



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

## ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

# REAKTIVNÍ PRÁŠKOVÉ KOMPOZITY A CEMENTOVÉ KOMPOZITY BEZ MAKROPÓRŮ

MAKROPÓRŮ REACTIVE POWDER COMPOSITES AND CEMENT COMPOSITES WITHOUT  
MACROPORES

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Monika Panenková

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. RUDOLF HELA, CSc.

BRNO 2018



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

## FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Monika Panenková
Název	Reaktivní práškové kompozity a cementové kompozity bez makropórů
Vedoucí práce	prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
Datum zadání	31. 3. 2017
Datum odevzdání	12. 1. 2018

V Brně dne 31. 3. 2017

---

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 2012 – 2016.

## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

V současné betonářské praxi se již začínají uplatňovat tzv. reaktivní práškové kompozity (RPC) s pevnostmi v tlaku až kolem 300 MPa. Tyto se zatím v praxi v ČR běžně nepoužívají, experimentální vývoj zatím není na dostatečné úrovni, aby se mohly tyto materiály uplatnit v praxi. Jedna z vlastností kterou se liší chování RPC (Reactive Powder Concrete) kompozitů od ostatních materiálů ultravysokých pevností je následkem jevu, který může být označen jako „efekt měřítka“. Tenká a krátká ocelová vlákna, užívaná jako rozptýlená výztuž v RPC kompozitech, se chovají odlišně od o něco delších vláken, používaných v běžných vysokohodnotných betonech. V běžném vysokohodnotném betonu by ocel takových rozměrů nehrála roli rozptýlené vláknové výztuže, ale tyčové výztuže, která má na mechanické vlastnosti zcela jiný vliv. Další variantou jsou tzv. Macro Defect Free (MDF), které mohou dosáhnout až 200 MPa v tahu za ohybu.

Cílem vaší diplomové práce bude vypracovat podrobnou rešerži 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. Popište principy a nutnost jejich ošetřování.

V experimentální části bude cílem zvýšit homogenitu materiálu užitím částic složek směsi o maximální velikosti 300  $\mu\text{m}$  zvýšením hustoty uspořádání částic v systému použitím optimalizované granulometrie částic v systému. Ověřit možnosti zlepšení mikrostruktury užitím vhodného tepelného ošetřování, díky kterému dojde k transformaci CSH gelu na tobermorit a následně na xonolit. Dále zvýšit houževnatost použitím rozptýlené výztuže ocelovými mikrovláknami, jejichž rozměry jsou velmi závažným faktorem ovlivňujícím mechanické vlastnosti materiálu. Mechanické vlastnosti ověřit ve stáří 7, 28 a 60 dnů.

Rozsah : min 70 stran

## STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

---

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

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce se zabývá tematikou navrhování a výroby ultra vysokohodnotných betonů (UHPC), reaktivních práškových kompozitů (RPC) a dalších jemnozrnných materiálu, jako kompozity omezující vznik makrotrhlin (MDF) nebo kompozit se zahuštěnou maticí obsahující malé částice (DSP). Teoretická část práce se soustředí na požadavky na vlastnosti a složení UHPC a RPC a na metodologii jejich navrhování. V experimentální části je popisován návrh RPC, výroba zkušebních těles, zkoušení některých fyzikálně mechanických vlastností, jako jsou pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku materiálu a určení chemické charakteristiky rentgenovou a termickou analýzou.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Ultra vysokohodnotný beton, reaktivní práškový kompozit, Ductal, pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu, návrh složení betonu, vlákna

## **ABSTRACT**

This diploma thesis deals with the design principles and manufacture of ultra performance concrete (UHPC), reactive powder composites (RPC) and other fine-grained materials, such as Macro defect free (MDF) or Densified systems with small particles (DSP). Theoretical part of this work is focused on the requirements of properties and composition UHPC and RPC and methodology of their design principles. Experimental part describes design principles RPC, manufacture of test specimens, testing of certain physical and mechanical properties, such as tensile strength, bending strength and compressive strength and determination chemical character X-ray and thermal analysis.

## **KEYWORDS**

Ultra high performance concrete, reactive powder composite (concrete), Ductal, compressive strength, tensile strength, bending strength, proposition for the composition of concrete, fibres

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP**

Bc. Monika Panenková *Reaktivní práškové kompozity a cementové kompozity bez makropórů*.  
Brno, 2018. 92 s. Diplomová 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 diplomovou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 12. 1. 2018

---

Bc. Monika Panenková  
autor práce

### **Poděkování:**

V první řadě bych ráda poděkovala svému vedoucímu práce, prof. Ing. Rudolfu Helovi, CSc. za rady, užitečné připomínky, a především za pomoc a čas, který mi byl ochoten věnovat. Dále bych chtěla poděkovat ostatním členům Ústavu technologie stavebních hmot a dílců za pomoc při zpracování této diplomové práce.

## Obsah

1	ÚVOD.....	9
2	CÍL.....	11
3	UHPC (Ultra vysokohodnotné betony) .....	11
4	RPC (Reaktivní práškové kompozity).....	12
4.1	Ductal.....	12
5	NÁVRH A SLOŽENÍ UHPC A RPC .....	14
6	VÝROBA UHPC a RPC .....	24
7	OŠETŘOVÁNÍ UHPC A RPC.....	25
8	VLASTNOSTI UHPC A RPC .....	26
8.1	Pevnost v tlaku a v tahu za ohybu.....	26
8.2	Modul pružnosti.....	27
8.3	Trvanlivost .....	27
8.4	Smrštění.....	28
9	APLIKACE UHPC A RPC .....	29
10	DSP (Kompozit se zahuštěnou maticí obsahující malé částice).....	33
11	MDF (Kompozit omezující vznik makrotrhlin) .....	34
12	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....	36
12.1	METODIKA.....	37
12.1.1	Výběr surovin.....	39
12.1.2	Navržené receptury UHPC .....	46
12.1.3	Technologie výroby .....	49
12.2	VÝSLEDKY .....	56
12.2.1	Konzistence a vodní součinitel.....	56
12.2.2	Fyzikálně mechanické vlastnosti .....	57
12.2.3	Rentgenová difrakční analýza (XRD).....	70
12.2.4	Diferenční termická analýza (DTA).....	71
12.2.5	Mikroskopické snímky .....	73
12.3	DISKUZE VÝSLEDKŮ .....	76
13	ZÁVĚR .....	79
14	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	81
15	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ .....	91

# 1 ÚVOD

Dnešní technologie umožňují snadný vývoj stavebních materiálů. Co se betonu týče, jeho používání bylo započato už v 19. století. Za pomoci moderních technologií došlo hlavně v 80. letech 20. století ke vzniku vysokohodnotných betonů, tzv. betonů s přidanou hodnotou (označovaných jako HPC – High Performance Concrete). U těchto betonů dochází vlivem vylepšení určitých vlastností ke zlepšení trvanlivosti betonu, životnosti konstrukcí a výraznému navýšení pevností v tlaku či tahu za ohybu. Jednou z nejčastěji posuzovanou a nejvíce sledovanou vlastností je pevnost betonu v tlaku, s jejíž zvýšením dochází ke zlepšení vlastností dalších.

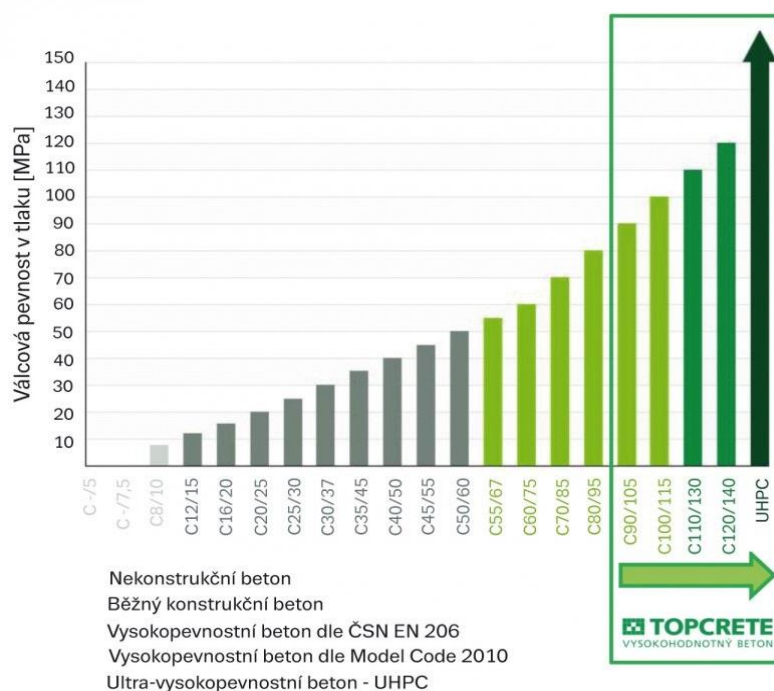
Jedním z vysokohodnotných betonů je tedy beton vysokopevnostní (označovaný jako HSC – High Strength Concrete). Jde o beton pevnostních tříd C 55/67 až C 105/115 dle ČSN EN 206 Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda [1]. Jeho vývoj je zařazen do poloviny 80. let a používán byl především v USA. HSC byl aplikován především u výškových budov za účelem ztenčení konstrukce nebo se tento materiál používá pro výstavbu mostů. Prvním použitím vysokopevnostního betonu na stavbu mostu o rozpětí 170 m v Evropě byl most Second Stichtse Bridge [2].

Dalším typem vysokohodnotného betonu je beton velmi vysokopevnostní (označovaný VHSC – Very High Strength Concrete, popř. VHPC – Very High Performance Concrete). Jedná se o beton pevnostních tříd C 105/115 až C 135/150.

Následným vývojem těchto typů betonů se začaly používat betony ultra vysokopevnostní (označované UHSC – Ultra High Strength Concrete), avšak v praxi se stále ještě používá spíše název ultra vysokohodnotné (označované UHPC – Ultra High Performance Concrete). Jelikož tento typ betonu obsahuje ve svém složení ocelová vlákna jako rozptýlenou výztuž, méně časté označení je i beton ultra vysokohodnotný vlákny vyztužený (označovaný UHPFRC – Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete). Jedná se o beton mimořádné kvality pevnostních tříd vyšších než C 135/150. Obecně se jedná o betony, u nichž je omezeno množství hrubého kameniva a nahrazeno jemnými složkami. Obsahuje také větší množství cementu a menší množství vody, čímž dochází ke snížení vodního součinitele na hodnoty v rozmezí 0,15 až 0,30. Takovou recepturou je

dosaženo větší hutnosti materiálu a tím dochází ke zlepšení dalších vlastností, jako jsou pevnosti, mrazuvzdornost, vodonepropustnost, odolnost proti chemickým rozmrazovacím látkám, odolnost proti obrusu a jiné [2][3][4].

Těmto betonům je od 80. let věnována vysoká pozornost a UHPC betony tento vývoj nekončí. Další vývoj vedl k tzv. reaktivním práškovým kompozitům (označovaných RPC – Reactive Powder Composite, popř. Reactive Powder Concrete). Jedná se o kompozit, v jehož složení je hrubé kamenivo eliminováno aktivními práškovými materiály natolik, že právě tyto materiály tvoří hlavní složky kompozitu. Dochází tak k vytvoření velmi hutné a homogenní mikrostruktury a tyto kompozity jsou pak schopny vykazovat pevnosti v tlaku o hodnotách vyšších než 200 MPa. Výzkum RPC se stal základním zdrojem pro vývoj například dnes průmyslově vyráběného materiálu Ductal ve Francii. Dalším podobným materiálem je kompozit se zahuštěnou maticí obsahující malé částice (označovaný DSP – Densified Systems with small Particles) nebo kompozity omezující vznik makrotrhlin (označovaný MDF – Macro Defect Free). Každý z těchto materiálů dosahuje vysokých pevností jiným způsobem. Kvůli jejich jemnozrnnému složení je vhodné je nazývat spíše kompozitem než betonem. Na obr. 1 lze vidět přehled pevnostních tříd betonu a jejich rozdělení [3][5][6][7][35].



Obr. 1: Graf pevnostních tříd betonu včetně vyznačení vysokohodnotných betonů [9]

## 2 CÍL

Cílem této diplomové práce je vypracovat rešerši vztahující se k navrhování a výrobě UHPC a RPC se zaměřením na požadavky na vlastnosti a druhy vstupních surovin pro jejich výrobu, možnosti využití jemnozrnných příměsí a superplastifikačních přísad. Následně by měly být popsány požadavky na metodologii jejich navrhování a požadavky z hlediska ošetřování. Na základě těchto poznatků by měl být sestaven model návrhu s ohledem na zvýšení homogenity materiálu použitím vhodných vstupních surovin a dále by měly být ověřeny mechanické vlastnosti.

## 3 UHPC (Ultra vysokohodnotné betony)

Jedná se o druh betonu, jehož pevnostní třída je více než C 135/150. Pevnost v tlaku UHPC je tedy obecně nad 150 MPa, některé zdroje uvádí nad 200 MPa [6][10][11] a pevnost v tahu ohybem 15 MPa a více, některé zdroje však uvádí hodnoty od 6 do 11 MPa [12]. Modul pružnosti se uvádí v rozmezí hodnot 40 až 55 GPa. Pro dosažení těchto pevností je důležité zvolit vhodné vstupní suroviny a navrhnout optimální složení.

S vysokou pevností UHPC se zlepšují i další vlastnosti. Je to například vysoká trvanlivost betonu, se kterou souvisí delší životnost konstrukcí, která se uvádí až 200 let. UHPC má vyšší odolnost proti korozi, proti působení klimatických vlivů nebo agresivních látek, dále vykazuje vyšší odolnost proti obrusu nebo mechanickému působení a vyšší mrazuvzdornost oproti prostému betonu. Vysoká pevnost UHPC dále umožňuje vytvořit štíhlejší průřezy při jeho použití a tím tedy také snížit hmotnost konstrukce. UHPC má proto velký význam při výstavbě výškových budov a pro své dobré chování v agresivním prostředí i pro mostní konstrukce. Další výhodou je snížené množství potřebné výztuže do konstrukce, což má za následek užití rozptýlené výztuže v podobě ocelových vláken [3][4][13][14].

## 4 RPC (Reaktivní práškové kompozity)

RPC je materiál na bázi portlandského cementu, jehož hodnoty pevností v tlaku se uvádějí obecně nad 125 MPa [15], některé zdroje uvádí nad 200 MPa [16]. Těchto hodnot je dosaženo především eliminováním velikosti částic, čímž dochází ke zvýšení homogenity struktury. Velký význam má použití jemných příměsí, jako je např. mikrosilika, popílek, struska a další, čímž lze dosáhnout částečného nahrazení cementu a zlepšení mechanických vlastností. Pro zvýšení houževnatosti kompozitu je používáno rozptýlené výztuže v podobě ocelových mikrovláken. Dále má na vlastnosti RPC příznivý vliv i vhodně zvoleného tepelného ošetřování, při kterém dochází k přeměně C-S-H gelů na tobermorit a následně na xonotlit. Tím dochází ke zlepšení mikrostruktury materiálu. Možnosti ošetřování jsou podrobněji popsány v kapitole 7 „Ošetřování UHPC a RPC“ (str. 25).

Označení RPC se používá i ve spojení s betonem, tzn. reaktivní práškové betony (reactive powder concrete), ale vzhledem k jeho jemnozrnnému složení je označení kompozit přesnější. RPC je velmi používaný materiál z hlediska designových tenkostěnných prvků.

### 4.1 Ductal

Ductal je produkt francouzské společnosti Lafarge a představuje minerální matici s vyztužujícími kovovými nebo organickými vlákny, která má díky svým výsledným vlastnostem široké použití v moderní architektuře. Ductal byl poprvé patentován v roce 1997, kdy se jednalo o Ductal s ocelovými vlákny. V roce 1998 se začal vyrábět Ductal s organickými vlákny a v roce 2000 s polypropylenovými vlákny [14][17].

Ductal je materiál označovaný jako RPC a vyznačuje se kombinací vysoké pevnosti, duktility, trvanlivosti a v neposlední řadě i estetickou flexibilitou. Ductal je dodáván v podobě předmíchaného produktu, obsahující typické vstupní suroviny, které obsahuje UHPC nebo RPC. Tato předem smíchaná směs obsahuje cement, písek, mikrosiliku, křemennou moučku, superplastifikační přísadu a volitelné množství kovových nebo organických vláken [18]. Ductal je rozšířeným stavebním materiálem především ve světě, a to např. ve Francii, USA, Itálii, Japonsku atd. Používá se především tam, kde je

požadována dlouhodobá trvanlivost spojená s nízkými náklady na údržbu, a proto je velmi používaný na výrobu tenkostěnných obkladů fasád nebo hydrotechnických staveb. Velký význam má i při výstavbě mostů, kde je výhodou jeho vysoká odolnost proti karbonataci a proti působení chloridů a kyselého prostředí. Dále použitím Ductalu lze snížit hmotnost konstrukce v porovnání s konstrukcemi z běžného železobetonu nebo předpjatého betonu nebo dosáhnout velmi malého smrštění a dotvarování, což je příznivé především při navrhování konstrukcí z předpjatého betonu [14][19].

Ductal má velký význam i z hlediska designového použití. Používá se na výrobu různých moderních předmětů nebo vybavení do interiérů.

#### ***Vlastnosti:***

Ductal má jedinečnou kombinaci vlastností, které jsou od vysokohodnotných betonů požadovány. Mají vysokou pevnost a zároveň vysokou nepropustnost, odolnost proti korozi a jiné. Pevnost v tlaku se uvádí až 200 MPa a pevnost v tahu až 40 MPa. Dnešní produkty Ductal mohou dosahovat hodnot pevnosti v tlaku až 85 MPa po 12 hodinách po odlití. Takových pevností dosahuje díky složení, tzn. vhodnou volbou složek, redukcí vodního součinitele na hodnotu okolo 0,2, použitím speciálních přísad a vláken. Z hlediska výroby je vysoká pevnost materiálu podpořena speciálními postupy výroby, které zahrnují propařování a zahřívání čerstvého betonu. Tyto požadavky předurčují tak Ductal pro použití v prefabrikovaných částech konstrukcí. Ductal rozšiřuje možnosti ve výstavbě složitých konstrukcí, z hlediska tvaru, textury povrchu a představuje možnou náhradu za konstrukce, které díky své mohutnosti, složitosti a potřebnosti velkého množství výztuže, mohou jen těžko splňovat podmínky, týkající se vyšší životnosti a trvanlivosti [13][14][19][20].

Ductal vzhledem ke své trvanlivosti velmi dobře odolává působení agresivního prostředí, mořské vody, mrazu a jiných agresivních či klimatických podmínek. V závislosti na kritériích je Ductal až stokrát trvanlivější než tradiční beton. Je tedy schopný zachovat své původní vlastnosti po dlouhou dobu používání i v agresivním a náročném prostředí [13][20].

Ductal byl použit na mnoha mostních konstrukcích po celém světě. Konkrétní příklady staveb jsou popsány v kapitole 9 „Aplikace UHPC a RPC“ (str. 29). Hlavní výhody, proč použít Ductal u mostních konstrukcí jsou [19]:

- Trvanlivost: extrémně nízká pórovitost, nízká propustnost chloridových iontů, vysoká odolnost vůči zmrazování a rozmrazování, tlakům a ohrusu
- Tažnost: odolnost vůči trvalému ohybu ve spárách (vzniklému provozem dopravních prostředků), konstrukční stabilita
- Rychlejší výstavba, snižuje rizika provozu během stavby
- Lehčí provedení - zdvihací hmotnost je srovnatelná s ocelí, optimalizace manipulačního řešení
- Delší rozpětí o menší tloušťce
- Rozměrová stabilita
- Delší životnost
- Estetické řešení konstrukce a optimální výška konstrukce
- Redukce údržby (není téměř potřeba)
- Ohybová pevnost
- Stavební náklady

Ductal má široké využití nejen ve stavebních konstrukcích, ale například i ve výrobě malé prefabrikace anebo podlahových a stěnových panelů. Dokonce lze použít i na výrobu interiérových doplňků.

Mladším a velice podobným materiálem je CERACEM, který v porovnání s Ductalem obsahuje vyšší množství cementu a dosahuje o něco vyšších pevností. Uvádí se pevnost v tlaku 165 MPa po 7 dnech a 200 MPa po 28 dnech za běžných podmínek zrání. CERACEM oproti Ductalu neobsahuje křemennou moučku [21][22].

## 5 NÁVRH A SLOŽENÍ UHPC A RPC

Přesná specifikace UHPC ani RPC není dána, ale je uvedena v různých směrnících a dokumentech. Prozatím neexistuje žádná platná legislativa pro výrobu, vlastnosti ani testování UHPC, ale v zahraničí bylo vytvořeno několik doporučení, jak tento typ betonu vyrobit.

Například francouzská doporučení uvádí tyto parametry [3]:

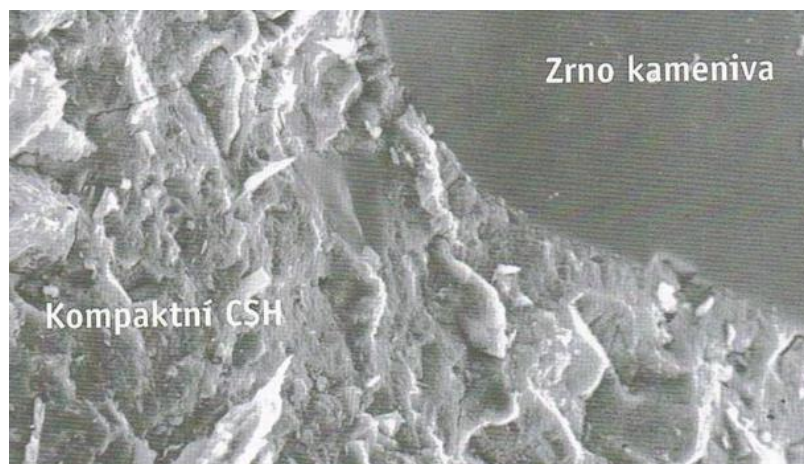
- Charakteristická pevnost v tlaku 150 až 250 MPa
- Vysoká reziduální pevnost v tahu dosažená vysokou dávkou drátků (více než 2 % obj.)
- Návrh směsi a obsah pojiva, který zajistí vysokou hutnost materiálu, a naopak eliminuje jeho porozitu, znamenající vysokou odolnost drátků uvnitř materiálu
- Pevnost matrice v prostém tahu vyšší než 7 MPa

Dále lze vycházet i z amerických doporučení od Federal Highway Administration, která uvádí tyto parametry [3]:

- Jemnozrnný kompozitní materiál s cementovým pojivem
- Vodní součinitel nižší než 0,25
- Vysoká dávka rozptýlené výztuže
- Pevnost v tlaku vyšší než 150 MPa
- Výrazně zvýšená trvanlivost ve srovnání s jinými (běžnými nebo vysokohodnotnými) betony

Německá doporučení kladou více důraz na trvanlivost a odolnost betonu. Tím připouští i nižší pevnosti materiálu a vychází z názoru, že pevnost UHPC se přizpůsobuje jeho konkrétnímu účelu využití [3].

Mechanické vlastnosti UHPC a RPC dosahují dobrých výsledků i z důvodu kvalitní tranzitní zóny (Interfacial Transition Zone – ITZ), tj. zóny na rozhraní kameniva a cementového tmele, tedy zóna přechodová. U betonů s hrubým kamenivem, kde je tranzitní zóna velmi pórovitá, dochází po zatížení ke vzniku trhlin. V případě UHPC nebo RPC je tranzitní zóna téměř plynulým přechodem mezi kamenivem a cementovým tmelem. Je to způsobeno homogenní strukturou materiálu, která je zajištěna vyšším objemem CSH gelů, zvýšeným množstvím jemných částic a eliminací hrubého kameniva. Tvorba CSH gelu je následkem pucolánové reakce, kdy dochází k reakci mezi hydroxidem vápenatým a aktivní příměsí. Na obr. 2 lze vidět plynulý přechod mezi zrnem kameniva a cementovým tmelem pomocí aktivní příměsi UHPC nebo RPC betonů.



Obr. 2: Kompaktní CSH gel v betonu s křemičitým úletem [23]

UHPC a RPC se od běžných betonů liší nejen výslednými vlastnostmi, ale také složením. Vyznačuje se především eliminací hrubého kameniva, vyšším množstvím cementu, nižším množstvím vody a vyšší množství jemných složek, kterými mohou být např. křemičité úlety (mikrosilika). Důležité je také použití kvalitní a vysoce účinné superplastifikační přísady. Jemnozrné složení materiálu vytváří hutnou strukturu s minimálním obsahem pórů, ale také velmi křehkou matici. Takový beton by nebylo možné z bezpečnostních důvodů použít jako konstrukční. Pro zvýšení houževnatosti je tedy nutné použít ocelová vlákna, která v betonu tvoří rozptýlenou výztuž.

### **Cement**

Použití vhodného cementu je pro výsledné vlastnosti RPC důležité. Pro tyto betony, které se vyrábí s požadavkem na vyšší pevnosti, se používá cement portlandský s vysokou čistotou a obsahem slinku nad 95 %, pevnostních tříd 52,5. Běžně se množství cementu pohybuje od 550 do 1000 kg/m<sup>3</sup>, ale obecně je množství cementu závislé na množství ostatních jemných podílů v betonu a na maximálním zrnu kameniva. Dle německých doporučení je vhodné použití cementu s nižším obsahem trikalciumaluminátu, aby byl omezen vývoj hydratačního tepla, které je vzhledem k vysokému množství cementu významné. Chemické a mineralogické složení je důležité i z hlediska účinku použitých superplastifikačních přísad, čímž může být velice ovlivněna konzistence čerstvého UHPC nebo RPC, která je jednou z klíčových vlastností tohoto typu betonu. Důležitá je u cementu i velikost a distribuce zrn [5][24][25].

## ***Plnivo***

Důležitá u kameniva je pro použití do UHPC nebo RPC křivka zrnitosti, která by měla být optimalizována od nejjemnějších složek až po hrubé frakce. Hrubá frakce kameniva by v případě obou betonů měla být omezena. Maximální zrno kameniva UHPC se uvádí 16 mm, ale běžně se používají frakce do 8 mm [5][26], popř. do 4 mm [14]. V případě RPC se uvažuje maximální zrno do 2 mm. V hodně případech je však uvažováno s maximálním zrnem přibližně 600  $\mu\text{m}$  [27][28]. Nejčastěji se tedy pro výrobu RPC používají křemičité písky s vhodnou granulometrií. Křemičitý písek by měl obsahovat více jak 90 % oxidu křemičitého a měl by být suchý. Vlhký křemičitý písek by způsobil kolísání konzistence čerstvého betonu a tím nepřesnosti v návrhu a složení. Ovlivněna by tedy byla i výsledná pevnost RPC [3][24][29].

Funkci plniva u RPC plní i cement. Je to dáno jeho velkým množstvím v RPC a minimálním množstvím vody. Nedochozí tak k úplné hydrataci veškerého cementu a v betonu následně zůstanou nezreagovaná zrna cementu o velikosti přibližně 150 až 300  $\mu\text{m}$  [7].

## ***Příměsi***

Příměs se do betonů obecně používá za účelem náhrady cementu levnějším materiálem. U betonů typu UHPC nebo RPC se však příměs přidává hlavně za účelem zlepšení některých vlastností. Používají se aktivní příměsi pucolánové nebo latentně hydraulické. Takové příměsi obsahují amorfni oxid křemičitý, který reaguje s hydroxidem vápenatým za vzniku CSH gelu. Z hlediska tranzitní zóny je tedy použití takové příměsi u těchto typů betonů důležité.

