



**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

**ANALÝZA OBJEMOVÝCH ZMĚN CEMENTOVÝCH  
KOMPOZITŮ S OHLEDEM NA OPTIMALIZACI DÁVKOVÁNÍ  
JEMNÝCH SLOŽEK**

ANALYSIS OF VOLUME CHANGES OF CEMENT COMPOSITES WITH RESPECT TO OPTIMIZING  
THE DOSAGE OF FINE COMPONENTS

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

DIPLOMA THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Milan Meruňka**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.**

**BRNO 2020**



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

## FAKULTA STAVEBNÍ

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

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>Student</b>	Bc. Milan Meruňka
<b>Název</b>	Analýza objemových změn cementových kompozitů s ohledem na optimalizaci dávkování jemných složek
<b>Vedoucí práce</b>	Prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
<b>Datum zadání</b>	31. 3. 2019
<b>Datum odevzdání</b>	10. 1. 2020

V Brně dne 31. 3. 2019

---

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

---

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.  
Děkan Fakulty stavební VUT

## PODKLADY A LITERATURA

Databáze internetových vědeckých časopisů Web of science, Scopus a další.  
Zahraniční a tuzemské odborné časopisy a sborníky z vědeckých sympozií.  
Diplomové a disertační práce publikované na FAST VUT v Brně.

## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Objemové změny betonů jsou nevyhnutelným procesem hydratačních pochodů a jejich znalost a predikce jsou nezbytné při výrobě některých specifických konstrukcí betonových staveb. Pro eliminaci objemových změn cementových kompozitů je z hlediska hydratačního procesu výhodné využívat zejména aktivní nebo pasivní příměsí. Díky vhodně navržené skladbě betonové směsi s použitím příměsí lze nejen pozitivně ovlivnit její objemové změny, ale taktéž modifikovat její parametry v čerstvém i zatvrdlém stavu. Dávkování aktivních i pasivních příměsí se dnes však řídí převážně zkušenostmi výrobce betonu, ačkoliv optimalizace jejich dávkování může přinášet další pozitivní dopad z pohledu fyzikálních a mechanických parametrů směsi, ale taktéž z pohledu ekonomiky a ekologie výroby.

V teoretické části diplomové práce sestavte řešerši z odborných publikací o možnosti redukce objemových změn zejména díky využití aktivních nebo pasivních příměsí. Zaměřte se na ovlivnění betonové směsi pomocí příměsí nejen z pohledu objemových změn, ale taktéž z hlediska ovlivnění směsi v čerstvém stavu (reologie, bleeding) a ovlivnění mikrostruktury ve stavu zatvrdlém. Pozornost věnujte zejména dávkování příměsí, jejich kombinacím a optimalizace jejich dávkování při zajištění maximální hutnosti matrice.

V experimentální části diplomové práce navrhnete několik betonů pevnostní třídy C30/37, při konzistenci S4 s využitím nejběžnějších aktivních a pasivních příměsí (vysokopepční struska, vysokoteplotní popílek, jemně mletý vápenec a kamenný filer). Tyto betonové směsi navrhnete vždy pouze s jedním druhem příměsí a z pohledu optimalizace jejich mísení pro zajištění maximální hutnosti v suchém stavu. U všech vyrobených betonů sledujte dopad rozdílného přístupu dávkování jednotlivých příměsí na objemové změny do stáří 60 dní a vybrané mechanické parametry, jako jsou pevnost v tlaku, vodotěsnost, nasákavost a mikrostruktura matrice z pohledu její hutnosti ve stáří 7, 28 a 90 dní. V čerstvém stavu navíc u všech vyrobených směsí sledujte dopad na konzistenci v čase do 90 minut a na odlučivost vody (bleeding).

Předpokládaný rozsah diplomové práce min. 80 stran.

## STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce se zabývá stanovením vlivu maximální hutnosti cementové matrice na objemové změny betonu, vlivu rozdílných příměsí či jejich kombinací na vývoj hydratačních teplot a na odlučivost vody z betonu. V teoretické části práce jsou popsány jednotlivé druhy objemových změn betonů, vliv jednotlivých vstupních složek a minerálních příměsí na odlučivost vody, vývoj hydratačního tepla a mikrostrukturu betonu. Experimentální část je zaměřena na sledování nejen objemových změn betonových směsí vyrobených s použitím různých druhů příměsí či jejich vhodné kombinace do stáří 60 dnů zrání, ale také vlivu jejich použití na vybrané mechanické parametry betonu jako jsou pevnost v tlaku, vodotěsnost, nasákavost nebo odlučivost vody z betonu v jeho čerstvém stavu a sledování změn mikrostruktury z dlouhodobého měřítka zrání směsí.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Objemové změny betonu, smrštění betonu, minimální mezerovitost cementové matrice, maximální hutnost cementové matrice, vývoj hydratačních teplot, mikrostruktura betonu...

## **ABSTRAKT**

The diploma thesis deals with the determination of the influence of the maximum density of the cement matrix on the volume changes of concrete, the influence of different admixtures or their combinations on the development of hydration temperatures and on the water separation of concrete. The theoretical part describes the various types of volume changes of concrete, the effects of individual input components and mineral admixtures on water separation, hydration heat development and concrete microstructure. The experimental part is focused on monitoring not only the volume changes of concrete mixtures made using different types of admixtures or their suitable combination until the age of 60 days of maturation, but also the influence of their use on selected mechanical parameters of concrete such as compressive strength, concrete in its fresh state and monitoring changes in the microstructure from long-term aging mixtures.

## **KEYWORDS**

Volume changes of concrete, shrinkage of concrete, minimum voidsity of cement matrix, maximum density of cement matrix, development of hydration temperatures, microstructure of concrete...

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

Bc. Milan Meruňka, *Analýza objemových změn cementových kompozitů s ohledem na optimalizaci dávkování jemných složek*. Brno, 2020. 118 s., 7 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

## **PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE**

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Analýza objemových změn cementových kompozitů s ohledem na optimalizaci dávkování jemných složek* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 10. 1. 2020

---

Bc. Milan Meruňka  
autor práce

## **PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Analýza objemových změn cementových kompozitů s ohledem na optimalizaci dávkování jemných složek* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 10. 1. 2020

---

Bc. Milan Meruňka  
autor práce

## **PODĚKOVÁNÍ:**

Velké poděkování patří vedoucímu diplomové práce, prof. Ing. Rudolfovi Helovi, CSc. za cenné rady a náměty při vypracování této diplomové práce.

Dále bych rád poděkoval Ing. Martinovi Ťažkému za odbornou pomoc a připomínky k teoretické i praktické části této práce a také všem ostatním pracovníkům vědeckého centra AdMaS, kteří mi byli nápomocni při provádění jednotlivých zkoušek experimentální části a se kterými jsem mohl získané výsledky konzultovat.

Obrovské poděkování patří také přítelkyni a rodině, která mě podporovala po celou dobu mého studia.



## OBSAH:

1	Cíl práce .....	12
2	Úvod .....	13
3	Teoretická část.....	14
3.1	Betonový kompozit .....	14
3.2	Čerstvý beton .....	14
3.2.1	Reologie betonové směsi (konzistence).....	14
3.2.2	Odlučování vody z betonu (bleeding).....	15
3.2.3	Hydratace cementu.....	16
3.3	Ztvrdlý beton .....	19
3.3.1	Objemové změny betonu .....	19
3.3.1.1	Autogenní smršťování – chemické smršťování .....	19
3.3.1.2	Plastické smrštění.....	20
3.3.1.3	Smrštění vysycháním.....	21
3.3.1.4	Karbonatační smrštění.....	22
3.3.1.5	Termální smrštění.....	23
3.3.1.6	Vlivy okolního prostředí na objemové změny .....	24
3.3.1.6.1	Okolní teplota .....	24
3.3.1.6.2	Vlhkost .....	24
3.3.1.6.3	Povětrnostní podmínky.....	25
3.3.2	Pórová struktura cementového kamene.....	25
3.3.2.1	Pórová struktura vs. mechanické parametry kompozitu .....	27
3.3.2.2	Zvyšování hutnosti cementové matrice (packing).....	28
3.3.2.3	Vliv hutnosti mikrostruktury betonu na porozitu betonu .....	29
3.3.2.4	Vliv hutnosti mikrostruktury betonu na průnik chloridových iontů.....	29
3.4	Vliv vstupních surovin na vybrané parametry cementového kompozitu .....	30
3.4.1	Voda.....	31
3.4.1.1	Vliv hodnoty vodního součinitele na odlučivost vody .....	31
3.4.1.2	Vliv hodnoty vodního součinitele na objemové změny betonu.....	32
3.4.1.3	Vliv vody na mikrostrukturu ztvrdlého betonu.....	33
3.4.2	Cement.....	34
3.4.2.1	Značení cementů .....	34
3.4.2.2	Vliv kolísání vlastností cementu na odlučivost vody .....	35
3.4.2.3	Vliv použitého druhu cementu na vývin hydratačního tepla .....	37
3.4.2.4	Vliv jemnosti mletí cementu na objemové změny betonu .....	38
3.4.2.5	Vliv cementu na mikrostrukturu betonu .....	39
3.4.3	Kamenivo .....	39
3.4.3.1	Vliv kameniva na odlučivost vody.....	39
3.4.3.2	Vliv kameniva na objemové změny betonu .....	40
3.4.3.3	Vliv kameniva na vývin hydratačního tepla.....	41
3.4.3.4	Vliv kameniva na mikrostrukturu .....	41
3.4.4	Minerální příměsi .....	42
3.4.4.1	Vysokoteplotní úletový popílek.....	43
3.4.4.1.1	Vliv vysokoteplotního popílku na reologii betonové směsi .....	44
3.4.4.1.2	Vliv vysokoteplotního popílku na odlučivost vody .....	44
3.4.4.1.3	Vliv vysokoteplotního popílku na vývoj hydratačního tepla .....	45
3.4.4.1.4	Vliv vysokoteplotního popílku na objemové změny.....	45
3.4.4.1.5	Vliv vysokoteplotního popílku na mikrostrukturu .....	46

3.4.4.2	Fluidní popílek .....	47
3.4.4.3	Vysokopecní jemně mletá granulovaná struska (VJMGS).....	48
3.4.4.3.1	Vliv VJMGS na odlučivost vody .....	48
3.4.4.3.2	Vliv VJMGS na vývoj hydratačního tepla .....	49
3.4.4.3.3	Vliv VJMGS na objemové změny .....	49
3.4.4.3.4	Vliv VJMGS na mikrostrukturu .....	51
3.4.4.4	Mikromletý vápenec .....	52
3.4.4.4.1	Vliv mikromletého vápence na odlučivost vody .....	52
3.4.4.4.2	Vliv mikromletého vápence na vývin hydratačních teplot.....	52
3.4.4.4.3	Vliv mikromletého vápence na smrštění .....	53
3.4.4.4.4	Vliv mikromletého vápence na mikrostrukturu .....	54
3.4.4.4.5	Vliv mikromletého vápence na mechanické parametry .....	55
3.4.4.5	Kamenný filler (odprašky, moučka).....	56
3.4.4.5.1	Vliv kamenného filleru na odlučivost vody .....	56
3.4.4.5.2	Vliv kamenného filleru na konzistenci, vodonáročnost.....	56
3.4.4.5.3	Vliv kamenné prosívky na mechanické parametry .....	56
3.4.4.5.4	Vliv kamenné prosívky na vývoj hydratačních teplot a objemové změny betonu.....	57
4	Experimentální část.....	59
4.1	Cíl práce.....	59
4.2	Metodika práce.....	60
4.3	Analýza vstupních surovin .....	61
4.3.1	Cement.....	61
4.3.2	Kamenivo .....	61
4.3.3	Voda.....	62
4.3.4	Plastifikační přísada.....	63
4.3.5	Příměsi .....	63
4.4	Stanovení vývoje hydratačních teplot .....	66
4.4.1	Vyhodnocení a diskuze výsledků.....	70
4.5	Návrh složení betonového kompozitu.....	72
4.5.1	Zkoušky čerstvého betonu .....	75
4.5.1.1	Stanovení konzistence a objemové hmotnosti čerstvého betonu .....	75
4.5.1.1.1	Vyhodnocení a diskuze výsledků.....	76
4.5.2	Odlučivost vody z čerstvé betonové směsi tlakovou metodou.....	77
4.5.2.1	Vyhodnocení a diskuze výsledků .....	79
4.5.3	Zkoušky ztvrdlého betonu .....	80
4.5.3.1	Stanovení vodotěsnosti ztvrdlého betonu.....	80
4.5.3.1.1	Vyhodnocení a diskuze výsledků.....	84
4.5.3.2	Stanovení objemových změn betonových směsí.....	88
4.5.3.2.1	Vyhodnocení a diskuze výsledků.....	93
4.5.3.3	Sledování mikrostruktury ztvrdlého betonu .....	95
4.5.3.3.1	Diskuze vyhodnocení výsledků.....	97
4.6	Ekonomické zhodnocení .....	98
4.6.1	Diskuze.....	99
5	Závěr .....	101
6	Fotodokumentace .....	104
7	Seznam použitých zdrojů .....	106
7.1	Použitá literatura .....	106
7.2	Použití právní normy a předpisy .....	109

7.3	Použité zdroje obrázků.....	110
8	Seznam použitých zkratk a symbolů .....	114
9	Seznam obrázků, tabulek, grafů a příloh .....	115
9.1	Seznam obrázků .....	115
9.2	Seznam tabulek.....	116
9.3	Seznam grafů.....	117
9.4	Seznam příloh .....	118

# 1 CÍL PRÁCE

Diplomová práce se zabývá objemovými změnami cementových kompozitů s ohledem na dávkování jemných složek. Cílem práce je zajistit maximální hutnost cementové matrice v suchém stavu za pomoci optimálního dávkování odlišných příměsí či jejich kombinací a stanovit vliv tohoto způsobu dávkování příměsí na objemové změny kompozitu.

Teoretická část práce se zabývá principem smrštění a jednotlivými druhy objemových změn vlivem vstupních surovin na vybrané parametry betonového kompozitu.

V experimentální části diplomové práce bylo navrženo a vyrobeno celkem 14 betonových receptur. Jednotlivé receptury se lišily použitou vstupní příměsí či jejich vzájemnou kombinací s cílem dosažení maximální hutnosti cementové matrice. Podstatné bylo zejména sledování vlivu těchto kombinací na objemové změny betonu. Dále u ztvrdlých betonů byl pozorován vliv různých druhů příměsí a jejich vzájemných kombinací na pevnost betonu v tlaku a jeho vodotěsnost ve stáří 7, 28 a 90 dní. Rovněž byl sledován vývoj nasákavosti betonu ve stáří 7, 28, 90 a 180 dní a možný dopad optimalizace dávkování příměsí na mikrostrukturu betonu, která byla hodnocena z pohledu její pórovitosti. Tato pórovitost kompozitu byla stanovena ve stáří 28, 90 a 180 dní. U čerstvých betonů byl sledován vliv jednotlivých receptur na odlučivost vody z betonu do 15 a 90 minut od zamíchání a také dopad na konzistenci v čase 5, 30, 60 a 90 minut od výroby. Vývoj hydratačních teplot byl z pohledu použitého zařízení měřen na cementových maltách o složení odpovídajícím betonům. Sledování vývoje hydratačních teplot jednotlivých receptur bylo provedeno z pohledu zhodnocení možné spojitosti tohoto parametru s hodnotou a průběhem objemových změn.

Veškeré získané výsledky jsou shrnuty v tabulkách a názorně vyobrazeny pomocí grafů.

## 2 ÚVOD

Pro moderní stavebnictví je beton nepostradatelným materiálem a obecně se řadí mezi nepoužívanější stavební materiál. Jeho základní složkou je cement, který tvoří základ cementové matrice a ovlivňuje téměř veškeré parametry betonové směsi.

Výroba cementu, potažmo portlandského slínku, je ovšem spojena se vznikem velkého množství  $\text{CO}_2$ , který představuje ekologickou zátěž pro celou planetu. Nejen z důvodu snížení škodlivých emisí, ale také z ekonomického hlediska, mnoho firem využívá při výrobě betonových směsí druhotné průmyslové suroviny. Tyto suroviny často vznikají jako vedlejší produkt při výrobě jiného materiálu (například vysokoteplotní popílek nebo vysokopecní struska) a nalezení jejich vhodné uplatnitelnosti je dáno zejména ekonomickým hlediskem, kdy cena těchto surovin bývá zpravidla nižší, než je cena cementu, a proto při optimálním návrhu betonové směsi je možné snížit náklady na jednotku produkce betonové směsi při zachování požadovaných mechanických parametrů. Druhou skutečností je omezení nevhodného skládkování těchto surovin v případě, že jejich uplatnitelnost nedosahuje objemu jejich produkce. Moderní technologie betonu je poté jedním z hlavních spotřebitelů vybraných druhotných surovin a ve většině případů je díky jejich využití dosaženo požadovaného ovlivnění vlastností kompozitu v čerstvém nebo ve ztvrdlém stavu. Použitím vhodných druhotných surovin je například možné eliminovat objemové změny betonu, které nastávají při procesu tuhnutí a zrání betonu.

## **3 TEORETICKÁ ČÁST**

### **3.1 Betonový kompozit**

Beton je umělý kompozitní materiál skládající se z pojiva, plniva, vody, vzduchu a případně přísad či příměsí. Nejčastěji používaným pojivem bývá portlandský cement, který společně s vodou, případně přísadou a příměsí vytváří cementovou pastu. Plnivem je nejčastěji anorganický zrnitý materiál nazývaný kamenivem, který může být přírodního původu, uměle vyrobený či recyklovaný. [5]

Dle základní betonářské normy ČSN EN 206+A1 [N1] jsou rozlišovány dva stavy betonu. Beton čerstvý, což je beton, který je zcela zamíchán a je stále ve stavu umožňující zhutnění zvoleným způsobem a beton ztvrdlý, což je beton, který je již v pevném stavu a vykazuje určitou pevnost.

### **3.2 Čerstvý beton**

Mezi nejdůležitější vlastnosti čerstvého betonu je jeho schopnost zpracovatelnosti dle zvoleného způsobu. Tento požadavek je úzce spjat se stupněm konzistence betonu či jeho schopností čerpatelnosti, která souvisí s návrhem kompozitu z pohledu pojivové i plnivové báze. Dále je od tohoto materiálu očekávána minimální segregace, neboli oddělování některých složek betonu (např. hrubého kameniva) od zbytku kompozitu a odolnost vůči odlučivosti vody z betonu (krvácení, bleeding). Očekává se také maximální homogenita betonové směsi. [32]

Nejen nevhodným návrhem betonové směsi, ale také nevhodným způsobem ukládání do konstrukce či snižováním viskozity betonové směsi neodborným přidavkem vody do betonu je možné způsobit velké množství vad či poruch výsledného díla a snížit tak i předpokládanou životnost celé konstrukce.

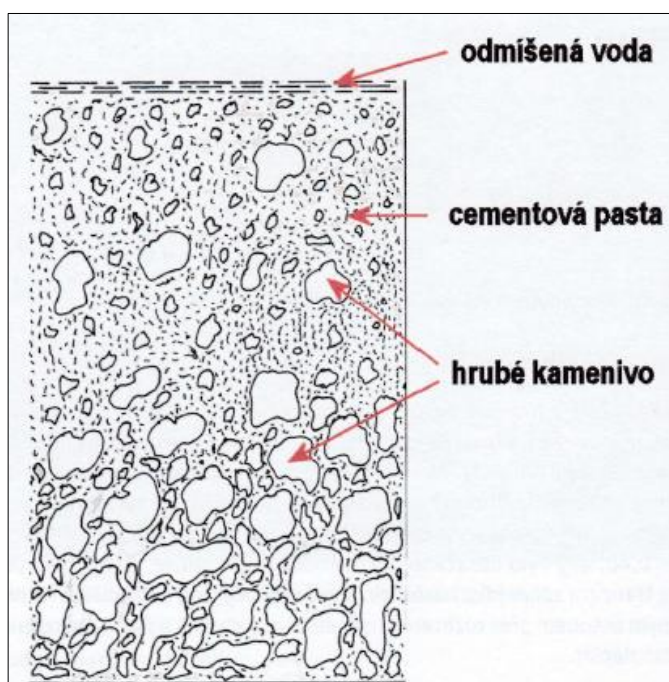
#### **3.2.1 Reologie betonové směsi (konzistence)**

Reologie je věda zabývající se deformací a tokem hmoty. V případě čerstvé betonové směsi se nejčastěji hovoří o konzistenci, což je schopnost

odporovat přetváření čerstvého betonu při působení vnějších sil. Konzistence betonové směsi je z pohledu normativních dokumentů možné stanovit několika odlišnými způsoby a jejich výběr je obecně dán vyrobenou konzistencí kompozitu. Největší produkci betonové směsi zabezpečuje tzv. transportbeton, jehož konzistence se nejčastěji stanovuje zkouškou sednutí kužele [N4], případně sednutí-rozlítím u samozhutnitelných betonů. Méně obvyklou zkouškou konzistence u transportbetonu bývá zkouška rozlítím [N20]. V případě prefabrikované výroby se poté využívá zkouška VeBe [N18] či stupeň zhutnitelnosti [N19].

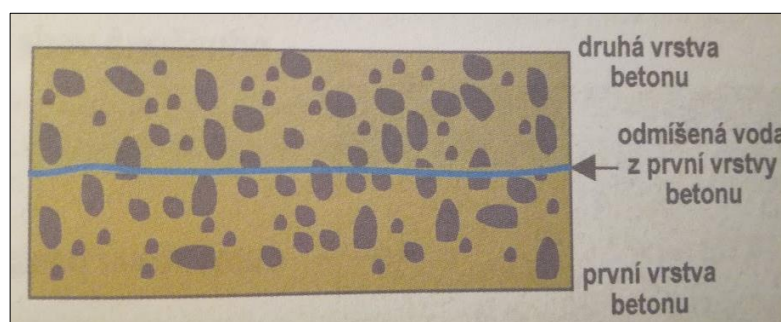
### 3.2.2 Odlučování vody z betonu (bleeding)

Odlučování vody z betonu je způsobeno usazováním kameniva v průběhu hutnění betonové směsi vlivem gravitace. Obrázek 1 znázorňuje, jak kamenivo větší frakce klesá níže a voda, jakožto základní složka betonu s nejnižší objemovou hmotností, je kapilárami vytlačována na povrch betonu, kde se shromažďuje a společně s vytlačeným cementovým tmelem tvoří cementovou pastu s vysokým vodním součinitelem, která má velmi nízké mechanické parametry. [9]



Obr. 1: Schématické znázornění segregace betonu [O15]

Problémy také mohou nastat v případě, kdy je beton ukládán ve více vrstvách, což je typické pro mohutnější konstrukce, například nosné mostní konstrukce nebo velké celky vodohospodářských staveb. U jednotlivých vrstev dochází k rozdílnému počátku tuhnutí či tvrdnutí betonu a na jejich povrchu se může hromadit odloučená voda, což snižuje přilnavost jednotlivých vrstev. Z toho důvodu je nutno zajistit provibrování horní vrstvy betonu s vrstvou betonu předcházející, čímž bude dosaženo homogennějšího rozložení odloučené vody, viz obr. 2. [9]



Obr. 2: Dělicí rovina mezi jednotlivými vrstvami betonu [O15]

Omezení odlučování vody z betonové směsi lze provést optimalizací složení betonové směsi, například použitím vhodné superplastifikační přísady, která sníží celkové množství vody v betonové směsi, případně použitím vhodných příměsí. Účinky jednotlivých příměsí na odlučivost vody z betonu budou rozebrány v dalších kapitolách této práce. Neméně důležité je věnovat pozornost použitému druhu kameniva a jeho skladbě. Obecně je poté normativními předpisy pro konstrukce, kde je kladen zvýšený důraz na nízký stupeň odlučivosti vody, dána minimální hodnota jemných složek do 0,125 mm, která lze obecně naplnit dávkou pojivového systému nebo dávkou nejjemnější frakce použitého kameniva.

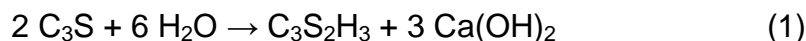
### 3.2.3 Hydratace cementu

Beton tuhne a tvrdne v důsledku hydratace cementu, což je souhrn chemických reakcí, díky kterým beton ztrácí zpracovatelnost.

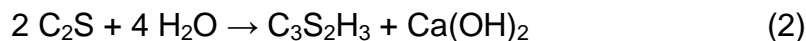
Hydratace jednotlivých slínekových minerálů probíhají dle následujících rovnic: [11]



a) Hydratace trikalciomsilikátu (alitu):



b) Hydratace dikalciomsilikátu (belitu):



c) Hydratace trikalciumaluminátu:

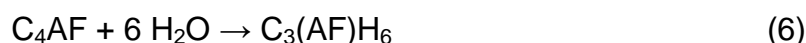
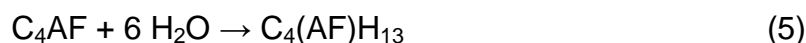


$\text{C}_4\text{AH}_{13}$  – vzniká za normálních podmínek

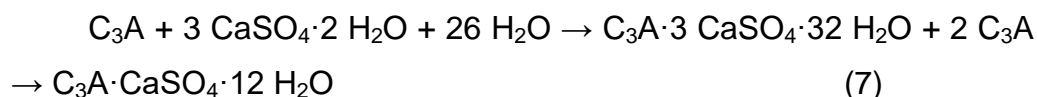


$\text{C}_3\text{AH}_6$  – vznik konverzí z  $\text{C}_4\text{AH}_{13}$  za desítky let

d) Hydratace tetraalkiumaluminátferitu (brownmilleritu):



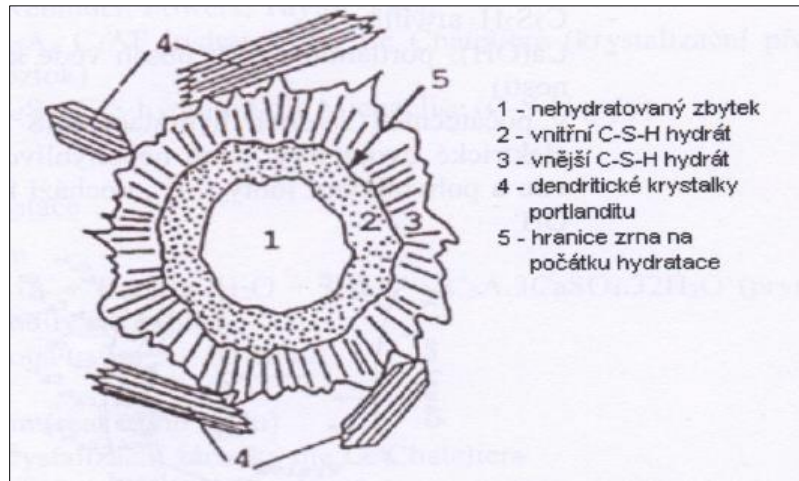
e) Hydratace za přítomnosti sádrovce



Hydratace cementu se rozděluje dle teorie Verneta do několika stadií: [10]

1. **Smíchání s vodou** – Dochází k uvolňování iontů z různých fází portlandského cementu do roztoku. Proces nastává v průběhu 10 - 15 minut a dochází k rychlému uvolňování hydratačního tepla. Povrch částic cementu se začíná pokrývat hydratovaným CSH gelem a primárním ettringitem. [10]
2. **Indukční perioda** – Zvyšující se hodnota pH a koncentrace  $\text{Ca}^{2+}$  iontů v záměsové vodě snižuje společně s hydráty vytvořenými na povrchu částic rozpustnost fází portlandského slínku. Vývin hydratačního tepla se značně zpomaluje a vytváří se malé množství CSH gelu. V průběhu této periody se záměsová voda stane nasyceným roztokem  $\text{Ca}^{2+}$ , přesto nedochází ke vzniku portlanditu  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , pravděpodobně z důvodu nízké rychlosti tvorby krystalizačních zárodků v porovnání s konkurenční tvorbou CSH gelu. [10]
3. **Počátek tuhnutí** – Hydratace je na konci indukční periody aktivována snížením koncentrace  $\text{Ca}^{2+}$  iontů v roztoku vznikem portlanditu. Náhlé

snížení koncentrace  $\text{Ca}^{2+}$  a  $\text{OH}^-$  iontů nastartuje rozpouštění všech fází portlandského cementu. Vývoj tepla se nejdříve pomalu zrychlí, protože část se spotřebuje na vznik portlanditu, a poté se rychlost vývoje hydratačního tepla zvyšuje. Hydrátové silikátové a aluminátové fáze portlandského slínku začínají mezi částicemi vytvářet vazby, jejichž následkem je tuhnutí cementové pasty. [10]



Obr. 3: Schématické znázornění hydratovaného zrna cementu [07]

4. **Tvrdnutí** – Protože portlandské cementy neobsahují takové množství síranu vápenatého, aby došlo k reakci s veškerými aluminátovými fázemi portlandského slínku, dochází tedy v průběhu indukční periody k vyčerpání  $\text{SO}_4^{2-}$  iontů, většinou po 9 – 15 hodinách od smíchání cementu s vodou. Zároveň dochází k rekrystalizaci ettringitu za vzniku monosulfátu. Hydratační produkty utvořené v průběhu prvních stádií jsou označovány jako „vnější produkt“, neboť rostou ze zrn cementu ven, do mezer mezi nimi a vytváří porézní a volnou síť vláknitého CSH gelu, jehliček ettringitu, destiček monosulfátu a krystalků portlanditu. [10]
5. **Zpomalení hydratace** – Zrna jednotlivých fází slínku jsou pokryta vrstvou hydrátu, která je stále silnější, proto molekuly vody stále obtížněji pronikají touto vrstvou k nehydratovaným částicím slínku. Hydratace portlandského cementu je ukončena, pokud se v systému nenachází žádná zhydratovaná fáze nebo ve chvíli, kdy již voda nemůže proniknout k nehydratovaným částicím či v systému již není

žádná volná voda, například u betonu s nízkou hodnotou vodního součinitele. [10]

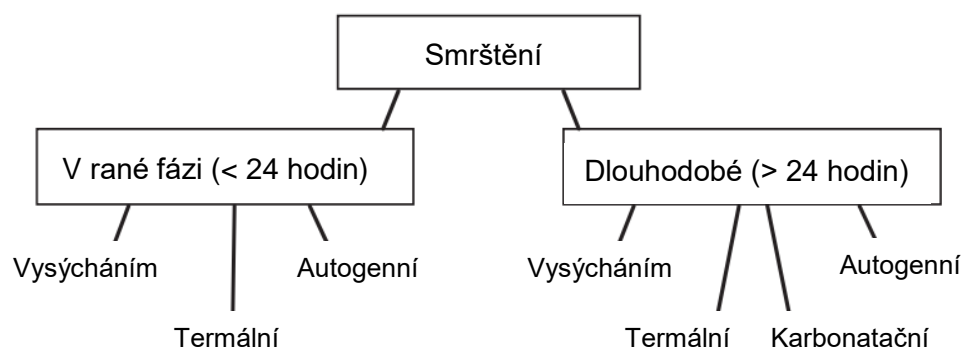
### 3.3 Ztvrdlý beton

Dle ČSN EN 206+A1 [N1] se za ztvrdlý beton považuje beton v pevném stavu s určitou pevností. Ta se všeobecně stanovuje na základě výsledků zkoušek provedených na zkušebních tělesech. Tím mohou být zkušební krychle o hraně 150 mm či válce o průměru 150 mm a výšce 300 mm odebrané dle ČSN EN 12350-1 [N5] a následně ošetřovány dle ČSN EN 12390-2 [N6].

#### 3.3.1 Objemové změny betonu

Při hydrataci slínekových minerálů dochází k objemovým změnám betonu, přičemž tyto změny nazýváme smrštěním a jsou způsobeny několika vzájemně propojenými procesy. Již při chemické reakci cementu s vodou dochází k prvním objemovým změnám. Kapilární jevy způsobují úbytek vody v krystalové mřížce minerálů a dle napětí vodních par okolního prostředí nastává migrace vlhkosti mezi jednotlivými, různě velkými póry. Vlivem kapilárních sil dochází ke smršťování cementové matrice a stlačování povrchu zrn kameniva. [1][2]

Obrázek č. 4 znázorňuje jednotlivé druhy objemových změn dle časového období, ve kterém nastávají.



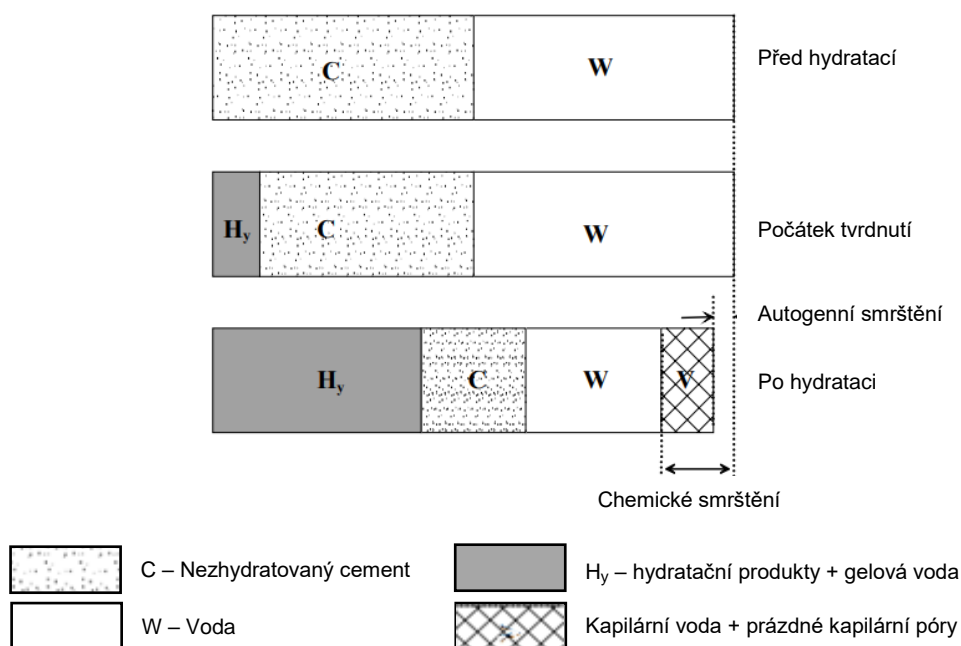
Obr. 4: Rozdělení objemových změn dle časového hlediska [O2]

##### 3.3.1.1 Autogenní smršťování – chemické smršťování

Autogenní smršťování betonu a cementové pasty je definováno jako makroskopická změna objemu, při které nedochází k migraci vlhkosti na vnější

okolní prostředí a nastává během prvních pár hodin po smíchání cementu s vodou. Je to důsledek chemického smrštění, při kterém hlavní slínkové minerály ( $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$  a  $C_4AF$ ) reagují s vodou za vzniku CSH gelu. Výsledkem chemických reakcí jsou produkty s nižším objemem, jak znázorňuje obr. 5. [3]

Autogenní smrštění je nejintenzivnější v prvních 7 dnech zrání a dle hodnoty vodního součinitele může dosáhnout smrštění až 0,9 mm/m. [4]

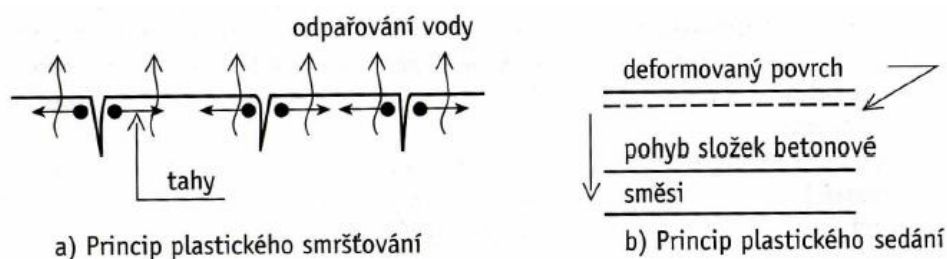


Obr. 5: Objemové složky autogenního smrštění [O1]

### 3.3.1.2 Plastické smrštění

Plastické smrštění nastává u betonu, který je stále ještě v plastickém stavu, tedy přibližně do 10 – 12 hodin od uložení do konstrukce a z jehož povrchu se může odpařovat voda. Pevnost betonu v důsledku hydratace cementu ještě není natolik dostatečná, aby byl beton schopný odolávat objemovým změnám z důvodu plastického smrštění a plastického sedání. Tyto jevy se liší svým mechanismem. Při plastickém smršťování dochází k rychlému odpařování vody z plastické hmoty, čímž vznikají smykové a tahové síly. Tahová pevnost betonu v plastickém stavu je nižší než vzniklé síly, čímž dojde k tvorbě mikrotrhlin na povrchu konstrukce. Tyto trhliny mohou u staveb vystavených proměnlivým klimatickým podmínkám značně zkrátit jejich životnost. [4]

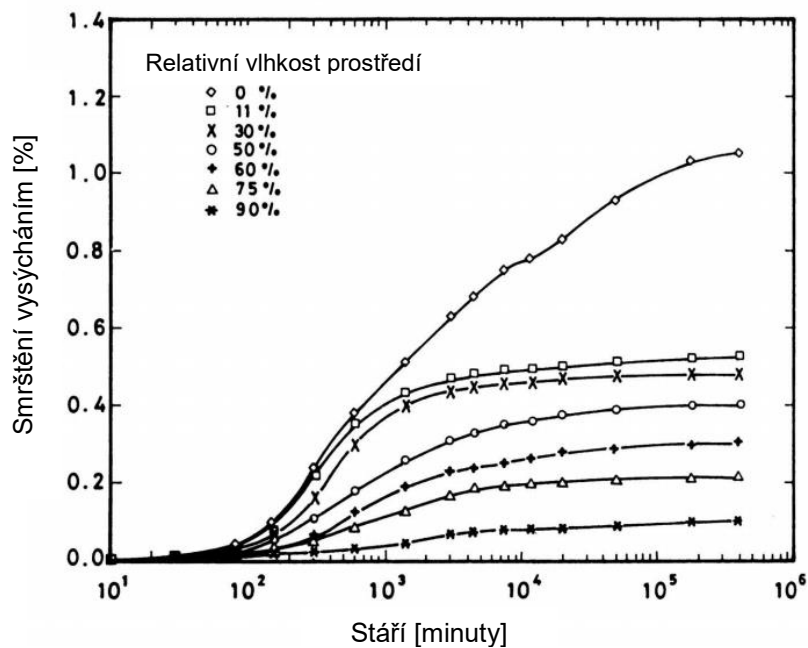
V případě plastického sedání dochází k pohybu cementového tmele a kameniva ve ztuhlém betonu, čímž se zvýrazňují trhliny od plastického smrštění. V případě nevyztužených deskových konstrukcí o stejné konstrukční výšce dochází k rovnoměrnému poklesu povrchu, což nezpůsobí žádné viditelné změny. V případě změny tloušťky průřezu betonové desky se rozdílné plastické sedání projeví vznikem trhlin či deformací povrchu. V případě vyztužení konstrukce dochází ke vzniku trhlin, které horní výztuž obejdou a pokračují i pod výztuží. Na plastickém sedání se nejvíce podílí změna tloušťky zhotovované konstrukce, hodnota vodního součinitele a také hutnost uloženého betonu. [4]



Obr. 6: Princip plastického smršťování a plastického sedání [O16]

### 3.3.1.3 Smrštění vysycháním

Smrštění vysycháním nastává v případě, kdy relativní vlhkost okolního prostředí již ztuhlého betonu klesne pod 100 %. Voda migruje z větších pórů či kapilár do okolního prostředí do té doby, dokud nenastane rovnováha mezi obsahem vlhkosti v betonu a jeho okolním prostředím. Čím větší je množství vody, které se v průběhu vysychání uvolní do okolního prostředí, tím větší deformace se vyvolávají, jak demonstruje experiment znázornění na obr. 7. Almudaiheem provedl měření, které probíhalo na cementové pastě se shodnou hodnotou vodního součinitele 0,6. Nejnižší hodnoty smrštění vykazovala cementová pasta uložená v prostředí s relativní vlhkostí vzduchu 90 % a naopak nejvyšší hodnoty smrštění vykazovala cementová pasta uložená v prostředí s nulovou vlhkostí. [36]

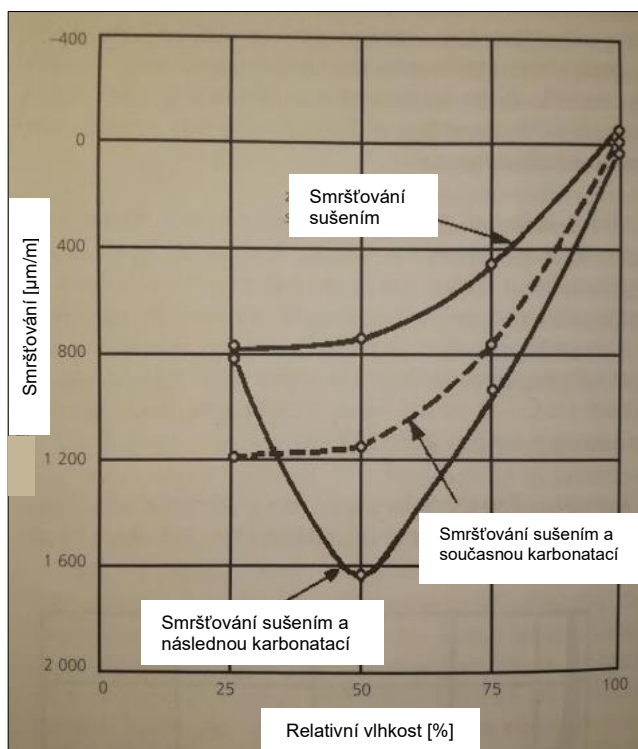


Obr. 7: Závislost smrštění na relativní vlhkosti okolního prostředí [O5]

### 3.3.1.4 Karbonatační smrštění

Karbonatační smrštění je výsledkem dlouhodobé reakce mezi vzdušným oxidem uhličitým a hydroxidem vápenatým. Běžná koncentrace  $\text{CO}_2$  v ovzduší se pohybuje okolo 0,03 %. [5]

Obrázek č. 8 znázorňuje intenzitu karbonatačního smrštění. Při vysoké relativní vlhkosti okolního prostředí je karbonatace betonu nízká, protože pórový systém betonu je zaplněný vodou a oxid uhličitý nemůže dobře pronikat do cementové pasty. Naopak při velmi nízké relativní vlhkosti okolního vzduchu je v pórovém systému betonu nedostatečné množství vody pro reakci s  $\text{CO}_2$  za vzniku  $\text{H}_2\text{CO}_3$ , což způsobuje zpomalení karbonatačního smrštění. Nejintenzivnější průběh toho smrštění probíhá v prostředí s relativní vlhkostí okolního prostředí okolo 50 %, tedy v době, kdy se v pórovém systému betonu nachází dostatečné množství vody pro reakci a zároveň dostatečný prostor pro průnik  $\text{CO}_2$ . Karbonatační smrštění je větší, pokud nastává po vysušení než smrštění, které nastává při současném sušení. [5]



Obr. 8: Vliv sušení a karbonatace na smršťování cementové malty [O15]

### 3.3.1.5 Termální smrštění

Již ztvrdlý beton neustále mění své rozměry v konstrukci vlivem měnících se teplot. Při klesající teplotě dochází k poklesu objemu betonu, hovoří se tedy o smršťování, se zvyšujícími se teplotami dochází k rozpínání betonu. Teplotní změny vyvolávají v konstrukcích napětí, která mohou být v extrémních případech nebezpečná a mohou vést k poškození konstrukce. [7]

Změna délky se dá vyjádřit vztahem: [8]

$$\Delta l_t = \alpha \cdot l_t \cdot \Delta T \quad (8)$$

kde:  $\Delta l_t$  – délková změna konstrukce

$\alpha$  – součinitel délkové teplotní roztažnosti (beton  $10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ;  
ocel  $12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ )

$l_t$  – původní délka konstrukce

$\Delta T$  – změna teploty [K]

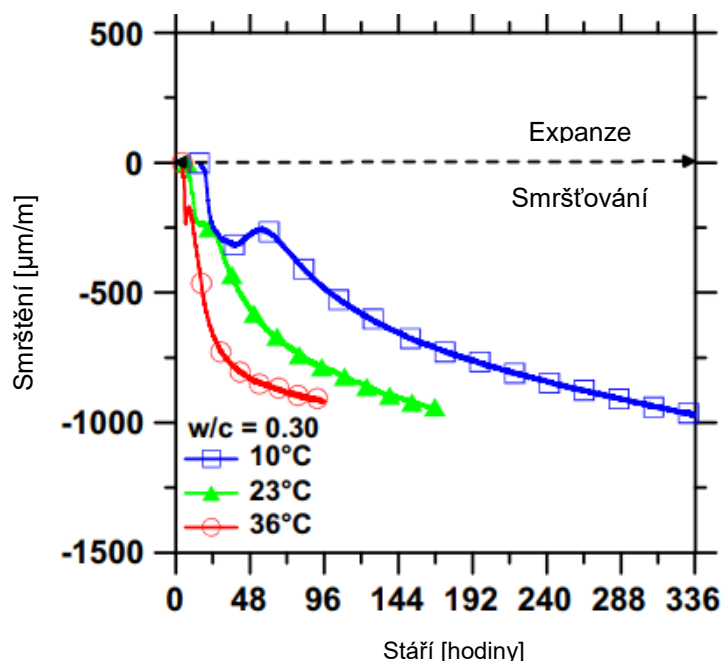
### 3.3.1.6 Vlivy okolního prostředí na objemové změny

Velikost objemových změn je ve velké míře závislá na podmínkách okolního prostředí, neboť dochází k rychlejšímu odpařování vody z betonové směsi.

