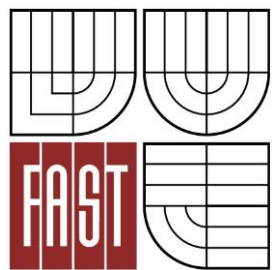




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND
COMPONENTS

SOUČASNÝ VÝVOJ UHPC BETONŮ A OVĚŘENÍ VYBRANÝCH VLASTNOSTÍ

CURRENT DEVELOPMENT OF UHPC CONCRETE AND VERIFICATION OF SELECTED PROPERTIES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MONIKA PANENKOVÁ

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. KLÁRA KŘÍŽOVÁ, Ph.D.



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607R020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Monika Panenková
Název	Současný vývoj UHPC betonů a ověření vybraných vlastností
Vedoucí bakalářské práce	Ing. Klára Křížová, Ph.D.
Datum zadání bakalářské práce	30. 11. 2015
Datum odevzdání bakalářské práce	27. 5. 2016

V Brně dne 30. 11. 2015

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Vedoucí ústavu

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

Odborné tuzemské i zahraniční časopisy, sborníky z odborných konferencí a symposií.

Dále internetové odkazy na dané téma.

Doporučeny jsou zejména: Beton TKS, ductal.com, lafarge.com, sciencedirect.com, apod.

Zásady pro vypracování

S vylepšováním jednotlivých vlastností betonu přichází nové typů betonů nesoucí specifická označení. Jedním z těchto betonů jsou tzv. UHPC betony, u kterých se v současnosti setkáváme i s označením RPC betony. Označení RPC betony, tak více poukazuje na jejich složení namísto na jeho vlastnosti. Jedná se o betony mimořádné kvality s pevností v tlaku okolo 150 MPa.

Bakalářská práce by měla popsat současný stav vývoje výzkumu z oblasti ultra vysocehodnotných betonů.

Cílem práce je rešerše těchto moderních typů betonů se zaměřením na jejich specifické složení a výsledné charakteristické vlastnosti, zejména ztvrdlých betonů.

Práce by měla popsat současný stav vývoje těchto betonů se zjištěním způsobů ověření vlastností čerstvých betonů, výrobu zkušebních těles a zároveň zkoušení fyzikálně mechanických vlastností.

Dále uvést a popsat současné realizované stavby na území ČR i na světovém poli stavebnictví.

Ze získaných poznatků sestavit základní model návrhu složení těchto betonů.

Navrhněte složení tradičního betonu, tří základních složení ultra vysocehodnotných betonů a experimentálně ověřte vybrané vlastnosti (pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu, hloubka průsaku tlakovou vodou, CHRL, obrusnost atd.). Dosažené vlastnosti obou typů betonů porovnejte a vyhodnoťte.

Rozsah: min. 40 stran.

Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

.....

Ing. Klára Křížová, Ph.D.

Vedoucí bakalářské práce

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá současným vývojem a výzkumem v oblasti ultra vysokohodnotných betonů – UHPC. Teoretická část práce se soustředí na složení a vlastnosti UHPC v porovnání s betony běžných pevností. Popisuje zásady navrhování, realizované stavby ve světě i v ČR a další možnosti využití tohoto materiálu. Experimentální část popisuje návrh UHPC, výrobu zkušebních těles a zkoušení některých fyzikálně mechanických vlastností, jako jsou pevnost v tlaku, pevnost v tahu ohybem, hloubka průsaku tlakovou vodou, mrazuvzdornost, odolnost proti působení chemických rozmrazovacích látek a ohrusnost materiálu.

Klíčová slova

Ultra vysokohodnotný beton, Ductal, pevnost v tlaku, návrh složení betonu, trvanlivost

Abstract

This bachelor thesis deals with current developments and research in the field of ultra high performance concrete – UHPC. Theoretical part of this work is focused on the composition and properties of UHPC compared to normal strength concretes. It describes design principles, constructions in the world and also in the Czech Republic and other use of this material. Experimental part describes the design of UHPC, manufacture of test specimens and testing for certain physical and mechanical properties such as compressive strength, tensile strength, bending strength, water impermeability, frost resistance, resistance to chemical de-icing substances and abrasiveness of the material.

Keywords

Ultra high performance concrete, Ductal, compressive strenght, proposition for the composition of concrete, durability

Bibliografická citace VŠKP

Monika Panenková *Současný vývoj UHPC betonů a ověření vybraných vlastností*. Brno, 2016. 68 s., Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Klára Křížová, Ph.D.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 11.5.2016

.....
podpis autora
Monika Panenková

Poděkování:

V první řadě bych ráda poděkovala své vedoucí práce, Ing. Kláře Křížové, PhD., za rady, užitečné připomínky a hlavně za pomoc a čas, který mi byla ochotna věnovat. Dále bych chtěla poděkovat ostatním členům Ústavu technologie staveních hmot a dílců za pomoc při zpracování této práce.

Obsah

1	ÚVOD	9
2	CÍL	9
3	TYPY HPC.....	10
3.1	DUCTAL	11
4	VLASTNOSTI UHPC.....	14
4.1	PEVNOST.....	14
4.2	TRVANLIVOST.....	16
4.3	UHPC Z EKONOMICKÉHO HLEDISKA.....	17
5	SLOŽENÍ UHPC.....	18
6	VÝROBA UHPC	22
7	POUŽITÍ UHPC V KONSTRUKCÍCH	24
7.1	UHPC V ČESKÉ REPUBLICE.....	24
7.1.1	REKONSTRUKCE MOSTU V BENÁTKÁCH NAD JIZEROU.....	24
7.1.2	LÁVKA V ČELÁKOVICÍCH	27
7.1.3	LÁVKA PŘES OPATOVICKÝ KANÁL.....	30
7.2	UHPC VE SVĚTĚ	32
7.3	DALŠÍ POUŽITÍ UHPC.....	37
7.3.1	FASÁDY	38
7.3.2	DESIGN.....	45
8	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST – ZKOUŠENÍ VYBRANÝCH VLASTNOSTÍ UHPC	47
8.1	METODIKA	47
8.2	VÝSLEDKY	58
8.3	DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	60
9	ZÁVĚR.....	62
10	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	63
11	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	68

1 ÚVOD

Veškeré stavební materiály se postupem času rozvíjejí a mění se na nové. Ani u betonu tomu není jinak. S vylepšením jednotlivých vlastností betonu přicházejí nejen nové druhy betonů, ale i jejich označení. Je však nutné zmínit, že tato označení nejsou ve všech literaturách sjednocena.

Beton je již historický materiál. Pomine-li se jeho vývoj v době předválečné, ještě v počátcích předpjatého betonu v 50. a 60. letech 20. století byl beton vyráběn poměrně jednoduchým způsobem. Z kameniva, cementu a vody. Běžná pevnost betonu byla okolo 20 až 25 MPa a pro náročnější konstrukce se dosahovalo hodnot až 60 MPa. Tato relativně vysoká pevnost byla dosahována použitím velmi kvalitního hutného kameniva, nízkého vodního součinitele a dlouhou účinnou vibrací. Čerstvý beton byl pouze zavlhlý a těžko zpracovatelný. S postupujícím časem se do betonu začaly přidávat plastifikační přísady, které výrazně zlepšovaly zpracovatelnost betonu a tím navýšily i jeho pevnosti. Hodnoty pevnosti pak dosahovaly hodnot okolo 80 MPa. K dalšímu navýšení pevností vedlo doplnění struktury o jemné složky se zrní menšími, než jsou zrna cementu a dalším vývojem plastifikačních přísad. V současné době je velmi obtížné přesně definovat horní hranici pevnosti betonu v tlaku [1].

Rozvoj používání vysokopevnostního betonu (*High Strength Concrete* - HSC) je zařazen do poloviny 70. let. Tyto betony byly používány převážně v USA a v první řadě u výškových budov za účelem ztenčení stěn a tím lepšího využití prostoru. Zlomem ve výrobě bylo zjištění, že tyto betony mají nejen vysoké pevnosti, ale i jiné vlastnosti, které jsou oproti jiným zvýhodněny. V některých případech tyto vlastnosti převažovaly a pevnost nebyla tou nejdůležitější. Tyto betony se následně začaly označovat jako vysokohodnotné betony (*High Performance Concrete* - HPC) a HSC se pak staly jejich podskupinou [2][3]. Takové zjištění mělo za následek další rozvoj, a to především ultra vysokohodnotných betonů (*Ultra High Performance Concrete* - UHPC) nebo ultra vysokohodnotných vláken vyztužených betonů (*Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete* - UHPFRC). Označení UHPFRC bylo vytvořeno faktem, že UHPC obsahuje ve svém složení ve většině případech ocelová vlákna, které vylepšují jeho konečné vlastnosti jako vysokohodnotného materiálu. Od roku 1980 byla UHPC věnována taková pozornost, která spustila vývoj RPC betonů (*Reactive Powder Concrete*). Jde o beton, který má ve svém složení eliminováno hrubé kamenivo aktivními práškovými materiály, jakými jsou cement, vysokopecní struska nebo křemičitý úlet, které tvoří hlavní složky kompozitu. Vzhledem k velmi hutné a homogenní mikrostruktuře jsou tyto betony schopny vykazovat pevnosti až o hodnotách 200 MPa a vyšších [4][5].

2 CÍL

Cílem této bakalářské práce je popsat současný stav vývoje a výzkumu z oblasti ultra vysokohodnotných betonů se zaměřením na jejich specifické složení a výsledné charakteristické vlastnosti. Ze získaných poznatků by měl být tedy sestaven základní model návrhu složení těchto betonů a ověření vlastností čerstvých, ale zejména ztvrdlých betonů, jako je například pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu, mrazuvzdornost, hloubka průsaku tlakovou vodou a jiné.

3 TYPY HPC

V následujících řádcích jsou definovány vybrané typy vysokohodnotných betonů s doplněním jejich základních vlastností.

Vysokopevnostní betony (HSC - High Strength Concrete)

Jedná se o obyčejný nebo těžký beton pevnostních tříd C 55/67 až C 105/115 dle ČSN EN 206 [6], jehož výraznou vlastností je pevnost. Vysoká pevnost je v tomto případě spjata s dalšími vylepšenými vlastnostmi, jako například vyšší odolností proti působení chemických rozmrazovacích látek, vyšší vodotěsností a nižší obrus. Z těchto důvodů je často v literatuře také nazýván jako vysokohodnotný beton. Prvním použitím vysokopevnostního betonu na stavbu mostu o rozpětí 170 m v Evropě byl most Second Stichtse Bridge [3].

Vzhledem ke složení betonu lze předpokládat dvojnásobnou cenu oproti betonu normálních pevností. Při celkovém zhodnocení se však ukázalo, že díky vyšším pevnostem byl snížen objem použitého betonu asi o 30 %. To dále přineslo asi 25% úsporu v množství výztuže. Celková spotřeba cementu byla i přes vyšší dávkování srovnatelná s betony normálních pevností právě díky nižšímu objemu betonu. Navíc byla dosažena úspora 30 % kameniva. Díky rychlejšímu nárůstu pevností byla kratší celková doba výstavby při vyšší kvalitě provedení, zvláště z pohledu trvanlivosti a odolnosti. V konečném výsledku se použití vysokohodnotného betonu ukázalo jako výhodné z kvalitativního, ekonomického i ekologického hlediska [3][7].

Vysokohodnotné betony (HPC – High Performace Concrete)

HPC betony vynikají mimořádnou kvalitou určitých vlastností v porovnání s obyčejným betonem. Například je to vyšší pevnost, trvanlivost, odolnost vůči pronikání tlakové vody, pohledové vlastnosti a další [3][8]. Více známé jsou betony právě se zvýšenou pevností. Tyto betony jsou nazývány vysokopevnostní betony a jsou podskupinou HPC.

Pro betony typu HPC se uvádí hodnota vodního součinitele v rozmezí 0,35 až 0,40. Dále se dělí podle toho, zda obsahují nebo neobsahují latentně-hydraulické příměsi. Kvalita a velikost maximálního zrna kameniva nejsou omezeny. Požadovaná pevnost betonu v tlaku by měla být po 4 hodinách minimálně 17,5 MPa, po 1 dni 35 MPa a po 28 dnech minimálně 70 MPa. Dostačující je splnění alespoň jedné hodnoty. Druhou podmínkou je trvanlivost betonu daná součinitelem trvanlivosti po 300 rozmrazovacích cyklech s hodnotou větší než 0,8. Třetí a zároveň nejdůležitější podmínka je velikost vodního součinitele (hmotnost vody / hmotnost všech složek, které mohou plnit funkci pojiva) pod 0,35. Všechny tři podmínky jsou navzájem propojeny společným cílem, a tím je návrh betonu s vysokou pevností i trvanlivostí [3][9].

Velmi vysokohodnotné betony (VHPC- Very High Performance Concrete, popř. VHSC)

VHPC je beton mimořádné kvality pevnostních tříd C 105/115 až C 135/150. Vodní součinitel je v rozmezí 0,25 až 0,35. Dále je nutné použití ztekucující přísady a latentně-hydraulických příměsí. Často se používají zpomalující přísady a kamenivo s vysokou pevností. Velikost maximálního zrna kameniva se doporučuje 10 až 12 mm [3][9].

Ultra vysokohodnotné betony (UHPC – Ultra High Performance Concrete, popř. UHSC)

Jedná se o beton mimořádné kvality pevnostních tříd vyšších než C 135/150. UHPC jsou tedy betony s pevností v tlaku nad 150 MPa a s pevností v tahu ohybem od hodnoty 15 MPa. Často se dokonce uvádí pevnost v tlaku vyšší než 200 MPa [4][10][11]. Hodnota vodního součinitele se pohybuje v rozmezí 0,15 až 0,30. Zpracovatelnost při minimálním obsahu vody se zlepšuje vhodnými superplastifikačními přísadami. Výrazně hustá struktura bez pórů zvyšuje nejen pevnost, ale také odolnost vůči korozi a agresivnímu prostředí. Trvanlivost a životnost jsou vyšší i bez vysoké potřeby ochranných opatření nebo oprav. Vysoká pevnost v tlaku umožňuje značné předpětí. Ztrátu duktility a tendenci k porušení lze eliminovat příměsí nejčastěji ocelových vláken a tím výrazně zlepšit chování UHPC i v konstrukcích namáhaných tahem [3][5][7][9][12][13][14][15].

Jiné označení pro UHPC betony je *reaktivní práškový beton (RPC - Reactive Powder Concrete)*, které více ukazuje na jeho složení, než na jeho vlastnosti. RPC vznikl při postupném vývoji betonů s velmi vysokými pevnostmi, kdy se nejprve předpokládalo, že beton bude mít velmi homogenní strukturu s malými zrny kameniva. Výzkum RPC se stal základním zdrojem pro vývoj dnes průmyslově vyráběného betonu Ductal. Dalším takovým produktem je DASH 47 americké společnosti CEMCOM nebo výrobek DENSIT, což je nová generace vlákný vyztuženého cementového kompozitu vyvinutá laboratoří z Francie [1][17][18].

Hlavní výhodou UHPC je tedy velmi vysoká pevnost, která umožňuje zmenšit a zeštíhlit průřezy konstrukcí a snížit tak vlastní hmotnost konstrukce, nebo vytvářet různé architektonické stavby a to i v případě, že se jedná o nová konstrukční řešení. To ukazuje na velké využití pro výškové budovy, mosty a jiné, u kterých je využití UHPC výhodné i z ekonomického hlediska. Obrovské využití lze sledovat hlavně při výstavbě lávek pro pěší. Navazující výhodou je snížené množství potřebné konstrukční výztuže. Velkou výhodou je také výrazně delší životnost konstrukce. Uvádí se dokonce až 200 let. Tento beton je též velmi vhodný do prostředí s vysokým namáháním chloridy, mrazem, nebo chemicky agresivními látkami [19][20][21][22][23].

3.1 DUCTAL

Ductal je produkt francouzské společnosti Lafarge. Jedná se o jeden z prvních komerčně využívaných ultra vysokohodnotných betonů. Představuje minerální matici s vyztužujícími kovovými či organickými vlákny, speciálně navrženou pro široké použití v architektonickém směru. Začátek používání Ductalu se datuje přibližně k roku 2000 a vývoj probíhal více než 10 let. V této době je již patentován [18][25].

Jde o revoluční materiál označovaný jako RPC beton a vyznačuje se jedinečnou kombinací pevnosti, duktility, trvanlivosti a estetickou flexibilitou konstrukcí. Materiál je dodáván jako předem smíchaný produkt obsahující typické vstupní suroviny UHPC [26]. Tento RPC zahrnuje cement, písek, mikrosiliku, křemennou moučku, superplastifikační přísadu, vodu a volitelné množství vláken kovových nebo organických. Tento materiál je prozatím rozšířen především hlavně v USA, Francii, Itálii a Japonsku. Byl použit na stavbách, kde je vyžadována dlouhodobá trvanlivost a malé náklady na údržbu. Proto byl aplikován například na fasádách budov, hydrotechnických stavbách a na mostech pro svou vysokou odolnost proti karbonataci betonu,

působení chloridů a kyselého prostředí. Ductal byl dokonce použit i pro návrhy zařizovacích předmětů interiérů. Mezi jeho velké přednosti patří velmi malé smrštění a dotvarování, což je příznivé při navrhování konstrukcí z předpjatého betonu. Použití Ductalu znamená velké snížení hmotnosti konstrukce oproti tradiční výstavbě z obyčejného železobetonu nebo předpjatého betonu. Díky svým výrazně kvalitnějším vlastnostem lze tento materiál využít v občanských i inženýrských stavbách. Obrovskou výhodou má i z estetického hlediska. Jeho široké použití nevyplývá jen z jeho výborných vlastností, ale také z jeho flexibility v použití. Díky jeho nepotřebě vyztužení lze vytvořit všelijaké architektonicky, esteticky složité a tvarově zajímavé stavby. Při rozhodování, zda použít nebo nepoužít Ductal, je třeba dbát na porovnání pořizovacích nákladů, nákladů na údržbu a opravy po dobu životnosti konstrukce [18][25][27].

Ductal je prodáván jako souprava, která obsahuje předem namíchanou směs, která obsahuje cement, křemičitou moučku, příměsi, vlákna a přísady. Směsi musí být uchovány v suchu při teplotě nad 10 °C a měly by být spotřebovány do tří měsíců od doručení [27].

Vlastnosti:

Ductal má jedinečnou kombinaci vlastností, které jsou od vysokohodnotných betonů požadovány. Mají velice vysokou pevnost a zároveň vysokou nepropustnost, odolnost proti korozi a jiné. Pevnost v tlaku se uvádí až 200 MPa [23] anebo až neuvěřitelných 230 MPa [18][25] a pevnost v tahu až 40 MPa. Takových pevností dosahuje díky složení betonové směsi, tzn. vhodnou volbou složek, redukcí vodního součinitele na hodnotu okolo 0,2, použitím speciálních přísad a vláken. Z hlediska výroby je vysoká pevnost materiálu podpořena speciálními postupy výroby, které zahrnují propařování a zahřívání čerstvého betonu. Tyto požadavky vedou výrobu materiálu zejména do výroben a předurčují tak Ductal pro použití v prefabrikovaných částech konstrukcí. Ductal rozšiřuje možnosti ve výstavbě složitých konstrukcí, z hlediska tvaru, textury i povrchu a představuje možnou náhradu za konstrukce, které díky své mohutnosti, složitosti a potřebnosti velkého množství výztuže, mohou jen těžko splňovat podmínky, týkající se vyšší životnosti a trvanlivosti [18][23][25].

Ductal vzhledem ke své trvanlivosti velice dobře odolává působení agresivního prostředí, mořské vody, mrazu a jiných agresivních či klimatických podmínek. V závislosti na kritériích je Ductal stokrát až tisíckrát trvanlivější než tradiční beton. Je tedy schopný zachovat své původní vlastnosti po dlouhou dobu používání i v agresivním a náročném prostředí [18][23].

Ductal byl použit na mnoha mostních konstrukcích po celém světě. Konkrétní příklady staveb jsou popsány v kapitole 7.2 „Využití UHPC ve světě“ (str. 32). Hlavními výhodami proč použít Ductal u mostních konstrukcí jsou [27]:

- trvanlivost: extrémně nízká pórovitost, nízká propustnost chloridových iontů, vysoké odolnosti vůči zmrazování a rozmrazování, tlakům a ohrusu
- tažnost: odolnost vůči trvalému ohybu ve spárách (vzniklému dopravou dopravních prostředků), konstrukční stabilita
- rychlejší výstavba, snižuje rizika provozu během stavby
- lehčí provedení: zdvihací hmotnost je srovnatelná s ocelí, optimalizace manipulačního řešení
- delší rozpětí o menší tloušťce
- rozměrová stabilita

- delší životnost
- estetické řešení konstrukce a optimální výška konstrukce
- redukce údržby (není téměř potřeba)
- ohybová pevnost
- stavební náklady

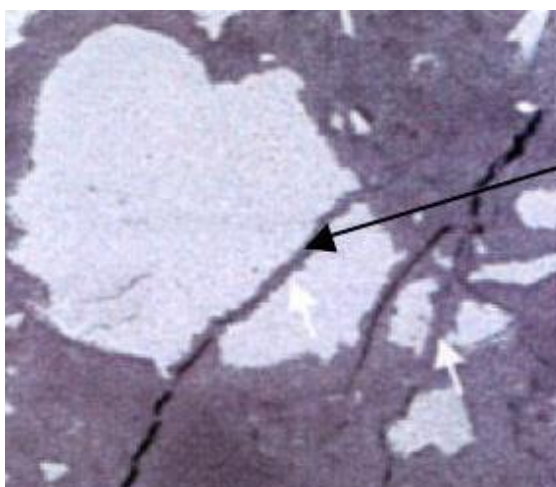
Některé vlastnosti Ductalu lze vidět v tab. 1. Dle hodnot lze pozorovat vliv tepelného ošetřování na materiál, které urychluje proces zrání produktu a poskytuje ještě vyšší pevnost a trvanlivost [28].

Tab. 1: Vybrané vlastnosti materiálu Ductal [28]

Vlastnosti	Ductal s ocelovými vlákny		Ductal s ocelovými a polypropylenovými vlákny		Ductal s organickými vlákny
	s TT	bez TT	s TT	bez TT	bez TT
Objemová hmotnost [kg/m³]	2500		2500		2350
Pevnost v tlaku [MPa]	150 - 200	150 - 180	150 - 180	140 - 160	100 – 140
Mez pružnosti v tahu [MPa]	9 - 10	7 - 9	8 - 9	6 - 8	5 - 7
Pevnost v ohybu [MPa]	20 - 40	15 – 30	15 - 30	12 - 25	10 - 20
Yangův modul [GPa]	45 - 55		45 - 55		35 - 45
Poissonův koeficient [-]	0,2	0	0,2	0	0,2
Smrštění [mm/m]	0,6 – 0,8	0,6 – 0,8	0,7 – 0,9	0,7 – 0,9	0,7 – 1,0
Dotvarování [mm]	0,2 – 0,4	0,8 – 1,0	0,2 – 0,4	0,8 – 1,0	1,0 – 1,2

Pozn.: TT znamená tepelné ošetřování materiálu

Zajímavou vlastností tohoto materiálu je jeho „samo-hojící“ schopnost. Tuto vlastnost lze vidět na obr. 1 u trhliny, která v betonu vznikla vlivem stárnutí.



Obr. 1: „Samo-hojící“ schopnost materiálu Ductal [27]

Dobré vlastnosti Ductalu jsou dány mimo jiné i jeho mikrostrukturou, která udává jeho tuhost. Optimalizací kameniva, vláken a příměsí je zaručena nízká pórovitost, jelikož veškeré složky dosahují průměru maximálně 1 mm a vodní součinitel je redukován na poměrně nízké hodnoty [27].

