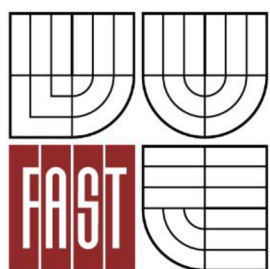




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A
DÍLCŮ

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

BETONY S VYSOKÝM OBSAHEM
ELEKTRÁRENSKÝCH POPÍLKŮ
HIGH VOLUME FLY ASH CONCRETE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAKUB KUČERA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. RUDOLF HELA, CSc.

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ

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

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student Jakub Kučera

Název Betony s vysokým obsahem elektrárenských popílků

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

Datum zadání bakalářské práce 30. 11. 2012

Datum odevzdání bakalářské práce 24. 5. 2013

V Brně dne 30. 11. 2012

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

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

Podklady a literatura

- tuzemské a zahraniční odborné časopisy
- sborníky z tuzemských a zahraničních odborných konferencí
- internetové stránky, např. <https://webofknowledge.com> nebo <http://wokinfor.com>

Zásady pro vypracování

V současné době se stále více začínají používat konstrukční betony s aktivní příměsí popílků z vysokoteplotního spalování. Běžný objem popílků činí kolem 20% z dávky cementů a slouží takto jako částečná náhrada cementů a tím se výrazně snižuje cena betonů a řeší i ekologické problémy s ukládáním popílků na skládky a snižování spotřeby cementů a tím i redukce CO₂.

Cílem Vaší práce bude zpracovat obsáhlé rešerše z tuzemské a hlavně zahraniční odborné literatury, která se zabývá použitím elektrérenských popílků v betonech s hlavním cílem prostudovat možnosti náhrad cementu 40 až 70% popílků pro tzv. High volume fly ash concrete. Zpracovat přehled dopadů na vývoj pevností, trvanlivosti betonů v různých prostředích (XF, XA), redukce vývoje hydratačních tepel atd. Ověřit i možnosti využití fluidních popílků.

V praktické části pak navrhnout 3 třídy betonů C16/20, C25/30 a C30/37 s vysokým obsahem el. popílků pro konzistenci S4. Z receptur vyrobit zkušební tělesa, na kterých si ověřit:

- pevnosti betonu v tlaku ve stáří 7, 28 a 90 dní
- mrazuvzdornost na 100 cyklů
- vodotěsnost betonů

Rozsah práce je minimálně 40 stran.

Předepsané přílohy

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

Abstrakt

Bakalářská práce sestává ze dvou částí. Cílem teoretické části je prozkoumat možnosti využití a vlastnosti betonu s vysokým obsahem elektrérenských popílků s náhradou cementu 40 až 70 %. Zpracovat přehled dopadů na vývoj pevností, trvanlivosti betonu v různých prostředích, redukce vývoje hydratačních tepel atd. Cílem praktické části je porovnat vlastnosti betonů různých tříd a s různým množstvím popílku.

Klíčová slova

vysoký obsah, popílek, beton, trvanlivost, pevnost, hydratační teplo

Abstract

Bachelor thesis consist of two parts. The aim of teoretical part is to explore possibilities of usage and properties of high volume fly ash concrete with 40 – 70 % cement replacement. To make an overview of development of strength, durability in various environments, reduction of heat evolution etc. The aim of the experimental part is to compare properties of various class concretes with various amount of fly ash.

Keywords

high volume, fly ash, concrete, durability, strength, heat evolution

Bibliografická citace VŠKP

KUČERA, Jakub. *Betony s vysokým obsahem elektrárenských popílků*. Brno, 2013. 55 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

Prohlášení:

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

V Brně dne 23. 5. 2013

.....
Jakub Kučera

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Rudolfu Helovi, CSc. a kolektivu v okruhu betonářských laboratoří na ústavu THD FAST VUT v Brně za odborné vedení a rady při zpracování mé bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval své rodině za veškerou podporu při plnění mého studia.

V Brně 2013

Jakub Kučera

Obsah

1 Úvod	10
2 Teoretická část	11
2.1 Cíl teoretické části	11
2.2 Základní informace	12
2.3 Popílky a jejich rozdělení	13
2.4 Popílek jako příměs	15
2.5 Beton s vysokým obsahem elektrárenských popílků (HVFAC)	16
2.6 Ošetřování	17
2.7 Pevnost betonu	18
2.7.1 Pevnost v tlaku	18
2.7.2 Pevnost v tahu	20
2.8 Modul pružnosti	22
2.9 Dotvarování	22
2.10 Odolnost proti škodlivým účinkům mrazu a chemických rozmrazovacích látek	23
2.11 Odolnost proti síranům	25
2.12 Hydratační teplo	28
2.13 Karbonatace	29
2.13.1 Faktory ovlivňující míru karbonatace	30
2.13.2 Podněty podporující karbonataci a vyvolání koroze betonářské oceli	31
2.14 Propustnost	32
2.15 Difúzní odpor popílkového betonu proti pronikání chloridů	34
2.16 Využití fluidních popílků pro výrobu betonu	35
3 Praktická část	37
3.1 Cíl praktické části	37
3.2 Metodika práce	38

3.3 Provedené zkoušky	39
3.3.1 Zkoušení vlastností v čerstvém stavu.....	39
3.3.2 Zkoušení vlastností v ztvrdlém stavu.....	39
3.4 Výsledky zkoušek	40
3.4.1 Receptura C16/20 FA50.....	40
3.4.2 Receptura C16/20 FA60.....	41
3.4.3 Porovnání vlastností receptur C16/20	42
3.4.4 Receptura C25/30 FA50.....	42
3.4.5 Receptura C25/30 FA56.....	43
3.4.6 Porovnání vlastností receptur C25/30	44
3.4.7 Receptura C30/37 FA42.....	45
3.4.8 Receptura C30/37 FA54.....	46
3.4.9 Porovnání vlastností receptur C30/37	47
4 Závěr.....	48
5 Seznam použitých zdrojů	50
6 Seznam použitých zkratk a symbolů	55

1 Úvod

Kvůli vysoké ceně cementu, jeho složité, nákladné a hlavně neekologické výrobě je důležité najít nějakou náhradu při výrobě betonu. V dnešní době je již zcela běžné, že se do betonu přidávají příměsi jako například vysokopecní struska, microsílka, mikromletý vápenec, elektrárenský popílek a další. Právě použití popílku je ekonomicky velmi výhodné. Poměr kvality ku ceně vysokoteplotního popílku z něj dělá nejpoužívanější příměs do betonu v České republice. Jedná se o druhotnou surovinu při výrobě elektrické energie, a proto je z ekologického hlediska velmi přínosné ho dále využívat. I přesto, že se jedná o odpad, je prokázáno, že vysokoteplotní popílek má příznivý vliv na kvalitu betonu v množství 10 – 20 % z hmotnosti cementu. Cílem je však nahrazovat větší díl cementu elektrárenským popílkem (až 70 %), za co nejnižšího snížení kvality betonu. Je třeba prozkoumat, jaký dopad na pevnosti a na trvanlivost v agresivních prostředích (XF, XA) bude mít tak vysoká náhrada cementu.

2 Teoretická část

2.1 Cíl teoretické části

Cílem teoretické části je zpracovat obsáhlé rešerše z tuzemské a hlavně zahraniční odborné literatury, která se zabývá použitím elektrárenských popílků v betonech s hlavním cílem prostudovat možnosti náhrad cementu 40 – 70 % popílků pro tzv. high volume fly ash concrete. Zpracovat přehled dopadů na vývoj pevností, trvanlivosti betonů v různých prostředích, redukce vývoje hydratačních tepel atd.

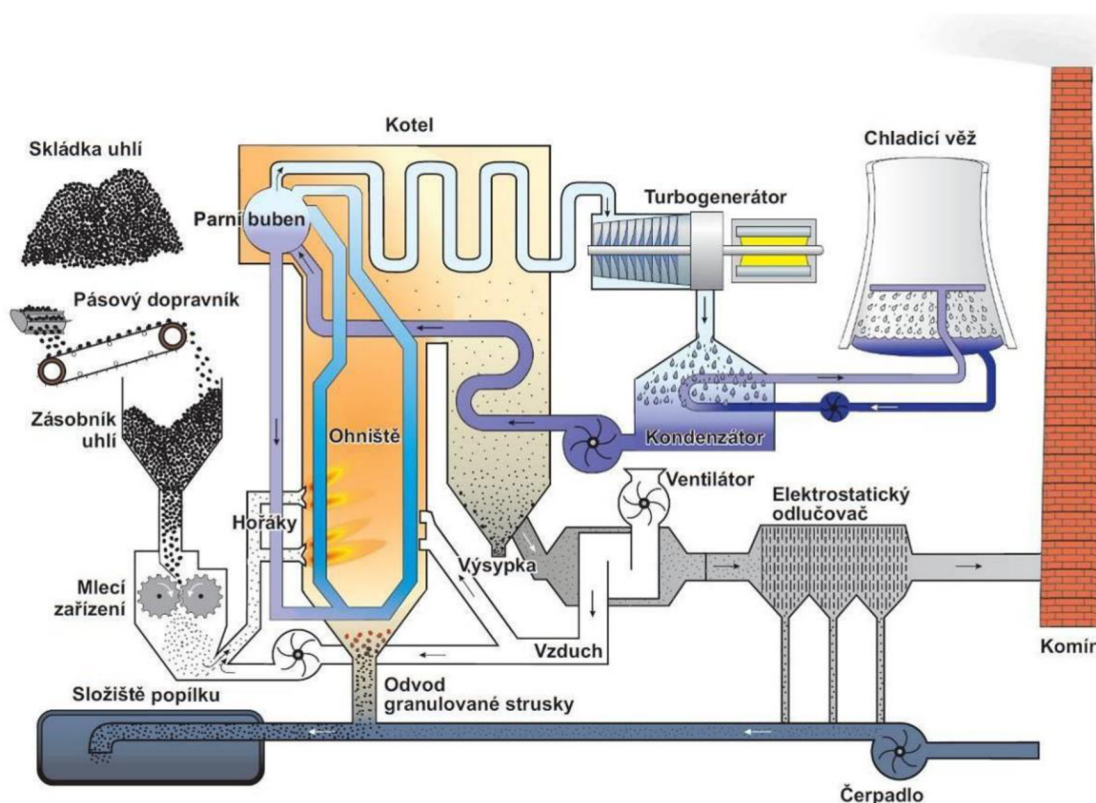
2.2 Základní informace

Popílek je druhotný produkt ze spalování fosilních paliv v tepelných elektrárnách. Převážně černé a hnědé uhlí je spalováno za vysokých teplot a nespalitelné minerální nečistoty jsou unášeny pryč ve formě popílku. Roztavený popílek je ochlazován a tuhne jako kulaté duté částice o průměru 1 – 150 μm . Popílek je odstraňován ze spalin pomocí elektrostatických odlučovačů nebo cyklonů.

Popílek je latentně hydraulická látka, což znamená, že se sám o sobě nereaguje s vodou, avšak po smíchání s budičem tuhne a tvrdne jako látka hydraulická. Budičem v betonu je cement, přesněji hydroxid vápenatý, který je v cementu obsažený. Tím se spustí tzv. purolánová reakce, při které se vytvářejí podobné produkty jako při hydrataci cementu.

2.3 Popílký a jejich rozdělení

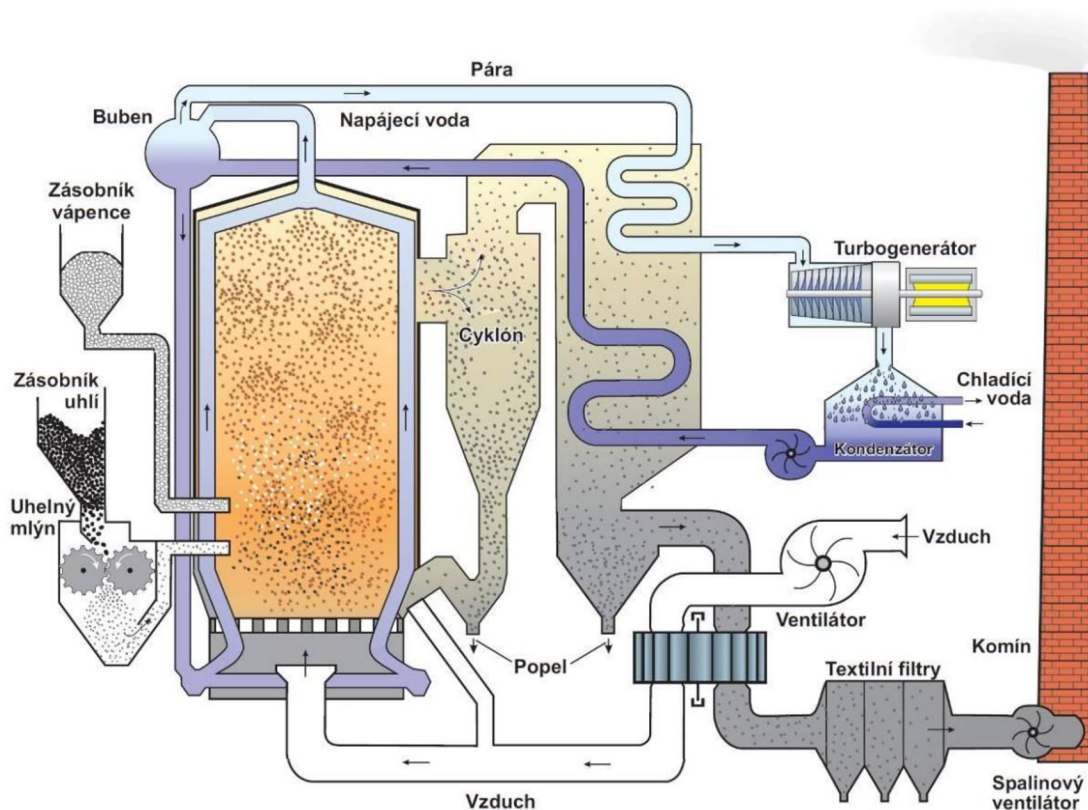
Podle ČSN EN 450-1 "Popílek do betonu" je popílek jemný prášek skládající se převážně z kulovitých sklovitých částic, vznikajících při spalování práškového uhlí samotného nebo se spoluspalovaným materiálem. Má pucolánové vlastnosti a skládá se převážně z SiO_2 a Al_2O_3 , přičemž obsah aktivního SiO_2 , definovaný a stanovený podle EN 197-1 je minimálně 25 %. Popílek se získává elektrostatickým nebo mechanickým odlučováním prachových částic ze spalin spalovacích zařízení vytápěných práškovým uhlím samotným nebo i se spoluspalovaným materiálem. Popílký s nízkým obsahem reaktivního vápníku a vysokým obsahem reaktivního SiO_2 se označují jako popílký křemičitanové nebo bohaté na křemík a mohou pocházet i z elektrárny spalující hnědé uhlí. Vápenaté popílký (obsah reaktivního $\text{CaO} > 10\%$) se bez ohledu na uvedené výjimky doposud málo využívají jako příměs do betonu. Vápenaté popílký se však mohou podle ČSN EN 197-1 používat jako hlavní složka na výrobu portlandského popílkového cementu CEM II/A-W nebo CEM II/B-W.



