VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ
INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

BETONY S ELEKTRÁRENSKÝMI POPÍLKY PRO PROSTŘEDÍ XF3 A XF4

CONCRETE WITH FLY ASH FOR XF3 AND XF4

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Jiří Máša
AUTHOR

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

BRNO 2018

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	Jiří Máša
Název	Betony s elektrárenskými popílky pro prostředí XF3 a XF4
Vedoucí práce	prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
Datum zadání	30. 11. 2017
Datum odevzdání	25. 5. 2018

V Brně dne 30. 11. 2017

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

PODKLADY A LITERATURA

- internetové zdroje z tuzemských a zahraničních konferencí, odborných časopisů a knih
- diplomové práce publikované na VUT FAST za posledních 5 let
- tuzemské a zahraniční odborné časopisy

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Využívání vysokoteplotních elektrárenských popílků v betonech jako částečná náhrada cementu je běžné již cca 50 roků pro známé pozitivní přínosy pro redukci vývoje hydratačních tepel, eliminaci vzniku smršťovacích trhlin či pozitivní dopad na dlouhodobé pevnosti. Již výrazně nižší rozsah využívání je pro betony vystavené cyklickému zmrazování za přítomnosti vody či spolupůsobení chemických rozmrazovacích látek tzn. prostředí označované XF3 a 4. V ČR se v oblasti dopravních staveb využívá pro posouzení kvalitativních požadavků na betony směrnic ŘSD ČR (TKP 17, 18), kde je užívání el. Popílků pro prostředí XF v podstatě zakázáno. V USA či v Německu taková omezení neplatí, naopak zde jsou popílky úspěšně pro tyto typy konstrukcí používány.

Cílem Vaší práce bude sestavit obšírné rešerše z odborných publikací z vyspělých zemí, které popisují betony s využíváním el. popílků, hlavně v oblasti dopravních staveb. Zjistěte požadavky na kvalitativní vlastnosti el. Popílků a následně betonů, vzorové receptury a výsledné parametry. Dále posuďte možnosti tzv. vnitřního ošetřování a dopady na hutnost struktury cementového kamene vlivem vznikajících C-S-H gelů.

V experimentální části navrhněte betony třídy C30/37 XF3 neprovzdušněný a C30/37 XF4 provzdušněný, konzistence S3. Na zkušebních krychlích 150x150x150 cm ověřte 28 a 60 denní pevnosti, odolnosti proti CHRL a mrazuvzdornosti betonů ve stáří 28 a 60 dnů. Dále na těchto recepturách ověřte dopady 20 a 30 % náhrady cementu CEM I 42,5 vysokoteplotním popílkem z produkce elektrárny Opatovice a porovnejte stejné vlastnosti. Posuďte nasákavosti cementového kamene a rozdíly v mikrostruktuře betonů.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).

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

prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

Vedoucí bakalářské práce

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá betony s použitím elektrárenského popílku, jako aktivní příměsi pro prostředí XF3 a XF4. Bakalářská práce je rozdělena na dvě části. První, teoretická část je zaměřena na základní informace o elektrárenských popílcích a řeší dosavadní poznatky o betonech s částečnou náhradou popílku a posuzuje následně jejich vlastnosti jak v čerstvém, tak v zatvrdlém stavu. Dále jsou uvedeny světové poznatky chování těchto betonů. Druhá část se zabývá experimentálním ověřením těchto poznatků obsažených v teoretické části. Cílem této práce je ověřit trvanlivost betonu s popílkem pro prostředí XF3 a XF4.

Klíčová slova

Beton, popílek, prostředí XF, příměs, náhrada, trvanlivost

Abstract

This bachelor thesis deals with concrete using fly ash as an active ingredient for environment XF3 and XF4. Bachelor thesis is divided into two parts. The first, theoretical part, is focused on basic information on power generation of fly ashes and solves the existing knowledge about concrete with partial asphalt replacement and then evaluates their properties both in fresh and condensed state. Below are the world-wide knowledge of the behavior of these concrete. The second part deals with the experimental verification of these findings contained in the theoretical part. The aim of this work is to verify the durability of concrete with fly ash for XF3 and XF4 environments.

Keywords

Concrete, fly ash, environment XF, admixture, replacement, durability

Bibliografická citace VŠKP

Jiří Máša *Betony s elektrárenskými popílky pro prostředí XF3 a XF4.* Brno, 2018. 85 s., 8 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 samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 24. 5. 2018

Jiří Máša

autor práce

Poděkování

Touto cestou bych rád poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Rudolfu Helovi, CSc., za odborné rady a pedagogický dozor, při zpracování bakalářské práce. Dále mé poděkování patří vybraným pracovníkům ústavu THD a také centra AdMaS, a to Ing. Martinu Ťažkému a Vladimíru Klímovi, kteří mi byli nápomocní především při zpracování praktické části. V neposlední řadě bych rád také poděkoval Pavlovi Zrzavému z firmy FEROBET s.r.o, za odbornou konzultaci a rady v rámci bakalářské práce.

