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

VÝVOJ KONSTRUKČNÍCH BETONŮ S ELEKTRÁRENSKÝMI POPÍLKY

DEVELOPMENT OF STRUCTURAL CONCRETE WITH POWER PLANT ASH

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE MARTIN ŤAŽKÝ
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE prof. Ing. RUDOLF HELA, CSc.
SUPERVISOR

BRNO 2014

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	Martin Ťažký
Název	Vývoj konstrukčních betonů s elektrárenskými popílky
Vedoucí bakalářské práce	prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
Datum zadání bakalářské práce	30. 11. 2013
Datum odevzdání bakalářské práce	30. 5. 2014

V Brně dne 30. 11. 2013

.....	.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA	prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Vedoucí ústavu	Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

- internetové stránky web of science, atd.
- zahraniční a tuzemské odborné časopisy a sborníky z vědeckých sympozií
- diplomové práce vypracované na ÚTHD FAST Brno v období 2009 – 2013

Zásady pro vypracování

Využívání elektrárenských popílků z hnědého či černého uhlí spalovaných klasickým způsobem započalo v ČR v 60. letech minulého století. Za tuto dobu se výrazně zvýšil objem betonů s popílky a i jejich dávkování. Ovšem stále zůstávají pochybnosti o trvanlivosti těchto betonů, smršťování, možnosti provzdušnění statických modulech pružnosti atd. Malé využití popílků je pro betony vyšší ch pevnostních tříd.
Cílem vaší práce bude sestavit ucelenou rešerši teoretických podkladů z průmyslově vyspělých zemí i ČR o využívání popílků v betonech, vztahy mezi chemickým složením popílků, jejich granulometrie, měrným povrchem a optimálním dávkováním do betonů s portlandskými cementy. Získat informace o dopadu na trvanlivosti betonů v různých prostředích, deformační charakteristiky či vývoje pevností v čase až do 1 roku zrání. Zaměřit se i na možnosti využívání fluidních popílků v betonech či stmelených vrstvách vozovek.
V praktické části navrhněte receptury betonů pro třídy C40/50 a C50/60 s částečnou náhradou cementu CEM I 42,5 el. popílky Dětmarovice a Počerady. Porovnejte vlastnosti čerstvých betonů v čase do 90 minut od zamíchání a vývoj pevností v tlaku a statických modulů pružnosti ve stáří 7, 28, 60, 90 a 180 dnů s referenčním betonem bez popílků. Při stanovení optimální dávky popílků se zaměřte na dosažení minimální mezerovitosti suché směsi cement – popílek.
Rozsah bakalářské práce je minimálně 45 stran.

Předepsané přílohy

.....

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

Abstrakt

Celosvětově výroba betonu stále stoupá, což sebou však nese vzrůstající ekologickou zátěž z výroby cementu. Proto je dnes snahou stále více ve stavebnictví, taktéž pro výrobu betonu, využívat druhotných surovin z průmyslu. Nejběžnější takovou surovinou, jejíž používání je prakticky nejvíce rozšířené, je vysokoteplotní úletový popílek. Jeho použití přináší ne jen velice pozitivní dopad na ekonomiku a ekologii výroby, ale taktéž pozitivně ovlivňuje vlastnosti betonu jak v čerstvém, tak zatvrdlém stavu. Snahou této práce proto bylo dále zefektivnit jeho použití návrhem betonové směsi s přihlédnutím k minimální mezerovitosti suché směsi cement-popílek.

Klíčová slova

Popílek, cement, příměs, beton, trvanlivost, druhotná surovina, uhlí, C-S-H gel, mezerovitost, vodní součinitel, …

Abstract

Worldwide production of concrete is increasing, what has a negative environmental load of cement production. That is due to effort in building construction, also concrete production, greater use of the secondary raw materials. Fly ash is the most commonly used secondary raw material. His used has a very good impact on the economy and ecology of production and positively affects on the properties of concrete in both the fresh and hardened state. The aim of this bachelor's thesis was to improve its use in concrete, using a minimum void fraction of dry mix cement-fly ash.

Keywords

Fly ash, cement, admixture, concrete, durability, secondary raw material, coal, C-S-H gel, void fraction, water-cement ratio, …

Bibliografická citace VŠKP

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

Prohlášení:

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

V Brně dne 28.5.2014

……

podpis autora
Martin Ťažký

Poděkování:

Na tomto místě bych chtěl poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Rudolfu Helovi, CSc. a pracovníkům v okruhu betonářských laboratoří na ústavu THD FAST VUT v Brně za odborné vedení a pomoc při zpracování této bakalářské práce. Zároveň bych rád poděkoval celé své rodině a blízkému okolí za podporu při mém studiu a studentských aktivitách.

V Brně 2014 Martin Ťažký

Obsah

Úvod **10**

Teoretická část **11**

1 . Definice a historický vývoj 11

2 . Výroba dnešních popílků 14

3 . Vlastnosti popílku 18

3.1 . Chemické vlastnosti popílku 18

3.2 . Fyzikální vlastnosti popílku 21

3.3 . Další vlastnosti popílku 23

4 . Využití popílku 25

5 . Popílek v betonu 29

5.1 . Popílek jako mikroplnivo 29

5.1.1 . Čerstvý beton 31

5.1.2 . Zatvrdlý beton 33

5.2 . Popílek jako příměs 33

5.2.1 . Čerstvý beton 37

5.2.2 . Zatvrdlý beton 38

5.3 . Trvanlivost betonu s popílkem 42

5.3.1 . Odolnost proti mrazu a CHRL (XF1-XF4) 43

5.3.2 . Odolnost proti chloridům (XD1-XD3) 45

5.3.3 . Odolnost proti karbonataci (XC1-XC4) 47

5.3.4 . Odolnost proti síranům a kyselinám (XA1-XA3) 48

5.4 . Dávkování popílku 50

Praktická část **53**

6 . Cíl praktické části 53

7 . Metodika práce 54

7.1 . Návrh skladby betonové směsi 54

7.2 . Vstupní suroviny 55

7.2.1 . Kamenivo 55
7.2.2 . Cement 57
7.2.3 . Příměsi 57
7.2.4 . Přísady 58
7.3 . Provedené zkoušky 58
7.3.1 . Zkoušky v čerstvém stavu 58
7.3.2 . Zkoušky v zatvrdlém stavu 58
8 . Výsledky provedených zkoušek 59
8.1 . Receptury připravených betonů C 40/50 a C 50/60 59
8.1.1 . REF C 40/50 a REF C 50/60 59
8.1.2 . D-20 C 40/50 a D-17 C 50/60 59
8.1.3 . P-20 C 40/50 a P-17 C 50/60 59
8.1.4 . D-OPT C 40/50 a D-OPT C 50/60 59
8.1.5 . P-OPT C 40/50 a P-OPT C 50/60 60
8.2 . Výsledky provedených zkoušek 62
8.2.1 . Betony pevnostní třídy C 40/50 62
8.2.2 . Betony pevnostní třídy C 50/60 68
9 . **Závěr 76**
10 . Použitá literatura 80
10.1 . Použitá literatura 80
10.2 . Použité právní normy a předpisy 85
10.3 . Použité zdroje ilustrací 86
11 . Seznam použitých zkratek a symbolů 89
12 . Seznam příloh, tabulek a grafů....90
12.1 . Seznam příloh 90
12.2 . Seznam tabulek 90
12.3 . Seznam grafů 90
13 . Přílohy 92

Úvod

Beton dnes řadíme bezpochyby na místo jednoho z nejdůležitějších stavebních materiálů. Díky novým technologiím se použití tohoto materiálu pouze z oblasti konstrukční posunulo do oblastí tepelně izolačních, dekoračních, drenážních a jiných.

Výroba betonu však představuje silnou ekonomickou a ekologickou zátěž, přesněji řečeno výroba cementu, jež tvoří základní pojivovou složku betonu. A právě tento aspekt nás vede ke snaze cement částečně nahradit levnější surovinou. S výhodou je poté užíváno druhotných průmyslových surovin, jako jsou elektrárenské popílky, vysokopecní strusky atd. Je snahou zvýšit využitelnost těchto materiálů na úkor jejich skládkování a nahrazovat nimi jiné ekonomicky nákladné suroviny.

Zvyšující se poptávka po betonech speciálních vlastností nás nutí se dále zabývat možností použitelnosti těchto druhotných surovin, díky kterým bychom jinak prakticky jistých speciálních vlastností nebyli schopni dosáhnout. Není již dnes proto novinkou řadit je mezi základní suroviny pro výrobu stavebních materiálů, stejně jako je tomu například právě u cementu.

Teoretická část

1. Definice a historický vývoj

V betonářské terminologii je popílek definován na základě evropské harmonizované normy ČSN EN 450 - 1 „Popílek do betonu“. [N 1] Tato norma popílek definuje jako jemný prášek převážně z kulovitých sklovitých částic, které vznikají při spalování práškového uhlí samotného, nebo i se spoluspalovaným materiálem, který má pucolánové vlastnosti a sestává převážně z SiO_2 (oxid křemičitý) a Al_2O_3 (oxid hlinitý). Důležité je sledování právě obsahu aktivního SiO_2, který upravuje norma pro cementy ČSN EN 197 - 1,ed. 2. [N 2] Normová hodnota je stanovena nejméně na 25 hm.%. Obecně je nutno zmínit, že specifikuje-li tato norma popílek do betonu, jedná se vždy o létavý popílek z vysokoteplotního spalování.

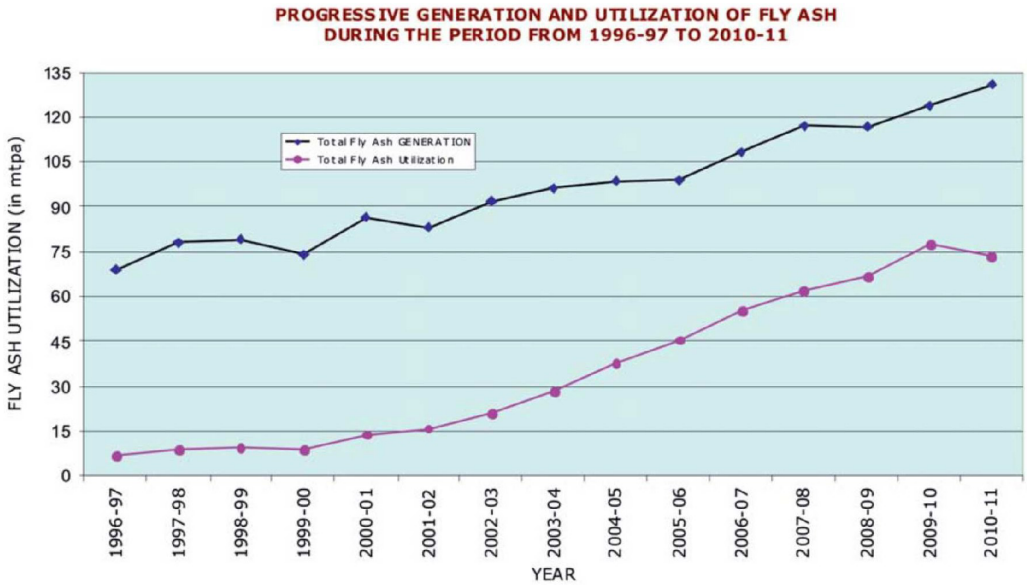
Tyto popílky vznikají jako druhotné suroviny při spalování černého či hnědého uhlí samotného, popřípadě s dalším spoluspalovaným materiálem. Jemné částice popílku jsou zachyceny pomocí elektrostatického nebo mechanického odlučování prachových částic ze spalin. Jedná se tedy o nespalitelné anorganické příměsi, které se do spalované suroviny dostávají buď činností podzemní vody, popřípadě jsou součástí již přímo rostlin, ze kterých uhlí posléze vzniká. Produkce popela při spalování uhlí je poté tím vyšší, čím vyšší množství těchto nespalitelných příměsí uhlí obsahuje. Například hnědé uhlí, nejčastěji v elektrárnách v ČR spalované, obsahuje okolo 20 až 25 hm.% nespalitelných příměsí.

Z historického hlediska první nám známé použití popílku při výrobě stavebních materiálů sahá až do starověkého Říma, kdy se o užití sopečného popelu pro výrobu malt zmiňuje ve svých knihách o architektuře známý římský architekt Marcus Vitruvius Pollio. Tato doba také dala vzniknout označení „pucolán“. Toto označení pochází z italského slova Pozzuolli, které je názvem města na úbočí Vesuvu, kde byl sopečný popel nalezen. [1-1]

V historii prvně používaný popílek byl však značně odlišný od popílku jako jej známe dnes. Jednalo se vlastně o sopečný popel, konkrétně ze sopky Vesuv.

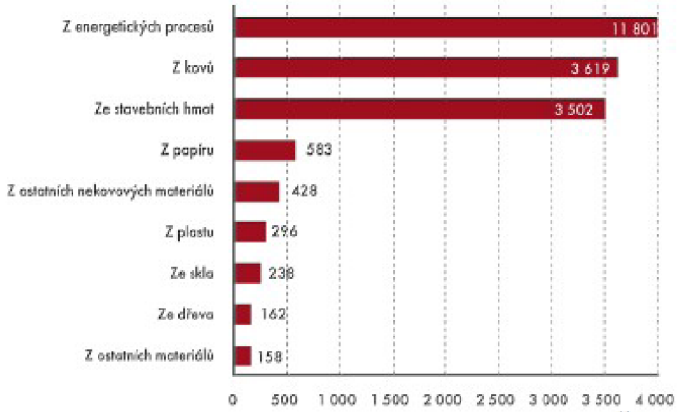
První rozmach popílku, tak jak ho známe dnes, se ale začal projevovat již ve 30. letech minulého století, kdy sílilo úsilí tento materiál využívat při výrobě stavebních hmot. Důvodem využití bylo zejména zpracování velkého množství odpadní suroviny z tepelných elektráren a s tím související taktéž ekonomické hledisko, protože popílek jako druhotná odpadní surovina je ekonomicky méně náročný, než je tomu u jiných základních stavebních materiálů. Jako příklad lze jmenovat portlandský cement, který je zřejmě nejčastěji užívaným pojivem při výrobě stavebních prvků a směsí.

Skutečně globálnější používání popílku ve vetší míře se však datuje zhruba o 30 až 40 let později, konkrétně tedy na 60. až 70. létá minulého století, kdy se používání popílku stává již prakticky ekologickou nutností z důvodu jeho narůstající produkce. Trend celosvětově dlouhodobého nárůstu produkce elektrárenského popílku lze demonstrovat na údajích pocházejících z daleké Indie. V této zemi je takto enormní nárůst produkce, jež lze pozorovat na přiloženém obrázku (obr. 1.1), dán zejména stálým navyšováním výroby elektrické energie, a to zejména v rámci tepelných elektráren. Demonstrativně lze uvést, že od roku 1947 do roku 2012 vzrostla produkce energie v Indii z původních 1330 MW na 205 340 MW. [1-2]



Obr. 1. 1: Produkce a využití elektrárenského popílku v Indii (zdroj: [O 1])

Situaci u nás zobrazuje graf produkce druhotných surovin v ČR (obr. 1.2), ve kterém elektrárenský popílek tvoří převážnou složku produktů z energetických procesů. Obecně lze říci, že produkce elektrárenského popílku se v posledních letech v ČR stabilizovala a pohybuje se okolo 6,2 milionů tun za rok. [1-3]



Obr. 1.2: Vývoj produkce druhotných surovin v ČR v roce 2012, tis.t (zdroj: [O 2])

I přes tento fakt provázelo prosazení používání popílku, jako do jisté míry plnohodnotné náhrady cementu, značné úsilí. Jedním se zlomů využití popílku při výrobě betonů lze zmínit datum 29. června 1970, kdy tehdejší vrchní úřad stavebního dozoru sídlícího ve spolkové zemi Severní Porýní-Vestfálsko udělil povolení konkrétní popílek jako produkt konkrétní elektrárny (Rheinstahl v Marl) používat jako nesamostatné pojivo, přičemž důležitým aspektem bylo, že bylo umožněno nahradit část potřebného cementu tímto popílkem. [1-4]

Tím se popílek stává velmi významnou surovinou pro výrobce betonu. Následovala však další omezení použití popílku pro výrobu betonu a v tomto trendu různých omezení se používání popílku jako částečné náhrady cementu táhlo až do roku 1996, kdy po dalších rozsáhlých výzkumech byl popílek Úřadem stavebního dozoru povýšen na normovanou stavební látku. To souviselo se vznikem obecné evropské normy o popílcích a jejich vlastnostech EN 450. Tato norma se však zabývá pouze použitím vysokoteplotních popílků, nikoliv popílků fluidních, které vykazují značné odlišnosti již ve své chemické podstatě dané samotným vznikem tohoto druhu popílku.

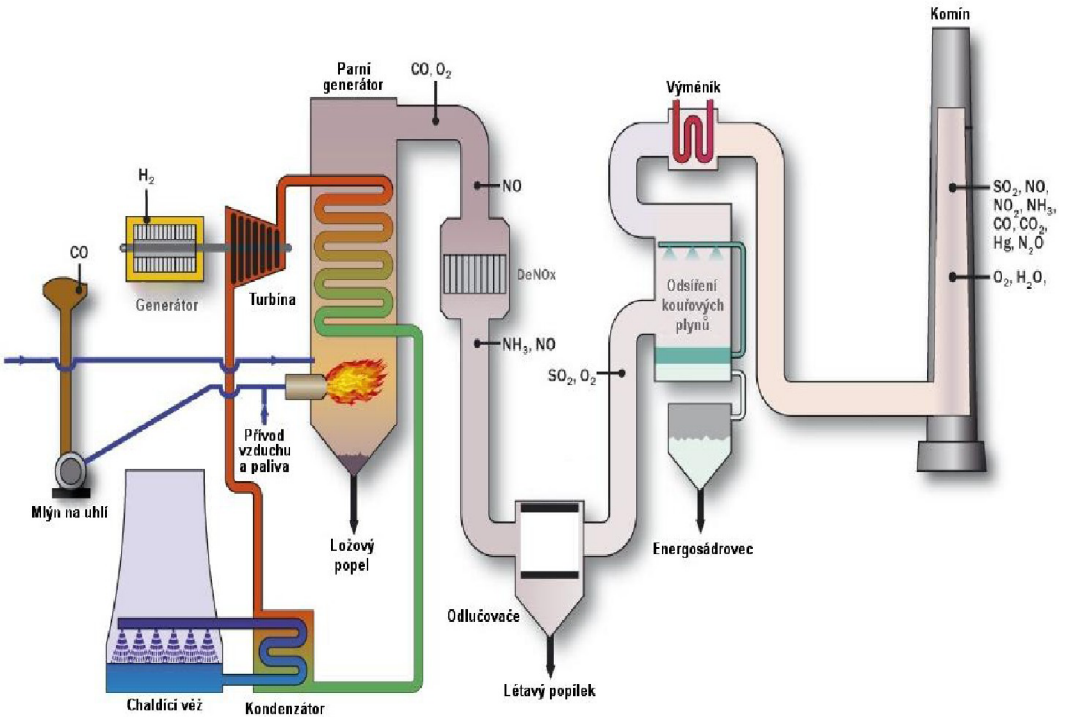
2. Výroba dnešních popílků

Dnešní do betonu užívané popílky, přesněji označovány jako elektrárenské úletové popílky, odtud anglické označení „fly ash“, jsou produktem spalování kamenného uhlí, což je organický sediment vznikající po mnoho let usazováním rostlinných a živočišných zbytků. Nejvhodnějším produktem pro spalování je uhlí černé, které z běžně dostupných pevných organických materiálů dává nejvyšší výhřevnost a jeho vznik je datován do dob starších, než je tomu u alternativního méně kvalitního uhlí hnědého. Konkrétně pak do období karbonu před 285 až 360 miliony let. [2-1] U uhlí je pro posouzení jeho kvality vždy nejdůležitější obsah organického podílu, tedy uhlíku. Uhlí černé obsahuje 75 – 95 % uhlíku, kdežto alternativní uhlí hnědé pouze 60 – 75 %. [2-2] Každé uhlí ovšem obsahuje taktéž určitý podíl doprovodných nespalitelných materiálů, které poté dávají vzniku samotnému popílku, a právě nižší množství těchto podílů obsažených v uhlí černém, dává vzniku menšímu procentu popílku z jeho spalování v porovnání s uhlím hnědým.

Obecně je nutno říci, že při tzv. výrobě elektrárenských popílků se setkáváme se 4 druhy těchto popílků. Základní hranicí jejich rozdělení je způsob spalování, přičemž jsou známé a v našich podmínkách používané dva způsoby. Je to tzv. klasické, neboli vysokoteplotní spalování, jehož produkcí jsou první dva druhy popílků. Popílek létavý zachycovaný v elektrostatických odlučovačích, tento popílek je jako jediný z dále jmenovaných použitelný jako náhrada cementu a pro výrobu betonu, poté je to popílek ložový nebo také ložový popel. Tento popel disponuje větší velikostí zrna a taktéž odlišným chemickým složením a mechanickými vlastnostmi. Ložový popel zůstává na dně kotle, odkud je mechanicky odstraňován. Využitelnost tohoto popelu spadá do oblasti rekultivace a zemních prací. Druhým technologickým postupem spalování je spalování velice jemně mletého uhlí ve vznosu při nižších teplotách, tzv. spalování fluidní. Tento způsob spalování dává popílky fluidní, neboli nízkoteplotní, přičemž opět dostáváme popel ložový a létavý popílek. Využití tohoto druhu popílku do betonu je však současnou betonářskou normou

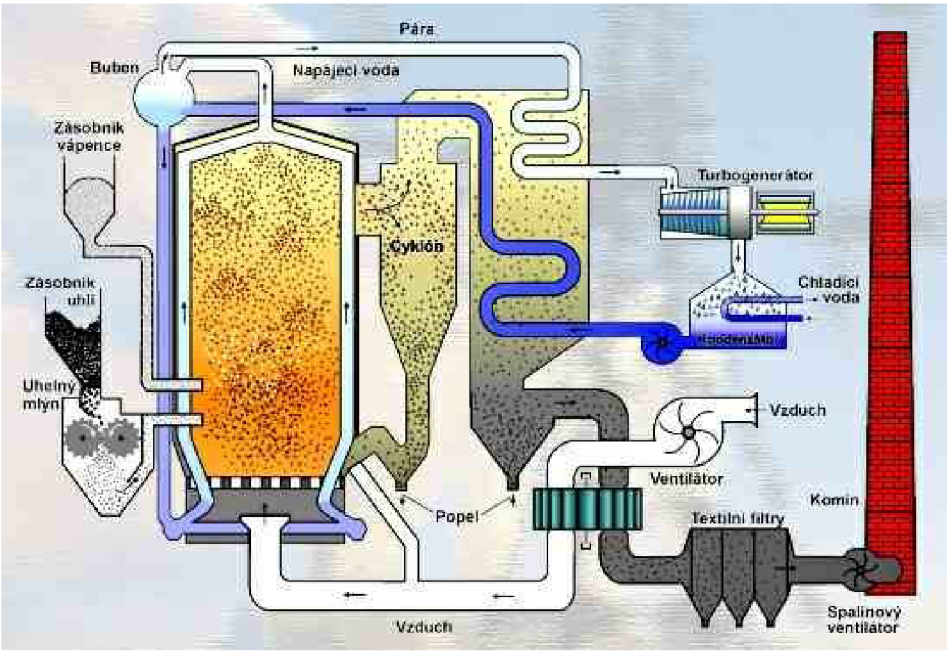
ČSN EN 206 – 1, Z4 [N 3] striktně zakázáno, a to zejména z důvodu nevhodného chemického a mineralogického složení. [2-3] Podrobnější dopad nevhodného chemického složení tohoto popílku na trvanlivost betonu bude rozebrán v pozdějších kapitolách práce.

Značné množství tepelných elektráren v ČR do dnes spaluje uhlí klasickým způsobem a tuto výrobu lze zjednodušeně popsat pomocí několika etap. První etapou výroby elektrárenských vysokoteplotních létavých popílků je těžba uhlí důlním, popřípadě povrchovým způsobem a následuje oddělení tzv. hlušiny, neboli doprovodné horniny, obvykle pomocí flotace. Takto vytěžené uhlí je dále exportováno do elektráren. Před samotným spalováním je nutné materiál nejprve jemně pomlet v uhelných, dnes obvykle ventilátorových mlýnech na jemný prach o velikosti zrna obvykle do 90 μm, kdy tato velikost je dána běžně dostupnými mlýny. [2-4] Připravený uhelný prach je společně se spalovacím vzduchem vháněn k vysokoteplotním hořákům. Vlivem vysoké teploty hořáků a jemnosti uhelných částic dojde během několika vteřin ke spálení organických složek uhlí, usazení větších nehořlavých složek na dno kotle a odchodu jemných nehořlavých částic společné se spalinami. Tyto jemné částice jsou spalinami strženy do komínového systému a tuhnou při rychlém ochlazování na převážně kulovité sklovito-amorfní částice. Zachycení popílkových částic z komínového systému probíhá pomocí soustavy elektrostatických a mechanických odlučovačů a filtrů, čímž dostáváme již finální elektrárenský úletový popílek. U tohoto způsobu spalování je pro vlastnosti výsledného popílku důležitá teplota spalování, která se pohybuje mezi 1200 až 1700 °C a způsob odsíření vzniklých spalin, které probíhá tzv. vápencovou vypírkou. Tato vypírka je však realizována až po odloučení létavého popílku (obr. 2.1). Tyto dva parametry spalovacího procesu propůjčují popílku konečné vlastnosti, jež jsou rozdílné oproti popílkům ze spalování fluidního.