Nejpoužívanější pucolánovou příměsí je křemičitý úlet neboli mikrosilika, která má výrazný vliv na pevnost, odolnost a trvanlivost betonu. Křemičité úlety jsou vedlejším produktem při výrobě křemíku nebo různých křemíkových slitin, kde je křemen redukován za přítomnosti paliva. Během této redukce vzniká při teplotě nad 2000 °C plynný oxid křemnatý, který uniká do horní části pece, tam se ochlazuje, následně kondenzuje a oxiduje na oxid křemičitý ve formě jemných částic. Kromě oxidu křemičitého obsahuje mikrosilika i malé množství oxidu hlinitého a železitého. Velikost zrn mikrosiliky se uvádí

0,1 až 0,3  $\mu\text{m}$ , měrný povrch přibližně 15000 až 25000  $\text{m}^2/\text{kg}$  a měrná hmotnost přibližně 2200  $\text{kg}/\text{m}^3$ . Dávka mikrosiliky se obvykle volí přibližně 10 % z hmotnosti cementu, avšak v případě UHPC a RPC je to zpravidla více. Udávají se hodnoty 10 až 30 % hmotnosti cementu. Toto dávkování odpovídá přibližně množství 150 až 250  $\text{kg}/\text{m}^3$  [2][24][30][31][32].

Kromě mikrosiliky lze použít i jiné příměsi. Často používanou příměsí obecně do vysokohodnotných betonů je metakaolin. Vzniká při tepelném zpracování přírodního kaolinu, ze kterého je vypuzena mezimřížková voda. Uvádí se, že se jedná o kvalitní pucolánovou příměs, která má pozitivní vliv na vývin pevností. Efektivní teplota výpalu je přibližně 750 až 800  $^{\circ}\text{C}$  po dobu 6 hodin. Velikost zrn metakaolinu je 1 až 10  $\mu\text{m}$  [30][33][34].

Další používanou příměsí je jemně mletá granulovaná struska. Ta vzniká jako druhotná surovina prudkým ochlazením při výrobě surového železa ve vysokých pecích. Jedná se o latentně hydraulickou příměs, která má pomalý průběh hydratace, a proto má význam pro výrobu UHPC a RPC v případě tepelného ošetřování čerstvého betonu. Pro výrobu těchto betonů běžným způsobem není použití strusky příliš vhodné. Reaktivita strusky závisí na jemnosti mletí, chemickém složení, obsahu skelné fáze a na složení použitého cementu. Měrný povrch vysokopecní strusky se pohybuje v závislosti na jemnosti mletí od 340 do 420  $\text{m}^2/\text{kg}$  [32][35].

Pro zvýšení dlouhodobých pevností lze použít jako příměs vysokoteplotní popílek. Tento druh popílku vzniká při spalování uhlí při teplotách přibližně 1300 až 1450  $^{\circ}\text{C}$ . Černouhelné popílký dosahují obecně lepších vlastností než popílký vzniklé při spalování hnědé uhlí. Vlastnosti popílku jsou tedy velmi proměnlivé, což je závislé nejen na druhu spalovaného paliva, ale také na způsobu jeho zachycení. Popílek je pucolánová látka, u níž pucolánová reakce probíhá pozvolna a výsledky se projevují nejdříve po 28 dnech zrání betonu. Popílek má tedy podobně jako struska větší význam v případě tepelného ošetřování čerstvého UHPC nebo RPC [35][36].

Jako příměs do betonu se využívá i jemně mletý vápenec, který se vyrábí mletím drceného vápence. Jeho kvalita je závislá na jemnosti mletí a granulometrii, která může přispívat k vyšším pevnostem zaplněním prostoru mezi zrny cementu jemnými podíly [7].

## ***Voda a vodní součinitel***

Voda do RPC nemá žádné zvláštní požadavky z hlediska použitelnosti stejně jako u obyčejných betonů. Použitá voda by měla 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 [37]. Běžně se používá voda pitná, kterou lze použít bez předchozího zkoušení jejích vlastností. Voda by zpravidla neměla obsahovat žádné nečistoty, jako např. oleje, tuky, humusovité látky, stopy čistících prostředků nebo různé rozptýlené látky. Z hlediska chemického složení, které je klíčové pro stanovení použitelnosti, by neměla obsahovat zvýšené množství chloridů, síranů, kyselin nebo jiných nevhodných sloučenin [38].

Velkou roli u RPC hraje vodní součinitel. Vodní součinitel udává poměr mezi množstvím vody a pojivé složky čerstvého betonu. Pojivou složku RPC betonů tvoří cement a mikrosilika, popř. popílek, struska a další. Každá příměs má svou k-hodnotu, kterou je množství násobeno a která zohledňuje aktivitu dané příměsi. Hodnota vodního součinitele RPC se pohybuje kolem hodnoty 0,20 až 0,25. Vzhledem k vyššímu množství cementu a dalších aktivních příměsí je takové množství vody nedostačující pro úplnou hydrataci. Část z množství cementu pak plní funkci plniva a tím pomáhá vytvořit hutnější strukturu matrice, která je jedním z důvodů vyšších pevností [3][5][39].

## ***Přísady***

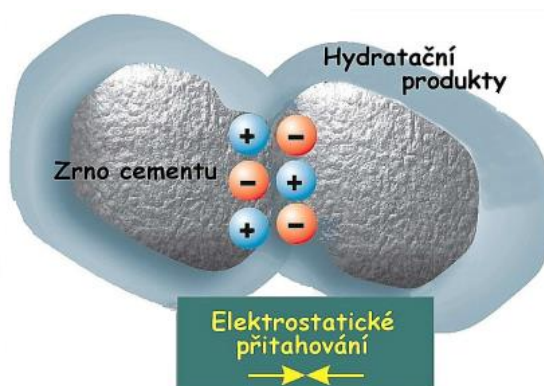
Vzhledem k nízkému vodnímu součiniteli je nutné do RPC použít vysoce účinné a kvalitní superplastifikační přísady. Obecně se tyto přísady používají pro dosažení lepší zpracovatelnosti při stejném množství vody nebo ke zvýšení pevností v důsledku snížení množství vody při zachování stejné zpracovatelnosti. Pro dosažení nízkého vodního součinitele je také velmi důležitá kompatibilita mezi superplastifikační přísadou a ostatními složkami betonu, především cementu. Použitím kvalitní superplastifikační přísady nedochází k segregaci jednotlivých složek čerstvého betonu o vyšší konzistenci a to umožňuje ukládání betonu i bez zhutnění pomocí vibrace [5][31][38][40].

Nejpoužívanější superplastifikační přísady lze rozdělit do následujících skupin:

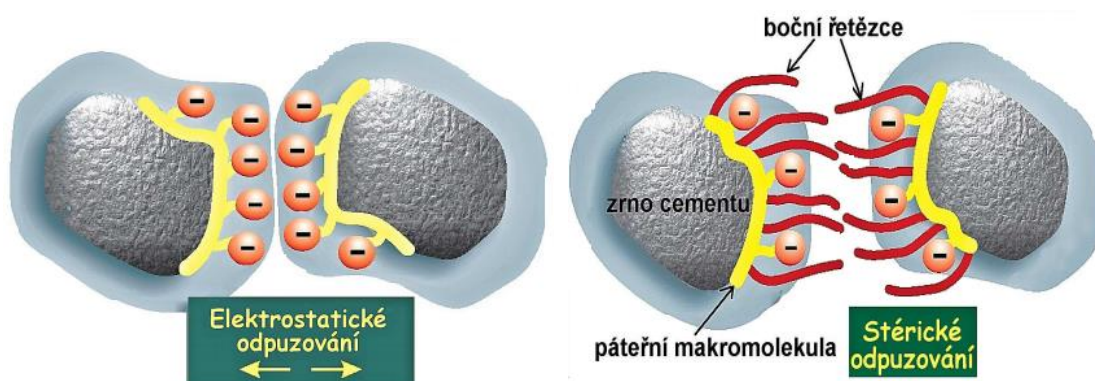
- **Sulfonované melaminformaldehydové kondenzáty (SMF)** – tyto plastifikační přísady se na trhu vyskytují v různých kvalitách. Jsou dodávány v podobě čirého roztoku a většinou obsahují od 22 do 40 % sušiny. Jejich princip spočívá v elektrostatickém odpuzování. Jeho výhodami jsou stálá kvalita a účinnost, udržení stabilního provzdušnění a nezpomalují tuhnutí betonu. Nevýhodou je však vyšší cena v porovnání s nižší účinností přísady.
- **Sulfonované naftalenformaldehydové kondenzáty (SNF)** – tyto přísady jsou dodávány v podobě hnědého roztoku, popř. hnědého prášku a většinou obsahují od 40 do 42 % sušiny. Jejich princip fungování je stejně jako u SMF založen na elektrostatickém odpuzování. Mezi jeho výhody patří vyšší obsah sušiny a nižší cena v porovnání s SMF a mezi nevýhody patří mírné retardační účinky v případě nežádoucího zpomalování tuhnutí betonu.
- **Estery polykarboxylových kyselin (PC)** – jedná se o nejúčinnější superplastifikační přísadu do betonu. Polykarboxyláty jsou syntetické organické polymery nesoucí karboxylové skupiny a mohou být ve formě bílého prášku nebo ve formě nažloutlého, slabě červeného nebo hnědého roztoku. Tyto přísady jsou tvořené makromolekulami s dlouhými postranními řetězci, které vytváří stérické odpuzování cementových částic, které mají tendenci koagulovat. Výhodou superplastifikačních přísad na bázi polykarboxylátů je regulovatelnost vlastností díky délce hlavního řetězce a délkám rozvinutí bočních řetězců. Experimenty [41] prokázaly, že s rostoucí délkou bočních řetězců roste účinnost přísady a s kratšími bočními řetězci se prodlužuje doba zpracovatelnosti. Kombinací a změnou bočních řetězců lze získat přísadu, která působí jako plastifikační a zároveň jako stabilizační přísada. Dále je možné regulovat dobu zpracovatelnosti a rychlost tvrdnutí materiálu [5][33][35][40].

Pro správný účinek superplastifikační přísady je důležitá kompatibilita mezi přísadou a portlandským cementem. Po smíchání cementu s vodou dochází vlivem elektrických nábojů na povrchu cementových zrn k jejich elektrostatickému přitahování. Koagulace zrn cementu pak zabraňuje pronikání vody k jejich povrchu a dochází tak ke snížené pohyblivosti čerstvého betonu. Použitím superplastifikační přísady dojde k vytvoření

záporného náboje na povrchu cementových zrn a následně jejich stérickému odpuzování. Elektrostatické přitahování cementových zrn lze vidět na obr. 3. Princip elektrostatického a stérického odpuzování lze vidět na obr. 4 a 5 [33].



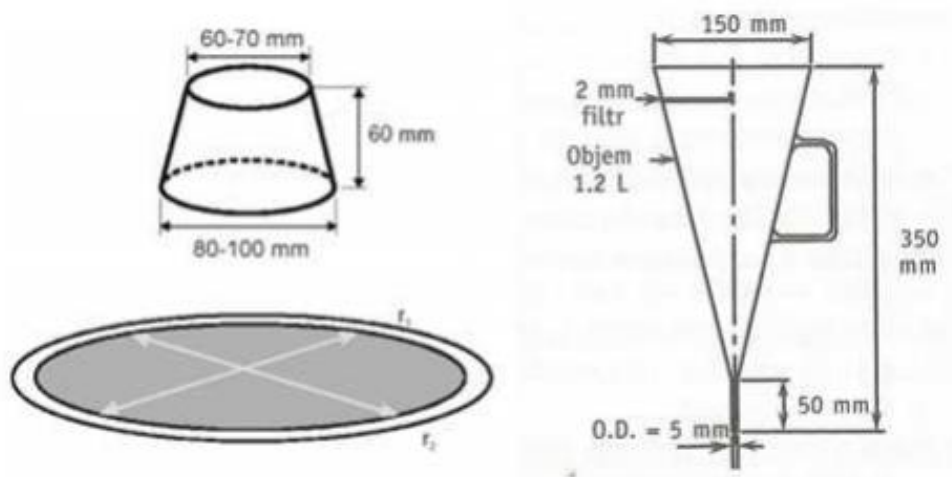
Obr. 3: Princip elektrostatického přitahování cementových zrn [33]



Obr. 4 a 5 (zleva): Princip elektrostatického odpuzování a princip stérického odpuzování přidáním superplastifikační přísady [33]

Na zjišťování kompatibility přísady s cementem je několik metod, ke kterým je však potřeba přistupovat s rezervou, jelikož samotný cement se superplastifikační přísadou může vykazovat jiné chování než následně v betonu. Nejpoužívanější je zkouška rozlití minikužele a metoda Marchova kužele. Zkouška rozlití se stanovuje na malém množství zkoušené cementové pasty a obvykle se měří v čase 10, 30, 40, 60, 90 a 120 minut. V případě Marchova kužele se zkouší větší množství cementové pasty a princip spočívá v měření času potřebného k tomu, aby určitý objem materiálu vytekl otvorem daného průměru, který se může u jednotlivých kuželů lišit. Často se používají obě metody současně. Reologii cementové pasty nejvíce ovlivňuje jemnost mletí cementu, jeho chemické složení, teplota vody a vodní součinitel. Vodní součinitel se volí tak,

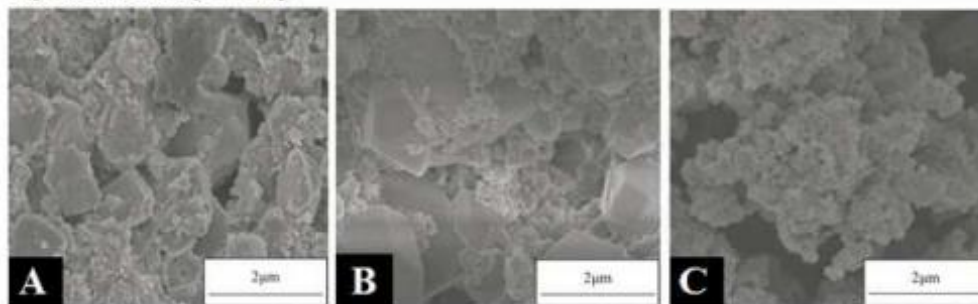
aby po 5 minutách od zamíchání pasty byla hodnota doby průtoku 60 až 90 s. V případě, že by pro dosažení těchto hodnot bylo třeba zvýšit vodní součinitel, je vhodné zvolit jiný druh superplastifikační přísady. Zkouška rozlití minikužele a příklad Marchova kužele jsou vidět na obr. 6 a 7 [8].



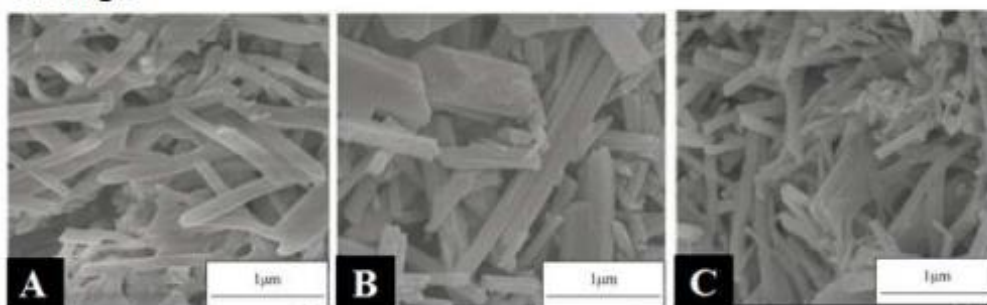
Obr. 6 a 7 (zleva): Zkouška rozlití minikužele a příklad Marchova kužele pro stanovení kompatibility mezi cementem a superplastifikační přísadou [8]

Plastifikační a superplastifikační přísady mají velký vliv i na morfologii hydratačních produktů, která má velký vliv na výsledné vlastnosti betonu. Touto problematikou se zabýval C. Shi a kolektiv, který ve svém výzkumu řeší především vliv morfologie portlanditu (hydroxidu vápenatého) na odolnosti betonu proti karbonataci. Superplastifikační přísady na bázi SNF, a především PC odolnost betonu proti karbonataci zvyšují. Dále byl v tomto výzkumu zkoumán vliv plastifikačních přísad na stabilitu primárního ettringitu, která se mění v důsledku vzniku různých morfologií. Výsledky prokázaly vyšší stabilitu primárního ettringitu v případě použití SNF přísady. Na obr. 8 je vidět porovnání jednotlivých rozdílů v morfologii hydratačních produktů u vzorků bez použití superplastifikační přísady a s použitím SNF a PC přísady [84].

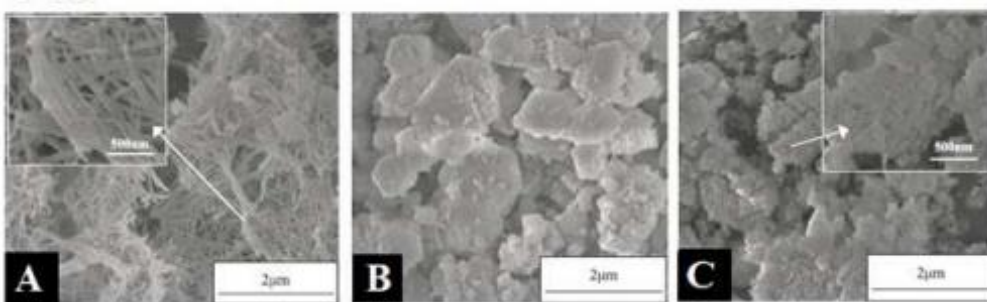
### Hydroxid vápenatý



### Ettringit



### C-S-H



Obr. 8: Porovnání morfologie hydratačních produktů v případě vzorků bez použití superplastifikační přísady (A), s použitím superplastifikační přísady na bázi sulfonanových naftalenformaldehydů (B) a s použitím přísady na bázi polykarboxylátů (C) [84]

### Ocelová vlákna (drátky):

Pro RPC se využívají mikroválkna v podobě ocelových drátků, jejichž délka se uvádí do 12 mm a průměr by neměl přesáhnout 0,15 mm. Množství drátků se běžně uvádí od 1 do 2 % z celkového objemu, což odpovídá přibližně 75 až 150 kg/m<sup>3</sup>. V některých případech se lze setkat i s dávkou 200 kg/m<sup>3</sup>. Drátky působí v RPC jako rozptýlená výztuž, která má v tomto typu betonu zcela jiný význam než v běžných betonech. Jedná se o jev, označovaný jako tzv. efekt měřítka, kdy tato rozptýlená výztuž RPC působí jako výztuž tyčová běžného betonu. V porovnání velikosti drátků a maximálního zrna kameniva RPC s velikostí vláken a maximálním zrnem kameniva běžného betonu lze usoudit, že toto

vyztužení RPC odpovídá přibližně 1 m dlouhé ocelové tyči o průměru 10 mm. Z toho vyplývá zlepšení mechanických vlastností, jako např. pevnost v tahu nebo pevnost v tahu za ohybu, díky kterým lze RPC použít jako konstrukční beton, do kterého není třeba přidávat další výztuž [3][5][15][24][26][29][31][39].

## 6 VÝROBA UHPC a RPC

V první řadě je nutné při výrobě RPC minimalizovat množství pórů v betonu a vznik trhlin či mikrotrhlin, které mohou vzniknout např. smrštěním. Je tedy nezbytný správný výběr surovin, správný způsob zpracování, ukládání a následně ošetřování RPC. Kombinací těchto aspektů lze docílit vysoce homogenní struktury, která způsobuje lepší mechanické vlastnosti, vyšší únosnost a trvanlivost betonu [42].

Důležitou částí výroby těchto typů betonů je míchání. Tento proces by měl trvat déle než v případě běžných betonů. Obecně se uvádí alespoň 5 až 10 minut. V některých případech se uvádí až téměř 20 minut. Dostatečným zamícháním čerstvého betonu je následně zamezeno nerovnoměrnému rozmístění plniva a ocelových vláken během a po uložení čerstvého betonu do bednění či forem, čímž jsou zaručeny rovnoměrné mechanické vlastnosti materiálu v konstrukci. Pro míchání UHPC nebo RPC je vhodné použít míchací zařízení s vysokou a volitelnou intenzitou míchání. Často se také v tomto případě využívá vakuové míchání, které zamezuje vnášení přebytečného vzduchu do čerstvého betonu během míchacího procesu a tím ovlivňuje nejen vlastnosti čerstvého, ale také ztvrdlého betonu. V případě použití míchacího zařízení s volitelnou intenzitou je vhodné intenzitu míchání z tohoto důvodu po dostatečném ztekucení čerstvého betonu snížit. Důležitá je také posloupnost jednotlivých složek [5][7][14][24][29][32].

Z hlediska konzistence mohou být UHPC nebo RPC od zavhlých směsí až po téměř samozhutnitelné. Důležité je však dosáhnout co nejvyšší hutnosti ve všech případech, tedy zvolit správný způsob zhutňování a ukládání čerstvého betonu. To závisí nejen na konzistenci čerstvého betonu, ale také na jeho složení. Během zkoušení konzistence čerstvého betonu by nemělo docházet k segregaci čerstvého betonu. Pokud dochází k odměšování některých složek, měla by být receptura betonu upravena [5][20][43].

Postup při výrobě UHPC nebo RPC má velký význam z hlediska orientace ocelových drátků v betonu. Nasměrování vláken má vliv především na hodnoty pevnosti v tahu za ohybu výsledné matrice. Je tedy nutné zvolit správný způsob ukládání čerstvého betonu a následného zhutnění. Každá receptura UHPC nebo RPC potřebuje věnovat způsobu ukládání zvýšenou pozornost a předem jej stanovit, aby bylo možné opakovaně kontrolovat homogenitu materiálu a orientaci ocelových drátků v betonu. Vhodnou formou zhutnění je vibrace, která odvzdušní beton a zvýší hutnost betonu [5][26].

## 7 OŠETŘOVÁNÍ UHPC A RPC

Cílem ošetřování betonu obecně je dosažení co nejvyšší pevnosti betonu využitím hydratace cementu a nerušené tvorby struktury cementového kamene. Je nutné zamezit nežádoucímu tahovému či tlakovému napětí ve struktuře betonu. Taková napětí mohou vzniknout například rychlým vysoušením betonu. Ošetřování by tedy mělo začít co nejdříve po výrobě a uložení čerstvého betonu do bednění nebo do forem. Vlhké ošetřování je důležité z hlediska dostatečné hydratace cementu na povrchu betonu a nedochází tak k jeho vysušování. Vysušování povrchu dochází totiž ke vzniku smršťovacích trhlin a deformací a tím ke snížení pevnosti a trvanlivosti betonu. Proto musí být zamezeno odpařování vody z povrchu betonu, což je nejčastější důvod smrštění u běžných betonů. Pro beton je tedy důležité zrání pod vodou nebo ve vlhkém prostředí spolu se skrápěním vodou. V případě UHPC a RPC má největší význam autogenní smršťování, tj. smršťování hydratací cementu, a to v důsledku nízkého vodního součinitele [44].

UHPC i RPC mohou dosahovat vysokých pevností i za běžných podmínek zrání, ale vhodnější je použití tepelného ošetřování. Je však nutné zvolit správnou teplotu ošetřování. Např. v případě ošetřovací teploty do 50 °C dojde ke zvýšení především počátečních pevností betonu. Se speciálním způsobem ošetřování také stoupají náklady na výrobu RPC. Hodně vysokých pevností však lze dosáhnout také kombinací jednotlivých tepelných ošetřování [21][45]. Nejběžnější způsoby ošetřování UHPC nebo RPC:

- **Propařování** – propařování většinou probíhá ve speciálních propařovacích komorách. Aby došlo ke zvýšení konečných pevností, teplota prostředí by měla

dosahovat kolem hodnoty 90°C při relativní vlhkosti 100 %. Propařováním dojde k urychlení procesu hydratace a průběhu pucolánových reakcí [21].

- **Autoklávování** – tímto typem ošetřování lze dosáhnout jinak pevností po 28 dnech již za 24 hodin. Autoklávování probíhá od teploty 50 °C. Při teplotách 50 až 150 °C dochází k výraznému urychlení hydratace a průběhu pucolánové reakce. Při teplotě 180 °C a tlaku přibližně 1 MPa dochází k přeměnám v mikrostrukturu za vzniku tobermoritu. V případě dosažení teploty 250 °C a více dochází k přeměně již vzniklého tobermoritu na xonotlit. Nárůst teploty a následně proces ochlazení by měl být pozvolný, aby nedošlo k poškození mikrostruktury betonu tepelným šokem. Pro autoklávování UHPC nebo RPC je nutná přítomnost křemičitého úletu kvůli dosažení potřebných mechanických vlastností. Bez použití mikrosiliky dochází v autoklávu zrychlenou hydratací k rychlé tvorbě hydratačních produktů, které však mají porézní a slabou mikrostrukturu, která následně vede ke snížení pevností. V případě, že je v RPC použita křemenná moučka, dochází při teplotě 250 °C k aktivaci jejích pucolánových vlastností. To vede ke zvýšení výsledných pevností v důsledku vzniku CSH fází s delšími řetězci a lepšímu propojení křemičitých zrn s dosud vzniklými CSH fázemi. Výhodou autoklávu je, že smrštění během tohoto procesu je výrazně menší než v případě běžného zrání za normálních podmínek. Nevýhodou je však snížená soudržnost mezi rozptýlenou výztuží a betonovou matricí, což způsobuje křehký charakter materiálu. Výhodné je v tomto případě i náhrada části množství cementu granulovanou vysokopecní struskou nebo vysokoteplotním popílkem [45][46][47][48].

## 8 VLASTNOSTI UHPC A RPC

### 8.1 Pevnost v tlaku a v tahu za ohybu

Pevnost betonu je jedna z nejdůležitějších vlastností a umožňuje materiálu odolávat působení vnějších sil. Pevnost betonu je závislá na mnoha faktorech. Pro dosažení vysokých hodnot je důležitá eliminace vzduchových pórů a vyplnění tohoto prostoru pevným materiálem. Pro omezení vzniku pórů je důležitá dostatečná zpracovatelnost.

Na pevnost má velký vliv průběh napětí v betonu a vznik napěťových špiček. Proto je vhodné omezení hrubých frakcí kameniva nebo jeho úplné vyloučení [5].

Hodnoty pevností UHPC a RPC byly zmíněny v kap. 3 „UHPC (Ultra vysokohodnotné betony)“ (str. 11) a 4 „RPC (Reaktivní práškové kompozity)“ (str. 12). UHPC se uvádí, že dosahuje hodnot pevností v tlaku nad 150 MPa a v tahu za ohybu více jak 15 MPa. V případě RPC se uvádí pevnosti v tlaku až nad 200 MPa.

## 8.2 Modul pružnosti

Modul pružnosti představuje poměr mezi napětím a přetvořením. Modul pružnosti betonu, ačkoli se jedná o jednu hodnotu, se skládá z modulu pružnosti kameniva a modulu pružnosti cementového tmele. Modul pružnosti kameniva je vyšší než modul pružnosti cementové pasty, a proto je modul pružnosti betonu závislý především na modulu pružnosti kameniva. V případě navrhování UHPC nebo RPC je tedy důležité vybírat kvalitní kamenivo s vysokým modulem pružnosti, pokud je požadován vyšší modul pružnosti betonu. Hodnota modulu pružnosti těchto typů betonů se uvádí 40 až 55 GPa [49][50].