V Brně 2018 Jiří Máša

Obsah

Úvod ... 11
I. Teoretická část ... 12
1 Historický vývoj použití popílku ... 12
2 Současné využívání popílků ... 13
3 Popílek ... 14
3.1 Vstupní suroviny - uhlí ... 14
3.2 Spalovací zařízení ... 15
3.2.1 Roštová ohniště ... 15
3.2.2 Prášková ohniště ... 15
3.2.3 Fluidní ohniště ... 18
3.3 Odloučení tuhých částic ve spalinách ... 19
3.3.1 Mechanické odlučovače ... 20
3.3.2 Mokré odlučovače ... 21
3.3.3 Elektrostatické odlučovače ... 21
3.4 Vlastnosti popílků ... 22
3.4.1 Chemické složení ... 22
3.4.2 Minerální složení ... 23
3.4.3 Fyzikální vlastnosti ... 24
3.4.4 Index účinnosti ... 24
3.5 Požadavky dle legislativy ... 25
3.5.1 Koncepce k-hodnoty ... 26
4 Použití popílků ... 26
4.1. Popílek jako příměs ... 26
4.1.1 Latentní hydraulicita ... 28
4.2 Popílek do cementu ... 28
4.3 Transportbeton ... 29
5 Vlastnosti betonu s popílkem ... 29
5.1 Čerstvý beton ... 29
5.1.1 Zpracovatelnost ... 30
5.1.2 Redukce vody ... 30
5.2 Zatvrdlý beton ... 30
5.2.1 Pevnost betonu ... 31
5.2.2 Vznik trhlin na základě vývoje hydratačního tepla ... 32
5.3 Karbonatace betonu ... 33
5.4 Kontaktní zóna ... 35
6 Prostředí XF ... 36
7 Betony s popílkem v oblasti dopravních staveb ... 38
7.1 Beton s vysokou odolností proti mrazu a CHRL ... 38
7.1.1 Betony s vysokou odolností proti mrazu ... 38

7.1.2 Beton s vysokou odolností proti CHRL 38
7.2 Beton vystavený extrémním klimatickým podmínkám 39
7.2.1 Beton 39
7.2.2 Zkušební postup 40
7.2.3 Výsledky 41
7.3 Vysoce odolný beton – odolnost proti síranům 42
7.4 Podkladní vrstvy vozovky 43
7.5 Beton na kryty vozovek 44
II. Praktická část 48
8 Cíl praktické části 48
9 Metodika práce 48
10 Receptury 50
11 Suroviny 52
11.1 Kamenivo 52
11.1.1 Sítový rozbor 54
11.2 Cement 55
11.3 Popílek 56
11.4 Voda 57
11.5 Přísady 57
11.5.1 Plastifikační přísady 57
11.5.2 Provzdušovací přísady 58
12 Zkoušení čerstvého betonu dle ČSN EN 12350 58
12.1 ČSN EN 12350 – Část 2: Zkouška sednutím 58
12.1.1 Podstata zkoušky 58
12.1.2 Pomůcky 58
12.1.3 Postup 58
12.1.3 Vyhodnocení zkoušky 59
12.2 ČSN EN 12350 – Část 6: Objemová hmotnost 60
12.2.1 Podstata zkoušky 60
12.2.2 Pomůcky 60
12.2.3 Postup 60
12.2.3 Vyhodnocení zkoušky 60
12.3 ČSN EN 12350 – Část 7: Obsah vzduchu – tlaková metoda 60
12.3.1 Podstata zkoušky 60
12.3.2 Pomůcky 60
12.3.3 Postup 61
12.4 Vyhodnocení zkoušek čerstvého betonu 61
12.4.1 C 30/37, S3 61
12.4.2 C 30/37, S4 62
12.5 Diskuze zkoušek v čerstvém stavu 64

13 Zkoušení zatvrdlého betonu dle ČSN EN 12390 65
13.1 ČSN EN 12390 – Část 3: Pevnost v tlaku 65
13.1.1 Podstata zkoušky 65
13.1.2 Pomůcky 65
13.1.3 Postup 65
13.1.4 Vyhodnocení zkoušky 65
13.2 ČSN EN 12390 – Část 5: Pevnost v tahu ohybem (čtyřbodový) 66
13.2.1 Podstata zkoušky 66
13.2.2 Zkušební zařízení 66
13.3.4 Vyhodnocení zkoušky 66
13.3 ČSN 73 1326: Stanovení odolnosti cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek 66
13.3.1 Podstata zkoušky 66
13.3.2 Zkušební vzorky 67
13.3.3 Pomůcky 67
13.3.4 Postup 67
13.3.5 Vyhodnocení 67
13.4 ČSN 73 1322: Stanovení mrazuvzdornosti betonu 68
13.4.1 Podstata zkoušky 68
13.4.2 Zkušební vzorky 68
13.4.3 Zkušební zařízení 68
13.4.4 Postup 68
13.5 Vyhodnocení zkoušek zatvrdlého betonu 69
13.5.1 Objemová hmotnost 69
13.5.2 Pevnost v tlaku 70
13.5.3 CHRL 72
13.5.4 Mrazuvzdornost 73
13.6 Diskuze zkoušek v zatvrdlém stavu 74
14 Závěr 78
15 Seznam použité literatury 80
16 Seznam použitých norem 81
17 Seznam zkratek 82
18 Seznam obrázků 83
19 Seznam tabulek 84
20 Seznam grafů 85
21 Seznam příloh 85