#### 3.3.1.6.1 Okolní teplota

Bylo prokázáno, že smrštění cementové pasty se urychluje se vzrůstající teplotou okolního prostředí. Vzrůstá rychlost odpařování záměsové vody z betonu a také dochází k urychlení hydratace cementu.

Na obrázku č. 9 je znázorněn průběh smrštění cementové pasty se shodným vodním součinitelem při různých teplotách okolního prostředí. Při teplotě okolního prostředí 10 °C trvalo více než 3krát delší dobu dosažení stejné hodnoty smrštění, než při teplotě okolního prostředí 36 °C, což může být způsobeno právě pomalejší hydratací cementu v cementové pastě a pomalejším odpařováním vody ze směsi. [8]



Obr. 9: Vliv okolní teploty na velikost a rychlost smrštění cementové pasty [O3]

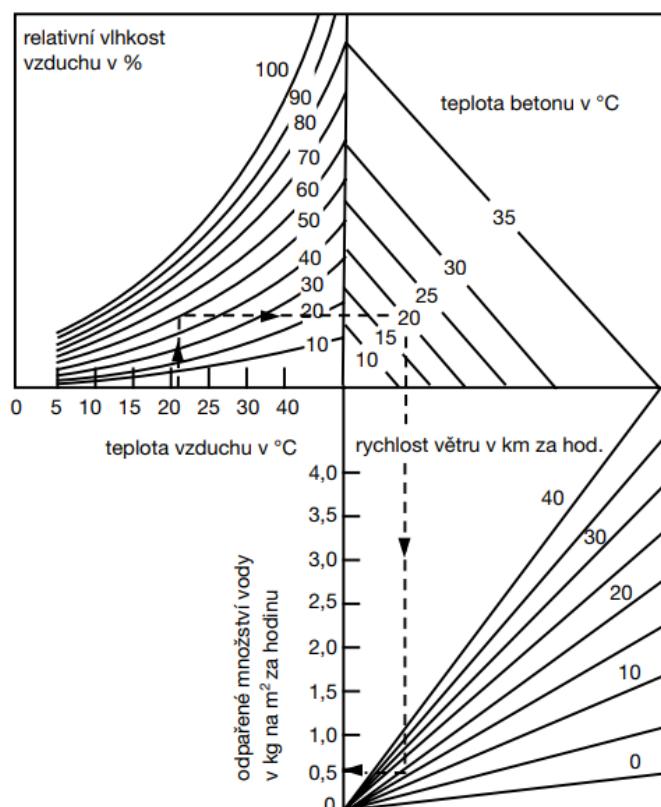
#### 3.3.1.6.2 Vlhkost

S ubývajícím relativní vlhkostí okolního prostředí se zvyšuje rychlost odpařování vody obsažené v betonové směsi, což vede ke zvyšování a urychlování smršťování, jak již bylo znázorněno na obr. 7.



### 3.3.1.6.3 Povětrnostní podmínky

Vlivem působení větru či průvanu dochází k urychlení odpařování vody z betonové konstrukce. Tento faktor představuje největší riziko v období plastického smrštění. Beton se nachází v plastickém stavu a má nižší tahovou pevnost, než jsou síly vzniklé od vypařování vody. Ve většině takových případů se projeví na povrchu konstrukce mikrotrhlínky, které mohou snížit celkovou životnost konstrukce z důvodu snazšího pronikání škodlivých plynů, chloridových iontů či vody do struktury kompozitu.



Obr. 10: Vliv okolních podmínek na rychlost odpařování vody z betonu [O11]

### 3.3.2 Pórová struktura cementového kamene

Beton je pórovitým materiálem a nejen velikost, ale i množství pórů ovlivňuje jeho vlastnosti, například pevnost v tlaku, modul pružnosti i trvanlivost. Póry betonového kompozitu rozdělujeme do 5-ti skupin, dle jejich vzniku či charakteru: [9]

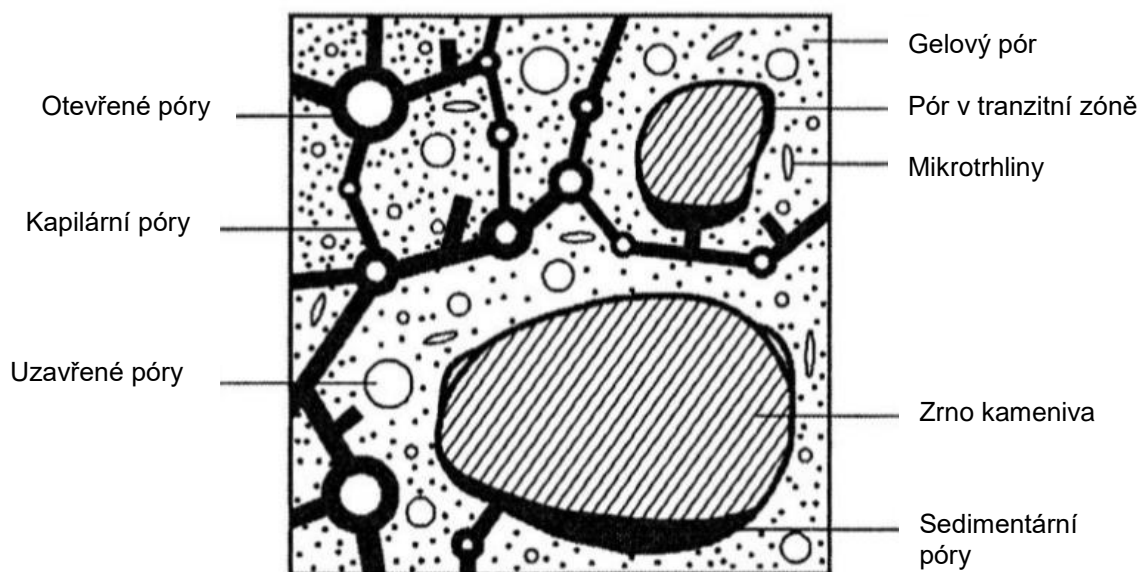
- 1) Póry, které vznikly nedokonalým zpracováním či hutněním betonové směsi, přičemž nedošlo k dokonalému vytlačení vzduchu například z konstrukce bednění. Důsledkem jsou makrodutiny (kaverny), které jsou

ve špatně zhutněném betonu zastoupeny ve velké míře. Mají velmi špatný vliv na mechanické parametry betonu, jeho trvanlivost a v případě pohledového betonu se považují za vadu. [9]



*Obr. 11: Kaverna vzniklá nedokonalým zhutněním betonové směsi [O27]*

- 2) Póry přítomné v zrnech kameniva, například v lehkém kamenivu. Důsledkem těchto pórů je růst tepelně izolačních vlastností, zároveň ale také klesají jeho mechanické parametry. [9]
- 3) Uzavřené póry o velikosti 100 – 300  $\mu\text{m}$ , které lze pozorovat optickým mikroskopem. Tyto póry vznikají v důsledku použití provzdušňovací přísady, která se nejčastěji používá z důvodu zvýšení mrazuvzdornosti betonu. Při působení vody na tento beton dojde k zaplnění přibližně 60 % objemu póru a při působení záporných teplot má voda stále prostor pro fázovou přeměnu na led, aniž by výrazně snížila mechanické parametry směsi. [9]



Obr. 12: Schéma pórové struktury betonového kompozitu [O28]

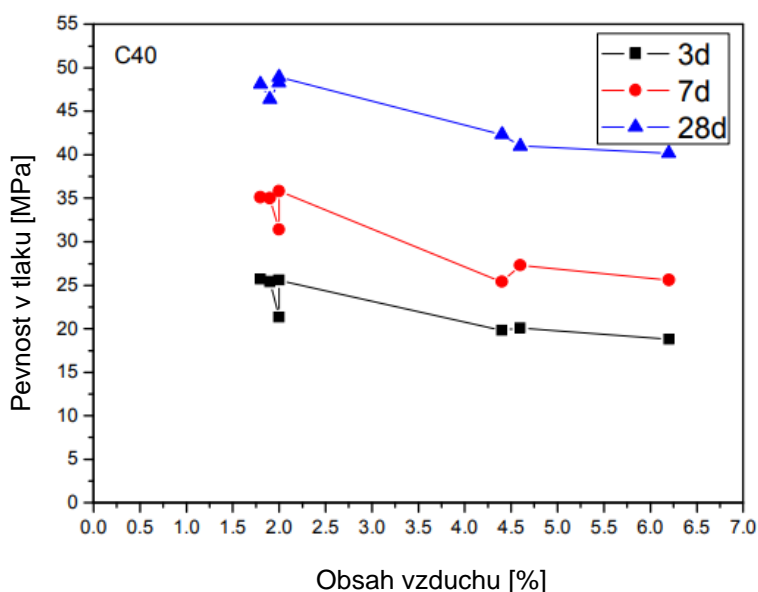
- 4) Kapilární póry, které vznikají mezi zrny hydratujícího cementu. Mají nepravidelný tvar a velikost přibližně 0,1 – 10  $\mu\text{m}$ , takže mohou být přesně sledovány pouze pomocí elektronového mikroskopu. Množství těchto pórů je závislé na hodnotě vodního součinitele a stupni hydratace cementu. [9]
- 5) Gelové póry jsou nanopóry o velikosti 1 - 10 nm, z toho důvodu se dají zjistit nepřímo, například metodou adsorpce dusíku. Voda je fyzikálními silami vázaná na strukturu CSH gelů. [9]

Kapaliny mohou pórovitým materiálem procházet v případě, když jsou veškeré kapiláry propojeny. Beton má nespojitou pórovitost, a proto může odolávat průsaku tlakové vody. Závisí ovšem nejen na množství pórů, ale také stupni hydratace, hodnotě vodního součinitele a způsobu ošetřování.

### 3.3.2.1 Pórová struktura vs. mechanické parametry kompozitu

Pórová struktura betonového kompozitu se velkou mírou podílí na jeho mechanických a trvanlivostních parametrech. Závisí na velikosti pórů, jejich tvaru i skutečnosti, zda se jedná o otevřené či uzavřené póry, prázdné či zaplněné kapalinou.

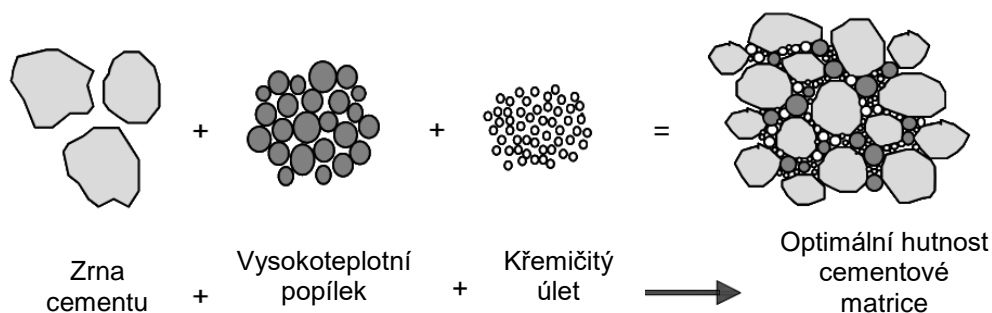
S přibývajícím obsahem vzduchu v čerstvém betonu dochází k poklesu mechanických parametrů. Kolektiv autorů studie [31] sledoval vliv obsahu vzduchu na pevnost betonu v tlaku po 3, 7 a 28 dnech zrání. K ovlivnění pevnosti betonu v tlaku došlo poměrně významným způsobem. Po 28 dnech zrání dosahovala betonová směs s 2 % vzduchu pevnosti v tlaku přibližně 50 MPa, přičemž totožná betonová směs s obsahem vzduchu 6,2 % po stejné době zrání vykazovala téměř o 8 MPa nižší pevnost v tlaku, tedy více než o 15 %.



Obr. 13: Vliv obsahu vzduchu na pevnost betonu v tlaku [O22]

### 3.3.2.2 Zvyšování hutnosti cementové matrice (packing)

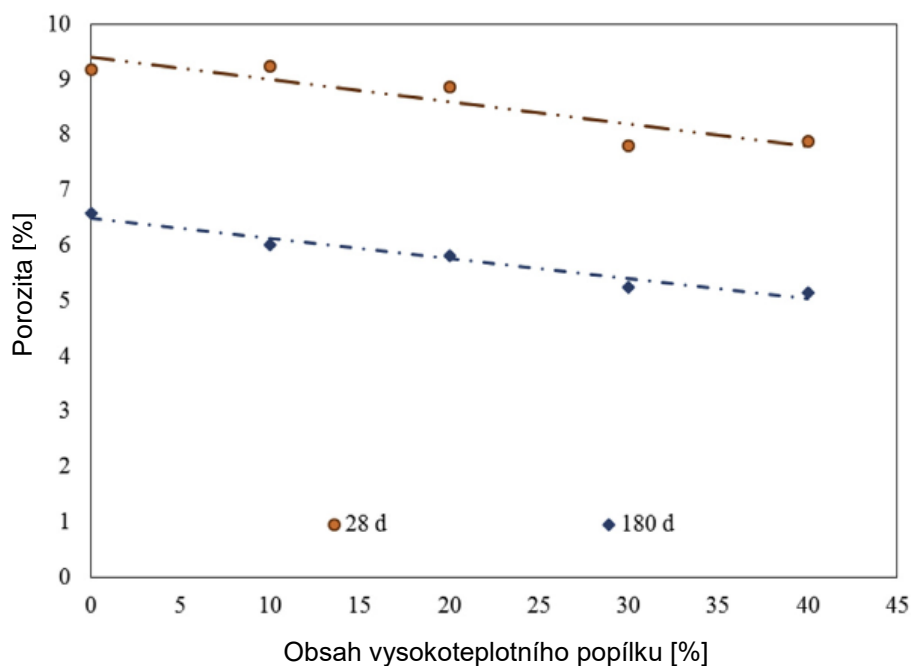
S přibývajícimi póry a kapilárami v betonové směsi dochází ke snižování mechanických parametrů. Proto je snahou dosáhnout co největší hutnosti, potažmo minimální mezerovitosti cementové matrice za pomoci optimálního dávkování jemných složek betonového kompozitu a to tak, aby mezery mezi většími částicemi vyplnily částice menší. To by mělo pozitivně ovlivnit nejen mechanické parametry betonové směsi, ale také zvýšit trvanlivosti konstrukce. Vlivem hutnější mikrostruktury betonu a nižší porozitě dochází například k nižšímu průniku chloridových iontů do struktury betonu, které způsobují korozi výztuže či průniku  $\text{CO}_2$  způsobující karbonataci betonu. Vzorový příklad optimalizace hutnosti cementové matrice díky využití různých druhů příměsí zobrazuje následující obrázek.



Obr. 14: Princip zvyšování hutnosti cementové matrice [O24]

### 3.3.2.3 Vliv hutnosti mikrostruktury betonu na porozitu betonu

V následujícím experimentu se Saha zaměřil na sledování celkové porozity v čase 28 až 180 dní ve ztvrdlých betonech, ve kterých část cementu nahradil vysokoteplotním popílkem. Vlivem pucolánové reakce a zahušťováním struktury vzniklými novotvory dochází po 180 dnech zrání ke snížení celkové porozity téměř o 3 %. Zároveň se zvyšováním podílu vysokoteplotního popílku ve směsi také snižuje celková porozita betonového kompozitu. [29]



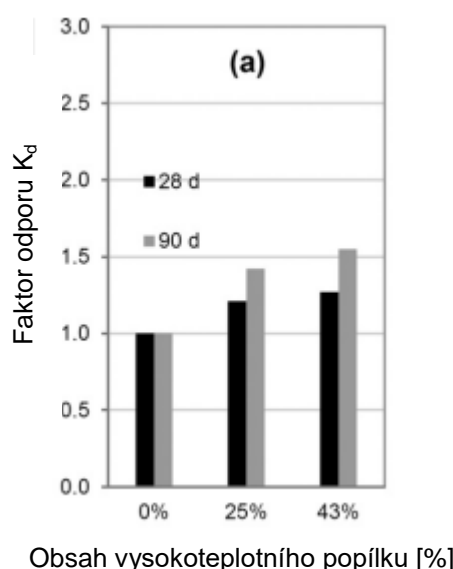
Obr. 15: Vliv obsahu vysokoteplotního popílku na porozitu betonu v časovém horizontu [O20]

### 3.3.2.4 Vliv hutnosti mikrostruktury betonu na průnik chloridových iontů

Aponte se svým kolektivem porovnával odolnost směsi referenční bez obsahu vysokoteplotního popílku se směsmi s obsahem vysokoteplotního

popílku 25 a 43 %. Pro výrobu betonových směsí byl použit portlandský cement CEM I 42,5 R a shodná hodnota vodního součinitele 0,4. Koeficient  $K_d$  vyjadřuje odpor vůči pronikání chloridových iontů. V případě směsi referenční je hodnota koeficientu odporu chloridových iontů po 28 i 90 dnech zrání stejná, u betonových směsí s přidavkem vysokoteplotního popílku se hodnota tohoto odporu zvyšuje. [37] Je to důsledek pucolánové reakce, která souvisí s tvorbou CSH fází, které zaplňují mikrostrukturu cementového tmelu a zvyšují tak jeho nepropustnost, hutnost.

Průnik chloridových iontů do betonu je nebezpečný zejména v případě, kdy se jedná o beton vyztužený ocelovou výztuží. Koroze výztuže je doprovázena několikanásobným zvýšením objemu, což způsobuje tlakové účinky na okolní beton, které mohou vést až k degradaci kompozitu.



Obr. 16: Vliv vysokoteplotního popílku na koeficient odporu vůči průniku chloridových iontů [O30]

### 3.4 Vliv vstupních surovin na vybrané parametry cementového kompozitu

Pečlivým výběrem vstupních surovin lze významně ovlivnit chování betonové směsi v čerstvém stavu i finální vlastnosti ztvrdlého betonu. Z toho důvodu je v následujících kapitolách této práce rozebrán vliv jednotlivých vstupních surovin na vybrané parametry cementového kompozitu.

### 3.4.1 Voda

Voda je jednou ze základních složek betonu. Je potřebná nejen pro zajištění požadované konzistence čerstvého betonu, ale také pro hydrataci cementu, na kterou je nutno přibližně 25 – 35 % vody z hmotnosti cementu. [6]

Z technologického hlediska je voda rozlišována jako záměsová, která je dávkována při mísení čerstvé betonové směsi a voda ošetřovací, kterou se ošetřuje již ztvrdlý povrch betonové konstrukce, a to zejména z důvodu doplnění vody potřebné k hydrataci cementu a také pro eliminaci objemových změn konstrukce.

Veškerá záměsová voda použitá pro přípravu betonu dle normy ČSN EN 206+A1 [N1], včetně vody recyklované, musí splňovat požadavky stanovené v normě ČSN EN 1008 [N2].

Množství vody přidávané k cementu vyjadřujeme hodnotou vodního součinitele, což je poměr hmotnosti vody k hmotnosti cementu. [6]

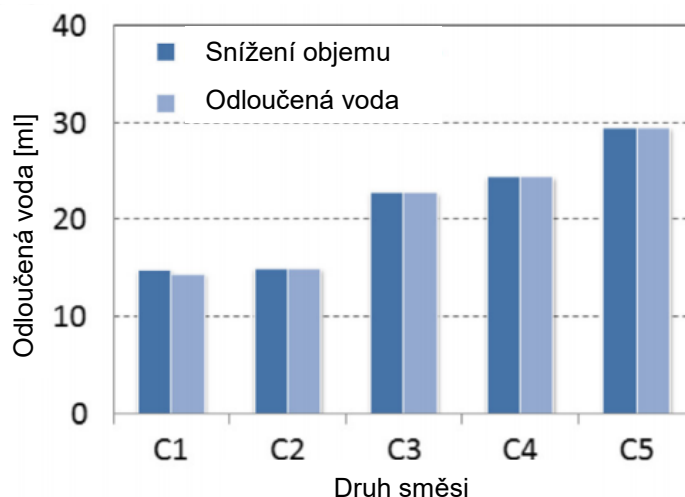
#### 3.4.1.1 Vliv hodnoty vodního součinitele na odlučivost vody

Hong se svými kolegy provedl výzkum, ve kterém se zabývali vlivem hodnoty vodního součinitele na odlučivost vody z cementové pasty. Složení jednotlivých cementových past s příslušnou hodnotou vodního součinitele je uvedeno v tabulce 1. [14]

Tab. 1: Složení porovnávaných cementových past

Označení	Voda [g]	Cement [g]	Vodní součinitel
C1	105	299	0,35
C2	111	278	0,40
C3	117	260	0,45
C4	112	244	0,46
C5	127	260	0,49

Zkušebním přístrojem vyvozoval na povrch cementové pasty tlak o velikosti 250 kPa a bylo zjišťováno množství odloučené vody, které je znázorněno na obr. 17. Bylo potvrzeno, že se vzrůstající hodnotou vodního součinitele je cementová pasta více náchylná na odlučování vody ze své struktury. Snížení celkovému objemu cementové pasty vždy odpovídalo množství odloučené vody. [14]



Obr. 17: Množství odloučené vody z cementové pasty v závislosti na vodním součiniteli [O9]

### 3.4.1.2 Vliv hodnoty vodního součinitele na objemové změny betonu

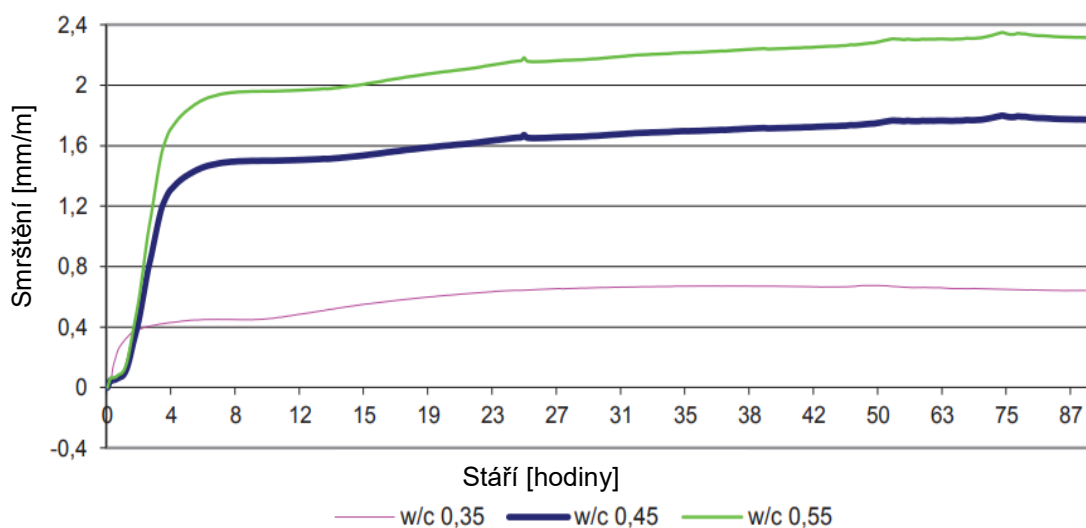
Jasiczak se svým kolektivem prokázal, že betonové směsi s odlišným vodním součinitelem mají při stejných podmínkách okolního prostředí rozdílný průběh i hodnoty smrštění, jak je znázorněno na obrázku č. 18. Měření probíhalo na třech betonových směsích, jejichž konkrétní složení je možno vidět v tabulce 2. Betonové směsi obsahovaly shodné množství cementu, stejné procentuální zastoupení kameniva a lišily se pouze rozdílným množstvím záměsové vody. Zrání probíhalo při teplotě 20 °C a relativní vlhkosti okolního prostředí 35 %. [12]

Tab. 2: Složení porovnávaných betonových směsí

Surovina	w = 0,35	w = 0,45	w = 0,55
Cement	400 kg	400 kg	400 kg
Voda	140 l	180 l	220 l
Písek 0-2 mm	623 kg	588 kg	553 kg
Kamenivo 2-8 mm	678 kg	641 kg	604 kg
Kamenivo 8-16 mm	584 kg	551 kg	519 kg
Pevnost v tlaku	44,0 MPa	42,1 MPa	22,4 MPa

Nejnižší hodnoty smrštění vykazovala betonová směs s nejnižší hodnotou vodního součinitele, přibližně 0,7 mm/m a naopak nejvyšší hodnoty smrštění vykazovala betonová směs s nejvyšší hodnotou vodního součinitele, téměř 2,4 mm/m. Hodnota smrštění je tedy závislá na množství vody, které beton obsahuje a úzce to souvisí s rychlostí odpařování vody do okolního prostředí. [12]



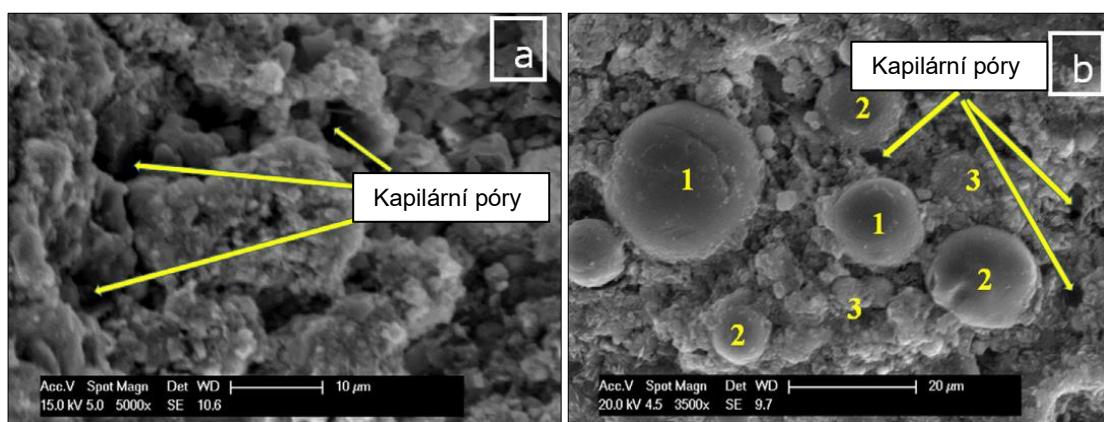


Obr. 18: Vliv hodnoty vodního součinitele na velikost smrštění [O6]

### 3.4.1.3 Vliv vody na mikrostrukturu ztvrdlého betonu

Voda je nezbytnou součástí pro hydrataci cementu v betonové směsi. Při procesu hydratace se však spotřebuje přibližně 25 – 35 % záměsové vody a zbylá část záměsové vody nepotřebná k reakci se vlivem odpařování uvolňuje do okolního prostředí. Tím však dochází ke vzniku prázdných pórů a kapilár, které snižují nejen mechanické parametry betonového kompozitu, ale také jeho odolnost vůči působení agresivních vlivů. [33]

Na následujících snímcích jsou zachyceny kapilární póry vzniklé právě odpařením záměsové vody. Na obrázku vpravo jsou včetně kapilárních pórů zachyceny částice vysokoteplotního popílku nezreagované (1), částečně zreagované (2) a zcela zreagované (3).



Obr. 19: Znázornění kapilárních pórů ve ztvrdlém betonu a stupňů hydratace vysokoteplotního popílku [O33]

### 3.4.2 Cement

Cement je základní pojivou složkou betonu. Výsledné mechanické parametry betonové konstrukce jsou závislé nejen na dávce cementu, ale také na jeho typu.

#### 3.4.2.1 Značení cementů

Dle ČSN EN 197 [N3] rozdělujeme cementy na 5 základních druhů – portlandský cement CEM I; portlandský cement směsný CEM II; vysokopeční cement CEM III; pucolánový cement CEM IV a směsný cement CEM V.

Značení cementu je závislé na druhu použité příměsi a jejím dávkování.

Tab. 3: Značení cementu dle složení [O11]

hlavní druhy	označení 27 výrobků (druhy výrobků pro obecné použití)		složení (poměry složek podle hmotnosti)					složení (poměry složek podle hmotnosti)					doplňující složky
			hlavní složky					hlavní složky					
			slínek	vysokopecní struska	křemčitý úlet	pucolány		popílky		kalcinovaná břidlice	vápenec		
						přírodní	přírod. kalcin.	křemčitě	vápenatě		L	LL	
K	S	D	P	Q	V	W	T	L	LL				
CEM I	portlandský cement	CEM I	95–100	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0–5
CEM II portlandský cement směsný	portlandský struskový cement	CEM II/A-S	80–94	6–20	–	–	–	–	–	–	–	–	0–5
		CEM II/B-S	65–79	21–35	–	–	–	–	–	–	–	–	0–5
	portlandský cement s křemčitým úletem	CEM II/A-D	90–94	–	6–10	–	–	–	–	–	–	–	0–5
	portlandský pucolánový cement	CEM II/A-P	80–94	–	–	6–20	–	–	–	–	–	–	0–5
		CEM II/B-P	65–79	–	–	21–35	–	–	–	–	–	–	0–5
		CEM II/A-Q	80–94	–	–	–	6–20	–	–	–	–	–	0–5
		CEM II/B-Q	65–79	–	–	–	21–35	–	–	–	–	–	0–5
	portlandský popílkový cement	CEM II/A-V	80–94	–	–	–	–	6–20	–	–	–	–	0–5
		CEM II/B-V	65–79	–	–	–	–	21–35	–	–	–	–	0–5
		CEM II/A-W	80–94	–	–	–	–	–	6–20	–	–	–	0–5
		CEM II/B-W	65–79	–	–	–	–	–	21–35	–	–	–	0–5
	portlandský cement s kalcinov. břidlicí	CEM II/A-T	80–94	–	–	–	–	–	–	6–20	–	–	0–5
		CEM II/B-T	65–79	–	–	–	–	–	–	21–35	–	–	0–5
	portlandský cement s vápenecem	CEM II/A-L	80–94	–	–	–	–	–	–	–	6–20	–	0–5
		CEM II/B-L	65–79	–	–	–	–	–	–	–	21–35	–	0–5
		CEM II/A-LL	80–94	–	–	–	–	–	–	–	–	6–20	0–5
CEM II/B-LL		65–79	–	–	–	–	–	–	–	–	21–35	0–5	
portlandský směsný cement	CEM II/A-M	80–94	–	–	6–20	–	–	–	6–20	–	–	0–5	
	CEM II/B-M	65–79	–	–	21–35	–	–	–	21–35	–	–	0–5	
CEM III vysokopecní cement	CEM III/A	35–64	36–65	–	–	–	–	–	–	–	–	0–5	
	CEM III/B	20–34	66–80	–	–	–	–	–	–	–	–	0–5	
	CEM III/C	5–19	81–95	–	–	–	–	–	–	–	–	0–5	
CEM IV pucolánový cement	CEM IV/A	65–89	–	–	11–35	–	–	11–35	–	–	–	0–5	
	CEM IV/B	45–64	–	–	36–65	–	–	36–65	–	–	–	0–5	
CEM V směsný cement	CEM V/A	40–64	18–30	–	18–30	–	–	18–30	–	–	–	0–5	
	CEM V/B	20–38	31–50	–	31–50	–	–	31–50	–	–	–	0–5	

Dle charakteristické hodnoty pevnosti v tlaku a počátku tuhnutí jsou předepsány jednotlivé pevnostní třídy cementu, viz tabulka 4. Počáteční nárůst pevností, počátek i doba tuhnutí, velikost objemových změn i rychlost vývinu tepla je vyjma samotného chemismu cementu nejvíce závislá zejména na

jemnosti mletí cementu, které se obvykle pohybuje v rozmezí 300 - 450 m<sup>2</sup>/kg. [16]

Tab. 4: Požadavky na mechanické a fyzikální vlastnosti cementu [O11]

pevnostní třída	pevnost v tlaku MPa			počátek tuhnutí
	počáteční pevnost		normalizovaná pevnost 28 dnů	
	2 dny	7 dnů		
32,5 N	–	≥ 16	≥ 32,5    ≤ 52,5	≥ 75
32,5 R	≥ 10,0	–		
42,5 N	≥ 10,0	–	≥ 42,5    ≤ 62,5	≥ 60
42,5 R	≥ 20,0	–		
52,5 N	≥ 20,0	–	≥ 52,5    –	≥ 45
52,5 R	≥ 30,0	–		

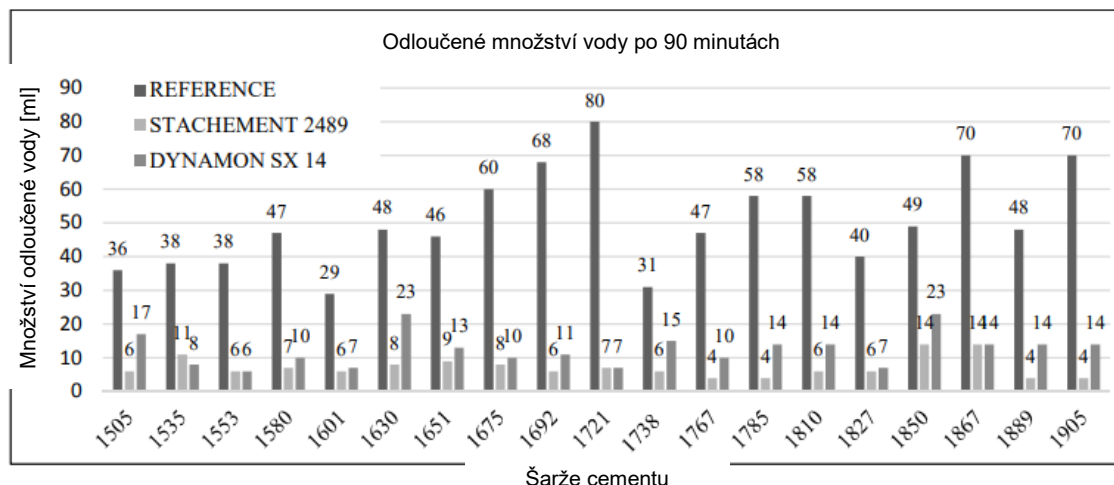
### 3.4.2.2 Vliv kolísání vlastností cementu na odlučivost vody

Jančaříková s kolektivem zkoumala vliv vlastností cementu na odlučivost vody. Zkoušky byly prováděny na stejném druhu cementu od stejného výrobce ze stejného výrobního závodu, pouze s rozdílnou šarží produktu. Na každém vzorku byla stanovena granulometrie, střední velikost částic a specifický měrný povrch. Jednotlivé hodnoty odloučené vody se u cementových past lišily, což je nejspíše způsobeno kolísavými parametry cementu z výroby. Potvrdilo se ovšem, že cementová pasta referenční vykazovala vždy několikanásobně větší množství odloučené vody, než cementová pasta s přidavkem superplastifikační přísady, která snížila množství záměsové vody, a tím i hodnotu vodního součinitele. [13]

Tab. 5: Složení porovnávaných cementových past

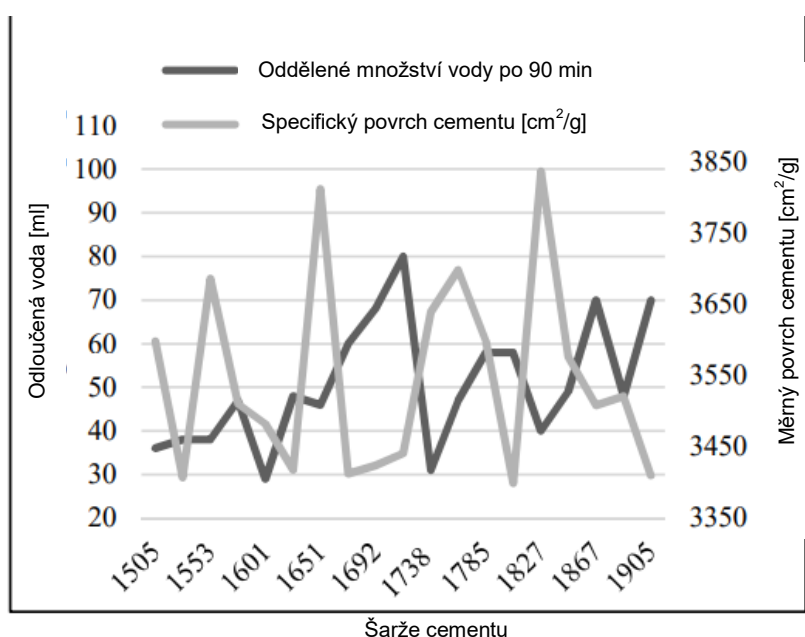
Složka	Reference	Dynamon SX 14	Stachement 2489
CEM I 42,5 R	450 g	500 g	500 g
Voda	292,5 g	175 g	175 g
*Dynamon SX 14	—	2,5 g	—
*Stachement 2489	—	—	2,5 g
Vodní součinitel	0,65	0,35	0,35

Pozn: \* – Superplastifikační přísada



Obr. 20: Odloučené množství vody po 90 minutách dle hodnoty vodního součinitele a typu superplastifikační přísady [O8]

Po 15 minutách od smíchání cementu s vodou bylo u směsi referenční odděleno přibližně 7 ml vody, u směsi obsahující superplastifikační přísadu činilo množství odloučené vody přibližně 3 ml. Zásadní rozdíl v těchto směsích se projevil po 90 minutách, kdy směs referenční vykazovala až 80 ml odloučené vody, směsi obsahující superplastifikační přísadu odloučily méně než 23 ml. Na tomto rozdílu má velký vliv množství vody, které bylo použito pro vznik cementové pasty. Obrázek 21 demonstruje závislost mezi specifickým povrchem cementu a množstvím odloučené vody. Se zvyšující se hodnotou specifického povrchu se množství odloučené vody snižuje a naopak. [13]



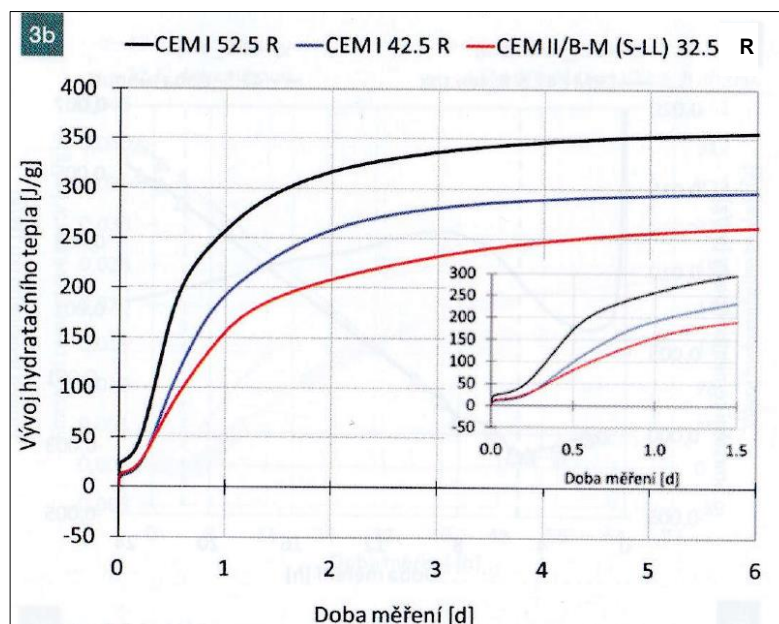
Obr. 21: Závislost odloučené vody na specifickém povrchu cementu [O8]

Proměnlivé vlastnosti cementu mohou být ovlivněny například tzv. intenzifikátory mletí, které se přidávají do mlecího zařízení či přímo do směsi těsně před vstupem do mlecího zařízení v dávce 0,02 – 0,05 % z hmotnosti cementu. V případě, že jsou absorbovány na existujícím a nově vytvořeném povrchu cementových zrn, způsobí to neutralizaci nábojů na povrchu cementových zrn, čímž nedochází k přitahování nábojů jednotlivých cementových zrn. [41]

Je také známo, že v cementárnách dochází ke spalování tzv. TAPů, tedy tuhých alternativních paliv, mezi které patří například opotřebované pneumatiky, masokostní moučka či textilní odpad. Vlivem rozdílných vlastností a výhřevností těchto materiálů může docházet k ovlivnění vybraných vlastností cementu.

### **3.4.2.3 Vliv použitého druhu cementu na vývin hydratačního tepla**

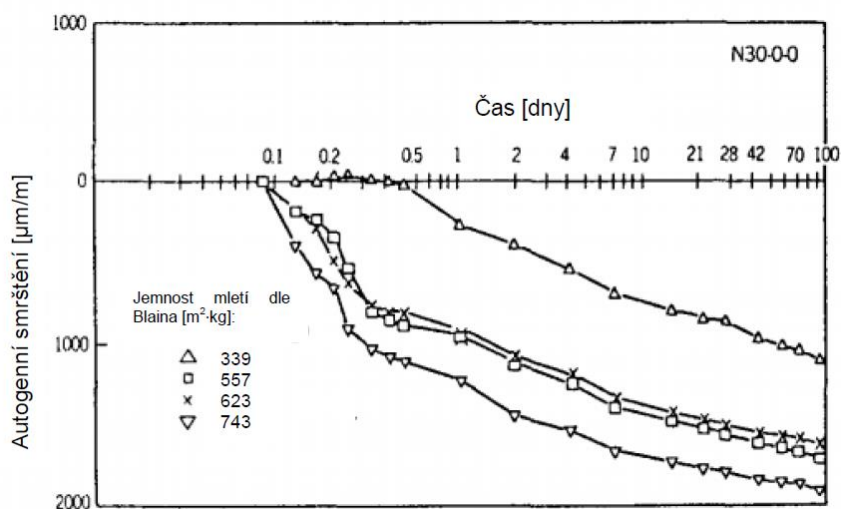
Kucharczyková se svým kolektivem zjišťovala vliv druhu cementu na vývoj hydratačního tepla. Pro přípravu cementových past byly použity tři odlišné druhy cementu z Cementárny Mokrá. Konkrétně byly použity dva cementy portlandské, CEM I 52,5 R s měrným povrchem 521 m<sup>2</sup>/kg a CEM I 42,5 R s menším měrným povrchem 381 m<sup>2</sup>/kg. Třetí cement byl portlandský cement směsný CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R, který obsahuje 21 – 35 % příměsí, konkrétně kombinaci vysokopecní strusky a vápence. Dle technického listu je velikost měrného povrchu 529 m<sup>2</sup>/kg. Obr. 22 demonstruje vývoj hydratačního tepla u jednotlivých cementových past. Dle očekávání, nejvyšší vývoj hydratačního tepla (350 J/g) byl zaznamenán u cementové pasty vyrobené z CEM I 52,5 R, který má velký měrný povrch, díky čemuž může více cementových zrn reagovat a vytvářet exotermní reakci. Druhý portlandský cement CEM I 42,5 R s nižším měrným povrchem vykazoval přibližně o 50 J/g nižší hodnotu než předchozí cement. Nejnižší vývoj hydratačního tepla vykazovala cementová pasta z portlandského směsného cementu CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R. Tento cement má sice nejvyšší měrný povrch z porovnávaných cementů, ale vlivem obsahu příměsí 21 – 35 % se vývin hydratačního tepla snižuje. [28]



Obr. 22: Vývoj hydratačního tepla v závislosti na typu cementu [O19]

### 3.4.2.4 Vliv jemnosti mletí cementu na objemové změny betonu

Nejen použitý druh či množství použitého cementu má vliv na objemové změny betonu. Tazawa se svým kolektivem provedl výzkum, ve kterém měřil smrštění na čtyřech cementech s rozdílnou jemností mletí při konstantní hodnotě vodního součinitele 0,30. Nejnižší hodnoty smrštění vykazoval cement s nejnižší jemností mletí a s přibývajícím měrným povrchem se objemové změny zvyšovaly. To je dáno nejen množstvím zrn, které přicházejí do kontaktu s vodou, ale také vyšším uvolňováním hydratačního tepla v průběhu reakce. [18][17]



Obr. 23: Vliv jemnosti mletí cementu na objemové změny [O12]

### **3.4.2.5 Vliv cementu na mikrostrukturu betonu**

Dle již zmíněného značení cementu rozlišujeme nejen množství, ale také druh příměsi obsažené v cementu. Vliv cementu na mikrostrukturu ztvrdlého betonu je různý, v závislosti zejména na daném typu a množství příměsi v něm obsažené. Z toho důvodu bude vliv jednotlivých příměsí rozebrán samostatně v následujících kapitolách této práce, zabývající se příměsemi.

