležitá, protože se v blízkosti lávky nachází velké množství skladovaných chemikálií. Lávka má rozpětí 19 m a v její konstrukci není použita žádná betonářská výztuž.



Obr. 7 Lávka v chemické továrně Chryso, Francie, zdroj [72]

Saint-Pierre-la-Cour, Mayenne, materiál DUCTAL®

První most navržený z materiálu Ductal ve Francii. Převádí pozemní komunikaci přes železniční trať z cementárny společnosti Lafarge v Mayenne. Nosná konstrukce je tvořena 10 ks nosníků a spráhující desky, obě části provedené z materiálu Ductal®.



Obr. 8 Most Saint-Pierre-la-Cour, Francie, zdroj [73]

Pont de la Chabottesur l'A51, materiál BCV® (2005)

Lávka pro pěší (34) přes rychlostní komunikaci A51 (12/2005) je tvořena 22 prefabrikovanými segmenty délky 2.44m přivezenými na místo stavby. Tloušťky komorového segmentu jsou 12(stěny a dolní deska) a 14cm (horní deska). Segmenty byly sestaveny a sepnuty dodatečným předpětím do konečného tvaru. Spáry mezi segmenty byly vyplněny lepidlem. Rozpětí lávky je 47.4m. Nosník je vyztužen pouze ocelovými vlákny a spojení zajišťuje 6ks 19-lanových kabelů T15. Nosník byl složen a předeprnut vedle rychlostní komunikace a uložen na definitivní opěry ve smontovaném stavu pomocí jeřábu. Celková hmotnost nosníku byla cca 195 t.



Obr. 9 Lávka přes A51, Pont de la Chabottesur l'A51, Francie, zdroj [70], [73]

Pinel Bridge, Rouen France, materiál BSI® (2007)

V rámci rozšíření stávajícího mostu byla navržena nová nosná konstrukce jako zabetonované ocelové nosníky. Společnost Eiffage TP navrhla alternativní řešení, kde nosná konstrukce je tvořena 17 nosníky z UHPFRC spřaženými s klasickou železobetonovou deskou C35/45. Nosníky z UHPFRC mají tvar obráceného T s horní rozšířenou hlavicí pro uložení bednění pro spřahující desku. Nosníky jsou uloženy na sraz dolní pásnice. Rozpětí mostu je 27 m a šířka 14 m. Výška nosníků je 620 mm, šířka dolní pásnice 795 a výška 150 mm. Šířka stěny je proměnná 70 a 120 mm u konců nosníků. Horní pásnice má tvar 250x50 mm. Nosník je předepnutý 28 předem předpjatými lany T15,7/1860 MPa se separací některých lan u podpor. U tohoto mostu došlo oproti zabetonovaným nosníkům ke zlehčení konstrukce o cca 40%.



Obr. 10 Pinel Bridge, Rouen, Francie, zdroj [74]

Bourg-lès-Valence, materiál BSI® – CERACEM (2002)

Jedná se o silniční nadjezd složený z pěti nosníků tvaru PI na rozpětí 22 m z UHPC. Spáry mezi nosníky jsou také provedeny z UHPC betonovaná na místě. Výška nosníků je 90 cm, šířka 2,5 m, tloušťka stěn je 12 cm a horní deska má tloušťku 15 cm.



Obr. 11 Silniční most Bourg-lès-Valence, Francie, zdroj [75]

Švýcarsko

Lávka pro pěší v krásném alpském prostředí. Podle požadavků projektantů (Huggler SA – Interlaken) bylo nutné navrhnout takovou desku, která bude zároveň sloužit jako ochrana stávající konstrukce. Byly to tyto požadavky: vysoká pevnost, nízká hmotnost, umožnění obnovy betonu těsnicí vrstvou a použití prefabrikátů tak, aby bylo možné jednoduše provést montáž. Jednotlivé elementy z UHPFRC mají šířku 1,76 m a délku 0,76 m při tloušťce 4 cm.

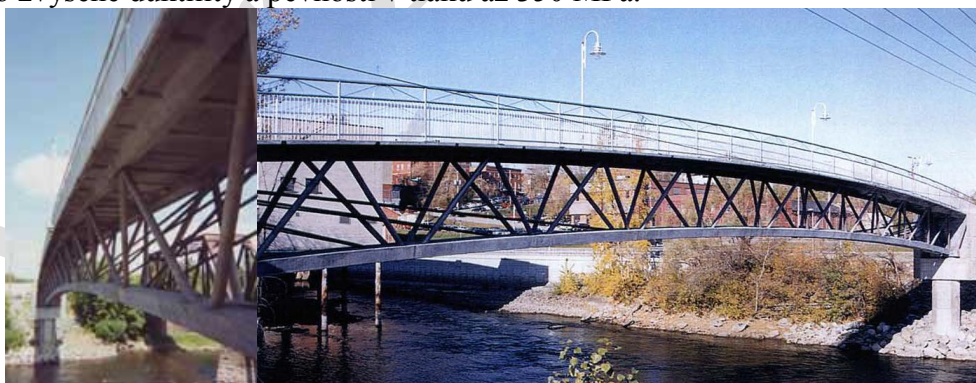


Obr. 12 Lávka Lauterbrunnen, Švýcarsko, zdroj [75]

Kanada

Sher brook footbridge over Magog, Quebec, materiál Ductal® (1997)

První větší aplikací UHPC byl Sherbrookfootbridge v Kanadě. Tato lávka byla postavena v roce 1997 přes řeku Magog. Rozpětí lávky je 60 metrů při tloušťce desky pouhých 30 mm (Obr. 12). Tato prefabrikovaná dodatečně předepjatá prostorová konstrukce neobsahuje žádnou konvenční ocelovou výztuž. Horní a dolní pásnice jsou vyrobeny z betonu o pevnosti v tlaku 200 MPa. Diagonály jsou zhotoveny z UHPC ohraničeným nerezovými trubkami, je dosaženo zvýšené duktility a pevnosti v tlaku až 350 MPa.



Obr. 13 Lávka pro pěší přes řeku Magog – Sher brook footbridge over Magog, Quebec, Kanada, zdroj [65], [66]

Díky velmi vysoké pevnosti v tlaku UHPC bylo možné navrhnout relativně vylehčenou předepjatou konstrukci, která byla prefabrikována a smontována na místě. Protože se jednalo o první větší aplikaci z UHPC, nebyl z důvodu bezpečnosti využit plný potenciál materiálu. Konstrukce byla navržena tak, aby nevznikalo v diagonálách žádné tahové napětí v obou

mezních stavech, a dále aby nedocházelo k tahu ve spodním nosníku za mezního stavu použitelnosti [66].