Úvod

S ohledem na aktuální globální ekonomickou a environmentální situaci je běžné v mnoha průmyslových odvětvích využívání alternativních surovinových, či energetických zdrojů. Výroba stavebních hmot není v tomto ohledu žádnou výjimkou, ba naopak vzhledem k „velkotonážní“ produkci nejrůznějších typů materiálů, především na silikátové bázi, je stále třeba postupovat kupředu a hledat nové alternativy a varianty. Odstranění emisí oxidu uhličitého lze dosáhnout použitím méně energeticky náročných materiálů ve stavebnictví.

Většina betonových konstrukcí se nepotýká s problémem nízké pevnosti, ale problém nastává v trvanlivosti betonových konstrukcí, proto je používání popílků čím dál více diskutované téma. Používání popílku jako příměs do betonu, je ve vyspělejších zemí (Německo, Rakousko, USA) běžnou praxí. Bohužel v České republice používání popílku jako příměsi do betonu pro silniční betony poměrně dost omezuje legislativa. Změnu by mohla přinést ekologická i ekonomická situace. Dalším podstatným aspektem by mohla být očekávaná legislativa v České republice, která by měla zakazovat skladování vedlejších energetických produktů, tedy i popílku. Odpadní produkty používané jako náhrada stávajících surovin vedou k nižší spotřebě energie a úsporám nákladů. Nejvíce energeticky náročným produktem v oblasti betonu je cement. Při redukci použití cementu v betonové směsi lze tedy snížit množství potřebného cementu. Z ekonomického hlediska je cement přibližně 20krát dražší než popílek, který je vedlejším energetickým produktem. Nahrazením části cementu popílkem tak můžeme docílit zlepšení vlastností betonu v čerstvém i zatvrdlém stavu, ale také snížení nákladů na samotný produkt. V dnešní době, kdy se vyvíjí stále nové materiály, je cena výsledného produktu důležitým aspektem.

I. Teoretická část

1 Historický vývoj použití popílku

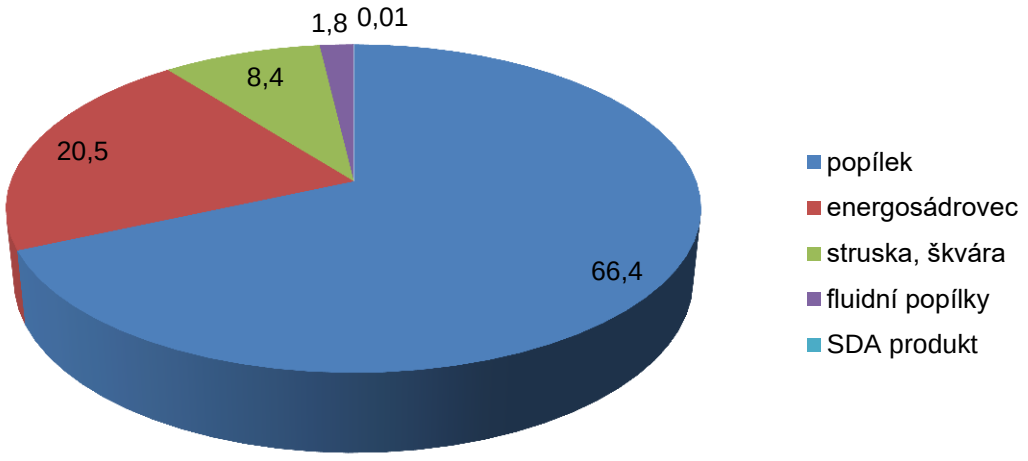
První poznatky o použití popílku jako příměsi do betonu byly zaznamenány v první polovině minulého století, kdy prvním impulsem bylo zvyšující se množství popílků ze spalování uhlí v elektrárnách (Evropa, Amerika). Navrhovalo se jejich použití jako náhrada za cement, jako příměs do pórobetonů, atd. Průkopníkem popílku v betonu se staly Spojené státy americké, když jej použily v 50. letech při stavbě přehrady Hungry Horse v Montaně, v přibližně 3 mil. m^3 betonu. V Evropě to bylo právě Německo, které zpočátku používalo popílek z elektráren na černé uhlí, které splňovalo kvalitativní i kvantitativní požadavky. Ve větší míře se začal popílek používat až v 60. letech 20. století. Během dalších 10 let, v návaznosti na ekologickou situaci v Německu se používání popílku stalo nutností. Po velkém úsilí bylo dosaženo dnes viditelného úspěchu při přesvědčování potenciálních uživatelů k vypracování potřebné logistické infrastruktury a zpřístupnění trhu pro popílek. Ze začátku bylo potřeba vyřešit problém, kterým byla stavební legislativa, nebylo zde totiž upraveno použití popílku a nebylo zohledněno ani ve stavebně-technických normách. To platilo zejména pro použití popílku v betonu, který v té době představoval důležitý aplikační trh. Úspěchu bylo dosaženo dne 29. června 1970, kdy spolková země Severní Porýní-Vestfálsko, jako vrchní úřad stavebního dozoru, udělil firmě H. Keller, povolení na použití popílku z elektrárny Rheinstahl v Marl jako nesamostatného pojiva. Nahradit část cementu popílkem bylo z hospodářského hlediska rozhodujícím faktorem. Schválení popílku jako složky pojiva udělalo z popílku látku zajímavou a žádanou pro výrobce betonu. Následně byl příznivý vývoj velmi rychle pozastaven, když spolkové země část svých pravomocí v záležitostech stavebního dozoru převedly na Ústav stavební techniky, který předběžně nepovolil započítávat popílek jako nesamostatné pojivo. Do roku 1979 bylo pro popílky uděleno až 31 kontrolních značek. Nový předpis pro zařazení popílku jako částečné náhrady pojiva byl vydán až v roce 1983, který bohužel zaostával za úrovní povolení z roku 1970. Poté do roku 1995 bylo provedeno celkem 85 kontrolních značek pro popílky na základě „Směrnic pro udělení kontrolních značek pro černouhelný popílek“. Na zakotvení dnes platné