### **3.4.3 Kamenivo**

Kamenivo je anorganický zrnitý materiál, který tvoří 70 – 80 % objemu betonu. Jeho hlavní funkcí je vytvoření pevné kostry s co nejnížší mezerovitostí. Dle způsobu vzniku rozlišujeme kamenivo přírodní, umělé či recyklované. Přírodní kamenivo pochází z minerálních zdrojů a může se těžit z přírodních ložisek nebo drtit z přírodního kamene.

Kamenivo používané do betonu musí být tvrdé, pevné a nesmí obsahovat nečistoty. Měkké a pórovité složky snižují jeho pevnost a mohou se rozpadat v průběhu míchání čerstvého betonu, čímž mohou ovlivnit jeho zpracovatelnost.

#### **3.4.3.1 Vliv kameniva na odlučivost vody**

Většina kameniv používaných k výrobě betonových směsí se vyznačuje velmi nízkou nasákavostí. Se zvyšujícím se množstvím záměsové vody v betonové směsi se zvyšuje zároveň riziko segregace betonu, ztráta homogenity směsi a zvyšuje se také odlučivost vody z betonu, neboť kamenivo, jakožto téměř nenasákavý materiál, nemá prakticky žádnou možnost eliminovat množství odloučené vody. Možný dopad lze z pohledu kameniva sledovat pouze v druhu použitého kameniva a velikosti maximálního zrna z pohledu měrného povrchu jednotlivých zrn. V případě jemnozrnných kameniv je možné pozitivní vliv sledovat rovněž díky obsahu jemných částic, které jsou často tvořeny převážně jílovými minerály disponujícími obecně vysokou schopností vázat vodu.

### 3.4.3.2 Vliv kameniva na objemové změny betonu

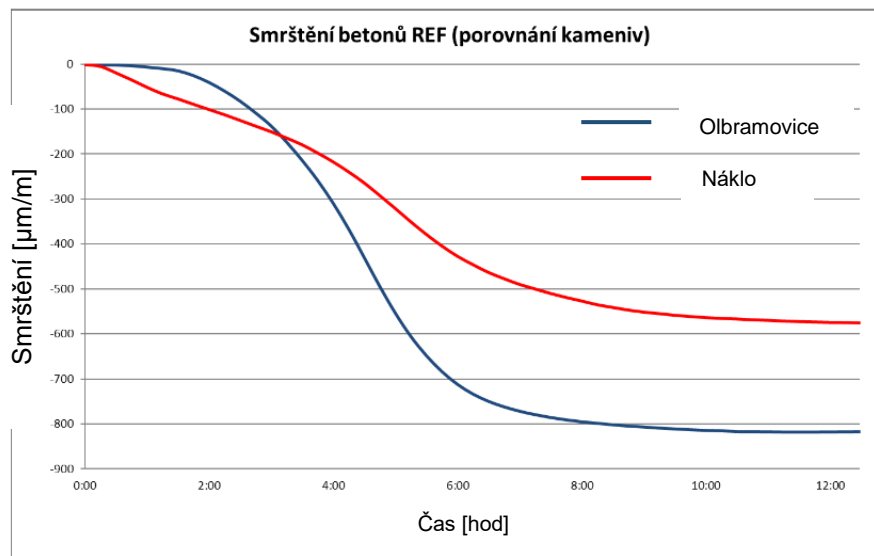
Kamenivo v betonové směsi působí obecně jako blokátor smrštění a s jeho přibývajícím množstvím ve směsi by se mělo smrštění snižovat.

Pikna se ve své diplomové práci zabýval vlivem použitého typu kameniva na objemové změny betonu. Pro výrobu jedné betonové směsi bylo použito drcené kamenivo z lokality Olbramovice a pro druhou betonovou směs použil těžené kamenivo z lokality Náklo. Druhá betonová směs vykazovala po 12 hodinách hodnotu smrštění přibližně o 200  $\mu\text{m}/\text{m}$  nižší než betonová směs s drceným kamenivem. I při dlouhodobém měření vykazovala betonová směs s těžným kamenivem uspokojivější výsledky objemových změn. [15]

Velikost objemových změn zaleží nejen na množství kameniva ve směsi, ale také na jeho kvalitě. Kamenivo z lokality Náklo se vzhledem k jeho složení řadí k nejkvalitnějším těžným kamenivům v ČR. Obsahuje velké množství křemene, kvarcitu a opuky. V kamenivu z lokality Olbramovice jsou ve velké míře zastoupeny granity až granodiority. Těžené kamenivo z jiné lokality s nižší kvalitou složení by mohlo vykazovat diametrálně odlišné výsledky, a proto nelze zcela jednoznačně konstatovat, že těžené kamenivo pozitivně ovlivňuje objemové změny. [15]

V tomto případě lze však nižší hodnoty objemových změn při použití těžného kameniva přisuzovat měrnému povrchu samotných zrn kameniva. Téměř na dokonale kulovitých a hladkých zrnech těžného kameniva ulpívá znatelně nižší množství vody, což má pak za důsledek nižší tloušťku tranzitní zóny o vysokém vodním součiniteli. Tato tranzitní zóna vykazuje horší mechanické parametry než okolní cementový kámen a její zvýšená pórovitost má rovněž výrazný dopad na objemové změny, proto je její nižší tloušťka oproti případu s použitím drceného kameniva žádoucí.





Obr. 24: Vliv druhu kameniva na velikost smrštění betonu [O10]

### 3.4.3.3 Vliv kameniva na vývin hydratačního tepla

Při reakci cementu s vodou dochází k uvolňování hydratačního tepla. S přibývajícím množstvím kameniva v betonové směsi je uvolněné teplo z části akumulováno do zrn kameniva, díky čemuž dochází ke snížení vývoje maximálních hydratačních teplot. Aby nedocházelo ke zkreslení výsledků a stanovil se přesnější průběh vývoje hydratačního tepla, probíhá často měření na jednodušších systémech, což jsou cementové malty nebo pasty.

Kamenivo je do betonu přidáváno jako plnivo a z pohledu hydratačních procesů je tento materiál inertní, nepodílí se tedy na vývinu hydratačního tepla v průběhu hydratačních procesů.

### 3.4.3.4 Vliv kameniva na mikrostrukturu

Pro dosažení nejvhodnější skladby kameniva se používá tzv. optimální křivka zrnitosti, která vyjadřuje optimální zastoupení jednotlivých velikostí zrn kameniva v betonové směsi. Cílem je, aby mezery mezi větší frakcí kameniva byly zaplněny frakcí jemnější, což způsobuje značné finanční úspory, neboť by jinak tyto mezery musely být zaplněny například cementovým tmelem, což by bylo velmi nevhodným řešením.

### 3.4.4 Minerální příměsi

Jedná se o anorganické látky, které se vyznačují velikostí částic menší než 0,125 mm a velkým měrným povrchem. Do betonu se přidávají z důvodu zlepšení vlastností v čerstvém či ztvrdlém stavu. Ve většině případů se jedná o vedlejší produkt výroby a přidáním některých příměsí do betonu lze snížit dávku cementu, což je výhodné zejména z ekonomického či ekologického hlediska. Dle ČSN EN 206+A1 [N1] rozdělujeme příměsi na dva základní typy. [19]

První typ tvoří tzv. inertní příměsi. Tento typ příměsí se nepodílí na žádném hydratačním procesu při tuhnutí a tvrdnutí betonu, proto se používají zejména jako mikroplnivo do betonové směsi ke zvýšení hutnosti cementové matrice. Mezi typické zástupce tohoto druhu patří kamenný filler, barevné pigmenty či betonový recyklát. Hlavní nevýhodou těchto příměsí je nutnost vyšší dávky záměsové vody z důvodu vyššího měrného povrchu materiálu. [2]

K tomuto typu příměsí se řadí také mikromletý vápenec. Ač je tento druh příměsí brán jako inertní, výzkumy uvedené v dalších kapitolách této práce potvrzují, že s přibývajícím jemností mletí vápence vykazují betonové směsi vyšší mechanické parametry. Skrytou aktivitu je rovněž možné pozorovat u jemně mletého betonového recyklátu. V tomto případě je tato aktivita často přisuzována opětovné hydrataci ještě nezhydratovaných zrn cementu v recyklátu, ke kterým se díky jeho rozemletí může opět dostat voda.

Druhý typ tvoří tzv. aktivní příměsi, což jsou látky, které svým chemickým složením přispívají k vyšší pevnosti cementového tmele. Dle jejich hydratačních schopností se rozlišují na látky latentně hydraulické a látky pucolánové. [20]

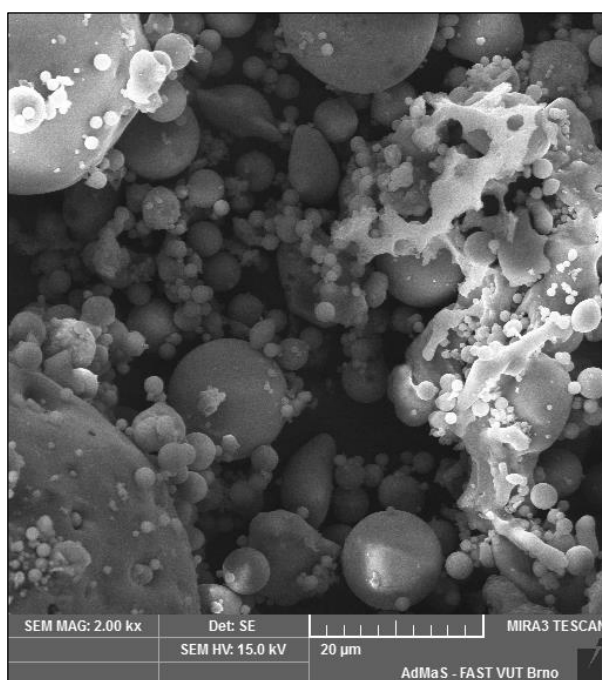
Latentně hydraulická látka je taková látka, která po smíchání s vodou nereaguje. Pro získání hydraulických vlastností je zapotřebí použití budičů, které se dle povahy rozlišují na alkalické (pH > 7, např. cement či vápno) a síranové ( $\text{CaSO}_4$ ). Nejznámějším zástupcem této skupiny je vysokopepční jemně mletá granulovaná struska. [20]

Pucolánové látky jsou anorganické látky, které sami netuhnou ani netvrdnou, ale obsahují amorfni  $\text{SiO}_2$ , který za přítomnosti vápenatých iontů reaguje s  $\text{Ca(OH)}_2$  za vzniku CSH gelu. Mezi nejznámějším zástupce této skupiny patří vysokoteplotní popílek či mikrosilika. [20]

### 3.4.4.1 Vysokoteplotní úletový popílek

Popílek se získává jako vedlejší energetický produkt při spalování uhlí. Nejvhodnějším produktem pro spalování je uhlí černé, které dává z běžně dostupných organických materiálů nejvyšší výhřevnost. Nejdůležitější parametr kvality uhlí je obsah organického podílu, tedy uhlíku. Černé uhlí obsahuje 75 - 95 % uhlíku, u hnědého uhlí se obsah tohoto prvku pohybuje v rozmezí 60 - 75 %. V každém druhu uhlí je obsaženo určité množství nespalitelných látek, které udávají vznik popílku. Hnědé uhlí obsahuje vyšší procento těchto nespalitelných látek a z toho důvodu vzniká při spalování tohoto druhu paliva i větší množství popílku v porovnání s uhlím černým. [21]

Uhlí určené ke spalování se válcovými mlýny pomele na jemný prach, který má 80 % hmotnosti částic uhlí velikost zrn do 90  $\mu\text{m}$ . Spalovacím vzduchem je uhelný prach dopravován k hořákům, kde během několika sekund dochází k vyhoření organických složek, usazení větších nehořlavých složek na dno kotle a k odchodu jemných nehořlavých částic společně se spalinami do komínového systému. Ty při rychlém ochlazení tuhnou na kulovité sklovitě-amorfní částice. Za pomoci elektrostatických a mechanických odlučovačů a filtrů dochází k zachycování popílkových částic, díky čemu je získán vysokoteplotní úletový popílek. [21]

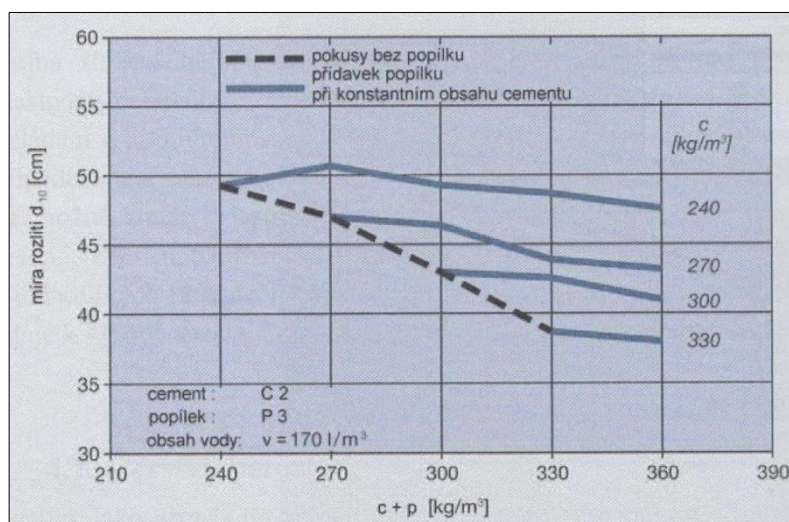


Obr. 25: Snímek ze SEM vysokoteplotního popílku Dětmarovice s dvoutisícovým přiblížením

### 3.4.4.1.1 Vliv vysokoteplotního popílku na reologii betonové směsi

Použití popílku jakožto aktivní příměsi do betonu zvyšuje objem cementového tmelu, který je velice důležitý pro zajištění dobré zpracovatelnosti betonu vzhledem k obsahu jemných podílů. Přídavek vysokoteplotního popílku se tedy projeví i na zrnitosti směsi lepší zpracovatelností, což ocení nejen odběratelé betonové směsi, kterým je usnadněno ukládání směsi do bednění, ale také výrobci z pohledu nižšího opotřebování zařízení pro výrobu a dopravu čerstvého betonu. [34]

V případě nahrazení části cementu v betonové směsi při zachování konstantního množství vody se velmi často dosahuje vyšších hodnot sednutí kužele či rozliti, jak znázorňuje obr. 26. Je to dáno tvarem zrn popílku, která jsou téměř dokonale kulovitá a v čerstvé betonové směsi mají zrna popílku nižší tření. Bylo také zjištěno, že s přibývajícím jemností popílku vykazují betonové či maltové směsi tekutější konzistenci. [34] Tato teorie však nemusí být obecně platná, budeme-li na pojivovou bázi nahlížet z pohledu jejího měrného povrchu při dávce popílku zajišťující stejnou pevnost jako v případě jeho nepoužití. V tomto ohledu dochází často k nutnému navýšení pojivové báze kompozitu, což může být obecně spojeno s nutnou vyšší dávkou vody.



Obr. 26: Míra rozliti betonové směsi v závislosti na množství obsaženého cementu a popílku [O25]

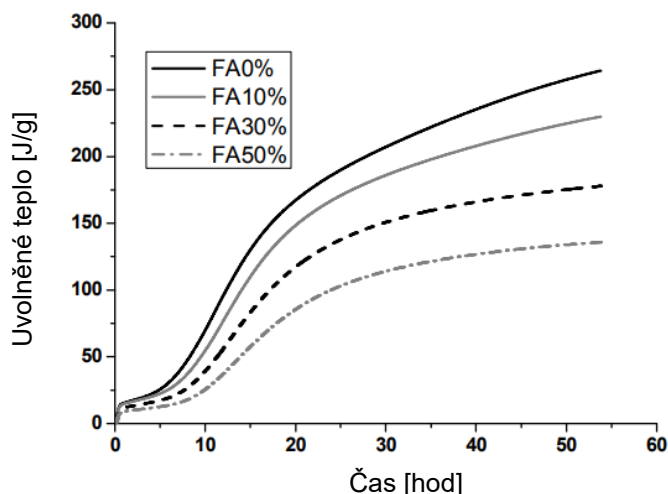
### 3.4.4.1.2 Vliv vysokoteplotního popílku na odlučivost vody

Vlivem tvaru zrna popílku, které je téměř dokonale kulovitého tvaru, jeho sklovitému povrchu a nízké nasákavosti, zvyšuje přídavek popílku do betonové

směsi či malty riziko odlučování vody, neboť popílek vzhledem k morfologii zrna není schopný vodu zadržet. Přídavkem vysokoteplotního popílku se však obecně zvyšuje dávka pojivových složek pro zachování stejné pevnosti kompozitu a tím i měrný povrch pojivové báze, což má pozitivní vliv na stupeň odlučivosti vody.

#### 3.4.4.1.3 Vliv vysokoteplotního popílku na vývoj hydratačního tepla

Obrázek č. 27 demonstuje vývoj hydratačního tepla u cementových past se shodným vodním součinitelem 0,35. Nejvyšší uvolněné hydratační teplo vykazuje cementová pasta bez přídavku popílku. S přibývajícím náhradou cementu v cementové pastě vysokoteplotním popílkem dochází k poklesu uvolněného hydratačního tepla. Nejnižší množství uvolněného hydratačního tepla vykazuje cementová pasta s 50 % vysokoteplotního popílku, a to téměř o polovinu v porovnání s cementovou pastou bez obsahu popílku. Je tedy zřejmé, že vysokoteplotní popílek nepřispívá k vývoji hydratačního tepla. Z toho důvodu je tato příměs často využívána do betonů pro masivní stavby. [30]

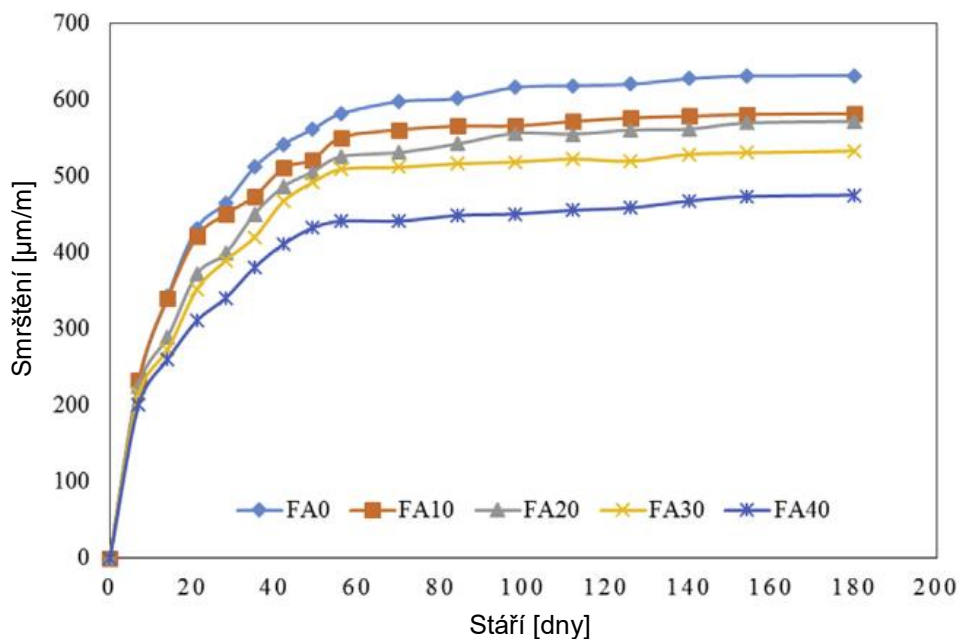


Obr. 27: Vliv vysokoteplotního popílku na vývoj hydratačního tepla [O21]

#### 3.4.4.1.4 Vliv vysokoteplotního popílku na objemové změny

Experiment vyobrazený na obrázku 28 znázorňuje vliv přídavku vysokoteplotního popílku na objemové změny kompozitu. Směs referenční s označením FA0 neobsahovala žádný popílek a výchozí dávka cementu byla  $400 \text{ kg/m}^3$ . V dalších betonových směsích proběhla náhrada cementu 10, 20, 30 a 40 % vysokoteplotním popílkem. S přibývajícím množstvím popílku ve směsi se snižovala velikost objemových změn, lze tedy konstatovat, že

s částečnou náhradou cementu vysokoteplotním popílkem lze pozitivně ovlivnit objemové změny betonu. [29]

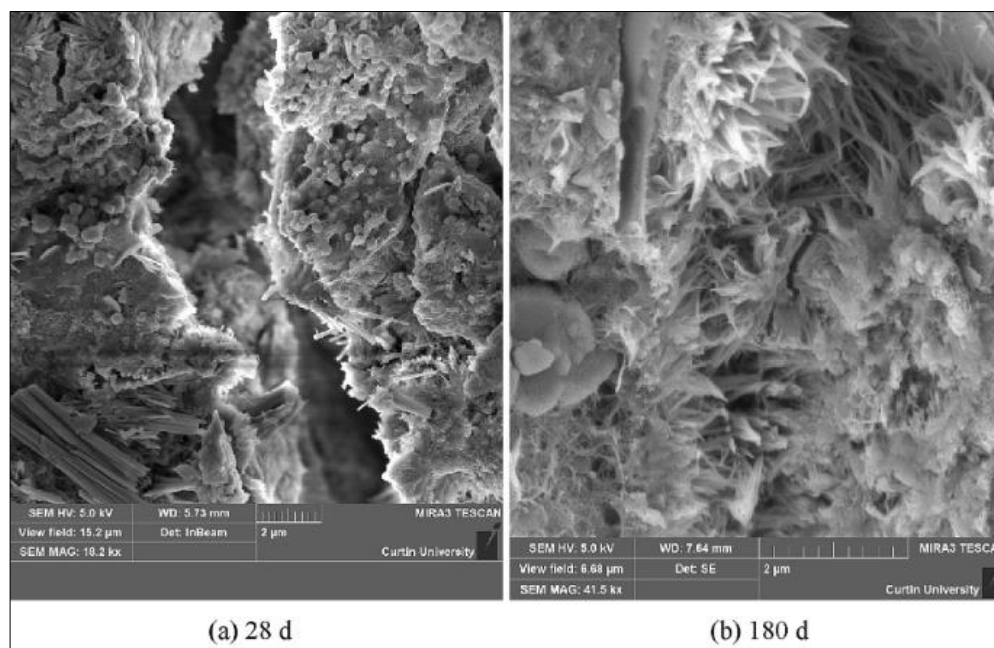


Obr. 28: Vliv vysokoteplotního popílkem na objemové změny [O20]

#### 3.4.4.1.5 Vliv vysokoteplotního popílkem na mikrostrukturu

Je všeobecně známo, že nahrazením cementu v betonové směsi vysokoteplotním popílkem dochází ke snížení počátečních mechanických parametrů betonu. Vlivem pucolánové reakce dochází k vytvrzování mikrostruktury betonu v delším časovém horizontu, čímž získáváme hutnější mikrostrukturu, a tím i vyšší mechanické parametry směsi. Snímek č. 29 pořízený z elektronového mikroskopu znázorňuje strukturu betonu s 40% náhradou cementu vysokoteplotním popílkem. Snímek vlevo zachycuje mikrostrukturu betonu po 28 dnech zrání, snímek vpravo zachycuje mikrostrukturu téhož betonu po 180 dnech zrání. V dutinách mezi produkty je vidět zvýšené množství CSH gelů způsobené pucolánovou reakcí. [29]

Mikrostruktura betonu je výrazně hutnější, což může v důsledku zvýšit odolnost vůči průniku chloridových iontů či jiných škodlivých látek do struktury betonu, jak již bylo popsáno v kapitole 3.3.2.4 *Vliv hutnosti mikrostruktury betonu na průnik chloridových iontů.*



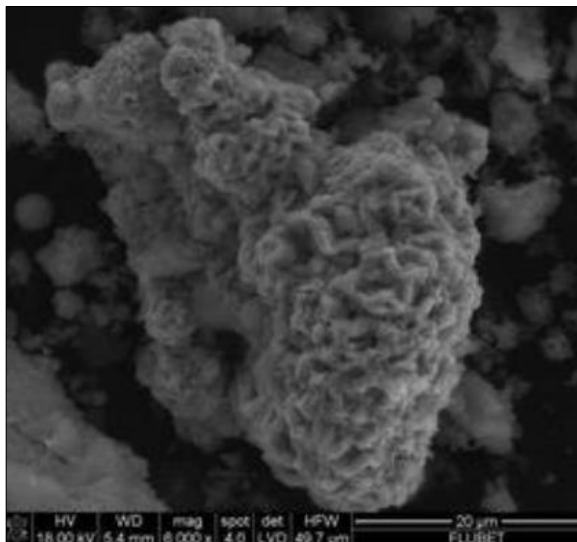
Obr. 29: Porovnání mikrostruktury betonu se 40% náhradou cementu vysokoteplotním popílkem po 28 a 180 dnech zrání [O20]

#### 3.4.4.2 Fluidní popílek

Fluidní popílek vzniká spalováním uhlí pomletého na velikost částic přibližně 20  $\mu\text{m}$ , které je společně s vápencem či dolomitem spalováno při teplotě 750 – 850  $^{\circ}\text{C}$  ve fluidním kotli tzv. ve vznosu v řádech minut. Vzhledem k nižší spalovací teplotě vzniká nižší množství oxidů dusíku, a proto není kouřový plyn potřeba denitrifikovat. [42]

Fluidní popílek se ovšem vyznačuje zvýšeným množstvím volného aktivního CaO, síranů a nerozpustného anhydritu II, které se částečně podílí na hydraulických vlastnostech a společně s hlinitokřemičitou amorfni formou fluidních popílků a trikalciumpilikáty obsažených v portlandském slínku, dochází ke vzniku nežádoucího ettringitu. [21]

Vzhledem ke vznikajícímu ettringitu, který je doprovázen objemovými změnami, které mohou způsobit narušení stávající betonové konstrukce a následnou destrukci, je používání fluidního popílku jako příměsi do betonu prozatím řadou norem zakázáno. [21]



Obr. 30: Přibližné zrno fluidního popílku za pomoci SEM [O29]

### 3.4.4.3 Vysokopeční jemně mletá granulovaná struska (VJMGS)

VJMGS vzniká jako vedlejší produkt při výrobě surového železa ve vysoké peci. Důležitým vlivem na latentně hydraulické vlastnosti strusky má její ochlazení. Aby došlo k vytvoření amorfní struktury, je zapotřebí rozžhavenou struskovou taveninu o teplotě v rozmezí 1350 – 1550 °C prudce ochladit na teplotu pod 800 °C, čímž se zajistí latentně hydraulické vlastnosti. [22]

Pro získání specifického měrného povrchu (přibližně 350 – 450 m<sup>2</sup>/kg) je nutno granulovanou strusku semlít.

Dalším, velmi významným parametrem strusky je její modul zásaditosti, který se vypočte z rovnice:

$$Mz = \frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3} \quad (9)$$

V případě, že modul zásaditosti je menší než 1, jedná se o strusky kyselé, které se používají jako kamenivo. V případě, že modul zásaditosti je vyšší než 1, jedná se o strusku zásaditou vhodnou pro použití jako příměsí do betonu či cementu. [22]

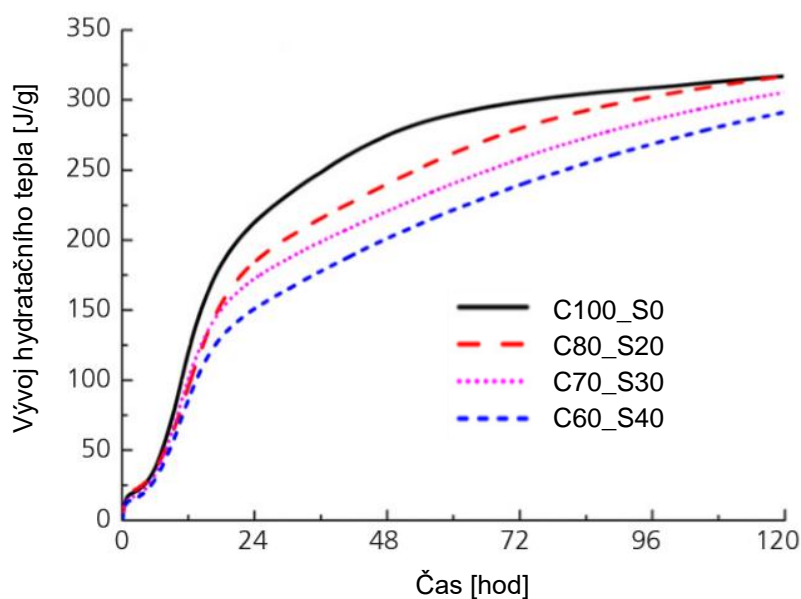
#### 3.4.4.3.1 Vliv VJMGS na odlučivost vody

Vlivem zrna VJMGS, které disponuje velkým měrným povrchem a dobrou nasákavostí, snižuje přidavek VJMGS do betonové směsi či malty riziko odlučování vody, neboť VJMGS vzhledem k morfologii zrna a jeho vlastnostem je schopná záměsovou vodu částečně redukovat.



### 3.4.4.3.2 Vliv VJMGS na vývoj hydratačního tepla

Obr. 31 demonstruje vývoj hydratačního tepla cementových past v průběhu 5 dnů od zamíchání. Celkem byly porovnávány čtyři cementové pasty. Cementová pasta tvořená pouze portlandským cementem vykazovala vyšší hodnoty ve vývoji hydratačního tepla zejména v prvních 48 hodinách v porovnání se zbylými cementovými pastami, ve kterých byla část cementu nahrazena 20, 30 či 40 % VJMGS. Tyto cementové pasty vykazovaly s přibývajícím množstvím VJMGS po 48 hodinách zrání nižší množství uvolněného hydratačního tepla. I porovnání průběhu uvolněného hydratačního tepla je značně odlišné. Cementová pasta bez přídavku VJMGS po 72 hodinách zrání již uvolnila téměř veškeré hydratační teplo, kdežto uvolňování hydratačního tepla u cementových past s přídavkem VJMGS i po 72 hodinách probíhalo velmi významným způsobem. [25]

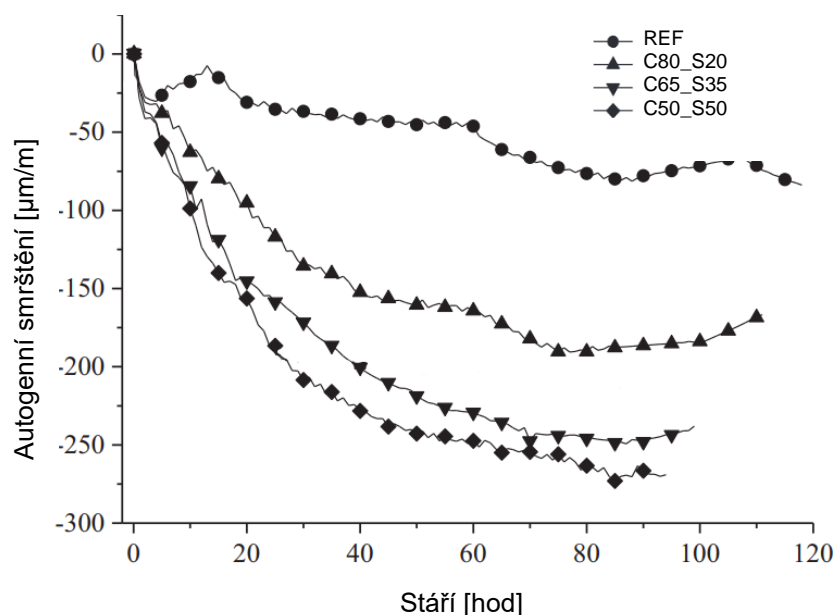


Obr. 31: Vliv VJMGS na vývin hydratačního tepla cementových past [O23]

### 3.4.4.3.3 Vliv VJMGS na objemové změny

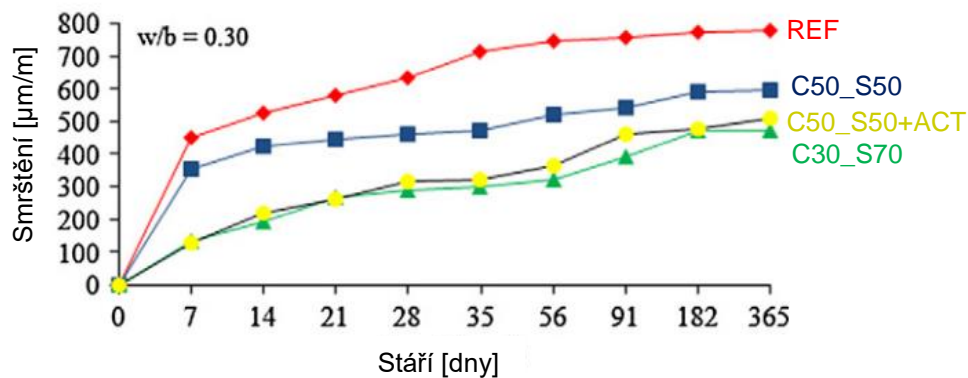
Autoři následující studie zjišťovali vliv VJMGS na velikost autogenního smrštění. Celkem byly namíchány čtyři betonové směsi. První směs referenční s celkovou dávkou cementu  $541 \text{ kg/m}^3$ . Ve zbývajících třech směsích došlo k částečné náhradě cementu 20, 35 a 50 % VJMGS. Nejnižší hodnoty autogenního smrštění vykazovala betonová směs referenční a s přibývajícím množstvím VJMGS v betonové směsi se hodnoty smrštění zvyšovaly. V tomto

případě je tedy možné konstatovat, že VJMGS má negativní vliv na objemové změny betonového kompozitu. [27]



Obr. 32: Vliv množství VJMGS na objemové změny betonu [O18]

Dellinghausen se svým kolektivem provedl experiment, ve kterém se také zabýval vlivem obsahu VJMGS na objemové změny. Závěr byl zcela opačný, tedy že zvyšování obsahu VJMGS ve směsi se pozitivně projevuje na velikost objemových změn betonového kompozitu. Ve své studii porovnával směs referenční bez obsahu VJMGS s betonovými směsmi, ve kterých byl cement nahrazen z 50 a 70 % právě VJMGS. Dále zjišťoval vliv přidáním aktivátoru na bázi síranu sodného u betonové směsi s 50% nahrazením pojiva VJMGS. Veškeré betonové směsi byly namíchaný s konstantní hodnotou vodního součinitele 0,30. [38]



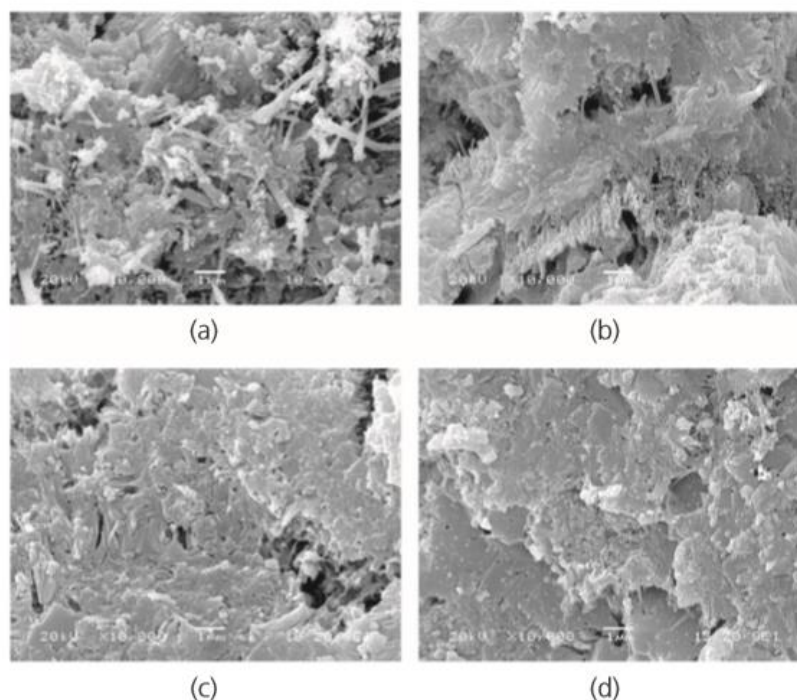
Obr. 33: Vliv množství VJMGS na objemové změny betonu [O31]

Nejvyšší smrštění vykazovala směs referenční a se zvyšujícím se množstvím VJMGS ve směsi se velikost objemových změn snižovala. Je ovšem zajímavé pozorovat průběh smrštění. Zatímco u směsi referenční došlo po 56 dnech zrání k ustálení hodnoty smrštění, u betonových směsí s obsahem VJMGS docházelo k nárůstu objemových změn až do stáří 182 dnů. Přídavek aktivátoru do betonové směsi s 50% nahrazením cementu VJMGS se v počátku jevil jako pozitivní, po 14 dnech došlo k téměř 50% redukci objemových změn v porovnání se směsí se shodným obsahem VJMGS. V průběhu zrání ovšem u směsi s přídavkem aktivátoru docházelo k nárůstu smrštění, a to k takovému, že po roce zrání obě betonové směsi vykazovaly téměř shodnou velikost smrštění. Přídavek aktivátoru má vliv pouze na redukci počátečního smrštění, nikoliv celkového. [38]

Rozdílný vliv VJMGS na objemové změny betonového kompozitu, ke kterému autoři uvedených studií došli, může být způsoben rozdílným chemickým složením vysokopecní strusky případně její granulometrií.

#### **3.4.4.3.4 Vliv VJMGS na mikrostrukturu**

Vysokopecní jemně mletá granulovaná struska vlivem své latentní hydraulicity reaguje s  $\text{Ca(OH)}_2$  za vzniku hydratačních produktů, které zahušťují mikrostrukturu, jak je možno vidět na snímcích ze SEM. Znázorňují mikrostrukturu betonového kompozitu po 3 a 28 dnech zrání. Na snímcích vlevo, tedy (a) a (c), jsou snímky bez přídavku VJMGS do betonové směsi a na snímcích vpravo, tedy (b) a (d), je nahrazen cement 40 % VJMGS. Při porovnání mikrostruktury obou betonových směsí ve stejném stáří vždy vykazuje hutnější mikrostrukturu betonová směs s přídavkem VJMGS. Její přídavek do směsi by měl tedy zvyšovat trvanlivost kompozitu vzhledem ke vzniklým novotvarům zahušťujících mikrostrukturu.



Obr. 34: Znárodnění mikrostruktury betonu a) C100\_S0 po 3 dnech zrání, b) C60\_S40 po 3 dnech zrání, c) C100\_S0 po 28 dnech zrání, d) C60\_S40 po 28 dnech zrání [O23]

#### 3.4.4.4 Mikromletý vápenec

Jedná se o inertní příměs, která je získávána mletím drceného vápence, který obsahuje více jak 75 %  $\text{CaCO}_3$  a zároveň obsah jílových podílů není vyšší než 1,2 g/100 g. Dále je požadováno, aby více jak 70 % zrn propadlo sítem 0,063 mm, díky čemuž jsou v cementové pastě ve velké míře zastoupeny velmi jemné částice, které zhutňují strukturu cementového kamene. [19]

##### 3.4.4.4.1 Vliv mikromletého vápence na odlučivost vody

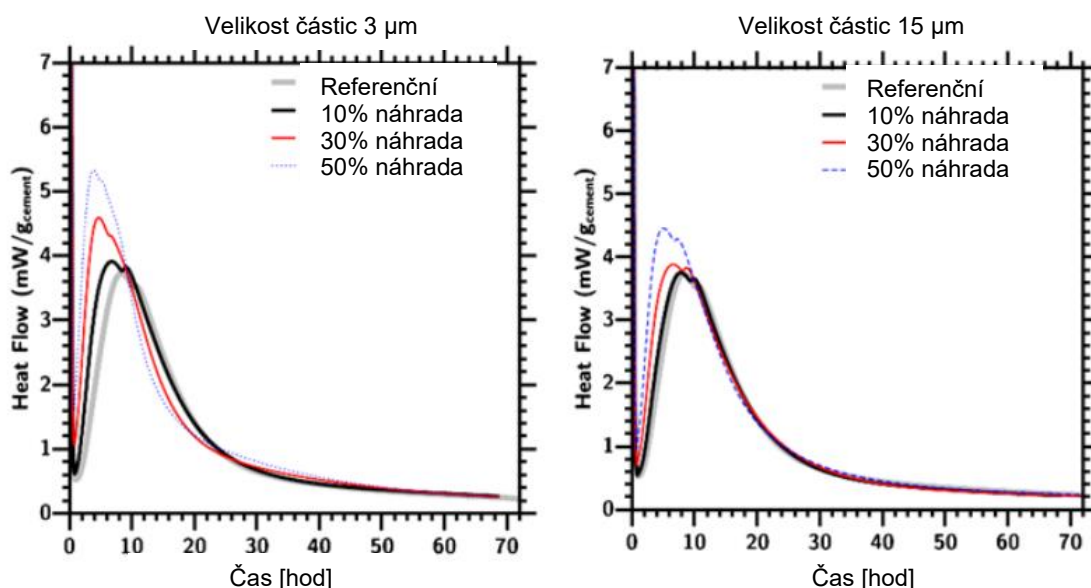
Vliv mikromletého vápence na odlučivost vody z betonu závisí zejména na jeho měrném povrchu, který je dán jemností mletí. Mikromletý vápenec se také vyznačuje dobrou nasákavostí. Obecně lze tedy konstatovat, že přidávkou mikromletého vápence do betonové směsi či malty se riziko odlučování vody snižuje.