Obr. č. 1: Schéma tepelné elektrárny s klasickým spalováním [40]

Vysokoteplotní popílek se dělí dle ASTM C618 do dvou tříd. Třída C je vyráběna spalováním hnědého uhlí a ligninu a třída F spalováním převážně černého uhlí a antracitu. Hlavním dělícím znakem je chemické složení, kde popílek třídy C musí splňovat: $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 50 \%$ a popílek třídy F: $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 70 \%$.

U vysokoteplotních popílků spalovaných se teplota spalování pohybuje okolo 1400 až 1600 °C. Proto popílek obsahuje více než 50 % skelné fáze, která reaguje s $\text{Ca}(\text{OH})_2$ za vzniku C-S-H gelu. Dále obsahuje β -křemen a mullit, který se reakce zúčastňuje pouze za hydrotermálních podmínek.



Obr. č. 2: Schéma tepelné elektrárny s fluidním spalováním [40]

Ekologicky výhodnější je pro teplárny technologie fluidního spalování za atmosférického tlaku. Princip fluidního spalování spočívá v tom, že se palivo namele s přísadou vápence nebo dolomitu a spaluje se ve vznosu při teplotách okolo 850 °C, která je optimální pro reakci oxidu siřičitého a vzdušného vápna. Na rozdíl od vysokoteplotního spalování, kde probíhá desulfatace až po spalovacím procesu, se spaliny čistí už ve spalovacím kotli.

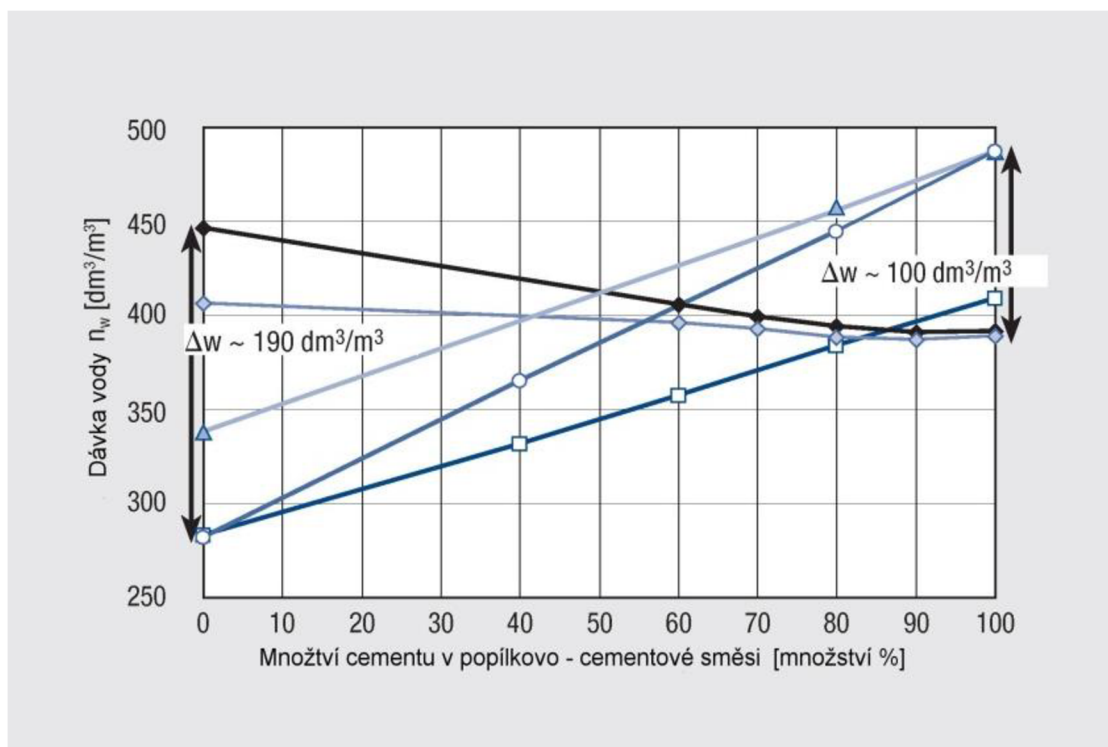
Hlavní výhodou této technologie z hlediska ekologického je to, že se uvolněný SO_2 během spalovacího procesu váže na CaSO_4 . Oxid siřičitý unikající do atmosféry má za následek vznik kyselých dešťů. Popílek je tedy pevný odpad této technologie a je tvořený směsí popela z paliva, nezreagovaného CaO , síranu vápenatého a dalších částí z reakce popelovin s CaO a nespáleného paliva. Tyto popílky mají vysoký obsah SO_3 (7 až 18 %). Anhydrit (až 20%) a volné vápno (až 15 hm. %) jsou hlavní pojivé složky výsledného popílku. Nezreagovaný CaO je kvůli nízké spalovací teplotě a rychlému chlazení ve formě měkce páleného vápna, a tudíž je velmi reaktivní. Tato technologie je jedna z nejmodernějších metod spalování tuhých paliv, a proto je to prozatím nejúčinnější metoda snižování emisí škodlivých látek do ovzduší. Popílek z fluidního spalování se dělí na ložový a úletový. Ložový sedá kvůli větší velikosti částic na dno spalovacího kotle, zatímco úletový odchází se spalinami a je zachytáván na cyklónech nebo na filtrech. Přestože pocházejí z jednoho spalovacího procesu, vlastnosti obou druhů popílků se od sebe liší granulometrií, měrným povrchem, hustotou, sypanou hmotností, ale i chemickým a mineralogickým složením.

Vysokoteplotní popílky se používají při výrobě cementu i jako příměsi do betonu. Fluidní popílky se dle ČSN EN 450 v České republice nehodí do betonů, protože nesplňují většinu technických požadavků. Proto je použití dle ČSN EN 206-1 nepřijatelné. [1] [2] [3]

2.4 Popílek jako příměs

Popílek se dnes jako příměs do betonu používá zcela běžně, ale pouze v obsahu 15 – 20 % z hmotnosti cementu, kde je jeho hlavní výhodou ekonomický faktor, ale ani kvalitativní faktor není zanedbatelný. Je prokázáno, že beton s příměsí 15 – 20% popílku je srovnatelný a v některých vlivech i lepší, než referenční beton. Popílek má pozitivní účinek jak na čerstvý beton, tak i na ztvrdlý beton. Jako jemná příměs s granulometrií pod 0,125 mm zlepšuje zpracovatelnost čerstvého betonu. Při vodním součiniteli $w = 0,4$ můžeme za pomoci superplastifikátorů dosáhnout ve zkoušce sednutí kužele až třídy S4, neboli 160 – 210 mm. Na zlepšení vlastností ztvrdlého betonu má vliv především tvar a velikost zrn popílku, které fungují jako mikroplnivo, zlepšující hutnost a mezerovitost. Praktickou metodou pro hodnocení požadavku na množství vody

na ovlhčení zrn pojiva s příměsí popílku, resp. jemných podílů, je metoda podle Puntkeho [4] poskytující spolehlivý údaj o podílu pórů a o spotřebě vody v nejhutnějším seskupení (obr. č. 3). Se zvyšující se jemností zrn a narůstajícím podílem kulových zrn se zvyšuje pozitivní působení popílku jako plniva. [5] [32]



Obr. č. 3: Spotřeba vody různých cementů, popílků a jejich směsí [32]

2.5 Beton s vysokým obsahem elektrérenských popílků (HVFA)

Beton s vysokým obsahem elektrérenských popílků, neboli HVFA, je definován jako beton s příměsí vysokoteplotního popílku s více než 30 - 50 % příměsí z hmotnosti cementu. Ravina a Metha [7] dokázali, že nahrazením 35 – 50 % cementu popílkem lze snížit vodní součinitel až o 5 - 7 % při stejném smrštění. Malhorta [8] [9] [10] dokazuje, že betony s vysokým obsahem elektrérenských popílků mají vynikající pevnosti, dobrou trvanlivost včetně mrazuvzdornosti, propustnosti chloridových iontů a nevykazují žádnou nepříznivou roztažnost při reakci s horšími kamenivy. Betony s obsahem až 60 % popílku a s přidavkem superplastifikátoru vykazují nižší obrusnost než beton bez popílkové příměsí. Podle Siddiqua [6] beton s 50% náhradou cementu popílkem může dosahovat až 70 % pevnosti v tlaku a tahu za ohybu po 28 dnech a přibližně 95 % pevnosti

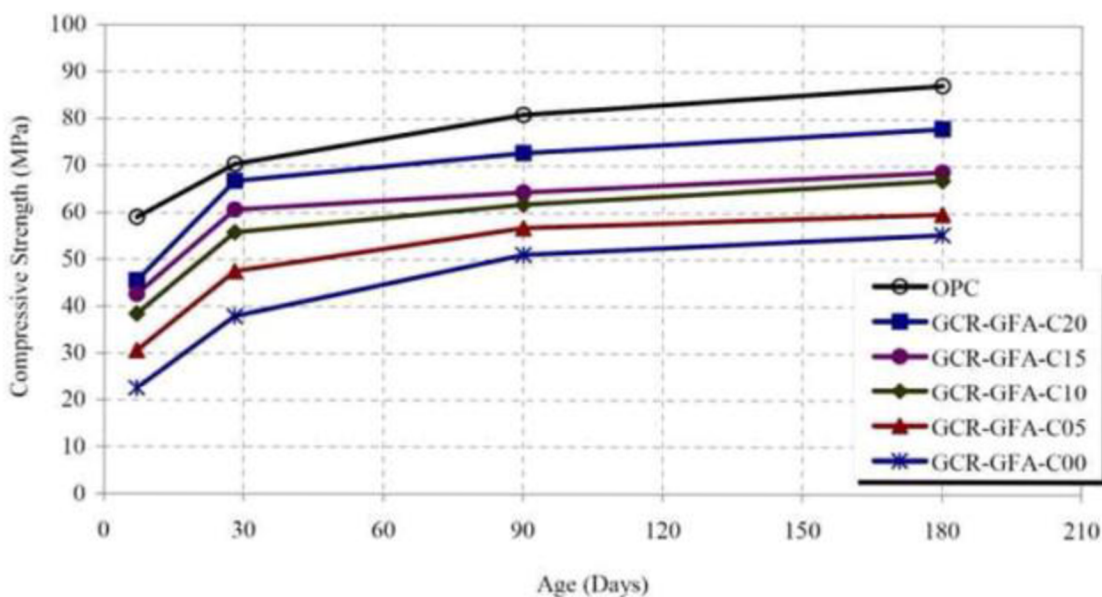
po 365 dnech. Z toho vyplývá, že HVFAC vykazuje větší nárůst pevností mezi 90 a 365 dny než referenční beton. To je způsobeno pučolanitou popílku.

Vysokoteplotní popílek se výborně hodí jako příměs do betonu na vysoce kvalitní chodníkové dlažby s vysokou pevností a minimální obrusností. Výzkum dokázal, že tento beton má lepší vlastnosti než referenční beton bez popílkové příměsi. [11]

2.6 Ošetřování

Betony s vysokým obsahem elektrérenských popílků dosahují stejné konzistence po zamíchání jako referenční betony s mnohem vyšším vodním součinitelem. Proto je třeba tyto betony ošetřovat po co nejdelší dobu, aby nedošlo ke vzniku trhlin způsobených plastickým smrštěním a odpařováním záměsové vody. Ideální délka ošetřování je 28 dní. V praxi se, hlavně z ekonomických důvodů, málokdy dodrží alespoň 7 denní ošetřování, a proto může nastat mezi laboratorními zkouškami a zkouškami betonu uloženého v skutečné konstrukci velký rozdíl jak v pevnosti, tak i v trvanlivosti. [12] [34]

Z obrázku č. 4 je patrné, že pevnost v tlaku betonu s vysokým obsahem elektrérenských popílků stoupá s délkou ošetřování betonu podobně jako u referenčního betonu (OPC). Avšak nárůst pevností popílkového betonu je podstatně rychlejší do 28 dne. Když je stále ošetřován, stále stoupá i po 28 dnu. [34]



Obr. č. 4: Závislost délky ošetřování na pevnosti v tlaku [34]

2.7 Pevnost betonu

2.7.1 Pevnost v tlaku

Nejdůležitější pevností betonu je pevnost v tlaku, protože v kompozitní soustavě železobetonu nebo předpjatého betonu přenáší tahové síly betonářská výztuž, zatímco beton přenáší síly tlakové.