Glenmore/Legsby overpass, Calgary, Alberta, Kanada,

Lávka o jednom poli přes osm dopravních pruhů, délka 53 m. Nosná konstrukce je tvořena dvěma konzolami na opěrách a vloženým polem délky 33,6m. Nosník má tvar písmene T a vyroben z UHPC Ductal®. Nosník má objem 40 m³ [65].



Obr. 14 Lávka pro pěší přes silniční komunikaci, Calgary, Kanada, zdroj [65]

The Hawk Lake Bridge, Ontario

Tento most převádí transkanadskou dálnici (Trans-Canada Highway 17) přes železnici (Canadian Pacific Railway). Materiál Ductal® byl použit pro podélné spojení jednotlivých prefabrikovaných komorových nosníků na stavbě. Jelikož je most daleko od civilizace, UHPC pro podélné spoje nosníků byl míchán přímo na stavbě. Z důvodu nízkých nočních teplot na stavbě byl míchaný UHPC velmi dobře ošetřován – ochranné tepelné pokrývky a ohřátá záměsová voda. V UHPC byla použita ocelová vlákna. Průměrná pevnost betonu v tlaku ve 28 dnech byla 145,2 MPa.



Obr. 15 Most Hawk Lake, Ontario, Kanada, zdroj [65], [66]

The Current River Bridge, Ontario, Kanada (2007)

Na tomto mostě byl použit UHPC - Ductal[®] Joint Fill pro prefabrikované římsy pod zábradlím.



Obr. 16 The Current River Bridge, Ontario, Kanada, zdroj [65]

The Sunshine Creek Bridge, Ontario, Kanada (2007)

Na tomto mostě byl použit UHPC - Ductal[®] Joint Fill pro devět podélných spár spojujících 10 komorových prostých nosníků tloušťky 600 mm a délky 21 m. UHPC byl také použit pro přechodové desky a římsy.



Obr. 17 The Sunshine Creek Bridge, Ontario, Kanada, zdroj [65]

Country Hills Pedestrian Bridge, Alberta (2008)

Tento most spojuje sousední komunity velmi pěkným zakřiveným mostem přes šestipruhovou silnici. Most má rozpětí 49 m s vloženým 33,5 m polem z UHPC - Ductal[®]. Tato lávka je prvním mostem, kdy byl UHPC dávkován v autodomíchávači.



Obr. 18 The Country Hills Pedestrian Bridge, Alberta, Kanada, zdroj [3.1]

The Buller Creek, Ontario (2009)

Na tomto mostě byl použit UHPC - Ductal[®] Joint Fill pro devět podélných spár spojujících 10 komorových prostých nosníků tloušťky 900 mm a délky 27,8 m. UHPC byl také použit pro přechodové desky a římsy.



Obr. 19 The Buller Creek, Ontario, Kanada, zdroj [65]

The Log River Bridge, Ontario (2009)

Na tomto mostě byl použit UHPC - Ductal[®] Joint Fill pro sedm podélných spár spojujících 8 komorových prostých nosníků tloušťky 610 mm a délky 21 m. UHPC byl také použit pro přechodové desky a římsy. Skleněná vlákna (GFRP) byla použita pro UHPC.



Obr. 20 The Log River Bridge, Ontario, Kanada, zdroj [65]

Austrálie

Sheperds Creek bridge, NSW, materiál Ductal®

Jedná se o první použití UHPC v Austrálii jako zkušební pro státní organizaci „Roads and Traffic Authority NSW (RTA)“. Nový most nahradil původní dřevěný most. Rozpětí mostu je 15 m se šikmostí 16°. Nosná konstrukce je tvořena 16 předem předpjatými prefabrikovanými nosníky z UHPC výšky 600 mm s osovou vzdáleností 1,3 m. Jako ztracené bednění byly použity desky z UHPC tloušťky 25 mm. Spřahující deska má tloušťku 170 mm a provedena jako standardní železobetonová konstrukce.



Obr. 21 Most přes Sheperds Creek, zdroj [76]

Nový Zéland

Auckland Regional Transport Network Ltd

V rámci vylepšování přístupu cestujících na nádražích byly ve stanicích železniční trati Auckland Regional Transport Network Ltd. postaveny nové lávky sloužící jako přístupové rampy pro cestující. První stanicí byla Papatoetoe (2005) [81], kde celková délka lávky s rampami je 175 m a rozpětí jednoho prostého pole je 20 m. Použitý materiál je Ductal®. Nosná konstrukce je tvořena dodatečně předpjatým PI průřezem s perforovanými stěnami. Horní deska nosného průřezu má tloušťku 50 mm, stěny 100 mm. Žebra mezi stěnami jsou á 2700 mm. Výška průřezu je 650 mm, šířka nosníku PI je 2200 mm. V každé stěně dole je 10 profilů 12,7 mm předpínacích lan a nahoře 6 profilů 12,7 mm. Větší pole byla vyráběna ve dvou částech, které byly předepnuty na stavbě. Nosná konstrukce byla vyráběna v Austrálii a dovezena na Nový Zéland.

Hlavními výhodami tohoto návrhu bylo výrazné snížení hmotnosti nosné konstrukce, to vedlo k omezenému návrhu opatření proti zemětřesení dle Novozélandských norem a také k ušetření na spodní stavbě a výstavbě.



Obr. 22 Lávka pro pěší přes železniční stanice, Papatoetoe, Nový Zéland, (zdroj [70], [76])

Další stanicí byla Penrose (2006). Lávka má celkovou délku 265m a tvoří ji 15 polí délky 20 m. Tato konstrukce je stejná jako na první konstrukci ve stanici Papatoetoe. Třetí stanicí je Papakura (2007).

SRN

Lávka přes řeku Neste, Kassel

První konstrukcí z UHPC v Německu byla cyklistická lávka přes řeku Nieste nedaleko Kasselu (viz Obr. 23). Lávka byla navržena jako prefabrikát, dodatečně předepjatá konstrukce dvěma ocelovými předpínacími kabely. Lávka je 12 m dlouhá. Mostovka má tloušťku 100 mm a rozpětí mezi obrubními nosníky v příčném směru 3 m. Mostovka je vyztužena výhradně ocelovými drátky [68].



