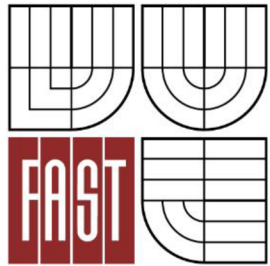




**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STAVEBNÍ**  
**ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ**

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

**VÝVOJ ULTRAVYSOCE PEVNOSTNÍCH (UHPC) A  
REAKTIVNÍCH PRÁŠKOVÝCH (RPC) KOMPOZITŮ**  
THE DEVELOPMENT OF ULTRA-HIGH STRENGTH (UHPC) AND REACTIVE POWDER (RPC)  
COMPOSITES

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**  
BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**LUKÁŠ RUNDT**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

prof. Ing. RUDOLF HELA, CSc.

BRNO 2016





# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

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

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>Student</b>	Lukáš Rundt
<b>Název</b>	Vývoj ultravysoce pevnostních (UHPC) a reaktivních práškových (RPC) kompozitů
<b>Vedoucí bakalářské práce</b>	prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
<b>Datum zadání bakalářské práce</b>	30. 11. 2015
<b>Datum odevzdání bakalářské práce</b>	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 zahraniční i tuzemské časopisy, sborníky z odborných symposií a konferencí, internetové zdroje odborných publikací z daného oboru.

Diplomové práce vypracované na ÚTHD FAST Brno v období 2009 – 2014

## **Zásady pro vypracování**

V současné betonářské praxi se již běžně používají vysokopevnostní betony (HSC) s pevnostmi kolem 110 MPa. Ovšem existuje i oblast tzv. ultravysoce pevnostních betonů, které se vyznačují pevnostmi kolem 160 MPa a tzv. reaktivní práškové kompozity s pevnostmi v tlaku až kolem 300 MPa. Tyto se zatím v praxi v ČR běžně nepoužívají. Laboratorně se již několik různých verzí otestovalo.

Cílem vaší bakalářské práce bude vypracovat podrobnou rešerši ze zahraničních i tuzemských odborných zdrojů vztahujících se k navrhování a výrobě UHPC A RPC. Hlavně se zaměřte na požadavky na vlastnosti a druhy vstupních surovin pro jejich výrobu, možnosti využívání jemnozrnných příměsí do betonu a superplastifikačních přísad. Vydefinujte požadavky a metodologii jejich navrhování, kritéria vlastností čerstvých a zatvrdlých. Popište principy a nutnost jejich ošetřování. U RPC se věnujte typu a granulometrii plniva, obsahu jemných podílů, typům cementů atd., případně nutnosti využití rozptýlené výztuže, typu vláken a jejich množství.

V experimentální části navrhněte receptury UHPC a RPC a laboratorně ověřte jejich pevnosti v tlaku ve stáří 7, 28 a 60 dnů.

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

.....  
prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.  
Vedoucí bakalářské práce



### **Abstrakt**

Bakalářská práce se zabývá ultravysoce pevnostními betony a reaktivními práškovými kompozity. V teoretické části jsou formou rešerše popsány vlastnosti vstupních surovin na jejich výrobu, zejména příměsí. Dále je studována metodologie návrhu, zpracování, typy ošetřování. Jsou popsány fyzikálně-mechanické a trvanlivostní vlastnosti v čerstvém i ztvrdlém stavu. V praktické části byly navrženy a připraveny 4 zkušební směsi a sledovaly se jejich reologické vlastnosti, pevnosti po 7 a 90 dnech v případě UHPC a pevnosti po 7, 28 a 60 dnech v případě RPC.

### **Klíčová slova**

Ultravysoce pevnostní beton, reaktivní práškový kompozit, jemnozrné příměsí, křemičité úlety, popílky, nanočástice, vlákna, ošetřování, pevnost v tlaku, trvanlivost

### **Abstract**

Bachelor's thesis studies ultra-high strength concrete and reactive powder composites. In theoretical part there are researched and described properties of raw materials used for their production, mainly additions. Design methodology, processing and types of curing are also studied. Physical mechanic and durability properties of fresh and hardened concrete are described. In practical part 4 mixtures were designed and prepared and their rheological properties, strengths after 7 and 90 days in case of UHPC and strengths after 7, 28 and 60 days in case of RPC were tested.

### **Keywords**

Ultra-high performance concrete, reactive powder composite, fine additions, silica fume, fly ash, nanoparticles, fibers, curing, compression strength, durability



**Bibliografická citace VŠKP:**

Lukáš Rundt, *Vývoj ultravysoce pevnostních (UHPC) a reaktivních práškových (RPC) kompozitů*. Brno, 2016. 64 s., 64 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

**Prohlášení:**

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

V Brně dne 27.5.2016

.....  
podpis autora

Lukáš Rundt



### **Poděkování:**

Děkuji svému vedoucímu práce prof. Ing. Rudolfu Helovi, CSc za odbornou pomoc s jejím vypracováním. Dále všem pracovníkům ústavu THD, zejména panu Klímovi za pomoc s praktickou částí práce. Děkuji také Bc. Adéle Halešové za zodpovídání všetečných dotazů.

## Obsah

A	Teoretická část .....	12
1	Úvod.....	12
2	Druhy a vlastnosti vstupních surovin.....	12
2.1	Cement.....	13
2.2	Křemičité úlety .....	14
2.2.1	Tranzitní zóna .....	14
2.3	Popílek.....	15
2.4	Granulovaná vysokopeční struska .....	16
2.5	Metakaolín .....	16
2.6	Mletý vápenec.....	17
2.7	Rýžové slupky (pluchy).....	17
2.8	Popel z paliva pro výrobu palmového oleje .....	19
2.9	Nanočástice.....	20
2.10	Kamenivo a fillery .....	21
2.11	Superplastifikátory .....	22
2.12	Vlákna .....	23
3	Požadavky a metodologie návrhu .....	25
4	Zpracování a ošetřování .....	27
4.1	Ošetřování.....	28
5	Vlastnosti UHPC.....	29
5.1	Konzistence .....	29
5.2	Pevnosti .....	31
5.3	Modul pružnosti a Poissonovo číslo.....	32
5.4	Duktilita.....	32
5.5	Tvrdost, odolnost vůči nárazu a výbuchu .....	33
5.6	Smrštění .....	34
5.7	Trvanlivost.....	35
5.7.1	Permeabilita .....	35
5.7.2	Mrazuvzdornost .....	36
5.7.3	Požární odolnost.....	37

6	RPC.....	38
6.1	Pojiva.....	38
6.2	Typ a granulometrie plniv, obsah jemných podílů.....	39
6.3	Rozptýlená výztuž, množství a typ vláken.....	40
6.4	Vybraná specifika RPC .....	40
B	Praktická část.....	42
7	Návrh receptur .....	42
7.1	Použité suroviny.....	42
7.1.1	Cement.....	42
7.1.2	Křemičité úlety .....	42
7.1.3	Nanosilika.....	42
7.1.4	Mletý vápenec .....	43
7.1.5	Kamenivo .....	43
7.1.6	Superplastifikační přísada .....	43
7.1.7	Voda .....	43
7.1.8	Rozptýlená výztuž .....	43
7.2	Návrh a výroba UHPC .....	43
7.3	Návrh a výroba RPC .....	45
8	Provedené zkoušky a výsledky.....	46
8.1	Objemová hmotnost v čerstvém stavu .....	46
8.2	Objemová hmotnost ve ztvrdlém stavu.....	46
8.3	Zkoušky konzistence .....	47
8.4	Pevnost v tlaku .....	48
8.5	Pevnost v tahu za ohybu.....	50
9	Závěr.....	51
10	Seznam použitých zdrojů.....	55
11	Seznam příloh .....	63
11.1	Seznam grafů .....	63
11.2	Seznam obrázků.....	63
11.3	Seznam tabulek.....	63
13	Seznam použitých zkratk .....	64

## **A Teoretická část**

### **1 Úvod**

Jako ultra vysokohodnotný beton (UHPC) nebo ultra vysokopevnostní beton (UHSC) je označován kompozitní materiál s pojivem na bázi portlandského cementu s pevností v tlaku vyšší než 150 MPa, vysokou duktilitou a výbornou trvanlivostí. Těchto vlastností je docíleno vysokým obsahem cementu, nízkým vodním součinitelem, použitím superplastifikátorů, příměsemi (silika, popílek, vysokopecní struska, metakaolín, ...) a rozptýlenou výztuží.

Reaktivní práškový kompozit (RPC) je materiál s cementovým pojivem, poprvé představený Richardem a Cheyrezym [1]. Pevnosti v tlaku mezi 200-800 MPa je dosahováno velmi hutnou strukturou s optimální granulometrií všech surovin, tepelným ošetřováním za zvýšeného tlaku před i během tuhnutí a tvrdnutí, vysokým podílem křemičitých úletů a rozptýlené výztuže.

V běžné praxi se UHPC zatím nepoužívá, ačkoli k některým realizacím došlo už i na českém území. Potenciál tento materiál má kromě své trvanlivosti a s tím spojené udržitelnosti a menší nutnosti oprav také díky možnosti vyrábět nosné prvky velmi tenkých průřezů, čímž se odlehčí celá konstrukce. Například US Federal High Way Administration testovala mostní nosník tloušťky 7,8 cm [2], lávka přes Labe v Čelákovících má tloušťku desky mostovky 6 cm [3].

### **2 Druhy a vlastnosti vstupních surovin**

Obyčejný hutný beton má obsah vzduchu kolem 2 %, u UHPC se snažíme o co největší hutnost, čímž se zvyšuje pevnost a trvanlivost. Vedle cementu volíme vysoké dávky velmi jemných příměsí, maximální zrno kameniva může být až 16 mm, běžně však do 8 mm [4]. Studie různých složení UHPC ukazuje typické dávky materiálů v tabulce 1 [5].



Tabulka 1 - Obvyklé složení UHPC dle [5]

Složky	Hmotnostní dávka [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	Dávka [%]
Cement	693-1114	22-35
Křemičitý úlet	116-273	5-13
Drcený křemen	0-208	0-9
Písek	733-1340	28-51
Vlákna	79-234	1-3
Superplastifikátor	14-40	1,4-4
Voda	140-240	14-24

## 2.1 Cement

Množství cementu se pohybuje mezi  $700$  a  $1100 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , je tedy přibližně třikrát vyšší než u obyčejného betonu. Je jedním z příčin vysoké ceny UHPC, většího vývoje hydratačního tepla a objemových změn při smršťování betonu. Používá se portlandský cement CEM I nebo směsný CEM II. Pevnostní třída je 42,5 nebo 52,5 [6]. Cement by měl obsahovat menší podíl  $\text{C}_3\text{A}$  kvůli menší spotřebě záměsové vody, kterou zvyšuje také jemnost mletí [8].

Díky velmi nízkému vodnímu součiniteli (typicky 14-20 %, ve srovnání s 40-50 % pro obyčejný beton) obsahuje UHPC méně vody než je potřeba na hydrataci všech zrn cementu (23-25 % z hmotnosti cementu [7]). Tím cementová zrna získávají také funkci plniva.

Autoři [8] zkoušeli směs portlandského cementu, mikrosiliky a velmi jemně mletého cementu pod označením Mikrodur® (firmy Dyckerhoff). Snahou bylo získat co nej hutnější matici. Velikost zrna použitého portlandského cementu bylo kolem  $35 \mu\text{m}$  a křemičitého úletu mezi  $0,1-1 \mu\text{m}$ . Jemně mletý cement tyto dvě složky pak doplňuje se svými třemi druhy F ( $d_{95} < 16 \mu\text{m}$ ), U ( $d_{95} < 9,5 \mu\text{m}$ ) a X ( $d_{95} < 6 \mu\text{m}$ ). Dohromady ještě s vysokopecní struskou jde o předem připravenou pojivovou směs, jejímiž výhodami jsou snadnější zacházení, kratší doba míchání a odpadají problémy s dávkováním a homogenitou.

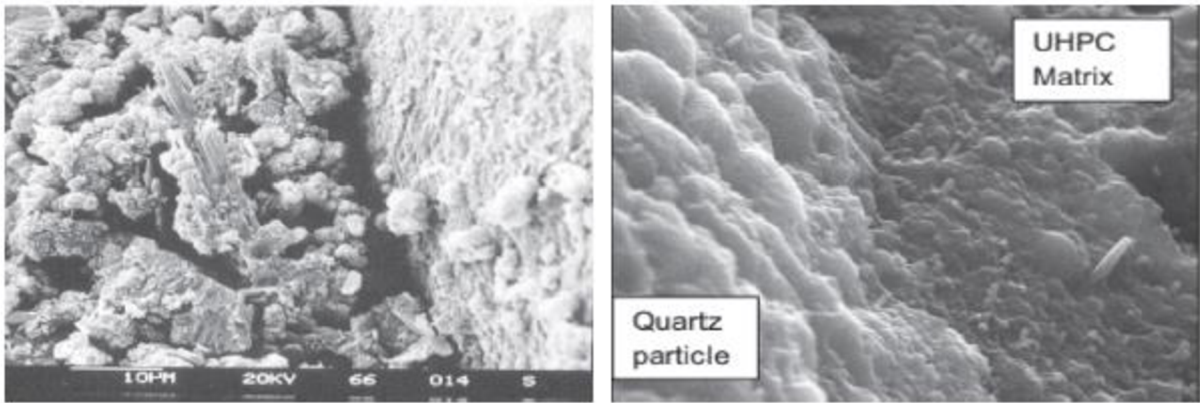
## 2.2 Křemičité úlety

Křemičité úlety (silika) jsou vedlejším produktem hutnických provozů při výrobě křemíkových kovů a ferosilicia. Dodávají se v prášku nebo suspenzi, do betonu se užívají už asi 80 let. Silika obsahuje 80-98 % amorfního  $\text{SiO}_2$ , jehož kulatá zrna o měrném povrchu až  $25\,000\text{ m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$  mají velice dobré pucolánové vlastnosti [7]. Dále obsahují  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (0,5-0,8 %),  $\text{MgO}$  (0,5-1,5 %),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (0,2-0,8 %) a další [12]. Podle různých autorů [1,6,9] je optimální dávka křemičitých úletů do UHPC mezi 20-35 %, je však velmi závislá na vodním součiniteli, kdy se s menším obsahem vody snižuje dávka siliky. Kulatá zrna mají za následek lepší zpracovatelnost, hlavně však vyplňují prostor mezi částicemi cementu a přispívají k hutnější struktuře.

Křemičité úlety reagují s volným vápnem, v malých množstvích obsaženém v suchém cementu, ale hlavně s hydroxidem vápenatým vznikajícím hydratací cementu za tvorby CSH gelů. Množství 18 % siliky z hmotnosti cementu stačí, aby zreagoval veškerý  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Ne všechna zrna cementu zhydratují, takže úletů stačí méně, na vyplnění mezer mezi cementovými zrny je však optimální dávka siliky až 30 %. V běžných betonech mají úlety také funkci stabilizační - omezují odlučování vody. S vyšším podílem siliky však roste spotřeba vody, což má v UHPC za důsledek nutné zvýšení dávky superplastifikátoru [10].

### 2.2.1 Tranzitní zóna

Tranzitní zóna (oblast mezi kamenivem a cementovým tmelem) v běžných betonech patří mezi nejslabší místa, protože obsahuje póry a krystaly  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  a ettringitu. Tloušťka vrstvy je 10-50  $\mu\text{m}$ . Zde hrají křemičité úlety významnou roli. Díky nízkému vodnímu součiniteli při výrobě UHPC a pucolánovým reakcím mezi hydroxidem vápenatým a minerálními příměsemi vzniká CSH gel a tranzitní zóna je pak téměř stejně hutná jako samotná matrice. To ukazuje obr. 1 [6].



Obrázek 1- Tranzitní zóna obyčejného betonu (vlevo) a UHPC (vpravo) [6]

### 2.3 Popílek

Popílky použitelné do betonu dělíme na létavé (vysokoteplotní) a fluidní. Létavé popílky jsou práškové látky vzniklé spalováním uhlí, zachycené na odlučovačích. Jako odpadní látka mají proměnlivé složení podle technického řešení spalovacího procesu, druhu uhlí a způsobu odlučování. Černé uhlí je výhodnější kvůli menší variabilitě vlastností a popílek obsahuje skelné kuličky, zatímco hnědouhelné popílky mají zrna nepravidelného tvaru (tím stoupá vodonáročnost). Popílky obsahují amorfní oxid křemičitý, křemen, cristobalit, tridymit, mullit a působí jako pucolány. Pucolanita se projevuje velmi pomalu [7].

Fluidní popílek se musí používat omezeně, protože obsahuje na rozdíl od létavého popílku také amorfní hlinitokřemičitou fázi, křemen, anhydrit, volné vápno a za přítomnosti vlhkosti také hydroxid vápenatý a karbonát vápenatý. Díky tomu po smíchání s vodou dochází ke tvorbě ettringitu, případně sádrovce, které jsou termodynamicky nestabilní [13].

Mnoho autorů zkoumalo využití popílků v UHPC, především jako náhradu nebo doplnění křemičitých úletů, například v kombinaci s granulovanou vysokopecní struskou [14]. Snížení podílu siliky vede k menší potřebě superplastifikátoru, popílky také snižují vývin hydratačního tepla a smrštění. Yazici a spol. [6] připravili RPC s vysokým podílem popílku a strusky o pevnosti 200 MPa při ošetřování za normální teploty, 234 MPa při ošetřování vodní párou a 250 MPa při autoklávování. Kombinace popílku a strusky zvyšuje také pevnost v ohybu a tvrdost. Došlo však k poklesu v modulu pružnosti, zejména při vyšší než 30% náhradě cementu.

Peng a spol. [15] zkoušeli ultra-jemný létavý popílek společně s práškem z ocelářské strusky a stanovili optimální poměr popílek/struskový prášek pro dosažení největší pevnosti 1,5. Směs s 18 % práškové strusky (steel slag powder), 12 % ultra-jemného létavého popílku, 15 % křemičitých úletů a 2 % ocelových vláken měla pevnost v tlaku 188 MPa a pevnost v ohybu 32 MPa po 3denní vodní lázni o teplotě 90 °C. Dobré mechanické vlastnosti vycházely převážně ze sekundární hydratace a plnicího účinku pojivových složek.

## 2.4 Granulovaná vysokopecní struska

Tato příměs má definici jako sklovitý materiál vznikající rychlým ochlazením vhodné složené struskovité taveniny vznikající při tavení železné rudy ve vysoké peci. Musí být sklovitá aspoň ze dvou třetin hmotnosti a musí vykazovat hydraulické vlastnosti při vhodné aktivaci. Jejím mletím na jemný prášek pak vzniká mletá granulovaná vysokopecní struska. Obsah MgO musí být do 18 %, sulfidů do 2 %, síranů do 2,5 %, chloridů do 0,1 %, ztráta žíháním do 3,0 %. Měrný povrch je  $275 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$  [16].

Struska se do betonu přimíchává již mnoho let a použití do UHPC bylo také vyzkoušeno. Ve studii [65] se zkoušel směsný cement druh II obsahující z 50 % portlandský cement a z 50 % vysokopecní strusku. Bylo dosaženo dobrých pevností a trvanlivosti ve srovnání s bílým portlandským cementem I a směsným cementem druh V.

