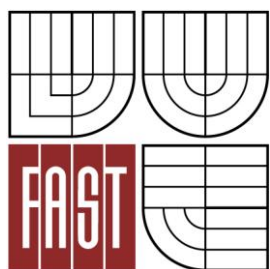




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A
DÍLCŮ

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

VLIV ELEKTRÁRENSKÝCH POPÍLKŮ NA TRVANLIVOST BETONŮ

EFFECT OF FLY ASH ON THE DURABILITY OF CONCRETE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Tomáš Vašek

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. RUDOLF HELA, CSc.

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

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

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Tomáš Vašek
Název	Vliv elektrárenských popílků na trvanlivost betonů
Vedoucí bakalářské práce	prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
Datum zadání bakalářské práce	30. 11. 2011
Datum odevzdání bakalářské práce	25. 5. 2012
V Brně dne 30. 11. 2011	

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

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

Podklady a literatura

Odborné zahraniční i tuzemské časopisy, sborníky z odborných symposií a konferencí, internetové zdroje odborných publikací z daného oboru.

Zásady pro vypracování

Využívání elektrárenských popílků při výrobě dosáhlo v uplynulých 10 letech i vlivem ekonomické krize a pod tlakem ekologických dopadů výrazného navýšení. V současné době se v ČR používá pro výrobu hlavně transportbetonu el. popílek v min. 60% produkce. Využití pro běžné třídy agresivního prostředí XO, XC, XD v podstatě nic nebrání ani stávající legislativní předpisy. Pro ostatní třídy, hlavně XF, resp. XA jsou již kladeny různé překážky a v odborné veřejnosti je k těmto možnostem značná nedůvěra.

Cílem vaší práce bude prostudovat odborné zahraniční zdroje týkající se problematiky dlouhodobé trvanlivosti a životnosti betonů s částečnou náhradou cementu el. popílkem s vysokoteplotního spalování. Sestavit podrobnou rešerši možností využití ve všech oblastech stavebnictví, hlavně v dopravních stavbách i pro podkladní vrstvy vozovek. Popsat mechanismy působení el. popílků v mikrostruktuře cementových betonů a jejich případnou náchylnost na degradaci v různých prostředích. Částečnou pozornost věnovat taktéž problematice využití popílků z nízkoteplotního spalování (fluidní popílkem) pro výrobu betonů. V experimentální části pak ověřte trvanlivost betonů s hnědouhelným (elektrárna Počeradý) a černouhelným popílkem (elektrárna Dětmárovice) pro beton třídy C30/37, XF4, S3 a porovnejte s referenčním betonem vyrobeným pouze s cementem CEM I 42,5. Zaměřte se na optimální náhradu cementu popílkem pro dosažená vyhovující odolnosti povrchů podle ČSN 73 1326 na 100 zmrazovacích cyklů.

Rozsah : min 40 stran

Předepsané přílohy

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

Abstrakt

Bakalářská práce sestává ze dvou částí, tedy teoretické a praktické. V teoretické části jsou uvedeny základní informace o výrobě a rozdělení elektrérenských popílků, vývoj a podstata betonů s vysokým obsahem popílku nahrazujícího cement a pohled na tyto betony v České republice. Dále jsou uvedeny světové poznatky chování takových betonů v rámci trvanlivosti a potencionální problémy, jež na ně mohou působit. Teoretická část končí shrnutím použití elektrérenských popílků v různých oblastech stavebnictví. V praktické části jsou porovnány vlastnosti jednotlivých receptur betonu obsahujících popílek s recepturou obsahující pouze portlandský cement. Závěrem je vyhodnocení praktické části a uvedení poznatků vlivu elektrérenských popílků na trvanlivost betonu.

Klíčová slova

vysoký obsah, popílek, beton, trvanlivost, druhotná surovina, trvale udržitelný rozvoj, chemické rozmrazovací prostředky, mráz

Abstract

Bachelor thesis consists of two parts, theoretical and practical. In the theoretical section provides basic information on the manufacture of fly ash, development and principle of High Volume Fly Ash Concrete and view on this type of concrete in the Czech Republic. Listed below are the world's knowledge of conduct of durability and potential problems that can act on them. The theoretical part ends with summary of the utilization of fly ash in various areas of construction industry. In the practical part compares the characteristics of each recipe containing fly ash with recipe containing only Portland cement. Finally, is evaluation of results of practical part and influence on the durability of fly ash concrete.

Keywords

high volume, fly ash, concrete, durability, secondary raw material, sustainable development, chloride permeability, freeze and thaw

Bibliografická citace VŠKP

VAŠEK, Tomáš. *Vliv elektrérenských 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..

Prohlášení:

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

V Brně dne 25.5.2012

.....
Tomáš Vašek

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 2012

Tomáš Vašek

Obsah

1	Úvod	9
2	Teoretická část	10
2.1	Základní informace	10
2.2	Popílky a jejich rozdělení	11
2.3	Vývoj betonu s vysokým obsahem popílku HVFAC v České republice	13
2.4	Užití popílků v betonu a účinky jeho použití na vlastnosti betonu – potencionální problémy.....	14
2.4.1	<i>Užití, vlastnosti a definice HVFAC</i>	<i>14</i>
2.4.2	<i>Odolnost vůči chemickým rozmrazovacím látkám.....</i>	<i>15</i>
2.4.3	<i>Odolnost vůči síranům</i>	<i>17</i>
2.4.4	<i>Plastické smrštění</i>	<i>18</i>
2.4.5	<i>Hydratační teplo</i>	<i>18</i>
2.4.6	<i>Pevnost</i>	<i>19</i>
2.4.7	<i>Propustnost</i>	<i>20</i>
2.4.8	<i>Efekt popílků u alkalicko-křemičité reakce</i>	<i>23</i>
2.4.9	<i>Karbonatace</i>	<i>24</i>
2.5	Využití popílku v různých oblastech stavebnictví	28
2.5.1	<i>Použití popílku do cementobetonových vozovek.....</i>	<i>28</i>
2.5.2	<i>Použití popílků do podkladních vrstev vozovky</i>	<i>34</i>
2.5.3	<i>Popílkové stabilizáty</i>	<i>36</i>
2.5.4	<i>Vysoká náhrada cementu popínkem v samozhutnitelných betonech</i>	<i>38</i>
2.5.5	<i>Další možnosti použití popílků spalovaných klasickým způsobem</i>	<i>40</i>
2.5.6	<i>Využití fluidních popílků pro výrobu betonů.....</i>	<i>40</i>
3	Praktická část	42
3.1	Cíl praktické části.....	42
3.2	Metodika práce	43
3.3	Použité materiály	44
3.4	Provedené zkoušky.....	46
3.4.1	<i>Zkoušení vlastností v čerstvém stavu</i>	<i>46</i>
3.4.2	<i>Zkoušení vlastností v ztvrdlém stavu</i>	<i>46</i>
3.5	Výsledky měření	48
3.5.1	<i>Receptura REF C25/30</i>	<i>48</i>
3.5.2	<i>Receptura C-DET C25/30.....</i>	<i>49</i>
3.5.3	<i>Receptura H-CHVA C25/30</i>	<i>50</i>
3.5.4	<i>Vývoj vlastností receptur C25/30</i>	<i>51</i>
3.5.5	<i>Receptura REF C30/37 XF4.....</i>	<i>53</i>
3.5.6	<i>Receptura C-DET20 C30/37 XF4</i>	<i>54</i>
3.5.7	<i>Receptura H-CHVA20 C30/37 XF4.....</i>	<i>55</i>
3.5.8	<i>Receptura C-DET30 C30/37 XF4</i>	<i>56</i>
3.5.9	<i>Receptura H-CHVA30 C30/37 XF4.....</i>	<i>57</i>
3.5.10	<i>Receptura C-DET50 C30/37 XF4</i>	<i>58</i>

3.5.11	<i>Receptura H-CHVA50 C30/37 XF4</i>	59
3.5.12	<i>Vývoj vlastností receptur C30/37 XF4</i>	60
4	Závěr	63
5	Seznam použitých zdrojů	65
6	Seznam použitých zkratek a symbolů	70

1 ÚVOD

V posledních letech se kladou čím dál tím vyšší environmentální požadavky na různá odvětví průmyslu. Klade se důraz např. na průmyslové odpady, jež se musí kontrolovaně skladovat, ale také na tvorbu skleníkových plynů do ovzduší, zejména CO₂, jehož množství rapidně stoupá. Využití popílku do betonu je žádoucí, jelikož z části řeší oba tyto environmentální problémy. Popílek jakožto odpad z elektráren se využije jako vstupní surovina a z toho vyplývá, že se nemusí dále skladovat. Tím také nahrazuje cement, jehož výroba do ovzduší produkuje při 1t produktu, přibližně 0,85t CO₂. Využití elektrárenských popílků do betonů se výrazně zvýšilo i vlivem ekonomické krize, díky jeho nízké ceně. Popílek, jakožto odpad je oblíbená surovina do betonu, ale zatím je k němu v České republice značná nedůvěra v užití hlavně pro třídy agresivního prostředí XF. Abychom mohli do této problematiky více nahlédnout, je potřeba získat různé poznatky ze zahraničí, týkající se problematiky dlouhodobé trvanlivosti a životnosti betonů s využitím elektrárenských popílků z vysokoteplotního spalování. Dále uvést možnosti využití el. popílků v různých oblastech betonářských technologií, zejména pro dopravní stavby a pro podkladní vrstvy vozovek.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Základní informace

Popílek je vedlejší nehořlavý anorganický produkt z elektráren, jež spalují uhlí. Toto uhlí je spalováno za vysokých teplot a většina minerálních nečistot je unášena pryč, ve formě popela. Roztavený popel je ochlazován a rychle tuhne jako kulaté a skelné částice. Částice popílku mají průměr od 1 do 150 μm . Popílek je nadále odstraňován ze spalin pomocí řady mechanických separátorů, či elektrostatických odlučovačů a filtrů. Ne všechny popílky jsou ovšem vhodné pro použití do betonů. Je mnoho elektrárenských společností, které používají čistící systémy k odstranění oxidu siřičitého z plynových zásobníků. Popílek je tedy smíchán s produkty z tohoto čistícího zařízení a tento poté obsahuje volné vápno, sulfáty vápníku nebo siřičitany. Tyto popílky prozatím tedy nelze do betonu použít. (Burden, 2006 [1]).

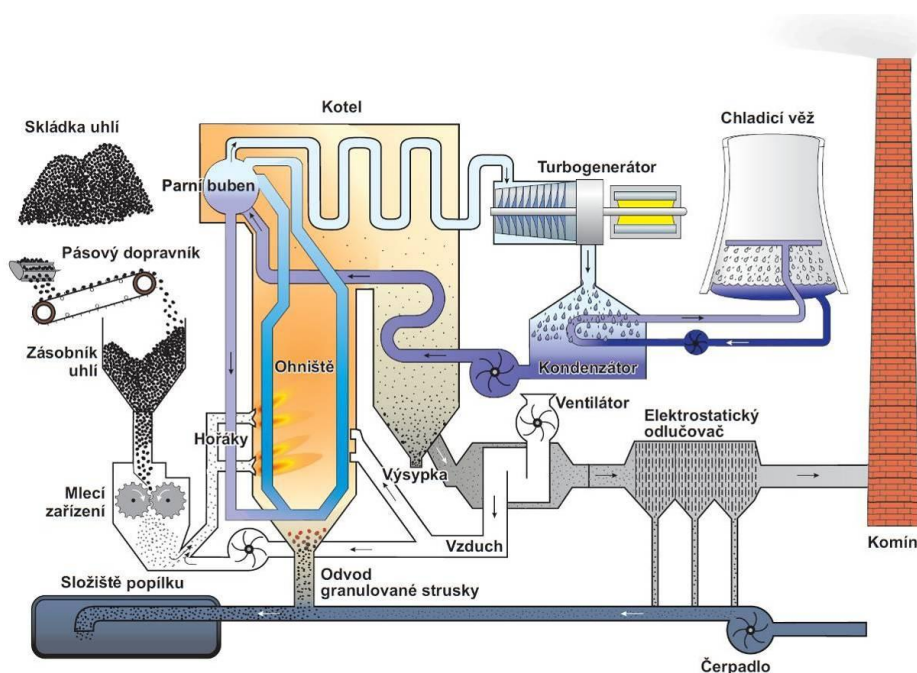
Samotný popílek hydraulický není. Znamená to tedy, že sám o sobě nereaguje s vodou jako cement. Pokud je však smíchán s hydroxidem vápenatým z cementu, reaguje podobně a vytváří podobné produkty jako při reakci cementu a vody. Tato vlastnost je odlišná podle typu popílku a nazývá se „puccolanita“. Puccolanová reakce může být porušena, pokud je popílek delší dobu skladován ve vlhkém prostředí. [39]

2.2 Popílký a jejich rozdělení

Ve světě se popílek klasifikuje dle ASTM C618 do dvou tříd a to C, nebo F. Třída F je vyráběna převážně z černého uhlí, nebo antracitu a třída C z uhlí hnědého nebo lignitu, ale hlavním kritériem je chemické složení. $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 70\%$ pro třídu F a $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 50\%$ pro třídu C. Černouhelné popílký jsou obvykle spalovány v o něco vyšších teplotách a mají sklovitější charakter zrn, než li hnědouhelné. Nicméně i popílký z hnědého uhlí a lignitu často splňují chemické požadavky pro třídu F. To způsobilo občas chaos a proto např. v Kanadě vznikla norma, která klasifikuje popílký dle obsahu CaO. Typ F < 8% CaO, Typ CI 8-20% CaO, a typ CH >20% CaO. (Burden, 2006 [1]).

Dle druhu technologie výroby se popílký dělí na popílký z klasického spalování a z fluidního spalování.

U popílků spalovaných klasickým způsobem se teplota spalování pohybuje okolo 1400 až 1600°C. Obsahují především sklovitou fází, obvykle nad 50%, která hraje důležitou roli v reaktivitě popílků s $\text{Ca}(\text{OH})_2$, za vzniku C-S-H gelu. Dále obsahuje mullit, jež se reakce zúčastňuje pouze za hydrotermálních podmínek a β -křemen.



Obr. č. 1 Schéma tepelné elektrárny s klasickým spalováním

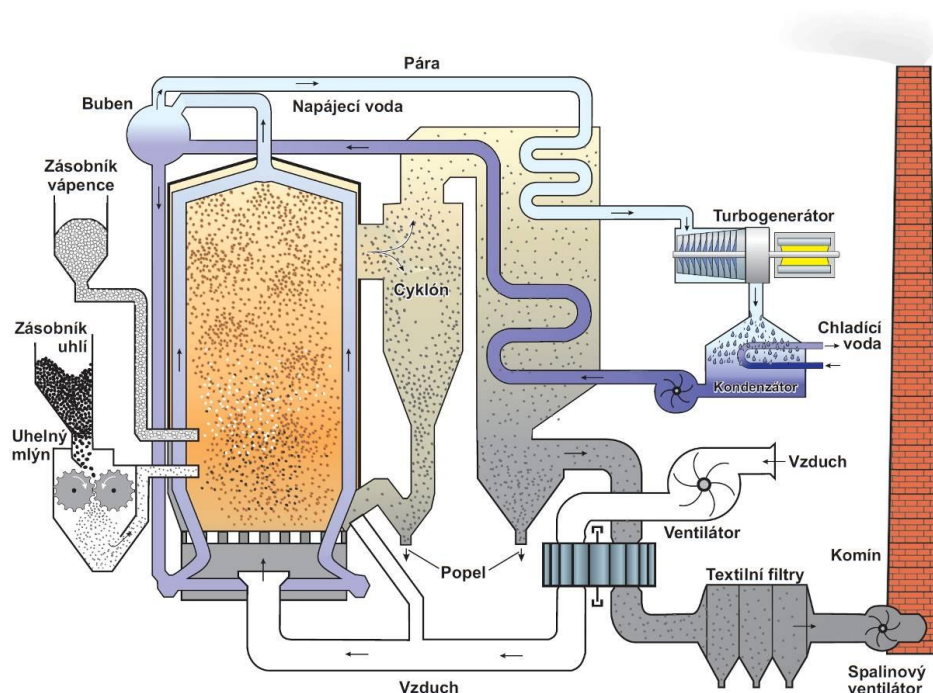
Kvůli ekologické výhodnosti začaly teplárny a některé elektrárny používat technologii fluidního spalování za atmosférického tlaku. Princip fluidního spalování spočívá v tom, že se namele palivo s přísadou vápence, či dolomitu a spaluje se obvykle v cirkulující vrstvě při teplotách okolo 850°C, která je optimální pro absorpci oxidu siřičitého aktivním CaO. Na rozdíl od klasického odsiřování, které čistí spaliny až za spalovacím procesem, fluidní technologie umožňuje likvidaci škodlivin přímo v kotli.

Hlavní ekologickou výhodou této technologie spalování je, že se tedy uvolněný SO_2 během disociačního procesu váže na CaSO_4 . Pokud by se nevázal, tak by díky oxidu siřičitému unikajícímu do ovzduší vznikaly škodlivé kyselé deště. Surovina v podobě

ložového popele, nebo popílků z odlučovačů (elektrofiltrů) je tedy pevný odpad této technologie a tvoří konečný produkt jakožto směs popela z původního paliva, nezreagovaného CaO, síranu vápenatého a dalších částí z reakce popelovin s CaO a nespáleného paliva. Tyto popílků mají také vysoký obsah SO_3 (7 až 18 %). Na pojivých vlastnostech popílků se podílí zejména přítomný anhydrit (až 20%) a volné vápno (až 15 hm. %). Díky nižší teplotě spalování je nezreagovaný CaO ve formě měkce páleného vápna, a tudíž je reaktivní. Charakteristický je také nízký obsah taveniny.

Tato technologie je jedna z nejmodernějších metod spalování uhlí a dalších druhů paliv, kde tvoří prozatím nejučinnější metodu snižování emisí škodlivých látek do ovzduší.

Protože v důsledku transportu kouřových plynů z prostoru ohniště dochází k separaci jednotlivých frakcí, jemné podíly jsou odnášeny spaliny ve formě úletu a jsou zachytávány obvykle v cyklónech, či filtrech a hrubé podíly zůstávají ve spalovacím prostoru jako ložové popely. Vlastnosti obou druhů popílků se od sebe liší granulometrií, měrným povrchem, hustotou, sypanou hmotností, ale i chemickým a mineralogickým složením, přestože pocházejí z jednoho spalovacího procesu.



Obr. č. 2 Schéma tepelné elektrárny s fluidním spalováním

Klasické popílků se díky svým pucolánovým výhodám hojně používají v cementech i jako příměs do betonu. Naproti tomu fluidní popílků mají oproti klasickým rozdíly, díky nimž je podle ČSN EN 450 v ČR nehodnotí jako charakteristické popílků určené do betonu a současně obvykle nesplňují většinu předepsaných technických kritérií. Proto jeho využití pro výrobu betonu podle ČSN EN 206-1 není prozatím přípustné. [39]; [42].

2.3 Vývoj betonu s vysokým obsahem popílku HVFAC v České republice

Beton s vysokým obsahem popílku je definován jako beton, který v pojivové složce obsahuje minimálně 30% popílku, jež nahrazuje původní cement. Anglicky se pojem beton s vysokým obsahem popílku označuje jako HVFA Concrete (High Volume Fly Ash Concrete). (Burden, 2006 [1]).

Popílků jsou v České republice nejčastěji používány k výrobě transportbetonu. Obvyklé množství popílku v betonu však nedosahuje hodnot, které by dovolilo označit beton jako HVFAC. Mezi hlavní důvody, proč se v ČR nevyrábí běžně HVFAC, patří hlavně:

- neexistující cíleně vyvinuté systémy přísad do betonu, které by zajistily rychlejší vývin počátečních pevností HVFAC a byly dostatečně robustní s ohledem na relativně proměnlivé složení popílků a to jak z hlediska mineralogického, tak i z hlediska jeho granulometrie.
- běžně užívané technické normy a předpisy (mj. ČSN EN 206-1) omezují maximální přípustné množství popílku nahrazujícího dávku cementu. Přestože betony s vysokým obsahem popílku mohou splňovat nároky kladené na konstrukční betony v čerstvém i ztvrdlém stavu, nejsou využívány veškeré možnosti k jejich certifikaci.

V zahraničí se HVFAC uplatňuje v transportbetonu a to především u tříd pevnosti C16/20 až C30/37, typickým použitím jsou monolitické konstrukce jako např. základové konstrukce, sloupy, desky, průvlaky, opěrné stěny, betonové chodníky a okrajově je použití i u stříkaného betonu. Hlavním přínosem betonů s vysokou dávkou popílku je kromě velmi dobré zpracovatelnosti v čerstvém stavu především větší odolnost ztvrdlého betonu vůči korozi způsobené agresivním prostředím. HVFAC představují velmi dobrou prevenci expanzních reakcí sulfátového a alkalicko-křemičitého typu. Díky složení HVFAC dochází k omezení šířky mikrotrhlin a tím ke zvýšení spolehlivosti z hlediska mezních stavů použitelnosti. (Matoušková, Šáchová, Huňka, Kolísko, Brož, 2012 [38]).