## 8.3 Trvanlivost

Kromě vysokých pevností mají UHPC a RPC vysokou míru odolnosti proti agresivnímu prostředí, proti mechanickému působení nebo jiným faktorům. Z toho vyplývá jeho vysoká trvanlivost a dlouhá životnost. Vysoká odolnost těchto materiálů vychází z vysoké míry hutnosti a minimální pórovitosti matrice. Díky těmto vlastnostem dosahují minimální propustnosti, maximální mrazuvzdornosti a jsou ideální pro použití do jakýchkoliv klimatických podmínek. Proto je použití UHPC a RPC výhodné z hlediska výstavby mostů. Některé vlastnosti u různých typů betonů lze vidět v tab. 1.

Tab. 1: Porovnání výsledků zkoušek betonů z hlediska trvanlivosti [7][19]

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

Pozn.: Jiná literatura [12] uvádí odpady při zkoušce odolnosti proti působení vody a CHRL po 60 cyklech a hodnoty pro jednotlivé betony jsou stejné. Z toho vyplývá, že po dalších 90 cyklech se množství odpadu výrazně nezměnilo.

## 8.4 Smrštění

UHPC a RPC jsou náchylné ke smršťování v důsledku nízkého vodního součinitele. Proto je nezbytně nutné materiál ošetřovat vodou co nejdříve po jeho vyrobení. Nejdůležitějšími typy smrštění jsou:

- **Plastické smršťování** – tento druh smršťování je závislý na velikosti vodního součinitele. Vyšší množství záměsové vody vede k jejímu následnému odpařování a tím k výraznému zmenšení objemu v době tuhnutí. To pak způsobuje vznik trhlin ve ztvrdlém betonu. Je proto nutné zabránit rychlému odpařování vody z povrchu betonu. Tento typ smršťování má obrovský vliv v případě obyčejných betonů. Vzhledem k nízkému vodnímu součiniteli mají pro UHPC a RPC větší význam jiné typy smrštění [7][51].
- **Autogenní smrštění** – tento typ smrštění má u těchto druhů betonů největší význam, jelikož se jedná o hydratační (chemické) smršťování, které je způsobeno hydratací velkého množství pojiva. Během tohoto procesu dochází ke zmenšení objemu vstupních surovin schopných hydratace. Hydratační reakce probíhají velmi rychle, a to ihned po zamíchání betonu. Voda je odváděna ze stále jemnějších kapilár,

což má za následek nárůst tahových napětí, která způsobují intenzivnější autogenní smrštění. Jelikož porozita těchto materiálů je velmi nízká, většina vody je tedy spotřebována na hydratační procesy, a proto se odpařování vody z povrchu betonu vyvíjí minimálně. Vyšší autogenní smršťování UHPC nebo RPC vyžaduje tedy pečlivé ošetřování během prvních několika hodin zrání [7][51].

## 9 APLIKACE UHPC A RPC

Vlastnosti UHPC a RPC, jejichž důsledkem je vysoká trvanlivost a dlouhá životnost konstrukcí vede především k myšlence, použít tento typ betonu pro výstavbu mostovek nebo celých mostů. Z hlediska možnosti zeštíhlení konstrukcí lze také využít UHPC nebo RPC v případě výškových budov. Tyto materiály se prozatím jako konstrukční využívají v mnoha světových zemích. Velké využití mají např. v USA, Kanadě, Francii, Německu a mnoha dalších. Spoustu světových staveb z tohoto materiálu je postaveno z Ductalu.

První stavbou, postavenou z tohoto RPC materiálu, je lávka v Sherbrooke, v kanadském Quebecu. Jedná se o most pro pěší a cyklisty přes řeku Magog. Další významnou stavbou, postavenou z Ductalu je most v Saint Pierre la Cour. Jedná se o most se dvěma jízdními pruhy a chodníky po obou stranách. V německém Kasselu byla postavena lávka Gaertnerplatz pro pěší a cyklisty přes řeku Fuldu a v Japonsku byl postaven v r. 2002 most pro pěší Sakata-Mirai. V Tokiu byla z Ductalu vystavěna přistávací dráha na mezinárodním letišti Haneda. Dráha je postavena z části na umělém ostrově a z části na mostních konstrukcích nad mořskou hladinou. Je využita vysoká trvanlivost RPC ve slaném prostředí a výhodou je minimální údržba konstrukce. Dalšími příklady jsou Footbridge of Peace neboli lávka Míru v Soulu v Jižní Koreji, dále tzv. „most budoucnosti“ ve Washingtonu, most Shepherd v Austrálii, Papatoetoe Footbridge na Novém Zélandu a mnoho dalších. Beton s extrémně vysokými pevnostmi byl použit i v menších zemích, jako např. ve Slovinsku, kde byl UHPC využit na překrytí stávající mostové desky. Při kontrole dva roky po instalaci nebyly prokázány žádné škody, trhliny ani odlupování materiálu. Ve Švýcarsku se jedná o modernizaci a rozšiřování stávajících mostů, vytváření ochranné vrstvy pro opravu silničních svodidel a mostových pilířů nebo mazaniny na lávky. Ductal se časem začal využívat i v jiných odvětvích stavitelství, konkrétně ve vodním, kde byla tímto materiálem opravena přehrada Caderousse na řece

Rhoně ve Francii. Lávku Míru v Soulu lze vidět na obr. 9 a lávku v Sherbrooke na obr. 10 [4][6][14][18][29][52].



*Obr. 9 a 10 (zleva): Lávka Míru pro pěší, Soul v Jižní Korey [53] a lávka pro pěší v Sherbrooke, Quebec v Kanadě [29]*

V České republice není použití materiálu typu UHPC nebo RPC tak běžné jako ve světě. UHPC se u nás aplikoval celkem třikrát. První myšlenka ohledně výroby takového typu betonu přišla v roce 2009, kdy se UHPC začala zabývat firma Skanska a.s. a v roce 2010 byl vyroben první zkušební nosník. V roce 2012 následně proběhla rekonstrukce mostu v Benátkách nad Jizerou vytvořením nové mostové desky z těchto nosníků. Další a velmi významnou aplikací UHPC je lávka v Čelákovících přes řeku Labe, vyrobená firmou TBG Metrostav. Před zhotovením samotné lávky provedla firma několik zkušebních receptur, zkoušek a dosáhla velkého množství výsledků. Na základě těchto výsledků pak byla stanovena přesná metodika návrhu a výroby UHPC pro výrobu nové lávky. Třetí aplikací UHPC u nás je lávka přes Opatovický kanál, zhotovená firmou Skanska a.s. Jedná se o lávku pro pěší v obci Čeperka u Opatovic a byla postavena v rámci modernizace železniční trati Hradec Králové – Pardubice – Chrudim. Součástí lávky je zábradlí zhotovené také z UHPC panelů. Lávku lze vidět na obr. 11 a lávku v Čelákovících na obr. 12 [12][54][55][56].



*Obr. 11: Lávka přes Opatovický kanál vedle železniční trati Hradec Králové – Pardubice – Chrudim [57]*

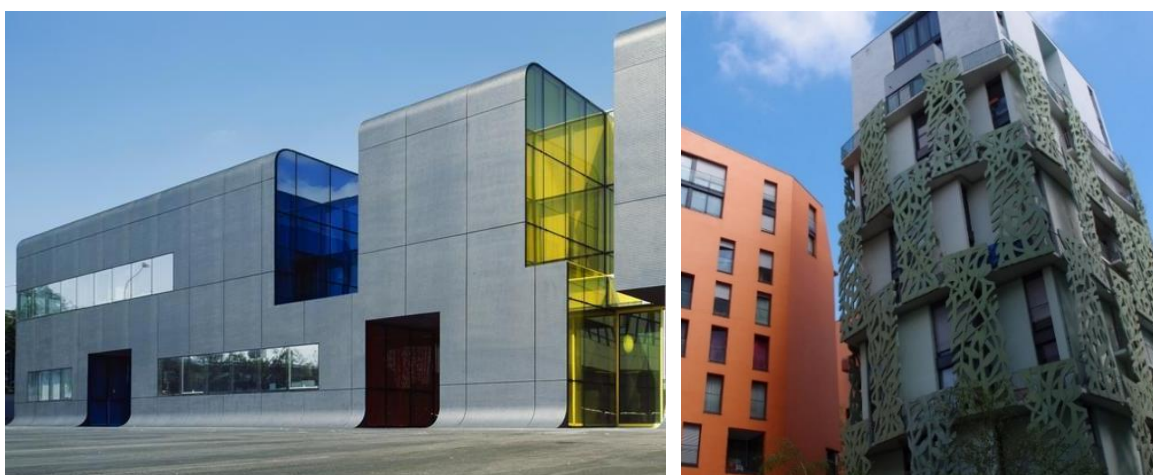


*Obr. 12: Lávka v Čelákovících přes řeku Labe [58]*

Kromě mostů, lávek a jiných dopravních ploch se UHPC nebo Ductal dále také využívá pro fasádní účely, a to především pro pohledové tenkostěnné prvky. Výhodou v tomto případě je vytvořit nejen tenké prvky, ale také díky granulometrii prvky zaoblené nebo jinak architektonicky tvarované. Další výhodou je spojení panelů téměř beze spár, čímž stavba působí celkově efektivnějším dojmem. Není třeba tak řešit množství spojů ve spárách ani jejich utěsnění nebo zajištění rovinatosti. Tyto výhody vedly k použití UHPC panelů při návrhu fasády budovy Atrium v kanadské Britské Kolumbii. V případě této budovy bylo nutné vyrobit co nejtenčí panely, aby bylo možné překrýt posunuté rozvody klimatizace bez přílišného zásadu do vzhledu stavby. Další stavbou, u které byla na pokrytí použita fasáda z Ductalu, je autobusové centrum RATP v Thiais v Paříži. Jedná se o budovu ve stylu „lego“ textury, která plní funkci protismykové úpravy pojezděných povrchů. Zajímavostí u této stavby je, jak panely pokrývají stavbu od pojezdové plochy až po střechu za použití zaoblených tvarů. Z Ductalu jsou také postaveny fasády s různými otvory různých geometrických tvarů nebo motivů. Jejich funkcí je mimo atraktivní vzhled také

zastínění budovy před dopadem ostrého slunečního záření, přehřívání vnitřních prostor a pro ochranění před hlukem a ruchem obklopujícího městského prostředí. Takovou budovou, která byla rozšířena o bílé vyztužené panely z Ductalu s 50 % objemu otvorů, je radnice v Plescop ve Francii. Ductal byl také použit ve Francii pro novou přístavbu muzea v Lille, kde byla vytvořena fasáda s 30 % otvorů. Ductal panely pokrývají i fasádu komunitního centra v Sedanu ve Francii, jejichž objem kruhových a oválných otvorů je také 30 %. V průmyslové oblasti Rive Gauche, ležící v pařížské čtvrti na levém břehu Seiny, bylo z Ductalu navrženo několik bloků bytových domů. Provedení představuje zelené výhonky vinné révy šplhající po fasádě. Autobusové centrum ve Francii lze vidět na obr. 13 a bytové domy v Rive Gauche na obr. 14 [13][38].

V České republice je zaznamenána výroba tenkostěnných fasádních panelů z bílého UHPC zpevněných výztužnou sítí. Panely zhotovila firma Skanska a.s. na opláštění kancelářské budovy jako lehký obvodový plášť pro švédskou a norskou firmu [59].



*Obr. 13 a obr. 14 (zleva): „Lego“ fasáda autobusového centra [13] a fasáda bytových domů v průmyslové oblasti Rive Gauche ve Francii [38]*

Velmi významnou stavbou z Ductalu je v Paříži galerie Fondation Louis Vuitton. Galerie představuje loď, kterou tvoří 12 tzv. „plachet“, které jsou vytvořeny ze skoro 20 tisíc zakřivených panelů z bílého Ductalu. Jsou vyrobeny v kombinaci se sklem, se dřevem a ocelí. Bílé plachty jsou nazývány tzv. „ledovci“ a mají sloužit především jako střecha a z části jako fasáda. Galerii lze vidět na obr. 15 [19][60].



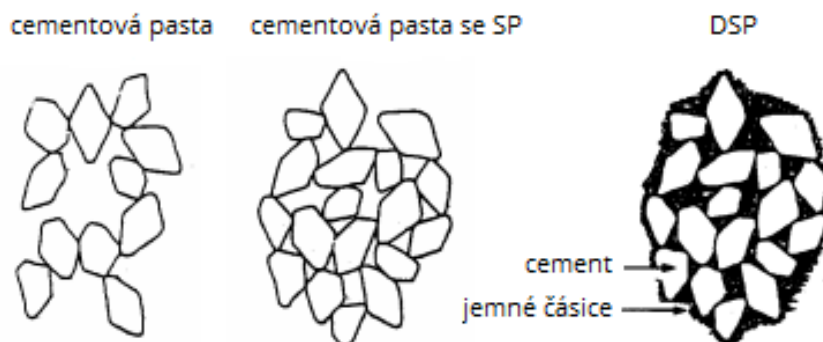
Obr. 15: Bílé plachty z Ductalu francouzské galerie Fondation Louis Vuitton [60]

## 10 DSP (Kompozit se zahuštěnou maticí obsahující malé částice)

Vývoj tohoto druhu materiálu, je založen na výzkumu H. H. Bacheho [31], který použitím mikrosiliky, plastifikační přísady a jemného kameniva s vysokou pevností v tlaku, dosáhl pevností v tlaku betonu od 150 do 200 MPa. Pozornost věnoval především výsledné pórovitosti kompozitu a kamenivu, u kterého zjistil, čím menší je maximální zrno, tím vyšší jsou výsledné pevnosti betonu a používal kamenivo s co nejvyšší vlastní pevností v tlaku, tzn. žulu, diabas nebo tavený bauxit. Navíc drcené kamenivo s dostatečně drsným povrchem může zvyšovat pevnosti v tranzitní zóně oproti pevnosti samotného kameniva. Snížením velikosti maximálního zrna kameniva se také snižuje možnost zadržování vody, nedochází tedy k poklesu pevností v tranzitní zóně, a snižuje se možnost vzniku trhlin.

DSP dosahuje nízkého vodního součinitele stejně jako u jiných RPC kompozitů, tj. hodnota okolo 0,2. Oproti jiným RPC obsahuje nižší množství cementu, vyšší množství kvalitního kameniva a plastifikační přísady. Důležité je u DSP vyšší množství oxidu křemičitého, což je dosaženo vyšší dávkou křemičitého úletu, tj. nad 10 % z hmotnosti cementu. Vyšší množství křemičitého úletu vede k vylepšení struktury kompozitu tvorbou vyššího obsahu CSH gelů a ke snížení celkového objemu pórů a jejich průměrné velikosti. Množství přísady se uvádí až téměř 9 % z hmotnosti cementu, což přispívá k tvorbě CSH gelů pucolánovými reakcemi vlivem vyššího množství křemičitého úletu. Takové složení vede k vytvoření velmi hutné struktury, z čehož vyplývá, že DSP je velice křehký materiál a je tak náchylný na vznik makrotrhlin. Z tohoto důvodu se často využívá polymerních

vláken jako rozptýlené výztuže. Důvodem je snížení silného odprýskávání betonu v případě požáru, kdy dojde k vyhoření vláken a tím se uvolní prostor pro odpařování vodní páry z CSH fází. Během výroby DSP musí být zajištěna dostatečná homogenizace všech suchých složek a po odformování se běžně ukládá do vody, aby bylo zamezeno autogennímu smršťování [31]. Na obr. 16 je vidět porovnání struktury cementové pasty, cementové pasty se superplastifikační přísadou a struktury DSP.



*Obr. 16: Struktura cementové pasty, cementové pasty se superplastifikační přísadou a struktura DSP (zleva) [61]*

Některé studie [62] uvádí přípravu DSP metodou horkého lisování, čímž dojde k lepšímu obalení částic a zlepšení chemického složení kompozitu. To vede následně k výraznému zvýšení pevností až na hodnotu kolem 800 MPa po 28 dnech hydratace a sušení v sušárně při 200 °C.

DSP materiál se v současné době prodává pod obchodní značkou Densit, který byl vytvořen dánskou společností. Obecné použití Densitu je v podobě reprofilační malty a ochrany proti korozi. Dále jsou z něho vyráběny dlaždice nebo se používá pro opravy kanalizací, odpadních rour a mnoho dalších využití [31][63].

## 11 MDF (Kompozit omezující vznik makrotrhlin)

Jedná se o materiál, který má ve svém složení oproti jiným typům RPC obsažen polymer, jehož funkcí je plnit funkci plniva a příznivě se tak podílet na reologických vlastnostech materiálu. Nejčastěji se používá polyvinylalkohol, polyakrylamid a další. Cement se používá portlandský, cement s vyšším množstvím oxidu hlinitého a v některých

případech i hlinitanový cement. Vodní součinitel se pohybuje mezi hodnotami 0,08 a 0,2 [64].

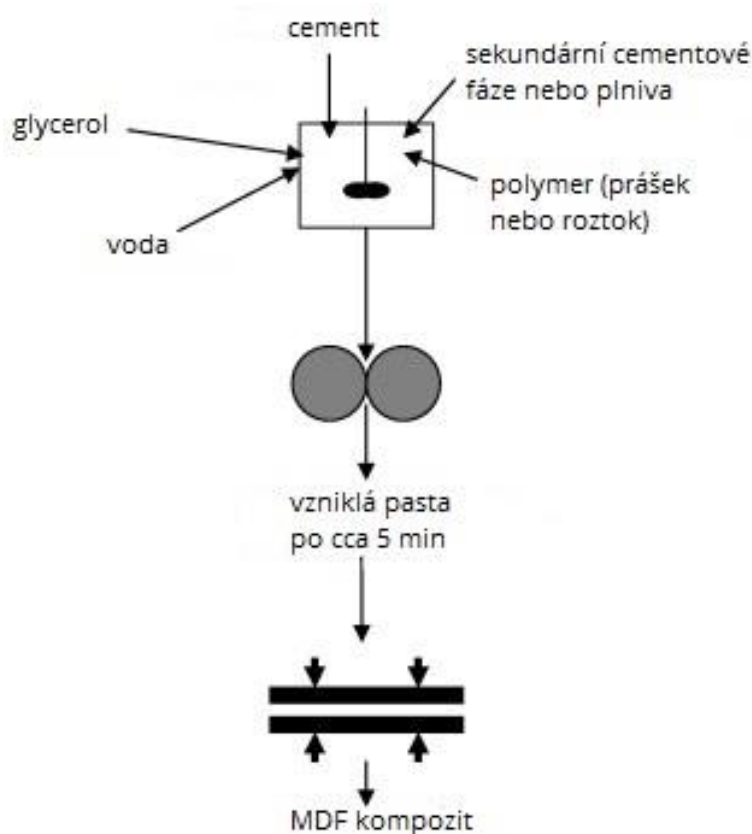
Na vývoji MDF se podílel v první řadě Birchall a kolektiv [31], pevnosti v tahu za ohybu dosahovaly až 200 MPa. Jeho výzkum byl založen na Griffithovu kritériu, který je dán vztahem mezi pevností v tahu za ohybu a délkou kritické trhliny. Čím kratší je délka kritické trhliny, tím vyšší je pevnost v tahu za ohybu.

Na tento výzkum navázal Young a Odler [65], kteří dokázali výrazný vliv polymeru na výsledné pevnosti kompozitu a tím jeho důležitou roli v MDF kompozitu. Jejich předpoklad pro výrobu MDF vycházel z poznatků získaných při porovnání s obyčejným betonem. Jednou z odlišností MDF je výrazně vyšší poměr hodnot pevnosti v tlaku a pevnosti v tahu za ohybu. Další důležitou skutečností je, že na výsledné vlastnosti má obrovský význam chemické složení cementu a polymeru a při odstranění polymeru z cementové pasty dojde k poklesu pevností o 90 %. Po následném zaplnění tohoto prostoru hydratačními produkty cementu dojde k navrácení pevnosti pouze na jednu třetinu původní hodnoty. Na základě všech poznatků Young došel k závěru, že struktura MDF kompozitu je tvořena nezreagovanými zrny cementu, a to v důsledku nízkého vodního součinitele. Zhydratované částice cementu se vzájemně propojí s polymerem, vytvoří se tak pevná matrice a nezreagovaná zrna cementu, která v materiálu zůstala v důsledku nízkého vodního součinitele, pak plní funkci plniva a zvyšují tak hutnost kompozitu.

Následkem nízkého vodního součinitele a neúplné hydratace cementových zrn je snížená trvanlivost ve vlhkém prostředí. Pokud MDF přijde do kontaktu s vlhkým prostředím, může dojít k dodatečné hydrataci nezhydratovaných zrn cementu, a to umožní přístup vlhkosti k polymeru, který má hygroskopické vlastnosti. Řešením této problematiky je např. nahrazení rozpustného polymeru hydrofobním polymerem. Další následkem přítomnosti nezhydratovaných zrn cementu a nevýhodou MDF je jeho smršťení [65][66].

Z důvodu přítomnosti polymeru v materiálu je nutné použití speciálních mísičů, které se používají pro zpracování plastů a pryží. V první fázi je nutné řádně promíchat cement s polymerem při nízkém vodním součiniteli, aby pak během hydratace cementu došlo

ke kvalitnímu propojení hydratačních produktů s polymerními řetězci. Přítomnost polymeru zajišťuje dobrou zpracovatelnost a tím je sníženo tření částic během homogenizace. Pro tyto účely je také vhodné použít glycerol, který působí jako plastifikátor. MDF je po dalším krátkém promíchání následně vytvrzován za působení nízkého tlaku, přibližně 6 MPa, což napomáhá tvorbě hutné struktury. Pro urychlení vytvrzování může být použito i lisování za tepla. Typický průběh výroby MDF lze vidět na obr. 17 [64][67].



Obr. 17: Nejběžnější průběh výroby MDF [67]

## 12 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V této části práce bylo navrženo několik receptur, ve kterých bylo experimentováno s několika variantami z hlediska množství a druhu složek RPC. Dále byly ověřovány různé typy ošetřování čerstvého betonu a ověřeny mechanické vlastnosti. Na čerstvém betonu byla prováděna modifikovaná zkouška rozlití kuželem. Na ztvrdlém betonu pak byly

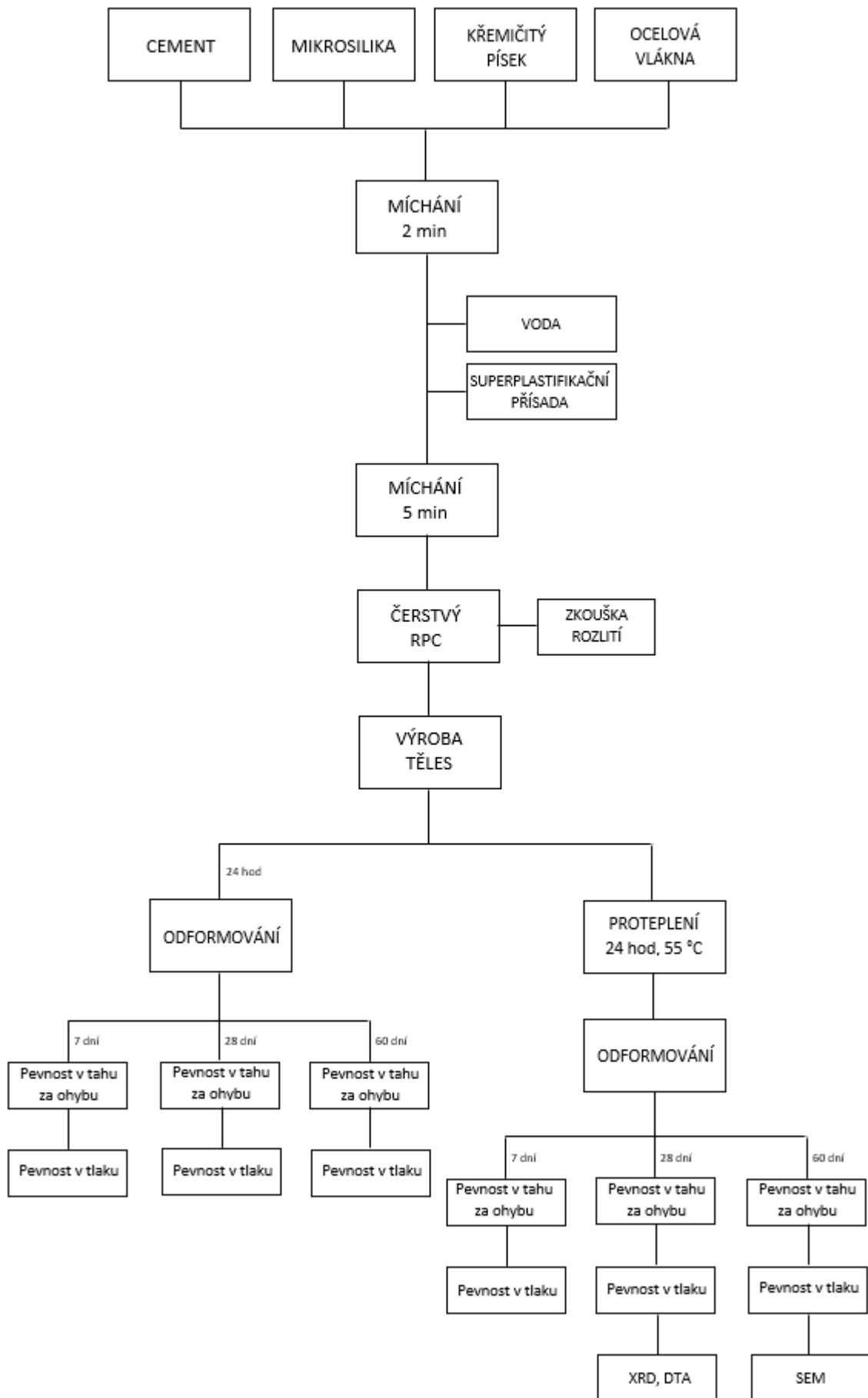
stanoveny pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku po 7, 28 a 60 dnech zrání. Výsledky jednotlivých receptur byly následně porovnávány.

## 12.1 METODIKA

Na základě poznatků, získaných z rešerší a dosavadních zkušeností byly vybrány vhodné suroviny pro RPC a následně bylo stanoveno, v jakém poměru je smíchat. Schéma celé výroby RPC lze vidět na obr. 18.

Obecné zásady pro návrh a výrobu RPC jsou:

- Vyloučení hrubého kameniva a omezení frakce na hodnoty 600  $\mu\text{m}$ , popř. 300  $\mu\text{m}$ .
- Použití ocelových drátků, které napomáhají ke zlepšení mechanických vlastností ve ztvrdlém stavu napomáhá zlepšit mechanické vlastnosti ve ztvrdlém stavu.
- Použitím vysoce účinné a kvalitní superplastifikační přísady, která umožní snížení vodního součinitele, což má za následek zvýšení homogenity a pevnosti materiálu.
- Vodní součinitel by se měl pohybovat kolem hodnoty 0,2 některé zdroje uvádí dokonce 0,1 až 0,2 [31] nebo 0,14 až 0,18 [68].
- Vyšší dávka cementu, který by neměl obsahovat vysoké množství alkálií. Nejběžnější druh cementu používaný pro RPC je CEM I pevnostní třídy 52,5. Kombinací vyššího množství cementu a nízkého vodního součinitele nedojde k hydrataci veškerého pojiva, a proto pak část cementu plní v RPC funkci plniva.
- Použití vysoce aktivní příměsi, jako je křemičitý úlet neboli mikrosilika, která je důležitou složkou jak UHPC, tak RPC. Množství mikrosiliky by se mělo pohybovat kolem hodnoty 20 % z množství cementu [68].
- Dodržení dostatečné doby míchání, aby došlo k řádnému propojení všech složek čerstvého RPC a účinku superplastifikační přísady.
- Zvolení vhodného způsobu hutnění, aby nedošlo k nežádoucímu nasměrování ocelových vláken, což by mělo negativní vliv na výsledné vlastnosti RPC.
- Zvolení správného druhu ošetřování, který umožňuje zvýšit nárůst počátečních pevností RPC.