## 2.5 Metakaolín

Kalcinací jílového minerálu kaolínu vzniká metakaolín. Teplota výpalu je mezi 650-800 °C a záleží na vstupním materiálu. Při vyšší teplotě vzniká mullit a křemen, které jsou inertní. Během výpalu se rozpadá krystalová mřížka únikem vody a vzniká amorfní oxid křemičitý a hlinitý, proto má metakaolín pucolánové vlastnosti a velký měrný povrch. Při použití do betonu jako náhrada cementu vylepšuje následující vlastnosti: počáteční pevnosti, pevnost v tlaku, v ohybu, trvanlivost, mrazuvzdornost, odolnost proti alkalicko-křemičité reakci a sulfátům, snižuje autogenní smršťování [18].

Metakaolín použitý ve studii [19] pod obchodním názvem Mefisto L05 (České lupkové závody a.s., Nové Strašecí, Česká republika) měl 50 % částic velikosti do 4  $\mu\text{m}$ , 90 % částic do 11  $\mu\text{m}$ , měrný povrch  $12\,700 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$  a chemické složení podle tabulky 2.

Tabulka 2 - Chemické složení metakaolinu Mefisto L05 [19]

Složka	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	CaO
Obsah [%]	52,1	43,4	1,87	0,85	0,75	0,66	0,17

Se vzrůstajícím obsahem metakaolinu v UHPC, kde nahrazoval křemičité úlety, klesala pevnost v tlaku a lehce stoupala pevnost v ohybu. Většími výhodami jsou však dostupnost, nižší cena a díky své bílé barvě má metakaolín i estetické přednosti [6].

## 2.6 Mletý vápenec

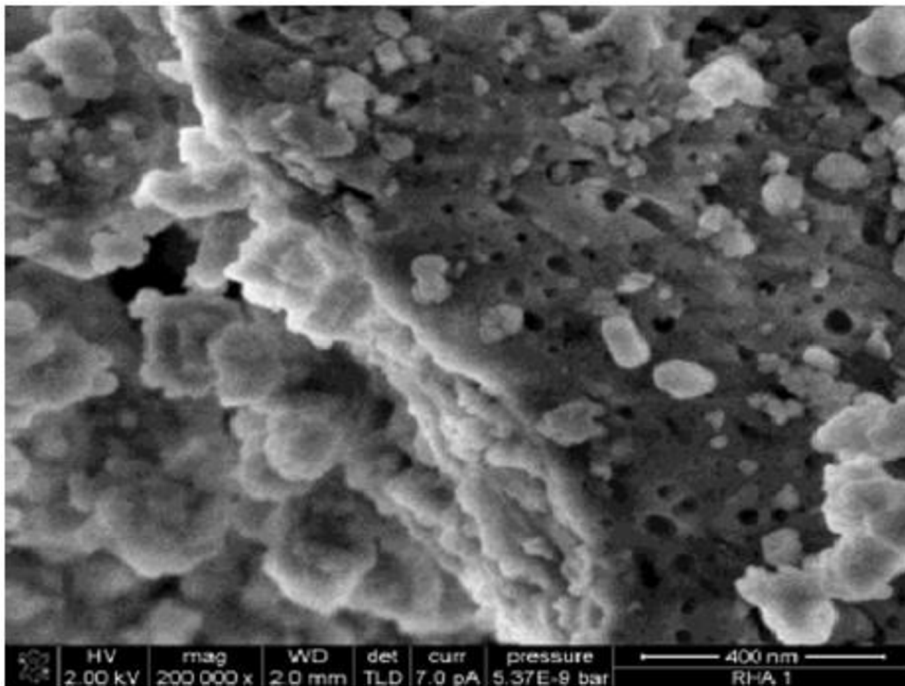
Mletý drcený vápenec se používá v cementářství, ale také jako inertní příměs do betonů. Určující je jemnost mletí a granulometrie. Vápenec zhutňuje strukturu cementové pasty zaplněním prostoru mezi zrny cementu a dalšími složkami, čím se zvyšuje pevnost a tekutost [6]. Některé studie [20] naznačují, že vápenec není úplně inertní. Uhličité ionty působí na C<sub>3</sub>A a C<sub>4</sub>AF obsažené v portlandském cementu za vzniku karbo-aluminátů.

## 2.7 Rýžové slupky (pluchy)

Rýžové slupky (pluchy) jsou zemědělský odpad. Po kompletním spálení za řízených podmínek dostaneme prach (rice husk ash, RHA), který obsahuje mezi 90-96 % amorfního oxidu křemičitého, má tedy purolánové vlastnosti. Typická velikost částic je 5-10 μm s mimořádným měrným povrchem i více než 250 m<sup>2</sup>·g<sup>-1</sup>, který vyplývá z pórovité struktury, viz obr. 2 [6].

Rýžových slupek je hojně například ve Vietnamu, Indii, Brazílii nebo Číně. Vzhledem k jejich množství jsou spalovány, což má nepříznivý vliv na životní prostředí, jejich možné použití jako náhrada jemných podílů v betonu je tedy velmi žádoucí.

Betonové vzorky s obsahem RHA o velikostech mezi 3,6 a 9 μm dosáhly pevností v tlaku 150 MPa při normálním ošetřování. Nejvyšších pevností (180 MPa za 28 dní a 210 MPa za 91 dní) dosáhl UHPC s prachem velikosti 3,6 μm, tedy nejmenší zkoušené [6]. Autoři [21] zkoumali nahrazení siliky v UHPC mletou granulovanou vysokopecní struskou a prachem z rýžových slupek, kdy nejvyšší pevnosti dosáhla směs 65 % cementu, 15 % RHA a 20 % strusky. Zkoušely se také různé doby mletí RHA, jeho vlastnosti shrnuje tabulka 3.



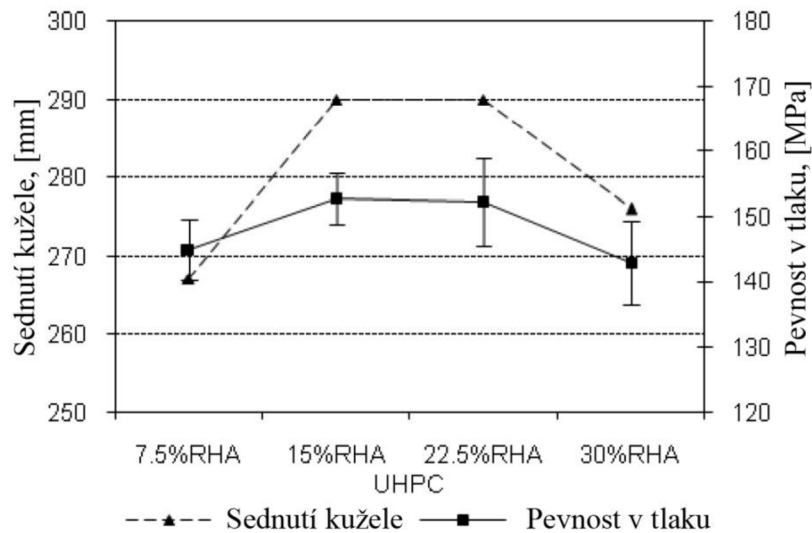
Obrázek 2 - Snímek prachu z rýžových slupek z elektronového mikroskopu [6]

Tabulka 3 – Vlastnosti RHA [21]

	RHA-45	RHA-120	RHA-240	RHA-360	RHA-540
Doba mletí [min]	45	120	240	360	540
Střední velikost částic [ $\mu\text{m}$ ]	9,65	7,41	6,22	5,78	5,34
Měrný povrch (BET) [ $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ]	59,42	52,28	47,78	44,02	43,69

UHPC s RHA-45 vyžadoval 20 minut míchání, s delší dobou mletí klesala potřebná doba míchání a zvyšovala se tekutost směsi. Směs s RHA-360 dosáhla nejvyšší pevnosti v tlaku (172 MPa), pevnosti betonu s RHA-120 a RHA-240 byly podobné, z ekonomického hlediska je tedy velikost částic 7,41  $\mu\text{m}$  nejvýhodnější. Zkoušeny byly i směsi s různým množstvím RHA bez strusky, viz graf 1. Zpracovatelnost i pevnost v tlaku do určitého množství RHA stoupají, při 30% náhradě cementu už jsou nižší. Při použití ocelových drátků délky 9 mm a průměru 0,15 mm byla pevnost v tlaku směsí UHPC-15%RHA a UHPC-22,5%RHA shodných 169,5 MPa. Optimální množství RHA ve zkušebních směsích tedy bylo 22,5 %.

Různé kombinace RHA a křemičitých úletů byly zkoušeny, kdy se dosáhlo vyšší pevnosti v tlaku u směsi obsahující RHA než u směsi bez něj. Možné vysvětlení je lepší zhutnění struktury (velikost částic prachu je mezi velikostí zrn cementu a siliky) a také pórovitá struktura RHA schopná do sebe nasáknout vodu a opět ji uvolnit, čím přispívá k lepší hydrataci cementu. Směs s 20 % létavého popílku a 10 % RHA zlepšovala kromě pevnosti také samozhutnitelnost betonu [6].



Graf 1 - Vliv obsahu RHA na sednutí kužele a pevnost v tlaku [21]

## 2.8 Popel z paliva pro výrobu palmového oleje

Popel z paliva, které se používá pro výrobu palmového oleje, (Palm oil fuel ash, POFA) je vedlejší produkt spalování ovocných zbytků, zrn, skořápek a vláken. Spalováním těchto surovin vzniká elektřina na pohon mlýnů, které vyrábějí palmový olej. Vzhledem k velké produkci tohoto oleje vzniká také množství popela, který se z větší části ukládá na skládky. To může v budoucnu způsobovat ekologické problémy, zejména v Malajsii, Thajsku a Indonésii [46].

Bylo zjištěno, že POFA má pucolánové vlastnosti, v betonu přispívá ke zpracovatelnosti, odolnosti vůči chloridům, kyselému prostředí a redukuje vývin hydratačního tepla, podobně jako vysokopecní popílek. Autoři [49] zkoušeli modifikovaný proces mletí a tepelného ošetřování, které výrazně snižuje ztrátu žíháním z 21,60 % na 2,53 %. S tímto popelem dosáhli pevností v tlaku za 28 dní 95 MPa při 60% náhradě cementu a 104 MPa při 40%. Použití v UHPC bylo zkoušeno v [46]. Modifikovaný popel měl střední velikost zrna 2,06  $\mu\text{m}$ , měrný povrch 177,50  $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$  a měrnou hmotnost 2550  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ .

Čím vyšší obsah popelu, tím větší bylo rozlítí. To je pravděpodobně způsobeno tím, že část křemičitých úletů byla nahrazena popelem, takže se neabsorbovalo tolik superplastifikační přísady na povrchu siliky. Druhým vysvětlením je snížení celkového hmotnostního podílu pojiv, protože cement byl nahrazen popelem objemově. Tím se zvýšil vodní součinitel. Pro zvýšení pevností v tlaku vzhledem k referenční směsi bylo doporučeno nahradit cement popelem do 25 %. Směs s  $360,25 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  cementu,  $214,25 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  siliky a  $290,52 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  popelu dosáhla pevnosti v tlaku 158,3 MPa a pevnosti v tahu za ohybu 46,7 MPa za 90 dní. Z ekologického i ekonomického hlediska má tedy tato příměs význam.

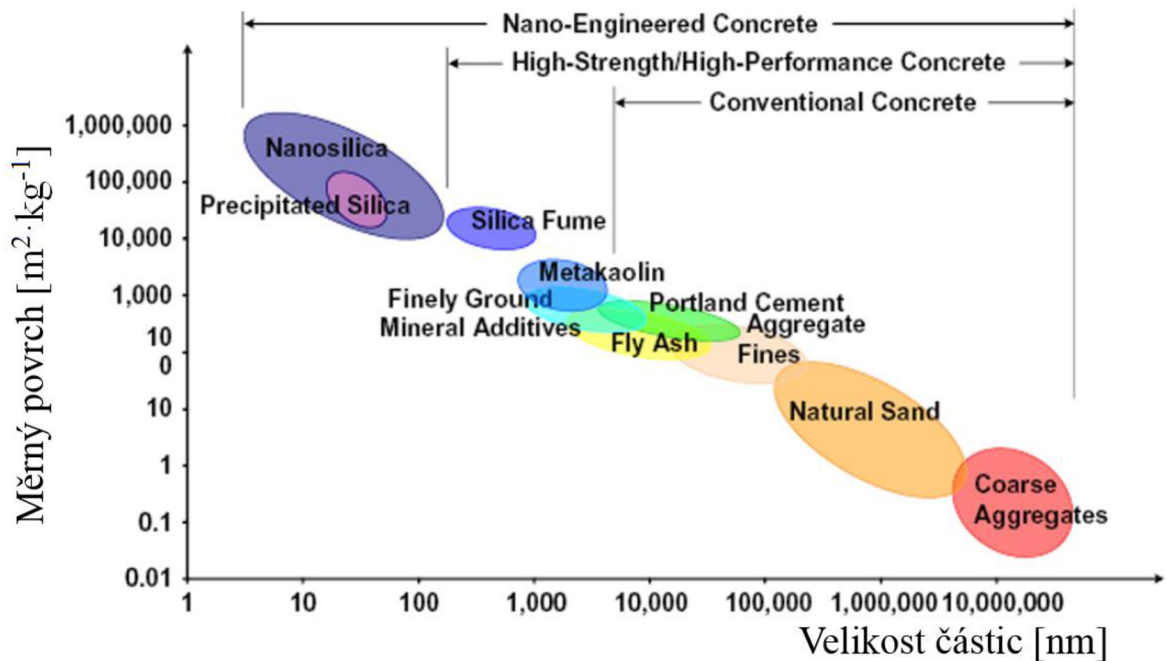
## 2.9 Nanočástice

Použití nanočástic v UHPC je zkoumáno. Jde například o nanosiliku (nano-SiO<sub>2</sub>), nano-uhličitan vápenatý (nano-CaCO<sub>3</sub>), nano-oxid hlinitý (nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), nano-oxid titaničitý (nano-TiO<sub>2</sub>) a nano-oxid železitý (nano-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Mezi jejich vlastnosti patří velký měrný povrch. Srovnání velikostí jejich částic s dalšími složkami v betonu ukazuje obr. 3.

Nanočástice přispívají k hydrataci cementu díky své vysoké reaktivitě, mohou působit jako nano-výztuž a jako filler, kdy zhutňují mikrostrukturu a tranzitní zónu, čímž klesá pórovitost. Výzkum prokázal, že přidání nano-SiO<sub>2</sub> nebo nano-CaCO<sub>3</sub> mělo za následek zvýšení pevnosti v tlaku a v ohybu. Přidání 5 % nanosiliky z hmotnosti cementu snížilo množství kapilárních pórů o 35 % ve srovnání s kontrolní směsí. Beton s obsahem nano-TiO<sub>2</sub> díky fotokatalýze získává samoregenerační vlastnosti. [6]

Nanosilika má vyšší čistotu, větší množství nekystalického oxidu křemičitého, vyšší pucolánovou aktivitu než silika, zvyšují množství hydratačních produktů, čímž klesá množství portlanditu. Přidáním nanosiliky se zhoršuje konzistence a vodonáročnost, zlepšují se pevnosti, zejména v raném stádiu. Optimální množství na zachování přijatelných hodnot rozlítí a zároveň co nejvyšších pevností se ukázalo 3 % z množství cementu.





Obrázek 3 - Velikost částic a jejich měrný povrch složek betonu [6]

Dle dvou hlavních metod výroby rozlišujeme nanosiliku pyrogenní a ve formě solu. Pyrogenní nanosilika v práškové formě s měrným povrchem  $50\text{-}500\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$  je výsledkem reakce tetrachloridu křemičitého, vodíku a kyslíku ve vysokoteplotních pecích. Monodisperzní silika ve formě solu jsou disperze amorfního oxidu křemičitého ve vodě a vyrábějí se nukleací a růstem kyseliny křemičité ve vodním médiu.

Pyrogenní nanosilika je rozdílná v tom, že částice aglomerují – aglomeráty mohou mít délku až 100 mikrometrů, jejich pucolánová reaktivita se tedy liší. Ve studii [11], kde se zkoušela pyrogenní nanosilika Aerosil 200 a nanosilika ve formě solu Levasil 200/30, vykázal Aerosil 200 rychlejší pucolánovou reakci jak v nanosilika-vápencových, tak v cementových pastách. Obecným problémem nanočástic je jejich efektivní disperze v betonové směsi [58].

## 2.10 Kamenivo a fillery

V běžném betonu patří k nejslabším místům matrice tranzitní zóna, u UHPC to bývá kamenivo. Je tedy nutné volit kameniva tvrdá, například gabro, žulu, diabas nebo čedič [7]. Největší velikost zrna bývá 16 mm, pro pevnosti nad 150 MPa se však doporučuje velikost snižovat. Větší frakce zhoršují homogenizaci směsi, na druhou stranu patří k nejlevnějším složkám UHPC, z ekonomického a ekologického hlediska je tedy snaha využívat ho v co nejvyšší míře.

Autoři studie [28] zkoušeli směsi s proměnlivým množstvím pojivových složek (cement, vysokopecní struska, křemičitý úlet a vápenná moučka), kde jako hrubé kamenivo byl použit drcený vápenec s maximální velikostí zrna 20 mm. Složení směsi UHPC, která vykázala sednutí kužele 268 mm a pevnost v tlaku 175,8 MPa za 90 dní, ukazuje tabulka č. 4 (C – cement, KÚ – křemičitý úlet, S – vysokopecní struska, VM – vápenná moučka, w/p – podíl vody k pojivu, SP – superplastifikační přísada, DK – drobné kamenivo a HK – hrubé kamenivo). Všechny suroviny jsou běžně dostupné.

Tabulka 4 - Složení UHPC s hrubým kamenivem [28]

Pojivo	C	KÚ	S	VM	w/p	Voda	SP	DK	HK
[kg·m <sup>-3</sup> ]	[%]	[%]	[%]	[%]		[kg·m <sup>-3</sup> ]	[kg·m <sup>-3</sup> ]	[kg·m <sup>-3</sup> ]	[kg·m <sup>-3</sup> ]
900	50	10	20	20	0,16	144	18	616	923

Vápenec byl použit také v [27] a to ve frakcích 5-10 a 10-20 mm. Jako jemné kamenivo posloužil umělý písek, z příměsí křemičitý úlet, vysokopecní struska a popílek. UHPC dosáhl pevnosti v tlaku 150 MPa a také výborné zpracovatelnosti, kdy sednutí kužele bylo 260 mm a rozlité kužele 635 mm hodinu po zamíchání, beton je tedy vhodný také k čerpání.

Jako jemné podíly se používají do UHPC například křemenné moučky nebo další zbytky po drcení kameniv. Další možností je cihelný prach vznikající jako odpad při broušení cihelných výrobků. Autoři [29] zkoumali použití měděné strusky (odpad vznikající při zpracování mědi), kterou tvoří černé skelné částice velikostí podobných jako písek. UHPC, kde jemné kamenivo zcela nahradila měděná struska, dosáhl za 28 dní pevnosti v tlaku 143,8 MPa bez tepelného ošetřování.

## 2.11 Superplastifikátory

Superplastifikační (silně vodu redukující) přísady otevřely cestu nejen samozhutnitelným betonům. UHPC se bez jejich použití neobejde, protože nízký vodní součinitel a jemné příměsí zhoršují, až znemožňují zpracovatelnost. Dávka superplastifikátoru v UHPC může být až patnáctkrát vyšší než u běžných betonů [24]. Superplastifikátory na bázi polykarboxylátů se ukázaly jako nejefektivnější. Ty jsou tvořeny hlavním řetězcem polyakrylátů nebo polymetakrylátů a vedlejším řetězcem polyethylenoxidů nebo polypropylenoxidů (případně jejich směsi). Pracují na principu sterického odpuzování [22].