započitatelné k-hodnoty byly provedeny další rozsáhlé výzkumné práce. Se zavedením EN 450-1 Úřadem stavebního dozoru v roce 1996 se popílek stal normovanou stavební látkou. [1]

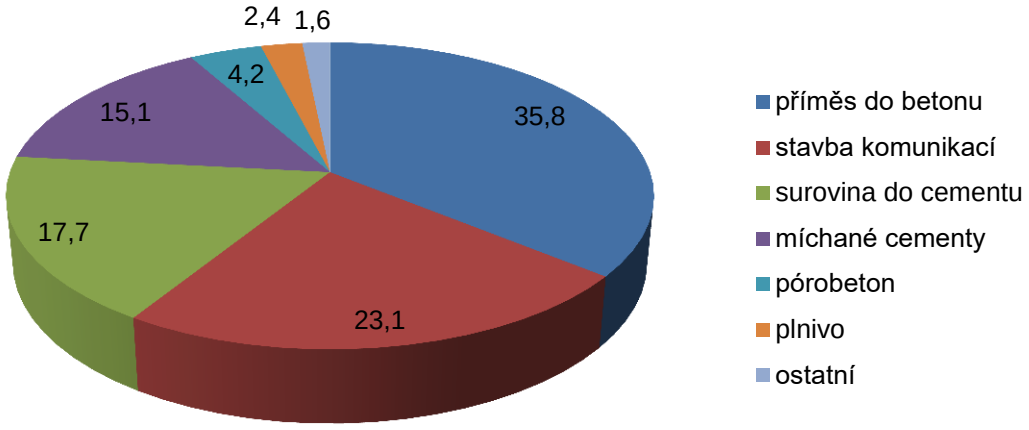
2 Současné využívání popílků

V roce 2009 se v původních 15 zemích EU vyprodukovalo 52 miliónů tun energetických produktů. Z toho bylo využito 15,4 mil. tun popílku ve stavebním průmyslu (především do betonu, cementu, pří stavbách komunikací, atd.). Největší část popílku se v současné době využívá pro zahlazování následků důlní činnosti (rekultivace). Z této produkce bylo jako příměsi do betonu využito více než 6 miliónů tun popílku.

Na Obr. 2 je znázorněno poměrné využití popílků v roce 2009. Největší část popílku je využívaná jako příměs do betonu. Další podstatná část popílku je zužitkována do konstrukcí silničních podkladových vrstev. Třetí největší podíl popílku je používaný jako část vstupní suroviny při výrobě cementového slínku a menší část jako složka do různých cementů. Menší část popílku se používá na výrobu betonových tvarovek (pórobeton) a jiné. [1]



Obr. 1 Poměr produkce jednotlivých druhů energetických produktů v EU (statistika ECOBA) [1]



Obr. 2 Použití popílku ve stavebním průmyslu v Evropě v roce 2009 (statistika ECOBA) [1]

