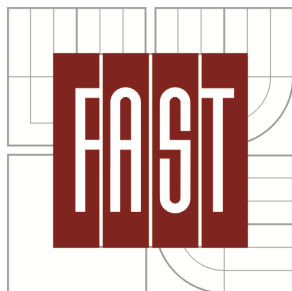


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A
DÍLCŮ

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

ULTRAVYSOCEPEVNOSTNÍ BETONY

ULTRA – HIGH – STRENGTH CONCRETES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

PAVEL AMBRUZ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. RUDOLF HELA, CSc.

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

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

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Pavel Ambruz
Název	Ultravysocepevnostní betony
Vedoucí bakalářské práce	prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
Datum zadání bakalářské práce	30. 11. 2011
Datum odevzdání bakalářské práce	25. 5. 2012
V Brně dne 30. 11. 2011	

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

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.
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.

Zásady pro vypracování

V moderní betonářské praxi se pro extrémně namáhané konstrukce např. výškové budovy, mosty či speciální prefabrikované nosníky začínají častěji prosazovat betony s pevnostmi vyššími než 110 MPa, které nazýváme ultravysocepevnostní (UHSC). V ČR jsou zatím zkušenosti s jejich praktickým využíváním minimální.

Cílem této bakalářské práce bude sestavit rešeršní přehled o metodách navrhování UHSC včetně použitých vstupních surovin a ověřených receptur včetně dosažených fyzikálně-mechanických parametrů. Posoudit dostupnost charakteristických surovin v ČR. Výraznou pozornost věnovat přístupům k navrhování křivek zrnitosti pro max. použité frakce kameniva do 4 mm a 8 mm v oblasti mezi 0 až 0,25 mm, případně vliv při používání rozptýlené výztuže. Prostudovat a popsat metodické přístupy při navrhování reaktivních práškových kompozitů a jejich možnosti.

V praktické části pak navrhnout recepturu betonu s max. frakcemi kameniva 4 a 8 mm s optimální křivkou zrnitosti pro dosažení pevností v tlaku kolem 150 MPa i s využitím jemných ocelových či jiných vláken.

Rozsah : min 40 stran

Předepsané přílohy

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

Abstrakt:

Práce se zabývá sumarizací poznatků o metodách výroby ultravysocepevnostních betonů (UHSC) a jejich možným využitím v praxi, které je deklarováno existující stavbou. Dále práce uvádí vhodné suroviny pro výrobu UHSC a jejich dostupnost na českém trhu. Praktická část se zabývá experimentem, jehož výsledkem má být beton s pevností v tlaku 150 MPa.

Klíčová slova:

Ultravysocepevnostní beton, vysokohodnotný beton, hutná matrice, mikrosilika, pevnost v tlaku

Abstract:

Thesis deals with summarizing knowledge about production methods of ultra – high – strength concrete (UHSC) and their possible use in practice, which is documented on the existing building. Further work shows suitable raw materials for production UHSC and their availability on the Czech market. The practical part results an experiment whose outcome should be concrete with a compressive strength of 150 MPa

Keywords:

Ultra - high - strength concrete, high – performance concrete, packing density, silica fume, compressive strength

Bibliografická citace VŠKP

AMBRUZ, Pavel. *Ultravysocepevnostní beton: bakalářská práce*. Brno, 2012. 57 str. 7 příloh. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí bakalářské 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 25. 5. 2012

.....
Pavel Ambruz

Poděkování:

Na tomto místě bych rád poděkoval doc. Ing. Rudolfu Helovi, CSc za cenné připomínky a odborné rady, kterými přispěl k vypracování této bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Petru Novosadovi a dalším zaměstnancům ústavu THD za pomoc při vypracování.

Obsah:

I. Teoretická část.....	10
1. Úvod.....	10
2. Cíle.....	11
3. Metody navrhování ultravysocepevnostního betonu.....	12
3.1. Technologie vyvinutá Brunauerem a jeho kolektivem.....	14
3.2. DSP betony (Densified systems with small particles = Betony se zhuštěnou maticí obsahující malé částice)	15
3.3. MDF betony (Macro defect free = Betony omezující vznik makroporuch).....	17
a) CAPR (calcium aluminate phenol resin = Kompozity z hlinitanového cementu s fenolovou pryskyřicí)	19
3.4. RPC (Reactiv powder concrete = Reaktivní práškové betony).....	21
4. Složky ultravysocepevnostního betonu.....	27
4.1. Cement.....	27
4.2. Kamenivo.....	31
4.3. Přísady.....	34
4.4. Příměsi.....	37
4.5. Voda.....	39
4.6. Vyztužování betonu.....	40
5. Vliv způsobu ošetřování UHSC na výsledné pevnosti betonu.....	43
6. Realizovaný projekt.....	45
II. Praktická část.....	47
7. Použité suroviny.....	47
7.1. Cement.....	47
7.2. Kamenivo.....	47
7.3. Voda.....	47
7.4. Plastifikační přísada.....	47
7.5. Příměsi.....	47
7.6. Rozptýlená výztuž.....	48
8. Použité receptury.....	48
9. Prováděné zkoušky.....	49
10. Výsledky zkoušek.....	49

<i>11. Závěr.....</i>	<i>51</i>
<i>12. Seznam tabulek.....</i>	<i>52</i>
<i>13. Seznam grafů.....</i>	<i>53</i>
<i>14. Seznam obrázků.....</i>	<i>54</i>
<i>15. Seznam použité literatury.....</i>	<i>55</i>
<i>16. Seznam příloh.....</i>	<i>57</i>

I. Teoretická část

1. Úvod

Beton je dnes jeden z nejpoužívanějších stavebních materiálů. Rychlého rozvoje kvality a užití dosáhl v 19. století s rozvojem hydraulických pojiv. Dalšího vývojového stupně bylo dosaženo na počátku 20. století vytvořením železobetonu a o půl století později předpjatého betonu. S narůstáním poznatků a dlouhodobých zkušeností s užitím betonu se rozšiřovaly další možnosti pro jeho modifikovaného použití. Nástup chemických přísad dal možnost vzniku vysokohodnotných betonů (high – performance concrete = HPC). HPC začaly ve světě vznikat již v osmdesátých letech 20. století a jejich rozvoj pokračuje i přes jejich vyšší cenu. Pro HPC je specifické použití přísad a příměsí, popřípadě i výztuže ze speciálních vláken.^[1]

Ultravysocepevnostní betony (ultra – high – strength concrete = UHSC) jsou podskupinou HPC, které dosahují pevnosti v tlaku vyšší než 110 MPa, a řadí se mezi ně beton se zhuštěnou maticí obsahující malé částice (densified systems with small particles = DSP), kompozity omezující vznik makroporuch (macro defect free = MDF) a reaktivní práškové kompozity (reactiv powder concrete = RPC). Každý z těchto materiálů dosahuje svých ultravysokých pevností různým způsobem a společně tvoří skupinu nových moderních materiálů. Označení těchto materiálů jako betony není úplně přesné, většinou se jedná o kompozity na bázi portlandských cementů.

Princip dosažení vysokých pevností betonu v tlaku spočívá v rovnoměrnější a hutnější struktuře betonu s minimem pórů a zvýšením podílu hydratovaného cementu. Vzhledem k nízkému vodnímu součiniteli, který se u receptur UHSC využívá, je nutné použití superplastifikačních přísad, abychom dosáhli optimální konzistence. Vysoké pevnosti těchto betonů dovolují mnohem subtilnější konstrukce a tím nižší objem vyrobeného betonu a snížení množství tyčové výztuže. Zároveň dochází ke snížení rychlosti degradace konstrukce a úsporám na údržbě. Takto může dojít k celkovému snížení nákladů stavby i přes vyšší finanční náklady u těchto betonů.

Tyto moderní betony se používají obzvláště v oblasti extrémně namáhaných konstrukcí např. výškové budovy, mosty nebo speciální prefabrikované nosníky. Využití těchto betonů limituje náročnost na výrobu (míchání) a ošetřování, proto by bylo vhodné jejich použití v našich podmínkách v prefa výrobnách. V zahraničí proběhly výzkumy UHSC již v osmdesátých letech minulého století a na základě těchto studií jsou používány v západních zemích Evropy a Japonsku. V České republice jsou zatím zkušenosti s jejich praktickým využitím minimální.

2. Cíle

Hlavním cílem této bakalářské práce bude sestavit rešeršní přehled o metodách navrhování UHSC včetně použitých vstupních surovin a ověřených receptur včetně dosažených fyzikálně-mechanických parametrů. Dále posoudit dostupnost charakteristických surovin v České republice.

Dalším cílem bude zhodnocení křivek zrnitosti pro max. použité frakce kameniva do 4 mm a 8 mm a vliv používání rozptýlené výztuže.

Dalším cílem bude popsat metodické přístupy při navrhování reaktivních práškových kompozitů a jejich možnosti pro praktické využití.

V experimentální části této práce bude cílem navržení receptury betonu s max. frakcemi kameniva 4 mm a 8 mm s optimální křivkou zrnitosti pro dosažení pevností v tlaku kolem 150 MPa i s využitím jemných ocelových či jiných vláken.

3. Metody navrhování UHSC

Ultravysoká pevnost materiálů je kromě jiného založena na extrémně nízké pórovitosti. K jejímu dosažení lze použít různé techniky. Ne všechny z těchto technik použitých v laboratorních podmínkách jsou vhodné pro komerční aplikování, zejména vlivem ekonomických důvodů nebo příliš komplikované technologie. U níže popsanych materiálů se nejedná o klasické betony, spíše se jedná o kompozity na bázi portlandského cementu, kde se projevuje z hlediska pevnosti jeho dosažitelný potenciál. Na tyto kompozity lze použít základní principy aplikované na křehké materiály. Mezi tyto materiály se řadí například také keramika, u které lze nalézt některé strukturální podobnosti s betonem.^[3]

Pevnost v tahu za ohybu (podle ČSN EN 12390-3) křehkého materiálu závisí na jeho porózitě. Tuto závislost popisuje následující exponenciální rovnice:^[2]

$$S = S_0 e^{-bP} \quad (3.1)$$

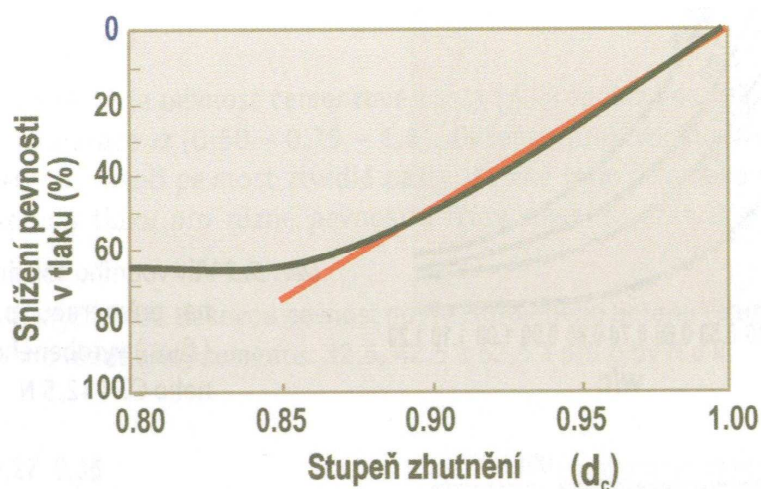
Spevnost v tahu za ohybu

Ppórovitost materiálu

S_0reprezentuje teoretickou pevnost materiálu při nulové porózitě

bkonstanta zohledňující rozměry a tvary pórů

Studie zabývající se vlivem mikrostruktury na pevnost keramických materiálů v tahu ukázaly, že kromě porózy má na výslednou pevnost vliv také velikost částic a míra nehomogenity.



Graf 1: Závislost pevnosti betonu v tlaku na obsahu vzduchu nedokonalým zhutněním^[6]

Pevnost křehkých materiálů v tlaku je mnohem vyšší, než jejich pevnost v tahu za ohybu. Důvodem pro toto chování je, že při namáhání v ohybu dojde k porušení materiálu díky rychlému růstu několika málo mikrotrhlinek. Při namáhání materiálu v tlaku je pro porušení třeba spojení velkého množství trhlinek. Je tedy nutné vynaložit značně vyšší energii k iniciaci a šíření této sítě trhlinek, které způsobí porušení materiálu namáhaného v tlaku.

Pevnost homogenních materiálů v tlaku lze odhadnout použitím Griffithova kritéria

pro porušení materiálu v tahu za ohybu a ze zákonů mechaniky kontinua. Získaná hodnota je přibližně osminásobkem hodnoty pevnosti materiálu v tahu za ohybu. Přestože doposud nebyla vyvinuta teoretická metoda pro odvození pevnosti materiálu v tlaku z jeho mikrostrukturních charakteristik, je možné k jejímu odhadu užít empirické vztahy. Příkladem je následující vztah: ^[2]

$$C = C_o(I-P)^m \quad (3.2)$$

C....pevnost v tlaku křehkého materiálu

P.....pórovitost materiálu

C_o...reprezentuje teoretickou pevnost materiálu při nulové porózitě

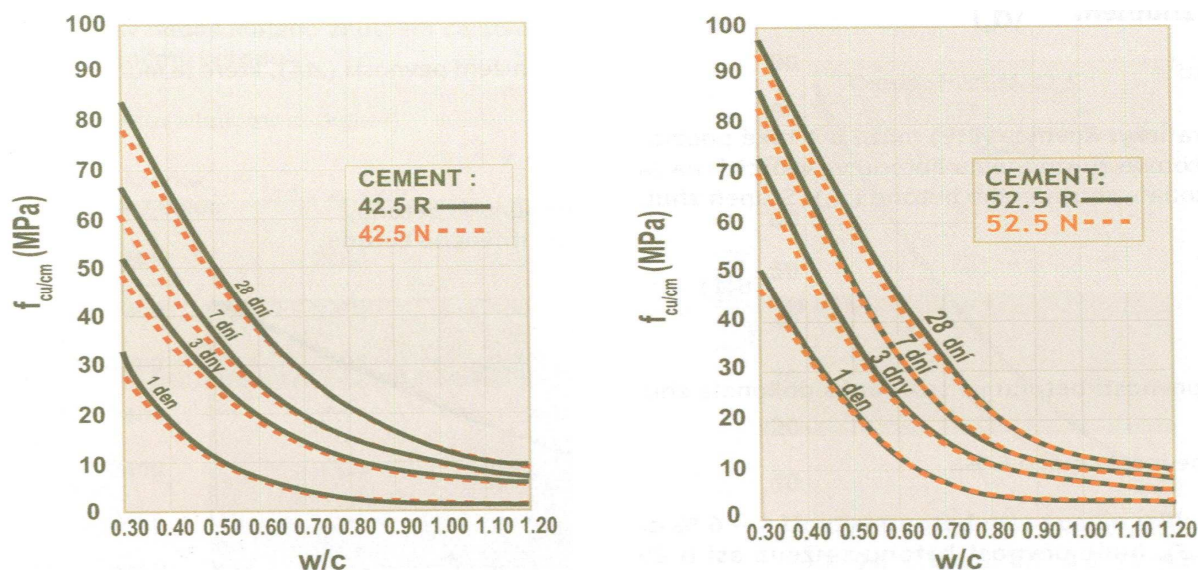
m....konstanta závisící na síle vazeb v pevné látce, velikosti a tvaru pórů, velikosti a tvaru zrn materiálu a přítomnosti nečistot

Pevnost v tlaku se snižuje se zvyšující se velikostí pórů přítomných v materiálu a se zvyšující se velikostí zrn v materiálu (v mikrostrukturním měřítku).

Většina materiálových charakteristik křehkého materiálu je závislá na středních hodnotách. To však neplatí pro mechanické vlastnosti, které závisejí spíše na hodnotách extrémních. To znamená, že pevnost materiálu je funkcí pevnosti nejslabšího článku materiálu. Z toho vyplývá zmíněný fakt, že kromě hodnoty pórovitosti je pro pevnost materiálu rozhodující také velikost a tvar pórů a jejich rozmístění v materiálu. ^[3]

Pro dosažení co nejnižší pórovitosti je nutné snížit vodní součinitel a optimalizovat rozdělení velikosti částic v kompozitu. Tuto podmínku lze splnit použitím vhodných přísad a příměsí. Použitím moderních superplastifikátorů na bázi polykarboxylátů lze dosáhnout minimálního potřebného vodního součinitele, který se pro dosažení ultravysokých pevností pohybuje v rozmezích 0,1 až 0,2. Záměs by měla obsahovat jen takové množství vody, které je potřebné pro hydrataci cementu. Nadbytečná voda odchází z matrice během zrání betonu a zanechává volné póry. Optimalizaci uspořádání částic v betonu lze částečně řešit použitím křemičitých úletů. Poměr velikosti částic cementu a mikrosiliky je přibližně 1:100, což je daleko od optimálního rozdělení velikosti částic, plynoucího ze zákona o uspořádání kulových částic. Další faktor ovlivňující pórovitost je chemické smrštění při hydrataci portlandského cementu. Smrštění činí přibližně 10% objemu původních složek nehydratovaného systému a je nevyhnutelné díky povaze reakcí, probíhajících při hydrataci. Toto smrštění lze potlačit vyvozením tlaku na materiál v průběhu prvních fází hydratace, dokud je cementová pasta v plastickém stavu a dokud nejsou v materiálu vazby, schopné tomuto tlaku vzdorovat. Již v roce 1925 použil tento postu Francouz Freyssinet, který stlačením nízkopevnostních betonů dosáhl vypuzení většiny obsaženého vzduchu, potlačení části počátečního smrštění a zvýšení pevnosti v tlaku výsledných materiálů. V dnešní době se pro zamezení vzniku hydratačních trhlin přidávají do betonu vlákna různých materiálů, které

zachytí a přenesou vznikající napětí v matrici v počátečních stádiích hydratace cementu. [2]



Graf 2 a 3: Závislost pevnosti betonu na vodním součiniteli a pevnosti cementu [6]

Z popisu složení a výrobních postupů jednotlivých materiálů plyne, že při užití znalostí o principech řídicích reakce v systémech obsahujících portlandský cement a optimalizace granulometrie částic je možné dosáhnout mnohem vyšších pevností, než jaké jsou běžné pro většinu vysokohodnotných betonů. [2]

3.1. Technologie vyvinutá Brunauerem a jeho kolektivem

Brunauer aplikoval základní principy pro dosažení velmi vysokých pevností betonů v technologii výroby betonu.