Je důležité zvolit správný typ superplastifikátoru, jeho dávku a způsob přidání do směsi s ohledem na pojivové složky v UHPC. Ukázalo se, že délka vedlejšího řetězce ovlivňuje zpomalování tuhnutí, zatímco jejich hustota působí na zpracovatelnost [6]. Kombinace 2 polykarboxylátů zajistila lepší disperzi cementu a siliky [23]. Superplastifikátor na bázi allyl etheru se adsorbuje přednostně na zrnech křemičitých úletů, což se vysvětluje tím, že poloha karboxylátových skupin lépe odpovídá vzdálenosti mezi  $\text{Ca}^{2+}$  ionty na povrchu siliky. Podobně metakrylát interaguje více se zrny hydratujícího cementu. Navzájem se oba polykarboxyláty nevyklučují, naopak přispívají k hustší polymerní vrstvě. Dalším důsledkem je i celkové snížení dávky superplastifikátoru.

Studie [24] porovnávala vliv 8 typů polykarboxylátů na vlastnosti UHPC v čerstvém i zatvrdnutém stavu. Lišily se zejména doby tuhnutí a počáteční pevnosti. Aplikace UHPC (prefabrikace, transport v autodomíchavači apod.) tedy také rozhoduje o typu použitého superplastifikátoru. Nejvyšších počátečních pevností dosahovaly polyakryláty s dlouhým vedlejším řetězcem.

Článek [25] se věnoval způsobu přidání superplastifikátoru do směsi. Porovnal 3 způsoby přimíchání: přímo se záměsovou vodou, dvou-stupňový způsob (první část se přidává spolu se záměsovou vodou nebo hned po ní, druhá část se přidává později) a opožděný způsob (přidání ve specifikovaném čase po přidání záměsové vody. Ve vysokopevnostním betonu se superplastifikátory na bázi SNF nebo SMF má opožděný způsob přidání pozitivní vliv na dispergační účinek, do cementových past se pak superplastifikační přísada přidává optimálně po 10-15 minutách po přilítí vody [26]. U UHPC pozdější přidání druhé části superplastifikátoru při dvou-stupňovém způsobu mělo za následek vyšší tekutost směsi a tím menší obsah vzduchu. O způsobu přimíchání však rozhoduje především reaktivita cementu, čím pomaleji hydratuje, tím menší mají jednotlivé způsoby efekt.

## 2.12 Vlákna

UHPC obsahující rozptýlenou výztuž – vlákna – se označuje jako Ultra High-Performance Fibre-Reinforced Concrete. UHPC je křehký materiál, proto se do směsi tato krátká vlákna přidávají, aby se zlepšila pevnost v tahu, houževnatost, tvrdost a odolnost proti nárazu. Výztuž zabraňuje iniciaci a propagaci trhlin, protože přes rozhraní mezi vlákny a betonem přenáší napětí [6]. Druhy používaných vláken a jejich

vlastnosti ukazuje tabulka č. 5. Nejčastěji používaná vlákna jsou ocelová kvůli vysokým pevnostem. Jejich obsah se v UHPC pohybuje mezi 0,5 a 3 % (objemovými).

*Tabulka 5 - Typ a vlastnosti vláken [6]*

<b>Typ</b>	<b>Průměr [μm]</b>	<b>Pevnost v tahu [MPa]</b>	<b>Modul pružnosti [Gpa]</b>
Akrylát	5-17	800-950	16-23
Polyester	10-80	735-1200	6-18
Polyetylen	800-1000	200-300	5-6
Nylon	23	900-960	4,5-5,2
PVA	1,30	600-2500	5-50
Aramid	10-12	2500-3100	60-120
Skelná vata	2,7	490-770	70-119
Sklo	10-16	1400-2500	70-80
Uhlík	7-18	1800-4000	200-480
Ocel	250-1000	280-2800	200-250

Vysoký obsah vláken vede k horší zpracovatelnosti UHPC a vysoké ceně, protože 1 % z objemu může být dražší než beton samotný. Ve studii [43] se zkoušely kombinace makro vláken (hladká, zkroucená a zahnutá) a mikro vláken (jen hladká). Obsah makro vláken byl zvolen 1 %, jejich délka se měnila od 10 do 60 mm, tloušťka od 0,2 do 0,7 mm, množství mikro vláken bylo mezi 0 a 1,5 %, jejich délka od 5 do 13 mm a tloušťka mezi 0,16 a 0,25 mm. Mikro vlákna měla pozitivní efekt na tahová zpevnění, chování po vzniku trhlin a na snížení počtu trhlin. Z hlediska deformační kapacity měla nejlepší výsledky zkroucená vlákna, pak zahnutá a nejhůrší hladká.

Užití skelných vláken bylo zkoumáno v [40] jako složka bílého UHPC určeného především pro netypické architektonické prvky (například tenké perforované fasádní panely). Skelná vlákna jsou levnější než ocelová a nezanechávají stopy po rzi na povrchu. Skelné vlákno je tvořeno pramenem stovek mikrofilamentů průměru přibližně 14 μm. Mikrofilamenty uvnitř pramene vykazují menší soudržnost s betonem, protože nejsou spojeny s cementovou maticí. Bylo však ukázáno, že hydratační produkty prostupují místy mezi mikrofilamenty a rozdílné soudržnosti se vyrovnávají.

Problémem je rovnoměrná disperze vláken v betonu, tedy zabránění tvorbě shluků a dosažení správné orientace všech vláken, které se pomocí výpočetní tomografie věnovali ve zprávě [41]. Byla navržena samozhutnitelná směs UHPFRC a sledovaly se trhliny, dutiny a disperze vláken ve vztahu ke směru ukládání, typu a velikosti vláken. U všech kvádrových vzorků hustě vyztužených klasickou tyčovou výztuží bylo pozorováno rovnoměrné rozložení vláken, nevznikaly shluky ani nedocházelo k nápadnému natočení vláken v některém směru. Jen při horizontálním ukládání byla zaznamenána nevýznamná tendence k natočení vláken ve svislém směru. Mezi chováním jednotlivých vláken - 0,4x12,5 mm nebo 0,16x6 mm - nebyl vidět výrazný rozdíl.

### 3 Požadavky a metodologie návrhu

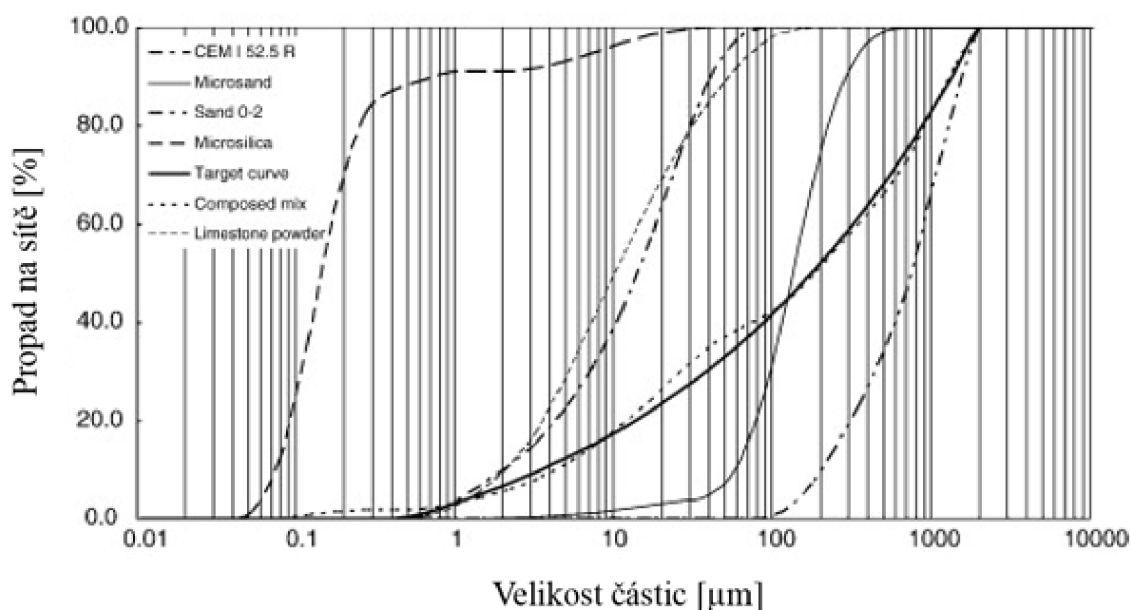
Pro dosažení dobrých pevnostních i trvanlivostních vlastností betonu je třeba optimálního vyplnění prostoru zrnitými součástmi. De Larrard a Sedran v práci [31] popsali teoretický model lineární hustoty zaplnění (Linear Packing Density Model, LPDM), z kterého pak vycházely další modely: Model pevné suspenze (Solid Suspension Model, SSM) a model kompresního zaplnění (Compressive Packing Model, CPM).

LPDM popisuje interakci mezi zrny daných velikostí. Vylepšení tohoto modelu především pomocí konceptu virtuálního zaplnění (teoretické maximální zaplnění prostoru, kdy jsou částice přesně vedle sebe) vedlo k modelu SSM. V modelu CPM De Larrard a Sedran představili index zhutnění. Je to poměr mezi virtuálním a skutečným zaplněním. UHPC však obsahuje velký podíl jemných příměsí a jejich kombinací, u kterých je komplikované tento podíl zaplnění zjistit.

Jiný přístup zvolili autoři [30], který využívá distribuci zrn pomocí křivky zrnitosti. Jemné částice zde mohou být zakomponovány s menší náročností než v dříve zmíněných modelech. Principem je upravená rovnice (1) Andreasena a Andersena, která vychází z Fullerovy křivky zrnitosti a zahrnuje velikost nejmenší částice:

$$P(D) = \frac{D^q - D_{min}^q}{D_{max}^q - D_{min}^q} \quad (1)$$

Kde  $P(D)$  je podíl částic menších než  $D$ ,  $D$  je velikost částice,  $D_{\max}$  je největší velikost částic,  $D_{\min}$  nejmenší velikost částice a  $q$  je modul distribuce, který vyjadřuje poměr mezi jemným a hrubým kamenivem. Modul  $q > 0,5$  vychází pro receptury s větším podílem hrubého kameniva, pro SCC se doporučuje 0,22-0,25. Podíly jednotlivých složek se upravují, dokud se nedosáhne optimální shody s funkcí (1). Využívá se algoritmus na principu metody nejmenších čtverců, aby rozdíl mezi zbytky na sítě jednotlivých frakcí všech materiálů a teoretickou křivkou byl co nejmenší.



Obrázek 4 - Křivky zrnitosti materiálů, teoretická a návrhová křivka zrnitosti [30]

Obrázek 4 ukazuje křivky zrnitosti složek UHPC, teoretickou křivku podle rovnice (1) a návrhovou křivku zrnitosti výsledné směsi. S touto metodou se podařilo připravit UHPC s množstvím cementu  $650 \text{ kg/m}^3$  a pevností v tlaku 150 MPa.

Autoři [32] využili při návrhu model CPM a kromě velikosti částic složek, jejich hustoty, teoretického zaplnění, příspěví cementu na konečné pevnosti a nasycení chemické přísady se započítával i vliv ukládání směsi. V literatuře se však obvykle návrh složení UHPC neuvádí a vychází z experimentů nebo jiných studií. Některé receptury jsou také poměrně utajované.

## 4 Zpracování a ošetřování

Během míchání složek betonu musí dojít k homogenizaci směsi a k maximálně možnému vyloučení vzduchových pórů. Byly zkoušeny speciální postupy, jak tohoto dosáhnout, například vakuové míchání nebo aplikace tlaku před a během tuhnutí. Je však žádoucí tyto postupy omezovat, protože kromě potřeby speciálních technologických zařízení zvyšují pracnost i cenu ve srovnání s běžnými postupy u betonu obyčejných pevností. Dávkování složek se neliší od konvenčního betonu, nejdřív se dávkuje pojiva, plniva, pak voda se superplastifikační přísadou (případně dalšími přísadami) a nakonec rozptýlená výztuž (v případě použití mikrovláken jsou nejdřív přidána tato, poté ostatní vlákna). Kvůli velkému obsahu jemných podílů se může zvyšovat potřebný čas míchání [6].

Autoři [33] se zabývali vakuovým mícháním jako možnou alternativou vibrování, které může způsobit zhoršenou orientaci až sedimentaci rozptýlené výztuže. Využili 2 míchaček různých objemů (5 litrů pro maltu a 75 litrů pro beton), které umožňují regulovat tlak vzduchu. Tlaky byly vyzkoušeny 3: 101,3 kPa, 50 kPa a 5 kPa. Vakuování probíhalo na konci míchání a trvalo 70 sekund během pomalé fáze míchání. Zatímco v maltě došlo k výrazné redukci vzduchových pórů (především velikosti 0,06 až 1 mm) a tím ke zvýšení pevnosti v tlaku o 10 MPa, v případě většího objemu míchačky je rozdíl v pevnostech v tlaku u UHPC minimální. Zvyšuje se však modul pružnosti a pevnost v příčném tahu.

Ve studii [34] byla zkoušena aplikace vnějšího tlaku na válce vyrobené z RPC hned po nalití do forem. Působením tlaku na tekutou směs dochází k eliminaci pórů, volné vody a k přiblížení částic, důsledkem jsou mimo jiné lepší trvanlivostní charakteristiky a soudržnost s rozptýlenou výztuží. Velikosti vnějšího tlaku 100 MPa odpovídala pevnost v tlaku vzorků 475 MPa, k odstranění pórů však stačí tlak nižší. Stejní autoři pak zkoumali v [35] vliv velikosti vnějšího tlaku, který se měnil od 5 MPa do 25 MPa, na tvrdost a pevnost v tahu za ohybu kvádrů z RPC. Pevnost v tahu za ohybu vzrostla o 34 % a tvrdost třikrát ve srovnání s referenční směsí bez aplikace tlaku. Zvýšení tlaku z 5 MPa na 25 MPa nemělo výrazný vliv na vlastnosti ani na strukturu materiálu.

## 4.1 Ošetřování

Po odformování betonu je potřeba jej ošetřovat, aby došlo k dostatečné hydrataci cementu a aby se zamezilo ztrátě vlhkosti, která může způsobit smršťovací trhlinky, deformace a zhoršení trvanlivosti. U UHPC rozeznáváme 3 hlavní metody, podle prostředí, ve kterém tuhne a tvrdne: za běžné teploty (20°C a uložení ve vodě nebo na vzduchu), za zvýšené teploty (nejčastěji 90°C) nebo v autoklávu [6]. Zvýšená teplota urychluje pucolánovou reakci mezi křemičitými úlety a  $\text{Ca(OH)}_2$  [38].

Vhodný způsob ošetřování závisí na složení UHPC, jak ukázala studie [37], která se zabývala vlivem rozdílných složek a typů ošetřování na vlastnosti. Ošetřování při teplotě 75°C mělo za následek menší pevnosti po 28 dnech než při teplotě 90°C, pevnosti po 90 dnech se však už lišily méně, vzhledem k pokračující reakci mezi portlanditem a křemičitými úlety. Pevností 200 MPa bylo dosaženo po 8 hodinách při teplotě 90°C, výrazně se tedy redukuje čas tvrdnutí, což je výhodné pro prefabrikaci. Směs obsahující strusku vyžadovala buď déle trvající uložení před teplotním ošetřováním (3 dny) nebo delší čas ošetřování při 90°C (48 hodin) pro dosažení podobných pevností jako směsi s popílkem nebo jen s cementem. UHPC, který byl 8 hodin autoklávován (při teplotě 150°C a tlaku 0,5 MPa), dosáhl pevností v tlaku po 28 dnech 260 MPa.

Autoři [36] zkoumali vliv doby uložení před teplotním ošetřováním. Vzorky byly vystaveny vodní páře o teplotě 90°C po dobu 48 hodin a to buď přímo po odformování (po 70 hodinách), po 10 nebo po 24 dnech. Referenční beton, který tvrdnul na vzduchu, dosáhl pevnosti v tlaku 165 MPa, tepelně ošetřované UHPC vykázaly pevnost v průměru o 30 MPa vyšší. Mezi jednotlivými typy ošetření však byl rozdíl pevností minimální, to poskytuje flexibilitu při prefabrikaci, kdy výrobce může najednou vyrobit více výrobků, ale ošetřovat je postupně.

Graybeal [39] zkoušel vliv nižší i vyšší teploty na počáteční pevnosti malt z UHPC, které slouží jako spoje mezi prefabrikovanými dílci mostních konstrukcí. Ze zrychlení tuhnutí a tvrdnutí vyplývá i rychlejší výstavba, tepelné ošetřování může být tedy ekonomicky výhodné. Vzorky z hotových maltových směsí byly vystaveny teplotám 10°C, 23°C a 41°C. Ukázalo se, že čas, kdy dochází u malt k rychlému nárůstu pevností, je nepřímo úměrně závislý na teplotě.



Rychlý nárůst pevností zkoumali i autoři [42] se zaměřením na betonáž in situ. Stejně jako u zpracování UHPC, ani ošetřování by nemělo vyžadovat speciální technologické postupy, které jsou neekonomické. Minimální doba ošetřování pro dosažení sedmidenních pevností v tlaku 180 MPa byla 2 dny při teplotě 60°C ve vlhkém prostředí. Při teplotě 40°C bylo vyžadováno minimálně 4 dnů ošetřování, avšak v některých zemích k dosažení této teploty není potřeba žádných dodatečných zařízení, stačí UHPC překrýt tlustší, těsnou fólií.

## **5 Vlastnosti UHPC**

Mezi vlastnosti UHPC zkoušené v čerstvém stavu patří především konzistence, dále například objemová hmotnost. Pevnostní charakteristiky, objemové změny (smrštění) a trvanlivost (mrazuvzdornost, odolnost proti pronikání látek a vysokým teplotám) jsou pak vlastnosti stanovené ve ztvrdlém stavu.

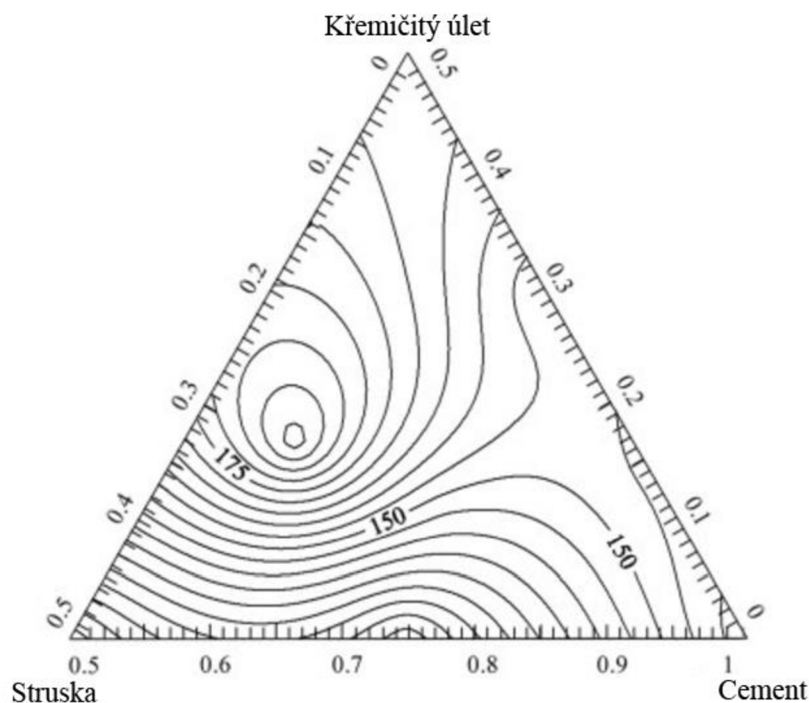
### **5.1 Konzistence**

Zpracovatelnost betonu určuje způsob ukládání, jeho čerpatelnost a nutnost zhutňování. Konzistenci ovlivňuje každá složka UHPC, zejména pak kompatibilita cementu se superplastifikační přísadou, obsah velmi jemných podílů a druh kameniva [44]. Poměr jednotlivých velikostí částic má větší vliv na rozlití než druh materiálu, jak ukázali autoři [50]. Náhrada křemenného prášku za vápenec neměla takový vliv na reologické vlastnosti. Hrubší podíly zvyšují viskozitu směsi, protože snižují hustotu zaplnění.