Obr. 2.1: Schéma vzniku vysokoteplotního popílku (zdroj: [O 3])

Jak již bylo psáno výše, druhou variantou je modernější a účinnější spalování fluidní. Taktéž tento spalovací proces lze zjednodušeně popsat v několika etapách, přičemž první etapa, tedy natěžení a úprava suroviny je stejná jako pro klasické spalování. Zcela rozdílný je však samotný způsob spalování v kotli. Jak již sám název napovídá, spalování probíhá fluidně, neboli ve vznosu. Na rozdíl od klasického spalování, kdy uhlí leží nehnutě na spalovacích roštech, je při fluidním spalování uhelný prach uveden v kotli do vznosu a utváří cirkulační vrstvu. To umožňuje dokonalé spalování materiálu při nižších teplotách, cca při 800 až 850 °C. Tato snížená teplota se projevuje zejména na výsledném tvaru zrn a granulometrii popílku. Na jeho odlišném chemickém složení oproti popílkům vysokoteplotním se podílí poté zejména způsob odsíření spalin. Odsíření spalin z fluidního spalování totiž probíhá pomocí přídavku pevného na jemno mletého vápence přímo do kotle společně s uhlím. Díky tomu fluidní popílky mohou obsahovat zvýšené množství volného vysoce reaktivního CaO, které se stává hlavní překážkou použití tohoto druhu popílku pro výrobu betonu. Proces fluidního spalování je zobrazen na přiloženém obrázku. (obr. 2.2)



Obr. 2.2: Schéma vzniku fluidního popílku (zdroj: [O 4])

Jak je zřejmé z výše psaného, vlastnosti a chemické složení popílku je závislé na způsobu spalování, ale taktéž na druhu uhlí, které je v elektrárně spalováno. Obecně požadované vlastnosti popílku pro použití do betonu řeší norma ČSN EN 450 – 2 [N 4], na základě které se vystavuje technické osvědčení o posouzení shody. Vhodnost použitelnosti popílku pro výrobu betonu dle normy ČSN EN 206 – 1, Z4 [N 3] je tedy spjata s certifikátem shody výrobku, a tím pádem musí mít každý popílek dodací list opatřen certifikační značkou CE. Jak již bylo řečeno dříve, obě jmenované normy se zabývají vysokoteplotním popílkem a použití fluidního popílku do betonu striktně zakazují. Zavedení kontroly popílků na základě certifikátů shody je nutné zejména v důsledku jejich velké druhovosti, což je dáno spalováním různých surovin v různých elektrárnách. V současné době je v České republice vyprodukováno okolo 8 až 10 milionů tun [2-5] elektrárenských úletových popílků, a to převážně vzniklých spalováním uhlí hnědého (elektrárna Počerady, Chvaletice, Prunéřov a další) a v menším měřítku uhlí černého (Dětmarovice), přičemž největším producentem popílku je energetická skupina ČEZ. Černouhelné popílky poté z celkové produkce tvoří jen zhruba 20 %. [2-6]

3. Vlastnosti popílku

3.1. Chemické vlastnosti popílku

Po chemické stránce obecně popílky řadíme mezi alkalické materiály, přičemž jejich hodnota pH dosahuje 7,0 a více. [3-1] Tato hodnota pH však značně kolísá v závislosti na druhu popílku a je dána jeho chemickým složením. Obecně mezi 3 základní složky popílku řadíme oxid křemičitý (SiO_2), oxid hlinitý (Al_2O_3) a oxid železitý (Fe_2O_3), v případě fluidního popílku navíc volný oxid vápenatý (CaO) v podobě měkce páleného vápna. Zmíněné 3 základní složky vysokoteplotního popílku zastupují v jeho složení asi 90 % celého objemu. Zbylá procenta jsou tvořena již vzhledem k jejich menšímu procentu zastoupení méně významnými prvky, jako jsou oxid vápenatý (CaO), u fluidních popílků však až 35 %, oxidy alkalických kovů (K_2O a Na_2O), oxid sírový (SO_3) a další. [3-2]

Přesné zastoupení jednotlivých složek v popílku je hlídáno a stanovováno pro každý druh popílku, protože jeho složení se může značně lišit v závislosti na druhu spalovaného uhlí a spoluspalovatelných látek (tab. 3.1). [3-3, 4]

Průměrné chemické složení elektrárenských popílků z ČR elektráren					
[hm.%]	Dětmarovice	Počerady	Mělník	Tušimice	Hodonín (fluid)
SiO_2	52,400	50,900	53,710	50,000	29,100
Al_2O_3	24,200	30,200	30,940	23,400	17,700
CaO	4,000	1,810	2,080	3,420	25,900
Fe_2O_3	6,400	5,310	6,000	14,500	2,500
K_2O	2,800	1,590	1,670	1,065	0,700
MgO	2,800	1,080	1,280	1,720	2,600
MnO	0,100	0,041	0,020	0,092	nestanoveno
Na_2O	0,300	0,205	0,208	0,291	0,300
P_2O_5	0,400	0,134	0,240	0,164	nestanoveno
SO_3	0,000	0,080	0,270	0,723	5,900
TiO_2	1,000	1,750	1,950	1,526	0,500

Tab. 3.1: Průměrné chemické složení elektrárenských popílků produkovaných vybranými tepelnými elektrárnami v ČR

Mimo sledování chemického složení popílku je pro jeho použitelnost po výrobu betonu nutné sledovat například i jeho ztrátu žíháním nebo jemnost, přičemž tyto hodnoty stejně jako ostatní stanovuje norma ČSN EN 450 – 1. [N 1] Samotná hodnota ztráty žíháním nám dává obraz zejména o obsahu nespáleného uhlíku v popílku a také o jeho vlhkosti.

Na základě hodnot ztráty žíháním jsou popílky dle výše zmíněné normy rozděleny do tří kategorií A až C, přičemž maximální přípustná hodnota ztráty žíháním je pro kategorii C a činí 9 hm.%, popřípadě je možné dělení dle jemnosti na kategorie N a S, přičemž kategorie S představuje velice jemné popílky se zbytkem na sítě s velikostí oka 45 μm pouze 13 %. (tab 3.2)

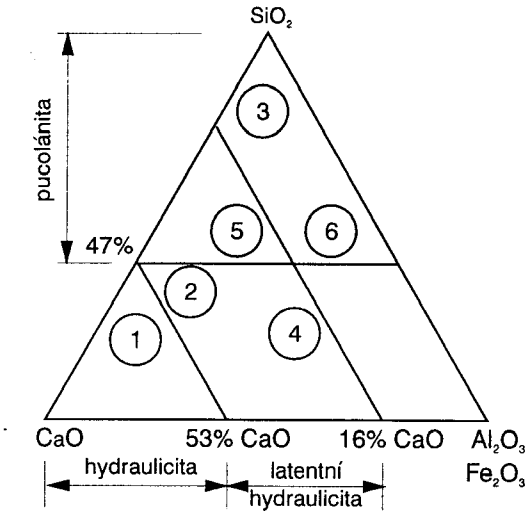
	Vlastnost	Mezní hodnoty jednotlivých výsledků
1	Ztráta žíháním (horní mezní hodnota)	7,0 % hmotnosti (kategorie A) 9,0 % hmotnosti (kategorie B) 11,0 % hmotnosti (kategorie C)
2	Jemnost (horní mezní hodnota)	45 % hmotnosti (kategorie N) 13 % hmotnosti (kategorie S)
3	Variabilita jemnosti (dolní a horní mezní hodnoty)	±15 procentních bodů z deklarované hodnoty (jen u kategorie N)
4	Chloridy (horní mezní hodnota)	0,10 % hmotnosti
5	Volný oxid vápenatý (horní mezní hodnota)	1,6 % hmotnosti
6	Aktivní oxid vápenatý (horní mezní hodnota)	11,0 % hmotnosti
7	Oxid sírový (horní mezní hodnota)	3,5 % hmotnosti
8	Oxid křemičitý + oxid hlinitý + oxid železitý (dolní mezní hodnota)	65 % hmotnosti
9	Celkový obsah alkálií (horní mezní hodnota)	5,5 % hmotnosti
10	Oxid hořečnatý (horní mezní hodnota)	5,5 % hmotnosti
11	Objemová stálost (horní mezní hodnota)	11 mm
12	Index účinnosti po 28 dnech (dolní mezní hodnota) Index účinnosti po 90 dnech (dolní mezní hodnota)	70 % 80 %
13	Variabilita měrné hmotnosti (dolní a horní mezní hodnota)	±225 kg/m^3 od deklarované hodnoty
14	Počátek tuhnutí (horní mezní hodnota)	2,25 krát déle než počátek tuhnutí cementu bez popílku
15	Požadavek na množství vody (horní mezní hodnota)	97 % (jen kategorie S)

Tab. 3.2: Normové hodnoty vybraných vlastností popílku

Popílek lze dále dělit do dvou tříd, jako popílek křemičitý (V) a popílek vápenatý (W). Toto rozdělení se provádí na základě obsahu aktivní vápenné složky (CaO). Křemičité popílky jsou obecně méně bohaté na aktivní CaO, přičemž této složky dle normy ČSN EN 197-1, ed. 2 [N 2] obsahují nejvýše

10 hm.%. Křemičité popílky jsou obvykle produktem při spalování kvalitnějšího černého uhlí, popřípadě kvalitního uhlí hnědého.

Spalováním méně kvalitního hnědého uhlí dostáváme popílky vápenaté, kde hodnota aktivního CaO překračuje 10 hm.%. Takto zvýšený obsah aktivního CaO již dává vápenatému popílku mimo pucolánové vlastnosti navíc vlastnost latentně hydraulickou, což je znázorněno na přiloženém obrázku (obr. 3.1) [3-5], která je však v technologických důsledcích s pucolanitou téměř totožná.



Obr. 18. Pozice hydraulických a pucolánových látek v potrojném diagramu $CaO - SiO_2 - Al_2O_3$ (Fe_2O_3).
1 – portlandské cementy, 2 – vysokopecní strusky, 3 – křemičité úlety, 4 – popílky bohaté na CaO, 5 – popílky bohaté na SiO_2, 6 – pucolánové popílky (Rankin).

Obr. 3.1: Potrojný diagram CaO, SiO_2, Al_2O_3 + Fe_2O_3 (zdroj: [O 5])

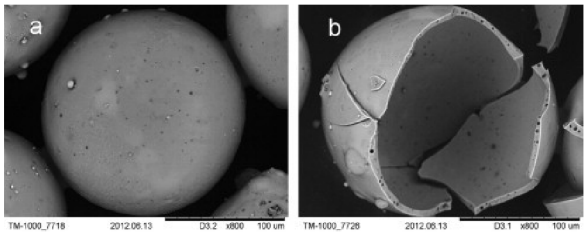
Ve světě je však běžnější dělení popílků dle americké klasifikace ASTM C 618-89 (2003) (American Society for Testing and Materials), dle které se popílky dělí taktéž na základě chemického složení do tří skupin, do skupiny F, C a N. Popílky třídy F jsou alternativou k našim křemičitým popílkům a obsahují proto velké množství SiO_2 a Al_2O_3, obecně ještě s Fe_2O_3 musí být zastoupeny z více než 70 %, naopak zastoupení CaO a MgO je nízké. Vznik tohoto druhu popílku je obvykle podmíněn opět spalováním kvalitního černého uhlí nebo antracitu. Skupina C je poté alternativou k popílkům vápenatým, čemž odpovídá vyšší zastoupení CaO a MgO a souhrnný součet SiO_2, Al_2O_3 a Fe_2O_3 mezi 50 a

70 %. Skupina N je z chemického hlediska prakticky totožná se skupinou F, odlišná je však zejména hodnota ztráty žíháním, která je oproti max 6 % u předešlých skupin navýšena na přípustnou hodnotu 10 %. Naopak hodnota maximálního přípustného množství SO_3 je ponížena z 5 % na 4 %. [N 5]

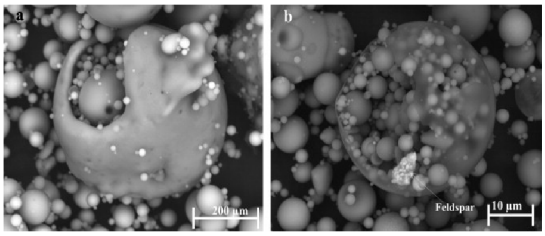
Uvažujeme-li popílek jako příměs při výrobě betonu, řadí se do typu příměsí II, tedy do příměsí s pucolánovou nebo hydraulickou aktivitou. Pucolány jsou látky, které obsahují aktivní SiO_2 a Al_2O_3 a nejsou schopny samostatně s vodou reagovat. Jejich reaktivnost ve vodném prostředí je podmíněna přítomností hydroxidu vápenatého ($Ca(OH)_2$), přičemž poté reagují za tvorby nerozpustných C-S-H gelů, které disponují vysokou pevností a jsou prakticky shodné s hydratačními splodinami, jež vznikají při hydrataci portlandského cementu. Tato reakce je vyvolána převážně amorfním oxidem křemičitým (SiO_2). [3-6] Díky těmto pucolánovým vlastnostech se vysokoteplotní popílek podílí na vytváření celkové pevnosti a struktury cementového kamene, proto je ho možné posuzovat taktéž jako součást pojiva.

3.2. Fyzikální vlastnosti popílku

Popílek je tvořen velmi jemnými kulovitými částicemi, jejichž tvar je rozhodujícím faktorem ovlivnění reologie čerstvé betonové směsi. Zakulacený povrch popílkových částic je zeskelněný, tudíž uzavřený. Ve vysokoteplotním popílku je možný výskyt taktéž zeskelněných kulových dutých částic označovaných jako cenosféry nebo zeskelněných kulových tenkostěnných nebo i tlustostěnných útvarů vyplněných velkým množstvím velice drobných částic popílků obvykle o velikosti pod 10 μm a tyto útvary se označují jako plerosféry (obr. 3.2 – 3). [3-7] Téměř dokonale zakulacený povrch mají popílky vzniklé spalováním kvalitního černého uhlí. Naproti tomu při spalování uhlí hnědého nemusí vždy vznikat částice blížící se ideální kouli.

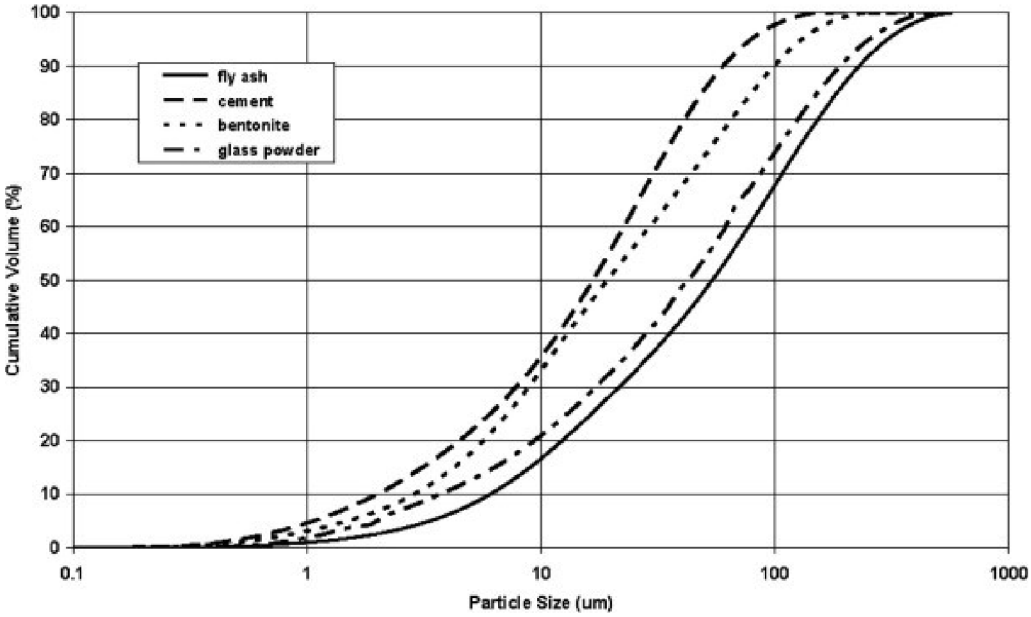


Obr. 3.2: cenosféry v rastrovacím elektronovém mikroskopu (zdroj: [O 6])



Obr. 3.3: plerosféry v rastrovacím elektronovém mikroskopu (zdroj [O 7])

Přestože je velikost zrn popílku řádově odpovídající velikosti zrnu cementu, tedy v řádech desítek mikrometrů, konkrétně střední průměr zrn popílku se udává jako 10 až 30 mikrometrů, samotné granulometrické složení je odlišné, což je patrné z přiloženého obrázku (obr. 3.4). Taktéž popílek, stejně jako jiné materiály, je možno dále upravovat a mezi poměrně jednoduché úpravy patří například prosévání a odstranění hrubších zrn popílku, pomocí čehož je možné získat jemný až velmi jemný popílek. Takto upravené popílky potom obsahují převážně jen zrna ideálního kulového tvaru a jejich zrnitost se blíží ideální křivce zrnitosti, díky čemuž se tyto popílky stávají vysoce hodnotnou surovinou pro dosažení požadovaných reologických vlastností betonu.



Obr. 3.4: Křivky zrnitosti popílku, cementu a dalších materiálů (zdroj: [O 8])

Fyzikální parametry jako jsou sypná hmotnost, objemová hmotnost, popřípadě měrný povrch jsou opět odvislé od druhu popílku. Obecně však lze říci, že měrná hmotnost zrn popílku je nižší než měrná hmotnost zrn cementu, konkrétně se uvádí okolo hodnoty 2000 až 2500 kg/m^3. Sypná hmotnost zrn popílku již prakticky koresponduje se sypnou hmotností cementu, tedy okolo hodnoty 1000 kg/m^3. Z důvodu lepší reaktivnosti se stejně jako u ostatních materiálů snažíme i u popílku dosáhnout co nejvyšší hodnoty měrného povrchu, proto se některé popílky dále melou. Tím je dán široký rozsah měrného povrchu 200 až 550 m^2/kg dle Blaina. [3-8] Jak již bylo řečeno, fyzikální vlastnosti popílku jsou závislé na jeho původu, ale je třeba doplnit, že taktéž na daném místě odběru v konkrétní elektrárně. Elektrostatické filtry každé elektrárny jsou rozděleny do několika sekcí, přičemž každá sekce zachycuje primárně popílek o jisté velikosti zrna. Díky tomu jsme schopni z jedné elektrárny odebírat popílky o rozdílné velikosti zrna a tyto popílky následně míchat dle požadované optimální křivky zrnitosti. Tato problematika bude ještě dále probírána v pozdějších kapitolách práce.

3.3. Další vlastnosti popílku

Elektrárenský popílek je ze své podstaty odpadním produktem, který byl na základě normy povýšen na druhotnou surovinu, a tudíž je s ním spojeno i mnoho negativních vlastností. Nejsou to však jen vlastnosti, jako je například radioaktivita spojená s původem vzniku popílku, ale například díky vysoké jemnosti popílku je nutné hlídat taktéž limitní hodnoty prašnosti. Obecně platné limity pro čistotu vzduchu na pracovišti jsou 3 kg/m^3 a limitní hodnota pro vdechnutelný prach je 10 mg/m^3, přičemž nevhodná manipulace s popílkem by mohla zapříčinit překročení těchto hodnot. [N 6] Již zmíněná hodnota radioaktivity nesmí stejně jako u ostatních stavebních materiálů přesáhnout hodnotu uvedenou v Příloze č. 10 vyhlášky 307/02 ve znění vyhlášky 499/05 Sb. [N 7] Základním hlídaných prvkem je poté Radon (Ra-226), přičemž pro

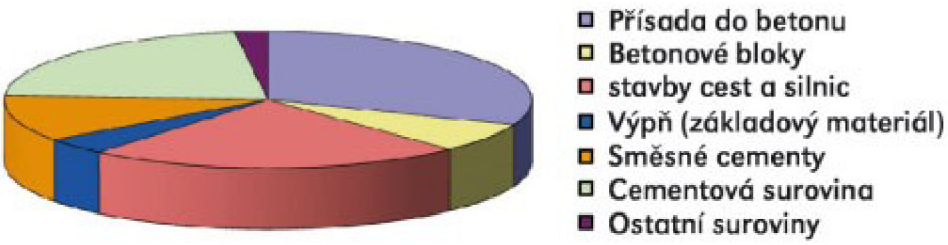
elektrárenský popílek nesmí jeho aktivita přesáhnout hodnotu 300 Bq/kg pro použití pro stavby s obytnými nebo pobytovými místnostmi. V případě využití elektrárenského popílku výhradně pro stavby jiné než s obytnými nebo pobytovými místnosti se tato hodnota zvyšuje až na 1000 Bq/kg. [3-9] Je na místě dodat, že tyto hodnoty dnešními popílky nejsou naplněny z důvodu kvalitní kontroly vstupní suroviny do procesu spalování.

S popílkem tedy není nutno nakládat jako s nebezpečnou látkou, protože všechna rozsáhlá měření neprokázala jeho závadnost na lidské zdraví ani na životní prostředí při správném nakládání s sním. [3-10] I přes nepatrně zvýšenou hodnotu radioaktivity, nepřesahuje však výše uvedené limitní hodnoty, nepředstavuje popílek nebezpečí při použití ve stavebnictví ani jiných případech, jako jsou například rekultivace. Je to dáno zejména předpisy, které nutí tepelné elektrárny a spalovny uhlí kontrolovat tyto hodnoty již pro samotné uhlí a další materiál, který je následně spalován.

Díky těmto faktům má popílek ve stavebnictví velmi široké uplatnění, čemu velmi přispívá jeho příznivá cena. Tím se stává jednou ze základních složek při výrobě stavebních materiálů, ale taktéž při zemních pracích spojených například s výstavbou pozemních komunikací. Významným parametrem použitelnosti není však jen ekonomické hledisko, ale též hledisko ekologické, protože jsme popílkem schopni nahradit jiné svou výrobou ekologicky škodlivé materiály, jako je například cement, při jehož výrobě je produkováno velké množství CO_2,, které dosahuje až hodnoty 1 tuny na 1 tunu portlandského slinku. [3-11] Je samozřejmé, že při spalování uhlí, je produkce CO_2 taktéž značně nepříznivá, je si však třeba uvědomit, že popílek je pouze sekundární a nevyhnutelný produkt tohoto spalování, které slouží pro výrobu elektrické energie.

4. Využití popílku

Všechny dosud psaná fakta dnes popílek ve stavebnictví staví prakticky vedle cementu k nezbytným materiálům. Jeho používání ve stavebním průmyslu lze ilustrovat přiloženým grafem (obr. 4.1), z něhož je zřejmé, že nejvyšší využití popílku je jako příměsi při výrobě betonu, následuje stavba pozemních komunikací a výroba cementu. Zde je však třeba připomenout, že tato využitelnost se týká striktně popílků vysokoteplotních, protože využití popílků fluidních je omezeno řadou norem díky jejich nevhodnému chemickému a mineralogickému složení. Fluidní popílky tedy doposud nenašly takové uplatnění. Pro zvýšení jejich využitelnosti je s nimi prováděna řada experimentů, které by mohly po jisté úpravě právních předpisů zatřídit tento popílek mezi využitelné druhy průmyslového odpadu. Jako příklad lze jmenovat použití fluidního popílku jako příměsi při výrobě cementu. [4-1]



Obr. 4.1: Využití elektrárenských popílků ve stavebnictví (zdroj: [O 9])

Popílek použitý jako příměs do betonu nahrazuje v určitém množství cement potřebný pro výrobu a dosažení požadovaných pevností betonu. Tím se výroba betonu stává ekonomicky a ekologicky méně náročná. Popílek však pozitivně ovlivňuje mnoho dalších vlastností zatvrdlého betonu, jako je například nepropustnost, a tím do jisté míry odolnost proti chemicky agresivnímu prostředí. V čerstvém betonu to je naopak například kladné ovlivnění viskozity cementové pasty, proto je jeho použití při výrobě některých druhů betonu prakticky nezbytné. Jako příklad lze uvést výrobu samozhutnitelných betonů

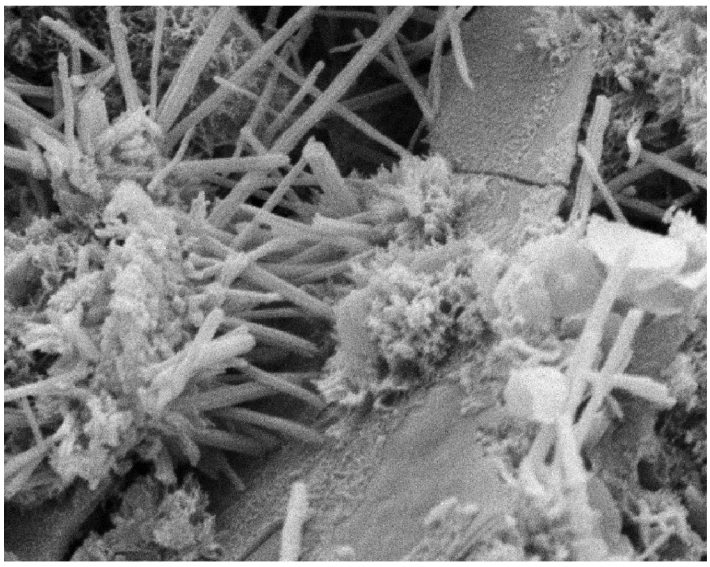
(SCC), tedy betonů na jejichž reologickou schopnost je kladen vysoký požadavek, přičemž tento vysoký požadavek pomáhá popílek naplňovat. Snahou je dnes výroba dokonce tzv. green concrete neboli HVFAC betonů (High Volume Fly Ash Concrete), což jsou betony s vysokým obsahem popílku, konkrétně v poměru ku množství cementu vyšším než 1. Podrobně se použití popílku jako příměsi do betonu a jeho dávkování budou věnovat další kapitoly.

Do betonu se popílek může dostat také již obsažen v cementu. Do cementu se popílek přidává z důvodu nahrazení části portlandského slínku, jehož výroba patří v celém stavebním průmyslu mezi ekonomicky a ekologicky nejnáročnější. Cementy obsahující popílky se označují jako portlandské směsné (CEM II), pucolánové (CEM IV) nebo cementy směsné (CEM V). Samotné zatřídění daného cementu do příslušné skupiny řeší norma ČSN EN 197 – 1, ed. 2. [N 2] Popílek se však nepoužívá pro přimíchání do cementů pouze jako náhrada za portlandský slínek, ale je možné jej přidávat taktéž jako přísadu regulující tuhnutí cementu, běžně tuto funkci ale plní sádrovec. Za zmínku stojí, že právě v tomto ohledu by se jevilo jako optimální použití fluidního popílku díky jeho zvýšenému obsahu volného aktivního CaO, síranů (SO_3) a taktéž obsahu nerozpustného anhydritu II. Právě tyto dvě složky dávají fluidnímu popílku do jisté míry taktéž hydraulické vlastnosti a ve spojení s hlinitokřemičitou amorfní ($xAl_2O_3 \cdot ySiO_2$) formou fluidních popílků společně s aluminatovými bázemi portlandského slínku (zejména C_3A) vzniká ettringit ($C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$), který brání nadměrně rychlému tuhnutí cementu způsobenému právě trikalciumaluminátem (C_3A). Naprosto stejného mechanismu je využíváno při použití sádrovce jako regulátoru tuhnutí, který ve styku s aluminátovými bázemi portlandského slínku vytváří na jejich povrchu těžko rozpustný ettringit, který brání dalšímu pronikání vody dovnitř zrna a zpomaluje tak jeho jinak velice rychlou hydrataci. [4-2]

$$Rovnice\ vzniku\ ettringitu\left(trisulfátu\right):$$

$$C_3A + 3CaSO_4 \cdot 2H_2O + 26H_2O \rightarrow C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$$

A právě tyto pochody spojené se vznikem ettringitu se stávají pro využití fluidního popílku při výrobě stavebních materiálů, například betonu, značně diskutabilní, protože vznik ettringitu v již zpevněném kompozitu by díky svému enormně narůstajícímu objemu působil na celý kompozit degradačně, a to až do jeho úplného rozpadu. Vznikající ettringit utváří jehličkovité krystaly, jejichž molární objem je až 2,65 krát větší než molární objem původních látek. Ukázka již probíhající degradace betonu vznikem sekundárního ettrigitu lze vidět na přiloženém obrázku. (obr. 4.2)



Obr. 4.2: Krystaly ettringitu ve struktůře betonu (zdroj: [O 10])

Proto je použití fluidního popílku orientováno spíše na zemní a rekultivační práce, popřípadě tam, kde je vzniku ettringitu s výhodou využito, popřípadě jeho vznik nepůsobí degradačně.

Využití popílku vysokoteplotního není omezeno pouze na použití jako příměsi pro výrobu hutných betonů. Taktéž výroba pórobetonu, hlavně v dřívějších dobách, byla odkázána na použití popílku jako křemičité složky, která dává během hydrotermální reakce v autoklávu vzniku základnímu minerálu tobermoritu ($C_6S_5H_6$). Moderní technologie výroby pórobetonu jej dnes však z většiny vytlačily a používají jako křemičitou složku křemičitý písek. S lehkými stavebními materiály souvisí i použití popílku pro výrobu lehkého kameniva.