Pro výrobu Ductalu jsou použity dva druhy vláken. Jedná se o vlákna s vysokým obsahem uhlíku a to buď kovová nebo polyvinylalkoholová (PVA). Určujícími faktory pro volbu typu vláken je požadovaná pevnost, reologické požadavky, míra vystavení agresivním látkám, požadovaná estetická kritéria a míra vystavení lidskému kontaktu [27].

Výrobky z tohoto materiálu lze vyrábět v mnoha dlouhotrvajících základních či smíšených barvách s přídavkem pigmentů. Základními barvami Ductalu jsou bílá a šedá. V závislosti na množství přidaného pigmentu lze získat světlejší anebo naopak tmavší odstíny. Dávka by však neměla překročit hodnotu 3 % z hmotnosti předem připravené směsi Ductalu [27].

Ductal má široké využití nejen ve stavebních konstrukcích, ale například i ve výrobě dlažby anebo podlahových a stěnových panelů. Dokonce jej použít i na výrobu interiérových doplňků. Tento typ využití Ductal je blíže popsán v kapitole 7.3.2 „Design“ (str. 45)

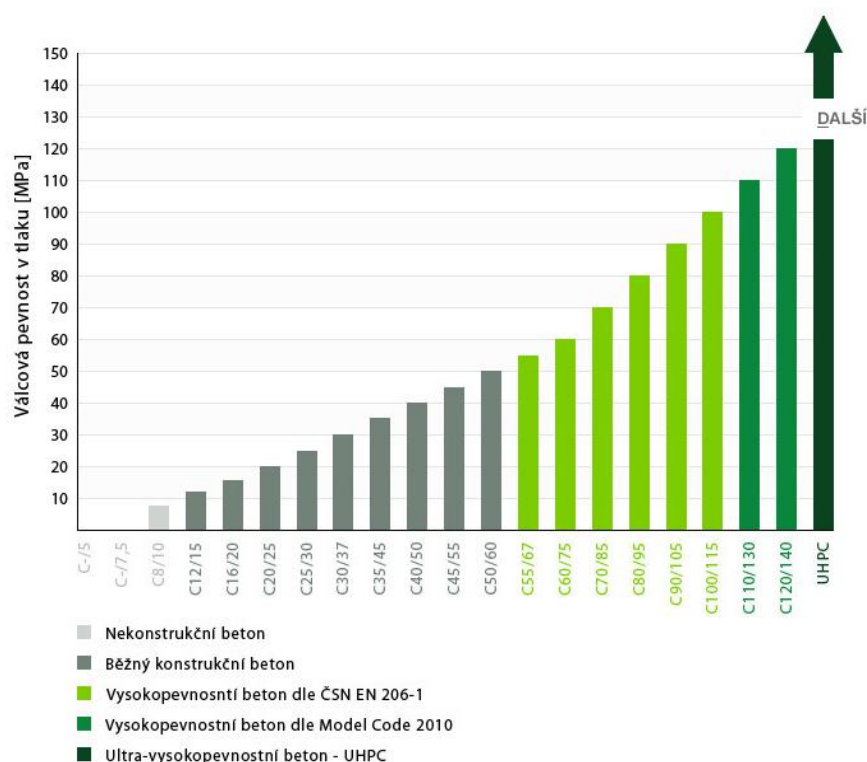
4 VLASTNOSTI UHPC

UHPC je ultra vysokohodnotný materiál, ve většině případů vlákny vyztužený, který má své specifické složení a vlastnosti. Ocelová vlákna jsou do tohoto jemnozrnného kompozitního materiálu přidávána za účelem zpevnění už tak velmi pevné, ale křehké matrice.

4.1 PEVNOST

Pevnost je nejdůležitější mechanická vlastnost betonu a je to schopnost materiálu, odolávat působení vnějších sil. Pokud je pevnost zjištěna experimentálně za účelem stanovení výpočtových hodnot pro projektování, jedná se o pevnost technickou. Hodnota určená na základě teorie bezpečnosti, zajišťující spolehlivost konstrukce bez skutečných nebo teoretických hodnot pevnosti při současném uvažování technické pevnosti, se nazývá pevnost statická [32]. Pevnost nelze považovat za konstantní hodnotu, je závislá na mnoha faktorech.

Hodnoty pevností obyčejných a vysokopevnostních betonů lze porovnat na obr. 2.



Obr. 2: Přehled pevnostních tříd betonu [31]

Hlavní princip dosažení vysoké pevnosti spočívá v omezení vzduchových pórů a vyplnění tohoto prostoru pevným materiálem. Další podmínkou je rovnoměrný průběh napětí v materiálu a odstranění napětíových špiček, které tvoří potenciální místa porušení. Protože póry jsou svým objemem menší, než je zrno cementu, je potřeba na vyplnění hodně jemné materiály – mikrosiliky, popř. nanosiliky. Rovnoměrnější průběh napětí se dosáhne například vyloučením, popř. omezením množství hrubého kameniva. Omezení pórů omezuje také množství použité vody a musí být zajištěna dostatečná zpracovatelnost [1].

Obecně se za UHPC betony považují betony dosahující pevnosti nad 150 MPa. Modul pružnosti není přesně dán, ale pohybuje se kolem hodnot 45 až 55 GPa. Z toho vyplývá nutnost výroby UHPC z prvotřídních surovin za použití nejmodernějších chemických přísad. Při výrobě se používá velmi přesné dávkovací a mísící zařízení. Jednotlivé komponenty směsi tak jsou optimálně poskládány do výsledného kompozitního celku [19]. S přísnými podmínkami týkajícími se přesnosti dávkování a požadavků na výrobu je častým problémem nerovnoměrné rozložení drátků ve vyrobeném betonovém segmentu [25].

Zvýšení pevnosti v tlaku UHPC má také vliv na pevnost v tahu za ohybu. Díky vyšší této pevnosti beton lépe odolává vzniku trhlin během zatížení a po odtížení. UHPC betony mají hodnotu tahové pevnosti přibližně 6 až 11 MPa [31], většina zdrojů však uvádí tahovou pevnost UHPC betonu okolo hodnoty 15 MPa [5][12][13][15][23][30]. S využitím ocelových vláken s výbornými vlastnostmi lze dosáhnout pevností dokonce 35 až 50 MPa [22][31].

Přesná specifikace vlastností UHPC není dána, ale jsou uvedeny v různých směrnících a dokumentech. Prozatím neexistuje žádná platná legislativa pro výrobu, vlastnosti a testování UHPC.

Například francouzská doporučení uvádí tyto parametry [5]:

- charakteristická pevnost v tlaku 150 až 250 MPa
- vysoká reziduální pevnost v tahu dosažená vysokou dávkou drátků (více než 2 % obj.)
- návrh směsi a obsah pojiva, který zajistí vysokou hutnost materiálu a naopak eliminuje jeho porozitu, znamenající vysokou odolnost drátků uvnitř UHPFRC
- „samohojící“ vlastnosti (zarůstání trhlin), které zajišťují dlouhodobé udržení pevnosti materiálu v tahu (avšak v případě, že je dodržen určitý limit šíře trhlin)
- Pevnost matrice v prostém tahu vyšší než 7 MPa

Dále lze čerpat z amerických doporučení od Federal Highway Administration, která uvádí tyto parametry [5]:

- jemnozrnný kompozitní materiál s cementovým pojivem
- vodní součinitel nižší než 0,25
- vysoká dávka rozptýlené výztuže
- pevnost v tlaku vyšší než 150 MPa
- výrazně zvýšená trvanlivost ve srovnání s jinými (běžnými nebo vysokohodnotnými) betony

Německá doporučení kladou více důraz na trvanlivost a odolnost betonu. Tím připouští i nižší pevnosti materiálu a vychází z názoru, že pevnost UHPC se přizpůsobuje jeho konkrétnímu účelu využití [5].

4.2 TRVANLIVOST

Zásadním parametrem betonů typu UHPC je jejich dlouhá životnost v extrémních podmínkách. Vysoká odolnost UHPC vychází zejména z vysoké hutnosti materiálu. Při zkouškách průsaku tlakovou vodou je průsak neměřitelný. Právě dlouhá životnost je hlavním důvodem pro rozšíření UHPC např. v mostním stavitelství v USA, kde bylo v roce 2013 dokončeno přes 80 mostů s využitím technologie UHPC [31]. Některé tyto vlastnosti u jednotlivých betonů lze porovnat v tab. 2.

Tab. 2: Porovnání výsledků zkoušek betonů z hlediska trvanlivosti [17][27]

Zkouška	Obyčejný beton	HSC	UHSC	RPC Ductal
Mrazuvzdornost po 300 cyklech				
- bez provzdušňovací přísady	10 %	15 %	-	100 %
- s provzdušňovací přísadou	50%	90%	100 %	100 %
Odolnost proti působení vody a CHRL (odpady po 150 cyklech [g/m ²])	>1 000	<900	<100	<60
Obrusnost	4	2,8	-	1,3 – 1,7
Hloubka karbonatace (po 1 měsíci zrychlené karbonatace [mm])	10	2	-	<0,1

Pozn.: jiná literatura [31] uvádí odpady při zkoušce odolnosti proti působení vody a CHRL po 60 cyklech a hodnoty pro jednotlivé betony jsou stejné. Z toho vyplývá, že po dalších 90 cyklech se množství odpadu výrazně nezměnilo.

Alkaysi a spol. ve svém výzkumu testovali různé směsi UHPC na odolnost proti zmrazování a rozmrazování, odolnost vůči působení chloridů a průniku vody do matrice. Jednotlivé receptury se lišily v použitém množství cementu a křemičitého prášku. Zatímco u obyčejných betonů s určitým množstvím pórů, které mohou posloužit jako volný prostor pro rozpínání vody, v případě UHPC se spoléhá na hutnou strukturu, která zabrání průniku vody do struktury. Z toho vyplývá minimální vnitřní porušení materiálu v důsledku průniku vody a působení zmrazovacích a rozmrazovacích cyklů. Nejvyšší odolnost vůči pronikání chloridových iontů vykázal beton neobsahující žádný křemičitý prášek a naopak beton s 25 % křemičité příměsi vykazoval mírně vyšší propustnost chloridů [33].

Výzkum v Portugalsku byl zaměřen na vliv nano-příměsí na trvanlivost betonu. V první řadě nanosilika omezuje korozi ocelových armatur, což je v případě vyztužených konstrukcí pozitivní z hlediska trvanlivosti a životnosti [34].

Abbas a spol. zaměřili svůj výzkum na vliv množství a délky ocelových vláken na trvanlivost a mechanické vlastnosti betonu. Závěrem bylo, že délka vláken nemá na trvanlivost UHPC vliv, avšak pozitivně jej ovlivnilo jejich množství [35].

4.3 UHPC Z EKONOMICKÉHO HLEDISKA

U výroby UHPC je zřejmá vysoká technologická náročnost. Používají se vysoce kvalitní materiály, vysoké množství cementu a drahé přísady. I technologie samotné výroby je velice náročná. A to z hlediska dodržení kvality složek a technologických postupů. Z toho vyplývá, že cena UHPC vysoce převyšuje cenu kvalitního vysokopevnostního betonu. V současné době by bylo těžké cenu nějak konkretizovat a přesně určit. UHPC u nás není ještě běžně využíván a cena surovin a samotného výrobního procesu by se zcela jistě měnila s narůstajícími zkušenostmi. Z dlouhodobého hlediska ale nelze říci, že by výroba takového materiálu byla nevýhodná. Je třeba mít stále na paměti přínosy, které s UHPC přicházejí, a sice snížení hmotnosti konstrukce, její

vysokou odolnost a vysokou životnost. Pokud se ale od konstrukce vyžaduje pouze zeštíhlení průřezu a snížení její hmotnosti, jen obtížně lze konkurovat klasickým předpjatým nebo ocelovým konstrukcím [1].

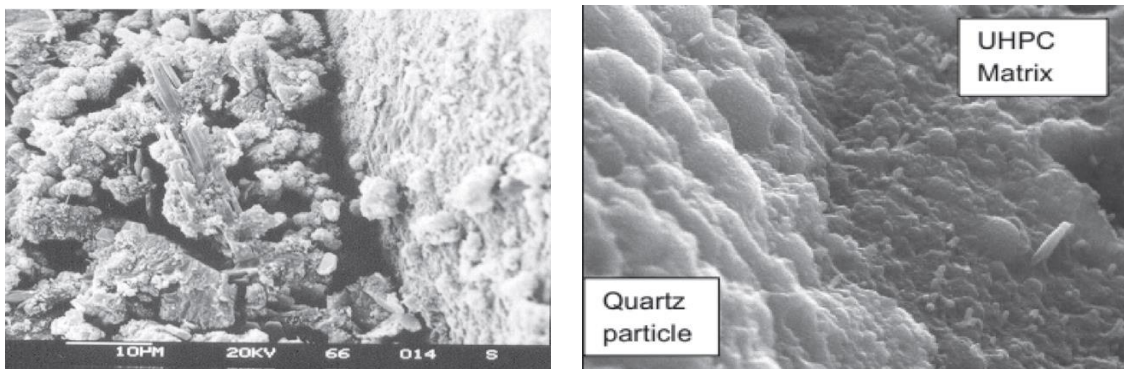
Velkou výhodou jsou i snížené celkové náklady ve spojení s bedněním, prací, údržbou a hlavně rychlostí výstavby [36].

Dle výzkumu [37], který vznikl zadáním úkolu výroby zajímavého prefabrikátu do Dubaje, lze porovnat konkrétní příklady. Bylo vytvořeno několik receptur a jejich materiálové náklady se pohybovaly od hodnoty 5 000 Kč až po hodnoty kolem 20 000 Kč. Tyto částky závisely na množství a druhu cementu, na dávce mikrosiliky a superplastifikační přísady. Dále také platí, že UHPC s vyššími náklady dosahovaly lepších vlastností, avšak ne ve všech případech. Například UHPC s materiálovými náklady 13 374 Kč měl pevnost v tlaku na nosníku 100,8 MPa a UHPC s materiálovými náklady 8 425 Kč měl tutéž pevnost 101,3 MPa. Nelze tedy s jistotou říci, že čím dražší UHPC, tím lepší výsledné vlastnosti. Například UHPC s materiálovými náklady 18 600 Kč dosáhl pevnosti v tlaku 157 MPa na krychlich o hraně 100 mm a UHPC s náklady 10 691 Kč dosáhl hodnoty 151 MPa. Rozdíl pevností tedy není nijak výrazný, avšak cena UHPC je značně nižší [37].

5 SLOŽENÍ UHPC

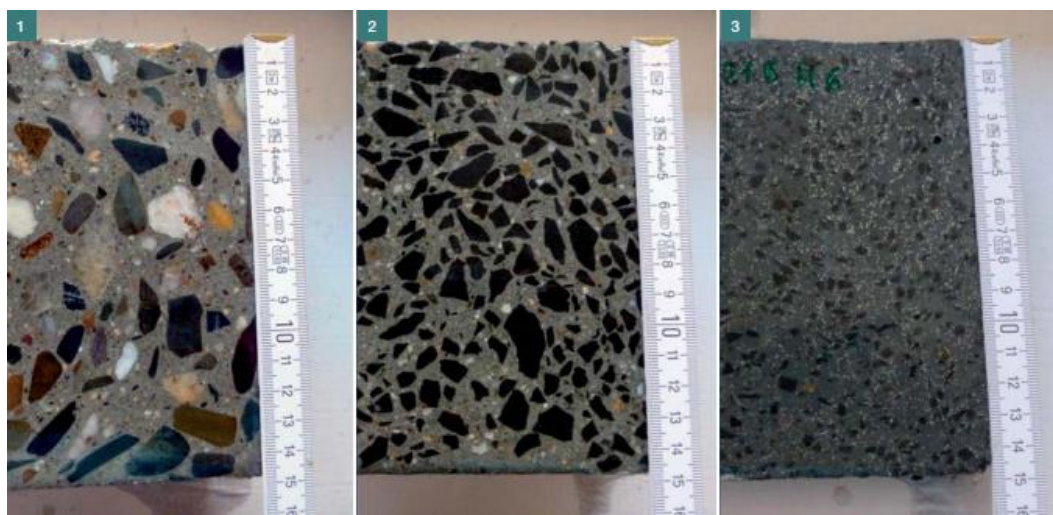
UHPC beton se neliší od obyčejného betonu pouze vlastnostmi, ale také hlavně skladbou směsi, která je od složení obyčejného betonu velice odlišná, i když se to na první pohled nemusí zdát. Obecně lze říci, že UHPC je jemnozrnná směs s vysokou dávkou cementu, mikrosiliky a ocelových vláken, která má vysokou hutnost bez kapilární porozity. Je to tedy kombinace portlandského cementu, jemného písku, křemičitého úletu, vysoce účinné superplastifikační přísady a vody. Stanovení vhodné struktury patří mezi nejnáročnější součásti návrhu složení UHPC. Podle použití v konstrukci je třeba stanovit, které vlastnosti jsou nejdůležitější a podle toho také směs navrhnout [5][36].

Mechanické vlastnosti UHPC jsou dány především kvalitou přechodové zóny mezi kamenivem a cementovým tmelem. Tato zóna se také jinak nazývá tranzitní (*Interfacial Transition Zone - ITZ*). Jde o slabou zónu v mikrostruktuře betonu, která se nachází na rozhraní kameniva a cementového tmele. Tranzitní zóna se může snadno stát nejslabším článkem betonů. UHPC se vyznačují vyšším objemem C-S-H gelů než u běžných betonů. Je to způsobeno pucolánovou reakcí mezi hydroxidem vápenatým Ca(OH)_2 a příměsí. Výsledkem je tedy vysoce homogenní mikrostruktura, díky které dosahuje UHPC výrazně dobrých vlastností. Na obr. 3 a 4 lze vidět rozdíl tranzitní zóny u obyčejných a UHPC betonů. V případě UHPC lze vidět plynulý přechod mezi kamenivem a cementovou pastou, naopak u obyčejného betonu je tranzitní zóna velmi pórovitá [40].



Obr. 3 a 4: Porovnání tranzitní zóny (ITZ) u obyčejných betonů a UHPC

Zvýšení podílu jemných složek, které jsou pro tento typ betonu nezbytné, vede také k výraznému navýšení množství cementu [1]. Na obr. 5 je vidět porovnání řezů běžného betonu (1), HSC (2) a UHPC (3).



Obr. 5: Porovnání struktury ztvrdlého obyčejného betonu, HSC a UHPC (zleva) [5]

Hutná struktura s minimálním obsahem pórů má také vliv na velmi křehká porušení materiálu a proto by beton mohl být nebezpečný pro použití do konstrukcí. Požadavek na zvýšení houževnatosti tak vede k nutnosti vyztužit strukturu dalším prvkem a tím jsou ocelové drátky. To také vede k názvu UHPFRC, který je někdy používám namísto UHPC [1].

Cement:

Typ a kvalita cementu jsou také rozhodujícím parametrem pro dosažení velmi vysokých pevností. Ve většině receptur je použit čistý portlandský cement druhu CEM I s obsahem slínku více než 95 %, pevnostní třídy 42,5 nebo 52,5. Dle německých zkušeností se doporučuje cement s nízkým C₃A (trikalciumaluminát), aby se omezil vývoj hydratačního tepla, které je vzhledem k vysokému množství cementu významné. Avšak i s cementy vysokopecními druhu CEM III lze dosahovat vysokých pevností, ale jejich nárůst je pomalejší. V současnosti jsou v zahraničí vyráběny speciální vysoce účinné cementy, obsahující též mimořádně jemné (10 – 100 µm) syntetické oxidy křemíku, které reagují s hydroxidem vápenatým rychleji, než běžný křemičitý úlet. V obvyklých směsích se obsah cementu pohybuje v rozmezí 550 až 1000 kg/m³, ale obecně

je obsah cementu závislý na obsahu ostatních jemných příměsí a na maximálním zrně kameniva [1][37].

Příměsi:

Především se používá mikrosilika (křemičitý úlet), která má hned několik funkcí. Dále má také významný vliv na odolnost a trvanlivost betonu. Dávkování bývá obvykle okolo 10 % hmotnosti cementu, ale do UHPC se hodí použití této příměsí více. Uvádí se obecně 10 až 30 %. Je to 150 až 250 kg/m³. Bylo zjištěno, že nejvyšší pevnosti UHPC bylo dosaženo při dávkování 580 kg/m³ cementu a 177 kg/m³ mikrosiliky. Což je zhruba 30 % a tedy trojnásobek běžné dávky [3][37][39].

Využívat lze i křemičitý písek o velikosti zrn přibližně 250 µm anebo drcený křemen o velikosti zrn zhruba 10 µm [4][39]. Některé výzkumy [4] dokázaly, že přítomnost křemičité moučky a mikrosiliky velmi příznivě zvýšila hutnost výsledné struktury materiálu. Jiné výzkumy [39] ukázaly, že použití drceného křemene v UHPC vede k lehkému navýšení pevnosti v ohybu (+2,6 %) ale zato k příznivému ovlivnění pevnosti v tlaku (+8,2 %). Vysokoteplotní popílek také přispívá ke zvýšení pevnosti UHPC. Bylo zjištěno, že UHPC s popílkem může dosahovat pevnosti v tlaku až 200 MPa při standardním zrání v místnosti, 234 MPa po propařování a až 250 MPa po vytvrzení v autoklávu. V kombinaci s vysokopecní struskou může zvýšit pevnost v ohybu betonu a významně zlepšit houževnatost betonu bez ohledu na způsob zrání [40].

Jelikož většina příměsí, které se začaly používat zároveň s vývojem betonu jako stavebního materiálu, jsou odpadním materiálem jiné průmyslové výroby, začaly se jednotlivé materiály postupně upravovat či vyrábět přímo s účelem použití do betonu. Takovým způsobem se před nějakou dobou začal využívat metakaolin, který se jako hydraulická jemnozrnná příměs (nebo také jinak řečeno, pucolánová látka) používá všeobecně při výrobě vysokohodnotných betonů. Vzniká kalcinací přírodního kaolinu, kdy je z něho vypuzena mezimřížková voda. Velikost zrn je 1 až 10 µm. Oproti jiným mikrosilikám má určité výhody, což je například sypná hmotnost, menší prašivost, lépe se skladuje, nemění barvu betonu a má nižší cenu [17][39][41].

Metakaolin je možností spíše až v budoucnu. Zkoušky, které byly provedeny pro srovnání UHPC s křemičitou příměsí a UHPC s metakaolinem, nevykazovaly ve výsledku příliš velké rozdíly. Použití metakaolinu nepatrně zvýšilo pevnost v ohybu (+2,6 %) a naopak snížilo pevnost v tlaku (-6,7 %). Také reaguje lépe na tepelné ošetřování než křemičitá příměs. Avšak do budoucna může být jeho použití slibné. Nejen, že je levnější variantou, ale také jeho bílá barva může být z estetického hlediska výhodou. Dalším krokem ve studiu UHPC s metakaolinem bude zcela určitě zkoumání z hlediska mikrostruktury a trvanlivosti. Použití metakaolinu může snížit i autogenní smršťování [39][40].

Kamenivo:

Pro UHPC je důležitá i pevnost kameniva, která by měla být nad 200 MPa a jeho soudržnost s pojivovou složkou. Křivka zrnitosti by měla být optimalizována od nejjemnějších složek až po hrubé frakce kameniva. Horní mez nejhrubší frakce kameniva, $D_{\max}$, se uplatňuje zcela jinak, než u běžných betonů. U běžných betonů je třeba k dosažení stejné pevnosti zvětšovat obsah cementu s nepřímou závislostí na $D_{\max}^n$, kde n je zpravidla mírně menší než 0,2. U betonů s nízkým

vodním součinitelem tato závislost neplatí. Maximální zrno kameniva může být 16 mm, avšak běžně se využívá do 8 mm [1][42], v některých případech do 4 mm [25] a v některých nemusí být jednoznačně použito [43]. Samozřejmostí je kamenivo bez nečistot a pokud možno, tak v suchém stavu. Při použití přirozeně vlhkého kameniva se zvyšuje riziko velkého kolísání konzistence betonu a tím i jeho pevností. Vhodnější je tedy kamenivo před použitím vysušit [5][37][43][44].