Ve studii [45] byl zkoumán vliv rozdílného obsahu siliky a strusky na konzistenci UHPC. Výsledky jsou ukázány v ternárním diagramu v obr. 5. Silika měla výrazný vliv na rozlití malty (zkouška probíhala podle čínské normy GB/T 2419-2005). Postupným přidáváním siliky se hodnota rozlití zvyšovala, maxima 195 mm dosáhla při 22% obsahu siliky. Vyšší obsah pak tekutost opět snižoval. Vliv byl lépe pozorovatelný při přidání více než 10 % strusky. Velký měrný povrch křemičitých úletů má za následek absorpci superplastifikátoru na jejich zrnech a zvýšení vodonáročnosti. Struska, která má větší měrný povrch než cement, vyžaduje také více vody k dosažení stejné konzistence. Vyšší než 40% podíl strusky vedl k rozlití menší než 140 mm.

Vliv křemičitých úletů na konzistenci je velmi komplikovaný. Jsou citlivé na změnu výchozích surovin, jak ukazuje například studie [48]. Ke třem různým dávkám cementu

se přidávalo různé množství siliky. Vyšší obsah cementu měl za následek větší sednutí, protože cementová zrna vyplňují prostor mezi kamenivem a vlákny, čímž se zlepšuje tekutost. Z výsledků je ale také patrné, že čím více siliky, tím tužší konzistence.



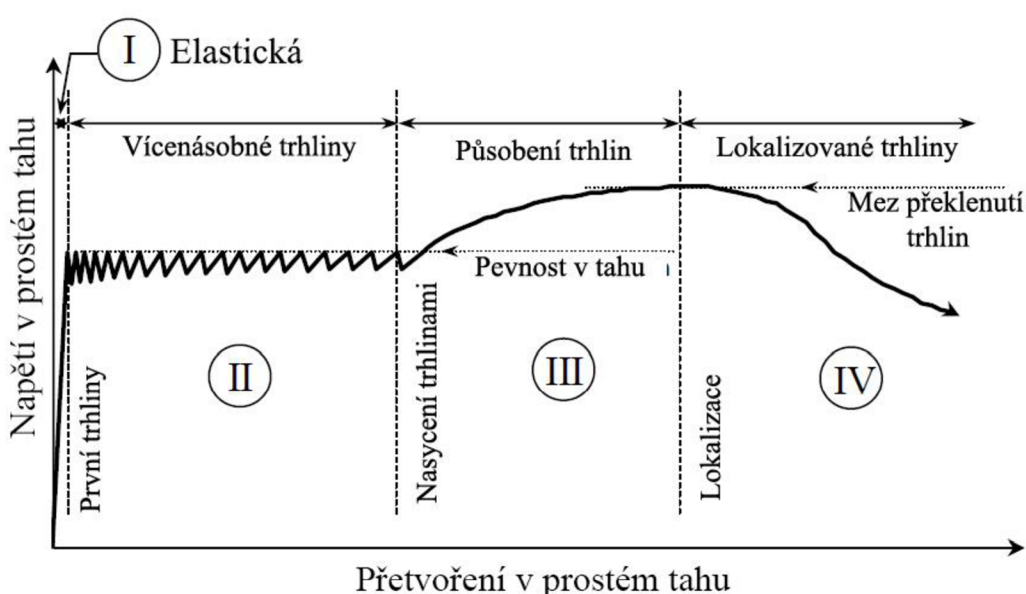
Obrázek 5 - Ternární diagram vlivu složek UHPC na konzistenci [45]

Vývojem samozhutnitelného UHPC obsahujícího vlákna (Self-compacting ultra-high fibre-reinforced concrete – SCUHFRPC) se zabývali autoři [47]. Základem receptury byl CARDIFRC (kompozit na bázi cementu obsahující vlákna vyvinutý v Cardiffu). Původní objem 6 % hybridních ocelových vláken průměru 0,15 mm a délky 6 mm (5 % objemu) a 13 mm (1 % objemu) byl nahrazen 2,5 % vláken se zvlňnými konci délky 30 mm a průměru 0,55 mm. Směs byla navržena na zhutňování vibrací, ale je velmi tekutá, pokud neobsahuje vlákna, takže má potenciál být samozhutnitelná.

Byly zkoušeny rozdílné vodní součinitele, poměry superplastifikátor/voda a náhrada cementu struskou. Vlákna byla v míchačce i po zkoušce rozlitím rovnoměrně rozložena, výrazně však zvyšují viskozitu UHPC. Směs splnila požadavky na pohyblivost i odolnost proti segregaci, nevyhověla však požadavkům prostupnosti v J-ring testu s obráceným Adamsovým kuželem, protože vlákna se shlukovala kolem tyčí aparátu. Musel se tedy zvýšit poměr superplastifikátor/voda z 0,22 na 0,28. UHPC tedy lze připravit jako samozhutnitelný, ale je nutné prověřit prostupnost úzkými otvory, i když vyhoví pohyblivost a odolnost vůči segregaci.

## 5.2 Pevnosti

Pevnost betonu je jeho nejdůležitější charakteristika. Minimální pevnost v tlaku se liší podle různých autorů, ale průměrně by UHPC měl dosáhnout alespoň 150 MPa. Pevnost v tahu se u UHPC a RPC pohybuje mezi 8 až 15 MPa a pevnost v tahu za ohybu mezi 30 až 141 MPa. Pevnosti ovlivňuje složení, ukládání a ošetřování [44]. Dlouhodobé pevnosti se zkoušely v článku [38]. 3,5leté pevnosti byly o 40 % vyšší než za 28 dní. Vzorky byly bez vláken, tudíž velmi křehké, a to vedlo k velkým odchylkám v naměřených hodnotách (až 50 MPa). Tím se vysvětlují o 25 MPa nižší naměřené pevnosti za 8 let než za 6 let.



Obrázek 6 - Idealizované chování při namáhání v prostém tahu [52]

Namáhání 2,9 m dlouhých trámů z UHPC s rozptýlenou i tyčovou výztuží bylo zkoušeno v [51]. Poměr vyztužení se měnil a výztuž byla umístěna v 1 nebo 2 vrstvách. V UHPC se tvořily několikanásobné těsně vedle sebe uspořádané trhlinky kolmé na směr tahových sil dřív, než mohlo dojít k vytažení vláken (trámy byly namáhány čtyřbodovým ohybem). UHPC bez tyčové výztuže vykázalo houževnaté chování po vzniku trhlin. Mimo jiné bylo zkoušeno, že ukládání betonu ovlivňuje orientaci vláken a tím statické chování. Ukládání z jednoho konce dosáhlo lepších výsledků než ukládání od středu rozpětí.

Chování UHPC v prostém tahu zjišťoval Graybeal a kolektiv ve studii [52]. Výsledky ilustruje obr. 6. Fáze I (elastická) probíhá do meze pevnosti v tahu cementového kompozitu. Ve fázi II (vícenásobných trhlin) vznikají v UHPC trhliny, vlákna přenáší

napětí jak v trhlinách, tak v betonu, a dochází k dalšímu přetvoření, avšak bez zvýšení napětí. To je způsobeno pravděpodobně homogenitou materiálu. Ve fázi III už nedochází ke vzniku dalších trhlin, vlákna se natahují a dochází k postupnému vytahování z hmoty betonu. V poslední fázi IV se přerušuje přídržnost vláken s UHPC, trhliny se rozšiřují a napětí v prvku postupně klesá. Nutno však poznamenat, že pro dosažení stejného chování je nutné dosáhnout efektivního vyztužení vláknem, tedy dostatečného množství, disperze a správné orientace.

### 5.3 Modul pružnosti a Poissonovo číslo

Průměrný modul pružnosti UHPC měřený na 6 válcích po 28 dnech zrání v laboratorních podmínkách byl 42,7 GPa a v případě propařování 50 GPa. Obvykle se pohybuje mezi 40 a 70 GPa. Po ukončení propařování se u UHPC už nezvyšovala pevnost ani modul pružnosti. Vzorky v normálních podmínkách uložení se zpevňovaly ještě minimálně po 8 týdnech zrání, modul pružnosti se však po 1 měsíci měnil jen minimálně. Modul pružnosti měřený v tlaku byl o 4,9 GPa nižší než při měření v tahu. Poissonovo číslo pro UHPC se pohybuje mezi 0,18 a 0,2 podle různých autorů, neliší se tedy od běžného betonu [53].

### 5.4 Duktilita

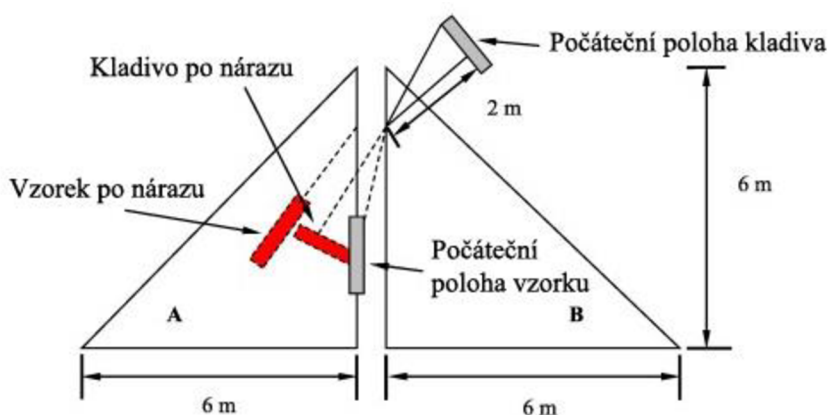
Duktilita je schopnost konstrukčního prvku odolávat bez výrazné ztráty pevnosti opakovaným cyklům velkých deformací v oblasti nad mezi kluzu [55]. Je to důležitá vlastnost při navrhování konstrukcí odolných proti seismickým zatížením. Autoři [54] zkoušeli vlastnosti UHPC trámů s konvenční výztuží i rozptýlenou. Index duktility  $\mu_p$  pro železobetonové trámy vyjádřili podle rovnice (2):

$$\mu_p = \frac{\Delta_p}{\Delta_y} \quad (2)$$

Kde  $\Delta_p$  je průhyb v polovině rozpětí při maximálním zatížení a  $\Delta_y$  je průhyb v polovině rozpětí při mezi kluzu ocelové výztuže. Paradoxně nižší index byl stanoven, když byla použita ocelová vlákna. K deformaci tyčové výztuže došlo při menším průhybu kvůli schopnosti vláken překlenout trhliny. Delší hladká vlákna a zkroucená vlákna pak zvyšovala duktilitu, protože trámy dosáhly většího průhybu na mezi únosnosti. Trámy bez vláken selhaly v oblasti tlačeného betonu, nebyla-li použita vlákna, došlo k přetržení tažené výztuže.

## 5.5 Tvrdost, odolnost vůči nárazu a výbuchu

Tvrdost kombinuje pevnost betonu a duktilitu, prozatím neexistují standardní metody zkoušení tvrdosti UHPC. Například klasická zkouška odrazovým tvrdoměrem SilverSchmidt se doporučuje provádět na betonech do pevností 100 MPa [57]. Obsah vláken výrazně zvyšuje tvrdost, použití hybridní rozptýlené výztuže mělo pak ještě lepší výsledky. Ačkoli tepelné ošetřování v autoklávu nebo v horké páře má pozitivní vliv na vlastnosti UHPC, nejtvrdsí vzorky byly ty, které zrály ve vodní lázni za normální teploty [44].



Obrázek 7 - Modifikovaná zkouška nárazem kyvadla [56]

Studie [56] se zabývala dvěma dynamickými zkouškami: zkouškou rázem v ohybu Charpyho kladivem a modifikovanou zkouškou nárazu kyvadlem pro zjištění disipace energie. Schéma druhé zmíněné zkoušky je na obr. 7, vzorek UHPC je zavěšený na rámu, kladivo se vyzvedne do výšky přibližně 3,2 m a spustí se. V nejnižší poloze, kde má kladivo největší kinetickou energii, narazí do vzorku. Pokud nedojde k destrukci vzorku (kvádr 500x500x100 mm), zkouška se opakuje, výsledkem je celková energie, kterou vzorek dokáže absorbovat.

Úlomky UHPC po nárazu Charpyho kladivem byly kvádrotvého tvaru, přičemž došlo k vytržení vláken, úlomky z referenčního betonu normálních pevností byly méně pravidelného tvaru. Nahrazení delších rovných vláken krátkými mělo negativní vliv na disipaci energie, protože k vytržení krátkých vláken stačí menší síla. Naopak tomu však bylo v případě zkoušky s kyvadlem. Charpyho kladivo má větší energii a vzorky byly relativně menší, k destrukci tedy došlo po prvním nárazu. V modifikované zkoušce kyvadlem vydržely vzorky s hybridními vlákny 8 nárazů, část energie se tedy spotřebovávala na tvorbu malých trhlin. Horší výsledky tudíž měl UHPFRC s jedním

typem vláken, UHPC bez vláken byl silně poničen už po prvním nárazu kyvadla. Z toho vyplývá, že různý typ zkoušky přináší různé závěry.

Autoři [59] zkoušeli odolnost vůči zásahu projektily, konkrétně kalibru 12,7 mm a RPG granáty 40 mm. Cílem bylo zjistit, jestli je z ekonomického hlediska výhodné používat UHPFRC na ochranu budov proti výbuchu. Byly zkoušeny panely tloušťky 5 cm a jejich aplikace jako ochranná vrstva současných konstrukcí by výrazně zvýšila odolnost proti nárazu a explozi. V článku [60] byl studován teoretický rozdíl sloupů z obyčejného betonu a UHPFRC v reakci na výbuch. Ačkoli průhyb v případě, kdy nedošlo k destrukci, byl u UHPFRC jen o 27-30% menší, měl by vydržet čtyřikrát větší ráz než obyčejný beton.

## 5.6 Smrštění

Nízký vodní součinitel a jemné příměsi způsobují rychlé vysychání povrchu v raném stadiu a v porovnání s běžným betonem kvůli vyššímu obsahu cementu také větší autogenní smršťování (způsobené hydratací cementu). Bleeding se nevyskytuje, protože voda se rychleji odpařuje. Na zabránění odpařování vody byly vyzkoušeny 3 materiály na povrchu hydratující malty: vinyl, parafinový olej a membránu tvořící sloučenina. Vinyl urychloval tuhnutí malty, sloučenina tvořící membránu jej naopak zpomalovala, nejvhodnější se tedy jevil parafinový olej [61].

Podle [62] autogenní smršťování nepokračovalo po 36 hodinách od ukončení tuhnutí a smršťování vysycháním skončilo po 117 dnech. Smršťování způsobuje trhliny a dá se mu zabránit několika způsoby:

- 1) přidáním rozptýlené výztuže
- 2) zvětšením podílu kameniva
- 3) přísadou redukující smrštění - zmenšuje povrchové napětí a zvyšuje viskozitu vody v pórech
- 4) expanzní příměsí – urychluje hydrataci v raném stadiu tvorbou ettringitu
- 5) omezením smršťování samotného cementového tmelu

Byl zkoumán vliv metakaolínu a popílku, kdy se vyzkoušely kombinace malty jednosložkové (pouze cement), dvousložkové (cement se silikou/metakaolínem/létavým popílkem) a trojsložkové (cement s metakaolínem a popílkem). Nejmenšího smrštění vysycháním za 147 dní dosáhla směs trojsložková, která měla také největší hodnoty

rozlití. Při zachování poměru příměsi/cement šlo také o směs s nejvyšší pevností v tlaku po 28 dnech.

Autoři [63] navrhli náhradu ocelových/uhlíkových vláken jehličkovitými krystaly wollastonitu a tím potenciálně snížit cenu UHPC. Do směsi byla přidána i smrštění redukující přísada (polyoxyalkylen alkyl ether) v množství 1 a 2% z množství cementu a wollastonit (krystaly délky 152  $\mu\text{m}$  a průměru 8  $\mu\text{m}$ ) v množství 4 a 12% z  $m_c$ . Ve vodním uložení může docházet k vyluhování přísady, v kombinaci s wollastonitovými mikrovláknými ale došlo ke zvýšení pevnosti v raném stadiu a snížení celkového poměrného smrštění.

## **5.7 Trvanlivost**

Trvanlivost je pravděpodobně nejdůležitější předností UHPC. Minimalizuje náklady na údržbu konstrukcí, prodlužuje jejich životnost a přispívá k udržitelné výstavbě. V článku [64] autoři hodnotili celkové dopady stavby mostní konstrukce na životní prostředí od těžby surovin, výroby a výstavby přes užívání po likvidaci a recyklaci. Srovnaly se dvě varianty – monolitická železobetonová konstrukce mostovky z betonu C30/37 XF2 a kombinace prefabrikovaného ztraceného bednění z UHPC Tv1 s monolitickou částí taktéž z betonu C30/37 XF2. Ukázalo se, že optimalizované zabudování HPC/UHPC betonů do konstrukcí může vykazovat příznivější výsledky.

Mezi trvanlivostní charakteristiky patří permeabilita (vodotěsnost, propustnost plynů, tepelná/elektrická vodivost, odolnost vůči chloridům, karbonatům), mrazuvzdornost, požární odolnost a další.

### **5.7.1 Permeabilita**

Permeabilita je dána dobou hydratace cementu, ve ztvrdlém cementovém tmelu pak záleží na velikosti, tvaru a množství gelových částic a diskontinuitě kapilárních pórů. Dávka superplastifikátoru má menší vliv než vodní součinitel, ale jeho optimální množství snižuje obsah vody a tím přispívá k hutnější struktuře. Propustnost RPC byla změřena přibližně o 1 řád nižší než u běžného betonu [69].

Ochranou stávajících konstrukcí přidáním UHPC vrstvy se zabývali autoři studie [68]. Odolnost vůči průniku chloridů se měřila podle ASTM C1202-94 na válcovitých vzorcích tloušťky 5 cm, průměru 10 cm, přičemž na jedné straně vzorku byl roztok

NaOH a na druhé roztok NaCl. Zavedl se stejnosměrný proud o napětí 60 V a měřil se celkový náboj prošlý vzorkem v coulombech, který odpovídá permeabilitě chloridy. Průsak vody byl zkoušen na válečcích, na jejichž horní stranu tlačil vodní sloupec pod tlakem 250 kPa. Propustnost chloridů a vody u UHPC byla zanedbatelná, pro plyny pak nulová.



Obrázek 8 - Řez UHPC po 80 týdnech chemického napadení [70]

Mikrotrhliny vzniklé autogenním smršťováním přispívají k pórovitosti, zejména v betonu bez vláken, taktéž tepelné ošetřování musí probíhat velmi pozvolně, aby nedocházelo k trhlinkám. Tranzitní zóna mezi cementovým tmelem a kamenivem/vláknou byla v UHPC považována za hutnou, ale ukázalo se, že může zvyšovat permeabilitu. Vlákná snižují odolnost vůči chloridům, v případě chemického napadení kyselinou chlorovodíkovou vykazují však ocelová vlákna dvojitý účinek. V jejich okolí dochází k větší propustnosti, na druhou stranu vznikající vrstva hydroxidů železa brání průniku kyseliny, jak ukazuje obr. 8. Tloušťka zkarbonatované vrstvy v UHPC po 6 měsících ve venkovním prostředí, nevystavené přímému vlivu počasí, byla jen 180  $\mu\text{m}$  [70].