Obr. 23 Cyklo lávka přes řeku Nieste

Gärtner platz brücke - Lávka přes řeku Fulda, Kassel

Další mostní aplikací z UHPC v Německu je Gärtnerplatzbrücke přes řeku Fulda v Kasselu, který měří 140 m. Konstrukce je navržena jako prostorový rám složený z oceli a ultravysokopevnostního betonu. Most se skládá ze šesti polí, nejdelší je 36 m dlouhé. Spodní pásnice a diagonály jsou z profilované oceli kruhového průřezu, jsou spojeny svarem. Diagonály jsou s horní pásnicí z UHPC spojeny plně předepjatým šroubovým spojem. Mostní

deska je vyrobena z prefabrikátů 5 m širokých a předepnutých v příčném směru. Tloušťka desky se pohybuje od 80 mm uprostřed lávky do 100 mm na krajích. Deska je spojena s horní pásnicí z UHPC lepením [69].



Obr. 24 Lávka Gärtner platz brücke přes řeku Fulda, Kassel

USA

Hlavní výzkum a použití UHPC se odehrává ve státě Iowa, kde státní universita Iowa State University ve spolupráci s FHWA (Turner-Fairbank Highway Research Center in Washington) zkouší UHPC v inženýrském stavitelství.

Mars Hill Bridge, Wapello County, Iowa

První most z UHPC v USA byl postaven v roce 2005. Nosníky jsou vybetonovány z materiálu Ductal ve tvaru I výšky a sprážené klasickou železobetonovou deskou tloušťky 23 cm. Rozpětí mostu je 33,5 m. Příčný řez je tvořen třemi nosníky z UHPC [79].



Obr. 25 Silniční most Mars Hill Bridge, Wapello County Iowa, USA

The Cat Point Creek Bridge, Virginia (2008)

Tento most je tvořen pěti 24,3 m dlouhými I nosníky z materiálu Ductal[®] a spráhující deskou ze standardního železobetonu betonovanou na místě.



Obr. 26 Silniční most Cat Point Creek Bridge, Virginia, USA

The Jakway Park Bridge, Iowa (2008)

Druhá generace PI nosníků z UHPC byla použita na střední pole mostu Jakway Park Bridge (rozpětí středního pole 15,2 m). V příčném řezu je 3 ks PI nosníků. Nosníky byly vyrobeny v továrně společnosti Lafarge ve Winipegu, Manitoba, Kanada. Nosníky ve tvaru písmena PI vyšly jako nejoptimálnější z hlediska spotřeby UHPC, vzhledem k jeho ceně.



Obr. 27 Silniční most Jakway Park Bridge Iowa, USA, zdroj [79]

Zkušební lávka, Virginie, USA (2003)

FHWA ve své laboratoři ve Virginii postavila PI nosník z materiálu Ductal pro dlouhodobé testování a sledování. Nosník nemá železobetonářskou výztuž.



Obr. 28 Zkušební lávka, FHWA laboratoř, Virginie [65]

Dalším využitím UHPC jsou žebrované desky jako náhrada stávajících železobetonových desek na spřažených mostech [80].

Jižní Korea

Seonyu Footbridge v Soulu (střední oblouk 120 m dlouhý a 4,3 m široký, tloušťka desky menší než 30 mm).

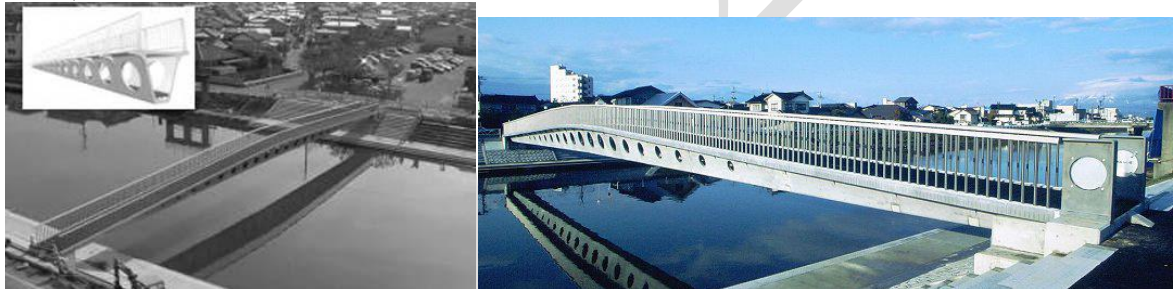


Obr. 29 Lávka Seonyu v Soulu, Korea[3]

Japonsko

Sakata Mirai Footbridge, Japonsko

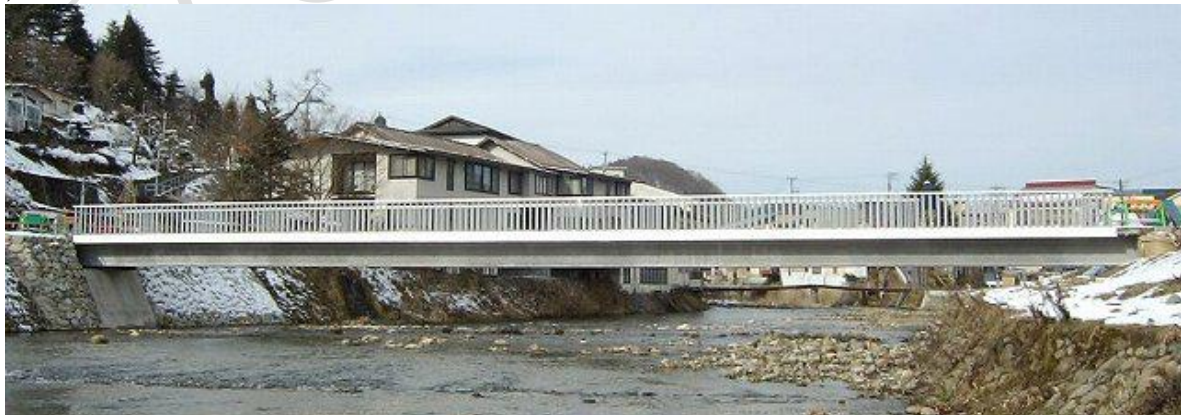
Mezi další příklady mostních realizací z Ductalu® patří lávka pro pěší Sakata Mirai Foot bridge v Japonsku (rozpětí 50 m bez mezipodpory, šířka 2,4 m, proměnná výška 0,45-1,55 m).



Obr. 30 Lávka SakataMirai (2002), Japonsko, zdroj [71]

Akakura Onsen Bridge, Japonsko

Dalším příkladem je Akakura Onsen Bridge s hlavním rozpětím 35,3 m a výškou nosníku 0,95 m.