Tato technologie spočívá ve smísení popílku s vodou a vytvoření granulátu, který je následně zapálen a samovyhořením vytvrzen, popřípadě za přídavku malého množství cementu vytvrzen pouze vysušením. Popílkové lehké kamenivo však nedosahuje prozatím takových mechanických a fyzikálních parametrů, které by rozšířily jejich použitelnost. [4-3]

Dalším využitím popílku ve stavebním průmyslu spočívá zejména v rámci silničního stavitelství. V tomto stavebním odvětví popílek plní funkci podkladových vrstev a stabilizaci zemin, popřípadě je v menším množství používán i při výrobě asfaltových směsí. Pro tyto účely a rekultivaci důlních oblastí, přičemž tato mimostavební oblast použití zároveň spotřebuje největší množství vyprodukovaného popílku, je možno povětšinou využívat popílků vysokoteplotních i fluidních. Samotná aplikace podkladních vrstev vozovek a násypů, popřípadě stabilizace zemin, spočívá buď ve smíchání popílku pouze s optimální dávkou vody, která zajistí maximální hutnost této směsi, zde se využívá zkoušky Proctor Standart, popřípadě smíchání popílku s jistou dávkou pojiva, nejčastěji v podobě cementu. Dnes je taktéž zcela běžné stmelování vrstev hrubého kameniva sloužícího jako podkladní vrstva vozovky řídkou popílkovou suspenzí, která se obchodně označuje jako KAPS (kamenivo stmelené popílkovou suspenzí). Složení této suspenze může být taktéž pouze na bázi popílku a vody, přičemž utuhnutí směsi je dáno částečným nasáknutím suspenze do zrn kameniva a odpařením přebytečné vody nebo pro kvalitnější stmelení se do suspenze přidává taktéž menšího množství cementu, díky němuž suspenze tvrdne podobně jako cementová malta. [4-4] Samotné KAPS je dodáváno jako certifikovaný stavební výrobek, a to již taktéž například společností ČEZ Energetické produkty, tedy společností produkující převážné množství popílků v ČR. [4-5]

5. Popílek v betonu

Skladbu betonové směsi lze zobecnit do 3 složek, přičemž nejvyšší zastoupení v této směsi má kamenivo. Aby se jednalo o beton jako takový, je nezbytné, aby byly zastoupeny nejméně dvě frakce kameniva, a to kamenivo hrubé a jemné. Zbylé dvě složky jsou cement a záměsová voda. V dnešní době se k těmto základním složkám však prakticky vždy připojují navíc příměsi nebo přísady, popřípadě oboje. Na elektrárenský popílek, který splňuje požadavky pro jeho užití do betonu dle normy ČSN EN 450, jedná se tedy vždy pouze o popílek vysokoteplotní, lze na tento popílek v betonu nahlížet jako na kamenivo, přesněji mikroplnivo, toto použití se řídí normou pro kamenivo do betonu ČSN EN 12620+A1 [N 8], nebo jako na příměs, která svým chemickým působením umožňuje redukci množství použitého cementu, v tomto případě dle normy ČSN EN 206-1, Z4. [N 3] V obecném smyslu lze popílek tedy klasifikovat též jako pojivo, přesněji však řečeno jako příměs mající pucolánovou vlastnost, díky které hydratačními procesy vznikají chemicko-mineralogicky obdobné produkty, jako jsou hydratační zplodiny portlandského cementu.

5.1. Popílek jako mikroplnivo

Prakticky stejně jako jakýkoliv jemný materiál, který je v souladu s normou ČSN EN 12620+A1, lze elektrárenský popílek použít jako mikroplnivo, přičemž díky jeho tvaru a velikosti zrn se jedná o poměrně kvalitní druh mikroplniva, co se týká ovlivnění reologie čerstvého betonu. Samotná vhodnost užití mikroplnivové složky spočítá v možnosti díky ní dosáhnout hutnější struktury cementového kamene a po zatvrdnutí celého betonového kompozitu. Dosáhnutí ideální hutnosti cementového kamene je stejně jako u samotné složky kameniva závislé na správné granulometrické skladbě. Pohybujeme-li se v oblasti mikroplniv, čili jemných podílů, křivku zrnitosti vyskládáváme vždy z cementu, jemných podílů obsažených v samotném kamenivu a použité příměsi.

V praxi však není zcela běžná kontrola a skladba křivek zrnitosti jemných částí ve směsi. Zcela obvyklá je praxe, kdy k navrženému množství cementu přidáváme množství příměsi, ať již typu I nebo II, na základě zkušeností a provedených zkoušek, přičemž jemné podíly kameniva zahrnujeme do křivky zrnitosti samotného kameniva jako takového.

Stupňující se tendence po ultravysokopevnostních betonech a betonech speciálních vlastností, které jsou typické velkou hutností cementové matrice, vedla k vytvoření prakticky dvou směrů výzkumu návrhu těchto betonů. Jako první směr by bylo možno označit snahu zapojení zcela nových materiálů do výroby betonu. Tyto materiály obvykle spadají až do nano velikostí. Druhým směrem lze poté označit snahu vystavit ideální křivku zrnitosti, která by zajišťovala maximální hutnost betonu, ne jen na úrovní kameniva, ale taktéž na úrovni jemných podílů. Jedná se tedy o vytvoření ideální křivky zrnitosti smícháním cementu a příměsi, popřípadě navíc jemných podílů vnesených do kompozitu kamenivem. Dosažení optimální hutnosti těchto jemných podílů lze poté označit jako tzv. „packing“. [5-1] Jelikož experimetnální část této práce je zaměřena právě na porovnání vlastností betonů zcela bez popílku, betonů s klasickou dávkou popílku, která dnes činí u běžných hutných betonů obvykle množství 15 až 25 % z množství cementu a betonu navržených právě s přihlédnutím k maximální hutnosti cementové matrice, bude tématu dávkování a packingu věnována samostatná kapitola práce.

Obecně vyšší hutnosti lze dosáhnout pouze s využitím rozdílných frakcí jednotlivých složek a dobrým tvarem jejich zrn. Popílek díky tvaru svých zrn blížících se kouli se jeví jako ideální materiál, přičemž již samotný popílek může svou granulometrií dosahovat téměř ideální křivky zrnitosti díky jeho další vhodné úpravě, kterou je obvykle jeho prosévání. Tím lze získat velmi hutnou popílkovou směs. Takto upravené popílky s téměř dokonalou křivkou zrnitostí nacházejí své uplatnění zejména při výrobě již zmíněných vysokopevnostních až ultra-vysokopevnostních betonů. I takto upravený popílek může být dále s výhodou podroben packingu s cementem, čímž je jeho efektivita ještě dále umocněna. [5-2]

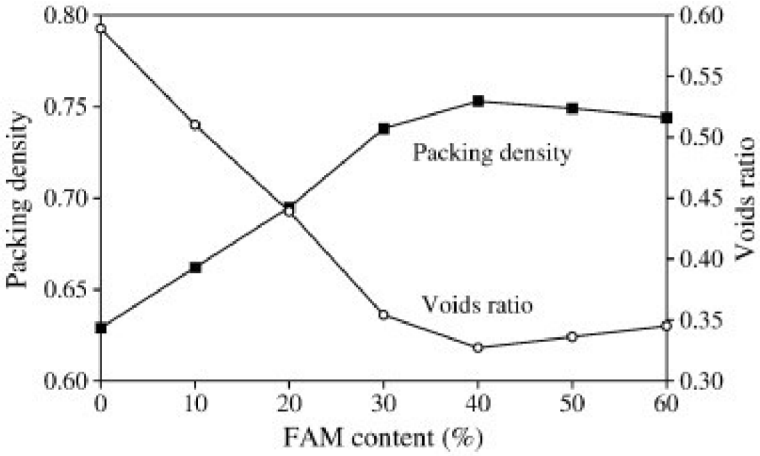
5.1.1. **Čerstvý beton**

V čerstvém betonu popílek kladně ovlivňuje zejména zpracovatelnost. Lepší zpracovatelnost betonové směsi je výhodná pro výrobce i odběratele. Všeobecně platí, že se zlepšující se zpracovatelností betonové směsi roste kvalita následného zhutnění a na to navazující pevnosti betonu v zatvrdlém stavu a další mechanické vlastnosti. Pod pojmem lepší zpracovatelnost je zde míněno lepší ztekucení směsi, popřípadě při normové zkoušce konzistence dle ČSN EN 12350 -2 dochází k vyšší hodnotě sednutí kužele. [N 9]

Zlepšení reologických vlastností použitím popílku lze přisoudit zejména jeho tvaru zrn, kdy tyto zrna kulovitého tvaru vytvářejí v čerstvém betonu tzv. „efekt kuličkového ložiska“. [5-3]

Konzistence se vždy pojí s množství potřebné záměsové vody, popřípadě použitím plastifikátorů a jejich množstvím, přičemž bylo vypozorováno, že zajištění optimálního množství použitého popílku způsobí maximální hutnost a reologickou schopnost betonové směsi i při velmi nízkém vodním součiniteli. (obr. 5.1) Při takto nízké hodnotě vodního součinitele obvykle dostáváme betony vysokých pevností, což je dáno minimální tloušťkou vodního filmu na povrchu zrn kompozitu. Každá tranzitní zóna, styk kameniva a cementového kamene, představuje v betonu defektní místo, a to jak z pohledu pevnosti kompozitu, tak z pohledu trvanlivosti. Tranzitní zóna je vždy místem více pórovitějším než je samotný cementový kámen, což je dáno vyšším vodním součinitelem tohoto místa, právě díky tvorbě vodního filmu na povrchu kameniva, a takto pórovitá struktura dosahuje nižších pevností, ale zejména se stává propustnější pro migraci chloridových a jiných iontů do vnitřní struktury betonu. Tím se beton stává méně odolnějším vůči agresivnímu prostředí. [5-4] Tento film, ač dosahuje velice malé tloušťky, způsobuje mírné naředění okolního cementového tmele, zvýšení vodního součinitele a odcházející záměsová voda po sobě zanechává mikropóry, jež snižují výslednou pevnost tohoto místa. Samotný popílek umožňuje použití menšího množství záměsové vody při zachování požadovaného stupně konzistence, což samo o sobě

ovlivňuje hutnost zatvrdlého betonu, ale jeho chemické působení během hydratace a tvorba velice malých C-S-H gelů prorůstající taktéž do mikropórů této tranzitní zóny zapříčiňuje svou podstatou další snížení pórovitosti tranzitních zón. [5-5]



Obr. 5.1: Vliv množství popílku na hutnost betonu a použitý vodní součinitel (zdroj: [O 11])

Redukce množství vody při dodržení požadované konzistence lze nazvat jako plastifikační účinek popílku. Na základě tohoto účinku lze dle normy ČSN EN 206-1, Z4 [N 3] snížit hodnotu ekvivalentního vodního součinitele dle vzorce w = v/(c+k·p), kde v je množství vody, c je množství cementu, p je množství příměsi, v našem případě popílku a k je dle zmíněné normy k-hodnota. Konkrétní hodnota této k-hodnoty je dána normou a liší se na základě druhu použité příměsi a bude o ní pojednáno v podkapitole věnující se popílku jako příměsi.

Plastifikační účinek popílku a jeho velikost a tvar částic je spojen se zvyšováním viskozity samotného cementového tmele, což pozitivně ovlivňuje stabilitu betonové směsi. To se projeví zabráněním segregace hrubších složek, pocení a krvácení čerstvé betonové směsi. I když fakt, že popílek zabraňuje pocení a krvácení betonu nelze jednoznačně potvrdit, protože při nevhodně zvoleném množství popílku a záměsové vody, může tyto negativní vlastnosti právě umocnit, přičemž tento fakt je pozorován zejména u silně zeskelněných zrn popílku, která jsou poté těžce smáčivá. Naopak zvýšení viskozity

cementového tmelu díky popílku je velmi výhodné pro výrobu samozhutnitelných betonů (SCC). Právě pro výrobu těchto betonů je spotřebováno prakticky nejvyšší množství popílků jako mikroplniva zabezpečující vysokou viskozitu a zároveň schopnost tečení směsi.

5.1.2. **Zatvrdlý beton**

Je-li na popílek nahlíženo jako na mikroplnivo, nelze jednoznačně popsat jeho přínos pro vlastnosti zatvrdlého betonu. To je dáno faktem, že popílek se díky své pucolanitě podíly na chemických procesech při hydrataci a tvrdnutí betonu, a proto v betonu ve své původní podobě zůstává jen v malém množství a zbytek tvoří nově vznikající C-S-H gely. Obecně však lze říci, že přebytečně množství popílku, které se chemické reakce ještě nezúčastnilo vyplňuje díky malé velikosti zrn strukturu cementového tmele a tím je snížena výsledná pórovitost kompozitu. Použití popílku na úkor určitého množství cementu nepatrně sníží taktéž objemovou hmotnost zatvrdlého betonu oproti betonu referenčnímu, který by obsahoval plné množství cementu. Snížení objemové hmotnosti je dáno nižší objemovou hmotností samotného popílku oproti cementu.

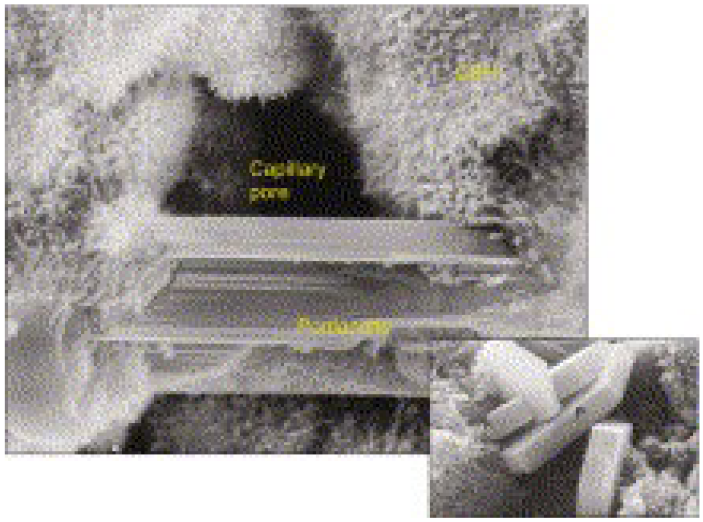
O dalších vlastnostech zatvrdlého betonu, které popílek ovlivňuje ať už pozitivně či negativně bude pojednáno v další podkapitole, která se bude zabývat chemickým působením popílku v betonu.

5.2. **Popílek jako příměs**

Elektrárenský popílek se kromě kladného působení jako mikroplniva využívá do betonu zejména pro svou chemickou aktivitu. Jak již bylo řečeno, popílek se projevuje tzv. pucolánovou aktivitou. To znamená, že ve vodném prostředí za přítomnosti vápenatých iontů reaguje za tvorby tzv. C-S-H gelů. Tvorba těchto

gelů během hydratace složek betonu je výhodná zejména pro jejich vysokou pevnost a také rozměry, které jsou tak malé, že jsou ve struktuře schopné vyplňovat vzniklé mikropóry, popřípadě jiné malé defekty.

C-S-H gely jsou obecně nejhojněji zastoupené reakční produkty v cementovém tmelu, literatura uvádí až z 50 %. [5-6] Snahou je jejich množství dále zvyšovat právě pomocí přídavku příměsí vedoucích k jejich tvorbě, protože vzniklé C-S-H gely stojí za většinou využitelných technických vlastností cementové malty. Dobré vlastnosti gelů, zejména pak například pevnosti, nejsou dány však skutečnou pevností jejich krystalků, ale tím, že vytváří na rozdíl od jiných hydratačních krystalů souvislou vrstvu, která je spojuje s cementem do soudržného celku, to lze vidět na snímku z elektronového mikroskopu, kde vzniklé C-S-H gely obklopují krystal portlanditu ($Ca(OH)_2$). (obr. 5.2)



Obr. 5.2: Krystal portlanditu obalen CSH gelem (zdroj: [O 12])

Samotnou pucolánovou reakci lze chemicky zjednodušeně popsat tak, že prvotním impulsem je úplná disociace hydroxidu vápenatého ve vodě na Ca^{2+} a OH^- ionty. Tím vzniká silně alkalický nasycený roztok hydroxidu vápenatého s pH až 12,5, přičemž vysoká koncentrace OH^- iontů vede k rozštěpení vazeb v SiO^2, tedy rozštěpení vazeb křemičitanů a hlinitokřemičitanů. Po rozštěpení

vazeb a následném kontaktu vzniklých iontů s ionty Ca^{2+} dochází k tvorbě již samotných hydratovaných křemičitanů (CSH) a hlinitanů vápenatých (CAH). Tvorba CAH je však v systému do jisté míry potlačena na úkor vzniku CSH, protože se rozpouštějí pomaleji a pro jejich vznik je třeba vyšší koncentrace Ca^{2+} iontů. [5-7]

$$\textit{Disociace hydroxidu vápenatého ve vodném prostředí}:$$
$$Ca(OH)^2 \rightarrow Ca^{+2} + 2OH^-$$

$$\textit{Rozštěpení vazeb v } SiO_2, \textit{ křemičitanech a hlinitokřemičitanech}:$$
$$\equiv Si - O - Si \equiv + 8OH^- \rightarrow 2[SiO(OH)_3]^- + H_2O$$
$$\equiv Si - O - Al \equiv + 7OH^- \rightarrow 2[SiO(OH)_3]^- + [Al(OH)_4]^-$$

$$\textit{Tvorba CSH a CAH gelů}:$$
$$[SiO(OH)_3]^- + Ca^{+2} \rightarrow C - S - H\ gel$$
$$[Al(OH)_4]^- + Ca^{+2} \rightarrow C - A - H\ gel$$

Pucolánová aktivita u popílku je vyvolána především jejich amorfní fázi SiO_2 a samotný chemismus reakce je podmíněn přítomností vysoce vápenatého roztoku, který rozrušuje sklovitý povrch zrn popílku, čímž dochází k vyluhování křemičitých a hlinitých oxidů. Tato reakce dává vzniknout podobným hydratačním produktům, které vznikají hydratací cementu. [5-8]

Rozhodující vlastností použitelnosti pucolánů je jejich pucolánová aktivita, což je schopnost pucolánů za normální teploty a ve vodném prostředí reagovat s volným hydroxidem vápenatým za vzniku vázaných hydratačních produktů. Určení reaktivnosti spočívá ve stanovení množství hydroxidu vápenatého, se kterým je pucolán schopen reagovat a v reakční kinetice této reakce.

Pro zjištění reaktivnosti pucolánů, a tedy i elektrárenských popílku používáme různé metody, tzv. přímé, spočívající přímo ve sledování množství $Ca(OH)_2$ během probíhající reakci a metody tzv. nepřímé, spočívající v měření samotných fyzikálních vlastností, jako jsou pevnosti, elektrická a tepelná vodivost zkušebních těles atd. Jako metodu přímou lze jmenovat rentgenovou difrakční analýzu, termogravimetrickou analýzu nebo klasickou titraci.

Použití popílku jako příměsi do betonu se řídí závaznou normou ČSN EN 206-1, Z4 [N 3], přičemž samotné materiálové požadavky na popílek jsou zakotveny v normě ČSN EN 450-1 [N 1] a zkušební metody pro použití popílku pro stavební účely jsou zakotveny v české normě ČSN 72 2071. [N 10]

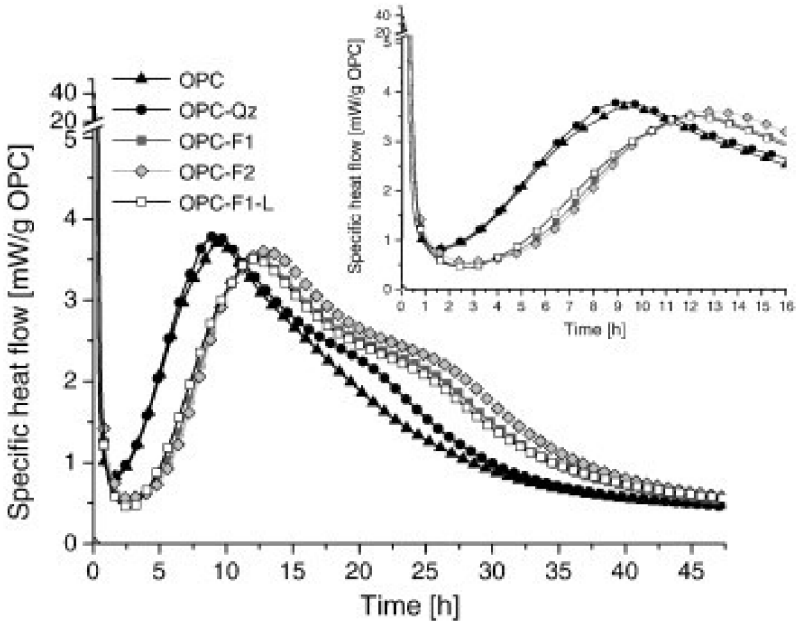
Na základě jmenovaných norem potom popílek definujeme jako příměs typu II, tedy příměs aktivní s pucolánovou nebo latentně hydraulickou vlastností. Díky tomu, lze popílkem nahradit určité množství potřebného cementu, přičemž je v normě zakotvena tzv. k – hodnota, která zároveň napomáhá ke stanovení ekvivalentního vodního součinitele.

Hodnota k - hodnoty se dle uvedené normy liší dle užité chemicky aktivní příměsi a udává její maximální přípustné množství, které je možno započítat do minimálního potřebného množství cementu a při výpočtu ekvivalentního vodního součinitele. Konkrétní hodnota pro popílek vyhovující normě ČSN EN 450, pro kterou platí zmíněné pravidlo, je dána poměrem hmotnosti popílku ku cementu ve velikosti menší nebo rovno 0,33. V případě použití vyššího množství popílku již toto nadbytečné množství nelze uvažovat při výpočtu ekvivalentního vodního součinitele a minimálního množství cementu. [N 3]

Samotná velikost k-hodnoty je však normou dále upřesněna pro jednotlivé druhy použitých cementů a stupně vlivu prostředí, jemuž bude beton vystaven. Například pro beton obsahující portlandský cement CEM I 32,5 dle ČSN EN 197 – 1, ed. 2 [N 1] je možno uvažovat k-hodnotu 0,2, respektive pro 42,5 a vyšší k-hodnotu 0,4. Minimální množství cementu lze snížit maximálně o množství (k·(min obsah cementu – 200 kg/m^3)). Vždy však musí být dodržena podmínka, že cement společně se započítatelným množstvím popílku musí být minimálně roven požadované minimální hodnotě cementu. Výjimku započitatelnosti k-hodnoty pro výpočet ekvivalentního vodního součinitele tvoří prostředí XF2 až XF4, pro které nesmí být vodní součinitel touto koncepcí poupraven. Dávkování popílku bude věnována samostatná kapitola s ohledem na nejnovější výzkumnou činnost.

5.2.1. **Čerstvý beton**

Mimo ovlivnění reologických vlastností popsaných v předešlé podkapitole zabývající se užitím popílku jako mikroplniva, se popílek na základě svého chemismu podílí i dále na procesu tuhnutí a tvrdnutí, čili na přechodu čerstvé betonové směsi do stavu utuhlého či zatvrdlého. Popílky všeobecně zpomalují tuhnutí betonu nebo obecněji cementové směsi. Tuto vlastnost lze snadno odzkoušet na samotné cemento-popílkové kaši, kdy již provedené výzkumy prokázaly, že počátek a konec doby tuhnutí je obvykle opožděn o čas blížící se hodině. Konkrétní čas je poté dále dán množstvím a druhem použitého popílku a taktéž druhem použitého cementu. [5-9] Toto opoždění počátku tuhnutí lze demonstrativně pozorovat pomocí kalorimetrie, konkrétně specifického tepelného toku směsi. (obr. 5.3) Pro praktické použití popílku při výrobě betonu tyto nevelké hodnoty opoždění počátku a konce doby tuhnutí nemají přílišný vliv, pokud se nejedná o speciální betonáže, kde se klade důraz právě na urychlení počátku tuhnutí a tvrdnutí. Povětšinou lze této vlastnosti naopak v jistých případech elegantně využít.

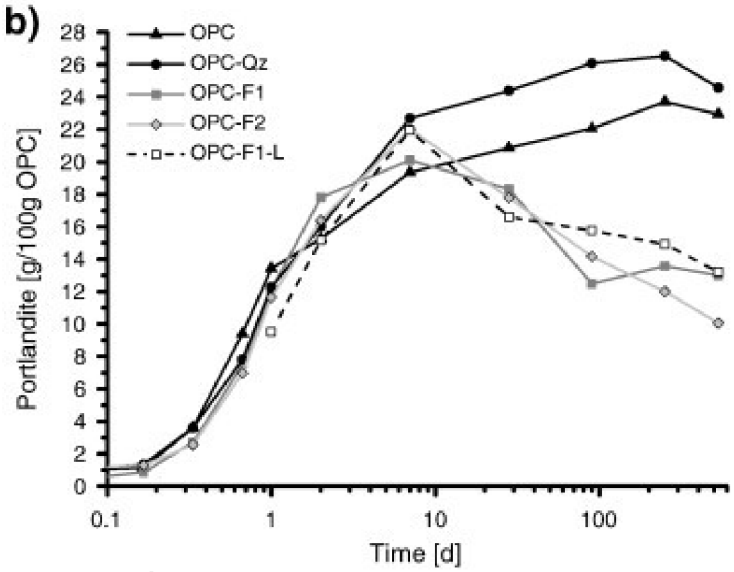


Obr. 5.3: Opožděná doba tuhnutí a tvrdnutí podle specifického tepelného toku – křivka OPC-F1 a OPC-F2, u obou 50 hm.% popílku, w=0,5 (zdroj: [O 13])

5.2.2. **Zatvrdlý beton**

Pozitivum používání popílku pro výrobu betonu je zřejmé právě v pozitivním ovlivnění některých konečných vlastností betonu. Popílek ovlivňuje prakticky všechny fyzikální a mechanické vlastnosti zatvrdlého betonu, ať se jedná o pevnost, trvanlivost, ale taktéž samotné pochody doprovázené hydratací cementu, tedy smrštění nebo vývin hydratačního tepla. Poslední dva parametry lze sledovat in situ při tvrdnutí betonu, ale například kladné ovlivnění pevností je nutno sledovat již v delším časovém intervalu, u popílku konkrétně v časovém intervalu převyšujícím i normových 28 dní.

Obecně lze pozorovat při dostatečné vlhkosti prostředí dlouhodobý nárůst pevnosti, přičemž rychlost reakce lze zobecnit tak, že po 28 dnech zrání betonu s příměsí popílku je zhydratováno pouze 5 – 15 % hmotnosti popílku, kdežto po 180 dnech se toto procento zvýší na 30 – 40 %. [5-10] Jiná studie přímo říká, že popílek prakticky prvních 7 dnů plní v betonu pouze funkci mikroplniva a až při pozdější době hydratace byl zaznamenán úbytek portlanditu, který je spojen s pucolánovou reakcí popílku, při níž se portlandit ($Ca(OH)_2$) spotřebovává. [5-11] Toto tvrzení lze podložit sledováním úbytku portlanditu v betonu během hydratace pomocí TGA analýzy. (obr. 5.4)

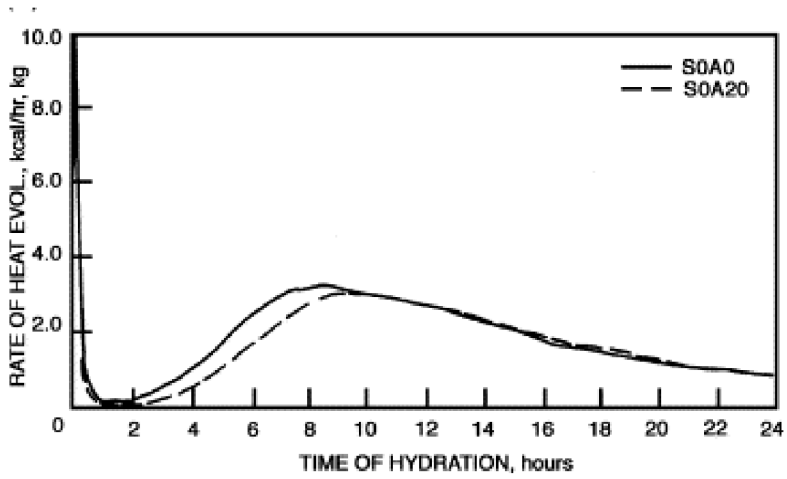


Obr. 5.4: Úbytek portlanditu během hydratace betonu - křivka OPC-F1 a OPC-F2, u obou 50 hm.% popílku, w=0,5 (zdroj: [O 14])

Pucolánová reakce popílku vedoucí k tvorbě velmi husté sítě C-S-H gelů způsobuje vyplnění pórové struktury zatvrdlého betonu, což se pozitivně projevuje na pevnostech betonu a také jeho trvanlivosti. Samotná trvanlivost je poté ovlivněna několika faktory. Jedním z faktorů lze uvést snížený vývin hydratačního tepla při hydrataci cementu, a s tím spojené menší hodnoty smršťování. Menší hodnota smrštění působí pozitivně proti vzniku trhlin, a tím zatvrdlý beton tvoří neporušenou strukturu zamezující průniku látek z vnějšího prostředí způsobující degradaci betonu.