2.4 Užití popílků v betonu a účinky jeho použití na vlastnosti betonu – potencionální problémy

Dnes je obecným trendem nahradit větší podíl portlandského cementu popílkem. Vychází to tedy z tří hlavních aspektů. Jako první můžeme uvést ekonomiku, jelikož popílek je značně levnější než cement. Díky tomu čím větší podíl popílku v cementu máme, tím více se nám náklady na cement snižují. Druhým aspektem, který je v obecném zájmu asi nejdůležitější je životní prostředí. Popílek je druhotný odpadní produkt, který pokud není zrovna využíván jako příměs do betonu, či cementu, končí obvykle někde na skládce. Například od roku 1999 jen v Kanadě bylo uloženo cca 4 megatuny popílku ročně na skládkách a v České republice vyprodukuje ČEZ a.s. ročně cca 6,5 milionu tun popílku. Dále také z hlediska problematiky životního prostředí, čím více popílku využijeme jako náhradu portlandského cementu, tím méně portlandského cementu je potřeba vyrobit a o to více se zmenší emise CO_2 , které tato výroba produkuje. Jako třetí a poslední aspekt, jsou technické výhody popílku při větší náhradě za portlandský cement. Větší náhrada portlandského cementu popílkem v betonu má při vhodném užití za následek lepší vlastnosti, zejména pak životnost. (Burden, 2006 [1]).

Vezmeme-li tedy v aspektu tyto tři výhody popílku, nelze se divit, že se využití HVFAC dynamicky celosvětově rozvíjí, a to jak v USA a Kanadě, tak i v Číně. (Matoušková, Šáchová, Huňka, Kolísko, Brož, 2012 [38]).

2.4.1 Užití, vlastnosti a definice HVFAC

Termín HVFAC (beton s vysokým obsahem popílku) použil Malhotra koncem osmdesátých let 20. století. Tento beton se dle Malhotry vyznačuje nízkým vodním součinitelem a minimální náhradou cementu popílkem zatříděným dle ASTM do třídy F dokonce 50%. Díky nízkému vodnímu součiniteli a použití superplastifikátorů je zpracovatelnost sednutím kužele na úrovni 150 – 200 mm. V situacích, kdy nejsou požadovány vysoké pevnosti v tlaku a vyšší zpracovatelnost, lze do jisté míry použití přísad zlepšujících konzistenci omezit. U HVFAC se uvádí, že mají dobrou zpracovatelnost, malý vývin hydratačního tepla, nižší počáteční pevnosti, ale vysoké pevnosti ve vysokém stáří. Rovněž mají malé smrštění, vysokou trvanlivost a můžeme je zařadit do vysokohodnotných betonů.

Obecné vlastnosti definující HVFAC:

- minimálně 50% náhrada cementu popílkem (některé zdroje uvádějí náhradu od 30%)
- nízký obsah vody, obvykle pod 130 kg/m^3
- dávka cementu kolem 200 kg/m^3
- pevnost v tlaku ve stáří 28 dní 30 MPa nebo vyšší, sednutí kužele vyšší jak 150 mm a vodní součinitel na úrovni 0,3 (voda/pojivo včetně popílku). Vlastnosti jsou dosaženy díky použití velkého množství superplastifikátorů, případně dalších přísad

- u betonů odolných proti mrazu a působení chemických rozmrazovacích látek se používají provzdušňující přísady
- betony s nižšími pevnostmi (pod 30 MPa) ve stáří 28 dní mají vodní součinitel (voda/pojivo včetně popílku) kolem hodnoty 0,4, obvykle se nepoužívají superplastifikační přísady a sednutí kužele je nižší, než 150 mm.

(Matoušková, Šáchová, Huňka, Kolísko, Brož, 2012 [38]).

2.4.2 Odolnost vůči chemickým rozmrazovacím látkám

Ke špatné odolnosti betonu vůči CHRL dojde, když je vystaven nevyzrálý, nebo neprovzdušněný beton velkému množství rozmrazovacích látek a zároveň cyklickému působení mrazu za přítomnosti vody ve venkovním prostředí. Destruktivní síly související s cyklickým zmrazováním a rozmrazováním betonu se zvyšují v přítomnosti rozmrazovacích solí. Beton obsahující popílek by měl být vystaven vůči takovému prostředí, pouze v případě, že je dostatečně provzdušněný a vykazuje dostatečnou pevnost. Mnoho laboratorních studií uvedlo odolnost vůči CHRL u betonů obsahujících popílek od 25 do 30 % nízkou. Avšak zrychlené testy CHRL v laboratořích neposkytují spolehlivé údaje o jejich výkonu v praxi a betony typu HVFA byly použity v různých praktických případech, kde byly vystaveny zmrazování a rozmrazování za pomoci chemických rozmrazovacích látek s vyhovujícími výsledky.

Existují tři různé zásady, které se musí dodržet, aby mohl být beton typu HVFA vystaven vůči CHRL:

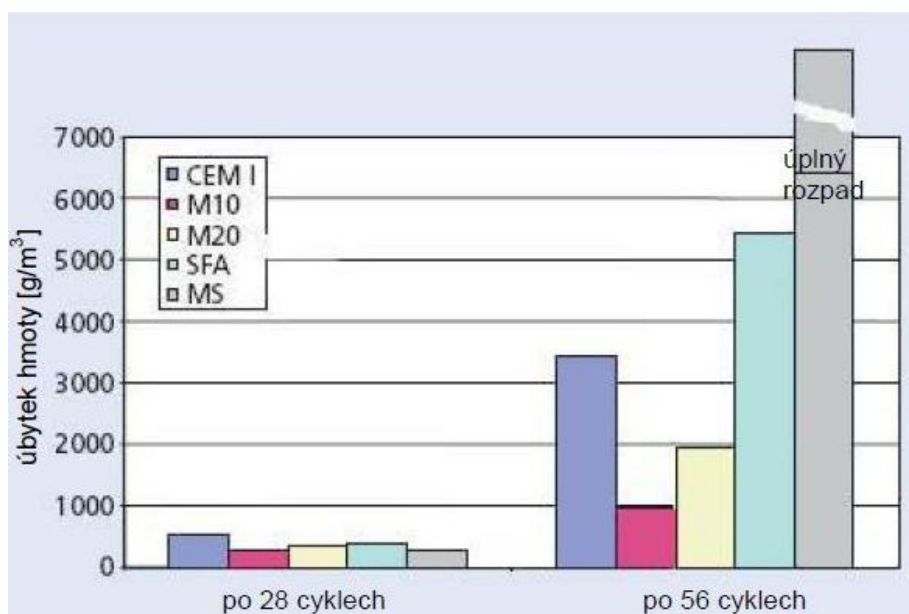
- nízký vodní součinitel [množství vody / (množství popílku + cementu)]
- adekvátní provzdušnění
- řádné a kvalitní zpracování a ošetřování

Typ a množství použitého popílku a vodní součinitel betonové směsi značně ovlivní odolnost vůči CHRL. Obecně platí, že odolnost vůči CHRL klesá s rostoucím množstvím popílku v betonové směsi a rostoucím vodním součinitelem. Dále pokud bude beton obsahující popílek ošetřován plastickými nátěry pro zabránění vypařování vody z betonu, vykáže podstatně menší odolnost vůči CHRL, než-li beton obsahující popílek ošetřovaný ve vlhkém prostředí. V CANMET provedli zkoušku vůči CHRL na betonech typu HVFA v souladu s normou ASTM C672 a oznámili, že výsledky jsou neuspokojivé. Vzorky betonů HVFA ve srovnání s referenčními betony z pouze normálního portlandského cementu se stejným vodním součinitelem a stejným množstvím pojivých materiálů ukázaly vážné vizuální povrchové narušení a vysokou ztrátu hmotnosti. Avšak výsledky laboratorních testů odporují výsledkům z praxe. Například chodník vyrobený z betonu HVFA umístěný v Halifax, Nova Scotia v Kanadě roku 1996. Tento chodník je vystaven přibližně 100 zmrazovacím a rozmrazovacím cyklům a četným použitím chemických rozmrazovacích látek ročně. Do dnes tento chodník prokazuje dobrou odolnost. (Malhotra and Mehta, 2002 [2]; Langley and Leaman, 1998 [3]). Rozpory v odolnosti popílkových betonů vůči CHRL vznikají z kolísání kvality a složení použitých materiálů, rozdílných podmínkách zkoušení, prostředí kterému jsou vystaveny a kvalitě zpracování

a ošetřování. Většina vědeckých pracovníků vidí v odolnosti vůči CHRL u popílkových betonů problém a vychází z laboratorních testovacích metod dle normy ASTM C672, spíše, než ze skutečné odolnosti těchto betonů v praxi. (Burden, 2006 [1]).

Brandenburger, Herter a Huttel zkoušeli v Berlíně odolnost popílkových betonových směsí proti rozmrazovacím prostředkům pomocí zkoušky CDF (roztokem chloridu sodného) a tyto směsi srovnali s výsledky betonu z výlučně portlandského cementu CEM I 42,5 R. Jako příměsi jim posloužil jemný tříděný certifikovaný černouhelný popílek dle DIN EN 450 (M10 o velikosti částic 95% < 10 µm, M20 o velikosti částic 95% < 20 µm) a pro další srovnání klasický černouhelný popílek a mikrosilika. Pro směs pouze s CEM I 42,5 R byl použit vodní součinitel $W=0,5$, stejně tak, jako pro mikrosiliku. Pro směsi s popílkem byl vodní součinitel redukován na $W=0,42$. Náhrada cementu popílkem činila vždy 25% a náhrada mikrosilikou činila 10%.

Jak je patrné z výsledků zkoušek, po 28 cyklech směs bez přísady vykazovala největší množství odlupování. Následovaly směsi s černouhelným popílkem a jemným popílkem M20 se srovnatelným odlupováním ve střední hodnotě. Směs s jemným popílkem M10 i směs s mikrosilikou vykazaly nejnižší množství odlupování. Po zatěžovací fázi 29 až 56 cyklů se zřetelně zvyšuje odlupování v průběhu doby, než u prvních 28 cyklů. Opotřebení se urychluje pro všechny směsi. Nejmenší odlupování má směs s jemným popílkem M10, které činí cca jednu třetinu odlupování referenční směsi bez přísady. Nejpozoruhodnější je úplný rozpad zkušebního tělesa s mikrosilikou po 56 cyklech, ačkoliv směs s mikrosilikou po 28 dnech spolu se směsí s jemným popílkem M10 vykazovala nejlepší výsledky. Výsledky zkoušek jsou zobrazeny na Obr. č. 3.



Obr. č. 3 Střední hodnoty odlupování po zkoušce roztokem chloridu sodného

Zkoušení odolnosti proti rozmrazovacím prostředkům betonových směsí ukazuje, že při použití jemných popílků (v tomto případě M10) je možné vyrobit betony s velmi vysokou odolností proti působení rozmrazovacích prostředků. Zde zkoušené betony nebyly, co se

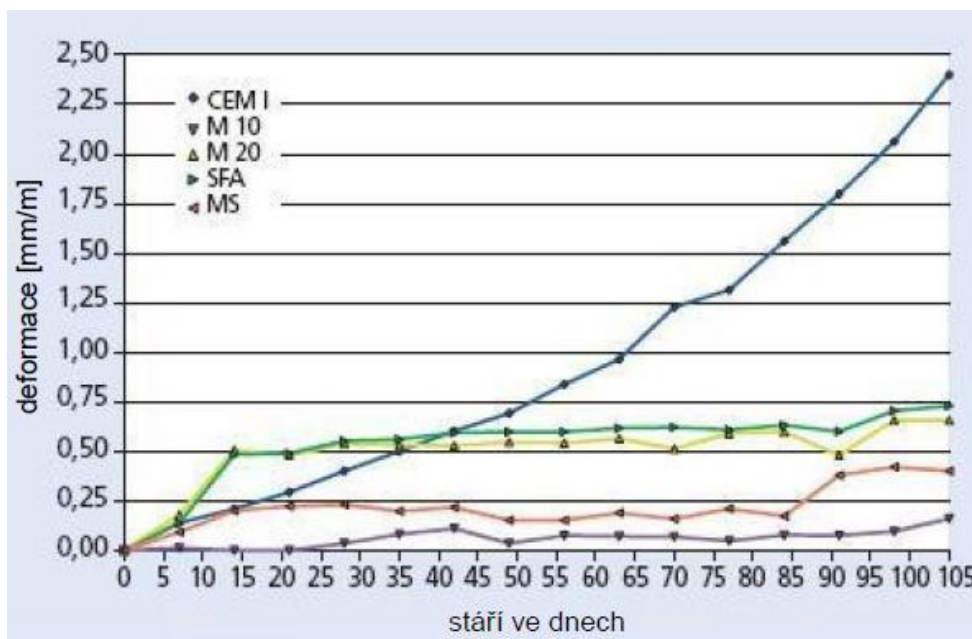
týče odolnosti proti rozmrazovacím prostředkům optimalizovány. Další výzkumy na vhodně optimalizovaných betonech to mezitím potvrdily. Návrhy betonových směsí s jemnými popílkami (v tomto případě Microsit M10) prokázaly právě se zřetelem na dlouhodobé působení vyšší odolnost proti působení rozmrazovacích prostředků než směsi s čistým cementem, příp. směsi s cementem a netříděným černouhelným popínkem, příp. s mikrosilikou, jako přísadami do betonu. (Brandenburger, Herten, Huttli, 2007 [35]).

2.4.3 Odolnost vůči síranům

Na stejných směsích, tedy Referenční, M10, M20, SFA a MA (viz. 2.4.2 Odolnost vůči chemickým rozmrazovacím látkám) Brandenburger, Herter a Huttli zkoušeli odolnost proti působení síranů. Směsi byly zkoušeny podle zkušební metody SVA (zkušební metody expertního výboru) a navzájem mezi sebou srovnány.

U zkušební metody SVA se stanovuje podélné přetvoření plochých hranolů malty (160 mm x 40 mm x 10 mm) rozpínáním při působení síranů (30 g $\text{SO}_4^{2-}/\text{l}$). Ze vzniklého podélného přetvoření je substrahováno „přirozené“ podélné přetvoření, které je měřeno paralelně na referenčním zkušebním hranolu stejného složení v nasyceném roztoku hydroxidu vápenatého. Hraniční hodnota, která vzniká z podélného přetvoření pro matici odolnou vůči síranům, je pro ploché hranoly z malty po 91 dnech 0,5 mm/m.

Na Obr. č. 4 jsou znázorněna vypočtená podélná přetvoření příslušných zkušebních těles v závislosti na čase. Výsledky ukazují, že hraniční hodnota pro směs odolnou vůči síranům pouze z cementu, směs s typickým černouhelným popínkem a také směs s popínkem M20 byla podstatně překročena, přičemž podélné přetvoření směsi s jemným popínkem M20 bylo asi pětikrát menší než podélné přetvoření směsi pouze z cementu.



Obr. č. 4 Podélné přetvoření zkušebních těles po působení síranů

Souhrnně výsledky zkoušky ukazují, že s jemnými popílky (v tomto případě Microsit® M10) je možné vyrobit maltové a s jistotou také betonové směsi, které vykazují velmi vysokou odolnost proti síranům. (Brandenburger, Herten, Huttli, 2007 [35]).

2.4.4 Plastické smrštění

Po uložení čerstvé betonové směsi nebo krátce poté, může dojít na povrchu betonu k plastickému smršťování. Důvodem jsou okolní podmínky, které dovolují rychlé vypařování vlhkosti z povrchu betonové směsi. Pokud se voda z povrchu odpařuje rychleji, než li se doplňuje na její povrch z procesu bleeding, vznikají trhliny. To způsobuje rapidní smrštění sušením a tahové napětí na povrchu, jehož příčinou jsou malé nepravidelné trhlinky. Plastické smršťování je potencionální problém popílkových betonů z důvodů nedostatečného obsahu vody díky nízkým vodním součinitelům. Proto se doporučuje ihned od začátku ošetřovat povrch betonu poskytnutím vlhkého prostředí. Tím se omezí vypaření potřebné vody a sníží se plastické smrštění. (Burden, 2006 [1]).

2.4.5 Hydratační teplo

Nahrazení portlandského cementu popílkem může redukovat exotermické reakce mezi cementem a vodou (Bremner a Thomas, 2004 [4]). Je to z toho důvodu, že pomalejší pucolánové reakce, kdy nahrazujeme část portlandského cementu popílkem, mají pro uvolnění hydratačního tepla delší časovou periodu. Proto tedy teplota betonu zůstává nižší, díky rozptýlení její produkce (Joshi a Lohtia, 1997 [5]). Předpokládá se, že přidáním popílku snížíme počáteční teplotu o 15 až 30%, než u ekvivalentního množství portlandského cementu. Většina popílků pro beton s nízkým obsahem CaO (Třída F) snižují rychlost nárůstu hydratačního tepla při náhradě za portlandský cement, ovšem popílky s vysokým obsahem CaO (Třída C) vždy nezpůsobují snižování nárůstu hydratačního tepla, kvůli jejich vlastnostem podobných cementu (Joshi a Lohtia, 1997 [5]). Obecně rychlost vývoje tepla odpovídá paralelně rychlosti vývoje pevnosti. Některé popílky s vysokým obsahem CaO reagují s vodou velmi rychle a produkují spíše nadměrné teplo, než aby jej snižovaly (Berry a Malhotra, 1986 [6]). Vzestup teploty v betonu závisí na následujících faktorech:

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

(Joshi a Lohtia, 1997 [5]).

Při použití betonu typu HVFA podstatně snížíme výsledky maximální dosažené teploty a tím umožníme velkému množství hmoty vytvoření takových teplot, aniž při něm dosáhla maximálního teplotního rozdílu 40°C (Bremner a Thomas, 2004 [4]). Pro příklad u velkého betonového bloku vyrobeného z betonu typu HVFA, maximální teplota uprostřed bloku dosáhla 54°C. Teplota prostředí, ve kterém byl betonový blok umístěn byla 19°C, z toho vyplývá teplotní rozdíl mezi vnitřkem a vnějškem betonového bloku 35°C. Pro srovnání stejně velký betonový blok vyrobený pouze z portlandského cementu vykazoval

maximální teplotu uvnitř bloku 83°C. U tohoto bloku byla teplota okolního prostředí 18°C a tomu odpovídající teplotní rozdíl 65°C mezi vnitřkem a vnějškem betonového bloku. Celková hmotnost pojivových materiálů bylo pro oba bloky stejná. (Malhotra a Mehta, 2002 [2]).

2.4.6 Pevnost

Ať už pevnost v daném časovém období, či míra nárůstu pevnosti popílkového betonu, oboje jsou ovlivněny charakteristikou samotného použitého popílku (vlastnosti, chemické složení, velikost částic, reaktivita), cementem s kterým se používá, proporcemi betonového dílce, a nakonec teplotou a ostatními podmínkami pro zrání jako je např. přítomnost přísad v betonu (Hobbs, 1983 [7]; Berry a Malhotra, 1986 [6]; ACI výbor 232, 2003 [8]). Ačkoli receptury zahrnující popílek mají nárůst pevnosti pomalejší než receptury betonových směsí bez popílku, jejich dlouhodobé pevnosti jsou vyšší (Bremner a Thomas, 2004 [4]). Nejprve průběh pevnosti s portlandským cementem rychle vzroste v počátečním období a následně je jeho nárůst značně utlumen. V tomto období, kdy je nárůst pevnosti portlandským cementem utlumen, nastupuje nárůst pevnosti díky pucolánové aktivitě popílku, která zajišťuje pevnost v období pozdějším, pokud je beton ponechán ve vlhkém prostředí. Proto beton obsahující popílek, jež má rovnocenné nebo nižší pevnosti v prvotním období zrání, může mít vyšší pevnost v pozdějším období na rozdíl od betonu, který popílek neobsahuje. Aby toho dosáhl, musí být ale během provozu správně ošetřován nebo vystaven dostatečně vlhkému prostředí. Nárůst pevností bude pokračovat s plynoucím časem a má za následek vyšší dlouhodobé pevnosti, než při použití betonu pouze z cementu (Berry a Malhotra, 1986 [6]; ACI výbor 232, 2003 [8]). Za použití urychlovačů, aktivačních přísad, plastifikátorů nebo vhodnou změnou v poměrech receptury může být dosaženo už dostatečných 3 nebo 7 denních pevností (ACI výbor 232, 2003 [8]). Popílků obsahující vyšší množství CaO (Třída C) vykazují u betonu rapidnější zpevnění v raném časovém období, než popílků obsahujících méně CaO (Třída F), protože popílků Třídy C jsou v raném období zrání reaktivnější (Bremner a Thomas, 2004 [4]; Smith et al., 1982 [9]; ACI výbor 232, 2003 [8]). Nicméně popílků Třídy F přispívají k větším dlouhodobým pevnostem betonu, než popílků Třídy C, i přes jejich pomalejší tempo nárůstu pevnosti v raném období zrání. Z důvodu své jemnosti a pucolánové aktivity, popílků v betonu zlepšují kvalitu cementové kaše a mikrostrukturu přechodové zóny mezi matricí a kamenivem. Výsledkem nepřetržitého procesu utěšňování pórů, vzhledem k zahrnutí popílkových hydratačních produktů v betonu, je dosaženo růstu pevnosti v průběhu vytvrzování (Joshi a Lohtia, 1997 [5]). Je třeba poznamenat, že vyšší teplota během procesu ošetřování velmi prospívá k rychlejšímu nárůstu počátečních pevností a následné budoucí získávání pevností popílkového betonu, z důvodu zvýšení aktivační energie potřebné pro pucolánové reakce. (ACI výbor 232, 2003 [8]).

S ohledem na betony typu HVFA je v rámci průmyslu dosažení krátkodobých pevností potencionální problém. Avšak mnohé studie ohledně tohoto problému vyvodily uspokojivé závěry. Siddique (2003) ukázal, že nahrazení 40%, 45% a 50% cementu

popílkem sníží 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 ale uvádí, že i 28 denní pevnost betonu s 40%, 45% a 50% obsahem popílků je dostatečná pro použití v železobetonových konstrukcích (Siddique, 2003 [10]).

V CANMET provedli studie k prozkoumání typického vývoje pevnosti pro betony s vysokým obsahem popílku 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 typu HVFA 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 (Bilodeau et al., 2001 [11]; Lengley a Leaman, 1998 [3]).