##### 3.4.4.4.2 Vliv mikromletého vápence na vývin hydratačních teplot

Autoři následné studie zjišťovali vliv částečné náhrady cementu v cementové pastě mikromletým vápencem. Celkem byly porovnávány čtyři rozdílné směsi. Směs referenční tvořená pouze cementem a dále směsi, které byly z 10, 30 a 50 % hmotnostně nahrazeny mikromletým vápencem. Směs

referenční vykazovala nejnižší množství uvolněného tepla a s přibývajícím množstvím mikromletého vápence ve směsi se zároveň uvolněné teplo zvyšovalo, nejvyšší hodnoty tedy vykazovala směs z 50 % cementu a 50 % mikromletého vápence. Stejní autoři se zároveň zabývali i vlivem velikosti částic na množství uvolněného tepla a bylo zjištěno, že se zvyšující se velikostí částic je množství uvolněného tepla nižší, jak je možno vidět na obrázku č. 35. [24]

S přibývajícím obsahem mikromletého vápence ve směsi a s přibývajícím jemností mletí vápence přibývá i krystalizačních zárodků tvořených mikromletým vápencem, na kterých se mohou reakční produkty slínku vysrážet, což urychluje růst krystalů a ovlivňuje i hydrataci slínku. [39]

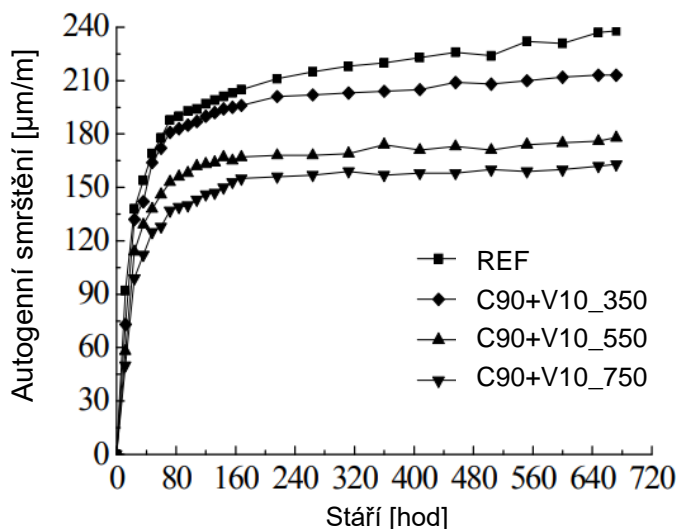


Obr. 35: Vliv náhrady cementu a velikost částic mikromletého vápence na tepelný tok [O14]

#### 3.4.4.4.3 Vliv mikromletého vápence na smrštění

Byl proveden výzkum zjišťující vliv jemnosti mletí mikromletého vápence na objemové změny betonu. Autoři studie porovnávali betonovou směs referenční s obsahem cementu  $490 \text{ kg/m}^3$  a betonové směsi s 10% nahrazením cementu právě mikromletým vápencem s rozdílným měrným povrchem, konkrétně 350, 550 a  $700 \text{ m}^2/\text{kg}$ . Obr. 36 demonstruje průběh autogenního smrštění. Nejvyšší hodnoty smrštění vykazuje betonová směs referenční. Se zvyšujícím se měrným povrchem mikromletého vápence dochází ke snížení smrštění betonové směsi. Autoři se domnívají, že s přidavkem mikromletého

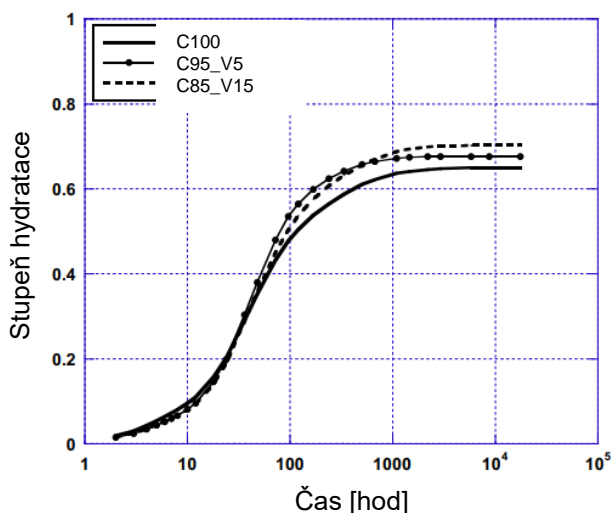
vápence se zpomaluje úbytek vnitřní relativní vlhkosti betonové směsi a účinek je výraznější s přibývajícím měrným povrchem mikromletého vápence. [26]



Obr. 36: Vliv měrného povrchu mikromletého vápence na smrštění betonové směsi [O17]

#### 3.4.4.4 Vliv mikromletého vápence na mikrostrukturu

Autoři studie zjišťovali vliv nahrazení části cementu mikromletým vápencem. Pro měření byly použity tři zkušební záměsi. První zkušební záměs byla tvořena cementovou pastou, ve druhé zkušební záměsi došlo k 5% náhradě cementu mikromletým vápencem a u třetí záměsi bylo množství cementu nahrazeno 15 % mikromletého vápence. Při porovnání stupně hydratace ve stejném časovém období bylo zjištěno, že s přibývajícím množstvím mikromletého vápence se zvyšuje i stupeň hydratace. [23]



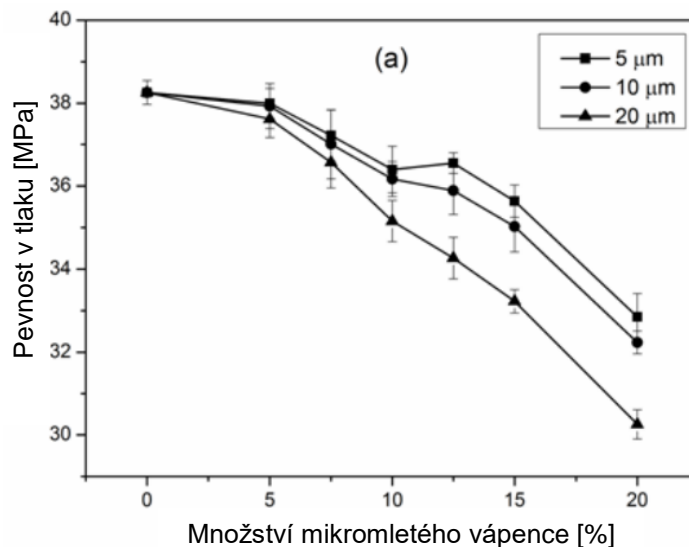
Obr. 37: Vliv přídavku mikromletého vápence na stupeň hydratace [O13]

Mikromletý vápenec je považován za inertní příměs do betonu, mnoho studií ovšem hovoří o tzv. skryté aktivitě vápenců. Jemné částice vápence tvoří krystalizační zárodky, na kterých se mohou reakční produkty slínku vysrážet. Přítomnost těchto zárodků urychluje růst krystalů, vede k větší hydrataci slínku a ovlivňuje i fyzikálně mechanické parametry kompozitu. [39]

#### 3.4.4.4.5 Vliv mikromletého vápence na mechanické parametry

Skupina autorů následujícího experimentu se zabývala jemností mletí vápence na mechanické parametry cementových past. Jednotlivé pasty se navzájem lišily velikostí částic vápence a procentuální náhradou cementu. Veškeré pasty byly namíchány s konstantní hodnotou vodního součinitele 0,50. [40]

Dle zjištěných mechanických parametrů je možno konstatovat, že s přibývajícím množstvím mikromletého vápence ve směsi klesají její mechanické parametry a také že s přibývající velikostí částic vápence je tento úbytek výraznější. To je způsobeno nižším množstvím zárodků, které jsou k dispozici pro reakční produkty slínku. Lze se také domnívat, že v případě, kdyby byl mikromletý vápenec skutečně zcela inertní příměsí, bylo by snížení mechanických parametrů cementových past daleko výraznější.



Obr. 38: Vliv velikosti částic a množství mikromletého vápence na mechanické parametry [O32]

#### **3.4.4.5 Kamenný filler (odprašky, moučka)**

Při drcení kameniva v lomech vznikají zachytáváním jemných podílů kamenné odprašky o velikosti zrn do 0,01 – 0,125 mm a specifickým měrným povrchem dle Blaina je 150 – 300 m<sup>2</sup>/kg. Další vlastnosti odprašek jsou závislé na vlastnostech původní horniny, ze které byly odprašky získány. Z důvodu ostrohranných zrn ovšem tento materiál obecně potřebuje vyšší dávku záměsové vody. [19]

##### **3.4.4.5.1 Vliv kamenného filleru na odlučivost vody**

Vliv kamenného filleru na odlučivost vody nelze jednoznačně specifikovat. Vždy totiž závisí na petrografickém druhu horniny, ze které kamenný filler pochází. Do úvahy také připadají vlastnosti této suroviny, které jsou zejména v granulometrii a velikosti měrného povrchu velmi variabilní.

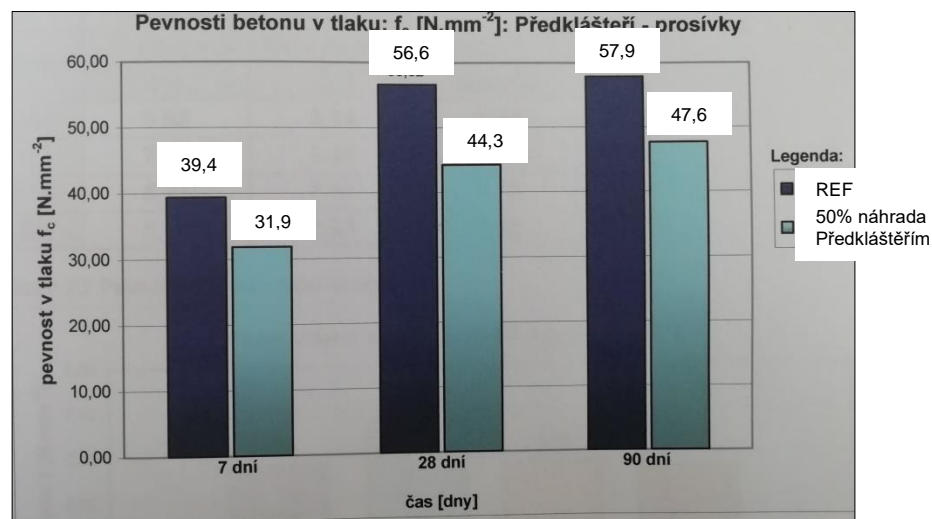
##### **3.4.4.5.2 Vliv kamenného filleru na konzistenci, vodonáročnost**

Z důvodu velkého měrného povrchu a nepravidelného tvaru zrn je nutno použít větší množství záměsové vody pro ovlhčení povrchu zrn. To způsobí pokles výsledných fyzikálně mechanických parametrů a zároveň se zvýší riziko segregace kameniva a množství odloučené vody z betonové směsi.

##### **3.4.4.5.3 Vliv kamenné prosívky na mechanické parametry**

Ťažký se ve své diplomové práci zabýval 50% náhradou těžného drobného kameniva frakce 0 – 4 mm z Bratčic kamennou prosívkou z lokality Předklášteří v porovnání s referenční směsí bez obsahu prosívky a zjišťoval vliv na mechanické parametry ztvrdlého betonu. Ty byly v rozdílném časovém horizontu pokaždé nižší. To je nejspíše způsobeno nevhodnou granulometrií výsledné směsi a také o 20 kg/m<sup>3</sup> vyšší dávkou záměsové vody potřebné pro ovlhčení vyššího měrného povrchu způsobeného jemnými částicemi příměsí. [44]





Obr. 39: Vliv 50% nahrazení DTK 0 – 4 mm kamennou prosívkou na mechanické parametry ztvrdlého betonu [O26]

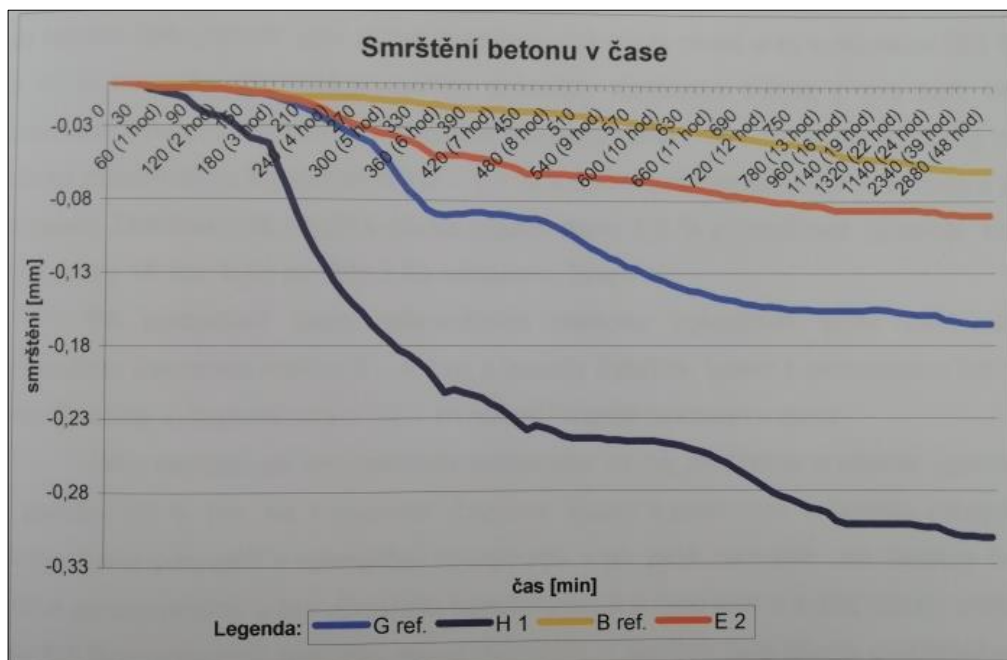
#### 3.4.4.5.4 Vliv kamenné prosívky na vývoj hydratačních teplot a objemové změny betonu

Stejný autor měřil také vývoj hydratačních teplot v betonových směsích. Ve všech recepturách byla použita konstantní dávka cementu 330 kg/m<sup>3</sup>. V referenční betonové směsi s označením G byla dávka DTK 0 – 4 z lokality Žabčice 1130 kg/m<sup>3</sup>, u receptury s označením H1 došlo k 50% náhradě DTK kamennou prosívkou z lokality Lomnička. V referenční směsi s označením B byla dávka DTK 960 kg/m<sup>3</sup> a v případě betonové směsi s označením E2 došlo k 50% náhradě této dávky kamennou prosívkou z lokality Předklášteří. [44]

Průběh vývoje hydratačních teplot v měřených betonových recepturách byl velmi podobný, a to zejména vlivem konstantní dávky cementu. I přesto betonové směsi s obsahem kamenné prosívky vykazovaly nepatrně nižší maximální dosažené teploty, které mohou být způsobeny zvýšenou dávkou vody ve směsi potřebné z důvodu vyššího měrného povrchu kamenných fillerů při stejné konzistenci.

Obrázek 40 demonstuje vývoj objemových změn na betonových recepturách. V případě 50% nahrazení DTK z lokality Žabčice kamennou prosívkou z lokality Lomnička došlo ke zvýšení objemových změn téměř o 50 % v porovnání s referenční recepturou G. V případě 50% náhrady DTK kamennou prosívkou z lokality Předklášteří došlo ke zvýšení objemových změn téměř o jednu třetinu. Je tedy patrné, že nahrazením DTK kamennou prosívkou

negativně působí na objemové změny z důvodu vyššího měrného povrchu jemných částic, s čímž souvisí i vyšší dávka záměsové vody pro dosažení potřebné konzistence. [44]



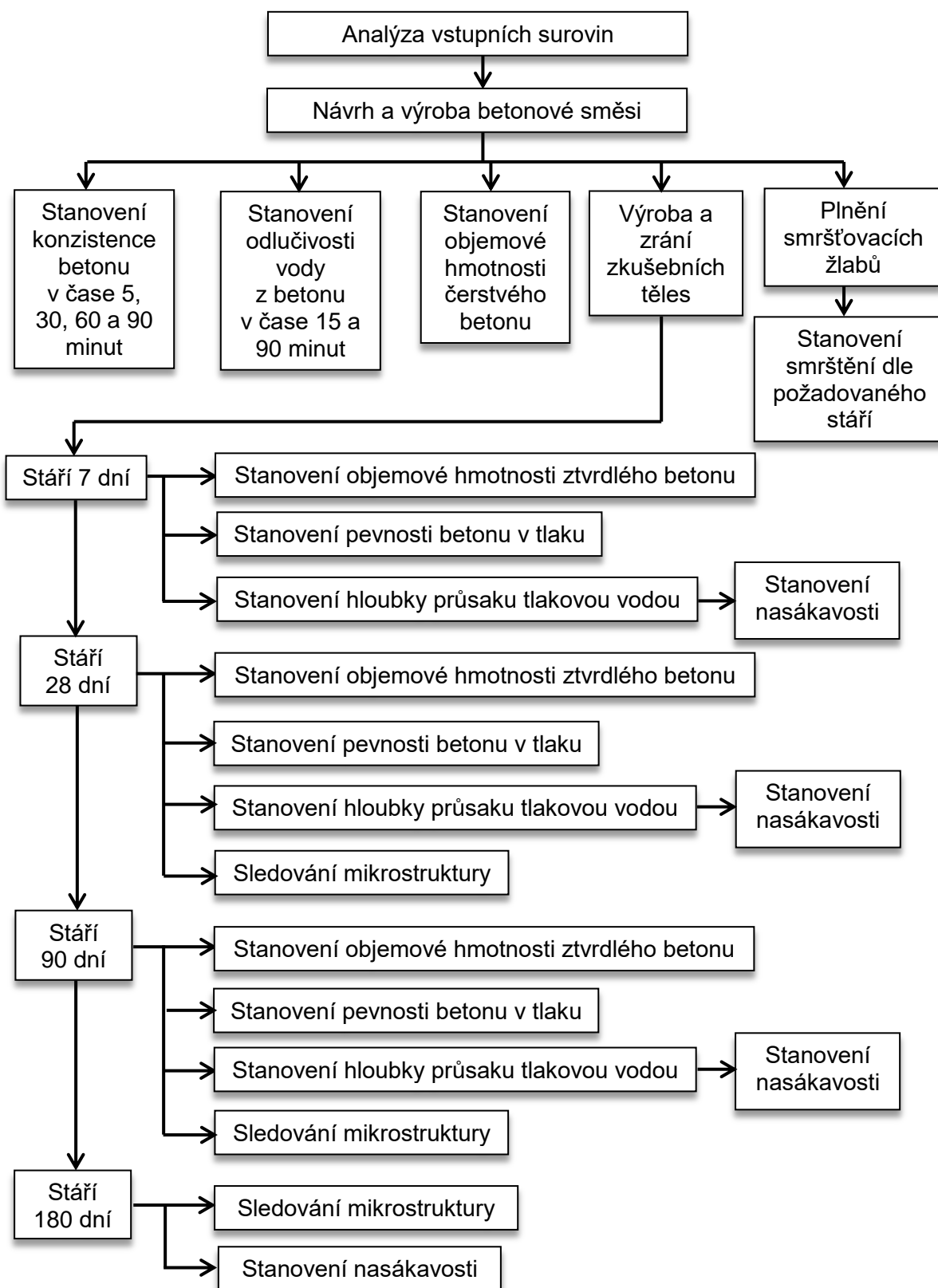
Obr. 40: Průběh objemových změn u porovnávaných betonových receptur [O26]

## **4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST**

### **4.1 Cíl práce**

V rámci experimentální části diplomové práce bylo navrženo složení betonové směsi pevnostní třídy C 30/37 při konzistenci S4 s využitím aktivních příměsí (vysokopeční jemně mletá granulovaná struska, vysokoteplotní popílek), inertních příměsí (mikromleté vápence, kamenné fillery) a jejich vzájemné kombinace za pomoci speciálního softwaru s cílem dosažení co největší hutnosti cementové matrice v suchém stavu a zjištění jejího vlivu na objemové změny betonu. Zvýšení hutnosti cementové matrice by také mělo vést ke snížení obsahu pórů a kapilár, tedy ke zvýšení mechanických vlastností a snížení nasákavosti betonu. Zároveň při vhodném návrhu by mělo dojít ke snížení množství cementu při zachování srovnatelných mechanických parametrů, což by bylo přínosné zejména z ekonomického hlediska.

## 4.2 Metodika práce



### 4.3 Analýza vstupních surovin

Aby bylo možno provést správný návrh betonové směsi s maximální hutností cementové matrice, je nejdříve nutné pečlivě analyzovat veškeré vstupní suroviny. Více informací o jednotlivých surovinách je k nalezení v následujících podkapitolách práce.

#### 4.3.1 Cement

Pro výrobu všech betonových směsí a zároveň pro měření vývoje hydratačních teplot na cementových maltách byl použit portlandský cement CEM I 42,5 R od společnosti Českomoravský cement, a. s. vyrobený v závodě Mokrá. Základní mechanické a fyzikální parametry této suroviny jsou převzaty z technického listu výrobce a jsou obsaženy v tabulce 6. Zbylé informace o této surovině jsou uvedeny v technickém listu výrobce, který je součástí příloh této práce. [P6]

Tab. 6: Základní mechanické a fyzikální parametry CEM I 42,5 R

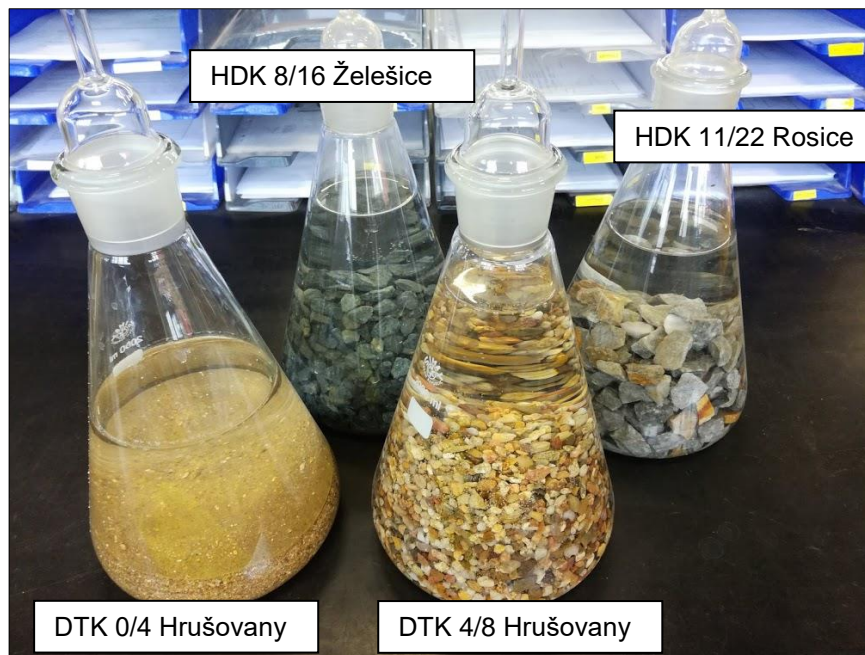
Surovina	Pevnost v tahu za ohybu po 2 dnech zrání [MPa]	Pevnost v tlaku po 2 dnech zrání [MPa]	Pevnost v tahu za ohybu po 28 dnech zrání [MPa]	Pevnost v tlaku po 28 dnech zrání [MPa]	Počátek tuhnutí [min]	Konec tuhnutí [min]	Měrný povrch [m <sup>2</sup> /kg]	Měrná hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]
CEM I 42,5 R	6,0	30,0	9,0	60,0	185	240	408	3110

#### 4.3.2 Kamenivo

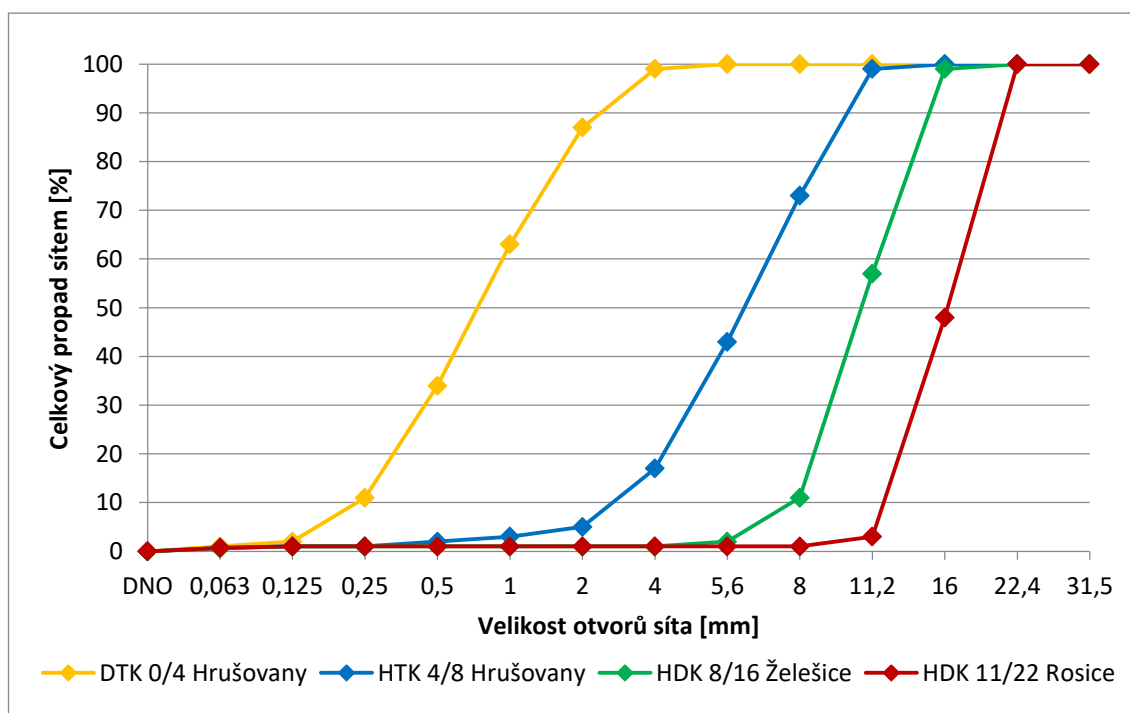
Pro výrobu betonových směsí byly celkem použity 4 frakce kameniva. Na každé frakci kameniva byla stanovena objemová hmotnost zrn a nasákavost dle ČSN EN 1097-6 [N7], výsledné hodnoty jsou obsaženy v tab. 7 a dle ČSN EN 933-1 [N8] byl stanoven síťový rozbor dílčích frakcí kameniva. Jednotlivé křivky zrnitosti jsou znázorněny v grafu č. 1.

Tab. 7: Základní informace o použitém kamenivu

Vlastnost	Kamenivo			
Frakce, lokalita	DTK 0/4 Hrušovany	DTK 4/8 Hrušovany	HDK 8/16 Želešice	HDK 11/22 Rosice
Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	2660	2650	2980	2670
Nasákavost [%]	0,56	1,39	0,42	0,38



Obr. 41: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti dle ČSN EN 1097-6 [N7]



Graf 1: Křivky zrnitosti dílčích kameniv

### 4.3.3 Voda

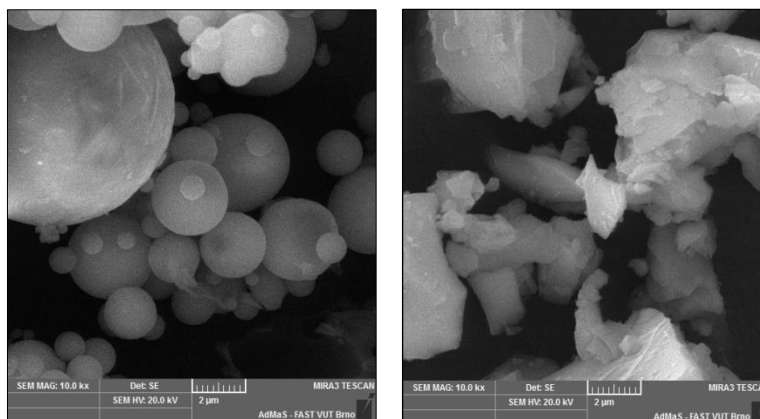
Pro výrobu betonových směsí i cementových malt byla použita pitná voda z vodovodního řadu, který je ve správě společnosti Brněnské vodárny a kanalizace, a. s..

#### 4.3.4 Plastifikační přísada

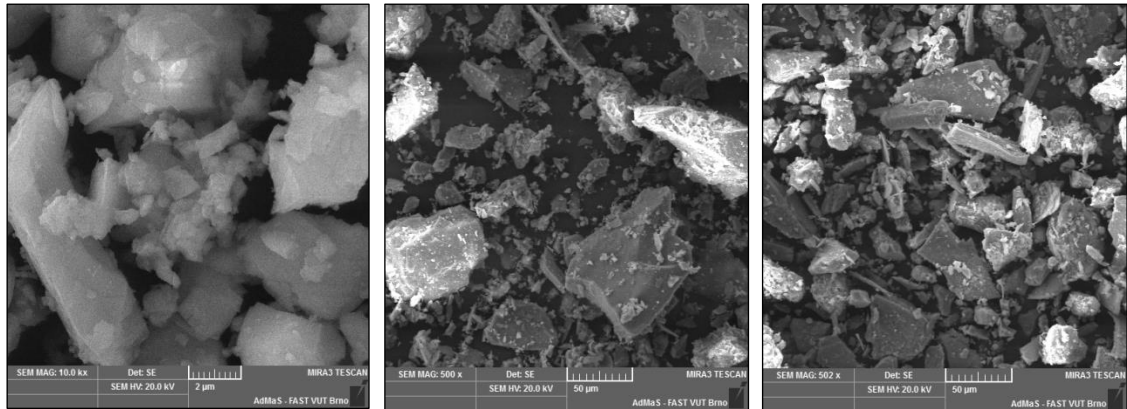
Pro snížení množství záměsové vody a zvýšení fyzikálně mechanických vlastností betonové směsi byla použita superplastifikační přísada Mapei Dynamon SX 14 na bázi nesířených akrylových polymerů, která má značnou měrou zamezit ztrátě konzistence čerstvé betonové směsi při zpracování v delším časovém horizontu. Doporučené dávkování uváděné výrobcem se pohybuje v rozmezí 0,5 – 1,5 % z hmotnosti cementu. Veškeré údaje o této přísadě jsou k dispozici v technickém listu výrobce, který je součástí příloh diplomové práce. [P7]

#### 4.3.5 Příměsi

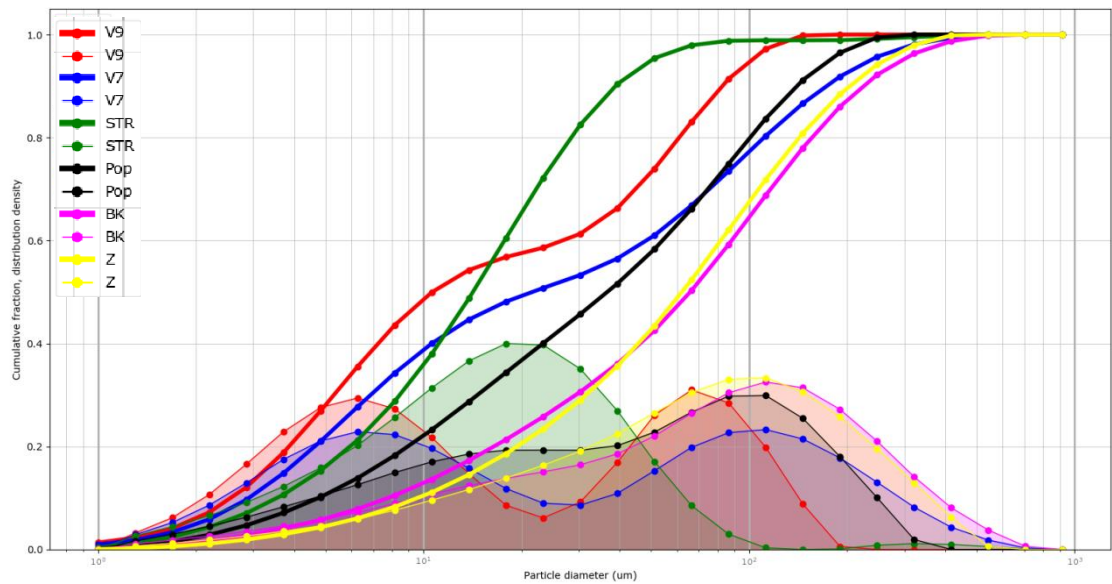
Pro přípravu betonových směsí bylo použito celkem 6 druhů příměsí. Z aktivních příměsí se jednalo o vysokoteplotní úletový popílek z tepelné elektrárny Dětmarovice a vysokopeční jemně mletou granulovanou strusku z lokality Dětmarovice. Z inertních příměsí to byly dva mikromleté vápence společnosti Carmeuse číslo 7 a 9 z lokality Mokrá, které se od sebe lišily jemnosti mletí. Dále dva kamenné fillery z odlišných lokalit, konkrétně z lomu Zárubka a Bílý Kámen. Na všech příměsích byla stanovena jejich granulometrie (viz. Obr. 47), měrná hmotnost a měrný povrch, jejichž hodnoty jsou uvedeny v Tab. 8. Tato tabulka obsahuje rovněž sledované parametry kombinací těchto příměsí, které byly stanovené pomocí softwaru pro zajištění maximální hutnosti této směsi v jejím suchém stavu. Přesný postup této optimalizace je popsán dále. Následující obrázky č. 42 – 46 zachycují vstupní příměsi za použití SEM.



Obr. 42, 43: Snímek ze SEM vysokoteplotního popílku Dětmarovice (vlevo) a VJMGS Dětmarovice (vpravo)



Obr. 44, 45, 46: Snímek ze SEM mikromletého vápence 7 (vlevo), kamenného filleru z lokality Bílý Kámen (uprostřed) a kamenného filleru z lokality Zárubka (vpravo)



Obr. 47: Křivky zrnitosti a rozložení velikosti zrn použitých příměsí

Tab. 8: Stanovené parametry použitých příměsí

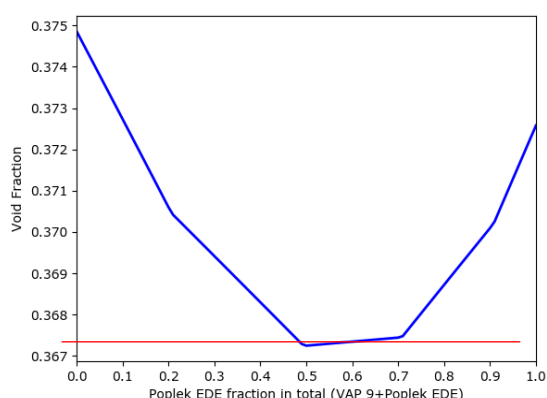
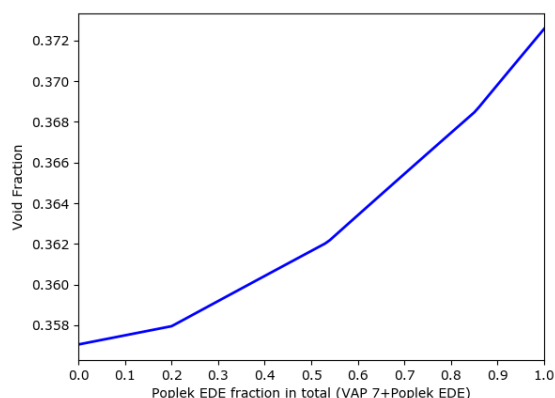
Receptura	STR	POP	VÁP 7	VÁP 9	ZÁR	BK	STR + VÁP 7	STR + VÁP 9	STR + ZÁR	STR + BK	POP + VÁP 7	POP + VÁP 9	POP + ZÁR	POP + BK
Měrná hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	2920	2250	2770	2750	2780	2680	2850	2830	2820	2710	2440	2500	2350	2530
Měrný povrch [cm <sup>2</sup> /g]	3840	2900	3120	4490	2320	3350	3480	4165	2760	3400	2980	3690	2790	3190



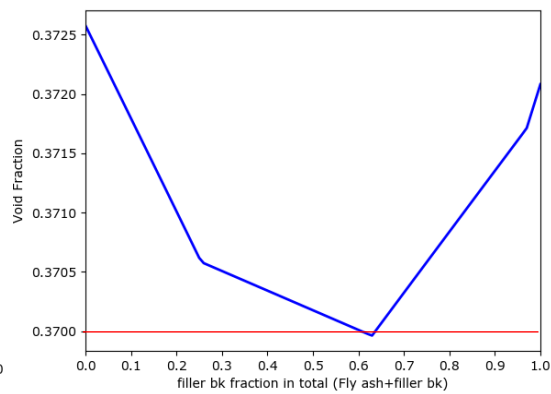
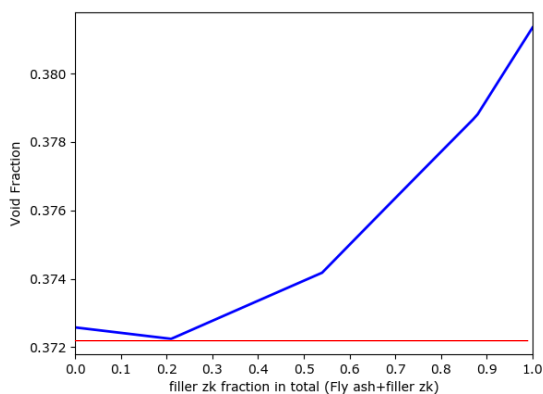
Pro dosažení maximální hutnosti cementové matrice byl použit speciální algoritmus, který na základě zjištěných parametrů jednotlivých surovin dokázal stanovit nejvhodnější objemový poměr mísení příměsí pro získání co nejnižší mezerovitosti této kombinace. V případě, že nebyl nalezen optimální poměr, jak je tomu například při kombinaci mikromletého vápence 7 a vysokoteplotního popílku, byl zvolen objemový poměr mísení 50 %:50 %. Nenalezení optimálního poměru mísení těchto surovin je dáno jejich granulometrií. Nevhodná vzájemná granulometrie má za následek, že jakékoliv jejich mísení obecně zhoršuje mezerovitost směsi, která by byla nejnižší pouze při použití jednoho druhu příměsí. Veškeré objemové dávkování kombinací příměsí a vypočtené mezerovitosti, potažmo maximální hutnosti tohoto systému je uvedeno v tabulce 9 a následně znázorněno na obrázcích 48 – 55.

Tab. 9.: Poměr mísení kombinace příměsí pro dosažení minimální mezerovitosti směsi

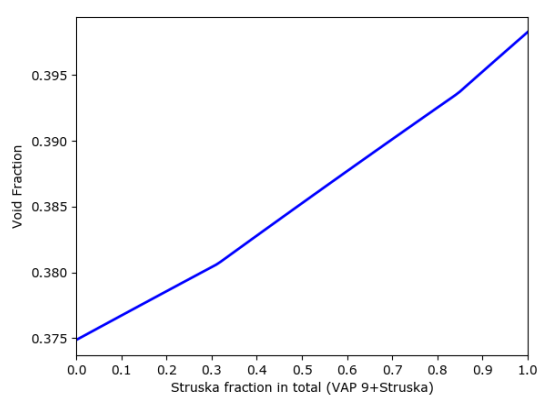
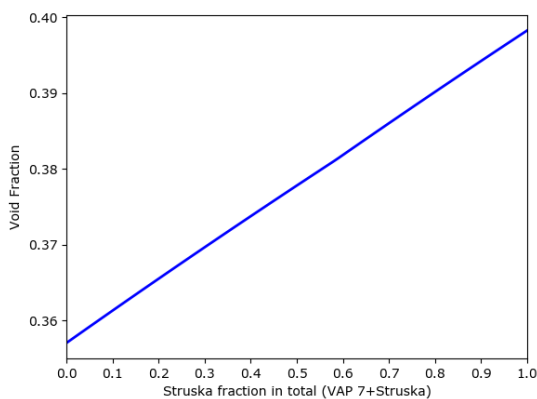
Druh a množství příměsí [%]	Struska Dětmarovice (STR)	Popílek Dětmarovice (POP)	Vápenec 7 Mokrá (VAP 7)	Vápenec 9 Mokrá (VAP 9)	Filler Zárubka (ZÁR)	Filler Bílý Kámen (BK)	Minimální mezerovitost [%]	Maximální hutnost [%]
POP+VÁP 7	—	50	50	—	—	—	—	—
POP+VÁP 9	—	51	—	49	—	—	36,72	63,28
POP+ZÁR	—	80	—	—	20	—	36,98	63,02
POP+BK	—	36	—	—	—	64	37,28	62,72
STR+VÁP 7	50	—	50	—	—	—	—	—
STR+VÁP 9	50	—	—	50	—	—	—	—
STR+ZÁR	27	—	—	—	73	—	37,60	62,40
STR+BK	10	—	—	—	—	90	36,99	63,01



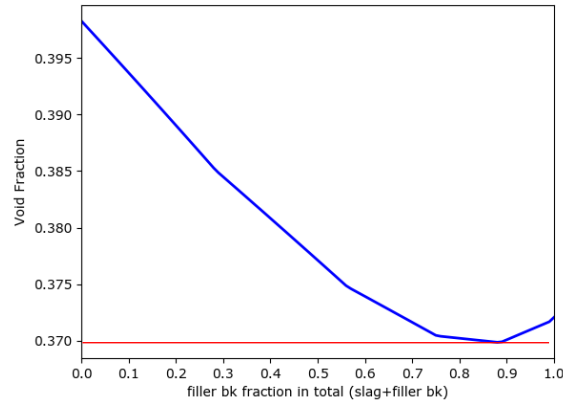
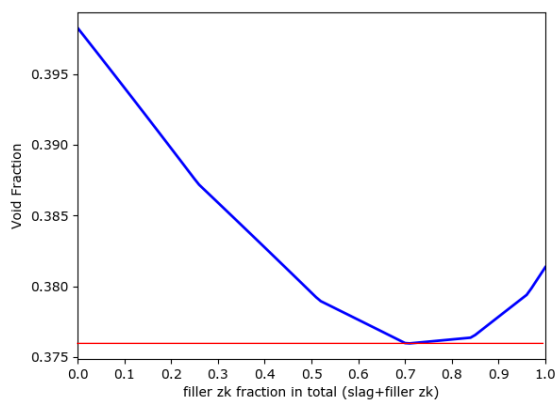
Obr. 48, 49: Optimální poměr mísení vysokoteplotního popílku s mikromletým vápencem 7 a 9



Obr. 50, 51: Optimální poměr mísení vysokoteplotního popílku s kamennými fillery



Obr. 52, 53: Optimální poměr mísení VJMGS s mikromletými vápenci 7 a 9



Obr. 54, 55: Optimální poměr mísení VJMGS s kamennými fillery

#### 4.4 Stanovení vývoje hydratačních teplot

Z důvodu přesnějšího stanovení vlivu jednotlivých minerálních příměsí a jejich kombinací na vývoj hydratačních teplot probíhalo měření na jednodušších systémech, tedy cementových maltách při stejné konzistenci.

Celkem bylo vytvořeno 14 receptur, z toho 6 receptur pouze s jedním druhem příměsí a 8 receptur s kombinací příměsí. Jejich přesné složení včetně množství přidané vody a hodnoty rozlití je uvedeno v tabulce 10.

Složení jednotlivých malt vycházelo ze složení příslušných betonových směsí. Obsah cementu a příměsí byl zachován, pouze z pohledu přístrojového vybavení a pro snadnější stanovení konzistence metodou rozlití pomocí střešovacího stolku došlo k náhradě hrubého kameniva drobným těžným kamenivem 0 – 4 mm z lokality Hrušovany.

Tab. 10.: Složení cementových malt pro měření vývoje hydratačních teplot

Receptura/ surovina [g]	Cement CEM I 42,5 R Mokrá (C)	Struska Dětmarovice (STR)	Popílek Dětmarovice (POP)	Vápenec 7 Mokrá (VÁP 7)	Vápenec 9 Mokrá (VÁP 9)	Filler Zárubka (ZÁR)	Filler Bílý Kámen (BK)	DTK 0 – 4 mm Hrušovany	Množství vody [ml]	Ø Rozlití [mm]
STR	300	90	—	—	—	—	—	1525	330	170
POP	300	—	120	—	—	—	—	1465	330	180
VÁP 7	315	—	—	120	—	—	—	1435	345	180
VÁP 9	315	—	—	—	120	—	—	1475	330	180
ZÁR	315	—	—	—	—	120	—	1475	330	180
BK	315	—	—	—	—	—	120	1475	330	170
STR+VÁP 7	300	46	—	44	—	—	—	1520	330	170
STR+VÁP 9	300	46	—	—	44	—	—	1495	340	170
STR+ZÁR	300	25	—	—	—	65	—	1490	340	180
STR+BK	300	10	—	—	—	—	80	1450	355	170
POP+VÁP 7	300	—	54	66	—	—	—	1450	340	180
POP+VÁP 9	300	—	55	—	65	—	—	1465	335	170
POP+ZÁR	300	—	92	—	—	28	—	1455	335	170
POP+BK	300	—	38	—	—	—	82	1465	335	180

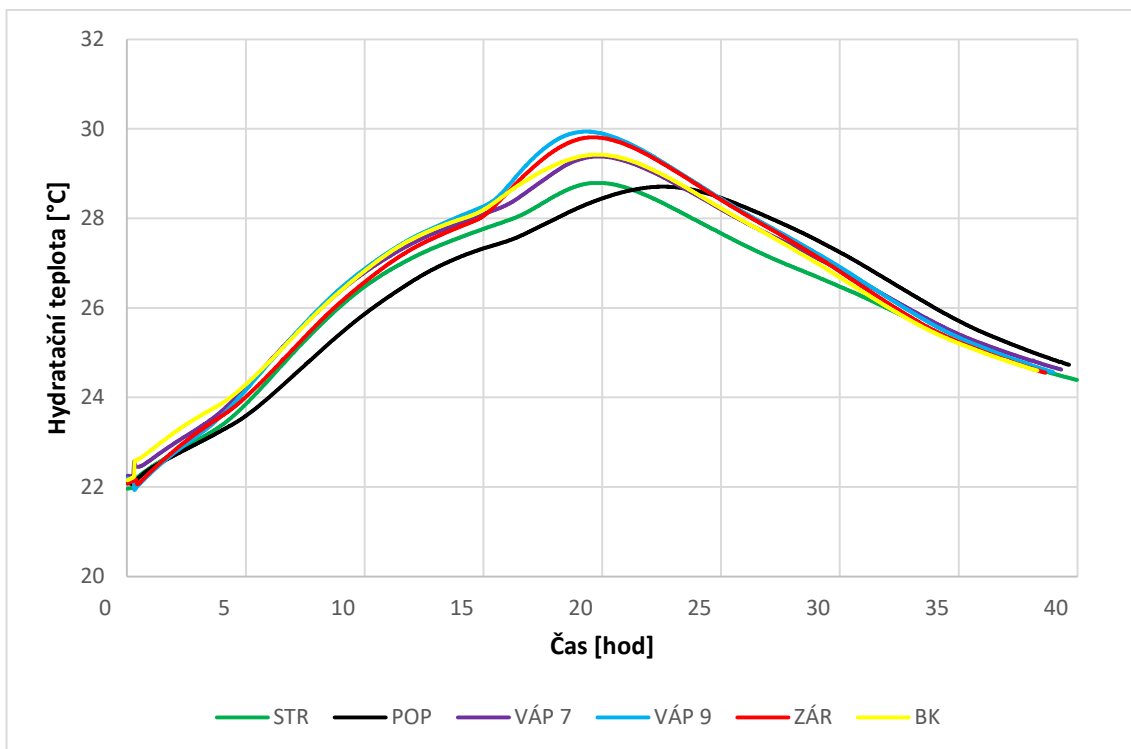
Měření vývoje hydratačních teplot probíhalo dle ČSN EN 196 – 9 [N9] semiadiabatickou metodou, avšak na cementových maltách. Jednotlivé cementové malty byly namíchány dle složení na konzistenci rozlití 170 - 180 mm stanovené dle ČSN EN 1015-3 [N21], následně naplněny do PE sáčků a vloženy do izolovaných kalorimetrů. Hodnota teploty směsi byla

zaznamenávána každou 1 minutu. Kalorimetr, na kterém probíhalo měření je znázorněn ve fotodokumentaci na obrázku 69.