Menší vývin hydratačního tepla a s tím spojené již zmíněné menší hodnoty smrštění a vznik trhlin lze vysvětlit snížením množství cementu na úkor použitého adekvátního množství popílku, přičemž popílek vykazuje hodnoty hydratačního tepla násobně nižší než cement. [5-12]

Snížený vývin hydratačního tepla při použití popílku jako náhrady za adekvátní část cementu lze demonstrovat na přiloženém obrázku. (obr. 5.5)



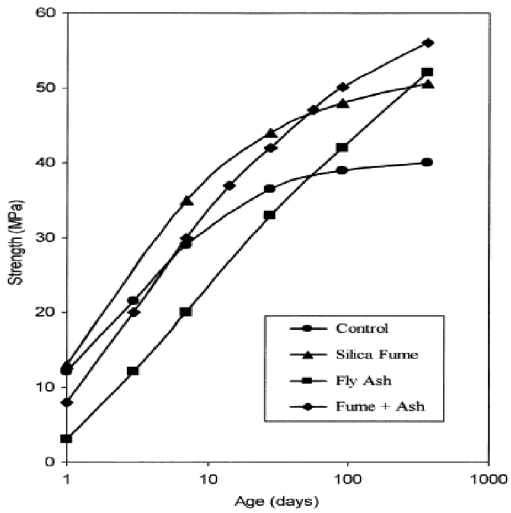
Obr. 5.5: Vývin hydratačního tepla cementu bez popílku (SOA0) a s přídavkem 20 hm.% popílku (SOA20), w = 0,5 (zdroj: [O 15])

Zlepšení trvanlivosti betonu při použití popílku je však nutné přisuzovat zejména vzniku nových C-S-H fází, díky kterým u zatvrdlého betonu dochází sice ke zvýšení celkové pórovitosti betonu, avšak s vyšším obsahem jemných

pórů. Vznikající C-S-H gely totiž rostou ven z cementu a ve své struktuře obsahují mikropóry, neboli tzv. gelové póry, které sice zvyšují celkovou pórovitost betonu, ale které jsou svou velikostí řádově menší než kapilární póry vznikající v cementovém kameni během hydratace.

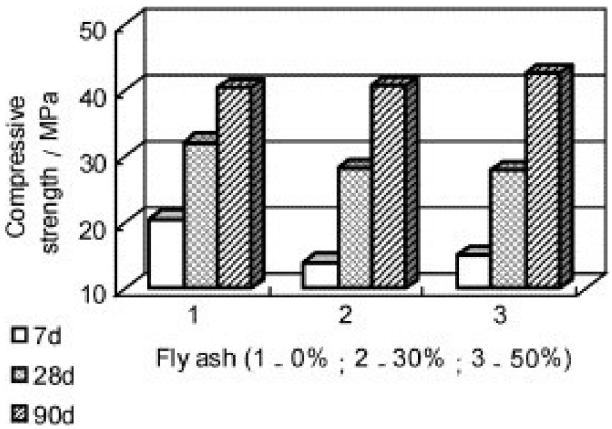
Takto vzniklé gelové póry se podílí na zlepšení trvanlivosti faktem, že nezajišťují transport látek cementovým kamenem. U popílkových betonů se tak setkáváme s tzv. „pore-blocking efektem“, což lze vysvětlit, jako znepřístupnění určitého podílů pórů kapilárních, čili pórů se schopností transportu látek. Pore-blocking efektu je dosaženo vniknutím malých C-S-H fází do pórů kapilárních. Tím dochází k uzavření těchto pórů zcela nebo alespoň k částečnému ovlivnění transportu látek, a tím je značně ovlivněno pronikání látek z vnějšího prostředí do struktury betonu a jeho následná degradace. Ovlivnění trvanlivosti použitím popílku se věnuje následující podkapitola.

Vrátíme-li se nyní k pevnostem popílkových betonů, je nutné na pevnosti nahlížet normově po 28 dnech zrání, ale pro popílky je typické na konečné pevnosti nahlížet taktéž po delším časovém úseku zrání. Vývoj nárůstu pevností u popílkových betonů je totiž značně odlišný od betonů bez popílku. Referenční betony bez použití popílku zpravidla vykazují vyšší počáteční pevnosti a obvykle i pevnosti po normových 28 dnech, oproti betonům popílkovým. Tento fakt snížení „počátečních“ pevností lze vysvětlit zejména menším množstvím použitého cementu na úkor popílku, který se zprvu chová pouze jako mikroplnivo. Tím je dáno, že při použití popílku musíme fakt pomalejšího náběhu pevností vzít v úvahu, a to zejména u konstrukcí, kde je rychlý nárůst počátečních pevností požadován. S touto skutečností se lze vypořádat použitím vhodných superplastifikačních přísad do betonu a tím snížení vodního součinitele. Dalším zráním betonu a rozvojem pucolánové reakce již však dochází ne jen ke srovnání pevností betonu referenčního a popílkového, ale obvykle betony s popílkem vykazují pevnost vyšší než beton referenční. (obr. 5.6)

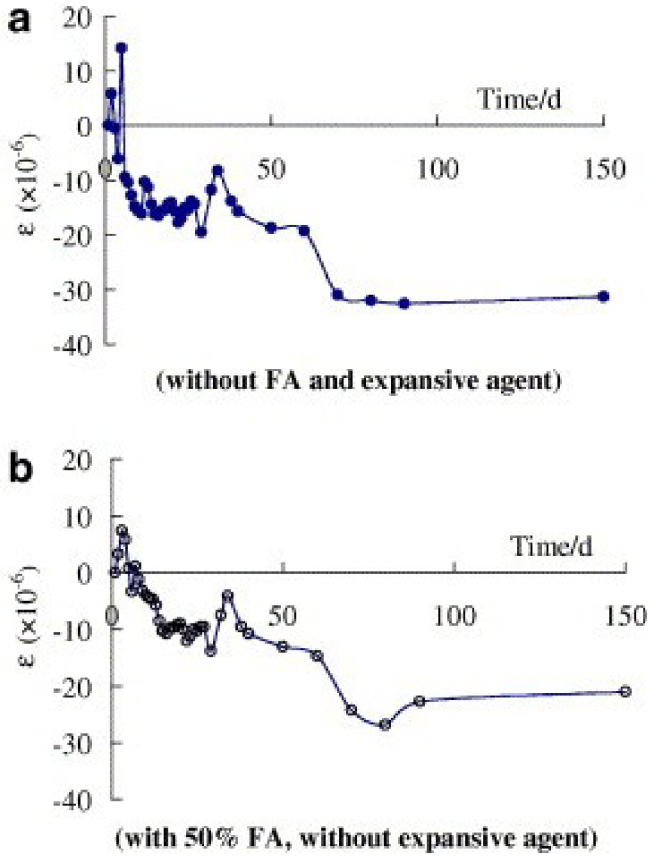


Obr. 5.6: Nárůst pevností referenčního betonu a betonů s různým druhem příměsí (zdroj: [O 16])

Zvýšení konečné pevnosti betonu s popílkem oproti betonu referenčnímu lze vysvětlit propojením všech dosud psaných mechanismů, tedy vyplněním mikrostruktury cementového tmele vzniklými C-S-H fázemi, zmenšením tranzitní zóny mezi cementovým kamenem a kamenivem, ovlivněním smrštění a tím vzniku trhlin. Toto tvrzení dokládá výsledek studie vedené Gaem, Li a kolektivem, která byla zaměřena na redukci tvorby trhlin a smrštění u betonových hrází. Na základě studie beton s aplikací 50 % popílku po 90 dnech přesáhl hodnotu pevnosti betonu referenčního a míra smrštění byla snížena o 33 %, což lze ilustrovat na přiložených grafech. (obr. 5.7, 5.8) [5-13]



Obr. 5.7: Vývoj pevností betonů s různou dávkou popílku v čase (zdroj: [O 17])



Obr. 5.8: Smrštění betonové hráze s popílkem a bez v čase(zdroj: [O 18])

5.3. Trvanlivost betonu s popílkem

Na schopnost betonů s popílky odolávat agresivnímu prostředí jsou do dnešních dob velmi rozpolcené názory. Dle některých názorů a zkušeností jsou tyto betony pro většinu agresivních prostředí oproti betonům bez popílku nevyhovující, dle jiných názorů a zkušeností jsou dostačující, či dokonce odolnější. Tento druhý názor se opírá o skutečnost hutnější struktury betonu při použití popílků jako minerální příměsi, přičemž obecně lze říci, že hutnější, tedy méně pórovitá a propustnější struktura betonu, předurčuje tomuto betonu vyšší trvanlivost. [5-14] Tato skutečnost bude dále potvrzena nebo vyvrácena na

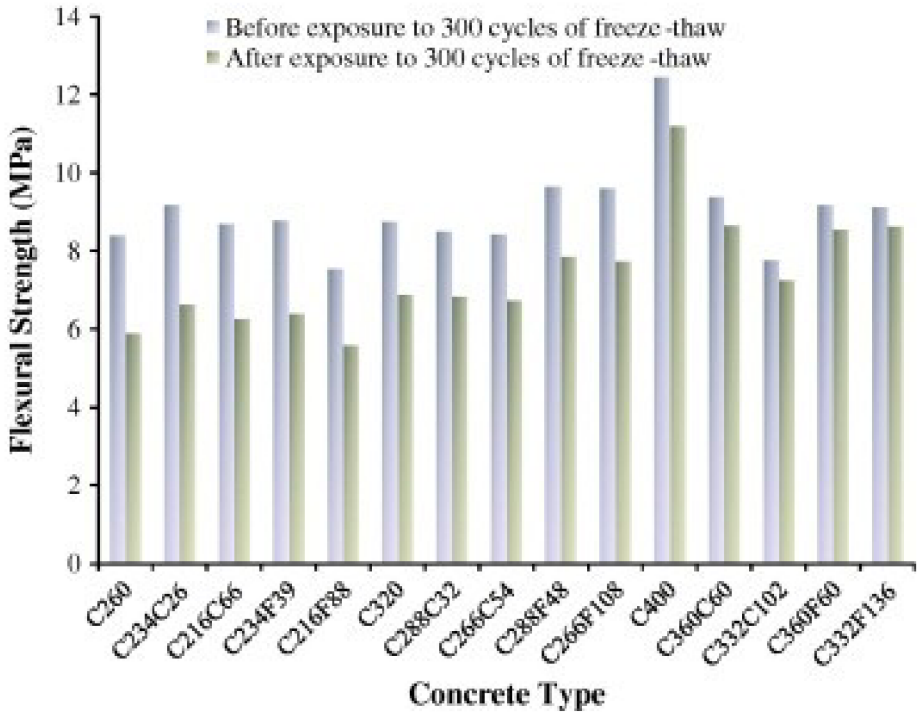
základě rešerše provedených zkoušek popílkových betonů a jejich odolnosti vůči danému typu prostředí.

5.3.1. **Odolnost proti mrazu a CHRL (XF1 – XF4)**

Odolnost betonu proti periodickému zmrazování, které je dále umocněno použitím chemických rozmrazovacích látek (CHRL) je nezbytná zejména pro konstrukce vozovek a jím přilehlých objektů. Aby byl beton schopen odolávat tomuto prostředí, je nutné jeho strukturu poupravit tak, aby voda tvořící jeho vlhkost měla při expanzi svého objemu způsobené mrazem, uvádí se nárůst objemu až o 9 %, dostatek místa pro tento nárůst. V druhém případě by její expanzivní tlaky působící na betonovou matrici způsobovaly její destrukci. Za přítomnosti CHRL je tato skutečnost dále umocněna tvorbou a nárůstem objemu krystalů dané soli.

U běžných betonů jsme se s touto skutečností vypořádali pomocí tzv. provzdušňujících přísad, díky kterým do struktury cementového kamene během míchání vneseme rovnoměrně rozprostřené mikropóry o velikosti nepřesahující 300 μm. Již vyzrálý dobře provzdušněný beton je poté schopen tomuto prostředí dostatečně odolávat a mikropóry poskytují expandujícím látkám a ledu dostatek prostoru bez destrukce okolního cementového kamene. Beton s přídavkem popílku je možné na základě provedených studií tomuto prostředí vystavit pouze kvalitně provzdušněný a po nabytí dostatečných pevností. Obecně se uvádí, že odolnost betonu proti cyklickému zmrazování klesá s rostoucí dávkou popílku, což je podpořeno studií vydanou v CANMET (canadian centre for mineral and energy technology), která výsledky zkoušek betonů s vyšší dávkou popílku hodnotí jako neuspokojivé. Naproti tomu se staví rozsáhlý výzkum použitelnosti popílků třídy C a F a dopad jejich dávky na trvanlivost betonu vedený Van den Heedem a kolektivem. Na základě této studie byl vysloven závěr, že betony s obsahem popílku lépe odolávají cyklickému zmrazování a rozmrazovaní, což lze doložit grafem zobrazujícím

pokles ohybové pevnosti před a po provedených 300 cyklech. Z grafu lze vyčíst, že pokles ohybové pevnosti po provedených cyklech přídavek popílku kladně ovlivňuje, konkrétně například beton pouze s dávkou 320 kg portlandského cementu CEM I 42,5 R vykázal rozdíl ohybové pevnosti před a po cyklování 21,17 % a beton s dávkou 14 % popílku třídy F, který slouží jako náhrada adekvátního množství cementu, vykázal rozdíl ohybové pevnosti pouze 18,48 %. [5-15] (obr. 5.9)



Obr. 5.9: Pokles ohybových pevností betonů s různou dávkou a typem popílků vystavených cyklickému zmrazování (zdroj: [O 19])

Stejná studie uvádí, že ani pokles hmotnosti vzorků a dynamického modulu pružnosti měřeného ultrazvukovou metodou před a po cyklování není u betonů s dávkou popílků od 0 do 35 % nijak závratný a na základě této zkoušky hodnotí betony jako vyhovující.

Obecně lze tedy říci, že při dodržení nízkého vodního součinitele, kvalitního zhutnění a provzdušnění betonu s popílky, jsou tyto betony schopny kvalitně odolávat prostředí cyklickému zmrazování. V některých případech, jako je

například pokles pevnosti v tahu za ohybu, tyto betony vykazují příznivější parametry než betony bez popílků.

Jiná situace vyvstává v oblasti cyklického zmrazování za přítomnosti solí. V tomto ohledu prakticky všichni autoři studií hodnotí popílkové betony jako neuspokojivé, přičemž míra neuspokojivosti narůstá s mírou náhrady cementu popílkem. Praxe je však často zcela odlišná, jako příklad lze jmenovat vyrobenou betonovou dlažbu z HVFAC betonu ve Wisconsinu (USA) popřípadě chodníkovou část v Halifaxu (Kanada), kde oba zmiňované objekty i po několika letech vystavení reálnému prostředí mrazu s rozmrazovacími látkami, jsou stále hodnocené pro dané prostředí jako vyhovující. [5-16]

Nicméně současný výzkum je směřován ke zlepšení trvanlivosti popílkových betonů v tomto prostředí například pomocí přídavku speciálních provzdušňujících přísad.

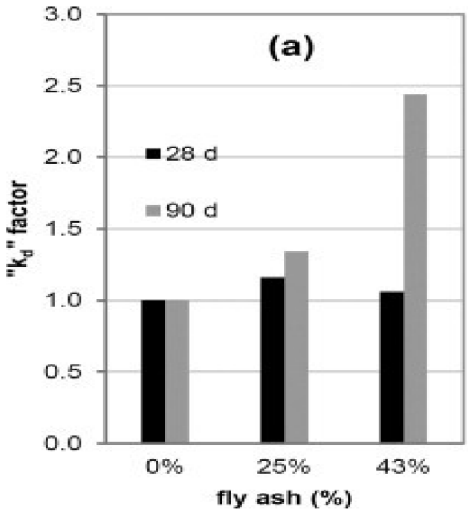
5.3.2. **Odolnost proti chloridům (XD1 – XD3)**

Odolnost proti působení chloridů je podmíněna zejména nepropustností betonu. Dle již výše psaného by proto popílkové betony měly trvanlivost v tomto prostředí kladně ovlivňovat, což lze doložit na základě několika provedených výzkumů.

Zvýšenou trvanlivost betonu vůči agresivním vlivům chloridů oproti betonu bez popílku lze demonstrovat například na koeficientu vyjadřujícím odpor proti pronikání chloridů.

Označíme-li tento koeficient K_d, lze na dalším přiloženém grafu demonstrovat zvyšující se hodnotu koeficientu s postupující pucolánovou reakcí a tím tvorbu dalších C-S-H fází dále vyplňujících strukturu cementového kamene a zajišťující tak jeho nepropustnost. Tento graf taktéž poukazuje na zvyšující se odolnost s rostoucí dávkou popílku, přičemž prokazatelný nárůst blokace chloridových

iontů je patrný s delším časovým úsekem, což je opět dáno pomalejší pucolánovou reakcí popílků. [5-17] (obr. 5.10)



Obr. 5.10: Koeficient odporu proti pronikání chloridům s různou dávkou popílku třídy F, w = 0,4 (zdroj: [O 20])

Migrace chloridů dovnitř struktury cementového kamene je nebezpečná zejména pro ocelovou výztuž, která poté podléhá degradaci korozí a tím dochází k ovlivnění její správné funkce v betonu. Samotná korodující výztuž působí však degradačně taktéž na okolní beton, protože tvořící se rez na ocelovém prutu zvyšuje jeho objem 2,5 až 6 krát, čímž vyvozuje enormní tlakové účinky na beton vedoucí k jeho porušení. Konkrétní výsledky zrychlených zkoušek působení chloridů na beton s ocelovou výztuží potvrdily výše psaný úsudek o kladném ovlivnění trvanlivosti betonu vystavenému tomuto prostředí popílkem a dále s jeho zvyšující se hodnotou a stářím betonu. [5-18]

5.3.3. **Odolnost proti karbonataci (XC1 – XC4)**

Stejně jako v předešlém případě je odolnost betonu proti karbonataci podmíněna jeho nízkou propustností. Hlavními parametry ovlivňující karbonataci betonu však jsou zejména vodní součinitel, kvalita vyrobeného betonu s ohledem na kvalitu zhutnění, ošetřování, koncentrace CO_2 a množství volného hydroxidu vápenatého ($Ca(OH)_2$), který vstupuje do karbonatačních reakcí.

Díky přídavku popílku lze poté snadno pozitivně ovlivnit propustnost betonu, dodržení nižšího vodního součinitele díky jeho nižším nárokům na vodu a do jisté míry taktéž množství volného $Ca(OH)_2$, protože tento hydroxid je spotřebováván pucolánovou reakcí za tvorby C-S-H gelů.

Chemicky však agresivní CO_2 je schopný reakce prakticky se všemi látkami obsahujícími CaO. Běžně to je tedy $Ca(OH)_2$, ale taktéž vzniklé C-S-H produkty. Reakce vede k tvorbě uhličitanů, díky nimž se snižuje pH betonu. To je nebezpečné zejména z pohledu výztuže betonu, jejíž životnost je závislá právě na vysoké hodnotě pH, díky které je výztuž tzv. pasivována. Dochází-li k omezení této pasivace, začnou se uplatňovat principy koroze výztuže a s ní spojené degradační následky popsané v předešlé podkapitole.

Výsledky většiny provedených studií poukazují na to, že i přes kladné ovlivnění nepropustnosti betonu použitím popílku jako částečné náhrady cementu, popílky rychlost karbonatace zvyšují, a proto jsou popílkové betony v tomto prostředí méně trvanlivé. Obvykle se však uvádí, že míra negativního ovlivnění trvanlivosti je dána druhem popílku s ohledem na obsah CaO, vyšší množství je výhodou, a množstvím použitého popílku. V tomto ohledu studie uvádí, že betony s množstvím popílku okolo 10 % vykazují prakticky stejné hodnoty jako betony pouze cementové. [5-19]

Výsledky jiných studií však považují použití popílku jako přínos v boji proti karbonataci. Například studie vedená Papadakisem uvádí, že je-li popílek použit jako mikroplnivo a ne jako adekvátní náhrada jistého podílu cementu,

pak tyto betony vykazují ve srovnání s betony bez popílku vyšší odolnost proti karbonataci. [5-20] Jiní autoři uvádějí, že betony s vysokou dávkou popílku jako náhrady cementu vedoucí k radikálnímu snížení vodního součinitele dosahují odolnosti proti karbonataci stejné nebo vyšší než betony klasické. [5-21]

Obecně lze tedy říci, že má-li beton s částečnou náhradou cementu popílkem odolávat prostředí s CO_2, je nutné dodržet nízkou hodnotu vodního součinitele a zabezpečit kvalitní zhutnění a ošetřování takového betonu. Poté tyto betony mohou být alternativou používání jinak nákladných opatření proti karbonataci betonu.

5.3.4. **Odolnost proti síranům a kyselinám (XA1 – XA3)**

Betony ve styku s kyselinou obvykle prodělávají poměrně rychle degradační proces a tomuto procesu se velmi nesnadno zabraňuje. Degradace je dána přeměnou fází cementového kamene na vodou rozpustné soli. Aby byl beton do jisté míry takovému procesu schopen odolávat je nutné zajistit jeho vysokou hutnost a nepropustnost, čehož dosáhneme zejména nízkou hodnotou vodního součinitele a vhodnou příměsí, například popílku. Je taktéž vhodné omezit množství $Ca(OH)_2$ vyskytujícího se v betonu, které je svou podstatou složkou degradační reakce. [5-22] V tomto ohledu lze opět vhodně využít popílku jako částečné náhrady cementu. Díky tomu menší množství slínku dává vzniknout menšímu množství $Ca(OH)_2$ a toto množství je dále redukováno probíhající pucolánovou reakcí do níž vstupuje.

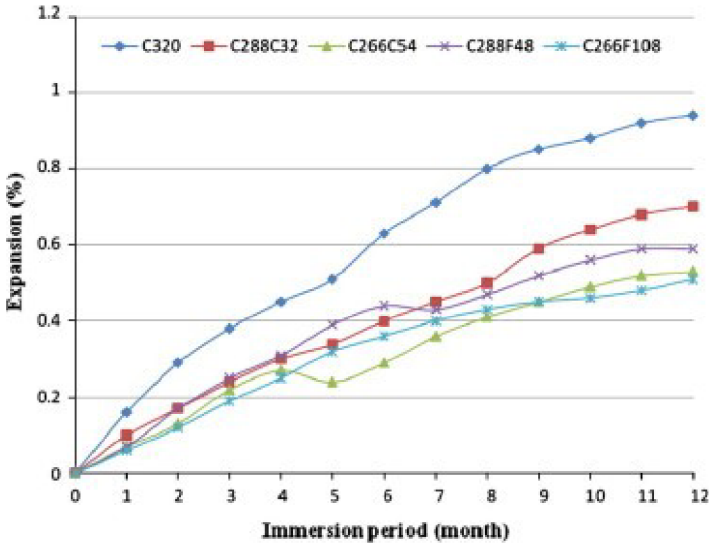
V případě působení agresivních síranů dochází k degradaci způsobené vznikem nových objemnějších produktů. Základním produktem způsobující degradaci je ettringit, popřípadě monosulfát a vznikající sádrovec. Síranové ionty SO_4^{2-} reagují s vápenatými ionty Ca^{2+} a dávají vzniku sádrovci $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, který dále vstupuje do reakce s trikalciumaluminátem za vzniku ettringitu ($C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$). Samotný ettringit působí degradačně pro svůj

velký molární objem, 2,6 krát vyšší než vstupujících reaktantů. [5-22] Velké jehličkovité krystaly poté tlakem na okolní strukturu beton rozrušují.

Jak je zřejmé z popsaných pochodů, pro ochranu betonu proti síranům je nutné zabezpečit malý obsah $Ca(OH)_2$, zdroj Ca^{2+} iontů, a C_3A, který již dává vzniknout přímo ettringitu. Pro potlačení prvního zmíněného produktu lze opět s výhodou využít popílku, na základě skutečností popsaných u napadení kyselinami. Druhý produkt lze potlačit prakticky jen při výrobě cementu. Vyrábí se tzv. síranovzdorné cementy s obsahem C_3A do 3 %. I v tomto ohledu lze však částečně redukovat C_3A při náhradě podílu cementu popílkem. Dále s použitím popílku dostáváme betony hutnější struktury a vyšším difúzním odporem proti pronikání síranů.

Na základě výzkumů bylo však zjištěno, že popílky kladně ovlivňují odolnost proti síranům taktéž díky svému malému obsahu SO_3. Toto SO_3 se totiž účastní reakce s C_3A za tvorby ettringtu již v raném stadiu hydratace, zde ještě ettringit nepůsobí degradačně, a proto se část C_3A již v tomto stádiu spotřebovává a nezbývá jej tolik pro pozdější reakce se sírany.

Provedený výzkum s náhradou různého množství cementu popílkem potvrzuje úsudek o velmi dobré zvýšené odolnosti betonů vůči síranům díky popílkům. Zkouška byla provedena na trámcích po 28 dnech zrání ve vodném prostředí. Trámce byly umístěny do nádrže s 15% roztokem síranu hořečnatého ($MgSO_4$) a každý měsíc po dobu 1 roku byl sledován jejich délkový nárůst spojený s tvorbou (degradací) ettringitu. Výsledek měření lze interpretovat na přiloženém grafu (obr. 5.11) a jako konkrétní hodnoty lze uvést nárůst u betonu pouze s cementem po 1 roce o 0,92 % a betonu s náhradou 20 % portlandského cementu popílkem za stejné časové období pouze o hodnotu 0,51 %. [5-23]



Obr. 5.11: Nárůst objemu betonu vystaveného síranovému prostředí s různou dávkou popílků v časovém období (zdroj: [O 22])

5.4. Dávkování popílku

Popílky se stejně jako jiné práškové příměsi dávkují přímo do míchačky společně s cementem. Jejich hmotnost je prakticky vždy vztažena na hmotnost cementu a udává se v hmotnostních procentech. Pro samotný popílek je běžná praxe dávkování v objemu mezi 15 až 25 % z hmotnosti cementu. Adekvátní část z této dávky je poté možno na základě konceptu k-hodnoty započíst do minimálního množství cementu dle normy a taktéž pro výpočet ekvivalentního vodního součinitele.

Běžná praxe návrhu dávky popílku je dle zkušenosti a výsledků předchozích provedených zkoušek pro daný typ popílku. Nelze totiž jednoznačně říci, že se popílek z jakékoliv elektrárny bude chovat stejně s cementem z jakékoliv cementárny, popřípadě další příměsí nebo užitou přísadou. Proto při návrhu receptury betonu navrhneme rozložení frakcí kameniva dle ideální křivky zrnitosti, potřebné množství cementu a vodu s plastifikační přísadou dle požadované konzistence. Popílkem je poté dle ověřených zkoušek nahrazena adekvátní část cementu, popřípadě poupraven vodní součinitel.