Voda:

Na vodu nejsou kladeny žádné speciální požadavky oproti záměsové vodě do obyčejných betonů. Voda by měla být pitná, a pokud není pitná, nesmí obsahovat žádné nečistoty, které by mohly nepříznivě ovlivnit beton. Zejména nesmí obsahovat oleje, kyseliny, chloridy nebo jiné sloučeniny [36].

Obsah vody je dalším důležitým parametrem. Vodní součinitel je nejčastěji udáván jako poměr vody a cementu a poměr vody a pojiva (cement + mikrosilika) se pohybuje okolo hodnoty 0,2, nejčastěji 0,22 až 0,28, což není dostatečné množství vody na úplnou hydrataci cementu. Pojivý součinitel se pohybuje nejčastěji v rozmezí 0,18 až 0,22. Cement jako pojivo pak částečně funguje jako plnivo, které pouze napomáhá splnit požadovanou hutnost materiálu, která vede k pevnostním vlastnostem betonu. Kvůli vysokým dávkám superplastifikační přísady se do součinitelů započítává i voda v něm obsažená [1][5][25][42][43][44].

Přísady:

Nejčastější přísadou do UHPC jsou samozřejmě plastifikační nebo superplastifikační přísady a to na bázi polykarboxilátů vzhledem ke své účinnosti. Dávky superplastifikační přísady jsou vysoké a pohybují se kolem hodnot 25 až 30 kg/m³. Tyto hodnoty odpovídají přibližně 5 % hmotnosti cementu. Další přísady jako jsou například provzdušňovací přísady se do UHPC nepoužívají [1][36].

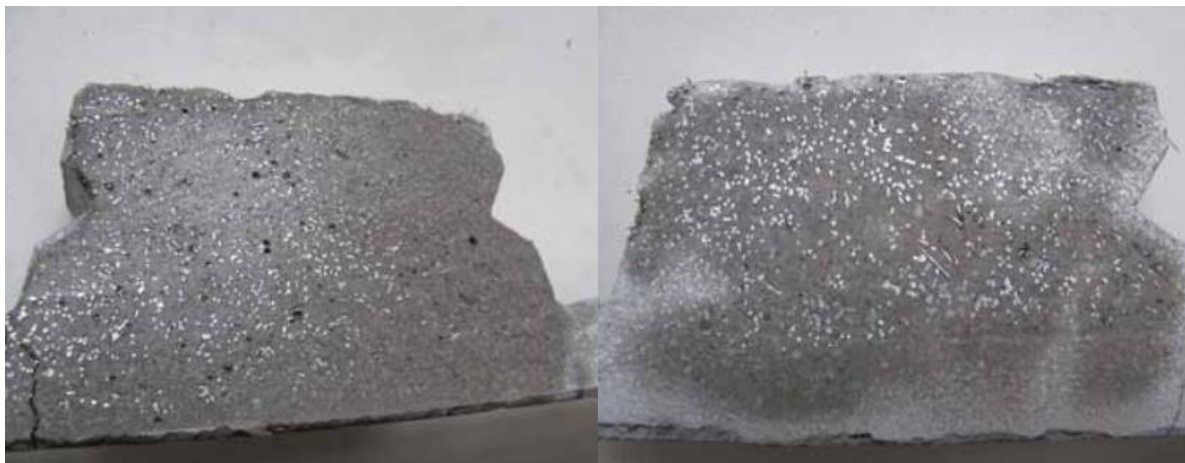
Ocelová vlákna (drátky):

Drátky mají mnohem menší průměr než drátky, které se běžně do betonu používají. Obvykle se pohybují okolo hodnot 0,2 až 0,3 mm z hlediska průměru a s délkou přibližně 12 mm. Jejich množství se objemově pohybuje v rozmezí 1 až 2 %, dle francouzských doporučení více jak 2 % (až 2,5 %). Jako minimální obsah můžeme uvažovat hodnotu 75 kg/m³, ale vyskytují se i hodnoty kolem 200 kg/m³. Mají vysokou pevnost, což znamená v hodnotách 1000 až 3000 MPa, aby nedocházelo k jejich přetržení, ale spíše k porušení soudržnosti s betonem. Dávkování těchto vláken ve vhodném poměru také napomáhá zlepšit jiné mechanické parametry jako je pevnost v tahu. I proto je tento materiál vhodný pro použití pro prvky nevyztužené běžnou výztuží [1][5][22][37][42][43][44].

Jedním faktorem, který ovlivňuje výsledné vlastnosti UHPC je homogenita distribuce vláken po průřezu. Tento faktor není ovlivněn stářím matrice a lze jej kontrolovat u čerstvého betonu i u betonu ve ztvrdlém stavu pomocí destruktivních i nedestruktivních zkoušek [25].

Množství, orientaci a distribuci vláken v průřezu lze stanovit pomocí destruktivních i nedestruktivních metod. Množství vláken v průřezu lze kontrolovat pomocí jádrových vývrtů, které jsou následně rozdrceny lisem a vlákna jsou vybírána magnetem. Jedná se o destruktivní

metodu. Další takovou metodou jsou optické metody na lomových plochách a mikroskopické metody na řezných plochách. Nedestruktivní metodou lze označit například metodu elektromagnetické indukce, měření elektrického odporu, radiografie a další. Na obr. 6 lze vidět rovnoměrné rozmístění vláken a na obr. 7 je naopak vidět, že během výroby došlo k segregaci vláken ke dnu formy [25].



Obr. 6 a 7: Rovnoměrné a nerovnoměrné rozmístění ocelových vláken v UHPC (zleva) [25]

Pigmenty:

Práškové nebo kapalně pigmenty mohou být do UHPC použity. Při použití pevných pigmentů se vlastnosti čerstvého betonu mohou měnit při dávce na 1 %. Je proto nutné je dávkovat do 1 % z celkové hmotnosti všech suchých složek. Při použití tekutého pigmentu je třeba zohlednit vodu, která je do směsi tím pádem přidávána. Dávka tekutého pigmentu by neměla překročit 3 % z celkové hmotnosti všech suchých složek. Pokud je tato dávka překročena, může to mít negativní vliv na výsledný UHPC beton. Veškeré použití pigmentů do UHPC musí být předem prozkoušeno [36].

6 VÝROBA UHPC

Pro míchání UHPC je potřeba míchací zařízení s vysokou a nastavitelnou intenzitou míchání, případně zařízení, umožňující aktivační způsob míchání. Pro míchání v reálných podmínkách je potřeba intenzivní míchačka s přesným dávkováním a s možností dávkování velkého množství drátků. Nevýhodou při míchání UHPC je velmi dlouhý potřebný míchací čas a malé objemy jednotlivých záměsí. Důležité je také dodržení ověřeného sledu dávkování jednotlivých složek [1][37].

Míchání také může být redukováno rozdělením na dvě etapy míchání. První etapou je míchání při vysokých otáčkách po dobu 40 sekund a to je následováno druhou etapou, kdy míchání probíhá za nízkých otáček a to 70 sekund. Celkový čas pro míchání je potom kolem 2 minut [43].

Doba míchání je delší než u běžných betonů. Interval doby míchání pro UHPC je 7 až 18 minut. To zabraňuje plynulému průběhu výroby a redukcím kapacity betonáren. Doba míchání může být redukována optimalizací velikosti zrn ve směsi, nahrazení hrubšího kameniva cementem, křemičitým pískem nebo úletem nebo přizpůsobení typu superplastifikační přísady či cementu [25][43].

Postup výroby má velký vliv na orientaci drátků v UHPC. Orientace drátků nemá vliv na vznik trhlin v důsledku namáhání, ale naopak má vliv na konečnou pevnost v tahu za ohybu materiálu. Nejvyšších pevností bývá dosaženo, když je beton ukládán ve směru měření tahové síly. Vlákná v nosníku betonovaném vertikálně jsou narovnána do vrstev ve směru ukládání. Jako důsledek tahových a ohybových sil je jen 24 až 35 % odpovídající hodnoty horizontálně betonovaných nosníků. V desce o tloušťce 1 m byla však vlákna uspořádána náhodně. Orientace vláken nemá zásadní vliv na tlakové pevnosti ani na modul pružnosti betonu [43].

Konzistence (zpracovatelnost):

Konzistence UHPC se může pohybovat od téměř zavlhlých směsí až po samozhutnitelné. Samozhutnitelná konzistence směsi by měla být v rozmezí rozlití Abramsovým kuželem 650 až 750 mm, u tekutého typu UHPC až 700 až 850 mm. Důležitým faktorem, ovlivňujícím stabilitu směsi a nutnost dosáhnout co nejvyšší hutnosti, je intenzivní vibrace zkušebních těles i konstrukce. Způsob ukládky a intenzita vibrace vždy závisí na konkrétním složení směsi a na její viskozitě. V případě, že konstrukci nelze hutnit, musí být konzistence přizpůsobena následujícím podmínkám. Při zkouškách nesmí docházet k segregaci směsi. Jestliže k segregaci dochází, je směs špatně navržena a je třeba ji upravit. Směs musí být dostatečně stabilní pro zvolený způsob ukládky a pro zajištění rovnoměrného rozmístění hrubého kameniva a drátků tak, aby byly zajištěny rovnoměrné mechanické vlastnosti materiálu ve všech místech konstrukce. Kvůli odbedňovacím časům je třeba dbát na to, aby bylo dosaženo vysokých pevností v co nejkratší době při zachování dostatečně dlouhé zpracovatelnosti z hlediska trvání dopravy a ukládání betonu. Tekutá konzistence betonu vyžaduje také zcela jiný přístup z hlediska výroby bednění a forem než u obyčejných betonů [1][18][23][42][44][46]. Konzistenci a odolnost proti blokaci čerstvého UHPC lze vidět na obr. 8.



Obr. 8: Konzistence a odolnost proti blokaci čerstvého UHPC [46]

Ukládání:

Při ukládání betonu do konstrukce je důležitá především rychlost ukládání a prostředí, ve kterém ukládání probíhá. Způsob ukládání je třeba detailně vyzkoušet pro konkrétní konstrukci a konkrétní recepturu UHPC. Je to nezbytné zejména z hlediska kontroly homogenity rozložení a orientace drátků v konstrukci [1].

Ukládání vlákný vyztužených betonů vyžaduje speciální pozornost. UHPC vykazují podobné reologické chování jako obyčejné samozhutnitelné betony. Vyžaduje tedy další formu přípravy,

ale také umožňuje snížení namáhání během betonování. Vnitřní vibrace se pro UHPC obecně nedoporučuje kvůli výztuži. Omezená vnější vibrace může částečně působit jako prostředek, který zbaví beton vzduchových pórů [43]. Způsob ukládání čerstvého UHPC lze vidět na obr. 9.



Obr. 9: Ukládání čerstvého UHPC [42]

Vibrace:

Vibrace směsi je vhodná pro urychlení odvětrávání betonu. Vibrací se nejen zvýší hutnost směsi, ale hlavně se sníží riziko setrvání vzduchových pórů pod suchou vrstvou na povrchu betonu, tzv. „seschlou kůží“, která se tvoří díky malému obsahu vody [1].

7 POUŽITÍ UHPC V KONSTRUKCÍCH

7.1 UHPC V ČESKÉ REPUBLICE

V České Republice bylo realizováno již několik staveb z vysokohodnotného betonu, ale UHPC byl dlouhou dobu pouze laboratorní záležitostí.

7.1.1 REKONSTRUKCE MOSTU V BENÁTKÁCH NAD JIZEROU

První myšlenka o vytvoření UHPC u nás je zařazena do roku 2009, kdy se tímto typem betonu začala zabývat jedna z největších stavebních firem u nás i na Slovensku, firma Skanska a.s. První praktická zkušenost je zařazena do roku 2010, kdy proběhla první provozní zkouška mostních nosníků z tohoto betonu. Zkouška proběhla v již zmiňované firmě v závodu Prefa (provozovna Tovačov) a byl vytvořen zkušební nosník z UHPC, který je vidět na obr. 10 [1][12][15][22][47][48].



Obr. 10: Zkušební nosník z UHPC vyrobený firmou Skanska v závodě Prefa [47]

První využití mostních desek z těchto nosníků proběhlo během rekonstrukce mostu na silnici II. třídy v Benátkách nad Jizerou v roce 2012. Konstrukce nahrazuje původní konstrukci z roku 1977 a její životnost je plánována přibližně na 100 let [12][15][22][47].

Desky z UHPC, které měly představovat ztraceného bednění, byly vyrobeny v roce 2012 ve firmě Skanska a.s., v závodě Prefa. Tvar desky je žebrový a pevnostní třída betonu měla být minimálně C 110/130. Půdorysné rozměry jsou 1 x 1,6 m, tloušťka je 20 mm a celková výška podélného a obvodových žebér včetně desky je 60 mm. Celková výška středového žebra je 40 mm. Desky měly vytvořit ztracené bednění pro betonáž mostovky o rozměru 50 x 13,1 m. Pevnost v tahu za ohybu měla být minimálně 10 MPa a byla zkoušena na trámci 150 x 150 x 700 mm [12][15][22].

Popis technologie výroby:

Čerstvý UHPC byl připraven v betonárně s maximálním objemem míchačky (1,5 m³), s nuceným mícháním, vybavené automatickým ovládáním. Čerstvý UHPC byl dopravován z betonárny do výrobní haly speciálním vozíkem a pak bádii do forem. Ukládání směsi do ocelových forem, které byly důkladně očištěny od nečistot a opatřeny separačním přípravkem, probíhalo plynule bez jakéhokoli ztuhnutí. Beton se pomalu rozléval sám a povrch byl zarovnáván latí. Poté byl postříkán prostředkem proti odpařování vody a hlazen ocelovým hladítkem každých 5 minut do doby, dokud se na povrchu nepřestaly vytvářet vzduchové bubliny [12][15][22].

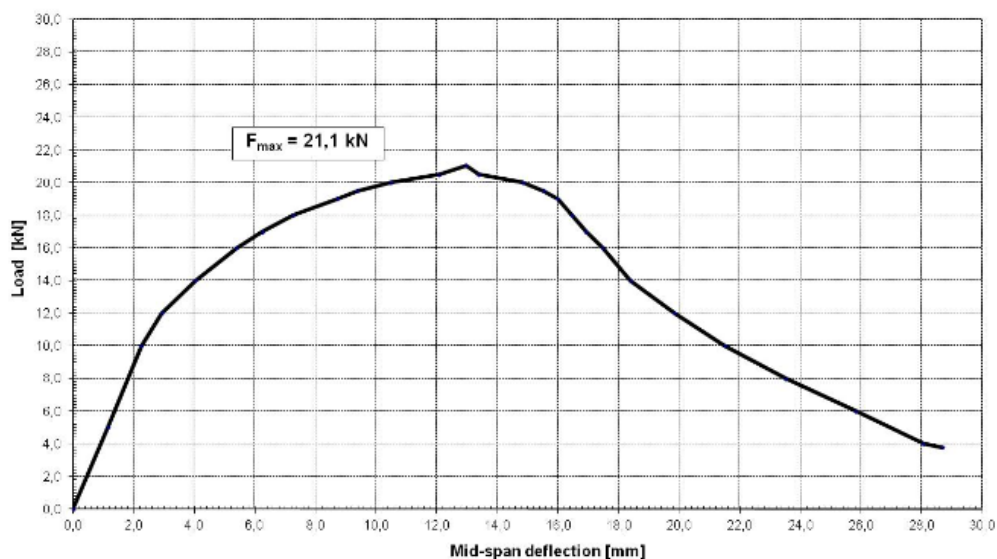
Na základě důkladné analýzy desek byla navržena a přijata opatření pro sériovou produkci desek tak, aby bylo dosaženo požadovaných parametrů [22]:

- Pro výrobu 10 mostních desek byla stanovena záměs 0,75 m³
- Všechny přísady a příměsi včetně drátků byly váženy těsně před vstupem do míchačky
- Byla zavedena přesná a detailní evidence o každé desce, do které byl zaznamenán datum, čas výroby, přesné množství všech složek a podpis zodpovědného pracovníka
- Složky betonu byly uskladněny v suchém prostředí, aby nemohlo dojít k nasátí vzdušné vlhkosti
- Konzistence čerstvého betonu byla přesně stanovena technologickým předpisem
- Každá z desek byla evidována s výrobním číslem a zvážená pomocí závěsné váhy

Zavedená opatření zajistila homogenitu výroby a dosažení vyhovujících parametrů únosnosti desek [22].

Zatěžovací zkoušky mostních desek:

Zkoušky byly prováděny v časovém rozmezí prosince 2011 až duben 2012 a bylo provedeno více jak 20 zkoušek. Během zkoušení byla sledována hlavně závislost deformace desky ve středu rozpětí na zatížení a maximálně dosažené zatížení. Oba parametry pak společně tvořily teoretickou statickou analýzu. Výsledky testů byly s teoretickými předpoklady porovnávány a sloužily pro hodnocení kvality vyrobených desek a případně určovaly upravující zásahy do jejich výroby. Výsledkem každé ze zkoušek byl pracovní diagram. Charakteristický pracovní diagram desky, který byl přijat jako vyhovující, je na obr. 11 [12].



Obr. 11: *Výsledný a vyhovující pracovní diagram získaný jednou ze zkoušek mostních desek na rekonstrukci mostu v Benátkách nad Jizerou [12]*

Pozn.: na obrázku je znázorněn typický výsledek zatěžovací zkoušky desky, závislost průhybu ve středu desky na zatížení.

Desky byly navrženy tak, aby bezpečně přenášely zatížení způsobené pohybem osob a vrstvu čerstvého betonu na horním povrchu desky. Deformace desek byly zkoušeny v závodě Prefa a.s. Skanska ve čtyřbodovém ohybu a to ve třech zatěžovacích krocích. Velikost zkušebního zatížení odpovídala přibližně 130 % provozního zatížení během výstavby mostu [12][15][22].

Zajímavým faktorem pro posouzení použitelnosti desky byl akustický zvuk při vzniku trhliny. Jestliže byl během zkoušky zvuk zaznamenán, znamenalo to podle naměřených průhybů nesplnění požadovaných podmínek. Při stavbě bylo nakonec nevyužito přibližně 15 % celkového množství desek a to dokonce u těchto desek nedošlo zatěžovací zkouškou k porušení. Jediným problémem byly právě deformační limity stanovené projektantem [22].

Souhrn výsledků zkoušek na osmi mostních deskách pro rekonstrukci mostu v Benátkách nad Jizerou lze shrnout takto: Desky byly staré v rozmezí od 14 do 34 dnů. Dosažené zatížení $F_{\max}$ bylo v rozmezí od 21,0 kN do 28,3 kN, průměrně pak 24,3 kN. Průhyb ve středu rozpětí $D_{\max}$ byl v rozmezí 12,6 mm až 18,5 mm, průměrně je to 15,0 mm [22]. Na obr. 12 lze vidět osazené desky na rekonstruovaném mostu.



Obr. 12: *Osazení desek pro urychlení montáže rekonstruovaného mostu [14]*

Závěrem této zkušenosti je, že UHPC lze vytvořit i v podmínkách a s dostupností surovin v ČR. Pevnosti byly mnohem vyšší než pevnosti u nás běžně používaných betonů a bonusem byla výrazně zvýšená duktilita materiálu. Tato aplikace měla i ekologický a provozní efekt. Byl umožněn návrh desek jako samostatných konstrukcí a tudíž nebylo potřeba lešení, které by znemožnilo provoz dálnice. Takto byl provoz pouze omezen. Tím byla výstavba z celkového pohledu zjednodušena. Předpokladem tohoto využití je velká perspektiva a aplikační potenciál UHPC i u nás [1][14][22].

Potvrzením tohoto předpokladu je druhá aplikace UHPC v ČR. Nejedná se však o rekonstrukci stávající stavby, ale o zcela novou stavbu mostu a to o lávku v Čelákovících zhotovenou společností TBG METROSTAV.

7.1.2 LÁVKA V ČELÁKOVICÍCH

Lávka byla prvním významným využitím UHPC v ČR. Byla postavena v roce 2013 (kolaudace proběhla až v roce 2014) [31].

Společnost TBG Metrostav se HSC betonem zabývala již od roku 2005, kdy jejich naměřené průměrné pevnosti v tlaku u betonu třídy C 80/95 dosahovaly hodnoty vyšší než 115 MPa. Podle této společnosti však nelze k UHPC přistupovat jako k vylepšenému HSC betonu, ale jako k úplně novému materiálu. Vývoj byl zahájen ve spolupráci s německou univerzitou v Kasselu, kde měli s UHPC rozsáhlé zkušenosti. Záměrem této spolupráce bylo vyvinout tento UHPC z materiálů dostupných v ČR tak, aby kvalita výsledného materiálu byla srovnatelná s výsledky používání UHPC ve světě. Publikace této zkušenosti se zařazuje do roku 2012.

Protože je UHPC velmi citlivý na přesný postup výroby i přepravy, na výrobu a zkoušení zkušebních těles i na výrobu finální konstrukce, byly v laboratořích detailně zkoumány vlastnosti všech vstupních surovin a vytvořeny první návrhy receptury. Veškeré vlastnosti a postupy bylo nutné nejdříve nastavit, poté ověřit a nakonec udržet. Zároveň byly odzkoušeny alternativní receptury k recepturám vyvinutým v laboratoři. Bylo totiž zjištěno, že u receptur vyvinutých laboratorně došlo výrobou na klasické betonárně ke znatelnému poklesu pevností i k výrazné změně ve zpracovatelnosti směsi. Směsi vyvinuté v laboratoři tak byly pro stavební účely nevhodné. Muselo dojít k zásadnějším úpravám směsi pro snížení viskozity a zvýšení pevnosti.

V rámci těchto zkoušek bylo namícháno téměř 30 různých receptur [42][44]. Míchání směsi UHPC je vidět na obr. 13.



Obr. 13: Míchání UHPC směsi společností TBG Metrostav [44]

Mnohdy se spíše než pevnost, jevílo jako důležitější reologické chování směsi, zejména její viskozita a stabilita. Základem bylo snížit viskozitu směsi při zachování rozlivu a stability směsi a získat zkušenosti s dopravou betonu autodomíchávači. Vzhledem k tomuto typu dopravy bylo nutné dbát na dobu zpracovatelnosti materiálu. Problémem však bylo lepkavé chování materiálu, kdy docházelo ke ztrátám betonu na stěnách autodomíchávačů. Ukládání betonu z autodomíchávače do pokusné konstrukce lze vidět na obr. 14. V rámci zkoušení bylo vytvořeno několik pokusných panelů a prefabrikátů [44].



Obr. 14: Ukládání UHPC z autodomíchávače do pokusné konstrukce [44]

Kvůli samozhutnitelné konzistenci nelze beton ukládat ze spádů, ale zároveň také dosahuje požadovaných vlastností i bez hutnění vibrací. Důležité je beton ihned po uložení ošetřit, aby se na povrchu betonu nevytvořila „seschlá kůže“ na povrchu betonu. Vzhledem k nízkému vodnímu součiniteli začne beton sesychat do několika minut. „Seschlá kůže“ nedosahuje

požadovaných pevností a zároveň brání prostupu vzduchu ven z betonu, což způsobuje nesoudržnost betonu s dalšími částmi konstrukce [1][42][44][49].

Po zkušenosti s výrobou, dopravou a vlastnostmi UHPC byla úspěšně zhotovena lávka, jako první stavba z UHPC u nás.