- zmenšení zrn cementu – za použití účinné mlecí přísady ve speciálním mlýnu dosáhl měrného povrchu cementu až $900 \text{ m}^2/\text{kg}$
- zpomalovací přísada – místo sádrovce použil uhličitan draselný, který kontroluje hydrataci C_3A , uhličitan draselný nekoliduje při použití s lignosulfonátem
- plastifikátor - pro dosažení vodního součinitele 0,2 použil lignosulfonát

Tato metoda byla použita v roce 1972, kdy použití superplastifikátorů nedosahovalo průmyslového měřítka. Zvýšení měrného povrchu cementu sebou nese jisté negativa. Tím je vyšší množství záměsové vody, které zvětšuje smrštění a možnost vzniku smršťovacích trhlin. Jemnější mletí cementu také zvyšuje jeho reaktivitu, která zkracuje dobu zpracovatelnosti a nepříznivě působí na reologii čerstvého betonu. Proto při práci s takovým cementem musíme zvýšit pozornost při ošetřování betonu. [2]

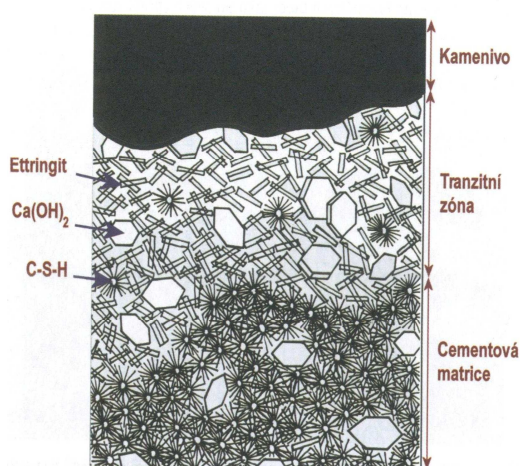
3.2. DSP betony (Densified systems with small particles = Betony se zhuštěnou matricí obsahující malé částice)

Na vývoji těchto materiálů se výrazně podílel H. H. Bache, který využil mikrosiliky a nízkého vodního součinitele, kterého docílil použitím plastifikátoru. Takovou recepturou chtěl docílit co nejnižší pórovitosti. Jako první věnoval pozornost vybranému kamenivu, zvláště pak hrubému kamenivu. Zjistil, že čím menší maximální velikost zrna použije, tím větší jsou výsledné pevnosti betonu v tlaku. Pro svůj výzkum použil kamenivo velmi vysokých pevností v tlaku jako je žula, diabas nebo tavený bauxit. ^[2]

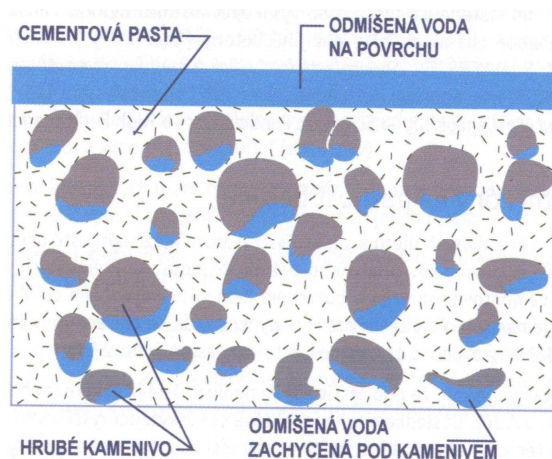
Tab.1: Vliv typu a maximální velikosti zrna kameniva na pevnost v tlaku a modul pružnosti DSP ^[2]

D_{\max} [mm]	Kamenivo	f'_c [MPa]	Modul Pružnosti [GPa]
16	žula	125	68
16	diabas	168	65
10	tavený bauxit	218	109
4	tavený bauxit	268	108

Použitím plastifikátoru a mikrosiliky lze dosáhnout lepší vazby v tranzitní zóně, která je nejslabším článkem běžných betonů (*obr. 1*). Drcené kamenivo s dostatečně drsným povrchem může vykazovat vyšší pevnosti v tranzitní zóně, než je pevnost samotného kameniva. Zmenšením maximální velikosti použitého zrna kameniva se eliminuje možnost zadržení vody pod kamenivem a následnému poklesu pevnosti tranzitní zóny (*obr. 2*). S větší velikostí zrna rovněž roste možnost výskytu defektů a navíc smršťující se cementová pasta kolem velkých zrn může praskat.



Obr. 1: Schematické znázornění tranzitní zóny ^[6]
zrny



Obr. 2: Nadbytečná voda pod hrubými kameniva ^[6]

Problematika DSP

Velmi hutná mikrostruktura způsobuje vysokou křehkost DSP materiálů. To má za následek tyto aspekty:

- mikrotrhlinky se v tranzitní zóně vlivem vysoké teploty mohou rozšířit. Způsobují tak mnohem výraznější snížení modulu pružnosti, než pevnost v tlaku
- při působení ohně může dojít k náhlému roztrhání DSP betonu. To je způsobeno nízkou propustností cementové matrice, která brání úniku vodní páry, která vzniká uvolňováním z C-A-H, C-H a C-S-H vlivem vysoké teploty. (Tento problém může být odstraněn použitím polymerních vláken, které se kolem teploty 200 °C roztaví a vytváří tak volný prostor pro vznikající vodní páru)
- při dosažení kritického napětí a vzniku trhlin DSP beton nevykazuje téměř žádnou plastickou deformaci. Tato vlastnost se zvyšuje s rostoucí pevností v tlaku (Použitím vhodné ocelové výztuže lze tento problém úplně odstranit).

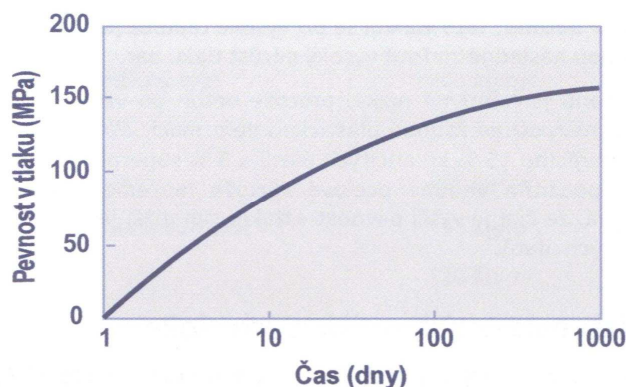
Receptura DSP betonu

Následující jednoduché složení je zaměřeno na dosažení nízkého vodního součinitele (<0,20 pro všechny pojivové složky) s relativně velkým množstvím křemičitých úletů. Nízký vodní součinitel zajišťuje nedostatek vody pod zrny hrubého kameniva (viz obr. 2). Tato záměs také obsahuje nezvykle velké množství superplastifikátoru (8,5% z m_c). Pro zpracování bylo použito vysokosmykového mísiče, který zajišťuje důkladnou homogenizaci cementu a křemičitých částic. Po odformování byl beton uložen do vodního prostředí, aby nedošlo k autogennímu smrštění. Pro tuto recepturu byly použity složky, které jsou běžně dostupné na českém trhu. Nevýhodou tohoto složení pro betonárny jsou dvě frakce drobného kameniva, přičemž u většiny výrobců betonu jsou zásobníky nebo prostory pro skladování jen jedné drobné frakce.

Tab. 2: Složení DSP betonu

Složky betonové směsi [kg]	na 1 m ³
cement CEM I 42,5R	400
křemičité úlety	140
PC superplastifikátor	34
křemen (0-1 mm)	140
křemen (1-4 mm)	570
žulová drť (4-15 mm)	1155
Voda	100
Vodní součinitel (cement + křemičitý úlet)	0,19

Po 28 dnech ve vodním uložení vykazoval DSP beton pevnost v tlaku přibližně 120 MPa a po 3 letech 150 MPa. Z grafu 4 je patrné, že pevnost betonu v tlaku neustále narůstá a po 28 dnech zrání nejsou zdaleka dosaženy maximální pevnosti. Takové chování je způsobeno příměsí mikrosiliky, která v matrici reaguje mnohem pomaleji než cement za tvorby C-S-H gelů.^[6]



Graf 4: Pevnost v tlaku DSP betonu podle složení v tab. 2^[6]

Hutnou mikrostrukturou získávají DSP materiály vysokou odolnost proti obrusu, vodotěsnost a trvanlivost. V současnosti se DSP technologie prodává dánskou společností pod obchodní značkou DENSIT[®] a nachází široké uplatnění. Ve stavebnictví se používá jako reprofilační malta, na opravy kanalizací, ochrana proti korozi, pro odpadní roury, dlaždice a další. V dalších odvětvích slouží jako materiály pro důlní konstrukce, ochranné konstrukce (trubky, kolena, šnekové dopravníky), tvářicí nástroje (keramické lisování, vulkanizační prvky, tenké formy) a ostatní (trezory, elektrické komponenty, mlýnské kameny).^[7]

3.3. MDF betony (Macro defect free = Kompozity omezující vznik makroporuch)

MDF materiály byly vyvinuty na počátku osmdesátých let minulého století. Na jejich výzkumu se podílel Birchall a kol., kteří dokázali dosáhnout pevnosti v tahu za ohybu až 200 MPa. Novinkou v těchto materiálech bylo použití polymerů, které měly zajišťovat funkci plniva a příznivě se podílet na reologických vlastnostech.

Birchall vyšel z rozboru Griffithova kritéria, které platí pro vztah pevnosti v tahu za ohybu křehkého pružného materiálu o délce kritické trhliny l :^[2]

$$\sigma = \sqrt{\frac{E\gamma}{\pi l}} \quad (3.3)$$

σpevnost materiálu v tahu za ohybu

Emodul pružnosti

γspecifická povrchová energie povrchu vzniklého při šíření trhlin

Pevnost v tahu za ohybu σ lze zvýšit a u MDF materiálů se dosahuje zkrácením délky kritické

trhliny l. [2]

Na práci Birchalla později navázal Young a Odler, kteří dokázali aktivní roli polymeru při výrobě tohoto kompozitu, proto v literatuře můžeme narazit i na pojem OCC („organo-cement-composite“). Při výzkumu vycházeli z několika odlišností oproti běžnému betonu:

- MDF materiál vykazuje mnohem vyšší poměr hodnot pevnosti v tlaku a pevnosti v ohybu
- chemické složení cementu, jakož i polymeru má zásadní vliv na konečné vlastnosti betonu
- pokud odstraníme polymer z cementové pasty, dojde ke snížení pevnosti o 90%. Při následném vyplnění těchto prostor produkty hydratace cementu se pevnost vrátí pouze na jednu třetinu původní hodnoty této pasty
- při delším vystavení vodnímu prostředí dochází k výraznému poklesu pevností.

Z těchto poznatků Young konstatoval, že matrice MDF kompozitů je tvořena mikrostrukturou s nezareagovanými částicemi cementu (v důsledku nízkého vodního součinitele). Nehydratované částice cementu tak tvoří plnivo a samotná matrice se skládá ze dvou vzájemně prostupujících fází, které zahrnují hydratované cementové částice a polymerní řetězce.^[5]

Výroba MDF kompozitů

Pro výrobu slouží speciální (tzv. Branbury) mísiče, které se používají např. v průmyslu plastů a pryže. Nejdříve dochází k předmíchání hydraulického pojiva s polymerem (polyvinyl alkohol = PVA) při nízkém vodním součiniteli 0,08 až 0,2. Do směsi se může přidat glycerol, který působí jako plastizátor. Předmíchání je následováno vysokosmykovým mícháním, při kterém dochází ke kontaktu mezi polymerem, pojivem a vodou. Čím vyššího stupně míchání je dosaženo, tím pevnější síťovanou strukturu během hydratace cementu polymer vytvoří. Po míchání vzniklá směs většinou putuje do válcového mlýna, kde se v době kratší než pět minut zhomogenizuje. Po homogenizaci je nutné na MDF materiál při vytvrzování působit nízkým tlakem (cca 6 MPa). Zatížení pomáhá formování a tvorbě hutné struktury. To je výhodné z hlediska vlhkostní odolnosti, protože vznikající polymerní fáze dosahuje menšího průměru. Vytvrzování může být urychleno lisováním za tepla. Během výrobního procesu zastává polymer hned několik funkcí. Nejdříve působí jako velmi účinný dispergační prostředek, čímž zlepšuje zpracovatelnost suché cementové pasty a snižuje tření částic při míchání a i v kolovém mlýně. Polymer také vyplňuje dutiny mezi nezareagovanými zrny cementu a umožňuje jim nejbližší uspořádání během hutnění. Hlavní význam polymeru v MDF kompozitech je tvorba příčných vazeb s hlinitanovými ionty, které způsobují nárůst pevnosti

během vytvrzování. PVA mění hydratační reakce hlinitanového cementu a iniciuje vznik C_3AH_6 fázi.^[4]

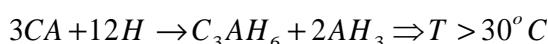
Problematika MDF

Vzhledem k nízkému vodnímu součiniteli nedochází k hydrataci všech zrn cementu. Nehydratovaný cement působí jako potencionální úložiště vlhkosti, pokud s ní MDF materiál přijde do kontaktu. Působením vlhkosti dochází k hydrataci této fáze, a to umožňuje přístup další vlhkosti k PVA¹. PVA tvořící trojrozměrnou síť materiálu má hygroskopickou povahu a je nepravděpodobnějším místem, kudy dochází k transportu vlhkosti. Tento problém lze částečně řešit kombinací následujících metod:

- odstraněním nezreagovaného cementu (snížení koncentrace aktivního slinku použitím cementů, ve kterých hraje pasivní roli $\gamma-C_2S$)
- vyšší zesítnění polymerní fáze v matrici, které sníží rozpustnost použitého polymeru
- nahrazení rozpustného polymeru hydrofóbním polymerem (probíhají studie na použití organotitaničitých sloučenin).^[5]

Dalším negativním jevem u MDF materiálů je jejich smrštění. Je velmi obtížné zjistit přesné hydratační reakce v kompozitní matrici, kde dochází k neúplné hydrataci. Během reakcí hlinitanového cementu s PVA dochází k vytvrzení charakterizováno 10 % objemovým smrštěním, které může být způsobeno dehydratací polymeru a přesunutí vlhkosti k zrnům nehydratovaného cementu a jejich následné hydrataci. V přítomnosti PVA dochází ke vzniku meziprojektu CAH_{10} nebo C_2AH_8 během vytvrzování a až poté k vzniku konečného C_3AH_6 . Vznikající meziprojektu prodlužují dobu vzniku C_3AH_6 a během stlačení může docházet k výraznému oslabení struktury. Ideální případ by nastal, kdyby ke smrštění došlo během stlačení nebo vznik C_3AH_6 by byl tak rychlý, že by došlo k nepatrnému smrštění.^[4]

Hydratační reakce vznikající v systému hlinitanového cementu s PVA (jsou totožné jako reakce bez PVA, ale mění se jejich rozsah):^[19]



Přičemž je užito maltovinářského značení a $C = CaO$, $A = Al_2O_3$, $H = H_2O$.

Posledním nedostatkem je jejich finanční náročnost na technické výrobní zařízení a vysoké výrobní náklady. To brání prosazení se v komerčním měřítku.^[4]

1 PVA – Polyvinyl alkohol

a) CAPR (calcium aluminate phenol resin = Kompozity z hlinitanového cementu s fenolovou pryskyřicí)

Je nový typ kompozitu, který je vyráběn stejným způsobem jako MDF materiály. Jako polymer není použito PVA, ale fenolové pryskyřice, která slouží ke kontrole hustoty síťované struktury. Jako plastizátor je použit glycerol. Při výrobě se nepřidává žádná voda a k hydrataci vysoce hlinitanového cementu slouží pouze voda, která se uvolní z fenolové pryskyřice během kondenzační polymerní reakce. To může vést k efektivnímu vodnímu součiniteli až 0,01.