### 5.7.2 Mrazuvzdornost

Ze zmíněné výborné vodotěsnosti UHPC vyplývá také vynikající mrazuvzdornost, protože voda, která by se při nízkých teplotách rozpínala v pórech za vzniku ledu, se do struktury nenasákne. Několik autorů provádělo zkoušku mrazuvzdornosti, například Ductal® podle článku [71] vydržel 400 zmrazovacích cyklů bez jakéhokoli poškození. Autoři studie [65] zkoušeli 3 druhy cementu a 3 různé dávky křemenné moučky a jejich vliv na mrazuvzdornost UHPC. Cyklus se skládal ze 4 hodin ochlazování, 3 hodin na



teplotě  $-20^{\circ}\text{C}$ , 4 hodin ohřívání a 1 hodiny na teplotě  $20^{\circ}\text{C}$ . Ani v jednom případě nedošlo k hmotnostnímu úbytku.

### 5.7.3 Požární odolnost

UHPC se používá v drsnějším prostředí, kde riziko požáru je teoreticky větší. Ve výškových budovách, kde má UHPC velký potenciál, je požární odolnost materiálu velmi důležitou vlastností. Vysoká teplota způsobuje rozklad materiálu a díky teplotní roztažnosti expanzi, které je většinou zabráněno, čímž dochází ke zvětšení vnitřního napětí. Důsledkem je pak odprýskávání betonu, které poškozuje části konstrukce a může vést až ke kolapsu [66]. Byly zkoušeny vzorky z 8 různých UHPC nebo UHPFRC jednak nezatížené, jednak zatížené, které odolávají lépe a také lépe odpovídají skutečné konstrukci. Pevnost v tlaku se stanovila buď přímo za zvýšené teploty, nebo po ochlazení. Nárůst teploty probíhal podle normové křivky ISO 834 ( $1000^{\circ}\text{C}$  za 90 minut) a podle uhlovodíkové teplotní křivky ( $1000^{\circ}\text{C}$  za 2 minuty a  $1250-1300^{\circ}\text{C}$  za 15 minut).

Pevnost v tlaku se zvýšením teploty snižovala, ale ve srovnání s modulem pružnosti velmi nelineárně. Teplotní roztažnost se měnila pro každou směs, u Ductalu® lineárně rostla do teploty  $600^{\circ}\text{C}$ , pak se zastavila, u Rostocku® došlo od  $700^{\circ}\text{C}$  ke smršťování. Mezi jednotlivými recepturami se všechny naměřené hodnoty relativně dost lišily, jedním z možných vysvětlení je druh kameniva, kdy například křemen a diabas nejsou tak tepelně stálé jako čedič. Je tedy vhodné vždy experimentálně ověřit vlastnosti navržené směsi v reakci na oheň. Přidání polypropylenových vláken mělo pozitivní vliv na odprýskávání betonu, jak ukazuje obr. 9.

Železobetonové sloupy rozměrů  $0,5 \times 0,5 \times 3,6$  m z UHSC za vysoké teploty se zkoušely v [67]. První odprýskávání na sloupu nastalo po 30 minutách zahřívání a trvalo hodinu a půl. To je způsobeno tlakem páry v pórech a tepelným napětím, které je v hutných betonech vyšší. Průměrná hloubka odprýsknutí byla 36,5 mm, maximum 98 mm. U vzorků obsahující hybridní vlákna (polypropylenová a nylonová) k odprýsknutí nedocházelo. Procentuální úbytek pevnosti za zvýšené teploty byl pro UHSC vyšší než pro běžný beton, ačkoli vydržel zkoušených 25 % návrhového zatížení i po 3 hodinách a 52 % návrhového normálového zatížení.



Obrázek 9 - Desky z UHPFRC, vlevo bez PP vláken, vpravo s PP vlákny [66]

## 6 RPC

Reaktivní práškový kompozit (Reactive Powder Composite případně Reactive Powder Concrete – RPC) je materiál složený z portlandského cementu, jemných příměsí, přísad a vody. Poprvé byl představen v roce 1995 v [1]. Od složení UHPC se liší vyšším obsahem cementu a velikostí maximálního zrna, které většinou nepřekračuje 600  $\mu\text{m}$ . Mezi hlavní principy patří eliminace hrubého kameniva, čím se zlepšuje homogenita směsi, minimalizovaná pórovitost optimalizací granulometrie, případně aplikací tlaku během tuhnutí, tepelné ošetřování a zlepšení pevnosti v ohybu a duktility přidáním rozptýlené výztuže. Pevnost v tlaku se pohybuje mezi 200 až 800 MPa.

### 6.1 Pojiva

Požadavky na cement byly popsány v části 2.1. Poměr křemičitých úletů/cement se v RPC volí v rozmezí 0-15-0,30. Z důvodu velmi vysoké dávky cementu, který je drahý a má neblahé dopady na životní prostředí, je snaha jej nahrazovat. Dalším negativem je autogenní smršťování a vznik trhlin, které snižují mechanické vlastnosti.

Autoři článku [73] zkoušeli náhradu cementu z 0, 20, 40 a 60 % létavým popílkem v kombinaci s různými typy ošetřování (proteplování v páře, autoklávování a klasické vodní uložení) a s 3 různými druhy kameniva (křemen, slinutý bauxit a žula). Přidání popílku zvýšilo pevnosti, při obsahu cementu 376  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$  v RPC bylo dosaženo pevnosti

v tlaku 200 MPa. Konečných pevností bylo možno dosáhnout už za 2 dny při použití tepelného ošetřování, vodní uložení ale mělo také dobré výsledky. Při aplikaci tlaku během tuhnutí a tvrdnutí a následném autoklávování bylo dosaženo pevnosti v tlaku 403 MPa, při 60% náhradě popílkem byla pevnost 338 MPa, tudíž stále velmi vysoká hodnota. Použití žuly mělo sice za následek horší mechanické pevnosti než v případě slinutého bauxitu, ale dostatečné pro úspěšnou výrobu RPC.

Velmi podobný výzkum se zabýval nahrazením cementu struskou, množství bylo také 0, 20, 40 a 60 % z  $m_c$ , použitá kameniva byla bauxit, žula a křemen [14]. RPC s 40 % strusky a žulou dosáhl pevnosti v tlaku 210 MPa, RPC s 60 % strusky a bauxitem pak 254 MPa. Kromě menší spotřeby cementu je další výhodou v menším smrštění a vývinu hydratačního tepla, ale také v možnosti snížit obsah křemičitých úletů a tím i superplastifikační přísady. Tím se dále snižuje ekonomická náročnost.

V článku [74] byl studován vliv Thomasovy strusky vznikající v elektrické peci při výrobě oceli. Podíl amorfních složek může být až 90 %. Poměr  $SiO_2/CaO$  se mění mezi 0,8-1,4 a jejich součet tvoří více než 85 % hmotnosti této strusky. Po 3 dnech ošetřování ve vodní páře o teplotě 95°C dosáhly vzorky RPC pevnosti v tlaku 187 MPa a v tahu za ohybu 29,7 MPa. Podíl strusky v těchto vzorcích byl 35 % z hmotnosti pojiv a podíl vláken pak 1 % (z objemu).

## 6.2 Typ a granulometrie plniv, obsah jemných podílů

Jako plnivo se používá křemičitý písek, jehož podíl bývá přibližně 40% z hmotnosti RPC. Maximální velikost zrna se doporučuje 600  $\mu m$  a nejmenší zrno 150  $\mu m$ , aby písek nezasahoval do granulometrie cementu, jehož největší zrna mají velikost 80-100  $\mu m$ . Střední velikost zrna 250  $\mu m$  je optimum. Různé čáry zrnitosti písku (dunového písku ze Saudské Arábie) byly zkoušeny:

- 1) neupravovaná zrnitost
- 2) 100% propad sítem velikosti oka 600  $\mu m$  a 100% zbytek na síte velikosti oka 150  $\mu m$
- 3) 100% propad sítem velikost oka 600  $\mu m$
- 4) 100% propad sítem velikost oka 300  $\mu m$
- 5) 100% propad sítem velikost oka 150  $\mu m$
- 6) kombinace 1/3 písku 3), 1/3 písku 4) a 1/3 písku 5)

Za konstantního množství ostatních složek dosáhla největší pevnosti v tlaku po 28 dnech 126 MPa a také optimálního rozliti malty 200 mm směs s neupravenou zrnitostí, písek 1). Dávka superplastifikační přísady pro dosažení dané konzistence byla také nejmenší - 1,5 % z hmotnosti pojiv.

Dalším používaným plnivem je drcená krystalická křemenná moučka o velikosti zrn 10-15  $\mu\text{m}$ . Mezi přednosti patří snížení pórovitosti tranzitní zóny. V případě tepelného ošetřování vykazuje moučka zvýšenou reaktivitu s hydratujícím cementem [72]. Byla zkoušena náhrada křemenné moučky recyklovaným sklem. Sklo tvoří převážně amorfní  $\text{SiO}_2$ , dále oxidy  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$  a další složky. Jemně drcené sklo se tedy může považovat za příměs s pucolánovými schopnostmi, ačkoli například silika vykazuje pětikrát vyšší pucolanitu. Použití v betonu je komplikované, protože obsah  $\text{Na}_2\text{O}$  může mít za následek alkalicko-křemičitou reakci, na druhou stranu se ukázalo, že při velikosti částic skla pod 0,25 mm v UHPC nedochází k výraznému rozpínání [76].

Ve studii [75] byla zrnitost použitého drceného skla: 20% propad na síť 0,075, 35% propad na síť 0,15 mm a 45% na síť 0,25 mm. Náhrada cementu sklem v RPC byla 10, 20 a 30 %, kdy nejpříznivějších pevností v tlaku, v tahu za ohybu i v příčném tahu dosáhly vzorky s 20% náhradou. Pravděpodobným důvodem byl podobný obsah  $\text{SiO}_2$  a  $\text{Ca(OH)}_2$ , čím se maximalizovala efektivita pucolánové reakce za vzniku CSH gelů druhého typu.

### **6.3 Rozptýlená výztuž, množství a typ vláken**

Množství a typ vláken v RPC byly navrženy už v článku [1], kde byl tento materiál představen. Měla by být přidána tenká rovná ocelová vlákna v množství 1,5-3 % (objemových). Použitá vlákna měla průměr 0,15 mm a délku 13 mm, za ekonomické dávkování se považuje  $155 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  (2 %). Pro RPC, které se ošetřuje za zvýšené teploty (250°C a více) schopné dosáhnout pevnosti v tlaku až 800 MPa, jsou pak vhodná vlákna nepravidelného tvaru a kratší délky (méně než 3 mm).

### **6.4 Vybraná specifika RPC**

RPC s pevností v tlaku 200 MPa mívá rozptyl pevností v tahu za ohybu 30-60 MPa a lomovou energii 20-40  $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ . Modul pružnosti bývá u RPC v rozmezí 50-60 GPa, v případě velké hutnosti až 75 GPa [1]. Vzhledem k obsahu jemných podílů je potřeba

změnit způsob míchání, aby došlo k dostatečné homogenizaci všech složek. V článku [74] byl popsán tento postup:

- míchání suchých složek po dobu 3 minut za nízkých otáček (140 ot/min)
- přidání poloviny z celkového množství vody obsahující polovinu množství superplastifikační přísady
- míchání po dobu 3 minut za vyšších otáček (285 ot/min)
- přidání zbytku vody se superplastifikační přísadou
- míchání po dobu 10 minut za vyšších otáček (285 ot/min)
- pomalé přidávání vláken po dobu 2 minut
- míchání po dobu alespoň 3 minut pro dosažení dobré disperze vláken

Celková doba tak činí 20-25 minut a postup by se měl upravit podle vstupních surovin.

## **B Praktická část**

### **7 Návrh receptur**

V experimentální části byly navrženy 2 směsi UHPC, 2 směsi RPC a ověřeny jejich pevnosti v tlaku. Receptury vycházely z odborných článků a byly konzultovány s vedoucím práce.

#### **7.1 Použité suroviny**

Do zkušebních směsí byly použity následující vstupní suroviny.

##### **7.1.1 Cement**

U UHPC i RPC směsí se použil cement CEM I 52,5 R od společnosti Českomoravský cement, a.s. ze závodu Mokrý. Střední zrno má velikost 10  $\mu\text{m}$ , zbytek na síti 20  $\mu\text{m}$  je 22,2 %. Měrná hmotnost činí 3140  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , měrný povrch 501  $\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$  a  $\text{Na}_2\text{O}$  ekvivalent je 0,65 %.

##### **7.1.2 Křemičité úlety**

Použitá silika RW-Füller společnosti RW silicium GmbH obsahuje (96,0 $\pm$ 1,5) %  $\text{SiO}_2$  a maximálně 0,9 %  $\text{SiC}$ , 0,9 %  $\text{K}_2\text{O}$  a 0,12 %  $\text{Na}_2\text{O}$ . Ztráta žíháním je 1,2 %, pH 7,5. Měrný povrch metodou BET je 18-22  $\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ . 95 % částic má velikost menší než 10  $\mu\text{m}$  a 70 % menší než 1  $\mu\text{m}$ .

##### **7.1.3 Nanosilika**

Nanosilika pocházela od výrobce SkySpring Nanomaterials, Inc., Houston, Texas. Měrná hmotnost je 2160  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , sypná hmotnost jen 100  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , měrný povrch 160  $\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$  a obsah  $\text{SiO}_2$  98,7 %. Velikost sférických částic je mezi 10 a 20 nm, zrna se však shlukují do aglomerátů, jejichž střední velikost je 8,3  $\mu\text{m}$  (měřeno ve vodní suspenzi). Shluky se mohou dispergovat pomocí ultrazvuku, ale v bakalářské práci toho nebylo využito.

### **7.1.4 Mletý vápenec**

Mletý vápenec pocházel z lomu Zblovice, jedná se devonský vápenec s vyšším podílem dolomitu, měrný povrch je  $432 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ , sypaná hmotnost  $2160 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  a měrná hmotnost  $2540 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ .

### **7.1.5 Kamenivo**

Vzorky UHPC obsahovaly 2 nebo 3 frakce kameniva a to: 0-4, 4-8 a 8-16 mm. Pro frakci 0-4 mm byl použit těžný písek Žabčice. Hrubé drcené kamenivo frakcí 4-8 a 8-16 tvořil čedič z lomu Bílčice. Objemová hmotnost byla  $2980 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , sypaná hmotnost frakce 4-8 mm  $1520 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  a frakce 8-16 mm  $1440 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Nasákavost frakce 4-8 mm je 0,9 %, frakce 8-16 mm pak 0,8 %. Hrubé kamenivo bylo nejdříve propráno a vysušeno, aby se odstranily nežádoucí jemné podíly. Ve směsích RPC kamenivo tvořil křemičitý písek Střeleč, jehož největší zrno bylo 0,135 mm.

### **7.1.6 Superplastifikační přísada**

Použil se světle hnědý superplastifikátor Sika® ViscoCrete®-2700 na bázi polykarboxylát éteru. Objemová hmotnost při  $20^\circ\text{C}$  je  $1080 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  a podíl alkálií ( $\text{Na}_2\text{O}$  ekvivalent) je menší než 1,0 %

### **7.1.7 Voda**

Jako záměsová voda posloužila voda z vodovodního řadu.

### **7.1.8 Rozptýlená výztuž**

V RPC směsích tvořily rozptýlenou výztuž rovné tenké ocelové drátky společnosti DM KrampeHarex. Jejich průměr je 0,2 mm a délka 6 mm. Pevnost v tahu je  $2100 \text{ MPa} \pm 15 \%$ .

## **7.2 Návrh a výroba UHPC**

Byly navrženy 2 receptury, první směs označená jako UHPC 1 obsahovala největší zrno velikosti 16 mm a měla dosáhnout za 60 dní pevnosti v tlaku 130 MPa. Největší velikost zrna 8 mm obsahovala druhá směs (UHPC 2), která měla dosáhnout pevnosti v tlaku za 60 dní 150 MPa. Složení ukazuje tabulka 6.

Vodní součinitel (poměr vody k pojivu) byl spočítaný v souladu s normou ČSN EN 13263 [78], kdy se pro výpočet bere v úvahu množství křemičitých úletů maximálně 11 % z množství cementu (70 kg u UHPC 1 a 82,5 kg u UHPC 2). Prostředí XC nebo XF nebylo specifikováno, k-hodnota křemičitých úletů je 2,0 (v opačném případě by byla 1,0). Vodní součinitel u UHPC 1 byl tedy 0,18, u UHPC 2 byl 0,16. Podíl siliky k cementu je v obou případech 0,15 a dávka superplastifikátoru pak 2,5 % z množství cementu.

Tabulka 6 - Složení UHPC

Složka	UHPC 1	UHPC 2
	Množství [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	Množství [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]
CEM I 52,5 R	700	750
Křemičitý úlet	105	112
Písek 0-4 mm	655	725
Kamenivo 4-8 mm	265	675
Kamenivo 8-16 mm	660	-
Voda	155	150
Superplastifikační přísada	17,5	18,75

Dávkování do míchačky s nuceným mícháním probíhalo následovně: nejdříve byly přidány suché složky (kamenivo, cement, křemičité úlety), promíchány a postupně za míchání byla dávkována voda společně se superplastifikační přísadou. Po míchání byla provedena zkouška sednutí kužele a následně byl UHPC uložen do kovových forem tvaru krychle 150x150x150 mm, od každé směsi 9 kusů. Zhutňování probíhalo na vibračním stole ve dvou vrstvách. Vzorky byly po 1 dni odformovány a uloženy ve vodním prostředí až do provedení zkoušek pevnosti v tlaku - po 7 dnech a 90 dnech.

Od zkoušky pevnosti v tlaku po 28 a 60 dnech bylo po konzultaci s vedoucím práce upuštěno, protože zkušební lis v laboratoři na Ústavu technologie stavebních hmot a dílců dosahuje maximální síly pouze 3000 kN, bylo tedy třeba použít zkušební lis externího pracoviště. Dvě krychle byly vyzkoušeny na pevnost v tlaku v laboratoři AdMaS na lise o síle 4000 kN, ale díky tomu, že má tuhý kloub, nedošlo k porušení jen prostým tlakem a hodnoty pevností byly nevyhovující.



### 7.3 Návrh a výroba RPC

Byly navrženy 2 receptury RPC, první obsahovala nano-siliku (RPC 1), ve druhé směsi byla tato příměs nahrazena obyčejnými křemičitými úlety (RPC 2). Složení je v tabulce 7. Vodní součinitel je  $w=0,23$ , u směsi RPC 2 byl zvýšen na 0,25 ve snaze dosáhnout měkčí konzistence (k-hodnota pro mletý vápenec byla uvažována 0,4, pro křemičité úlety 2,0). Poměr písku k cementu je 1,1, množství ocelových vláken je 4 % z objemu směsi. Podíl superplastifikační přísady je 2,5 % z hmotnosti cementu.