3 Popílek

Popílek je nejjemnější frakce zbytku ze spalování uhlí o zrnitosti 0–1 mm, který je zachytáván v odlučovačích. Z celkového objemu energetického odpadu ze spalování fosilních paliv tvoří cca 75–85 %. Je to heterogenní materiál tvořený částicemi s rozdílnými fyzikálními, chemickými, mineralogickými, morfologickými a technologickými vlastnostmi, které jsou ovlivňované kvalitou spalovaného uhlí a technologií spalovacího procesu. Tuhé odpady, které souvisí se spalovacím procesem, anebo čištěním kouřových plynů, se označují jako vedlejší energetické produkty. Patří sem:

- popel, který obsahuje popílek a škváru,
- energosádrovec – produkt mokré vápencové vypírky kouřových plynů,
- produkt polosuché metody odsíření kouřových plynů,
- produkt spalování uhlí ve fluidních kotlech s odsířením,
- produkt suché aditivní metody odsíření. [2]

3.1 Vstupní suroviny - uhlí

Ložiska černého uhlí vznikala převážně v době karbonu před 285 až 360 miliony let. Uhlí je nehomogenní, koloidní, tuhá, přírodní hornina, která vznikla přeměnou organických látek, převážně dřevnatého rostlinného materiálu.

Po biochemickém rozkladu byly tyto látky převrstveny usazeninami zabraňujícími přístup vzduchu, takže zuhelnatěly.

Základní vlastnosti uhlí a jeho výhřevnost závisí na intenzitě a době procesu karbonifikace. Čím déle trval proces zuhelňování, tím větší je zastoupení uhlíku v něm. Nejstarším uhlím je antracit (90–95 % C), mladším je černé uhlí (80–90 % C) a za nejmladší se považuje hnědé uhlí (70 % C), lignin (60 % C) a rašelina (50 % C). Kvalita uhlí závisí na obsahu hořlaviny, popeloviny a vody. Nejsou známa dvě ložiska uhlí, která by poskytovala kvalitativně shodné palivo. [2]

3.2 Spalovací zařízení

Významný vliv na vazbu prvků do popelovin má způsob spalovacích procesů. Spalovací procesy v elektrárnách probíhají v různých ohništích:

- Roštová
- Prášková
- Fluidní [2]

3.2.1 Roštová ohniště

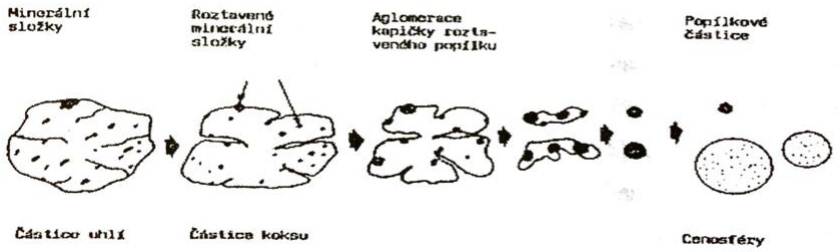
V současné době jsou téměř vytlačeny práškovými ohništi, jelikož jejich výkon je omezen konstrukčními podmínkami. Spalují se kusová tuhá paliva v požadované tloušťce vrstvy, aby byl zajištěn dostatečný přívod vzduchu, který je nezbytný pro správné spalování. Tuhé zbytky po spalování se zachycují právě na roštu. [2]

3.2.2 Prášková ohniště

Dnes asi nejpoužívanější způsob spalování. Uhlí je spalováno ve formě úhelného prášku, který je vháněn hořáky do spalovacího prostoru. Uhlí je před samotným spalováním pomleto, a tím docílíme zvětšení měrného povrchu než u běžného tříděného uhlí.

Prášková ohniště dále dělíme na výtavná a granulační podle způsobu vypouštění strusky. Podmínkou výtavného procesu je udržení vyšší teploty v ohništi, než je teplota tečení popelovin. Tímto docílíme toho, aby se zbytky po spálení paliva shromažďovaly na dně ohniště ve formě tekuté strusky. Volbou vhodného paliva docílíme vysokých spalovacích teplot. Další možností je jemnost mletí, vysušení paliva nebo přísun vzduchu. V případě granulačního ohniště

chceme dosáhnout opaku, tedy aby nedocházelo k tvorbě tekuté strusky. Toho docílíme udržování teploty v rozmezí 1100 až 1500 °C podle jemnosti a druhu použitého paliva. Vzniká tuhá škvára, která se po vychlazení hydraulicky nebo mechanicky odvádí ze dna ohniště. Škvára obsahuje 15 až 25 % popelovin, které jsou obsaženy v uhlí. Zbytek tvoří jemná zrna popílku, která odcházejí z ohniště přes odlučovače do komína. [2]