Cíleným používáním popílku se dá ovlivnit vývoj pevnosti betonu v čase až do 360 dnů. Při ekvivalentní hodnotě vodního součinitele se pomalejší počáteční reakce kompenzuje snížením hodnoty vodního součinitele (voda / pojivo). Vlivem pomalejšího vytvrzování následkem pucolánové reakce popílků bude tento beton vykazovat vyšší konečnou pevnost v tlaku než adekvátní beton bez obsahu popílku. U částí betonových staveb, kde je to na základě očekávaného statického namáhání přijatelné, se proto doporučuje stanovit pozdější termín testování pevností, aby se zohlednil pomalejší vývoj pevností, a to kvůli vyhnutí se příliš vysokým a ekonomicky drahým konečným pevnostem v delším stáří (60 až 90 dnů). Při úplné náhradě cementu popílkem v poměru 1:1 (v hmotnostních podílech) při nezměněném obsahu vody v betonu, se vývoj pevností zpomalí, protože pucolánová reakce popílku probíhá pomaleji než hydratace cementu. Při přiměřeném ošetřování se pevnost v tlaku u betonu z portlandského cementu při nahrazení 50 % cementu popílkem po 28 dnech dosáhne, resp. překročí za 90 až 180 dní. Při dalším dostatečném vlhkostním ošetřování, což je u části stavby s volným přístupem venkovního vlhkého vzduchu dosaženo, probíhá vlivem pucolánové reakce dlouhodobé další dozrávání. Toto může v průběhu několika let vést k dalšímu zvýšení pevnosti, takže u popílkových betonů se dosáhne konečné pevnosti výrazně převyšující pevnosti srovnatelného betonu pouze z portlandského cementu. Dodatečný přírůstek popílku jako příměsí do betonu vede při dané hodnotě vodního součinitele a při daném obsahu cementu v betonu vždy k vyšším hodnotám 28 denních pevností. Betony, u kterých se vyžaduje rychlý vývoj pevností, je možné hospodárně vyrobit s popílkem volbou vhodného cementu a vhodným složením betonu při využití účinku popílku jako mikroplniva a s využitím superplastifikačních a urychlovacích přísad.

V rámci průmyslu nastává u betonů s vysokým obsahem elektrérenských popílků problém s dosažením krátkodobých pevností. Siddique však ukázal, že nahrazení 40 % až 50 % cementu popílkem snižuje 28 denní pevnost betonu v tlaku a naproti tomu má tento beton trvalé a podstatné zlepšení nad 28 denních pevností v tlaku ve srovnání s konvenčním betonem z portlandského cementu. Rovněž také uvádí, že i 28 denní pevnost betonu s 40% až 50% obsahem popílků je dostatečná pro použití v železobetonových konstrukcích. [6]

„V CANMET provedli studie k prozkoumání typického vývoje pevnosti pro betony s vysokým obsahem elektrérenských popílků a ukázali jednodenní pevnosti okolo 8 MPa, 28 denní pevnosti okolo 35 MPa, a 91 denní pevnosti okolo 45 MPa. Je třeba poznamenat, že hodnoty pevností se mohou lišit v závislosti na proporcích ve složení a použitých materiálech. V CANMET rovněž zaznamenali, že betony s vysokým obsahem elektrérenských popílků lze aplikovat i pro vysokopevnostní betony v praxi, kde při polních studiích se pevnosti pohybovaly od 35 do 50 MPa za 28 dní a od 50 do 70 MPa za 90 dní. [13] [14]

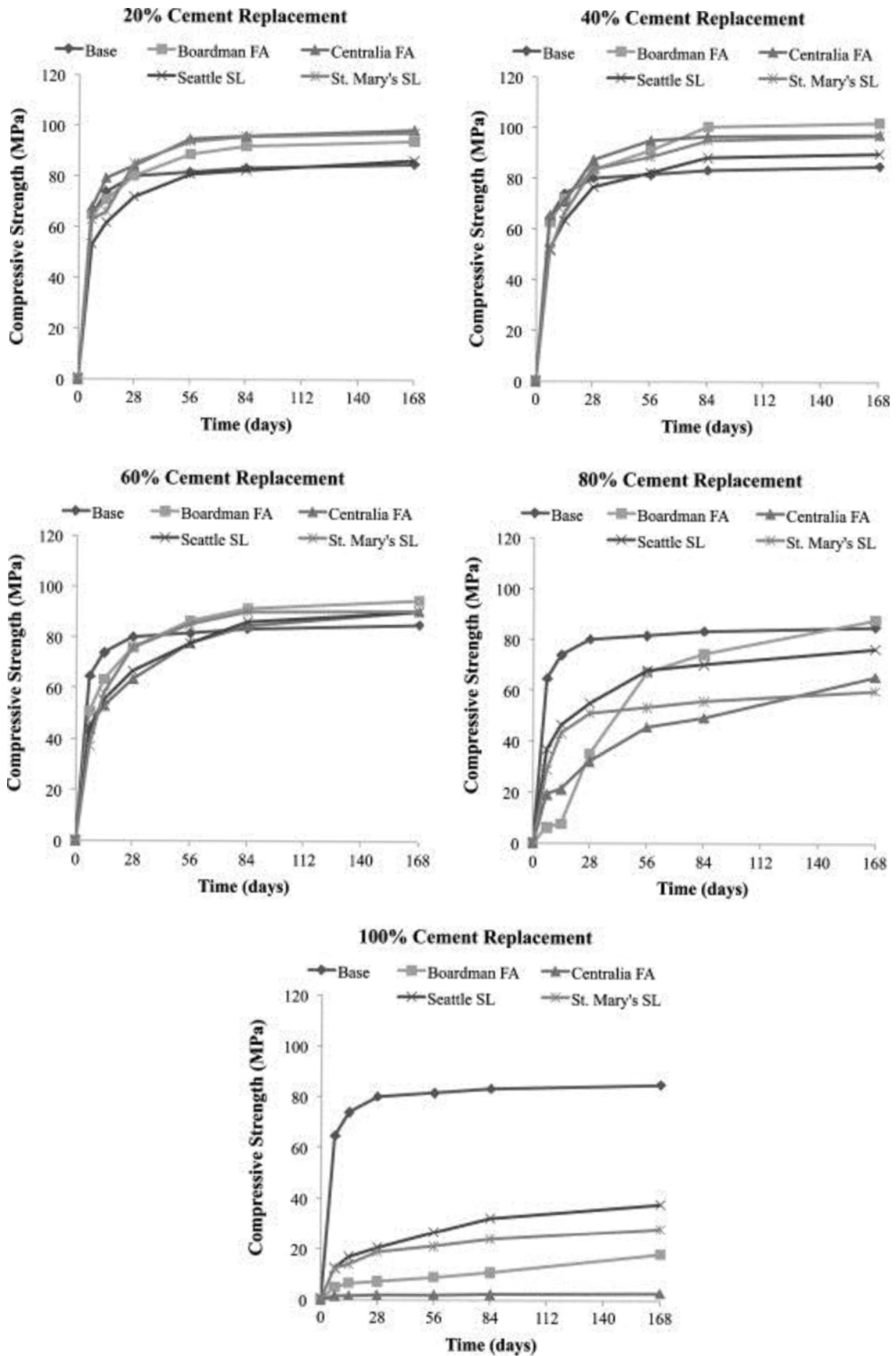
Různé případové studie EcoSmart také informují o pozitivních výsledcích pevností v raném období zrání u betonů s vysokým obsahem elektrérenských popílků. Zkušenosti z namíchaných směsí v praxi obecně vykazují, že betony s vysokým obsahem elektrérenských popílků demonstrují dostatečný rozvoj pevností k produkci adekvátních pevností i po jednom dnu a to v hodnotách až 10 MPa. EcoSmart taktéž zjistili, že některé betonové směsi obsahující popílek vyvíjejí nižší 3 denní a 7 denní pevnosti, ale dosahují vyšších maximálních pevností za předpokladu, že jsou ošetřovány řádně. Vědci tedy pochopili, že adekvátní vlhké ošetření po delší dobu je nezbytné, aby betony s vysokým obsahem popílků dosáhly ekvivalentních, či vyšších pevností, než konvenční betony z portlandského cementu.[15]“ [40]

V roce 2012 Hannesson a kol. [24] (viz. obr. č. 5) publikovali svůj výzkum, ve kterém se zabývali nahrazením cementu vysokoteplotním popílkem a vysokopecní struskou, při náhradě cementu 20 – 100 %. Pucolánová reakce způsobuje pomalejší nárůst pevností a to hlavně u betonu s 60% náhradou cementu. Z jejich výsledků však vyplývá, že po 168 dnech a při nahrazení až 60 % cementu vysokoteplotním popílkem, dostaneme beton s vyšší pevností, než je

referenční beton. Beton s náhradou 80 % cementu vysokoteplotním popílkem vykázal více než 70% pevnost v tlaku po 168 dnech, avšak nárůst pevností byl velice pomalý. Pevnosti betonu v tlaku s 100% náhradou cementu, neboli pouze s vysokoteplotním popílkem, byly velice nízké. Z toho vyplývá, že v pojivové složce musí být přítomen cement, aby mohla proběhnout pucolánová reakce. [24]

2.7.2 Pevnost v tahu

Popílek ovlivňuje pevnost betonu v tahu stejnou měrou jako pevnost v tlaku. Betony obsahující popílek mají přinejmenším stejné, většinou však nepatrně vyšší pevnosti v tahu a příčném tahu jako betony bez popílku se shodnou pevností v tlaku. Tato zvýšená pevnost v tahu se dává do souvislosti především se zmenšením tloušťky a míry hutnosti kontaktní zóny mezi kamenivem a cementovou základní fází, čímž se zlepší přenos síly mezi těmito dvěma složkami betonu.



Obr. č. 5: Závislost pevnosti v tlaku na množství vysokoteplotního popílku (FA) a vysokopeční strusky (SL). Porovnání s referenčním betonem (Base) [24]

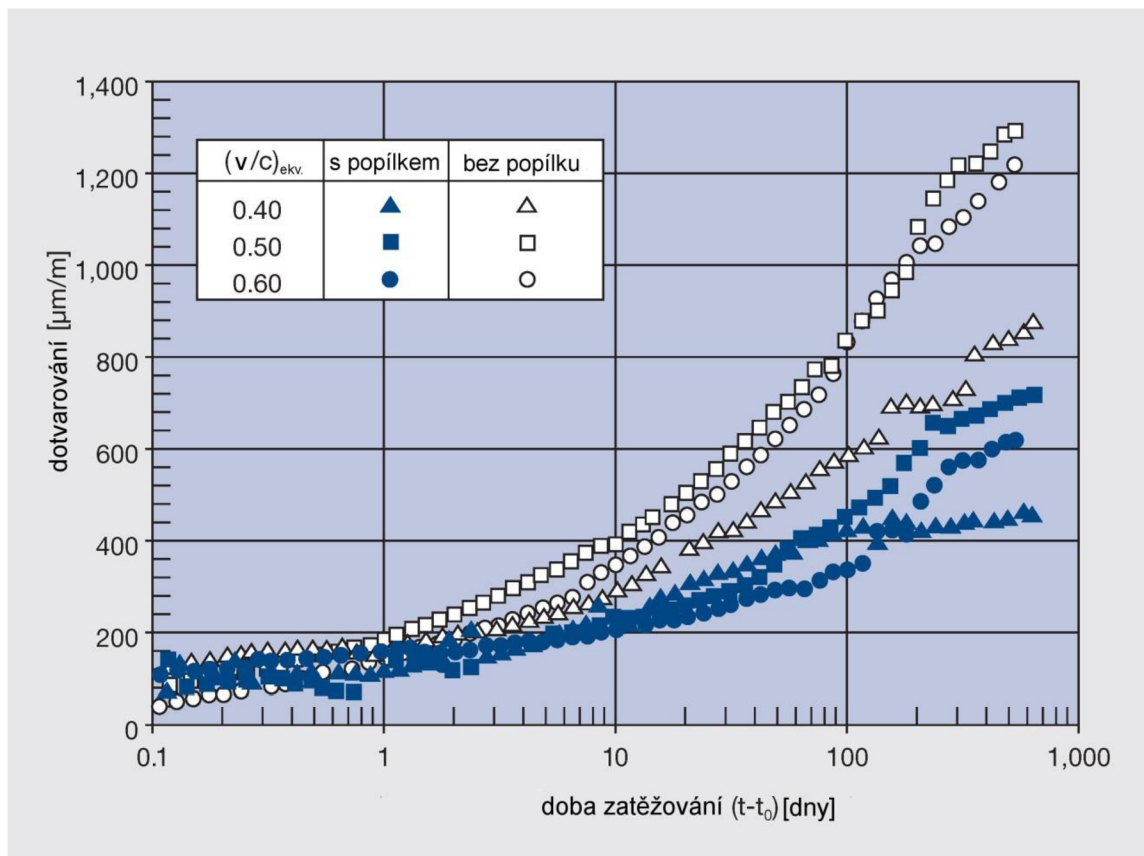
2.8 Modul pružnosti

Při porovnání modulů pružnosti klasického betonu a betonu s vysokým obsahem elektrárenských popílků se stejnou pevností v tlaku v době zkoušení zjistíme, že rozdíl modulů pružnosti je nepatrný. Jediný rozdíl je ve vývojích modulů pružnosti. Popílkový beton má kvůli pomalé pucolánové reakci pomalejší náběh modulu pružnosti. Avšak konečný modul pružnosti je vyšší než u klasického betonu. Z toho vyplývá, že při návrhu nosných konstrukcí je možno počítat s charakteristickými moduly pružnosti. To platí i pro vysokopevnostní a samozhutnitelné betony. Přídavkem popílku se taktéž nezmění ani deformační křivka betonu ani chování betonu na mezi pevnosti. [31] [32]

2.9 Dotvarování

Betony s vysokým obsahem elektrárenských popílků vykazují po 28 dnech v důsledku dalšího dotvrzování vlivem pucolánové reakce výrazně menší dotvarování. Jako příčina se uvádí tloušťky kontaktní zóny mezi kamenivem a základní pojivovou fází. [32]

Novějšími výzkumy Müllera, Guse a Schneidera [33] se výsledky zkoušek potvrdily. V daných podmínkách zkoušek byl jako podstatný faktor identifikován relativně nízký obsah cementu v popílkových betonech. Kromě toho se jako příčina výrazně mírnějšího dotvarování uvádí odlišný obsah vlhkosti a rozdíly v průběhu její změny v čase, které spočívají v rozdílných stavech charakteru pórové struktury.