Výstavba lávky:

Pro stavbu lávky byl použit beton C 110/130 s rozptýlenou výztuží, z něhož byla vytvořena segmentová vozovka lávky s poli zavěšená na dvou pylonech tvaru A o výšce 36 metrů. Pylony jsou vetknuty do základových bloků, uchycených na záhlaví velkopřůměrových pilot. Protiváhu k tahovým reakcím lávky tvoří masivní železobetonové opěry, založené také na pilotách. Mostovka je vynášena závěsy s protikorozií ochrannou galvanizací, vedenými ve dvou rovinách. V horní části jsou závěsy kotveny do výztuh, které spojují obě části pylonu a v dolní části jsou použity rektifikovatelné závěsy, které jsou umístěny na boku mostovky. V podélném směru je lávka vyztužena a předepnuta. V příčném směru jsou vyztužena pouze žebra a jsou použity dva profily průměru 16 mm. Za nejslabší článek konstrukce byla považována deska, která nemá žádnou klasickou výztuž a tloušťku pouze 60 mm. Provedené zkoušky ale prokázaly, že únosnost desky je vyšší, než předpokládal návrh konstrukce [49].

UHPC a požadavky na ukládání a vlastnosti materiálu se liší od jiných betonů a proto bylo nutné nejprve provést mnoho zkoušek. Receptura musela být navržena tak, aby byla samozhutnitelná a co nejméně viskózní, aby nedocházelo k blokování betonu během ukládání. Dále bylo důležité, aby se beton mohl přepravit na místo uložení vzdáleného 26 km od betonárny a to i v letním období. Konzistence se měřila běžným způsobem pomocí Abramsova kužele. Finální struktura UHPC měla zpracovatelnost 3 hodiny a pevnosti v konstrukci dosahovaly 100 MPa po 21 hodinách od uložení. Čerstvý beton byl vyráběn v Praze Troji a díky jejich kvalitnímu vybavení betonárky bylo dosaženo přesného dávkování vody a kvalitních vstupních surovin. Avšak i přes kvalitní vybavení bylo nutné některé složky dávkovat ručně, jako například drátky. Betonáž byla prováděna na dva postupy, a jeden postup činil 3,8 m³ UHPC. Beton sám plnil formu, kontrolními otvory bylo pouze sledováno, zda nedochází k blokaci betonu. Celkově bylo na stavbu dodáno 190 m³ betonu. Jako kontrolní těleso pro pevnost v tlaku byla zvolena krychle o hraně 100 mm. Krychelná pevnost byla zkoušena na každém autodomíchávači a to jak v betonárně, tak i na stavbě. Po skončení betonáže byl segment zakryt a ošetřován. Výsledky kontrolních testů prokázaly, že výsledné vlastnosti odpovídají požadavkům [5][31][46][49]. Hotovou lávku v Čelákovících lze vidět na obr. 15 a 16.



Obr. 15 a 16: Pohledy na hotovou lávku v Čelákovících [5][16] (zleva)

Závěrem TBG METROSTAV je, že je nutné tedy počítat s rozdíly v pevnosti při každém míchání a zkoušení betonu tohoto typu a že se jedná o velice složitý proces. Správný výběr betonu není to jediné, co ovlivňuje konečné pevnosti betonu. Je nutné dbát i na správné nastavení křivky zrnitosti kompletní směsi včetně pojiva. Protože granulometrie všech složek a jejich zkombinování je zásadní pro „dokonalé“ vyplnění prostoru. 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 tomto případě podařilo. Dále potvrzují, že je třeba během betonáže dbát na rozmístění a orientaci vláken, musí být respektován vliv autogenního smršťování a skutečnost, že experimentální ověření vlastností je nutné provádět nejen na vlastním betonu, ale také na konkrétních konstrukčních prvcích. Dalším velkým poznatkem je doporučení použít spíše konzervativní návrhy UHPC. Protože jsou zkušenosti s UHPC stále ještě omezené, je pravděpodobné, že i přes nesplnění některých vlastností, které zahrnuje beton UHPC, nebude konstrukce ohrožena z hlediska použitelnosti [5][46].

7.1.3 LÁVKA PŘES OPATOVICKÝ KANÁL

Jedná se o nejnovější informaci o použití UHPC u nás. V provozovně Štětí, závodu Prefa firmy Skanska a.s. byl na konci roku 2015 vyroben prefabrikovaný předem předpjatý nosník z UHPC, který je určen pro pilotní projekt v rámci modernizace železniční trati Hradec Králové – Pardubice – Chrudim k realizaci lávky pro pěší přes Opatovický kanál v obci Čeperka. Součástí lávky jsou i zábradelní panely, které jsou také vyrobeny z UHPC (ale jiné receptury), která jsou vyztužená výztužnou sítí kvůli zvýšení užitečných vlastností a vyšší bezpečnosti práce při montáži. Souběžně byla v Kloknerově ústavu ČVUT provedena řada doprovodných zkoušek, které budou popsány níže [29].

Původní projekt uvažoval s monolitickou jednotrámovou konstrukcí s konzolami u rozpětí 15,3 m z betonu C 35/45. Konstrukce lávky byla navržena jako dodatečně předepjatá dvěma dvanácti lanovými kabely s průměrem lan 15,7 mm. Pro konstrukci byl uvažován objem betonu 14 m³. Firma Pontex s.r.o. ale navrhla výrazně štíhlejší a efektivnější nosník tvaru dvojitého písmene T a to sice předem předpjatý, ale zhotovený z UHPC betonu pevnostní třídy C 110/130. Objem betonu je přibližně o 2/3 menší, tzn. je přibližně 4 m³. Při návrhu bylo všech příznivých vlastností UHPC plně využito. Tento materiál totiž nakonec umožnil realizovat tenkostěnnou konstrukci předepnutou pouze 14 lany o průměru 15,7 mm. Tloušťka konzol je 50 mm a žeber 80 mm. Z důvodu zachování tuhosti konstrukce je horní deska ve vzdálenosti 1 m zesílena žebry výšky 50 mm mezi trámy s ubývající výškou směrem k okraji konzol. Zábradlí je uchyceno pomocí

zabetonovaných pouzder v okraji desky. Prefabrikovaná lávka je z výrobních důvodů navržena s jednostranným sklonem. Ve výrobě byl totiž prefabrikát vybetonován v pootočené formě s vodorovným povrchem, což usnadnilo jeho výrobu. Prvek je doplněn monolitickým příčnickem se zavěšenými křídly z betonu C 35/45 o celkovém objemu 1 m³. Výsledná konstrukce tak svými parametry výrazně převyšuje parametry původního návrhu. Beton je navíc také mrazuvzdorný a zcela nenasákavý [29].

Výroba nosníku:

Čerstvý UHPC s rozptýlenou ocelovou výztuží byl vyráběn na betonárně provozovny Štětí s maximálním objemem míchačky 1,5 m³ s nuceným mícháním, vybavené automatickým ovládacím systémem. Po předchozím předepnutí předpínacích lan byl čerstvý UHPC dopravován od betonárny do výrobní haly speciálním vozíkem a pak bádii do ocelové formy. Postup dávkování, míchání a celé výroby nosníku byl přesně popsán v technologickém předpisu. Ukládání čerstvého UHPC do důkladně očištěných forem od nečistot a opatřených separačním prostředkem probíhalo plynule bez jakéhokoliv ztuhnutí. Poté byl postříkán prostředkem proti odpařování vody a hlazen ocelovým hladítkem dokud se na povrchu nepřestaly vytvářet vzduchové bubliny [29]. Hotový nosník lze vidět na obr. 17.



Obr. 17: Hotový nosník lávky pro pěší z UHPC na skládce ve Štětí [29]

Výsledky zkoušek:

Souběžně s výrobou nosníku probíhala celá řada zkoušek na různých zkušebních tělesech v Kloknerově ústavu ČVUT Praha [29]. Výsledky jsou určeny vždy z průměru třech těles a jsou patrné z tab. 3, 4 a 5.

Tab. 3: *Technické parametry UHPC na zkušebních tělesech o rozměrech 40 x 40 x 160 mm* [29]

Zkušební těleso	Trámečky 40 x 40 x 160 mm		
	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Pevnost v tlaku [MPa]	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]
Stáří 23 dny	2380	128,5	25,1
Stáří 29 dní	2390	133,5	27,9
Stáří 58 dní	2390	143,0	28,2

Tab. 4: *Technické parametry UHPC na krychlích o hraně 150 a 100 mm ve stáří 29 dní [29]*

Zkušební těleso	Krychle o hraně 150 mm		Krychle o hraně 100 mm	
	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Pevnost v tlaku [MPa]	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Pevnost v tlaku [MPa]
Vzorek č. 1	2433	130,7	2387	123,5
Vzorek č. 2	2417	121,4	2389	128,0
Vzorek č. 3	2411	116,4	2388	124,6

Tab. 5: *Technické parametry UHPC na trámcích o rozměrech 100 x 100 x 400 mm [29]*

Zkušební těleso	Trámce o rozměrech 100 x 100 x 400 mm		
	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Trámcová pevnost [MPa]	Statický modul pružnosti [GPa]
Stáří 30 dní	2380	104,0	43,0
Stáří 58 dní	2400	115,5	43,7

Výroba zábradelních panelů z probarveného UHPC:

Namísto původně navrženého ocelového zábradlí navrhla firma Pontex s.r.o. ocelové sloupky, do kterých budou vsazeny zábradelní panely z UHPC jako výplně. V zadávací projektové dokumentaci byl předepsán barevný odstín betonu, který měl být dodržen nejen u ocelových sloupků, ale i u zábradelních panelů. Do důkladně očištěných forem od nečistot a opatřených separačním prostředkem byla vložena výztužná síť a přesně zakotvena na podélné úhelníky. Čerstvý beton vykazoval charakteristické vlastnosti SCC betonů, tudíž nebylo potřeba použití vibrace ke zhutnění jednotlivých prvků. Povrch byl pouze zarovnan ocelovým hladítkem [29]. Hotový zábradelní panel je zobrazen na obr. 18.



Obr. 18: *Hotový zábradelní panel z probarveného UHPC jakou součást lávky [29]*

7.2 UHPC VE SVĚTĚ

Spoustu světových staveb z UHPC je stavěno z Ductalu. Významnou aplikací tohoto materiálu je most v Saint Pierre la Cour ve Francii. Další stavbou je například lávka Sherbrooke v Kanadě, Sermaises ve Francii nebo Sakata Mirai v Japonsku. Dále lze zmínit „most budoucnosti“ ve Washingtonu nebo most Shepherd v Austrálii. Díky úpravám receptury se Ductal začal využívat i v jiných odvětvích jako například ve vodním stavitelství, kde byla pomocí Ductalu

opravena přehrada Caderousse na řece Rhoně ve Francii. Dalšími mosty jsou například Papatoetoe Footbridge na Novém Zélandu, Pont du Diable Footbridge, Footbridge of Peace v Soulu v Jižní Koree, Yokemuri Yamagata Footbridge a mnoho dalších [27].

V Evropě byl obecně UHPC použit u mostů v Rakousku, Chorvatsku, Francii, Německu, Itálii, Nizozemsku, Slovinsku, a Švýcarsku. První mosty z UHPC v Německu byly postaveny v Niestetalu u Kasselu s délkami polí 7, 9 a 12 m. Nejdelší část mostu byla dodatečně napínaná, dvě kratší části byly předepnuté a zaujímaly tvar písmene π . Další dva mosty průřezu ve tvaru π byly postaveny v blízkosti Friedberg a Weinheim s délkami rozpětí 12 a 18 m. UHPC byl použit i v poměrně malých zemích Evropy. Ve Slovinsku byl UHPC použit jako vrstva o tloušťce 25 až 30 mm na překrytí stávající mostové desky. Při kontrole dva roky po instalaci nebyly prokázány žádné škody, trhliny ani odlupování materiálu. Ve Švýcarsku se jedná o modernizaci a rozšiřování stávajících mostů, vytváření ochranné vrstvy pro opravu silničních svodidel a mostových pilířů nebo mazaniny na lávky [43].

V Americe, konkrétně v New Yorku se u několika mostů používalo UHPC pro vytvoření spojení mezi sousedními prefabrikovanými betonovými prvky. Výhodou aplikace je využití krátkých délek, které mohou být použity pro spojování délek nepředepnutých výztuží v UHPC [43].

Galerie Fondation Louis Vuitton, Paříž:

Jedná se o nejnovější stavbu postavenou z Ductalu, která vyžadovala 6 let práce a jejíž architektem je Frank Gehry. Jelikož galerie představuje loď, tvoří ji 12 tzv. „plachet“, které jsou vytvořeny z 19 072 zakřivených panelů z bílého Ductalu ve vhodné kombinaci se sklem, dřevem a ocelí. Tyto panely jsou pro svou čistě bílou barvu nazývány tzv. „ledovci“. Zakřivené plachty mají sloužit převážně jako střecha a z části jako fasáda. Otvory a mezery, které oddělují neprůhledné ledovce, jsou uzavřeny prosklenými obálkami, které jsou rozloženy po celé budově. Součástí fasády je hydroizolace, tepelná izolace a protipožární zábrana. Vnitřní prostory jsou obklopeny bílou kůží nepravidelných tvarů [27][38]. Galerii lze vidět na obr. 19.



Obr. 19: Nová galerie Fondation Louis Vuitton v Paříži [38]

Ductal byl pro tento projekt vybrán právě pro složitost a zakřivení konstrukce. I přes tvarově náročný projekt je díky Ductalu zajištěna trvanlivost a kvalita povrchu. Panely mají tloušťku pouze 25 mm, čímž je ve velké míře zredukována celková hmotnost skupiny panelů. Výroba a montáž představovali poměrně složitý proces. Z důvodu velmi tenkých spojů panelů (7 až 10 mm), bylo nutné neustále kontrolovat geometrii konstrukce. Panely byly testovány na řadu vnějších účinků,

aby byla zaručena estetická funkce konstrukce [27]. Budova působí na první pohled složitě, ale faktem je, že ve finále se jedná pouze o nahodile skládané panely.

Most v Saint Pierre la Cour:

Most je navržen pro dva jízdní pruhy a chodníky na obou stranách. Most je šikmý a jeho celková šířka je 12,9 m. Na výrobu desky bylo použito 10 prefabrikovaných předepjatých I-nosníků, které jsou uspořádány v osové vzdálenosti 1,4 m a CIP desky i tloušťce 200 mm. Celkové rozpětí mostu je 19 m. Nosníky jsou předem předepnuty lany. Po uložení betonu bylo bednění vyhříváno na teplotu 40 °C, čímž bylo dosaženo pevnosti v tlaku 80 MPa po 18 hodinách. Po odformování byly nosníky zakryty a při konstantní vlhkosti protěplovány při teplotě přibližně 80 °C. Montáž nosníků o hmotnosti 9,5 t byla provedena běžným mobilním jeřábem [25][43].

Další aplikací UHPC je Nadjezd na dálnici A51 ve Francii a jedná se o prefabrikovaný dodatečně předepnutý trámový most o délce 47,4 m. Průřez má konstantní hloubku 1,6 m. Horní tloušťka desky je 140 mm a tloušťka dolní desky 120 mm. Most je dodatečně podélně předepnutý šesti vnějšími předpínacími kabely [43].

Využití UHPC bylo také u stavby mostu Bourg Les Valence ve Francii. Každý most se skládá ze dvou nosníků, které jsou spojeny právě UHPC [25].

Most Gaertnerplatz:

Dalším využitím UHPC byl most Gaertnerplatz pro pěší a cyklisty přes řeku Fulda v německém Kasselu. Jedná se o konstrukci o šesti rozpětích s celkovou délkou 133,2 m a hlavním rozpětím 36 m. Nosný systém je příhradový s proměnnou výškou. Tento příhradový nosník se skládá ze dvou horních UHPC přírub, které mají rozměry 300 x 400 mm o délce 12 až 35 m. Mostovka je také z UHPC, klene se mezi dvěma vrchními přírubami a je široká 5 m. V nejtenčím místě má tloušťku 85 mm a na krajích 120 mm. Nosné betonové prvky jsou slepeny epoxidovanou pryskyřicí. Při výstavbě byly nejprve příruby uchyceny na ocelovou konstrukci rámu a následně byly zkompletované prvky uloženy na pilíře. Potom byly na nosníky přilepeny desky mostovky a nosníky byly dodatečně vnitřně předepnuty [3][43][50]. Most lze vidět na obr. 20.



Obr. 20: *Most Gaertnerplatz pro pěší a cyklisty přes řeku Fulda, Kassel [51]*

Mars Hill Bridge, Wapello County:

Jedná se o první silniční most v severní Americe, vyvinutý firmou Lafarge. Jednoduchý jedno-rozponový most se skládá ze tří 33,5 m dlouhých prefabrikovaných, předepnutých betonových nosníků o výšce 1,14 m a z betonové mostové desky betonované na místě stavby, která je nosníky zabezpečena. Každý nosník je vyztužený dráty o průměru 15 mm, ale neobsahuje žádnou smykovou výztuž. Měkká výztuž je použita pouze pro spřažení s monolitickou deskou. Lan bylo celkem použito 40 [3][24][43].

Most přes zátoku Cat Point Creek v Richmond County:

Jedná se o most na Route 624 přes Cat Point Creek v Richmond County, jehož rozpětí je složeno z 10 polí. Délka polí je 24,8 m. Jmenovitá pevnost v tlaku pro návrh byla 159 MPa. Nosníky neobsahují žádnou smykovou výztuž [43].

Pro výrobu UHPC byla požadována výrobní, která má pro výrobu tohoto materiálu potřebnou kvalifikaci a přítomnost zodpovědné osoby. Namíchány byly 4 záměsy ve dvouhrádelové míchačce přepravovány na stavbu domíchávači ve formě transportbetonu. Výroba požadované dávky betonu a vyprázdnění míchačky trvalo kolem 20 až 25 minut. Směs byla ukládána do jednoho konce nosníku a díky své konzistenci se lila po celém průřezu. Vnější vibrace byla omezena pouze na 2 sekundy [43].

Lávka v Sherbrooke:

V Kanadě byl UHPC poprvé použit v roce 1997 u mostu v Sherbrooke, Quebec pro pěší a cyklisty přes řeku Magog a je to vůbec první aplikace Ductalu na konstrukci. Most byl zkonstruován z 6 prefabrikovaných litých dílců se dvěma polovičními rozpětími sestavených ke vztyčení přes řeku v celkovém rozpětí 60 m s výškou průřezu 3 m. Tyto dílce jsou dodatečně předepnuty systémem vnitřních a vnějších kabelů. Tloušťka horní desky je pouhých 30 mm a je široká 3,3 m. Deska je vyztužena v příčném směru dodatečně předepnutými žebry o tloušťce 70 mm a v podélném směru je také dodatečně předepnuta pásem. Navržený projekt konstrukce se skládá z krovního prostoru s horním UHPC vláknem, který slouží jako pojízdný povrch, ze dvou UHPC spodních vláken a příhradových diagonál, které jsou skloněny ve dvou směrech. Každá diagonála se skládá z nerezových ocelových trubek s vrstvou UHPC a má průměr 150 mm. Obě pásnice z UHPC mají pevnost v tlaku přibližně 200 MPa. Prefabrikovaná dodatečně předpjatá prostorová konstrukce neobsahuje žádnou konvenční ocelovou výztuž [3][12][22][24][26][43]. Most lze vidět na obr. 21.



Obr. 21: Hotová lávka pro pěší a cyklisty v Sherbrook v Kanadě [43]

Dále byl UHPC v Americe použit například na výstavbu most Jakway Park v Buchanan County.

Dálniční most Shepherd's Creek:

Most Shepherd's Creek je samostatný most v Austrálii o rozpětí 15 m s šestnácti stupňovým sklonem. Jedná se o dálniční most z Ductalu. Horní konstrukce se skládá z 16 prefabrikovaných předem předpjatých nosníků tvaru I o výšce 600 mm. Osová vzdálenost nosníků je 1,3 m. Jako ztracené bednění jsou použity desky z UHPC o rozměrech 1,1 x 2,4 m o tloušťce 25 mm. Spřahující železobetonová monolitická deska má tloušťku 170 mm. velkou výhodou je hmotnost nosníků, která je při délce 15,1 m pouze 4,2 t. Ztracené bednění je také lehké a zároveň zaručuje trvanlivý pohled mostu [3][24][43].

Most Sakata-Mirai:

První most Sakata-Mirai v Japonsku je zařazen do roku 2002 a byl vyroben z Ductalu. Tento pěší most se skládá z komorových nosníků, které byly dodatečně předepjaty společně do jednoho průřezu o rozpětí 49,2 m. Most je široký 2,4 m. Velké množství mostů pro pěší v Japonsku se skládá z prefabrikovaných dílčích U nosníků se samostatnou vrchní deskou, která je k těmto nosníkům neodlučitelně připojena. Samotné nosíky jsou spojeny podélně CIP spoji a jsou dodatečně napnuta. Výsledná pevnost betonu byla 238 MPa. Výsledná konstrukce měla mnohem nižší hmotnost, než by měla konstrukce z obyčejného betonu. Díky tomu se podařilo celkové náklady snížit o 8 až 10 % [3][7][43]. Most lze vidět na obr. 22.



Obr. 22: Hotový most Sakata-Mirai v Japonsku [43]

Most Horikoshi Highway C-Ramp byl první japonský silniční most z použitím UHPC. Je to kombinovaný složený most, který se skládá ze čtyř předepjatých UHPC I-nosníků a běžné

betonové CIP desky. Použití UHPC do nosníku redukuje počet nosníků z 11 na 4 a jejich hmotnost je nižší než u nosníků z běžného betonu, což umožňuje použití menšího jeřábu pro ukládání nosníků. Celková hmotnost mostu byla tak zredukována o 30 % [43].

Lávka Toyota Gymnázium je dvou článkový komorový nosník z betonovaný litých dílců a suchého spoje s epoxidy. K překonání účinků autogenního smrštění řídicích dílců před uložením dalších dílců byl použit ocelový plech na konec řídicího dílce [43].

Dráha letiště Haneda, Tokio:

Přistávací dráha D na mezinárodním letišti Haneda v Tokijském zálivu byla ostavena z části na umělém ostrově a z části na mostních konstrukcích nad mořskou hladinou. Samotná přistávací dráha je klasická spřažená ocelobetonová konstrukce, ale obslužné plochy byly navrženy jako spřažené konstrukce z Ductalu. Celkem bylo vyrobeno 6900 desek o rozměrech 7,8 x 3,6 x 0,25 m. Předem předpjaté desky se skládají z žeber, která podpírají desku s minimální tloušťkou 75 mm v obou směrech a neobsahují žádnou betonářskou výztuž. Díky použitému materiálu bylo o 56 % snížena vlastní hmotnost nosné konstrukce oproti běžnému betonu. Největší výhodou však zůstává až trvanlivost materiálu v agresivním přímořském prostředí s minimální údržbou konstrukce [3][43].

Lávka Míru v Soulu:

Lávka Míru (Footbridge of Peace) je lávka v Soulu v Jižní Koreji. Lávka byla navržena v roce 2002 a vyrobena byla z Ductalu. Jedná se o obloukový most s hlavním rozpětím 120 m. Je postaven z šesti prefabrikovaných, dodatečně předepnutých dílců tvaru π o výšce 1,3 m. Vrchní pásnice nosníku je příčně předepnutá žebry o tloušťce 30 mm. Žebra jsou od sebe ve vzdálenosti 1,225 m. Šest prefabrikovaných dílců bylo společně dodatečně napnuto kabely, položených na vrchních i spodních nosnících průřezu. Tento UHPC most má největší rozpětí mostů ve světě [24][26][43]. Most lze vidět na obr. 23.



Obr. 23: Hotová lávka Míru v Soulu [43]

7.3 DALŠÍ POUŽITÍ UHPC

Kompozitní stropní konstrukce na bázi UHPC a dřeva

Tradiční dřevobetonové stropní konstrukce jsou tvořeny dřevěnými trámy, které jsou mechanicky spojeny s betonovou deskou uloženou nad nimi. Nevýhodou takového řešení stropů může být příliš velká hmotnost betonové desky vyžadující větší dimenze dřevěných trámů. Využitím UHPC

vyztužených rozptýlenou ocelovou výztuží lze snížit tloušťku horní betonové desky až na 25 nebo 30 mm. Takto subtilní desku již nelze kotvit tradičními mechanickými spoji [15].