Obr. 31 Lávka Akakura Onsen (2003), Japonsko, zdroj [71]

5.2 POZEMNÍ STAVBY

V oblasti pozemních staveb je použití UHPC v podstatě jakékoliv, tzn. tam kde je potřeba tenká konstrukce libovolného tvaru.

Francie

V pozemních stavbách byl tento materiál použit na rekonstrukci zvonice Paláce Spravedlnosti v Laval (viz Obr. 32). Byla zhotovena přesná kopie zvonice, která byla zničena během druhé světové války. Díky novému materiálu bylo dosaženo 5krát nižší hmotnosti konstrukce. Díky tomu mohla být zvonice vyrobena jako prefabrikát a poté vyzvednuta a osazena ve výšce 22 m na vrcholu paláce. Celá rekonstrukce trvala pouhých 48 hodin [65].



Obr. 32 Zvonice Paláce Spravedlnosti v Laval, zdroj [65]

Zastřešení mýtné brány – viadukt Millau, Francie (2005)

V roce 2005 byla s výstavbou viaduktu Millau postavena mýtná brána se zastřešením z UHPC (BSI®). Jednalo se o 53 ks segmentů o celkové hmotnosti 2300t z UHPC. Základní rozměry konstrukce jsou: šířka 98m, rozpětí 28m, výška segmentů 20-85cm, tloušťka 10cm, předpětí 28 lan DSI 12T15S.





Obr. 33 Střeška mýtné brány, viadukt Millau, Francie, zdroj [70]

Kanada

Dalším projektem z Ductalu je zastřešení Shawnessy Rail Transit Station v Kanadě [67]. 24 unikátních tenkostěnných skořepinových baldachýnů podepřených sloupy poskytuje přístřešek cestujícím. Skořepiny mají rozměr 5,1 na 6 metrů při tloušťce pouhých 20 mm. Pevnost v tlaku betonu se pohybuje od 130 do 200 MPa, pevnost v tahu za ohybu od 20 do 50 MPa. Jednotlivé části konstrukce byly předem vyrobeny ve výrobně prefabrikátů. Skořepina jednoho pole zastřešení se skládala ze dvou polovin - prefabrikátů. Nejdříve byly osazeny sloupy, dále pak skořepiny na pomocné ocelové lešení. Jako poslední byly upevněny vzpěry. Na této aplikaci bylo ukázáno, že z betonu lze vyrábět i vysoce estetické konstrukce, jejichž materiál slibuje dlouhou životnost a nízké náklady na údržbu.



Obr. 34 Shawnessy Light Rail Transit Station (zdroj <http://www.cpci.ca>)

Španělsko

UHPC byl použit pro sloupy v muzeu Královny Sofie v Madridu (2007). UHPC byl použitý jako výplň ocelových sloupů průměru 32cm. Kombinace ocelové trouby a UHPC zvýšila ohybovou a tlakovou únosnost 16m sloupů [3.9].

5.3 INŽENÝRSKÉ KONSTRUKCE

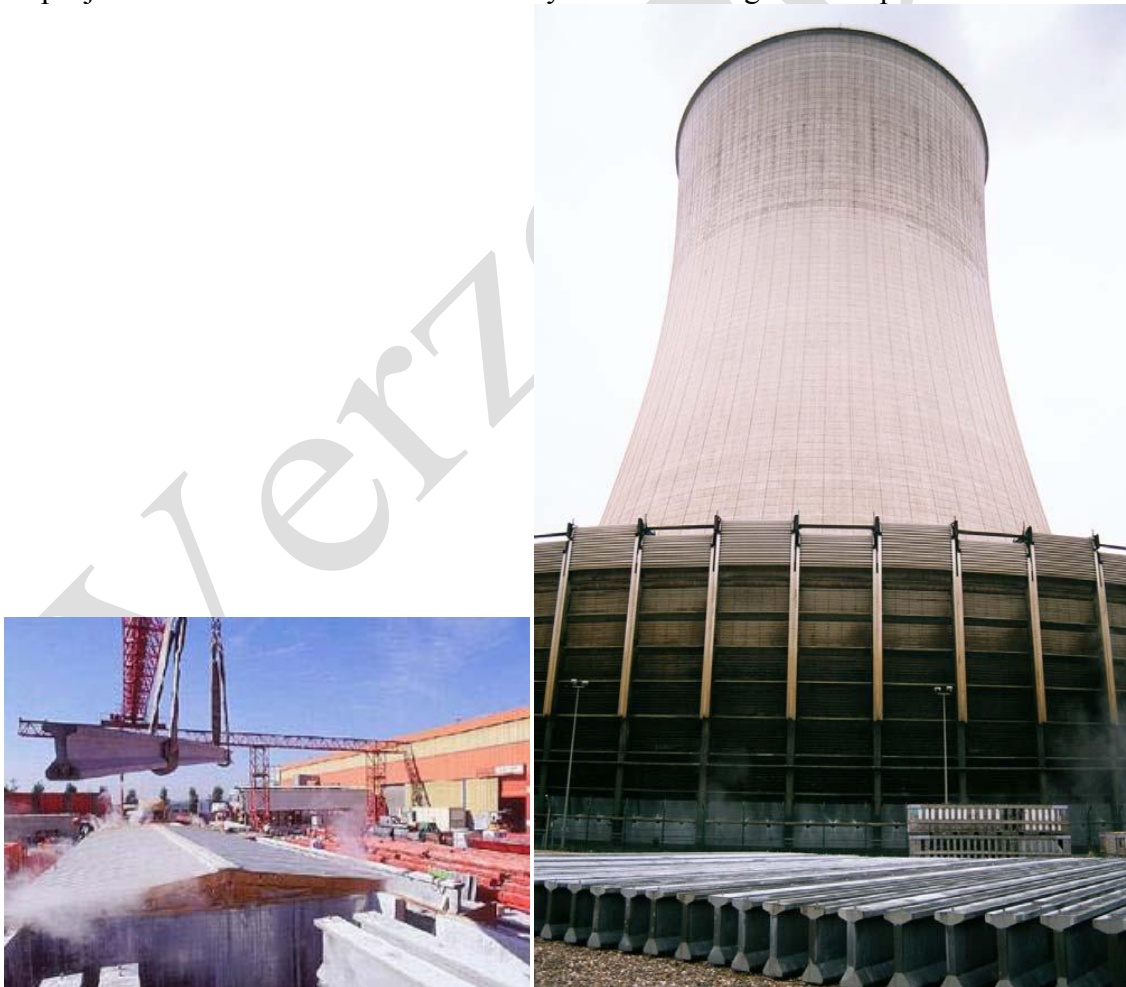
Dalším oborem použití UHPC jsou například:

1. piloty pro hlubinné založení; ve světě se zkouší náhrada ocelových beraněných pilot pilotami z UHPC [3.9],
2. těžební plošiny v moři,
3. části jezů ve vodohospodářských stavbách,
4. protipovodňové stavby ve vnitrozemí a také na mořském pobřeží,
5. zakrytí sil,
6. sloupy,
7. ochrana konstrukcí a okolí proti výbuchům.