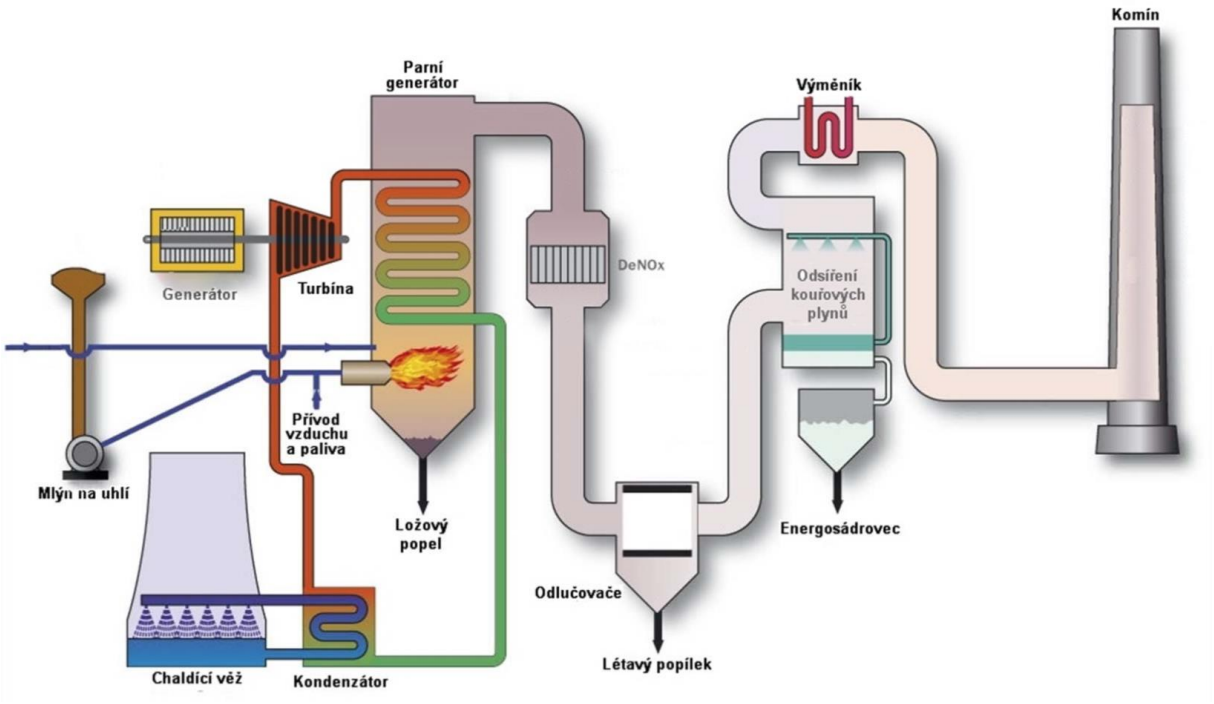


Obr. 3 Vznik popílku [2]

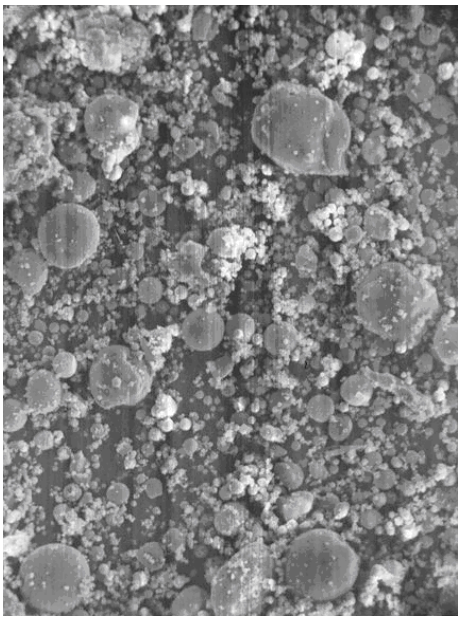
3.2.2.1 Charakteristika popílku z práškových ohnišť

V první fázi dochází k rozkladu natavování původních minerálních složek, které tvoří samostatné příměsi nebo jsou jemně dispergovány v uhelné hmotě a dosahují velikosti okolo 2 μm. Roztavené minerální fáze zůstávají ve formě diskrétních taveninových kapek na povrchu zkoksovatělých částic. Tyto částice jsou taveninou nesmáčitelné. Během hoření postupně dochází k aglomeraci jednotlivých roztavitelných kapek. Laboratorní experimenty ukazují, že při spalování černého uhlí vzniká přibližně pět částic popílku.

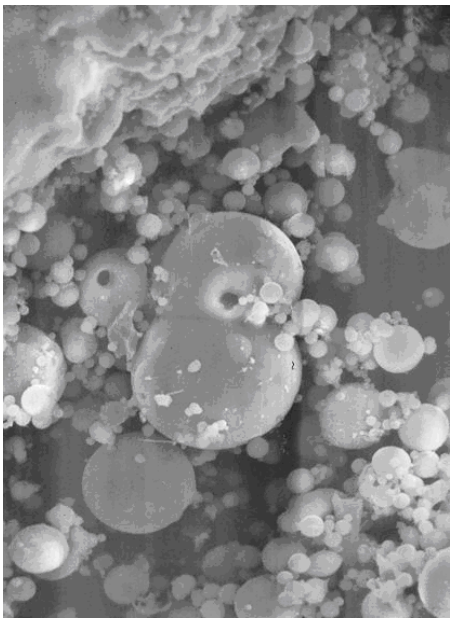
Charakter popílku je do značné míry ovlivňován fázovým složením popelovin obsažených v uhelné hmotě. Převážnou část popelovin obsažených v běžných uhlích tvoří jílové minerály, křemen, karbonáty a pyrit. Minerální fáze tvořící popeloviny podléhají při hoření dalekosáhlým změnám, které zahrnují rozkladné tavící, aglomerační, kondenzační a sublimační procesy. Chemické a strukturální změny minerálních fází zahrnují procesy termického rozkladu a oxidačně redukční reakce. [2]