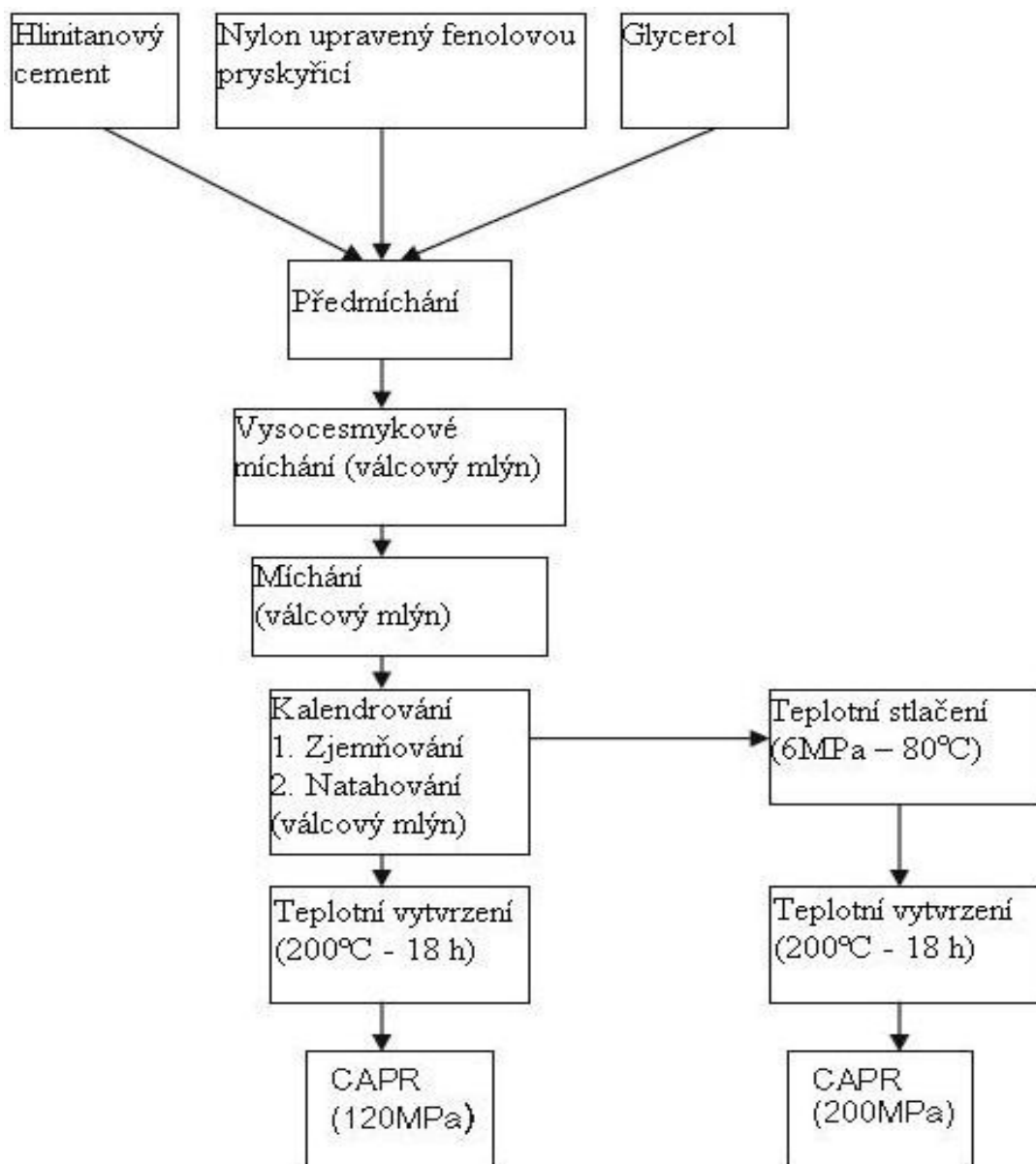
CAPR kompozity vykazují vysokou odolnost vůči vlhkosti, když po jednom roce ponoření ve vodě 20 °C vykazovaly 0,82 % nárůst hmotnosti, 0,12 % objemovou expanzi a ztrátu pevnosti v ohybu 9 %. „Imunizační postup“ vyvinutý pro CAPR kompozity zahrnuje vytvrzení v horké vodě před tepelným vytvrzením. Vytvrzení v horké vodě upřednostňuje tvorbu stabilních fází C_3AH_6 před metastabilním CAH_{10} a hlinitanového gelu. Takto připravené vzorky nevykazovaly po jednom roce ponoření ve vodě 20 °C téměř žádnou ztrátu pevnosti v ohybu.

Po studiu chování CAPR kompozitů se předpokládá, že zesítnění je iniciováno uvolňujícími se Ca ionty během vysokosmykového míchání a Al ionty se uvolňují během tepelného vytvrzování. Při lomu dochází k šíření trhlin skrz polymerní matici a částice cementu působí jako vyztužující prvek. Zvýšením počtu cementových částic však došlo k snížení pevností, zřejmě vlivem horšího obalení částic cementu během formování.^[4]

Využitelnost MDF a CAPR

Pokud by se MDF materiály dokázaly komerčně prosadit, možnost jejich využití by byla extrémně široká. Patří mezi ně střešní tašky, nehořlavé dveře, kanalizační potrubí, letištní můstky, plastové formy, tiskové válce, nádrže odolné proti korozi, kryty kabelových průchodů, brzdové obložení, palety a mnoho dalších. Mnoho z těchto aplikací dnes zastávají kovy, keramika nebo plasty. Kovy mají obvykle výrazně vyšší modul pružnosti, ale nemají vysokou korozivní odolnost jako MDF kompozity. Plasty mohou dosahovat vysokých pevností a jsou snadno tvarovatelné, ale neobsahují takový teplotní rozsah jako je tomu u MDF materiálů. Keramika je tvrdá, pevná, odolná vůči korozivním a teplotním účinkům, ale není jednoduché ji vytvarovat do složitých tvarů. MDF a CAPR kompozity jsou stabilní do 250 °C, lehčí než většina keramiky a mohou být lehce tvarovány do složitých tvarů. Kritéria bránící běžnému komerčnímu používání jsou nedostatek důvěry v trvanlivost a stabilitu v rámci různých environmentálních podmínek. Zároveň musí být konkurenceschopné

současným materiálům a jejich aplikacím.^[4]



Obr. 3: Schematické znázornění výroby CAPR kompozitu^[4]

3.4. RPC (Reactiv Powder Concrete = Reaktivní práškové betony)

Reaktivní práškové kompozity jsou materiály na bázi portlandského cementu, které dosahují ultravysoké pevnosti. Těchto pevností je dosaženo použitím následujících technologií a komponentů:

- zvýšení homogenity struktury materiálu užitím složek směsi, které nepřesahují maximální velikost 300 μm (dříve 800 μm). Tímto pravidlem se posouváme ještě mnohem dále než je tomu u DSP materiálů
- zvýšení hustoty uspořádání částic, které lze dosáhnout optimalizací granulometrie částic v systému

- tuhnutí materiálu pod tlakem, které snižuje vliv chemického smrštění cementu
- použití vhodného tepelného ošetřování, které má za následek transformaci CSH gelů na tobermorit a následně na xonotlit, což má za následek zlepšení mikrostruktury
- snížení křehkosti materiálu použitím rozptýlené výztuže ocelovými mikrovláknami.

Rozměry ocelových mikrovláken závažně ovlivňují mechanické vlastnosti materiálu.

Spojením všech těchto známých technologií do jednoho výrobního procesu lze produkovat RPC materiál, který dosahuje vysoké pevnosti v tahu za ohybu a houževnatosti a zároveň vysoké pevnosti v tlaku. Během experimentu v roce 1994 na Univerzitě v Sherbrooke byl vytvořen kompozit z komerčně dostupných surovin, který dosáhl pevnosti v tlaku 200 MPa a poté byl vyráběn v běžné míchačce.

RPC materiály vykazují zvláštní vlastnost, kterou se liší od ostatních materiálů ultravysokých pevností. Tato vlastnost je následkem jevu, který můžeme označit jako „efekt měřítka“. Rozptýlená výztuž v RPC, kterou tvoří krátká a tenká ocelová vlákna, se chová jiným způsobem, než je tomu u UHSC, kde výztuž tvoří delší ocelová vlákna. Srovnáním maximální velikosti zrn RPC (300 μm) a UHSC (4 mm) s rozptýlenou výztuží (\varnothing 0,5 mm, $l = 12$ mm) zjistíme, že krátká a tenká ocelová vlákna v RPC by v poměru k velikosti části odpovídala metr dlouhé ocelové tyči o průměru 10 mm. Taková výztuž by v UHSC hrála roli tyčové výztuže, která má zcela jiný vliv na mechanické vlastnosti betonu. Při plnění do ocelových trubek za použití tlaku dochází k velkému nárůstu pevností, které jsou způsobeny nepřístupností vzduchu během hydratačních reakcí. ^[2]

Optimalizace granulometrie

Pro návrhy receptur RPC jsou preferovány experimentální metody podle následujících principů:

- směs obsahuje více zrnitých tříd, přičemž každá třída by měla mít minimální rozsah velikosti zrn (všechna zrna stejně velké)
- třídy jsou od sebe odděleny střední velikostí zrna, která má mít koeficient alespoň 13 mezi dvěma po sobě následujícími třídami
- reologickou analýzou určit nejvhodnější poměr cementu a superplastifikátoru.

Hlavním parametrem pro posouzení kvality granulované směsi je spotřeba vody, která je potřeba přidat pro dosažení ztekucení. Minimální vodní součinitel pro dosažení hutné struktury je 0,08. Toto množství je vázáno jen na cement a mikrosiliku. Reálně musíme počítat ještě se vzduchovými bublinami. Pro určení nejlepší granulometrie sledujeme poměr d_o/d_s , kde d_o je naměřená objemová hmotnost cementu a d_s je objemová hmotnost pevných částic bez vzduchu a vody. Čím vyšší poměr dosáhneme, tím je lepší granulometrie. ^[13]

Působení tlaku

Pevnost v tlaku se zvyšuje s hustotou a zatížením čerstvého betonu můžeme dosáhnout hutnější struktury. Podle způsobu a délky použití tlaku vyvozujeme tři příznivé účinky.

Zatížením eliminujeme nebo výrazně snižujeme vzduchové bubliny, které vznikly mícháním, během několika sekund.

Pokud aplikujeme tlak na několik minut do čerstvého betonu, který není uzavřen ve vodotěsné formě, je přebytečná voda vytěsněna a odchází netěsnostmi formy. Netěsnosti musí být takových rozměrů, aby nedocházelo k úniku cementové pasty. Toho lze jednoduše dosáhnout nepoužíváním kovových forem. Při vnesení tlaku 50 MPa na zkušební vzorek 7 cm v průměru na 30 minut může dojít k odstranění 20 % až 25 % vody, které bylo potřeba při míchání. Vzhledem k nízkému vodnímu součiniteli užívanému pro RPC, odpovídá toto množství zvýšení o více než 2 % objemové hmotnosti. Takto vytlačená voda proudí ze vzorku a je závislá na velikosti vzorku a počtu míst, kterými může odcházet.

Při aplikaci tlaku po dobu 6 až 12 hodin po zamíchání můžeme omezit část pórovitosti vzniklou chemickým smrštěním. V tomto období můžeme díky působením tlaku identifikovat mikropraskání, které je zapříčiněno porušováním pevných mostů, které během hydratace vznikají. Mikrotrhliny se zacelují a přispívají k zpevnění struktury.

Tyto účinky zvyšují objemovou hmotnost celkově až o 6 % a příznivě působí na zvýšení pevnosti v tlaku. Tlakové účinky mají jen nepatrný vliv na pevnost v ohybu. ^[13]

Tepelné ošetřování

Tepelné ošetřování se provádí po ztvrdnutí betonu při 90 °C a za normálního tlaku a má za následek urychlení pucolánových reakcí a pozměnění mikrostruktury hydrátů, které však zůstávají v amorfní fázi. Vyšší teploty při ošetřování (250 °C až 400 °C) se užívá jen pro vyztužené RPC a vede ke vzniku krystalických hydrátů (xonolit) a k dehydrataci ztvrdlé pasty. ^[13]

Vliv rozptýlené výztuže

Matrice RPC se chová čistě lineárně a pružně, což odpovídá nízké lomové energii. Proto se přidávají ocelová vlákna, která se přidávají v množství 1,5 % až 3 % podle objemu, ale optimu odpovídají 2 %, které jsou zhruba 155 kg/m³. Jak už bylo zmíněno, lze vyztužené RPC tepelně ošetřit vyššími teplotami, kterými se docílí lepších mechanických vlastností. Pro tepelně ošetřované betony jsou vhodné kratší vlákna (méně než 3 mm) menších průměrů a nepravidelného tvaru. Taková vlákna zvyšují pevnost v tlaku, ale výrazně snižují lomovou energii. Použitím dvou druhů vláken rozptýlené výztuže je možno opět zvýšit potřebnou

lomovou energii. ^[13]

Receptury RPC a jejich mechanické vlastnosti

Tab. 3: Receptury RPC ^[13]

Surovina	RPC 200				RPC 800	
	Bez rozptýlené výztuže		S rozptýlenou výztuží		Křemičité částice	Ocelový prach
Portlandský cement	1	1	1	1	1	1
Mikrosilika	0,25	0,23	0,25	0,23	0,23	0,23
Písek 150 – 600 µm	1,1	1,1	1,1	1,1	0,5	-
Drcený křemen $d_{50} = 10$ µm	-	0,39	-	0,39	0,39	0,39
Superplastifikátor (Polyakrylát)	0,016	0,019	0,016	0,019	0,019	0,019
Ocelová vlákna L = 12 mm	-	-	0,175	0,175	-	-
Ocelová vlákna L = 3 mm	-	-	-	-	0,63	0,63
Ocelový prach < 800 µm	-	-	-	-	-	1,49
Voda	0,15	0,17	0,17	0,19	0,19	0,19
Tlakové zatížení	-	-	-	-	50 MPa	50 MPa
Tepelné ošetření	20 °C	90 °C	20 °C	90 °C	250 – 400 °C	250 – 400 °C

(pozn. množství jednotlivých surovin receptur je dávkováno v hmotnostních dílech)

Tab. 4: Mechanické vlastnosti RPC kompozitů ^[13]

Mechanická vlastnost	RPC 200	RPC 800
Pevnost v tlaku	170 – 230 MPa	Křemenný písek 490 – 680 MPa
		Ocelový prach 650 – 810 MPa
Pevnost v ohybu	30 – 60 MPa	45 – 141 MPa
Lomová energie	20 – 40 kJ/m ²	1,2 – 20 kJ/m ²
Youngův modul	50 – 60 GPa	65 – 75 GPa

Snížení množství cementu a křemičitých úletů

Vysoký obsah cementu 800 – 1000 kg/m³ v RPC má negativní vliv nejen na cenu, ale i na vývin hydratačního tepla a problematiku smrštění. Nahrazení cementu minerálními přísadami by tento problém mohlo vyřešit a současně by mohlo dojít k zvýšení trvanlivosti. V experimentu (Halit Yazıcı 2007) byl jako náhrada cementu a mikrosiliky použit popílek a granulovaná vysokopecní struska.

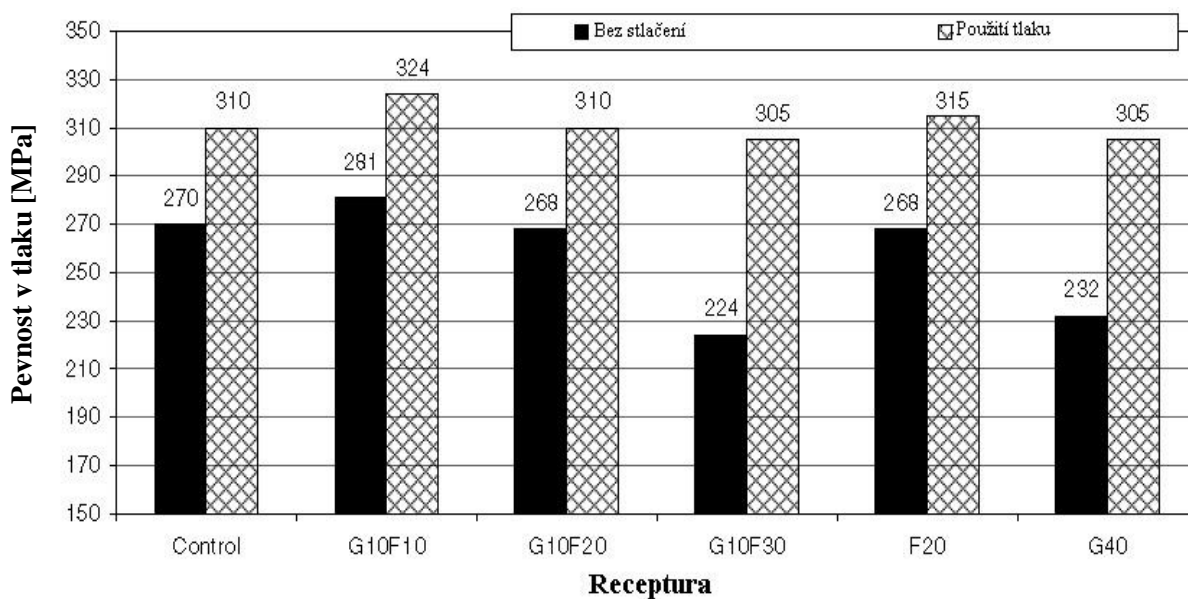
Ze záměsí (tab. 5) byly připraveny zkušební vzorky (válece 100 mm výška 100 mm

průměr), ze kterých byla po zamíchání polovina vystavena tlaku 30 MPa po dobu 8 hodin ve formách a druhá polovina ponechána bez zatížení. Všechny vzorky byly po 16 hodinách od vložení do forem autoklávovány při 210 °C a tlaku 2 MPa po dobu 8 hodin. Po vychladnutí byla na vzorcích provedena zkouška pevnosti v tlaku (graf 5).^[14]

Při tomto experimentu bylo použito drceného křemene s maximálním zrnem 3 mm, což není pro RPC běžné, ale výsledky pokusu ukázaly, že RPC s pevností 200 MPa můžou být vyrobeny i tímto způsobem.