Francie

Atomová elektrárna Cattenom-Civaux (DUCTAL)

Dalším zajímavým použitím UHPC byla náhrada ocelových nosníků v silně agresivním prostředí chladicích věží atomové elektrárny Cattenom – Civaux (1997-1998, Ductal) prefabrikovanými předpjatými pruty a nosníky z UHPC. Jednalo se o cca 2600 ks [70]. Společnost Electricité de France (EdF) zvolila pro výměnu UHPC z důvodu zlehčení konstrukce, zlepšení trvanlivosti, což má za následek menší zatížení na základy a navíc zlepšuje chování během rozmrazovacích cyklů ve velmi agresivním prostředí.



Obr. 36 Chladicí věže atomové elektrárny Cattenom-Civaux, Francie (zdroj [70])

Austrálie

Rekonstrukce zakrytí jezů u elektrárny Eraring Power Station, Austrálie. Původní zakrytí jezů začalo kolabovat po 14 letech účinkem chloridů rozprašovaných slanou vodou na jez. Nové zakrytí jezů má očekávanou životnost více než 100 let v tomto slaném prostředí [76].



Obr. 37 Zakrytí jezů u elektrárny Eraring Power Station, Austrálie (zdroj [76])

Ochrana proti výbuchům

Jelikož má UHPC výraznou odolnost proti výbuchům a nárazům a rázům nabízí se použití tohoto materiálu jako ochranných prvků v místech, kde se pracuje s explosivními materiály či se počítá s možnými nárazy či průstřely. Ohybová tuhost UHPC s ocelovými vlákny je cca 200 krát větší než u klasického železobetonu s ocelovými vlákny.

Příkladem jsou panely z UHPC chránící proti výbuchu.



Obr. 38 Výroba a použití panelů z UHPC zajišťující ochranu při výbuchu, Austrálie (zdroj [76])

USA**Zakrytí střechy sila na slínek, Joppa Illinois**

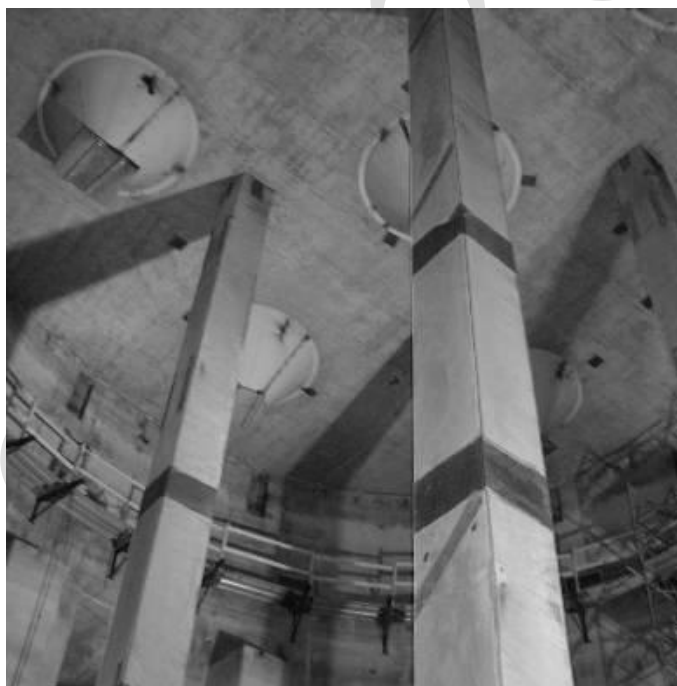
24 klínovitých prefabrikovaných panelů bylo použito na zakrytí střechy sila průměru 17,7m. Tloušťka panelů je 13mm. Toto řešení ušetřilo čas, práci a počet pracovníků na stavbě střechy sila než použití sruženého kovového zastřešení sila.



Obr. 39 UHPC panely zakrývající vrchol sila ve městě Joppa, USA (zdroj [77])

Sloupy terminálu pro nakládání cementu, Detroit, Michigan

Použitím 4 sloupů menších rozměrů (76x76 cm) na výšku 17 m z UHPC v terminálu pro nakládání cementu v Detroitu bylo možné využít větší volný prostor pro tři místa pro nakládání cementu ze sila. Tyto sloupy jsou vyztuženy pouze 4 ks 13 mm předpjatými lany. Rozměry UHPC sloupů jsou cca ¼ sloupů navržených ze standardního železobetonu.



Obr. 40 Sloupy z UHPC výšky 16,5 m v terminálu pro nakládání cementu, Detroit, Michigan, USA (zdroj [77])

5.4 REKONSTRUKCE

Dalším místem pro využití UHPC je možnost rekonstrukcí stávajících konstrukcí.

Francie

Pro rekonstrukci pilířů mostu de Valabres byl použit materiál BSI®.



Obr. 41 Rekonstrukce pilířů mostu de Valabres, Francie (zdroj [70])

Pro rekonstrukci fasády domu Grands Moulins de Paris byl použit materiál BSI®.

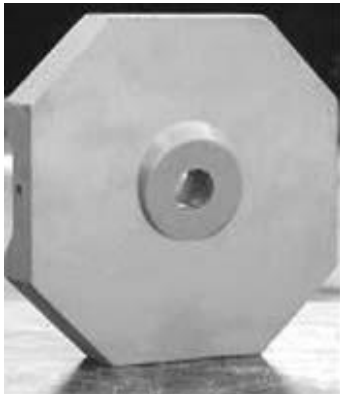


Obr. 42 Rekonstrukce fasády domu GrandsMoulins, Paříž, Francie (zdroj [70])

5.5 KONSTRUKČNÍ PRVKY

Kotevní desky pro zemní kotvy (DUCTAL)

Vzhledem k vyšší trvanlivosti byl UHPC (Ductal) použit pro roznášecí desky pro zemní kotvy na ostrově Réunion. Bylo použito více než 6000 ks.