Různé případové studie EcoSmart také informují o pozitivních výsledcích pevností v raném období zrání u typu betonu HVFA. Zkušenosti z namíchaných směsí v praxi obecně ukazují, že betony typu HVFA 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 (Gillies, 2001 [12]). Vědci tedy pochopili, že adekvátní vlhké ošetření po delší dobu je nezbytné, aby betony typu HVFA dosáhly ekvivalentních, či vyšších pevností, než konvenční betony z portlandského cementu.

2.4.7 Propustnost

Propustnost je velmi zajímavý aspekt týkající se trvanlivosti betonu. Chce-li být beton trvanlivý, musí být také relativně odolný proti pronikání kapalin (Berry a Malhotra, 1986 [6]). Obecně, menší propustnost znamená větší trvanlivost (Joshi a Lohtia, 1997 [5]). Propustnost betonu je řízena mnoha faktory jako např. množstvím cementové matrice, vodním součinitelem, použitými frakcemi kameniva, pevností a ošetřováním. Prostřednictvím pucolánových vlastností, popílek chemicky reaguje s Ca(OH)_2 a vodou a tím produkuje C-S-H gel (ACI výbor 232, 2003 [8]). Ca(OH)_2 je spotřebováno pucolánovou reakcí a převedeno na hydratační produkty nerozpustné ve vodě (Joshi a Lohtia, 1997 [5]). Tyto reakce snižují riziko vyplavování Ca(OH)_2 (Ca(OH)_2 je rozpustný ve vodě a může se ze ztvrdlého betonu vyluhovat na povrch) (ACI výbor 232, 2003 [8]). Výsledkem začlenění popílku může mít za následek značné utěsnění pórů. (Joshi a Lohtia, 1997 [5]). Přetvoření velkých pórů na póry jemné v důsledku pucolánové reakce mezi cementovou kaší a popílkem podstatně redukuje propustnost v cementovém systému (Wedding, Manmohan a Mehta, 1981 [13]). Redukce propustnosti popílkového betonu, může snížit rychlost průsaku vody, agresivních chemikálií a kyslíku (ACI výbor 232, 2003 [8]). To vede ke zvýšení trvanlivosti, protože agresivní činidla nemohou útočit na beton, ani na betonářskou výztuž v něm uloženou (Bremner a Thomas, 2004 [4]).

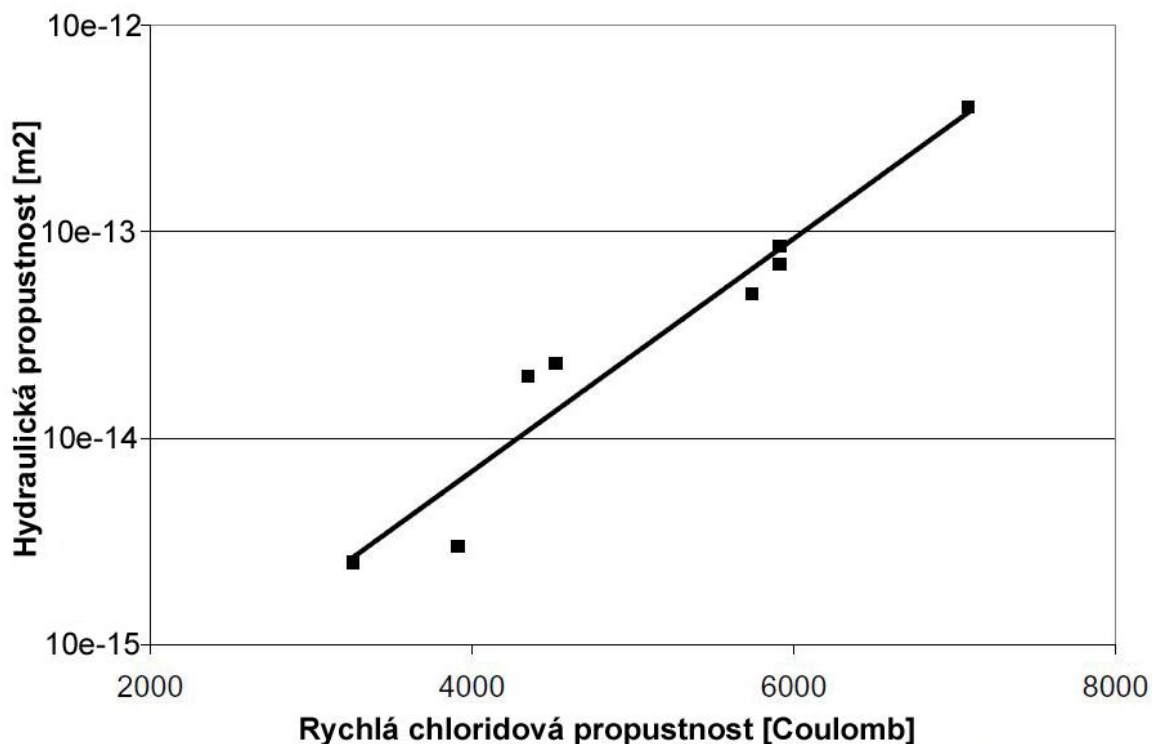
Propustnost betonu se vztahuje přímo na množství hydratovaného cementového materiálu. Po 28 dnech zrání, kdy dochází k malé pucolánové aktivitě, jsou popílkové betony propustné více, než klasické betony z portlandského cementu. Avšak po 6 měsících zrání, jsou popílkové betony, mnohem méně propustné, než betony pouze z portlandského cementu, což je způsobeno právě pomalou, ale dlouhotrvající pucolánovou reakcí popílku (Davis, 1954 [14]; Berry a Malhotra, 1986 [6]; Joshi a Lohtia, 1997 [5]).

Propustnost HVFA betonů je velmi nízká. Předpokládaná propustnost (hydraulická konduktivita) HVFA betonů je menší než 10-13 m/s. Pro srovnání normální beton z portlandského cementu o vodním součiniteli $w = 0,40$ má propustnost 10-12 m/s (Malhotra a Mehta, 2002 [2]). Obecně odolnost struktury železobetonů proti korozi, alkalické expanzi, síranovým a jiným chemickým útokům na vodotěsnosti betonu patřičně závisí. HVFA betony při vhodném ošetřování jsou schopny poskytnout vynikající vodotěsnost a trvanlivost (Mehta, 2004 [15]). Použitím popílku do betonu snižujeme původní množství vody a v kombinaci s vytvářejícími se produkty v cementovém systému tohle všechno vede k menší pórovitosti a nespojitě, přerušované pórovité struktuře, která zmenšuje propustnost samotného betonu (Estakhri a Saylak, 2004 [16]; Malhotra a Mehta, 2002 [2]). Musí se ale znovu zdůraznit, že propustnost HVFA betonů závisí na jejich vhodném ošetřování.

Vztah mezi elektrickou vodivostí a propustností

Jeden z typů zkoušky, který měří nepřímo vodotěsnost, ukazuje pohyb elektrického náboje prostředím betonu. Test rychlé chloridové propustnosti neboli RCPT (ASTM C1202 – Standardní testovací metody pro elektrickou indikaci schopnosti betonu odolávat průniku chloridových iontů) zahrnuje aplikaci na měření napětí mezi dvěma stranami betonového vzorku ve tvaru válce, který je 100mm vysoký a má průměr 50mm. Tento vzorek se umístí mezi roztok hydroxidu sodného na jedné straně a chloridu sodného na straně druhé. Celkový náboj, jenž projde vzorkem během 6 hodin, poskytne nepřímý výsledek měření propustnosti daného betonu. Pro betony o vodním součiniteli w mezi 0,4 a 0,75 výsledky ze zkoušky RCPT dobře zachycují vztah propustnosti a totální pórovitosti (hydraulické propustnosti), jak je vidět na Obr. č. 5.

RCPT ve skutečnosti měří elektrický náboj procházející vzorkem. Nízká propustnost betonů vykazuje téměř konstantní proud během 6 hodinové zkoušky, kdežto vysoce propustné betony mohou vykazovat rostoucí proud kvůli ohřevu, což má za následek zvýšení vodivosti (Mindess et al., 2003 [17]).



Obr. č. 5 Vztah hydraulické propustnosti a rychlé chloridové propustnosti

Obr. č. 5 ukazuje vztah mezi výsledky zkoušek hydraulické propustnosti a rychlé chloridové propustnosti (RCPT) (D. Whiting z propustnosti betonu, SP-108, Americký betonářský institut, Detroit, MI, pp.195-222 1988). (Burden, 2006 [1]).

Experiment na propustnost chloridových iontů u popílkového betonu

V Ohio State University byly provedeny testy z hlediska dlouhodobější propustnosti chloridových iontů na vzorcích s užitím popílku třídy F o náhradě cementu 0, 15, 30 a 50%. Propustnost chloridových iontů byla u směsí s popínkem výrazně nižší, než u směsi bez popílku. Propustnost se snižovala se zvyšováním obsahu popílku. Na směsi bez popílku mezi šestým měsícem až jedním rokem vytvrzování se snížila propustnost o 4,75%, přičemž u směsi s popínkem se tato propustnost snížila o 30 až 40 % za stejné časové období. Dokonce i po jednom roce zrání měla směs bez popílku střední hodnotu propustnosti chloridových iontů, zatímco směsi s popínkem měly tuto hodnotu velmi nízkou. Betony s velkým obsahem popílku se zde ukázaly jako nejtrvanlivější vzhledem k zabránění koroze pro železobetonové konstrukce. Výsledky jsou shrnuty v Tab. č. 1 (Bargaheiser a Butalia, 2007 [18]).

	Propustnost chloridových iontů [Coulomb]	
	Doba zrání 6 měsíců	Doba zrání 1 rok
0% popílku	3580 (střední)	3410 (střední)
15% popílku	1160 (nízká)	720 (velmi nízká)
30% popílku	550 (velmi nízká)	390 (velmi nízká)
50% popílku	530 (velmi nízká)	300 (velmi nízká)

Tab. č. 1 Výsledky propustnosti chloridových iontů na betonových směsích s různým obsahem popílku po 6 a 12 měsících

2.4.8 Efekt popílku u alkalicko-křemičité reakce

Potencionální využití pucolánu, jako opatření k prevenci škodlivého rozpínání alkalicko-křemičité reakci bylo poprvé zmíněno v práci Thomase Stantonova v roce 1940, kde ukázal účinnost přírodních pucolánů. Brzy poté výzkumný sbor inženýrů předvedl jak popílek, jakožto pucolán, může být využit pro kontrolu alkalicko-křemičité reakce (AKR). V průběhu dalších cca 50 let po tomto objevu následovaly stovky dokumentů ukazujících řešení s efektem popílku na AKR. Až nyní je opravdu akceptováno, že popílek efektivně snižuje rizika AKR, ale stále se neví, jaké přijatelné množství tohoto popílku je efektivní k redukci tohoto rizika. Výzkumný tým Thomas, Dunster, Nexon a Blackwell se pokusili toto zjistit.

Tito pánové provedli studii, kde vystavili 45 betonových bloků (915 x 915 x 815 mm, či krychle o hraně 350 mm) obsahujících křemičité reaktivní kamenivo s alkáliemi a o různých úrovních vysoce alkalického cementu + klasického popílku. Venkovní expozici pro vystavení těchto vzorků tvořil areál v jihovýchodní Anglii po dobu až 18 let za účelem stanovení účinnosti popílku při kontrole AKR. Použité reaktivní kamenivo obsahovalo řadu křemičitých písků a drcenou drobu v kombinaci hrubého a jemného kameniva. Délková změna byla měřena pravidelně po celou tuto dobu. Všechny betonové tvárnice bez popílku ukázaly nadměrnou expanzi a popraskání v rozsahu 5 – 10 let od výroby. Popílek byl použitý pro náhradu cementu v rozsahu 25 až 40% a účinně snížil expanzi a praskání na všech vzorcích ve všech úrovních alkálií. Z 27 bloků obsahujících popílek a křemičitý písek pouze 2 bloky byly po 16 – 18 letech poškozeny, přičemž poškození těchto bloků bylo výrazně nižší, než u podobných bloků se stejným obsahem portlandského cementu bez popílku. Žádný z bloků z droby a popílku nevykazoval trhliny. Tato studie prokázala, že popílek, používá-li se v náhradě 25-40% je účinnou prevencí vůči alkalicko-křemičité reakci.

Na Obr. č. 6 jsou zobrazeny betonové bloky této studie, vystavené 18 let na venkovní expozici. Na levé fotce je blok vyrobený z 550 kg/m³ portlandského cementu, na pravé fotce je blok vyrobený z 450 kg/m³ portlandského cementu + 150 kg/m³ elektrárenského popílku (Thomas, Dunster, Nixon, Blackwell, 2011 [36]).



Obr. č. 6 Bloky vyfocené po 18 letech vystavení na venkovní expozici v Anglii

2.4.9 Karbonatace

Mechanismy karbonatace

Karbonatace je proces, při němž hydroxid vápenatý z hydratované kaše portlandského cementu reaguje ve vlhkém prostředí s oxidem uhličitým z atmosféry do formy uhličitanu vápenatého (Berry a Malhotra, 1986 [6]). Jak oxid uhličitý postupuje, zbývající produkty hydratace cementu, skládající se z hydratovaného vápníku, křemičitanů, hlinitanů a feritů, či příbuzných komplexů hydratovaných solí, jsou napadeny a rozloženy, přičemž v konečném důsledku vznikají uhličitan vápenatý a hydratovaný oxid křemičitý, oxid hlinitý, oxid železitý a hydráty síranu vápenatého (Roberts, 1981 [19]).

Karbonatace betonu může vyústit v následující škodlivé důsledky:

- zvýšení propustnosti (za určitých okolností)
- vznik objemových změn
- zvýšení vzniku trhlin
- úbytku pasivační vrstvy, která chrání výztuž před korozí

(Berry a Malhotra, 1986 [6]).

Vědci tvrdí, že hloubku karbonatace zvyšuje nedostatečné zhutnění, vysoká propustnost, malá pevnost betonu, vysoký vodní součinitel, vyšší obsah popílku a tím nižší obsah cementu (Gebauer, 1982 [20]; Berry a Malhotra, 1986 [6]; Roberts, 1981 [19]).

Faktory ovlivňující míru karbonatace

Míra karbonatace betonu závisí na následujících faktorech:

- kvalita zhutnění
- koncentrace oxidu uhličitého
- doba vlhkého ošetřování
- propustnost
- okolní teplota
- vlhkostní podmínky prostředí
- složení receptury
- stupeň nasycení (obsah vlhkosti)
- množství hydroxidu vápenatého, jenž je k dispozici pro reakci

(Berry a Malhotra, 1986 [6]; Joshi a Lohtia, 1997 [5]; Parrott, 1987 [21]; Roberts, 1981 [19]).

Hlavní faktor, kterým můžeme ovlivnit omezení míry karbonatace je vodní součinitel. Obecně redukce vodního součinitele značně snižuje naměřenou hloubku karbonatace. Pomalu a dlouhodoběji reagující systém jako například s popílkem, by mohl ukázat větší užitek v dlouhodobě vlhkém prostředí, protože hydratace cementu v povrchových vrstvách zrajícího betonu se prakticky už zastaví, jakmile vnitřní relativní vlhkost klesne na cca 80%. Následek toho je zvýšená pórovitost a vysoká propustnost v povrchových vrstvách, což zvyšuje míru difúze pro oxid uhličitý (Parrott, 1987 [21]). Toto již bylo určitými vědci navrženo, avšak ošetřovací období při jejich pokusu trvalo pouze 7 dnů a snížení karbonatace dosáhli pouze nízké, nebo žádné (Thomas a Matthews, 1992 [22]; Ho, 1987 [23]; Nagataki, 1986 [24]). Popílkové betony ve srovnání s normálními betony z portlandského cementu o stejné pevnostní třídě karbonatují podobně, nebo v mírně vyšší míře i za případu, že jsou špatně ošetřovány (Roberts 1981 [19]; Thomas a Matthews, 1992 [22]; Matthews, 1984 [25]; Hobbs, 1988 [26]; Lewandowski, 1983 [27]; Tsukayama, 1980 [28]; Dhir, 1989 [29]). U betonů nižších pevnostních tříd, nebo betonů vystavených zvýšené koncentraci oxidu uhličitého je dokázáno, že popílkové betony mají míru karbonatace větší (Thomas a Matthews, 1992 [22]; Gebauer, 1982 [20]; Ho, 1987 [23]). Při 50% náhradě cementu popílkem u betonů stejných pevnostních tříd, karbonatace postupuje podstatně vyšším tempem, ovšem můžeme ji snížit prodloužením počátečního ošetřování při zaručení vlhkého prostředí, nebo zvýšením pevnosti. (Thomas a Matthews, 1992 [22]). V oblastech s relativní vlhkostí pod 25% je nedostatek volné vody potřebné pro karbonataci. Stejné výsledky s nulovou karbonatací můžeme získat i naopak v prostředí s velkým množstvím vody, kde je beton zcela nasycen či vystaven 100% relativní vlhkostí. Panuje všeobecná shoda, že hloubka karbonatace dosáhne maxima v prostředí o relativní vlhkosti mezi 50 až 75%. Rychlost karbonatace může také stoupat se zvýšenou teplotou, ovšem ta také podporuje sušení, proto v závislosti na stupni sušení při vyšších teplotách může být rychlost karbonatace nižší nebo vyšší. (Parrott, 1987 [21]; Roberts, 1981 [19]). Ochranné nátěry mohou omezit karbonataci díky omezení přístupu vody a difúzi oxidu uhličitého, avšak kvalita a výkon nátěru bývá proměnlivá (Parrott, 1987

[21]). Při vystavení na vzduchu za normální relativní vlhkosti míra karbonatace klesá s postupujícím časem a její hloubka je přibližně úměrná druhé odmocnině času expozice (Roberts, 1981 [19]).

Podněty podporující karbonataci a vyvolání koroze betonářské oceli

Přestože koroze betonářské oceli způsobená karbonatací se dnes nejeví jako problém, je-li v použitém betonu vysoký obsah popílku a tento beton při betonáži nemá snížený vodní součinitel a nemá dostatečné počáteční ošetřování pomoci zajištění vlhkého prostředí, problémy koroze oceli kvůli karbonataci se nakonec stanou realitou (Thomas, 2003 [30]). Vysoké pH betonu je způsobeno přítomností alkalických hydroxidů v pórech, které obvykle vytváří pH 13 a množství pevného hydroxidu vápenatého $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 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 (Thomas, 2004 [31]; Parrott, 1987 [21]). 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 (Parrott, 1987 [21]; Roberts, 1981 [19]).

Zde je několik podnětů podporujících karbonataci vyvolanou korozi oceli:

- Expozice – karbonataci vyvolaná koroze je nejrozšířenější v prostředí, kde není k dispozici dostatek vlhkosti k zabránění difúze oxidu uhličitému, nýbrž je zde taková dostatečná vlhkost, která korozi udržuje. Tento podnět bývá většinou u spodní strany balkónů, na mostovkách, nebo v místech, kde je beton vystaven relativní vlhkosti prostředí, avšak je chráněn před přímým srážením.
- Vysoký vodní součinitel betonu – ten má za následek větší propustnost betonu a potažmo i jeho sklony k větší hloubce karbonatace.
- Nedostatečné ošetřování – neadekvátní ošetřování má za následek větší propustnost, jelikož vede k neúplné hydrataci cementu.
- Nedostatečná krycí vrstva betonu – ochranu výztuže před korozí vlivem karbonatace betonu můžeme dosáhnout zvolením adekvátní krycí vrstvy a tím zabráníme průniku karbonatace až k výztuži po dobu očekávané životnosti konstrukce.
- Pucolány – propustnost betonu je redukována přidáním popílků, beton je těsnější a tedy průnik CO_2 do betonu je obtížnější. Ačkoliv popílek snižující propustnost reaguje s $\text{Ca}(\text{OH})_2$, tato reakce redukuje část materiálu potřebnou pro reakci s CO_2 . Tedy beton dostává méně pronikajícího oxidu uhličitého pro neutralizaci betonu (Roberts, 1981 [19]; Papadakis et al., 1991 [32]; Burden, 2006 [1]).

Užití popílku jako prevence proti korozi výztuže

Většina opatření pro zabránění korozi využívá základní principy, jež zabraňují reakcí CO_2 a chloridových iontů s povrchem oceli a které rovněž zvyšují dobu potřebnou k proniknutí chloridových iontů krycí vrstvou betonu. I když tato opatření nezastaví korozi úplně, resp. nezamezí jejímu startu, tak vykonávají svoji funkci tím, že výrazně tuto korozi zpomalují, resp. zvyšují čas, než začne výztuž korodovat. Mezi tyto základní principy patří použití materiálů obsahující příměsi, nátěrových hmot, membrán a povlaků na posílení odolnosti oceli. Jedna z variant je také použití popílku jako minerální příměsi do betonu, která zajišťuje prevenci vůči korozi výztuže utěsněním betonu.

Minerální příměsi jako popílek jsou používány pro zmenšení propustnosti, neboli utěsnění vrstvy betonu a tím zamezení proniknutí iniciátorů, které by vyústily v korozi výztuže. Popílek je jednou z nejběžnějších příměsí do betonu, ale jen zřídka jeho použití bylo uvažováno pro zamezení, či zmírnění koroze výztuže. Za normálních okolností se technologové zaměřují na udržení zásaditého prostředí při pH 12-13, aby ocel udrželi v neagresivních, zásaditých podmínkách. Vzhledem k nižšímu pH popílku nahrazujícího cement, který je primární zdroj zásaditosti betonu se této možnosti technologové snaží vyhnout. Naproti tomu v dobře hydratované betonové směsi může portlandský cement obsahovat 15 – 40% hmotnostních hydroxidu vápenatého. To je zpravidla dostačující k udržení pH 12-13. Vzhledem k tomu, že popílek zlepšuje hustotu betonu spolu s dalšími výhodnými faktory, tak jeho užití více než kompenzuje mírně nižší hodnotu pH.