Obr. 4 Vysokoteplotní způsob spalování [3]



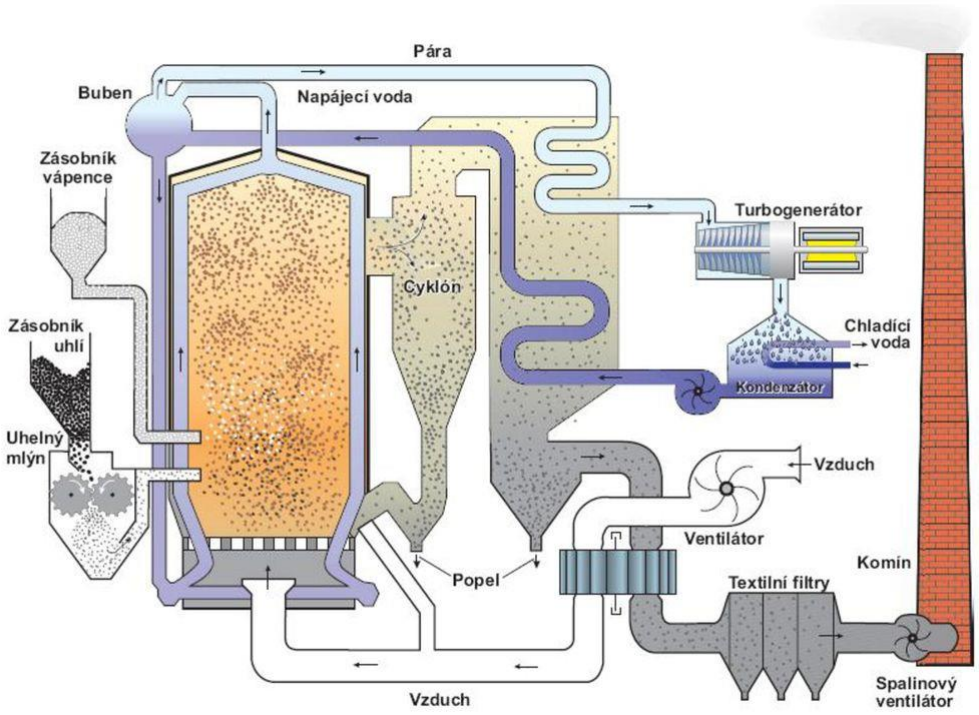
Obr. 5 Vysokoteplotní popílek zvětšení 300x [4]



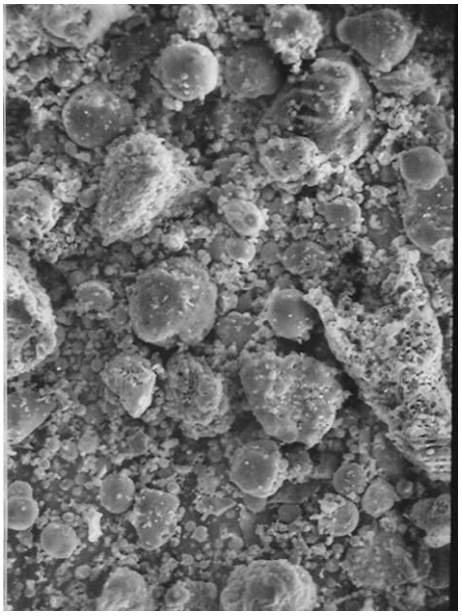
Obr. 6 Vysokoteplotní popílek zvětšení 1500x [4]