Tab. 5: Zkušební záměsi RPC (konstantní molární poměr $\text{CaO/SiO}_2 = 1,3$)^[14]

Materiál [kg/m ³]	Control	G10F10	G10F20	G10F30	G20F20	F20	G40
Cement	830	664	581	498	498	664	498
Mikrosilika	291	205	157	110	120	195	141
Struska	-	83	83	83	166	-	332
Popílek	-	83	166	249	166	166	-
1 – 3 mm křemen	489	521	534	548	552	516	561
0,5 – 1 mm křemen	244	260	266	273	275	257	279
0 – 0,4 mm křemen	244	260	266	273	275	257	279
Voda	151	151	151	151	151	151	151
Superplastifikátor	55	35	34	33	38	38	35
Ocelová vlákna	234	234	234	234	234	234	234



Graf 5: Vliv množství minerální příměsi na pevnost RPC v tlaku^[14]

Výsledky testu ukázali, že nahrazením části cementu a mikrosiliky lze dosáhnout uspokojivých mechanických vlastností a je možné nahrazovat původní složky popílkem nebo

granulovanou vysokopecní struskou. U receptury s nahrazením 40 % cementu a mikrosilky minerálními příměsmi (receptura G10F30) došlo ke snížení množství cementu z 830 kg/m^3 na 498 kg/m^3 , přičemž se pevnosti stále pohybovaly nad 200 MPa bez použití tlaku a při stlačení v původních fázích hydratace bylo dosaženo srovnatelných pevností s referenční záměsí. Výsledky také ukázaly, že při užití tlaku při výrobě mají všechny receptury srovnatelné pevnosti nad 300 MPa. Snížení množství cementu v tak velké míře sebou nese významné finanční úspory. Použitím těchto minerálních příměsí navíc výrazně snižujeme množství potřebného superplastifikátoru. Nahrazením docílíme snížení hydratačního tepla, smrštění a ekologické šetrnosti.^[14]

Využitelnost RPC

Výroba RPC 200, která nepoužívá tlakovou metodu, se velmi blíží konvenčně vyráběným HPC. Díky vysokým pevnostem v tlaku jsou RPC 200 ideální pro předpínané konstrukce, ve kterých jsou hlavní tahové síly přeneseny předpětím, druhotné tahové síly a tlakové síly samotným betonem. Konstrukce vyrobená takovým způsobem může být mnohem lehčí, než je tomu u běžných betonů. Kombinace snížení množství tyčové výztuže, redukce stálého zatížení vylehčením konstrukce a zmenšení objemu použitého betonu tvoří hlavní snížení nákladů. Nahrazení běžného betonu RPC snižuje surovinovou spotřebu, která je úzce spojena se životním prostředím.

Technologicky náročnější výroba RPC 800, při které je nutné použití tlakových zařízení a teplotního ošetřování, je použitelná jen pro prefabrikované prvky. Svými mechanickými vlastnostmi může nahrazovat ocel pro výrobu mechanických dílů. Tento materiál má také vynikající odolnost proti nárazu a lze jej využít v armádních konstrukcích a vybaveních.

Díky vysokým pevnostem v tlaku se dají RPC materiály použít jako části příhradových nosníků, kde by přenášely tlakové zatížení a kovové prvky by přenesly tahové napětí. RPC materiály disponují velmi hustou mikrostrukturou, která zaručuje velmi vysoké odolnosti vůči agresivnímu prostředí a vodotěsnost, a jsou vhodné pro průmyslové a jaderné úložiště odpadů.^[13]

4. Složky UHSC

Při výběru složek UHSC je nutné věnovat větší pozornost jednotlivým komponent, než je tomu u běžných betonů. Důležitým parametrem není pouze „kvalita“, ale i celková vyrovnanost vlastností. Při dosahování vyšších pevností v tlaku hrají vlastnosti každé složky kritickou roli. Právě tyto vlastnosti rozhodují o ekonomické náročnosti na výrobu a schopnosti konkurence s jinými materiály. UHSC jsou citlivější v čerstvém stavu na změnu kvality použitých surovin. Doba zpracovatelnosti je jedním z hlavních parametrů čerstvého UHSC.

Jako u běžných betonů hlavní pojivovou složku tvoří cement, jehož výchozí vlastnosti jsou nejdůležitější pro výsledný kompozit. O volbě kameniva, které tvoří pevnou kostru betonu, rozhoduje především jeho pevnost, která se může stát limitujícím faktorem. Jak již bylo výše zmíněno, přísady a příměsi jsou nezbytnou součástí UHSC. Výběr plastifikátoru hraje důležitou roli zejména v kombinaci s cementem. Použití vyztužení ve formě vláken nebo drátků vyžadují jen některé receptury a nejsou nezbytnou součástí pro UHSC.

4.1. Cement

Anorganická jemně mletá látka, která po smíchání s vodou vytváří kaši, která tuhne a tvrdne vlivem hydratačních reakcí a procesů. Cement je hydraulické pojivo, které po zatvrdnutí je stálé na vzduchu i ve vodě.

Ve snaze dosáhnout vysokých pevností v tlaku, hraje cement klíčovou úlohu. Vlastnosti cementu mají vliv nejen na mechanické vlastnosti, ale i na reologii betonu. Pro výrobu UHSC jsou nejvhodnější cementy CEM I (ČSN EN 197 Cement), které svým jednodušším složením snižují variabilitu vlastností. Dalším důvodem použití cementu CEM I je poměrně vysoký obsah příměsí používaných pro receptury UHSC.

Nízký vodní součinitel (0,2 – 0,3) a velká dávka superplastifikátoru výrazně ovlivňuje reologické vlastnosti a mají za následek rychlé tuhnutí cementové pasty. Při běžné hodnotě vodního součinitele tento problém nenastává. Rozdílné chování nastává i u pevností. Dosažené normové pevnosti portlandských cementů neodpovídají pevnostem, při užití nízkého vodního součinitele. Tento fakt je zřejmě způsoben drobnými rozdíly ve složení portlandského cementu, které jsou zamaskovány při normových zkouškách vysokým vodním součinitelem.

Důležitou vlastností cementu je jemnost mletí. Již podle Brunauera víme, že čím jemnější pomletí cementu dosáhneme, tím vyšší pevnosti můžeme očekávat. Vyšším měrným povrchem dosáhneme lepšího kontaktu silikátové fáze s vodou. Jemnější cement je reaktivnější a dochází mnohem dříve k tvorbě primárního ettringitu a na povrchu silikátů ke

vzniku C-S-H gelů. Z reologického hlediska je však tento vliv nepříznivý a zkracuje se zpracovatelnost čerstvého betonu.

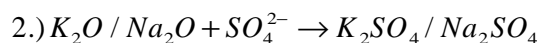
Dalším parametrem rozhodujícím o vlastnostech cementu má množství C_3A a jeho modifikace. O morfologii C_3A v portlandském cementu podle Regourd (1978) rozhoduje množství alkálií, které jsou zachyceny v C_3A . V jaké formě je C_3A v cementu obsažen můžeme zjistit rentgenovým difraktografem po rozkladu cementu kyselinou salicylovou.^[2]

Tab. 6: Modifikace C_3A podle obsahu alkálií^[2]

Množství alkálií v C_3A	Struktura
< 2,4 %	kubická
2,4 – 3,8 %	kubická + ortorombická
3,8 – 5,4 %	ortorombická
> 5,4 %	triklinická

Triklinická struktura v běžném portlandském cementu nenastává. Množství alkálií v C_3A lze omezit udržováním vhodné rovnováhy vstupních surovin. Alkálie se váží na SO_3 , které do pece přichází většinou s palivem, a při jeho dostatku nedochází k vazbě alkálií na C_3A . Struktura rozhoduje o reaktivitě C_3A a typu ettringitu, což ovlivňuje rychlost hydratace cementu. Obecně je nejvhodnější C_3A s kubickou modifikací, protože je reaktivnější a lze jeho reakci se síranovými ionty snáze regulovat i v přítomnosti superplastifikátoru. Z výše uvedeného vyplývá, že nejvhodnější cementy pro výrobu UHSC jsou ty, které obsahují co nejnižším množství C_3A a pokud možno s kubickou strukturou.^[2]

Vaznost alkálií při nedostatku SO_4^{2-} a nadbytku SO_4^{2-} .^[20]

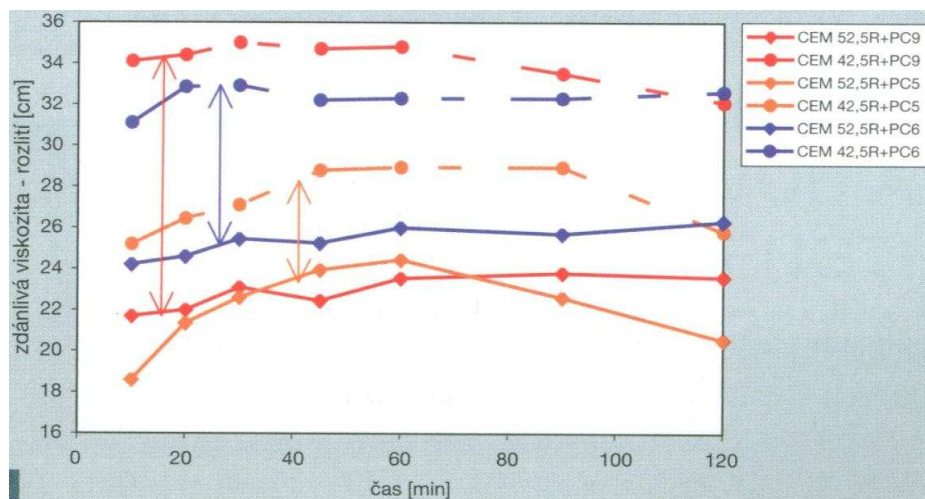


Nevýhodou pro volbu cementu jsou normativní předpisy, podle kterých jsou prováděny zkoušky a výroba cementu. Tyto předpisy jsou řádově sto let staré a nenavazují na používání polyfunkčních přísad v technologii betonu. Podle chemického složení cementu, které výrobci často uvádí na svých webových stránkách, nejsme schopni určit jeho vlastnosti a chování po zamíchání s vodou. Proto se doporučuje sledovat jen měrný povrch podle Blaina, rentgenový difraktogram cementu po rozkladu v kyselině salicylové (obsah a forma C_3A a síranu vápenatého) a chování v přítomnosti superplastifikátoru.^[2]

Cementy v ČR

V ČR jsou běžně dostupné cementy CEM I, které jsou nejvýhodnější pro výrobu

UHSC, ve dvou pevnostních třídách 42,5 a 52,5. Vhodnější pevnostní třídou se jeví CEM I 52,5, ale není tomu vždy. Při experimentech na FAST VUT, byly sledovány reologické a pevnostní charakteristiky různých pevnostních tříd cementů společně se superplastifikátory. Pevnostní třídy cementů 52,5 vždy vykazovaly horší reologické vlastnosti (menší ztekucení, *graf 6*). Tím je znázorněno, že vyšších pevnostních tříd cementu se dosahuje vyšší jemností mletí slinku, a ne lepšími vlastnostmi cementu. Příliš tuhá konzistence čerstvého betonu může negativně ovlivnit zhutnění, které značně snižuje konečné pevnosti ztvrdlého betonu. Proto se jeví vhodnější pevnostní třída 42,5. Na českém trhu se nachází CEM I 42,5 ve dvou provedeních podle počáteční doby tuhnutí, a to R a N. Pro složení UHSC je výhodnější CEM I 42,5N, který reaguje pomaleji a nezkracuje dobu zpracovatelnosti čerstvého betonu. Cementy s normální počáteční dobou tuhnutí většinou obsahují méně C_3A , jehož množství chceme co nejnižší.^[8]



Graf 6: Vliv třídy cementu a druhu superplastifikátoru na reologické chování^[8]

Cement se v ČR vyrábí v pěti cementárnách, které jsou v současnosti vlastněny čtyřmi nadnárodnostními společnostmi. HeidelbergCement vlastní výrobní závody v Mokré a Praze – Radotíně a je největším výrobcem cementu v ČR. Vlastník Prachovické cementárny je Holcim (Česko), a.s. V Čížkovicích patří výrobní závod společnosti Lafarge Cement, a.s. A pátá cementárna v Hranicích je ve vlastnictví italského koncernu Buzzi Unicem.

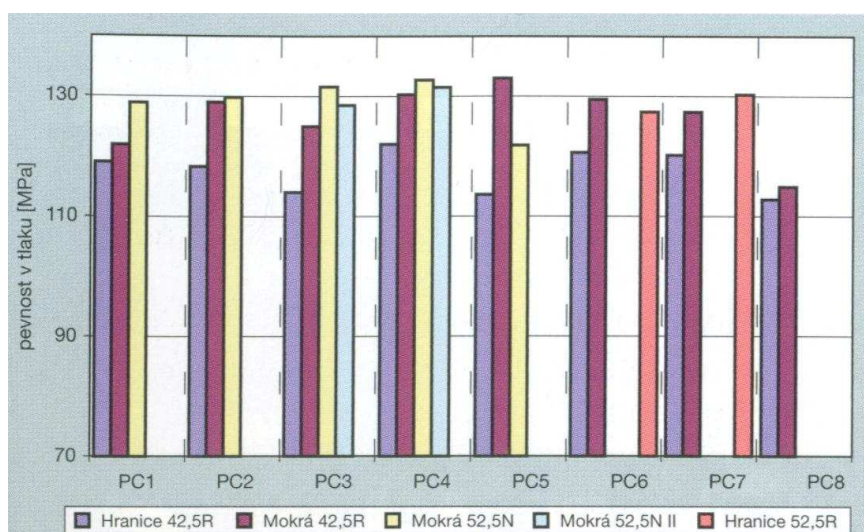
Kompatibilita cementu a superplastifikátoru

Pro UHSC jsou vhodné polykarboxylátové superplastifikátory svojí vysokou účinností. Bohužel chemické složení uváděné výrobcem nám mnoho neřekne o chování s různými druhy cementu. Proto je důležité vyzkoušet vlastnosti superplastifikátoru a zjistit jeho chování s cementem. Zkoušení na betonových směsích je časově a materiálově náročné, proto byly vyvinuty metody, které nevyžadují tolik materiálu a jsou snadnější na provedení a

opakování. Tyto metody jsou založeny na sledování reologického chování pasty a slouží pro předběžnou představu účinných a neúčinných kombinací. Nejsou zcela spolehlivé, proto je nutné superplastifikátor ještě vyzkoušet na pokusné betonové směsi. Nepřesnosti vznikají rozdílným způsobem míchání pasty a betonu. Mezi tyto předběžné zkoušky patří metoda rozlití minikužele a metoda Marchova kužele. Rozlití minikužele vyžaduje malé množství pasty a pozorujeme statické chování. Výslednou hodnotou je rozlití minikužele v určitém čase od počátku míchání. U kompatibilních složek nedochází k poklesu rozlití pasty v čase. Marchův kužel vyžaduje větší množství pasty a sledujeme chování vlivem dynamických podmínek. Měříme čas, za který nám pasta vyteče z Marchova kužele. Stejně jako u minikužele by nemělo docházet k zvyšování doby výtoku pasty z kužele v čase. Abychom dosáhli co nejpřesnější hodnoty, doporučuje se pastu namíchat nejen z cementu, ale i všech složek menších 2 mm.

Jako hlavní faktory působící na reologické chování pasty jsou vodní součinitel, počáteční teplota záměsové vody, jemnost cementu, fázové složení portlandského cementu, množství síranu vápenatého a rychlost jeho rozpustnosti, alkalické sírany obsažené v cementu a účinnost míchání.^[2]

Jak se ukázalo, volba vhodného superplastifikátoru a cementu nepůsobí jenom na reologii čerstvého betonu, ale i na pevnost ztvrdlého betonu. Při výrobě mikrobetonů konstantního poměrového složení na FAST VUT bylo použito pět druhů cementů různých pevnostních tříd a tři superplastifikátory. Výsledky ukázaly, že není přímá spojitost mezi pevnostní třídou cementu a pevností výsledného mikrobetonu.^[8]



Graf 7: Pevnosti mikrobetonu v závislosti na použitém superplastifikátoru a cementu^[8]

Z výše uvedených informací vyplývá, že volba cementu nehraje hlavní roli ve výsledné pevnosti betonu. Hlavní faktor vymezující maximální dosažitelnou pevnost betonu je kompatibilita všech použitých surovin. Z technického a ekonomického hlediska jsou

nejvhodnější pro UHSC portlandské cementy vyšších pevnostních tříd.

4.2. Kamenivo

Kamenivo je hlavní plnivovou složkou betonu a zabírá více než 70 % objemu. Tak jako v běžných betonech, tak i v UHSC musí kamenivo splňovat všechna normová ustanovení. S rostoucí pevností betonu v tlaku jsou kladeny i vyšší požadavky na pevnosti kameniva, které se může stát nejslabším článkem. Podle výše zmíněných DSP materiálů (*kap 3.2.*) je volba D_{\max} modifikátorem dosažitelných pevností a je nutné dodržet optimální křivku zrnitosti (*graf 8*).