Obr. 18: Schéma technologie výroby a zkoušení RPC

### 12.1.1 Výběr surovin

Pro experiment byly vybrány tyto suroviny:

#### ***Cement***

Cement byl použit portlandský CEM I 52,5 R. Charakteristické vlastnosti dle technického listu [69] jsou velmi vysoký nárůst pevností, velmi vysoká počáteční pevnost, vysoká konečná pevnost, velmi rychlý vývin hydratačního tepla a vysoké celkové hydratační teplo. CEM I 52,5 R z Mokrý se používá pro výrobu betonů vyšších pevnostních tříd, betonů s rychlým nárůstem pevností, předpínaných betonů, pro výrobu suchých omítkových směsí a malt nebo pro výrobu pórobetonů. Je také vhodný pro použití do všech stupňů vlivu prostředí. Dodává se volně ložený v autocisternách nebo železničních vagoněch. Fyzikální a mechanické vlastnosti tohoto portlandského cementu jsou vypsány v tab. 2 a chemické vlastnosti v tab. 3.

Tab. 2: Fyzikální a mechanické vlastnosti portlandského cementu CEM I 52,5 R (Českomoravský cement – Mokrá) [69]

Parametr	Průměrná hodnota	Metoda/poznámka	
Pevnost v tlaku [MPa]	1 den	25	EN 196-1
	2dny	38	EN 196-1
	7dní	57	EN 196-1
	28 dní	67	EN 196-1
	56 dní	68	EN 196-1
	90 dní	69	EN 196-1
Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	1 den	6	EN 196-1
	2dny	7	EN 196-1
	7dní	8	EN 196-1
	28 dní	9	EN 196-1
	56 dní	9	EN 196-1
	90 dní	9	EN 196-1
Normální konzistence [%]	30,3	EN 196-3	
Počátek tuhnutí [min]	154	EN 196-3	
Konec tuhnutí [min]	210	EN 196-3	
Objemová stálost [mm]	1,1	EN 196-3 (Le Chatelier)	
Měrný povrch [m <sup>2</sup> /kg]	508	EN 196-6 (Blaine)	
Měrná hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	3140	EN 196-6	
Sypaná hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ] (v autocisterně)	950	Přibližná hodnota při uložení cementu do cisterny	
Sypaná hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ] (v síle)	1200 – 1600	Odhad při uskladnění v síle. Mění se v závislosti na míře setřesení cementu, době uskladnění nebo velikosti a zaplnění síla	
Hydratační teplo [J/g]	7 dní	370	EN 196-8

Tab. 3: Chemické vlastnosti portlandského cementu CEM I 52,5 R (Českomoravský cement – Mokrý) [69]

Parametr	Průměrná hodnota	Metoda/poznámka
CaO	64,6	EN 196-2
SiO <sub>2</sub>	20,3	EN 196-2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,7	EN 196-2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,3	EN 196-2
<b>Obsah [%]</b> MgO	1,4	EN 196-2
SO <sub>3</sub>	3,0	EN 196-2
Cl <sup>-</sup>	0,038	EN 196-2
K <sub>2</sub> O	0,77	EN 196-2
Na <sub>2</sub> O	0,09	EN 196-2
<b>Na<sub>2</sub>O ekvivalent [%]</b>	0,6	EN 196-2
<b>Nerozpustný zbytek [%]</b>	0,6	EN 196-2
<b>Ztráta žíháním [%]</b>	2,0	EN 196-2

### Kamenivo

Jako plnivo byl použit jemně mletý křemičitý písek ze Sklopísku Střeleč a byly použity křemičité písky o čtyřech různých frakcích. Obsah SiO<sub>2</sub> těchto písků dle technických listů [70] se pohybuje mezi hodnotami 99,2 až 99,8 % a obsah Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> do 0,1 %. Fyzikální charakteristika křemičitých písků je uvedena v tab. 4. Využití křemičitých písků je velice rozsáhlé. Používají se nejen jako plnivo do různých betonových nebo maltových směsí, ale také např. na tryskání betonových a ocelových konstrukcí, na zásyp umělých sportovních trávníků, dále také ve strojírenském, slévárenském nebo sklářském průmyslu a mnoho dalších.

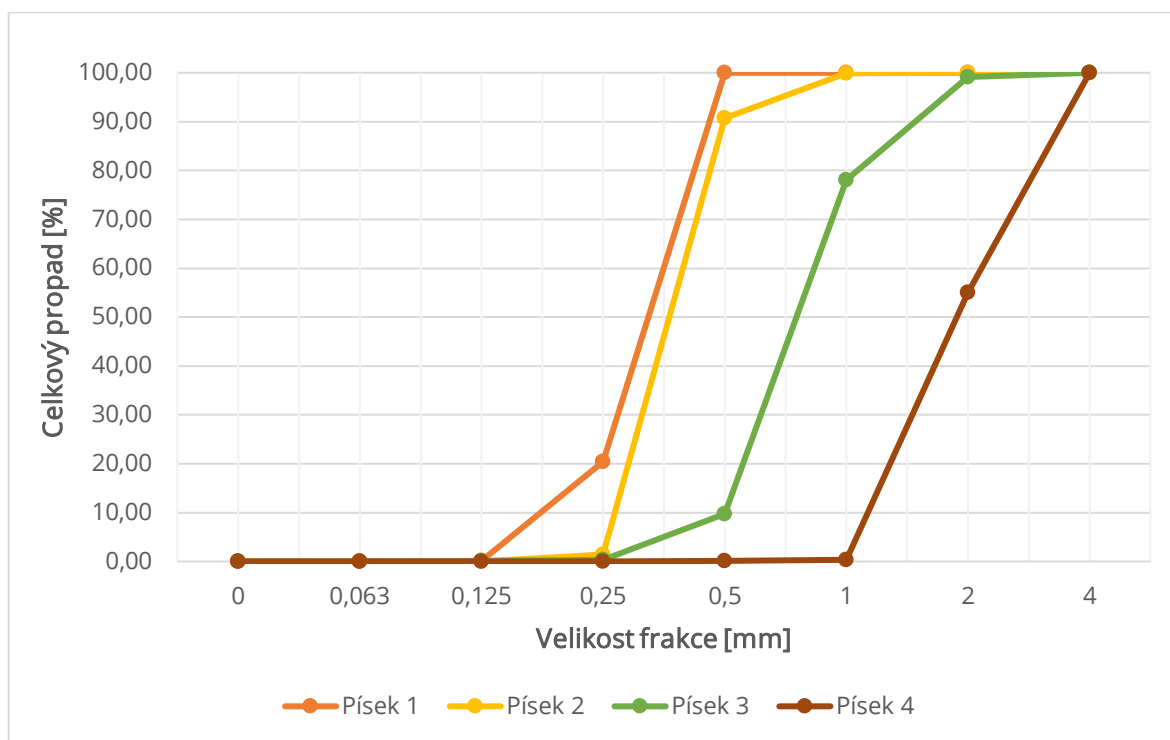
Tab. 4: Fyzikální charakteristika křemičitých písků ze Sklopísku Střeleč [70]

Parametr	Hodnota
Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	2650
Sypná hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	1500
Tvrdość (Mohs) [-]	7
Ztráta žíháním [%]	0,1 – 0,3
Vlhkost [%]	Max 0,2
pH [-]	7,2

Na jednotlivých křemičitých pískách byl proveden síťový rozbor dle ČSN EN 933-1: Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – síťový rozbor [71]. Principem zkoušky je roztřídění a oddělení kameniva pomocí sady sít do několika zrnitostních podílů s klesající velikostí částic. Velikosti otvorů sít se zvolí dle druhu kameniva a požadované přesnosti. Výsledkem jsou jednotlivé hmotnosti částic zachycených na sítích uvedené v procentech k počáteční hmotnosti vzorku. Výsledky jsou uvedeny v tab. 5 a zaznamenány do grafu 1.

Tab. 5: Zrnitost křemičitých písků zjištěná síťovým rozbořem

Velikost otvorů síť [mm]	Souhrnné procento propadu [%]			
	Písek 1	Písek 2	Písek 3	Písek 4
4	100,00	100,00	100,00	100,00
2	100,00	100,00	99,18	55,04
1	100,00	99,90	78,09	0,30
0,5	100,00	90,69	9,78	0,12
0,25	20,42	1,40	0,39	0,04
0,125	0,18	0,00	0,12	0,04
0,063	0,00	0,00	0,00	0,04
P (zbytek na dně)	0,00	0,00	0,00	0,00



Graf 1: Křivky zrnitostí jednotlivých křemičitých písků

### **Superplastifikační přísada**

Byla použita superplastifikační přísada Viscocrete 4035 od výrobce Sika na bázi vodného roztoku modifikovaných polykarboxylátů. Dle technického listu [72] se jedná o univerzální a vysoce účinnou superplastifikační přísadu pro transportbeton vyšších pevnostních tříd, která splňuje veškeré požadavky ČSN EN 934-1: Přísady do betonu, malty a injektážní malty – Část 1: Společné požadavky [73] a ČSN EN 934-2: Přísady do betonu, malty a injektážní malty – Část 2: Přísady do betonu – Definice, požadavky, shoda, označování a značení štítkem [74]. Objemovou hmotnost přísady při 20 °C uvádí výrobce 1060 kg/m<sup>3</sup>, hodnotu pH přibližně 4,5, obsah chloridových iontů do 0,1 % a obsah sodných alkálií do 1 %. Doporučené dávkování je 0,3 až 0,7 % z hmotnosti cementu. Pro betony s požadavkem na vyšší konzistenci, s nízkým vodním součinitelem nebo pro samozhutnitelné betony je doporučená dávka 0,6 až 1,4 % z hmotnosti cementu. Příklad je vhodná zejména pro betony stupně konzistence S3 až S5 nebo F4 až F6, pro samozhutnitelné betony, pro betony s nízkou ztrátou konzistence, s dlouhou dobou dopravy nebo zpracování, s nízkým vodním součinitelem a pro hutné nebo vysokopevnostní betony. Mezi výhody této přísady patří lepší prostorové rozptýlení jemných podílů, lepší dispergace a smáčení zrn cementu, snížení třecí síly mezi zrny

cementu a kameniva, delší doba zpracovatelnosti nebo nižší spotřeba záměsové vody, a tedy dosažení nižšího vodního součinitele, což vede ke zvýšení hutnosti a pevnosti betonu.

### **Ocelová vlákna**

Byla použita rovná ocelová mikroválkna kulatého průřezu od výrobce Krampe Harex o průměru 0,175 mm a délce 6 mm. Minimální dávka vláken není výrobcem stanovena, avšak pro tuto diplomovou práci bylo zvoleno množství 120 kg/m<sup>3</sup>. Vlákná jsou vhodná nejen pro výrobu prefabrikovaných betonových dílců, ale také jako vyztužení do průmyslových podlah nebo pro tunelové aplikace. Vlákná jsou v souladu s normou ČSN EN 14889-1: Vlákná do betonu – Část 1: Ocelová vlákna – Definice, specifikace a shoda [76]. Některé vlastnosti mikrovláken dle technického listu [77] jsou uvedeny v tab. 6 a lze je vidět na obr. 19 a 20.

*Tab. 6: Vlastnosti ocelových mikrovláken Krampe Harex [77]*

Parametr	Hodnota
Délka [mm]	5,1 – 6,9
Průměr [mm]	0,15 – 0,22
Poměr délka/průměr [-]	34
Pevnost v tahu [MPa]	> 2 100
Modul pružnosti [MPa]	210 000
Množství drátků na 1 kg	882 700



*Obr. 19 a 20: Ocelová mikroválkna od výrobce Krampe Harex použitá pro výrobu RPC*

## Mikrosilika

Byla použita mikrosilika od německého výrobce RW Silicium GmbH. Mikrosilika je vhodná nejen jako příměs do betonů nebo malt, ale také do izolačních, keramických nebo žáruvzdorných materiálů. Chemické složení a další vlastnosti mikrosiliky dle technického listu [75] jsou uvedeny v tab. 7.

Tab. 7: Chemické vlastnosti mikrosiliky [75]

Parametr	Hodnota	Maximální hodnota	
Obsah [%]	SiO <sub>2</sub>	96,0	-
	SiC	0,6	0,9
	MgO	0,25	0,4
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,2	0,3
	CaO	0,3	0,45
	Na <sub>2</sub> O	0,08	0,12
	K <sub>2</sub> O	0,5	0,90
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,05	0,15
Ztráta žháním [%]	1,2	2	
Vlhkost [%]	0,05	0,9	
Volné CaO [%]	0,7	1,6	
pH [-]	7,4 – 8,4	-	
Sypná hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	200	-	
Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	300 – 360	-	
Měrný povrch [m <sup>2</sup> /kg]	18 000 – 22 000	-	
Velikost primárních částic [μm]	0,1 – 0,3	-	
Velikost sekundárních částic nad 1 μm	30 %	-	
Velikost sekundárních částic nad 10 μm	5 %	-	

## Voda

Voda byla použita pitná z vodovodního řádu. Voda tedy splňuje veškeré požadavky dle ČSN EN 1008: Záměsová voda do betonu – Specifikace pro odběr vzorků, zkoušení a posouzení vhodnosti vody, včetně vody získané při recyklaci v betonárně, jako záměsové vody do betonu [37].

### 12.1.2 Navržené receptury UHPC

Receptury byly navrženy s ohledem na získané poznatky a dosavadní zkušenosti. První myšlenkou bylo navrhnout receptury s různým množstvím cementu a mikrosiliky. Bylo tedy navrženo šest receptur se třemi možnostmi množství cementu a ke každé dvě varianty množství mikrosiliky. Množství cementu bylo navrženo 800, 1000 a 1200 kg/m<sup>3</sup>. K tomu bylo navrženo množství mikrosiliky 150 a 200 kg/m<sup>3</sup>. Vodní součinitel byl zvolen u všech receptur stejný, tj. hodnota 0,2, avšak v průběhu míchání byl dle potřeby čerstvého RPC upravován. Konečná hodnota vodního součinitele byla stanovena dle vzorce:

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

kde:  $m_v$  ... množství vody [kg/m<sup>3</sup>]

$m_c$  ... množství cementu [kg/m<sup>3</sup>]

$m_p$  ... množství ostatního pojiva (mikrosilika) [kg/m<sup>3</sup>]

$k$  ... konstanta, zohledňující použitá pojiva (pro mikrosiliku je to hodnota 2) [-]

Tak tomu bylo i v případě superplastifikační přísady, kde bylo u všech receptur navrženo 1,2 % z hmotnosti cementu, ale nakonec bylo množství přísady u receptur individuální. V případě, že dávka superplastifikační přísady byla příliš vysoká, tzn. že převyšovala dávkování doporučené výrobcem, bylo nutné zvýšit i vodní součinitel. Vzhledem k charakteru materiálu bylo třeba dosáhnout vyšší konzistence, aby bylo možné materiál snadněji zhutnit. Množství ocelových vláken bylo u všech receptur stejné, tj. 120 kg/m<sup>3</sup>, což odpovídá 1,6 % z celkového objemu betonu. Množství křemičitého písku bylo dopočítáno pomocí rovnice absolutních objemů:

$$\frac{mk}{\rho_k} + \frac{mc}{\rho_c} + \frac{mv}{\rho_v} + \frac{mp}{\rho_p} + \frac{mvl}{\rho_{vl}} = 1 - \frac{V_z}{100}$$

Kde:  $m_k$  ... množství kameniva [ $\text{kg/m}^3$ ]

$\rho_k$  ... objemová hmotnost kameniva [=  $2650 \text{ kg/m}^3$ ]

$m_c$  ... množství cementu [ $\text{kg/m}^3$ ]

$\rho_c$  ... objemová hmotnost cementu [=  $3100 \text{ kg/m}^3$ ]

$m_v$  ... množství vody [ $\text{kg/m}^3$ ]

$\rho_v$  ... objemová hmotnost vody [=  $1000 \text{ kg/m}^3$ ]

$m_p$  ... množství příměsi (mikrosiliky) [ $\text{kg/m}^3$ ]

$\rho_p$  ... objemová hmotnost příměsi (mikrosiliky) [=  $2200 \text{ kg/m}^3$ ]

$m_{vl}$  ... množství ocelových vláken [ $\text{kg/m}^3$ ]

$\rho_{vl}$  ... objemová hmotnost ocelových vláken [=  $7850 \text{ kg/m}^3$ ]

$V_z$  ... množství vzduchu v betonu [= 2 %]

Následně byly receptury rozvinuty o myšlenku použít více druhů křemičitého písku o různých frakcích. Křemičité písky byly použity o frakcích 0,125 až 0,5 mm (písek 1), 0,25 až 1 mm (písek 2), 0,25 až 2 mm (písek 3) a 1 až 4 mm (písek 4). Všechny 6 receptur bylo tedy rozšířeno o další 3 sady, kde byl sledován vliv velikosti zrn písku. Receptury, které jsou zaznamenány v tab. 8 představují kombinace množství cementu a mikrosiliky, ale ve skutečnosti byla každá receptura namíchána se všemi čtyřmi druhy písku.

Tab. 8: Šest základních receptur navržených s ohledem na množství cementu a mikrosiliky

Receptura	1	2	3	4	5	6
<b>Cement</b>	800	800	1000	1000	1200	1200
<b>Mikrosilika</b>	150	200	150	200	150	200
<b>Křemičitý písek</b>	1170	1100	860	800	560	500
<b>Ocelová vlákna</b>	120	120	120	120	120	120
<b>Voda</b>	240	260	280	310	320	340
<b>Vodní součinitel</b>	0,22	0,22	0,22	0,22	0,21	0,21
<b>SP</b>	1,7 %	1,7 %	1,7 %	1,7 %	1,8 %	1,8 %

Na těchto recepturách byly provedeny zkoušky pouze na mechanické vlastnosti po 7 dnech zrání. Dle výsledků pak byly zvoleny receptury pro zkoušení mechanických vlastností po 28 a po 60 dnech zrání a pro vlastnosti vzorků tepelně ošetřených. Důvodem je velké počáteční množství receptur, které by vedlo k příliš velkému množství dosažených výsledků. Výsledky by pak byly těžko vzájemně porovnatelné.

Výsledky pevností v tahu za ohybu a v tlaku po 7 dnech zrání všech receptur jsou pro představu zaznamenány v tab. 9. Podrobněji jsou však zpracovány v kapitole 12.2 „Výsledky“ (str. 56), konkrétně 12.2.2 „Fyzikálně mechanické vlastnosti“ (str. 57). Hodnoty vybraných receptur jsou zvýrazněny a následně jsou jednotlivé receptury vypsány v tab. 10.

Tab. 9: Výsledné pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku po 7 dnech zrání pro výběr receptur pro další zkoušení

Receptura	R <sub>f</sub> [MPa]	R <sub>c</sub> [MPa]	Receptura	R <sub>f</sub> [MPa]	R <sub>c</sub> [MPa]
1.1	18,1	85,4	4.1	17,7	73,8
1.2	<b>20,1</b>	<b>87,2</b>	4.2	<b>17,7</b>	<b>83,1</b>
1.3	19,0	86,2	4.3	16,8	72,5
1.4	12,9	74,4	4.4	<b>15,3</b>	<b>76,6</b>
2.1	16,9	61,3	5.1	<b>17,3</b>	<b>94,4</b>
2.2	16,6	72,2	5.2	22,7	91,6
2.3	15,5	62,9	5.3	<b>20,3</b>	<b>89,3</b>
2.4	14,2	61,9	5.4	15,8	85
3.1	<b>21,6</b>	<b>90,3</b>	6.1	16,3	81,8
3.2	16,8	76,6	6.2	<b>18,1</b>	<b>86,5</b>
3.3	<b>16,1</b>	<b>81,0</b>	6.3	16,9	76,9
3.4	15,5	76,3	6.4	<b>15,8</b>	<b>82,8</b>

Pozn.: První číslo v označení receptur udává číslo samotné receptury a druhé číslo značí konkrétní frakci křemičitého písku použitého v dané receptuře.

Tab. 10: Vybrané receptury pro zkoušení mechanických vlastností po 28 a po 60 dnech zrání a pro vzorky tepelně ošetřené

Receptura	1.2	3.1 a 3.3	4.2 a 4.4	5.1 a 5.3	6.2 a 6.4
Cement	800	1000	1000	1200	1200
Mikrosilika	150	150	200	150	200
Křemičitý písek	1170	860	800	560	500
Ocelová vlákna	120	120	120	120	120
Voda	240	280	310	320	340
Vodní součinitel	0,22	0,22	0,22	0,21	0,21
SP	1,7 %	1,7 %	1,7 %	1,8 %	1,8 %

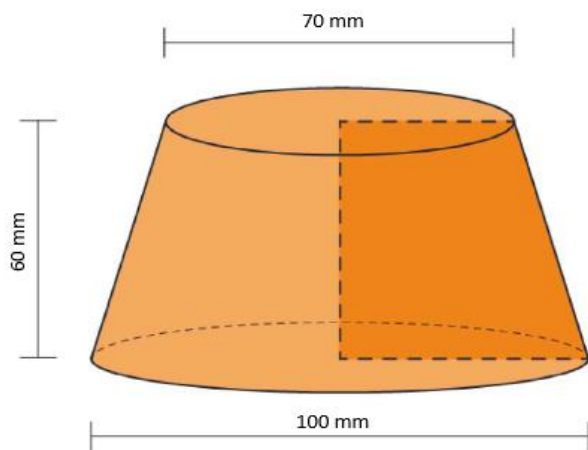
### 12.1.3 Technologie výroby

Míchání probíhalo v míchacím zařízení na zkoušení cementu dle normy EN 196-1 [78]. Do míchačky byly nejdříve nasypány všechny suché složky RPC. Tedy křemičitý písek, následně portlandský cement a nakonec mikrosilika. Tyto složky byly promíchány, následně byla přidána ocelová vlákna a směs byla znovu promíchána zasucha. Míchání suchých složek trvalo celkem přibližně 2 minuty. Poté byla přidána část záměsové vody, superplastifikační přísada, a nakonec zbytek záměsové vody. Během míchání byly sledovány změny konzistence čerstvého RPC a množství superplastifikační přísady a záměsové vody bylo upravováno dle potřeby. Míchání čerstvého RPC probíhalo přibližně 5 minut. Na obr. 21 a 22 je vidět čerstvý beton ihned po zamíchání. Konkrétně se jedná o recepturu 1.4, tj. množství cementu  $800 \text{ kg/m}^3$ , množství mikrosiliky  $150 \text{ kg/m}^3$  a křemičitý písek frakce 1 až 4 mm.



*Obr. 21 a 22: Čerstvý RPC před uložením do forem*

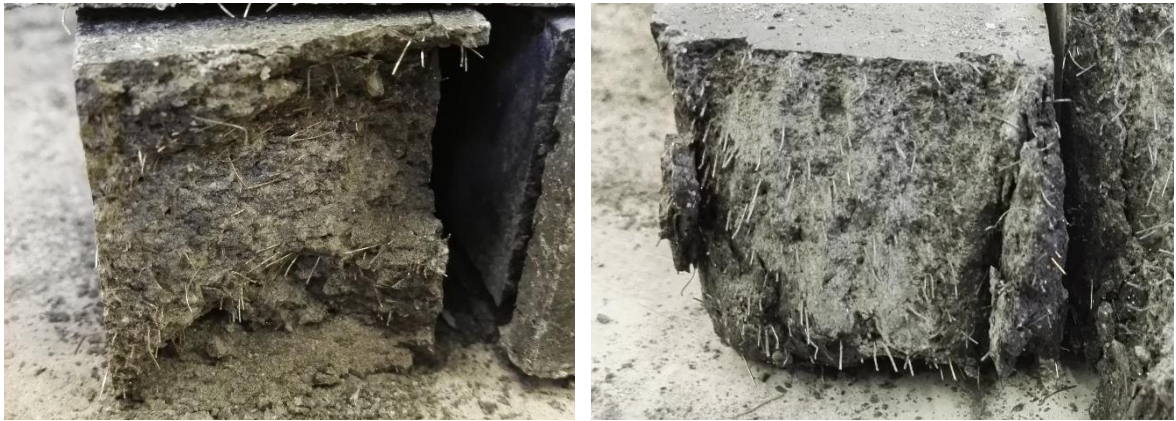
Po zamíchání byla zjišťována konzistence čerstvého RPC. Vzhledem ke granulometrii směsi byl pro její stanovení použit modifikovaný postup zkoušky konzistence čerstvé malty s použitím střešovacího stolku dle ČSN EN 1015-3: Zkušební metody malt pro zdivo – Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešovacího stolku) [79]. Principem zkoušky je zjištění hodnoty rozlití čerstvé malty, která se získá změřením dvou na sebe kolmých průměrů rozlité malty a jejich následným zprůměrováním. Před provedením zkoušky byly deska a kovový kužel navlhčeny pomocí vlhké tkaniny a natřeny tenkou vrstvou odbedňovacího oleje. Kovový kužel byl umístěn na střed rovné a nenasákavé desky střešovacího stolku a naplněn maltou. Povrch byl zarovnan a po několika sekundách byl kužel zvednut. Následně bylo provedeno 15 rázů pomocí střešovacího stolku. Poté byly změřeny dva na sebe kolmé průměry rozlité směsi a rozlití bylo vyhodnoceno jako průměr těchto dvou hodnot s přesností na 10 mm. Rozměry použitého kužele jsou vidět na obr. 23 a použitý střešovací stolek na obr. 24.



Obr. 23 a 24 (zleva): Rozměry kužele pro zkoušku rozlití RPC [80] a použitý střešací stolek pro provedení této zkoušky

Následně byly připraveny formy pro výrobu zkušebních těles o rozměrech 40 x 40 x 160 mm. V první fázi byla vyrobena tři zkušební tělesa pro každou z 24 původních receptur pro mechanické vlastnosti po 7 dnech zrání. Po zredukování receptur byla pro každou recepturu zhotovena opět tři zkušební tělesa, a to pro mechanické vlastnosti po 28 a po 60 dnech a pro tepelné ošetřování a následné zkoušení mechanických vlastností po 7, po 28 a po 60 dnech zrání. Některé formy byly hutněny na vibračním stole. Jelikož hutnění za použití vibračního stolu s magnety způsobuje jednosměrné nasměrování ocelových vláken, doba vibrace byla omezena na nejkratší možnou dobu. U většiny směsí byla vibrace nezbytná, avšak pokud to konzistence čerstvého RPC umožnila, bylo zhutnění provedeno pomocí laboratorních pomůcek (dusadel, aj.).

Na obr. 25 a 26 lze vidět rozdíl v nasměrování ocelových vláken při různém způsobu hutnění. U vzorku na obr. 25 byla použita vibrace pouze minimálně. Jedná se o vzorek receptury 3.3, jehož hodnota rozlití byla 160 mm, a naopak u vzorku na obr. 26 bylo nutné vibrovat čerstvý RPC po delší dobu a jedná se o vzorek receptury 4.2 s hodnotou rozlití 130 mm. U tohoto vzorku je vidět jednosměrnou orientaci ocelových vláken.