Obr. č. 6: Časový průběh dotvarování betonů s obsahem a bez obsahu popílku, začátek zatížení betonu t_0 po 28 dnech [32]

2.10 Odolnost proti škodlivým účinkům mrazu a chemických rozmrazovacích látek

Odolnost proti škodlivým účinkům mrazu (bez rozmrazovacích prostředků), neboli odolnost v prostředí XF1 a XF3, závisí převážně na pórové struktuře stavební látky a na množství vody v ní obsažené v průběhu zmrazování. Velký význam má poměr kapilárních pórů k pórům gelovým. U vodou nasyceného betonu dochází v kapilárních pórech k tvorbě mikroskopických ledových čoček, při níž se voda z gelových pórů přerozděluje do pórů kapilárních. Při tání se v důsledku podtlaku do gelových pórů nasává voda. Toto kryoskopické nasávání vícenásobně převyšuje kapilární nasycování vodou, to znamená, že beton absorbuje dodatečnou vodu. Postup narušení je v rozhodující míře ovlivňován rychlostí absorpce vody až do kritického nasycení. Jakmile se dosáhne kritického nasycení, nastává narušení betonu malým počtem cyklů zmrazování – rozmrazování. Přitom se ve stále větší míře narušuje struktura cementového kamene. Narušení struktury se projevuje například v poklesu dynamického modulu pružnosti, což se dá

prokázat ultrazvukovým měřením. Současně nastává rozpad cementového kamene a malty na povrchu betonu. [16]

Při náhradě cementu popílkem při konstantním obsahu vody vzniká následkem menšího obsahu cementu v popílkovém betonu větší celková pórovitost, protože produkty pucolánové reakce nezabírají větší objem než reagující výchozí látky. Na druhé straně se následkem pucolánové reakce a „pore-blocking efektu“ zlepšuje rozdělení velikosti pórů. Celkově větší objem pórů a s ním spojená vyšší absorpce vody vedou při zkoušce po 28 dnech a za výše uvedených podmínek často k nižší mrazuvzdornosti betonu, protože k tomuto časovému okamžiku pucolánová reakce ještě nepokročila dostatečně daleko. [17]

Přítomnosti rozmrazovacích solí zvyšuje velikost destruktivních sil související s cyklickým zmrazováním a rozmrazováním betonu. Beton s vysokým obsahem elektrárenských popílků by neměl být takovému prostředí vystaven, pokud nemá dostatečnou pevnost a není řádně provzdušněn. Studie uvádějí, že odolnost proti působení chemických rozmrazovacích látek u betonů s vysokým obsahem elektrárenských popílků je nízká. Testy odolnosti proti CHRL v laboratořích vykazují rozdílné výsledky než terénní zkoušky z praxe, kde byly betony s vysokým obsahem elektrárenských popílků použity v různých praktických případech a byly vystaveny zmrazování a rozmrazování za pomoci chemických rozmrazovacích látek s vyhovujícími výsledky. Z praxe a zkoušek vyplývá, že je třeba dodržovat 4 hlavní zásady, aby mohl být beton s vysokým obsahem popílků použit v prostředí XF2 a XF4:

- nízký vodní součinitel
- dostatečné provzdušnění (póry s průměrem menším než 300 μm)
- kvalitní zpracování
- důsledné a dostatečně dlouhé ošetřování

Obecně platí, že se zvyšujícím se vodním součinitelem a zvyšujícím se množstvím popílku v betonové směsi klesá odolnost proti CHRL. Ošetřování povrchu popílkového betonu plastickými nátěry také snižuje odolnost proti CHRL. Plastický nátěr zabraňuje přístupu vlhkosti k betonu a tím zastaví hydrataci betonu a

pucolánovou reakci, která má velký vliv na trvanlivost betonu. V CANMET provedli zkoušku vůči CHRL na betonech s vysokým obsahem elektrárenských popílků s neuspokojivými výsledky. Vzorky betonů s vysokým obsahem elektrárenských popílků ve srovnání s referenčními betony z portlandského cementu se stejným vodním součinitelem a stejným množstvím pojivých materiálů ukázaly vážné vizuální povrchové narušení a vysokou ztrátu hmotnosti.

Při dodržení ustanovení EN 206-1 ohledně minimálního obsahu cementu a ekvivalentní hodnoty vodního součinitele dosahují provzdušněné betony s obsahem popílku té samé odolnosti proti mrazu a rozmrazovacím prostředkům jako stejné betony bez obsahu popílku. [18] Poté, co byly v rozsáhlých výzkumných pracích předloženy důkazy odolnosti těchto popílkových betonů proti působení cyklického zmrazování a rozmrazovacím prostředkům, by mohlo být možné i u betonů expozičních tříd XF2 a XF4 započítání popílku do minimálního obsahu cementu a aplikace ekvivalentní hodnoty vodního součinitele. [19]

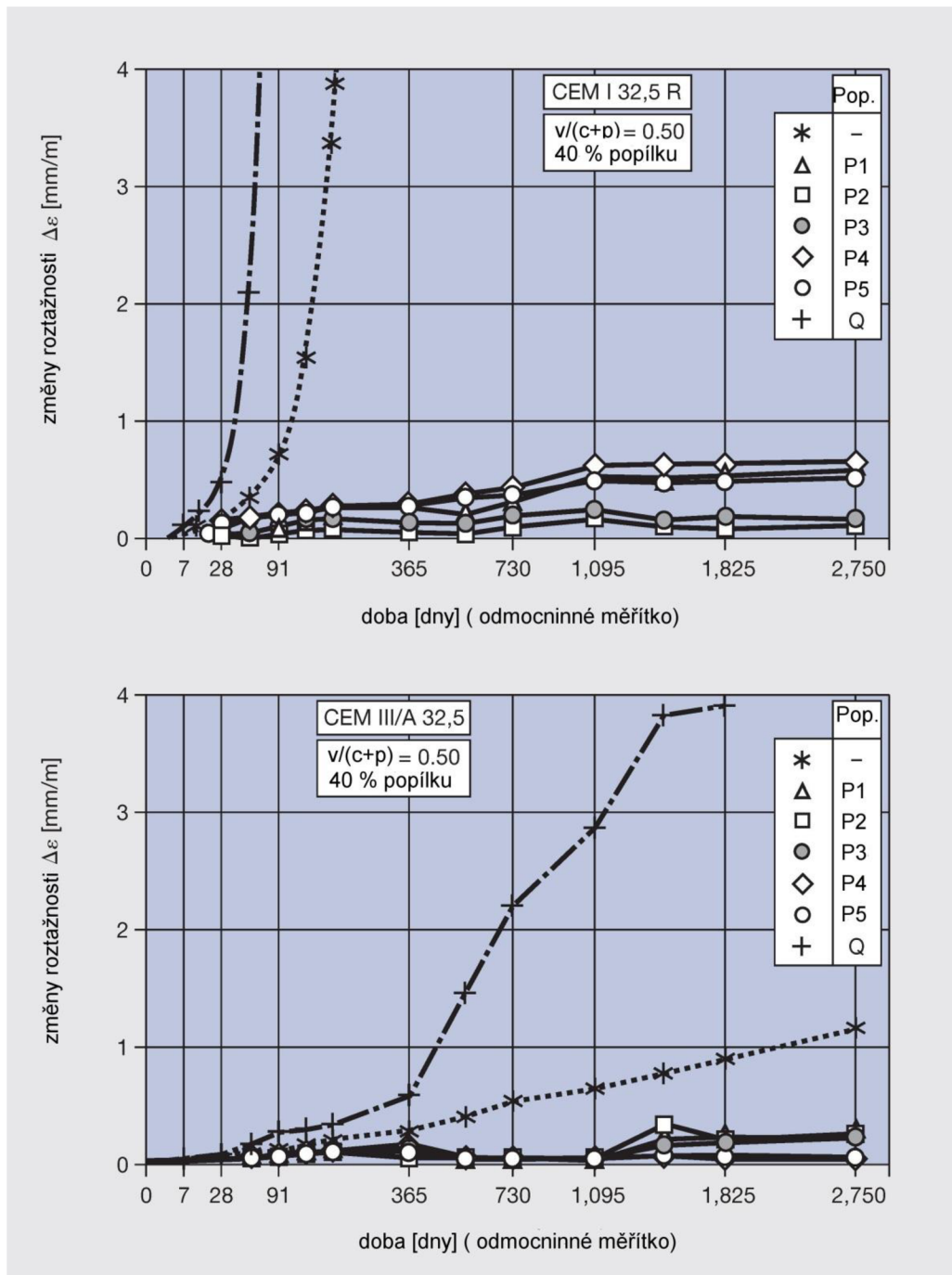
2.11 Odolnost proti síranům

Použitelnost a únosnost betonů, vystavených dlouhodobému působení síranů z půdy nebo vody, může být velice omezena. Aluminátové fáze v hydratované nebo nehydratované formě (v podstatě C_3A) nacházející se v cementovém kameni a obsahující hliník a hydroxid vápenatý $Ca(OH)_2$, jsou hlavní složky reagující se sírany. Výsledkem reakce jsou objemné fáze jako ettringit, monosulfát a sekundární sádrovec, vyvolávající rozpínání. Při intenzivním chemickém působení se z tohoto důvodu musí použít cementy s vysokou odolností proti síranům (síranovzdorné cementy). U těchto cementů se jedná buď o portlandské cementy s obsahem $C_3A \leq 3 \%$ a s obsahem $Al_2O_3 \leq 5 \%$, nebo o vysokopeční cementy s minimálním obsahem 65 % vysokopeční granulované strusky.

Celá řada zkoušek a praktické zkušenosti potvrzují, že použití popílku jako příměsi do betonu typu II může výrazně zlepšit odolnost malt a betonů proti síranům. To platí i tehdy, když se použijí cementy, které samy nemají vysokou odolnost proti síranům. Na základě současných poznatků se vliv popílků na odolnost betonu proti síranům vysvětluje v podstatě hutnější pórovou strukturou a vyšším difúzním

odporem, redukcí obsahu Ca(OH)_2 vlivem pucolánové reakce, jakož i sníženým obsahem C_3A (vztaženým na pojivo) a částečnou náhradou cementu popílkem. [20]

Na obrázku č. 7 jsou z rozsáhlého zkušebního programu ukázkově sestaveny změny mezi hranoly uloženými v roztoku síranů a ve vodě, na betonech s portlandským cementem (CEM I 32,5 R) a s vysokopecním cementem (CEM III/A 32,5), v kombinaci s pěti různými popílkami, exploatované po dobu 2750 dní (což odpovídá přibližně 7,5 rokům). Při konstantní hodnotě poměru voda ku pojivu $v/(c+p) = 0,5$ se ve všech směsích vždy nahradilo 40 % cementu shodným množstvím popílku jako příměsí. [21] [32]



Obr. č. 7: Průběh změn roztažnosti malt s CEM I 32,5 R a CEM III/A 32,5 (pět různých popílků F1 až F5 a kremenná moučka Q) podle [32]

Z obrázku vyplývá, že použitím popílku se výrazně a trvale zvyšuje odolnost proti síranům. Pro přínos popílku na zvýšení odolnosti betonu proti síranům lze v zásadě uvést tři důvody:

- ztuhnutí struktury C-S-H produkty pucolánovou reakcí popílku
- spolupůsobení rozpustného SO_3 z popílku při reakci v počáteční fázi

- snížení podílu slínku obsahujícího C_3A a snížení obsahu $Ca(OH)_2$ náhradou cementu stejným množstvím popílku

Fázové analýzy pomocí rentgenové difrakce ukazují, že u popílků s vyšším obsahem síranů se v cementovém kameni vytvářejí vyšší podíly ettringitu a menší množství monosulfátu. Když se zmenšil obsah SO_3 v popílku, prokázalo se víc monosulfátu za současného úbytku podílu ettringitu. Tyto výsledky byly potvrzeny výsledky jiných výzkumů, kde se ukázalo, že směsi s popílkem, ve kterých jsou hlinitanové fáze před ostříkáním sírany přítomné prioritně jako ettringit, vykazují vysokou odolnost proti síranům. Pokud byl oproti tomu přítomen zvýšený podíl monosulfátu, nastalo po napadení sírany poškození následkem tvorby ettringitu.