Receptura UHPC pro dřevobetonovou stropní konstrukci byla navržena s důrazem na lokálnost surovin. Složení směsi vycházelo z receptury vyvinuté na pracovišti prof. Schmidta na univerzitě v Kasselu v Německu a bylo upraveno na základě testování různých lokálních vstupních materiálů. Výsledná receptura UHPC pevnostní třídy 160 dosahuje 28 denní pevnosti v tlaku 160 MPa na krychli o hraně 100 mm při normovém uložení ve vodním prostředí a pevnost v tahu za ohybu, zkoušená na trámcích 100 x 100 x 400 mm, je 22 MPa. Modul pružnosti v tlaku je 49 GPa [15].

Prvním krokem ve výzkumu těchto spřažených stropních konstrukcí bylo ověřit možnosti lepeného spoje. V první sadě experimentů byly testovány dva typy betonu (běžný beton třídy C 30/37 a UHPC 160) a tři různá lepidla na bázi epoxidových pryskyřic. Rozdíl mezi běžným betonem a UHPC v kompozitu s lepeným dřevem byl v typu porušení. V případě kompozitu běžného betonu a dřeva docházelo k porušení hlavně v betonu, ale u kompozitu s UHPC docházelo k porušení kompozitu především ve dřevě [15].

Ověření reálné části konstrukce bylo provedeno na velkoformátovém výseku stropní konstrukce, který měl půdorysné rozměry 1,2 x 2,4 m. V rámci experimentálního ověření probíhaly mimo vlastní zkoušky velkoformátového zkušebního tělesa doprovodné materiálové zkoušky betonu a smyková zkouška lepeného spoje [15].

Míra využívání dřevostaveb se pro výstavbu budov postupně zvyšuje. Aplikace spřažených dřevobetonových stropních konstrukcí umožňuje eliminovat určité nevýhody celodřevěných stropů z hlediska jejich menší ohybové a rovinné tuhosti a horších akustických a požárních parametrů. Využití UHPC pro výrobu tenkých desek vede dále ke snížení spotřeby betonu a současně i k úsporám v dopravě materiálu a prvků na stavbu [15].

7.3.1 FASÁDY

Ve světě byl v hodně případech UHPC použit pro fasádní účely jako konstrukční tenkostěnný pohledový materiál. Tyto účely nezůstaly jen ve světě, ale už i u nás bylo takové využití zaznamenáno. Například ve firmě Skaska a.s. byly vyrobeny tenkostěnné fasádní panely z bílého UHPC, které byly zpevněny výztužnou sítí. Jeden prototyp byl dokonce zaslán pro posouzení do švédského Malmö na opláštění kancelářské budovy jako lehký obvodový plášť. Na opláštění kancelářské budovy si tento typ prvků odebrala i firma Statoil Bergen v Norsku. Analýza a volba typu tenkostěnných prvků vycházela z konkrétní poptávky po výrobcích, konkrétně těchto dvou potenciálních odběratelů [30].

Využití UHPC se zdá být naprosto neomezené. Po počátečních investicích do speciálního vybavení jako je bednění, do správného míchání a ukládání betonu lze vyrobit jakýkoli složitý tvar. Jemná matrice betonu a její litá konzistence umožňují vyplnit filigránské detaily na budoucím povrchu betonového prvku [23][30].

7.3.1.1 FASÁDNÍ PRVKY Z UHPC VE SVĚTĚ

Železobeton změnil fasády domů na počátku 20. století, neboť umožnil zvětšit rozměry oken obytných domů. Podobně UHPC fasádní prvky mění vzhled fasád 21. století. Ačkoliv je Ductal relativně nový materiál, v posledních letech se jeho využití posunulo výrazně dopředu a to na nových a unikátních fasádách a jiných obvodových konstrukcích. Aby bylo možné provést realizaci tohoto zajímavého použití, bylo také potřeba vyvinout odpovídající závěsné a spojovací prvky a celé systémy stejně jako povrchové úpravy materiálu. Každý nově navržený fasádní prvek je třeba vyrobit jako prototyp, vyzkoušet a vyhodnotit všechny jeho části a to včetně závěsných a spojovacích prvků. Betonové prvky mohou být velmi tenké, ale zároveň musí být dodrženy mezní hodnoty dosažených průhybů a vibrací, které mohou výsledný vzhled prvku významně ovlivnit [23].

Plošně zaoblené UHPC panely umožňují obložit zaoblená nároží budov panely vcelku beze spár. Celistvost plochy, která není spárami narušena, působí elegantním a efektivnějším dojmem. Není potřeba řešit množství spojů ve spárách ani jejich utěsnění. Sníží se počet zavěšených prvků pro jednotlivé panely, které by se v případě spojení musely zajistit, aby výsledná plocha byla rovná [23].

The Atrium v kanadské Britské Kolumbii

Tyto výhody vedly k použití panelů vyrobených z UHPC při návrhu fasády budovy The Atrium v kanadské Britské Kolumbii. Systém závěsných fasádních panelů musel být co nejtenčí, aby mohl překrýt posunuté rozvody klimatizace. Vysoká pevnost a duktilita použitého materiálu, který byl vyztužený plastickými vlákny, umožnila snížit tloušťku panelů až na 20 mm a tím i vlastní hmotnost konstrukce. Průřezy nosných prvků tak mohly být zredukovány [23][36]. Budovu lze vidět na obr. 24.

Použité bednění pro fasádní prvky na budově nebylo nějak zvlášť složité. S pečlivě načasovanou betonáží a odbedněním se podařilo vyrobit panely s vnější plochou zdobenou jemným žebrováním. Výška jednoho žebra je neuvěřitelných 5 mm a šířka 10 až 15 mm. Podklad pro tento žebrovaný vzor byl ručně kreslený návrh architekta, který byl později přenesen na matrice vkládané do forem [23].

Pro fasádu bylo vyrobeno přibližně 690 panelů ve třech různých formách. Běžná betonářská vyztuže nebyla vůbec použita. Všechny panely jsou vysoké 1,3 m a jejich šířka je proměnná v hodnotách 750 mm až 2,15 m. Nejvíce panelů však bylo vyrobeno o šířce 1,3 m [23].



Obr. 24: *The Atrium v kanadské Britské Kolumbii* [36]

Autobusové centrum RATP v Thiais, Paříž

Autobusové centrum na okraji Paříže je pokryto fasádou z Ductalu se zajímavou texturou v „Lego“ stylu, která plní funkci protismykové úpravy pojižděných povrchů. Dalo by se říci, že stavba, jak kdyby vyrůstala z manipulační a odstavné plochy autobusů a fasádní panely ji pokrývají spojitě od země až po střechu. Panely mají tloušťku pouhých 30 mm. Výrazná pravidelná textura povrchů panelů vytváří v barevných odrazech na skleněných stěnách zajímavá moaré [23][36]. Centrum lze vidět na obr. 25.



Obr. 25: *Autobusové centrum RATP v Thiais v Paříži* [36]

Práci na projektu budovy předcházelo dlouhé období konzultací a diskuzí o fasádě, výrobě prototypů panelů a o jejich zkoušení. Obtížná byla i fáze návrhu a přípravy bednění pro rovinné a zejména zakřivené plochy. Na budově jsou použity panely s plochami konkávního i konvexního tvaru. Přípravné období bylo ukončeno až ve chvíli, kdy bylo zřejmé, že projekt splní veškeré požadavky z hlediska trvanlivosti a finančních nákladů, které byly na konstrukci kladeny. UHPC byl klíčovým prvkem, který tvoří povrch stavby a dává jí specifický výraz. Tekutost materiálu umožnila vytvořit několikrát opakované otisky forem v neobvyklé a dokonalé přesnosti a jemnosti. Tmavošedá fasáda s kruhovými výstupky je zcela stejná na plochách přilehlých k budově, svislých stěnách i na zaoblených horních hranách střešní atiky [23].

Bylo vyrobeno 378 fasádních panelů o celkové ploše 12 000 m³. Bylo třeba vyřešit řadu technických a technologických problémů spojených se zajištěním přesného tvaru nízkých výstupků, které měly tvar komolého kužele o průměru 24 mm a výšce 7 mm. Těchto výstupků bylo vyrobeno a použito 97 000 a byly uspořádány v pravidelném rastru s 12mm mezerou bez ohledu na zakřivení plochy fasádního panelu. Pro výrobu forem i vlastních panelů bylo třeba rozpracovat návrh do všech detailů a přesně a pečlivě rozplánovat a popsat všechny nutné servisní a jiné práce od skladování a čištění forem až po přesnou identifikaci všech panelů včetně jejich umístění na konstrukci. Pro osazování panelů na fasádu byl navržen a odzkoušen jednoduchý závěsný systém z prvků z nerezavějící oceli, který celou fázi výstavby výrazně usnadnil [23].

Fasádní panely s otvory a mřížoviny

Své využití našly i fasády s moderními otvory různých geometrických tvarů. Fasády sestavené z panelů s otvory geometrických tvarů nebo rostlinnými motivy jsou velmi atraktivní a používány pro zastínění budovy před dopadem ostrého slunečního záření, přehřívání vnitřních prostor anebo pro ochranění před hlukem a ruchem obklopujícího městského prostředí [23].

Tradiční děrované fasádní panely jsou vyráběny z lakované nebo nerezové oceli, hliníku a dříve se používala i litina. Ductal nabízí alternativy k vytváření různých dekorativních prvků, které mají vysokou trvanlivost a jejich výroba vyžaduje výrazně nižší množství času a energie. Takto bylo navrženo rozšíření radnice města Plescop v oblasti Morbihan na jihu francouzské Bretaně [23].

Rozšíření radnice, Plescop, Francie

Budova byla rozšířena o bílé vyztužené panely, které obsahují z 50 % otvory a jsou vyrobené opět z Ductalu. Panely pokrývají druhé nadzemní podlaží budovy a to více než 170 m² fasády. Největší z nich má rozměry 5,5 x 3,9 x 0,1 m [23]. Radnici lze vidět na obr. 26.



Obr. 26: Radnice ve městě Plescop na jihu Francie rozšířená o UHPC prvky [36]

Uspořádání muzeálních expozic často vyžaduje práci s denním světlem. Ve stejném čase ale musí být exponáty chráněny před možným poškozením dopadem UV paprsků. Zajímavým příkladem, jak oba (zdánlivě neslučitelné) požadavky vyřešit, je rozšíření Městského muzea moderního umění v Lille připomínající lehký závoj.

Rozšíření muzea v Lille, Francie

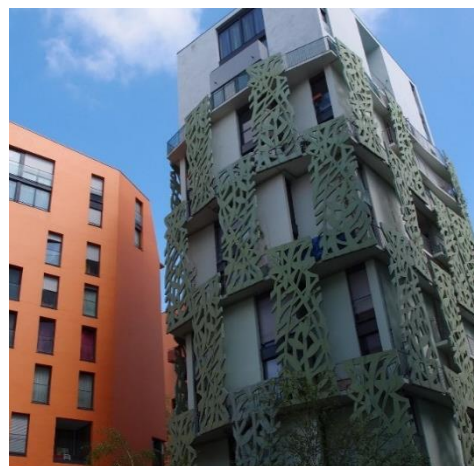
Jedná se o unikátní mřížovinu fasády navržené z UHPC architektkou Manuelle Gautrand. Architektka vycházela při návrhu nových částí muzea z jeho původních architektonicky cenných budov z roku 1983. Vzhled nové přístavby měl být ale zapadající do současné moderní doby. Závoj z Ductalu splnil veškeré funkční i estetické požadavky a dal novým budovám jedinečný vzhled. Výrazně děrované panely s 30 % otvorů pokrývají 185 m² fasády nové přístavby. Šířka panelů je 5,5 m, výška 3 až 8 m a tloušťka je 70 až 90 mm [23].

Komunitní centrum, Sedan, Francie

Centrum bylo postaveno jako součást regeneračního programu problematické části města v roce 2008. Byla navržena dvojité fasáda, abych byl ochráněn vnitřní prostor oddělený bohatě prosklenou fasádou. Na západní a jižní straně budovy je fasáda kryta stěnovými panely z Ductalu. Rozměry panelů jsou 2 x 4 m a tloušťka je 45 mm. Panely jsou tvořeny hustou perforací (30 %) kruhovými a protáhlými otvory, které dovolují dovnitř proniknout jen úzkým kuželům slunečního světla. Fasádní panely zaujímají plochu 330 m² a byly na budovu osazeny během 20 dnů [23].

Průmyslová oblast Rive Gauche

Jako část revitalizace průmyslové oblasti Rive Gauche ZAC ve 13. pařížské čtvrti ležící na levém břehu Seiny bylo navrženo několik bloků bytových domů, které svým vzhledem upoutají pozornost kolemjdoucích. Design totiž představuje zelené výhonky vinné révy šplhající po fasádě a vytvářející tak zajímavou vertikální krajinu. Bytové domy stojí v sousedství prestižní budovy Národní knihovny z roku 1996 a pařížské školy architektury Val de Seine z roku 2006. Požadavkem bylo vymyslet něco nadčasového, než jen stěny pokryté zelení, u kterých je velmi obtížné udržení v dobrém stavu už jen z finančního hlediska. Vzor pnoucích rostlin měl být zachován a byl tedy přenesen do abstraktní mřížoviny stínících fasádních panelů z Ductalu. Bylo jich vyrobeno celkem 44. Plochu panelu 15 m² tvoří 50 % materiálu a 50 % otvory. Výška panelů, která vede přes dvě podlaží je 6,6 m, šířka je 2,3 m, tloušťka 70 až 90 mm a hmotnost každého z panelů je 1,8 t. I přesto byla po jejich osazení na balkóny dodržena všechna normová ustanovení pro zatížení balkónů [23]. Panely, představující rostliny na bytových domech lze vidět na obr. 27 a 28.



Obr. 27 a 28: Fasáda bytových domů v Rive Gauche ve Francii [45]

Lehké fasády

Tento fasádní systém s dlouhodobou trvanlivostí je tvořen sendvičovými panely, kde je 200 a 300 mm silná vrstva tepelné izolace kryta 300 mm UHPC, konkrétně byl opět použit Ductal. Systém brání vzniku tepelných mostů na styku stropní konstrukce s fasádou, chrání fasádu proti pronikání srážkové vody a dává naprostou volnost v umisťování okenních otvorů. Panely totiž neobsahují konvenční výztuž železobetonu [23][25].

Poprvé byl tento nosný systém využit na budově mateřské školy v Paříži Pierre Budin Daycare v květnu roku 2012, kterou lze vidět na obr. 29. Rohová budova na křižovatce rušné Rue Poissonniere a Rue Budin je navržena jako nízkoenergetická. Její bílá fasáda je vyrobená z Ductalu s příměsí oxidu titaničitého. Má plochu 520 m² a je zvlněná ve vodorovném i svislém směru [23].



Obr. 29: UHPC systém na budově školky Pierre Budin Daycare v Paříži ve Francii [23]

Vykonzolovaná střecha Villy Navarra by se také dala zařadit do lehkých fasád. Mírně vyspádovaná konstrukce střechy byla navržena ze sedmnácti U nosníků dlouhých 9,25 m a širokých 2,35 m. Volná konzolovaná část přesahuje o 7,8 m přes skleněnou fasádu a brání tak pohledům z okolí do vnitřních soukromých prostor. Nosníky z Ductalu jsou po délce vyztuženy nízkými žebry, která mají v hřebeni střechy výšku 510 mm a k okraji se snižují, až zcela vymizí. Pás podél podélného okraje střechy je široký 1,41 m a na každém nosníku odlehčen pěti příčnými otvory, které jsou dlouhé 2,1 m. V těchto místech je panel střechy vysoký pouze 30 mm. Sluneční paprsky pronikají otvory v tmavé střeše a posunují po podlaze široké terasy jasné ovály [23].

Závěrem využití Ductalu jako fasádního materiálu je utvrzení ve většině jeho vlastnostech. Například možnost vytvářet štíhlé a velmi tenké prvky bez komplikovaných spojů jednoduše lité do forem téměř libovolného tvaru. Konstrukce vyžadují minimální nároky na údržbu a vykazují obrovskou trvanlivost. Samozřejmě je třeba počítat do budoucna i s úpravami norem, aby ve svých předpisech zahrnujících veškerá doporučení pro správný a bezpečný návrh konstrukce obsahovaly i charakteristiky pro nový materiál. Avšak bez zájmu veřejnosti, jakožto trhu o použití nového materiálu by nebyl zájem ani důvod normy měnit. Finanční náročnost materiálu je vykompenzována sníženými náklady na nepotřebné konstrukční prvky, jako jsou povrchové úpravy, na údržbu materiálu a jeho vysokou trvanlivost [23].

7.3.1.2 FASÁDNÍ PRVKY Z BÍLÉHO UHPC V ČESKÉ REPUBLICE

Použití UHPC pro tyto účely v České republice dosud nebylo zavedeno. První provozní odzkoušení provedla firma Skanska a. s., ve své provozovně Štětí v roce 2012. Ve spolupráci se závodem LOP (Lehké obvodové pláště), který spadá pod divizi Pozemního stavitelství firmy Skanska a. s., navrhla a vyrobila tenkostěnné fasádní panely z bílého UHPC jako prototyp pro konkrétní zakázku, a to opláštění kancelářské budovy firmy Statoil Bergen v Norsku [52].

Výroba prototypu fasádního panelu z UHPC v provozovně Štětí:

Směs čerstvého betonu UHPC byla vyrobena v míchačce s protiproudým nuceným mícháním o užitém obsahu 750 l. Postup míchání a dávkování směsi byl přesně stanoven v technologickém postupu výroby. Od míchačky k formě byl čerstvý beton přepravován bádii a z ní odléván do formy horizontální části fasádního panelu. Plnění šikmé části panelu bylo prováděno pomocí speciálního nástavce. Šikmá hrana byla zarovnána řezáním pilou s diamantovým kotoučem a pak zabroušena brusku. Manipulace s hotovým prototypem panelu a jeho přeprava byla provedena pomocí ocelového rámu, který byl našroubován na předem nalepené úchyty [30].

Souběžně s výrobou prototypu tohoto fasádního panelu byla v Kloknerově ústavu ČVUT Praha a v laboratoři BASF Stavební hmoty ČR s.r.o. provedena celá řada doprovodných zkoušek na různých zkušebních tělesech [30]. Výsledky těchto zkoušek jsou určeny vždy z průměru třech těles a jsou patrné v tab. 6, 7 a 8.

Tab. 6: *Technické parametry UHPC na zkušebních tělesech o rozměrech 40 x 40 x 160 mm* [30]

Zkušební těleso	Trámečky 40 x 40 x 160 mm		
	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Pevnost v tlaku [MPa]	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]
Stáří 3 dny	2360	86,5	10,8
Stáří 28 dní	2350	96,0	18,2
Stáří 90 dní	2370	111,0	20,0

Tab. 7: *Technické parametry UHPC na krychlích o hraně 150 a 100 mm* [30]

Zkušební těleso	Krychle o hraně 150 mm		Krychle o hraně 100 mm	
	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Pevnost v tlaku [MPa]	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Pevnost v tlaku [MPa]
Stáří 3 dny	2380	81,8	2380	78,9
Stáří 28 dní	2370	97,8	2330	98,4
Stáří 90 dní	2380	109,4	2390	111,4

Tab. 8: *Technické parametry UHPC na válcích o průměru 150 mm a výšce 300 mm [30]*

Zkušební těleso	Válce o průměru 150 mm a výšce 300 mm		
	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Pevnost v tlaku [MPa]	Statický modul pružnosti [GPa]
Stáří 3 dny	2350	77,3	33,6
Stáří 28 dní	2360	88,0	35,8
Stáří 90 dní	2390	89,6	39,6

Pozn.: Objemová hmotnost se tvarem prvku nemění, pohybuje se stále ve stejných hodnotách. Pevnost v tlaku je u válcových profilů o něco nižší než u hranolových. Žádné velké rozdíly ale nelze pozorovat.

Výsledkem byl vyrobený prototyp tenkostěnného fasádního panelu, který byl dlouhý 4 m, široký 1,35 m a o tloušťce pouhých 13 mm. Během transportu nedošlo k prasknutí panelu ani k jinému porušení [30]. Hotový panel lze vidět na obr. 30.



Obr. 30: *Hotový fasádní panel vyrobený firmou Skanska a.s. v provozovně Štětí [52]*

Tenkostěnné fasádní prvky se vyráběly převážně ze sklocementu. Avšak zkoušky UHPC ukázaly, že bílý UHPC jako materiál pro tento typ konstrukcí mnohdy výrazně překračuje technické parametry našeho sklocementového výrobce [52].

Odzkoušenou technologií výroby tenkostěnných fasádních panelů odléváním bílého UHPC do forem bylo dosaženo velmi dobrých výsledků. Z dostupných tuzemských surovin se podařilo vyrobit materiál, který svými technickými parametry výrazně překračuje konkurenční sklocement. Hlavním přínosem bílého UHPC je kromě zlepšení životního a pracovního prostředí také zvýšení užitných vlastností a trvanlivosti, zvláště pak v podmínkách vysoce agresivního prostředí. Závěrem je tedy fakt, že i u nás je možné vytvořit takový konstrukční prvek a vyhovět přitom náročným požadavkům zahraničních architektů [30][52].

7.3.2 DESIGN

Využití UHPC je možné i mimo stavební využití v konstrukcích. Zajímavým příkladem takového použití je například lavice v baru Agricole v San Franciscu. Návrhy nejdříve směřovaly spíše k využití oceli, ale nakonec se UHPC ukázalo jako mnohem lepší možnost. I to dokazuje, že UHPC má velmi flexibilní využití. Z UHPC může být například vyrobena i velkoformátová dlažba nebo různé dekorativní stěny. V případě použití UHPC dlaždic není nutný speciální způsob dláždění nebo následná úprava. Je vhodný i do koupelen nebo jiných prostor se zvýšeným

výskytem vlhkosti a to díky své velmi nízké propustnosti na vodu. Dokonce je možné použití tohoto materiálu i na kuchyňské nebo koupelnové prvky jako je například dřez nebo sprchový kout. Nejnovějším trendem je využití UHPC na výrobu bio krbů [27][36]. Obrázek krbu a lavice z UHPC lze vidět na obr. 31 a 32.



Obr. 31 a 32 (zleva): Lavice v baru Agricole, San Francisco a bio krb z UHPC [36]

Využití UHPC (Ductal) mimo samotné stavební konstrukce je opravdu široké. O tom se lze dále přesvědčit na obr. 33 a 34. Vyrábět lze nejen nábytkové prvky, ale i různé interiérové doplňky různých velikostí. Výhodou je snadnost odlévání a možnost vytvářet povrchové efekty, jako například krokodýlí nebo ještěřčí kůže, dřevo nebo dokonale vyleštěné zrcadlo [27].



Obr. 33 a 34: Další interiérové využití UHPC pro dekorační účely [36]

UHPC, zejména Ductal je využíván například i na výrobu schodišť. Zatímco klasický beton vytváří spíše masivní schodišťové konstrukce, Ductal umožňuje tyto prvky vyrábět překvapivě lehké. Schodiště mohou být zavěšeny nebo prostě ukotveny k přilehlé stěně [27]. Jejich vzhled působí elegantně, o čemž se lze přesvědčit na obr. 35 a 36.



Obr. 35 a 36: Schodiště zhotovené z Ductalu [27]

Dalším využitím materiálu Ductal je pro výrobu dlažby a podlahových desek. Dlažba z Ductalu může být velmi tenká a to tak, že tloušťka může být pouhých 15 mm. Mají tedy tloušťku srovnatelnou s klasickými keramickými dlaždicemi. Dlaždice mohou být vyrobeny v rozměrech 500 x 500 mm anebo 1 000 x 1 000 mm dle velikosti prostoru. Dokonce mohou být vyrobeny i s LED diodami, které mění barvu. Strukturu lze ovlivnit použitou formou. Výsledkem mohou být imitace kamene nebo sopečné lávy [27].