*Obr. 25 a 26: Porovnání orientace vláken u vzorků s různou intenzitou vibrace*

Ošetřování zkušebních těles probíhalo dvěma způsoby. Vzorky všech receptur, určených pro zkoušení mechanických vlastností po 7 dnech zrání, a vzorky první sady po redukcí receptur byly po vyrobení ponechány v laboratorních podmínkách a po 24 hodinách byly ihned po odformování ponořeny do vody, kde byly ponechány po celou dobu zrání. Vzorky druhé sady, která byla vyrobena na základě výsledných zredukovaných receptur, byly ihned po vyrobení ve formách tepelně ošetřovány. Tepelné ošetřování probíhalo v propařovací komoře při teplotě 55 °C po dobu 24 hodin. Následně byly odformovány a uloženy do vlhkého prostředí. Po jejich úplném ochlazení byly vzorky ponořeny do vody, kde zůstaly po celou dobu zrání. Čerstvý RPC uložený ve formách a uložení forem do propařovací komory jsou vidět na obr. 27 a 28.



*Obr. 27 a 28 (zleva): Čerstvý RPC uložený ve formách a uložení forem do propařovací komory před proteplením zkušebních těles*

Na všech zkušebních tělesech byla následně zjištěna objemová hmotnost ve ztvrdlém stavu a zkoušeny fyzikálně mechanické vlastnosti po 7, 28 a 60 dnech zrání. Objemová hmotnost ztvrdlého RPC byla stanovena dle vzorce:

Prováděné zkoušky fyzikálně mechanických vlastností RPC na zkušebních tělesech:

- **Objemová hmotnost ztvrdlé malty** – podstata zkoušky vychází z normy pro cementové malty ČSN EN 196-1 Metody zkoušení cementu – Část 1: Stanovení pevnosti [78]. Zkouška byla stanovena na všech zkušebních tělesech po 7, 28 a 60 dnech zrání.

Výsledná objemová hmotnost ztvrdlého RPC byla stanovena dle vzorce:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Kde:  $\rho$  je objemová hmotnost ve ztvrdlém stavu [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$m$  je hmotnost vzorku [kg]

$V$  je objem vzorku [ $\text{m}^3$ ]

- **Pevnost v tahu za ohybu** – podstata zkoušky vychází z normy pro cementové malty ČSN EN 196-1 Metody zkoušení cementu – Část 1: Stanovení pevnosti [78]. Pro stanovení pevnosti v tahu za ohybu byly použity tři zkušební tělesa o rozměrech 40 x 40 x 160 mm a zkouška byla prováděna po 7, 28 a 60 dnech zrání. Na porušených zkušebních tělesech byla následně stanovena i pevnost v tlaku. Zkoušení běžných betonů na pevnost v tahu ohybem popisuje norma ČSN EN 12390-5 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles [81]. Avšak v případě této diplomové práce je s ohledem na granulometrii materiálu vhodnější použít postup dle normy na zkoušení cementu.

Výsledná pevnost v tahu za ohybu RPC se tedy vypočte dle vzorce:

$$R_f = \frac{1,5 \times F_f \times l}{b^3}$$

Kde:  $R_f$  je pevnost v ohybu [MPa]  
 $F_f$  je lomové zatížení, vynaložené na střed zkušebního tělesa [N]  
 $l$  je vzdálenost lomových podpěr (100 mm) [mm]  
 $b$  je délka boční strany průřezu zkušebního tělesa [mm]

- **Pevnost v tlaku** – podstata této zkoušky vychází také z normy ČSN EN 196-1 Metody zkoušení cementu – Část 1: Stanovení pevnosti [78]. Pevnost v tlaku byla provedena na porušených tělesech zkouškou pevnosti v tahu za ohybu. Zkouška pevnosti v tlaku běžných betonů se provádí dle normy ČSN EN 12390-3 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles [82].

Výsledná pevnost v tlaku RPC byla tedy stanovena dle vzorce:

$$R_c = \frac{F_c}{1600}$$

Kde:  $R_c$  je pevnost v tlaku [MPa]  
 $F_c$  je nejvyšší zatížení při porušení [N]  
1600 je plocha destiček (40 x 40 mm) [mm<sup>2</sup>]

Na obr. 29 a 30 je vidět rozdíl povrchů zkušebních těles s použitím křemičitého písku frakce od 0,125 do 0,5 mm a písku frakce od 1 do 4 mm. Na obr. 31 a 32 lze vidět rozdíl mezi jednotlivými strukturami po mechanickém porušení zkušebních těles.



*Obr. 29 a 30 (zleva): Rozdíl mezi povrchem zkušebního tělesa s použitím křemičitého písku frakce do 0,5 mm a s použitím písku frakce do 4 mm*



*Obr. 31 a 32 (zleva): Porovnání struktury ztvrdlého RPC v případě receptury s frakcí křemičitého písku do 0,5 mm a s frakcí do 4 mm*

Na vybraných vzorkách bylo zjišťováno složení pomocí rentgenové a termické analýzy. Pro tyto analýzy byly vybrány čtyři vzorky neproteplené a čtyři vzorky proteplené s ohledem na výsledky fyzikálně mechanických vlastností. Vzorky byly odebrány ze zkušebních těles, na kterých byla provedena zkouška pevnosti v tlaku po 28 dnech. Část porušeného zkušebního tělesa byla velmi jemně pomleta v diskovém mlýně. Na vzorkách pak byly provedeny následující zkoušky:

- **Diferenční termická analýza (DTA)** – metoda je založená na měření rozdílu teplot mezi zkoušeným vzorkem a inertním standardem současně zahřívány v peci měřicího přístroje na teplotu od 1200 do 1600 °C. Inertní standard může být u modernějších přístrojů virtuální. V průběhu zahřívání dochází většinou k reakcím endotermním, kdy se teplo spotřebovává. Takovou reakcí je např. dehydratace, dehydroxylace, tvorba taveniny atd. a bývá většinou doprovázena změnou hmotnosti. Vzorek je zkoumán ve formě prášku. V průběhu měření je sledován nárůst teploty v peci, nárůst teploty zkoumaného vzorku, nárůst teploty inertního zdroje (pokud je přítomen) a hmotnost zkoumaného vzorku.
- **Rentgenová difrakční analýza (XRD)** – analýza slouží pro identifikaci krystalických látek (minerálů) ve vzorku. Používá se zejména pro kvalitativní stanovení složení materiálu. Pro kvantitativní stanovení je tato analýza doplňována jinou analýzou, kterou je například právě diferenční termická analýza. XRD analýza je založena

na skutečnosti, že rozměry krystalové mřížky jsou srovnatelné s vlnovou délkou rentgenového záření. Na krystalové mřížce tak může docházet k difrakci záření. Jelikož je vzor krystalu periodický, je difrakční vzor záření po průchodu krystalem v poměrně dobrém vztahu se strukturou krystalu.

## 12.2 VÝSLEDKY

### 12.2.1 Konzistence a vodní součinitel

Vodní součinitel a hodnoty rozlití jsou pro vzájemné porovnání uvedeny v tab. 11. Rozlití receptury 1.2, tj. množství cementu  $800 \text{ kg/m}^3$ , množství mikrosiliky  $150 \text{ kg/m}^3$  a křemičitý písek frakce 0,25 až 1 mm a receptury 1.3, tj. stejné množství cementu a mikrosiliky a křemičitý písek frakce 0,25 až 2 mm, lze vidět na obr. 33 a 34.

*Tab. 11: Vodní součinitel, počítaný s příslušnou k-hodnotou pro jednotlivá pojiva a rozlití, vycházející u jednotlivých receptur*

Receptura	Vodní součinitel	Rozlití	Receptura	Vodní součinitel	Rozlití
1.1	0,22	150	4.1	0,22	150
1.2	0,22	140	4.2	0,22	130
1.3	0,22	160	4.3	0,22	160
1.4	0,22	130	4.4	0,22	150
2.1	0,22	130	5.1	0,21	160
2.2	0,22	150	5.2	0,21	160
2.3	0,22	150	5.3	0,21	160
2.4	0,22	130	5.4	0,21	150
3.1	0,22	150	6.1	0,21	160
3.2	0,22	150	6.2	0,21	150
3.3	0,22	160	6.3	0,21	160
3.4	0,22	150	6.4	0,21	160



*Obr. 33 a 34 (zleva): Rozlití RPC receptury 1.2 a receptury 1.3*

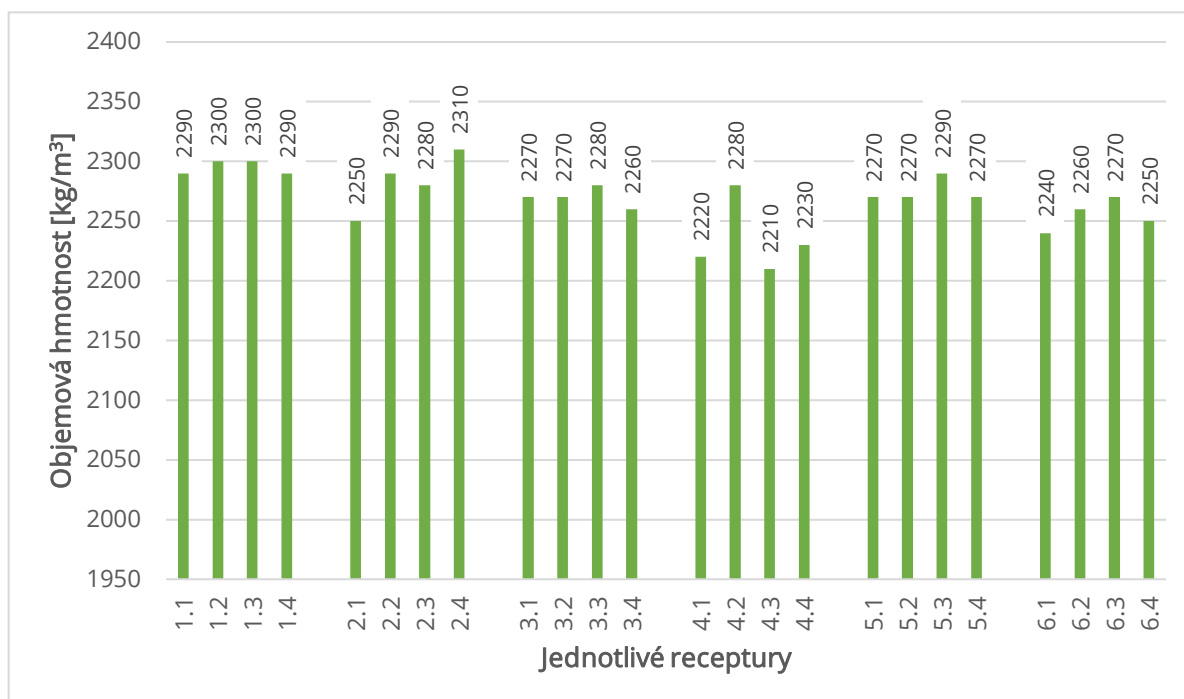
Konzistence jednotlivých receptur byla tedy porovnatelná a jejich zpracování bylo náročnější, a to především z hlediska hutnění. V důsledku vysokého množství pojivých složek u všech receptur byly výsledné směsi velmi lepivé a vizuálně nedocházelo k žádnému odměšování jednotlivých složek čerstvého RPC.

### **12.2.2 Fyzikálně mechanické vlastnosti**

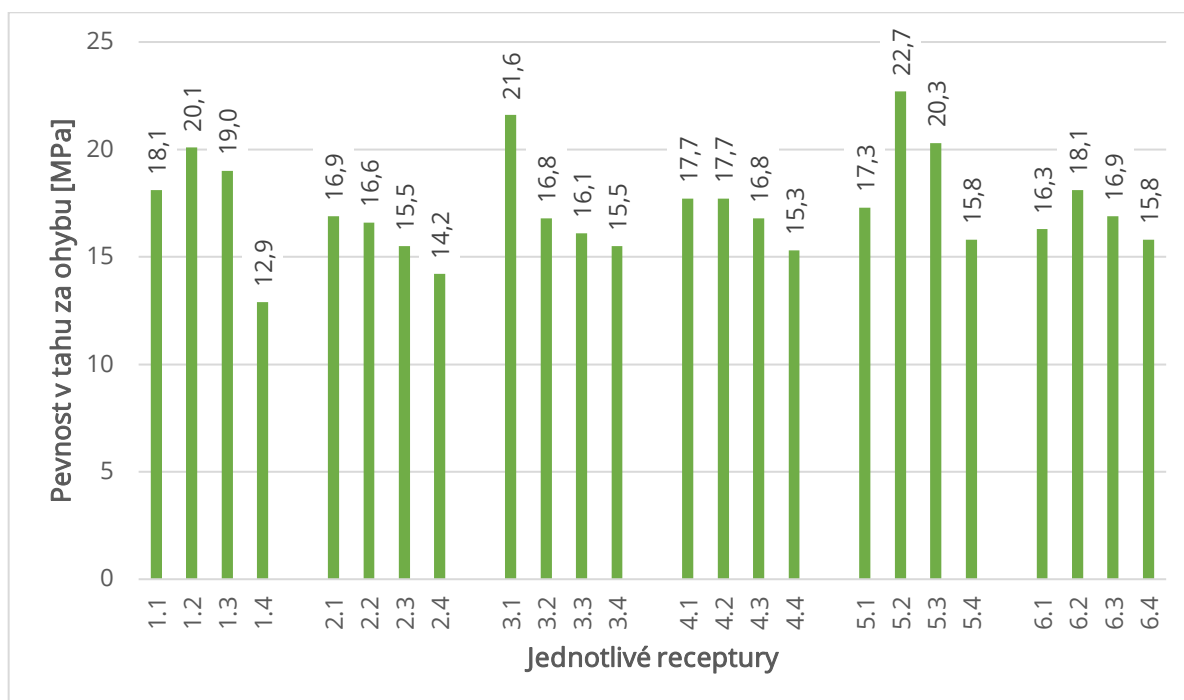
V tab. 12 lze vidět výsledky objemové hmotnosti ztvrdlého RPC, pevností v tahu za ohybu a pevností v tlaku všech receptur, které byly navrženy v první fázi experimentu a zkoušeny po 7 dnech zrání. Výsledky jsou také znázorněny v grafech 2 až 4.

Tab. 12: Výsledky objemových hmotností a pevností v tahu za ohybu a v tlaku po 7 dnech zrání pro všechny počáteční varianty receptur

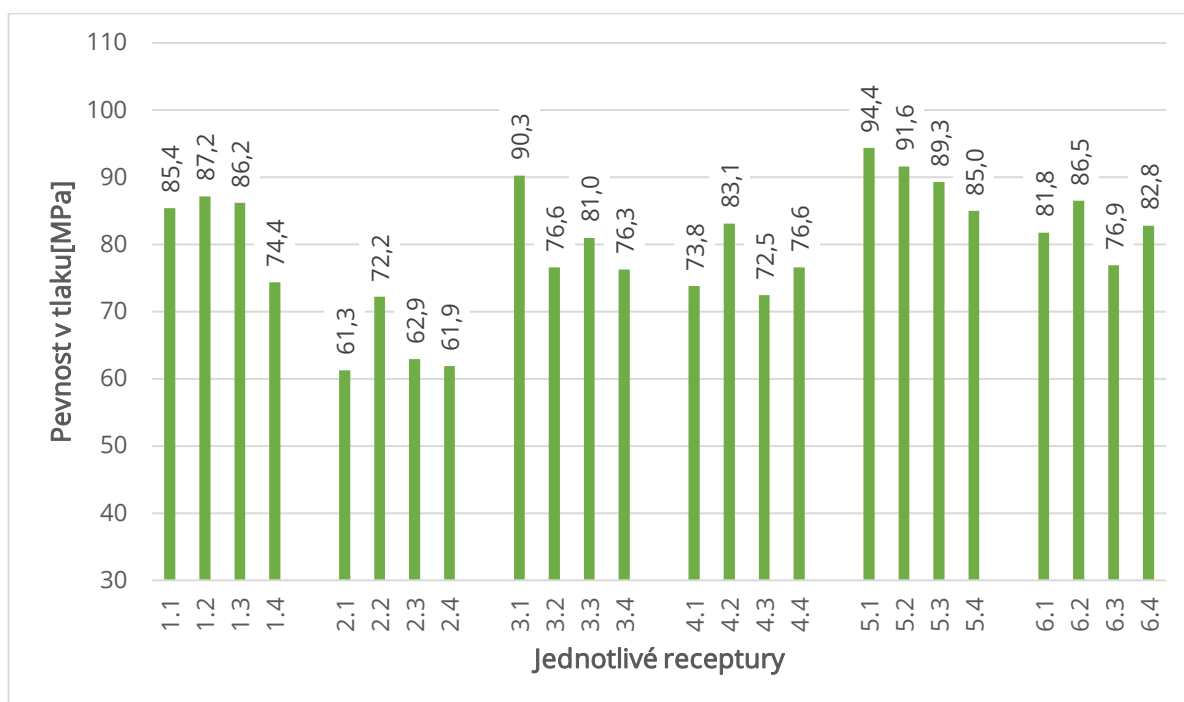
Receptura	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	R <sub>f</sub> [MPa]	R <sub>c</sub> [MPa]	Receptura	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	R <sub>f</sub> [MPa]	R <sub>c</sub> [MPa]
1.1	2290	18,1	85,4	4.1	2220	17,7	73,8
1.2	2300	20,1	87,2	4.2	2280	17,7	83,1
1.3	2300	19,0	86,2	4.3	2210	16,8	72,5
1.4	2290	12,9	74,4	4.4	2230	15,3	76,6
2.1	2250	16,9	61,3	5.1	2270	17,3	94,4
2.2	2290	16,6	72,2	5.2	2270	22,7	91,6
2.3	2280	15,5	62,9	5.3	2290	20,3	89,3
2.4	2310	14,2	61,9	5.4	2270	15,8	85,0
3.1	2270	21,6	90,3	6.1	2240	16,3	81,8
3.2	2270	16,8	76,6	6.2	2260	18,1	86,5
3.3	2280	16,1	81,0	6.3	2270	16,9	76,9
3.4	2260	15,5	76,3	6.4	2250	15,8	82,8



Graf 2: Výsledky objemových hmotností navržených receptur se čtyřmi frakcemi kameniva po 7 dnech zrání



Graf 3: Výsledky pevností v tahu za ohybu navržených receptur se čtyřmi frakcemi kameniva po 7 dnech zrání



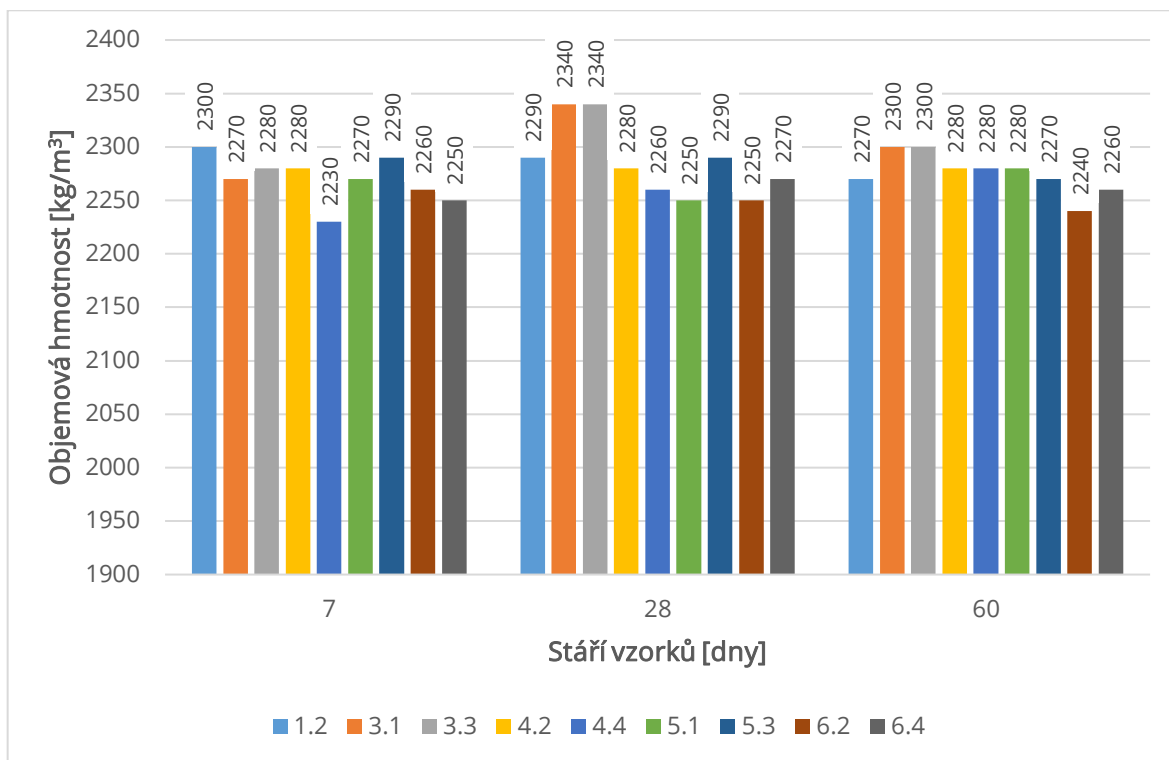
Graf 4: Výsledky pevností v tlaku navržených receptur se čtyřmi frakcemi kameniva po 7 dnech zrání

Po následné redukci receptur byly vyrobeny sady zkušebních těles pro zkoušení vlastností po 28 a po 60 dnech zrání a sady určené pro tepelné ošetřování. Výsledky objemových hmotností těchto receptur jsou zaznamenány v tab. 13 a v grafech 5 až 7, výsledky pevností v tahu za ohybu v tab. 14 a v grafech 8 až 10 a pevností v tlaku v tab. 15 a v grafech 11 až 13.

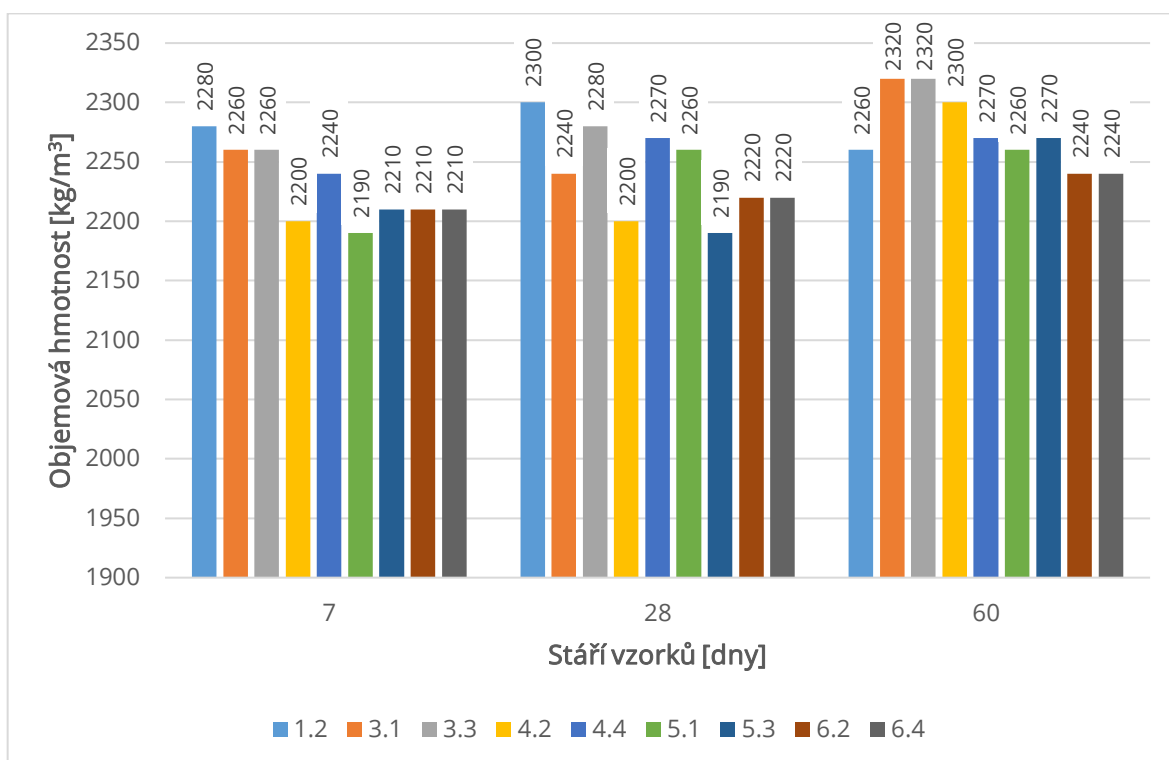
*Tab. 13: Výsledky objemových hmotností po zredukovaném množství navržených receptur po 7, 28 a 60 dnech zrání vzorků ošetřených při laboratorní teplotě a při teplotě 55 °C po dobu 24 hodin v propařovací komoře*

Receptura	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] po 7 dnech		$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] po 28 dnech		$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] po 60 dnech	
	N	P	N	P	N	P
1.2	2300	2280	2290	2300	2270	2260
3.1	2270	2260	2340	2240	2300	2320
3.3	2280	2260	2340	2280	2300	2320
4.2	2280	2200	2280	2200	2280	2300
4.4	2230	2240	2260	2270	2280	2270
5.1	2270	2190	2250	2260	2280	2260
5.3	2290	2210	2290	2190	2270	2270
6.2	2260	2210	2250	2220	2240	2240
6.4	2250	2210	2270	2220	2260	2240

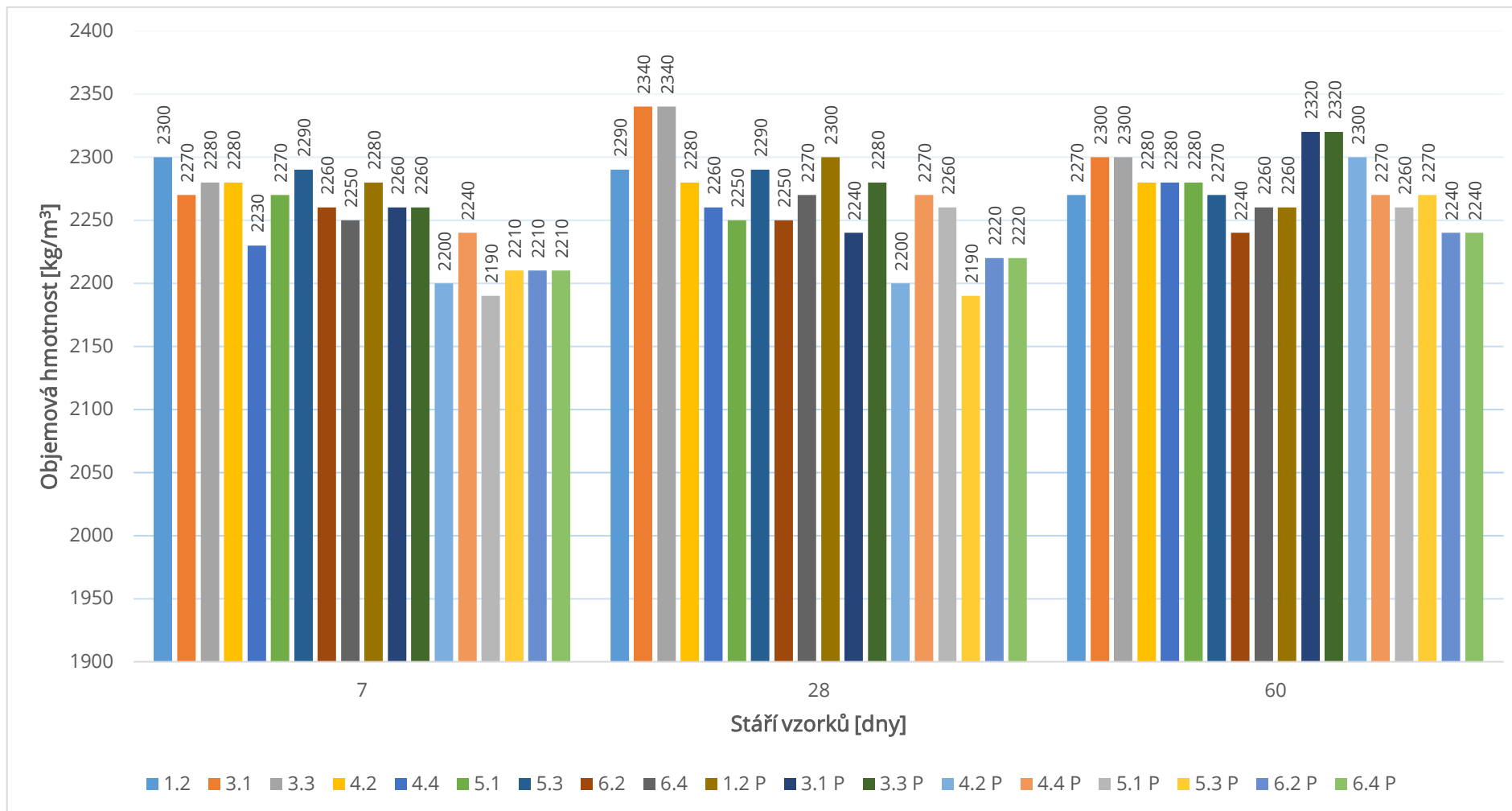
*Pozn: N je označení pro vzorky neproteplené (zrání v laboratorních podmínkách) a P je označení pro výsledky vzorků tepelně ošetřených při teplotě 55 °C po dobu 24 hodin v propařovací komoře*