Tabulka 7 - Složení RPC

Složka	RPC 1	RPC 2
	Množství [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	Množství [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]
CEM I 52,5 R	1000	1000
Křemičitý úlet	150	180
Nanosilika	30	-
Mletý vápenec	150	150
Křemičitý písek	1100	1100
Voda	290	315
Superplastifikační přísada	25	25
Ocelová vlákna	110	110

Nanosilika se nejdříve míchala s celkovou dávkou vody, superplastifikátoru a menším množstvím křemičitého písku po dobu 10 minut a tato suspenze byla pak použita jako dávka záměsové vody. Ocelová vlákna se do míchačky přisypávala nakonec. Směs RPC 2 byla míchána ručním míchadlem, protože výkon míchačky na malty byl nedostačující.

Bylo stanoveno rozliti malty na střešacím stolku. Ze směsi 1 bylo vyrobeno 6 trámečků 40x40x160 mm a ze směsi 2 6 trámečků stejných rozměrů. Zhutňování probíhalo na zhutňovacím stolku, protože na vibračním stole s magnety by mohlo dojít k nechtěné orientaci drátků. Formy byly plněny ve 2 vrstvách. Po 1 dni se vzorky odformovaly a uložily do vodního prostředí, dokud se nezkoušely pevností v tlaku a v tahu za ohybu (po 7, 28 a 60 dnech).

## 8 Provedené zkoušky a výsledky

### 8.1 Objemová hmotnost v čerstvém stavu

Objemová hmotnost v čerstvém stavu byla stanovena podle ČSN EN 12350-2 [79]. Byly zváženy hmotnosti prázdné a plné formy, po jejich odečtení se získala hmotnost čerstvého betonu a následným podělením objemem forem pak objemová hmotnost v čerstvém stavu.

### 8.2 Objemová hmotnost ve ztvrdlém stavu

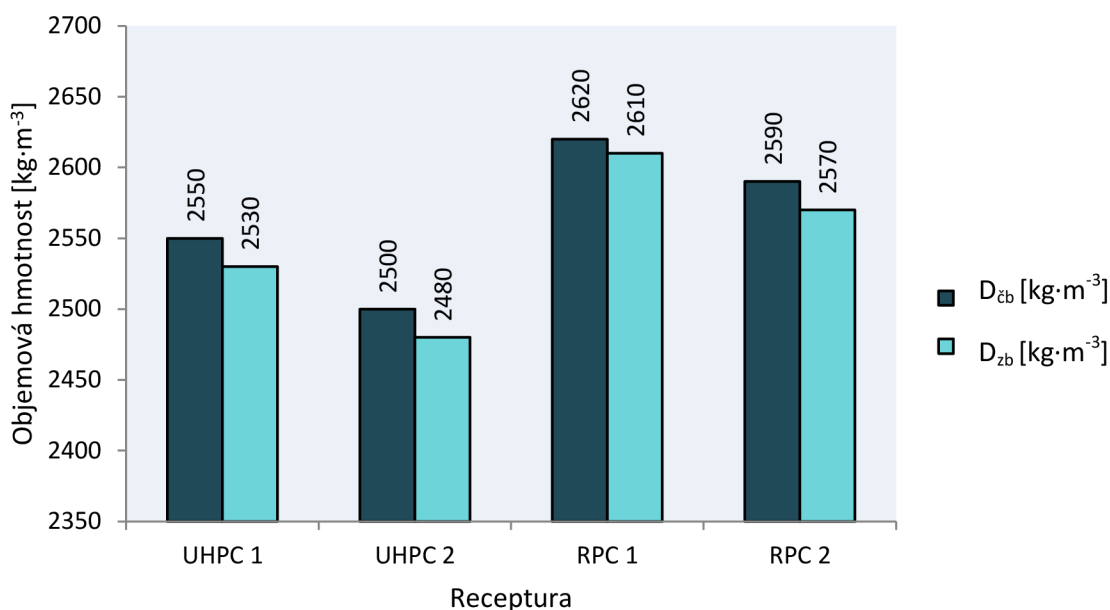
Ve ztvrdlém stavu se objemová hmotnost získala zvážením ztvrdlých vzorků a změřením jejich rozměrů. Příprava vzorků, postup zkoušky a vyhodnocení bylo provedeno podle normy ČSN EN 12390-7 [80].

Hodnoty objemové hmotnosti v čerstvém i ztvrdlém stavu ukazuje tabulka 8 a graf 2. Objemová hmotnost v ztvrdlém stavu se stanovila na nejstarších vzorcích (ve stáří 90 dnů u UHPC a 60 dnů u RPC) a odpovídala předpokladu, že bude nižší, protože část záměsové vody se odpařila, kvůli čemu dochází k plastickému smrštění.

Objemová hmotnost RPC byla nižší než součet složek v recepturách ( $2855 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  u RPC 1 a  $2880 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  u RPC 2). Vzorky nebyly na zhutňovacím stolku dostatečně dobře zhutněny a měly tedy větší obsah vzduchu (zkouška obsahu vzduchu v čerstvém betonu nebyla provedena). Chyba však nastala pravděpodobně v samotném návrhu směsi, který je třeba upravit, aby bylo dosaženo požadované hutné struktury kompozitu a optimálního zaplnění prostoru mezi zrny křemičitého písku a cementu.

Tabulka 8 - Objemové hmotnosti v čerstvém a ztvrdlém stavu

	UHPC1	UHPC2	RPC3	RPC4
$D_{\text{čb}} [\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$	2550	2500	2620	2590
$D_{\text{zb}} [\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$	2530	2480	2610	2570



Graf 2 - Objemové hmotnosti v čerstvém a ztvrdlém stavu

### 8.3 Zkoušky konzistence

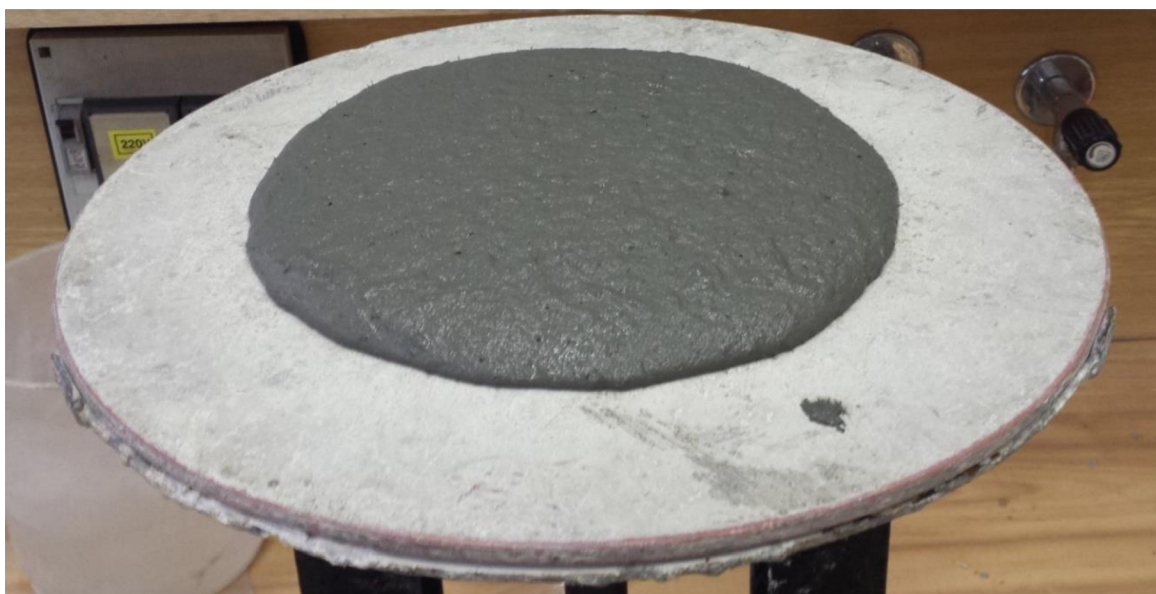
Konzistence čerstvého UHPC byla stanovena zkouškou sednutí podle normy ČSN EN 12350-2 [81]. Abramsův kužel (dolní průměr 200 mm, horní průměr 100 mm, výška 300 mm) se navlhčí, postaví na vodorovnou ocelovou podložku a ve 3 vrstvách se plní čerstvým betonem. Každá vrstva se zhutní 25 vpichy propichovací nerezovou tyčí. Horní povrch se zarovná lžící a kužel se svisle zvedne vzhůru. Nesmí dojít ke zborcení kuželu. Výsledkem je rozdíl mezi nejvyšším bodem sednutého betonu a výškou Abramsova kužele zaokrouhlený na 10 mm. Uvede se stupeň sednutí.

Konzistence čerstvého RPC byla vzhledem k jeho malému množství (1 záměs byla 0,8 l, ze kterých byly vyrobeny 3 trámečky) stanovena zkouškou rozlité malty na střešacím stolku podle ČSN EN 1015-3 [82]. Povrch střešacího stolku se navlhčí, umístí se na něj kužel (průměr dolní podstavy 100 mm, průměr horní podstavy 70 mm a výška 60 mm) a naplní se ve 2 vrstvách čerstvou maltou, v tomto případě kompozitem. Každá vrstva je zhutněna 10 lehkými údery dusadla o průměru 40 mm. Horní povrch se urovná lžící a kužel se zvedne kolmo vzhůru. Malta se rozlije 15 nárazy střešacího stolku (1 náraz za sekundu). Hodnota rozlité je pak průměr ze dvou navzájem kolmých průměrů koláče zaokrouhledená na 1 mm.

Výsledky zkoušek ukazuje tabulka č. 9. Sednutí kužele bylo pro obě receptury UHPC shodně 240 mm, tedy stupeň S5 – tekutá směs. Díky vysokému obsahu jemných podílů

i poměrně vysoké dávce superplastifikační přísady byl však beton velmi lepivý. To komplikovalo ukládání do forem, při použití v praxi by bylo obtížné ukládání do bednění, případně do forem prefabrikovaných dílců. Bylo by tedy vhodné upravit složení směsi.

Rozlití RPC 1 bylo 190 mm, u RPC 2 pak bylo menší o 10 mm, ačkoli bylo použito větší množství záměsové vody. Obsah drátků přispěl k tužší konzistenci, ve srovnání s UHPC byla směs méně lepivá. RPC často dosahují tekuté konzistence, bylo by tedy také vhodné upravit návrh směsi, popřípadě vyzkoušet jiný typ superplastifikační přísady. Ukázka rozlití směsi RPC 1 je na obrázku č. 10.



Obrázek 10 - Zkouška konzistence RPC

Tabulka 9 - Zkoušky konzistence

	<b>UHPC 1</b>	<b>UHPC 2</b>
Sednutí kužele [mm]	240	240
	<b>RPC 1</b>	<b>RPC 2</b>
Rozlití malty [mm]	190	180

#### 8.4 Pevnost v tlaku

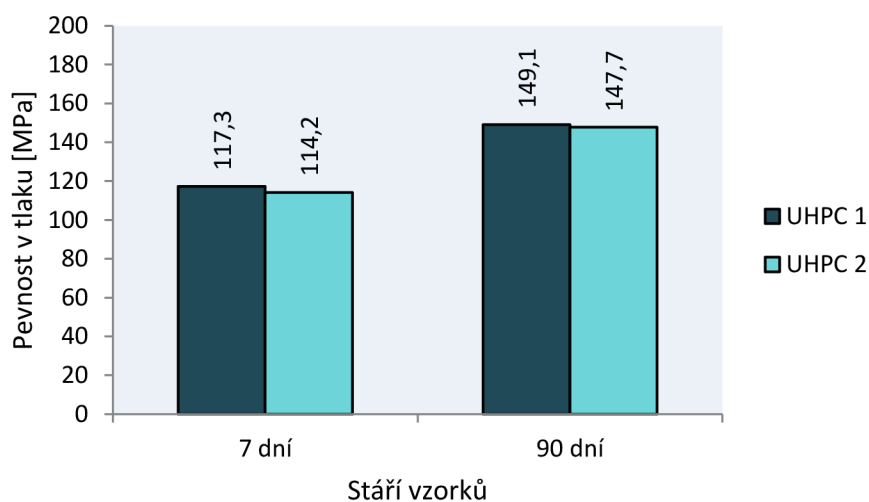
Pevnost v tlaku byla zkoušena dle normy ČSN EN 12390-3 [83], v případě UHPC na zkušebních kostkách 150x150x150 mm po 7 a 90 dnech, v případě RPC na zlomcích trámečků 40x40x160 mm po zkoušce pevnosti v tahu za ohybu po 7, 28 a 60 dnech.

Zatěžování bylo vedeno kolmo na směr hutnění, hodnota pevnosti v tlaku se zaokrouhlí na 0,1 MPa.

Hodnoty pevností v tlaku na vzorcích UHPC ukazuje tabulka č. 10 a graf č. 3, na vzorcích RPC pak tabulka č. 11 a graf č. 4. Sedmidenní i konečné pevnosti u všech 4 směsí byly srovnatelné vzhledem k velkému rozptylu pevností na jednotlivých vzorcích. Rozdíl byl například 19 MPa mezi nejnižší (141,0 MPa) a největší (160,1 MPa) naměřenou 90denní pevností v tlaku u směsi UHPC 2. Naproti očekávání UHPC 1, obsahující kamenivo s největším zrnem velikosti 16 mm, dosáhl vyšších průměrných pevností než směs s největším zrnem 8 mm. U směsi s větším zrnem, zejména jde-li o drcené kamenivo s horším tvarovým indexem, lze totiž obtížněji dosáhnout hutné struktury.

*Tabulka 10 - Pevnost v tlaku UHPC*

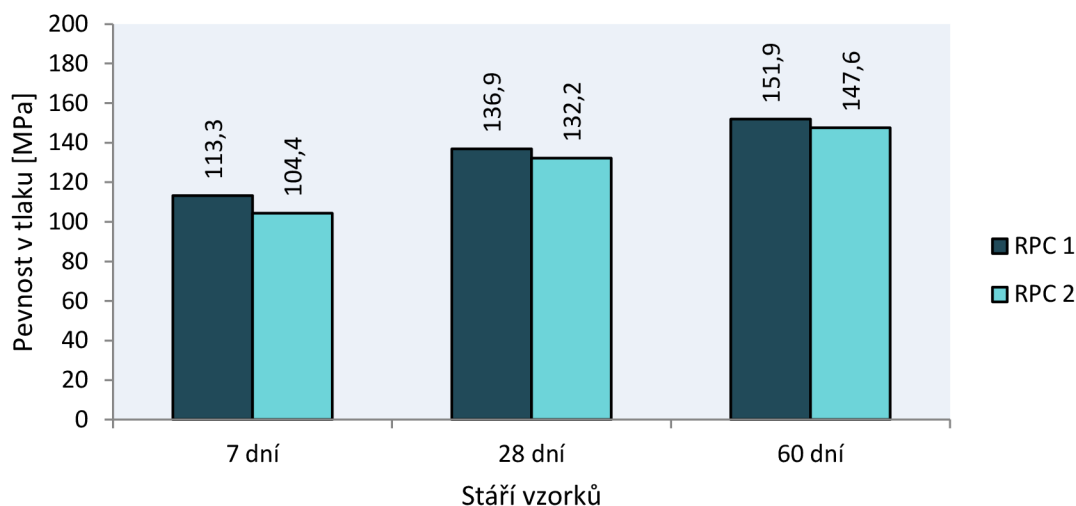
<b>Receptura</b>	<b>UHPC 1</b>	<b>UHPC 2</b>
Pevnost v tlaku po 7 dnech [MPa]	117,3	114,2
Pevnost v tlaku po 90 dnech [MPa]	149,1	147,7



*Graf 3 - Pevnosti v tlaku UHPC po 7 a 90 dnech*

Tabulka 11 - Pevnost v tlaku RPC

Receptura	RPC 1	RPC 2
Pevnost v tlaku po 7 dnech [MPa]	113,3	104,4
Pevnost v tlaku po 28 dnech [MPa]	136,9	132,2
Pevnost v tlaku po 60 dnech [MPa]	151,9	147,6



Graf 4 - Pevnosti v tlaku RPC po 7, 28 a 60 dnech

Potenciál reaktivních práškových kompozitů - s ohledem zejména na pevnost v tlaku - nebyl využit, vzhledem k faktu, že podobných pevností dosáhnul i UHPC s obyčejným kamenivem, s menším množstvím pojiva a bez nutnosti použít rozptýlenou výztuž. Směs RPC 1 obsahující nano-siliku sice vykazovala vyšší pevnosti v tlaku i v tahu za ohybu, vzhledem k velkému rozptylu všech hodnot pevností to však mezi RPC 1 a RPC 2 nebyl významný rozdíl. Nano-silika navíc nebyla dispergována ultrazvukem, ale jen ve vodě se superplastifikační přísadou a pískem, pravděpodobně tedy stále obsahovala aglomeráty, které působí v kompozitu podobně jako křemičité úlety. Větší vliv mělo míchání ručním míchadlem, které přispělo k horší homogenizaci směsi a tím k lehce horším pevnostem.

## 8.5 Pevnost v tahu za ohybu

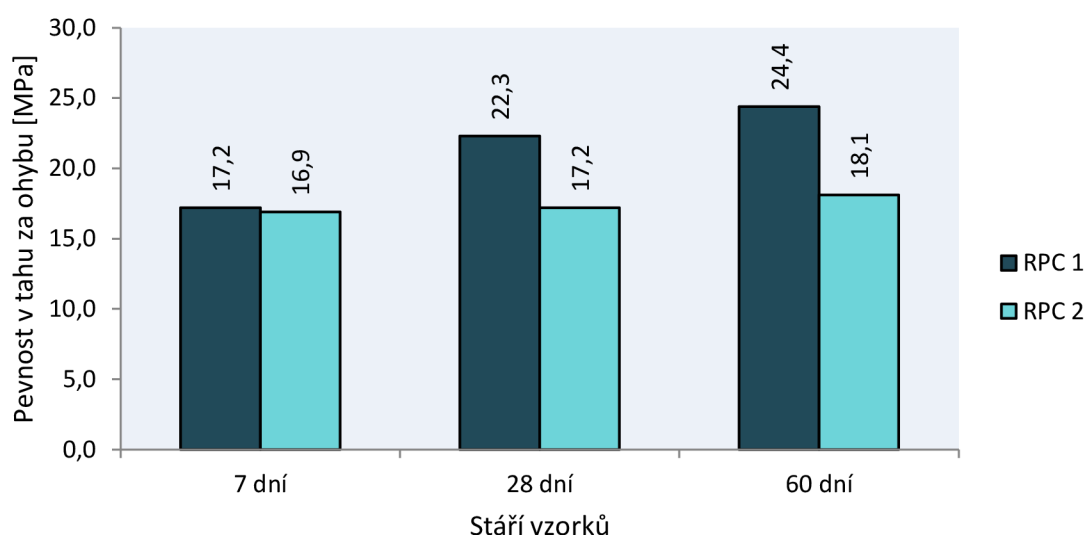
Pevnost v tahu za ohybu byla stanovena dle příslušné normy ČSN EN 1015-11 [84] na trámečcích z RPC třibodovým ohybem. Trámeček 40x40x160 mm byl umístěn symetricky na podpory vzdálené 100 mm od sebe a uprostřed rozpětí zatěžován hydraulickým lisem kolmo na směr hutnění. Pevnost v tahu za ohybu se zaokrouhlí na

0,1 MPa. Hodnoty pevností v tahu za ohybu jsou v tabulce č. 12 a v grafu č. 5. Při dosažení přibližně 70% síly potřebné k porušení vzorku došlo ke zřetelnému porušení cementové matrice vzorku (křehkému lomu) a dále už zatížení přenášely jen drátky.

Nejvyšší dosažená pevnost v tahu za ohybu 24,4 MPa se řadí ke spodní hranici dosahovaných pevností RPC (běžně kolem 30, v případě proteplování až 60 MPa). Nicméně běžné betony stále několikanásobně převyšuje.