Podle pevnosti jsou považována za nejlepší těžená kameniva glaciální (ledovcová), které tvořily nejpevnější a nejtvrdší část hornin drcených ledovcem. Kamenivo bylo propíráno vodou stékající z tajícího ledovce, která odnesla všechny měkčí a rozmělněné horniny a zajišťuje velkou čistost vzniklé drti. Drcení ledovcem probíhalo velmi pomalu a v kamenivu nevznikaly pukliny a trhliny, které naopak mohou obsahovat kameniva vzniklá odstředem a mechanickým drcením.^[2]

Křivky zrnitosti

Optimální křivka zrnitosti slouží k dosažení skladby kameniva s minimální mezerovitostí a můžeme ji charakterizovat jako zrnitost, při které se na dosažení vyžadované zpracovatelnosti betonu při uvažovaném množství cementu spotřebuje minimální množství vody. To je jedním z hlavních předpokladů vysoké hutnosti, pevnosti a trvanlivosti ztvrdlého betonu. Vzhledem k důležitosti optimální zrnitosti kameniva v betonu bylo provedeno mnoho studií, jejichž výsledkem jsou následující vztahy:

$$1. \text{ Bolomeyova rovnice} \quad y = A + (100 - A) \cdot \sqrt{\frac{d}{D}} \quad (4.1)$$

y celkový propad sítím d % hmotnosti)

d uvažovaná minimální velikost zrna (mm)

D uvažovaná maximální velikost zrna (mm)

A součinitel závislý na konzistenci čerstvého betonu a druhu použitého kameniva (*tab. 7*)

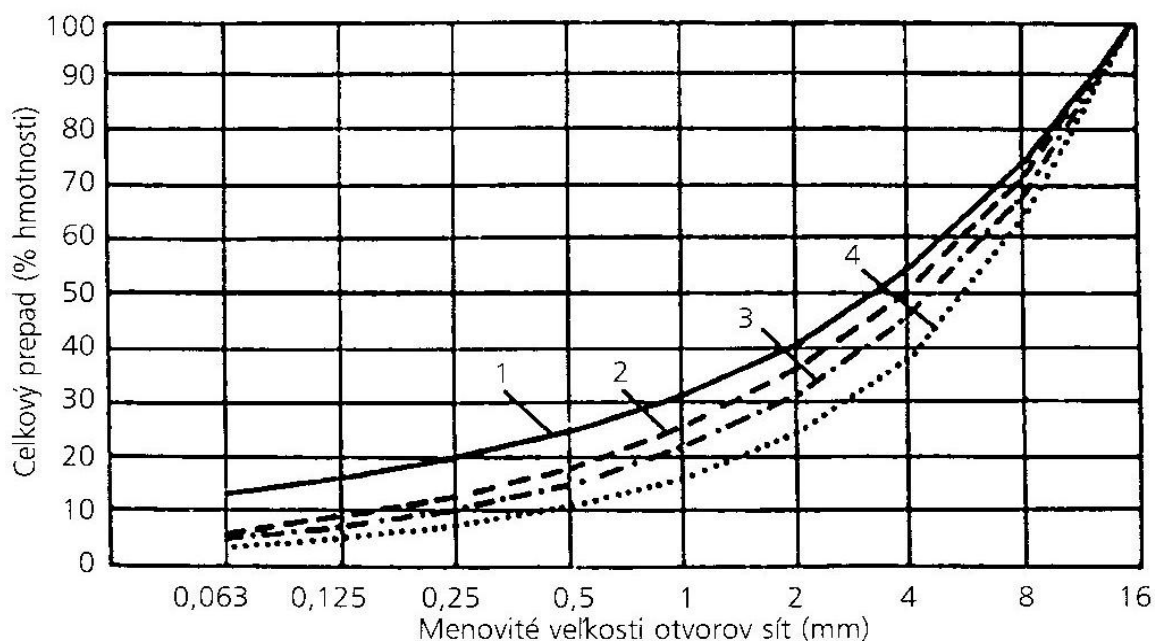
Tab. 7: Součinitel A podle Bolomeya^[10]

Konzistence čerstvého betonu	Zavhlá	Málo měkká	Měkká	Velmi měkká	Tekutá
Těžené kamenivo	4	6	8	10	12
Drcené kamenivo	6	8	10	12	14

$$2. \text{ Fuller} \quad y = 100 \left(\frac{d}{D_{\max}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.2)$$

$$3. \text{ EMPA I} \quad y = 50 \left(\frac{d}{D} + \sqrt{\frac{d}{D}} \right) \quad (4.3)$$

$$4. \text{ EMPA II} \quad y = 20 \left(\frac{d}{D} + 4 \sqrt{\frac{d}{D}} \right) \quad (4.4)$$

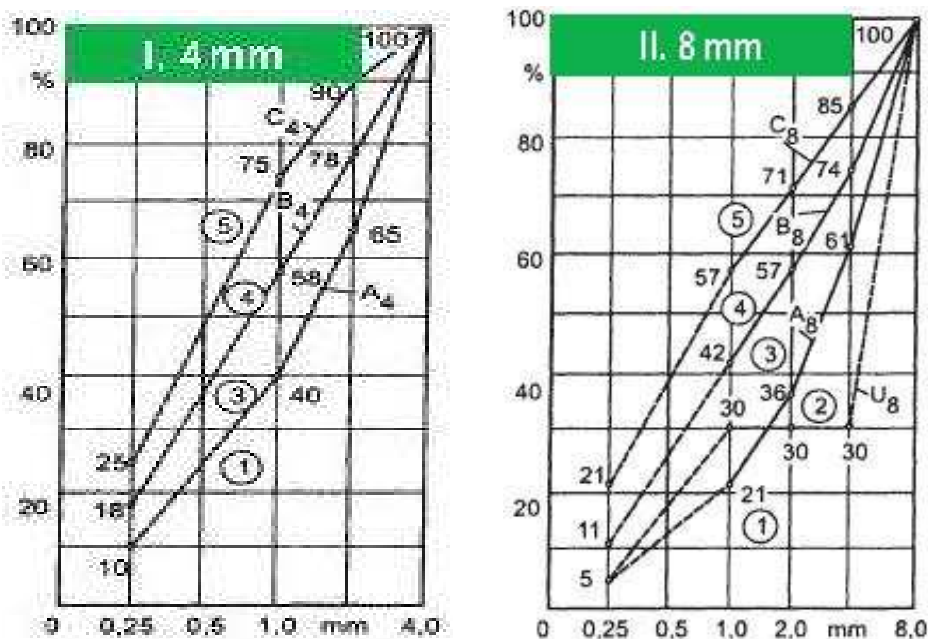


Graf 8: Ideální křivky zrnitosti pro $D_{\max} = 16 \text{ mm}$,

1 – Bolomey, 2 – Fuller, 3 – EMPA I, 4 – EMPA II^[10]

Z kameniva s plynulou zrnitostí získáme hutný beton, když se mezery mezi velkými zrny postupně vyplňují menšími zrny. Ve skutečnosti takové ideální uspořádání není možné. Zrna jednotlivých frakcí se nerozdělí rovnoměrně v celém objemu směsi a menší částice přesně nezapadnou mezi větší. Zvýšení koncentrace menších zrn způsobuje odtlačení větších od sebe, a tím dochází k nakypření směsi. Čím více úzkých frakcí kameniva do směsi použijeme, tím jednodušší je dodržet optimální zrnitost.^[10]

Česká základní řada normových sít (ČSN EN 12620 Kamenivo do betonu) je rozdělena následně podle velikosti čtvercových ok 0,063, 0,125, 0,25, 0,5, 1, 2, 4, 8, 16, 31,5 (32) a 63 mm. Pro skladbu UHSC by mělo být použito maximální frakce 4 – 8 mm a menších, aby nevznikaly problémy popsané u DSP materiálu. Proto je nutné používat optimální křivky zrnitosti pro D_{\max} 4mm a 8 mm a upravit volbu kameniva tak, aby se jim co nejvíce podobaly. Všechny použité kameniva musí odpovídat ČSN EN 12620 Kamenivo do betonu.



Graf 9 a 10: Ideální křivky zrnitosti pro D_{max} 4 mm a 8 mm ^[12]

Grafy 9 a 10 jsou rozděleny do pěti oblastí, které vyjadřují vhodnost kameniva pro beton. Oblast 1 a 5 jsou nevhodné zrnitosti, oblast 3 vyjadřuje dobrou zrnitost, oblast 4 vymezuje ještě použitelnou zrnitost pro maximální zrna kameniva a oblast 2 u grafu 10 vyjadřuje přerušovanou zrnitost pro mezerovitý beton. ^[12]

Kamenivo v ČR:

Drcené kamenivo dosahuje lepších pevnostních výsledků v betonu, které jsou dány jeho drsným povrchem. Nevýhodou drcených kameniv je obsah prachových částic, které vznikají při jeho drcení a negativně působí na reologii. Vysoký obsah prachových částic ovlivňuje kompatibilitu cementu s plastifikátorem a zvyšuje lepivost čerstvého cementu. Na množství prachu v kamenivu má zásadní vliv i skladování. Pokud kamenivo není kryté, srážkami dochází k vymývání prachových částic v horních vrstvách a naopak k usazování ve spodních vrstvách kameniva. Proto jsou vhodnější praná drcená kameniva, která mají snížený obsah prachu. Drceného kameniva frakce 0 - 2 mm často obsahuje příliš vysoké podíly prachu a má velmi nerovnoměrné zastoupení zrnitosti. Z tohoto důvodu je vhodnější frakce drceného kameniva pod 2 mm nahrazovat kvalitním těženým kamenivem. ^[18]

Český masiv disponuje celou řadou vhodných kameniv pro výrobu UHSC, mezi něž se řadí žuly, gabra, čediče, diority a diabasy. Z hlediska pevnosti a tvarového indexu vykazuje čedič velmi dobré vlastnosti, které jsou dány je sloupcovitou odlučností, ale má vyšší objemovou hmotnost. Lokality čediče jsou v podhůří Lužických hor, Nový Bor, Kamenický Šenov a České Kamenice, ale většina těchto území je státem chráněna. Aktivní těžba probíhá v kamenolomu Bílčice, který v dnešní době vlastní společnost Kamenolomy ČR s.r.o.

Kamenolom dodává všechny frakce potřebné pro výrobu UHSC. Nevýhodou jsou náklady na dopravu, kterým se u kvalitnějších kameniv nevyhneme. Před samotnou přípravou betonové směsi je vhodné ověřit si vlastnosti samotného kameniva. ^[9]

Tab. 8: Vlastnosti vybraných hornin vhodných pro UHSC ^[9]

Hornina	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Nasákavost [%]	Pevnost v tlaku [MPa]
Čedič	2700 - 3300	0,5 - 1 - 2	180 - 400 (tavený až 700)
Melafyr	2600 - 3000	0,5 - 1	150 - 300
Diabas	2600 - 3000	0,5 - 1	120 - 300
Znělec	2300 - 2700	0,5 - 1	150 - 240
Gabro	2700 - 3100	0,5 - 1	120 - 280
Diorit, gabrodiorit	2600 - 3000	0,5 - 1	120 - 280
Syenit	2500 - 2900	0,5 - 1,5	150 - 230

Pro dodržení optimální plynulé křivky zrnitosti je vhodné drcené kamenivo doplnit těžším frakce do 2 mm. Těžší kamenivo nedosahuje tak vysokých pevností betonu ve srovnání s drceným, ale má rovnoměrnější zastoupení velikosti zrn. Pro složení UHSC je doporučeno použití praných písků o vysokém obsahu SiO₂, které však neobsahují jemné podíly. Tato skutečnost je kompenzována vysokým množstvím jemných částic v cementu a příměsích. Stavební písky na českém trhu nabízí například firma Provodínské písky a.s. pod obchodním označením SH 51, které mají obsah SiO₂ 96 % jsou nabízeny v ideální frakci 0 – 2 mm. ^[11]

4.3. Přísady

Přísady jsou chemické sloučeniny převážně v tekutém stavu, které se dávkuje procentuelně na hmotnost cementu. Do betonu se přidávají během míchání většinou s vodou v množství 0,2 % až 5 % hmotnosti cementu. Optimální množství stanovuje výrobce a nemělo by být překračováno. Přidávají se za účelem modifikace vlastností čerstvého a ztvrdlého betonu. Protože se jedná o tekuté látky, zvyšují celkové množství vody v čerstvém betonu.

Běžně jsou používány následující přísady:

- vodoredukující/plastifikační
- silně vodoredukující/superplastifikační
- stabilizační (zadržující vodu)
- provzdušňovací
- urychlující tuhnutí

- urychlující tvrdnutí
- zpomalující tuhnutí
- těsnící (hydrofobizační, odpuzující vodu).

Při výrobě UHSC se hlavně používají superplastifikační přísady, méně často retardační a zcela zřídka se můžeme setkat s těsnícími přísadami, které zaplňují póry a kapiláry a zhutňují ztvrdlý beton.^[12]

Superplastifikační přísady

Podle svého chemického složení mají superplastifikátory jinou účinnost na disperzi cementových zrn, redukci záměsové vody a reologii směsi s velmi nízkým vodním součinitelem. Velmi důležitou roli hraje kompatibilita s cementem, která již byla dříve zmíněna.

Současné superplastifikační přísady se dají rozdělit podle svého chemického složení do čtyř základních skupin:

a) *Sulfonované melaminformaldehydové kondenzáty – SMF*

Dříve bylo složení chráněno patentem a na trhu byl jen jeden výrobek. Dnes SMF vyrábí řada výrobců pod různým označením a s různou kvalitou. Jsou dodávány ve formě čiré kapaliny, která podle kvality může obsahovat od 22 % do 40 % sušiny. Pracují na principu elektrostatického odpuzování (*obr. 4*). Mezi jejich výhody patří stálá kvalita a účinnost, neovlivňují barvu architektonických betonů, udržení stabilního provzdušnění, nezpomalují tuhnutí a zachycují méně vzduchu než SNF. Nevýhodou je jejich nižší účinnost a vyšší cena v porovnání se SNF.

b) *Sulfonované naftalenformaldehydové kondenzáty – SNF*

Tyto superplastifikátory mají dlouhou tradici a je jich na trhu celá řada. Prodávají se jako hnědé kapaliny, které mají obsah sušiny 40 % až 42 %, nebo se můžeme setkat s nahnědlým práškem. Odpuzování molekul funguje také na elektrostatickém principu. Mají mírné retardační, které jsou někdy nevýhodou. Mezi jejich výhody patří větší obsah sušiny než u SMF, jsou levnější díky vysoké konkurenci na trhu, kvalita servisu a spolehlivost značek.

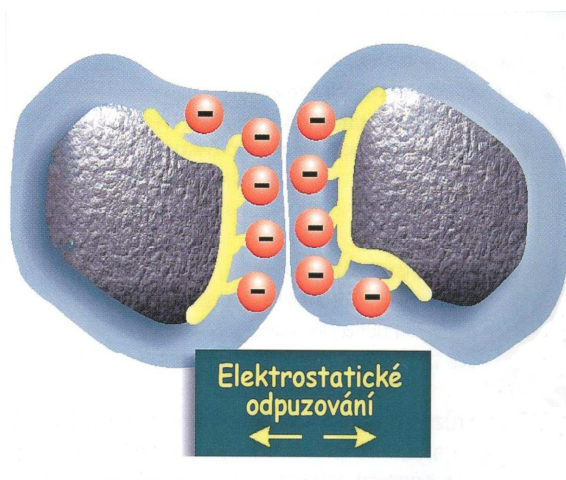
c) *Lignosulfonáty – LS*

Tyto superplastifikátory se nepoužívají pro výrobu UHSC samotné, často se používají ve směsi s NSF a MSF. Někteří výrobci na začátku míchání použijí LS a až ke konci NSF nebo MSF. Dodávají se jako kapalina hnědé barvy a obsahem sušiny a konzistencí se rovnají SNF. Dispergují částice vlivem elektrostatického odpuzování.^[12]

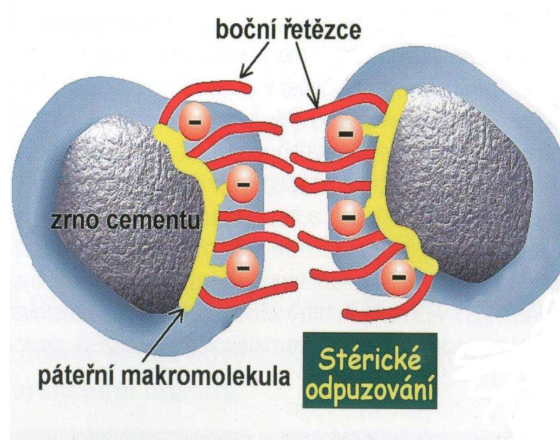
d) *Polykarboxyláty a polakarboxylát – étery – PC, PCE*

Jsou nejmodernějšími a nejúčinnějšími superplastifikačními přísadami, které jsou nejvhodnější pro UHSC. Na povrchu cementových částic dochází k uspořádání elektrického náboje tak, že jsou přitahovány a dochází k jejich aglomeraci. Voda se tak nedostává k povrchu cementových zrn, která se nedokonale podílí na pohyblivosti čerstvého betonu a je omezen zpevňovací potenciál cementu.