Graf 5: Vyhodnocení objemové hmotnosti vzorků tepelně neošetřených po 7, 28 a 60 dnech zrání



Graf 6: Vyhodnocení objemové hmotnosti vzorků tepelně ošetřených při teplotě 55 °C po dobu 24 hodin v propařovací komoře po 7, 28 a 60 dnech zrání

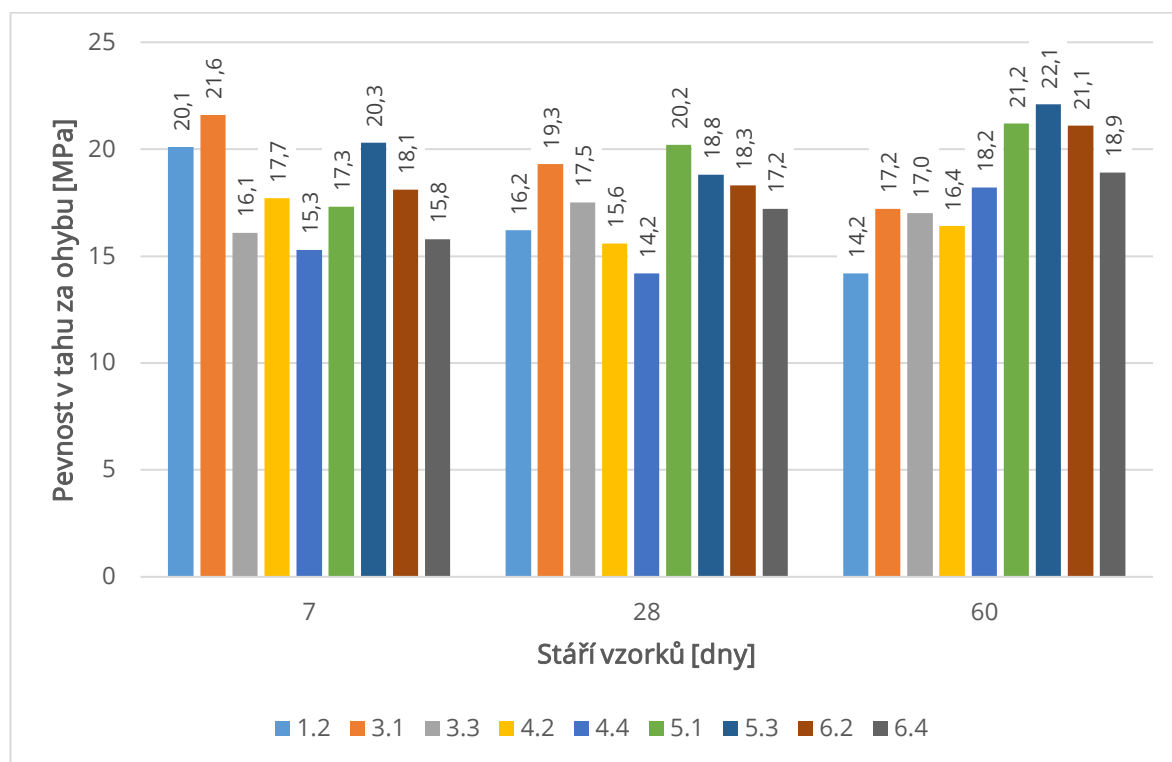


Graf 7: Vyhodnocení objemových hmotností vzorků tepelně neošetřených a tepelně ošetřených při teplotě 55 °C po dobu 24 hodin v propařovací komoře pro lepší představu a porovnání dosažených výsledků

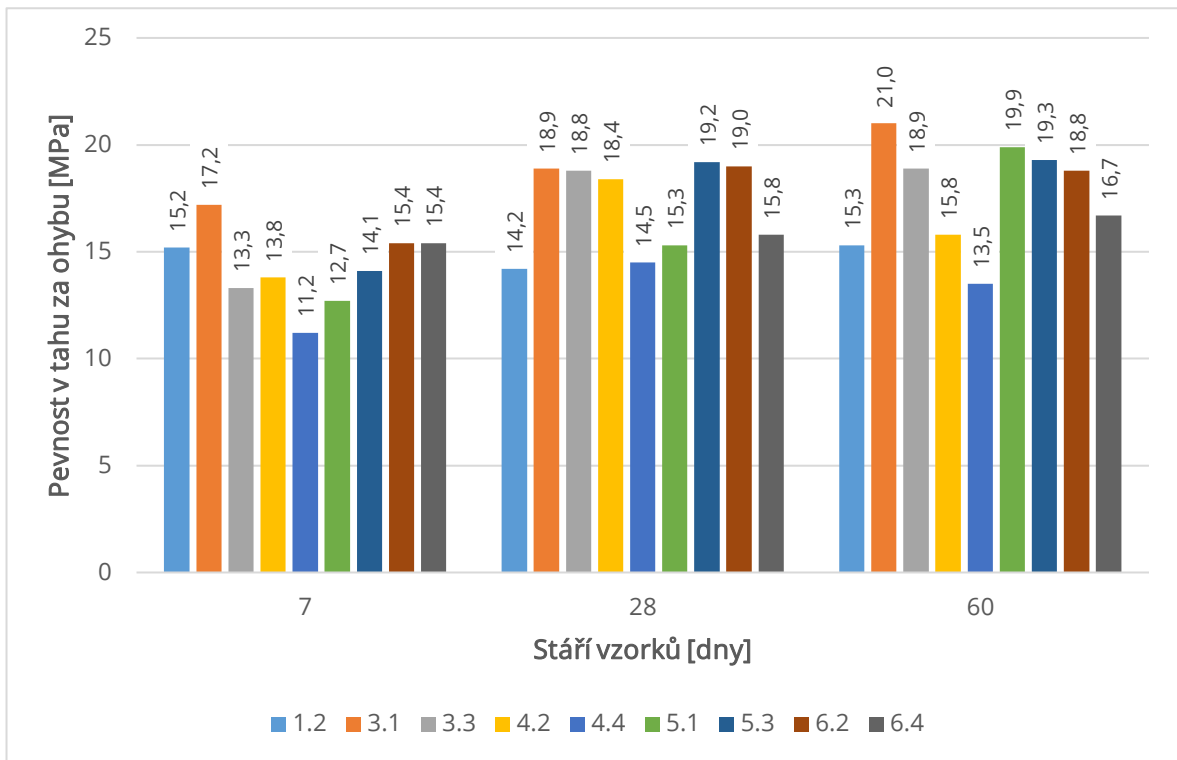
Tab. 14: Výsledky pevností v tahu za ohybu po zredukovaném množství navržených receptur po 7, 28 a 60 dnech zrání vzorků ošetřených při laboratorní teplotě a při teplotě 55 °C po dobu 24 hodin v propařovací komoře

Receptura	R <sub>f</sub> [MPa] po 7 dnech		R <sub>f</sub> [MPa] po 28 dnech		R <sub>f</sub> [MPa] po 60 dnech	
	N	P	N	P	N	P
1.2	20,1	15,2	16,2	14,2	14,2	15,3
3.1	21,6	17,2	19,3	18,9	17,2	21
3.3	16,1	13,3	17,5	18,8	17	18,9
4.2	17,7	13,8	15,6	18,4	16,4	15,8
4.4	15,3	11,2	14,2	14,5	18,2	13,5
5.1	17,3	12,7	20,2	15,3	21,2	19,9
5.3	20,3	14,1	18,8	19,2	22,1	19,3
6.2	18,1	15,4	18,3	19	21,1	18,8
6.4	15,8	15,4	17,2	15,8	18,9	16,7

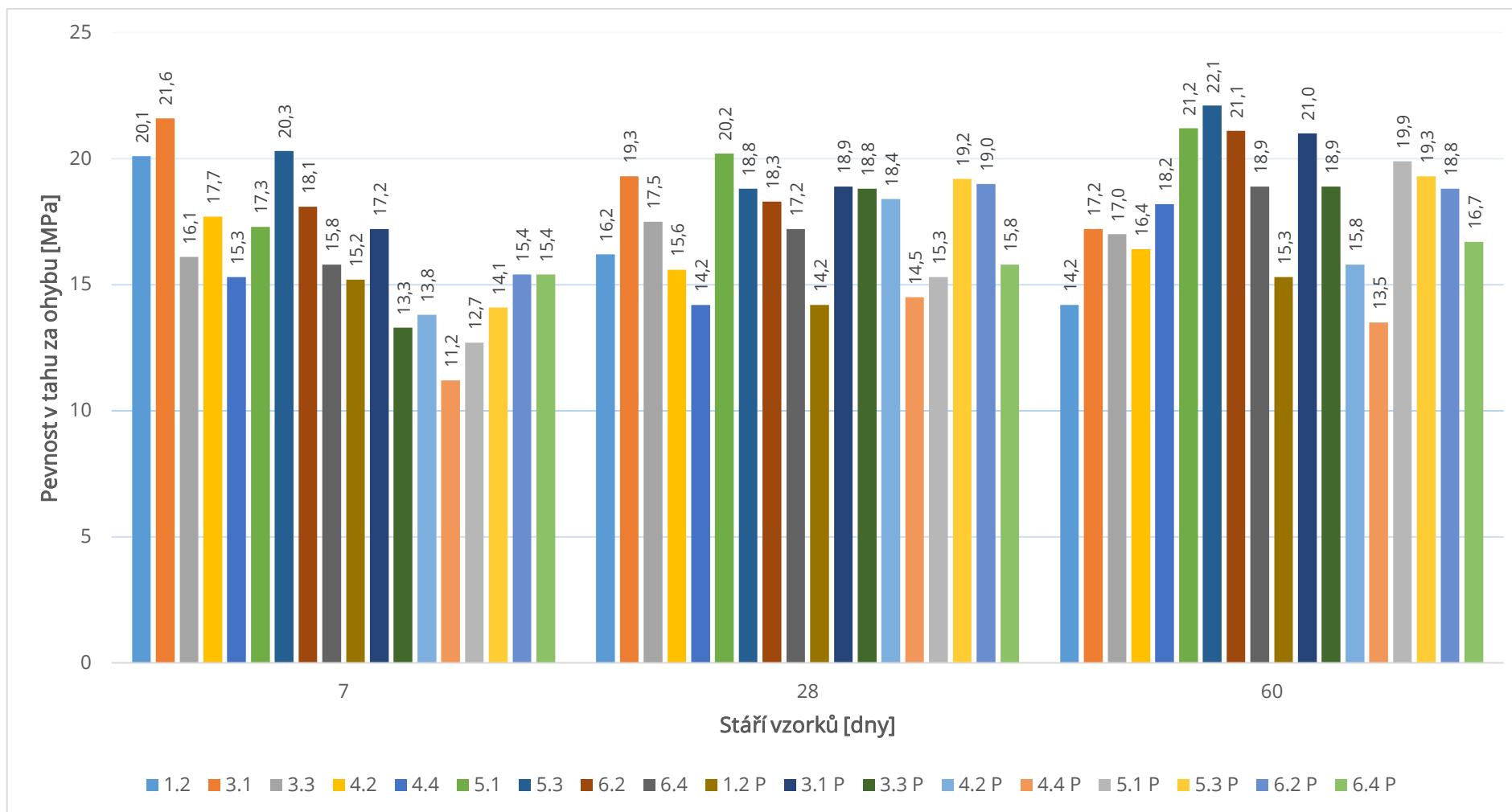
Pozn: N je označení pro vzorky neproteplené (zrání v laboratorních podmínkách) a P je označení pro výsledky vzorků tepelně ošetřených při teplotě 55 °C po dobu 24 hodin v propařovací komoře



Graf 8: Vyhodnocení pevnosti v tahu za ohybu vzorků tepelně neošetřených po 7, 28 a 60 dnech zrání



Graf 9: Vyhodnocení pevnosti v tahu za ohybu vzorků tepelně ošetřených při teplotě 55 °C po dobu 24 hodin v propařovací komoře po 7, 28 a 60 dnech zrání

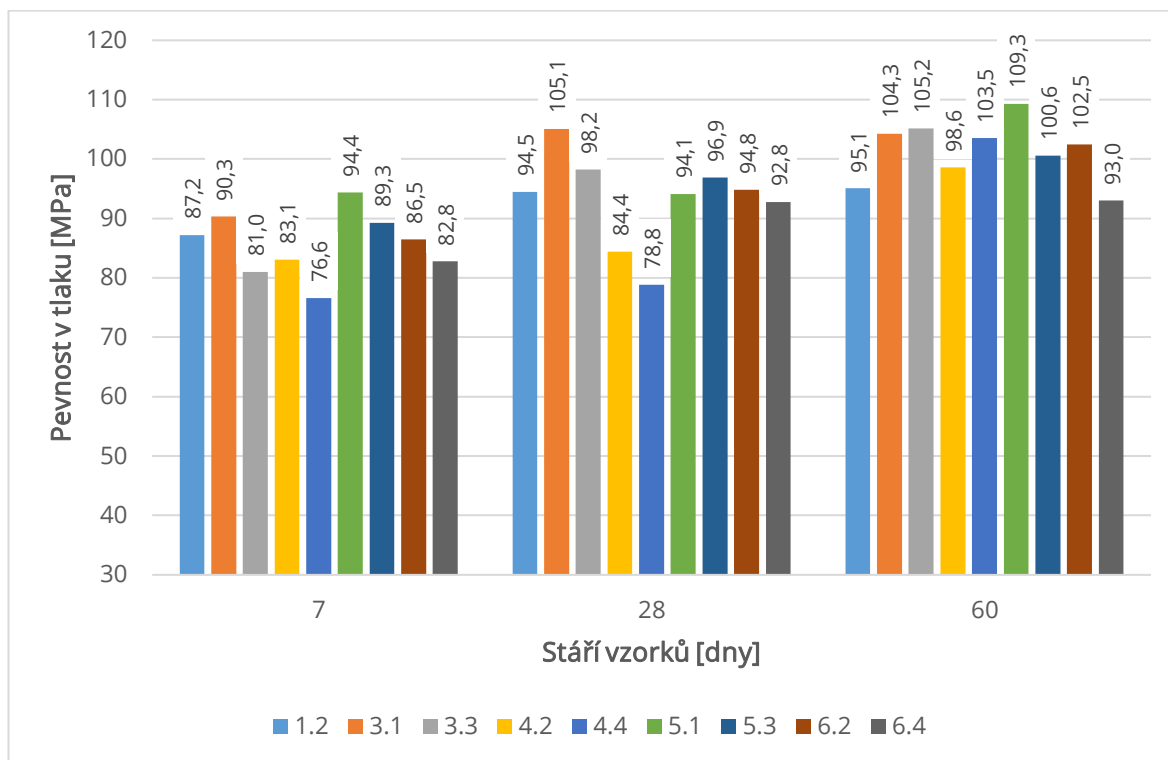


Graf 10: Vyhodnocení pevnosti v tahu za ohybu vzorků tepelně neošetřených a tepelně ošetřených při teplotě 55 °C po dobu 24 hodin v propařovací komoře pro lepší představu a porovnání dosažených výsledků

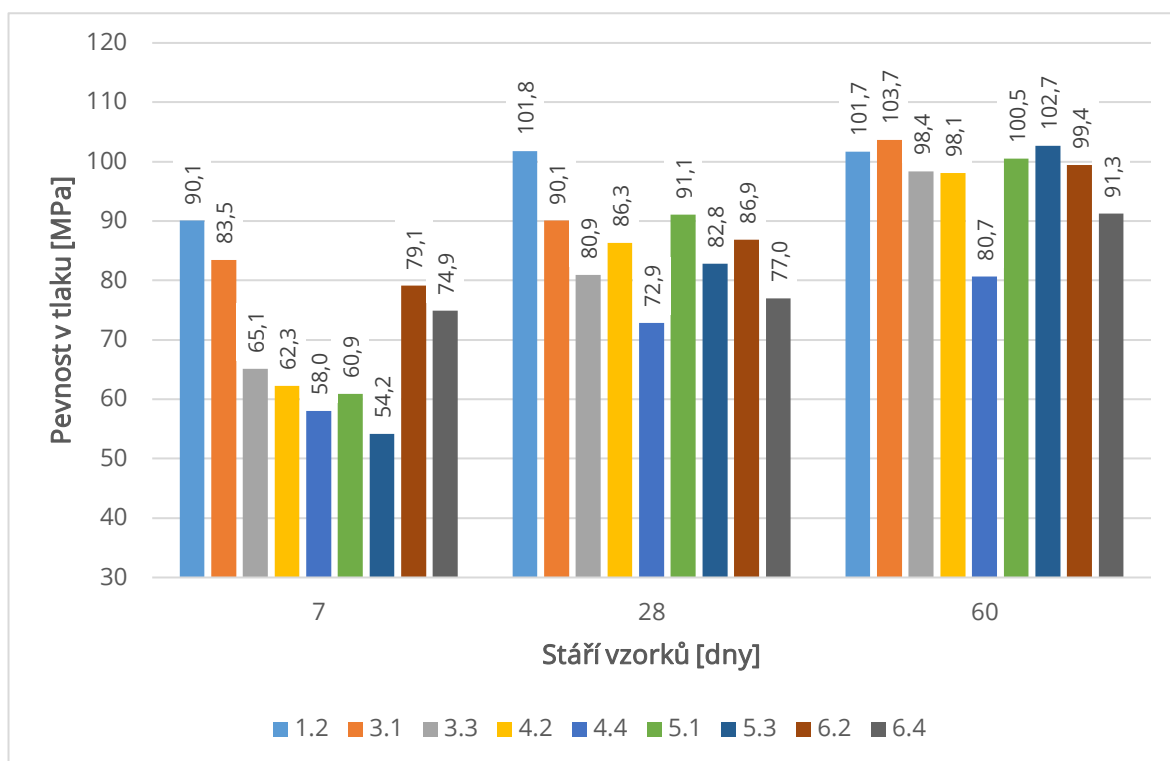
Tab. 15: Výsledky pevností v tlaku po zredukovaném množství navržených receptur po 7, 28 a 60 dnech zrání vzorků ošetřených při laboratorní teplotě a při teplotě 55 °C po dobu 24 hodin v propařovací komoře

Receptura	R <sub>c</sub> [MPa] po 7 dnech		R <sub>c</sub> [MPa] po 28 dnech		R <sub>c</sub> [MPa] po 60 dnech	
	N	P	N	P	N	P
1.2	87,2	90,1	94,5	101,8	95,1	101,7
3.1	90,3	83,5	105,1	90,1	104,3	103,7
3.3	81,0	65,1	98,2	80,9	105,2	98,4
4.2	83,1	62,3	84,4	86,3	98,6	98,1
4.4	76,6	58,0	78,8	72,9	103,5	80,7
5.1	94,4	60,9	94,1	91,1	109,3	100,5
5.3	89,3	54,2	96,9	82,8	100,6	102,7
6.2	86,5	79,1	94,8	86,9	102,5	99,4
6.4	82,8	74,9	92,8	77,0	93,0	91,3

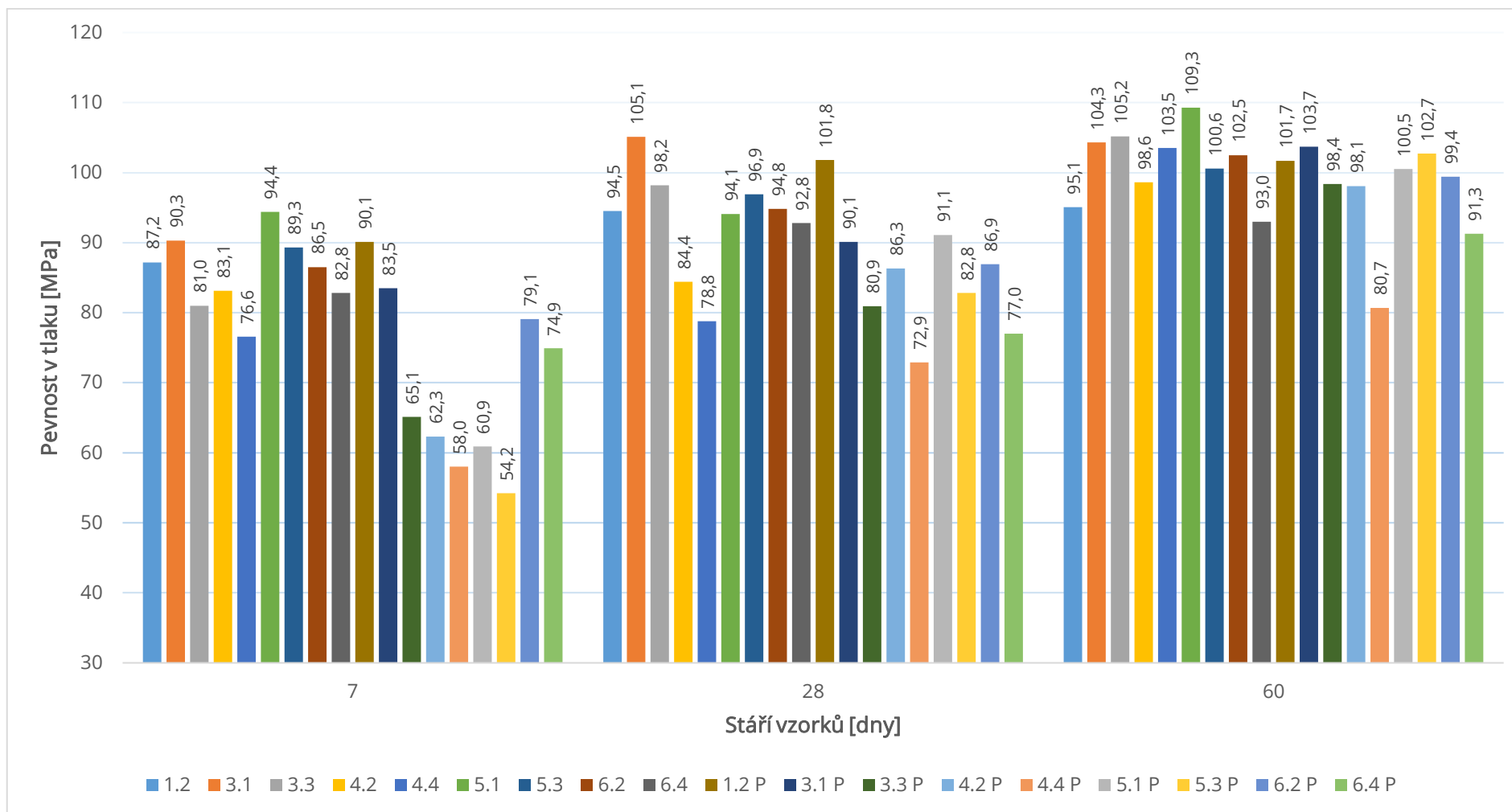
Pozn: N je označení pro vzorky neproteplené (zrání v laboratorních podmínkách) a P je označení pro výsledky vzorků tepelně ošetřených při teplotě 55 °C po dobu 24 hodin v propařovací komoře



Graf 11: Vyhodnocení pevnosti v tlaku vzorků tepelně neošetřených po 7, 28 a 60 dnech zrání



Graf 12: Vyhodnocení pevnosti v tlaku vzorků tepelně ošetřených při teplotě 55 °C po dobu 24 hodin v propařovací komoře po 7, 28 a 60 dnech zrání



Graf 13: Vyhodnocení pevnosti v tlaku vzorků tepelně neošetřených a tepelně ošetřených při teplotě 55 °C po dobu 24 hodin v propařovací komoře pro lepší představu a porovnání dosažených výsledků

Po provedení zkoušek pevností v tahu za ohybu a v tlaku bylo na tělesech možné pozorovat nejen orientaci ocelových vláken v materiálu, ale také přítomnost nezreagovaného pojiva v hutné struktuře RPC. Na obr. 35 je vidět zkušební těleso receptury 1.2 s množstvím cementu  $800 \text{ kg/m}^3$  a na obr. 36 je zkušební těleso receptury 6.2 s množstvím cementu  $1200 \text{ kg/m}^3$ . Oba vzorky byly protepleny na teplotu  $55 \text{ }^\circ\text{C}$  po dobu 24 hodin v propařovací komoře a zkoušeny po 60 dnech zrání. Na obr. 37 je také vidět několik vnitřních pórů, které byly pravděpodobně způsobeny nedostatečným hutněním. Je to zkušební vzorek receptury 1.2 neproteplený, zkoušený po 60 dnech zrání.