Moderní stavby však stálé více vyžadují výrobu betonů speciálních vlastností. Pomocí elektrárenského popílku je možno mnoho těchto vysokohodnotných betonů vyrábět, přičemž moderní směry návrhu betonů se již nezaměřují pouze na ideální skladbu kameniva, ale taktéž ideální skladbu jemných složek betonu, obvykle složek pod velikost zrna 125 μm. Taková skladba zaručuje maximální hutnost výsledné směsi a taktéž zatvrdlého betonu, která vede k pozitivnímu ovlivnění mnoha parametrů. [5-24]

Aby mohlo být dosaženo maximální hutnosti jemných podílů ve směsi, je nutné, aby do systému vstupovaly nejméně dvě komponenty různé velikosti zrna. Menší frakce poté vyplňuje mezery frakce hrubší. Je možné za tyto dvě komponenty považovat cement a popílek. Problematické se však stává, že velikost zrn obou materiálů se od sebe příliš neliší. Jako výhodnější se proto jeví užití materiálu třetího, ještě menší frakce. Ekonomicky nejvýhodnější by se poté jevilo užití popílků různých frakcí, které lze snadno získat z různých stupňů filtrů tepelných elektráren. Popílek by tak již nebylo prakticky nutné dále třídit, pokud by byl zajištěn separátní odběr z jednotlivých filtrů. Na trhu se však setkáváme taktéž s popílkem tříděným o velmi jemné frakci. Komerční příklad takového popílku je Microsit® třídy M10 nebo M20 o velikosti zrna z více než 95 % pod 10, potažmo 20 μm. [5-25]

Smíchání takto rozdílných frakcí podle optimální křivky zrnitosti nám zajišťuje maximální možnou hutnost směsi v suchém stavu. Jelikož se pohybujeme ve velmi malých rozměrech zrn materiálu, není zde již možné provádět běžné sítové rozbory, ale využívá se laserové granulometrie. Na základě experimentů je dnes sestaveno mnoho algoritmů pro dosažení maximální hutnosti jemných podílů, které pracují s křivkami zrnitosti jednotlivých materiálů, popřípadě s velikostí středního zrna a nebo měrného povrchu. Tyto algoritmy umožní vyskládat ideální křivku zrnitosti jemných podílů. Zastoupení jednotlivých složek je však dáno čistě dle jejich granulometrie. Proto se lze setkat s výsledkem, kdy je navrženo až okolo 50 nebo více % popílku doplněno do 100 % cementem, v případě míchaní pouze jedné frakce popílku a jedné frakce cementu.

Již provedené výzkumy však dokazují, že betony s takto vysokou náhradou cementu popílkem, je-li dodržena maximální hutnost cementu a popílku, vykazují mnohdy stejné nebo i lepší hodnoty pevností a dalších mechanických vlastností než betony s běžnou dávkou popílku nebo zcela bez popílku, což je však patrné až s delším časovým úsekem zrání. Touto problematikou a potvrzením kladného dopadu maximální hutnosti směsi cement-popílek v suchém stavu bez ohledu na minimální množství cementu se zabývá experimentální část této práce. Snahou je zejména porovnání výsledných mechanických vlastností betonů zcela bez popílků, s běžnou dávkou popílku a dávkou popílku dle maximální hutnosti v různých časových úsecích normalizovaného zrání. Pro porovnání budou připraveny betony na pomezí vysokopevnostních betonů, tedy betony okolo hodnoty 50 MPa v tlaku. Tyto betony se běžně používají pro náročnější aplikace, tedy výškové budovy, mostní konstrukce a jinak staticky náročné objekty. Vzhledem k vyšší dávce cementu, která při použití CEM I 42,5 R činí zpravidla mezi 380 až 420 kg na 1 m^3 betonu, popřípadě při užití běžné dávky popílku okolo 15 až 25 % je možné toto množství cementu zhruba o 5 až 10 % ponížit při dodržení požadovaných pevností po normových 28 dnech, jsou tyto betony obvykle odolné vůči v našich podmínkách vyskytujícímu se agresivnímu prostředí typu XC nebo XD. Přídavek popílku tuto trvanlivost dále umocňuje. Pokud dodržíme u těchto betonů kvalitní provzdušnění jsou velmi dobře odolné taktéž v prostředí XF s i bez rozmrazovacích látek. Naopak vyšší dávka cementu, z důvodu požadovaných vyšších pevností, prakticky vždy se jedná o čisté portlandské cementy CEM I 42,5 R, se stává nevýhodnou pro užití v prostředí XA. Částečnou kompenzaci horší trvanlivosti vůči tomuto prostředí zde mohou představovat právě popílky.

Praktická část

6. Cíl praktické části práce

Cílem praktické části této bakalářské práce je ověřit dopad různého množství použitého popílku při výrobě betonů o vysokých pevnostech, konkrétně pevnostech okolo 50 MPa, na konzistenci tohoto betonu v čerstvém stavu a mechanické vlastnosti ve stavu zatvrdlém.

Pro samotnou výrobu bude užito dvou druhů popílků, a sice popílek černouhelný a hnědouhelný a jejich množství jako adekvátní náhrada cementu bude navrženo dle klasického principu návrhu, ale taktéž dle dodržení minimální mezerovitosti suché směsi cement-popílek.

Hlavním cílem práce je ověřit právě dopad tohoto přístupu návrhu receptury na konzistenci a finální mechanické vlastnosti betonu ve srovnání s betony zcela bez popílků a s běžnou dávkou popílku bez ohledu na zajištění maximální hutnosti suché směsi cement-popílek. Všechny zkoušky na zatvrdlém betonu budou prováděny v časovém úseku 7, 28, 60 a 90 dnů. U všech navržených receptur bude taktéž posouzen dopad druhovosti popílku na jmenované vlastnosti betonu.

7. Metodika práce

7.1. Návrh skladby betonové směsi

Pro návrh skladby betonové směsi bylo použito drobné kamenivo frakce 0-4 mm z lokality Žabčice, hrubé drcené kamenivo frakce 8-16 mm z lokality Olbramovice a hrubé drcené kamenivo frakce 11-22 mm z lokality Lomnička. Cement byl použit čistý portlandský třídy 42,5 R (CEM I 42,5 R) vyrobený společností CEMEX Czech Republic, s.r.o. v cementárně Dětmarovice, přičemž tento cement není na trhu běžně komerčně dostupný, ale slouží výhradně pro vlastní potřeby společnosti. Plastifikační přísada na bázi akrylových nesířených polymerů byla použita od firmy Mapei, s.r.o. s konkrétním obchodním označením Mapei Dynamon SX 14.

Rozdílným prvkem ve všech směsích bylo použité množství popílku a jeho původ. Byly použity dva druhy popílku, přičemž oba pocházely od českého producenta ČEZ Energetické produkty, s.r.o. a jednalo se o popílek černouhelný z tepelné elektrárny Dětmarovice a popílek hnědouhelný z tepelné elektrárny Počerady. V obou případech se jednalo o létavý popílek z vysokoteplotního spalování.

Byly navrženy betony pevnostní třídy C 40/50 a C 50/60, přičemž každá pevnostní třída betonu byla vyrobena jako srovnávací (referenční) pouze s cementem, s běžnou dávkou popílku pro oba druhy a taktéž pro oba druhy popílku s přihlédnutím k minimální mezerovitosti suché směsi cement-popílek. Pro tuto metodu bylo použito algoritmu sestaveného dle práce T. Reschke: Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefugeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Ph.D. Thesis, Weimar, 2000. Celý algoritmus byl naprogramován v jazyce Python 2.7 s využitím objektového programování a grafických knihoven a jeho zdrojový kód mi byl poskytnut Doc. Ing. Vítem Šmilauerem, Ph.D. působícím na Fakultě stavební ČVUT v Praze, kterému za něj tímto děkuji.

Všechny receptury byly navrženy pro konzistenci běžně čerpatelných transportbetonů třídy S3 dle ČSN EN 12350 – 2, konzistence touto metodou byla vždy ihned po namíchání ověřena a z každé směsi bylo vyrobeno 15 krychlí rozměru 100 × 100 × 100 mm pro zkoušky pevnosti v tlaku a 4 trámce 100 × 100 × 400 mm pro stanovení statického modulu pružnosti v tlaku. Zkoušky mechanických vlastností byly prováděny vždy po 7, 28, 60 a 90 dnech zrání, přičemž pro zkoušku pevnosti v tlaku byly užity vždy 3 tělesa, zbylé 3 vyrobené z každé směsi budou podrobeny této zkoušce až po 180 dnech zrání. Pro stanovení statického modulu pružnosti bylo použito vždy 2 trámců z každé směsi. Z důvodu nedostatečné pevnosti betonu po 7 dnech zrání byly první 2 trámce z každé sady po této zkoušce vyřazeny.

Poměr mísení frakcí kameniva pro beton třídy C 40/50 byl 49:26:25 v pořadí 0-4, 8-16 a 11-22 mm. Pro beton třídy C 50/60 byl poměr mísení navržen přibližně stejný s ohledem na celkovou nižší dávku kameniva a vyšší dávku cementu.

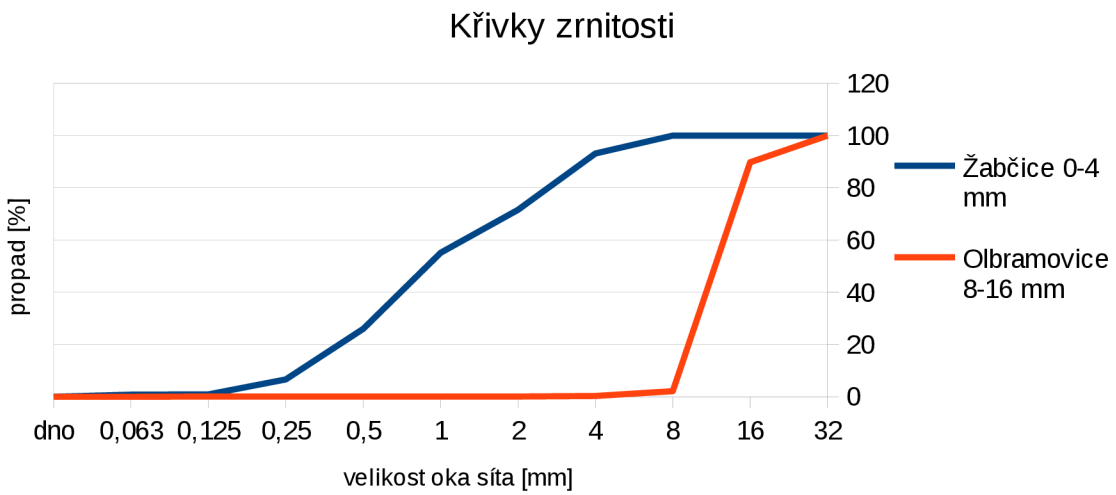
Navržené skladby směsí jsou uvedeny v tabulce dále, přičemž vodní součinitel každé směsi byl spočítán vždy s využitím konceptu k-hodnoty.

7.2. Vstupní suroviny

7.2.1. Kamenivo

Pro výrobu betonových směsí bylo užito 3 frakcí kameniva, přičemž velikost největšího zrna byla 22 mm. Pro každou frakci kameniva byly provedeny sítové rozbory a změřena objemová hmotnost, sypná hmotnost volně sypaného i setřeseného kameniva a stanoven tvarový index pro hrubé frakce.

Kamenivo 0-4 mm Žabčice, 8-16 mm Olbramovice a 11-22 mm Lomnička



Graf 1 : Křivky zrnitosti kameniv 0-4 mm Žabčice a 8-16 mm Olbramovice

Graf 2 : Křivka zrnitosti kameniva 11-22 mm Lomnička

lokalita	Žabčice 0-4 mm	Olbramovice 8-16 mm	Lomnička 11-22 mm
objemová hmotnost [kg/m³]	2520	2570	2670
sypná hmotnost- volně sypané [kg/m³]	1410	1360	1300
sypná hmotnost- setřesené [kg/m³]	1730	1550	1510
tvarový index [%]	-	22	48

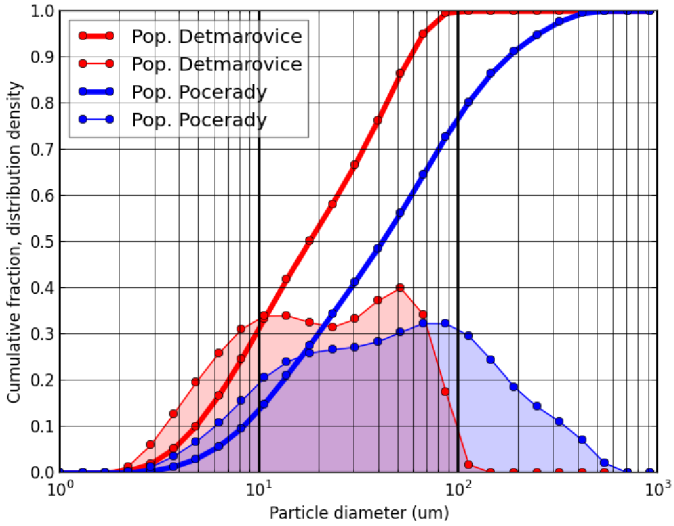
Tabulka 1: Objemové hmotnosti, sypné hmotnosti a tvarové indexy použitých kameniv

7.2.2. *Cement*

Pro všechny směsi byl použit cement třídy CEM I 42,5 R vyrobený společností CEMEX Czech Republic, s.r.o. v cementárně (mlýnici) Dětmarovice. Naměřené hodnoty měrného objemu a měrného povrchu dle Blaina jsou uvedeny společně s hodnotami popílků níže. Průvodní list výrobních zkoušek z doby odběru produktu je uveden v příloze práce.

7.2.3. *Příměsi*

Jako příměs byly použity dva typy elektrárenských létavých vysokoteplotních popílků produkovaných společností ČEZ, a.s. Jednalo se o popílek černouhelný z tepelné elektrárny Dětmarovice a popílek hnědouhelný z tepelné elektrárny Počerady. Granulometrie obou popílků a rozložení velikosti jejich zrn jsou uvedeny v následujícím grafu, který je vygenerován výše zmíněným programem.



Graf 3: Křivky zrnitosti a rozložení velikosti zrn popílků Dětmarovice a Počerady

materiál	CEM I 42,5 R	Pop. Dětmarovice	Pop. Počerady
měrná hmotnost [kg/m³]	2926	2124	1932
měrný povrch [m²/kg]	342	223	195

Tabulka 2: Měrná hmotnost a měrný povrch dle Blaina popílku Dětmarovice a Počerady a cementu CEM I 42,5 R

7.2.4. *Přísady*

Pro všechny směsi byl použit jeden typ superplastifikátoru na bázi akrylových nesířených polymerů Dynamon SX 14 od firmy Mapei, spol. s.r.o., materiálový list produktu je uveden v příloze práce.

7.3. Provedené zkoušky

7.3.1. *Zkoušky v čerstvém stavu*

Na betonu v čerstvém stavu byly provedeny zkoušky jeho konzistence a stanovena objemová hmotnost. Zkouška konzistence metodou rozlití dle normy ČSN EN 12350-5 – Zkoušení čerstvého betonu – Část 3: Zkouška rozlitím, byla provedena vždy ihned po zamíchání (0 minut), po 30 minutách, 60 a 90 minutách od zamíchání. Objemová hmotnost ihned po zamíchání poté byla stanovena dle normy ČSN EN 12350-6 – Zkoušení čerstvého betonu – Část 3: Objemová hmotnost.

7.3.2. *Zkoušky v zatvrdlém stavu*

Pro každou záměs byla provedena zkouška pevnosti v tlaku dle normy ČSN EN 12390-3 – Zkoušení zatvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles, vždy na 3 zkušebních tělesech tvaru krychle o hraně 100 mm a před provedením této zkoušky byla na stejných zkušebních tělesech stanovena objemová hmotnost v zatvrdlém stavu dle normy ČSN EN 12390-7 – Zkoušení zatvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost zatvrdlého betonu. Na vyrobených zkušebních tělesech tvaru trámce o rozměrech 100 × 100 × 400 mm vždy v počtu dvou, byla provedena zkouška statického modulu pružnosti v tlaku dle normy ČSN ISO 6784 – Beton: Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku. Všechny zmíněné zkoušky byly provedeny v časových intervalech 7, 28, 60 a 90 dnů od vyrobení betonu.

8. Výsledky provedených zkoušek

8.1. Receptury připravených betonů C 40/50 a C 50/60

Konkrétní složení všech dále jmenovaných směsí bude upřesněno v souhrnné tabulce níže.

8.1.1. REF C 40/50 a REF C 50/60

Tyto betonové směsi byly připraveny zcela bez příměsí, tedy pouze z portlandského cementu třídy CEM I 42,5 R a sloužily jako srovnávací s výsledky dalších směsí s různou dávkou popílku.

8.1.2. D-20 C 40/50 a D-17 C 50/60

Pro výrobu těchto betonových směsí bylo jako příměsi užito 20 % z hmotnosti cementu černouhelného popílku z elektrárny Dětmarovice pro beton pevnostní třídy C 40/50 a 17 % z hmotnosti cementu stejného popílku pro beton C 50/60.

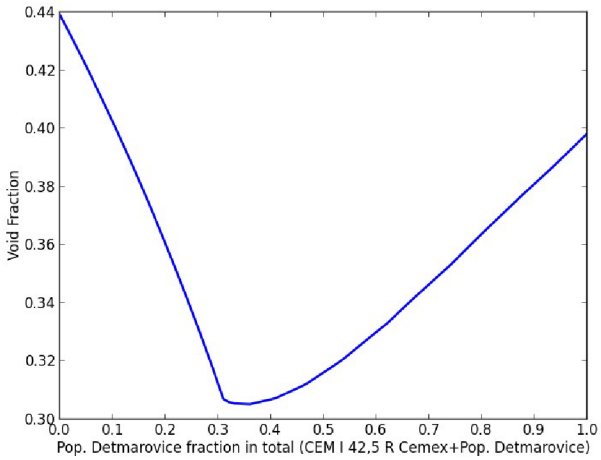
8.1.3. P-20 C 40/50 a P-17 C 50/60

Tyto záměsi se oproti předchozím liší pouze druhem popílku, přičemž pro tyto záměsi bylo užito 20 % z hmotnosti cementu popílku hnědouhelného z elektrárny Počerady pro beton C 40/50 a 17 % z hmotnosti cementu stejného popílku pro beton C 50/60.

8.1.4. D-OPT C 40/50 a D-OPT 50/60

Množství popílku jako příměsi pro tyto směsi bylo určeno na základě maximální hutnosti suché směsi cement-popílek pomocí již zmíněného algoritmu. Konkrétně byla směs připravena z 36 % černouhelného popílku Dětmarovice a 64 % cementu objemově pro obě pevnostní třídy betonu. Maximální možná dosažitelná hutnost směsi popílku Dětmarovice a cementu CEM I 42,5 R byla právě při tomto množství a činila 69,48 %, tomu odpovídá minimální mezerovitost 30,52 %. Výsledek interpretuje přímo grafický výstup z

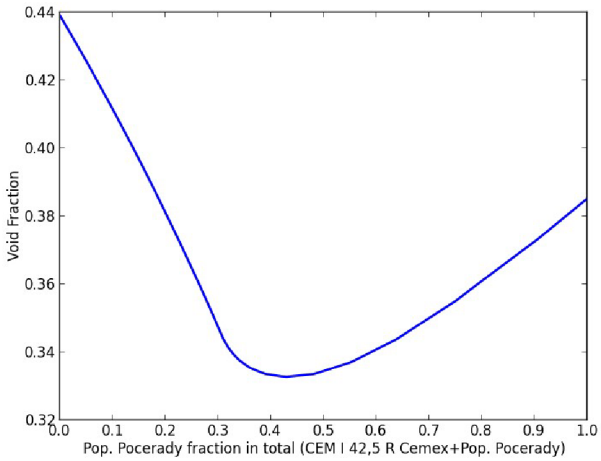
použitého algoritmu, kde lze vidět křivku mezerovitosti obou směsí v závislosti na procentuálním zastoupení popílku Dětmarovice.



Graf 4: Křivka mezerovitosti suché směsi popílek Dětmarovice a CEM I 42,5 R

8.1.5. ***P-OPT C 40/50 a P-OPT C 50/60***

Stejně jako v předchozím případě bylo množství popílku pro tyto záměsi určeno dle maximální hutnosti suché směsi cement-popílek, přičemž konkrétně bylo užito 43 % hnědouhelného popílku Počerady a 57 % cementu objemově pro obě pevnostní třídy betonu. Toto množství odpovídá hutnosti 66,72 %, což odpovídá mezerovitosti 33,28 %. Výsledek algoritmu lez opět interpretovat na grafu křivky mezerovitosti dané směsi.



Graf 5: Křivka mezerovitosti suché směsi popílek Počerady a CEM I 42,5 R

Konkrétní složení všech betonových směsí na 1 m³ čerstvého betonu

		REF C 40/50		D-20 C 40/50		P-20 C40/50		D-OPT C40/50		P-OPT C40/50	
		kg/m³	pozn.	kg/m³	pozn.	kg/m³	pozn.	kg/m³	pozn.	kg/m³	pozn.
CEM I 42,5 R (CEMEX)		385	-	360	-	360	-	319	64,0 obj.%	300	57,0 obj.%
popílek	Dětmarovice	-	-	90	20,0 % m_c	-	-	131	36,0 obj.%	-	-
	Počerady	-	-	-	-	90	20,0 % m_c	-	-	150	43,0 obj.%
DTK 0-4 Žabčice		910	49,3 % m_k	910	49,3 % m_k	910	49,3 % m_k	910	49,3 % m_k	910	49,3 % m_k
HDK 8-16 Olbramovice		480	26,0 % m_k	480	26,0 % m_k	480	26,0 % m_k	480	26,0 % m_k	480	26,0 % m_k
HDK 11-22 Lomnička		455	24,7 % m_k	455	24,7 % m_k	455	24,7 % m_k	455	24,7 % m_k	455	24,7 % m_k
plastifikátor Mapei Dynamon SX 14		3,5	0,9 % m_c	4,0	1,1 % m_c	4,0	1,1 % m_c	4,0	1,4 % m_c	4,0	1,6 % mc
voda		160	W=0,42	180	W=0,45	171	W=0,43	167	W=0,47	163	W=0,48
konzistence sednutím kužele [mm]		140	S3	140	S3	140	S3	150	S3	130	S3

Tabulka 2: Složení směsí betonů pevnostní třídy C 40/50 (pozn. m_c – hmotnost cementu, m_k – hmotnost kameniva)

		REF C 50/60		D-17 C 50/60		P-17 C50/60		D-OPT C50/60		P-OPT C50/60	
		kg/m³	pozn.	kg/m³	pozn.	kg/m³	pozn.	kg/m³	pozn.	kg/m³	pozn.
CEM I 42,5 R (CEMEX)		445	-	430	-	430	-	370	64,0 obj.%	347	57,0 obj.%
popílek	Dětmarovice	-	-	90	17,0 % m_c	-	-	150	36,0 obj.%	-	-
	Počerady	-	-	-	-	90	17,0 % m_c	-	-	173	43,0 obj.%
DTK 0-4 Žabčice		870	48,5 % m_k	870	48,5 % m_k	870	48,5 % m_k	870	48,5 % m_k	870	48,5 % m_k
HDK 8-16 Olbramovice		470	26,2 % m_k	470	26,2 % m_k	470	26,2 % m_k	470	26,2 % m_k	470	26,2 % m_k
HDK 11-22 Lomnička		455	25,3 % m_k	455	25,3 % m_k	455	25,3 % m_k	455	25,3 % m_k	455	25,3 % m_k
plastifikátor Mapei Dynamon SX 14		4,0	0,9 % m_c	4,7	1,1 % m_c	4,7	1,1 % m_c	4,7	1,4 % m_c	4,7	1,6 % m_c
voda		160	W=0,36	180	W=0,39	180	W=0,39	166	W=0,40	167	W=0,43
konzistence sednutím kužele [mm]		140	S3	140	S3	140	S3	140	S3	130	S3

Tabulka 3: Složení směsí betonů pevnostní třídy C 50/60 (pozn. m_c – hmotnost cementu, m_k – hmotnost kameniva)

Hmotnost popílků byla v obou případech návrhu směsi dle maximální hutnosti vypočítána z naměřených měrných hmotností popílků a cementu, přičemž hodnoty těchto parametrů jsou uvedeny v tabulce výše.

8.2. Výsledky provedených zkoušek

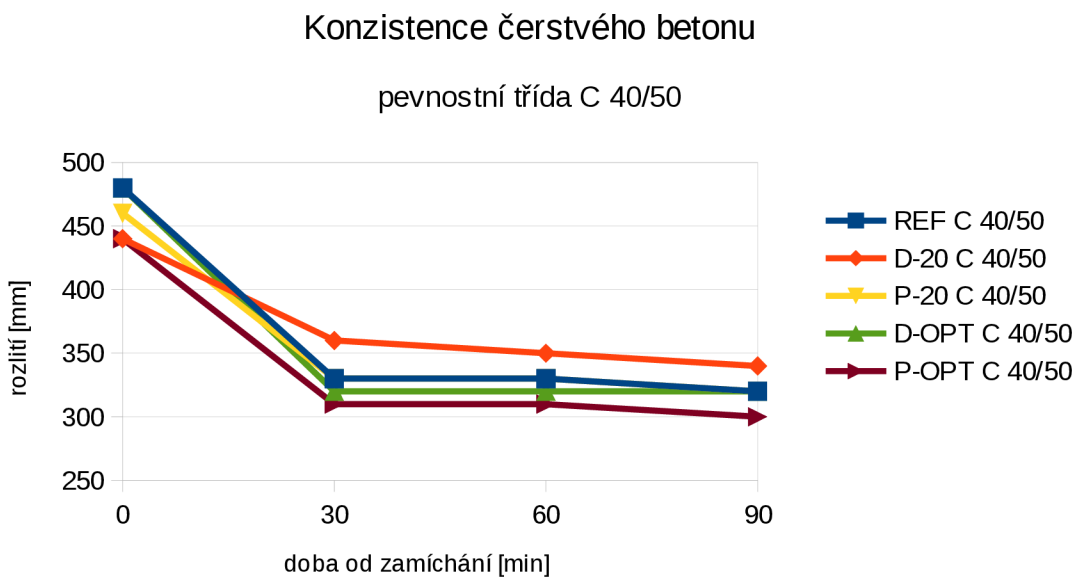
8.2.1. *Betony pevnostní třídy C 40/50*

Všechny výsledky provedených zkoušek dle popisu výše budou uvedeny v souhrnných tabulkách a následně graficky vyhodnoceny. Tabulky i grafy pro lepší přehlednost vždy budou obsahovat výsledky všech betonů dané pevnostní třídy.

čerstvý beton

		REF C 40/50	D-20 C 40/50	P-20 C40/50	D-OPT C40/50	P-OPT C40/50
objemová hmotnost [kg/m³]	vypočítaná	2390	2480	2470	2470	2460
	skutečná	2420	2380	2370	2350	2310
	odchylka [%]	-1.26%	4,04%	4,05%	4,86%	6,10%
konzistence rozlitím [mm]	0 min	480 / F3	440 / F3	460 / F3	480 / F3	440 / F3
	30 min	330 / F1	360 / F2	330 / F1	320 / F1	310 / F1
	60 min	330 / F1	350 / F2	330 / F1	320 / F1	310 / F1
	90 min	320 / F1	340 / F1	320 / F1	320 / F1	300 / F1

Tabulka 4: Objemové hmotnosti betonů C 40/50 v čerstvém stavu a jejich konzistence



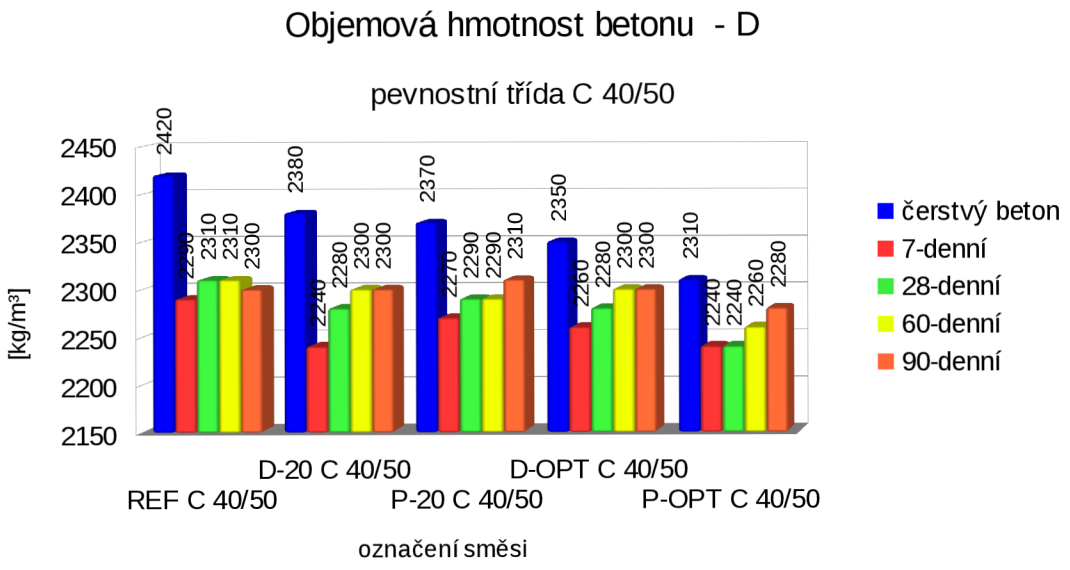
Graf 6: Konzistence betonů pevnostní třídy C 40/50 závislá na čase

Grafické vyhodnocení objemové hmotnosti v čerstvém stavu bude znázorněno společně s objemovými hmotnostmi ve stavu zatvrdlém po určité době zrání.