Tabulka 12 - Pevnost v tahu za ohybu RPC

Receptura	RPC 1	RPC 2
Pevnost v tahu za ohybu po 7 dnech [MPa]	17,2	16,9
Pevnost v tahu za ohybu po 28 dnech [MPa]	22,3	17,2
Pevnost v tahu za ohybu po 60 dnech [MPa]	24,4	18,1



Graf 5 - Pevnost v tahu za ohybu RPC po 7, 28 a 60 dnech

## 9 Závěr

Bakalářská práce se zabývala v teoretické části vstupními surovinami používanými k výrobě ultravysoce pevnostních betonů a reaktivních práškových kompozitů, metodologií jejich návrhu, zpracování, ošetřování a vlastnostmi jak v čerstvém, tak ztvrdlém stavu. Širšímu užití těchto moderních materiálů brání několik faktorů. Vyžadují pečlivý výběr kvalitních surovin a jejich co nejméně proměnlivé vlastnosti.

Při návrhu je třeba sledovat křivky zrnitosti kameniva pro dosažení hutné struktury a zvolit superplastifikační přísadu kompatibilní s použitým typem cementu, aby bylo dosaženo požadované zpracovatelnosti. Kvůli optimální homogenizaci je většinou potřeba prodloužit dobu míchání.

Nejdůležitějším negativem je však ekonomická náročnost, která je vzhledem k stále přetrvávajícímu trendu vybírat zakázky na základě nejnižší ceny překážkou pro uplatnění UHPC nebo RPC. Podíl na vyšší ceně má především vysoký obsah cementu a křemičitých úletů, v případě RPC pak nutný vysoký obsah rozptýlené výztuže (nejčastěji ocelových drátků). Proto byly v práci popsány možnosti náhrady cementu alternativními materiály jako elektrárenský popílek, vysokopeční struska, mletý vápenec ale také ne tolik běžnými jako například popel z rýžových slupek nebo z paliva pro výrobu palmového oleje.

Používání alternativních surovin a snižování obsahu cementu má nesporné ekologické přínosy a přispívá k udržitelnému rozvoji. Na použití UHPC ve stavebních konstrukcích je nutno pohlížet z dlouhodobého hlediska vzhledem k jeho výborné trvanlivosti, jak bylo popsáno v kapitole 5. Při použití UHPC se výrazně omezuje nutnost údržby konstrukcí a často nákladných oprav, zejména u dopravní infrastruktury. Vyčíslení nákladů na opravy konstrukcí v horizontu několika desítek let může být diskutabilní, ale například v případě mostní konstrukce v článku [64] vychází životní cyklus stavby s použitím prvků z UHPC příznivěji než z betonu běžných pevností.

Z hlediska mechanických vlastností má UHPC potenciál kromě speciálních konstrukcí (například prvky velmi namáhané předpínáním) především při výstavbě výškových budov a mostů. Umožňuje tenké průřezy konstrukčních prvků, čím se snižuje hmotnost celé stavby a tím i zatížení do základů. Zvyšuje se využitelná plocha. V článku [85] autoři srovnávali 40podlažní kancelářskou budovu s nosnými prvky z běžného betonu a z kombinace běžného betonu a UHPC. Průřez sloupů se snížil o 32,18 až 62,13 % (v závislosti na podlaží), celková hmotnost nosných prvků se snížila o 48,71 %. Značně poklesnul také objem potřebné ocelové tyčové výztuže.

UHPC i RPC lze vyrobit jako samozhutnitelné, tím se sníží pracnost na stavbě. Ušetří se pohonné hmoty za dopravu kameniva, kterého je potřeba méně. Celková spotřeba cementu záleží na konkrétní stavbě, teoreticky může být menší v případě použití UHPC, protože objem běžného betonu bude větší, což má pozitivní vliv na emise CO<sub>2</sub> vzniklé



při výrobě cementu. UHPC vykazuje vysoké počáteční pevnosti, to umožňuje dřívější odbednění a urychlení stavebních prací.

V praktické části byly navrženy 2 směsi UHPC a 2 směsi RPC. Bylo vyrobeno 9 krychlí z každé směsi UHPC a 6 trámečků z každé směsi RPC. Stanovily se objemové hmotnosti v čerstvém a ztvrdlém stavu, konzistence, pevnost v tlaku a v případě trámečků ještě pevnosti v tahu za ohybu (třibodově).

Objemová hmotnost v čerstvém stavu směsi UHPC 1 byla  $2550 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , u UHPC 2  $2500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , ve ztvrdlém stavu byly dle očekávání nižší ( $2530$  a  $2480 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ). Sednutí kužele bylo v obou případech  $240 \text{ mm}$ , tedy třída S5 (tekutá). Konzistence však byly velmi lepivé („medovité“) a komplikovaly by využití jak při prefabrikaci, tak i při betonáži in situ. Řešením by mohlo být upravení množství superplastifikační přísady, změna jejího typu, přidání vody (vodní součinitele byly velmi nízké) nebo náhrada části cementu jinou aktivní příměsí.

Pevnosti v tlaku na krychlích  $150\times 150\times 150 \text{ mm}$  byly zkoušeny po 7 a 90 dnech. Ačkoli UHPC 1 obsahoval navíc větší frakci kameniva ( $8\text{-}16 \text{ mm}$ ), pevnosti v tlaku byly lehce vyšší. Hodnoty  $150 \text{ MPa}$ , která se většinou uvádí jako hranice ultravysoce pevnostních betonů, nebylo dosaženo jen o  $0,9 \text{ MPa}$ , což je ale vzhledem k velkému rozptylu pevností přijatelné. Vzhledem k faktu, že směs UHPC 2 obsahovala cementu o  $50 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  více a dosáhla pevností nižších, bylo by možné obsah cementu snížit. To by také přispělo k lepší zpracovatelnosti.

Byly vyrobeny dvě směsi reaktivních práškových kompozitů, rozdíl mezi nimi byl v použití nano-siliky u první směsi a mírně zvýšené dávky vody u směsi druhé. Objemová hmotnost ve ztvrdlém stavu byla jen o  $10 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  menší než v čerstvém stavu v případě směsi RPC 1 a o  $20 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  menší u směsi RPC 2. Obě objemové hmotnosti byly však menší než návrhová objemová hmotnost, je tedy žádoucí upravit návrh směsi. Dalším vysvětlením může být nedokonalá homogenizace a zhutnění ve formách, tudíž větší obsah vzduchu.

Lepšímu zhutnění by přispěla měkčí konzistence, která byla stanovena jako rozlití malty na střešacím stolku, hodnota rozlití byla  $190 \text{ mm}$  pro RPC 1 a  $180 \text{ mm}$  pro RPC 2. Zvýšení dávky vody by mělo za následek snížení pevností, řešením by mohlo být upravit dávku superplastifikační přísady nebo změna druhu. Také mohlo dojít ke špatné

homogenizaci a nedostatečnému smočení zrn cementu superplastifikátorem. Bylo by vhodné vyzkoušet kombinaci cementu, křemičitých úletů, superplastifikační přísady a vody bez vápence, křemičitého písku a ocelových drátků.

Pevnosti v tlaku byly zkoušeny po 7, 28 a 60 dnech a byly srovnatelné s pevnostmi UHPC, tedy poměrně nízké. I bez tepelného ošetřování, aplikaci tlaku při tuhnutí nebo autoklávování by tyto kompozity měly dosáhnout 180-200 MPa v tlaku. Příčinou může být špatný návrh směsi, homogenizace a zhutnění a z tohoto vyplývající nedostatečně hutná struktura, kde každý vzduchový pór je slabinou. Vliv nano-siliky nebyl prokazatelný díky velkému rozptylu pevností a dalších již zmíněných faktorů jako nedostatečná homogenizace a zhutnění.

Pevnost v tahu za ohybu byla pro RPC 1 24,4 MPa a dá se uvažovat jako hlavní přednost RPC, který je takto vhodný pro aplikaci například pro konstrukční prvky velmi namáhané od předpínání, kde je zároveň požadována vysoká počáteční pevnost.

Zatímco RPC se v současné stavební praxi používá jen ojediněle, UHPC je možno objednat jako transport beton se zaručenou dobou zpracovatelnosti 3 hodiny od zamíchání. Architektům umožňuje UHPC vytvářet odvážné tvary, ať už celých staveb nebo jen fasádních prvků. Překážkou použití UHPC může být také nedostatečná legislativa a normové požadavky, ale to se snad v blízké budoucnosti změní.

## 10 Seznam použitých zdrojů

- [1] RICHARD, Pierre a Marcel CHEYREZY. Composition of reactive powder concretes. *Cement and Concrete Research*. 1995, **25**(7): 1501-1511. DOI: 10.1016/0008-8846(95)00144-2. ISSN 00088846. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0008884695001442>
- [2] ULM, Franz-Josef a Paul ACKER. Nanoengineering UHPC Materials and Structures. In: FEHLING, Ekkehard, M SCHMIDT a S STÜRWALD. *Ultra high performance concrete (UHPC): proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany, March 05-07, 2008*. Kassel: Kassel University Press, 2008, s. 3-11. Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Heft 10. ISBN 3899583760.
- [3] KALNÝ, Milan, Jan KOMANEC, Václav KVASNIČKA, Jan L. VÍTEK, Robert BROŽ, Petr KOUKOLÍK a Robert COUFAL. Lávka přes Labe v Čelákovících - První nosná konstrukce z UHPC v ČR. *Beton: Technologie, konstrukce, sanace*. Praha: Česká betonářská společnost, 2014, (4). ISSN 1213-3116.
- [4] COUFAL, Robert a Jan L. VÍTEK. První použití UHPC ve formě transportbetonu v ČR. *Materiály pro stavbu*. Praha: Springer Media, 2012, (9). ISSN 1213-0311.
- [5] GHAFARI, Ehsan, Hugo COSTA a Eduardo JÚLIO. Critical review on eco-efficient ultra high performance concrete enhanced with nano-materials. *Construction and Building Materials*. [Guildford, Surrey: Butterworth Scientific], 2015, (101). ISSN 1879-0526.
- [6] SHI, Caijun, WU, XIAO, WANG, HUANG a Zhi FANG. A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design. *Construction and Building Materials*. [Guildford, Surrey: Butterworth Scientific], 2015, (103). s. 742-749. ISSN 1879-0526.
- [7] PYTLÍK, Petr. *Technologie betonu*. Brno: VUTIUM, 2000. s. 50. ISBN 80-214-1647-5.
- [8] STRUNGE, Josef a Thomas DEUSE. Special cements for ultra high performance concrete. In: FEHLING, Ekkehard, M SCHMIDT a S STÜRWALD. *Ultra high performance concrete (UHPC): proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany, March 05-07, 2008*. Kassel: Kassel University Press, 2008, s. 61-68. Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Heft 10. ISBN 3899583760.
- [9] YANG, Youhua. *Manufacturing reactive powder concrete using common New Zealand materials*. Auckland, N.Z., 2000. Diplomová práce. Dept. of Civil and Resource Engineering, University of Auckland. Vedoucí práce Jason Ingham.
- [10] ŠTĚRBA, Alain. Příměsí dřívě a nyní: Část I. *Beton: Technologie, konstrukce, sanace*. Praha. 2011, (6): 20-27. ISSN 1213-3116
- [11] HESAM, Madani, ALIREZA a TAYEBE. A comparison between the pozzolanic reactivity of nanosilica sols and pyrogenic nanosilicas. ED. BY M. SCHMIDT .. [ET AL.]. *Ultra-high performance concrete and nanotechnology in construction: proceedings of Hipermat 2012, 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials, Kassel, March 7 - 9, 2012*. Kassel: Kassel Univ. Press, 2012, 125-131. ISBN 9783862192656.
- [12] JAYAKUMAR, Karthikeyan. Role of Silica fume in Concrete in Concrete Technology. ED. BY M. SCHMIDT .. [ET AL.]. *Ultra-high performance concrete and*

- nanotechnology in construction: proceedings of Hipermat 2012, 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials, Kassel, March 7 - 9, 2012.* Kassel: Kassel Univ. Press, 2012, 165-174. ISBN 9783862192656.
- [13] FRIDRICOVÁ, Marcela, Jan GEMRICH, Karel DVOŘÁK, Dominik GAZDIČ, Karel KALIVODA. Možnosti výroby směsných cementů na bázi fluidních popílků *Beton: Technologie, konstrukce, sanace*. Praha. 2013, (4): 74-78. ISSN 1213-3116
- [14] YAZICI, Halit, Hüseyin YIGITER, Anıl S. KARABULUT a Bülent BARADAN. Utilization of fly ash and ground granulated blast furnace slag as an alternative silica source in reactive powder concrete. *Fuel*. 2008, (87): 2401-2407. ISSN 00162361.
- [15] Y.Z. Peng, S. Hu, Q. Ding, Preparation of reactive powder concrete using fly ash and steel slag powder, *J. Wuhan Univ. Technol.-Mater. Sci. Ed.* 25 (2) (2010) 349–354.
- [16] ČSN EN 15167-1. *Mletá granulovaná vysokopeční struska pro použití do betonu, malty a injektážní malty - Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [17] YAZICI, Halit, M.Y. YARDIMCI, H. YIGITER, et al., Mechanical properties of reactive powder concrete containing high volumes of ground granulated blast furnace slag, *Cem. Concr. Compos.* 2010, (8): 639–648.
- [18] CANMET MATERIALS TECHNOLOGY LABORATORY. *Characteristics of Metakaolin and its use in concrete*. Dostupné také z: <http://ecosmartconcrete.com/docs/prfourier.pdf>
- [19] SLÍŽKOVÁ, P. TESÁREK, T. PLACHÝ, D. FRANKEOVÁ a V. PETRÁŇOVÁ. Comprehensive study on mechanical properties of lime-based pastes with additions of metakaolin and brick dust. *Cement and Concrete Research: An International Journal*. Hong Kong: Elsevier, 2014, **64**(64): 17-29. DOI: 10.1016/j.cemconres.2014.06.006. ISSN 00088846. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884614001239>
- [20] RAMEZANIANPOUR, Ali A., E. GHASVAND, I. NICKSERESHT, M. MAHDIKHANI a F. MOODI. Influence of various amounts of limestone powder on performance of Portland limestone cement concretes. *Cement and Concrete Composites* [online]. 2009, vol. 31, issue 10, s. 715-720. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2009.08.003. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946509001383>
- [21] AN, Van Viet Thien, Ludwig HORST-MICHAEL. Proportioning Optimization of UHPC Containing Rice Husk Ash and Ground Granulated Blast-furnace Slag ED. BY M. SCHMIDT .. [ET AL.]. *Ultra-high performance concrete and nanotechnology in construction: proceedings of Hipermat 2012, 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials, Kassel, March 7 - 9, 2012.* Kassel: Kassel Univ. Press, 2012, 165-174. ISBN 9783862192656.
- [22] SEKANINOVÁ, J. Tenkovrstvé geopolymerní omítky pro vnější použití. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2012. 56 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. František Šoukal, Ph.D..
- [23] SCHRÖFL, Ch., M. GRUBER a J. PLANK. Preferential adsorption of polycarboxylate superplasticizers on cement and silica fume in ultra-high performance concrete (UHPC). *Cement and Concrete Research*. 2012, **42**(11), 1401-1408. DOI: 10.1016/j.cemconres.2012.08.013. ISSN 00088846. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884612001913>
- [24] HIRSCHI, Thomas a WOMBACHER. Skupiny. FEHLING, Ekkehard, M SCHMIDT a S STÜRWALD. *Ultra high performance concrete (UHPC): proceedings of the Second*

- International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany, March 05-07, 2008*. Kassel: Kassel University Press, 2008, (1). Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Heft 10. ISBN 3899583760.
- [25] NGUYEN, Viet Tue, Jianxin MA a ORGASS. Influence of addition method of superplasticizer on the properties of fresh UHPC. FEHLING, Ekkehard, M SCHMIDT a S STÜRWALD. *Ultra high performance concrete (UHPC): proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany, March 05-07, 2008*. Kassel: Kassel University Press, 2008, (1). Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Heft 10. ISBN 3899583760.
- [26] AIAD, Ismail. Influence of time addition of superplasticizers on the rheological properties of fresh cement pastes. *Cement and Concrete Research*. 2003, **33**(8), 1229-1234. DOI: 10.1016/S0008-8846(03)00037-1. ISSN 00088846. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884603000371>
- [27] YANG, Gai-Fei PENG, Yu-Xin GAO a ZHANG. Characteristics of Mechanical Properties and Durability of Ultra-High Performance Concrete Incorporating Coarse Aggregate. KASSEL], ed. by M. Schmidt .. [Universität. *Ultra-high performance concrete and nanotechnology in construction proceedings of Hipermat 2012, 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials, Kassel, March 7 - 9, 2012*. Kassel: Kassel Univ. Press, 2012, (1). ISBN 9783862192649. ISSN 978-3-86219-264-9.
- [28] WANG, Chong, Changhui YANG, Fang LIU, Chaojun WAN a Xincheng PU. Preparation of Ultra-High Performance Concrete with common technology and materials. *Cement and Concrete Composites*. 2012, **34**(4), 538-544. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2011.11.005. ISSN 09589465. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095894651100206X>
- [29] AMBILY, P.S., C. UMARANI, K. RAVISANKAR, Prabhat Ranjan PREM, B.H. BHARATKUMAR a Nagesh R. IYER. Studies on ultra high performance concrete incorporating copper slag as fine aggregate. *Construction and Building Materials*. 2015, (77), 233-240. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.092. ISSN 09500618. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061814013944>
- [30] YU, R., P. SPIESZ a H.J.H. BROUWERS. Mix design and properties assessment of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC). *Cement and Concrete Research*. 2014, (56), 29-39. DOI: 10.1016/j.cemconres.2013.11.002. ISSN 00088846. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884613002275>
- [31] DE LARRARD, F. a T. SEDRAN. Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model. *Cement and Concrete Research*. 1994, **24**(6), 997-1009. DOI: 10.1016/0008-8846(94)90022-1. ISSN 00088846. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0008884694900221>
- [32] KOENDERS, E.A.B., S. FORMAGINI a E.M.R. FAIRBAIRN. Performance assessment of Ultra High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites in view of sustainability. *Materials*. 2012, (36). DOI: 10.1016/j.matdes.2011.09.022. ISSN 02613069. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261306911006364>
- [33] DILS, J., V. BOEL a G. DE SCHUTTER. Vacuum mixing technology to improve the mechanical properties of ultra-high performance concrete. *Materials and Structures*. 2015, **48**(11), 3485-3501. DOI: 10.1617/s11527-014-0416-2. ISSN 1359-5997. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1617/s11527-014-0416-2>