*Obr. 35 a 36 (zleva): Viditelné nezhydratované pojivo proteplených vzorků po 60 dnech zrání receptur s množstvím cementu  $800 \text{ kg/m}^3$  a  $1200 \text{ kg/m}^3$*



*Obr. 37: Viditelné póry ve struktuře RPC po 60 dnech zrání*

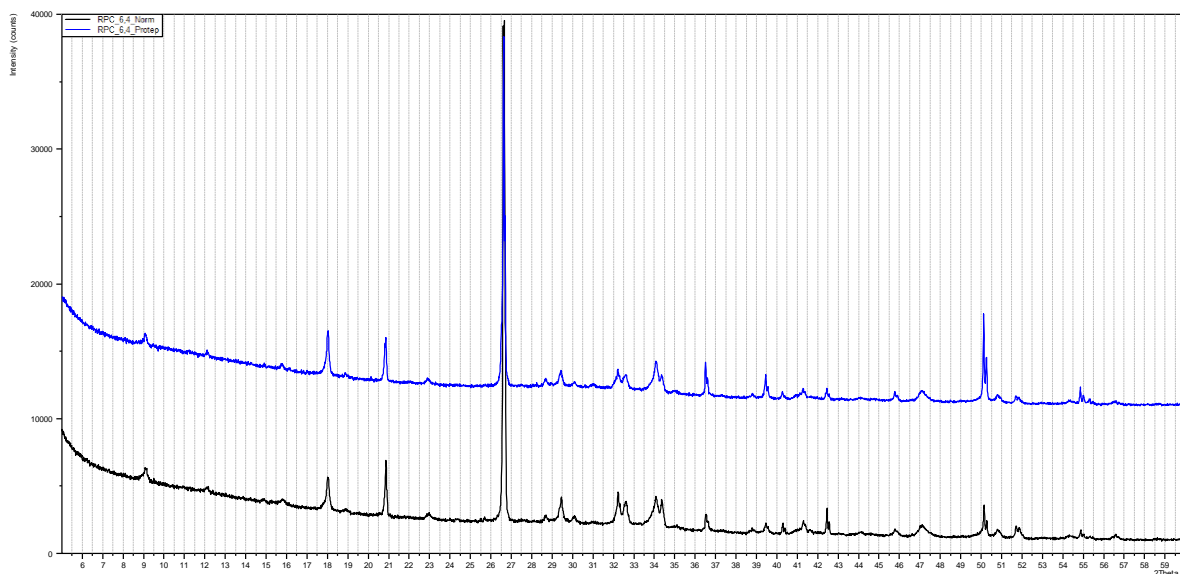
### 12.2.3 Rentgenová difrakční analýza (XRD)

Pro tuto analýzu byly vybrány pouze čtyři receptury. Byly porovnány výsledky pevností v tlaku po 28 dnech zrání u vzorků, které nebyly ošetřeny za zvýšené teploty a u vzorků tepelně ošetřených v propařovací komoře při teplotě 55 °C po dobu 24 hodin. Podle získaných hodnot byly vybrány dva vzorky, které vykazovaly vyšší pevnosti v případě tepelně ošetřených oproti neprotepleným. Jedná se o receptury 1.2, tj. množství cementu 800 kg/m<sup>3</sup>, množství mikrosiliky 150 kg/m<sup>3</sup> a křemičitý písek frakce 0,25 až 1 mm a receptura 4.2, tj. množství cementu 1000 kg/m<sup>3</sup>, množství mikrosiliky 200 kg/m<sup>3</sup> a křemičitý písek frakce 0,25 až 1 mm. Jelikož u ostatních výsledků došlo naopak k poklesu pevností, byly vybrány ty, které vykazovaly největší snížení pevností po proteplení v porovnání se vzorky neproteplenými. Byla tedy vybrána receptura 3.1, tj. množství cementu 1000 kg/m<sup>3</sup>, množství mikrosiliky 150 kg/m<sup>3</sup> a křemičitý písek frakce 0,125 až 0,5 mm. Tato receptura byla vybrána také z toho důvodu, že po celou dobu experimentu vykazovala jedny z nejlepších výsledků. Poslední recepturou pro XRD analýzu byla vybrána receptura 6.4, tj. množství cementu 1200 kg/m<sup>3</sup>, množství mikrosiliky 200 kg/m<sup>3</sup> a křemičitý písek frakce 1 až 4 mm.

Dle výsledků z této analýzy lze říci, že ve všech vzorcích byly zaznamenány stejné minerály a těmi jsou:

- **Křemen** přítomností křemičitého písku, popř. křemičitého úletu
- **Portlandit**, vzniklý hydratačními reakcemi cementu
- **Ettringit**, vzniklý reakcí mezi slinkovými minerály, sádrovce obsaženého v cementu a vody
- **Kalcit** jako modifikace vápence
- **Brownmillerit** (C<sub>3</sub>A) a **alit** (C<sub>3</sub>S) v malém množství, které byly zaznamenány pravděpodobně v důsledku přítomnosti nezhydratovaného portlandského cementu. U vzorku 1.2 neprotepleného se brownmillerit nevyskytl. Množství alitu bylo obecně u tepelně ošetřených vzorků nižší než u vzorků neproteplených.

Na obr. 38 je vidět křivka vzorku receptury 6.4. Černá křivka znázorňuje vzorek neproteplený a modrá křivka vzorek proteplený při teplotě 55 °C po dobu 24 hodin.



Obr. 38: Příklad XRD křivky pro recepturu 6.4 neprotepleného a protepleného vzorku

#### 12.2.4 Diferenční termická analýza (DTA)

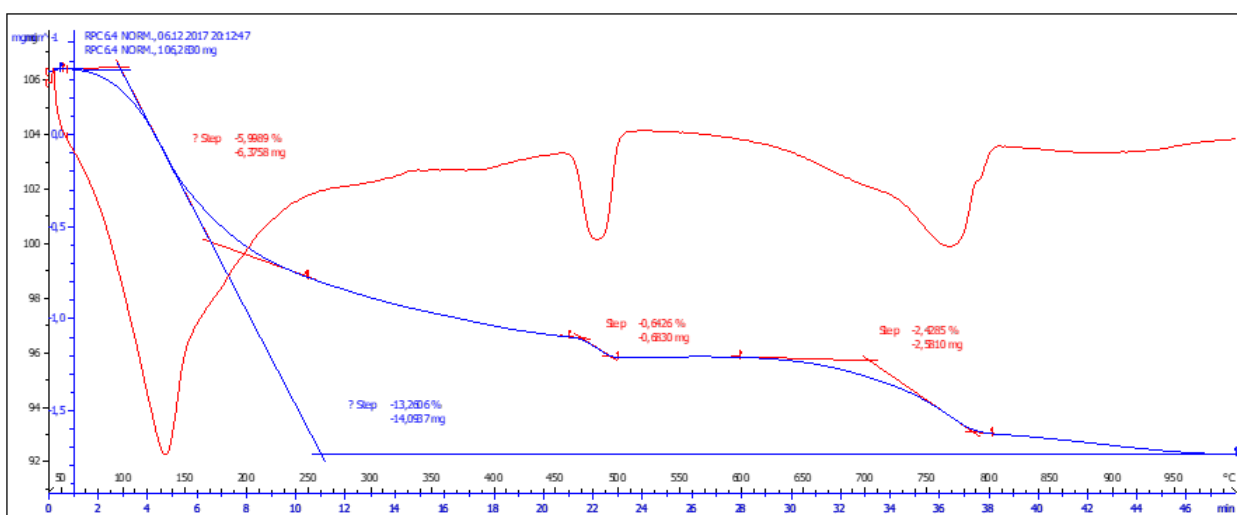
Pro tuto zkoušku byly použity stejné vzorky jako pro rentgenovou difrakční analýzu. Tzn. receptura 1.2, jejíž množství cementu je 800 kg/m<sup>3</sup>, receptura 3.1 a 4.2 s množstvím cementu 1000 kg/m<sup>3</sup> a receptura 6.4 s množstvím cementu 1200 kg/m<sup>3</sup>. U všech byly analyzovány vzorky tepelně neošetřené a proteplené v propařovací komoře při teplotě 55 °C po dobu 24 hodin. Jednotlivé úbytky hmotností v daných teplotních intervalech včetně celkových hmotnostních úbytků vzorků, odečtených z jednotlivých grafů jsou znázorněny v tab. 16.

Tab. 16: Jednotlivé úbytky hmotností v jednotlivých teplotních intervalech a celkový úbytek hmotnosti jednotlivých vzorků

Receptura	Úbytek hmotnosti v jednotlivých teplotních intervalech [%]			Celkový úbytek hmotnosti [%]
	70 – 200 °C	450 – 500 °C	700 – 800 °C	
	1.2 N	4,38	0,41	
1.2 P	3,94	0,35	1,40	9,23
3.1 N	5,26	0,63	1,77	11,50
3.1 P	5,19	0,66	1,55	11,76
4.2 N	5,23	0,59	2,01	11,61
4.2 P	5,23	0,56	1,89	12,28
6.4 N	6,00	0,64	2,43	13,26
6.4 P	5,97	0,82	1,85	13,85

Pozn: N je označení pro vzorky neproteplené (zrání v laboratorních podmínkách) a P je označení pro výsledky vzorků tepelně ošetřených při teplotě 55 °C po dobu 24 hodin v propařovací komoře

Příklad výsledného grafu diferenční termické analýzy je vidět na obr. 39. Jedná se o recepturu 6.4 bez tepelného ošetření.



Obr. 39: Výsledný graf diferenční termické analýzy pro recepturu 6.4 bez tepelného ošetření

U všech křivek jednotlivých receptur došlo ke stejným dějům ve stejném teplotním intervalu. Při teplotě 70 až 200 °C došlo k odpaření fyzikálně vázané vody, při teplotě 450 až 500 °C došlo k rozpadu portlanditu (hydroxidu vápenatého) na oxid vápenatý

za současného odpaření vody a při teplotě 700 až 800 °C (popř. 1000 °C) došlo k rozpadu kalcitu (uhličitanu vápenatého) na oxid vápenatý a oxid uhličitý. Z jednotlivých úbytků hmotností zkoušených vzorků vyplývá, že čím vyšší množství cementu bylo v receptuře navrženo, tím vyšší je množství vzniklého portlanditu a kalcitu a následně tedy i vyšší úbytek hmotnosti vzorku v důsledku rozpadu těchto minerálů.

### 12.2.5 Mikroskopické snímky

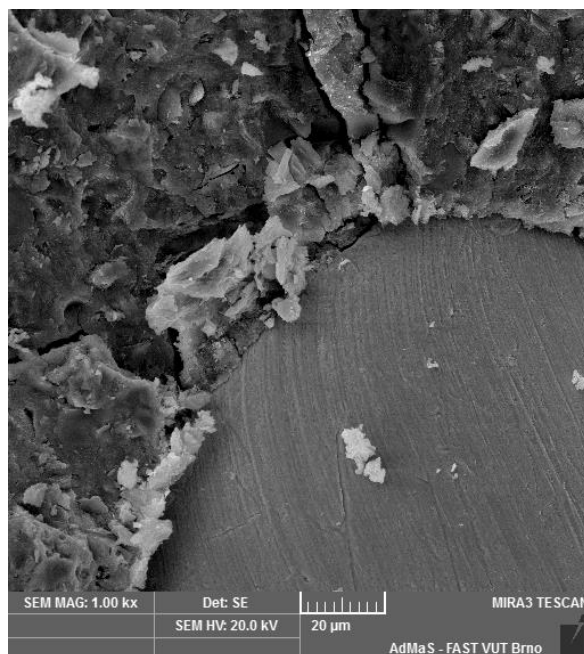
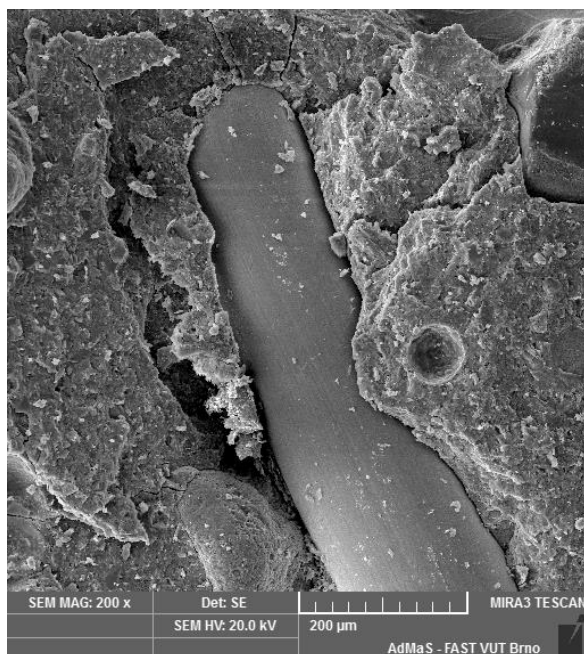
Na závěr experimentální části diplomové práce byl vybrán jeden vzorek, jehož úlomky byly sledovány mikroskopem. Byl vybrán vzorek ze zkušebního tělesa receptury 5.1. po tepelném ošetření v propařovací komoře na 55 °C po dobu 24 hodin. Vzorek této receptury byl zvolen dle dosažených pevností v tahu za ohybu a v tlaku po 60 dnech zrání. Na snímkách je vidět velmi hutná struktura materiálu a velké množství CSH gelů.

Pro sledování mikrostruktury vzorků byl použit rastrovací elektronový mikroskop (SEM) MIRA3 od společnosti TESCAM, který lze vidět na obr. 40. Pro zkoumání byly malé kousky vzorku připraveny do nosiče, který byl následně vložen do vakuovací neboli pozlacovací komory, ve které byly vzorky pozlaceny, a tak bylo možné sledovat jejich mikrostrukturu. Vakuovací (pozlacovací) komoru lze vidět na obr. 41.

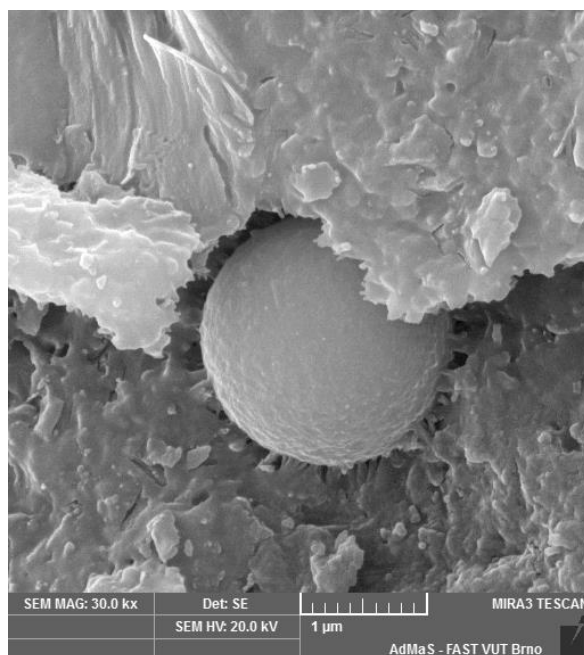
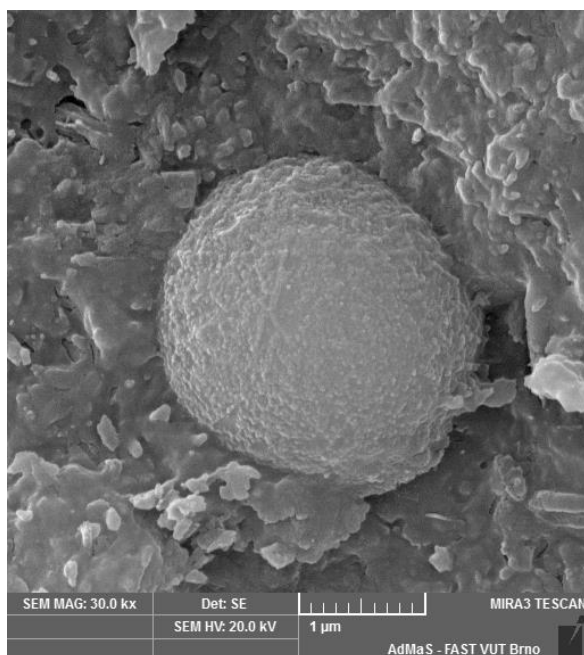


Obr. 40 a 41 (zleva): Rastrovací elektronový mikroskop [83] a vakuovací komora

Na obr. 42 a 43 je vidět propojení ocelového vlákna s cementovou maticí ve struktuře RPC. Díky hutné struktuře materiálu nejsou patrné žádné větší póry kolem drátku, avšak v některých místech jsou vidět velmi malé trhliny, které pravděpodobně vznikly v důsledku zkoušení fyzikálně mechanických vlastností. Na zvětšeném obr. 43 je také vidět kompaktní struktura kompozitu kolem drátku. Na obr. 44 a 45 jsou vidět zrna mikrosiliky a jejich propojení se strukturou kompozitu.

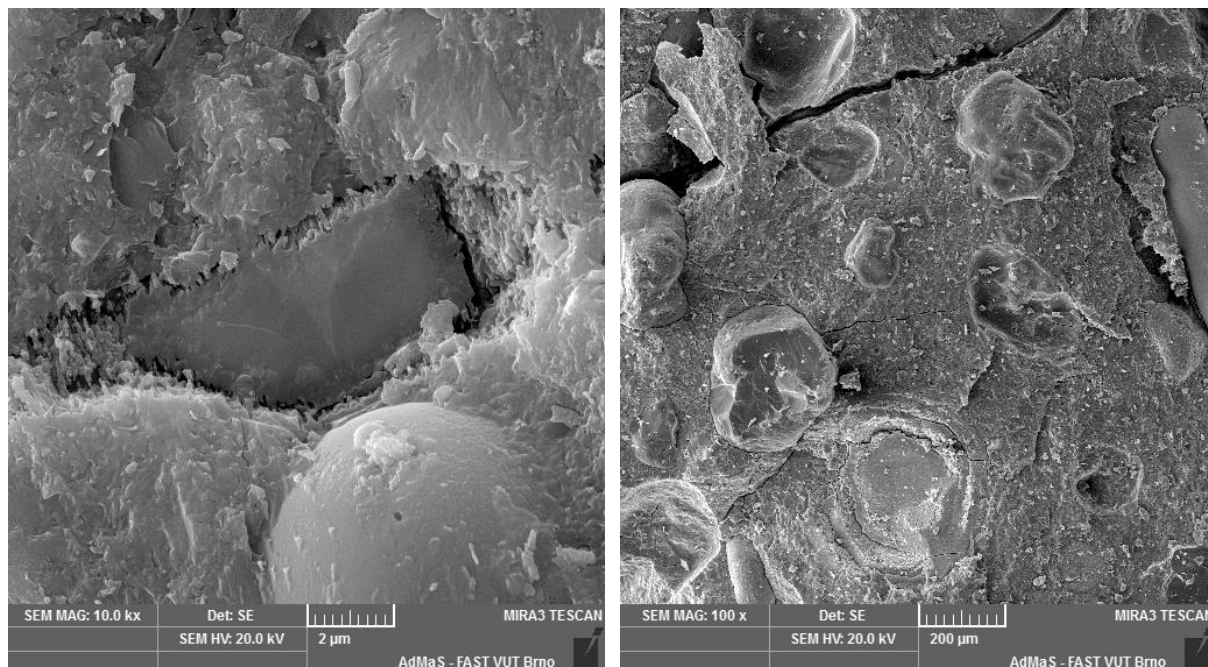


*Obr. 42 a 43: Snímek struktury RPC s ocelovým vláknem*



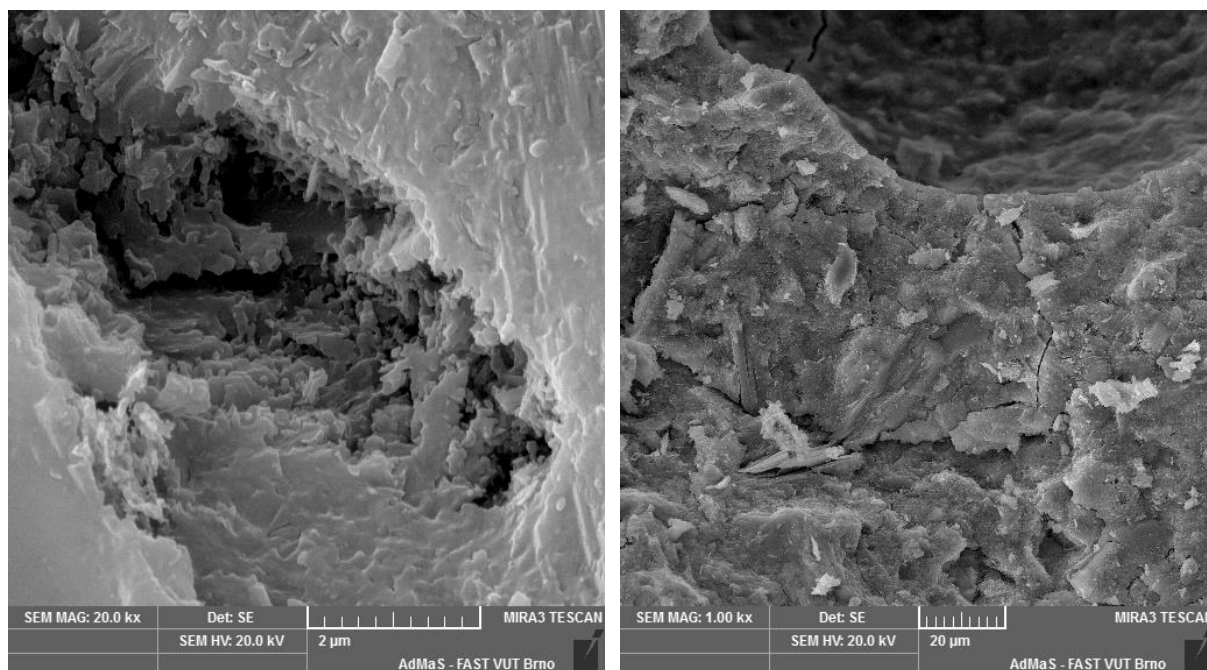
*Obr. 44 a 45: Viditelná zrna mikrosiliky navázané na hutnou strukturu RPC*

Na obr. 46 lze pozorovat nezhydratované zrno cementu obalené hydratačními produkty a na obr. 47 lze vidět hutnou strukturu RPC s viditelnými zrny křemičitého písku s malými trhlinami, které vznikly pravděpodobně během zkoušení fyzikálně mechanických vlastností kompozitu.



*Obr 46 a 47 (zleva): Zrno cementu po částečné hydrataci a hutná struktura RPC s viditelnými zrny plniva*

Na obr. 48 lze vidět pór nepravidelného tvaru, do jehož prostoru dochází k prorůstání hydratačních produktů. Na obr. 49 lze vidět naopak pór jasně kulovitého tvaru o velikosti přibližně 150  $\mu\text{m}$ , kolem něhož jsou vidět malé trhlinky, které vznikly pravděpodobně v důsledku zkoušení fyzikálně mechanických vlastností jako v předchozím případě.



Obr. 48 a 49 (zleva): Snímek póru s prorůstajícími hydratačními produkty a viditelné rozhraní hutné struktury kompozitu s pórem

## 12.3 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Receptury byly navrženy dle získaných poznatků tak, aby obsah pojivých složek byl vyšší než v případě betonu běžných pevností a aby vodní součinitel a dávka superplastifikační přísady nepřesahovaly doporučenou hodnotu. Dále také byla použita pouze jemná frakce kameniva pro dosažení optimální granulometrie materiálu. Vyšší množství mikrosiliky, tj. od 12,5 do 25 % z hmotnosti cementu, mělo zajistit vysoký podíl jemných složek a vyšší množství vzniklých CSH gelů, což vede k vytvoření hutné a pevné struktury s velmi kvalitní tranzitní zónou na rozhraní zrn kameniva. Množství pojivých složek bylo celkem  $950 \text{ kg/m}^3$  pro recepturu 1,  $1000 \text{ kg/m}^3$  pro recepturu 2,  $1150 \text{ kg/m}^3$  pro recepturu 3,  $1200 \text{ kg/m}^3$  pro recepturu 4,  $1350 \text{ kg/m}^3$  pro recepturu 5, a  $1400 \text{ kg/m}^3$  pro recepturu 6.

Vodní součinitel byl předem pevně stanoven na hodnotu 0,2, avšak v průběhu míchání byl dle potřeby upravován. V případě receptur 1 až 4 je jeho konečná hodnota 0,22 a u receptury 5 a 6 je jeho hodnota 0,21. Stejně je to i v případě superplastifikační přísady. Dávka byla stanovena 1,5 % z hmotnosti cementu a v průběhu míchání byla společně s množstvím vody upravována. V případě receptur s vodním součinitelem 0,22 byla dávka superplastifikační přísady 1,7 % a v případě receptur s vodním součinitelem 0,21 byla dávka přísady 1,8 % z hmotnosti cementu. Ve všech případech byla tedy dávka vyšší, než je

doporučené množství výrobcem, avšak pro zamezení zvyšování množství vody v čerstvém RPC bylo nutné dávku přísady zvýšit. V případě receptury 5 a 6, tzn. s nižším množstvím vody a vyšší dávkou superplastifikační přísady oproti ostatním, byly průměrné hodnoty rozlití vyšší pouze o přibližně 10 mm. Na hodnoty objemových hmotností a pevností v tahu za ohybu a v tlaku to však vliv nemělo. Hodnoty rozlití dosahovaly u všech receptur průměrně od 130 do 160 mm. Rozdíly mezi jednotlivými recepturami s jinými frakcemi křemičitého písku byly viditelné na konzistenci čerstvého RPC při jeho zpracování. Směsi s jemnějšími frakcemi byly výrazně lepivější než směsi s hrubšími frakcemi křemičitého písku.

Objemová hmotnost byla ve všech případech porovnatelná. Hodnoty dosahovaly od 2190 do 2340 kg/m<sup>3</sup>. Vzhledem ke zvolené granulometrii RPC byly objemové hmotnosti očekávány vyšší a pravděpodobně mělo na jejich výsledné hodnoty největší vliv nedostatečné zhutnění čerstvého RPC. Což koresponduje následně i s výslednými hodnotami pevností v tlaku zkušebních těles.

U betonů běžných pevností je poměr mezi pevností v tahu za ohybu k pevnosti v tlaku přibližně 1:10. V případě těchto RPC je to přibližně 1:6. Dobrých výsledků pevností v tahu za ohybu bylo dosaženo vyšší dávkou ocelových vláken, která v RPC díky tzv. „efektu měřítka“ působí velice pozitivně na konečné výsledky těchto pevností. Hodnoty se pohybují od 14,2 do 21,6 MPa u vzorků neproteplených a od 11,2 do 21 MPa u protepovaných. Ve vzájemném porovnání všech receptur jsou mezi výslednými pevnostmi v tahu za ohybu velké rozdíly. Ty mohly být způsobeny během výroby, kdy bylo nutné každou sadu těles na zkoušení jednotlivých pevností míchat samostatně z důvodu kapacity míchacího zařízení pro cementovou maltu. Čerstvý RPC byl tedy následně hutněn každý zvlášť a tím mohly vzniknout rozdíly pevností mezi tělesy pro zkoušení pevností po všech dobách zrání. Obecně jsou však hodnoty těchto pevností poměrně vysoké a dle očekávání. Výsledné pevnosti v tlaku očekávaných hodnot nedosáhly. V hodně případech tvořily pevnosti po 7 dnech zrání kolem 90 % pevností po 28 nebo 60 dnech zrání. U proteplených vzorků tvořily pevnosti po 7 dnech od tepelného ošetření přibližně 80 % z pevností po 28 dnech zrání a přibližně 70 % z pevností po 60 dnech zrání. Pevnosti po 28 a 60 dnech byly následně většinou porovnatelné. Zkušební tělesa, která byla ihned po vyrobení proteplena v propařovací komoře při teplotě 55 °C po dobu 24 hodin dosáhla ve většině případech nižších pevností v porovnání se vzorky neproteplenými. Pro dosažení lepších

výsledků byla pravděpodobně zvolena nízká teplota proteplování nebo nevhodný způsob. Vhodnější by bylo použití autoklávu a tím ošetření vzorků za vyšší teploty a zvýšeného tlaku. Vliv jednotlivých frakcí na výsledné pevnosti v tlaku je nepatrný. O trochu nižších výsledků dosáhla zkušební tělesa receptur s použitím křemičitého písku nejhrubší frakce, tj. od 1 do 4 mm. Hodnoty jsou jinak velice srovnatelné. Vysoké množství cementu má pozitivní vliv na hodnoty pevností, ale v tomto případě mezi množstvím 800 a 1200 kg/m<sup>3</sup> není zvýšení pevností patrné. Je to pravděpodobně způsobeno poměrem mezi množstvím cementu a kameniva. Vzhledem k vysokým pevnostem kameniva může snížení množství vést k poklesu výsledných pevností. Obecně by bylo možné vyšších pevností v tlaku pravděpodobně dosáhnout několika způsoby. V první řadě lepším zhutněním, na které mohlo mít vliv kromě samotného způsobu hutnění také složení RPC, jako např. použití kvalitnější superplastifikační přísady nebo jemnějšího cementu. Dále by bylo také vhodné použití křemičitého písku s plynulejší křivkou zrnitosti nebo vhodnější tepelné ošetření čerstvého RPC, ideálně v autoklávu, při kterém by za vyšší teploty došlo k transformaci CSH gelu na tobermorit nebo dokonce na xonotlit, které by vedly ke zvýšení pevnosti a trvanlivosti materiálu.