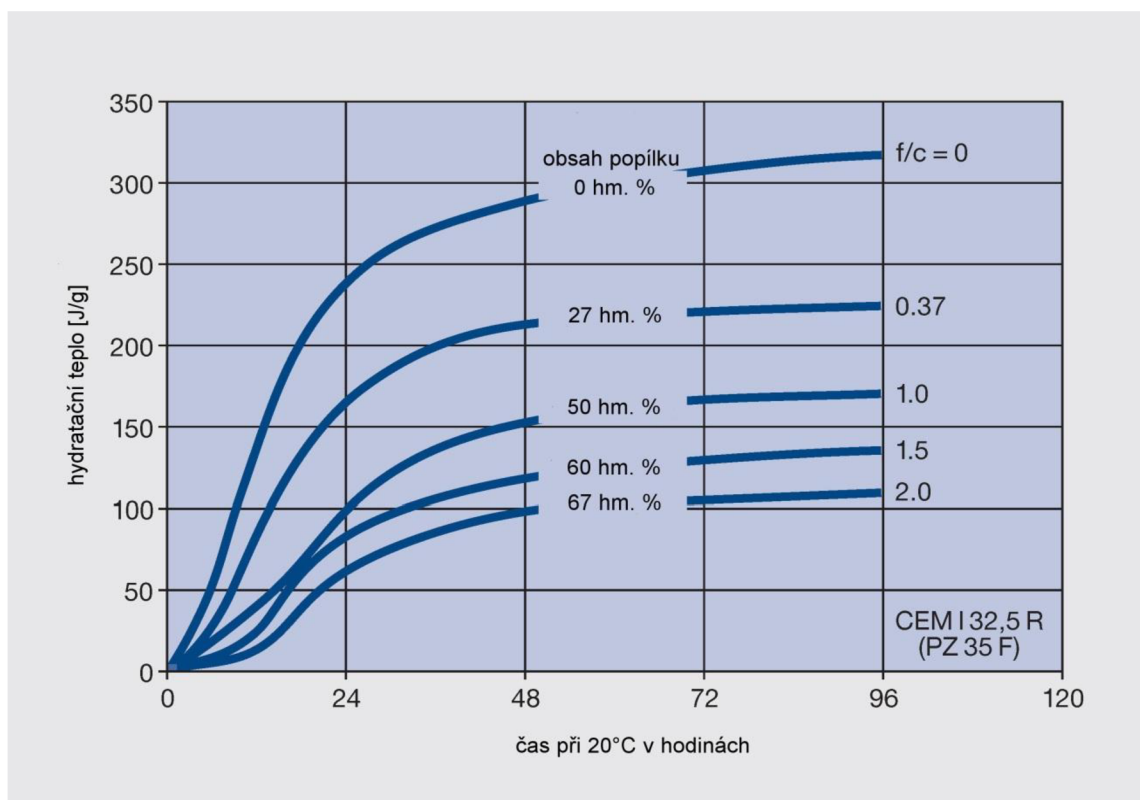
2.12 Hydratační teplo

Použitím elektrérenského popílku jako náhrady portlandského cementu v betonu lze výrazně snížit vývoj hydratačního tepla. Při nahrazení 50 % cementu popílkem můžeme snížit hydratační teplo až na polovinu (obr. č. 8). Hlavním důvodem je to, že pucolánová reakce popílku probíhá pomaleji než hydratace cementu, a proto se výdej hydratačního tepla rozvolní na delší časovou periodu. Tím je snížena maximální teplota v betonu. Použitím popílku jako příměsi se sníží také počáteční teplota betonu o 15 až 30 %, než by měl beton pouze s portlandským cementem. Vzestup teploty v betonu závisí na následujících faktorech:

- vývoj tepla způsobeného hydratací a pucolánovými reakcemi
- míře ztráty tepla a tepelných vlastností betonu do okolního prostředí
- velikosti samotného betonového prvku

Při použití betonu s vysokým obsahem elektrérenských popílků podstatně snížíme velikost maximální teploty uprostřed betonového prvku a tím zajistíme, že i u velko-objemových betonových prvků nepřekročí rozdíl maximální teploty uvnitř prvku a okolní teploty maximální normový rozdíl $40\text{ }^\circ\text{C}$. U zkoušeného velkého betonového bloku vyrobeného z betonu s vysokým obsahem elektrérenských popílků byla maximální teplota uprostřed bloku $54\text{ }^\circ\text{C}$. Teplota prostředí, ve kterém byl betonový blok umístěn, byla $19\text{ }^\circ\text{C}$. Z toho vyplývá teplotní rozdíl mezi vnitřkem a vnějškem betonového bloku byl $35\text{ }^\circ\text{C}$. Stejně velký betonový blok vyrobený pouze z portlandského cementu měl maximální teplotu uvnitř bloku $83\text{ }^\circ\text{C}$ a teplota

okolního prostředí byla 18°C. Rozdíl teplot byl tedy 65 °C. Za celkově stejné hmotnosti pojivových materiálů byl tedy rozdíl teplot uvnitř obou bloků 30 °C, což odpovídá přibližně 50% snížení. [22] [23]



Obr. č. 8: Vývoj hydratačního tepla pojivové směsi [32]

2.13 Karbonatace

Při procesu karbonatace reaguje hydroxid vápenatý (CaO) z hydratované kaše portlandského cementu prostředí s oxidem uhličitým (CO_2) z atmosféry za vzniku uhličitanu vápenatého (CaCO_3). Reakce však probíhá pouze ve vlhkém prostředí. S postupující hloubkou karbonatace jsou napadeny i další produkty hydratace cementu. Z hydratovaného vápníku, křemičitanů, hlinitanů a feritů, či příbuzných komplexů hydratovaných solí vznikají v konečném stádiu uhličitan vápenatý a hydratovaný oxid křemičitý, oxid hlinitý, oxid železitý a hydráty síranu vápenatého. Karbonatace betonu může vyústit v následující škodlivé důsledky:

- zvýšení propustnosti
- vznik objemových trhlin
- zvýšení četnosti trhlin

- úbytek pasivační vrstvy, která chrání výztuž před korozi [25]

2.13.1 Faktory ovlivňující míru karbonatace

Míra karbonatace závisí na následujících faktorech:

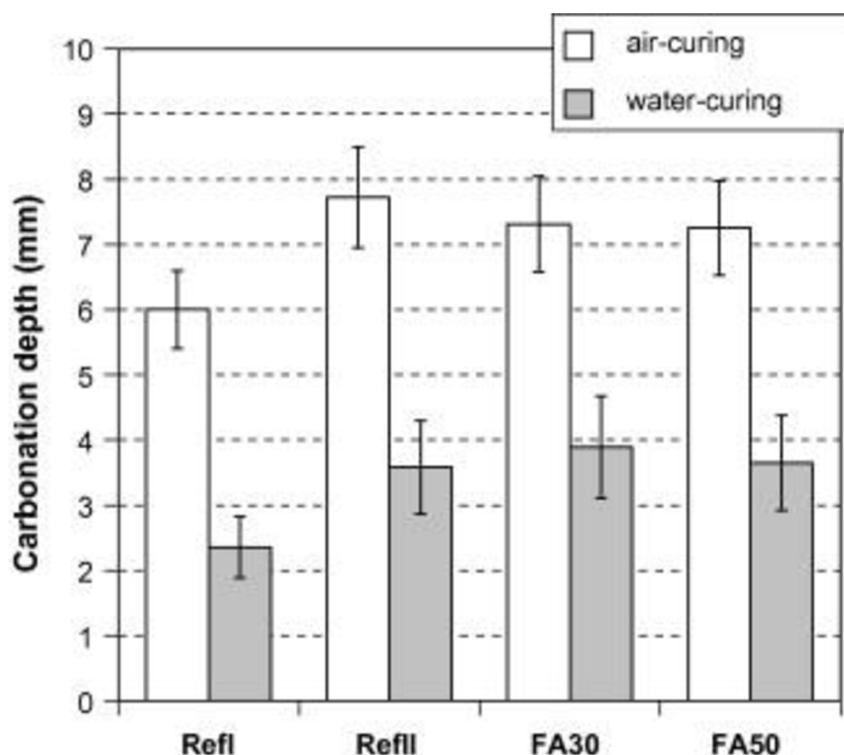
- vlhkost prostředí
- stupeň nasycení (obsah vlhkosti)
- množství hydroxidu vápenatého, který je k dispozici pro reakci
- kvalita zhutnění
- okolní teplota
- koncentrace oxidu uhličitého v okolním vzduchu
- doba vlhkého ošetřování
- propustnost
- složení receptury [26]

Jeden z nejhlavnějších vlivů, který ovlivňuje míru karbonatace betonu je vodní součinitel. Obecně hloubku karbonatace nejvíce ovlivňuje redukce vodního součinitele. Na míru karbonatace betonů s vysokým obsahem elektrárenských popílků má však také vliv ošetřování a vlhkost prostředí, ve kterém jsou uloženy. Vlhké prostředí negativně ovlivňuje míru karbonatace, ale na druhou stranu velmi příznivě působí na ošetřování betonu a podporuje pucolánovou reakci popílků. Ošetřování betonu ve vlhkém prostředí způsobuje zvýšení hutnosti v povrchových vrstvách a tím se redukuje výskyt a velikosti pórů. To má za následek snížení propustnosti, čímž se snižuje míra difúze oxidu uhličitého. Popílkové betony bez řádného ošetřování vykazují podobné, nebo nepatrně horší výsledky při zkoušení míry karbonatace. Avšak u betonů s vysokým obsahem elektrárenských popílků nižších pevnostních tříd, které byly vystaveny vyšší koncentraci oxidu uhličitého, zkoušky prokázaly nižší odolnost proti karbonataci. I u popílkových betonů s náhradou až 50 % cementu popílkem vyšších pevnostních tříd karbonatace postupuje rychleji než u betonů pouze z portlandského cementu, avšak délkou a způsobem počátečního ošetřování

můžeme tuto odolnost podstatně zvýšit. Za ideálních podmínek se může odolnost popílkového betonu přiblížit, nebo i vyrovnat odolnosti klasického betonu.

Pokud je relativní vlhkost prostředí nižší než 25 %, ke karbonataci vůbec nedochází a to důvodu nedostatku volné vody potřebné pro reakci. Karbonatace také neprobíhá v prostředí s relativní vlhkostí blížící se 100 %, protože beton je zcela nasycen volnou vodou z okolí. Ideální pro karbonataci je relativní vlhkost prostředí mezi 50 % a 75 %. Rychlost karbonatace je také ovlivněna teplotou prostředí. Vyšší teplota podporuje vysychání betonu, ale na druhou stranu zvyšuje rychlost a intenzitu reakce. Karbonatace může být také redukována ochrannými nátěry, které zamezí přístupu vzdušné vlhkosti k betonu a tím snížení difúze oxidu uhličitého. [25] [26] [27] [28] [29]

Younsi a kol. [30] (Obr. č. 9) provedli výzkum, ze kterého vyplývá, že velice záleží na způsobu a délce ošetřování betonu.



Obr. č. 9: Hloubka karbonatace naměřená po jednom roce v laboratorních podmínkách při teplotě 20 °C a vlhkosti 50 – 70 % pro vzorky ošetřované ve vodě a na vzduchu [30]

2.13.2 Podněty podporující karbonataci a vyvolání koroze betonářské oceli

„Ke korozi betonářské výztuže u betonů s vysokým obsahem elektrárenských popílků může docházet, pokud není beton dostatečně ošetřován a pokud není

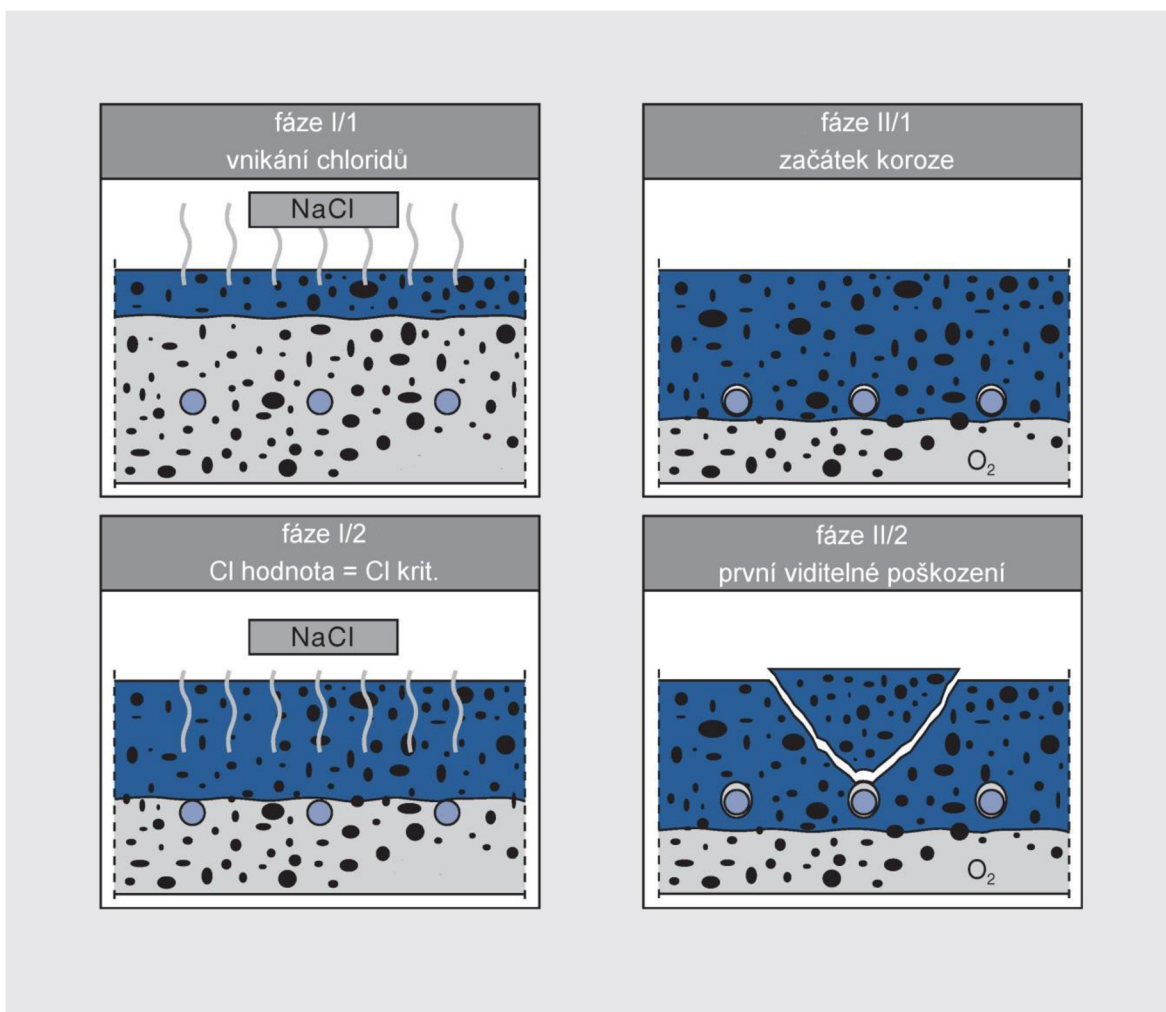
dodržení vodní součinitel. Vysoké pH betonu je způsobeno přítomností alkalických hydroxidů v pórech, které obvykle vytváří pH 13 a množství pevného hydroxidu vápenatého Ca(OH)_2 , který funguje jako vyrovnávací činidlo pro udržení vyššího pH i za nepřítomnosti alkálií. Nasycený roztok hydroxidu vápenatého má pH 12,45. Oxid uhličitý z atmosféry může proniknout do betonu, chemicky reagovat s alkáliemi a vápennými hydroxidy a tím produkovat uhličitany. Tento proces karbonatace vyústí ve významnou redukci pH betonu a zkarbonatovaný beton má poté pH menší než 9. Pokud proces karbonatace začínající na povrchu betonu vystaveného atmosféře pronikne přes krycí vrstvu betonu, pH v okolí oceli poklesne dostatečně na to, aby zrušilo pasivační funkci krycí vrstvy betonu a tím nastartovalo korozi oceli. Snížení zásaditosti při karbonataci v pórech tmelu vede tedy ke korozi výztuže, narušení krycí vrstvy betonu, jeho případnému drolení a následně taky potřebu obtížných a nákladných oprav. “ [26] [29] [40]