Stejně jako u podlahových desek má Ductal mnoho výhod, které platí i pro stěnové panely. Lze jej vyrábět v tloušťkách od 12 do 20 mm, v různých formátech, barvách a s různými texturami a reliéfy. Výhodami u takových panelů je zejména nízká hmotnost a štíhlost, snadné připevnění ke stěně a použití i do vnějšího prostředí. S tím souvisí jeho další výhody, jako například velmi nízká propustnost vody anebo možnost porůstání rostlinami a vytvoření tak tzv. „živé“ stěny [27].

8 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST – ZKOUŠENÍ VYBRANÝCH VLASTNOSTÍ UHPC

V této části práce bylo navrženo složení UHPC a tradičního betonu a experimentálně ověřeno. Prováděnou zkouškou na čerstvém betonu byla modifikovaná zkouška rozlítí kuželem. Zkoušky prováděné na ztvrdlém betonu byly následující: pevnost v tlaku po 1 a po 28 dnech, pevnost v tahu za ohybu po 1 a po 28 dnech, odolnost proti působení mrazu a chemických rozmrazovacích látek, odolnost proti obrušování a odolnost vůči působení tlakové vody. Jednotlivé vlastnosti byly vyhodnoceny a receptury následně porovnány.

8.1 METODIKA

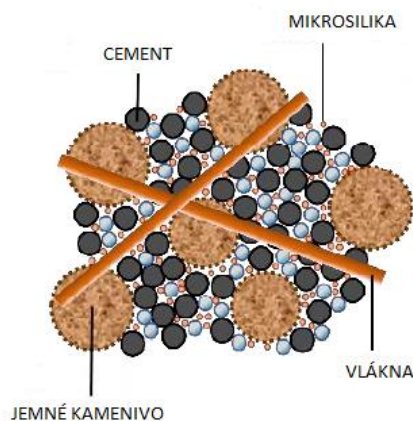
Na základě poznatků, získaných z rešerší, bylo vyhodnoceno, jaké suroviny a v jakém poměru použít a jakým způsobem UHPC vyrobit.

Obecné zásady pro návrh betonu s takto vysokými pevnostmi jsou [10][40]:

- Množství hrubého kameniva je většinou do betonu omezeno, aby se zvýšila homogenita betonu. Avšak pro snížení nákladů na výrobu UHPC lze použít kamenivo do velikosti zrn 20 mm.
- Použití ocelových drátků napomáhá zlepšit mechanické vlastnosti ve ztvrdlém stavu. Stejně tak důležitá je i orientace vláken.

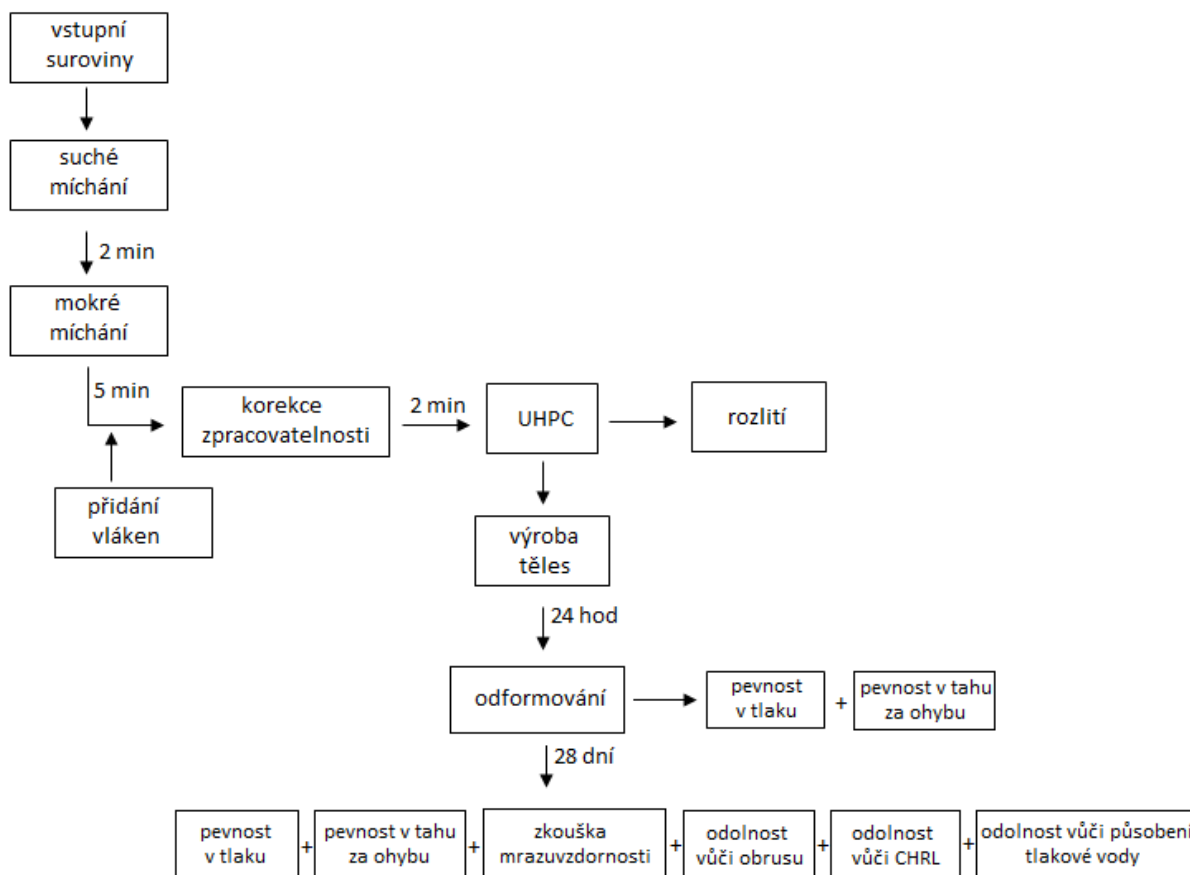
- Použitím vysoce účinné a kvalitní superplastifikační přísady se snižuje vodní součinitel, čímž se snižuje porozita a zvyšuje pevnost betonu.
- Vodní součinitel by se měl pohybovat kolem hodnot 0,14 až 0,18 [10], případně 0,14 až 0,20.
- Cement by měl mít nízký obsah alkálií a měl by nabývat vyšších pevností. Nejběžněji využívaný cement do UHPC je CEM I pevnostní třídy 42,5 nebo 52,5. Dávkování se pohybuje v rozmezí přibližně 600 až 1000 kg/m³. Nízký vodní součinitel a vyšší obsah cementu neumožňuje zhydratovat všechno pojivo, proto část cementu plní funkci plniva v betonu.
- Vysoce aktivní mikrosilika (křemičitý úlet) urychluje hydrataci cementu a je důležitou složkou UHPC. Množství by mělo být 20 až 35 % z množství cementu. Jelikož tato příměs vzniká většinou hutnickou výrobou, je důležité sledovat množství uhlíku, který může beton nepříznivě ovlivnit. Například obsah nevypáleného uhlí v mikrosilice může způsobit tmavý povrch betonu, což je estetickým problémem. Jako náhradu za křemičitý úlet lze použít vysokopecní strusku, metakaolin, vysokoteplotní popílek atd. Velké množství těchto velice jemných příměsí přispívá k optimalizaci složení a mikrostruktury hydratovaného pojiva a k redukci hydratačního tepla.
- Maximální obsah pojiva by měl být 900 kg/m³, aby bylo vytvořeno potřebné množství pasty a dosaženo vysoké tekutosti UHPC.
- Tepelné ošetřování může přispět k navýšení už takto vysoké pevnosti.

Jednoduše řečeno, cílem je vytvořit UHPC jako materiál, který není příliš drahý. Aby byl UHPC finančně snadno dostupný, je tedy třeba se zaměřit na výběr surovin s ohledem na jejich dostupnost. Schéma složení UHPC před přidáním vody lze vidět na obr. 37.



Obr. 37: Typické složení UHPC [53]

Schéma výroby lze vidět na obr. 38.



Obr. 38: Schéma technologie výroby a zkoušení UHPC

Výběr surovin

Pro experiment byly vybrány tyto suroviny:

Cement:

Cement byl použit portlandský pevnosti 42,5 R. Výrobce je Českomoravský cement, a.s. a výrobním závodem je Mokrý u Brna. Pevnost v tlaku tohoto cementu je po 1 dni 15 MPa a po 28 dnech 61 MPa. Pevnost v tahu za ohybu je po 1 dni 4 MPa a po 28 dnech 9 MPa. Měrný povrch výrobce udává 377 m²/kg a měrnou hmotnost 3110 kg/m³. Obsah slinku je 90 % [54]

Kamenivo:

Byl použit normalizovaný písek v sáčkích o hmotnosti 1350 ± 5 g o velikosti zrn 0-2 mm. Výrobce je společnost Filtrační písky, s.r.o., Chlum. Jedná se o písek, používaný k výrobě normové cementové malty dle ČSN EN 196-1 [60].

Superplastifikační přísada:

Superplastifikační přísada byla zvolena v suché formě Sika ViscoCrete – 225 Powder. Tato přísada je zvláště vhodná pro výrobu suchých maltových a betonových směsí. Poskytuje extrémní redukci vody, vynikající tekutost, současně optimální soudržnost a velmi silný samozhutňující efekt. Tyto

vlastnosti jsou spojeny s dobrou počáteční pevností a mají velice pozitivní vliv na vlastnosti betonu. Dalšími výhodami této přísady je například slučitelnost s dalšími přísadami, snížení tvorby trhlinek a odolnosti proti tečení, krátký čas vstřebávání, střední zpomalení a jiné. Je vhodný pro použití s jakýmkoli druhem cementu. Dávkování je závislé na receptuře betonu, ale doporučená hodnota je od 0,05 do 0,5 % z hmotnosti cementu [55].

Voda:

Voda byla použita pitná z vodovodního řádu.

Mikrosilika:

Pro tento experiment byly použity mikrosiliky od dvou dodavatelů. Mikrosilika pro téměř všechny receptury byla použita od německého výrobce RW Silicium GmbH [56]. Pro výrobu receptury 6 byla použita Mikroslica – Sioxid od slovenské společnosti OFZ. Měrnou hmotnost této mikrosiliky výrobce udává v rozmezí 15 000 až 30 000 m²/kg s tím, že většina částic má průměr 0,1 až 0,2 μm. Sypaná hmotnost mikrosiliky je 130 až 350 kg/m³ ve volně sypaném stavu a 450 až 650 kg/m³ v setřeseném stavu. Obsah SiO₂ je minimálně 90 % [57].

Popílek:

Popílek byl použit od výrobce ČEZ Energetické produkty, a.s., Dětmarovice. Jako popílek do betonu se řídí normou ČSN EN 450-1 [70]. Výrobce uvádí měrnou hmotnost popílku cca 200 kg/m³. Index účinnosti po 28 dnech je minimálně 75 % a po 90 dnech minimálně 85 %. Jemnost (zbytek na síť 0,045 mm) je maximálně 40 % [58].

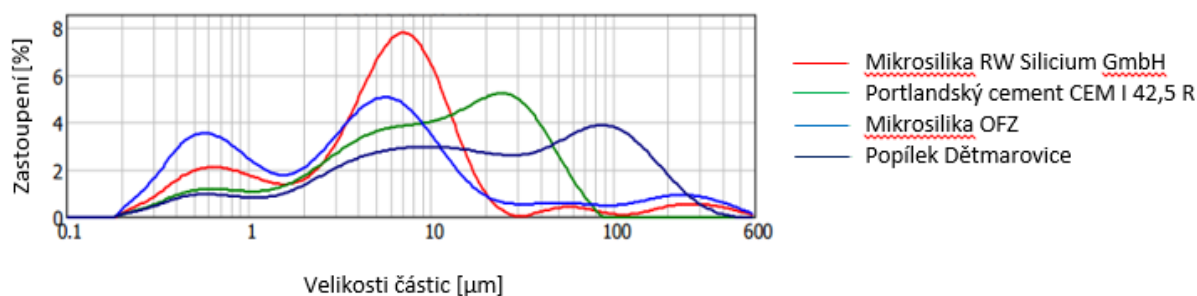
Korund:

Byl použit bílý korundový prášek velikosti F 80, což odpovídá velikosti částic 150 – 212 μm. Výrobce je Eisenwerk Würth GmbH a je dodáván v pytlích o hmotnosti 25 kg. Čistota se uvádí více jak 99 % Al₂O₃. Bílý korund neobsahuje žádné železo a vykazuje extrémní tvrdost (tvrdost dle Mohse je 9). Obecně se používá na výrobu brusných kotoučů, žáruvzdorných výrobků nebo výrobků s ochranou proti opotřebení [59].

Ocelová vlákna:

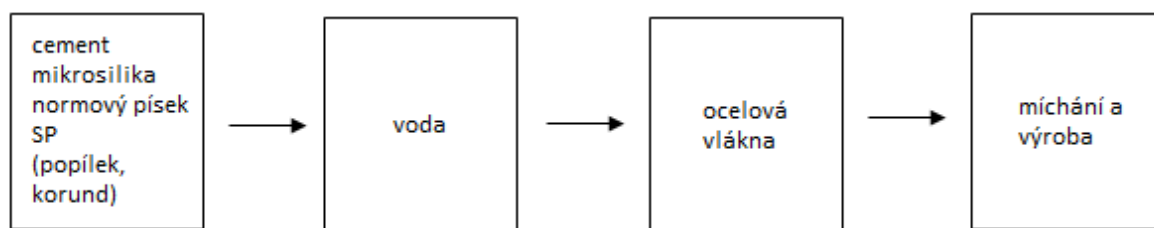
Byla použita rovná mikrovlákna ve formě drátků od výrobce KrampeHarex. Tloušťka vláken je 0,2 mm a délka 6 mm.

Na obr. 39 lze vidět procentuální zastoupení jednotlivých velikostí částic u použitých materiálů. Jedná se o portlandský cement, popílek z Dětmarovic a oba typy mikrosiliky.



Obr. 39: Křivky jednotlivých materiálů týkající se zastoupení jednotlivých velikostí částic

Postup dávkování složek lze vidět na obr. 40.



Obr. 40: Postup dávkování jednotlivých složek do míchacího zařízení

Pozn.: První a referenční receptura byla navržena bez vláken, tudíž vlákna do míchacího zařízení dávkována nebyla.

Navržené receptury UHPC

Návrh receptur byl zvolen s ohledem na získané poznatky. Dle současných výzkumů a odborné literatury se nabízí několik možností, jak navrhnout a vyrobit beton typu UHPC. Jednou možností je navrhnout materiál blízký se spíše k typu RPC betonů, což znamená vyloučit hrubé frakce kameniva. Další možností je návrh konstrukčního UHPC, který vychází z návrhu běžného betonu. V takovém případě je samozřejmostí jiné objemové zastoupení jednotlivých složek, především aktivních práškových materiálů, doplnění velmi účinných plastifikačních přísad a zejména použití vysoce kvalitního kameniva hrubých frakcí.

Pro výrobu UHPC této bakalářské práce byla zvolena možnost jemnozrnných směsí s maximálním zrnem kameniva 2 mm. V první fázi byly navrženy čtyři receptury označené 1 až 4, přičemž u receptury 4 se jednalo o referenční recepturu vycházející z návrhu normové cementové malty dle ČSN EN 196-1 [60]. Další receptury byly navrženy jako UHPC směsi. Receptura 1 byla navržena bez ocelových vláken a vyznačuje se vyšším množstvím normalizovaného písku oproti receptuře 2 a 3. Dále obsahuje mikrosiliku i popílek. Receptura 2 obsahuje méně cementu než receptura 1, neobsahuje mikrosiliku, ale obsahuje mnohem vyšší podíl popílku oproti receptuře 1. Dále obsahuje vyšší množství korundu a ocelových vláken než receptura 3. Navzdory tomu receptura 3 v porovnání s recepturou 1 obsahuje vyšší podíl portlandského cementu a mikrosiliky. Nejnižší podíl superplastifikační přísady má receptura 1, ale má také nejvyšší podíl vody. Množství pojivých složek se pohybuje u všech tří receptur méně než 1 000 kg/m³.

První výsledky UHPC směsí 1 až 3 ukázaly, že pevnostní zkoušky nedosáhly očekávaných hodnot. Na základě toho, byly navrženy další dvě receptury označené 5 a 6. Jelikož výroba UHPC je

poměrně nákladná, byly v první fázi navrženy receptury s ohledem na snížení nákladů, což se v laboratorních podmínkách neosvědčilo. Z toho důvodu byly další dvě receptury navrženy bez ohledu na náklady s vyšším podílem portlandského cementu, mikrosiliky i ocelových vláken. Receptura 5 se od receptury 6 liší v použití popílku. Receptura 6 na rozdíl od receptury 5 obsahuje korund. Receptura 6 obsahuje vyšší podíl portlandského cementu i mikrosiliky, naopak má nižší množství normalizovaného písku. Množství vody a plastifikační přísady bylo přibližně stejné v obou případech. Množství vláken je o 15 kg/m^3 vyšší v případě receptury 5. Množství pojivých složek bylo v obou případech vyšší než $1\,000 \text{ kg/m}^3$. Všechny receptury jsou zaznamenány v tab. 9.

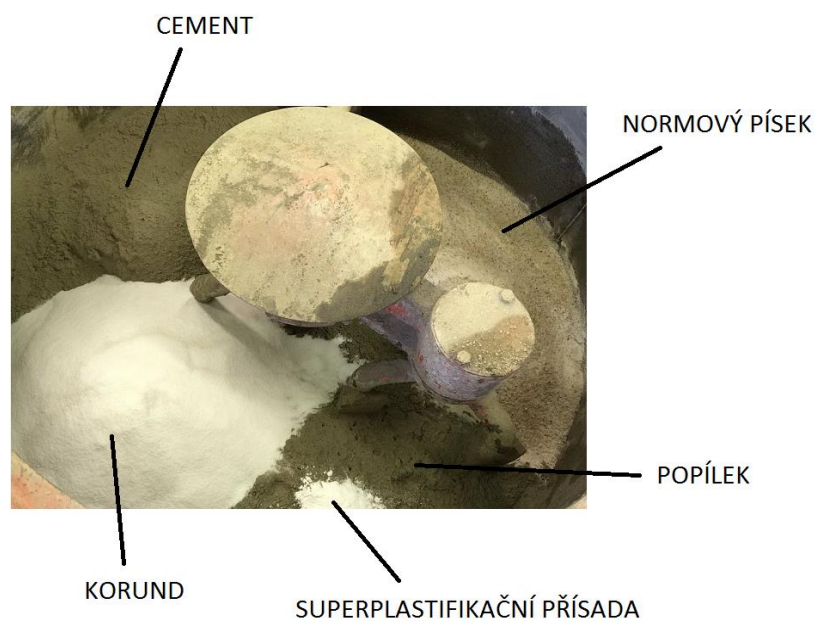
Tab. 9: Navržené receptury pro výrobu UHPC

Složky	Receptura [kg/m^3]					
	1	2	3	4 - REF	5	6
Cement	690	401	795	450	805	820
Mikrosilika	100	-	168	-	190	215
Popílek	80	328	-	-	90	-
Korund	-	397	198	-	-	200
Normalizovaný Písek	1 265	833	971	1 350	965	915
Ocelová vlákna	-	155	90	-	160	145
Voda	250	228	243	170	273	274
	1,242	1,363	2,544	1,035	2,871	2,870
SP	0,18 %	0,34 %	0,32 %	0,23 %	0,36 %	0,35 %
	m_c	m_c	m_c	m_c	m_c	m_c

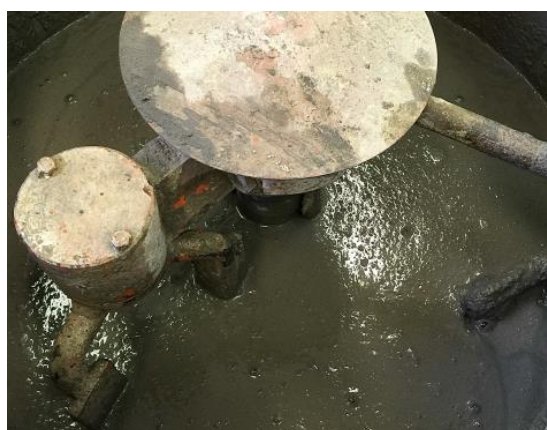
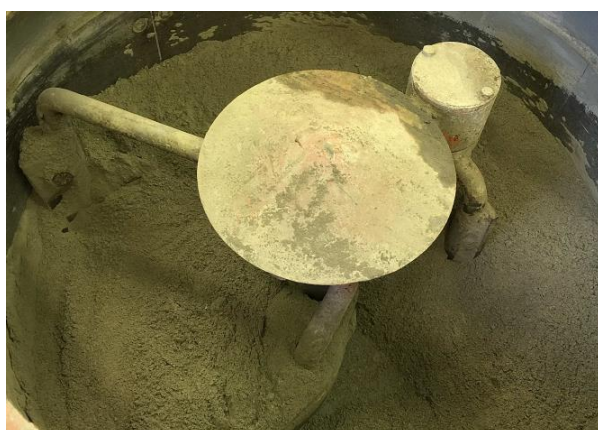
Technologie výroby

Míchání bylo prováděno v míchačce s nuceným oběhem a s maximálním užitným objemem 37 l. Do míchačky byl nejprve nasypán normalizovaný písek, poté portlandský cement s ostatními suchými složkami (mikrosilika, popílek, korund), včetně práškové superplastifikační přísady a přibližně 2 minuty byla tato suchá směs míchána. Poté byla přidána záměsová voda a míchání probíhalo dalších 5 minut. UHPC vyžaduje delší míchání, ale na menší objem v případě této bakalářské práce byla tato doba míchání dostačující. V případě receptur s vlákny byla poté přidána ocelová vlákna. Následovala kontrola konzistence čerstvého betonu a podle potřeby byla přidána voda nebo superplastifikační přísada. Pokud bylo třeba přidat superplastifikační přísadu, byla rozmíchána v malém množství vody a poté dávkována do čerstvého betonu.

Jednotlivé složky betonu v míchačce lze vidět na obr. 41. Suchou směs po rozmíchání lze vidět na obr. 42. Čerstvý beton po smíchání s vodou je vidět na obr. 43. Přidání vláken do čerstvého betonu je ukázáno na obr. 44 a čerstvý beton společně zamíchaný s vlákny na obr. 45.



Obr. 41: Jednotlivé suché složky receptury 2 před zamícháním



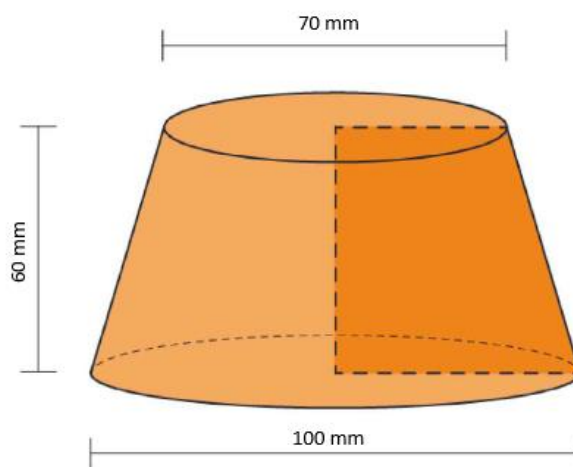
Obr. 42 a 43: Zamíchané všechny suché složky a čerstvý UHPC před přidáním vláken (zleva)



ČERSTVÝ UHPC BEZ VLÁKEN OCELOVÁ VLÁKNA

Obr. 44 a 45: Čerstvý UHPC s přidávanými vlákny před a po zamíchání (zleva)

Dle poznatků, získaných z rešerší, byla zjištěna i konzistence čerstvé malty. Pro stanovení konzistence čerstvé malty byl použit modifikovaný postup zkoušky konzistence čerstvé malty s použitím střešacího stolku dle ČSN EN 1015-3 [61]. Principem zkoušky je hodnota rozlití malty, která se získá změřením průměru rozlitého vzorku čerstvé malty. Před každou zkouškou byla deska a vnitřní povrch kužele navlhčeny vlhkou tkaninou a natřeny tenkou vrstvou odbedňovacího oleje. Kovový kužel byl umístěn na střed rovné a nenasákavé desky střešacího stolku a naplněn maltou. Povrch byl zarovnan a po několika sekundách byl kužel zvednut. První vyrobená malta byla následně rozlita 15 rázy střešacího stolku. U dalších směsí nebylo střešání použito vzhledem k dosažené konzistenci. Následně byly změřeny dva na sebe kolmé průměry a rozliti bylo vyhodnoceno průměrem těchto dvou hodnot s přesností na 10 mm. Použitý kužel lze vidět na obr. 46.