Rentgenová difrakční analýza prokázala přítomnost některých minerálů. Těmi minerály jsou křemen, který je ve vzorku přítomen v podobě křemičitého písku, popř. v podobě mikrosiliky. Dále pak portlandit vzniklý hydratací portlandského cementu, ettringit vzniklý reakcemi mezi slinkovými minerály, vodou a sádrovcem, který je obsažen v cementu, kalcit jako modifikace vápence a v malém množství nezhydratované slinkové minerály jako trikalciualuminát (brownmillerit) a trikalciumsilikát (alit), které byly zaznamenány z důvodu přítomnosti nezreagovaných zrn cementu. Množství alitu bylo obecně u tepelně ošetřených vzorků nižší než u vzorků neproteplených, což mohlo být způsobeno zrychlenou hydratací vlivem tepelného ošetřování v prostředí se 100% relativní vlhkostí. S rostoucí dávkou cementu v jednotlivých recepturách se mírně zvýšila intenzita píků portlanditu, což se potvrdilo i diferenční termickou analýzou, která přesněji stanovila množství portlanditu ve vzorkách. V případě receptur s dávkou cementu 800 kg/m<sup>3</sup> obsahovaly přibližně 1,5 % portlanditu, receptury s množstvím cementu 1000 kg/m<sup>3</sup> přibližně 2,5 % a receptury s 1200 kg/m<sup>3</sup> cementu kolem 3 % portlanditu. Stejný průběh byl zaznamenán i při rozkladu uhličitánů.

Z mikroskopických snímků, které byly pořízeny lze vidět, že se jedná o hutnou strukturu s velmi plynulou tranzitní zónou na rozhraní jednotlivých složek RPC. Ze snímků je dobře vidět i dobré umístění ocelových vláken ve struktuře a jejich tzv. „efekt měřítka“, díky němuž fungují vlákna v RPC na způsob tyčové výztuže vzhledem ke granulometrii celého materiálu. Viditelná jsou i částečně zhydratovaná zrna cementu nebo zrna mikrosiliky, zaklenutá do jemnozrnné a hutné struktury.

## 13 ZÁVĚR

Téma diplomové práce se zabývalo studiem návrhu a výroby UHPC a RPC kompozitů. Cílem bylo popsat metodiku navrhování s ohledem na požadavky na vlastnosti a druhy vstupních surovin a výroby s ohledem na požadované výsledné vlastnosti, tj. především pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku. To vše bylo následně experimentálně ověřováno.

V teoretické části byla řešena terminologie jednotlivých jemnozrnných kompozitů a požadavky na jejich vlastnosti. Jelikož na tyto typy materiálů nejsou zatím žádné platné legislativní předpisy, poznatky byly získávány především z různých praktických experimentů a výzkumů. Podstatná část teoretické části práce byla věnována samotné metodice. Tzn. požadavkům na složení, tedy kvalitu, druh a množství vstupních surovin a na samotnou výrobu, především způsoby ošetřování čerstvého kompozitu. Část byla také věnována dosavadním realizovaným stavbám z těchto druhů materiálů, které jsou rozšířené především ve světě než u nás.

Na základě získaných poznatků pak byly navrženy první receptury RPC se zaměřením na množství portlandského cementu, které je vyšší než u betonů běžných vlastností, na množství křemičitého úletu, jehož dávka vztažená k množství cementu je také vyšší než u obyčejných betonů a na druh křemičitého písku a velikost jeho zrn. Dále na množství záměsové vody a tím na hodnotu vodního součinitele a na množství superplastifikační přísady. Na míchání čerstvého RPC bylo použito míchací zařízení na výrobu cementové malty a na všech směsích byla stanovena konzistence zkouškou rozlité za pomoci střešacího stolku. Po 7 dnech od výroby zkušebních těles o rozměrech 40 x 40 x 160 mm na nich byla stanovena pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku. Následně pak dle těchto výsledků byly receptury eliminovány na konečné množství a složení. Zkušební tělesa pak byla vyrobena stejným

způsobem pro zkoušení fyzikálně mechanických vlastností po 28 a po 60 dnech zrání. Navíc byly také vyrobeny sady zkušebních těles pro tepelné ošetření při 55 °C po dobu 24 hodin v propařovací komoře. Proteplování čerstvého RPC probíhalo ihned po vyrobení ve formách.

U obou pevností byl zaznamenán poměrně vysoký nárůst počátečních pevností oproti pevnostem konečným. Pevnosti v tlaku po 7 dnech zrání dosahovaly kolem 80 % z konečných pevností, které byly po 28 a po 60 dnech zrání srovnatelné. Pevnosti v tahu za ohybu po 60 dnech zrání dosahovaly průměrné hodnoty 18 MPa a pevnosti v tlaku po 60 dnech zrání dosahovaly průměrné hodnoty 100 MPa, což nesplnilo původní očekávání. Dobré výsledky z hlediska pevností v tahu za ohybu zajistilo vyšší množství ocelových drátků o průměru 0,175 mm a délce 0,6 mm.

Dosažené výsledky vedou k závěru, že vysoké množství cementu vyšších pevností v kombinaci s vyšší dávkou mikrosiliky je nezbytné pro výrobu těchto druhů materiálů. Také bylo zjištěno, že receptury s frakcí křemičitého písku do 4 mm dosáhly podobných výsledků jako receptury s frakcí do 0,5 mm. Zvolený způsob tepelného ošetření se projevil jako nedostačující pro tento typ materiálu. Pro dosažení lepších vlastností by bylo vhodnější použití autoklávu. Klíčovým faktorem ve výrobě RPC kompozitů je dle získaných zkušeností způsob hutnění čerstvého RPC, kdy by mělo být dosaženo co nejvíce hutné struktury s minimálním množstvím pórů, a především dávka a kvalita superplastifikační přísady, která s tím velice souvisí. Správná superplastifikační přísada zajistí vhodnou konzistenci čerstvého RPC bez potřeby zvyšovat vodní součinitel a možnost dostatečného zhutnění.

## 14 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ČSN EN 206. Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. Praha: Český normalizační institut, 2014
- [2] MYŠIČKOVÁ, L. Vlastnosti, zkoušení a využití UHPC v konstrukcích. Brno, 2011. 48 s., 64 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce Ing. Petr Cikrle, Ph.D. (dostupné na: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=54415](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=54415))
- [3] COUFAL R., VÍTEK J.L., PROCHÁZKOVÁ A. Praktická zkušenost s výrobou a dopravou UHPC. In: TBG Metrostav [online]. 2015, č. 2, str. 28 [cit. 2017-10-20]. (dostupné na: [http://www.tbgmetrostav.cz/fileadmin/user\\_upload/napsali\\_o\\_nas/clanky\\_ke\\_stazeni/BETON\\_2-15\\_COUFAL\\_UHPC.PDF](http://www.tbgmetrostav.cz/fileadmin/user_upload/napsali_o_nas/clanky_ke_stazeni/BETON_2-15_COUFAL_UHPC.PDF))
- [4] HELA R., BODNÁROVÁ L. a MARŠÁLOVÁ J. Nové materiály – nové druhy a technologie betonu. Beton: Technologie, konstrukce, sanace. Praha: Česká betonářská společnost. 2003, č.2. s. 58 - 60. ISSN 1213-3116
- [5] VÍTEK, J.L., COUFAL R. Vysokopevnostní betony a UHPC. Betonové konstrukce 21. století, betony s přidanou hodnotou. 2012 (vydáno jako samostatná příloha časopisu Beton TKS), str. 43
- [6] YU R., SPIESZ P., BROUWERS H.J.H. Development of an eco-friendly Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with efficient cement and mineral admixtures uses, Cement and Concrete Composites, Volume 55, January 2015, Pages 383-394, ISSN 0958-9465 (dostupné na: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946514001930>)
- [7] ONDRÁČEK, M. Vývoj vysokopevnostních betonů definovaných vlastností s využitím druhotných surovin: disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Brno, 2013. 153 s. Vedoucí disertační práce: prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

- [8] MATOUŠKOVÁ K. Vliv chemických přísad na průběh hydratačních teplot cementových past. Brno, 2016. 64 s., 13 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Martin Sedlmajer, Ph.D.
- [9] Betonová i zděná inspirace. In: ABS portál [online]. [cit. 2017-12-20]. (dostupné na: <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/materialy-a-vyrobky/beton/betonova-i-zdena-inspirace>)
- [10] Chong Wang, Changhui Yang, Fang Liu, Chaojun Wan, Xincheng Pu, Preparation of Ultra-High Performance Concrete with common technology and materials, Cement and Concrete Composites, Volume 34, Issue 4, April 2012, Pages 538-544, ISSN 0958-9465, (dostupné na: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.11.005>)
- [11] REDA M.M., SHRIVE N.G., GILLOTT J.E. Microstructural investigation of innovative UHPC, Cement and Concrete Research, Volume 29, Issue 3, March 1999, Pages 323-329, ISSN 0008-8846, (dostupné na: [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00225-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00225-7))
- [12] Unikátní látka s nosnou konstrukcí z UHPC v Čelákovících. In: iMateriály [online]. [cit. 2017-12-20]. (dostupné na: [http://imaterialy.dumabyt.cz/rubriky/technologie/unikatni-lavka-s-nosnou-konstrukci-z-uhpc-v-celakovicich\\_42526.html](http://imaterialy.dumabyt.cz/rubriky/technologie/unikatni-lavka-s-nosnou-konstrukci-z-uhpc-v-celakovicich_42526.html))
- [13] MARGOLDOVÁ J. Fasády z UHPC – betonové „závoje“. Betonové konstrukce 21. století, betony s přidanou hodnotou. 2012 (vydáno jako samostatná příloha časopisu Beton TKS), str. 59
- [14] LAFARGE CEMENT JOURNAL [online]. 2013, 10(2) [cit. 2017-12-20]. (dostupné na: [http://www.lafarge.cz/2013\\_02.pdf](http://www.lafarge.cz/2013_02.pdf))
- [15] CHEYREZY M., MARET V., FROUIN L. Microstructural Analysis of RPC (Reactive Powder Concrete), Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 7, pp 1491 - 1500, 1995.
- [16] RICHARD P., CHEYREZY M. Composition of reactive powder concretes, Cement and Concrete Research, Volume 25, Issue 7, 1995, Pages 1501-1511, ISSN 0008-8846, [http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00144-2](http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846(95)00144-2).

- [17] BERNARDI S., CORVEZ D. Ductal: from materials to structures. 2016. Francie. [cit. 2017-12-20]. (dostupné na: [https://conc-nano-struc.sciencesconf.org/data/pages/Bernardi\\_Ductal\\_from\\_materials\\_to\\_structures\\_Gilles\\_Chanvillard\\_s\\_memory\\_2016.07.06.pdf](https://conc-nano-struc.sciencesconf.org/data/pages/Bernardi_Ductal_from_materials_to_structures_Gilles_Chanvillard_s_memory_2016.07.06.pdf))
- [18] KŘÍŽOVÁ K., HELA R.. Lafarge Cement Journal. Ultravysokopevnostní beton pro mostní stavby. 2010, č. 4, s. 10
- [19] Ductal [online]. [cit. 2017-12-20] (dostupné na: <http://www.ductal.com/>)
- [20] Budoucnost ultra vysokopevnostních betonů. In: ABS portál [online]. [cit. 2017-12-20]. (dostupné na: <http://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/materialy-a-vyrobyky/beton/budoucnost-ultra-vysokopevnostnich-betonu>)
- [21] TORREGROSA, E.C. Dosage optimization and bolted connections for UHPFRC ties. Valencie, Spain, 2013. UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
- [22] REBENTROST M., WIGHT G. Experience and Applications of UHPC in Asia - Ultra high performance concrete (UHPC): proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany, March 05-07, 2008. Kassel.
- [23] EGER L. Aktivace příměsí do betonu. Brno, 2012. 88 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
- [24] TICHÝ J., ŠTĚRBA A., TREFIL V. a ŽALUDEK I. Ultravysokopevnostní beton v prefabrikaci. Beton: Technologie, konstrukce, sanace: Energetické a vodohospodářské stavby. Praha: Česká betonářská společnost, 2010, 10(5), 46-49. ISSN 12133116.
- [25] DILS J., TAERWE, L., ed. Influence of Vacuum Mixing, Air Entrainment or Heat Curing on the Properties of Hardened and Fresh (Ultra) High Performance Mortar. Universiteit Gent, 2005.

- [26] Ultravysokohodnotný transportbeton TOPCRETE pro tenkostěnné konstrukce. In: iMateriály [online]. [cit. 2017-12-20]. (dostupné na: [http://imaterialy.dumabyt.cz/rubriky/informace-vyrobcu/ultravysokohodnotny-transportbeton-topcrete-pro-tenkostonne-konstrukce\\_42943.html](http://imaterialy.dumabyt.cz/rubriky/informace-vyrobcu/ultravysokohodnotny-transportbeton-topcrete-pro-tenkostonne-konstrukce_42943.html))
- [27] MOSTOFINEJAD D., NIKOO M.R., HOSSEINI S.A. Determination of optimized mix design and curing conditions of reactive powder concrete (RPC). *Construction and Building Materials*. 2016, x(123), 754-767.
- [28] RICHARD, P., CHEYREZY, M. Composition of reactive powder concretes. *Cement and Concrete Research*. 1995, x(25), 1501-1511.
- [29] Ultra-High Performance Concrete: A State-Of-The-Art Report for The Bridge Community. In: U.S. Department of Transportation: Federal Highway Administration [online]. [cit. 2017-12-20]. (dostupné na: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/hpc/13060/006.cfm#c6a>)
- [30] TAFRAOUI A., ESCADEILLAS G., LEBAILI S., VIDAL T. Metakaolin in the formulation of UHPC, *Construction and Building Materials*, Volume 23, Issue 2, February 2009, Pages 669-674, ISSN 0950-0618. (dostupné na: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061808000676>)
- [31] AÏTCIN, Pierre-Claude. *Vysokohodnotný beton*. 1. české vydání. Praha: ČKAIT, červen 2005, 320 s. *Betonové stavitelství*. ISBN 80-86769-39-9.
- [32] GABKO M. *Reaktivní práškové kompozity (RPC)*. Brno, 2017. 80 s., Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
- [33] Polyfunkční přísady do betonu-principy a možnosti návrhu podle požadavku konkrétní aplikace. In: TERZIJSKI, Ivailo. *Vědecké spisy Vysokého učení technického v Brně*. Brno, 2011, s. 35. ISBN 978-80-214-4331-0. ISSN 1213-418X. (dostupné na: <http://www.vutium.vutbr.cz/tituly/pdf/ukazka/978-80-214-4331-0.pdf>)

- [34] POON, Ch.-S., AZHAR, S., ANSON, M., WONG, Y.-L. Performance of metakaolin concrete at elevated temperatures. Research Center for Advanced Technology in Structural Engineering, Department of Civil and Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, 30 October 2001
- [35] AMBRUZ P. 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.
- [36] Popílek: Odpad. Informační centrum stavebních hmot s využitím odpadů: VUT v Brně, Ústav stavebních hmot a dílců [online]. [cit. 2017-12-20]. (dostupné na: <http://waste.fce.vutbr.cz/Odpad/Popilek.html>)
- [37] ČSN EN 1008. Záměsová voda do betonu – Specifikace pro odběr vzorků, zkoušení a posouzení vhodnosti vody, včetně vody získané při recyklaci v betonárně, jako záměsová voda do betonu. Praha: Český normalizační institut, 2003
- [38] Ultra high performance concrete (UHPC): Guide to manufacturing architectural precast UHPC elements. In: NPCA: National Precast Concrete Association [online]. [cit. 2017-12-20]. (dostupné na: <http://precast.org/wp-content/uploads/2011/05/NPCA-ultra-high-performance-concrete.pdf>)
- [39] První použití UHPC ve formě transportbetonu v ČR. In: TBG Metrostav: Pro lepší stavění [online]. [cit. 2017-12-20]. (dostupné na: [http://www.tbg-metrostav.cz/fileadmin/user\\_upload/napsali\\_o\\_nas/clanky\\_ke\\_stazeni/057\\_059\\_MAT09.pdf](http://www.tbg-metrostav.cz/fileadmin/user_upload/napsali_o_nas/clanky_ke_stazeni/057_059_MAT09.pdf))
- [40] TKACZEWSKA E. Effect of the superplasticizer type on the properties of the fly ash blended cement. Construction and Building Materials. 2014, 18(70), 388–393.
- [41] Beton: Technologie, konstrukce, sanace. Praha: Česká betonářská společnost, 2011, jedenáctý, 1/2011. ISSN 1213-3116.
- [42] RICHARD, P. Reactive Powder Concrete. A new ultrahigh - strength cementitious material. 4th International Symposium on Utilization of High - strength / High performance concrete, Paris, 1996.

- [43] V Čelákovících byla otevřena unikátní lávka. In: TBG Metrostav: Pro lepší stavění [online]. [cit. 2016-05-19]. (dostupné na: [http://www.tbg-metrostav.cz/fileadmin/user\\_upload/napsali\\_o\\_nas/clanky\\_ke\\_stazeni/UHPC\\_lavka.pdf](http://www.tbg-metrostav.cz/fileadmin/user_upload/napsali_o_nas/clanky_ke_stazeni/UHPC_lavka.pdf))
- [44] Českomoravský beton: Příručka technologa BETON. Suroviny – výroba – vlastnosti. 2013, 1. vydání. [cit. 2017-12-20]. (dostupné na: <http://www.betonuniversity.cz/stahnout-soubor?id=1025>)
- [45] HELMI M., HALL M.R., STEVENS L.A., RIGBY S.P. Effects of high-pressure/temperature curing on reactive powder concrete microstructure formation. Construction and Building Materials [online]. 2016, 105, 554-562 [cit. 2017-12-20]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.147. ISSN 09500618. (dostupné na: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061815308187>)
- [46] Effect of Curing Temperature at an Early Age on the Long-Term Strength Development of UHPC. In: <http://www.beton-team.de/> [online]. Germany, 2006 [cit. 2017-12-20]. (dostupné na: <http://www.beton-team.de/imgint/Effect%20of%20Curing%20Temperature%20at%20an%20Early%20Age%20on%20the%20Long-Term%20Strength%20Development%20of%20UHPC.pdf>)
- [47] YAZICI H., DENIZ E., BARADAN B. The effect of autoclave pressure, temperature and duration time on mechanical properties of reactive powder concrete. Construction and Building Materials [online]. 2013, 42, 53-63 [cit. 2017-12-20]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.01.003. ISSN 09500618. (dostupné na: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061813000299>)
- [48] YAZICI H. 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 na: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132306000928>)
- [49] Ultra-vysokopevnostní betony-UHPC. In: TBG Metrostav [online]. [cit. 2017-12-20]. (dostupné na: <http://www.tbg-metrostav.cz/produkty/ultra-vysokopevnostni-betony-uhpc/>)

- [50] CALDARONE, A.M., High-strength concrete a practical guide, Taylor & Francis 2009, ISBN 0-203-96249-4.
- [51] HELA, R., Technologie betonu II - studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia, VUT FAST Brno, 2007
- [52] REBENTROST, Mark a Pavel SMÍŠEK. Reaktivní jemnozrnný beton Ductal® Beton: Technologie, konstrukce, sanace. Praha: Česká betonářská společnost, 2007, č. 5, s. 22-23. ISSN 1213-3116
- [53] Ductal Concrete by Lafarge. In: Concrete decor [online]. [cit. 2017-12-20]. (dostupné na: <https://www.concretedecor.net/decorativeconcretearticles/vol-7-no-3-may-2007/ductal-concrete-by-lafarge/>)
- [54] TICHÝ J., KOMANEC J., SLANSKÝ B., ČÍTEK D., HUBKA M. a KOLÍSKO J. Lávka pro pěší z UHPC přes Opatovický kanál. In: 22. betonářské dny: Sekce ČT2A: Nové technologie. 2015, s. 8. ISBN 978-80-906097-0-9
- [55] PEŘINA J., TICHÝ J. Příprava experimentální stavby z UHPC. In: Centrum pro efektivní a udržitelnou dopravní infrastrukturu [online]. [cit. 2017-12-20]. (dostupné na: [http://www.cesti.cz/technicke\\_listy/tl2013/2013\\_WP3\\_TL3\\_6b.pdf](http://www.cesti.cz/technicke_listy/tl2013/2013_WP3_TL3_6b.pdf))
- [56] Skanska - vývoj receptur ultravysokohodnotného betonu pro použití v prefabrikaci. In: *Stavební noviny* [online]. [cit. 2017-12-20]. (dostupné na: <http://tvstav.cz/clanek/2140-skanska-vyvoj-receptur-ultravysokohodnotneho-betonu-pro-pouziti-v-prefabrikaci>)
- [57] ČDS 2016. Stavby, technologie a inovace. [online]. [cit. 2017-12-20]. (dostupné na: <http://www.top-expo.cz/cds-2016/cena-verejnosti-cds-2016/>)
- [58] Heidelberg cement group. [online]. [cit. 2017-12-20]. (dostupné na: <http://www.heidelbergcement.com/en/elbe-pedestrian-bridge>)
- [59] TICHÝ J., TREFIL V., HUŇKA P.. Výroba tenkostěnných fasádních panelů z bílého UHPC s výztužnou sítí. In: 12. konference, Technologie betonu 2014. 2014. ISBN 978-80-903806-4-6

- [60] Lafarge: Building better cities [online]. [cit. 2017-12-20]. (dostupné na: <http://www.lafarge.com/en>)
- [61] RASHID M.A., MANSUR M.A. Journal of Civil Engineering (IEB), 37 (1) (2009) 53-63
- [62] LU, P., YOUNG J. (1991). Hot Pressed DSP Cement Paste. MRS Proceedings, 245. doi:10.1557/PROC-245-321
- [63] Densit. [online]. [cit. 2017-12-20]. (dostupné na: <http://www.densit.com>)
- [64] Repka, M.: MDF composites AC-PVAI with increased moisture resistance. Brno: Brno University of Technology. Faculty of Chemistry. Institute of Materials Chemistry, 2009. 76 p. Diploma thesis. Supervisor Ing. František Šoukal, Ph.D.
- [65] DRÁBLIK, M, MOJUMDAR S.C., SLADE R.C.T. Prospect of novel macro-defect-free cements for the new millennium. In: s. 68-73. (dostupné na: [http://www.ceramicssilikaty.cz/2002/pdf/2002\\_02\\_068.pdf](http://www.ceramicssilikaty.cz/2002/pdf/2002_02_068.pdf))
- [66] Chotard T] 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.
- [67] 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 na: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061808002687>)
- [67] DONATELLO S., TYRER M., CHEESEMAN C.R. Recent developments in macro-defect-free (MDF) cements, In Construction and Building Materials, Volume 23, Issue 5, 2009, Pages 1761-1767, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.09.001>.
- [68] Chong Wang, Changhui Yang, Fang Liu, Chaojun Wan, Xincheng Pu, Preparation of Ultra-High Performance Concrete with common technology and materials, Cement and Concrete Composites, Volume 34, Issue 4, April 2012, Pages 538-544, ISSN 0958-9465, (dostupné na: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.11.005>)
- [69] Heidelberg cement group. Technický list. Českomoravský cement CEM I 52,5 R Mokrý [online]. [cit. 2017-12-20]. (dostupné na: <http://www.heidelbergcement.cz/cs/cement/volne-lozeny-cement/cemi525r>)

- [70] Sklopísek Střeleč. Technický list. Křemičitý písek. [online]. [cit. 2017-12-20]. (dostupné na: <http://www.glassand.eu/files/Katalog.pdf>)
- [71] ČSN EN 933-1. Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor. Praha: Český normalizační institut, 2012
- [72] Sika. Technický list. Superplastifikační přísada Viscocrete 4035. [cit. 2017-12-20].
- [73] ČSN EN 934-1: Přísady do betonu, malty a injektážní malty – Část 1: Společné požadavky. Praha: Český normalizační institut, 2008
- [74] ČSN EN 934-2: Přísady do betonu, malty a injektážní malty - Část 2: Přísady do betonu - Definice, požadavky, shoda, označování a značení štítkem. Praha: Český normalizační institut, 2008
- [75] GmbH. Technický list. Mikrosilika RW silicium [online]. [cit. 2017-12-20]. (dostupné na: [http://www.silicium.de/fileadmin/user\\_upload/rw-silicium/PDF/Produktspezifikation\\_RWF\\_QSt\\_11.pdf](http://www.silicium.de/fileadmin/user_upload/rw-silicium/PDF/Produktspezifikation_RWF_QSt_11.pdf))
- [76] ČSN EN 14889-1: Vlákna do betonu – Část 1: Ocelová vlákna – Definice, specifikace a shoda. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [77] KrampeHarex. Technický list. Ocelová makrovlákna [online]. [cit. 2017-12-20]. (dostupné na: <https://www.krampeharex.com/de/fasern/produkte/drahtfaser/>)
- [78] ČSN EN 196-1. Metody zkoušení cementu – Část 1: Stanovení pevnosti. Praha: Český normalizační institut, 1996
- [79] ČSN EN 1015-3. Zkušební metody malt pro zdivo – část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešacího stolku). Praha: Český normalizační institut, 2000
- [80] Myoung Sung Choi, Jung Soo Lee, Keum Seong Ryu, Kyung-Taek Koh, Seung Hee Kwon, Estimation of rheological properties of UHPC using mini slump test, Construction and Building Materials, Volume 106, 1 March 2016, Pages 632-639, ISSN 0950-0618. (dostupné na: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061815307777>)

- [81] ČSN EN 12390-5. Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles. Praha: Český normalizační institut, 2009
- [82] ČSN EN 12390-3. Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. Praha: Český normalizační institut, 2009
- [83] Tescan. Performance in nanospace. MIRA 3 [online]. [cit. 2017-12-20]. (dostupné na: <https://www.tescan.com/en-us/technology/sem/mira3>)
- [84] SHI, C., HE, T.-S., ZHANG, G., WANG, X., HU, Y. Effects of superplasticizers on carbonation resistance of concrete, *Construction and Building Materials*, Volume 108, April 2016, 48-55.

## 15 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

*HSC* – Vysokopevnostní beton (High Strength Concrete)

*HPC* – Vysokohodnotný beton (High Performance Concrete)

*VHSC* – Velmi vysokopevnostní beton (Very High Strength Concrete)

*UHSC* – Ultra vysokopevnostní beton (Ultra High Strength Concrete)

*UHPC* – Ultra vysokohodnotný beton (Ultra High Performance Concrete)

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

*RPC* – Reaktivní práškový kompozit (Reactive Powder Composite)

*MDF* – Kompozit omezující vznik makrotrhlin (Macro Defect Free)

*DSP* – Kompozit se zahuštěnou maticí obsahující malé částice (Densified Systems with small Particles)

*ITZ* – Tranzitní zóna (Interfacial Transition Zone)

*SP* – Superplastifikační přísada

*SMF* – Sulfonované melaminformaldehydové kondenzáty

*SNF* – Sulfonované naftalenformaldehydové kondenzáty

*PC* – Estery polykarboxylových kyselin

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

*EN* – Evropská norma

*CEM I* – Portlandský cement

*52,5 R* – Minimální pevnost v tlaku 52,5 MPa po 28 dnech, R – rychlý počáteční nárůst pevností (Rapid)

*CSH* – hydratační produkty (kalcium silikát hydráty)

*XRD* – Rentgenová difrakční analýza

*DTA* – Diferenční termická analýza

*SEM* – Rastrovací elektronový mikroskop