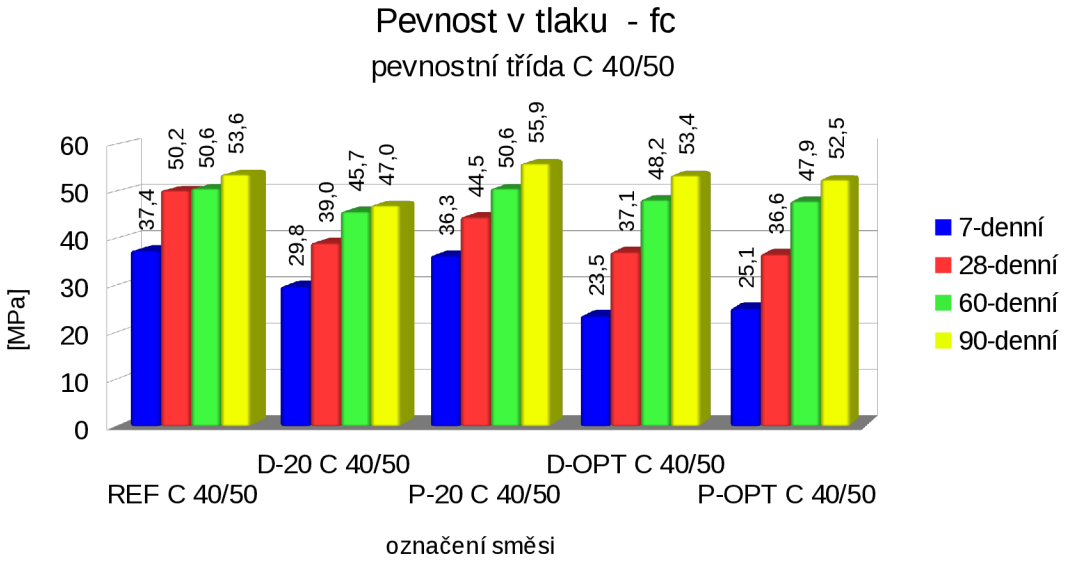
zatvrdlý beton

		REF C 40/50	D-20 C 40/50	P-20 C 40/50	D-OPT C 40/50	P-OPT C 40/50
objemová hmotnost [kg/m³]	7-denní	2290	2240	2270	2260	2240
	28-denní	2310	2280	2290	2280	2240
	60-denní	2310	2300	2290	2300	2260
	90-denní	2300	2300	2310	2300	2280
pevnost v tlaku [MPa]	7-denní	37,4	29,8	36,3	23,5	25,1
	28-denní	50,2	39,0	44,5	37,1	36,6
	60-denní	50,6	45,7	50,6	48,2	47,9
	90-denní	51,2	47,0	55,9	53,4	52,5
statický modul pružnosti v tlaku [GPa]	7-denní	29,5	26,5	27,5	24,0	26,0
	28-denní	30,0	28,5	30,0	29,0	28,5
	60-denní	31,5	30,0	32,0	30,5	30,0
	90-denní	33,5	30,5	32,0	31,5	31,0

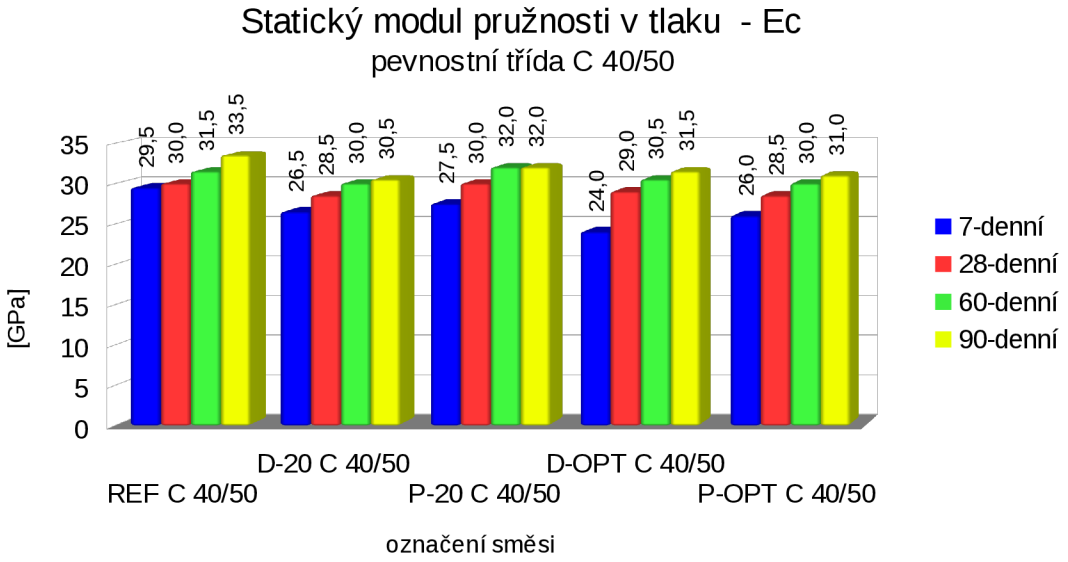
Tabulka 5: Objemové hmotnosti betonů C 40/50 v zatvrdlém stavu a jejich pevnost v tlaku a statický modul pružnosti v tlaku závislé době zrání



Graf 7: Objemové hmotnosti betonů pevnostní třídy C 40/50 závislé na době zrání



Graf 8: Pevnosti v tlaku betonů pevnostní třídy C 40/50 závislé na době zrání



Graf 9: Statické moduly pružnosti v tlaku betonů pevnostní třídy C 40/50 závislé na době zrání

Diskuze výsledků

Z výsledků provedených zkoušek na betonech jak v čerstvém, tak zatvrdlém stavu, je patrný vliv přídavku různého množství popílku a zároveň taktéž jeho druh.

Zřejmě nejpatrnější vliv množství popílku lze pozorovat v dopadu na pevnosti v tlaku. Dle předpokladu nejvyšší pevnosti po 7 i 28 dnech zrání dosáhl beton referenční, REF C 40/50, vyrobený pouze z portlandského cementu. Náhrada 20 % z množství cementu černouhelným popílkem, směs D-20 C 40/50, pevnosti po 7 a 28 dnech zrání již ponížila cca o 20 %. Stejné množství popílku hnědouhelného, směs P-20 C40/50, finální pevnosti po 28 dnech zrání poté ponížilo méně, konkrétně cca o 10 % a pevnosti počáteční, tedy po 7 dnech zrání, jen minimálně v řádu cca 3 %.

U obou zmíněných betonů s náhradou 20 % cementu popílkem byl patrný dopad postupující pucolánové reakce s delší dobou zrání. V případě užití popílku černouhelného se po 60 i 90 dnech zrání snižují rozdíly pevností oproti betonu referenčnímu. Je však třeba poznamenat, že ani po 90 dnech zrání pevnost betonu referenčního za použití tohoto druhu popílku v množství 20 % nebyla překonána. Při použití stejného množství popílku hnědouhelného byla situace vývinu pevností obdobná, avšak zřejmě díky jeho rychlejší pucolánové reakci, byly finální pevnosti betonu P-20 C 40/50 v tlaku již po 60 dnech zrání shodné s pevností betonu referenčního a po 90 dnech zrání jeho pevnost překonána.

Zřejmý byl vliv návrhu s dosažením minimální mezerovitosti suché směsi cement-popílek, kdy i přes vysoké dávky popílku nedošlo zejména po delším časovém úseku k nijak razantnímu poklesu pevnosti oproti betonům s 20 % popílku, ani betonu referenčnímu. Trend vyrovnání, popřípadě překonání pevností zmíněných betonů, je patrný s postupující pucolánovou reakcí. Proto po 7 dnech zrání tyto betony vykazují pokles pevnosti oproti betonu referenčnímu nejvyšší, až o více než 30 % u obou druhů popílků. Postupující pucolánová reakce v případě obou druhů popílku však způsobila, že po finálních 90 dnech zrání oba betony, tedy D-OPT C 40/50 a P-OPT C 40/50, dosahují pevností prakticky shodných s betonem referenčním. Zajímavé je zde zejména porovnání vývoje pevností s betony s klasickou dávkou popílku, kdy zejména návrh směsi o maximální hutnosti cementu a černouhelného popílku, D-OPT C 40/50, velmi pozitivně ovlivnil jeho finální pevnosti, které jsou již po 60

dnech zrání vyšší než při běžné dávce tohoto popílku, a to až o 16 %. V případě stejné metody návrhu, avšak s popílkem hnědouhelným, bylo dosaženo prakticky stejně pozitivních nárůstu pevností. Mírně horší hodnoty oproti této metodice návrhu s popílkem černouhelným a klasické dávce popílku hnědouhelného byly nejspíše dány faktem, že pomocí tohoto popílku maximální možná hutnost suché směsi byla cca o 3 % nižší oproti směsi s popílkem černouhelným a celkově pro návrh bylo užito o 7 % popílku více, takže vývoj pevností byl ještě více opožděn. I v tomto případě se však pevnosti betonů s touto a klasickou dávkou stejného popílku po delším časovém úseku prakticky vyrovnávají.

Na závěr zhodnocení dosažených krychelných pevností je třeba říci, že všechny výsledky byly naměřeny na zkušebních krychlích o délce hrany 100 mm, a tedy pro zatřídění do příslušné pevnostní třídy dle ČSN EN 206-1, Z4, kde jsou pevnostní třídy stanoveny pro zkoušky na krychlích o hraně délky 150 mm, je třeba všechny pevnosti cca o 15 % povýšit. Přibližně o toto množství jsou totiž pevnosti na zkušebních krychlích o hraně 150 mm větší oproti zkušebním krychlím o délce hrany 100 mm.

Výsledky statických modulů pružnosti v tlaku prakticky kopírují trend ovlivnění pevností v tlaku popílky. Taktéž v tomto případě dochází k pozitivnímu ovlivnění této veličiny při použití popílků s postupující dobou zrání betonu. Prakticky po 60 dnech zrání již dochází k vyrovnání modulů všech připravených betonů. Pozitivní výsledky jsou stejně jako v předešlém případě sledovány zejména při návrhu směsí s přihlédnutím k její maximální hutnosti v suchém stavu. Zejména beton D-OPT C 40/50 vykazuje velmi pozitivní nárůst hodnot modulu pružnosti i přes jeho vysokou dávku a tento nárůst je dokonce pozitivnější, než při klasické dávce stejného druhu popílku, která je o mnoho nižší. To se jeví stejně jako v případě pevností v tlaku velice výhodné zejména z ekonomického a ekologického hlediska.

Hodnoty objemových hmotností betonů jak v čerstvém, tak zatvrdlém stavu ukazují, že popílky ovlivňují tento parametr zejména z důvodu své nižší měrné

hmotnosti oproti cementu. Je patrný taktéž rozdíl měrných hmotností samotných druhů popílků.

Naměřené konzistence čerstvého betonu při použití plastifikační přísady Mapei Dynamon SX 14 jsou do značné míry diskutabilní, a to zejména s delším časovým úsekem od zamíchání směsi. U všech připravených betonů došlo prakticky již 30 minut po zamíchání k velmi negativnímu poklesu konzistence, konkrétně z počátečního rozlití cca 450 mm na rozlití cca 330 mm. Takto nízký stupeň konzistence již potom u všech betonů přetrval až do finální zkoušky po 90 minutách od zamíchání. Negativní dopad na konzistenci zřejmě způsobila nevhodně zvolená plastifikační přísada, která nebyla zcela kompatibilní s některou ze vstupních surovin. Pro správné posouzení ovlivnění konzistence čerstvého betonu, proto bylo třeba provést další zkoušky s jinou kompatibilní plastifikační přísadou. Při použití prvně zvolené plastifikační přísady tak lze sledovat prakticky ovlivnění pouze konzistence čerstvého betonu ihned po zamíchání, přičemž se vzrůstajícím se množstvím popílku bylo možno použít nižší dávky vody pro dodržení stejného stupně konzistence u všech betonů. Z výsledků lze taktéž vypozorovat mírně horší plastifikační účinek popílku hnědouhelného oproti popílku černouhelnému, což je dáno zejména horší granulometrií tohoto popílku a horším tvarem méně zeskelněných zrn.

Nové zkoušky ovlivnění konzistence při užití jiné plastifikační přísady byly provedeny pouze na vybraných betonech pevnostní třídy C 50/60, proto popis zvolené plastifikační přísady a naměřené výsledky budou uvedeny až s výsledky zmíněné pevnostní třídy. Stejný trend ovlivnění konzistence popílky při použití kompatibilní plastifikační přísady, lze však očekávat taktéž pro betony této pevnostní třídy.

Při použití obou plastifikačních přísad je podstatné, že ani vyšší dávky popílku, při zajištění maximální hutnosti suché směsi cement-popílek, nejsou překážkou pro dosažení požadovaného stupně konzistence čerstvé betonové směsi, naopak je v tomto ohledu zřejmý jejich pozitivní účinek.

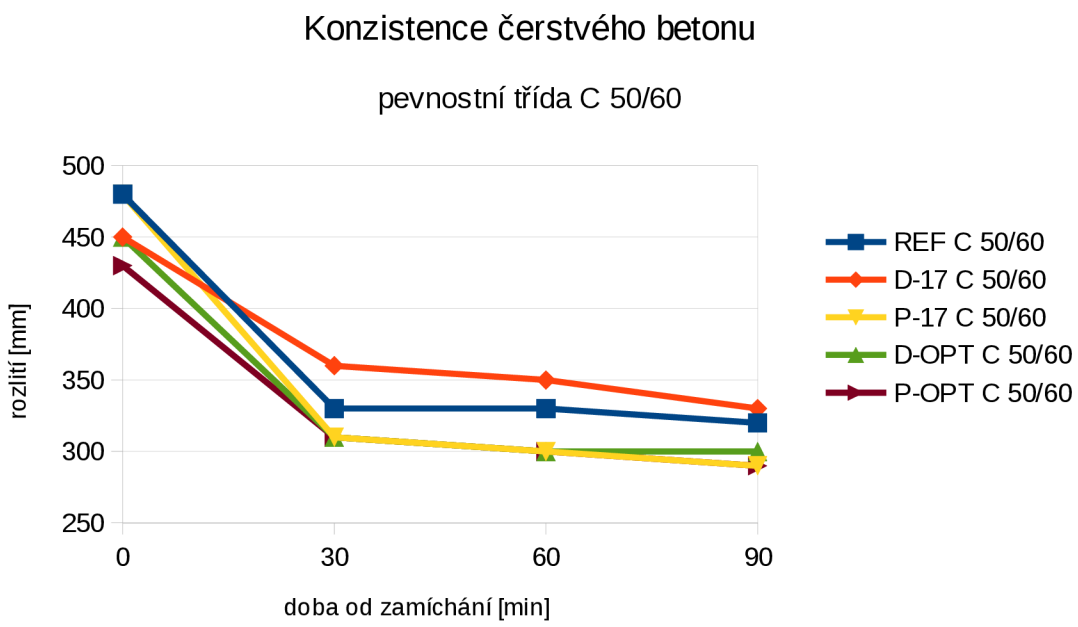
8.2.2. ***Betony pevnostní třídy C 50/60***

Stejně jako v předchozím případě, tedy u výsledků betonů pevnostní třídy C 40/50, budou výsledky betonů této pevnostní třídy uvedeny přehledně v souhrnných tabulkách a následně bude vyhotoveno grafické vyhodnocení a posouzení jednotlivých výsledků.

čerstvý beton

		REF C 50/60	D-17 C 50/60	P-17 C 50/60	D-OPT C 50/60	P-OPT C 50/60
objemová hmotnost [kg/m³]	vypočítaná	2400	2500	2500	2490	2490
	skutečná	2450	2380	2360	2340	2310
	odchylka [%]	-2,08%	4,80%	5,60%	6.02%	7,23%
konzistence rozlitím [mm]	0 min	480 / F3	450 / F3	480 / F3	450 / F3	430 / F3
	30 min	320 / F1	360 / F2	310 / F1	310 / F1	310 / F1
	60 min	310 / F1	350 / F2	300 / F1	300 / F1	300 / F1
	90 min	300 / F1	330 / F1	290 / F1	300 / F1	290 / F1

Tabulka 6: Objemové hmotnosti betonů C 50/60 v čerstvém stavu a jejich konzistence



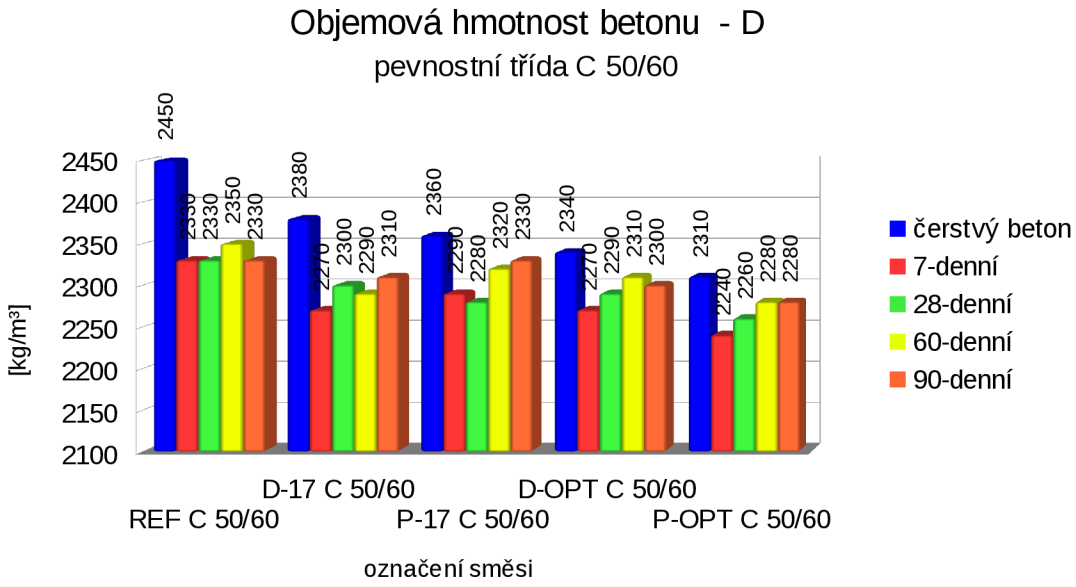
Graf 10: Konzistence betonů pevnostní třídy C 50/60 závislé na čase

Grafické vyhodnocení objemové hmotnosti jednotlivých betonů této pevnostní třídy v čerstvém stavu bude opět znázorněno v grafu společně s objemovými hmotnostmi těchto betonů v zatvrdlém stavu po určité době zrání.

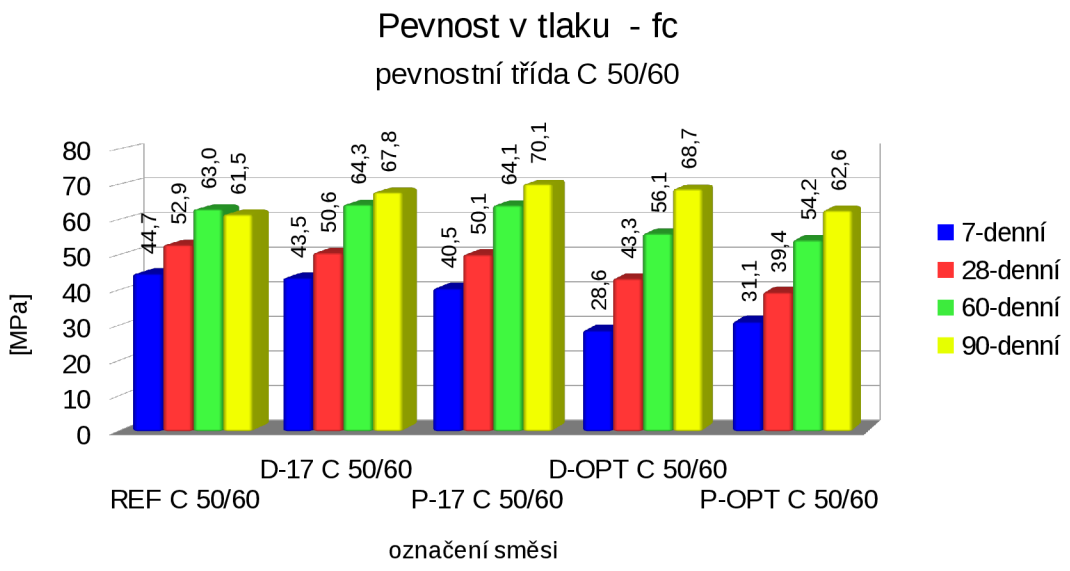
zatvrdlý beton

		REF C 50/60	D-17 C 50/60	P-17 C 50/60	D-OPT C 50/60	P-OPT C 50/60
objemová hmotnost [kg/m³]	7-denní	2330	2270	2290	2270	2240
	28-denní	2330	2300	2280	2290	2260
	60-denní	2350	2290	2320	2310	2280
	90-denní	2340	2310	2330	2300	2280
pevnost v tlaku [MPa]	7-denní	44,7	43,5	40,5	28,6	31,1
	28-denní	52,9	50,6	50,1	43,3	39,4
	60-denní	63,0	64,3	64,1	59,5	54,2
	90-denní	61,5	67,8	70,1	68,7	62,6
statický modul pružnosti v tlaku [GPa]	7-denní	33,0	26,5	28,5	26,5	25,5
	28-denní	33,0	32,0	31,5	31,5	29,5
	60-denní	35,0	32,5	32,5	33,0	31,5
	90-denní	35,5	32,5	33,0	34,0	32,5

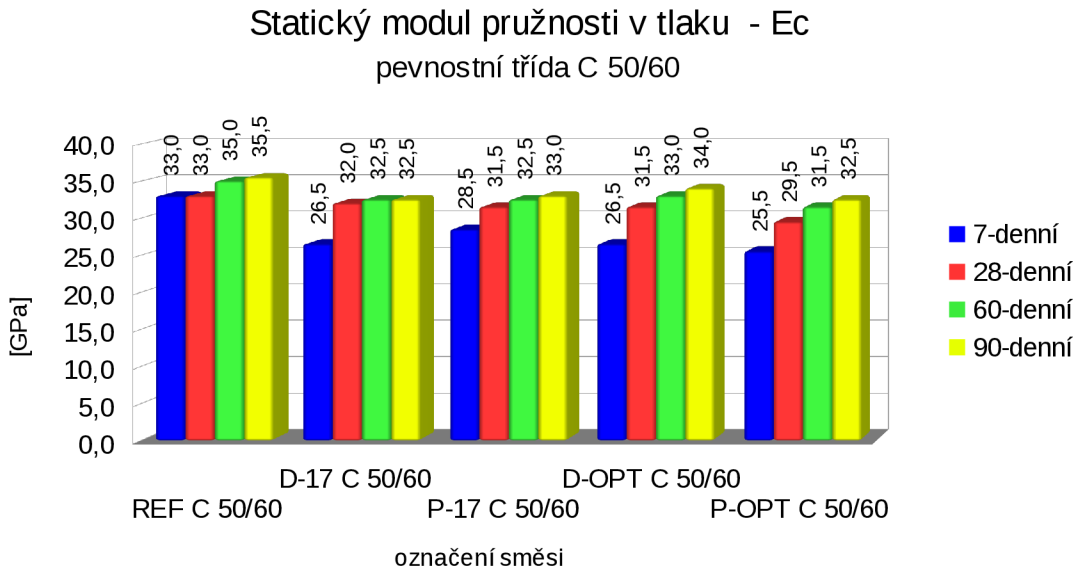
Tabulka 7: Objemové hmotnosti betonů C 50/60 v zatvrdlém stavu a jejich pevnost v tlaku a statický modul pružnosti v tlaku závislé na době zrání



Graf 11: Objemové hmotnosti betonů pevnostní třídy C 50/60 závislé na době zrání



Graf 12: Pevnosti v tlaku betonů pevností třídy C 50/60 závislé na době zrání



Graf 13: Statické moduly pružnosti v tlaku betonů pevností třídy C 50/60 závislé na době zrání

Výsledky ovlivnění konzistence čerstvého betonu s užitím kompatibilní plastifikační přísady:

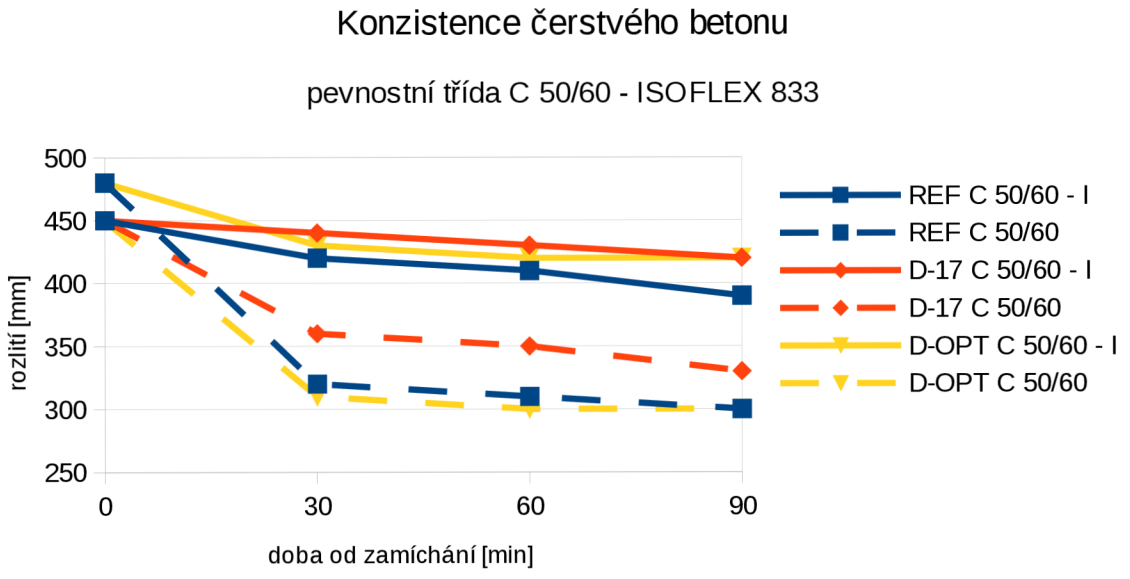
Jako nové přísady bylo užito plastifikační přísady vyrábené firmou Cemex Czech Republic, s.r.o. o označení CX ISOFLEX 833. U této přísady se dalo očekávat zejména kompatibilitu s použitým cementem vyrobeným stejnou společnosti. Jedná se o superplastifikační přísadu na lignosulfonanové a multikarboxylové bázi, přičemž tento výrobek není opět komerčně dostupný a slouží pouze pro potřeby společnosti. Z důvodu přítomnosti lignosulfonanové báze se dala očekávat regulace tuhnutí betonové směsi. Technický list produktu je uveden v příloze práce.