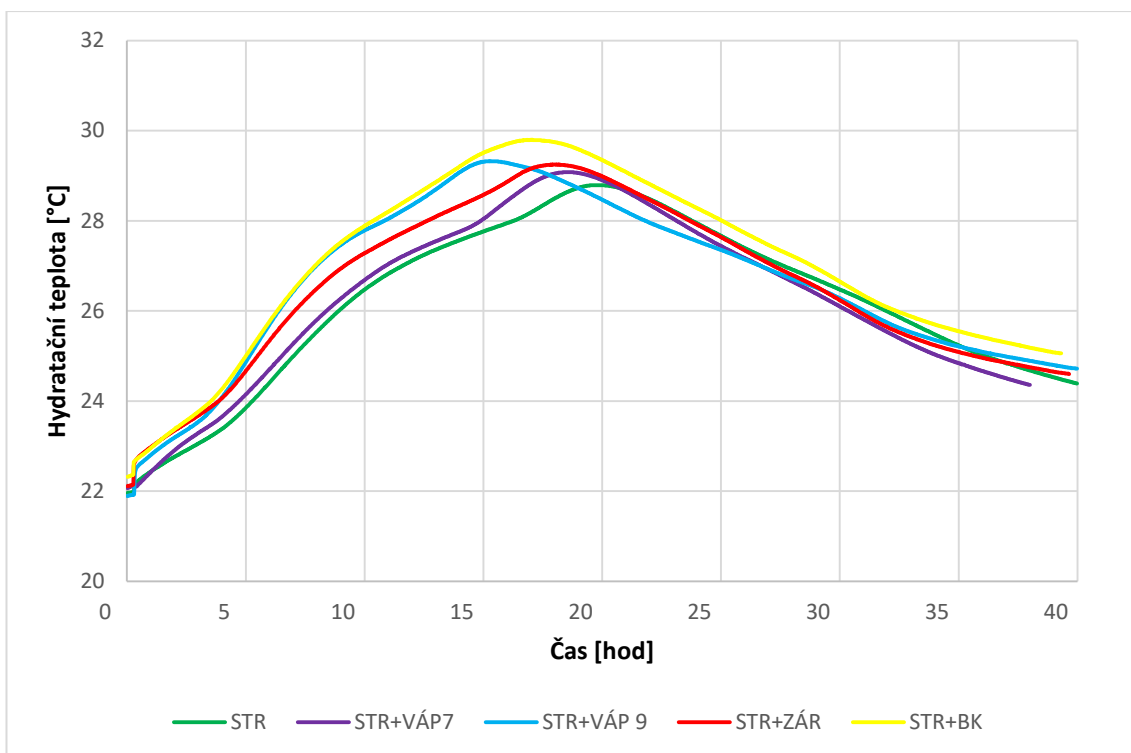
Maximální dosažená teplota jednotlivých cementových past a čas k jejímu dosažení je zaznamenán v tabulce 11. Průběh vývoje hydratačních teplot u jednotlivých cementových past je zaznamenán v grafech 2 – 4.

Tab. 11: Maximální vyvinuté hydratační teploty a čas potřebný pro jejich dosažení

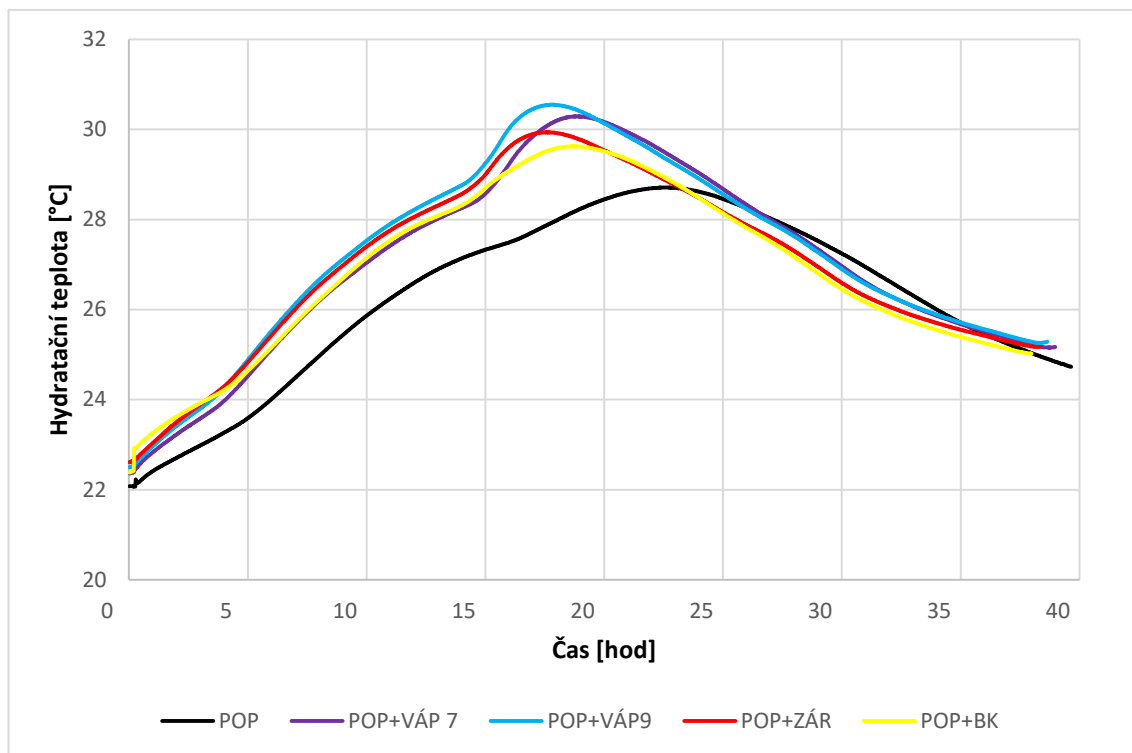
<b>Stáří/ Receptura</b>	<b>Maximální dosažená teplota [°C]</b>	<b>Čas dosažení maximální teploty [h:min]</b>
STR	28,8	19:50
POP	28,7	22:34
VÁP 7	29,4	19:53
VÁP 9	29,9	19:18
ZÁR	29,8	19:36
BK	29,4	19:47
STR + VÁP 7	29,1	18:37
STR + VÁP 9	29,3	15:17
STR + ZÁR	29,3	18:06
STR + BK	29,7	17:05
POP + VÁP 7	30,3	18:53
POP + VÁP 9	30,6	17:48
POP + ZÁR	29,5	17:36
POP + BK	29,6	18:48



Graf 2: Vývoj hydratačních teplot cementových malt s jednou příměsí



Graf 3: Vývoj hydratačních teplot u cementových malt v kombinaci VJMGS a inertních příměsí



Graf 4: Vývoj hydratačních teplot u cementových malt v kombinaci vysokoteplotního popílku a inertních příměsí

#### 4.4.1 Vyhodnocení a diskuze výsledků

##### Cementové malty pouze s jedním druhem příměsí

Při měření vývoje hydratačních teplot u cementových malt obsahujících pouze jeden druh příměsí vykazovala nejvyšší dosaženou hodnotu 29,9 °C cementová malta obsahující mikromletý vápenec 9, následně cementová malta s kamenným fillerem z lokality Zárubka 29,8 °C, shodné nejvyšší dosažené teploty 29,4 °C vykazovaly cementové malty obsahující mikromletý vápenec 7 či kamenný filler z lokality Bílý Kámen. Cementová malta obsahující VJMGS vykazovala maximální dosaženou teplotu 28,8 °C. Mikromletý vápenec se vyznačuje svojí skrytou aktivitou a s přibývajícím jemností mletí se zvyšuje i množství krystalizačních zárodků, které v důsledku větší hydratace slínku mohou vykazovat vyšší hydratační teploty, což může být příčinou, proč právě cementová malta s mikromletým vápencem 9 vykazuje vyšší maximální dosažené teploty než cementová malta s mikromletým vápencem 7. Cementová malta s mikromletým vápencem 7 také obsahovala v porovnání o 15 g více vody, čímž jednoznačně dochází k ovlivnění hydratační teploty. Cementové malty obsahující VJMGS či vysokoteplotní popílek obsahovaly ve

svém složení o 15 g méně cementu v porovnání s ostatními cementovými maltami s jednou příměsí a z toho důvodu dochází k nižšímu vývinu hydratačního tepla a bylo dosaženo nižších hydratačních teplot než u ostatních cementových malt. Při hydrataci cementové malty obsahující vysokoteplotní popílek byla zapotřebí delší doba pro dosažení maximální hydratační teploty, což je v přímé souvislosti s povahou popílku, který rozvolňuje hydratační proces, a proto se velice často používá do konstrukčních betonů masivních staveb.

### **Cementové malty v kombinaci příměsí VJMGS a inertních příměsí**

V případě receptur s kombinací VJMGS a inertních příměsí vykazovala nejvyšší dosaženou teplotu 29,7 °C cementová malta s kombinací VJMGS a kamenného filleru z lokality Bílý Kámen. Zajímavý trend nastal u cementové směsi obsahující kombinaci VJMGS a mikromletého vápence 9, neboť k dosažení maximální hydratační teploty došlo o 3 hodiny a 20 minut dříve než u cementové malty s VJMGS a mikromletým vápencem 7. Může to být dáno právě vyšší skrytou aktivitou mikromletého vápence v důsledku vyšší jemnosti mletí, jejíž vliv byl popsán již v teoretické části práce.

### **Cementové malty v kombinaci příměsí vysokoteplotního popílku a inertních příměsí**

V případě cementových malt s kombinací vysokoteplotního popílku a inertních příměsí vykazovala nejvyšší dosaženou teplotu 30,6 °C cementová malta obsahující mikromletý vápenec 9, poté směs s mikromletým vápencem 7, konkrétně 30,3 °C. Při porovnání času potřebných k dosažení této teploty je také patrné, že cementová malta obsahující mikromletý vápenec 9 dosáhla i přes vyšší množství záměsové vody své maximální teploty téměř o hodinu dříve v porovnání s mikromletým vápencem 7, což může být způsobeno vyšším počtem krystalizačních zárodků v důsledku vyšší jemnosti mletí. Tento výsledek přímo odpovídá výsledkům u směsí s VJMGS a lze tedy říci, že byl prokázán vliv mikromletého vápence popsán v teoretické části práce. Cementové malty obsahující směs vysokoteplotního popílku a kamenných fillerů dosáhly přibližně stejné maximální hydratační teploty.

Z pohledu možného dopadu na objemové změny kompozitu nelze očekávat žádné negativní důsledky u žádné z vyrobených směsí. Dosažené maximální teploty jsou u všech směsí prakticky srovnatelné a vyjma rychlejšího nástupu této teploty nelze pozorovat žádné anomálie.

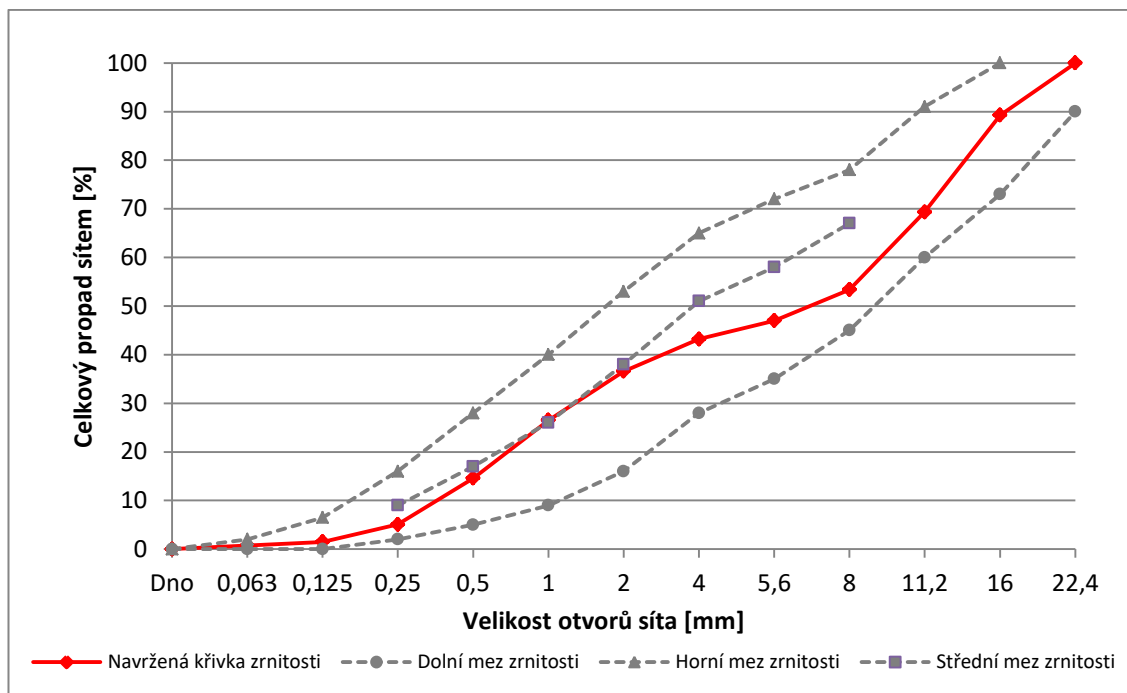
#### **4.5 Návrh složení betonového kompozitu**

Celkem bylo namícháno 14 receptur betonových směsí pevnostní třídy C30/37. Šest receptur pouze s jedním druhem příměsi a dalších osm receptur v kombinaci aktivní příměsi s příměsí inertní v optimálním poměru stanoveným algoritmem. Dávky cementu a příměsi v případě receptur pouze s jedním druhem příměsi byly navrženy s ohledem na dosažení porovnatelné pevnosti v tlaku po 28 dnech. V případě receptur s kombinací příměsi bylo vždy vycházeno ze skladby obsahující danou aktivní příměs.

Po provedení síťových rozborů na vstupních kamenivech byla pro veškeré betonové směsi navržena shodná křivka zrnitosti, která je znázorněná na grafu 5. Tím by se mělo zamezit ovlivnění rozdílné skladby kameniva na mechanické parametry jednotlivých receptur. Pro lepší orientaci polohy navržené křivky jsou na totožném grafu znázorněny hranice zrnitosti vycházející z TKP 18 ČR [N23].

Množství vody v betonové směsi se pohybovalo v rozmezí od 173 - 180 kg/m<sup>3</sup> a množství superplastifikační přísady Mapei Dynamon SX 14 se pohybovalo v rozmezí 0,8 – 1,2 % k celkové hmotnosti cementu a příměsí ve směsi, a to z důvodu dosažení shodné konzistence betonové směsi stanové metodou dle ČSN EN 12350 – 2 [N4] s hodnotou sednutí kužele 180 mm v čase 5 minut.





Graf 5: Výsledná křivka zrnitosti směsi kameniva

Z výsledných dávek vody a plastifikační přísady pro dosažené stejného sednutí kužele u všech betonových směsí jednoznačně vyplývá vodonáročnost jednotlivých druhů příměsí. Dle očekávání na základě vhodné morfologie zrn se jako nejvhodnější z pohledu pozitivního ovlivnění konzistence směsi jeví vysokoteplotní úletový popílek. Jako nejméně vhodná příměs z pohledu ovlivnění reologie kompozitu se jeví VJMGS, případně kamenné fillery. Tento výsledek je v přímě souvislosti s výzkumy popsány v teoretické části práce.

Tab. 12: Složení jednotlivých receptur betonových směsí

Receptura/ surovina [kg/m <sup>3</sup> ]	STR	POP	VÁP 7	VÁP 9	ZÁR	BK	STR + VÁP 7	STR + VÁP 9	STR + ZÁR	STR + BK	POP + VÁP 7	POP + VÁP 9	POP + ZÁR	POP + BK
<b>CEM I 42,5 R Mokrá</b>	300	300	315	315	315	315	300	300	300	300	300	300	300	300
<b>Struska Dětmorovice</b>	90	—	—	—	—	—	46	46	25	10	—	—	—	—
<b>Popílek Dětmorovice</b>	—	120	—	—	—	—	—	—	—	—	54	55	92	38
<b>Vápenec 7 Mokrá</b>	—	—	120	—	—	—	44	44	—	—	66	—	—	—
<b>Vápenec 9 Mokrá</b>	—	—	—	120	—	—	—	—	—	—	—	65	—	—
<b>Filler Zárubka</b>	—	—	—	—	120	—	—	—	65	—	—	—	28	—
<b>Filler Bílý Kámen</b>	—	—	—	—	—	120	—	—	—	80	—	—	—	82
<b>DTK 0/4 Hrušovany</b>	765	730	735	735	730	730	760	760	760	760	740	730	730	735
<b>HTK 4/8 Hrušovany</b>	240	235	235	235	230	235	240	235	240	240	235	235	230	235
<b>HDK 8/16 Želešice</b>	475	470	470	470	470	470	475	475	475	475	475	475	465	470
<b>HDK 11/22 Rosice</b>	365	355	360	360	355	360	365	365	365	365	360	360	350	360
<b>Voda</b>	175	173	175	175	180	175	175	178	175	175	170	175	180	175
<b>Vodní součinitel<sup>1)</sup> [-]</b>	0,45	0,41	0,40	0,40	0,41	0,40	0,45	0,46	0,45	0,45	0,40	0,42	0,43	0,42
<b>Superplastifikační přísada Mapei Dynamon SX 14</b>	4,1	3,3	4,2	4,3	4,7	4,0	4,5	4,5	4,5	4,0	4,0	4,4	4,8	4,1

<sup>1)</sup> Hodnota vodního součinitele byla vypočtena jako poměr hmotnosti vody k celkové hmotnosti cementu a příměsí bez ohledu na k-hodnotu dle ČSN EN 206+A1 [N1]

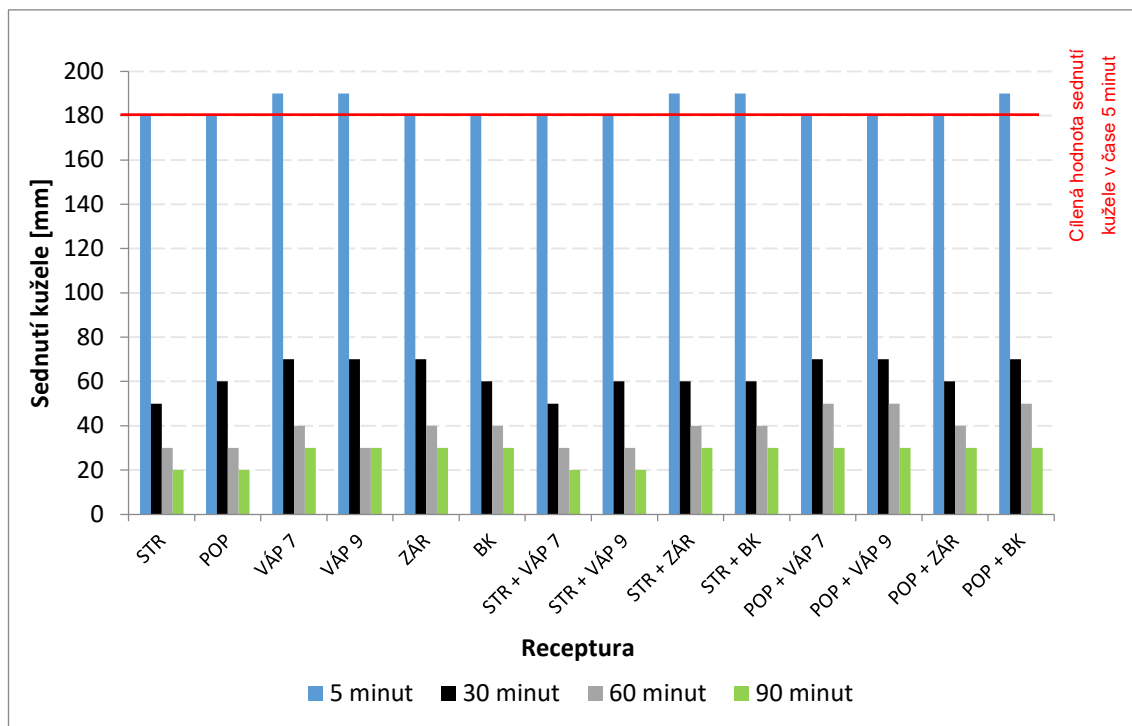
## 4.5.1 Zkoušky čerstvého betonu

### 4.5.1.1 Stanovení konzistence a objemové hmotnosti čerstvého betonu

Na veškerých betonových směsích byla stanovena konzistence čerstvého betonu metodou sednutí kužele dle ČSN EN 12350 – 2 [N4] v čase 5, 30, 60 a 90 minut od zamíchání. Stanovení objemové hmotnosti čerstvého betonu probíhalo v souladu s ČSN EN 12350 – 6 [N10]. Veškeré hodnoty jsou uvedeny v tabulce č. 13. Pro přehlednější znázornění ztráty konzistence čerstvého betonu v čase jsou hodnoty zaznamenány i v grafu č. 6. Cílem bylo namíchat betonovou směs s hodnotou sednutí kužele 180 mm, které bylo prakticky vždy docíleno. Tato cílená hodnota je také v grafu č. 6. znázorněná červenou horizontální přímkou.

Tab. 13: Hodnota sednutí kužele při zkoušce konzistence betonu v čase, objemová hmotnost čerstvého betonu

Receptura	Sednutí kužele [mm] v čase a stupeň konzistence (St. kon.) [-]								OH <sub>čB</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]
	5 minut	St. kon.	30 minut	St. kon.	60 minut	St. kon.	90 minut	St. kon.	
STR	180	S4	50	S2	30	S1	20	S1	2390
POP	180	S4	60	S2	30	S1	20	S1	2360
VÁP 7	190	S4	70	S2	40	S1	30	S1	2370
VÁP 9	190	S4	70	S2	30	S1	30	S1	2370
ZÁR	180	S4	70	S2	40	S1	30	S1	2360
BK	180	S4	60	S2	40	S1	30	S1	2380
STR + VÁP 7	180	S4	50	S2	30	S1	20	S1	2390
STR + VÁP 9	180	S4	60	S2	30	S1	20	S1	2400
STR + ZÁR	190	S4	60	S2	40	S1	30	S1	2390
STR + BK	190	S4	60	S2	40	S1	30	S1	2350
POP + VÁP 7	180	S4	70	S2	50	S2	30	S1	2380
POP + VÁP 9	180	S4	70	S2	50	S2	30	S1	2390
POP + ZÁR	180	S4	60	S2	40	S1	30	S1	2400
POP + BK	190	S4	70	S2	50	S2	30	S1	2360



Graf 6: Výsledné hodnoty zkoušky konzistence metodou sednutí kužele [N4] v čase 5, 30, 60 a 90 minut od zamíchání

#### 4.5.1.1.1 Vyhodnocení a diskuze výsledků

Zkouška konzistence čerstvého betonu probíhala metodou sednutí kužele dle ČSN EN – 2 [N4] v čase 5, 30, 60 a 90 minut od zamíchání. V čase 5 minut veškeré betonové směsi vykazovaly hodnotu sednutí 180 – 190 mm. Při následující zkoušce konzistence betonové směsi v čase 30 minut hodnota sednutí kužele klesla na 50 – 70 mm u všech betonových směsí. Po 60 minutách od zamíchání vykazovaly betonové směsi hodnotu sednutí kužele 30 – 50 mm a v čase 90 minut od zamíchání tato hodnota klesla na 20 - 30 mm.

Takto vysoká a rychlá ztráta konzistence čerstvého betonu může mít několik příčin. Jedna z nich může být nekompatibilita cementu a zvolené superplastifikační přísady. V tomto případě by bylo vhodné zvolit jinou superplastifikační přísadu, případně zvolit moderní přísadu tzv. 5. generace, které fungují nejčastěji na bázi modifikovaného polykarboxylátu v kombinaci s dalším druhem přísady, díky čemu je možné eliminovat nedostatky každé z nich a využít jejich pozitiv. Tento experiment však z důvodu velkého počtu zkušebních záměsí společně s dlouhým časovým horizontem provedených zkoušek nebyl proveden.

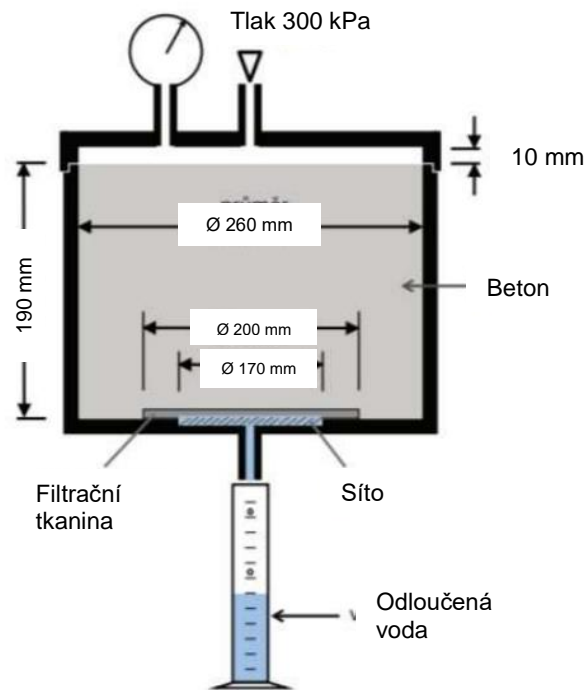
Jako vhodný návrh se na základě obecných úsudků jeví kombinace polykarboxylátu a lignosulfonanu. Polykarboxyláty v betonové směsi způsobují stérické odpuzování zrn cementu, což má za následek snížení viskozity betonové směsi. Lignosulfonáty jsou těžce rozpustné cukry, které způsobují retardaci tuhnutí. Při kombinaci těchto látek by mohlo dojít ke kombinaci vlastností a výsledkem by měla být vysoká účinnost superplastifikační přísady zaručující dlouhou dobu zpracovatelnosti.

#### 4.5.2 Odlučivost vody z čerstvé betonové směsi tlakovou metodou

Tato zkouška byla provedena dle postupu rakouské směrnice MERKBLATT Weiche Betone [N22]. Podstatou této zkoušky je zjištění množství odloučené vody z naplněné zkušební nádoby betonovou směsí přes filtrační síto a tkaninu při působení tlaku 300 kPa v čase 15 a 60 minut od zahájení zkoušky. Celkový objem betonu ve zkušební nádobě činí 10 dm<sup>3</sup>. Dle celkového množství odloučené vody přepočtené na 1 m<sup>3</sup> betonu se beton zatřídí do příslušné třídy. Maximální přípustné hodnoty pro jednotlivé kategorie jsou uvedeny v tabulce 14. Tato metoda je ve velké míře používána pro betonovou směs určenou pro zakládání staveb hlubinnými piloty nebo podzemními stěnami. Tlak vzduchu působí na beton ve zkušební nádobě, díky čemu je simulován tlak vyvozený vlastní tíhou betonové směsi například při hlubinné pilotě, která dosahuje značných hloubek.

Tab. 14: Maximální množství odloučené vody z betonové směsi pro jednotlivé třídy

Označení třídy	Množství odloučené vody
FW 20	$FWM_{15} \leq 20 \text{ l/m}^3$
	$FWM_{60} \leq 40 \text{ l/m}^3$
FW 30	$FWM_{15} \leq 30 \text{ l/m}^3$
	$FWM_{60} \leq 55 \text{ l/m}^3$



Obr. 56: Schématické znázornění tlakové nádoby na měření odlučivosti vody z betonu [O35]

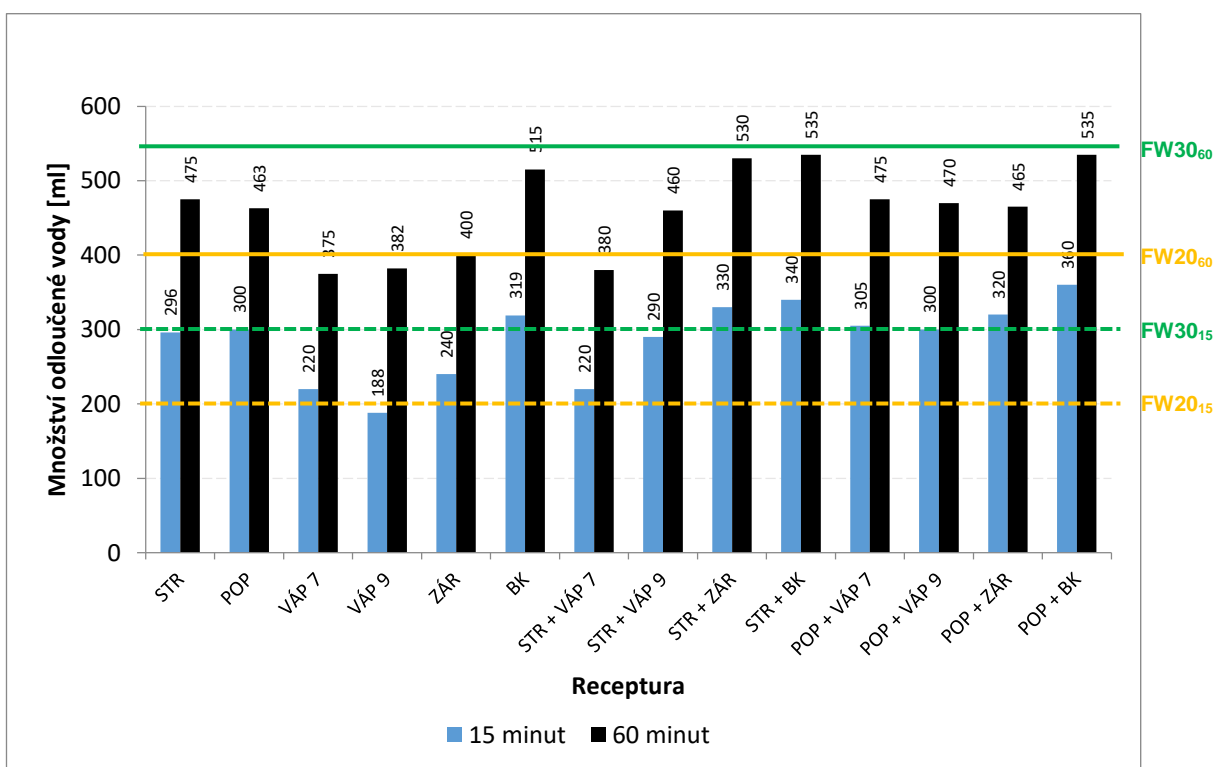


Obr. 57, 58: Betonová směs v tlakové nádobě před zkouškou (vlevo) a po 60 minutách působení tlaku 300 kPa (vpravo)

Zkouška odlučivosti vody z betonu byla provedena na veškerých recepturách. Pro přehlednější porovnání jsou získané hodnoty zpracovány do grafu č. 7.

Tab. 15: Množství odloučené vody z jednotlivých betonových směsí

Receptura /doba působení tlaku	STR	POP	VÁP 7	VÁP 9	ZÁR	BK	STR + VÁP 7	STR + VÁP 9	STR + ZÁR	STR + BK	POP + VÁP 7	POP + VÁP 9	POP + ZÁR	POP + BK
15 minut [ml]	296	300	220	188	240	319	220	290	330	340	305	300	320	360
60 minut [ml]	475	463	375	382	400	515	380	460	530	535	475	470	465	535



Graf 7: Množství odloučené vody z betonové směsi u jednotlivých receptur

#### 4.5.2.1 Vyhodnocení a diskuze výsledků

Množství vody odloučené z betonové směsi bylo stanovováno v čase 15 a 60 minut od začátku působení tlaku vzduchu. Jak je možno vidět na grafu 7, největší podíl odloučené vody byl uvolněn do 15 minut. Nejmenší množství odloučené vody po 60 minutách vykazuje betonová směs obsahující pouze mikromletý vápenec 7, konkrétně 375 ml a poté kombinace VJMGS a mikromletého vápence 7 se 380 ml odloučené vody. Potvrdilo se tedy, že mikromletý vápenec má velmi dobrý vliv na množství odloučené vody z betonové směsi. Naopak nejvyšší množství odloučené vody (515 – 535 ml)

vykazují betonové směsi obsahující kamenný filler z lokality Bílý Kámen, a to jak samostatně, tak v kombinaci s aktivními příměsemi. Jak bylo již v teoretické části zmíněno, kamenný filler s přihlédnutím na morfologii zrna a svým dalším vlastnostem není vhodný pro redukci množství odloučené vody. Z výsledků lze obecně soudit, že optimální poměr mísení jednotlivých příměsí nemá žádný pozitivní dopad na hodnotu odlučivosti vody z betonu a tato hodnota je dána pouze druhem použité příměsi. V rámci experimentu se však podařilo prokázat výrazný pozitivní dopad použití mikromletých vápenců, který byl diskutován již v teoretické části práce.

### **4.5.3 Zkoušky ztvrdlého betonu**

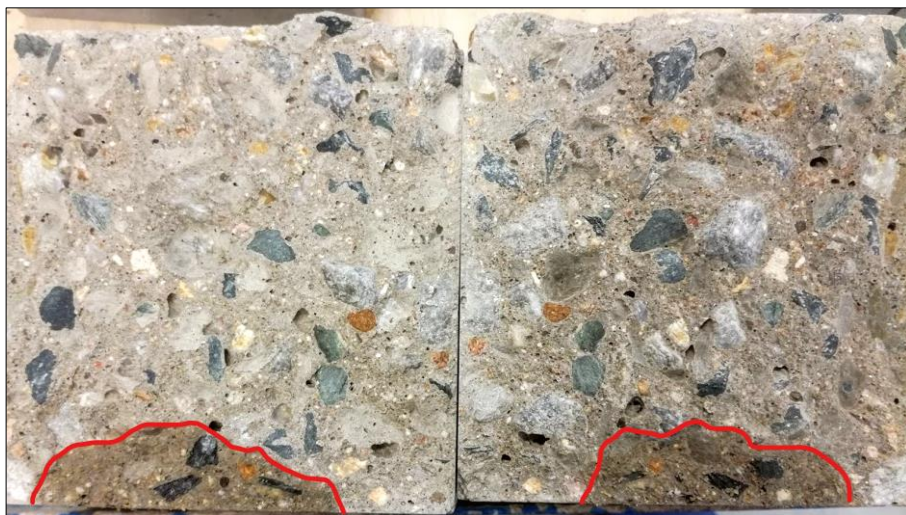
Od každé betonové směsi byla vyrobena zkušební tělesa tvaru krychle o hraně 150 mm, na kterých byla ve stáří 7, 28 a 90 dní stanovena objemová hmotnost ztvrdlého betonu dle ČSN EN 12390 – 7 [N11], pevnost betonu v tlaku dle ČSN EN 12390 – 3 [N12], vodotěsnost dle TKP ŘVC ČR se stupněm vodotěsnosti HV8 [N13]. Dále byla stanovena nasákavost betonu dle ČSN 73 1316 [N14] ve stáří 7, 28, 90 a 180 dní a sledována mikrostruktura ztvrdlého betonu ve stáří 28, 90 a 180 dní.

#### **4.5.3.1 Stanovení vodotěsnosti ztvrdlého betonu**

Zkouška vodotěsnosti betonu se provádí působením tlakové vody na zkušební těleso. Z pohledu evropských harmonizovaných norem se obecně nejčastěji využívá metoda dle ČSN EN 12390 – 8 [N17], případně metody dané technicko-kvalitativními podmínkami příslušných subjektů, jako je například zkouška tlakovou vodou dle TKP ŘVC ČR [N13]. Tento směsný dokument rozlišuje stupně vodotěsnosti označením HV a příslušeným číslem (2, 4, 8, 12), které značí desetinásobek nejvyššího vodního tlaku v MPa. V případě použitého stupně vodotěsnosti HV8 je na zkušební těleso vyvíjen tlak vodního sloupce o tlaku  $400 \pm 40$  kPa v prvních 24 hodinách a  $800 \pm 50$  kPa v dalších 48 hodinách, přičemž výsledkem je hodnota průsaku tlakové vody zkušebním tělesem, která se zjistí jeho rozlomením. Tato hodnota se dále porovnává s danými požadavky, přičemž její maximální hodnota nesmí přesáhnout 50 mm.



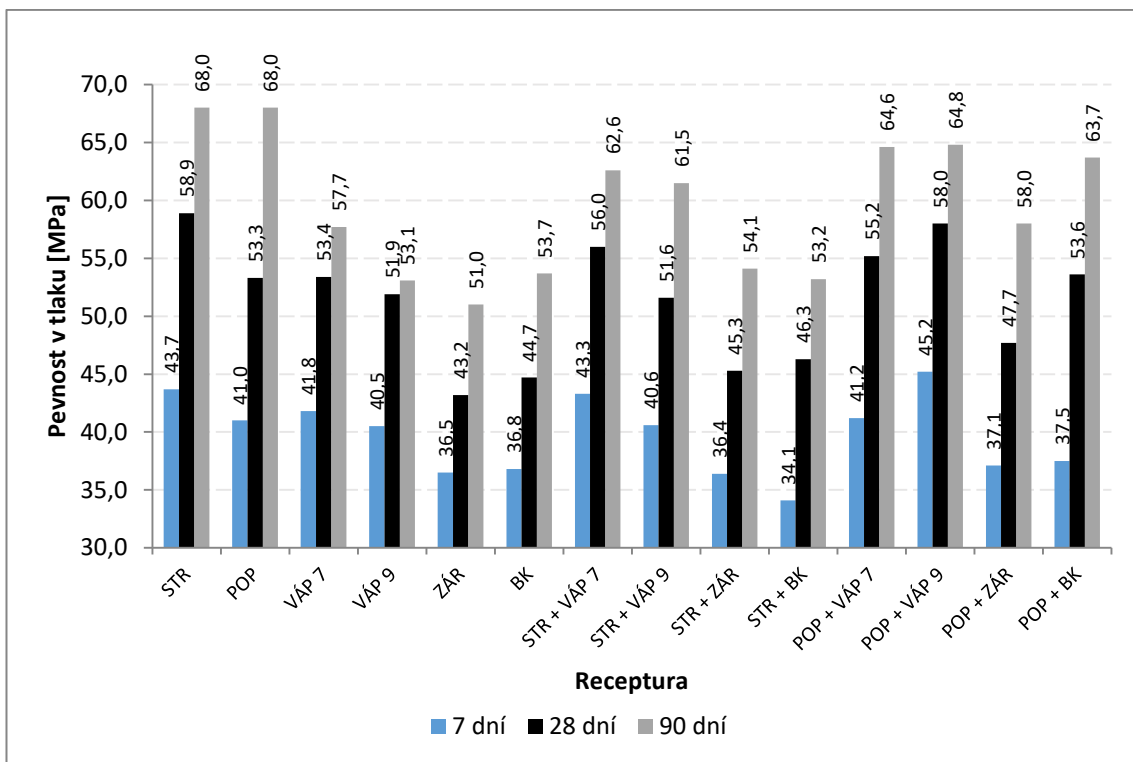
Použití metody dle TKP ŘVC ČR bylo zvoleno s ohledem na aplikaci vyššího tlakového namáhání, které napomůže k důkladnějšímu zhodnocení odolnosti betonů proti působení tlakové vody. Odolnost proti působení tlakové vody má přímou souvislost s nadměrnými objemovými změnami, díky kterým by se v kompozitu mohly vytvářet mikrotrhliny. Naměřené hodnoty mohou poukázat na vhodnost vzájemného optimálního mísení jednotlivých příměsí.