Obr. 46: Rozměry kužele pro zkoušku rozlití UHPC [62]

Vzhled každé směsi se s časem míchání měnil s ohledem na složení směsí. V případě, že bylo třeba přidat superplastifikační přísadu během míchání, bylo zajímavé pozorovat její účinek. Ihned po přidání bylo vidět celkem výrazné zvýšení tekutosti malty, avšak po dalších dvou minutách míchání byl tento účinek ještě zřetelnější. Během ukládání směsi do forem se však tekutost čerstvého betonu opět snižovala a směs zůstala více plastická. Po přidání vláken bylo také zřejmé snížení tekutosti směsi a zvýšení plastičnosti. Právě v těchto případech bylo většinou potřeba přidat superplastifikační přísadu. První směs byla více plastická oproti ostatním, což potvrzuje nejnížší dávku superplastifikační přísady. Druhá směs byla oproti ostatním naopak tekutá. Potvrzuje to nejvyšší hodnota zkoušky rozlití. Třetí, čtvrtá (referenční) a pátá směs byli oproti druhé méně tekuté. Šestá směs byla stejně jako v prvním případě spíše plastická. Množství superplastifikační přísady a vody bylo téměř stejné jako v případě druhé receptury, avšak tekutost byla pravděpodobně snížena vysokým celkovým množstvím pojivých složek. V druhé směsi bylo toto množství celkově nejnížší ze všech UHPC směsí a naopak v poslední, šesté směsi byl tento součet nejvyšší hodnotou ze všech receptur. Hodnoty jsou 729 kg/m^3 a $1\,035 \text{ kg/m}^3$.

Vodní součinitel byl počítán vzorcem:

$$w = \frac{m_v}{m_c + (k * m_p)}$$

kde: m_v je množství vody [kg/m^3]

m_c je množství cementu [kg/m^3]

m_p je množství ostatního pojiva (mikrosilika, popílek) [kg/m^3]

k je konstanta, zohledňující použitá pojiva (mikrosilika – 1,2; popílek – 0,4)

Vodní součinitel a hodnoty rozlití jsou uvedeny v tab. 10.

Tab. 10: Vodní součinitel, počítaný s příslušnou k – koncepcí pro jednotlivá pojiva a rozlití, vycházející u jednotlivých receptur.

	Receptura					
	1	2	3	4 - REF	5	6
w [%]	0,30	0,43	0,24	0,38	0,26	0,25
Rozlití [mm]	105	180	140	150	120	100

Na následujících obrázcích (obr. 47 a 48) lze vidět zkoušku rozlití a její měření.



Obr. 47 a 48: Rozlití směsi bez vláken (receptura 1) a směsi s vlákny (receptura 3) (zleva)

Následně byly připraveny formy pro výrobu sérií zkušebních těles. Byly vyrobeny krychle o hraně 100 mm a trámečky o rozměrech 40 x 40 x 160 mm pro každou recepturu. Formy byly naplněny betonem a v některých případech následně zhutněny na vibračním stole. V případě první směsi plastické konzistence byla vibrace použita jako u běžných betonů. V případě druhé směsi nebyla vibrace potřeba, jelikož se jednalo o směs tekutější konzistence, než v případě předchozí směsi. Třetí směs byla vibrována, avšak při vibraci docházelo ke špatnému nasměrování drátků, což by negativně ovlivnilo výsledky zkoušek, zejména mechanických vlastností materiálu. Proto byla vibrace v případě dalších zkušebních těles třetí maltové směsi omezena na minimální dobu vibrace. Vyplnění formy bylo zajištěno laboratorními pomůckami (dusadly aj.) Stejným způsobem byla vytvořena zkušební tělesa v případě páté a šesté maltové směsi. V případě čtvrté, referenční, byla vibrace opět použita, jelikož se jednalo opět o recepturu bez ocelových vláken. Naplněné

formy byly uloženy v laboratorních podmínkách. Zkušební tělesa byla po 24 hod odformována a uložena do vodního uložení po celou dobu zrání, max. 28 dní.

Na obr. 49 lze vidět rozdíly v nasměrování ocelových vláken při použití nebo naopak nepoužití vibrace. Druhá směs, která vibrována nebyla, má více nahodilé uspořádání vláken. Naopak u vibrovaného zkušební tělesa třetí směsi lze vidět vlákna spíše orientovaná jedním směrem.



Obr. 49: Orientace vláken při nepoužití vibrace (receptura 2) a s použitím vibrace (receptura 3) (zleva)

Prováděné zkoušky fyzikálně mechanických vlastností UHPC:

- **Pevnost v tlaku** – podstata zkoušky vycházela z normy ČSN EN 12 390-3 *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles* [63]. Pro stanovení pevnosti v tlaku byly použity krychle o hraně 100 mm. Zkouška byla prováděna po 1 dni a po 28 dnech zrání. Dle této normy by měla být zkouška provedena minimálně na 3 zkušebních tělesech, avšak pro naše účely, byla pevnost v tlaku stanovena pouze na 2 krychlích. A to kvůli nižšímu objemu míchání složek. Na stejných krychlích byla stanovena i objemová hmotnost ztvrdlého betonu dle ČSN EN 12 390-7 *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu* [64].
- **Pevnost v tahu za ohybu** – podstata zkoušky vycházela z normy pro cementové malty ČSN EN 196-1 *Metody zkoušení cementu – Část 1: Stanovení pevnosti* [60]. Pro stanovení pevnosti v tahu za ohybu byly použity tři trámečky a zkouška byla prováděna po 1 dni a po 28 dnech zrání. Na porušených zkušebních tělesech byla následně stanovena i pevnost v tlaku. Tato zkouška se u běžných betonů provádí dle normy ČSN EN 12 390-5 *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles* [65] na trámčích o rozměrech 100 x 100 x 400 mm. Jelikož se v případě této bakalářské práce jedná o velmi jemnozrnný materiál, zkoušky bylo vhodné provést dle normy pro cementové malty [60].
- **Stanovení mrazuvzdornosti** – podstata zkoušky vycházela z normy ČSN 73-1322 *Stanovení mrazuvzdornosti betonu* [66]. Dle této normy je zkouška prováděna na 3 zkušebních tělesech o rozměrech 100 x 100 x 400 mm a vedle toho musí být zhotovena 3 stejná tělesa srovnávací, na kterých se provádí srovnávací hodnoty hmotností a pevností v tlaku a v tahu za ohybu. V případě této bakalářské práce byly použity trámečky o rozměrech 40 x 40 x 160 mm, jelikož pro stanovení pevností byla použita zkušební tělesa

stejných rozměrů. Bylo nutné, aby se velikost těchto těles vzájemně shodovala. Bylo provedeno 100 zmrazovacích a rozmrazovacích cyklů. Vzorky byly po celou dobu zrání ponořeny ve vodě, před zkouškou byly tedy váženy v nasáklém stavu a zkouška byla započata po 28 dnech zrání. Na zkušebních tělesech byly stanoveny pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu a byl tak určen součinitel mrazuvzdornosti a zaznamenán úbytek hmotnosti. Součinitel mrazuvzdornosti byl stanoven na základě pevností v tahu za ohybu a měl by mít hodnotu vyšší než 0,75. Tzn. maximálně 75 % pevnosti po zkoušce mrazuvzdornosti z pevnosti srovnávacích těles.

- **Stanovení odolnosti proti chemickým rozmrazovacím látkám** – podstata zkoušky vycházela z normy ČSN EN 73 1326 *Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek* [67]. Pro tuto zkoušku byla použita krychle o hraně 100 mm a bylo provedeno 100 cyklů. Zkouška byla provedena po 28 dnech od zhotovení zkušební tělesa.
- **Stanovení obrusnosti betonu** – podstata zkoušky vycházela z normy ČSN 73 1324 *Stanovení obrusnosti betonu* [68]. Pro tuto zkoušku byl použit vzorek o půdorysných rozměrech přibližně 71 mm a výšce 40 mm, který byl výřezem ze zkušební krychle. Výsledkem je úbytek hmotnosti betonu a tím určená obrusnost betonu v %.
- **Stanovení hloubky průsaku tlakovou vodou** – podstata zkoušky vycházela z normy ČSN EN 12 390-8 *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 8: Stanovení hloubky průsaku tlakovou vodou* [69]. Na zkoušku byla použita krychle o hraně 100 mm a zkouška byla provedena po 28 dnech po zhotovení zkušební tělesa. Hloubka průsaku by neměla v žádném měřeném místě překročit hodnotu 50 mm a průměrná hodnota všech měřených míst by neměla být vyšší než 25 mm.

Porušení zkušební tělesa po zkoušce pevnosti v tlaku po 28 dnech lze vidět na obr. 50.



Obr. 50: Porušení jedné z krychlí po zkoušce pevnosti v tlaku

8.2 VÝSLEDKY

Tabulky:

Tab. 11: Výsledky zkoušení betonu po 1 dni od výroby

Receptura	Objemová hmotnost ztvrdlého betonu [kg/m ³]	Pevnost v tlaku [MPa]		Pevnost v tahu za ohybu [MPa]
		Krychle (100 mm)	Trámečky	
1	2210	17,4	15,9	4,1
2	2290	6,2	4,9	1,3
3	2240	24,4	23,7	5,0
4 - REF	2210	11,1	11,0	3,5
5	2200	18,3	14,7	5,1
6	2200	27,3	24,5	8,5

Tab. 12: Výsledky zkoušení pevností po 28 dnech od výroby

Receptura	Objemová hmotnost ztvrdlého betonu [kg/m ³]	Pevnost v tlaku [MPa]		Pevnost v tahu za ohybu [MPa]
		Krychle (100 mm)	Trámečky	
1	2230	95,9	94,8	13,3
2	2280	52,6	48,0	9,5
3	2220	74,9	91,7	17,5
4 - REF	2250	50,1	66,6	10,5
5	2170	68,1	81,4	15,1
6	2230	88,7	108,1	17,4

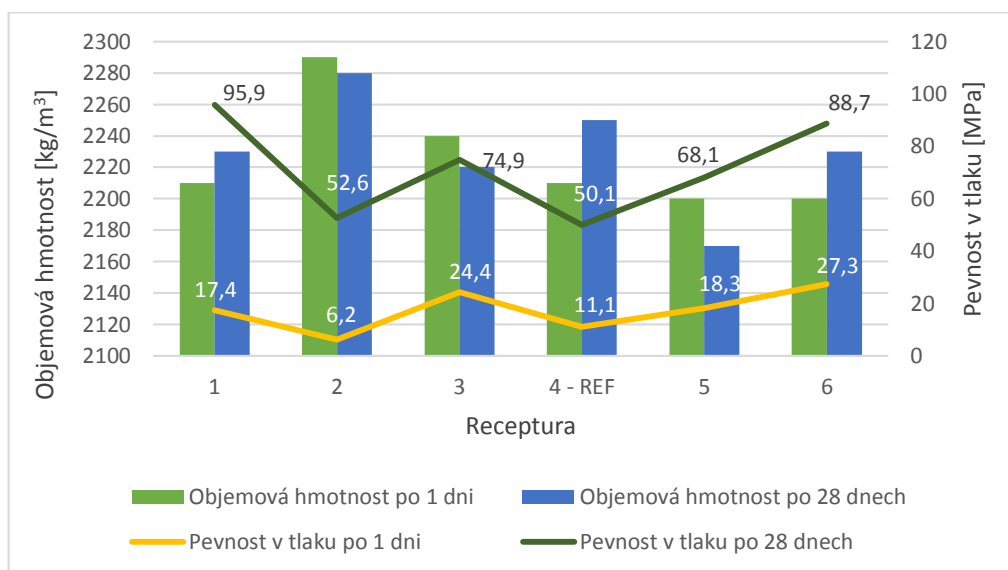
Tab. 13: Výsledky zkoušení mrazuvzdornosti

Receptur a	Úbytek hmotnosti [g]	Pevnost v tlaku [MPa]	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	Součinitel mrazuvzdornosti
1	3,4	96,6	10,8	0,81
2	19,0	51,1	10,4	1,09
3	5,7	97,9	15,4	0,88
4 - REF	11,3	52,9	8,4	0,80
5	4	93,4	15,0	0,99
6	2,7	118,2	20,0	1,15

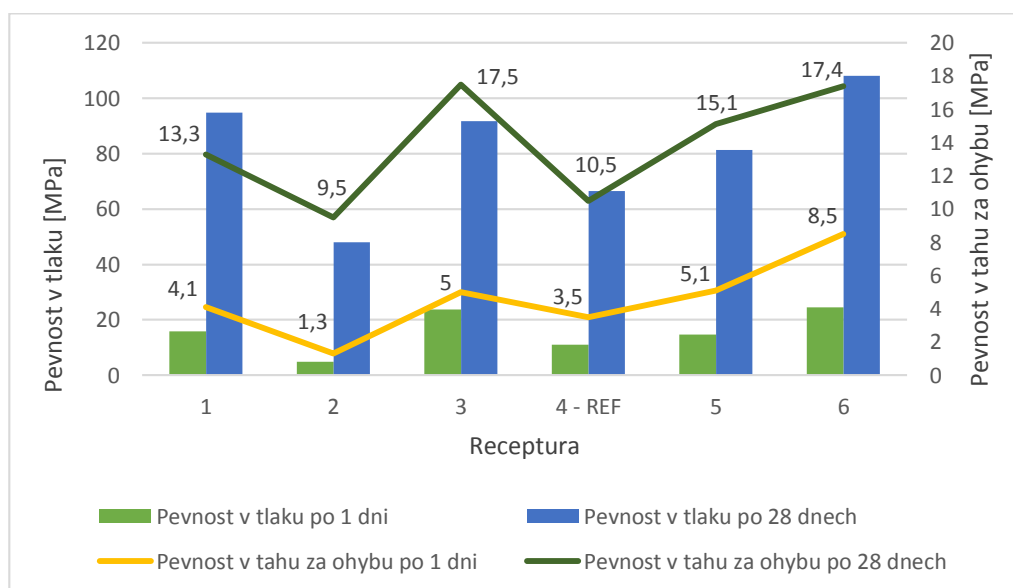
Tab. 14: Výsledky zkoušení dalších zkoušek po 28 dnech zrání

Receptura	CHRL – odpad [g/m ²]	Obrusnost betonu [%]	Hloubka průsaku tlakovou vodou [mm]
1	349,5	4,9	0
2	8 179,7	4,0	8
3	97,0	4,6	5
4 - REF	2 384,8	3,6	3
5	174,5	3,8	4
6	82,6	3,6	3

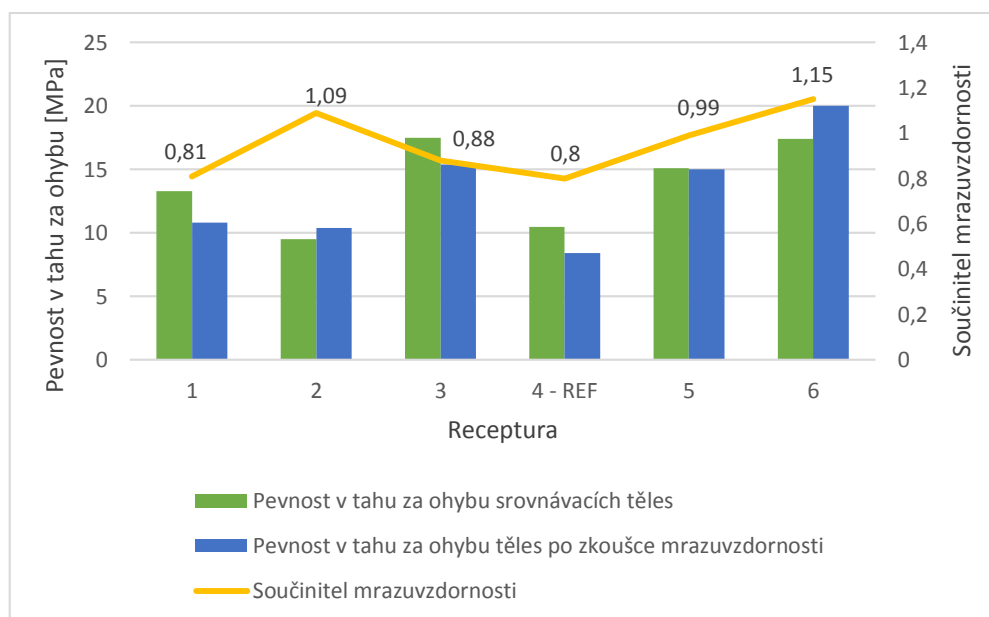
Grafy:



Graf 1: Objemová hmotnost a pevnost v tlaku po 1 a po 28 dnech zrání, zkoušené na krychlich o hraně 100 mm



Graf 2: Pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu zkoušená na zkušebních tělesech o rozměrech 40 x 40 x 160 mm po 1 a po 28 dnech zrání



Graf 3: Porovnání pevností v tahu za ohybu srovnávacích zkušebních těles a těles po zkoušce mrazuvzdornosti a křivka příslušného součinitele mrazuvzdornosti

8.3 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Hodnota vodního součinitele nebyla předem pevně stanovena, ale byla dopočítána zpětně dle potřebných úprav. Hodnoty vodních součinitelů všech vyrobených směsí jsou vyšší než hodnoty, které byly získány z rešerší. Běžné UHPC dosahují hodnoty vodního součinitele spíše pod 0,2, v případě této bakalářské práce je nejnižší hodnota 0,24. Jedná se o recepturu 3, kde je součet pojivých složek 963 kg/m^3 , množství vody 243 kg/m^3 a množství superplastifikační přísady 0,32 % z množství cementu. Naopak nejvyšší hodnota vodního součinitele je 0,43 v případě receptury 2, ve které je obsah pojivých složek 729 kg/m^3 , množství vody 228 kg/m^3 a množství superplastifikační přísady 0,34 % z množství cementu. Další nízké hodnoty, pohybující se kolem hodnoty 0,25, byly dosaženy v případě receptur 5 a 6, kde obsah pojivých složek byl více než 1000 kg/m^3 . Receptura 5 má hodnotu vodního součinitele 0,26, obsah pojivých složek 1085 kg/m^3 , množství vody 273 kg/m^3 a množství superplastifikační přísady 0,36 % z množství cementu. Receptura 6 má hodnotu vodního součinitele 0,25, obsah pojivých složek 1035 kg/m^3 , množství vody 274 kg/m^3 a množství superplastifikační přísady 0,35 % z množství cementu. Je tedy zřejmé, že množství vody a superplastifikační přísady je ve všech případech téměř stejné, tudíž rozdíl je zanedbatelný. Lze tedy usoudit, že na hodnotu vodního součinitele má v tomto případě zásadní vliv množství hydratujících složek.

Ze získaných poznatků bylo zjištěno, že UHPC není třeba hutnit za pomoci intenzivní vibrace, to však vede k závěru, že vyšší množství superplastifikační přísady je nezbytné. Intenzivní vibrace by mohla negativně ovlivnit distribuci ocelových vláken v UHPC, tudíž je lepší vyrobit materiál o tekutější konzistenci. V případě této bakalářské práce byla část hutněna opatrnou vibrací a část hutněna nebyla. Vzhledem k hodnotám objemových hmotností u všech vyrobených UHPC, které se pohybují kolem hodnoty 2200 kg/m^3 a jejich složení je zřejmé, že by bylo možné docílit hodnot ještě vyšších. Jednou možností, jak obecně zvýšit objemovou hmotnost, je použít intenzivnější vibraci a vytěsnit tak přebytečný vzduch z čerstvého betonu. V případě UHPC by tak došlo ke snížení jiných vlastností materiálu, tudíž druhou možností, jak by bylo možné v tomto případě zvýšit objemovou hmotnost, je zvýšení dávky superplastifikační přísady a tím ztekucení čerstvého

UHPC a vytvoření hutnější struktury během ukládání. Avšak je třeba brát v úvahu, že ne všechny plastifikační přísady se zvýšenou dávkou svůj účinek zvyšují. Pak je důležitá především kvalita a zajištění kompatibility mezi přísadou a práškovými složkami.

Hodnoty fyzikálně mechanických vlastností odpovídají výsledkům popsaným výše. Čím vyšší je podíl pojivých složek v UHPC při stejném množství vody a superplastifikační přísady u všech směsí, tím vyšší jsou výsledné pevnosti v tlaku i v tahu za ohybu. Snaha o úsporu materiálu a tím snížení nákladů na výrobu UHPC se neprokázala být pozitivní pro tyto vlastnosti materiálu. U směsí, které byly navrženy bez ohledu na úspory či náklady, se vyšší množství pojivých složek, zejména vyšší dávka mikrosiliky, ukázala být pozitivní pro vlastnosti UHPC. Směs z receptury 2, která ve svém složení obsahovala vysoké množství popílku, poměrně malé množství cementu a žádnou mikrosiliku se projevila jako nejslabší směs z hlediska fyzikálně mechanických vlastností. Avšak jako jediná vykazovala po 1 dni zrání přibližně 12% pevnosti v tlaku i v tahu za ohybu z pevností po 28 dnech zrání. Z toho vyplývá, že vyšší dávka popílku snižuje nárůst počátečních pevností. Jelikož pevnosti po 28 dnech zrání byly u této směsi nejnižší, lze tedy říci, že očekávaných hodnot dosáhne beton s touto příměsí po více jak 28 dnech. U receptury 6, která obsahovala nejvyšší množství cementu a mikrosiliky, vykazovala po 1 dni 48% pevnosti v tahu za ohybu z pevností po 28 dnech a v průměru 25% pevnosti v tlaku po 1 dni z pevností po 28 dnech.

Z hlediska mrazuvzdornosti se všechny směsi prokázaly jako mrazuvzdorné. Receptura 2 vykazala nejvyšší hodnotu úbytku hmotnosti, ale součinitel mrazuvzdornosti je 1,09, což je nejvyšší hodnota z prvních čtyř navržených směsí a znamená nulový úbytek na pevnosti v tahu za ohybu. Stejný výsledek byl stanoven u šesté směsi, kde hodnota součinitele mrazuvzdornosti je 1,15 a úbytek na hmotnosti je pouze necelé 3 g. Jelikož mrazuvzdornost souvisí s objemovou hmotností, je tedy zřejmé, že zvýšením objemové hmotnosti se zvyšuje i mrazuvzdornost materiálu. Receptura 2 vykazuje nejvyšší hodnoty objemové hmotnosti, tudíž i nejvyšší hodnoty součinitele mrazuvzdornosti. Referenční beton vykazuje dle očekávání nejnižší hodnotu součinitele mrazuvzdornosti (hodnota je 0,8). U směsí, které vykazaly vyšší hodnoty pevností v tahu za ohybu a v tlaku, po zkoušce mrazuvzdornosti lze usoudit, že výroba této sady zkušebních těles byla kvalitnější, než výroba srovnávacích těles. Avšak výsledkem je fakt, že se jedná o téměř 100% mrazuvzdorný materiál.