Pro zkoušky ovlivnění čerstvé betonové směsi popílky byly vybrány v této pevnostní třídě betonu obě směsi s černouhelným popílkem Dětmarovice a pro porovnání směs referenční. U všech směsí byla dodržena dříve uvedena receptura s výjimkou dávkování plastifikační přísady a záměsové vody, přičemž bylo požadavkem dosáhnout stejného stupně konzistence dle zkoušky ČSN EN 12350 – 2, konkrétně stupeň S3 při sednutí kužele cca 150 mm. Na připravených směsích byly provedeny stejné zkoušky v čerstvém stavu a ve stavu zatvrdlém byla stanovena pouze objemová hmotnost a pevnost v tlaku na zkušebních krychlích o délce hrany 150 mm, přičemž z časového důvodu již nemohly být provedeny zkoušky po 90 dnech zrání.

CEMEX CX ISOFLEX 833		REF C 50/60 – I	D-17 C 50/60 – I	D-OPT C 50/60 – I
plastifikační přísada	kg/m³ / pozn.	4,5 / 1,0 % mc	5,2 / 1,2 % m_c	5,2 / 1,2 % m_c
voda	kg/m³ / pozn.	170 / w = 0,38	180 / w = 0,39	166 / w = 0,40
konzistence sednutím kužele	mm / pozn.	150 / S3	140 / S3	150 / S3
objemová hmotnost ČB [kg/m3]	vypočítaná	2410	2500	2500
	skutečná	2400	2380	2360
	odchylka [%]	0,41%	4,80%	5,60%
konzistence rozlitím [mm]	0 min	450 / F3	450 / F3	480 / F3
	30 min	420 / F3	440 / F3	430 / F3
	60 min	410 / F2	430 / F3	420 / F3
	90 min	390 / F2	420 / F3	420 / F3
objemová hmotnost ZB [kg/m3]	7-denní	2320	2280	2280
	28-denní	2320	2290	2280
	60-denní	2310	2300	2290
pevnost v tlaku [MPa]	7-denní	51,6	45,4	29,7
	28-denní	61,7	59,2	47,3
	60-denní	62,3	68,7	59,7

Tabulka 8: Výsledky provedených zkoušek při použití kompatibilní plastifikační přísady

V přiloženém grafickém vyhodnocení jsou pro lepší porovnání uvedeny i naměřené hodnoty zkoušky konzistence při užití původního plastifikátoru, tyto hodnoty jsou zobrazeny čárkovaně a v označení směsí s novou plastifikační přísadou se objevuje navíc písmeno I.



Graf 14: Ovlivnění konzistence čerstvého betonu různým množstvím popílku při použití kompatibilní a nekompatibilní přísady

Diskuze výsledků

Stejně jako u betonů pevnostní třídy C 40/50 došlo k největšímu ovlivnění popílky v rámci pevnosti v tlaku. Je zřejmé, že trend vyrovnání, popřípadě překonání pevnosti betonu referenčního, s pojivovou složkou pouze z portlandského cementu, bude taktéž u betonů této pevnostní třídy stejný. V tomto případě je však třeba zmínit, že ani beton referenční, REF C 50/60, nedosáhl po 28 dnech zrání požadované pevnosti v tlaku při zkoušce zkušebních těles tvaru krychle o délce hrany 100 mm. Při normové zkoušce na krychlích o délce hrany 150 mm, na základě níž je beton zatříděn do pevnostní třídy dle ČSN EN 206-1, Z4, by však bylo nejspíše normové hodnoty pro pevnostní třídy C 50/60 těsně dosaženo. To je dáno faktem již zmíněným u vyhodnocení betonů předchozí pevnostní třídy, tedy že pevnost v tlaku na normové krychli o délce hrany 150 mm je cca o 15 % vyšší oproti pevnosti zjištěné při zkoušce na krychli o délce hrany 100 mm. Všeobecně nižší pevnost připraveného referenčního betonu je nejspíše důsledkem nevhodného návrhu složení směsi, popřípadě posléze nedokonalým zhutněním. Mírný defekt mohl být způsoben velmi špatným tvarovým indexem drceného kameniva frakce 11-22 mm z lokality Lomnička, díky kterému mohlo být ovlivněno právě dokonalé zhutnění betonové směsi.

Náhrada 17 % hmotnosti cementu popílkem černouhelným i hnědouhelným v tomto případě příliš neovlivnila ani počáteční pevnosti betonu. Došlo k poklesu pevnosti o méně než 6 % v případě D-17 C 50/60 a cca o 10 % v případě P-17 C 50/60, přičemž již po 90 dnech zrání oba jmenované betony pevnost betonu referenčního poměrně značně překonaly, v obou případech o více než 10 %. Velice pozitivní ovlivnění výsledných pevností betonu lze pozorovat opět zejména při užití hnědouhelného popílku v této běžné dávce.

Taktéž u této pevnostní třídy betonů je velmi patrné pozitivum návrhu směsi s přihlédnutím k její maximální hutnosti v suchém stavu. Pozitivum tohoto návrhu bylo opět nejvíce zřejmé u černouhelného popílku, přičemž vyrobený beton, D-OPT C 50/60, po 90 dnech zrání překonal poměrně znatelně, o více než 11 %, pevnost betonu referenčního, a taktéž betonu s běžnou dávkou tohoto

popílku. Méně pozitivní dopad na výsledné hodnoty pevností byl sledován u návrhu touto metodikou s použitím hnědouhelného popílku. V tomto případě je negativní pokles oproti směsi s použitím klasické dávky stejného popílku nejspíše způsoben vnesením chyby již při samotné výrobě zkušebních těles. Je zřejmé, že v případě bezchybné výroby, by se trend ovlivnění pevností této záměsi měl prakticky shodovat s trendem ovlivnění pevností u stejného druhu betonu, pouze pevností třídy C 40/50, stejně jako tomu bylo v případě popílku černouhelného. Taktéž zde by se však dal očekávat možný mírný pokles pevnosti v tlaku a dalo by se jej přisoudit menší dosažitelné maximální hutnosti, která byla cca o 3 % nižší než v případě návrhu s popílkem černouhelným a větší retardační schopnosti vyššího množství popílku oproti směsi s popílkem černouhelným.

V případě statických modulů pružnosti v tlaku sice i po 90 dnech zrání disponuje jeho nejvyšší hodnotou beton referenční, avšak velké pozitivum lze opět spatřit v návrhu směsi dle její maximální hutnosti v suchém stavu, protože beton D-OPT C 50/60 disponuje ze všech zbylých betonů nejvyšší hodnotou modulu pružnosti již po 60 dnech zrání, která se prakticky blíží modulu betonu referenčního. Obecně je třeba zmínit, že ač betony s jistou náhradou cementu popílkem disponují nižší hodnotu modulu pružnosti, není toto negativní ovlivnění nikterak fatální pro jejich použití.

Z naměřených hodnot objemových hmotností lze opět říci, že tyto hodnoty klesají s dávkou a druhem použitého popílku v závislosti na jeho měrné hmotnosti, která je oproti cementu vždy nižší.

Stejně jako u betonů pevnostní třídy C 40/50 nelze posoudit zcela jednoznačně ovlivnění konzistence čerstvého betonu s dobou od zamíchání směsi při použití plastifikační přísady Mapei Dynamon SX14. Ihned po zamíchání je však patrný plastifikační účinek obou popílků. S rostoucí dávkou popílku je možné snižovat množství záměsové vody při dodržení požadované konzistence a celkové zlepšení konzistence je patrné zejména u popílku černouhelného díky jeho ideálnímu tvaru zrn.

Z důvodu nekompatibility plastifikační přísady byly zkoušky ovlivnění konzistence provedeny pro beton referenční a betony s černouhelným popílkem této pevnostní třídy ještě jednou za použití jiné plastifikační přísady. Na základě výsledků těchto zkoušek byl potvrzen úsudek o plastifikačním účinku popílku, který se projevuje nižší potřebnou dávkou záměsové vody pro dosažení požadované konzistence. Správně zvolená plastifikační přísada však poukázala taktéž na pozitivní vliv popílku na konzistenci čerstvého betonu s delší dobou od zamíchání. Díky přídavku popílku dochází k pomalejšímu poklesu stupně konzistence a beton si tak zachovává déle svou schopnost zpracovatelnosti, což lze demonstrovat na přiloženém grafu. Tento fakt lze vysvětlit samotnou retardační schopností popílku.

Zbylé naměřené hodnoty u směsí připravených s touto plastifikační přísadou již prakticky korespondují s výsledky směsí s původní plastifikační přísadou. Patrný je pouze mírný retardační efekt lignosulfonanové báze na počáteční pevnosti betonu v tlaku.

9. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo prozkoumat a následně experimentálně ověřit vliv elektrárenského popílku na vlastnosti betonu v čerstvém i zatvrdlém stavu. Úkolem bylo taktéž prozkoumat odlišnosti jednotlivých druhů popílků a popsat tento dopad odlišnosti na jejich využitelnost. Dlouhodobé zkušenosti z naší země i ze zahraničí s využíváním popílků do betonu jednoznačně prokazují jejich pozitivní vliv prakticky na všechny mechanické a fyzikální vlastnosti ve stavu čerstvém i zatvrdlém. Tento pozitivní dopad na vlastnosti betonu při dodržení jistých zásad návrhu, výroby a následného ošetřování vede k jeho stále vyššímu využití. Většina studií však uvádí, že s rostoucí dávkou popílku dochází k negativnímu ovlivnění například v oblasti pevností a taktéž trvanlivosti v jistých třídách agresivity. Tato skutečnost brání rozvoji jejich použitelnosti jako příměsi do betonu ve větším množství a do betonů specifických vlastností.

Popílky vždy díky svému pomalejšímu nástupu pucolánové reakce negativně ovlivňují počáteční pevnosti betonu, a to obvykle nejméně do 28 dní zrání. Po této době již však betony s jejich aplikací prakticky vždy vykazují pozitivní nárůst pevnosti oproti betonům běžným. Lze taktéž říci, že při správném návrhu, výrobě a ošetřování betonu, popílky prakticky ve všech směrech pozitivně ovlivňují trvanlivost betonu. Díky probíhající pucolánové reakci tyto betony vykazují zpravidla vyšší nepropustnost, a tím odolnost vůči prostředí XA, XD a taktéž XC. Jsou-li tyto betony kvalitně provzdušněny dobře odolávají taktéž prostředí XF. V případě, že však nejsou dodrženy některé z požadavků kvalitní výroby a delší doby ošetřování, je předpokladem, že popílky budou výsledné mechanické a fyzikální vlastnosti betonu ovlivňovat spíše negativně. Naopak kladné ovlivnění bude jejich přídavek vykazovat prakticky vždy v nižším vývinu hydratačního tepla, a s tím spojeným vznikem hydratačních trhlin, což předurčuje jejich vhodnost použití zejména pro masivní konstrukce.

V experimentální části práce bylo snahou prokázat, že i vyšší množství popílku, které slouží jako náhrada adekvátní části cementu, může taktéž dále pozitivně ovlivňovat vlastnosti čerstvého i zatvrdlého betonu. Snahou bylo

prokázat, že tato skutečnost může být dále umocněna složením suché směsi cement-popílek, přičemž zajištění maximální hutnosti této směsi, vede k prakticky stejným nebo lepším výsledkům jako běžné nižší dávky popílku. Dodržení tohoto velmi jednoduchého pravidla návrhu vede poté k velké ekonomické úspoře a působí taktéž velmi pozitivně na ekologii výroby betonu.

Pro porovnání vlastností betonu čerstvého i zatvrdlého byly vyrobeny v pevnostní třídě C 40/50 a C 50/60 vždy vzorky betonu referenčního pouze s portlandským cementem, vzorky s běžnou dávkou popílku, konkrétně tedy 20 % z hmotnosti cementu pro třídu C 40/50 a 17 % z hmotnosti cementu pro třídu C 50/60 a vzorky s množstvím popílku dle maximální hutnosti suché směsi cement-popílek. U těchto vzorků bylo pro černouhelný popílek Dětmarovice stanoveno jeho množství na 36 % z celkového navrženého objemu cementu a pro hnědouhelný popílek Počerady 43 % z celkového navrženého objemu cementu.

Ve všech případech popílek pozitivně ovlivnil konzistenci čerstvého betonu, přičemž s jeho rostoucím množstvím rostla taktéž kvalita ovlivnění. Tato vlastnost se projevila na potřebě nižší dávky záměsové vody pro dosažení stejné konzistence u všech betonů a pomalejší ztrátou zpracovatelnosti směsi. Ovlivnění lze přisuzovat plastifikačnímu efektu popílku díky jeho granulometrii a tvaru zrn, což vysvětluje taktéž mírně horší ovlivnění konzistence popílkem hnědouhelným oproti černouhelnému, protože tento popílek disponuje zejména horším tvarem zrn a ovlivnění pomalejšího poklesu stupně konzistence reterdačnímu účinku popílku.

Zkoušky pevnosti v tlaku prokázaly, že i přes vyšší pevnosti betonů referenčních u obou pevnostních tříd do 28 dnů zrání, nakonec tyto betony po 90 dnech zrání disponují nižší pevností v tlaku oproti betonům s běžnou dávkou hnědouhelného popílku a u pevnostní třídy C 50/60 také popílku černouhelného. Taktéž u pevnostní třídy betonu C 40/50, však po 90 dnech zrání, beton s klasickou dávkou černouhelného popílku disponuje prakticky srovnatelnou pevností v tlaku s betonem referenčním. Jako velice pozitivní se ukázalo dávkování popílku na základě dodržení maximální hutnosti suché

směsi cement-popílek, přičemž i přes poměrně vysoké dávky popílku takto připravené betony obou pevnostních tříd vykazovaly pevnosti prakticky shodné s betony s běžnou dávkou popílku. Lépe se z tohoto hlediska návrhu jevil popílek černouhelný, kdy vyrobená směs při zajištění maximální hutnosti v obou pevnostních třídách již po 60 dnech zrání měla pevnosti prakticky shodné s betonem referenčním a po 90 dnech zrání, konkrétně u pevnostní třídy C 50/60, jeho pevnost znatelně překonala. Pozitivum lze spatřovat zejména při porovnání s betony, pro jejichž výrobu bylo užito běžné dávky popílku, protože v porovnání s nimi dosahují prakticky shodných nebo vyšších tlakových pevností.

Tím je dokázáno velmi pozitivní ovlivnění pevnosti v tlaku betonu navrženého podle maximální hutnosti suché směsi cement-popílek, přičemž výsledky mohou být dále závislé i na vzájemné granulometrii použitého cementu a popílku, a tím možnosti vyskládání co nejideálnější křivky zrnitosti, což se projeví vyšší hodnotou hutnosti směsi. Toto tvrzení lze s určitým nadhledem demonstrovat na lepších výsledcích mechanických vlastností při návrhu betonové směsi touto metodikou s použitím černouhelného popílku oproti směsi s hnědouhelným popílkem. První zmíněná směs díky vzájemně vhodné granulometrii cementu a černouhelného popílku měla cca o 3 % vyšší hutnost v suchém stavu než druhá jmenovaná.

Trend vývoje statického modulu pružnosti v tlaku prakticky korespondoval s vývoji pevností daných betonů v tlaku. I přes fakt, že nejvyšších hodnot i po 90 dnech zrání dosahovaly betony referenční v obou pevnostních třídách, je i u tohoto parametru zřejmé, že zajištění maximální hutnosti směsi cementu s popílkem sebou přináší velmi pozitivní ovlivnění. V pevnostní třídě C 50/60 touto metodikou navržený beton s černouhelným popílkem dokonce vykazoval nejvyšší hodnotu modulu pružnosti v tlaku oproti zbylým návrhům, vyjma betonu referenčního.

Taktéž tato mechanická vlastnost betonu tedy dále poukazuje na vhodnost návrhu betonové směsi podle maximální hutnosti suché směsi cement-popílek.

Tato metodika návrhu obvykle vede k užití poměrně velkého množství popílku, které oproti běžně používané dávce může být až dvojnásobné. Na základě provedených zkoušek však bylo prokázáno, že výsledné vlastnosti betonu po 90 dnech zrání, jsou prakticky s tímto běžným návrhem srovnatelné nebo jej dokonce překonávají a toto množství není překážkou ani pro výrobu betonů vyšších pevnostních tříd. Je však výhodné, aby daný druh popílku současně disponoval vhodnou křivkou zrnitosti k danému cementu, protože tento lepší vzájemný soulad vede k vyšší dosažitelné hutnosti suché směsi cement-popílek. Metodika návrhu betonu s přihlédnutím k dosažení maximální hutnosti suché směsi cement-popílek použití popílku jako příměsi dále zefektivňuje a návrh se tak stává ještě mnohem ekonomicky a ekologicky výhodnější, popřípadě je ještě více využito pozitivních vlastností popílku na vlastnosti jak čerstvého, tak zatvrdlého betonu.

Jako výhodné by se poté mohlo jevit další ovlivnění maximální hutnosti vzniklé směsi cementu a popílku, kdyby bylo použito více frakcí tohoto popílku, čím by bylo možno dosahovat ještě vyšších hutností směsi. Možnost dalšího experimentu se naskýtá rovněž v kombinaci popílku s další příměsí, ať již typu I nebo II. Tyto návrhy, které by mohly vést k dalšímu pozitivnímu ovlivnění vlastností betonu, by výrobu takového kompozitního materiálu posouvaly do oblasti mnohem ekonomicky výhodnější výroby a zároveň by při jejich výrobě bylo spotřebováno velké množství druhotných surovin, což by sebou přinášelo velké pozitivum z hlediska ekologického, umocněné dále nižším množstvím použitého cementu, jako jednoho z největších ekologických škůdců výroby stavebních hmot.

10. Použitá literatura

10.1. Použitá literatura

[1-1] EcoCrete: *Pucolány*. Ecocrete.cz [online]. 2014 [cit. 2014-02-10]. Dostupné z:http://ecocrete.eu/CS_30_0.htm

[1-2] SINGH, Gurdeep a RASUL. *Environmental Aspects of Coal Combustion Residues from Thermal Power Plants*. IntechOpen.com [online]. 2013, Chapter 8 [cit. 2014-04-05]. DOI: 10.5772/56038. Dostupné z: http://www.intechopen.com/books/thermal-power-plants-advanced-applications/environmental-aspects-of-coal-combustion-residues-from-thermal-power-plants

[1-3] ŠMILAUER, Vít, Ondřej ZOBAL, Zdeněk BITTNAR, Rudolf HELA, Roman SNOP a Pavel DONÁT. *Využití úletových popílků pro betonáž masivních konstrukcí*. Beton: Technologie - Beton v extrémních podmínkách. 2014, roč. 2014, č. 2, s. 60-65.

[1-4] *Příručka Popílek v betonu: Základy výroby a použití*. 2. přepracované vydání. Brno, Praha: ČEZ Energetické produkty, s.r.o., 2013, s. 9-11. ISBN 978-80-260-4226-6.

[2-1, 2] Fosilní paliva: *Uhlí*. Fosilnipaliva.cz [online]. 2014 [cit. 2014-02-10]. Dostupné z:http://www.fospaliva.wz.cz/page01.htm

[2-3] SVAZ VÝROBCŮ CEMENTU, VÝZKUMNÝ ÚSTAV MALTOVIN PRAHA, spol. s.r.o. *Popílek a jeho použití do betonu: Vyhovujícího nové betonářské normě ČSN EN 206-1*. Praha: Artis©, 2008-2014.

[2-4] KŘÍŽ, Pavel a Martin POCHYLA. *Ventilátorové mlýny v novém: regulace frekvenčními měniči*. Elektroprůmysl.cz [online]. 2012 [cit. 2014-03-05]. Dostupné z: http://www.elektroprumysl.cz/pohony-menice-a-energetika/ventilatorove-mlyny-v-novem-regulace-frekvencnimi-menici-3

[2-5] MEDVEDECOVÁ, Jaroslava a Petr MUŽÍK. *Nová surovina - fluidní popílek z tepelné elektrárny Hodonín*. VUT v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců.

[2-6] ŠTĚRBA, Alain. *Příměsi dříve a nyní, část 1*. Beton: Materiál a technologie - Vysokohodnotné betony. 2011, č. 6, s. 20-27.

[3-1] SEVERA, Tomáš a Jiří FRÁŇA. *Rekultivace elektrárenských popílků*. PÚPN. 3. ročník. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích.

[3-2] FRÝZOVÁ, Radka. *Fázové složení elektrárenských popílků: Kvantitativní stanovení vybraných minerálů*. Brno, 2012. Rešerše k tématu diplomové práce. Masarykova univerzita, Přirodovědecká fakulta, Ústav geologických věd.

[3-3] ELFMARKOVÁ, Veronika. *Vliv jemnozrnných příměsí na charakter pórového systému betonu*. Brno, 2011/2012. Studenstká vědecká a odborná činnost. VUT v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců.

[3-4] SOKOLÁŘ, Radim a Lenka SMETANOVÁ. *Elektrárenské popílky jako základní surovina páleného keramického střepu*. Brno, 2005. VUT v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců.

[3-5, 6] PYTLÍK, Petr. *Technologie betonu*. Brno, VUT v Brně: CERM, 1994. ISBN 8085867079.

[3-7] GOODRAZI, F. a SANEI, H. *Plerosphere and its role in reduction of emitted fine fly ash particles from pulverized coal-fired power plants*,. Fuel. 2009, Volume 88, s. 382-386. ISSN 0016-2361.

[3-8] *Příručka Popílek v betonu: Základy výroby a použití*. 2. přepracované vydání. Brno, Praha: ČEZ Energetické produkty, s.r.o., 2013, s. 16-17. ISBN 978-80-260-4226-6.

[3-9] Radioaktivita: Měření stav. a odpad. materiálů. *Přírodní radioaktivita stavebních materiálů a odpadů,* Radioaktivita.cz [online]. [cit. 2014-03-13]. Dostupné z:http://www.radioaktivita.cz/mereni_mat.html

[3-10] ČEZ Energetické produkty: Aktuality. *Úspěšná registrace energetických produktů dle nařízení REACH. 25.5. 2011,* Cezep.cz. [online]. 2011 [cit. 2014-03-16]. Dostupné z:http://www.cezep.cz/index.php?news=28&page=5

[3-11] KYNČLOVÁ, Magdaléna. *Geopolymerní betony: materiály šetrné k životnímu prostředí*. Praha, 2008. Juniorstav. VUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra konstrukcí pozemních staveb.

[4-1] DVOŘÁK, Karel, Marcela FRIDRICHOVÁ, Oldřich HOFMANN a Jana STACHOVÁ. *Využití fluidních popílků při výrobě cementu*. Brno, 2010. VUMO. VUT v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců.

[4-2] VENHOVSKÁ, Ludmila. *Fluidní popílek pro přípravu směsného cementu*. Brno, 2006. VUT v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců.

[4-3] DROCHYTKA, Rostislav. *Lehké stavební látky*. Brno, 2006. Skriptum BJ10. VUT v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců.

[4-4] KRAJČOVIČ, Marián. *Stavba pozemních komunikací*. Ostrava, 2014. Opory pro kombinované studium. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta stavební.

[4-5] ČEZ Energetické produkty: Produkty. *Stabilizát,* Cezep.cz. [online]. 2011 [cit. 2014-03-16] Dostupné z : http://www.cezep.cz/stabilizat.html?id=126

[5-1] RESCHKE, Thorsten, Eberhard SIEBEL a Gerd THIELEN. *Einfluß der Granulometrie und Reaktivität von Zement und Zusatzstoffen auf die Festigkeits- und Gefügeentwicklung von Mörtel und Beton*. Schriftenreihe der Zementindustry. Důsseldorf, 2001, Vol. 62. ISBN 3-7640-0406-1.

[5-2] *Příručka Popílek v betonu: Základy výroby a použití*. 2. přepracované vydání. Brno, Praha: ČEZ Energetické produkty, s.r.o., 2013, s. 17-18. ISBN 978-80-260-4226-6.

[5-3] AHMARUZZAMAN, M.. *A review on the utilization of fly ash*. Progress in Energy and Combustion Science. 2010, Volume 36, s. 327-363. ISSN 0360-1285.

[5-4, 6] THOMAS, Jeff a Hamlin JENNINGS. Northwestern University, Evanston, IL. [online]. [cit. 2014-03-26]. Dostupné z:http://iti.northwestern.edu.

[5-5] KWAN, A.K.H. a CHEN, J.J. *Adding fly ash microsphere to improve packing density, flowability and strength of cement paste*. Powder Technology. 2013, Volume 234, s. 19-25. ISSN 0032-5910.

[5-7] NAVRÁTILOVÁ, Eva. *Metody stanovení pucolánové aktivity*. Brno. VUT v Brně, Fakulta stavební, Ústav chemie.

[5-8] ROVNANÍKOVÁ, Pavla. *Vlastnosti betonů modifikovaných modifikovanými příměsemi*. Brno, 2011. Kalorimetrický seminář. VUT v Brně, Fakulta stavební, Ústav chemie.

[5-9, 11] DESCHNER, Florian, WINNEFELD, LOTHENBACH, Sebastian SEUFERT, Peter SCHWESIG, Sebastian DITTRICH, GOETZ-NEUNHOEFFER a NEUBAUER. *Hydration of Portland cement with high replacement by siliceous fly ash*. Cement and Concrete Research. 2012, Volume 42, s. 1389-1400. ISSN 0008-8846.

[5-10] *Příručka Popílek v betonu: Základy výroby a použití*. 2. přepracované vydání. Brno, Praha: ČEZ Energetické produkty, s.r.o., 2013, s. 28. ISBN 978-80-260-4226-6.

[5-12] LANGAN, B.W., WENG, M. a WARD, K.A. *Effect of silica fume and fly ash on heat of hydration of Portland cement*. Cement and Concrete Research. 2002, Volume 32, s. 1045-1051. ISSN 0008-8846.

[5-13] PEI-WEI, Gao, Lu XIAO-LIN, Lin HUI, Li XIAOYAN a Hou JIE. *Effects of fly ash on the properties of environmentally friendly dam concrete*. Fuel. 2007, Volume 86, s. 1208-1211. ISSN 0016-2361.

[5-14] LOHTIA, R.P. a JOSHI, R.C. *Fly ash in concrete: production, properties and uses. Australia*. Amsterdam: Gordon and Breach Science Publishers, 1997. ISBN 90-569-9580-4.

[5-15] UYSAL, Mucteba a Veysel AKYUNCU. *Durability performance of concrete incorporating Class F and Class C fly ashes*. Construction and Building Materials. 2012, Volume 34, s. 170-178. ISSN 0950-0618.

[5-16] VAN DEN HEEDE, P., FURNIERE, J. a DE BELIE, N. *Influence of air entraining agents on deicing salt scaling resistance and transport properties of high-volume fly ash concrete*. Cement and Concrete Composites. 2013, Volume 37, s. 293-303. ISSN 0958-9465.

[5-17] FERNANDO APONTE, Diego, Marilda BARRA a Enric VÀZQUEZ. *Durability and cementing efficiency of fly ash in concretes*. Construction and Building Materials. 2012, Volume 30, s. 537-546. ISSN 0950-0618.

[5-18] RAIF BOĞA, Ahmet a İlker BEKIR TOPÇU. *Influence of fly ash on corrosion resistance and chloride ion permeability of concrete*. Construction and Building Materials. 2012, Volume 31, s. 258-264. ISSN 0950-0618.

[5-19] KHUNTHONGKEAW, J., TANGTERMSIRIKUL, S. a LEELAWAT, T. *A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete*. Construction and Building Materials. 2006, Volume 20, s. 744-753. ISSN 0950-061.

[5-20] PAPADAKIS, V.G. *Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress*. Cement Concrete Research. 2000, Volume 30, s. 291-299.

[5-21] ATI, C.D. *Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash*. Constr. Build. Mater. 2003, Volume 17, s. 147-152.

[5-22] ŘEZNÍK, Bohuslav. *Vliv působení agresivního prostředí na mechanické vlastnosti alkalicky aktivovaného popílku*. Brno, 2011. Juniorstav. VUT v Brně, Fakulta stavební, ústav chemie.

[5-23] SUMER, Mansur. *Compressive strength and sulfate resistance properties of concretes containing Class F and Class C fly ashes*. Construction and Building Materials. 2012, Volume 34, s. 531-536. ISSN 0950-061.