2.14 Propustnost

Obecně platí, že se snižující se propustností se zvyšuje trvanlivost betonu. Na propustnost betonu má vliv množství faktorů např. pevnost, vodní součinitel, použité frakce kameniva, množství cementové matrice a ošetřování. Prostřednictvím pucolanity, popílek chemicky reaguje s Ca(OH)_2 a vodou a tím produkuje C-S-H gel. Ca(OH)_2 je spotřebováno pucolánovou reakcí a převedeno na hydratační produkty, podobné hydratačním produktům cementu. Tyto reakce snižují riziko vyplavování Ca(OH)_2 . Ca(OH)_2 je rozpustný ve vodě, a tak se může ze ztvrdlého betonu vyluhovat na povrch. Použití popílku může mít za následek značné utěsnění pórů. Pucolánová reakce má za následek přetvoření a vyplnění velkých pórů a tím se značně sníží propustnost pojivého systému. Redukce propustnosti popílkového betonu může snížit rychlost průsaku vody, agresivních chemikálií a kyslíku. Z toho vyplývá, že trvanlivost betonu bude značně zvýšena, protože agresivní látky nemohou pronikat příliš hluboko do betonu, a tak je lépe ochráněna nejen betonová matrice ale i betonářská výztuž. Propustnost betonu se zvyšuje se stářím betonu, neboli čím více pokročí hydratační reakce, tím se snižuje propustnost betonu. To samozřejmě platí i pro pucolánovou reakci, která však trvá déle než hydratace klasického cementu. Do 28 dní zrání, kdy dochází k malé pucolánové aktivitě, jsou popílkové betony propustné více, než klasické betony z portlandského cementu. Avšak v období mezi 28 dnem a 6 měsíci zrání

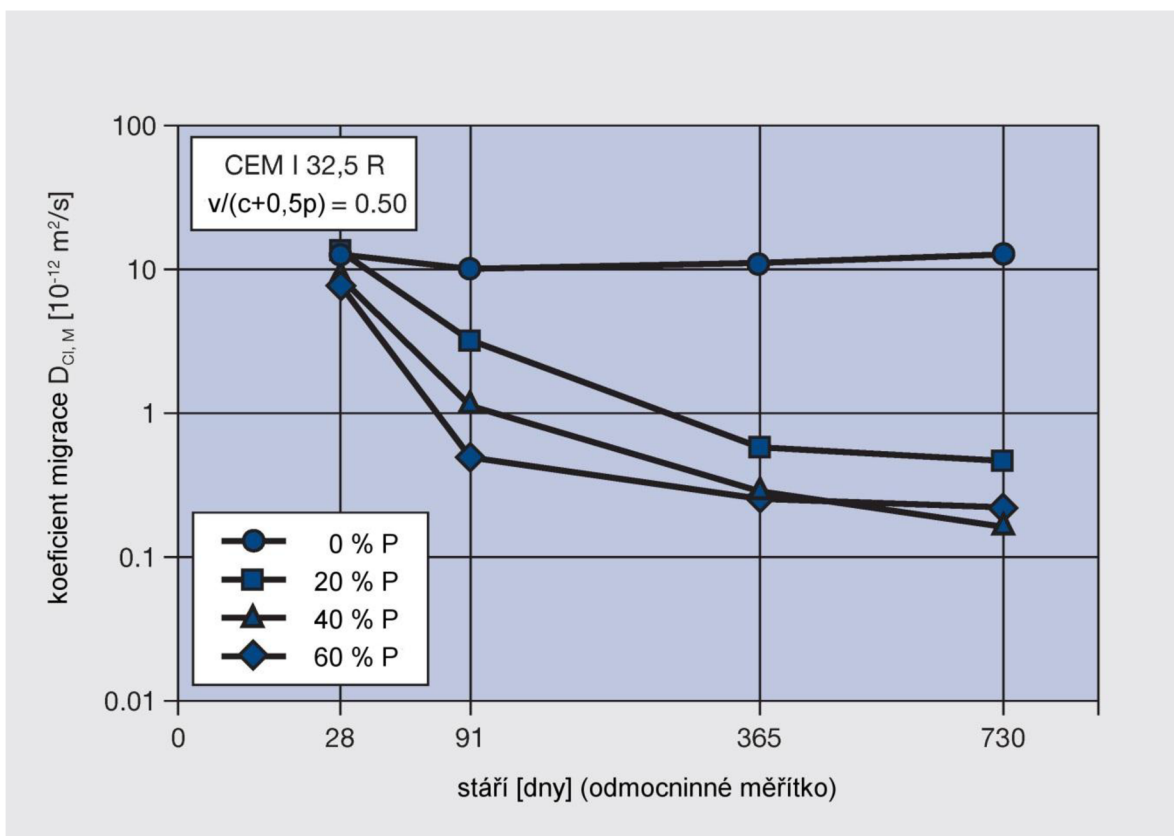
jsou popílkové betony mnohem méně propustné, což je způsobeno právě pomalou, ale dlouhotrvající pucolánovou reakcí popílku. Betony s vysokým obsahem elektrárenských popílků při vhodném ošetřování jsou schopny poskytnout vynikající vodotěsnost a trvanlivost. Použitím popílku do betonu snižujeme původní množství vody a v kombinaci s vytvářejícími se produkty v cementovém systému to vede k menší pórovitosti a nespojitě, přerušované pórovité struktuře, která zmenšuje propustnost samotného betonu. Musí se ale znovu zdůraznit, že propustnost betonů s vysokým obsahem elektrárenských popílků závisí na jejich vhodném ošetřování.

2.15 Difúzní odpor popílkového betonu proti pronikání chloridů



Obr. č. 10: Schematické znázornění fází koroze ocele v betonu indukované chloridy [32]

Obrázek č. 11 ukazuje časový vývoj koeficientu migrace (srovnatelný s koeficientem difúze chloridů) pro maltu a betony s cementem CEM I 42,5 R a s rozdílnými obsahy popílku. U zvolených, přibližně stejných 28 denních pevností maltových směsí se ukázalo, že po 28 dnech se nezávisle na obsahu popílku dosáhne shodný difúzní odpor proti pronikání chloridů, jako u adekvátních betonů s cementem CEM I 42,5 R bez obsahu popílku. Zatímco koeficient migrace pro portlandský cement zůstal během zkoumaných 730 dní téměř nezměněný, se zvyšujícím se obsahem popílku se po 90 dnech výrazně u těchto záměsí snížily koeficienty migrace. U směsí se 40 hm. %, resp. 60 hm. % popílku z hmotnosti cementu byly v těchto časových termínech naměřené přibližně stejné koeficienty migrace. [32] [36]



Obr. č. 11: Vliv obsahu popílku na časový vývoj koeficientu migrace chloridů v normových maltách [32]

Charakteristická příčina silného nárůstu difúzního odporu směsí s obsahem popílku se odůvodňuje změnou struktury vlivem pucolánové reakce popílku. Kontinuita kapilární struktury se účinně přerušuje C-S-H fázemi vzniklými díky pucolánové reakci popílku. Tento zvláštní účinek popílku se popisuje výrazem „pore-blocking effect“. Objem kapilárních pórů se tímto působením nesníží, případně se sníží jen v malé míře, avšak určité podíly pórů už nebudou přístupné pro přenos kapalných médií. Produkty vznikající při reakci popílku se projevují zejména v oblasti vstupu pórů, případně v pórových kanálcích, čímž se omezí nebo dokonce znemožní vniknutí či průtok do prostoru pórů nacházejících se za nimi. [32] [35]

2.16 Využití fluidních popílků pro výrobu betonu

Fluidní popílek je druhotná surovina fluidního spalování fosilních paliv. Teplota tohoto procesu je pouze 850 °C a to způsobuje nestálost v chemickém složení. Kvůli nestejnému chování popílku v betonu, není jeho použití jako příměsi do betonu povoleno. Fluidní popílek obsahuje podíl nerozpustného anhydritu

CaSO_4 II, volné CaO a částečně rozložené jílové minerály. Hlavním důvodem, proč se nepoužívá fluidní popílek do betonu, je vysoký obsah síranů, které jsou příčinou vzniku sekundárního ettringitu $\text{C}_3\text{A}\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$.

Fluidní popílek má ovšem využití v jiných oblastech stavebnictví např. výroba stabilizátů, jež nahrazují výplňové betony, nebo výroba pórobetonu, umělých kameniv studenou cestou, nebo pro solidifikaci nebezpečných odpadů. [37] [38] [39]

3 Praktická část

3.1 Cíl praktické části

Cílem praktické části je navrhnout 3 třídy betonu C16/20, C25/30 a C30/37 s vysokým obsahem elektrárenských popílků pro konzistenci S4. Od každé receptury vyrobit zkušební tělesa 150 x 150 x 150 mm, na kterých ověřit pevnost v tlaku po 7, 28 a 56 dnech, mrazuvzdornost na 50 cyklů a vodotěsnost betonu.

3.2 Metodika práce

1. Etapa

Návrh 3 tříd betonů C16/20, C25/30 a C30/37 s vysokým obsahem elektrárenských popílků. Od každé třídy byly navrženy 2 receptury s rozdílným množstvím popílku jako příměsí. Cement byl použit CEM I 42,5 R, kamenivo frakce 0-4 mm těžené Žabčice, kamenivo 8-16 mm drcené Olbramovice, popílek z elektrárny Dětmorovice. Receptury byly navrženy na konzistenci S4. Od každé receptury bylo vyrobeno 10 krychlí o rozměrech 150 x 150 x 150 mm.

2. Etapa

Namíchání betonových směsí, zkoušení vlastností čerstvého betonu a výroba zkušebních těles.

Provedené zkoušky:

- stanovení objemové hmotnosti v čerstvém stavu
- stanovení konzistence betonu sednutím kužele

3. Etapa

Zkoušení vlastností betonu v zatvrdlém stavu.

Provedené zkoušky:

- stanovení objemové hmotnosti v zatvrdlém stavu
- stanovení pevnosti v tlaku po 7, 28 a 56 dnech
- stanovení vodotěsnosti betonu po 28 dnech zrání
- stanovení mrazuvzdornosti po 28 dnech zrání

Vzorky byly uloženy ve vlhkém prostředí.

3.3 Provedené zkoušky

3.3.1 Zkoušení vlastností v čerstvém stavu

Po zamíchání byla provedena zkouška konzistence sednutím kužele dle ČSN EN 12350 – 2 Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutím. Poté byla stanovena objemová hmotnost dle ČSN EN 12350 – 6 Zkoušení čerstvého betonu – Část 6: Objemová hmotnost.

3.3.2 Zkoušení vlastností v ztvrdlém stavu

Stanovení objemové hmotnosti v ztvrdlém stavu

Objemová hmotnost v ztvrdlém stavu byla stanovena na krychlích 150 x 150 x 150 mm dle ČSN EN 12390 – 7 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu.

Stanovení pevnosti v tlaku

Pevnost v tlaku byla stanovena pro každou recepturu na 2 krychlích 150 x 150 x 150 mm, po 7, 28 a 56 dnech. Zkoušky byly provedeny dle ČSN EN 12390 – 3 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles.

Stanovení vodotěsnosti betonu

Stanovení vodotěsnosti bylo provedeno vždy na 2 krychlích 150 x 150 x 150 mm pro každou recepturu po 28 dnech zrání ve vlhkém prostředí. Zkouška byla provedena dle ČSN EN 12390-8.

Stanovení mrazuvzdornosti

Mrazuvzdornost byla zkoušena na 2 krychlích 150 x 150 x 150 mm od každé receptury. Zkouška byla provedena dle ČSN 73 1322: Stanovení mrazuvzdornosti betonu. Zkouška započala po 28 dnech uložení těles ve vlhkém prostředí. Každé těleso bylo vystaveno 50 zmrazovacím cyklům. U všech těles byla určena hmotnost před vložením do zkušebního zařízení kvůli určení úbytku hmotnosti.

Výsledkem zkoušky byl úbytek hmotnosti krychlí v procentech a součinitel mrazuvzdornosti = $(f_{cf,mraz}/f_{cf,ref}) * 100$.