Obr. 43 Kotevní desky pro zemní kotvy (Theearthretaininganchors), ostrov Réunion, zdroj [71], [71]

Další použití je v Calgary, Alberta, Kanada, kde byl UHPC použit pro kotevní desky zemních kotev držící prefabrikované opěrné stěny před mostní opěrou.



Obr. 44 Kotevní desky pro zemní kotvy (post-tensioned, soilanchorprecastretainingwallssystem), Calgary, Alberta, Kanada, zdroj [72]

5.6 FASÁDY

Na fasádách pozemních staveb se použil UHPC jako sluneční clony.



Obr. 45 Sluneční clony (Sun shades), La Doua University Lyon, zdroj [71]



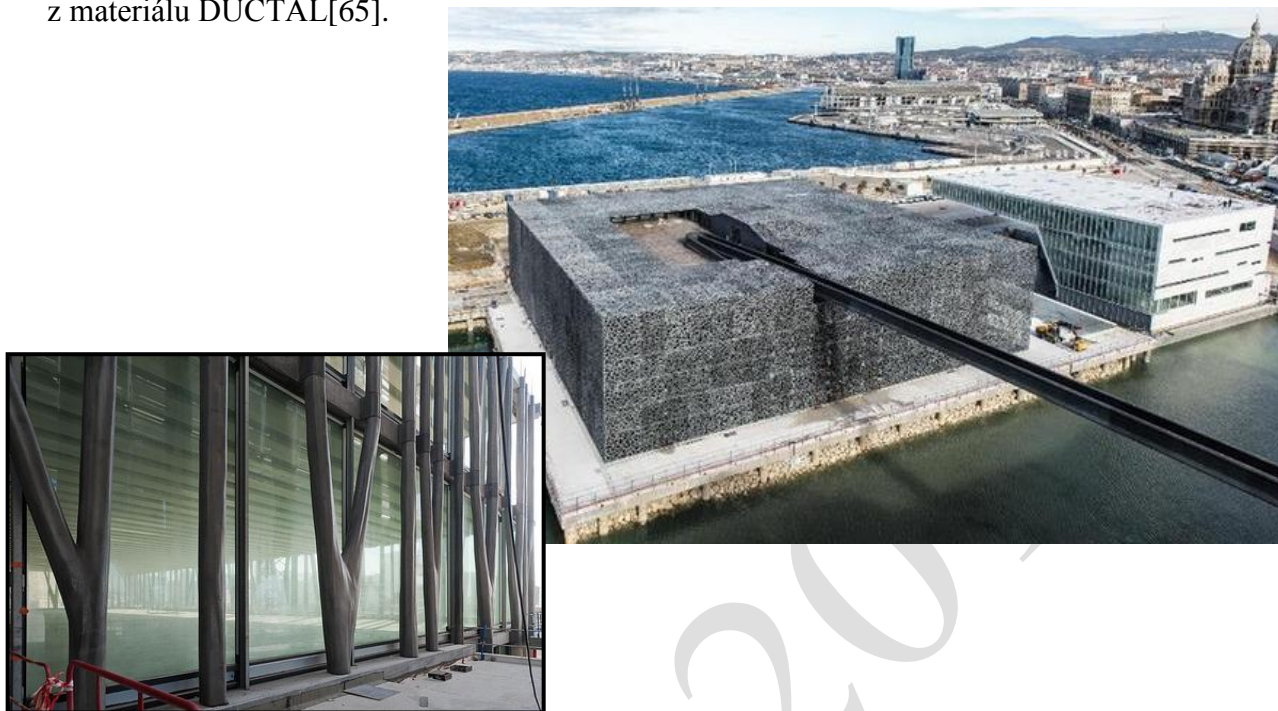
Obr. 46 Fasáda RATP Administration Centre in Thiais. [76]



Obr. 47 Sluneční clony na fasádě plaveckého bazénu Clichy Swimming Pool Complex [76]

The Museum of European and Mediterranean Civilizations MuCEM, Marseille, France

Jedno z největších komplexních využití UHPC na konstrukce zahrnující velkoplošné fasádní prvky, sloupy obvodového pláště a unikátní lávkopro pěší v délce 115 m bez podpory z materiálu DUCTAL[65].



Obr. 48 Pohled na celý objekt muzea včetně lávky [65]

Další oblastí pro použití UHPC jsou architektonické povrchy konstrukcí. Příkladem je speciální povrch mostních pilířů a opěr.



Obr. 49 Architektonické povrchy z UHPC, mostní pilíře [71]

6. BIBLIOGRAFIE

- [1] fib Model Code for Concrete Structures 2010, ©2013 fib, vyd. Ernst &Sohn
- [2] SETRA/AFGC: *Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes: Interim Recommendations*, 01/2002
- [3] AFGC/SETRA: *Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes, Recommendations* (06/2013). Paris CEDEX.
- [4] JSCE, Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks, Rokugo K., (ed.) Concrete Eng. Series, 82, 2008
- [5] DAfStb-Richtlinie Stahlfaserbeton: Ergänzungen zu DIN 1045, Teile 1 bis 4 (07/2001). 21. Entwurf. DAfStb im DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, April 2005
- [6] DIN 1045-1: *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Bemessung und Konstruktion*, (2001). ISBN 3-410-65800-9.
- [7] DBV Merkblatt STAHLFASERBETON – Oktober 2001
- [8] Schmidt M. et al.: Sachstandsbericht Ultrahochfeste Beton, DAfStb Beton Heft 561, 2008
- [9] Sborník z konference HIPERMAT 3rd International symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Material, Kassel, March 7-9, 2012
- [10] FEHLING, E. - SCHMIDT, M. - WALRAVEN, J. - LEUTBECHER, T. – FRÖHLICH, S.: *Ultra High Performance Concrete UHPC*, Wilhelm Ernst & Sohn, 2014, ISBN 978-3-433-03087-4
- [11] GRAYBEAL, B. A. - BABY, F. - MARCHAND, P. - TOUTLEMONDE, F. *Direct and Flexural Tension Test Method for Determination of the Tensile Stress-Strain Response of UHPFRC*. Kassel 2012. ISBN: 978-3-86219-264-9.
- [12] FERRARA, L. – FAIFER, M. – TOSCANI, S. *A magnetic method for non destructive monitoring of fiber dispersion and orientation in steel fibre reinforced cementitious composites – part 1: method calibration*. Materials and Structures (2012), doi: 10.1617/s11527-011-9793-y.
- [13] LATASTE, J.F. – SIRIEIX, C. – BREYSSE, D. – FRAPPA, M. *Electrical Resistivity Measurement Applied to Cracking Assessment on Reinforced Concrete Structures in Civil Engineering*. NDT & E International (2003) vol 36., Issue 6. ISSN 0963-8695.
- [14] KIM, J. W. – LEE, D. G. *Measurement of Fiber Orientation Angle in FRC by Intensity Method*. Journal of Materials Processing Technology (2008).
- [15] KOLÍSKO, J. - RYDVAL, M. – HUŇKA, P. *UHPC – Assessing the Distribution of the Steel Fibre and Homogeneity of the Matrix*. fib Symposium Tel Aviv, Tel Aviv, Israel. 2013. ISBN 978-965-92039-0-1.
- [16] Kolísko, J. - Tichý, J. - Kalný, M. – Huňka P. – Hájek P. – Trefil, V.: Vývoj ultravysokohodnotného betonu (UHPC) na bázi surovin dostupných v ČR, BETON TKS samostatná příloha Betonové konstrukce 21. století betony s přidáním hodnotou, ročník 20. č. 6 samostatná příloha, s. 51-56, ISSN 1213-3116
- [17] Rydval, M. – Kolísko, J. – Huňka, P. – Tichý, J.: Závislost únosnosti prvků vyrobených z UHPFRC na distribuci vláken. 20. Betonářské dny v Hradci Králové, 27.-28.11.2013, SBN 978-80-87158-34-0/978-80-87158-35-7 (CD)
- [18] Tichý, J.: Technologický postup výroby – Výroba předem předpjatých mostních nosníků z UHPC – podniková norma Skanska a.s., 22. 2. 2013
- [19] Ultra-High Performance Concrete: A State-of-the-Art Report for the Bridge Community, Publication No. FHWA-HRT-13-060, JUNE 2013
- [20] ČSN EN 196-1 (72 2100) *Metody zkoušení cementu – Část 1: Stanovení pevnosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2005.