Odolnost proti působení chemických rozmrazovacích látek vykazala nejvyšší opět receptura 6, s hodnotou necelých 83 g/m², a dále receptura 1, 3 a 5. Tyto směsi se ukázaly být dle [67] slabě narušené. Nejnižší odolnost proti působení chemických rozmrazovacích látek vykazala receptura 2, která se svou hodnotou řadí do třídy rozpadlý, a to s hodnotou až téměř 8 200 g/m². Referenční beton s hodnotou téměř 2 400 g/m² se ukázal být silně narušený.

Hloubka průsaku tlakovou vodou vyšla nejlépe v případě receptury 1, kde voda do materiálu neprosákla. Nejvyšší hodnotu vykazala opět receptura 2, kdy průsak vodou byl 8 mm. Avšak jsou to tak nízké hodnoty, že se všechny UHPC, včetně referenčního ukázaly být dle [69] vodonepropustné.

Hodnoty odolnosti proti ohrusu jsou celkově porovnatelné. Nejméně pozitivně se tato zkouška projevila v případě receptury 1, kde ohrusnost betonu dosahuje hodnoty 4,9 %. Referenční receptura a receptura 5 a 6 vykazaly hodnotu necelé 4 %. Receptura 2 vykazala hodnotu ohrusnosti 4 % a receptura 3 hodnotu 4,6 %.

9 ZÁVĚR

Téma bakalářské práce se zabývalo studiem ultra vysokohodnotných betonů. Cílem této práce bylo popsat současný stav výzkumu a použití těchto betonů ve stavebnictví. Dále byly tyto betony experimentálně ověřeny pro zjištění základních vlastností, tj. pevnost a trvanlivost.

V teoretické části byla řešena terminologie a jednotlivé definice. Avšak neexistuje žádná platná legislativa, která by tuto terminologii sjednotila. Dále nejsou přesně stanoveny základní vlastnosti, jejich správné hodnoty ani co lze od tohoto betonu očekávat. Podstatná část práce byla věnována studiu realizovaných staveb z UHPC. V ČR se jedná prozatím především o výzkum, ale i přesto již bylo několik staveb realizováno předními výrobci betonu, jako např. Skanska, TBG nebo Metrostav. Přednostně je UHPC využíván u mostních konstrukcí v Evropě, Asii a USA. V neposlední řadě byly uvedeny další možnosti využití UHPC, jakými jsou např. fasádní a obkladové prvky či vybavení interiéru a exteriéru.

Na základě zjištěných poznatků z výzkumů, jsou UHPC chápány jako jemnozrnné směsi nebo jako konstrukční betony. V rámci této bakalářské práce byl UHPC vyroben jako jemnozrnná směs. Z poznatků získaných z rešerší bylo vytvořeno několik návrhů receptur, které byly zaměřeny na množství pojivých složek, množství jemných podílů a množství a kvalitě superplastifikační přísady. V první fázi byly sestaveny tři UHPC receptury a jedna referenční. Při výrobě těchto směsí byly zjištěny poznatky, které vedly k návrhu dalších dvou směsí, jako např. zpracovatelnost měnící se v závislosti na čase. Na zkušebních tělesech byly provedeny zkoušky pevnosti (pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu) a trvanlivosti (hloubka průsaku tlakovou vodou, odolnost proti působení chemických rozmrazovacích látek, ohrusnost, mrazuvzdornost).

Poznatkem z navržených receptur je např. fakt, že popílek není ideální pro návrh tohoto typu betonu, jelikož výrazně snižuje nárůst počátečních pevností, zvláště při snížení množství portlandského cementu. Naopak příznivě se jeví použití vyšší množství mikrosiliky, zejména v kombinaci s ocelovými vlákny. Směsi s touto kombinací dosahovaly pevností okolo 110 MPa. Přídavek korundu ovlivnil zpracovatelnost čerstvého betonu, tzn. je potřeba více záměsové vody nebo korekce vodního součinitele použitím vyššího množství nebo kvalitnější superplastifikační přísady. UHPC obsahující korund dosahovaly nižších pevností v porovnání pouze s normovým pískem. UHPC, dosahující okolo 100 MPa, dosahovaly dobrých výsledků trvanlivosti. Např. mrazuvzdornost, vyšla nejméně příznivě v případě referenční směsi a směsi obsahující popílek. Stejným způsobem se použití popílku projevilo i u dalších zkoušek (hloubka průsaku tlakovou vodou, odolnost proti chemickým rozmrazovacím látkám).

Hodnoty pevností byly očekávány vyšší, což mohl ovlivnit nízký vodní součinitel, tj. nedostatek vody pro hydrataci veškerého pojiva, nebo nižší objemová hmotnost díky horší zpracovatelnosti. Budoucnost ukáže směr výzkumu a vývoje tohoto bezpochyby výjimečného typu betonu. Rozsáhlejší znalosti v oblasti způsobu dosažení požadované zpracovatelnosti, systému ukládání, praktické aplikace a případně zavedení legislativních požadavků a norem, umožní širší využití a přesvědčení investorů staveb o výhodách tohoto materiálu.

10 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] VÍTEK, Jan L., COUFAL Robert. Vysokopevnostní betony a UHPC. *Betonové konstrukce 21. století, betony s přidanou hodnotou*. 2012 (vydáno jako samostatná příloha časopisu Beton TKS), str. 43
- [2] KRATOCHVÍL Aleš, URBAN Jaroslav. Vývoj aplikací vysokohodnotného betonu při stavbě mostů, zejména v USA. In: *CDV* [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné na: <http://www.cdv.cz/file/clanek-vyvoj-aplikaci-vysokohodnotneho-betonu-pri-stavbe-mostu-zejmena-v-usa/>
- [3] MYŠÍČKOVÁ, Lucie. Vlastnosti, zkoušení a využití UHPC v konstrukcích. Brno, 2011. 48 s., 64 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce Ing. Petr Cikrle, Ph.D. (dostupné na: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=54415)
- [4] R. Yu, P. Spiesz, H.J.H. Brouwers, Development of an eco-friendly Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with efficient cement and mineral admixtures uses, *Cement and Concrete Composites*, Volume 55, January 2015, Pages 383-394, ISSN 0958-9465 (dostupné na: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946514001930>)
- [5] COUFAL Robert, VÍTEK Jan L., PROCHÁZKOVÁ Alena. Praktická zkušenost s výrobou a dopravou uhpc. In: *TBG Metrostav* [online]. 2015, č. 2, str. 28 [cit. 2016-05-18]. (dostupné na: http://www.tbg-metrostav.cz/fileadmin/user_upload/napsali_o_nas/clanky_ke_stazeni/BETON_2-15-COUFAL_UHPC.PDF)
- [6] ČSN EN 206. *Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha: Český normalizační institut, 2014
- [7] HELA Rudolf, BODNÁROVÁ Lenka a MARŠÁLOVÁ Jana. Nové materiály – nové druhy a technologie betonu. *Beton: Technologie, konstrukce, sanace*. Praha: Česká betonářská společnost. 2003, č.2. s. 58 - 60. ISSN 1213-3116
- [8] *EBETON* [online]. [cit. 2016-05-18]. (Dostupné na: <http://www.ebeton.cz/pojmy/vysokohodnotny-beton-hpc>)
- [9] Technické podmínky TP 226. *Vysokohodnotné betony pro mosty PK*. Praha: Ministerstvo dopravy ČR, Odbor silniční infrastruktury, 2010
- [10] Chong Wang, Changhui Yang, Fang Liu, Chaojun Wan, Xincheng Pu, Preparation of Ultra-High Performance Concrete with common technology and materials, *Cement and Concrete Composites*, Volume 34, Issue 4, April 2012, Pages 538-544, ISSN 0958-9465, (dostupné na: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.11.005>)
- [11] M.M Reda, N.G Shrive, J.E Gillott, Microstructural investigation of innovative UHPC, *Cement and Concrete Research*, Volume 29, Issue 3, March 1999, Pages 323-329, ISSN 0008-8846, (dostupné na: [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00225-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00225-7))
- [12] KOLÍSKO Jiří, HUŇKA Petr, RYDVAL Milan, KOSTELECKÁ Michaela. Development of UHPC from materials available in Czech republic. In *Central europe towards Sustainable Building 2013*. Praha. Sborník [online]. 2013 [cit. 6. listopadu 2015]. (dostupné na: http://www.cesb.cz/cesb13/proceedings/3_materials/CESB13_1414.pdf)

- [13] RYDVAL Milan, KOLÍSKO Jiří. Beton TKS. *Ohybová únosnost desek ztraceného bednění vyrobených z UHPFRC a vliv distribuce vláken*. 2015, č. 2, s. 34-37.
- [14] První praktické použití UHPC v České republice. *LCE PEOPLE MAGAZINE* [online]. 2013, str. 16 [cit. 2016-05-18]. (dostupné na: http://www.lafarge.cz/Lafarge_CE_Magazin_11-2013_CZ_web_%281%29.pdf)
- [15] *LAFARGE CEMENT JOURNAL* [online]. 2013, **10**(1) [cit. 2016-05-18]. (dostupné na: http://www.lafarge.cz/2013_01.pdf)
- [16] Cyklistická stezka přes Labe v Čelákovících. In: *Stavba roku* [online]. [cit. 2016-05-19]. (dostupné na: <http://www.stavbaroku.cz/printDetail.do?Dispatch=ShowDetail&siid=1111&coid=55>)
- [17] ONDRÁČEK, M. Vývoj vysokopevnostních betonů definovaných vlastností s využitím druhotných surovin: disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Brno, 2013. 153 s. Vedoucí disertační práce: prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
- [18] Budoucnost ultra vysokopevnostních betonů. In: *ABS portál* [online]. [cit. 2016-05-18]. (dostupné na: <http://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/materialy-a-vyroby/beton/budoucnost-ultra-vysokopevnostnich-betonu>)
- [19] Ultra-vysokopevnostní betony-UHPC. In: *TBG Metrostav* [online]. [cit. 2016-05-18]. (dostupné na: <http://www.tbg-metrostav.cz/produkty/ultra-vysokopevnostni-betony-uhpc/>)
- [20] PROCHÁZKA, D. *Vytvoření předpokladů hodnocení vlastností vysokopevnostních betonů s využitím nedestruktivních metod zkoušení*: disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Brno, 2013. 239 s. Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Brožovský, CSc.
- [21] TERZIJSKI, I. Technologické aspekty vývoje a aplikace vysokopevnostního betonu v podmínkách České republiky. Část I. Úvod a složky vysokopevnostního betonu. *Beton TKS*, 2011, roč. 2011, č. 1, s. 54-63. ISSN: 1213- 3116
- [22] KOLÍSKO J., TICHÝ J., KALNÝ M., HUŇKA P., HÁJEK P., TREFIL V. Vývoj ultra vysokohodnotného betonu (UHPC) na bázi surovin dostupných v ČR. *Betonové konstrukce 21. století, betony s přidanou hodnotou*. 2012 (vydáno jako samostatná příloha časopisu Beton TKS), str. 51
- [23] MARGOLDOVÁ J. Fasády z UHPC – betonové „závoje“. *Betonové konstrukce 21. století, betony s přidanou hodnotou*. 2012 (vydáno jako samostatná příloha časopisu Beton TKS), str. 59
- [24] REBENTROST, Mark a Pavel SMÍŠEK. Reaktivní jemnozrnný beton Ductal® Beton: Technologie, konstrukce, sanace. Praha: Česká betonářská společnost, 2007, č. 5, s. 22-23. ISSN 1213-3116
- [25] *LAFARGE CEMENT JOURNAL* [online]. 2013, **10**(2) [cit. 2016-05-18]. (dostupné na: http://www.lafarge.cz/2013_02.pdf)
- [26] KŘÍŽOVÁ Klára, HELA Rudolf. *Lafarge Cement Journal. Ultravysokopevnostní beton pro mostní stavby*. 2010, č. 4, s. 10
- [27] *Ductal* [online]. [cit. 2016-05-18] (dostupné na: <http://www.ductal.com/>)
- [28] Mechanical Performances. In: *Ductal* [online]. [cit. 2016-05-18]. (dostupné na: http://www.ductal.com/wps/portal/ductal/6_5-Mechanical_performances)
- [29] TICHÝ, Jan, Jan KOMANEC, Bohuslav SLANSKÝ, David ČÍTEK, Miroslav HUBKA a Jiří KOLÍSKO. Lávka pro pěší z UHPC přes Opatovický kanál. In: *22. betonářské dny: Sekce ČT2A: Nové technologie*. 2015, s. 8. ISBN 978-80-906097-0-9

- [30] TICHÝ Jan, TREFIL Vladislav a HUŇKA Petr. Výroba tenkostěnných fasádních panelů z bílého UHPC s výztužnou sítí. In: *12. konference, Technologie betonu 2014*. 2014. ISBN 978-80-903806-4-6
- [31] Unikátní lávka s nosnou konstrukcí z UHPC v Čelákovících. In: *iMateriály* [online]. [cit. 2016-05-19]. (dostupné na: http://imaterialy.dumabyt.cz/rubriky/technologie/unikatni-lavka-s-nosnou-konstrukci-z-uhpc-v-celakovicich_42526.html)
- [32] VÍTEK Lubomír. Stavební látky-Beton I. [online]. [cit. 2016-05-18]. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební (dostupné na: <http://www.szk.fce.vutbr.cz/vyuka/AI01/beton1.pdf>)
- [33] Mo Alkaysi, Sherif El-Tawil, Zhichao Liu, Will Hansen, Effects of silica powder and cement type on durability of ultra high performance concrete (UHPC), *Cement and Concrete Composites*, Volume 66, February 2016, Pages 47-56, ISSN 0958-9465 (dostupné na: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095894651530055X>)
- [34] Ehsan Ghafari, Mahdi Arezoumandi, Hugo Costa, Eduardo Júlio, Influence of nano-silica addition on durability of UHPC, *Construction and Building Materials*, Volume 94, 30 September 2015, Pages 181-188, ISSN 0950-0618 (dostupné na: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061815300313>)
- [35] Safeer Abbas, Ahmed M. Soliman, Moncef L. Nehdi, Exploring mechanical and durability properties of ultra-high performance concrete incorporating various steel fiber lengths and dosages, *Construction and Building Materials*, Volume 75, 30 January 2015, Pages 429-441, ISSN 0950-0618 (dostupné na: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006181401229X>)
- [36] Ultra high performance concrete (UHPC): Guide to manufacturing architectural precast UHPC elements. In: *NPCA: National Precast Concrete Association* [online]. [cit. 2016-05-19]. (dostupné na: <http://precast.org/wp-content/uploads/2011/05/NPCA-ultra-high-performance-concrete.pdf>)
- [37] TICHÝ, Jan, ŠTĚRBA Alain, TREFIL Vladislav a ŽALUDEK Ivo. Ultravysokopevnostní beton v prefabrikaci. *Beton: Technologie, konstrukce, sanace: Energetické a vodohospodářské stavby*. Praha: Česká betonářská společnost, 2010, **10**(5), 46-49. ISSN 12133116.
- [38] *Lafarge: Building better cities* [online]. [cit. 2016-05-19]. (dostupné na: <http://www.lafarge.com/en>)
- [39] Ahmed Taфраoui, Gilles Escadeillas, Soltane Lebaili, Thierry Vidal, Metakaolin in the formulation of UHPC, *Construction and Building Materials*, Volume 23, Issue 2, February 2009, Pages 669-674, ISSN 0950-0618, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.02.018> (dostupné na: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061808000676>)
- [40] Caijun Shi, Zemei Wu, Jianfan Xiao, Dehui Wang, Zhengyu Huang, Zhi Fang, A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design, *Construction and Building Materials*, Volume 101, Part 1, 30 December 2015, Pages 741-751, ISSN 0950-0618 (dostupné na: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061815305092>)
- [41] Polyfunkční přísady do betonu-principy a možnosti návrhu podle požadavku konkrétní aplikace. In: TERZIJSKI, Ivailo. *Vědecké spisy Vysokého učení technického v Brně*. Brno, 2011, s. 35. ISBN 978-80-214-4331-0. ISSN 1213-418X. (dostupné na: <http://www.vutium.vutbr.cz/tituly/pdf/ukazka/978-80-214-4331-0.pdf>)

- [42] Ultravysokohodnotný transportbeton TOPCRETE pro tenkostěnné konstrukce. In: *iMateriály* [online]. [cit. 2016-05-19]. (dostupné na: http://imaterialy.dumabyt.cz/rubriky/informace-vyrobcu/ultravysokohodnotny-transportbeton-topcrete-pro-tenkostenne-konstrukce_42943.html)
- [43] Ultra-High Performance Concrete: A State-Of-The-Art Report for The Bridge Community. In: *U.S. Department of Transportation: Federal Highway Administration* [online]. [cit. 2016-05-19]. (dostupné na: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/hpc/13060/006.cfm#c6a>)
- [44] První použití UHPC ve formě transportbetonu v ČR. In: *TBG Metrostav: Pro lepší stavění* [online]. [cit. 2016-05-19]. (dostupné na: http://www.tbg-metrostav.cz/fileadmin/user_upload/napsali_o_nas/clanky_ke_stazeni/057_059_MAT09.pdf)
- [45] ZAC Paris Rive Gauche (France): Mineral leaf decor for a vertical landscape. In: *Ductal* [online]. [cit. 2016-05-19]. (dostupné na: http://www.ductal.com/wps/portal/ductal/3_1_1_1-Detail?WCM_GLOBAL_CONTEXT=/wps/wcm/connectlib_ductal/Site_ductal/English_version/Page.Navigation.Architectural.BuildingEnvelopes.PerforatedFacades/KeyProjectDuctal%20Page/KeyProjectDuctal_1276026636950)
- [46] V Čelákovících byla otevřena unikátní lávka. In: *TBG Metrostav: Pro lepší stavění* [online]. [cit. 2016-05-19]. (dostupné na: http://www.tbg-metrostav.cz/fileadmin/user_upload/napsali_o_nas/clanky_ke_stazeni/UHPC_lavka.pdf)
- [47] PEŘINA, Jiří a Jan TICHÝ. Příprava experimentální stavby z UHPC. In: *Centrum pro efektivní a udržitelnou dopravní infrastrukturu* [online]. [cit. 2016-05-19]. (dostupné na: http://www.cesti.cz/technicke_listy/tl2013/2013_WP3_TL3_6b.pdf)
- [48] Skanska - vývoj receptur ultravysokohodnotného betonu pro použití v prefabrikaci. In: *Stavební noviny* [online]. [cit. 2016-05-19]. (dostupné na: <http://tvstav.cz/clanek/2140-skanska-vyvoj-receptur-ultravysokohodnotneho-betonu-pro-pouziti-v-prefabrikaci>)
- [49] Nejdelsí zavěšená lávka pro pěší a cyklisty v České republice. In: *iMateriály* [online]. [cit. 2016-05-19]. (dostupné na: http://imaterialy.dumabyt.cz/rubriky/zajimava-stavba/nejdelsi-zavesena-lavka-pro-pesi-a-cyklisty-v-ceske-republice_42856.html)
- [50] SCHMIDT, Michael a Thomas TEICHMANN. Ultra vysokohodnotný beton: základna udržitelných konstrukcí. Beton: Technologie, konstrukce, sanace. Praha: Česká betonářská společnost, 2008, č. 2, s. 12-14. ISSN 1213-3116
- [51] UHPC and Nanotech for construction materials. In: *ZKG International: Cement Lime Gypsum* [online]. [cit. 2016-05-19]. (dostupné na: http://www.zkg.de/en/artikel/zkg_2012-02_UHPC_and_Nanotech_for_construction_materials_1368521.html)
- [52] Výroba tenkostěnných fasádních panelů z bílého UHPC. In: *Stavební noviny* [online]. [cit. 2016-05-19]. (dostupné na: <http://tvstav.cz/clanek/2660-vyroba-tenkostennych-fasadnich-panelu-z-bileho-uhpc>)
- [53] PARK, Jong-Sup, Young JIN KIM, Jeong-Rae CHO a Se-Jin JEON. Early-Age Strength of Ultra-High Performance Concrete in Various Curing Conditions. In: *Materials*. 2015, s. 17. ISSN 1996-1944
- [54] Českomoravský cement a.s. *Technický list. Mokrý*. Vydání: 05/2011
- [55] Sika ViscoCrete – 225 Powder. *Technický list*. Vydání: 06/2014, verze č. 1.

- [56] Mikrosilika RW-Füller. In: *RW silicium GmbH* [online]. [cit. 2016-05-20]. (dostupné na: <http://www.silicium.de/produkte/mikrosilica/>)
- [57] Microsilica-Sioxid. In: *OFZ Istebné* [online]. [cit. 2016-05-20]. (dostupné na: <http://www.ofz.sk/sk/vyrobny-program/stavebne-vyrobky/microsilica-sioxid.html>)
- [58] Popílek. In: *ČEZ Energetické produkty* [online]. [cit. 2016-05-20]. (dostupné na: <http://www.cezep.cz/popilek.html?id=123>)
- [59] Eisenwerk Würth GmbH. *Korund, bílý korund*. Německo (dostupné na: <http://www.techconsult.cz/wp-content/uploads/sites/2/2016/02/Produktdatenblatt-Edelkorund-weiss-CZ.pdf>)
- [60] ČSN EN 196-1. *Metody zkoušení cementu – část 1: Stanovení pevnosti*. Praha: Český normalizační institut, 1996
- [61] ČSN EN 1015-3. *Zkušební metody malt pro zdivo – část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešacího stolku)*. Praha: Český normalizační institut, 2000
- [62] Myoung Sung Choi, Jung Soo Lee, Keum Seong Ryu, Kyung-Taek Koh, Seung Hee Kwon, Estimation of rheological properties of UHPC using mini slump test, *Construction and Building Materials*, Volume 106, 1 March 2016, Pages 632-639, ISSN 0950-0618, (dostupné na: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061815307777>)
- [63] ČSN EN 12390-3. *Zkoušení ztvrdlého betonu - část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. Praha: Český normalizační institut, 2009
- [64] ČSN EN 12390-7. *Zkoušení ztvrdlého betonu - část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu*. Praha: Český normalizační institut, 2009
- [65] ČSN EN 12390-5. *Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles*. Praha: Český normalizační institut, 2009
- [66] ČSN 73 1322 *Stanovení mrazuvzdornosti betonu*. Praha: Československý normalizační institut, 1968
- [67] ČSN 73 1326 *Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek*. Praha: Československý normalizační institut, 1985
- [68] ČSN 73 1324 *Stanovení obrusnosti betonu*. Praha: Československý normalizační institut, 1972
- [69] ČSN EN 12 390-8. *Zkoušení ztvrdlého betonu - část 8: Stanovení hloubky průsaku tlakovou vodou*. Praha: Český normalizační institut, 2009
- [70] ČSN EN 450-1. *Popílek do betonu – část 1: Definice, specifikace a kritéria shody*. Praha: Český normalizační institut, 2013

11 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

HSC – Vysokopevnostní beton (High Strenght Concrete)

HPC – Vysokohodnotný beton (High Performance Concrete)

VHPC – Velmi vysokohodnotný beton (Very High Performance Concrete)

UHSC – Ultra vysokopevnostní beton (Ultra High Strenght Concrete)

UHPC – Ultra vysokohodnotný beton (Ultra High Performance Concrete)

UHPRFC – Ultra vysokohodnotný beton vyztužený ocelovými vlákny (Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete)

RPC – Reaktivní jemnozrnný (práškový) beton či kompozit (Reactive Powder Concrete)

TT – tepelné ošetřování materiálu

PVA – Polyvinylalkohol (ve spojení polyvinylalkoholová vlákna)

CHRL – Chemické rozmrazovací látky

ITZ – Tranzitní zóna

SP – Superplastifikační přísada

REF – Referenční (ve spojení referenční beton či malta)

LED – Svítivá dioda (Light Emitting Diode)

ČSN – Československá norma (Česká soustava norem, Česká technická norma)

EN – Evropská norma

42,5 *R* – Minimální pevnost v tlaku 42,5 MPa po 28 dnech, *R* – rychlý počáteční nárůst pevností (Rapid)