- [34] İPEK, Metin, Kemalettin YILMAZ, Mansur SÜMER a Mehmet SARIBIYIK. The effect of pre-setting pressure applied flexural strength and fracture toughness of reactive powder concrete during the setting phase. *Construction and Building Materials*. 2011, **25**(1), 61-68. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.06.056. ISSN 09500618. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061810003053>
- [35] İPEK, Metin, Kemalettin YILMAZ a Mucteba UYSAL. The effect of pre-setting pressure applied flexural strength and fracture toughness of reactive powder concrete during the setting phase. *Construction and Building Materials*. 2012, (26), 459-465. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.06.045. ISSN 09500618. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061811003084>
- [36] AHLBORN, Theresa, Devin HARRIS, Donald MISSON a Erron PEUSE. Characterization of Strength and Durability of Ultra-High-Performance Concrete Under Variable Curing Conditions. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2011, **2251**(1), 68-75. DOI: 10.3141/2251-07. ISSN 0361-1981. Dostupné také z: <http://trrjournalonline.trb.org/doi/10.3141/2251-07>
- [37] HEINZ, Detlef, Liudvikas URBONAS a Tobias GERLICHER. Effect of Heat Treatment Method on the Properties of UHPC. KASSEL], ed. by M. Schmidt .. [Universität. *Ultra-high performance concrete and nanotechnology in construction proceedings of Hipermat 2012, 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials, Kassel, March 7 - 9, 2012*. Kassel: Kassel Univ. Press, 2012, (1). ISBN 9783862192649.
- [38] SCHACHINGER, HILBIG a STENGEL. Effect of Curing Temperature at an Early Age on the Long-Term Strength Development of UHPC. FEHLING, Ekkehard, M SCHMIDT a S STÜRWALD. *Ultra high performance concrete (UHPC): proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany, March 05-07, 2008*. Kassel: Kassel University Press, 2008, (1). Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Heft 10. ISBN 3899583760.
- [39] GRAYBEAL, Benjamin A. Compression response of a rapid-strengthening ultra-high performance concrete formulation. *FHWA, U.S. Department of Transportation, Report No. FHWA-HRT-12-065, National Technical Information Service Accession No. 2012-112545*. 2012, (1).
- [40] CHEN, Jeffrey; GILLES, C. UHPC composites based on glass fibers with high fluidity, ductility, and durability. In: *Ultra-High Performance Concrete and Nanotechnology in Construction. Proceedings of Hipermat 2012. 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials*. Kassel University Press GmbH, 2012. p. 265.
- [41] NEZHENTSEVA, Anastasia, Eigil V. SØRENSEN, Lars V. ANDERSEN a Frank SCHULER. *Distribution and Orientation of Steel Fibres in UHPFRC* [online]. Aalborg: Aalborg University, 2013 [cit. 2016-02-02]. ISSN 1901-726X.
- [42] PARK, Jong-Sup, Young KIM, Jeong-Rae CHO a Se-Jin JEON. Early-Age Strength of Ultra-High Performance Concrete in Various Curing Conditions. *Materials*. 2015, **8**(8), 5537-5553. DOI: 10.3390/ma8085261. ISSN 1996-1944. Dostupné také z: <http://www.mdpi.com/1996-1944/8/8/5261/>
- [43] PARK, Seung Hun, Dong Joo KIM, Gum Sung RYU a Kyung Taek KOH. Tensile behavior of Ultra High Performance Hybrid Fiber Reinforced Concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2012, **34**(2), 172-184. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2011.09.009. ISSN 09589465. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946511001661>

- [44] WANG, Dehui, Caijun SHI, Zemei WU, Jianfan XIAO, Zhengyu HUANG a Zhi FANG. A review on ultra high performance concrete: Part II. Hydration, microstructure and properties. *Construction and Building Materials*. 2015, (96), 368-377. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.095. ISSN 09500618. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061815303147>
- [45] SHI, Caijun, Dehui WANG, Linmei WU a Zemei WU. The hydration and microstructure of ultra high-strength concrete with cement–silica fume–slag binder. *Cement and Concrete Composites*. 2015, (61), 44-52. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2015.04.013. ISSN 09589465. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946515000761>
- [46] ALDAHDOOH, M.A.A., N. MUHAMAD BUNNORI a M.A. MEGAT JOHARI. Development of green ultra-high performance fiber reinforced concrete containing ultrafine palm oil fuel ash. *Construction and Building Materials*. 2013, (48), 379-389. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.07.007. ISSN 09500618. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061813006211>
- [47] DEEB, R., A. GHANBARI a B.L. KARIHALOO. Development of self-compacting high and ultra high performance concretes with and without steel fibres. *Cement and Concrete Composites*. 2012, **34**(2), 185-190. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2011.11.001. ISSN 09589465. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946511002022>
- [48] ALDAHDOOH, M.A.A., N. MUHAMAD BUNNORI a M.A. MEGAT JOHARI. Evaluation of ultra-high-performance-fiber reinforced concrete binder content using the response surface method. *Materials*. 2013, (52), 957-965. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.06.034. ISSN 02613069. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261306913005682>
- [49] MEGAT JOHARI, M.A., A.M. ZEYAD, N. MUHAMAD BUNNORI a K.S. ARIFFIN. Engineering and transport properties of high-strength green concrete containing high volume of ultrafine palm oil fuel ash. *Construction and Building Materials*. 2012, **30**(5), 281-288. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.12.007. ISSN 09500618. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061811006842>
- [50] LOWKE, Dirk, STENGEL, SCHIEßL a GEHLEN. Control of Rheology, Strength and Fibre Bond of UHPC with Additions - Effect of Packing Density and Addition Type. In: KASSEL], ed. by M. Schmidt .. [Universität. *Ultra-high performance concrete and nanotechnology in construction proceedings of Hipermat 2012, 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials, Kassel, March 7 - 9, 2012*. Kassel: Kassel Univ. Press, 2012, s. 215-224. ISBN 9783862192649.
- [51] YANG, In Hwan, Changbin JOH a Byung-Suk KIM. Structural behavior of ultra high performance concrete beams subjected to bending. *Engineering Structures*. 2010, **32**(11), 3478-3487. DOI: 10.1016/j.engstruct.2010.07.017. ISSN 01410296. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141029610002737>
- [52] GRAYBEAL, Benjamin A., Florent BABY, MARCHAND a Francois TOUTLEMONDE. Direct and Flexural Tension Test Methods for Determination of the Tensile Stress-Strain Response of UHPFRC. In: KASSEL], ed. by M. Schmidt .. [Universität. *Ultra-high performance concrete and nanotechnology in construction proceedings of Hipermat 2012, 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials, Kassel, March 7 - 9, 2012*. Kassel: Kassel Univ. Press, 2012, s. 395-402. ISBN 9783862192649.

- [53] GRAYBEAL, Benjamin A. a RUSSEL. INFRASTRUCTURE RESEARCH & DEVELOPMENT FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. *Ultra-High Performance Concrete: A State-of-the-Art Report for the Bridge Community* [online]. McLean, Virginia, 2013, 171 s. [cit. 2016-02-15].
- [54] YOO, Doo-Yeol a YOON. Structural performance of ultra-high-performance concrete beams with different steel fibers. *Engineering Structures*. 2015, (102), 409-423. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.08.029. ISSN 01410296. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141029615005283>
- [55] JANOŠKOVÁ, Lenka. Dynamická analýza konstrukce zatížené seismickým zatížením. Brno, 2012. 86 s., 16 s. příloh. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební mechaniky. Vedoucí práce Ing. Zbyněk Vlk, Ph.D.
- [56] YU, R., L. VAN BEERS, P. SPIESZ a H.J.H. BROUWERS. Impact resistance of a sustainable Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) under pendulum impact loadings. *Construction and Building Materials*. 2016, (107), 203-215. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.157. ISSN 09500618. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095006181530828X>
- [57] *SilverSchmidt Concrete Test Hammer* [online]. 2014 [cit. 2016-02-19]. Dostupné z: [http://www.proceq.com/fileadmin/documents/proceq/products/Concrete/SilverSchmidt/English/810\\_341\\_30E\\_SilverSchmidt\\_SF\\_E\\_2014.06\\_low.pdf](http://www.proceq.com/fileadmin/documents/proceq/products/Concrete/SilverSchmidt/English/810_341_30E_SilverSchmidt_SF_E_2014.06_low.pdf)
- [58] GHAFARI, Ehsan, Hugo COSTA, Eduardo JÚLIO, António PORTUGAL a Luisa DURÃES. The effect of nanosilica addition on flowability, strength and transport properties of ultra high performance concrete. *Materials*. 2014, (59), 1-9. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.02.051. ISSN 02613069. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261306914001691>
- [59] NICOLAIDES, Demetris, Antonis KANELLOPOULOS, Pericles SAVVA a Michael PETROU. Experimental field investigation of impact and blast load resistance of Ultra High Performance Fibre Reinforced Cementitious Composites (UHPFRCCs). *Construction and Building Materials*. 2015, (95), 566-574. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.141. ISSN 09500618. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095006181530163X>
- [60] ASTARLIOGLU, Serdar a Ted KRAUTHAMMER. Response of normal-strength and ultra-high-performance fiber-reinforced concrete columns to idealized blast loads. *Engineering Structures*. 2014, (61), 1-12. DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.01.015. ISSN 01410296. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141029614000182>
- [61] YOO, Doo-Yeol, Jung-Jun PARK, Sung-Wook KIM a Young-Soo YOON. Early age setting, shrinkage and tensile characteristics of ultra high performance fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*. 2013, (vol. 41), 427-438. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.12.015. ISSN 09500618. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061812009713>
- [62] LI, Zhengqi. Drying shrinkage prediction of paste containing meta-kaolin and ultrafine fly ash for developing ultra-high performance concrete. *Materials Today Communications*. 2016, 6(vol. 6), 74-80. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2016.01.001. ISSN 23524928. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352492815300738>
- [63] SOLIMAN, A.M. a M.L. NEHDI. Effects of shrinkage reducing admixture and wollastonite microfiber on early-age behavior of ultra-high performance concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2014, (vol. 46), 81-89. DOI:



- 10.1016/j.cemconcomp.2013.11.008. ISSN 09589465. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946513001935>
- [64] HÁJEK, Petr a Ctislav FIALA. Hodnocení životního cyklu betonových konstrukcí. *Beton: Technologie, konstrukce, sanace*. Praha: Česká betonářská společnost, 2015, **15**(5). ISSN 1213-3116.
- [65] ALKAYSI, Mo, Sherif EL-TAWIL, Zhichao LIU a Will HANSEN. Effects of silica powder and cement type on durability of ultra high performance concrete (UHPC). *Cement and Concrete Composites*. 2016, (vol. 66), 47-56. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2015.11.005. ISSN 09589465. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095894651530055X>
- [66] PIMIANTA, Pierre, Jean-Christophe MINDEGUIA, SIMON, BEHLOUL, , Patrick BAMONTE a Pietro GAMBAROVA. Literature Review on the Behaviour of UHPFRC at High Temperature. KASSEL], ed. by M. Schmidt .. [Universität. *Ultra-high performance concrete and nanotechnology in construction proceedings of Hipermat 2012, 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials, Kassel, March 7 - 9, 2012*. Kassel: Kassel Univ. Press, 2012, 549-. ISBN 9783862192649.
- [67] CHOE, Gyeongcheol, Gyuyong KIM, Nenad GUCUNSKI a Seonghun LEE. Evaluation of the mechanical properties of 200MPa ultra-high-strength concrete at elevated temperatures and residual strength of column. *Construction and Building Materials*. 2015, (vol. 86), 159-168. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.03.074. ISSN 09500618. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061815003323>
- [68] TAYEH, Bassam A., B.H. ABU BAKAR, M.A. MEGAT JOHARI a Yen Lei VOO. Mechanical and permeability properties of the interface between normal concrete substrate and ultra high performance fiber concrete overlay. *Construction and Building Materials*. 2012, (vol. 36), 538-548. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.06.013. ISSN 09500618. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061812004059>
- [69] TAM, C.M., Vivian W.Y. TAM a K.M. NG. Assessing drying shrinkage and water permeability of reactive powder concrete produced in Hong Kong. *Construction and Building Materials*. 2012, **26**(1), 79-89. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.05.006. ISSN 09500618. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061811002443>
- [70] SCHEYDT, Jennifer C. a MÜLLER. Microstructure of Ultra High Performance Concrete (UHPC) and its Impact on Durability. KASSEL], ed. by M. Schmidt .. [Universität. *Ultra-high performance concrete and nanotechnology in construction proceedings of Hipermat 2012, 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials, Kassel, March 7 - 9, 2012*. Kassel: Kassel Univ. Press, 2012, 349-356. ISBN 9783862192649.
- [71] ACKER, Paul a Mouloud BEHLOUL. Ductal® Technology: A Large Spectrum of Properties, A Wide Range of Applications. SCHMIDT, M a Ekkehard FEHLING. *Ultra high performance concrete (UHPC): proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany, September 13-15, 2004*. Kassel: Kassel University Press, 2004, 12-24. ISBN 3899580869.
- [72] AHMAD, Shamsad, Ahmed ZUBAIR a Mohammed MASLEHUDDIN. Effect of key mixture parameters on flow and mechanical properties of reactive powder concrete. *Construction and Building Materials*. 2015, (99), 73-81. DOI:

- 10.1016/j.conbuildmat.2015.09.010. ISSN 09500618. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061815303718>
- [73] YIĞİTER, Hüseyin, Serdar AYDIN, Halit YAZICI a Mert Yücel YARDIMCI. Mechanical performance of low cement reactive powder concrete (LCRPC). *Composites Part B: Engineering*. 2012, **43**(8), 2907-2914. DOI: 10.1016/j.compositesb.2012.07.042. ISSN 13598368. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359836812004969>
- [74] YAZICI, Halit, Hüseyin YIĞİTER, Anıl Ş. KARABULUT a Bülent BARADAN. Utilization of fly ash and ground granulated blast furnace slag as an alternative silica source in reactive powder concrete. *Fuel*. 2008, **87**(12), 2401-2407. DOI: 10.1016/j.fuel.2008.03.005. ISSN 00162361. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S001623610800104X>
- [75] PENG, Yanzhou, Jun ZHANG, Jiuyan LIU, Jin KE a Fazhou WANG. Properties and microstructure of reactive powder concrete having a high content of phosphorous slag powder and silica fume. *Construction and Building Materials*. 2015, (vol. 101), 482-487. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.046. ISSN 09500618. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061815304670>
- [76] KUSHARTOMO, Widodo, Ika BALI a Budi SULAIMAN. Mechanical Behavior of Reactive Powder Concrete with Glass Powder Substitute. *Procedia Engineering*. 2015, (vol. 125), 617-622. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.11.082. ISSN 18777058. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705815033998>
- [77] VAITKEVIČIUS, Vitoldas, Evaldas ŠERELIS a Harald HILBIG. The effect of glass powder on the microstructure of ultra high performance concrete. *Construction and Building Materials*. 2014, (vol. 68), 102-109. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.05.101. ISSN 09500618. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061814006035>
- [78] ČSN EN 13263-1+A1 – *Křemičitý úlet do betonu – Část 1: Definice, požadavky a kritéria shody*. Praha: Český normalizační institut, 2009.
- [79] ČSN EN 12350 – 6. *Zkoušení čerstvého betonu: Část 6: Objemová hmotnost*. Praha: Český normalizační institut, 2009.
- [80] ČSN EN 12390 – 7. *Zkoušení ztvrdlého betonu: Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu*. Praha: Český normalizační institut, 2009.
- [81] ČSN EN 12350 – 2. *Zkoušení čerstvého betonu: Část 2: Zkouška sednutím*. Praha: Český normalizační institut, 2009.
- [82] ČSN EN 1015 – 3. *Zkušební metody malt pro zdivo – Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešovacího stolku)*. Praha: Český normalizační institut, 2000.
- [83] ČSN EN 12390 – 3. *Zkoušení ztvrdlého betonu: Část 3: Pevnost v tlaku zkušebníchtěles*. Praha: Český normalizační institut, 2012.
- [84] ČSN EN 1015 – 11. *Zkušební metody malt pro zdivo: Část 11: Stanovení pevnosti zatvrdlých malt v tahu za ohybu a v tlaku*. Praha: Český normalizační institut, 2000.
- [85] POPA, Mircea, Zoltan KISS, Horia CONSTANTINESCU a Geanina BOLCA. Case Study: Designing a 40 Storey High Office Building Using two Variants, with Regular Concrete Columns and with Compound Ultra-High Performance Concrete Columns and Regular Concrete Columns. *Procedia Technology*. 2016, **22**, 40-47. DOI: 10.1016/j.protcy.2016.01.007. ISSN 22120173. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212017316000086>

## 11 Seznam příloh

### 11.1 Seznam grafů

<i>Graf 1 - Vliv obsahu RHA na sednutí kužele a pevnost v tlaku [21] .....</i>	19
<i>Graf 2 - Objemové hmotnosti v čerstvém a ztvrdlém stavu .....</i>	47
<i>Graf 3 - Pevnosti v tlaku UHPC po 7 a 90 dnech.....</i>	49
<i>Graf 4 - Pevnosti v tlaku RPC po 7, 28 a 60 dnech .....</i>	50
<i>Graf 5 - Pevnost v tahu za ohybu RPC po 7,28 a 90 dnech.....</i>	51

### 11.2 Seznam obrázků

<i>Obrázek 1- Tranzitní zóna obyčejného betonu (vlevo) a UHPC (vpravo) [6] .....</i>	15
<i>Obrázek 2 - Snímek prachu z rýžových slupek z elektronového mikroskopu [6] .....</i>	18
<i>Obrázek 3 - Velikost částic a jejich měrný povrch složek betonu [6].....</i>	21
<i>Obrázek 4 - Křivky zrnitosti materiálů, teoretická a návrhová křivka zrnitosti [30] .....</i>	26
<i>Obrázek 5 - Ternární diagram vlivu složek UHPC na konzistenci [45] .....</i>	30
<i>Obrázek 6 - Idealizované chování při namáhání v prostém tahu [52] .....</i>	31
<i>Obrázek 7 - Modifikovaná zkouška nárazem kyvadla [56] .....</i>	33
<i>Obrázek 8 - Řez UHPC po 80 týdnech chemického napadení [70].....</i>	36
<i>Obrázek 9 - Desky z UHPFRC, vlevo bez PP vláken, vpravo s PP vlákny [66] .....</i>	38
<i>Obrázek 10 - Zkouška konzistence RPC .....</i>	48

### 11.3 Seznam tabulek

<i>Tabulka 1 - Obvyklé složení UHPC dle [5] .....</i>	13
<i>Tabulka 2 - Chemické složení metakaolínu Mefisto L05 [19] .....</i>	17
<i>Tabulka 3 – Vlastnosti RHA [21] .....</i>	18
<i>Tabulka 4 - Složení UHPC s hrubým kamenivem [28].....</i>	22
<i>Tabulka 5 - Typ a vlastnosti vláken [6] .....</i>	24
<i>Tabulka 6 - Složení UHPC.....</i>	44
<i>Tabulka 7 - Složení RPC .....</i>	45
<i>Tabulka 8 - Objemové hmotnosti v čerstvém a ztvrdlém stavu .....</i>	46
<i>Tabulka 9 - Zkoušky konzistence .....</i>	48
<i>Tabulka 10 - Pevnost v tlaku UHPC.....</i>	49
<i>Tabulka 11 - Pevnost v tlaku RPC .....</i>	50
<i>Tabulka 12 - Pevnost v tahu za ohybu RPC.....</i>	51

### **13 Seznam použitých zkratk**

HPC	Vysocehodnotný beton
UHPC	Ultravysoce hodnotný beton
UHSC	Ultravysoce pevnostní beton
UHPRFC	Ultravysoce hodnotný beton s rozptýlenou výztuží
SCUHPRFC	Samozhutnitelný ultravysoce hodnotný beton s rozptýlenou výztuží
RPC	Reaktivní práškový kompozit
C3A	Trikalciumaluminát
RHA	Popel z rýžových slupek
POFA	Popel z paliva na výrobu palmového oleje
SNF	Plastifikační přísada na bázi sulfonovaných formaldehydů a naftalenů
SMF	Plastifikační přísada na bázi sulfonovaných formaldehydů a melaminů
LPDM	Model lineární hustoty zaplnění
SSM	Model pevné suspenze
CPM	Model kompresního zaplnění