Při hydrataci 15 – 40% cementu vůbec nehydratuje. Tento nehydratovaný cement, či volný hydroxid vápenatý je svým způsobem škodlivý pro beton, jelikož asistuje k předčasnému poškození betonu. Chemicky hydroxid vápenatý ač zajišťuje zásadité pH, tak nebezpečně reaguje se sulfáty, oxidem křemičitým a CO_2 . To má za následek poruchy betonových konstrukcí.

Budeme-li zkoumat 25% náhrady cementu popílkem, dala by se odstranit malá část hydroxidu vápenatého. Například 100 kg cementu by produkovalo průměrně 30 kg hydroxidu vápenatého. Pokud nahradíme 25 kg cementu popílkem, snížíme hydroxid vápenatý na průměrných 22,5 kg. Tato situace poukazuje, že popílkem se dá mírně snižovat stav hydroxidu vápenatého v cementu tak, aby bylo jeho množství ještě dostačující na udržení zásaditého pH.

Pucolánová reakce popílku převádí hydroxid vápenatý více na formu kalcium hydro silikátů (CSH produktů), což vede k nižší propustnosti. Použitím popílku se tedy výrazně sníží vniknutí vlhkosti, kyslíku, chloridů a agresivních chemikálií, čímž dojde ke zvýšení trvanlivosti a použitelnosti betonu. Je třeba poznamenat, že po dvaceti letech zrání je běžné vidět difúzní koeficient pro chloridy 100 krát menší u betonu s vyšším obsahem popílku nežli bez něj. Je tedy zřejmé, že betony s popílkem mohou zvyšovat odolnost proti útokům alkálií, sulfátů, pronikání chloridů, CO_2 a působení koroze (Bargaheiser a Butalia, 2007 [18]).

2.5 Využití popílku v různých oblastech stavebnictví

2.5.1 Použití popílku do cementobetonových vozovek

Typické předpoklady směsí s popílkem vycházející z teorie jejich použití

Víceleté studie prokázaly, že přidáním popílku jako filleru, nebo ve větším měřítku jako náhrady určitého množství cementu do betonové směsi, může zlepšit vlastnosti těchto směsí.

Některé z těchto zlepšení vycházejí z fyzikálních vlivů, založených na nárůstu podílu jemných částic, zatímco jiná zlepšení jsou vysvětlována chemickým vlivem popílku jako následek jím vyvolaných pucolánových reakcí.

Podíl popílku v pojivu betonové směsi závisí na typu popílku. Popílků s nižším obsahem CaO se většinou používají v množství 15 až 25 % z hmotnosti pojiva do cementobetonové vozovky (cement a popílek), zatímco popílků s vysokým obsahem CaO se používají v podílu 20 až 35 % popílku z hmotnosti pojiva.

Přidáním popílku se snižuje množství vody pro přípravu směsi v porovnání s „klasickými cementobetonovými“ recepturami, čímž se zlepšují inženýrské vlastnosti. To je vysvětlováno tím, že granulometrie kameniva a cementu ovlivňuje mezerovitost a tím i požadavky na množství vody. Přidání popílku může způsobit snížení objemu mezer ve směsi a tím i snížit potřeby vody pro dosažení požadované konzistence.

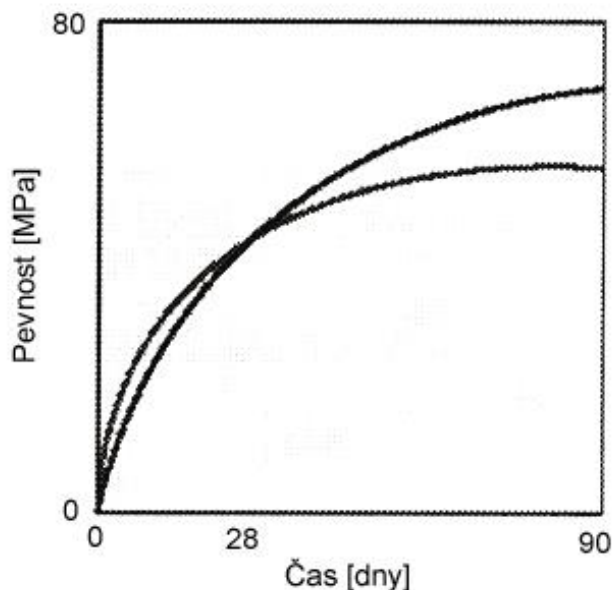
Přidáním popílku do hubeného betonu se zlepší reologické vlastnosti těchto směsí, jelikož postrádají dostatečný podíl jemných částic.

Dalším pozitivním dopadem vycházejícím ze zvýšení podílu jemných částic v betonové směsi přidáním popílku je snížení odlučování vody v čerstvém stavu, tzv. „bleeding“ betonu.

Navíc popílek v betonu v čerstvém stavu zlepšuje zpracovatelnost, která závisí na soudržnosti a obsahu cementové malty v betonové směsi. Výhodou náhražek cementu v cementobetonových směsích se stejnou hmotností popílku, ale s nižší objemovou hmotností než má beton, je nárůst objemu cementové malty, čímž se tedy zvýší zpracovatelnost směsi.

Přidání popílku do betonu prodlužujeme dobu tuhnutí, zejména u popílků s nižším obsahem CaO a vysokým obsahem uhlíku. Okamžitá pevnost betonu je obvykle nižší, ale v pozdějších fázích tuhnutí může být pevnost betonů s popílkem ještě vyšší než je pevnost referenčního betonu.

To je výsledkem pomalé pucolánové reakce popílku a vápna, která vzniká při hydrataci cementu.



Obr. č. 7 Nárůst pevnosti betonu v čase

Na Obr. č. 7, křivka s pozvolnějším nárůstem znázorňuje nárůst pevnosti betonové směsi s popílkem, zatímco druhá křivka, jež při 90 dnech zrání dosahuje nižší pevnosti, reprezentuje betonovou směs z běžného portlandského cementu.

Obdobné výsledky pevnosti betonu byly také pozorovány v případě nepropustnosti betonu. Důvodem ke snížení propustnosti směsí obsahujících popílek je transformace velkých mezer na menší a zvýšení jejich diskontinuity.

Kromě snížení propustnosti již zatvrdlých směsí se pro zlepšení životnosti takové směsi přidáním popílku zvýší odolnost proti působení síry. Konkrétně nahrazením jistého podílu cementu popílkem se sníží podíl volného $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a minerálního C_3A ve směsi. Obě sloučeniny jsou důležité pro negativní působení síranů.

Jedním z nejdůležitějších dopadů popílku na beton je určité snížení teploty hydratace. Celková teplota betonu i její vývoj jsou sníženy probíhajícími reakcemi popílku pro betony se střední dobou hydratace. Náhradou určitého podílu portlandského cementu uvolňujícího nejvíce tepla za popílek se sníží celkový potenciál pro nárůst tepla, neboť je známo, že popílek nevytváří teplo při prvních dnech hydratace. Pro stavbu betonových vozovek a tunelů v geotermálních oblastech jsou cementové směsi s popílkem obzvláště vhodné z důvodu omezeného výskytu trhlin způsobených teplem.

Odolnost proti zmrazování betonů s přísadkou popílku je zapříčiněna přítomností vzduchových mikropórů a nízkou propustností směsi. Za předpokladu, že se zvýší diskontinuita mezer a i samotná mezerovitost, jež je vhodně zvolená, lze dosáhnout požadované odolnosti směsí proti cyklickému zmrazování. (Dimter, Rukavina a Minazek, 2007 [33]).

Použití většího množství popílku třídy C a třídy F v betonových vozovkách

Tato studie provedená v USA uvádí výsledky výzkumu, vedeném pro vývoj a použití většího množství popílku třídy C a třídy F v recepturách betonu do povrchu vozovek.

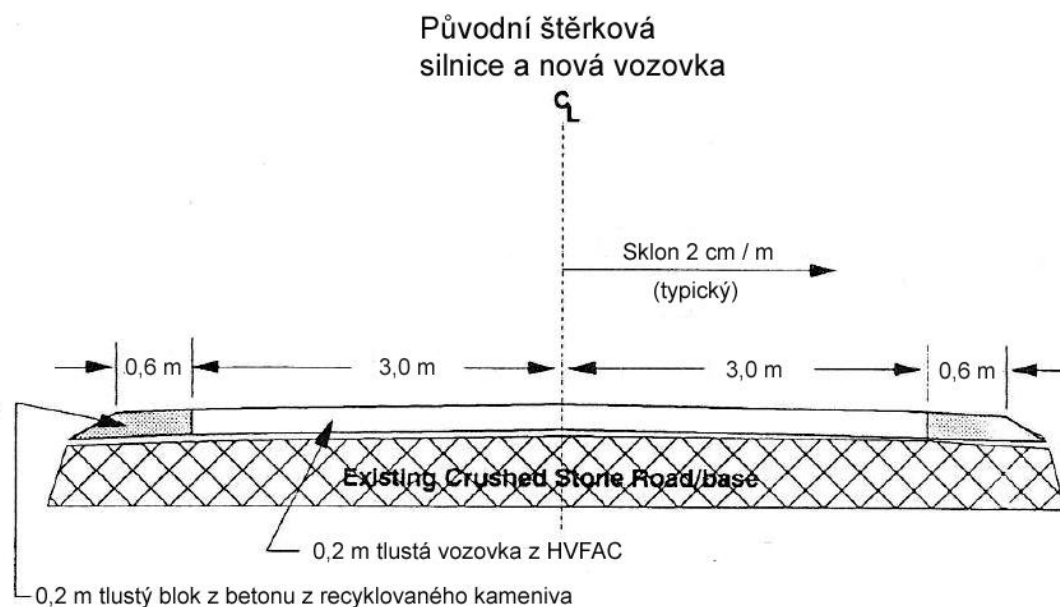
Receptury byly vyvinuté pro beton do povrchu vozovek s 20 a 50 % náhradou popílkem třídy C a 40 % náhradou popílkem třídy F za portlandský cement. Tyto směsi byly použity k prokázání jejich potenciálu pro užití v silničním odvětví a skutečné výsledky aplikace testu jsou uvedeny včetně údajů čerstvého betonu, pevnosti v tlaku, pevnosti v tahu a trvanlivosti v rámci zmrazování a rozmrazování.

Tento výzkum zahrnující použití většího množství popílků ukázal, že popílků mohou být použity pro výrobu velmi kvalitních povrchů vozovek.

Všechny tři betonové směsi byly použity na 1280 m dlouhou silnici přenášející tíhu od těžkých nákladních vozidel.

Návrh a konstrukce vozovky

Jako základní vrstva posloužila původní šterková silnice a na ni byla vylitá 6 m široká a 200 mm tlustá betonová vozovka. Vozovka byla svažována ze středu do stran ve sklonu 2 cm na 1 m a po stranách vozovky byly umístěny 0,6 m široké boky z betonu z recyklovaného kameniva. Dilatační spáry se zvolily po 6 m intervalech a při každé nově navazující betonové směsi po úsecích přibližně 402 m. Obr. č. 8 ukazuje průřez silnicí.



Obr. č. 8 Průřez budované vozovky

Beton byl z centrální betonárky přepravován klasickými domíchávači a ukládán klasickými finišery v průběhu dvou dnů v září roku 1990. Silnice byla otevřena pro nákladní dopravu po 10 dnech od dokončení výstavby a funguje nadále bez zjevných vad.

Minimální 28 denní pevnost v tlaku byla stanovena na 24 MPa a provzdušnění směsi 5 až 7 % objemových.

Propad a kontrola provzdušnění byla složitější u směsi s popílkem třídy F, který se vyznačoval „lepkavou“ konzistencí, než u třídy C. Beton s popílkem třídy F se vyznačoval pomalejším náběhem počátečních pevností potřebných pro pohodlné řezání dilatačních spár. Doba potřebná pro řezání tohoto betonu se pohybovala mezi 24 a 48 hodinami.

Rozdíl je také v barvě směsí. Zatímco směsi s popílkem 20 a 50 % třídy C měly každá trochu jiný tón slabě béžové, směs s 40 % popílku třídy F vykazovala středně šedé břidlicové zbarvení.

Materiály

Do tohoto projektu byl použit Portlandský cement typu I. Chemické složení tohoto cementu je zobrazeno v Tab. č. 2.

Složka	Zastoupení [%]
SiO ₂	20,0
Al ₂ O ₃	4,7
Fe ₂ O ₃	2,7
SO ₃	4,7
MgO	3,7
CaO	63,0
TiO ₃	0,3
Na ₂ O	0,2
K ₂ O	0,7
Vlhkost	0,4
ZŽ	1,3

Tab. č. 2 Složení portlandského cementu CEM I použitého ve směsi pro cementobetonovou vozovku

Popílek třídy F byl získaný z elektrárny Oak Creek a popílek třídy C z elektrárny Pleasant Prairie. Obě elektrárny se nacházejí v jihovýchodním Wisconsinu. Fyzikální a chemické parametry těchto popílků jsou uvedeny v Tab. č. 3.

Složka	Zastoupení [%]	
	Popílek třídy C	Popílek třídy F
SiO ₂	35,4	46,8
Al ₂ O ₃	17,5	23,7
Fe ₂ O ₃	5,3	13,2
SO ₃	2,8	1,2
MgO	4,6	1
CaO	26,1	3,1
Vlhkost	0,1	0,1
ZŽ	0,4	7,9

Tab. č. 3 Složení popílku třídy C a třídy F použitých ve směsi pro cementobetonovou vozovku

I přes ztráty žíháním (ZŽ) větší než 6 % pro tento zdroj popílku třídy F se v laboratorních podmínkách ukázal jeho výkon dostatečně odpovídající pro konstrukční použití. Tento výzkum byl proveden, aby prokázal vhodnost tohoto popílku pro silniční práce. Byl použit přírodní písek a štěrky z místních zdrojů tříděný v souladu s ASTM C 136 a maximální velikost hrubé frakce kameniva byla 38 mm. Dle specifikace chemických přísad do betonu (ASTM C 494, typ F) byl použit pro beton s popínkem třídy F superplastifikátor na melaminové bázi a ve všech směsích byla použita provzdušňovací přísada na bázi pryskyřic vyrobená firmou Grace Company. Dávky přísad byly měněny pro dosažení požadovaného provzdušnění pro tento projekt.

Proporce směsí

Byly vybrány tři směsi. Kontrolní standardní směs s 20 % popílku třídy C (označení směsi S3) jež je uvedena ve státě Wisconsin v oddělení pro dopravu. Dále směs s vysokým obsahem popílku třídy C (označení S2), která byla vybrána na základě předchozích zkušeností s konstrukční třídou a kvalitou silničního betonu. Cementovou maltu této směsi tvořilo 50 % popílku třídy C a 50 % Portlandského cementu CEM I. Další směs s vysokým obsahem popílku byla vybrána na základě laboratorních zkušeností z centra pro využití vedlejších produktů, kde byla tato směs vyvinuta pro popílek třídy F. Zvolená směs obsahovala 40% popílku třídy F a 60% Portlandského cementu CEM I, kamenivo, vodu, provzdušňovací přísadu a superplastifikátor (označení směsi S1). Konzistence sednutí pro všechny tři směsi byla udržena na hodnotě 51 ± 25 mm. Přídavek superplastifikátoru do směsi s popínkem třídy F udržel hodnotu vodního součinitele W/C na nízké úrovni. Vodní součinitel W/C byl u směsi s popínkem třídy C při náhradě 20% za cement na úrovni 0,34 až 0,40 a při náhradě 50% za cement na úrovni 0,34 až 0,37.

Provedené zkoušky na vzorcích

Na válcích o průměru 150 mm a výšce 300 mm byla provedena zkouška pevnosti v tlaku a pevnosti v tahu v souladu s ASTM C 39 a ASTM C 496. Pro každou zkoušku v různém časovém období byly pokaždé testovány tři vzorky. Pro pevnost v tahu za ohybu byly připraveny nosníky o rozměrech 15x15x76 mm v souladu s ASTM C 78 a pro každou směs se testovaly vždy tři tyto vzorky v různém časovém období.

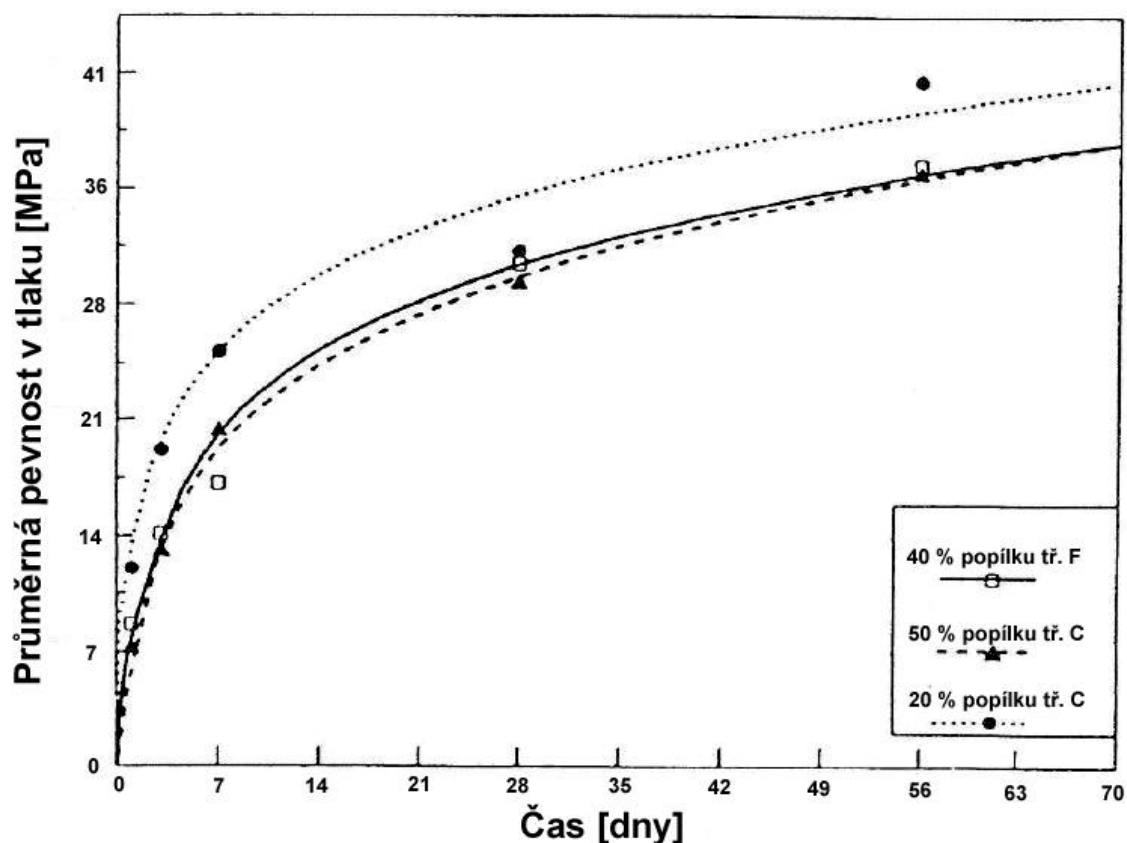
Pro zjištění trvanlivosti je rozhodující zkouška odolnosti betonu proti zmrazování a rozmrazování. Pro tuto se vytvořily vzorky o různých velikostech, tedy hranoly 75x75x280 mm a 75x100x310 mm. Odolnost proti zmrazování a rozmrazování byla hodnocena v souladu s ASTM C 666, metoda A. Ukazatele měřené pro trvanlivost byly koeficient trvanlivosti, změny rezonanční frekvence, hmotnost a pulzní rychlost.

Výsledky a diskuze této studie

Pevnost v tlaku

Výsledky pevnosti v tlaku, připravené ze vzorků na staveništi, splňovaly pro všechny tři směsi průměrnou minimální pevnost v tlaku 24 MPa po 28 dnech zrání. Pevnost v tlaku stoupala s postupem času u všech tří směr, jak je ukázáno na Obr. č. 9. Tento obrázek také poukazuje na to, jak pevnost v tlaku postupovala vytrvale vzhůru i mezi 28 a 56 dnem.

Hodnoty vzorků pro směs o 40 % Popílku třídy F vykazovaly průměrnou pevnost v tlaku po 3 dnech již 14 MPa, po 7 dnech 17 MPa, po 28 dnech 30 MPa a po 56 dnech dokonce 36 MPa. U směsi o 50 % popílku třídy C byla pevnost v tlaku po 3 dnech 13 MPa, po 7 dnech 20 MPa, po 28 dnech 30 MPa a po 56 dnech 35 MPa. U směsi o 20 % popílku třídy C byla pevnost v tlaku po 3 dnech 19 MPa, po 7 dnech 25 MPa, po 28 dnech 31 MPa a po 56 dnech 41 MPa.



Obr. č. 9 Nárůst pevnosti v tlaku pro směsi S1 (40 % popílku tř. F), S2 (50 % popílku tř. C) a S3 (20 % popílku tř. C)

Pevnost v tahu

Nárůst pevnosti v tahu také rostl s postupujícím časem. Pevnost v tahu byla obecně menší pro směsi s větším procentuálním obsahem popílku ve všech časových obdobích. Průměrné 28 denní výsledky vykazovaly 2,6 až 3,1 MPa a průměrné 56 denní výsledky 3,1 až 3,5 MPa.