Doporučuje se PC a PCE dávkovat co nejdříve do směsi, aby se zabránilo přejít SO_4^{2-} a dalším iontům do roztoku a omezit tak disperzní schopnost polykarboxylátů. Molekuly PC a PCE se skládají z páteřního řetězce nesoucího záporný náboj a elektricky neutrálních bočních řetězců. Páteřní řetězce se svým nábojem zachytí na částici cementu a boční řetězce jsou vystaveny směrem od zrna. Tím dochází k mechanickému neboli stérickému odpuzování cementových částic (obr. 5). Stérické odpuzování je efektivnější než elektrostatické a proto jsou PC a PCE účinnější. K páteřnímu řetězci tvořeným většinou kyselinou polymetakrylovou můžou být připojeny boční řetězce různé délky, které jsou většinou tvořeny hydrofilními oxyethylenovými makromolekulami. U PC platí, že řetězce páteřní i boční mohou mít libovolnou délku podle požadovaných vlastností. Experimentálně bylo zjištěno, že s rostoucí délkou bočních řetězců roste účinnost superplastifikátoru a s kratšími bočními řetězci se prodlužuje doba zpracovatelnosti. Kombinací a pozměněním bočních řetězců můžeme získat přísadu, které najednou působící superplastifikačně a stabilizačně. Zároveň může regulovat dobu zpracovatelnosti a rychlost tvrdnutí betonu. Pro tyto vlastnosti jsou často označovány jako polyfunkční přísady. ^[8]



Obr. 4: Elektrostatické odpuzování částic ^[8]



Obr. 5: Stérické odpuzování částic ^[8]

Komerčně vyráběné superplastifikátory se neřídí uvedeným rozdělením podle chemického složení. Často dochází k přidávání molekul jiného superplastifikátoru za účelem

zlepšení jeho účinnosti za určitých podmínek. Například do SMF jsou přidávány molekuly LS, aby působily retardačně. ^[2]

Superplastifikátory v ČR vyrábí a dodává jako součást stavební chemie společnosti Sika CZ, s.r.o., MAPEI, spol. s r.o. nebo CHRYSO Chemie s r.o., které nabízejí celou řadu superplastifikačních přísad na různých bázích.

4.4. Příměsi

Jsou většinou práškové látky, které se přidávají do čerstvého betonu, aby zlepšily některé vlastnosti nebo k docílení zvláštních vlastností. Příměsi dělíme na inertní příměsi typu I. a pucolány nebo latentně hydraulické látky typu II. Latentní hydraulická je schopnost látky tvrdnout za normální teploty ve vodním prostředí reakcí s Ca(OH)_2 . Podobné vlastnosti mají i pucolánové látky, které obsahují vysoký podíl aktivního SiO_2 . Podmínkou reakce je alkalické prostředí v roztoku, které je budičem hydraulicity. ^[12]

Nejčastěji používané příměsi typu II. pro výrobu UHSC jsou křemičitý úlet (mikrosilika), létavý popílek a vysokopecní struska. Příměsi typu I. vhodné pro výrobu UHSC jsou křemenné moučky, které plní funkci mikroplniva.

Křemičité úlety – mikrosilika

Mikrosilika vzniká jako druhotná surovina při výrobě křemíku nebo křemíkem legovaných ocelí v elektrických pecích ve formě šedého jemného prášku s velmi nízkou sypnou hmotností. Křemičité úlety se vyznačují velkým měrným povrchem $15\,000\text{ m}^2/\text{kg}$ – $30\,000\text{ m}^2/\text{kg}$ a měrnou hmotností okolo 2200 kg/m^3 . Obsahuje přes 80 % SiO_2 v amorfni podobě, který vytváří kulovité zrna o velikosti $0,1\text{ }\mu\text{m}$ – $0,2\text{ }\mu\text{m}$. Chemické složení a vlastnosti jsou závislé na druhu slitiny, při kterém byla mikrosilika vyrobena.

Křemičité úlety mají pucolánové vlastnosti, reagují s Ca(OH)_2 , který vzniká hydratací cementu, za vzniku C-S-H fází. Tyto fáze jsou odolnější v agresivním prostředí než Ca(OH)_2 . Navíc svou velikostí zrn vyplňuje mezery mezi částicemi cementu a funguje jako těsnící složka. Více jak 25 % mikrosiliky z hmotnosti cementu teoreticky postačuje na reakce s portlanditem a vyplnění mezer mezi zrny cementu. Spolu s mikrosilikou je nutné použít účinný dispergátor (superplastifikátor), aby bylo dosaženo optimálního rozložení jemných částic v matici. Křemičité úlety příznivě působí na zlepšení hutnosti tranzitní zóny, zvýšení pevnosti v tlaku a zvýšení odolnosti proti agresivnímu prostředí. ^[3]

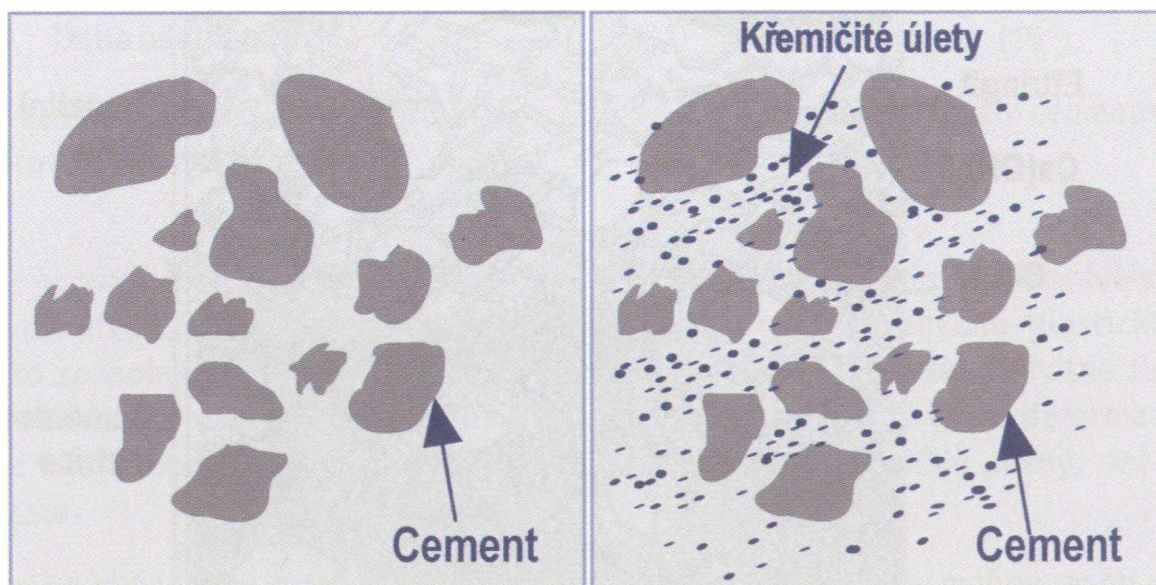
V současnosti se můžeme setkat s křemičitými úlety ve třech formách připravených pro výrobu betonu. Volně ložené v cisternách se sypnou hmotností 200 kg/m^3 – 300 kg/m^3 . Tato forma je náročná na skladování a prašnost. Přeprava v tomto stavu se prodražuje, proto

se přistoupilo k výrobě zahuštěné formy. Sypná hmotnost v granulované formě je kolem 500 kg/m³. Jejich výhodou je jednodušší manipulace a skladovatelnost. Také se lze setkat s mikrosilikou ve formě břechky, která obsahuje 50 % sušiny a vyžaduje zvláštní technologické zařízení.

Kvalita křemičitých úletů je závislá na výrobním postupu a skladování, které se liší závod od závodu. Ukazatelem kvality je obsah amorfního SiO₂, měrný povrch a síťový rozbor (měrný povrch by měl být měřen dusíkovou metodou ne podle Blaina).^[2]

Nevýhody mikrosiliky

- vyšší množství vody pro dosažení potřebné konzistence čerstvého betonu
- delší doba míchání čerstvého betonu
- vyšší dávky superplastifikátoru
- snížení alkality a pasivační schopnosti betonu
- nebezpečí vdechování jemnozrnných částic (silikóza)
- poměrně vysoká cena oproti ostatním minerálním plnivům^[8]



Obr.6: Vyplňování dutin mikrosilikou mezi částicemi cementu^[6]

Na českém trhu je mikrosilika běžně dostupná příměs do betonu a dodává ji například firma AVAS EXPORT – IMPORT, spol. s r.o.

Létavý popílek

Popílek se podle technologie spalování dělí na vysokoteplotní a fluidní. Vysokoteplotní popílek vzniká při spalování paliva při teplotách cca 1400 °C až 1600 °C, zatím co při fluidním spalování se dosahuje maximálních teploty 900 °C. Lepších vlastností

většinou dosahují popílky z černého uhlí na rozdíl od hnědouhelných. Mineralogicky jsou popílky tvořeny β -křemenem a mullitem a více než 90 % popílku má amorfní podobu.

Pevnosti betonů obsahujících popílek jsou vyšší než těch bez popílku. Při pucolánové reakci v betonu reaguje Ca(OH)_2 s oxidem křemičitým SiO_2 nebo hlinitým Al_2O_3 z popílku za vzniku kalciumsilikátových nebo kalciumaluminátových fází. Tím se zvyšuje odolnost proti CHRL. Pucolánová reakce popílků je velmi pozvolná a její výsledky jsou patrné nejdříve po 28 dnech zrání betonu. ^[17]

Pro výrobu UHSC, které zrají běžným způsobem, je použití popílku nevhodné. Pokud budeme při výrobě UHSC používat speciálního ošetřování (*kap. 5*) má popílek své opodstatnění.

Vysokopecní granulovaná drcená struska

Struska vzniká při výrobě surového železa ve vysokých pecích jako druhotná surovina rychlým ochlazením zásadité strusky ve formě taveniny. Struska je latentně hydraulická a její hydratace je z počátku velmi pomalá. Hydratací vznikají C-S-H fáze, které zhutňují strukturu matrice. Reaktivita strusky závisí na jemnosti mletí, chemickém složení, obsah skelné fáze a složení portlandského cementu. V čerstvém betonu prodlužují dobu tuhnutí a podle jemnosti mletí zlepšují stabilitu betonu. Zvýšení pevnosti závisí na typu jemnosti a množství strusky v betonu. V ztvrdlém betonu přeměňují velké póry na menší a snižují propustnost matrice betonu.

Vzhledem k pomalé hydrataci jsou strusky nevhodné pro výrobu UHSC běžným způsobem. Jejich využití v těchto betonech lze zvažovat při náročnějším ošetřování (*kap. 5*).

Křemenné moučky

Vyrábí se suchým mletím křemičitého písku v neželezném prostředí a na jednotlivé frakce jsou moučky rozděleny za pomoci větrných třídičů. Křemičitý písek vhodný pro výrobu mouček obsahuje více jak 98 % SiO_2 . V UHSC, které nejsou ošetřovány autoklávováním, plní funkci inertního mikroplniva, které má menší zrna než použitý cement.

V České republice vyrábí křemenné moučky firma Sklopísek Střeleč, a.s. a Provoďínské a.s., které nabízí podle střední velikosti zrna hned několik produktů. ^[11]

4.5. Voda

Voda, kterou do betonu použijeme, musí být v souladu s ČSN EN 1008 – Záměsová voda do betonu – specifikace pro odběr vzorků, zkoušení a posouzení vhodnosti, včetně vody získané při recyklaci v betonárně, jako záměsové vody do betonu. Pokud přidáváme pitnou

vodu, lze ji použít bez nutnosti zkoušení vlastností. Pokud výrobce čerpá povrchovou nebo podzemní vody je nutné její vlastnosti ověřit alespoň jednou měsíčně. Voda získaná při recyklaci není vhodná pro složení UHSC, protože receptury samotné obsahují vysoké množství jemných částic.

Předběžné zkoušky prováděné na povrchové a podzemní vodě jsou obsah olejů, tuků, rozptýlených látek a čisticích prostředků, barva, zápach, kyselost a obsah humusovitých látek. Pokud voda vyhovuje předběžným zkouškám, stanovuje se chemický rozbor, který rozhoduje o použitelnosti vody. ^[12]

4.6. Vyztužování betonu

Stejně jako u běžných betonů můžeme konstrukce z UHSC vyztužovat rozptýlenými vlákny, tyčovou výztuží nebo předpětím. Tyčová výztuž a předpětí není součástí technologického návrhu betonu, proto se dále budu zabývat jen rozptýlenou výztuží.

Rozptýlená vlákna

Na trhu se můžeme setkat se čtyřmi základními druhy vláken podle materiálu, ze kterého jsou vyráběny. Jsou to ocelová vlákna, skleněná vlákna, polymerní vlákna a celulózová vlákna. Každá z těchto skupin osahuje širokou paletu výrobků, která se liší rozměry vláken, povrchovou úpravou a kvalitou materiálu. Požadavky na účinky vláken v betonu jsou omezení smrštění a odstranění křehkosti, které je vhodné pro UHSC.

a) *Polymerní vlákna*

Jsou vyráběna ze syntetických polymerů (polypropyleny, polyamidy) a podle výroby se dělí na monofilamentní a fibrilovaná vlákna. Monofilamentní vlákna jsou vyráběna jednotlivě a následně oddělována na požadovanou délku s hladkým kruhovým průřezem. Fibrilovaná vlákna jsou vyráběna z fólie, která se dělí na požadovanou délku, a mají hranatý průřez s drsnějším povrchem. Jsou opatřena lubrifikačními, která při styku s vodou zajišťuje dokonalé rozmísení v celém objemu betonu.

Dávkuje se v množství cca 1 kg na 1 m³ betonu a jejich obvyklá délka je 12 mm. V betonu omezují vznik smršťovacích trhlin v počátečních stádiích tvrdnutí betonu a nově se zkoumají jejich protipožární účinky. ^[3]

Protože se nepodílí na konečných pevnostech betonu a mohou tvořit nejslabší místa v matici, nejsou vhodné pro UHSC.

b) *Celulózová vlákna*

Vyrábějí se krájením z celulózových pásů, čímž vznikají drobné kostičky. Aby se

rozmísily, potřebují delší dobu míchání (ideální je míchání pouze suché směsi). Svými vlastnostmi a účinky se podobají polymerním vláknům, ale jsou navíc schopny samošetřování.

c) *Skleněná vlákna*

Pro výrobu skleněných vláken musí být použito alkalivzdorné sklo. Délky vláken se pohybují mezi 10 mm až 20 mm a dávkují se v množství 5 % z hmotnosti cementu.

Vzhledem ke křehkým vlastnostem skla nejsou vhodné pro UHSC.

d) *Ocelová vlákna*

Použitím ocelových vláken měníme vlastnosti čerstvého i ztvrdlého betonu oproti prostému betonu. Vláknobeton s ocelovými vlákny dokáže přenášet vyšší ohybové napětí, které se projevuje v celém průřezu. Dávkování se velmi liší podle délky a průřezu vlákna.

Ocelová vlákna se dělí podle základního tvaru, průřezu a materiálu, ze kterého jsou vyrobena. Základní skupinu tvoří vlákna s upravenými kotvicími konci nebo s kotvením po celé délce profilováním průřezu vlákna. Průřez vláken je buď kruhového nebo obdélníkového tvaru s hladkým, profilovaným nebo zvlněným povrchem. Segmentová vlákna tvoří zvláštní skupinu, do které patří pozinkovaná a antikoroziční vlákna nebo speciální vlákna.

Podle technologie výroby můžeme ocelová vlákna dále dělit na drátěná vlákna, vlákna vyráběná z válcovaného materiálu a frézovaná z brám.

Drátěná vlákna - Rozměry vláken jsou běžně od 12 mm do 70 mm s průměrem od 0,15 mm do 1,2 mm. Dosahují pevností v tahu 600MPa – 1200 MPa.

Vlákna z válcovaného materiálu – Dosahují nižších tahových pevností než drátěná vlákna, a to 300 MPa až 1000 MPa. Délka se pohybuje v rozmezí 12 mm až 70 mm a jsou obdélníkového průřezu o různé šířce.

Frézovaná vlákna – Standardně se vyrábí o délce 30 mm s pevností v tahu 900 MPa.

Jedna strana má hrubý povrch s velkou přilnavostí k cementové matici. ^[3]

Tab. 9: Charakteristické vlastnosti vláken ^[10]

Vlákno	Průměr [μm]	Hustota [kg/m ³]	Modul pružnosti [GPa]	Pevnost v tahu [MPa]	Tažnost [%]
Ocel	5 - 500	7 850	200	500 – 2 000	0,5 – 3,5
Sklo	9 - 15	2 600	70 - 80	2 000 – 4 000	2 – 3,5
Fibrilovaný PP	20 - 200	900	5 - 77	500 - 750	8,0
Uhlíkové	9	1900	230	2 600	1,0



Obr. 7: Ocelová vlákna ^[6]



Obr. 8: Ocelová mikrovlákná používaná v UHSC ^[21]

5. Vliv způsobu ošetřování UHSC na výsledné pevnosti

Beton ošetřujeme, aby hydratovalo co nejvíc cementu a aby bylo omezeno smrštění. Během zrání betonu může dojít k různým typům smrštění.

- Plastické smrštění, které vzniká odpařováním vody na povrchu čerstvého betonu.
- Autogenní smrštění (též chemické nebo smrštění od samovysychání), které je spojeno s hydratačními procesy cementu.
- Smrštění od odpařování, které je následkem úbytku záměsové vody v ztvrdlém betonu.
- Teplotní smrštění způsobené změnou teploty betonu.
- Smrštění vlivem karbonatace.