- [21] ČSN EN 197-1 (72 2101) *Cement – Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití*. Praha: Český normalizační institut, 2012.
- [22] ČSN 72 1220 (72 1220) *Mleté vápence a dolomity*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1983.
- [23] ČSN EN 12620+A1 (72 1502) *Kamenivo do betonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2008.
- [24] ČSN EN 450-1 (72 2064) *Popílek do betonu - Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [25] ČSN EN 450-2 (72 2064) *Popílek do betonu - Část 2: Hodnocení shody*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2005.
- [26] ČSN EN 15167-1 (72 2090) *Mletá granulovaná vysokopecní struska pro použití do betonu, malty a injektážní malty - Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2006.
- [27] ČSN EN 13263-1+A1(72 2095) *Křemičitý úlet do betonu - Část 1: Definice, požadavky a kritéria shody*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [28] ČSN EN 13263-2+A1 (72 2095) *Křemičitý úlet do betonu - Část 2: Hodnocení shody*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [29] ČSN EN 14651+A1 (72 3431) *Zkušební metoda betonu s kovovými vlákny – Měření pevnosti v tahu za ohybu (mez úměrnosti, zbytková pevnost)*. Praha: Český normalizační institut, 2008. EAN: 8590963811147.
- [30] ČSN EN 14889-1 (72 3434) *Vlákna do betonu - Část 1: Ocelová vlákna - Definice, specifikace a shoda*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [31] ČSN EN 12350-1 (73 1301) *Zkoušení čerstvého betonu - Část 1: Odběr vzorků*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [32] ČSN EN 12350-2 (73 1301) *Zkoušení čerstvého betonu - Část 2: Zkouška sednutím*, 2009
- [33] ČSN EN 12350-5 (73 1301) *Zkoušení čerstvého betonu - Část 5: Zkouška rozlitím*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [34] ČSN EN 12350-6 (73 1301) *Zkoušení čerstvého betonu - Část 6: Objemová hmotnost*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [35] ČSN EN 12350-8 (73 1301) *Zkoušení čerstvého betonu - Část 8: Samozhutnitelný beton - Zkouška sednutí-rozlitím*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [36] ČSN EN 12350-9 (73 1301) *Zkoušení čerstvého betonu - Část 9: Samozhutnitelný beton - Zkouška V-nálevkou*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [37] ČSN EN 12350-10 (73 1301) *Zkoušení čerstvého betonu - Část 10: Samozhutnitelný beton - Zkouška segregace při prosévání*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [38] ČSN EN 12350-11 (73 1301) *Zkoušení čerstvého betonu - Část 11: Samozhutnitelný beton - Zkouška L-truhlikem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [39] ČSN EN 1992-1-1 (73 1201) *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 2006.
- [40] ČSN EN 12390-1 (73 1302) *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 1: Tvar, rozměry a jiné požadavky na zkušební tělesa a formy*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.

- [41] ČSN EN 12390 - 2 (73 1302) *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 2: Výroba a ošetřování zkušebních těles pro zkoušky pevnosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [42] ČSN EN 12390-3 (73 1302) *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009. EAN: 8590963843346.
- [43] ČSN EN 12390-5 (73 1302) *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009. EAN: 8590963843353.
- [44] ČSN EN 12390-6 (73 1302) *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010. EAN: 8590963858937.
- [45] ČSN EN 12390-7 (73 1302) *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [46] ČSN EN 12390-8 (73 1302) *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [47] ČSN P CEN /TS 12390-9 (73 1302) *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 9: Odolnost proti zmrazování a rozmrazování – Odlupování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [48] ČSN EN 12504-1 (73 1303) *Zkoušení betonu v konstrukcích – Část 1: Vývrty – Odběr, vyšetření a zkoušení v tlaku*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [49] ČSN EN 14488-3 (73 1304) *Zkoušení stříkaného betonu – Část 3: Ohybová únosnost (při vzniku trhliny, mezní a zbytková) vláknobetonových trámčových zkušebních těles*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2006. EAN: 8590963769554.
- [50] ČSN EN 14488 – 7 (73 1304) *Zkoušení stříkaného betonu – Část 7: Obsah vláken ve vláknobetonu*. Praha: Český normalizační institut, 2006. EAN: 8590963769578
- [51] ČSN 73 1318 (73 1318) *Stanovení pevnosti betonu v tahu*. Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 1986. EAN: 8590963310855.
- [52] ČSN ISO 6784 (73 1319) *Beton – Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1993.
- [53] ČSN 73 1320 (73 1320) *Stanovení objemových změn betonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1988.
- [54] ČSN 73 1322 (73 1322) *Stanovení mrazuvzdornosti betonu*.
- [55] ČSN 73 1326 (73 1326) *Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek*.
- [56] ČSN 73 2030 (73 2030) *Zatěžovací zkoušky stavebních konstrukcí*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1994.
- [57] ČSN EN 206 (73 2403) *Beton – Specifikace, výroba, vlastnosti a shoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [58] ČSN EN 1015-3 (72 2400) *Zkušební metody malt pro zdivo - Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střásacího stolku)*, 2000
- [59] Metodika 1 - Metodika pro návrh UHPC a pro materiálové zkoušky, výstup projektu TAČR TA 010110269, 2014
- [60] Metodika 2– Metodika pro navrhování prvků z UHPC, výstup projektu TAČR TA 010110269, Kloknerův ústav ČVUT v Praze 2014