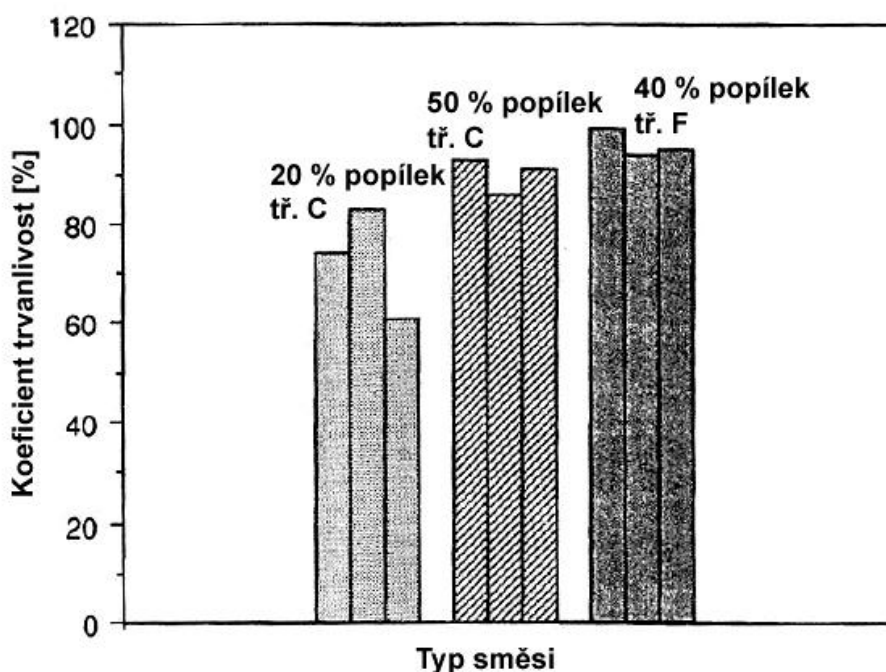
Pevnost v tahu za ohybu

Výsledky pevnosti v tahu za ohybu také ukázaly stabilní nárůst pevnosti. Zde výsledky vykazovaly 4,0 až 4,7 MPa po 28 dnech a 4,4 až 4,9 po 56 dnech zrání.

Zmrazování a rozmrazování

Souhrn testů ukázal, že všechny směsi vyhověly zkoušce zmrazování a rozmrazování odpovídající ASTM C 666. Z výsledků bylo patrné, že nejlepší koeficient trvanlivosti měla směs s 40 % popílku třídy F a nejmenší koeficient trvanlivosti směs s 20 % popílku třídy C. Z Obr. č. 10 je vidět, že koeficient trvanlivosti u směsi s 50 % popílku třídy C se blížil výsledkům, které měla směs s 40 % popínkem třídy F.

(Hooton, Naik, Ramme a Tews, 1994 [34]).



Obr. č. 10 Koefficient trvanlivosti směsi S1 (40 % Popílku tř. F), S2 (50 % popílku tř. C) a S3 (20 % popílku tř. C)

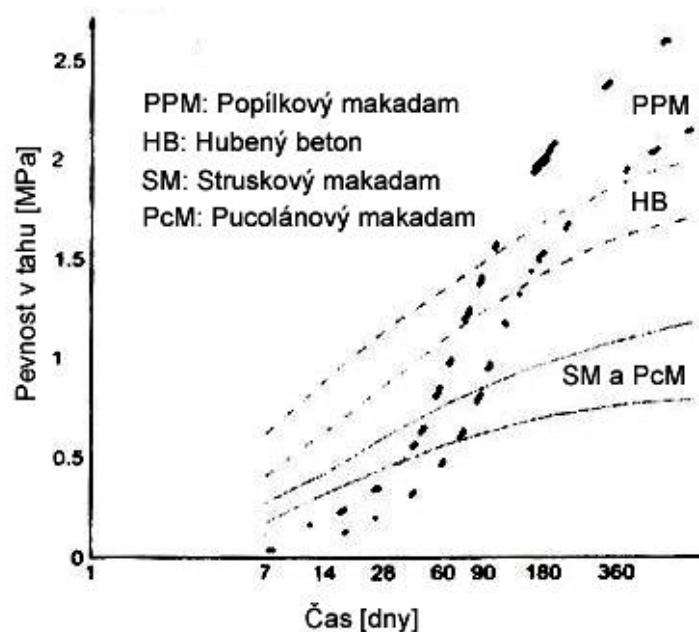
2.5.2 Použití popílků do podkladních vrstev vozovky

Zatímco se betonové směsi s popínkem používají do prolévaných vrstev vozovky v zahraničí již po mnoho let, používání směsí pro stabilizace s pojivem z popílku a cementu do podkladních vrstev vozovky nemá takovou tradici. Když v sedmdesátých letech minulého století vzrostla cena betonu, byl popílek používán v široké míře jako náhrada za určitý podíl cementu ve směsích pro stabilizace. K výběru popílku jako částečné náhrady cementu vedlo mnoho faktorů, i když ten ekonomický byl nejdůležitějším, neboť cena popílku oproti cementu je zanedbatelná. Z dalších faktorů je především pozitivní dopad přídavku popílku do betonových směsí na vlastnosti směsi, jak

vyplývá z mnohaletého zkoušení. Očekávalo se, že obdobný dopad bude mít popílek i na kvalitativně nižší směsi pro stabilizace.

Brzy bylo prokázáno, že tyto směsi pro stabilizace budou mít zelenou zejména pro jejich kontinuální nárůst pevnosti v tahu i po dobu několika let po pokládce.

Na Obr. č. 11 jsou zobrazeny různé směsi určené pro stabilizaci podkladní vrstvy vozovky. Je zde patrný nárůst pevnosti u popílkového makadamu v raném období nejnižší, ale z hlediska dlouhodobého dosáhnul naopak nejlepších výsledků (Dimiter, Rukavina, Minazek, 2007 [33]).



Obr. č. 11 Nárůst pevnosti v tahu jako funkce času

Chorvatské zkušenosti s použitím popílku do vozovek

První studie o směsích pro stabilizace vyráběných z místních zdrojů (jemnozrnné těžené kamenivo z řeky Drávy) s hydraulickým pojivem z cementu a popílku byla v Chorvatsku provedena fakultou stavební v Osijeku v roce 1996. Jediným domácím producentem popílku byla elektrárna Plomin, jejíž popílek nedosahoval příslušné kvality, proto byl pro zkoušení použit popílek z maďarské elektrárny v Pešti (Peczs). Svým složením ($\text{CaO} = 2,5 \%$) spadal tento popílek do kategorie bez schopnosti samostatné vazby (třída F) a mohl být použit pouze v kombinaci s jiným hydraulickým pojivem.

Množství pojiva (specifický podíl cementu s popílkem) ve zkoušených směsích byl 6 %, 9 %, 12 % a 15 % celkové hmotnosti směsi. V každém z těchto podílů byl podíl popílku zvýšen z 0 %, na 15 %, 20 %, 25 % a 30 % vzhledem k podílu cementu.

Mechanické vlastnosti (pevnost v tlaku a příčném tahu) byly měřeny na každém vzorku směsi pro stabilizace. Tato studie byla zaměřena na stanovení chování popílku a jeho vztahu k cementu ve směsi pro stabilizace.

Bylo zjištěno, že může být částečně nahrazena jistá část cementu, a pevnosti v tlaku a příčném tlaku se budou stále nacházet v uspokojivých limitech pro použití směsi do podkladních vrstev vozovek pozemních komunikací.

Výsledky naznačily, že podíl popílku v pojivu by měl být 15 až 25 % ve směsi pro stabilizace za předpokladu příslušného podílu pojiva z celkové hmotnosti směsi.

Popisovaná studie směsí pro stabilizace těžného kameniva, cementu a popílku byla rozšířena a pokračovalo se v ní v roce 2004. Komplexní laboratorní studie byla prováděna na 600 vzorcích směsí pro stabilizace včetně zkoušení mechanických a elastických vlastností: pevnosti v tlaku a příčném tahu, dynamický modul pružnosti, dynamický modul pružnosti ve smyku a Poissonovo číslo.

Množství pojiva (podíl cementu a popílku) ve zkoušených směsích byl 10 a 14 % z celkové hmotnosti směsi a u každého z nich byl podíl popílku zvýšen z 0 %, 25 %, 50 % a 75 % k podílu cementu.

Výsledek potvrdil, že použitý popílek může nahradit podíl cementu (maximálně 25 %) hmotnosti pojiva a že pevnost v tlaku směsi pro stabilizace zůstává v rámci předepsaných hodnot požadovaných pro její použití do podkladních vrstev vozovky stabilizovaných hydraulickým pojivem. Minimální množství pojiva ve směsi pro stabilizace bylo omezeno na 12 % celkové hmotnosti směsi.

Výsledky směsí s nižším podílem cementu pro stabilizace s podílem popílku v pojivu 50 a 75 % nesplnily požadavky na použití do stabilizovaných vrstev vozovky a hodnota minimální pevnosti v tahu byla podstatně nižší než požadovaná.

Obě výše popisované studie využily pro své účely popílek z maďarské elektrárny v Pešti. Důvody pro výběr tohoto popílku byly blízkost zdroje popílku, dobré zkušenosti maďarské strany s používáním tohoto popílku a nedostatečná kvalita popílku domácího producenta. Při řešení studie však elektrárna v Plominu, začala spalovat nové uhlí, a proto fakulta stavební v Osijeku plánovala opakovat své studie i s chorvatským popílkem. Dalším důvodem pro pokračování studie byla plánovaná výstavba dvou dalších tepelných elektráren v blízkosti měst Sisak a Osijek a nakládání s odpadem se tak stane v Chorvatsku reálným problémem (Dimiter, Rukavina, Minazek, 2007 [33]).

2.5.3 Popílkové stabilizáty

Popílkový stabilizát je ve své podstatě stavební polotovar, který je vyráběn jako homogenní směs popílku, většinou s příměsí jednoho, nebo více druhů pojiva, případně speciálních přísad. Stabilizát se dopravuje na stavbu v suchém stavu, kde se v jednoduchém mobilním zařízení smíchá s vodou přibližně v poměru 1 tuna suché směsi na 1 až 1,5 m³ vody. Základním principem použití popílkové suspenze je využití její tixotropní vlastnosti. Čerpatelný polotovar po odlevu do konstrukce zemního tělesa přechází samovolně do těstovitého stavu a následně do stavu hutného.

Stabilizát je ideálním materiálem pro vyplňování podzemních a obtížně přístupných prostor jako alternativa výplňových betonů a hutněných zásypů. Dá se také využít pro odizolování různých hlušinových a jiných odvalů, které mají negativní dopad na životní prostředí, například při prohořívání a exhalaci plynů zatěžujících okolí. Obvykle se

stabilizát pokládá v cca 0,5 m vrstvách a jeho konečná pevnost je okolo 3 MPa. Provádí se varianty jak z popílku z klasického, tak i z fluidního spalování. (Šarboch, 2006 [40]; Černý, 2007 [41])



Obr. č. 12 Zařízení pro lití popílkového stabilizátu



Obr. č. 13 Čerstvě aplikovaná suspenze popílkového stabilizátu



Obr. č. 14 Zatvrdlý stabilizát po 2 dnech od uložení

2.5.4 Vysoká náhrada cementu popílkem v samozhutnitelných betonech

Udržitelný rozvoj v technologii SCC (samozhutnitelných betonů) zahrnuje využití průmyslových odpadů jako popílek. Na konferenci v Montrealu byla představena studie HVFA SCC a vyhodnocení daných SCC o různé dávce popílku. Vlastnosti, o kterých se zde hovořilo, byly plastické vlastnosti betonu, vývoj pevnosti a zrychlená propustnost chloridů. Vysoký obsah popílku rovněž zlepšil reologické a mechanické vlastnosti a také trvanlivost.

Popílek se v betonářské technologii pomalu stává klasickou příměsí, ovšem koncept pro jeho užití ve větším množství zejména u SCC se moc nerozšířil. HVFA SCC betony jsou takové, které obsahují 50 %, či více elektrérenského popílku z celkového množství jemných podílů.

Přítomnost minerální přísady má určitou roli na výkonnost cementové malty, především v její mikrostruktuře. Mikrostrukturou cementové malty se rozumí zapojení všech jemných částic o velikosti pod 125 μm , chemických přísad a vody.

Zlepšení a zesílení vlastností betonu v mikrostruktuře přímo souvisí se zrnitostí a pórovitostí betonu v oblasti kontaktní zóny malty s kamenivem. Hydratační proces značně závisí na charakteristice cementové malty, tedy obyčejném Portlandském cementu a materiálech doplňujících, či nahrazujících cement. Dále také na externích faktorech jako je okolní teplota, nebo vlhkost.

Hydratační proces popílku v cementové maltě začíná tehdy, když pH kapilární vody dosáhne alespoň hodnoty 13. Velikost částic, mineralogická skladba a chemická povaha popílku stejně jako jeho kvantitativní podíl s cementem hraje důležitou roli pro pucolánovou reakci.

SCC obvykle obsahuje vyšší množství jemných podílů, než li konvenční beton. Systém částic je rovněž dispergován ve velké míře díky vysokým podílům přidávaného superplastifikátoru. Tedy v tomto nevibrovaném částicovém systému můžeme očekávat hustější a kompaktnější povahu konzistence a hustější strukturu ve srovnání s normálními vibrovanými betony. Hustější mikrostruktura v zatvrdlém stavu může vést ke zlepšení mechanických vlastností a trvanlivosti betonové konstrukce. Mikrostruktura betonu je velmi závislá na mikrostruktuře cementové malty. Zde je důležitý vztah mezi porézní strukturou tuhé látky, vlastnostmi transportní kapaliny a degradací. Z inženýrského hlediska stabilní SCC zdokonaluje tvorbu mikrostruktury a jednotné vlastnosti betonu v konstrukčních prvcích, což zvyšuje jejich životnost.

Robustnost je schopnost směsi SCC zachovat si vlastnosti vůči vnějším změnám. Zdroje vnějších změn jsou vlastnosti složek, změny množství složek během dávkování, míchání a charakteristika směsi, což jsou časově závislé jevy. Nedostatečná odolnost nepříznivě ovlivňuje reologickou skladbu a trvanlivost směsi.

Existují dva typy zkoušek nezbytných pro vývoj směsi SCC. První typ potvrzuje, že směs má v čerstvém stavu dostatečné reologické vlastnosti. Druhý typ potvrzuje, že směs v zatvrdlém stavu dosahuje požadovaných cílů. Zkoušená směs vykazovala adekvátní výsledky na uspokojivé úrovni, kdy zkouška rozlité kužele pro SCC měla minimální

hodnoty 650 mm, V-funnel čas toku v rozmezí 6-12 sekund, L-Box poměr výšky betonu na konci vodorovné části ku výšce za dělicími dvířky byl minimálně 0,8. Zkouška pevnosti v tlaku se provádí dle pokynů Indické standardní specifikace IS 516 a ekvivalentní standardní ASTM, kterou je ASTM C - 496. Propustnost chloridových iontů se považuje za nízkou a velmi nízkou pokud je její hodnota v rozmezí 1000 – 2000 coulombů, respektive 100 – 1000 coulombů.

SCC směsi na základě nízkého i vysokého obsahu popílků jsou dimenzovány na různé kombinace dvou typů jemných podílů. Cílem této studie představené v Montrealu bylo prozkoumat možnosti při výrobě SCC s velkým obsahem Indického popílku. Navíc byly zkoumány reologické vlastnosti a taky mechanické, jako např. trvanlivost SCC při různém složení jemných podílů a různém vodním součiniteli.

Směsi SCC byly rozděleny do dvou skupin. První skupinu tvořila směs SCC-1 a SCC-2 a byla navrhována na náhradu popílkem 30% a vodní součinitel $w = 0,35$. Druhou skupinu tvořila směs SCC-3 a SCC-4, které byly navrženy na 50% náhradu cementu popílkem a vodní součinitel $w = 0,25$.

Složení směsí najdeme v Tab. č. 4, plastické a mechanické vlastnosti SCC směsí jsou uvedeny v Tab. č. 5.

Směs SCC	W	Cement	Popílek	Voda	Super- plastifikátor	WMA	Jemné podíly		Hrubé kamenivo	
		[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[%]		FA1	FA2	10mm	20mm
SCC-1	0,36	350	150	180	1,36	-	884	0	273	544
SCC-2	0,35	340	146	170	2,75	0,15	571	245	699	234
SCC-3	0,25	340	340	170	1,93	-	548	235	533	186
SCC-4	0,24	354	354	170	2,5	-	426	426	618	0

Tab. č. 4 Složení SCC směsí s použitím popílků

Směs SCC	Pevnost v tlaku [MPa]		Zk. Rychlé chloridové propustnosti [Coulomb]		Zkouška rozlití kužele		V-funnel	L-box
	28 denní	56 denní	28 denní	56 denní	T ₅₀ [sec]	Rozlití [mm]	[sec]	
SCC-1	60,4	67,1	1191	494	2,75	640	12,1	0,88
SCC-2	58,4	63,7	1295	722	3,69	750	10,3	0,90
SCC-3	61	65,8	781	421	3,38	860	8,6	0,96
SCC-4	66,4	76,7	829	377	2,56	840	11,6	0,95

Tab. č. 5 Plastické vlastnosti, pevnost a trvanlivost směsí po 28 a 56 dnech

Množství tmele a jeho mikrostruktura je ve všech případech SCC při vyšší náhradě cementu popílkem větší a hutnější. Mikrostruktura tmele je ovlivněna přítomností částic menších než 125 μm v popílků, hlavně tedy u popílku FA2. Tyto vlastnosti snižují tření mezi samotnými částicemi, kdy kulatá zrna popílku mají dobrou reologii a posilují tekutost SCC směsí. Je evidentní podstatný nárůst mechanických vlastností včetně trvanlivosti těchto SCC směsí v průběhu mezi 28 a 56 dny. Nižší vodní součinitel „w“ a vyšší náhrada cementu popílků má viditelný vliv na pevnost v tlaku, která vzrůstá zejména až po 28 dnu,

oproti klasickým SCC bez přídavku popílku, kde pevnost v tlaku po 28 dnu již významně nenarůstá.

Hustá mikrostruktura v zatvrdlém stavu u SCC vede k zlepšení trvanlivosti betonu. Tím se rozumí zvýšení odolnosti betonu proti průniku chloridových iontů do systému betonu. Zkouška rychlé chloridové propustnosti vykazuje u všech směsí SCC po 56 dnech méně než 1000 coulombů. Nižší vodní součinitel a vysoký obsah jemných podílů ve směsi představuje ložisko pro snížení hodnoty rychlé chloridové propustnosti. Při vyšších náhradách cementu popílkem je vidět ostré snížení hodnoty rychlé chloridové propustnosti mezi 28 a 56 dny.

SCC směsi založené na vysoké náhradě cementu popílkem jsou krokem dopředu k udržitelnosti rozvoje. Popílek jako minerální příměs je potencionální materiál pro manipulaci s reologickými a mechanickými vlastnostmi a zvýšení trvanlivosti SCC. Směsi SCC tvořené různými pucolánovými materiály se chlubí excelentní reologií, mechanickými vlastnostmi a trvanlivostí. Vyšší náhrada cementu popílkem dle studie představené v Montrealu vykazuje rapidní nárůst těchto vlastností zejména mezi 28 a 56 dnem. Tato studie demonstruje čistý potenciál využití průmyslového odpadu cestou HVFAC, respektive jeho využití v odvětví SCC, kde jeho environmentální přínos je nepopíratelný, jelikož je technologicky velmi dobře využitelný (Chowdhury a Biswas, 2010 [37]).

2.5.5 Další možnosti použití popílků spalovaných klasickým způsobem

Popílek spalovaný klasickým způsobem má široké spektrum uplatnění i v jiných oblastech stavebnictví, než li pouze v oblasti výroby betonu, či oblastech dopravních staveb. Dá se využít například při výrobě pórobetonu hydrotermálním způsobem, nebo se z něj dají vyrábět umělá kameniva. Obvyklé použití je také v cementářském průmyslu, kde tvoří složku směsných cementů. Probíhají také výzkumy použití tohoto popílku v keramice na výrobu za sucha lisovaných keramických obkladových prvků.

2.5.6 Využití fluidních popílků pro výrobu betonů

Z důvodů rozdílnosti složení a chování fluidních popílků oproti popílkům z klasického spalování není prozatím využití těchto popílků do betonu připouštěno. Fluidní popílek vzniklý spalováním uhlí ve vzhledu obsahuje jistý podíl nerozpustného anhydritu CaSO_4 II, částečně rozložené jílové minerály a volné CaO . Největším důvodem, proč se tyto popílků nepoužívají do betonu je vyšší obsah SO_3 , díky kterému dochází k tvorbě ettringitu $\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$.

Proto využití tohoto typu popílku je především v jiných oblastech stavebnictví, jako např. výroba stabilizátů, jež nahrazují výplňové betony, nebo výroba pórobetonu, umělých kameniv studenou cestou, nebo pro soldifikaci nebezpečných odpadů. Pro soldifikaci je tento typ popílku zvláště vhodný díky jeho schopnosti vázat na sebe značné množství vody a poté samovolně tuhnout i bez přídavku dalších činidel a také díky jeho neutralizační kapacitě. Velkou měrou se také podílí úletová frakce, která je tvořena prachovými částicemi s velkým specifickým povrchem, což je předpoklad pro reakci se

zneškodňovaným odpadem (Černý, [41]; Balkovic, Peteja, Drábik, 2007 [44]; Bednarík, Vondruška, [43]).

Dále již byly provedeny výzkumy použití fluidního popílku pro maltoviny, nepřímo jako složku směsného cementu. Výzkumné práce zabývající se tímto tématem hovoří o jeho možném použití, ovšem s ohledem na zajištění objemové stálosti vzniklého cementu je dávkování tohoto popílku na nízké úrovni. Uvažuje se také použití pro výrobu portlandských slinků, kde byl proveden taktéž výzkum. Bylo zjištěno, že díky nízkému obsahu CaO pro tento účel, může popílek tvořit pouze jednu složku surovinové moučky, přičemž druhou musí tvořit vysokoprocentní vápenec. Při teplotě výpalu 1200 – 1250°C byla výrazná především tvorba β -C₂S. Některé slinky navíc již při teplotě 1250°C obsahovaly prvotní podíly alitu C₃S (Dvořák, Kulísek, Wagner, 2007 [45]; Dvořák, Fridrichová, Novák, 2006 [46]).