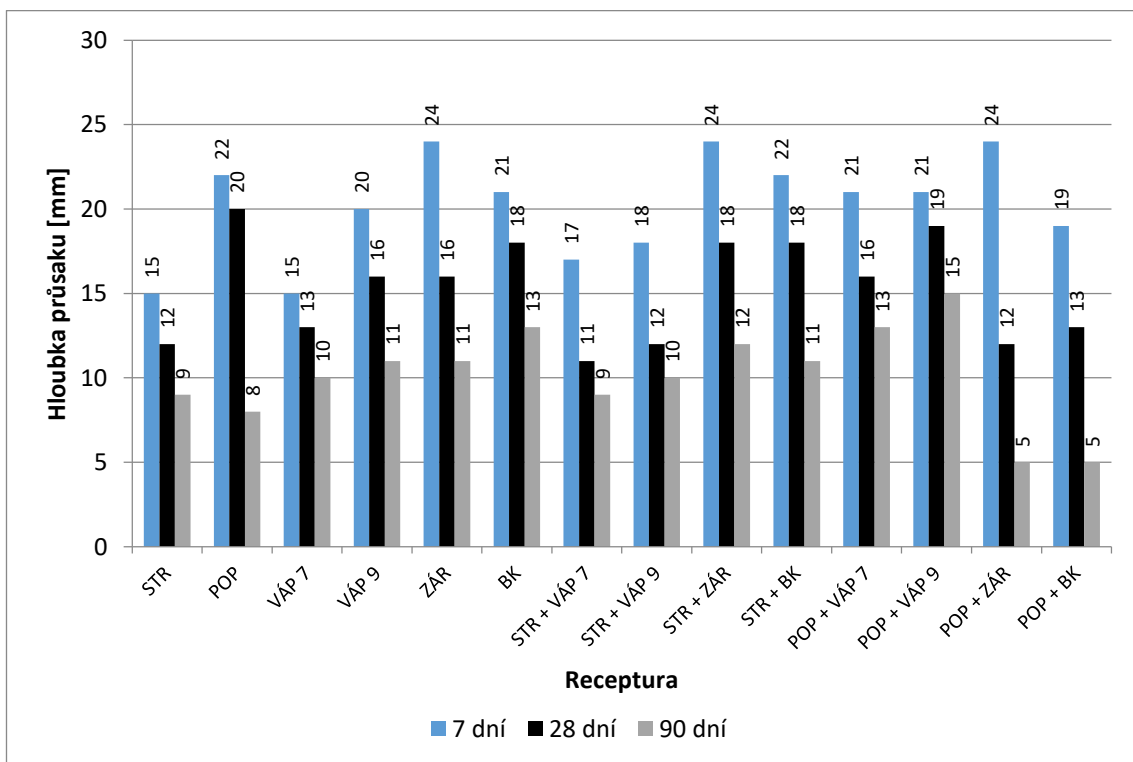
*Obr. 59: Hloubka průsaku dle TKP ŘVC ČR [N13] na zkušebním tělese ve stáří 7 dní*

Tab. 16: Výsledky stanovení fyzikálně mechanických parametrů jednotlivých receptur

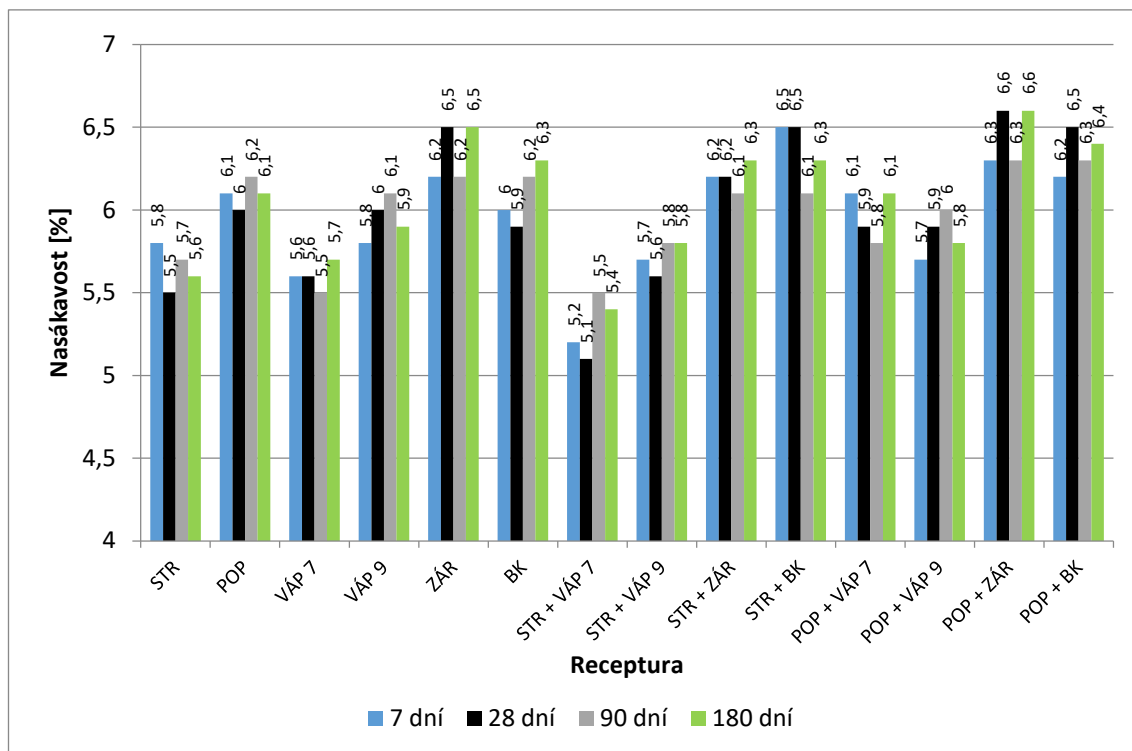
Receptura/ stáří [dny]	OH <sub>ZB</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]			Pevnost v tlaku [MPa]			Hloubka průsaku [mm]			Nasákavost [%]			
	7	28	90	7	28	90	7	28	90	7	28	90	180
<b>STR</b>	2390	2400	2390	43,7	58,9	68,0	15	12	9	5,8	5,5	5,7	5,6
<b>POP</b>	2350	2360	2360	41,0	53,3	68,0	22	20	8	6,1	6,0	6,2	6,1
<b>VÁP 7</b>	2390	2390	2390	41,8	53,4	57,7	15	13	10	5,6	5,6	5,5	5,7
<b>VÁP 9</b>	2380	2380	2390	40,5	51,9	53,1	20	16	11	5,8	6,0	6,1	5,9
<b>ZÁR</b>	2380	2370	2380	36,5	43,2	51,0	24	16	11	6,2	6,5	6,2	6,5
<b>BK</b>	2370	2370	2370	36,8	44,7	53,7	21	18	13	6,0	5,9	6,2	6,3
<b>STR + VÁP 7</b>	2390	2390	2400	43,3	56,0	62,6	17	11	9	5,2	5,1	5,5	5,4
<b>STR + VÁP 9</b>	2390	2390	2400	40,6	51,6	61,5	18	12	10	5,7	5,6	5,8	5,8
<b>STR + ZÁR</b>	2380	2390	2380	36,4	45,3	54,1	24	18	12	6,2	6,2	6,1	6,3
<b>STR + BK</b>	2380	2380	2380	34,1	46,3	53,2	22	18	11	6,5	6,5	6,1	6,3
<b>POP + VÁP 7</b>	2380	2380	2390	41,2	55,2	64,6	21	16	13	6,1	5,9	5,8	6,1
<b>POP + VÁP 9</b>	2390	2400	2390	45,2	58,0	64,8	21	19	15	5,7	5,9	6,0	5,8
<b>POP + ZÁR</b>	2370	2370	2380	37,1	47,7	58,0	24	12	5	6,3	6,6	6,3	6,6
<b>POP + BK</b>	2360	2360	2370	37,5	53,6	63,7	19	13	5	6,2	6,5	6,3	6,4



Graf 8: Pevnost betonu v tlaku jednotlivých receptur ve stáří 7, 28 a 90 dní dle ČSN EN 12390 – 3 [N12]



Graf 9: Hloubka průsaku tlakovou vodou jednotlivých receptur ve stáří 7, 28 a 90 dní dle TKP RVC ČR se stupněm vodotěsnosti HV8 [N13]



Graf 10: Nasákavost betonu jednotlivých receptur ve stáří 7, 28, 90 a 180 dní dle ČSN 731316 [N14]

#### 4.5.3.1.1 Vyhodnocení a diskuze výsledků

##### Pevnost betonu v tlaku

Po 7 dnech normového zrání vykazovala nejvyšší pevnost betonu v tlaku (45,2 MPa) receptura s kombinací vysokoteplotního popílku a mikromletého vápence 9. Vysokoteplotní popílek působí v betonové směsi jako pucolán a podílí se na zvýšení mechanických parametrů zejména v delším časovém horizontu vlivem zahušťování mikrostruktury vzniklými CSH gely v důsledku pucolánové reakce. Nejvyšší pevnosti po 7 dnech zrání mohou být způsobeny obsahem mikromletého vápence 9, který ač je klasifikován jako inertní příměs, je prokázáno, že se vyznačuje svoji skrytou aktivitou, což znamená, že jemné částice tvoří krystalizační zárodky, na kterých se mohou reakční produkty vysrážet, což v důsledku urychluje růst krystalů, způsobuje vyšší hydrataci slínku a zvyšuje i fyzikálně mechanické parametry. S přibývajícím jemností mletí vápence jemných částic přibývá, což může být příčinou, proč receptura s kombinací vysokoteplotního popílku a mikromletého vápence 9 vykazuje po 7 dnech zrání nejvyšší pevnosti. V tomto případě lze konstatovat, že nejen

kombinací těchto dvou přísad, ale všeobecně použití mikromletého vápence jako inertní přísady do betonu je vhodné zejména v porovnání s mechanickými parametry betonových směsí obsahující druhou inertní přísadu, kamenný filler. Druhé nejvyšší pevnosti betonu v tlaku (43,7 MPa) po shodné době zrání vykazovala betonová směs s přísadkou VJMGS, která se vyznačuje svojí latentní hydraulicitou. Naopak nejnižší pevnosti betonu (34,1 MPa) v tlaku po 7 dnech zrání vykazovala receptura s kombinací VJMGS a kamenného filleru z lokality Bílý Kámen. V tomto případě došlo k poklesu mechanických parametrů i ve srovnání s recepturami obsahující tyto přísady samostatně. Receptura s obsahem VJMGS vykazovala pevnost betonu v tlaku 43,7 MPa a s obsahem kamenného filleru z lokality Bílý Kámen 36,8 MPa. V tomto případě tedy nebyl pozitivní vliv kombinace těchto přísad prokázán.

Po 28 dnech normového zrání vykazovala nejvyšší pevnost v tlaku (50,9 MPa) betonová směs s přísadkou VJMGS. Druhé nejvyšší pevnosti v tlaku (50,0 MPa) vykazovala betonová směs s kombinací vysokoteplotního popílku a mikromletého vápence 9. Nejnižší pevnost betonu v tlaku (43,2 MPa) po 28 dnech zrání vykazovala směs s přísadkou kamenného filleru z lokality Zárubka. Dle složení této receptury je ovšem patrné, že vlivem nepravidelnosti a zvýšené nasákavosti zrn kamenného filleru vyžadovala tato směs jednu z největších dávek záměsové vody i superplastifikační přísady. V porovnání pevností betonu v tlaku u receptur s obsahem pouze jedné inertní přísady a směsí s kombinací inertních a aktivních přísad v optimálním poměru mísení došlo k pozitivnímu ovlivnění mechanických parametrů téměř ve všech případech, což by mohlo vypovídat o pozitivním vlivu hutnosti mikrostruktury betonových směsí, potažmo zvýšení mechanických parametrů. Dle získaných hodnot pevností betonu v tlaku jednotlivých směsí lze konstatovat, že veškeré receptury splňují požadovanou pevnostní třídu C30/37.

Nejvyšší pevnost betonu v tlaku (68,0 MPa) po 90 dnech normového zrání vykazovala shodně receptura s obsahem VJMGS s recepturou obsahující vysokoteplotní popílek. Vysokoteplotní popílek je znám svojí pucolánovou aktivitou a pozvolným nárůstem pevností v delším časovém horizontu, což bylo potvrzeno i v tomto případě. V porovnání s recepturou obsahující pouze

VJMGS, která je známá svojí latentní hydraulicitou, vykazovala betonová směs s vysokoteplotním popílkem po 28 dnech zrání výrazně nižší pevnost betonu v tlaku, ovšem po 90 dnech zrání v důsledku pucolánové reakce vysokoteplotního popílku došlo ke zvýšení mechanických parametrů natolik, že původní rozdíl mezi pevnostmi betonu v tlaku po 28 dnech zrání byl eliminován. Velmi dobré pevnosti betonu v tlaku vykazovaly také betonové směsi s kombinací příměsí VJMGS či vysokoteplotního popílku s mikromletým vápencem 7 i 9. V porovnání s recepturami obsahující pouze mikromletý vápenec 7 či 9 došlo k poměrně výraznému zvýšení mechanických parametrů. Lze tedy konstatovat, že kombinace mikromletého vápence v kombinaci s aktivní příměsí má pozitivní vliv na mechanické parametry betonové směsi. Nejnižší pevnost betonu v tlaku (51,0 MPa) vykazovala receptura s kamenným fillerem z lokality Zárubka. Při kombinaci tohoto kamenného filleru s aktivní příměsí ovšem došlo ke zvýšení mechanických parametrů směsi, a proto lze kombinaci aktivních a pasivních příměsí považovat za výhodnou z hlediska zvýšení mechanických parametrů směsi.

Z ekonomického i ekologického hlediska lze tedy použití mikromletého vápence jako příměsí do betonu považovat za velmi výhodnou. V případě kombinace s aktivní příměsí (VJMGS či vysokoteplotního popílku) a mikromletého vápence bylo dosaženo nepříliš odlišných či shodných pevností. Ovšem je důležité zmínit skutečnost, že těchto pevností bylo dosaženo nejen s poloviční dávkou vybrané aktivní příměsí, ale také nižší dávkou cementu, čímž tedy klesají celkové náklady na vstupní suroviny betonové směsi.

### **Hloubka průsaku tlakovou vodou**

Při stanovení vodotěsnosti jednotlivých receptur bylo ve všech případech potvrzeno, že s přibývajícím dobou zrání betonové směsi dochází k vytvrzování mikrostruktury betonu z důvodu vzniku nových hydratačních novotvarů a CSH gelů, což v důsledku snižuje hloubku průsaku tlakovou vodou.

Při porovnání hloubky průsaku betonových receptur obsahující pouze jednu příměs s betonovými recepturami s kombinací příměsí došlo k největší redukci průsaku u betonových směsí s kombinací popílku a kamenných fillerů. Obě tyto receptury vykazovaly shodnou hodnotu průsaku tlakovou vodou 5 mm

po 90 dnech zrání, kdežto receptura obsahující pouze kamenný filler z lokality Zárubka vykazovala po 90 dnech zrání hodnotu průsaku tlakovou vodou 11 mm a receptura s kamenným fillerem z lokality Bílý Kámen vykazovala hodnotu průsaku tlakové vody po 90 dnech zrání 13 mm. Kombinaci těchto kamenných fillerů s vysokoteplotním popílkem můžeme tedy hodnotit kladně, neboť je možno se domnívat, že bylo dosaženo hutnější mikrostruktury v důsledku optimálního mísení jemných složek a purolánové reakce vysokoteplotního popílku, což způsobilo nižší hloubku průsaku tlakovou vodou. Obecně je třeba konstatovat, že všechny receptury již po 7 dnech zrání vykazují vyhovující hodnotu z pohledu vodotěsnosti HV8 a tato hodnota je po 28 dnech velice nízká. Lze proto říci, že ani zvýšená hodnota nasákavosti a nutnost vyšších dávek záměsové vody například u kamenných fillerů nebyly překážkou pro výrobu betonů s vysokým stupněm vodotěsnosti.

### **Nasákavost betonu**

S přibývajícím časem zrání dochází vlivem hydratačních procesů ke vzniku hydratačních zplodin a novotvarů, které by měly způsobit hutnější mikrostrukturu kompozitu, což by mělo mít za následek nižší nasákavost betonu. Zkouška nasákavosti neprokázala jednoznačnou souvislost s touto úvahou. Z pohledu této zkoušky nebyl potvrzen jednoznačný vliv kombinace příměsí se snahou dosažení hutnější mikrostruktury na nasákavost betonu, avšak jako vhodné se opět jeví využití kombinace aktivní příměsí a mikromletého vápence.

#### 4.5.3.2 Stanovení objemových změn betonových směsí

Stanovení objemových změn probíhalo za pomoci zkušebních žlabů z nerezové oceli tvořené U profilem s vnitřními rozměry 60/100/1000 mm od firmy Schleibinger Geräte. Konstrukce je tvořena dvěma čely opatřenými zahnutými kotvami určenými k zabetonování. Jedno čelo formy je pevné a druhé pohyblivé. To je osazené elektronickým senzorem délky (tenzometrem) připojeným pomocí sběrnice k počítači a za pomoci měřícího softwaru je zaznamenána změny délky každých 15 minut po celou dobu měření. Pro minimalizování vlivu tření betonu o stěny formy je měřící žlab opatřen speciální neoprenovou folií. Tato zkušební metoda odpovídá rakouské normě pro měření objemových změn betonu OENORM B 3329 [N16]. [35]

Pro stanovení objemových změn jednotlivých receptur byly vždy naplněny dvě zkušební formy, na kterých probíhalo měření objemových změn současně a jako výsledná hodnota smrštění je brán aritmetický průměr z těchto dvou stanovení. V rámci naměřených hodnot lze však konstatovat, že obě zkušební měření vykazovaly vždy prakticky srovnatelné výsledky. V tabulce č. 17 jsou uvedeny jednotlivé hodnoty smrštění po 24 hodinách, 3, 7, 14, 28 a 60 dnech od zamíchání. Zkušební zařízení bylo po celou dobu zkoušky umístěno ve sklepní místnosti s téměř konstantními podmínkami okolního prostředí, teplotou 20 °C a relativní vlhkostí 75 %.



Obr. 60: Zkušební formy z nerezové oceli pro stanovení objemových změn betonu



Tab. 17: Velikost smrštění jednotlivých receptur v časovém horizontu

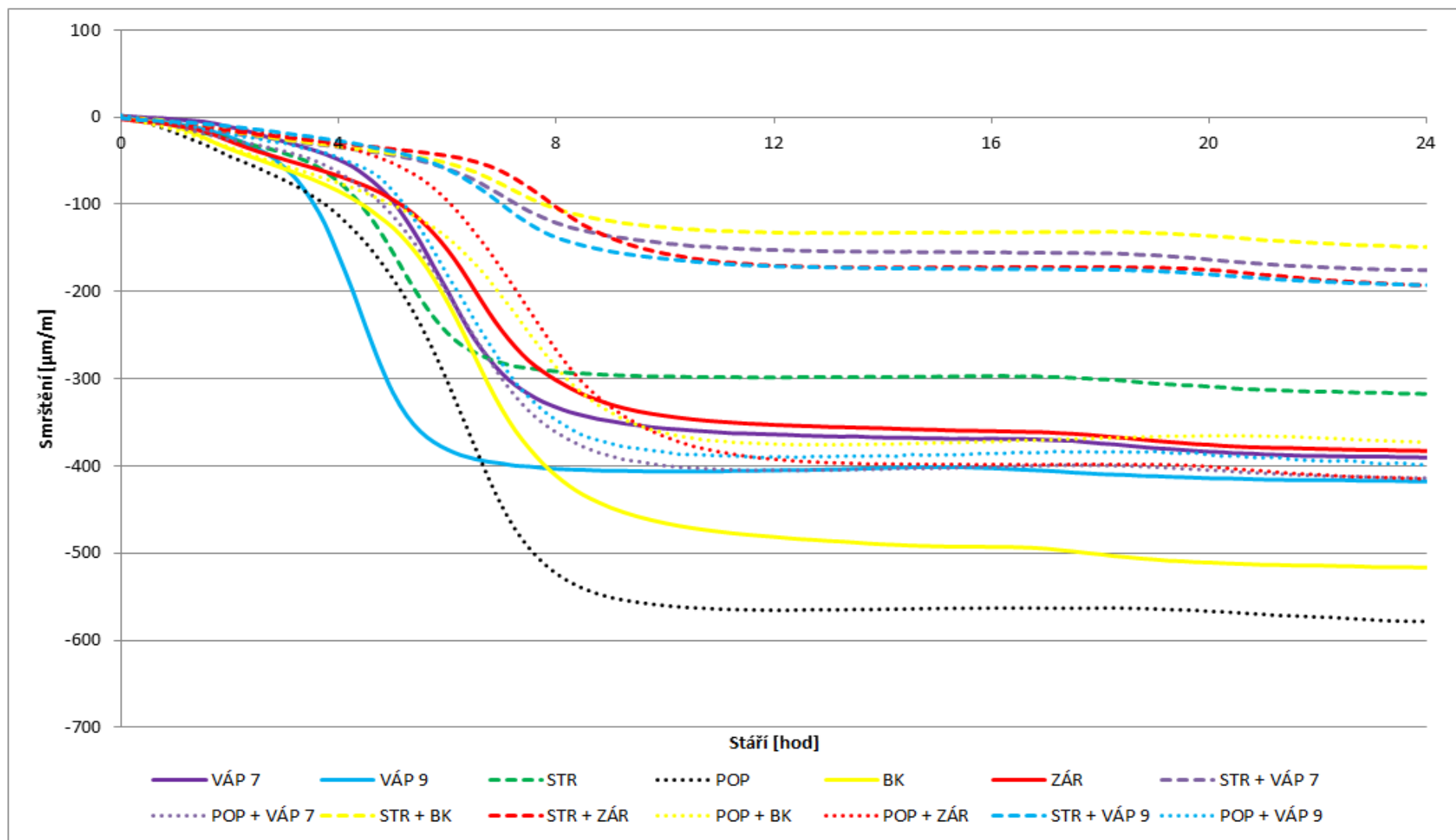
Stáří/ Receptura	24 hodin [μm/m]	3 dny [μm/m]	7 dní [μm/m]	14 dní [μm/m]	28 dní [μm/m]	60 dní [μm/m]
STR	317	344	392	452	499	519
POP	578	610	646	699	752	771
VÁP 7	390	414	448	496	551	583
VÁP 9	418	441	478	531	584	615
ZÁR	383	403	435	482	541	582
BK	517	548	584	634	692	728
STR + VÁP 7	175	195	224	284	344	398
STR + VÁP 9	193	214	246	308	362	414
STR + ZÁR	193	210	234	286	345	411
STR + BK	149	165	191	253	311	370
POP + VÁP 7	414	430	456	515	580	636
POP + VÁP 9	399	419	446	507	569	632
POP + ZÁR	415	430	454	502	560	627
POP + BK	373	395	420	477	539	598

V následující tabulce č. 18 je uveden procentuální vliv kombinací příměsí na objemové změny. Jako výchozí hodnoty pro stanovení tohoto vlivu jsou vždy brány hodnoty smrštění betonových receptur v porovnávaném stáří obsahující pouze jeden druh příměsí. Pro snadnější odlišení je zelenou barvou uveden pozitivní vliv na objemové změny, tedy jejich snížení při kombinaci příměsí a červenou barvou vliv negativní, tedy zvýšení velikosti objemových změn u betonových směsí s kombinací příměsí.

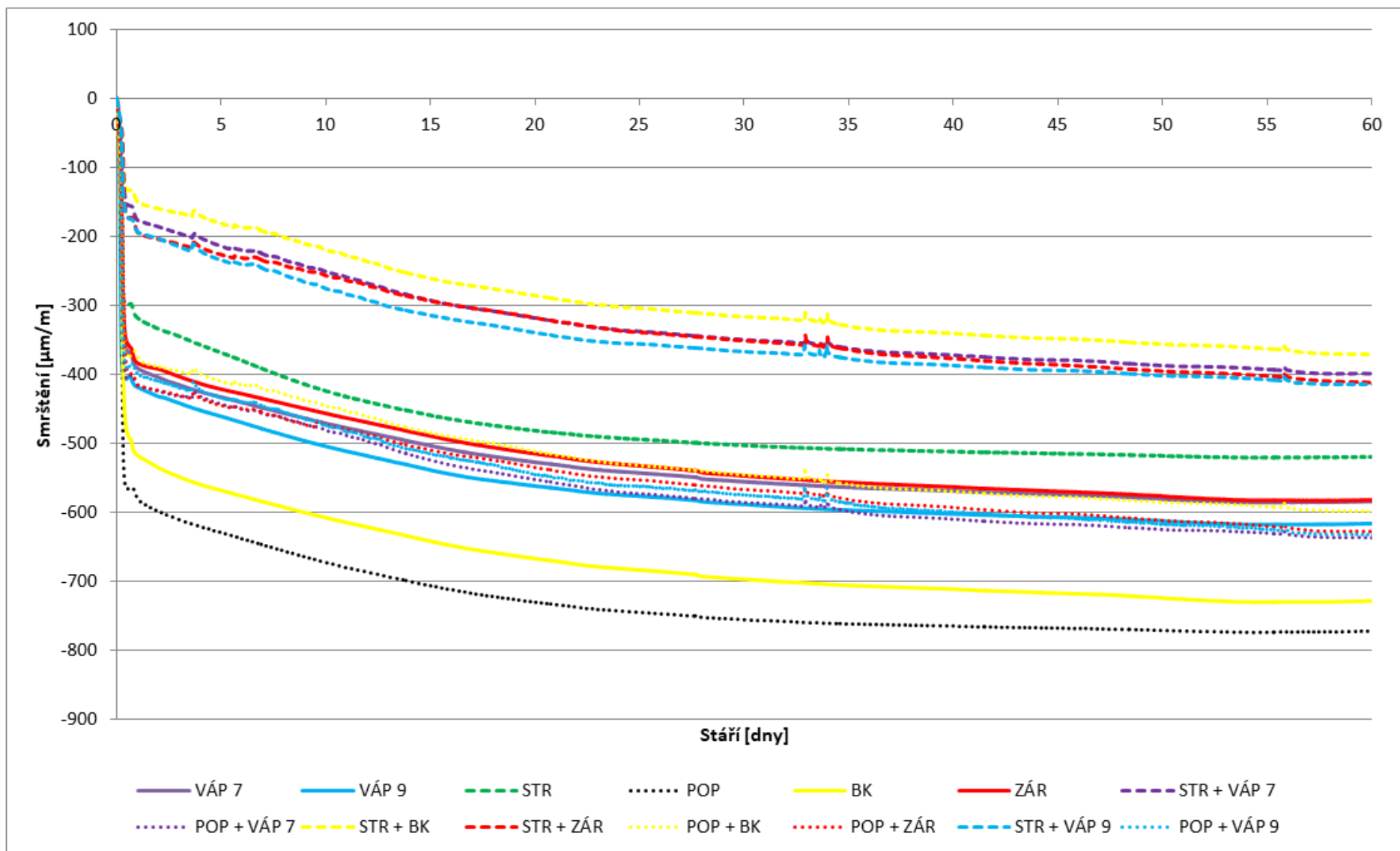
Tab. 18: Stanovení vlivu kombinace příměsí na objemové změny v čase

Receptura s kombinací příměsí	Stáří	Receptura s jedním druhem příměsí (výchozí)					
		STR	POP	VÁP 7	VÁP 9	ZÁR	BK
STR + VÁP 7	24 hodin	+ 45	—	+ 55	—	—	—
	28 dní	+ 31	—	+ 38	—	—	—
	60 dní	+ 23	—	+ 32	—	—	—
STR + VÁP 9	24 hodin	+ 39	—	—	+ 54	—	—
	28 dní	+ 27	—	—	+ 38	—	—
	60 dní	+ 20	—	—	+ 33	—	—
STR + ZÁR	24 hodin	+ 39	—	—	—	+ 50	—
	28 dní	+ 31	—	—	—	+ 36	—
	60 dní	+ 21	—	—	—	+ 29	—
STR + BK	24 hodin	+ 53	—	—	—	—	+ 71
	28 dní	+ 38	—	—	—	—	+ 55
	60 dní	+ 29	—	—	—	—	+ 49
POP + VÁP 7	24 hodin	—	+ 28	-6	—	—	—
	28 dní	—	+ 23	-5	—	—	—
	60 dní	—	+ 18	-9	—	—	—
POP + VÁP 9	24 hodin	—	+ 31	—	+ 5	—	—
	28 dní	—	+ 24	—	+ 3	—	—
	60 dní	—	+ 18	—	-3	—	—
POP + ZÁR	24 hodin	—	+ 28	—	—	-8	—
	28 dní	—	+ 26	—	—	-4	—
	60 dní	—	+ 19	—	—	-8	—
POP + BK	24 hodin	—	+ 35	—	—	—	+ 28
	28 dní	—	+ 28	—	—	—	+ 22
	60 dní	—	+ 22	—	—	—	+ 18

V následujících grafech č. 11 a 12 je znázorněn průběh objemových změn veškerých betonových směsí v čase 24 hodin a 60 dní. Podrobné grafické vyhodnocení všech objemových změn v čase 24 hodin a 60 dní je součástí příloh této práce. Pro názornost je dále uvedeno také souhrnné grafické vyhodnocení objemových změn veškerých betonových směsí do stáří 28 dnů.



Graf 11: Průběh objemových změn jednotlivých receptur do stáří 24 hodin



Graf 12: Průběh objemových změn jednotlivých receptur do stáří 60 dnů

#### 4.5.3.2.1 Vyhodnocení a diskuze výsledků

Největší objemové změny již od počátku měření až do stáří 60 dnů vykazovala betonová směs s obsahem vysokoteplotního popílku 771  $\mu\text{m}/\text{m}$  a betonová směs s příměsí kamenného filleru z lokality Bílý Kámen 728  $\mu\text{m}/\text{m}$ . Vhodnou kombinací těchto dvou příměsí ovšem došlo k redukci smrštění na hodnotu 598  $\mu\text{m}/\text{m}$ , což je v porovnání s betonovou směsí obsahující pouze vysokoteplotní popílek redukce smrštění o 22 % a ve srovnání s recepturou obsahující pouze kamenný filler z této lokality snížení objemových změn o 18 %. Všeobecně lze říci, že kombinací popílku s inertními příměsemi byla vždy dosažena redukce smrštění v rozmezí 18 – 22 % vztaženo k receptuře obsahující pouze vysokoteplotní popílek. Tato redukce může být důsledkem hutnější mikrostruktury betonu v důsledku kombinace příměsí, ale také může být způsobena nižší dávkou vysokoteplotního popílku ve směsi, který vykazoval největší objemové změny. Při porovnání kombinace vysokoteplotního popílku s inertními příměsemi vztažených k recepturám obsahujících pouze jednu inertní příměs došlo ve většině případů k mírnému zvýšení objemových změn v řádu 3 – 9 %. Výjimku tvoří pouze receptura s kombinací vysokoteplotního popílku a kamenného filleru z lokality Bílý Kámen, která je zmíněna již výše.

Obecně je nutné zmínit, že dosažené hodnoty objemových změn receptury pouze s vysokoteplotním popílkem jsou v přímém rozporu s výsledky popisovanými v teoretické části práce. Tato odlišnost výsledků může být dána chybou během samotné zkoušky nebo případně použitím vysokoteplotního popílku vykazujícího nějaké anomálie z pohledu jeho chemického složení a případně hodnoty ztráty žíháním.

Receptura obsahující pouze VJMGS vykazovala po 60 dnech zrání hodnotu smrštění 519  $\mu\text{m}/\text{m}$ . Při kombinaci VJMGS s inertními příměsemi došlo k redukci objemových změn ve všech případech přibližně o 20 – 29 % vztaženo k receptuře obsahující pouze VJMGS. Při redukci smrštění vztažené na betonové směsi obsahující pouze jednu inertní příměs bylo zjištěno, že kombinací inertní příměsi s aktivní příměsí byla velikost smrštění jednotlivých receptur o 29 – 49 % nižší, což lze považovat za velmi významnou redukci smrštění. Největší redukce, tedy 49 %, nastala u receptury s kombinací VJMGS

a kamenného filleru z lokality Bílý Kámen, který samostatně ve směsi vykazoval druhé nejvyšší objemové změny ze všech porovnávaných receptur.

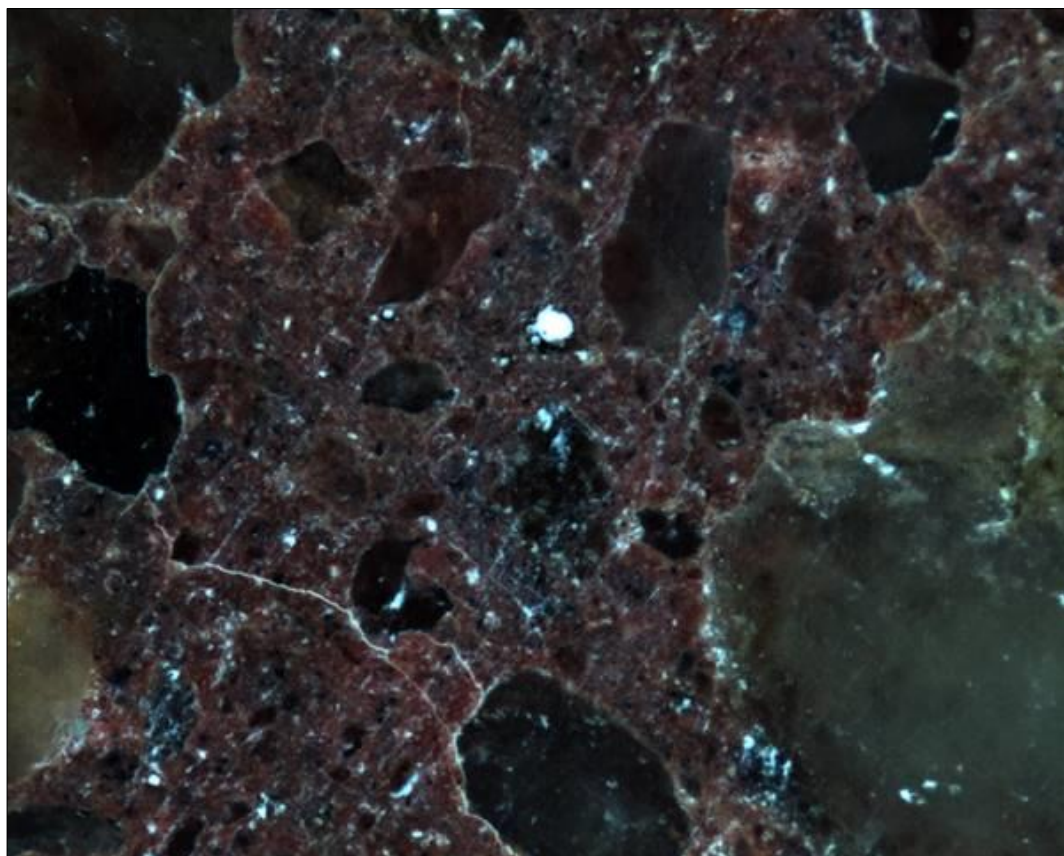
Lze tedy konstatovat, že pomocí vhodného dávkování a mísení jednotlivých druhů příměsí lze velmi výrazně redukovat objemové změny betonových směsí. Některé výsledky receptur s kombinací jednotlivých druhů příměsí poté prokazují, že po 60 dnech zrání lze díky této metodice vyrobit betonový kompozit s pevností přesahující 50 MPa a objemovými změnami menšími než 500  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

Z výsledků je však rovněž velmi patrný průběh ovlivnění smrštění díky kombinaci příměsí. Pozitivní ovlivnění díky optimálnímu mísení jednotlivých příměsí a zajištění tak maximální hutnosti matrice v suchém stavu je nejpatrnější v raném stádiu zrání. Z výsledků obsažených v Tabulce 18 je poté patrné, že s dobou zrání kompozitu tento pozitivní dopad z pohledu procentuální redukce smrštění klesá. U některých směsí je tento pokles mezi 24 hodinami a 60 dny téměř poloviční. Tento výsledek poukazuje na možnou odlišnost odchodu vody z kompozitu v případě použití kombinace příměsí. Díky jejich kombinaci mohlo dojít k vhodnějšímu navázání vody na pojivový systém díky jeho zvýšené hutnosti a jejímu pozvolnějšímu odchodu z kompozitu. Tato skutečnost je v přímé souvislosti s výsledky některých výzkumníků, kteří tvrdí, že maximální hutnost cementové matrice může negativně působit na autogenní smrštění a zejména smrštění vysycháním. Dopad na druhý jmenovaný druh smrštění byl nejspíše prokázán i experimentem provedeným v této diplomové práci, avšak pro další závěry by bylo nezbytné objemové změny vyrobených kompozitů sledovat ve výrazně delším časovém období.

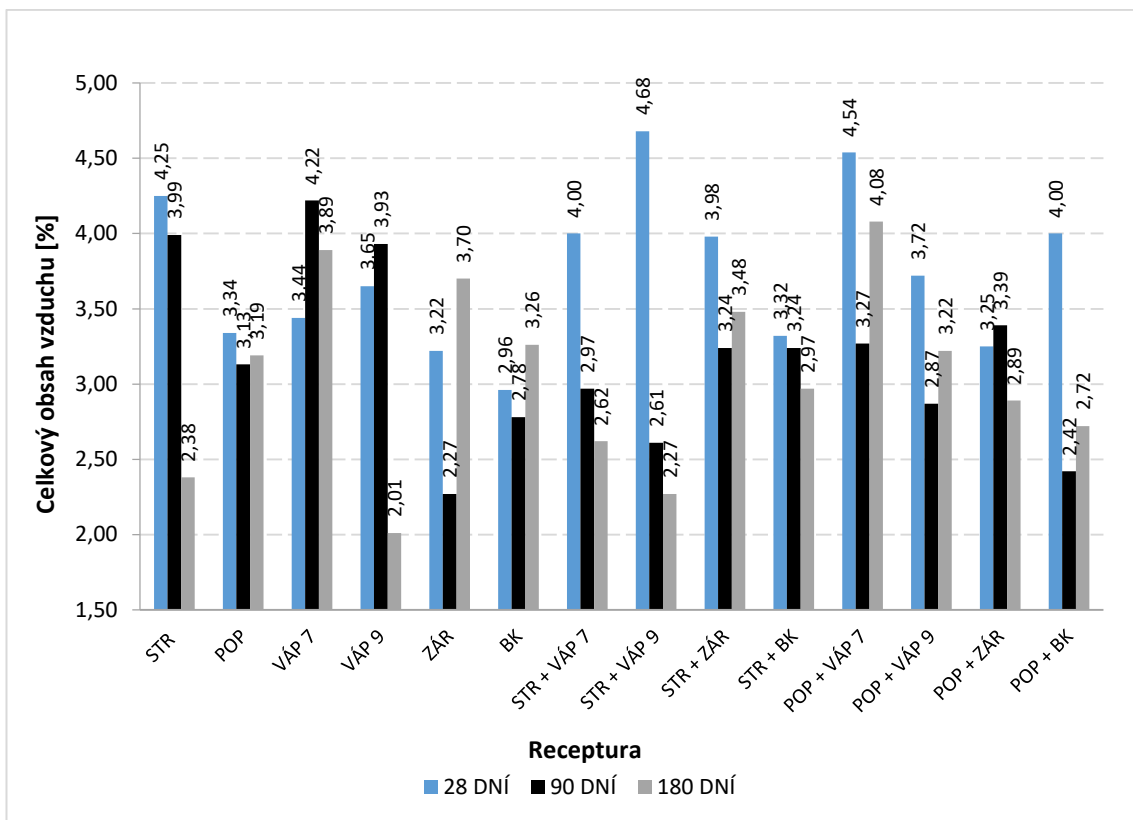
Ačkoliv se pozitivní dopad na objemové změny s delším obdobím zrání snižuje při optimálním poměru mísení jednotlivých druhů příměsí, lze tento vliv obecně klasifikovat jako velmi výrazný.

#### 4.5.3.3 Sledování mikrostruktury ztvrdlého betonu

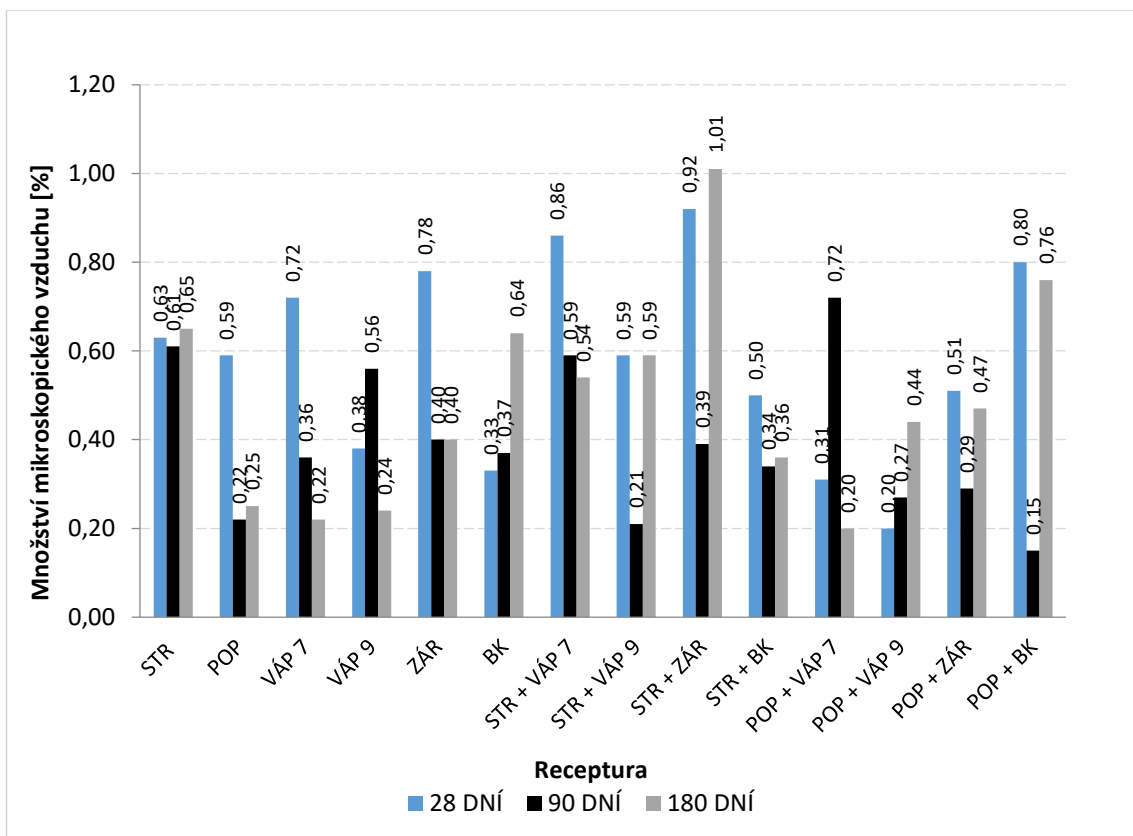
Mikrostruktura byla sledována za pomoci modifikované metody stanovení součinitele prostorového rozložení vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu dle ČSN EN 480 - 11 [N15] ve stáří 28, 90 a 180 dní. V rámci tohoto zkušebního postupu bylo ověřeno pouze množství celkového obsahu vzduchu a množství vzduchu s velikostí do 300  $\mu\text{m}$ , jejichž hodnoty jsou vyobrazeny na grafu č. 13 a 14. Zkušební vzorek vyříznut ze středu krychle o hraně 150 mm pro tuto zkoušku byl natřen červeným inkoustem, na který byla po jeho zaschnutí nanášena bílá zinková pasta, čímž došlo k vyniknutí veškerých obsahovaných pórů na povrchu ztvrdlého betonu, jak je možno vidět na obrázku č. 61. Příprava vzorku je shodná s přípravou dle zmíněné ČSN EN 480 – 11. [N15]



Obr. 61: Zvýrazněné vzduchové póry ve struktuře ztvrdlého betonu



Graf 13: Celkový obsah vzduchu v jednotlivých recepturách



Graf 14: Celkové množství mikroskopického vzduchu v jednotlivých recepturách



#### 4.5.3.3.1 Diskuze vyhodnocení výsledků

Při stanovení celkového obsahu vzduchu ve ztvrdlém betonu za pomoci modifikované metody stanovení součinitele prostorového rozložení pórů ve ztvrdlém betonu nebyl potvrzen jednoznačný vliv optimálního dávkování kombinace příměsí s cílem dosažení vyšší hutnosti mikrostruktury kompozitu. Zároveň by vlivem hydratačních reakcí mělo v průběhu zrání docházet k tvorbě novotvarů a C-S-H gelů, v jejichž důsledku by mělo docházet k zahušťování mikrostruktury, a tedy k poklesu množství vzduchových pórů v kompozitu. Tento jev by se měl nejvýrazněji projevit u betonové směsi obsahující pouze příměs vysokoteplotního popílku, případně kombinaci vysokoteplotního popílku s inertní příměsí.

Při stanovení mikroskopického obsahu vzduchu ve ztvrdlém betonu byl očekáván podobný trend, jako vykazuje například betonová směs s obsahem mikromletého vápence 7 či kombinace VJMGS a mikromletého vápence 7, tedy postupné snižování mikroskopického vzduchu s přibývajícím časem zrání. Zvýšení mikroskopického vzduchu po 180 dnech zrání vykazuje například směs s kombinací vysokoteplotního popílku s mikromletým vápencem 9 či vysokoteplotního popílku s kamenným fillerem z lokality Bílý kámen. Jedním z důvodů zvýšení obsahu mikroskopického vzduchu po této době zrání může být snížení obsahu makroskopického vzduchu, který v důsledku hydratačních reakcí snížil svoji velikost natolik, že byl později brán jako vzduch mikroskopický.

Lze ovšem konstatovat, že tento typ metody pro stanovení celkového obsahu vzduchu a celkového množství mikroskopického vzduchu není vhodný. V rámci experimentální části práce byl tento postup navržen pro jednoznačnou interpretaci výsledků z pohledu normativních dokumentů zabývajících se betonem a snahou o jednoduchost stanovení rozložení pórů a obsahu vzduchu v betonu.

Pro stanovení porozity zkušebních těles by však dle dosažených výsledků bylo vhodné použití jiné, přesnější metody. Do úvahy připadá metoda vysokotlaké rtuťové porozimetrie, která ovšem není schopná zahrnout uzavřené póry, neboť rtuť nemá možnost do těchto pórů proniknout. Další uvažovaná

metoda je metoda využívají sorpci plynu, nejčastěji dusíku. Tato metoda umožňuje získat informace o distribuci pórů, jejich objemu a celkové porozitě materiálu. Tato metoda je vhodná poté pouze pro otevřené póry o velikost 0,4 - 100 nm. [43] Pro obě navržené metody je však reprezentativní zkušební vzorek velice malý a je tak velice obtížné zajistit jeho vypovídající hodnotu.

#### **4.6 Ekonomické zhodnocení**

Od nejmenované společnosti zabývající se výrobou transportbetonu byly získány pořizovací ceny jednotlivých vstupních surovin, které ovšem na základě domluvy vytvořené oběma stranami nebudou zveřejněny.

Dle složení jednotlivých betonových receptur byly stanoveny náklady na 1 m<sup>3</sup> betonové směsi. V technické praxi se velice často stanovuje cena za jednotku pevnosti v tlaku, tedy 1 MPa a to zejména pro přesnější zjištění nákladů vstupních surovin. Může totiž nastat případ, že pořizovací náklady vstupních surovin pro výrobu 1 m<sup>3</sup> betonové směsi budou v porovnání s ostatními betonovými recepturami srovnatelné, ovšem fyzikálně mechanické parametry budou výrazně nižší a po přepočtu pořizovacích nákladů vstupních surovin na 1 MPa se zjistí, že tato betonová receptura není ekonomicky výhodná v porovnání s jinými. Typickým příkladem v rámci výsledků této diplomové práce je receptura s obsahem kamenného filleru z lokality Zárubka. Do pořizovacích nákladů vstupních surovin není zahrnuta cena vody, která je ovlivněna požadovaným stupněm konzistence zákazníkem či vlhkostí vstupních surovin, přesněji kameniva.