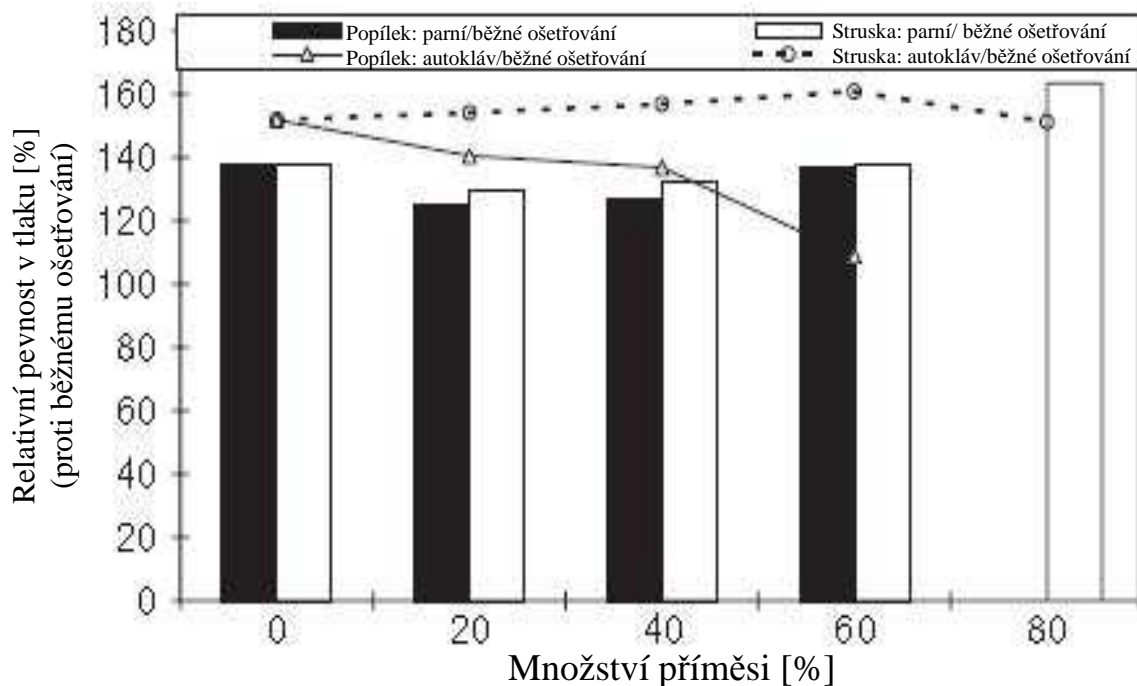
Vhodnými opatřeními lze v praxi smrštění minimalizovat. Pokud je obyčejný beton ponořen ve vodě, tak nedochází k jeho smršťování. Smrštění je tedy následkem nevhodného ošetřování nebo přerušení ošetřování a závisí na době ošetřování, vodním součiniteli a množství a typ kameniva. ^[3]

Vliv ošetřování na pevnosti UHSC

Vhodně zvoleným způsobem lze dosáhnout 28 – denní pevnosti již za 24 hodin v autoklávu. Při tomto postupu je nezbytná přítomnost mikrosiliky, aby bylo dosaženo vysokých mechanických vlastností. Bez použití křemičitých úletů dochází v autoklávu k rychlé tvorbě hydratačních produktů, které mají porézní a slabou mikrostrukturu vedoucí k nižším pevnostem. Smrštění při autoklávování se rovná přibližně jedné třetině smrštění za normálních podmínek. Protože matrice neobsahuje vápenato hlinité sírany, výrazně se zlepšuje odolnost proti síranům a snížením množství volného vápna redukuje možnost vzniku výkvětů. Autoklávování má však i své nevýhody jako vysoké finanční náklady na pořízení zařízení, soudržnost výztuže a betonu se radikálně snižuje (až o 50 %) a materiál je křehčí než běžný beton. ^[15]

Pro výrobu UHCS se používá velkého množství cementu, což zvyšuje jeho náklady a nepříznivě působí na vývin hydratačního tepla a smrštění. Proto je výhodné používat popílek a granulovanou vysokopecní strusku jako náhradu části cementu.

Byly provedeny pokusy (Yazıcı, 2007) vlivu rozdílného druhu ošetřování na konečné pevnosti UHSC s různým množstvím minerálních příměsí při zachování stálého množství mikrosiliky a křemičité moučky. Metody ošetřování byly zvoleny ve vodě 20 °C po dobu 28 dní, parní při atmosférickém tlaku a teplotě 90 °C na 12 dní a vysokotlaké při 2 MPa a teplotě 210 °C po dobu 8 hodin (autokláv).



Graf 11: Efektivita parního a autoklávovacího ošetřování^[15]

Parní a autoklávovací ošetřování vždy vykazuje lepší pevnosti v tlaku, než když jsou vzorky uloženy ve vodním prostředí. Parním ošetřováním bylo dosaženo zlepšení pevností v rozmezí 25 – 63 % a při autoklávování vykazovaly vzorky vyšší pevnosti o 9 – 61 % v závislosti na použité receptuře. Při použití vyššího procentuelního zastoupení minerálních příměsí nedochází k výrazným poklesům pevností a lze jimi nahrazovat část cementu a mikrosiliky. Parním ošetřováním nelze dosáhnout stejných pevností jako při autoklávování. Tuto skutečnost lze vysvětlit tím, že při autoklávování vznikají nové fáze, zatím co parní ošetřování zvyšuje reaktivitu jednotlivých složek.^[15]

6. Realizovaný projekt

Most Pinel v Rouen

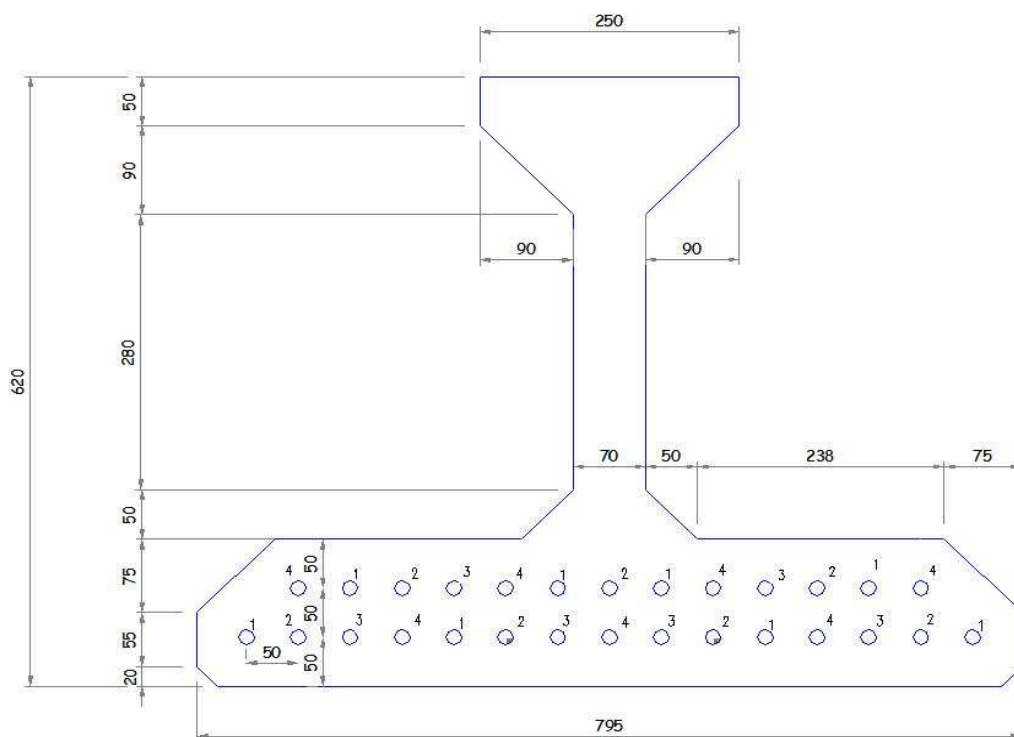
V roce 2007 došlo ve Francii v rámci přestavby k rozšíření železničního mostu 27 m dlouhého a 14 m širokého. Přestavba zahrnovala rozšíření dvou kolejových tratí na pět současných. Nová konstrukce kombinuje běžnou železobetonovou desku (C 35/45) se 17 příčnými trámy, které jsou vyrobené ze samohutnicího ultravysocehodnotného vlákny vyztuženého betonu (UHPFRC). Každý z trámů je předepnut ve 28 místech široké spodní příruby (*obr. 9*).

Trámy byly vyrobeny ve Veldhovnu firmou Hurks Beton, který je stálým partnerem Eiffage TP. Složení UHPFRC je stejné, jako bylo použito u střech mýtných bran viaduktu Millau (*tab. 10*). Konstrukční metody UHPFRC trámů jsou podobné jako u konvenčních nosníků s použitím napínací jednotky. Betonáž trámů proběhla ve dvou etapách. V první etapě byla vyrobena spodní příruba s použitím spodní části formy a ve druhé fázi byla vybetonována stojna s vrchní přírubou a vyztužením. Obě etapy betonáže musí proběhnou do 60 minut. Po 24 hodinách, kdy beton dosahoval pevnost v tlaku cca 100 MPa, bylo vneseno do trámu předpětí.

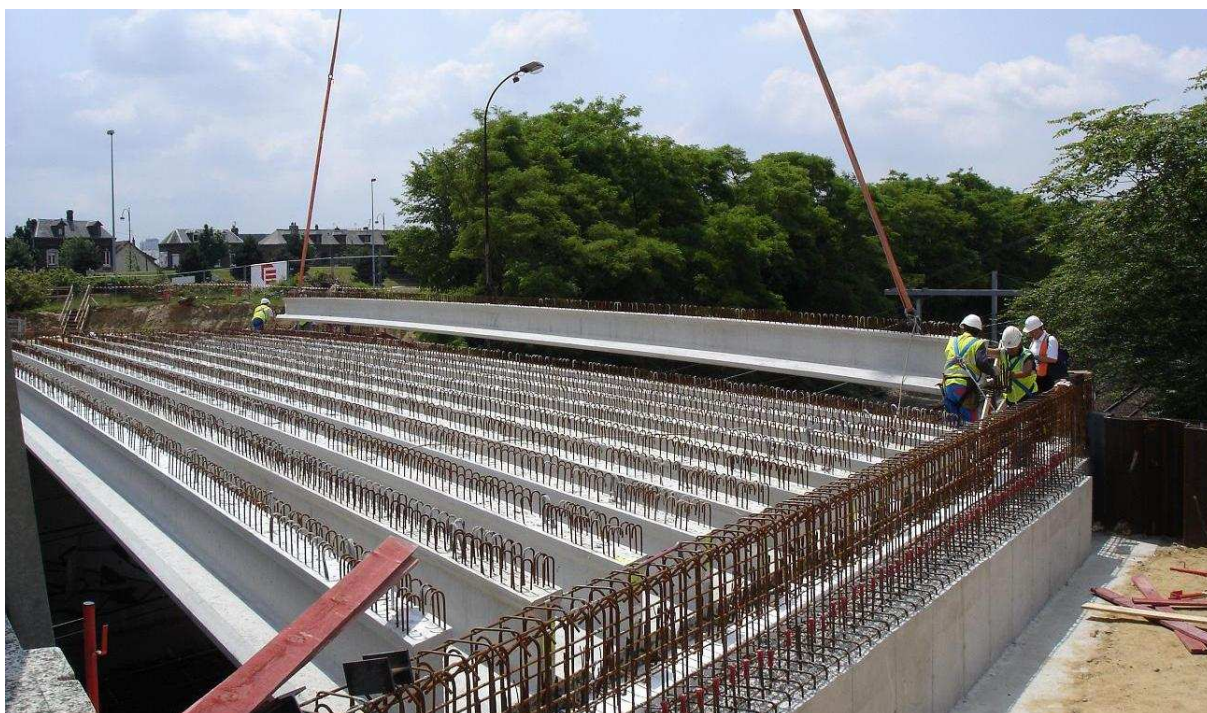
Tab. 10: Složení 165 MPa UHPFRC na 1 m³ [18]

Surovina	Hmotnost [kg]
Ceracem BFM-Millau premix od Siky	2360
Superplastifikátor	45
Voda	195
Ocelová vlákna	195

Trámy použité v tomto projektu jsou vyvinuté francouzským dodavatelem Eiffage TP a jsou hlavní složkou nosného systému, který výrobce považuje za ekonomickou alternativu běžně používaných ocelových nosníků, zvláště pokud jde o rozpory větší 20 m nad cestami nebo železnicemi. Výsledná konstrukce je lehčí (u mostu Pinel až o 40 % než původní řešení) a UHPFRC vykazuje vyšší trvanlivost než běžné betony. Hlavní výhody výstavby jsou stabilita, rychlost a bezpečnost po usazení trámů. Rozpon trámů od kraje ke kraji dovoluje jejich usazování s minimálním narušením dopravy. Vyztužení a svrchní deska nejsou tak časově náročné (menší objem betonu) než u kombinace ocelových nosníků s betonem. [18]



Obr. 9: Průřez UHPFRC nosníkem^[18]



Obr. 10: Ukládání předepnutých UHPFRC nosníků^[18]

II. Praktická část

Na základě konzultací se školitelem bakalářské práce, byla navržena recepturu UHSC s pevností v tlaku kolem 150 MPa z běžně dostupných surovin na českém trhu. Při výrobě byly použity postupy, které se shodují s výrobou běžných betonů. Míchání proběhlo v míchačce s nuceným oběhem a ošetřování bylo realizováno uložením ve vodním prostředí po dobu 28 dní. Pro lepší představu o průběhu nárůstu pevností bylo na jedné sadě vzorků z každé receptury provedena zkouška 7 – denní pevnosti v tlaku a po 28 dnech zrání byly provedeny zkoušky pevnosti v tlaku a pevnosti v tahu za ohybu.

7. Použité suroviny

7.1. Cement

Při výrobě UHSC byl použit balený portlandský cement CEM I 42,5 R, který byl vyroben v cementárně Mokrá společnosti Českomoravský cement, a.s. Chemické složení a mechanické vlastnosti viz příloha č. 1.

7.2. Kamenivo

Pro variantu s maximálním zrnem 8 mm bylo použito hrubé kamenivo čedič z lomu Bílčice frakce 4 – 8 mm. Dále byl použit čedič ze stejné lokality frakce 0 – 4 mm a písek frakce 0 – 4 mm z pískovny Žabčice u Brna. Čedič frakce 0 – 4 mm obsahoval velký podíl prachových částic, proto byl upraven na frakci 2 – 4 mm, která již byla použita pro výrobu UHSC.

7.3. Voda

Byla použita pitná voda podle ČSN EN 1008 Záměsová voda do betonu, která vyhovuje bez potřeby provádění zkoušek.

7.4. Superplastifikační přísady

Byly použity dva druhy superplastifikátorů, a to CHRYSO®Fluid CE 40 W na bázi polynaftalenu a CHRYSO®Fluid Optima 224 firmy CHRYSO Chemie, spol. s r.o. na bázi modifikovaných polykarboxylátů. Vlastnosti a chemické složení viz příloha č. 2 a 3.

7.5. Příměsi

Jako příměs byla použita mikrosilika Sioxid vyrobená firmou OFZ a.s. a křemenné moučky s obchodním označením MT 8 a ST 9. Parametry všech použitých příměsí jsou

popsány v přílohách 4, 5 a 6.

7.6. Rozptýlená výztuž

V receptuře UHSC 2 byly použity rovné ocelové mikroválkna DM firmy KrampeHarex CZ s.r.o., které jsou optimální pro dosažení vysokých pevností. Vlastnosti jsou uvedeny v příloze 7.

8. Použité receptury

Pro výrobu UHSC jsem zvolil dvě různé receptury. První varianta je bez ocelových vláken a obsahuje D_{\max} 4 mm, které zastupuje čedič frakce 2 – 4 mm. Druhá varianta osahovala čedič o maximální velikosti zrna 8 mm a k vyztužení jsem použil ocelová vlákna. Předpokládané výsledné pevnosti měly dosáhnout hodnot okolo 150 MPa.