3.4 Výsledky zkoušek

3.4.1 Receptura C16/20 FA50

Receptura betonu třídy C16/20 s 50% náhradou cementu popílkem

Složení směsi na m³:

C 16/20 FA50	1 m³	poznámka
CEM I 42,5 R	150	
Popílek	150	50 % náhrada
0 - 4 mm	846	46%
8 - 16 mm	975	54%
voda	175	w = 0,6
Superplastifikátor MAPEI SX14	2,4	0,8% (m _c + m _a)

Tab. č. 1: Složení receptury C16/20 FA50

Vlastnosti čerstvého betonu:

Konzistence sednutí kužele [mm]	180
Objemová hmotnost [kg/m ³]	2300

Tab. č. 2: Vlastnosti čerstvého betonu C16/20 FA50

Vlastnosti zatvrdlého betonu:

Pevnost v tlaku po 7 dnech [N/mm ²]	11,3
Pevnost v tlaku po 28 dnech [N/mm ²]	16
Pevnost v tlaku po 56 dnech [N/mm ²]	18,5
Hodnota průsaku [mm]	nevyhověl
Úbytek hmotnosti [%]	0,01
Součinitel mrazuvzdornosti [%]	60,2

Tab. č. 3: Vlastnosti zatvrdlého betonu C16/20 FA50

3.4.2 Receptura C16/20 FA60

Receptura betonu třídy C16/20 s 60% náhradou cementu popílkem

Složení směsi na m³:

C 16/20 FA60	1 m ³	poznámka
CEM I 42,5 R	135	
Popílek	200	60 % náhrada
0 - 4 mm	825	46%
8 - 16 mm	952	54%
voda	178	w = 0,5
Superplastifikátor MAPEI SX14	2,65	0,8% (m _c + m _a)

Tab. č. 4: Složení receptury C16/20 FA60

Vlastnosti čerstvého betonu:

Konzistence sednutí kužele [mm]	160
Objemová hmotnost [kg/m ³]	2310

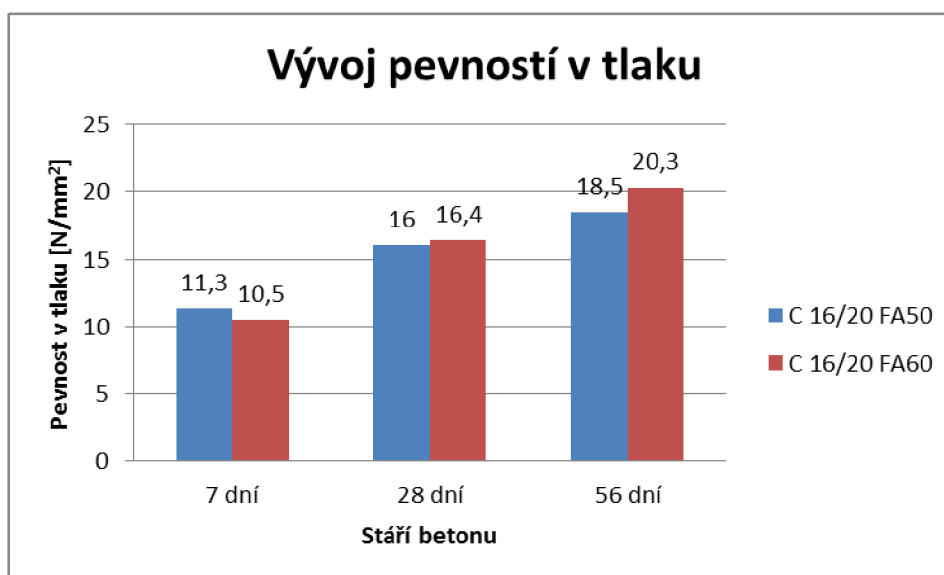
Tab. č. 5: Vlastnosti čerstvého betonu C16/20 FA60

Vlastnosti zatvrdlého betonu:

Pevnost v tlaku po 7 dnech [N/mm ²]	10,5
Pevnost v tlaku po 28 dnech [N/mm ²]	16,4
Pevnost v tlaku po 56 dnech [N/mm ²]	20,3
Hodnota průsaku [mm]	nevyhověl
Úbytek hmotnosti [%]	0,01
Součinitel mrazuvzdornosti [%]	99,4

Tab. č. 6: Vlastnosti zatvrdlého betonu C16/20 FA60

3.4.3 Porovnání vlastností rezeptur C16/20



Obr. č. 12: Graf vývoje pevností v tlaku rezeptur C16/20 FA50 a FA60

Shrnutí výsledků

Obě receptury vykázaly podobný vývoj pevností v tlaku. Beton s 50% náhradou cementu měl o něco větší pevnost po 7 dnech zrání, avšak po 28 a 56 dnech měl větší pevnost v tlaku beton s 60% náhradou cementu. Vodotěsnost obou betonů nevyhověla. Po dvou hodinách ve zkušebním zařízení začala voda prosakovat skrz stěny zkušebního tělesa. Úbytek hmotnosti betonu po 50 zmrazovacích cyklech byla pouhých 0,01 %. Součinitel mrazuvzdornosti betonu s 50% náhradou cementu popílkem byl 60,4 %. U betonu s 60% náhradou byl 99,4 %.

3.4.4 Rezeptura C25/30 FA50

Receptura betonu třídy C25/30 s 50% náhradou cementu popílkem.

Složení směsi na m³:

C 25/30 FA50	1 m ³	poznámka
CEM I 42,5 R	170	
Popílek	170	50 % náhrada
0 - 4 mm	790	45%
8 - 16 mm	985	55%
voda	180	w = 0,5
Superplastifikátor CHRYSOfluid OPTIMA 208	2,7	0,8% (m _c + m _a)

Tab. č. 7: Složení receptury 25/30 FA50

Vlastnosti čerstvého betonu:

Konzistence sednutí kužele [mm]	180
Objemová hmotnost [kg/m^3]	2310

Tab. č. 8: Vlastnosti čerstvého betonu C25/30 FA50

Vlastnosti zatvrdlého betonu:

Pevnost v tlaku po 7 dnech [N/mm^2]	15,2
Pevnost v tlaku po 28 dnech [N/mm^2]	24,4
Pevnost v tlaku po 56 dnech [N/mm^2]	27,7
Hodnota průsaku [mm]	70
Úbytek hmotnosti [%]	0,01
Součinitel mrazuvzdornosti [%]	94,2

Tab. č. 9: Vlastnosti zatvrdlého betonu C25/30 FA50

3.4.5 Receptura C25/30 FA56

Receptura betonu třídy C25/30 s 56% náhradou cementu popílkem

Složení směsi na m^3 :

C 25/30 FA56	1 m^3	poznámka
CEM I 42,5 R	170	
Popílek	220	56 % náhrada
0 - 4 mm	765	44%
8 - 16 mm	955	56%
voda	182	w = 0,5
Superplastifikátor CHRYSOFluid OPTIMA 208	3,11	0,8% ($m_c + m_a$)

Tab. č. 10: Složení receptury 25/30 FA56

Vlastnosti čerstvého betonu:

Konzistence sednutí kužele [mm]	170
Objemová hmotnost [kg/m^3]	2230

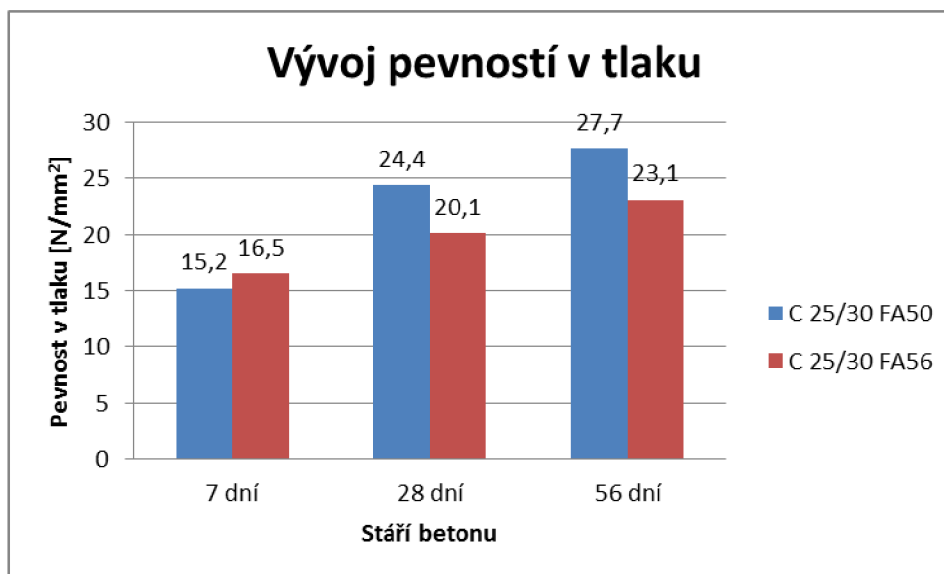
Tab. č. 11: Vlastnosti čerstvého betonu C25/30 FA56

Vlastnosti zatvrdlého betonu:

Pevnost v tlaku po 7 dnech [N/mm ²]	16,5
Pevnost v tlaku po 28 dnech [N/mm ²]	20,1
Pevnost v tlaku po 56 dnech [N/mm ²]	23,1
Hodnota průsaku [mm]	120
Úbytek hmotnosti [%]	0,01
Součinitel mrazuvzdornosti [%]	118,8

Tab. č. 12: Vlastnosti zatvrdlého betonu C25/30 FA56

3.4.6 Porovnání vlastností receptur C25/30



Obr. č. 13: Graf vývoje pevností v tlaku receptur C25/30 FA50 a FA56

Shrnutí výsledků

Beton s vyšším podílem popílků vykázal nižší nárůst pevností v tlaku po 28 a 56 dnech. Oba betony nevyhověli minimální krychelné pevnosti v tlaku po 28 dnech, aby mohly být zařazeny do třídy C25/30. Hodnoty průsaku betonu s 50% náhradou cementu popílkem byly 70 mm a beton s 56% náhradou vykázal hloubku průsaku 120 mm. Po 50 zmrazovacích cyklech byl úbytek hmotnosti obou betonů zanedbatelný a koeficient mrazuvzdornosti byl u obou betonů téměř 100 %.

3.4.7 Receptura C30/37 FA42

Receptura betonu třídy C30/37 s 42% náhradou cementu popílkem

Složení směsi na m³:

C 30/37 FA42	1 m ³	poznámka
CEM I 42,5 R	230	
Popílek	170	42 % náhrada
0 - 4 mm	750	44%
8 - 16 mm	965	56%
voda	185	w = 0,5
Superplastifikátor CHRYSOfluid OPTIMA 228	3,2	0,8% (m _c + m _a)

Tab. č. 13: Složení receptury 30/37 FA42

Vlastnosti čerstvého betonu:

Konzistence sednutí kužele [mm]	170
Objemová hmotnost [kg/m ³]	2300

Tab. č. 14: Vlastnosti čerstvého betonu C30/37 FA42

Vlastnosti zatvrdlého betonu:

Pevnost v tlaku po 7 dnech [N/mm ²]	24,0
Pevnost v tlaku po 28 dnech [N/mm ²]	35,1
Pevnost v tlaku po 56 dnech [N/mm ²]	37,5
Hodnota průsaku [mm]	20
Úbytek hmotnosti [%]	0,00
Součinitel mrazuvzdornosti [%]	109,4

Tab. č. 15: Vlastnosti zatvrdlého betonu C30/37 FA42

3.4.8 Receptura C30/37 FA54

Receptura betonu třídy C30/37 s 54% náhradou cementu popílkem

Složení směsi na m³:

C 30/37 FA54	1 m ³	poznámka
CEM I 42,5 R	185	
Popílek	215	54 % náhrada
0 - 4 mm	743	43%
8 - 16 mm	970	57%
voda	185	w = 0,5
Superplastifikátor CHRYSOfluid OPTIMA 228	3,2	0,8% (m _c + m _a)

Tab. č. 16: Složení receptury 30/37 FA54

Vlastnosti čerstvého betonu:

Konzistence sednutí kužele [mm]	190
Objemová hmotnost [kg/m ³]	2270

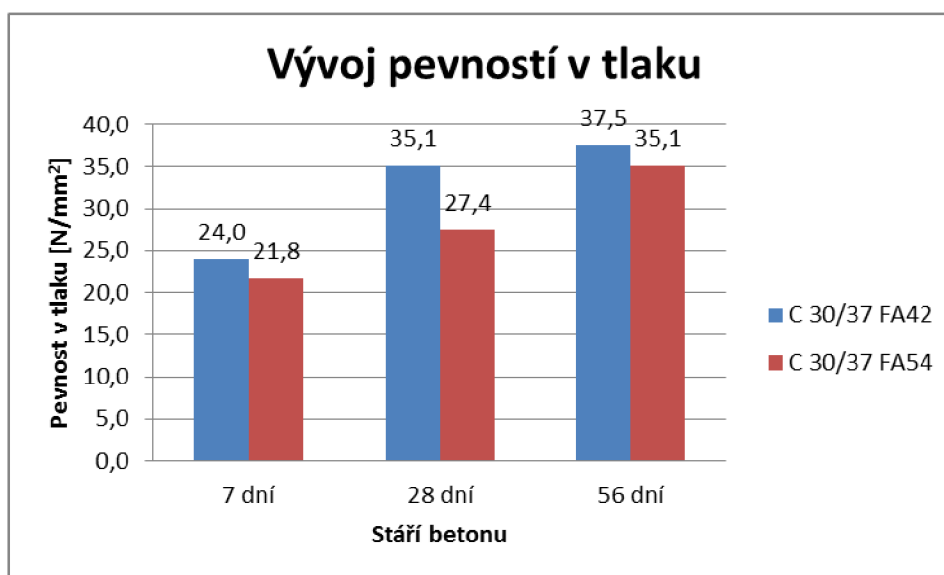
Tab. č. 17: Vlastnosti čerstvého betonu C30/37 FA54

Vlastnosti zatvrdlého betonu:

Pevnost v tlaku po 7 dnech [N/mm ²]	21,8
Pevnost v tlaku po 28 dnech [N/mm ²]	27,4
Pevnost v tlaku po 56 dnech [N/mm ²]	35,1
Hodnota průsaku [mm]	40
Úbytek hmotnosti [%]	0,00
Součinitel mrazuvzdornosti [%]	113,1

Tab. č. 18: Vlastnosti zatvrdlého betonu C30/37 FA54

3.4.9 Porovnání vlastností receptur C30/37



Obr. č. 14: Graf vývoje pevností v tlaku receptur C30/37 FA42 a FA54

Shrnutí výsledků

Oba betony navržené pro pevnostní třídu C30/37 nevyhověli v pevnosti v tlaku po 28 dnech a tudíž je nelze do této třídy zařadit. Beton s 54% náhradou cementu popílkem vykázal značný nárůst pevností mezi 28 a 56 dnem. Ve zkoušce vodotěsnosti oba betony vyhověly s hodnotou průsaku 20 a 40 mm. Úbytek hmotnosti po 50 cyklech nenastal a koeficient mrazuvzdornosti u obou betonů přesáhl 100 %.