Cena za 1 MPa je stanovena jako poměr pořizovací ceny vstupních surovin pro výrobu betonové směsi a její pevnosti betonu v tlaku po 28 dnech zrání bez uvažování ostatních přímých či nepřímých nákladů.

Tab. 19: Ekonomické zhodnocení jednotlivých receptur

Receptura	Pořizovací náklady vstupních surovin [Kč/m <sup>3</sup> ]	Pevnost betonu v tlaku po 28 dnech zrání [MPa]	Pořizovací náklady vstupních surovin [Kč/MPa]
STR	1205	58,9	20,5
POP	1155	53,3	21,7
VÁP 7	1194	53,4	22,4
VÁP 9	1197	51,9	23,1
ZÁR	1149	43,2	26,6
BK	1126	44,7	25,2
STR + VÁP 7	1189	56,0	21,2
STR + VÁP 9	1188	51,6	23,0
STR + ZÁR	1146	45,3	25,3
STR + BK	1112	46,3	24,0
POP + VÁP 7	1169	55,2	21,2
POP + VÁP 9	1179	58,0	20,3
POP + ZÁR	1177	47,7	24,7
POP + BK	1126	53,6	21,0

#### 4.6.1 Diskuze

Při přepočtu celkových nákladů vstupních surovin na jednotku pevnosti se nejméně výhodné jeví betonové směsi obsahující pouze kamenný filler, což je způsobeno nejnižšími mechanickými parametry betonové směsi po 28 dnech zrání. Z ekonomického hlediska se jeví jako nejvýhodněji betonová směs s kombinací vysokoteplotního popílku a mikromletého vápence 9 (20,3 Kč/MPa), případně betonová směs obsahující pouze strusku, u které náklady vstupních surovin vychází na 20,5 Kč/MPa.

Při vyhodnocení nákladů vstupních surovin na jednotku pevnosti lze také konstatovat, že používání kamenného filleru do betonové směsi bez použití aktivní příměsí, se jeví jako neekonomické řešení. V případě kombinace s aktivní příměsí, konkrétně vysokoteplotního popílku, lze uspořit přibližně 17 % nákladů na jednotku pevnosti. Z pohledu ceny u jednotlivých kombinací příměsí hraje významnou roli rovněž zvýšená dávka použité superplastifikační přísady nutná pro dosažení požadovaného stupně konzistence. V případě, že by byla nalezena superplastifikační přísada zabezpečující výraznější dopad na

konzistenci těchto receptur při srovnatelné pořizovací ceně, vedla by tato skutečnost k dalšímu snížení ceny zmíněných receptur.

Stanovené ceny na jednotku pevnosti poukazují na možný vhodný trend využití inertních příměsí v kombinaci s příměsí aktivní, díky čemu dojde k redukci dávkování v tomto navrženém případě vysokopecní strusky a vysokoteplotního popílku. Tato skutečnost bude v dalších letech ještě více názorná, protože v rámci posledních let a dle výhledu do budoucnosti dochází k výraznému úbytku produkce vysokopecní strusky a do betonu použitelného vysokoteplotního úletového popílku. Tyto skutečnosti výrazně působí na cenu obou zmíněných surovin a je nutné nalézt možné alternativy, díky kterým však bude možné dosahovat porovnatelných vlastností betonových kompozitů.

## 5 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo analyzovat vliv optimálního poměru mísení aktivních příměsí s příměsemi inertními s cílem dosažení maximální hutnosti cementové matrice, potažmo její minimální mezerovitosti u betonu pevnostní třídy C30/37 zejména na objemové změny do stáří 60 dnů. Byl sledován také vliv hutnosti cementové matrice na pevnost betonu v tlaku a jeho vodotěsnost ve stáří 7, 28 a 90 dní. Dále byla stanovena nasákavost jednotlivých receptur ztvrdlého betonu ve stáří 7, 28, 90 a 180 dní a dopad kombinace jednotlivých příměsí na mikrostrukturu betonového kompozitu ve stáří 28, 90 a 180 dní. U čerstvého betonu byl sledován vliv kombinace příměsí na odlučivost vody v čase 15 a 60 minut.

V teoretické části práce je detailně popsán vliv jednotlivých vstupních surovin na odlučivost vody z betonu, vliv na vývoj hydratačního tepla, vliv na objemové změny kompozitu či jeho mikrostrukturu. Je zde také rozebrána tzv. skrytá aktivita vápence, tedy jeho schopnost tvořit krystalické zárodky, na kterých je možné vysrážení reakčních produktů slínku, což vede k větší hydrataci slínku a ovlivnění i fyzikálně mechanických parametrů kompozitu. I přes řadu provedených výzkumů platná legislativa považuje mikromletý vápenec za zcela inertní příměs do betonu.

V praktické části diplomové práce byly pečlivě analyzovány jednotlivé vstupní suroviny, na jejichž základě proběhl návrh složení betonových směsí. U veškerých vyrobených betonových směsí bylo dosaženo požadované konzistence stupně S4 v čase 5 minut. V následujících minutách ovšem došlo k výraznému zvýšení viskozity směsi, tedy snížení stupně konzistence, což mohlo být způsobeno nevhodně zvoleným typem superplastifikační přísady. Pro ověření zpracovatelnosti betonové směsi až do času 90 minut by bylo vhodné použití jiného typu superplastifikační přísady. Za jednu z vhodných variant je možno považovat kombinaci modifikovaného polykarboxylátu a lignosulfanu, neboť při kombinaci těchto látek by mohlo dojít ke kombinaci jejich vlastností s výslednou vysokou účinností superplastifikační přísady zaručující dlouhou dobu zpracovatelnosti betonové směsi.

Z hlediska vlivu optimální kombinace příměsí na objemové změny kompozitu vykazovala nejvyšší hodnotu redukce smrštění betonová směs obsahující VJMGS a kamenný filler z lokality Bílý Kámen, u které došlo k redukci smrštění porovnávaných receptur, o 49 % ve srovnání s betonovou recepturou obsahující pouze kamenný filler. I další kombinace VJMGS s inertními příměsemi přinášely pozitivní ovlivnění objemových změn kompozitu, přibližně o 29 – 33 % po 60 dnech zrání, ve srovnání s betonovými směsmi obsahující pouze inertní příměs. V případě kombinace vysokoteplotního popílku s inertními příměsemi se také vždy podařilo snížit velikost objemových změn v porovnání k betonové směsi obsahující pouze vysokoteplotní popílek. V porovnání se směsmi obsahující pouze inertní příměs (vyjímaje směsi obsahující kamenný filler z lokality Bílý Kámen) se docílilo mírného zvýšení objemových změn. S přihlédnutím ovšem na fakt, že přidávkem vysokoteplotního popílku do těchto směsí došlo ke zvýšení nejen mechanických parametrů, ale také snížení hloubky průsaku tlakovou vodou lze konstatovat, že kombinace aktivních příměsí s příměsemi inertními má pozitivní vliv na vlastnosti betonové směsi.

Při stanovení pevnosti betonu v tlaku po 28 dnech zrání vykazovala nejvyšší hodnoty z porovnávaných receptur betonová směs obsahující pouze VJMGS, která se vyznačuje svoji latentní hydraulitou. Po 90 dnech zrání se mechanické parametry této směsi zvýšily. Shodné parametry ovšem vykazovala i betonová směs obsahující pouze vysokoteplotní popílek, který se vyznačuje svoji pucolánovou aktivitou a nárůstem mechanických parametrů zejména v delším časovém horizontu.

Za velmi efektivní řešení se dá považovat kombinace aktivních příměsí s mikromletým vápencem. V případě kombinace VJMGS s tímto druhem příměsí bylo dosaženo nepříliš rozdílných pevností betonu v tlaku v porovnání s betonovou směsí obsahující pouze VJMGS. Je ovšem nutno zohlednit složení daných receptur. Zatímco v betonové směsi obsahující pouze VJMGS je množství této příměsí  $90 \text{ kg/m}^3$ , u receptur s kombinací VJMGS a mikromletého vápence se množství aktivní příměsí snížilo o polovinu, což vzhledem k nastávajícímu trendu úbytku produkce této suroviny se jeví jako jedna

z vhodných alternativních řešení. Snížení množství této suroviny a kombinace s inertní příměsí v betonové směsi se jeví jako výhodné také z hlediska ekonomického.

Velmi podobné zjištění nastalo i v případě porovnání betonové směsi obsahující vysokoteplotní popílek s jeho kombinacemi s mikromletými vápenci. Po 28 dnech zrání vykazovaly betonové směsi obsahující kombinaci těchto příměsí dokonce vyšší pevnosti betonu v tlaku než receptura obsahující pouze vysokoteplotní popílek. Stejně jako v předchozím zjištění, i v tomto případě bylo použito poloviční množství aktivní příměsi ve směsi, což je opět velice výhodné zejména z ekologického hlediska.

Kamenné fillery vzhledem ke své morfologii zrna mají zvýšené nároky na množství záměsové vody, což způsobuje nejen pokles fyzikálně mechanických parametrů, ale jak je podloženo v teoretické části výzkumem, s přibývajícím množstvím záměsové vody se objemové změny betonového kompozitu zvyšují. Při vhodné kombinaci s VJMGS je ovšem možnost získat velice dobrých hodnot smrštění. Je ovšem nutno pamatovat na nižší mechanické parametry, které betonové směsi vykazují, tím pádem i na vyšší náklady vstupních surovin na jednotku pevnosti.

Vzhledem k probíhajícímu snížení produkce vysokopecní strusky i snížení množství vysokoteplotního úletového popílku vhodného do betonu se jeví kombinace těchto aktivních příměsí s vhodnými inertními příměsemi jako jedno z možných řešení. Dle zjištěných výsledků této diplomové práce se jako nejvhodnější inertní příměsí jeví mikromletý vápenec, který díky své skryté aktivitě pozitivně přispívá k ovlivnění mechanických parametrů ztvrdlého betonu. V technické praxi by vhodná kombinace příměsí měla mít pozitivní dopad také z ekonomického hlediska, neboť dochází ke snížení vstupních nákladů na aktivní příměsi.

## 6 FOTODOKUMENTACE



Obr. 62, 63: Stanovení konzistence betonu metodou sednutí kužele dle ČSN EN 12350 – 2 [N4] v čase 5 (vlevo) a 30 minut (vpravo) od zamíchání



Obr. 64, 65: Stanovení konzistence betonu metodou sednutí kužele dle ČSN EN 12350 – 2 [N4] v čase 60 (vlevo) a 90 minut (vpravo) od zamíchání





Obr. 66, 67: Zkušební zařízení Schleibinger Geräte určené ke stanovení objemových změn betonu [O4]



Obr. 68, 69: Střásací stůl pro určení konzistence cementové malty dle ČSN EN 1015 – 3 [N21] a zkušební zařízení Calmetrix f-cal 8000 určené pro měření vývoje hydratačních teplot [O34]

## 7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

### 7.1 Použitá literatura

- [1] PROF. ING PYTLÍK, CSC., Petr. TECHNOLOGIE BETONU I. Fakulta stavební VUT v Brně: Akademické nakladatelství CERM Brno, 1994. ISBN 80-85867-07-9.
- [2] Bc. Lucia Osuská Vývoj vysokohodnotných betonů s využitím druhotných surovin. Brno, 2016. 51 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
- [3] HOLT, Erika. Early age autogenous shrinkage of concrete: Dissertation [online]. Finland, 2001 [cit. 2019-11-02]. Dostupné z: <https://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/2001/P446.pdf>. University of Washington.
- [4] HELA, Rudolf. Technologie betonu II: Modul M 01, BJ15 - Technologie betonu II. Brno: Vysoké učení technické Brno, 2007.
- [5] BAJZA, Adolf a Ildikó ROUSEKOVÁ. TECHNOLÓGIA BETÓNU. Bratislava: JAGA GROUP, 2006. ISBN 80-8076-032-2.
- [6] ADÁMEK, Jiří, Bohumil NOVOTNÝ a Jan KOUKAL. Stavební materiály. Fakulta stavební VUT v Brně: Akademické nakladatelství CERM, s. r. o. Brno, 1997. ISBN 80-214-0631-3.
- [7] DRBUŠKOVÁ, M. Numerická analýza smršťování vybraných silikátových kompozitů. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav stavební mechaniky, 2014. 112 s., z toho 56 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Zbyněk Keršner, CSc., specialista/konzultant Ing. Petr Frantík, Ph.D.
- [8] SANT, Gaurav. The influence of temperature on autogenous volume changes in cementitious materials containing shrinkage reducing admixtures. Cement & Concrete Composites [online]. 2012, (34), 855 - 865 [cit. 2019-11-10]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.04.003>. ISSN 0958-9465.
- [9] COLLEPARDI, Mario. Moderní beton. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009. Betonové stavitelství. ISBN 9788087093757.
- [10] AÏTCIN, Pierre-Claude. Vysokohodnotný beton. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) a Českou betonářskou společnost vydalo Informační centrum ČKAIT, 2005. Betonové stavitelství. ISBN 8086769399.
- [11] FRIDRICHOVÁ, Marcela, Karel DVOŘÁK, Dominik GAZDIČ a Iveta HÁJKOVÁ. BJ16 - Maltoviny : modul M02: Studijní opory pro studijní programy s prezenční formou studia. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2014. ISBN 978-80-214-4973-2.
- [12] JASICZAK, Józef, Paweł SZYMAŃSKI a Piotr NOWOTARSKI. Impact Of Moisture Conditions On Early Shrinkage Of Ordinary Concrete With Changing W/C Ratio. Archives of Civil Engineering [online]. 2014, 2014, (60), 241 - 256. DOI: <https://doi.org/10.2478/ace-2014-0016>. Dostupné z: [https://content.sciendo.com/configurable/contentpage/journals\\$002face\\$002f60\\$002f2\\$002farticle-p241.xml](https://content.sciendo.com/configurable/contentpage/journals$002face$002f60$002f2$002farticle-p241.xml)
- [13] JANČAŘÍKOVÁ, Denisa, Rudolf HELA, D NETSVET a Tomáš PEŘINA. Variability in cement properties - influence on bleeding of cement paste. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering [online]. 2018, 16 July 2018, (385), 385 [cit. 2019-11-22]. DOI: doi:10.1088/1757-899X/385/1/012021. ISSN 1757-899X. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/385/1/012021/pdf>
- [14] HONG JAE, Yim, Kim HONG JAE, Han HO SEONG a Kwak HYO-GYOUNG. Influence of Portland cement and ground-granulated blast-furnace slag on bleeding of fresh mix.

Construction and Building Materials [online]. 2015, (80), 132-140 [cit. 2019-11-22]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.051>. ISSN 0950-0618. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/journal/construction-and-building-materials>

[15] Bc. Ondřej Pikna Studium možností redukce objemových změn a vývoje hydratačních teplot v betonech. Brno, 2019. 137 s., 14 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

[16] PŘÍRUČKA TECHNOLOGA BETON: SUROVINY - VÝROBA - VLASTNOSTI [online]. Aktualizace 1. vydání. HEIDELBERGCEMENT Group, 2013 [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <http://www.transportbeton.cz/stahnout-soubor?id=3203>

[17] Milan Meruňka, Vývoj speciálních vysokopevnostních betonů s nízkými objemovými změnami. Brno, 2018. 84 s. Bakalářské práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

[18] TAZAWA, Ei-ichi a Shingo MIYAZAWA. Influence of cement and admixture on autogenous shrinkage of cement paste. Cement and Concrete Research [online]. 1995, (25), 281 - 287 [cit. 2019-12-03]. DOI: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00010-0](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00010-0). ISSN 0008-8846.

[19] HELA, Rudolf. Příměsí do betonu. Beton: Technologie, konstrukce, sanace [online]. 2015, 15.(2) [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <http://www.betonks.cz/sites/default/files/2015-2-04.pdf>

[20] PROKOPEC, Zdeněk. Mechanické aktivace příměsí do betonů a ověření dopadů na fyzikálněmechanické vlastnosti čerstvých a zatvrdlých betonů. Brno, 2012. 76 s., Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Rudolf Hela, CSc..

[21] Martin Ťažký Vývoj konstrukčních betonů s elektrárenskými popílky. Brno, 2014. 91 s., 5 s.příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

[22] Martin Berčík Možnosti využití různých druhů příměsí v technologii stříkaných betonů. Brno, 2014. 65 s., 73 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Adam Hubáček, Ph.D.

[23] MOHAMED, Ashraf Ragab, Mona ELSALAMAWY a Marwa RAGAB. Modeling the influence of limestone addition on cement hydration. Alexandria Engineering Journal [online]. 2015, 10 November 2014, (54) [cit. 2019-11-24]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2014.11.004>. ISSN 1110-0168. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/journal/alexandria-engineering-journal>

[24] OEY, Tandré, Aditya KUMAR, Narayanan NEITHALATH, Gaurav SANT a G SCHERER. The Filler Effect: The Influence of Filler Content and Surface Area on Cementitious Reaction Rates. Journal of the American Ceramic Society [online]. 2013, (Vol. 96), 1978-1990 [cit. 2019-11-24]. DOI: 10.1111/jace.12264. Dostupné z: <http://web.a.ebscohost.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/ehost/pdfviewer/pdfviewer?vid=7&sid=d0510560-b36c-4de6-a6b2-e5b0c4bf5db4%40sdc-v-sessmgr03>

[25] TAO, Jiayin a Xiaosheng WEI. Effect of ground granulated blast-furnace slag on the hydration and properties of cement paste. Advances in Cement Research [online]. 2019, (31), 251-260 [cit. 2019-12-04]. DOI: <https://doi.org/10.1680/jadcr.17.00166>. ISSN 0951-7197. Dostupné z: <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/pdf/10.1680/jadcr.17.00166>

[26] WANG, Bin, Youping DING, Jing GAO, Jinfang SUN, Miaomiao CUI a Long HAN. Effect of Limestone Powder on Autogenous Shrinkage of Concrete. Applied Mechanics and Materials; Zurich [online]. 2011, (88-89), 767-771 [cit. 2019-12-02]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.88-89.767. ISSN 1660-9336. Dostupné z: [https://search.proquest.com/docview/1443433936?rfr\\_id=info%3Axri%2Fsid%3Aprimio](https://search.proquest.com/docview/1443433936?rfr_id=info%3Axri%2Fsid%3Aprimio)

- [27] DEJIAN, ShenCi, FengShuaishuai LIUZHIZHUO a Liang ZHUCHEN. Influence of ground granulated blast furnace slag on the early-age anti-cracking property of internally cured concrete. *Construction and Building Materials* [online]. 2019, (223), 233-243 [cit. 2019-12-03]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.149>. Dostupné z: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S095006181931579X?token=9ED1869599D998F6E8EC6AF3D3F58894A3350E13AD848D4FB1CE92D9D0B9A9F338751A166E451AFC8F6C10F476A156B0>
- [28] KUCHARCZYKOVÁ, Barbara, Dalibor KOCÁB, Pavla ROVNANÍKOVÁ, Romana HALAMOVIČOVÁ a Michaela HODULÁKOVÁ. Experimentální stanovení vývoje chemického a autogenního smrštění cementových past. *Beton - technologie, konstrukce, sanace: Beton a architektura*. Praha: Beton TKS, 2019, (5), 58 - 65.
- [29] ASHISH, KumerSaha. Effect of class F fly ash on the durability properties of concrete. *Sustainable Environment Research* [online]. 2018, (28), 25 - 35 [cit. 2019-12-03]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.serj.2017.09.001>. ISSN 2468-2039. Dostupné z: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2468203917301334?token=FDBB68FC65E6E938DDA31A36EEE6CCF2B7F7E11A76DCFF9B84056F4EF17D14C3223131B1A7180D72A5A2D26E3F5DB7E4>
- [30] LIGUO, Ma a Zhang YUNSHENG. Study on the effect of fly ash or silica fume to hydration heat of cement. *Advanced Materials Research* [online]. 2011, (250 - 253), 4001 - 4004 [cit. 2019-12-03]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.250-253.4001. ISSN 1662-8985.
- [31] BAI, Ruiying, Jiwei CAI, Jixu WU a Gonglei WEI. Influence of air content on the compressive strength of concrete. *Advanced Materials Research* [online]. 2012, (535-537), 1790-1793 [cit. 2019-12-03]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.535-537.1790. ISSN 1662-8985.
- [32] HONZA, Jakub, Robert COUFAL a Jan L. VÍTEK. Specifikace betonu pomocí jeho vlastností. *Beton - technologie, konstrukce, sanace* [online]. Praha: Beton TKS, 2019, (2) [cit. 2019-12-04]. Dostupné z: <http://www.betontkz.cz/sites/default/files/2018-2-54.pdf>
- [33] Voda [online]. [cit. 2019-12-04]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/voda>
- [34] BENSCHIED, N., W. von BERG, J. FEUERBORN, et al. Příručka Popílek do betonu: Základy výroby a použití. 2. přepracované vydání. ČEZ Energetické produkty, 2013. ISBN 978-80-260-4226-6.
- [35] Stroje pro zkušebnictví [online]. [cit. 2019-12-10]. Dostupné z: <https://www.strojeprozkusebnictvi.cz/merici-zlab-pro-stanoveni-objemovych-zmen.html>
- [36] ALMUDAIHEEM, Jamal A. Prediction of Drying Shrinkage of Portland Cement Paste: Influence of Shrinkage Mechanisms. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences* [online]. 1993, 1991, (3), 69 - 86. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1018-3639\(18\)30538-5](https://doi.org/10.1016/S1018-3639(18)30538-5). ISSN 1018-3639.
- [37] APONTE, Diego Fernando, Marilda BARRA a Enric VÁZQUEZ. Durability and cementing efficiency of fly ash in concretes. *Construction and Building Materials* [online]. 2012, (30), 537 - 546 [cit. 2019-12-16]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.026>.
- [38] DELLINGHAUSEN, L. M., A. L. G. GASTALDINI, F. J. VANZIN a K. K. VEIGA. Total shrinkage, oxygen permeability, and chloride ion penetration in concrete made with white Portland cement and blast-furnace slag. *Construction and Building Materials* [online]. 2012, (37), 652-659 [cit. 2019-12-16]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.076>.
- [39] TĚHNÍK, Vladimír, Radovan NEČAS a Dana KUBÁTOVÁ. Vápenec jako základní kámen maltovin [online]. [cit. 2019-12-16]. Dostupné z: [s3.eu-central-1.amazonaws.com/uploads.mangoweb.org/shared-prod/svcement.cz/uploads/2016/07/sd2008-prednaska-vt-vapence.pdf](https://s3.eu-central-1.amazonaws.com/uploads.mangoweb.org/shared-prod/svcement.cz/uploads/2016/07/sd2008-prednaska-vt-vapence.pdf)
- [40] THONGSANITGARN, P., W. WONGKEO, S. SINTHUPINYO a A. CHAIPANICH. Effect of Limestone Powders on Compressive Strength and Setting Time of Portland-Limestone Cement Pastes. *Advanced Materials Research* [online]. (343-344), 322-326 [cit. 2019-12-16].

DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.343-344.322. ISSN 1662-8985. Dostupné z: <https://www-scientific-net.ezproxy.lib.vutbr.cz/AMR.343-344.322.pdf>

[41] Technologie SikaGrind: Intenzifi kátory mletí cementu [online]. [cit. 2019-12-16]. Dostupné z: [https://cze.sika.com/dms/getdocument.get/e8143aeb-f7ee-372f-9ab1-9ef5a7fa54da/Technologie\\_SikaGrind\\_intenzifikatory\\_mleti\\_cementu.pdf](https://cze.sika.com/dms/getdocument.get/e8143aeb-f7ee-372f-9ab1-9ef5a7fa54da/Technologie_SikaGrind_intenzifikatory_mleti_cementu.pdf)

[42] SOKOLÁŘ, Radomír a Martin NGUYEN. Vlastnosti fluidních elektrárenských popílků s ohledem na jejich použitelnost ve výrobě pálených staviv [online]. 31. prosince 2018 [cit. 2019-12-17]. Dostupné z: [stavba.tzb-info.cz/cihly-bloky-tvarnice/18458-vlastnosti-fluidnich-elektrarenskych-popilku-s-ohledem-na-jejich-pouzitelnost-ve-vyrobe-palenyh-staviv](http://stavba.tzb-info.cz/cihly-bloky-tvarnice/18458-vlastnosti-fluidnich-elektrarenskych-popilku-s-ohledem-na-jejich-pouzitelnost-ve-vyrobe-palenyh-staviv)

[43] JARKOVÁ, Petra. Alternativní metody pro měření pórovitosti betonu pomocí digitálního zpracování a analýzy obrazu. Praha, 2018. 65 s., Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra technologie staveb. Vedoucí práce Ing. Rostislav Šulc, PhD..

[44] Bc. Tomáš Ťažký *Možnosti využívání druhotných surovin jako plniv do betonů*. Brno, 2006. 144s., 20 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Rudolf Hela

## 7.2 Použité právní normy a předpisy

[N1] ČSN EN 206+A1. Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. Praha: ÚNMZ, 2018.

[N2] 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. Praha: ÚNMZ, 2004.

[N3] ČSN EN 197-1 ED. 2. Cement - Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití. Praha: ÚNMZ, 2012.

[N4] ČSN EN 12350-2. Zkoušení čerstvého betonu - Část 2: Zkouška sednutím. Opr.1. Praha: ÚNMZ, 2019.

[N5] ČSN EN 12350-1. Zkoušení čerstvého betonu - Část 1: Odběr vzorků a zkušební zařízení. Opr.1. Praha: ÚNMZ, 2019.

[N6] ČSN EN 12390-2. Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 2: Výroba a ošetřování zkušebních těles pro zkoušky pevnosti. Opr.1. Praha: ÚNMZ, 2019.

[N7] ČSN EN 1097-6. Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva: Část 6: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti. Praha: ÚNMZ, 2014.

[N8] ČSN EN 933-1. Zkoušení geometrických vlastností kameniva: Část 1: Stanovení zrnitosti - Síťový rozbor. Praha: ÚNMZ, 2012.

[N9] ČSN EN 196-9. Metody zkoušení cementu: Část 9: Stanovení hydratačního tepla - Semiadiabatická metoda. Praha: ÚNMZ, 2010.

[N10] ČSN EN 12350-6. Zkoušení čerstvého betonu - Část 6: Objemová hmotnost. Praha: ÚNMZ, 2009

[N11] ČSN EN 12390-7. Zkoušení ztvrdlého betonu: Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu. Opr.1. Praha: ÚNMZ, 2019.

[N12] ČSN EN 12390-3. Zkoušení ztvrdlého betonu: Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. Opr.1. Praha: ÚNMZ, 2019.

[N13] TKP ŘVC ČR. TECHNICKÉ KVALITATIVNÍ PODMÍNKY STAVEB ŘVC ČR: kapitola 1. Třetí vydání. Praha: Česká republika – Ředitelství vodních cest ČR, 2017.

[N14] ČSN 731316. Stanovení vlhkosti, nasákavosti a vzlínivosti betonu. Praha: ÚNMZ, 04/1990 – 11/2003.

- [N15] ČSN EN 480-11. Přísady do betonu, malty a injektážní malty - Zkušební metody: Část 11: Stanovení charakteristik vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu. Praha: ÚNMZ, 2006.
- [N16] OENORM B 3329:2009-06-01. Vergussmörtel - Anforderungen und Prüfmethode. 2009.
- [N17] ČSN EN 12390-8. Zkoušení ztvrdlého betonu: Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou. Opr.1. Praha: ÚNMZ, 2019.
- [N18] ČSN EN 12350-3. Zkoušení čerstvého betonu: Část 3: Zkouška Vebe. Praha: ÚNMZ, 2019.
- [N19] ČSN EN 12350-4. Zkoušení čerstvého betonu: Část 4: Stupeň zhutnitelnosti. Praha: ÚNMZ, 2019.
- [N20] ČSN EN 12350-5. Zkoušení čerstvého betonu: Část 5: Zkouška rozlitem. Praha: ÚNMZ, 2019.
- [N21] ČSN EN 1015-3. Zkušební metody malt pro zdivo: Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střásacího stolku). A2. Praha: ÚNMZ, 2008.
- [N22] Merkblatt "Weiche Betone" ; Betone mit Konsistenz  $\geq$  F 59 inklusive ergänzender Klarstellungen, Österreichische Vereinigung für Beton - und Bautechnik, 18 S., Wien, 2009
- [N23] TKP 18 ČR. Technické kvalitativní podmínky staveb pozemních komunikací: Kapitola 18: Betonové konstrukce a mosty. Praha: Ministerstvo dopravy - odbor pozemních komunikací, 2016.

### 7.3 Použité zdroje obrázků

- [O1] HOLT, Erika. Early age autogenous shrinkage of concrete: Dissertation [online]. Finland, 2001 [cit. 2019-11-02]. Dostupné z: <https://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/2001/P446.pdf>. University of Washington.
- [O2] HOLT, E. a M. LEIVO. Cracking risks associated with early age shrinkage. Cement & Concrete Composites [online]. 2004, July 2004, (26), 10 [cit. 2019-11-10]. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(03\)00068-4](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00068-4). ISSN 0958-9465.
- [O3] SANT, Gaurav. The influence of temperature on autogenous volume changes in cementitious materials containing shrinkage reducing admixtures. Cement & Concrete Composites [online]. 2012, (34), 855 - 865 [cit. 2019-11-10]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.04.003>. ISSN 0958-9465.
- [O4] Stroje pro zkušebnictví [online]. [cit. 2019-12-10]. Dostupné z: <https://www.strojeprozkusebnictvi.cz/merici-zlab-pro-stanoveni-objemovych-zmen.html>
- [O5] ALMUDAIHEEM, Jamal A. Prediction of Drying Shrinkage of Portland Cement Paste: Influence of Shrinkage Mechanisms. Journal of King Saud University - Engineering Sciences [online]. 1993, 1991, (3), 69 - 86. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1018-3639\(18\)30538-5](https://doi.org/10.1016/S1018-3639(18)30538-5). ISSN 1018-3639.
- [O6] JASICZAK, Józef, Paweł SZYMAŃSKI a Piotr NOWOTARSKI. Impact Of Moisture Conditions On Early Shrinkage Of Ordinary Concrete With Changing W/C Ratio. Archives of Civil Engineering [online]. 2014, 2014, (60), 241 - 256. DOI: <https://doi.org/10.2478/ace-2014-0016>. Dostupné z: [https://content.sciendo.com/configurable/contentpage/journals\\$002face\\$002f60\\$002f2\\$002farti cle-p241.xml](https://content.sciendo.com/configurable/contentpage/journals$002face$002f60$002f2$002farti cle-p241.xml)
- [O7] FRIDRICOVÁ, Marcela, Karel DVOŘÁK, Dominik GAZDIČ a Iveta HÁJKOVÁ. BJ16 - Maltoviny : modul M02: Studijní opory pro studijní programy s prezenční formou studia. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2014. ISBN 978-80-214-4973-2.

- [O8] JANČAŘÍKOVÁ, Denisa, Rudolf HELA, D NETSVET a Tomáš PEŘINA. Variability in cement properties - influence on bleeding of cement paste. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering [online]. 2018, 16 July 2018, (385) [cit. 2019-11-22]. DOI: doi:10.1088/1757-899X/385/1/012021. ISSN 1757-899X. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/385/1/012021/pdf>
- [O9] HONG JAE, Yim, Kim HONG JAE, Han HO SEONG a Kwak HYO-GYOUNG. Influence of Portland cement and ground-granulated blast-furnace slag on bleeding of fresh mix. Construction and Building Materials [online]. 2015, (80), 132-140 [cit. 2019-11-22]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.051>. ISSN 0950-0618. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/journal/construction-and-building-materials>
- [O10] Bc. Ondřej Pikna Studium možností redukce objemových změn a vývoje hydratačních teplot v betonech. Brno, 2019. 137 s., 14 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
- [O11] PŘÍRUČKA TECHNOLOGA BETON: SUROVINY - VÝROBA - VLASTNOSTI [online]. Aktualizace 1. vydání. HEIDELBERGCEMENT Group, 2013 [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <http://www.transportbeton.cz/stahnout-soubor?id=3203>
- [O12] TAZAWA, Ei-ichi a Shingo MIYAZAWA. Influence of cement and admixture on autogenous shrinkage of cement paste. Cement and Concrete Research [online]. 1995, (25), 281 - 287 [cit. 2019-12-03]. DOI: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00010-0](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00010-0). ISSN 0008-8846.
- [O13] MOHAMED, Ashraf Ragab, Mona ELSALAMAWY a Marwa RAGAB. Modeling the influence of limestone addition on cement hydration. Alexandria Engineering Journal [online]. 2015, 10 November 2014, (54) [cit. 2019-11-24]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2014.11.004>. ISSN 1110-0168. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/journal/alexandria-engineering-journal>
- [O14] OEY, Tandré, Aditya KUMAR, Narayanan NEITHALATH, Gaurav SANT a G SCHERER. The Filler Effect: The Influence of Filler Content and Surface Area on Cementitious Reaction Rates. Journal of the American Ceramic Society [online]. 2013, (Vol. 96), 1978-1990 [cit. 2019-11-24]. DOI: 10.1111/jace.12264. Dostupné z: <http://web.a.ebscohost.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/ehost/pdfviewer/pdfviewer?vid=7&sid=d0510560-b36c-4de6-a6b2-e5b0c4bf5db4%40sdc-v-sessmgr03>
- [O15] BAJZA, Adolf a Ildikó ROUSEKOVÁ. TECHNOLÓGIA BETÓNU. Bratislava: JAGA GROUP, 2006. ISBN 80-8076-032-2.
- [O16] HELA, Rudolf. Technologie betonu II: Modul M 01, BJ15 - Technologie betonu II. Brno: Vysoké učení technické Brno, 2007.
- [O17] WANG, Bin, Youping DING, Jing GAO, Jinfang SUN, Miaomiao CUI a Long HAN. Effect of Limestone Powder on Autogenous Shrinkage of Concrete. Applied Mechanics and Materials; Zurich [online]. 2011, (88-89), 767-771 [cit. 2019-12-02]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.88-89.767. ISSN 1660-9336. Dostupné z: [https://search.proquest.com/docview/1443433936?rfr\\_id=info%3Axri%2Fsid%3Aprimo](https://search.proquest.com/docview/1443433936?rfr_id=info%3Axri%2Fsid%3Aprimo)
- [O18] DEJIAN, ShenCi, FengShuaishuai LIUZHIZHUO a Liang ZHUCHEN. Influence of ground granulated blast furnace slag on the early-age anti-cracking property of internally cured concrete. Construction and Building Materials [online]. 2019, (223), 233-243 [cit. 2019-12-03]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.149>. Dostupné z: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S095006181931579X?token=9ED1869599D998F6E8EC6AF3D3F58894A3350E13AD848D4FB1CE92D9D0B9A9F338751A166E451AFC8F6C10F476A156B0>
- [O19] KUCHARCZYKOVÁ, Barbara, Dalibor KOCÁB, Pavla ROVNANÍKOVÁ, Romana HALAMOVÁ a Michaela HODULÁKOVÁ. Experimentální stanovení vývoje chemického a autogenního smrštění cementových past. Beton - technologie, konstrukce, sanace: Beton a architektura. Praha: Beton TKS, 2019, (5), 58 - 65.

- [O20] ASHISH, KumerSaha. Effect of class F fly ash on the durability properties of concrete. Sustainable Environment Research [online]. 2018, (28), 25 - 35 [cit. 2019-12-03]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.serj.2017.09.001>. ISSN 2468-2039. Dostupné z: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2468203917301334?token=FDBB68FC65E6E938DDA31A36EEE6CCF2B7F7E11A76DCFF9B84056F4EF17D14C3223131B1A7180D72A5A2D26E3F5DB7E4>
- [O21] LIGUO, Ma a Zhang YUNSHENG. Study on the effect of fly ash or silica fume to hydration heat of cement. Advanced Materials Research [online]. 2011, (250 - 253), 4001 - 4004 [cit. 2019-12-03]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.250-253.4001. ISSN 1662-8985.
- [O22] BAI, Ruiying, Jiwei CAI, Jixu WU a Gonglei WEI. Influence of air content on the compressive strength of concrete. Advanced Materials Research [online]. 2012, (535-537), 1790-1793 [cit. 2019-12-03]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.535-537.1790. ISSN 1662-8985.
- [O23] TAO, Jiayin a Xiaosheng WEI. Effect of ground granulated blast-furnace slag on the hydration and properties of cement paste. Advances in Cement Research [online]. 2019, (31), 251-260 [cit. 2019-12-04]. DOI: <https://doi.org/10.1680/jadcr.17.00166>. ISSN 0951-7197. Dostupné z: <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/pdf/10.1680/jadcr.17.00166>
- [O24] DHIR, R. K., M. J. MCCARTHY a M. D. NEWLANDS. CHALLENGES IN DESIGNING CONCRETE DURABILITY: A SUSTAINABLE APPROACH. Concrete Technology Unit University of Dundee, UK [online]. [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/266907307\\_CHALLENGES\\_IN\\_DESIGNING\\_CONCRETE\\_DURABILITY\\_A\\_SUSTAINABLE\\_APPROACH](https://www.researchgate.net/publication/266907307_CHALLENGES_IN_DESIGNING_CONCRETE_DURABILITY_A_SUSTAINABLE_APPROACH)
- [O25] BENSCHEID, N., W. von BERG, J. FEUERBORN, et al. Příručka Popílek do betonu: Základy výroby a použití. 2. přepracované vydání. ČEZ Energetické produkty, 2013. ISBN 978-80-260-4226-6.
- [O26] Bc. Tomáš Ťažký *Možnosti využívání druhotných surovin jako plniv do betonů*. Brno, 2006. 144s., 20 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Rudolf Hela
- [O27] ING. KARBANOVÁ, Blanka a Pavla ING. BŘEZNIČKÁ. Vybrané problémy z realizace mostních staveb a jejich řešení, část III. [online]. 2008 [cit. 2019-12-16]. Dostupné z: [mosty.cz/index.asp?module=ActiveWeb&page=WebPage&DocumentID=2511###javascript](http://mosty.cz/index.asp?module=ActiveWeb&page=WebPage&DocumentID=2511###javascript)
- [O28] BOŁTRYK, Michal a Edyta PAWLUCZUK. PROPERTIES OF RECYCLED AGGREGATE CONCRETES MODIFIED BY ASPHALT PASTE [online]. January 2010 [cit. 2019-12-16]. Dostupné z: [researchgate.net/publication/289732650\\_Properties\\_of\\_recycled\\_aggregate\\_concretes\\_modified\\_by\\_asphalt\\_paste](https://www.researchgate.net/publication/289732650_Properties_of_recycled_aggregate_concretes_modified_by_asphalt_paste)
- [O29] WÓJCIK, Marta, Feliks STACHOWICZ a Adam MASŁOŃ. MOŻLIWOŚĆ WYKORZYSTANIA POPIOŁÓW LOTNYCH W CELU POPRAWY ODWADNIANIA OSADÓW ŚCIEKOWYCH. CZASOPISMO INŻYNIERII ŁĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE [online]. styczeń-marzec 2017, , 377-393 [cit. 2019-12-16]. DOI: 10.7862/rb.2017.35. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/318969094\\_Mozliwosc\\_wykorzystania\\_popiolow\\_lotnych\\_w\\_celu\\_poprawy\\_odwadniania\\_osadow\\_sciekowych](https://www.researchgate.net/publication/318969094_Mozliwosc_wykorzystania_popiolow_lotnych_w_celu_poprawy_odwadniania_osadow_sciekowych)
- [O30] APONTE, Diego Fernando, Marilda BARRA a Enric VÀZQUEZ. Durability and cementing efficiency of fly ash in concretes. Construction and Building Materials [online]. 2012, (30), 537 - 546 [cit. 2019-12-16]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.026>.
- [O31] DELLINGHAUSEN, L. M., A. L. G. GASTALDINI, F. J. VANZIN a K. K. VEIGA. Total shrinkage, oxygen permeability, and chloride ion penetration in concrete made with white Portland cement and blast-furnace slag. Construction and Building Materials [online]. 2012, (37), 652–659 [cit. 2019-12-16]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.076>.
- [O32] THONGSANITGARN, P., W. WONGKEO, S. SINTHUPINYO a A. CHAIPANICH. Effect of Limestone Powders on Compressive Strength and Setting Time of Portland-Limestone



Cement Pastes. *Advanced Materials Research* [online]. (343-344), 322-326 [cit. 2019-12-16]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.343-344.322. ISSN 1662-8985. Dostupné z: <https://www-scientific-net.ezproxy.lib.vutbr.cz/AMR.343-344.322.pdf>

[O33] MOHAMMED, Mahmoud Khashaa, Andrew Robert DAWSON a Nicholas Howard THOM. Production, microstructure and hydration of sustainable self-compacting concrete with different types of filler. *Construction and Building Materials* [online]. 2013, (49), 84-92 [cit. 2019-12-17]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.107>.