[5-24] RESCHKE, Thorsten, Eberhard SIEBEL a Gerd THIELEN. *Einfluß der Granulometrie und Reaktivität von Zement und Zusatzstoffen auf die Festigkeits- und Gefügeentwicklung von Mörtel und Beton*. Schriftenreihe der Zementindustry. Důsseldorf, 2001, Vol. 62. ISBN 3-7640-0406-1.

[5-25] BauMineral KraftWerkstoffe. Products: *Microsit®*. Baumineral.de [online]. 2014 [cit 2014-05-10]. Dostupné z: http://www.baumineral.de/produkte/microsit_e.php

10.2. Použité právní normy a předpisy

[N 1] ČSN EN 450-1. *Popílek do betonu - Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody*. Praha: ÚNMZ, 2013.

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

[N 3] ČSN EN 206-1, Z4. *Beton - Část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha: ÚNMZ, 2014.

[N 4] ČSN EN 450-2. *Popílek do betonu - Část 2: Hodnocení shody*. Praha: ÚNMZ, 2005.

[N 5] ASTM C 618 – 12a. *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. USA: ASTM International is a member of CrossRef.

[N 6] Podmínky ochrany zdraví při práci. In: *Nařízení vlády 361/2007 Sb.* 2007.

[N 7] O požadavcích na radiační ochranu v platném znění. In: *Vyhláška č. 307/2002 Sb*. 2002.

[N 8] ČSN EN 12620+A1. *Kamenivo do betonu*. Praha: ÚNMZ, 2008.

[N 9] ČSN EN 12350-2. *Zkoušení čerstvého betonu - Část 2: Zkouška sednutím*. Praha: ÚNMZ, 2009.

[N 10] ČSN 72 2071. *Popílek pro stavební účely . Společná ustanovení, požadavky a metody zkoušení*. Praha: ÚNMZ, 2011.

10.3. Použité zdroje ilustrací

[O 1] SINGH, Gurdeep a RASUL. *Environmental Aspects of Coal Combustion Residues from Thermal Power Plants*. IntechOpen.com [online]. 2013, Chapter 8 [cit. 2014-04-05]. DOI: 10.5772/56038. Dostupné z: http://www.intechopen.com/books/thermal-power-plants-advanced-applications/environmental-aspects-of-coal-combustion-residues-from-thermal-power-plants

[O 2] Statistika a my: *Tři čtvrtiny odpadu produkují asi 2 % firem*. Statistikaamy.cz [online]. 2013 [cit. 2014-03-9]. Dostupné z: http://www.statistikaamy.cz/2014/02/tri-ctvrtiny-odpadu-produkuji-asi-2-firem/

[O 3] Silotransport, Produkty: *Popílek*. Silotransport.cz [online]. 2014 [cit. 2014-01-2]. Dostupné z:http://www.silotransport.cz/popilek

[O 4] EnergyWeb, Encyklopedie energie: *Fluidní spalování*. Energyweb.cz [online]. 1999-2002 [cit. 2014-01-2]. Dostupné z: http://www.energyweb.cz/web/index.php?display_page=2&subitem=2&slovnik_page=fluid_spal.html

[O 5] PYTLÍK, Petr. *Technologie betonu*. Brno, VUT v Brně: CERM, 1994. ISBN 8085867079.

[O 6] VERESHCHAGINA, Tatiana, VERESHCHAGIN, Nina SHISHKINA, Nataly VASILIEVA, Leonid SOLOVYOV a Alexander ANSHITS. *Microsphere zeolite materials derived from coal fly ash cenospheres as precursors to mineral-like*

aluminosilicate hosts for $^{135,137}Cs$ and ^{90}Sr. Journal of Nuclear Materials. 2013, Volume 437, s. 11-18. ISSN 0022-3115.

[O 7] GOODRAZI, F. a SANEI, H.. *Plerosphere and its role in reduction of emitted fine fly ash particles from pulverized coal-fired power plants*,. Fuel. 2009, Volume 88, s. 382-386. ISSN 0016-2361.

[O 8] KOCKAL, Niyazi Ugur a Turan OZTURAN. *Durability of lightweight concretes with lightweight fly ash aggregates*. Construction and Building Materials. 2011, Volume 25, s. 1430-1438. ISSN 0950-0618.

[O 9] TZB portál, stavebnictvo: S*nižování zátěže životního prostředí s využitím popílku do bezcementových betonů a stěrek*. Tzbportal.sk [online]. 2012 [cit. 2014-02-8]. Dostupné z: http://www.tzbportal.sk/stavebnictvo/snizovani-zateze-zivotniho-prostredi-s-vyuzitim-popilku-do-bezcementovych-betonu-sterek

[O 10] Lab cement, Cement and Art: Hydrated Cement Paste. *Cementlab.com* [online]. 2007-2011 [cit. 2014-04-13]. Dostupné z: http://www.cementlab.com/cement-art.htm

[O 11] KWAN, A.K.H. a CHEN, J.J. *Adding fly ash microsphere to improve packing density, flowability and strength of cement paste*. Powder Technology. 2013, Volume 234, s. 19-25. ISSN 0032-5910.

[O 12] VAN DAMME, H., PELLENQ, R.J.-M. a ULM, F.-J. *Developments in Clay Science: Cement Hydrates*. Elsevier, 2013, s. 801-817. ISBN 9780080993645.

[O 13, 14] DESCHNER, Florian, WINNEFELD, LOTHENBACH, Sebastian SEUFERT, Peter SCHWESIG, Sebastian DITTRICH, GOETZ-NEUNHOEFFER a NEUBAUER. *Hydration of Portland cement with high replacement by siliceous fly ash*. Cement and Concrete Research. 2012, Volume 42, s. 1389-1400. ISSN 0008-8846.

[O 15] LANGAN, B.W., WENG, M. a WARD, K.A. *Effect of silica fume and fly ash on heat of hydration of Portland cement*. Cement and Concrete Research. 2002, Volume 32, s. 1045-1051. ISSN 0008-8846.

[O 16] THOMAS, M.D.A., SHEHATA, M.H., SHASHIPRAKASH, S.G., HOPKINS, D.S. a CAIL, K. *Use of ternary cementitious systems containing silica fume and fly ash in concrete*. Cement and Concrete Research. 1999, Volume 29, s. 1207-1214. ISSN 0008-884.

[O 17, 18] PEI-WEI, Gao, Lu XIAO-LIN, Lin HUI, Li XIAOYAN a Hou JIE. *Effects of fly ash on the properties of environmentally friendly dam concrete*. Fuel. 2007, Volume 86, s. 1208-1211. ISSN 0016-2361.

[O 19] UYSAL, Mucteba a Veysel AKYUNCU. *Durability performance of concrete incorporating Class F and Class C fly ashes*. Construction and Building Materials. 2012, Volume 34, s. 170-178. ISSN 0950-0618.

[O 20, 21] FERNANDO APONTE, Diego, Marilda BARRA a Enric VÀZQUEZ. *Durability and cementing efficiency of fly ash in concretes*. Construction and Building Materials. 2012, Volume 30, s. 537-546. ISSN 0950-0618.

[O 22] SUMER, Mansur. *Compressive strength and sulfate resistance properties of concretes containing Class F and Class C fly ashes*. Construction and Building Materials. 2012, Volume 34, s. 531-536. ISSN 0950-061.

11. Seznam použitých zkratek a symbolů

HVFAC	beton s vysokým obsahem popílku jako náhrady za cement
SCC	samozhutnitelný beton
KAPS	kamenivo stmelené popílkovou suspenzí
CHRL	chemické rozmrazovací látky
THD	Ústav technologie stavebních hmot a dílců
FAST	Fakulta stavební
VUT	Vysoké učení technické v Brně
w	vodní součinitel [-]
f_c	pevnost v tlaku [MPa]
E_c	statický modul pružnosti v tlaku [GPa]
D	objemová hmotnost betonu [kg/m^3]
m_c	hmotnost cementu [kg]
m_k	hmotnost kameniva [kg]
ČB	čerstvý beton
ZB	zatvrdlý beton

12. Seznam příloh, tabulek a grafů

12.1. Seznam příloh

Statický přehled kvality cementu CEM I 42,5 R CEMEX (leden 2014)

Materiálový list k plastifikační přísadě Mapei Dynamon SX 14

Technický list k plastifikační přísadě CEMEX CX Isoflex 833

12.2. Seznam tabulek

Tabulka 1: Objemové hmotnosti, sypné hmotnosti a tvarové indexy použitých kameniv

Tabulka 2: Měrná hmotnost a měrný povrch dle Blaina popílku Dětmarovice a Počerady a cementu CEM I 42,5 R

Tabulka 3: Složení směsí betonů pevnostní třídy C 40/50

Tabulka 4: Složení směsí betonů pevnostní třídy C 50/60

Tabulka 5: Objemové hmotnosti betonů C 40/50 a jejich konzistence

Tabulka 6: Objemové hmotnosti betonů C 40/50 v zatvrdlém stavu a jejich pevnost v tlaku a statický modul pružnosti v tlaku závislé na době zrání

Tabulka 7: Objemové hmotnosti betonů C 50/60 a jejich konzistence

Tabulka 8: Objemové hmotnosti betonů C 50/60 v zatvrdlém stavu a jejich pevnost v tlaku a statický modul pružnosti v tlaku závislé na době zrání

Tabulka 9: Výsledky provedených zkoušek při použití kompatibilní plastifikační přísady

12.3. Seznam grafů

Graf 1: Křivky zrnitosti kameniv 0-4 mm Žabčice a 8-16 mm Olbramovice

Graf 2: Křivka zrnitosti kameniva 11-22 mm Lomnička

Graf 3: Křivky zrnitosti a rozložení velikosti zrn popílků Dětmarovice a Počerady

Graf 4: Křivka mezerovitosti suché směsi popílek Dětmarovice a CEM I 42,5 R

Graf 5: Křivka mezerovitost suché směsi popílek Počerady a CEM I 42,5 R

Graf 6: Konzistence betonů pevnostní třídy C 40/50 závislá na čase

Graf 7: Objemové hmotnosti betonů pevnostní třídy C 40/50 závislé na době zrání

Graf 8: Pevnosti v tlaku betonů pevnostní třídy C 40/50 závislé na době zrání

Graf 9: Statické moduly pružnosti v tlaku betonů pevnostní třídy C 40/50 závislé na době zrání

Graf 10: Konzistence betonů pevnostní třídy C 50/60 závislá na čase

Graf 11: Objemové hmotnosti betonů pevnostní třídy C 50/60 závislé na době zrání

Graf 12: Pevnosti v tlaku betonů pevnostní třídy C 50/60 závislé na době zrání

Graf 13: Statické moduly pružnosti v tlaku betonů pevnostní třídy C 50/60 závislé na době zrání

Graf 14: Ovlivnění konzistence čerstvého betonu různým množstvím popílku při použití kompatibilní a nekompatibilní přísady

13. Přílohy

CEMEX

Statistický přehled kvality cementu

Dle ČSN EN 197 – 1

Číslo protokolu: 01/2014

Provozovna: CEMEX Czech Republic, s.r.o. Dětmarovice

Cement: CEM I 42,5 R

Období: Leden 2014

		Jednotky	Průměr	Maximum	Minimum	STD	Četnost
Měrný povrch - Blain		cm^2/g	3925	3963	3817	47	9
Zbytek na sítě 0,045		%	8,44	8,88	7,76	0,40	9
Zbytek na sítě 0,090		%	1,54	1,72	1,36	0,13	9
Počátek doby tuhnutí		minut	160	180	150	9,7	9
Konec doby tuhnutí		minut	200	220	180	12	9
Objemová stálost		mm	1,6	3,0	1,0	0,7	9
Obsah H_2O (v/c)		%	26,40	26,52	26,12	0,12	9
Pevnost v ohybu	2 dny	MPa	6,31	6,52	5,99	0,18	9
	28 dní	MPa	9,23	9,55	8,84	0,25	9
Pevnost v tlaku	2 dny	MPa	28,32	29,72	27,28	0,77	9
	28 dní	MPa	54,81	57,04	53,29	1,14	9
Obsah CaO		%	61,40	61,59	61,02	0,17	9
Obsah SO_3		%	2,85	2,94	2,72	0,08	9
Obsah Cl		%	0,066	0,071	0,051	0,007	6
Ztráta žíháním		%	1,72	1,91	1,56	0,12	9
Nerozpustný podíl		%	3,59	3,88	3,30	0,22	9
K_2O		%	0,56	0,58	0,54	---	4
Na_2O		%	0,29	0,29	0,28	---	4
Na_2O eqivalent		%	0,66	0,67	0,65	---	4

V Dětmarovicích 6.3.2014

Jiří Duda
Manažer kvality
CEMEX Czech Republic, s.r.o.
Praha 5, Stodůlky, Siemensova 2716/2, PSČ 155 00
IČ: 27892638, DIČ: CZ27892638
provozovna: Areál EDĚ č.p. 1216, 735 71 Dětmarovice
tel.: 596 539 511, fax: 257 257 685

CEMEX Czech Republic, s.r.o.
Siemensova 2716/2, 155 00 Praha 5 – Stodůlky, tel. (+420) 257 257 400, fax (+420) 257 257 480, www.cemex.cz
IČ: 27892638, DIČ: CZ27892638 Zápis v OR u Městského soudu v Praze, oddíl C, vložka 124693
Bankovní spojení: Raiffeisenbank a.s., č. ú. 5020017857/5500

MAPEI

Dynamon SX 14

Akrylový superplastifikátor optimalizující ztrátu zpracovatelnosti a se vysokou redukcí obsahu vody v betonu

683-9-2003

POPIS

Dynamon SX 14 je nová tekutá superplastifikační přísada pro betony o vysoké kvalitě (nepropustnost, trvanlivost, s vysokou mechanickou odolností) omezující značnou měrou ztráty při zpracování.

Dynamon SX 14 je, mimo jiné, zcela odlišný od tradičních přísad fungujících na bázi naftalenu (SN), nebo melaminu (SM), které jsou kondenzovány prostřednictvím formaldehydu.
Dynamon SX 14 je nová přísada do betonu na bázi nesíťených akrylových polymerů, zcela bez příměsi formaldehydu.

OBLAST VYUŽITÍ

Díky vysoké zpracovatelnosti (třída konzistence S4, nebo S5 podle normy EN 206) dosažitelné pomocí přípravku **Dynamon SX 14** a redukovaného množství vody, zhotovené betonové směsi zajišťují v čerstvém stavu snadnou aplikaci a vyznačují se optimálními mechanickými vlastnostmi po ztvrdnutí.
Dynamon SX 14 je zejména vhodný pro aplikace, při kterých je kladen důraz na minimální zhoršení zpracovatelnosti (dlouhodobá přeprava nebo teplé klima) bez nutnosti ztrát mechanických vlastností.
Nejčastější oblast aplikace přípravku **Dynamon SX 14** je:
Betonová směs o vyšší, či vysoké mechanické pevnosti, nepropustná a trvanlivá podle tříd odolnosti stanovených normou EN 206.

- Hotové betonové směsi o dobrých mechanických vlastnostech a výborných vlastnostech pro přepravu v teplých klimatických podmínkách nebo při zvlášť dlouhých přepravních vzdálenostech.
- Betonové směsi s možností čerpání na dlouhé vzdálenosti.
- Betonové směsi s možností čerpání i prostřednictvím granulometrických oblouků, nebo s nízkými dávkami cementu.

Některé příklady aplikace

Dynamon SX 14 je díky vysoké redukci obsahu vody ve směsi a dobré schopnosti zachování charakteristik nezbytných pro ukládání a schopnosti kompenzovat přítomnost jemných částic ve směsi charakterizován jako ztekucovací přísada zvlášť vhodná pro:

- Nepropustné transportbetony určené pro využití v místech vyššího výskytu agresivních, případně chemických složek (depurační nádrže, digestoře, nádrže, kanalizace, tunely, atd.)
- Transportbetony zachovávající si dobré vlastnosti zpracování (např. při přepravních časech přesahujících 1 hodinu a teplotách vyšších 25°C, třída konzistence S4, nebo S5 podle normy EN 206).
- Transportbetony s vysokou (Rck vyšší 40 MPa) a velmi vysokou pevností (Rck vyšší než 50 MPa)
- Betonové směsi s možností čerpání na větší vzdálenosti.
- Betonové směsi s možností čerpání s nízkými dávkami cementu.

TECHNICKÉ CHARAKTERISTIKY

Dynamon SX14 je 20% vodný roztok na bázi akrylových polymerů, bez příměsi formaldehydu, se schopností účinně dispergovat granule cementu (viz tabulka „Technické údaje") pomocí druhotných komponentů, schopných vylepšit značnou měrou přilnavost a možnost čerpání betonové směsi.
Působení přísady **Dynamon SX 14** může být vhodně využito třemi způsoby:

A) pro snížení pouze obsahu vody u betonových směsí bez přísad, za zachování stejných charakteristik zpracovatelnosti: bylo zaznamenáno zvýšení mechanické pevnosti, snížení propustnosti vody a zvýšení trvanlivosti (viz tabulka „Údaje o vlastnostech");
B) pro zvýšení zpracovatelnosti u kvalitních betonových směsí bez přísad (mechanická pevnost, nepropustnost, trvanlivost)

Dynamon SX 14

a špatné aplikovatelnosti (plastická, nebo suchá betonová směs);

C) pro snížení jak obsahu vody, tak cementu (v odpovídajícím poměru) tak, aby nedošlo k změněvztahu a/c (a tudíž i vlastností) a zpracovatelnosti betonové směsi bez přísad: v tomto případě byly zaznamenány výhody technického charakteru díky úpravě vlhkosti, nižší deformaci viskozity, menší tvorbě hydratačního tepla, atd. Tento způsob využití se doporučuje zejména pro betonové směsi s vysokým dávkováním cementu (více než 350 kg/m^3).

Jakýkoli z těchto důvodů vede k využití této přísady (zlepšení vlastností, zvýšení zpracovatelnosti, snížení dávkování cementu); výhodu dosaženou použitím přísady **Dymanon SX 14** je možno „formovat" jeho přesným dávkováním v intervalu 0,5% - 1,5% z hmotnosti cementu. Samozřejmě platí – čím vyšší dávka, tím vyšší účinek.

I efekt zachování zpracovatelnosti (i při delších časech při přepravě apod.) se zvyšuje úměrně s dávkováním přípravku.

ZPŮSOB VYUŽITÍ

S rozdílem vzhledem k tradičním plastifikátorům (SN, nebo SM), jejichž účinek je nerovnoměrný, je působení přípravku **Dynamon SX 14** tím účinnější, čím později je aplikován do směsi. **Dynamon SX 14** vyvíjí vždy maximální ztekucení směsi, a to při jakémkoli způsobu dodání vody do směsi (na začátku, či na konci přidání vody do směsi).

Vlastnosti přísady **Dynamon SX 14** ve srovnání s vlastnostmi tradičních plastfikátorů vyvinutých na bázi sulfátů naftalenu nebo melaminu.

Díky zvláštnímu chemickému složení (nesířené akrylové polymery) jsou kvalitativní výsledky po použití přípravku **Dynamon SX 14** o mnoho lepší než výsledky dosažené pomocí tradičních plastifikátorů.

Betonové směsi srovnatelné kvality a zpracovatelnosti

Hlavní výhody spojené s použitím přípravku **Dynamon SX 14** v porovnání s plastifikátory na bázi naftalenu a melaminu spočívají v:

- úspoře dávkovaného množství přípravku **Dynamon SX 14** (úspora cca 30% vůči tradičním přípravkům) nezbytného pro získání betonové směsi, která má v momentě namíchání stejnou zpracovatelnost přísadového konglomerátu jako u tradičních přísad.
- O mnoho nižší ztrátu zpracovatelnosti (v porovnání s tradičními přísadami) v důsledku přepravy z betonárny na staveniště.

Betonové směsi se stejným poměrem dávkování

Díky vyššímu rozptylovému účinku přípravku **Dynamon SX 14** ve směsi je umožněno za shodných podmínek dávkování jako je tomu u tradičních přísad na bázi naftalenu nebo melaminu zajistit větší redukci obsahu vody ve směsi.
Tato charakteristika může být výhodně využita pro jednotlivé účely:

- získat trvanlivé betonové směsi o optimálních mechanických vlastnostech tam, kde za sníženého obsahu vody ve směsi nenásleduje snížení dávkovaného množství cementu.
- Následné snížení poměru voda/cement se pak podílí na zvýšení mechanických vlastností (pevnosti materiálu) a trvanlivosti. redukovat nejen hydratační teplo u masivních struktur, ale i vliv dávky vody při zachování zpracovatelnosti (stejný poměr voda/cement).
- Současné snížení množství vody a obsahu cementu ve směsi umožňují redukovat teplo hydratace, jakož i smršťování a viskózní deformaci, což jsou hlavní charakteristiky cementové matrice

Mimo jiné, při shodném poměru dávkování umožňuje přísada **Dynamon SX 14** přípravu betonových směsí, jejichž hlavní charakteristikou je významně nižší ztráta zpracovatelnosti, nežli je tomu v porovnání s tradičními přísadami na bázi naftaleu, nebo melaminu.

Kompatibilita s jinými výrobky

Přísada **Dynamon SX 14** je kompatibilní s ostatními výrobky pro přípravu speciálních betonových směsí, a to zejména s těmito:

- provzdušňovací přísada **Mapeplast PT 1** pro přípravu betonových směsí odolných mrazovým cyklům
- prášková přísada **Mapeplast SF** na bázi jemného oxidu křemičitého pro výrobu vysoce jakostních betonů s vysokou mechanickou pevností, nepropustností a trvanlivostí expanzní činidlo **Expancrete** pro výrobu betonových směsí s kompenzovaným smrštěním
- Popílek
- Odbedňovací přípravky **DMA 1000**, **DMA 2000** a **DMA 3000**
- **Mapecure E** a **Mapecure S** pro ochranu proti rychlému odpařování vody z povrchu betonu (např.podlahy).

SPOTŘEBA

Dávkování v objemu
Od 0,5 do 1,5 litru na každých 100 kg cementu.

BALENÍ

Dodává se v 200 l sudech a kontejnerech o objemu 1000 l.
Na objednávku lze dodat i volně balené.

PODMÍNKY PRO SKLADOVÁNÍ

Skladovat v uzavřených nádobách, chránit před působením mrazu a nevystavovat slunečnímu záření.

UPOZORNĚNÍ

Výše uvedené návody a předpisy vycházejí z našich nejlepších zkušeností a je nutno je dodržovat. Tyto návody považujeme za indikativní a musí být potvrzeny praktickým použitím výrobku. Z tohoto důvodu doporučujeme předem posoudit vhodnost výrobku pro předpokládané použití. Spotřebitel přejímá veškerou zodpovědnost za případné následky vyplývající z používání výrobku.

TECHNICKÉ ÚDAJE

IDENTIFIKAČNÍ ÚDAJE O VÝROBKU	
Konzistence	tekutá
Barva	jantarová
Objemová hmotnost	1060 ± 20 kg/m³ při + 20°C
Obsah sušiny	21 ± 1,1%
Hlavní účinek	zvýšení a zachování zpracovatelnosti redukce obsahu vody
Vedlejší účinek	zlepšení čerpatelnosti
Klasifikace	vysoce účinný superplastifikátor dle UNI EN 934-2
Obsah chloridů	nejsou obsaženy
Skladovatelnost	12 měsíců v původních uzavřených obalech. Chránit před mrazem!
Klasifikace třídy nebezpečnosti dle směrnice 99/45 CE	žádná
Hořlavost	nehořlavý
Celní zařazení	3824 40 00

VLIV DYNAMONU SX 14 NA BETONOVOU SMĚS*			
Dávkování přísady v % z dávky cementu	0	0,7	1
vodní součinitel	0,6	0,5	0,44
Redukce vody [%]	-	17	27
Počáteční sednutí [mm]	200	220	220
Sednutí po 30 min. [mm]	140	220	220
Sednutí po 1 hod. [mm]	60	200	200
Rcm po 1 dni při +20°C [MPa]	8	15	17
Rcm po 3 dnech při +20°C [MPa]	16	28	34
Rcm po 7 dnech při +20°C [MPa]	24	40	47
Rcm po 28 dnech při +20°C [MPa]	35	50	60
Rck [MPa]	30	45	55
Hloubka penetrace vodou [mm] dle EN 12390/8	25	11	3
Odolnost dle EN 206-1	X0	X0, XC1, XC2, XC3, XA1, XF1, XD1, XD2	X0, XC1, XC2 XC3, XC4, XS1, XD1, XD2, XA1, XA2

*Tyto údaje jsou míněny jako příklady průměrných hodnot získaných u betonových směsí s 300 kg/m³ cementu CEM II/A-L 42, 5R s těženým kamenivem (maximální průměr 20 mm). Pro třídy odolnosti XF1,XF2,XF3,XF4 musí být beton provzdušněn formou mikropórů v objemu 5%

SUPERPLASTIFIKAČNÍ PŘÍSADA DO BETONU

Popis výrobku:

ISOFLEX 833 je superplastifikační přísada do betonových směsí cíleně regulující tuhnutí čerstvého betonu na lignosulfonanové a multikarboxylové (PCE) bázi. Působí na rozptýlení jemných součástí betonové směsi a na její hutnost, čímž umožňuje výrobu plastických a homogenních betonů. Přísada je v souladu s normou ČSN EN 934-2:2009+A1:2012.

Vlastnosti

- Barva: Kapalina tmavě hnědé barvy
- Hustota při 20°C : 1,11 ± 0,03 g/cm^3
- Obsah sušiny: 33 ± 2 %
- pH : 5,0 +/- 1,0
- Homogenita: homogenní při použití
- Obsah chloridů ≤ 0,1 % hm.
- Obsah alkálií (ekvivalentní obsah Na_2O) ≤ 1,5 % hm.

Použití

Doporučené dávkování 0,4 – 1,5 % z hmotnosti cementu.

Optimální dávkování je třeba určit v rámci průkazních zkoušek dle ČSN EN 206-1 změna Z4. Při dávkách přísady 0,4 – 1,5 kg na 100 kg cementu je možné snížení záměsové vody betonových směsí o 10 - 20 % bez zhoršení jejich zpracovatelnosti.

- CX ISOFLEX 833 zlepšuje čerpatelnost betonových směsí a výrazně snižuje jejich sklon k rozměšování (směs si zachovává soudržnost bez segregace kameniva a odlučování vody).
- Umožňuje výrobu plastických betonů jednotlivých pevnostních tříd ze směsí tekuté konzistence při nižší spotřebě cementu.
- Zlepšuje nejen pevnost betonu, ale též i vodotěsnost a odolnost betonu vůči klimatickým i chemickým vlivům.
- Zlepšuje vzhled betonu, nemění jeho barvu a nevytváří výkvěty. Je vhodný i pro pohledový beton.
- Nezvyšuje obsah vzduchu v čerstvém betonu a nezpůsobuje prodloužení tuhnutí betonu.

Skladování:

V uzavřených plastových obalech je skladovatelnost 1 rok. Chránit před přímým slunečním zářením. Nesmí zmrznout! Výrobek je nehořlavý. Otevřená balení spotřebujte co nejdříve.

Balení a dodávání:

- v návratných a zálohovaných 1000 litrových kontejnerech
- v nevratných 200 litrových PE sudech
- v nevratných malých PE obalech po 20 nebo 50 litrech

Bezpečnost a ochrana zdraví při práci:

Výrobek není toxický, avšak je nutno jej považovat za látku zdraví škodlivou, proto je třeba při práci s ním respektovat hygienické požadavky. V případě styku přísady s kůží dotyčné místo opláchněte vodou, při zasažení očí oči při otevřených víčkách vypláchněte tekoucí vodou, případně navštivte odborného lékaře. Další informace viz Bezpečnostní list.

Odstraňování odpadu – dle zákona o odpadech č. 185/2001 Sb.

Výrobce:
CEMEX Czech Republic, s.r.o.
Siemensova 2716/2
155 00 Praha 5
Tel: 257 257 400