Tab. 11: Receptura UHSC 1

Surovina [kg]	1 m ³
Cement CEM I 42,5 R	540
Písek Žabčice 0 – 2 mm	440
Čedič Bílčice 2 – 4 mm	1027
Mikrosilika Sioxid	162
Křemenná moučka ST 9	231
CHRYSO [®] Fluid CE 40 W	16,8
Voda	163

Tab. 12: Receptura UHSC 2

Surovina [kg]	1 m ³
Cement CEM I 42,5 R	650
Písek Žabčice 0 – 2 mm	244
Čedič Bílčice 2 – 4 mm	278
Čedič Bílčice 4 – 8 mm	425
Křemenná moučka MT 8	131
Křemenná moučka ST 9	325
Mikrosilika Sioxid	177
Ocelová mikroválkna DM	120
CHRYSO [®] Fluid Optima 224	38
Voda	161

9. Provádění zkoušky

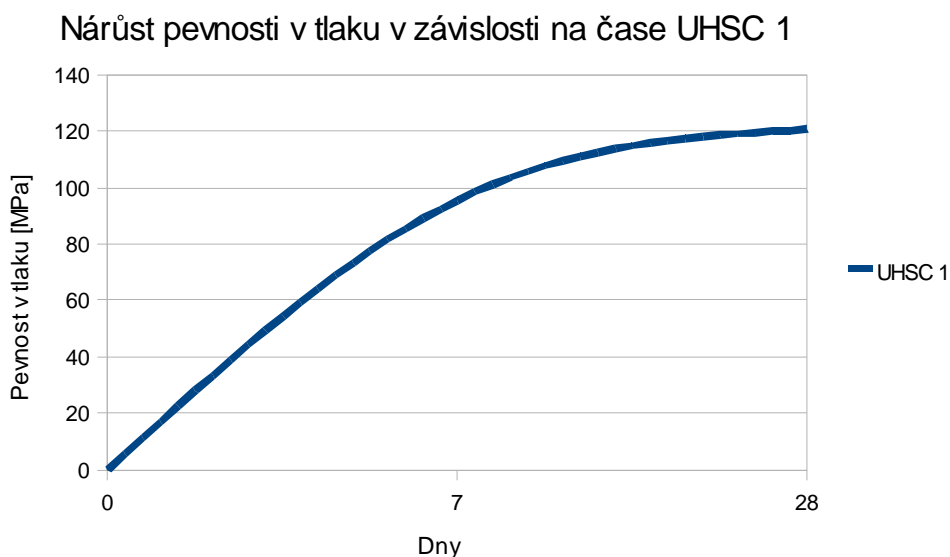
Na obou směsích čerstvého betonu byla provedena zkouška konzistence podle ČSN EN 12350-3 Zkoušení čerstvého betonu – Část 3: Zkouška Vebe. Objemová hmotnost v čerstvém stavu byla určena podle ČSN EN 12350-6 Zkoušení čerstvého betonu - Část 6: Objemová hmotnost.

Na ztvrdlém betonu byly provedeny zkoušky pevnosti v tlaku po 7 a 28 dnech podle ČSN EN 12390-3 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles, pevnosti v tahu za ohybu podle ČSN EN 12390-5 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles a byla stanovena objemová hmotnost podle ČSN EN 12390-7 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu.

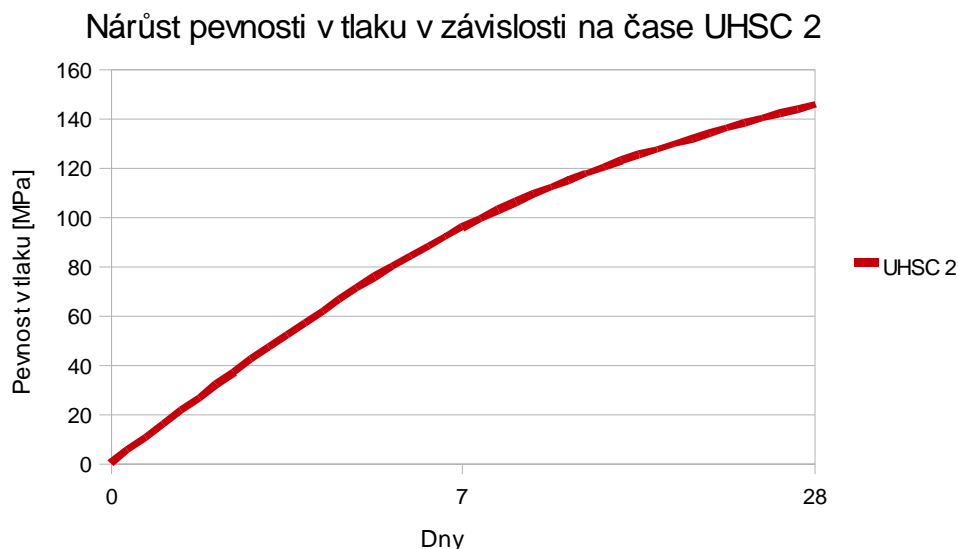
10. Výsledky zkoušek

Tab. 13: Mechanické vlastnosti UHSC 1 a UHSC 2

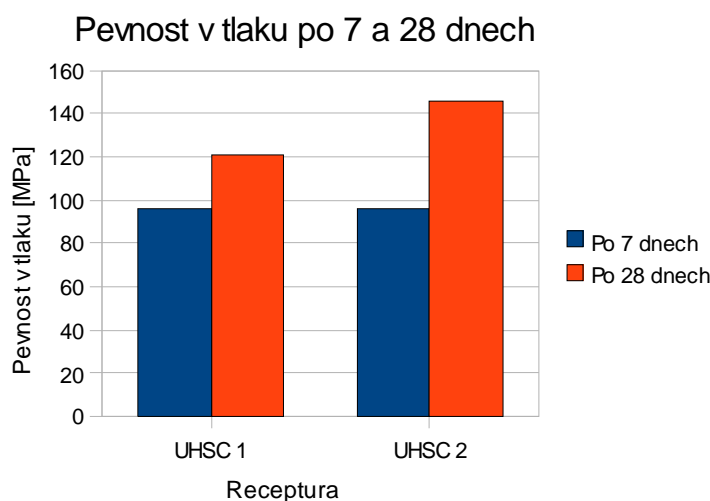
Receptura	Vebe [s]	D čerstvý beton [kg/m ³]	D ztvrdlý beton [kg/m ³]	f _c po 7 dnech [MPa]	f _c [MPa]	f _t [MPa]
UHSC 1	30 – V1	2470	2450	95,6	120,6	9,42
UHSC 2	10 – V3	2600	2440	95,9	145,9	11,44



Graf 12: Nárůst pevnosti v tlaku UHSC 1



Graf 13: Nárůst pevnosti vlaku UHSC 2



Graf 14: Srovnání pevností UHSC 1 a UHSC 2

Po 7 dnech uložení ve vodním prostředí vzorky obou směsí vykazovaly téměř shodné pevnosti v tlaku cca 96 MPa. Po 28 dnech ve vodním prostředí se pevnosti již výrazně lišily, když u vzorků UHSC 1 byla naměřena pevnost v tlaku 120,6 MPa a u UHSC 2 145,9 MPa. U vzorků UHSC 2 zřejmě došlo vlivem pucolánových reakcí k zhutnění struktury a zvýšení soudržnosti ocelových vláken s matricí, čímž došlo vyššímu nárůstu pevnosti než u UHSC 1. Vliv vláken byl patrný již během destrukčních zkoušek, kdy nedocházelo k „odštělování“ částí drceného betonu. Nízké pevnosti UHSC 1 lze přičítat i nevhodně zvolenému superplastifikátoru, který nedokázal směs optimálně ztekutit (Vebe 30 s) a při hutnění nebyl vytěsněn všechen vzduch. Receptura UHSC 2 se svými pevnosti těsně přiblížila k požadované hranici 150 MPa a částečně splnila zadaný cíl.

11. Závěr

V bakalářské práci byly popsány základní teoretické principy, které je nutné dodržet při výrobě ultravysocepevnostních betonů. První popisovanou metodou jsou DSP betony, které se již dokázaly prosadit v komerčním měřítku. Jejich výhodou je jednoduchý návrh a výroba srovnatelná s prostými betony. Další popisovaná metoda je výroba MDF materiálů, které jsou výjimečné svou pevností v tahu. Finanční náročnost na výrobní zařízení však brání rozvoji v širším měřítku a konkurenceschopnosti ostatním materiálům. Poslední popisovanou metodou jsou RPC, které svými pevnostmi v tlaku posunují UHSC o úroveň výše. Jelikož se jedná o moderní metodu, nabízí širokou možnost dalšího studia a pokusů.

Další část práce se zaměřuje na výběr vhodných surovin pro výrobu betonů ultravysokých pevností a jejich dostupností na českém trhu. Podle provedeného experimentu v praktické části se potvrdilo, že UHCS lze vyrobit za použití surovin, které jsou dostupné na českém trhu.

Teoretická část bakalářské práce vystihuje možnost ideálního použití ultravysocepevnostního betonu, kdy se projeví jeho přednosti vedoucí ke snížení nákladů a urychlení výstavby.

V praktické části jsem se pokusil připravit směs UHSC, která by dosáhla hodnoty okolo 150 MPa v tlaku. Ze dvou receptur se můj zadaný cíl částečně splnil jen u jedné, která dosáhla pevnosti v tlaku 145,9 MPa. Druhá receptura i při nevhodně zvoleném superplastifikátoru dosáhla pevnosti 120,6 MPa, která ji řadí do skupiny UHSC.

Touto prací jsem chtěl shrnout znalosti o návrhu, výrobě a použití ultravysocepevnostních betonů a ukázat jejich možný potenciál do budoucna.

12. Seznam tabulek

<i>tabulka 1: Vliv typu a maximální velikosti zrna kameniva na pevnost v tlaku a modul pružnosti DSP.....</i>	<i>14</i>
<i>tabulka 2: Složení DSP betonu.....</i>	<i>15</i>
<i>tabulka 3: Receptury RPC.....</i>	<i>23</i>
<i>tabulka 4: Mechanické vlastnosti RPC kompozitů.....</i>	<i>23</i>
<i>tabulka 5: Zkušební záměsi RPC (konstantní molární poměr $CaO/SiO_2 = 1,3$).....</i>	<i>24</i>
<i>tabulka 6: Modifikace C_3A podle obsahu alkálií.....</i>	<i>27</i>
<i>tabulka 7: Součinitel A podle Bolomeya.....</i>	<i>30</i>
<i>tabulka 8: Vlastnosti vybraných hornin vhodných pro UHSC.....</i>	<i>33</i>
<i>tabulka 9: Charakteristické vlastnosti vláken.....</i>	<i>40</i>
<i>tabulka 10: Složení 165 MPa UHPFRC na $1 m^3$.....</i>	<i>44</i>
<i>tabulka 11: Receptura UHSC 1.....</i>	<i>47</i>
<i>tabulka 12: Receptura UHSC 2.....</i>	<i>47</i>
<i>tabulka 13: Mechanické vlastnosti UHSC 1 a UHSC 2.....</i>	<i>48</i>

13. Seznam grafů

<i>graf 1: Závislost pevnosti betonu v tlaku na obsahu vzduchu nedokonalým zhutněním.....</i>	<i>11</i>
<i>graf 2: Závislost pevnosti betonu na vodním součiniteli a pevnosti cementu.....</i>	<i>13</i>
<i>graf 3: Závislost pevnosti betonu na vodním součiniteli a pevnosti cementu.....</i>	<i>13</i>
<i>graf 4: Pevnost v tlaku DSP betonu podle složení v tab. 2.....</i>	<i>16</i>
<i>graf 5: Vliv množství minerální příměsi na pevnost RPC v tlaku.....</i>	<i>24</i>
<i>graf 6: Vliv třídy cementu a druhu superplastifikátoru na reologické chování.....</i>	<i>28</i>
<i>graf 7: Pevnosti mikrobetonu v závislosti na použitém superplastifikátoru a cementu.....</i>	<i>29</i>
<i>graf 8: Ideální křivky zrnitosti pro $D_{max} = 16$ mm.....</i>	<i>31</i>
<i>graf 9: Ideální křivky zrnitosti pro $D_{max} 4$ mm.....</i>	<i>32</i>
<i>graf 10: Ideální křivky zrnitosti pro $D_{max} 8$ mm.....</i>	<i>32</i>
<i>graf 11: Efektivita parního a autoklávovacího ošetřování.....</i>	<i>43</i>
<i>graf 12: Nárůst pevnosti vlaku UHSC 1.....</i>	<i>48</i>
<i>graf 13: Nárůst pevnosti vlaku UHSC 2.....</i>	<i>49</i>
<i>Graf 14: Srovnání pevností UHSC 1 a UHSC 2.....</i>	<i>49</i>

14. Seznam obrázků

<i>obrázek 1: Schematické znázornění tranzitní zóny.....</i>	<i>14</i>
<i>obrázek 2: Nadbytečná voda pod hrubými zrny kameniva.....</i>	<i>14</i>
<i>obrázek 3: Schematické znázornění výroby CAPR kompozitu.....</i>	<i>20</i>
<i>obrázek 4: Elektrostatické odpuzování částic.....</i>	<i>35</i>
<i>obrázek 5: Stérické odpuzování částic.....</i>	<i>35</i>
<i>obrázek 6: Vyplňování dutin mikrosilikou mezi částicemi cementu.....</i>	<i>37</i>
<i>obrázek 7: Ocelová vlákna.....</i>	<i>41</i>
<i>obrázek 8: Ocelová mikrovlákná používaná v UHSC.....</i>	<i>41</i>
<i>obrázek 9: Průřez UHPFRC nosníkem.....</i>	<i>45</i>
<i>obrázek 10: Ukládání předepnutých UHPFRC nosníků.....</i>	<i>45</i>

15. Použitá literatura

- [1] *Beton: Technologie, konstrukce, sanace*. Praha: Česká betonářská společnost, 2003, třetí, 6/2003. ISSN 1213-3116.
- [2] AÏTCIN, Pierre-Claude. *Vysokohodnotný beton*. 1. české vydání. Praha: ČKAIT, červen 2005, 320 s. Betonové stavitelství. ISBN 80-86769-39-9.
- [3] Hela,R., *Technologie betonu II*, učební opory VUT FAST Brno, 2007
- [4] Recent developments in macro-defect-free (MDF) cements. In: *Construction and Building Materials*. 2008, s. 1761-1767. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2008.09.001. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061808002687>
- [5] DRÁBLIK, M, S.C. MOJUMDAR a R.C.T SLADE. Prospect of novel macro-defect-free cements for the new millennium. In: s. 68-73. Dostupné z: http://www.ceramicssilikaty.cz/2002/pdf/2002_02_068.pdf
- [6] COLLEPARDI, Mario. *Moderní beton*. 1. vydání. Praha: ČKAIT, 2009, 344 s. Betonové stavitelství. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [7] Densit. [cit. 2012-03-29]. Dostupné z: http://www.densit.com/About_ITW_Densit/Product_brands.aspx
- [8] *Beton: Technologie, konstrukce, sanace*. Praha: Česká betonářská společnost, 2011, jedenáctý, 1/2011. ISSN 1213-3116.
- [9] ZEMAN, Otakar. *Petrografie a regionální geologie Českého masívu*. 2. přeprac. vyd. Praha: ČVUT, 1994, 147 s. ISBN 80-010-1178-X.
- [10] BAJZA, Adolf a Ildiko ROUSEKOVÁ. *Technológia betónu*. 1. vyd. Bratislava: Jaga, 2006, 190 s. ISBN 80-807-6032-2.
- [11] Provodínské písky a.s. *Provodínské písky* [online]. 2010 [cit. 2012-05-09]. Dostupné z: <http://www.pisky.cz/index1.htm>
- [12] PŘÍŘUČKA TECHNOLOGA - BETON - SUROVINY, VÝROBA, VLASTNOSTI. 1. vydání. Praha: ARTIS - reklamní studio, 2010.
- [13] RICHARD a CHEYREZY. COMPOSITION OF REACTIVE POWDER CONCRETES. In: *Cement and Concrete Research*. USA: Elsevier, 1995, 1501 - 1511. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0008884695001442>
- [14] YAZICI, Halit, Hüseyin YIGİTER, 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. In: *Fuel*. Turecko, 2008, 2401 - 2407. Dostupné z:
<http://www.sciencedirect.com/science/journal/00162361>

- [15] YAZICI, Halit. The effect of curing conditions on compressive strength of ultra high strength concrete with high volume mineral admixtures. In: *Building and environment*. Turkey: Elsevier, 2007, 2083 - 2089. Dostupné z:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132306000928>
- [16] ČSN EN 206-1. *Beton - Část 1: Specifikace, vlastností, výroba a shoda*. Praha: Český normalizační institut, 2001.
- [17] Popílek: Odpad. Informační centrum stavebních hmot s využitím odpadů: VUT v Brně, Ústav stavebních hmot a dílců [online]. [cit. 2011-09-01]. Dostupné z:
<http://waste.fce.vutbr.cz/Odpad/Popilek.html>
- [18] MATTEIS, Daniel de, Pierre MARCHAND, Thierry THIBAUX a Nicolas FABRY. The new Pinel Bridge in Rouen, the fifth French road bridge using ultra high performance fiber-reinforced concrete components. In: IABSE, International Association for Bridge and Structural Engineering. *Creating and renewing urban structures tall buildings, bridges and infrastructure ; 17th Congress of IABSE, Chicago 2008*. Zürich: IABSE, 2008, s. 316-317. ISBN 9783857481185.
- [19] Chotard TJ et al. Application of X-ray computed tomography to characterise the early hydration of calcium aluminate cement. In: *Cem Concr Compos* 2003;25:145–52.
- [20] Vavřín, F.: Maltoviny, VUT Brno 1987
- [21] NAGAMOTO, Naoki, KATA, Kazukiyo TAMAKI a Akio KASUGA. EXPERIMENTAL RESEARCH ON NEW WEB STRUCTURE USING ULTRA HIGH STRENGTH FIBER REINFORCED CONCRETE. In: *8th International Symposium on Utilization of High-Strength and High-Performance Concrete*. Tokyo, 2008, 423 - 428.

16. Seznam příloh

Příloha č. 1: Technické listy – cement CEM I 42,5 R

Příloha č. 2: Technické listy – CHRYSO® Fluid CE 40 W

Příloha č. 3: Technické listy – CHRYSO® Fluid Optima 224

Příloha č. 4: Technické listy – Sioxid

Příloha č. 5: Technické listy – Křemenná moučka MT 8

Příloha č. 6: Technické listy – Křemenná moučka ST 9

Příloha č. 7: Technické listy – KrampeHarex DM