3 PRAKTICKÁ ČÁST

3.1 Cíl praktické části

Cílem praktické části této práce je porovnat vlastnosti směsí s českými dostupnými popílkami v rámci jejich reologie, náročnosti na potřebu vody, pevnosti, mrazuvzdornosti, odolnosti vůči chemickým rozmrazovacím látkám a vůči síranům a také vodotěsnosti těchto směsí.

Pro srovnání sloužila referenční směs pouze z portlandského cementu. Zkoušky byly prováděny vždy po 28 a 60 dnech, aby byl patrný vývoj vlastností směsí v tomto časovém rozmezí.

3.2 Metodika práce

1. Etapa

- Návrh složení směsí betonu třídy C 30/37 XF4 s náhradou cementu popílkem 0 %, 20 %, 30 % a 50 % s použitím těžného kameniva frakce 0 – 4 mm a drceného kameniva frakce 8 – 16 mm. Poměr mísení kameniva byl 47 % : 53 %. Cement byl použit CEM I 42,5 R a superplastifikátor na naftalenové bázi. Dále byla použita provzdušňovací přísada pro dosažení požadovaného množství obsahu vzduchu v betonu.
- Návrh složení směsí betonu třídy C 20/25 s náhradou cementu popílkem 23 % s použitím stejné plastifikační přísady, cementu i kameniva jako u směsi C 30/37 XF4. Poměr mísení kameniva byl také 47 % : 53 %.

Receptury byly navrženy na konzistenci S3. Pro recepturu C 30/37 XF4 bylo vyrobeno z každé směsi 12 krychlí o rozměrech 150 x 150 x 150 mm a 4 trámce o rozměrech 100 x 100 x 400 mm. Pro recepturu C 20/25 bylo vyrobeno z každé směsi 15 krychlí o rozměrech 150 x 150 x 150 mm.

2. Etapa

Vlastní míchání směsí, zkoušení vlastností čerstvého betonu a výroba zkušebních těles pro zkoušky.

Provedené zkoušky:

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

3. Etapa

Zkoušení vlastností betonu v zatvrdlém stavu.

Provedené zkoušky:

- stanovení objemové hmotnosti v zatvrdlém stavu
- stanovení pevnosti v tlaku po 28 a 60 dnech
- stanovení pevnosti v tlaku při uložení v síranovém prostředí po 90 dnech
- stanovení vodotěsnosti betonu po 28 a 60 dnech
- stanovení mrazuvzdornosti
- stanovení odolnosti povrchu betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek po 28 a 60 dnech

3.3 Použité materiály

Cement

Pro všechny receptury byl použit cement CEM I 42,5 R z produkce Českomoravský cement a. s., ze závodu Mokrý.

Kamenivo

Pro výrobu betonových směsí byly použity dvě frakce kameniva a to písek frakce 0 – 4 mm z lokality Žabčice a drcené kamenivo frakce 8 – 16 mm z lokality Olbramovice.

Přísady

Jako plastifikační přísada byl použit superplastifikátor na naftalenové bázi, typ STACHEMENT NN od firmy Stachema Kolín, spol. s.r.o. Tento plastifikátor by dle výrobce neměl ovlivnit účinnost provzdušňovacích přísad přidávaných do betonu. Vlastnosti této přísady jsou uvedeny v Tab. č. 6.

hustota ρ [kg.m ⁻³]	1200 ± 30
obsah sušiny [%]	42 ± 1
pH	8 - 11
Max. obsah chloridů [% hm.]	0,1
Max. obsah alkálií [% ekv Na ₂ O]	8

Tab. č. 6 Vlastnosti superplastifikační přísady STACHEMENT NN

Jako provzdušňovací přísada pro vytvoření účinného vzduchu (10 – 300 μ m) zlepšujícího vlastnosti ztvrdlého betonu vůči odolnosti proti působení mrazu byl zvolen výrobek téže firmy Stachema Kolín, spol. s.r.o., konkrétně typ MICROPORAN (LP). Vlastností této provzdušňovací přísady jsou uvedeny v Tab. č. 7.

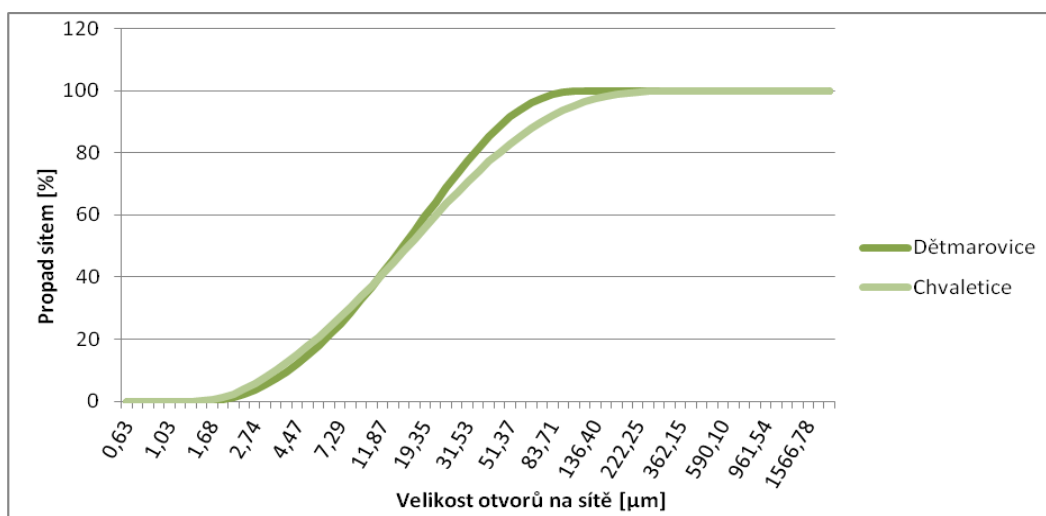
hustota ρ [kg.m ⁻³]	1015 ± 2
obsah sušiny [%]	4,5 ± 1
pH	9 - 11
Max. obsah chloridů [% hm.]	0,1
Max. obsah alkálií [% ekv Na ₂ O]	1,5

Tab. č. 7 Vlastnosti provzdušňovací přísady MICROPORAN (LP)

Příměsi

Testované příměsi nahrazující dávku cementu byly dva typy popílku a to čemouhelný, z elektrárny Dětmorovice a hnědouhelný z elektrárny Chvaletice.

Vlastnosti a chemické složení černouhelného popílku Dětmárovice jsou uvedeny v Tab. č. 8, vlastnosti a chemické složení hnědouhelného popílku Chvaletice jsou uvedeny v Tab. č. 9. Granulometrie těchto popílků je uvedena na Obr. č. 15.



Obr. č. 15 Granulometrie použitých popílků

SiO ₂ [%]	52,65	voda v původním vzorku [%]	0,07
Al ₂ O ₃ [%]	23,90	spalitelné látky [%]	2,885
CaO [%]	4,405	pH vodného výluhu	12,04
MgO [%]	2,34	obsah vodorozp. solí [%]	0,585
TiO ₂ [%]	0,99	sypná hmotnost [kg.m ⁻³]	753
Fe ₂ O ₃ [%]	7,135	setřesená hmotnost [kg.m ⁻³]	1070
SO ₃ [%]	0,43	měrná hmotnost [kg.m ⁻³]	2250,5
Na ₂ O [%]	<0,915	obsah celkové síry [%]	0,185
K ₂ O [%]	2,835	úhel skluzu popílku [st.]	36,5
P ₂ O ₅ [%]	0,31		
MnO [%]	0,102		
ztráta žiháním [%]	3,00		

Tab. č. 8 Vlastnosti a chemické složení černouhelného popílku Dětmárovice

SiO ₂ [%]	54,10	voda v původním vzorku [%]	0,085
Al ₂ O ₃ [%]	24,90	spalitelné látky [%]	0,905
CaO [%]	3,095	pH vodného výluhu	7,24
MgO [%]	1,52	obsah vodorozp. solí [%]	0,55
TiO ₂ [%]	1,53	sypná hmotnost [kg.m ⁻³]	736
Fe ₂ O ₃ [%]	11,165	setřesená hmotnost [kg.m ⁻³]	994
SO ₃ [%]	0,36	měrná hmotnost [kg.m ⁻³]	2235,5
Na ₂ O [%]	<0,805	obsah celkové síry [%]	0,145
K ₂ O [%]	1,325	úhel skluzu popílku [st.]	35,0
P ₂ O ₅ [%]	0,165		
MnO [%]	0,096		
ztráta žiháním [%]	1,325		

Tab. č. 9 Vlastnosti a chemické složení hnědouhelného popílku Chvaletice

3.4 Provedené zkoušky

Vzorky vyrobené z betonu byly umístěny do vodního uložení při teplotě 20°C.

3.4.1 Zkoušení vlastností v čerstvém stavu

Nejprve po zamíchání směsi byla provedena zkouška konzistence metodou sednutí 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. U receptury C30/37 XF4 byla navíc provedena zkouška stanovení obsahu vzduchu v čerstvém betonu tlakovou metodou dle ČSN EN 12350 – 7 Zkoušení čerstvého betonu – Část 7: Obsah vzduchu – Tlakové metody.

3.4.2 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 vždy pro každou směs betonu na 3 krychlích 150 x 150 x 150 mm, po 28 a 60 dnech zrání betonu. Zkoušky byly provedeny dle ČSN EN 12390 – 3 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles.

Stanovení pevnosti betonu v tlaku po uložení v síranovém prostředí (receptura C25/30)

Po 28 dnech zrání ve vodním uložení byly 3 vzorky z referenční směsi REF C25/30 a 3 vzorky směsi s černouhelným popílkem Dětmárovice receptury C-DET C25/30 přesunuty do uložení v síranovém prostředí nasyceného roztoku SO_4^{2-} . Zde byly ponechány 90 dnů a poté na nich byla stanovena pevnost v tlaku dle ČSN EN 12390 – 3 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles.

Stanovení vodotěsnosti betonu (receptura C25/30)

Stanovení vodotěsnosti betonu bylo provedeno vždy na 3 krychlích 150 x 150 x 150 mm pro každou směs receptury C25/30 po 28 a 60 dnech zrání betonu. Postupovalo se dle ČSN 73 1321: Stanovení vodotěsnosti betonu. Poté, co se vzorek upnul do vodotlačného zařízení se vždy postupně zvyšoval po určitém časovém rozmezí tlak vody působící na povrch vzorků. Prvních 24 hodin bylo působení tlakem 0,2 MPa (V2), dalších 24 hodin tlakem 0,4 MPa (V4) a posledních 24 hodin tlakem 0,8 MPa (V8).

Po dokončení zkoušky se tělesa vyjmula a ihned v polovině rozlomila. Prosáklá voda do struktury vzorku byla zakreslena a změřena její maximální hodnota hloubky průsaku v mm.

Stanovení odolnosti vůči CHRL (pro recepturu C30/37 XF4)

Zkoušení proběhlo vždy na 3 krychlích vyrobených z jednotlivých betonových směsí ve stáří 28 a 60 dnů. Krychle měly rozměr 150 x 150 x 150 mm a zkouška byla provedena dle ČSN 73 1326: Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek. Pro stanovení této zkoušky byla použita metoda A. Vzorky byly umístěny do misky s 5 % roztokem NaCl tak, aby krychle zasahovala 5 mm pod hladinou tohoto roztoku. Vzorek s miskou byl vložen do automatického mrazícího zařízení, kde byl vystaven celkově 100 cyklům zmrazování a rozmrazování. Po každých 25 cyklech byl vzorek vyjmut a z povrchu byly opláchnutím vodou odstraněny nesoudržné části, které byly zachyceny spolu s původním odpadem a po vysušení zváženy. Výsledkem této zkoušky je přepočet úbytku hmotnosti na jednotku plochy [g/m²] dohromady po 100 cyklech zmrazování a rozmrazování. Povrch je odolný, pokud odpad po 100 cyklech nepřekročí 1000 g/m².

Stanovení mrazuvzdornosti (pro recepturu C30/37 XF4)

Zkouška byla provedena dle ČSN 73 1322: Stanovení mrazuvzdornosti betonu. Zkoušena byla sada 4 trámčů, z nichž 2 trámce byly referenční – uloženy ve vodním prostředí a další 2 trámce byly vystaveny 100 zmrazovacím cyklům. Zkouška započala po 28 dnech zrání betonu. U vzorků jdoucích do mrazícího boxu byla stanovena před zkouškou jejich hmotnost, která byla po dokončení zmrazovacích cyklů opět stanovena pro určení úbytku hmotnosti vlivem zmrazování a rozmrazování.

Dále byla stanovena zkouška pevnosti v tahu za ohybu. Výsledkem byl tedy úbytek hmotnosti zkoušených trámčů v % a součinitel mrazuvzdornosti jako poměr hodnot aritmetického průměru pevností v tahu zmrazovaných a referenčních vzorků. Beton je mrazuvzdorný, pokud je hodnota součinitele mrazuvzdornosti vyšší, než 75 %.

Součinitel mrazuvzdornosti = $(f_{cf,mraz}/f_{cf,ref}) * 100$

3.5 Výsledky měření

3.5.1 Receptura REF C25/30

Tato receptura C20/25 byla bez popílku, pouze s portlandským cementem a sloužila jako referenční.

Složení směsi na m³:

	kg/m ³	Poznámka
CEM I 42,5R (Českomoravský cement)	377	
Popílek	0	
0-4 Žabčice	830	47 %
8-16 Olbramovice	925	53 %
Plastifikátor Stachement NN (FM)	2.67	0,7 % m _c
Voda	175	w = 0,46

Tab. č. 10 Složení receptury REF C25/30

Vlastnosti čerstvé betonové směsi:

Konzistence sednutí kužele [mm]	140
Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	2370

Tab. č. 11 Vlastnosti čerstvé směsi REF C25/30

Po 28 a 60 dnech byla stanovena objemová hmotnost, pevnost v tlaku a vodotěsnost. Dále byla vyhodnocena pevnost v tlaku po 90 denním uložení směsi v síranovém prostředí. Výsledky jsou uvedeny v Tab. č. 12. Vývoj pevností je znázorněn na Obr. č. 16. Vývoj vodotěsnosti je znázorněn na Obr. č. 17. Porovnání pevnosti v tlaku po 90 denním uložení v síranovém prostředí je uvedeno na Obr. č. 18.

Typ zkoušky	po 28 dnech	po 60 dnech
ρ [kg/m ³]	2370	2360
f_c [MPa]	50,0	49,3
Hodnota průsaku V2 - V8 [mm]	49	38
	Po uložení 90 dnů v síranovém prostředí	
f_c [MPa]	46,7	

Tab. č. 12 Výsledky zkoušek na ztvrdlém betonu směsi REF C25/30

3.5.2 Receptura C-DET C25/30

Tato receptura byla s použitím černouhelného popílku z elektrárny Dětmarovice. Složení směsi na m³:

	kg/m ³	Poznámka
CEM I 42,5R (Českomoravský cement)	290	
Popílek Dětmarovice	87	23 % náhrada
0-4 Žabčice	830	47 %
8-16 Olbramovice	925	53 %
Plastifikátor Stachement NN (FM)	2.67	0,7 % (m _c +m _a)
Voda	175	w = 0,46

Tab. č. 13 Složení receptury C-DET C25/30

Vlastnosti čerstvé betonové směsi:

Konzistence sednutí kužele [mm]	140
Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	2350

Tab. č. 14 Vlastnosti čerstvé směsi C-DET C25/30

Po 28 a 60 dnech byla stanovena objemová hmotnost, pevnost v tlaku a vodotěsnost. Dále byla vyhodnocena pevnost v tlaku po 90 denním uložení směsi v síranovém prostředí. Výsledky jsou uvedeny v Tab. č. 15. Vývoj pevnosti v tlaku je znázorněn na Obr. č. 16. Vývoj vodotěsnosti je znázorněn na Obr. č. 17. Porovnání pevnosti v tlaku po 90 denním uložení v síranovém prostředí je uvedeno na Obr. č. 18.

Typ zkoušky	po 28 dnech	po 60 dnech
ρ [kg/m ³]	2360	2360
f _c [MPa]	42,9	46,7
Hodnota průsaku V2 - V8 [mm]	78	33
	Po uložení 90 dnů v síranovém prostředí	
f _c [MPa]	61,3	

Tab. č. 15 Výsledky zkoušek na ztvrdlém betonu směsi C-DET C25/30

3.5.3 Receptura H-CHVA C25/30

Tato receptura byla s použitím hnědouhelného popílku z elektrárny Chvaletice. Složení směsi na m³:

	kg/m ³	Poznámka
CEM I 42,5R (Českomoravský cement)	290	
Popílek Chvaletice	87	23 % náhrada
0-4 Žabčice	830	47 %
8-16 Olbramovice	925	53 %
Plastifikátor Stachement NN (FM)	2.67	0,7 % (m _c +m _a)
Voda	175	w = 0,46

Tab. č. 16 Složení receptury H-CHVA C25/30

Vlastnosti čerstvé betonové směsi:

Konzistence sednutí kužele [mm]	130
Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	2350

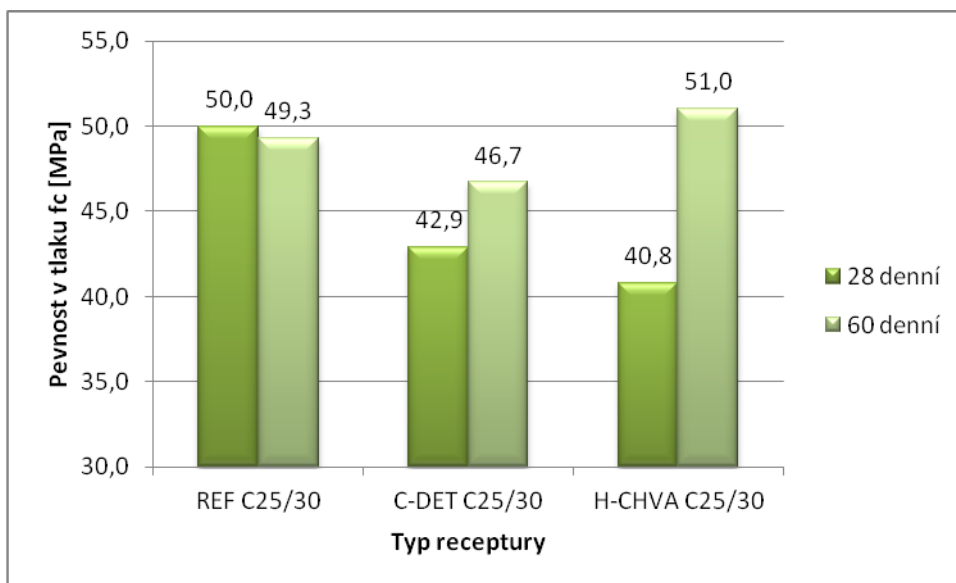
Tab. č. 17 Vlastnosti čerstvé směsi H-CHVA C25/30

Po 28 a 60 dnech byla stanovena objemová hmotnost, pevnost v tlaku a vodotěsnost. Výsledky jsou uvedeny v Tab. č. 18. Vývoj pevností je znázorněn na Obr. č. 16. Vývoj vodotěsnosti je znázorněn na Obr. č. 17.