- [61] Graybeal, B., "Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete," FHWA, U.S. Department of Transportation, Report No. FHWA-HRT-06-103, McLean, VA, 2006.
- [62] Schmidt, M. et al., "Mix Design and Properties of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete for the Construction of a Composite Concrete UHPFRC-Concrete Bridge," *Proceedings of IABSE Symposium Improving Infrastructure Worldwide-Bringing People Closer*, IABSE, Weimar, Germany, Vol. 93, 2007, pp. 466–476. Also *Ultra High Performance Concrete (UHPC)-10 Years of Research and Development at the University of Kassel*, Ed., Schmidt, M. and Fehling, E., Kassel University Press, Kassel, Germany, 2007, pp. 44–54.
- [63] Rossi, P. et al., "Bending and Compressive Behaviors of a New Cement Composite," *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, No. 1, 2005, pp. 27–33.
- [64] ČSN 731332 (731332) *Stanovení tuhnutí betonu*, 1986
- [65] Ductal® technical library, www.ductal-lafarge.com
- [66] Blais, P.Y., Couture, M.: Precast, Prestressed Pedestrian Bridge – World's First Reactive Powder Concrete Structure, *PCI Journal* ISSN 0887-9672, 1999, vol. 44
- [67] Perry, V.H., Zakariassen, D.: First Use of Ultra High Performance Concrete for an Innovative Train Station Canopy, *Concrete Technology Today* / August 2004, <http://www.cement.org>
- [68] INSTITUT FÜR KONSTRUKTIVEN INGENIEURBAU: Ultra High Performance Concrete (UHPC) 10 Years of Research and Development at the University of Kassel, Kassel university press GmbH, 2007, ISBN 3899583477
- [69] Borghoff, M.: The first European composite bridge made with UHPC in Kassel – Production of ultra high strength precast parts, *Fachbericht BFT (Beton + Fertigteil-Technik)*, 09/2006, www.elo-beton.de
- [70] Resplendino J.: Les Bétons Fibrés Ultra Performants BFUP, Perspectives offertes vis-à-vis de la pérennité et la maintenance des ouvrages, *Le Pont, Colloque sur les ouvrages d'Art*, Toulouse 10/2006.
- [71] The Institute of Concrete Technology: Yearbook: 2005-2006, ICE, UK; www.ictech.org
- [72] CTRE – Center for Transportation, Research and Education, Iowa State University: Design and Performance Verification of Ultra-High Performance Concrete Piles for Deep Foundations, Final Report, CTRE ISU, Iowa, USA 11/2008
- [73] CONSTRUCTION – ANNUEL OUVRAGES D'ART 2005, 3iroude Moderne, France 2005
- [74] Thibaux T.: UHPFRC prestressed beams as an alternative to composite steel-concrete decks: The example of Pinel Bridge (France), *Tailor Made Concrete Structures – Walraven & Stoelhorst (eds)*
- [75] SOLUTIONS-BÉTON, Les BFUP: des structures élancées qui laissent place à l'imagination, *Construction Moderne/ANNUEL OUVRAGES D'ART 2004*, France 2004
- [76] Rebstrost M., Wight G.: UHPC Perspective from a Specialist Construction Company, UHPFRC 2009 – FIB & AFGC November 17th & 18th – Marseille, France

- [77] Center for structural durability Michigan TechTransportation Institute – Ultra High Performance Concretefor Michigan Bridges, Material Performance – Phase I Final Report – November 2008 MDOT RC-1525, CSD-2008-11, Michigan, USA
- [78] www.densit.com – UHPC foroil and gasindustry USA
- [79] Wolf T., Sritharan S., Abu-Hawash A., Phares B., Bierwagen D.: Iowa’s ultra-high performance concrete implementation, Bridginggaps in structural materiale and design, Iowa Department of Transportation, Researchnews – Burelu of Research and Technology, 4/20011 Iowa, USA
- [80] Graybeal B. A., Lwin M. M.: Deploymentof Ultra -High-Performance Concrete Technology, FHWA, ASPIRE, Summer 2010, USA
- [81] Bierwagen Dean, UHPC Pi-Girder in Buchanan Co. (UHPC "pí"-nosník u Buchanan Co.), Proceedingsofthe 2009 Mid-Continent Transportation Research Symposium, Ames, Iowa, 2009
- [82] HochleistungsbetonfürVerkehrswege (Vysokohodnotný vozovkový beton); beton, 10/2009
- [83] Beton TKS Lávka Čelákovice

Verze 2015

Příklad struktury Technologického předpisu – TePř Příloha 1

Držitel výtisku:
Funkce:
Datum:

Technologický předpis – TePř na:

Výroba

Stavba :

Objekt:

Vydán dne

	Vypracoval	Odsouhlasil	Schválil	Výtisk č.
Funkce:				I.
Jméno:				
Datum:				
Podpis:				

OBSAH

1. ÚVODNÍ USTANOVENÍ
2. KONTROLA VÝROBY
 - 2.1 UHPC na mostní desky
 - 2.2 Tvar a rozměry dílců, přesnost provádění
3. VÝROBA DÍLCŮ – TECHNOLOGICKÉ POSTUPY
 - 3.1. Výroba a doprava betonu
 - 3.2. Výrobní zařízení
 - 3.3. Příprava formy a ukládání UHPC
 - 3.4. Ukládání UHPC
 - 3.5. Ošetřování prvků
4. ODFORMOVÁNÍ A VYVÁŽENÍ NA SKLÁDKU
5. KONTROLA JAKOSTI
 - 5.1. Kontrolní zkoušky čerstvého UHPC
 - 5.2. Zkoušení ztvrdlého UHPC
6. DOKLADOVÁ ČÁST
7. BEZPEČNOST PRÁCE
8. SOUVISEJÍCÍ DOKUMENTACE
 - Externí dokumentace
 - Interní dokumentace