4 Závěr

Cílem této práce bylo ověřit vlastnosti betonu s vysokým obsahem elektrárenských popílků. Jaký vliv na pevnost a trvanlivost má náhrada 40 až 70 % cementu elektrárenským popílkem. Zahraniční výzkumy dokazují, že popílek jako příměs má pozitivní vliv na vlastnosti betonu, avšak musí být dodrženy všechny zásady při navrhování receptur tohoto typu. Vodní součinitel by měl být co nejnižší. S tím souvisí použití vyššího množství superplastifikačních přísad. Konečná pevnost betonu je stejná nebo vyšší, než u referenčního betonu. Avšak popílkový beton má pomalejší nárůst pevností a konečných pevností dosahuje v rozmezí jednoho měsíce až půl roku. Trvanlivost betonu s vysokým obsahem elektrárenských popílků záleží také na kvalitním zpracování a hlavně délce a způsobu ošetřování. Pokud by měl být beton vystaven mrazu, musí být náležitě provzdušněn. Tyto betony se také vyznačují velmi nízkou propustností, s čím souvisí odolnost proti kapalným chemicky agresivním prostředím. Hydratační teplo těchto betonů je podstatně nižší ve srovnání s betonem pouze z portlandského cementu, a proto je méně náchylný ke vzniku trhlin. Všechny tyto vlastnosti beton získává až po 28 dnech zrání kvůli pomalejšímu průběhu pucolánové reakce popílku. I když se dodrží všechny zásady při navrhování a provádění předpokládáme, že popílkový beton bude méně odolný proti mrazu a chemickým rozmrazovacím látkám a karbonataci. Betony s vysokým obsahem elektrárenských popílků mají větší odolnost proti odměšování vody a z toho vyplývající menší náchylnost ke vzniku trhlin od plastického smršťování.

V praktické části byly porovnány dvě receptury tříd betonu C16/20, C25/30, C30/37. Každá receptura byla navržena s jiným obsahem elektrárenského popílku. Všechny receptury byly navrženy na konzistenci S4 sednutím kužele. Betony byly ošetřovány ve vlhkém prostředí po celou dobu zrání až do provedení zkoušek. Žádná z receptur nedosáhla požadované pevnosti v tlaku po 28 dnech, aby mohla být zařazena do třídy, pro kterou byla navržena. Avšak všechny receptury vykázaly nezanedbatelný nárůst pevností mezi 28 a 56 dnem a předpokládáme, že by pevnosti nadále stoupaly a dosáhly by požadované pevnosti.

Ve zkoušce vodotěsnosti beton třídy C16/20 nevyhověl. Po dvou hodinách ve zkušebním zařízení začala voda prosakovat skrz všechny stěny zkušebního tělesa a z toho vyplývá, že tento beton není vodotěsný. Beton třídy C25/30 měl průsak okolo 100 mm. Tento beton se také nehodí použít tam, kde působí tlaková voda. Beton třídy C30/37 obstál ve zkoušce vodotěsnosti velice dobře. Hodnota průsaku byla pouhých 20 mm, a tak o tomto betonu můžeme hovořit jako o vodotěsném.

U zkoušky mrazuvzdornosti byl úbytek hmotností všech betonů velice nízký a to 0,1 % nebo i méně. Všechny betony kromě receptury C16/20 FA50 (60,4 %) měly součinitel mrazuvzdornosti přibližně 100 % a některé i více. Nejlépe na tom byl beton třídy C30/37, který měl součinitel mrazuvzdornosti 109,4 % pro recepturu FA42 a 113,1 pro recepturu FA54.

Použití elektrárenského popílku jako příměsi do betonu je velice výhodné z hlediska ekonomického (cement je několikanásobně dražší než popílek), ekologického (popílek je druhotná surovina) a také kvůli jeho vlastnostem.

5 Seznam použitých zdrojů

- [1] ČEZ [online]. 2008 [cit. 20012-05-22]. Dostupný z <http://www.cez.cz>
- [2] ČSN EN 450-1 „Popílek do betonu – část 1: Definice, specifikace a kritéria shody“
- [3] Popílek: Odpad. Informační centrum stavebních hmot s využitím odpadů: VUT v Brně, Ústav stavebních hmot a dílců [online]. [cit. 2011-08-05]. Dostupné z: <http://waste.fce.vutbr.cz/Odpad/Popilek.html>
- [4] Puntke, W.: Wasseranspruch von feinen Kornhaufwerken. beton 52 (2002) H. 5, S. 242 – 248
- [5] Sybertz, F.: Beurteilung der Wirksamkeit von Steinkohlen flugaschenals Betonzusatzstoff. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, H. 434, BeuthVerlag, Berlin 1993
- [6] Rafat Siddique: Performance characteristics of high-volume Class F fly ash concrete; Cement and Concrete Research, Volume 34, Issue 3, March 2004, Pages 487–493
- [7] D Ravina, P.K Mehta: Properties of fresh concrete containing large amounts of flyash Cem. Concr. Res., 16 (2) (1986), pp. 227–238
- [8] V.M Malhotra: Durability of concrete incorporating high-volume of low-calcium (ASTM class F) flyash; Cem. Concr. Compos., 12 (4) (1990), pp. 271–277
- [9] G.M Giaccio, V.M Malhotra: Concrete incorporating high volumes of ASTM Class F flyash Cem. Concr. Aggregates, 10 (2) (1988), pp. 88–95
- [10] W.S Langlely, G.G Carette, V.M Malhotra: Structural concrete incorporating high volumes of ASTM Class F flyash ACI Mater. J., 86 (5) (1989), pp. 507–514
- [11] M Maslehuddin: Effect of sand replacement on the early-age strength gain and long-term corrosion-resisting characteristics of fly ash concrete; ACI Mater. J., 86 (1) (1989), pp. 58–62

- [12] Obada Kayali, M. Sharfuddin Ahmed: Assessment of high volume replacement fly ash concrete – Concept of performance index; Construction and Building Materials, Volume 39, February 2013, Pages 71–76
- [13] LANGLEY, W.S. a G.H. LEAMAN. PRACTICAL USES FOR HIGH-VOLUME FLY ASH CONCRETE UTILIZING A LOW CALCIUM FLY ASH. In: FlyAsh, SilicaFume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete. 38800 Country Club Drive Farmington Hills, MI 48331 USA: American Concrete Institute, 1998, s. 545-574.
- [14] BILODEAU, A., V.M. MALHOTRA a P.T. SEABROOK. MATERIALS TECHNOLOGY LABORATORY: Use of High-Volume Fly Ash Concrete at the Liu Centre. 2001. Dostupné z: <http://ecosmartconcrete.com/docs/csriucanmet.pdf>
- [15] GILLIES, Veronica a Busby PERKINS. TheEcoSmartConcrete Project: Resultsfromthe Case Studies [online]. 2001, 14 s. [cit. 2011-10-18]. Dostupné z: <http://ecosmartconcrete.com/docs/csrsummary.pdf>
- [16] Setzer, M. J.: Einfluss des Wassergehaltes auf die Eigenschaften des erhärteten Betons. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, H. 280, S. 43 – 117, Beuth Verlag Gmb H, Berlin 1980
- [17] Härdtl, R.: Veränderung des Betongefüges durch dieWirkung von Steinkohlenflugascheund ihr Einfluss auf die Betoneigenschaften. Schriftenreihe des Deutschen Ausschussesfür Stahlbeton, H. 448, Beuth Verlag GmbH, Berlin 1995
- [18] Schieß, P.: Gutachtliche Stellungnahme zur Verwendung von Steinkohlenflugasche in Beton mithohem Frost- Tausalwiderstandfür den Straßenbau. Gutachten B2222/2 vom 21. 8. 1998, Auftraggeber: Bau Mineral Gmb H Herten
- [19] Brameshuber, W., Schießl, P.; Uebachs, S.; Brandes, C.; Eck, T.: Einfluss von Flugascheauf den Frost- Tausalwiderstand von Beton, Abschlussberichtz um Verbundvorhaben IBAC/RWTH Aachenundcbm/TU München, Bericht-Nr. F 759/2 (VGB P 203), Aachen 2005

- [20] Schießl, P.; Härdtl, R.: Einfluss von Steinkohlenflugasche (SFA) auf den Sulfatwiderstand von Betonen. Forschungsbericht F 262, Institut für Bauforschung der RWTH Aachen, Aachen 1992
- [21] Schießl, P.; Meng, B.; Härdtl, R.: Verbesserung des Sulfatwiderstands von Beton durch Steinkohlenflugasche. Forschungsbericht F 1262, Institut für Bauforschung der RWTH Aachen, Aachen 1996
- [22] MEHTA, V.M.Malhotra and P.K.High-performance, high-volume fly ash concrete: materials, mixture proportioning, properties, construction practice, and case histories. Ottawa, Canada: Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development, Inc, 2002. ISBN 09-731-5070-X.
- [23] LOHTIA, R.C.Joshi and R.P. Flyash in concrete: production, properties and uses. Australia: Gordon and Breach Science Publishers, 1997. ISBN 90-569-9580-4
- [24] Schießl, P.; Härdtl, R.: Betone für massige Bauteile. Beton 46 (1996) H. 11, S. 668 – 672
- [25] BERRY, E a V MALHOTRA. Flyash in concrete: es cendres volantes dans le béton. Editor V Malhotra. Ottawa: CANMET, Canadian Centre for Mineral and Energy Technology, c1986, 178 s. ISBN 06-605-3261-1.
- [26] PARROTT, L.J.: A review of carbonation in reinforced concrete. Crowthorne, Berkshire, UK: Cement and Concrete Association, 1987. ISBN 07-210-1365-1
- [27] THOMAS, M.D.A. a J.D. MATTHEWS: Carbonation of fly ash concrete. Magazine of Concrete Research. New York: Thomas Telford Ltd, 1992, roč. 44, č. 160, p. 217-228. ISSN 0024-9831.
- [28] GEBAUER, J. Some observations on the carbonation of fly ash concrete. 1982, 155 s
- [29] ROBERTS. BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT, Watford (UK). Carbonation of concrete made with dense natural aggregates. 1981.

- [30] A. Younsi, P. Turcry, E. Rozière, A. Aït-Mokhtar, A. Loukili: Performance-based design and carbonation of concrete with high fly ash content; *Cement and Concrete Composites*, Volume 33, Issue 10, November 2011, Pages 993–1000
- [31] V. Sivasundaram, G.G.Carette, V.M.Malhotra: Long-term strength development of high-volume fly ash concrete; *Cement and Concrete Composites*, Volume 12, Issue 4, 1990, Pages 263–270
- [32] Hela R., Sokol P.: *Kniha popílek*, Praha, Brno, 2013
- [33] Müller, H. S.; Guse, U.; Schneider, E.: Leistungsfähigkeit von Beton mit Flugasche. *Beton- und Stahlbetonbau* 100 (2005) H. 8, S. 693 – 704
- [34] Kittiphong, Amnadnua, Weerachart Tangchirapat, Chai Jaturapitakkul: Strength, Water Permeability, and Heat Evolution of High Strength Concrete made from the Mixture of Calcium Carbide Residue and FlyAsh; *Materials & Design*, Available online 9 May 2013
- [35] Marsh, B. K.; Day, R. L.; Bonner, D. G.: Pore Structure Characteristics Affecting the Permeability of Cement Pastes Containing Fly-Ash. *Cement and Concrete Research* 15 (1985) H. 6, S. 1027 – 1038
- [36] Wiens, U.: *Zur Wirkung von Steinkohlen flugasche auf die chloridinduzierte Korrosion von Stahl in Beton*. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, H. 551, Beuth Verlag GmbH, Berlin 2005
- [37] ČERNÝ, V. Kameniva ze spékaných popílků. In sborník *Juniorstav 2007*. -. Brno, VUT Brno. 2007. p. 277 - 277. ISBN 978-80-214-3337-3
- [38] BEDNARÍK, V., VONDRUŠKA, M., *Stabilizace / solidifikace nebezpečných odpadů pomocí popílku z fluidního spalování uhlí*, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická
- [39] BALKOVIC, S., PETEJA, M., DRÁBIK, M. Výroba pórobetonu z fluidního popolčka. In VI. Odborná konference *MALTOVINY 2007*. Brno, VUT v Brně. 2007. ISBN 978-80-214-3520-9

[40] VAŠEK, Tomáš. Vliv elektrárenských popílků na trvanlivost betonů. Brno, 2011. 70 s., Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.. [cit. 24. 5. 2013]

6 Seznam použitých zkratek a symbolů

HVFAC	beton s vysokým obsahem elektrárenských popílků
THD	Ústav technologie stavebních hmot a dílců
FAST	Fakulta stavební
VUT	Vysoké učení technické v Brně
CHRL	chemické rozmrazovací látky
SCC	samozhutnitelné betony
ZŽ	ztráta žíháním [%]
w	vodní součinitel
f_{cf}	pevnost v tahu za ohybu [MPa]
f_c	pevnost v tlaku [MPa]
ρ	objemová hmotnost [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
m_c	hmotnost cementu [kg]
m_a	hmotnost příměsi [kg]