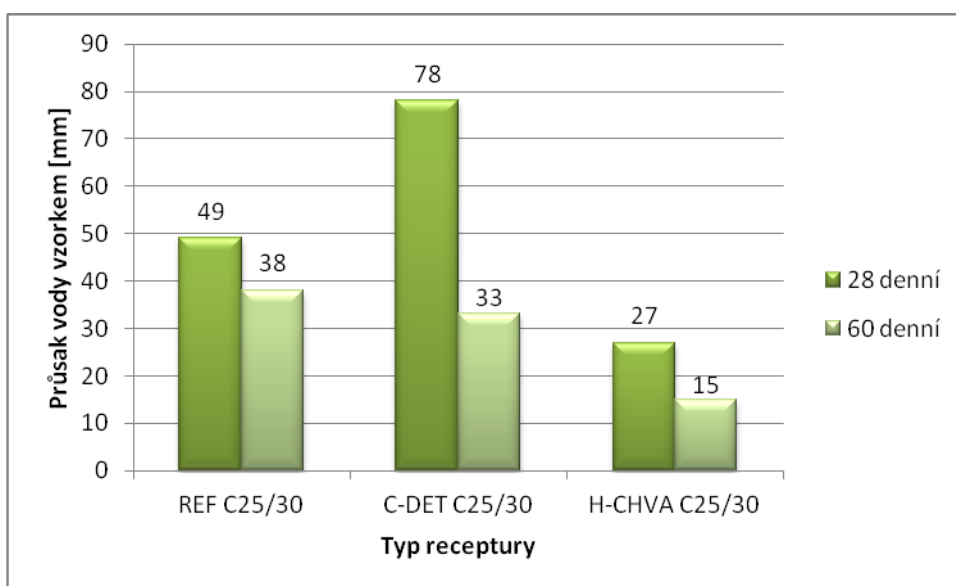
Typ zkoušky	po 28 dnech	po 60 dnech
ρ [kg/m ³]	2340	2330
f _c [MPa]	40,8	51,0
Hodnota průsaku V2 - V8 [mm]	27	15

Tab. č. 18 Výsledky zkoušek na ztvrdlém betonu směsi H-CHVA C25/30

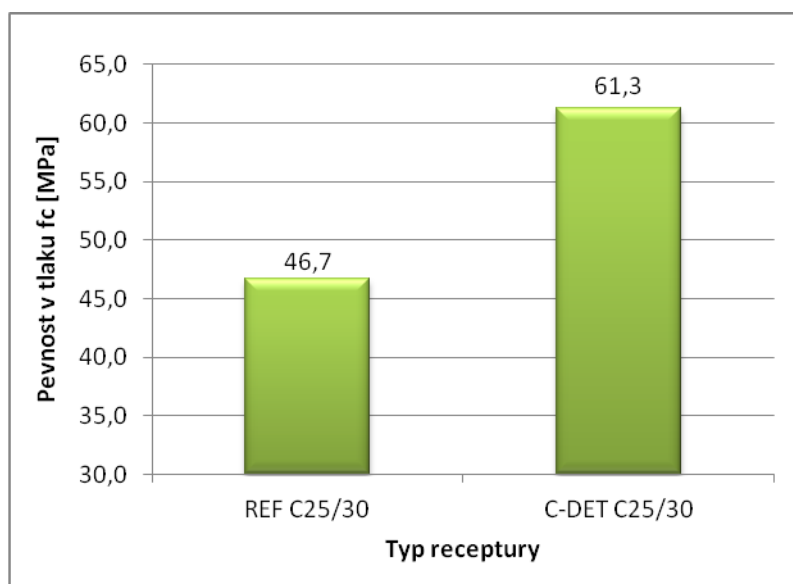
3.5.4 Vývoj vlastností rezeptur C25/30



Obr. č. 16 Vývoj pevnosti v tlaku po 28 a 60 dnech zrání u rezeptur C25/30



Obr. č. 17 Vývoj vodotěsnosti betonu po 28 a 60 dnech zrání u rezeptur C25/30



Obr. č. 18 Pevnost v tlaku receptur C25/30 po 90 denním uložení vzorků v síranovém prostředí

Shrnutí výsledků

Z výsledků zkoušek je patrné, že použité popílky mají kladný vliv na hodnoty dlouhodobých pevností, přičemž hodnoty těchto pevností oproti referenčnímu betonu výrazně vzrostly mezi 28 a 60 dnem.

Taktéž při zkoušce vodotěsnosti je patrný vliv pozdějších pucolánových reakcí, kdy po 28 dnech vykazoval beton s černouhelným popílkem podstatně horší výsledky, než li beton referenční, naproti tomu po 60 dnech při zkoušení již prokázal lepší výsledky oproti referenčnímu betonu. Beton s hnědouhelným popílkem dosáhnul dobrých výsledků již při 28 dnech a taktéž byl patrný nárůst zlepšení, v tomto případě na výborné výsledky po 60 dnech zrání.

Při 90 denním uložení v síranovém prostředí se u betonu s černouhelným popílkem dosáhlo po zkoušce pevnosti v tlaku výrazně vyšších výsledků oproti referenčnímu betonu.

Objemová hmotnost betonů s popílkem byla nepatrně nižší. Konzistence čerstvé směsi u betonu s černouhelným popílkem byla přibližně stejná jako u referenčního betonu. Naproti tomu konzistence směsi s hnědouhelným popílkem nebyla tak měkká, z důvodu jiných vlastností povrchu zrn hnědouhelného popílku, kdy černouhelný má zrna slinutější a tudíž na sebe nenavazují tolik vody, jako zrna popílku hnědouhelného.

3.5.5 Receptura REF C30/37 XF4

Tato receptura C30/37 XF4 byla bez popílku, pouze s portlandským cementem a sloužila jako referenční.

Složení směsi na m³:

	kg/m ³	Poznámka
CEM I 42,5R (Českomoravský cement)	406	
Popílek	0	
0-4 Žabčice	770	47 %
8-16 Olbramovice	860	53 %
Plastifikátor Stachement NN (FM)	2,44	0,6 % m _c
Provzdušňovač Microporan (LP)	0,49	0,12 % m _c
Voda	180	w = 0,44

Tab. č. 19 Složení receptury REF C30/37 XF4

Vlastnosti čerstvé betonové směsi:

Konzistence sednutí kužele [mm]	140
Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	2320
Obsah vzduchu [%]	6,5

Tab. č. 20 Vlastnosti čerstvé směsi REF C30/37 XF4

Po 28 a 60 dnech byla stanovena objemová hmotnost, pevnost v tlaku a odolnost vůči CHRL. Dále byla stanovena mrazuvzdornost. Výsledky jsou uvedeny v Tab. č. 21. Vývoj pevností je znázorněn na Obr. č. 19. Vývoj odolnosti vůči CHRL je znázorněn na Obr. č. 20. Vývoj mrazuvzdornosti je znázorněn na Obr. č. 21 a Obr. č. 22.

Typ vlastnosti	po 28 dnech	po 60 dnech
ρ [kg/m ³]	2300	2310
f_c [MPa]	39,2	41,0
Odpad při zkoušce CHRL [g/m ²]	931	949
Úbytek hmotnosti [%]	0,1	
Součinitel mrazuvzdornosti [%]	103	

Tab. č. 21 Výsledky zkoušek na ztvrdlém betonu směsi REF C30/37 XF4

3.5.6 Receptura C-DET20 C30/37 XF4

Tato receptura byla s 20 % náhradou cementu černouhelným popílkem z elektrárny Dětmárovice.

Složení směsi na m³:

	kg/m ³	Poznámka
CEM I 42,5R (Českomoravský cement)	325	
Popílek Dětmárovice	81	20 % náhrada
0-4 Žabčice	770	47 %
8-16 Olbramovice	860	53 %
Plastifikátor Stachement NN (FM)	2,44	0,6 % (m _c +m _a)
Provzdušňovač Microporan (LP)	0,49	0,12 % (m _c +m _a)
Voda	180	w = 0,44

Tab. č. 22 Složení receptury C-DET20 C30/37 XF4

Vlastnosti čerstvé betonové směsi:

Konzistence sednutí kužele [mm]	150
Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	2300
Obsah vzduchu [%]	5,5

Tab. č. 23 Vlastnosti čerstvé směsi C-DET20 C30/37 XF4

Po 28 a 60 dnech byla stanovena objemová hmotnost, pevnost v tlaku a odolnost vůči CHRL. Dále byla stanovena mrazuvzdornost. Výsledky jsou uvedeny v Tab. č. 24. Vývoj pevností je znázorněn na Obr. č. 19. Vývoj odolnosti vůči CHRL je znázorněn na Obr. č. 20. Vývoj mrazuvzdornosti je znázorněn na Obr. č. 21 a Obr. č. 22.

Typ vlastnosti	po 28 dnech	po 60 dnech
ρ [kg/m ³]	2290	2290
f _c [MPa]	43,0	44,4
Odpad při zkoušce CHRL [g/m ²]	1578	1210
Úbytek hmotnosti [%]	0,1	
Součinitel mrazuvzdornosti [%]	102	

Tab. č. 24 Výsledky zkoušek na ztvrdlém betonu směsi C-DET20 C30/37 XF4

3.5.7 Receptura H-CHVA20 C30/37 XF4

Tato receptura byla s 20 % náhradou cementu hnědouhelným popílkem z elektrárny Chvaletice.

Složení směsi na m³:

	kg/m ³	Poznámka
CEM I 42,5R (Českomoravský cement)	325	
Popílek Chvaletice	81	20 % náhrada
0-4 Žabčice	770	47 %
8-16 Olbramovice	860	53 %
Plastifikátor Stachement NN (FM)	2,44	0,6 % (m _c +m _a)
Provzdušňovač Microporan (LP)	0,80	0,20 % (m _c +m _a)
Voda	180	w = 0,44

Tab. č. 25 Složení receptury H-CHVA20 C30/37 XF4

Vlastnosti čerstvé betonové směsi:

Konzistence sednutí kužele [mm]	110
Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	2320
Obsah vzduchu [%]	5,5

Tab. č. 26 Vlastnosti čerstvé směsi H-CHVA20 C30/37 XF4

Po 28 a 60 dnech byla stanovena objemová hmotnost, pevnost v tlaku a odolnost vůči CHRL. Dále byla stanovena mrazuvzdornost. Výsledky jsou uvedeny v Tab. č. 27. Vývoj pevností je znázorněn na Obr. č. 19. Vývoj odolnosti vůči CHRL je znázorněn na Obr. č. 20. Vývoj mrazuvzdornosti je znázorněn na Obr. č. 21 a Obr. č. 22.

Typ vlastnosti	po 28 dnech	po 60 dnech
ρ [kg/m ³]	2300	2320
f _c [MPa]	40,4	46,3
Odpad při zkoušce CHRL [g/m ²]	759	702
Úbytek hmotnosti [%]	0,1	
Součinitel mrazuvzdornosti [%]	97	

Tab. č. 27 Výsledky zkoušek na ztvrdlém betonu směsi H-CHVA20 C30/37 XF4

3.5.8 Receptura C-DET30 C30/37 XF4

Tato receptura byla s téměř 30 % náhradou cementu černouhelným popílkem z elektrárny Dětmarovice.

Složení směsi na m³:

	kg/m ³	Poznámka
CEM I 42,5R (Českomoravský cement)	325	
Popílek Dětmarovice	130	29 % náhrada
0-4 Žabčice	740	47 %
8-16 Olbramovice	840	53 %
Plastifikátor Stachement NN (FM)	2,73	0,6 % (m _c +m _a)
Provzdušňovač Microporan (LP)	0,96	0,21 % (m _c +m _a)
Voda	180	w = 0,40

Tab. č. 28 Složení receptury C-DET30 C30/37 XF4

Vlastnosti čerstvé betonové směsi:

Konzistence sednutí kužele [mm]	140
Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	2290
Obsah vzduchu [%]	5,0

Tab. č. 29 Vlastnosti čerstvé směsi C-DET30 C30/37 XF4

Po 28 a 60 dnech byla stanovena objemová hmotnost, pevnost v tlaku a odolnost vůči CHRL. Dále byla stanovena mrazuvzdornost. Výsledky jsou uvedeny v Tab. č. 30. Vývoj pevností je znázorněn na Obr. č. 19. Vývoj odolnosti vůči CHRL je znázorněn na Obr. č. 20. Vývoj mrazuvzdornosti je znázorněn na Obr. č. 21 a Obr. č. 22.

Typ vlastnosti	po 28 dnech	po 60 dnech
ρ [kg/m ³]	2290	2280
f _c [MPa]	43,4	47,4
Odpad při zkoušce CHRL [g/m ²]	855	775
Úbytek hmotnosti [%]	0,2	
Součinitel mrazuvzdornosti [%]	108	

Tab. č. 30 Výsledky zkoušek na ztvrdlém betonu směsi C-DET30 C30/37 XF4

3.5.9 Receptura H-CHVA30 C30/37 XF4

Tato receptura byla s téměř 30 % náhradou cementu hnědouhelným popílkem z elektrárny Chvaletice.

Složení směsi na m³:

	kg/m ³	Poznámka
CEM I 42,5R (Českomoravský cement)	325	
Popílek Chvaletice	130	29 % náhrada
0-4 Žabčice	740	47 %
8-16 Olbramovice	840	53 %
Plastifikátor Stachement NN (FM)	2,73	0,6 % (m _c +m _a)
Provzdušňovač Microporan (LP)	0,91	0,20 % (m _c +m _a)
Voda	180	w = 0,40

Tab. č. 31 Složení receptury H-CHVA30 C30/37 XF4

Vlastnosti čerstvé betonové směsi:

Konzistence sednutí kužele [mm]	110
Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	2280
Obsah vzduchu [%]	5,5

Tab. č. 32 Vlastnosti čerstvé směsi H-CHVA30 C30/37 XF4

Po 28 a 60 dnech byla stanovena objemová hmotnost, pevnost v tlaku a odolnost vůči CHRL. Dále byla stanovena mrazuvzdornost. Výsledky jsou uvedeny v Tab. č. 33. Vývoj pevností je znázorněn na Obr. č. 19. Vývoj odolnosti vůči CHRL je znázorněn na Obr. č. 20. Vývoj mrazuvzdornosti je znázorněn na Obr. č. 21 a Obr. č. 22.

Typ vlastnosti	po 28 dnech	po 60 dnech
ρ [kg/m ³]	2280	2270
f _c [MPa]	43,9	48,7
Odpad při zkoušce CHRL [g/m ²]	5311	4258
Úbytek hmotnosti [%]	0,1	
Součinitel mrazuvzdornosti [%]	106	

Tab. č. 33 Výsledky zkoušek na ztvrdlém betonu směsi H-CHVA30 C30/37 XF4

3.5.10 Receptura C-DET50 C30/37 XF4

Tato receptura byla s 50 % náhradou cementu černouhelným popílkem z elektrárny Dětmárovice.

Složení směsi na m³:

	kg/m ³	Poznámka
CEM I 42,5R (Českomoravský cement)	203	
Popílek Dětmárovice	203	50 % náhrada
0-4 Žabčice	770	47 %
8-16 Olbramovice	860	53 %
Plastifikátor Stachement NN (FM)	2,44	0,6 % (m _c +m _a)
Provzdušňovač Microporan (LP)	0,81	0,20 % (m _c +m _a)
Voda	170	w = 0,42

Tab. č. 34 Složení receptury C-DET50 C30/37 XF4

Vlastnosti čerstvé betonové směsi:

Konzistence sednutí kužele [mm]	140
Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	2270
Obsah vzduchu [%]	5,0

Tab. č. 35 Vlastnosti čerstvé směsi C-DET50 C30/37 XF4

Po 28 a 60 dnech byla stanovena objemová hmotnost, pevnost v tlaku a odolnost vůči CHRL. Dále byla stanovena mrazuvzdornost. Výsledky jsou uvedeny v Tab. č. 36. Vývoj pevností je znázorněn na Obr. č. 19. Vývoj odolnosti vůči CHRL je znázorněn na Obr. č. 20. Vývoj mrazuvzdornosti je znázorněn na Obr. č. 21 a Obr. č. 22.

Typ vlastnosti	po 28 dnech	po 60 dnech
ρ [kg/m ³]	2250	2260
f _c [MPa]	29,0	38,4
Odpad při zkoušce CHRL [g/m ²]	3539	3429
Úbytek hmotnosti [%]	0,1	
Součinitel mrazuvzdornosti [%]	125	

Tab. č. 36 Výsledky zkoušek na ztvrdlém betonu směsi C-DET50 C30/37 XF4

3.5.11 Receptura H-CHVA50 C30/37 XF4

Tato receptura byla s 50 % náhradou cementu hnědouhelným popílkem z elektrárny Chvaletice.

Složení směsi na m³:

	kg/m ³	Poznámka
CEM I 42,5R (Českomoravský cement)	203	
Popílek Chvaletice	203	50 % náhrada
0-4 Žabčice	770	47 %
8-16 Olbramovice	860	53 %
Plastifikátor Stachement NN (FM)	3,10	0,75 % (m _c +m _a)
Provzdušňovač Microporan (LP)	0,89	0,22 % (m _c +m _a)
Voda	180	w = 0,44

Tab. č. 37 Složení receptury H-CHVA50 C30/37 XF4

Vlastnosti čerstvé betonové směsi:

Konzistence sednutí kužele [mm]	120
Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	2230
Obsah vzduchu [%]	6,0

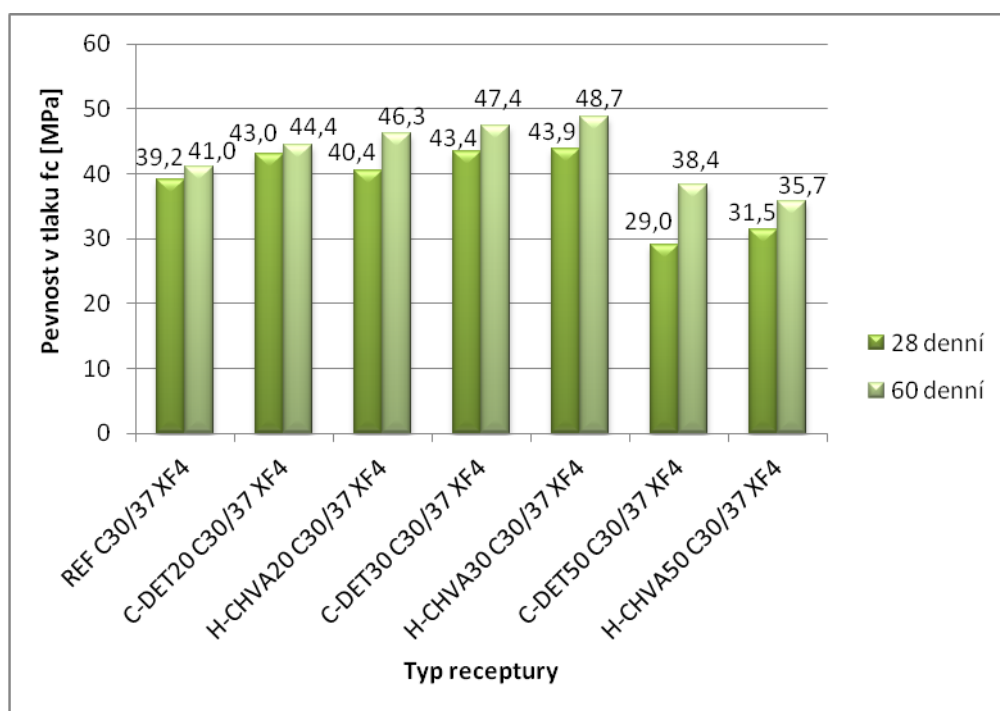
Tab. č. 38 Vlastnosti čerstvé směsi H-CHVA50 C30/37 XF4

Po 28 a 60 dnech byla stanovena objemová hmotnost, pevnost v tlaku a odolnost vůči CHRL. Dále byla stanovena mrazuvzdornost. Výsledky jsou uvedeny v Tab. č. 39. Vývoj pevností je znázorněn na Obr. č. 19. Vývoj odolnosti vůči CHRL je znázorněn na Obr. č. 20. Vývoj mrazuvzdornosti je znázorněn na Obr. č. 21 a Obr. č. 22.

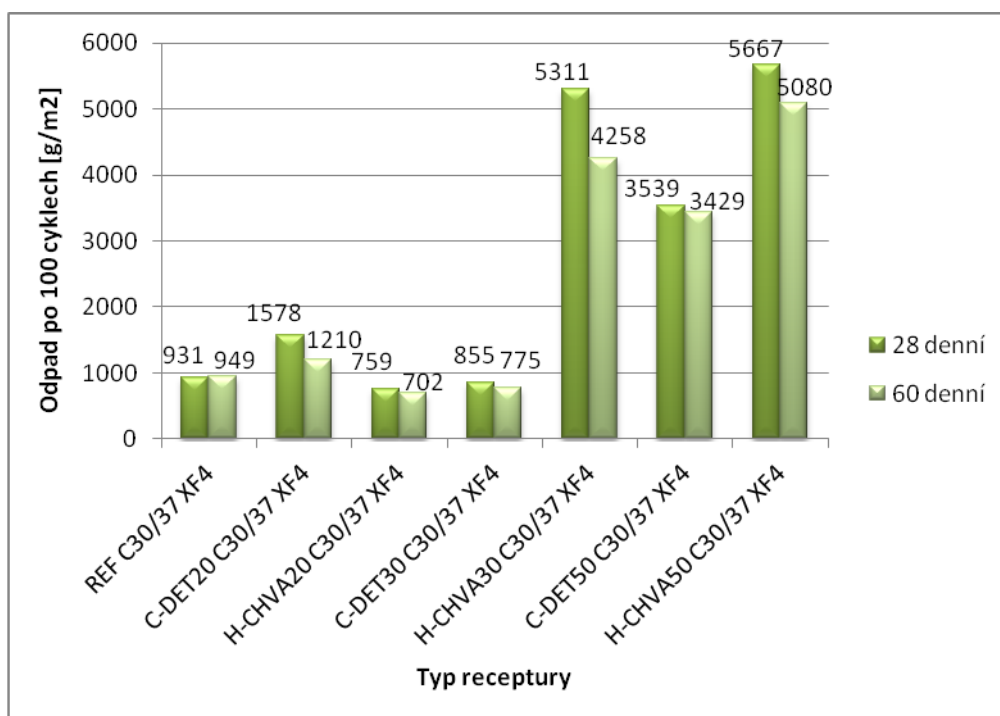
Typ vlastnosti	po 28 dnech	po 60 dnech
ρ [kg/m ³]	2230	2220
f _c [MPa]	31,5	35,7
Odpad při zkoušce CHRL [g/m ²]	5667	5080
Úbytek hmotnosti [%]	0,1	
Součinitel mrazuvzdornosti [%]	119	

Tab. č. 39 Výsledky zkoušek na ztvrdlém betonu směsi H-CHVA50 C30/37 XF4

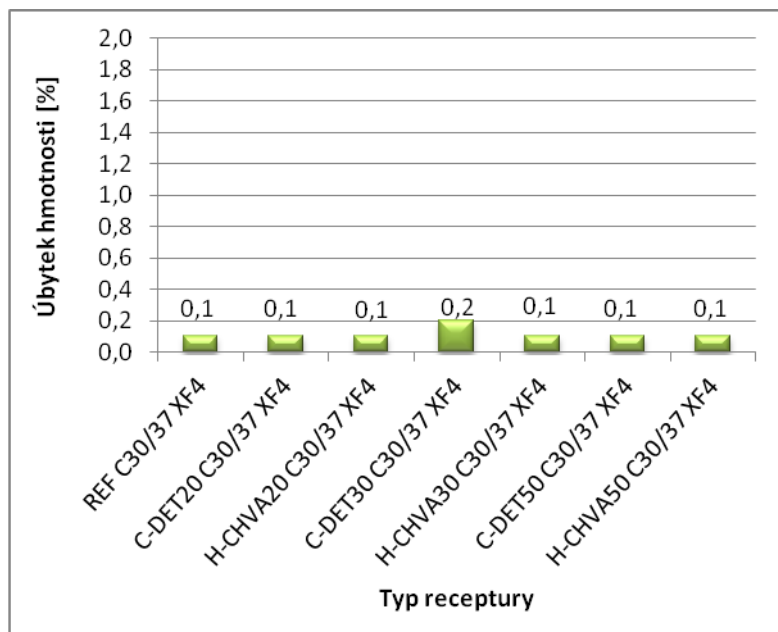
3.5.12 Vývoj vlastností rezeptur C30/37 XF4