[O34] F-Cal Semi-Adiabatic Calorimeter [online]. [cit. 2019-12-21]. Dostupné z: <https://www.calmetrix.com/f-cal-8000>

[O35] Bc. Tomáš Peřina Vliv kolísání složení cementů na vznik bleedingu a zpracovatelnosti malt v čase. Brno, 2018. 109 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

## 8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

AdMaS	Advanced Materials, Structures and Technologies (Pokročilé stavební materiály, konstrukce a technologie)
VUT	Vysoké učení technické v Brně
THD	Ústav technologie stavebních hmot a dílů
CO <sub>2</sub>	Oxid uhličitý
C <sub>3</sub> S	Trikalcium silikát
H <sub>2</sub> O	Voda
C <sub>3</sub> S <sub>2</sub> H <sub>3</sub>	Trikalcium disilikát trihydrogen
Ca(OH) <sub>2</sub>	Hydroxid vápenatý, portlandit
C <sub>2</sub> S	Dikalcium silikát
C <sub>3</sub> A	Trikalcium aluminát
C <sub>4</sub> AH <sub>13</sub>	Tetralcium aluminát triskaidekahydrogen
C <sub>3</sub> AH <sub>6</sub>	Trikalcium aluminát hexahydrogen
C <sub>4</sub> AF	Tetra aluminát ferit
CaSO <sub>4</sub> ·2 H <sub>2</sub> O	Sádrovec
C <sub>3</sub> A·3CaSO <sub>4</sub> ·32H <sub>2</sub> O	Ettringit
CSH	Kalcium silikát hydrogen
VJMGS	Vysokopecní jemně mletá granulovaná struska
SEM	Skenovací (rastrovací) elektronový mikroskop

## 9 SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK, GRAFŮ A PŘÍLOH

### 9.1 Seznam obrázků

Obr. 1: Schématické znázornění segregace betonu [O15] .....	15
Obr. 2: Dělicí rovina mezi jednotlivými vrstvami betonu [O15].....	16
Obr. 3: Schématické znázornění hydratovaného zrna cementu [O7].....	18
Obr. 4: Rozdělení objemových změn dle časového hlediska [O2].....	19
Obr. 5: Objemové složky autogenního smrštění [O1].....	20
Obr. 6: Princip plastického smršťování a plastického sedání [O16].....	21
Obr. 7: Závislost smrštění na relativní vlhkosti okolního prostředí [O5] .....	22
Obr. 8: Vliv sušení a karbonatace na smršťování cementové malty [O15] .....	23
Obr. 9: Vliv okolní teploty na velikost a rychlost smrštění cementové pasty [O3] .....	24
Obr. 10: Vliv okolních podmínek na rychlost odpařování vody z betonu [O11] .....	25
Obr. 11: Kaverna vzniklá nedokonalým ztuhnutím betonové směsi [O27].....	26
Obr. 12: Schéma pórové struktury betonového kompozitu [O28] .....	27
Obr. 13: Vliv obsahu vzduchu na pevnost betonu v tlaku [O22] .....	28
Obr. 14: Princip zvyšování hutnosti cementové matrice [O24] .....	29
Obr. 15: Vliv obsahu vysokoteplotního popílku na porozitu betonu v časovém horizontu [O20].....	29
Obr. 16: Vliv vysokoteplotního popílku na koeficient odporu vůči průniku chloridových iontů [O30] .....	30
Obr. 17: Množství odloučené vody z cementové pasty v závislosti na vodním součiniteli [O9].....	32
Obr. 18: Vliv hodnoty vodního součinitele na velikost smrštění [O6] .....	33
Obr. 19: Znázornění kapilárních pórů ve ztvrdlém betonu a stupňů hydratace vysokoteplotního popílku [O33] .....	33
Obr. 20: Odloučené množství vody po 90 minutách dle hodnoty vodního součinitele a typu superplastifikační přísady [O8] .....	36
Obr. 21: Závislost odloučené vody na specifickém povrchu cementu [O8].....	36
Obr. 22: Vývoj hydratačního tepla v závislosti na typu cementu [O19] .....	38
Obr. 23: Vliv jemnosti mletí cementu na objemové změny [O12] .....	38
Obr. 24: Vliv druhu kameniva na velikost smrštění betonu [O10] .....	41
Obr. 25: Snímek ze SEM vysokoteplotního popílku Dětmárovice s dvoutisícovým přiblížením .....	43
Obr. 26: Míra rozlití betonové směsi v závislosti na množství obsaženého cementu a popílku [O25].....	44
Obr. 27: Vliv vysokoteplotního popílku na vývoj hydratačního tepla [O21] .....	45
Obr. 28: Vliv vysokoteplotního popílku na objemové změny [O20].....	46
Obr. 29: Porovnání mikrostruktury betonu se 40% náhradou cementu vysokoteplotním popílkem po 28 a 180 dnech zrání [O20].....	47
Obr. 30: Přiblížené zrno fluidního popílku za pomoci SEM [O29].....	48
Obr. 31: Vliv VJMGS na vývin hydratačního tepla cementových past [O23].....	49
Obr. 32: Vliv množství VJMGS na objemové změny betonu [O18].....	50
Obr. 33: Vliv množství VJMGS na objemové změny betonu [O31].....	50
Obr. 34: Znázornění mikrostruktury betonu a) C100_S0 po 3 dnech zrání, b) C60_S40 po 3 dnech zrání, c) C100_S0 po 28 dnech zrání, d) C60_S40 po 28 dnech zrání [O23].....	52

Obr. 35: Vliv náhrady cementu a velikost částic mikromletého vápence na tepelný tok [O14].....	53
Obr. 36: Vliv měrného povrchu mikromletého vápence na smrštění betonové směsi [O17].....	54
Obr. 37: Vliv přídatku mikromletého vápence na stupeň hydratace [O13] .....	54
Obr. 38: Vliv velikosti částic a množství mikromletého vápence na mechanické parametry [O32].....	55
Obr. 39: Vliv 50% nahrazení DTK 0 – 4 mm kamennou prosívkou na mechanické parametry ztvrdlého betonu [O26].....	57
Obr. 40: Průběh objemových změn u porovnávaných betonových receptur [O26] .....	58
Obr. 41: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti dle ČSN EN 1097-6 [N7] .	62
Obr. 42, 43: Snímek ze SEM vysokoteplotního popílku Dětmárovice (vlevo) a VJMGS Dětmárovice (vpravo).....	63
Obr. 44, 45, 46: Snímek ze SEM mikromletého vápence 7 (vlevo), kamenného filleru z lokality Bílý Kámen (uprostřed) a kamenného filleru z lokality Zárubka (vpravo) .....	64
Obr. 47: Křivky zrnitosti a rozložení velikosti zrn použitých příměsí.....	64
Obr. 48, 49: Optimální poměr mísení vysokoteplotního popílku s mikromletým vápencem 7 a 9 .....	65
Obr. 50, 51: Optimální poměr mísení vysokoteplotního popílku s kamennými fillery ...	66
Obr. 52, 53: Optimální poměr mísení VJMGS s mikromletými vápenci 7 a 9 .....	66
Obr. 54, 55: Optimální poměr mísení VJMGS s kamennými fillery .....	66
Obr. 56: Schématické znázornění tlakové nádoby na měření odlučivosti vody z betonu [O35].....	78
Obr. 57, 58: Betonová směs v tlakové nádobě před zkouškou (vlevo) a po 60 minutách působení tlaku 300 kPa (vpravo).....	78
Obr. 59: Hloubka průsaku dle TKP ŘVC ČR [N13] na zkušební tělese ve stáří 7 dní	81
Obr. 60: Zkušební formy z nerezové oceli pro stanovení objemových změn betonu ...	88
Obr. 61: Zvýrazněné vzduchové póry ve struktuře ztvrdlého betonu .....	95
Obr. 62, 63: Stanovení konzistence betonu metodou sednutí kužele dle ČSN EN 12350 – 2 [N4] v čase 5 (vlevo) a 30 minut (vpravo) od zamíchání .....	104
Obr. 64, 65: Stanovení konzistence betonu metodou sednutí kužele dle ČSN EN 12350 – 2 [N4] v čase 60 (vlevo) a 90 minut (vpravo) od zamíchání .....	104
Obr. 66, 67: Zkušební zařízení Schleibinger Geräte určené ke stanovení objemových změn betonu [O4] .....	105
Obr. 68, 69: Střásací stolek pro určení konzistence cementové malty dle ČSN EN 1015 – 3 [N21] a zkušební zařízení Calmetrix f-cal 8000 určené pro měření vývoje hydratačních teplot [O34].....	105

## 9.2 Seznam tabulek

Tab. 1: Složení porovnávaných cementových past .....	31
Tab. 2: Složení porovnávaných betonových směsí .....	32
Tab. 3: Značení cementu dle složení [O11].....	34
Tab. 4: Požadavky na mechanické a fyzikální vlastnosti cementu [O11].....	35
Tab. 5: Složení porovnávaných cementových past .....	35
Tab. 6: Základní mechanické a fyzikální parametry CEM I 42,5 R .....	61

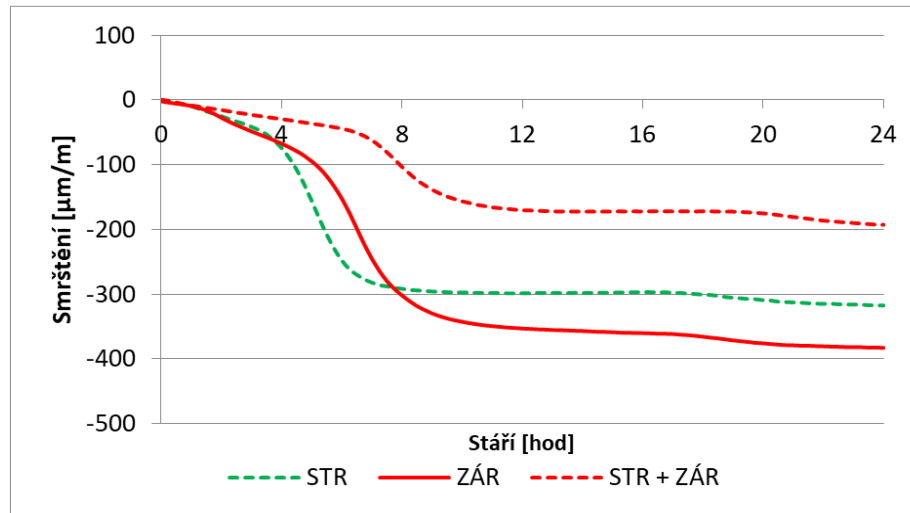
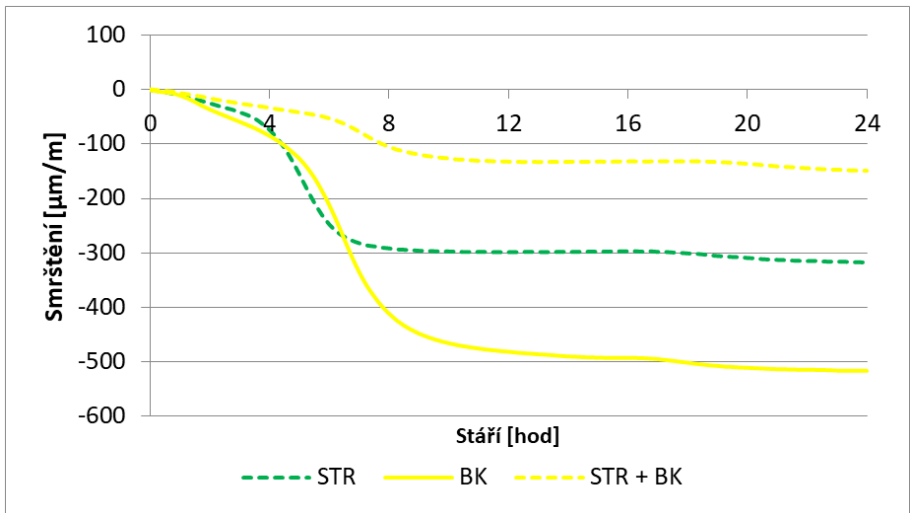
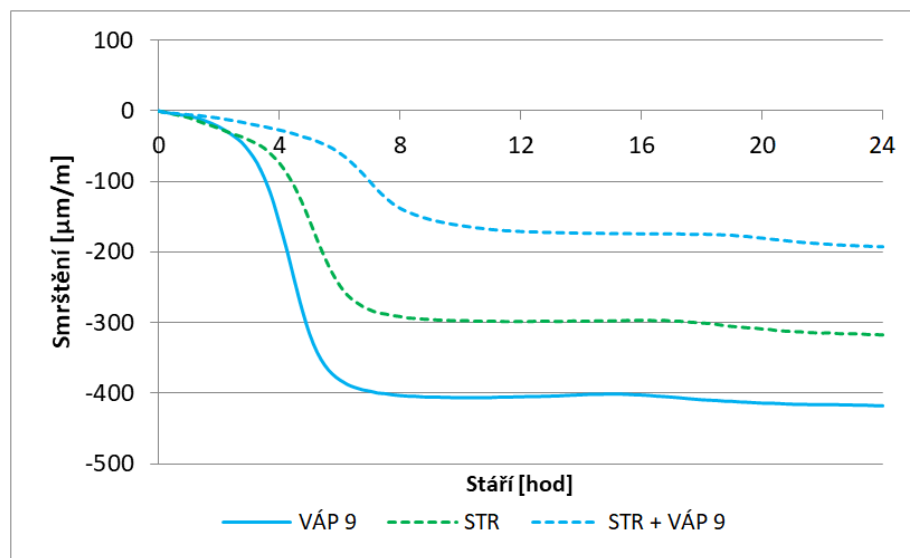
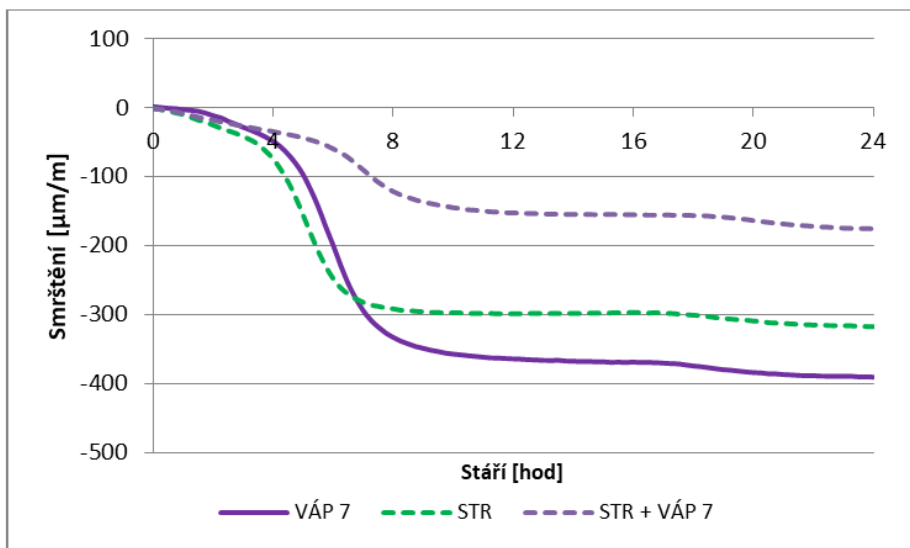
Tab. 7: Základní informace o použitém kamenivu .....	61
Tab. 8: Stanovené parametry použitých příměsí .....	64
Tab. 9.: Poměr mísení kombinace příměsí pro dosažení minimální mezerovitosti směsi .....	65
Tab. 10.: Složení cementových malt pro měření vývoje hydratačních teplot .....	67
Tab. 11: Maximální vyvinuté hydratační teploty a čas potřebný pro jejich dosažení ....	68
Tab. 12: Složení jednotlivých receptur betonových směsí .....	74
Tab. 13: Hodnota sednutí kužele při zkoušce konzistence betonu v čase, objemová hmotnost čerstvého betonu .....	75
Tab. 14: Maximální množství odloučené vody z betonové směsi pro jednotlivé třídy ..	77
Tab. 15: Množství odloučené vody z jednotlivých betonových směsí .....	79
Tab. 16: Výsledky stanovení fyzikálně mechanických parametrů jednotlivých receptur ..	82
Tab. 17: Velikost smrštění jednotlivých receptur v časovém horizontu .....	89
Tab. 18: Stanovení vlivu kombinace příměsí na objemové změny v čase .....	90
Tab. 19: Ekonomické zhodnocení jednotlivých receptur .....	99

### 9.3 Seznam grafů

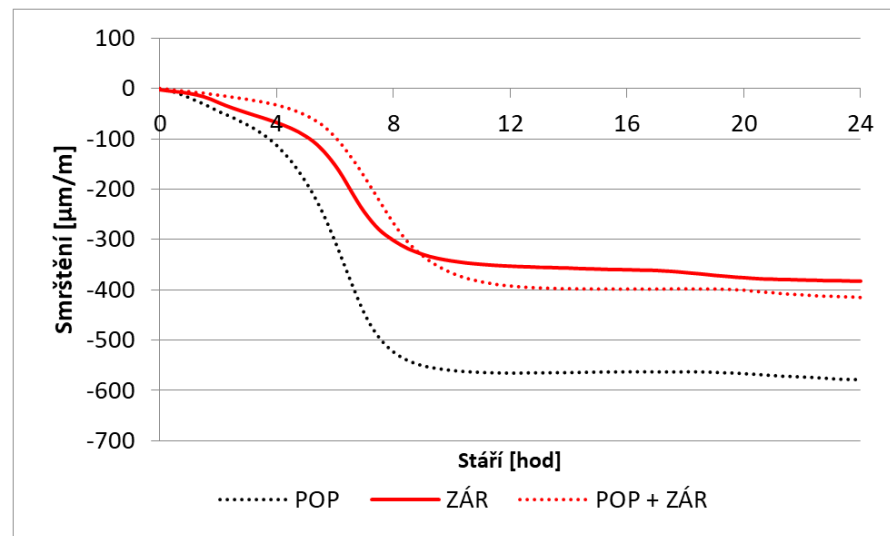
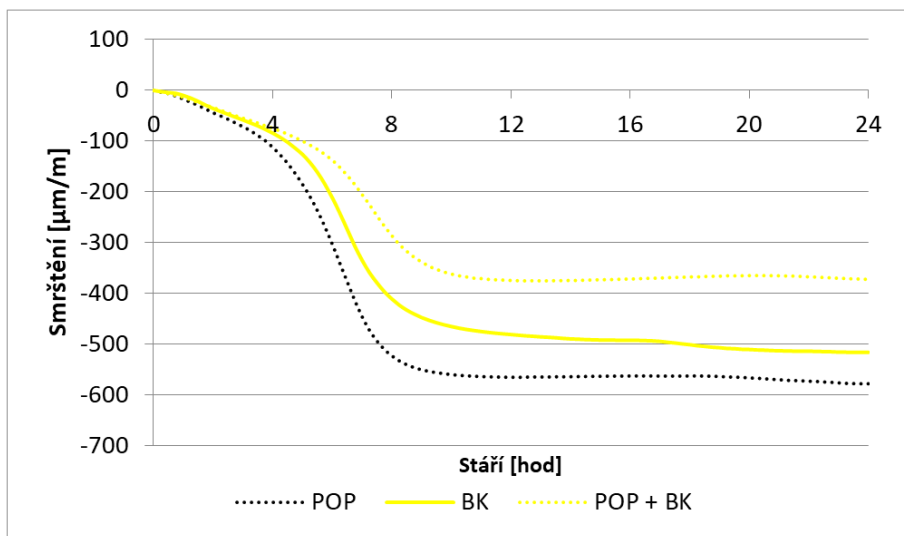
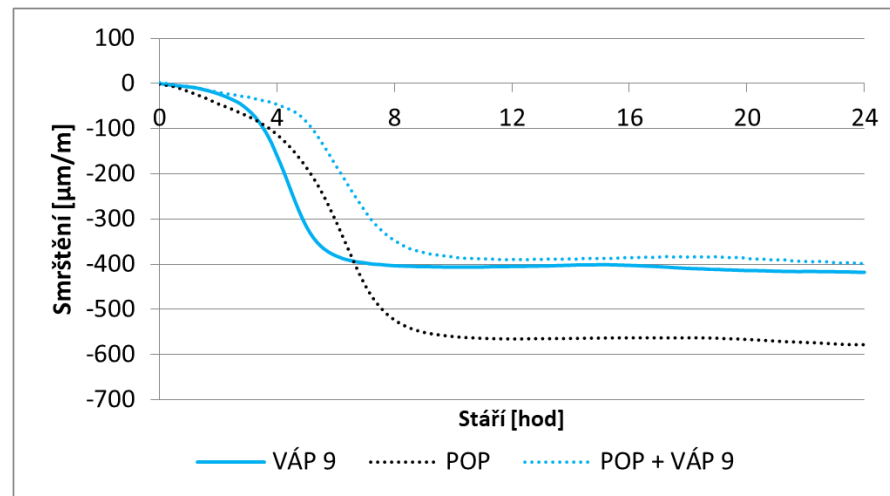
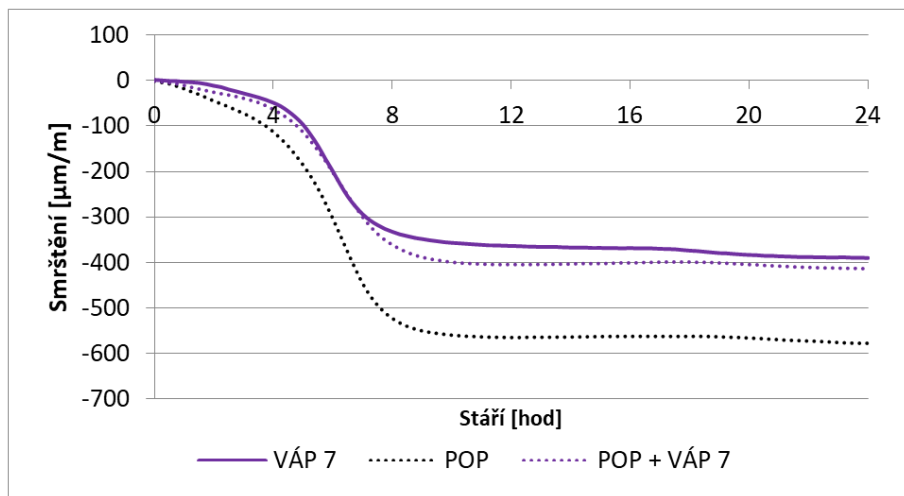
Graf 1: Křivky zrnitosti dílčích kameniv .....	62
Graf 2: Vývoj hydratačních teplot cementových malt s jednou příměsí .....	69
Graf 3: Vývoj hydratačních teplot u cementových malt v kombinaci VJMGS a inertních příměsí .....	69
Graf 4: Vývoj hydratačních teplot u cementových malt v kombinaci vysokoteplotního popílku a inertních příměsí .....	70
Graf 5: Výsledná křivka zrnitosti směsi kameniva .....	73
Graf 6: Výsledné hodnoty zkoušky konzistence metodou sednutí kužele [N4] v čase 5, 30, 60 a 90 minut od zamíchání .....	76
Graf 7: Množství odloučené vody z betonové směsi u jednotlivých receptur .....	79
Graf 8: Pevnost betonu v tlaku jednotlivých receptur ve stáří 7, 28 a 90 dní dle ČSN EN 12390 – 3 [N12] .....	83
Graf 9: Hloubka průsaku tlakovou vodou jednotlivých receptur ve stáří 7, 28 a 90 dní dle TKP ŘVC ČR se stupněm vodotěsnosti HV8 [N13] .....	83
Graf 10: Nasákavost betonu jednotlivých receptur ve stáří 7, 28, 90 a 180 dní dle ČSN 731316 [N14] .....	84
Graf 11: Průběh objemových změn jednotlivých receptur do stáří 24 hodin .....	91
Graf 12: Průběh objemových změn jednotlivých receptur do stáří 60 dnů .....	92
Graf 13: Celkový obsah vzduchu v jednotlivých recepturách .....	96
Graf 14: Celkové množství mikroskopického vzduchu v jednotlivých recepturách .....	96

## 9.4 Seznam příloh

Příloha 1: Porovnání objemových změn betonových směsí v kombinaci VJMGS a inertních příměsí do stáří 24 hodin.....	119
Příloha 2: Porovnání objemových změn betonových směsí v kombinaci vysokoteplotního popílku a inertních příměsí do stáří 24 hodin.....	120
Příloha 3: Průběh objemových změn jednotlivých receptur do stáří 28 dnů.....	121
Příloha 4: Porovnání objemových změn betonových směsí v kombinaci VJMGS a inertních příměsí do stáří 60 dnů .....	122
Příloha 5: Porovnání objemových změn betonových směsí v kombinaci vysokoteplotního popílku a inertních příměsí do stáří 60 dnů.....	123
Příloha 6: Technický list cementu CEM I 42,5 R Mokrý .....	124
Příloha 7: Technické údaje o superplastifikační přísadě Mapei Dynamon SX 14 .....	125

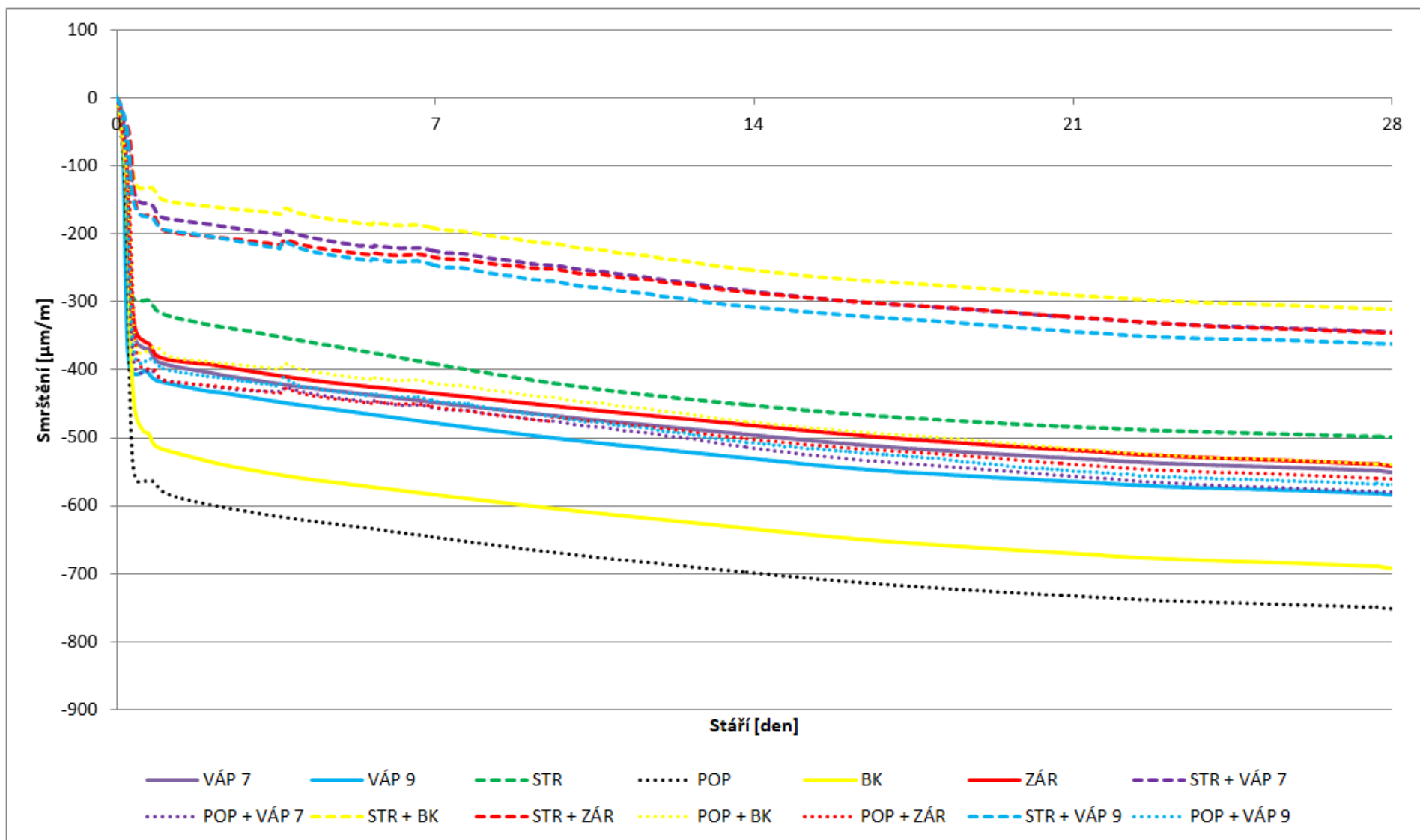


Příloha 1: Porovnání objemových změn betonových směsí v kombinaci VJMGS a inertních příměsí do stáří 24 hodin

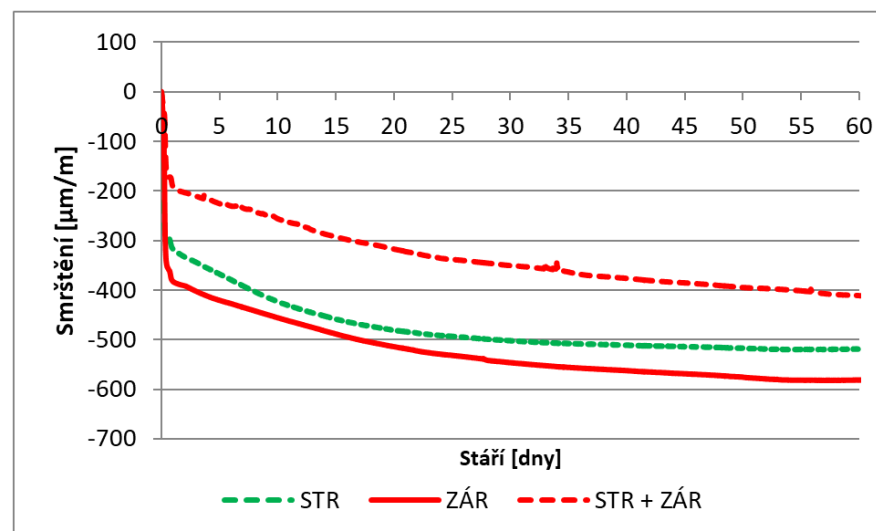
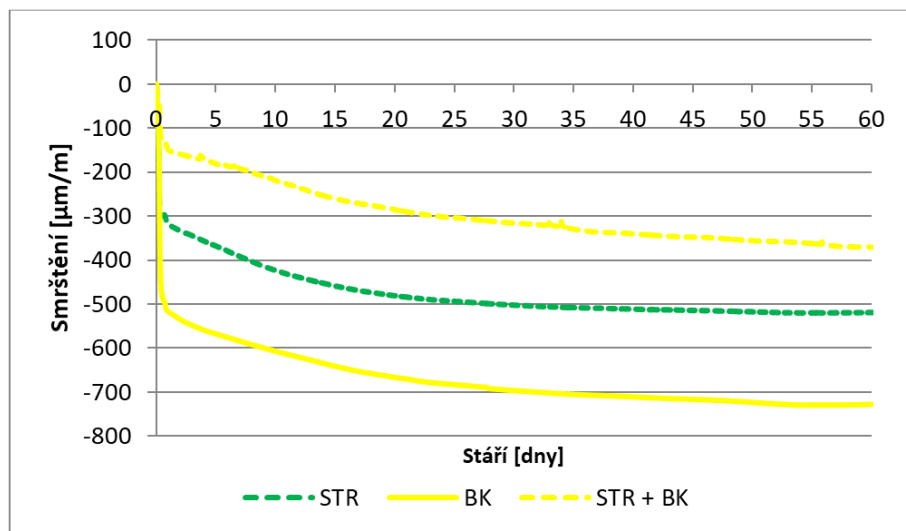
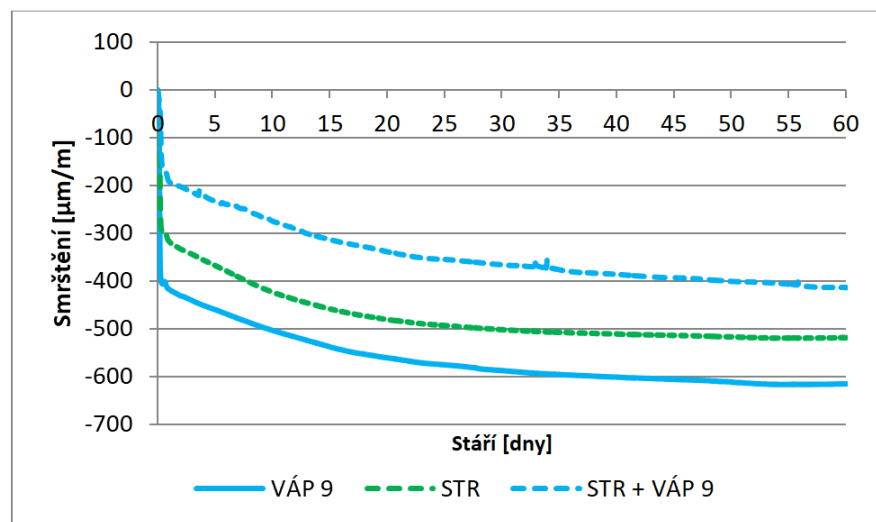
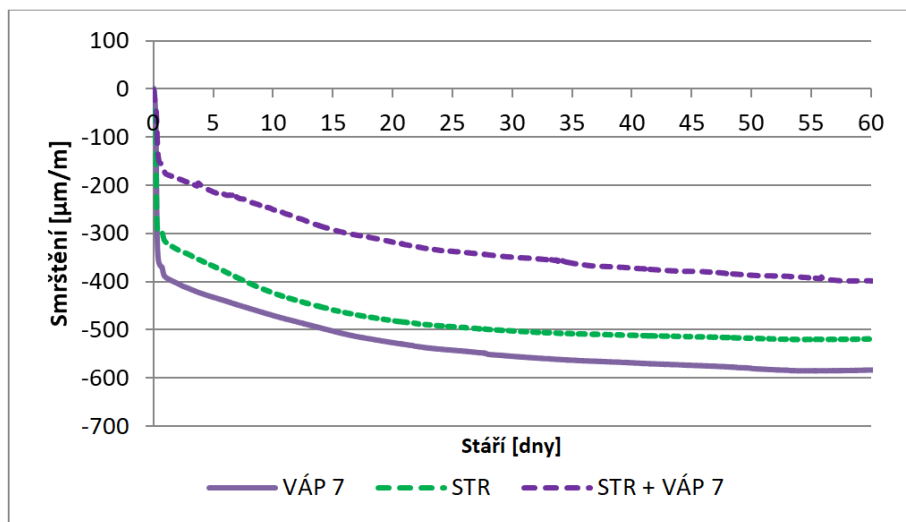


Příloha 2: Porovnání objemových změn betonových směsí v kombinaci vysokoteplotního popílku a inertních příměsí do stáří 24 hodin

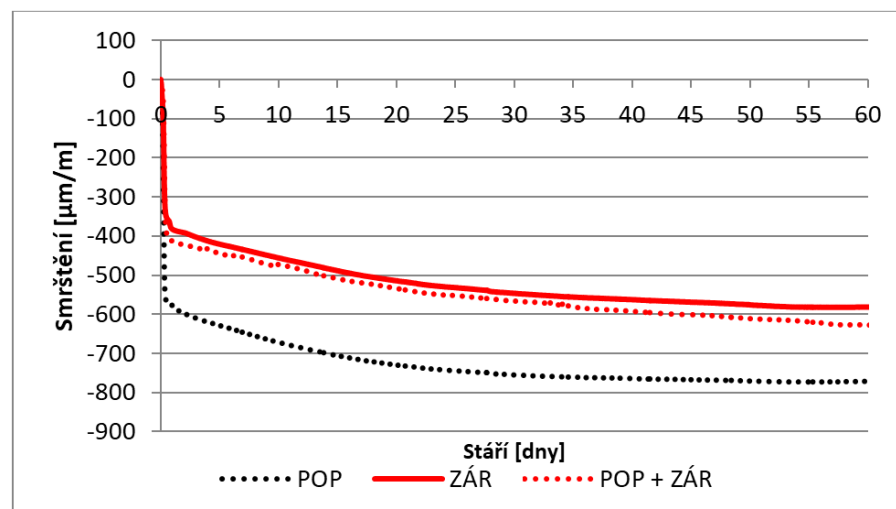
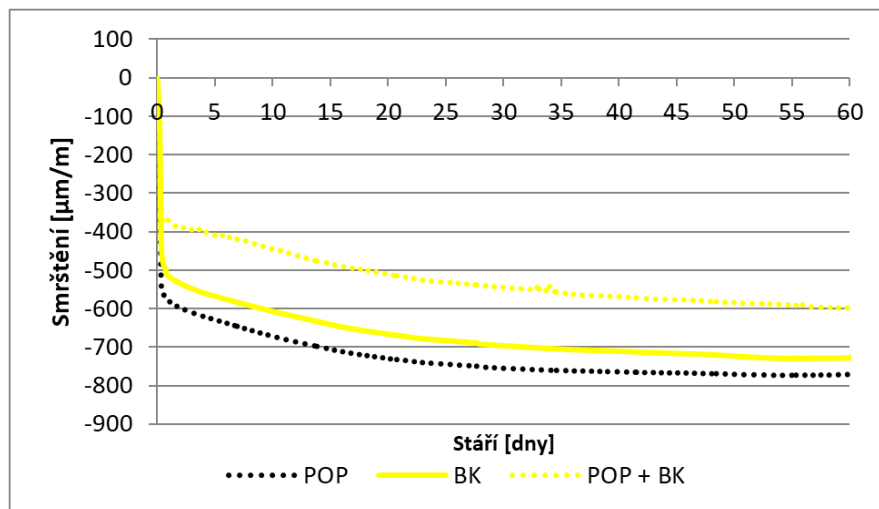
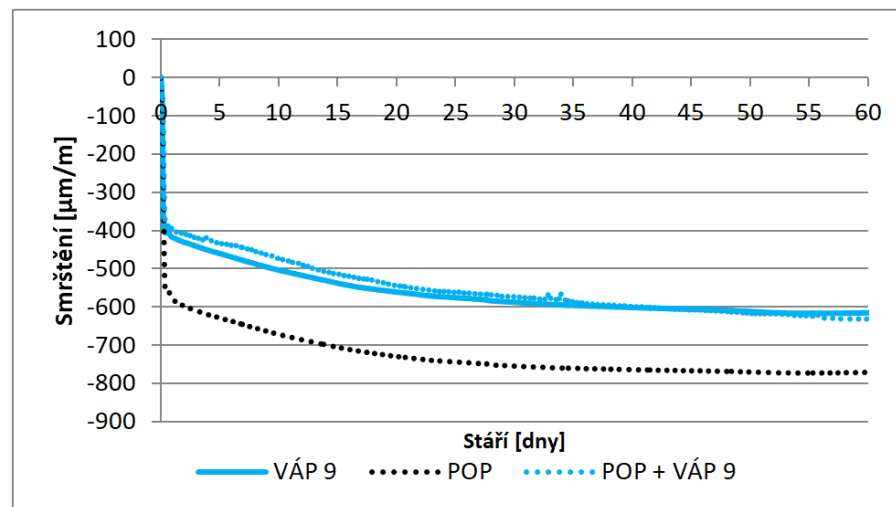
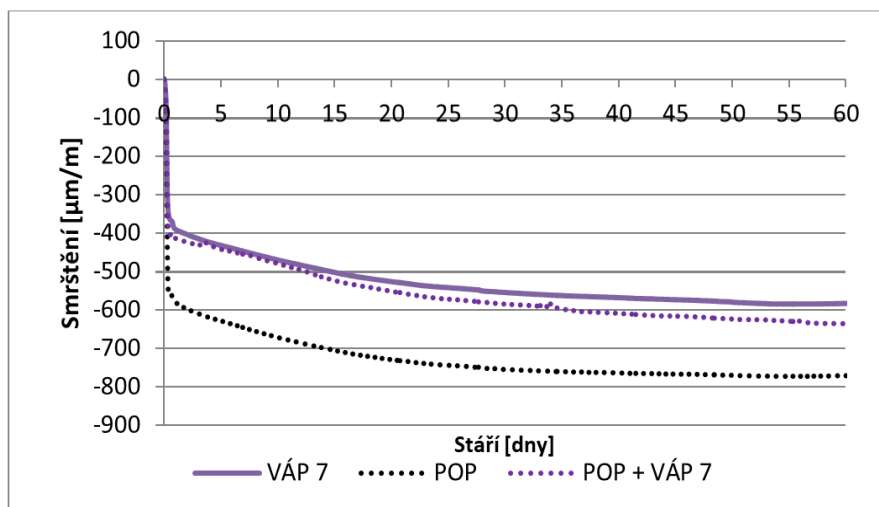




Příloha 3: Průběh objemových změn jednotlivých receptur do stáří 28 dnů



Příloha 4: Porovnání objemových změn betonových směsí v kombinaci VJMGS a inertních příměsí do stáří 60 dnů



Příloha 5: Porovnání objemových změn betonových směsí v kombinaci vysokoteplotního popílku a inertních příměsí do stáří 60 dnů

# CEM I 42,5 R

## Portlandský cement

EN 197-1

Výrobce: Českomoravský cement, a.s. – Závod Mokrá

**Technický list**  
březen 2019

Fyzikální a mechanické vlastnosti			Chemické vlastnosti			
Parametr	Průměrná hodnota	Metoda / poznámka	Parametr	Průměrná hodnota	Metoda / poznámka	
Pevnost v tlaku [MPa]	1 den	14	EN 196-1	CaO	63,7	EN 196-2
	2 dny	30	EN 196-1	SiO <sub>2</sub>	19,6	EN 196-2
	7 dní	53	EN 196-1	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,8	EN 196-2
	28 dní	60	EN 196-1	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,3	EN 196-2
	56 dní	66	EN 196-1	MgO	1,4	EN 196-2
	90 dní	67	EN 196-1	SO <sub>3</sub>	3,1	EN 196-2
Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	1 den	4	EN 196-1	Cl <sup>-</sup>	0,040	EN 196-2
	2 dny	6	EN 196-1	K <sub>2</sub> O	0,75	EN 196-2
	7 dní	8	EN 196-1	Na <sub>2</sub> O	0,19	EN 196-2
	28 dní	9	EN 196-1	Na <sub>2</sub> O ekvivalent [%]	0,69	EN 196-2
	56 dní	9	EN 196-1	Ner rozpustný zbytek [%]	0,7	EN 196-2
	90 dní	9	EN 196-1	Ztráta žíháním [%]	3,4	EN 196-2
Normální konzistence [%]	27,4	EN 196-3	V případě, že cement obsahuje (ve smyslu Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) 1907/2006 přílohy XVII, čl. 47) redukční činidlo, které po smíchání s vodou snižuje obsah Cr <sup>6+</sup> v cementu pod hodnotu 0,0002 %, je toto činidlo účinné nejméně po dobu skladování cementu, po kterou musí být cement chráněn před působením vody a vysoké relativní vlhkosti vzduchu (nejvýše 75 %). Doba skladování cementu je 90 dnů od data uvedeného na obalu (balený cement) nebo od data expedice (volně ložený cement).			
Počátek tuhnutí [min]	183	EN 196-3				
Konec tuhnutí [min]	242	EN 196-3				
Objemová stálost [mm]	0,9	EN 196-3, Le Chatelier				
Měrný povrch [m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> ]	408	EN 196-8, Blaine				
Měrná hmotnost [kg m <sup>-3</sup> ]	3110	EN 196-8				
Sypná hmotnost [kg m <sup>-3</sup> ] - v autocisterně	980	Přibližná hodnota při uložení cementu do cisterny.				
Sypná hmotnost [kg m <sup>-3</sup> ] - v síle	1200–1800	Odhad při uskladnění v síle. Mění se v závislosti na míře setřesení cementu, době uskladnění nebo velikosti a zaplnění síla.				
Hydratační teplo [J g <sup>-1</sup> ]	7 dní	310				EN 196-8

Použití cementu dle stupňů vlivu prostředí podle ČSN P 73 2404																	
Bez rizika	Koroze způsobená karbonatací				Působení chloridů (ne z mořské vody)			Střídavé působení mrazu a rozmrazování				Chemicky agresivní prostředí			Obrus		
X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3	XM1	XM2	XM3
✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓ <sup>a)</sup>	✓ <sup>a)</sup>	✓	✓	✓

a) Při chemické síranové agresivitě se stupněm vlivu prostředí vyšším než XA1 - koncentrace síranových iontů SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> vyšší než 600 mg/litr v podzemní vodě nebo 3000 mg/kg (v případě kapilárního sání 2000 mg/kg) v rostlé zemině - se musí použít síranovzdorný cement SR. Při obsahu SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> - do 1500 mg/litr je možné použít CEM I s dostatečnou dávkou puolanové příměsi (například alespoň 20 % popílku).

Hodnoty uvedené v technickém listu mají čistě informační charakter a mohou se lišit od hodnot konkrétních vzorků. Před jejich porovnáním s vlastnostmi jiných výrobků se prosím ujistěte, že všechna porovnávaná data byla získána pomocí totožných zkušebních postupů. V případě pochybností nás neváhejte kontaktovat.

Českomoravský cement, a.s.  
Technická podpora prodeje  
technicka.podpora@cmcem.cz  
+420 544 122 544

[www.cmcem.cz](http://www.cmcem.cz)

**ČESKOMORAVSKÝ  
CEMENT**  
HEIDELBERGCEMENT Group

Příloha 7: Technické údaje o superplastifikační přísadě Mapei Dynamon SX 14

<b>TECHNICKÉ ÚDAJE</b>			
<b>IDENTIFIKAČNÍ ÚDAJE O VÝROBKU</b>			
Konzistence	tekutá		
Barva	jantarová		
Objemová hmotnost	1060 ± 20 kg/m <sup>3</sup> při + 20°C		
Obsah sušiny	21 ± 1,1%		
Hlavní účinek	zvýšení a zachování zpracovatelnosti redukce obsahu vody		
Vedlejší účinek	zlepšení čerpatelnosti		
Klasifikace	vysoce účinný superplastifikátor dle UNI EN 934-2		
Obsah chloridů	nejsou obsaženy		
Skladovatelnost	12 měsíců v původních uzavřených obalech. Chránit před mrazem!		
Klasifikace třídy nebezpečnosti dle směrnice 99/45 CE	žádná		
Hořlavost	nehořlavý		
Celní zařazení	3824 40 00		
<b>VLIV DYNAMONU SX 14 NA BETONOVOU SMĚS*</b>			
Dávkování přísady v % z dávky cementu	0	0,7	1
vodní součinitel	0,6	0,5	0,44
Redukce vody [%]	-	17	27
Počáteční sednutí [mm]	200	220	220
Sednutí po 30 min. [mm]	140	220	220
Sednutí po 1 hod. [mm]	60	200	200
Rcm po 1 dni při +20°C [MPa]	8	15	17
Rcm po 3 dnech při +20°C [MPa]	16	28	34
Rcm po 7 dnech při +20°C [MPa]	24	40	47
Rcm po 28 dnech při +20°C [MPa]	35	50	60
Rck [MPa]	30	45	55
Hloubka penetrace vodou [mm] dle EN 12390/8	25	11	3
Odolnost dle EN 206-1	X0	X0, XC1, XC2, XC3, XA1, XF1, XD1, XD2	X0, XC1, XC2, XC3, XC4, XS1, XD1, XD2, XA1, XA2

\*Tyto údaje jsou míněny jako příklady průměrných hodnot získaných u betonových směsí s 300 kg/m<sup>3</sup> cementu CEM II/A-L 42, 5R s těžkým kamenivem (maximální průměr 20 mm). Pro třídy odolnosti XF1, XF2, XF3, XF4 musí být beton provzdušněn formou mikropórů v objemu 5%