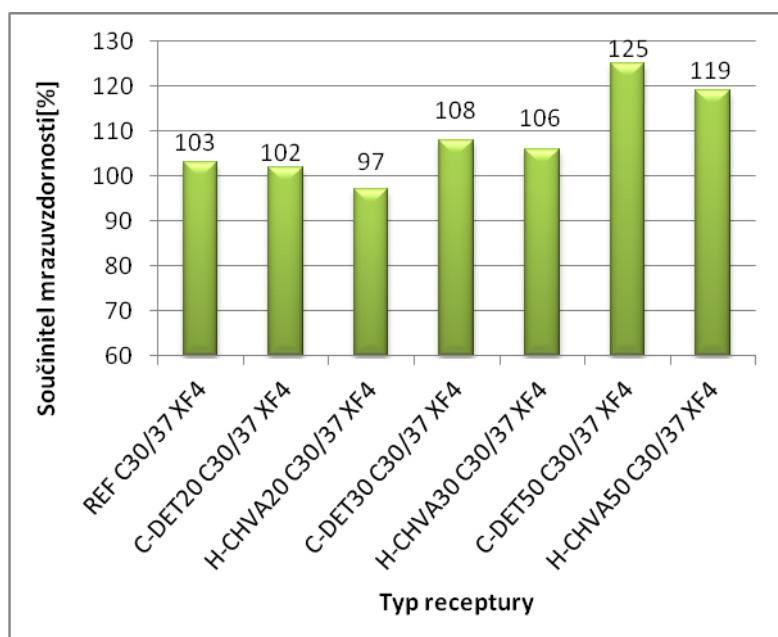
Obr. č. 19 Vývoj pevnosti v tlaku po 28 a 60 dnech zrání u rezeptur C30/37 XF4



Obr. č. 20 Vývoj odolnosti vůči mrazu a CHRL po 28 a 60 dnech zrání u rezeptur C30/37 XF4



Obr. č. 21 Srovnání úbytku hmotnosti při zkoušce mrazuvzdornosti u receptur C30/37 XF4



Obr. č. 22 Srovnání součinitele mrazuvzdornosti při zkoušce mrazuvzdornosti u receptur C30/37 XF4

Shrnutí výsledků

U betonů s náhradou cementu popílkou byl u všech receptur patrný průběh pucolánových reakcí po 28 dnech zrání, kdy byl výraznější vliv nárůstu pevností mezi 28 a 60 dnem ve srovnání s referenční recepturou pouze z portlandského cementu. Jedinou výjimku tvořila receptura C-DET20 C30/37 XF4, která nárůst pevností v tomto časovém období neměla nikterak výrazný. Pravděpodobně to bylo způsobeno vlivem chyby, která se mohla vnést při hutnění vzorků. Betony s 50 % náhradou cementu popílkem nedosáhly po 28 dnech požadovaných pevností pro pevnostní třídu C30/37. Díky pucolánové reakci beton z černouhelného popílku C-DET50 C30/37 XF4 po 60 dnu této pevnostní třídy dosáhl

a beton z hnědouhelného popílku H-CHVA50 C30/37 XF4 se jí přiblížil. Je velmi pravděpodobné, že by díky pucolánové aktivitě této pevnostní třídy v následujícím časovém období byl schopen dosáhnout.

Po zkoušce stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek neodpovídaly výsledky odpadů žádné závislosti vlivu elektrárenských popílků na tuto zkoušku. Výsledky dosahovaly různých hodnot při různých dávkách popílku nahrazujícího cement. To bylo způsobeno vlivem nedostatečně kvalitní úpravy povrchu vzorků pro tuto zkoušku, kdy při hutnění vystoupaly zrna popílku, jež mají oproti cementu menší objemovou hmotnost na povrch betonu v různém nehomogenním množství a tím následně zkreslovaly průběh působení chemických rozmrazovacích látek během zkoušky. Z tohoto důvodu je třeba do budoucna provést několikrát tento typ zkoušky znovu na více sadách vzorků, bez vnesení chyby při úpravě povrchu vzorků určených na tuto zkoušku, aby byly výsledky relevantní.

Po zkoušce mrazuvzdornosti všechny receptury neměly po 100 cyklech zmrazování a rozmrazování téměř žádný úbytek hmotnosti. Všechny receptury bez problému vyhověly zkoušce mrazuvzdornosti. S rostoucím množstvím náhrady popílku za cement se u všech receptur zvyšoval součinitel mrazuvzdornosti, kde nejlepších výsledků dosáhly receptury s 50 % náhradou černouhelného i hnědouhelného popílku.

S rostoucím obsahem popílku ve směsi objemová hmotnost mírně klesala. Konzistence čerstvé směsi s černouhelným popínkem byla opět přibližně stejná jako u referenčního betonu a konzistence čerstvé směsi s hnědouhelným popínkem opět dosahovala nižších hodnot sednutí kužele.

4 ZÁVĚR

Tato práce měla popsat a experimentálně ověřit vliv elektrárenských popílků na trvanlivost betonů. Poznatky ze zahraničí jednoznačně ukazují pozitivní vliv těchto příměsí na trvanlivost betonů při jejich vhodném složení, ovšem musí být dodrženy zásady navrhování takových receptur, kde vodní součinitel těchto směsí by měl dosahovat co nejmenších hodnot. S tím souvisí využití vyššího množství plastifikačních přísad do betonu. Dále bylo poznamenáno, že musí být tento typ betonů řádně a kvalitně zpracován a následně po delší dobu vhodně ošetřován. Pokud by tento typ betonu měl být vystaven působení mrazu, musí být také adekvátně provzdušněn.

Tyto betony se vyznačují hlavně vyšší nepropustností (vodotěsností), odolností vůči síranovému prostředí, odolností vůči alkalicko-křemičným reakcím v betonu, nižším hydratačním teplem a tím menší náchylností ke vzniku trhlin a nakonec vyššími dlouhodobými pevnostmi. Všechny tyto vlastnosti nabývají tyto betony zejména po 28 dnu jejich zrání vlivem pozdější pucolánové reakce.

Pokud u použití betonů s popílků výše zmíněné zásady nedodržíme, je předpoklad, že budou mít zejména horší odolnost vůči chemickým rozmrazovacím látkám a horší odolnost vůči karbonataci, než - li betony pouze z portlandského cementu.

Popílkové betony mají větší odolnost vůči odměšování vody, ale z tohoto důsledku také větší náchylnost na plastické smršťování na povrchu betonu.

V experimentální části byly porovnávány dva typy receptur, tedy C25/30 a C30/37 XF4. U obou typů receptur měly směsi s hnědouhelným popílkem Chvaletice konzistenci sednutí kužele nižší (110 – 130 mm) oproti směsím s černouhelným popílkem Dětmárovice, nebo referenčním směsím bez popílku (140 – 150 mm) při stejných dávkách vody. To je přikládáno povrchu částic hnědouhelného popílku, které na rozdíl od černouhelného nemají tak slinutý povrch a proto na sebe vážou více vody.

U receptury C25/30 byla po 28 dnech pevnost v tlaku nejvyšší u referenční směsi pouze z portlandského cementu REF 50 MPa a nižších hodnot dosahovaly směsi s černouhelným popílkem Dětmárovice C-DET 42,9 MPa a s hnědouhelným popílkem Chvaletice H-CHVAL 40,8 MPa. Po 60 dnech u referenční REF směsi zůstala pevnost v tlaku na přibližně stejné úrovni 49,3 MPa, naopak pevnost popílkových směsí výrazněji vzrostla C-DET 46,7 MPa, H-CHVAL 51 MPa.

Podobný průběh byl také sledován u zkoušek vodotěsnosti. Kdy C-DET měla horší průsak 78 mm po 28 dnech, než - li REF, která dosahovala 49 mm. Po 60 dnech hodnota průsaku u C-DET výrazně klesla na 33 mm, oproti REF 38 mm. H-CHVAL dosahovala nižších hodnot již po 28 dnech 27 mm, a po 60 dnech vlivem pucolánové reakce pouze 15 mm.

Výborných výsledků bylo dosaženo zejména při zkoušce pevnosti v tlaku po 90 denním uložení v síranovém prostředí, kdy C-DET vykazovala 61,3 MPa oproti REF 46,7 MPa.

U receptury C30/37 XF4 byl pozorován podobný průběh vývoje pevností, kde popílkové směsi měly oproti referenční směsi výraznější nárůst pevností mezi 28 a 60 dnem. 28

denní hodnotu pevnosti v tlaku dané pevnostní třídy nedosáhly směsi s 50% náhradou cementu popílkem C-DET50 29,0 MPa a H-CHVA50 31,5 MPa.

Zkouška CHRL nevykazovala adekvátní zhodnocení závislosti vlivu elektrárenských popílků v odolnosti vůči CHRL z důsledků vnesení chyby při hutnění a úpravě povrchu vzorků. Částice popílku o menší objemové hmotnosti, než jsou částice cementu zde vystoupaly v nehomogenním stavu do povrchu vzorků. Z tohoto důsledku byly výsledky zkoušky zkresleny a do budoucna je potřeba zkoušku opakovat, nejlépe na více sériích vzorků. Je potřeba se zaměřit také na precizní zpracování vzorků čerstvého betonu, zejména úpravu jejich povrchů a vhodné zhutnění.

U zkoušky mrazuvzdornosti byl úbytek hmotnosti u všech směsí nízký a to 0,1 %, nebo 0,2 %. Všechny směsi vykazovaly vyhovující součinitel mrazuvzdornosti, zejména se zvyšující se dávkou popílku. Nejlepší výsledky součinitele mrazuvzdornosti dosahovaly směsi s 50 % náhradou popílku C-DET50 125 % a H-CHVAL50 119 %.

Použití elektrárenského popílku do betonu je výhodné. Ať už z ekologického, či ekonomického hlediska, tak zejména díky jeho vlastnostem. Popílek snižuje množství drahého cementu, ve většině případů zlepšuje reologické vlastnosti a při dodržení technologických zásad zvyšuje trvanlivost.

5 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BURDEN, Donald. *The Durability of Concrete Containing High Levels of Fly Ash* [online]. New Brunswick, 2006 [cit. 2011-08-03]. Dostupné z: <http://www.cement.org/bookstore/profile.asp?id=14321>. Thesis. The University of New Brunswick. Vedoucí práce Dr. Michael Thomas, Civil Engineering
- [2] 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.
- [3] LANGLEY, W.S. a G.H. LEAMAN. PRACTICAL USES FOR HIGH-VOLUME FLY ASH CONCRETE UTILIZING A LOW CALCIUM FLY ASH. In: *Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*. 38800 Country Club Drive Farmington Hills, MI 48331 USA: American Concrete Institute, 1998, s. 545-574.
- [4] BREMNER, Theodore W. a Michael D. A. THOMAS. *Learning Module on Traditional and Non-Traditional Uses of Coal Combustion Products (CCP)*. 2004, 19 s.
- [5] LOHTIA, R.C. Joshi and R.P. *Fly ash in concrete: production, properties and uses*. Australia: Gordon and Breach Science Publishers, 1997. ISBN 90-569-9580-4
- [6] BERRY, E a V MALHOTRA. *Fly ash in concrete: Les 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.
- [7] HOBBS, D.W. *Influence of Fly Ash Upon the Workability and Early Strength of Concrete: Proceedings, 1st International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and other Mineral By-Products in Concrete*. 1983, 289-306.
- [8] ACI COMMITTEE 232. *Use of Fly Ash in Concrete: ACI 232.2R-03* [online]. 2003, 41 s. [cit. 2011-10-14]. Dostupné z: http://www.scribd.com/jantonio_45/d/84959510-ACI-232-2R-03-Use-of-Fly-Ash-in-Concrete
- [9] SMITH, R.L., C.F. RABA a M.A. MEARING. Utilization of Class C Fly Ash in Concrete. In: *6th International Fly Ash Utilization Symposium*. Reno: Proceedings, 1982, s. 31.

- [10] SIDDIQUE, Rafat. Performance characteristics of high-volume Class F fly ash concrete. In: *Cement and Concrete Research*. Patiala, Punjab 147 004, India: Department of Civil Engineering, Thapar Institute of Engineering and Technology, Deemed University, 2003, s. 487-493. 34: 3. DOI: 10.1016/j.cemconres.2003.09.002. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884603003107>
- [11] 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/csrlucanmet.pdf>
- [12] GILLIES, Veronica a Busby PERKINS. *The EcoSmart Concrete Project: Results from the Case Studies* [online]. 2001, 14 s. [cit. 2011-10-18]. Dostupné z: <http://ecosmartconcrete.com/docs/csrsummary.pdf>
- [13] WEDDING, PA, D MANMOHAN a PK MEHTA. Influence of Pozzolanic, Slag, and Chemical Admixtures on Pore Size Distribution and Permeability of Hardened Cement Pastes. *Cement, Concrete and Aggregates*. 1981, roč. 3, č. 1, s. 63-. ISSN 01496123. DOI: 10.1520/CCA10203J.
- [14] DAVIS, Raymond E. *Pozzolanic Material - With Special Reference to Their Use in Concrete Pipe*. Irving, Texas: American Concrete Pipe Association, 1954.
- [15] MEHTA, P. Kumar. *High - Performance, High - Volume Fly Ash Concrete for Sustainable Development: Proceedings of the International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology, Beijing, China, May 20-21, 2004* [online]. Ames: Center for Transportation Research and Education, Iowa State University, 2004, 359 s.[cit. 2011-11-05]. Dostupné z: http://www.intrans.iastate.edu/publications/_documents/conference-proceedings-workshops/sustainable-dev-workshop/mehtasustainable.pdf
- [16] ESTAKHRI, Cindy K. a Donald SAYLAK. *Potential for Reduced Greenhouse Gas Emissions in Texas Through the Use of High Volume Fly Ash Concrete* [online]. 2004 [cit. 2011-11-07]. Dostupné z: <http://swuttc.tamu.edu/publications/papers/167709TP.pdf>
- [17] MINDESS, Sidney, J YOUNG a David DARWIN. *Concrete*. 2nd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, c2003, 644 s. ISBN 01-306-4632-6.

- [18] BARGAHEISER, Keith a Tarunjit S. BUTALIA. *Prevention of Corrosion in Concrete Using Fly Ash Concrete Mixes*. Concrete Technology Forum, Dallas, Texas, 2007, 2007. Dostupné z: <http://circainfo.ca/pdf/K.%20Bargaheiser%20-%20Corrosion%20Paper.pdf>
- [19] ROBERTS. BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT, Watford (UK). *Carbonation of concrete made with dense natural aggregates*. 1981.
- [20] GEBAUER, J. *Some observations on the carbonation of fly ash concrete*. 1982, 155 s.
- [21] PARROTT, L.J. *A review of carbonation in reinforced concrete*. Crowthorne, Berkshire, UK: Cement and Concrete Association, 1987. ISBN 07-210-1365-1.
- [22] 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.
- [23] HO, D.W.S. a R.K. LEWIS. Carbonation of concrete and its prediction. *Cement and Concrete Research*. 1987, roč. 17, č. 3, s. 489-504. ISSN 00088846. DOI: 10.1016/0008-8846(87)90012-3. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0008884687900123>
- [24] NAGATAKI, Shigeyoshi, Hiroyuki OHGA a Eun Kyum KIM. *Effect of Curing Conditions on the Carbonation of Concrete with Fly Ash and the Corrosion of Reinforcement in Long-Term Tests*. 1986, 521-540.
- [25] MATTHEWS, J.D. Carbonation of Ten-Year Old Concretes with and Without Pulverised Fuel Ash. In: *Proceedings 2nd International Conference on Fly Ash Technology and Marketing*. Londýn: Ash Marketing - CEEB, 1984, s. 740.
- [26] HOBBS, D.W. Carbonation of Concrete Containing PFA. *Magazine of Concrete Research*. New York: Thomas Telford Ltd, 1988, roč. 40, č. 143, s. 67-78. ISSN 0024-9831.
- [27] LEWANDOWSKI, R. *Effect of Different Fly-Ash Qualities and Quantities on the Properties of Concrete*. Betonwerk and Fertigteil – Technik, 1983.

- [28] TSUKAYAMA, R. Long Term Experiments on the Neutralization of Concrete Mixed with Fly Ash and the Corrosion of Reinforcement. *Proceedings 7th International Congress on the Chemistry of Cement*. 1980, 30 - 35.
- [29] DHIR, R.K. Near - Surface Characteristics of Concrete: Prediction of Carbonation Resistance. *Magazine of Concrete Research*. New York: Thomas Telford Ltd, 1989, roč. 41, č. 148, 137 - 143. ISSN 0024-9831.
- [30] THOMAS, Michael D. A. Use of high-volume fly ash concrete in green buildings. In: *Proceedings, Annual Conference - Canadian Society for Civil Engineering*. Canada: University of New Brunswick, 2003, 641 - 648.
- [31] THOMAS, Michael D. A. The Effect of Curing and Concrete Quality on the Durability of Concrete with High-Volumes of Supplementary Cementing Materials. In: *Ecosmartconcrete* [online]. 2004 [cit. 2012-01-27]. Dostupné z: <http://ecosmartconcrete.com/docs/trthomas04.pdf>
- [32] PAPADAKIS, Vagelis G., Costas G. VAYENAS a Michael N. FARDIS. Fundamental Modeling and Experimental Investigation of Concrete Carbonation. *ACI Materials Journal*. 1991, roč. 88, č. 4, 363 - 373.
- [33] DIMTER, Sanja, Tatjana RUKAVINA a Krunoslav MINAZEK. Použití popílků v cementobetonovém krytu pozemní komunikace. In: *Silmos.cz - Info P* [online]. 2007 [cit. 2012-02-29]. Dostupné z: www.silmos.cz/file.php?id=1064
- [34] HOOTON, R. D., T. R. NAIK, B. W. RAMME a J. H. TEWS. Use of High Volumes of Class C and Class F Fly Ash in Concrete. *Cement, Concrete and Aggregates*. 1994, roč. 16, č. 1. ISSN 01496123. DOI: 10.1520/CCA10556J. Dostupné z: <http://www.astm.org/doiLink.cgi?CCA10556J>
- [35] RANDENBURGER, Dirk, HERTEN a Roland HÜTTL. Vysoce odolný beton s popílkem jako přísadou do betonu. In: *Silmos.cz - Info P* [online]. 2007 [cit. 2012-02-29]. Dostupné z: www.silmos.cz/file.php?id=1070
- [36] THOMAS, Michael, Andrew DUNSTER, Philip NIXON a Barry BLACKWELL. *Effect of fly ash on the expansion of concrete due to alkali-silica reaction - Exposure site studies*[online]. 2011 [cit. 2012-03-28]. ISSN 10.1016/j.cemconcomp.2010.11.006. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946510001927>

- [37] CHOWDHURY, Subrato a Partha Pratim BISWAS. High Volume Fly Ash SCC: A Step towards Sustainability Initiative. In: *SCC 2010 Montreal*. Montreal: Design, Production and Placement of Self-Consolidating Concrete, 2010, s. 193-199.
- [38] MATOUŠOVÁ, Lucie, Hana ŠÁCHOVÁ, Petr HUŇKA, Jiří KOLÍSKO a Václav BROŽ. Materiály pro beton: Vývoj betonu s velkým obsahem popílku (HVFAC) v ČR. In: *10.konference: Technologie betonu 2012*. 1. vydání. Pardubice: ČBS Servis, s.r.o., 2012, s. 5-12. ISBN 978-80-87158-31-9.
- [39] 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>
- [40] Stabilizát. ŠARBOCH, Petr. *Hlavní báňská záchranná stanice Praha* [online]. 2006 [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: <http://www.hbzs-praha.cz>
- [41] ČERNÝ, V. Kameniva ze spékanych popílků. In sborník Juniorstav 2007. -. Brno, VUT Brno. 2007. p. 277 - 277. ISBN 978-80-214-3337-3
- [42] ČEZ [online]. 2008 [cit. 2012-05-22]. Dostupný z <http://www.cez.cz>
- [43] BEDNARÍK, V., VONDRUŠKA, M., Stabilizace/solidifikace nebezpečných odpadů pomocí popílku z fluidního spalování uhlí, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická
- [44] 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
- [45] DVOŘÁK, K.; KULÍSEK, K.; WAGNER, Š. Směsné hydraulické vápno na bázi fluidního popílku jako pojivo suchých maltových směsí. In Sborník Vápno, cement, sádr. 1. Praha, VUMO Praha. 2007. p. 156 – 160
- [46] DVOŘÁK, K.; FRIDRICHOVÁ, M.; NOVÁK, J. Vypalované hydraulické pojivo s fluidním popílkem. In Ekologie a nové stavební hmoty a výrobky. 1. VUSTAH Brno. 2006. p. 265 - 271. ISBN 80-239-7146-8

6 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

HVFAC	beton s vysokým obsahem popílku nahrazujícího cement
THD	Ústav technologie stavebních hmot a dílců
FAST	Fakulta stavební
VUT	Vysoké učení technické v Brně
CHRL	chemické rozmrazovací látky
RCPT	zkouška rychlé chloridové propustnosti
AKR	alkalicko křemičitá reakce
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]