3.2.3 Fluidní ohniště

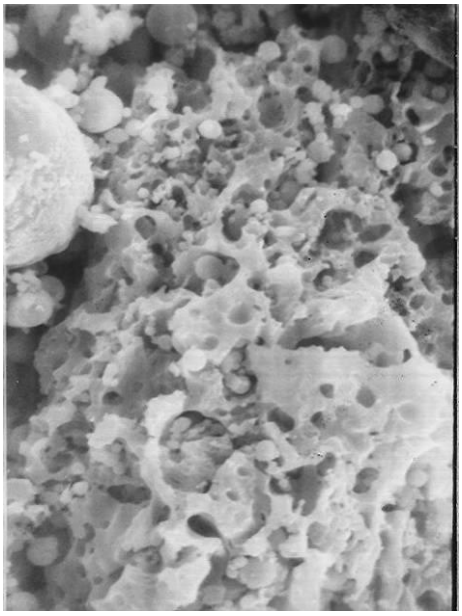
Spalují drcené palivo vytvořené vzestupným proudem spalovacího vzduchu a vznikajících spalin tak, že zrna paliva se vyhoříváním postupně zmenšují. Vznikající popílek se vynášen do určité výšky, kdy vlivem rozšiřujícího se průřezu ohniště poklesne rychlost nosného média na hodnotu rychlosti vznosu. Přiváděné palivo se spolu se zrny popílku rozvrství podle hmotnosti zrn do různých výšek. Částice neustále víří kolem své rovnovážné polohy. Tuhé zbytky po spálení, které zůstávají v ohništi ve formě sypkého popílku, se nesmí spékat. Nízké teploty ve fluidním lůžku je dosaženo použitím paliva s nízkou výhřevností a přiváděným vzduchem. [2]



Obr. 7 Fluidní způsob spalování [3]



Obr. 8 Fluidní popílek zvětšení 300x [4]



Obr. 9 Fluidní popílek zvětšení 1500x [4]

3.3 Odloučení tuhých částic ve spalinách

Odpadní plyny po spalovacích procesech je nutné čistit, tzn. zbavovat je nežádoucích tuhých částic a příměsí. Zachycení tuhých částic je velmi důležité, protože na pevné částice jsou vázány toxické těžké kovy a karcinogenní látky z produktů nedokonalého spalování.

Pro tuhé částice se v technické praxi používají tyto názvy:

- Dým – jemné částice o velikosti 0,1–1,0 μm vzniklé při oxidačních procesech kondenzací látek nebo z plynné fáze chemických reakcí.
- Kouř – jemné částice o velikosti 0,01–0,5 μm vzniklé nedokonalým spalováním, obsahuje převážně uhlík.
- Popílek – úlet z ohnišť spalovacích zařízení o velikosti 1–100 μm.
- Aerosol – disperzní soustava jemných částic o velikosti 0,01–1,0 μm v plynu.
- Prach – částice vzniklé převážně mechanickým způsobem.

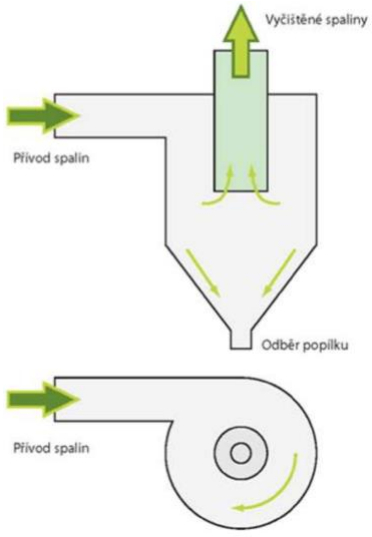
Požadavky na odlučování tuhých částic jsou v ČR určeny zákonem č. 309/1991 Sb. A vyhláškou 117/1997 Ministerstva životního prostředí, které předepisují emisní limity pro tuhé znečišťující látky podle jmenovitého tepelného výkonu kotlů. [5]

3.3.1 Mechanické odlučovače

Tyto odlučovače využívají hmotnostní síly působící na tuhou částici. Základním principem odlučování je rozdílná měrná hmotnost částice a plynu. Příkladem jsou cyklony, setrvačné odlučovače, usazovací komory. Výhodou je jejich jednoduchost a v podstatě nezávislost jejich funkce na dalším zdroji energie. Díky tomuto předpokladu mají tyto odlučovače nízkou pořizovací cenu a nízké jsou i náklady na údržbu. Snesou vysokou provozní teplotu čištěných spalin, a to až 350 °C. Vyznačují se především jednoduchou konstrukcí. Nevýhodou je jejich velice omezená účinnost, závislá především na granulometrii. Další nevýhodou je jejich poměrně vysoká tlaková ztráta. [5]

3.3.1.1 Cyklony

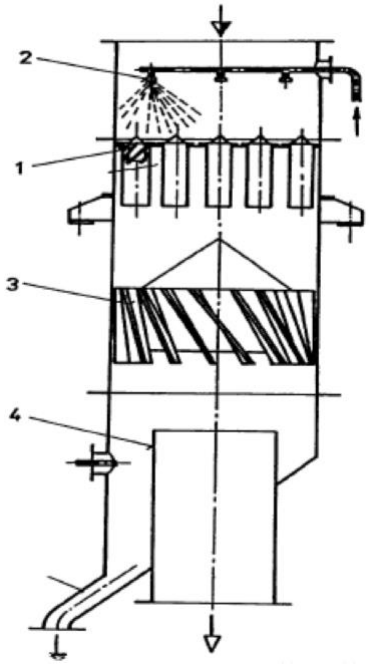
Jsou nejrozšířenější mechanické odlučovače. Cyklon je jednoduché zařízení skládající se ze vstupního potrubí, které ústí do válcové části. Na spodní části je kužel, který končí výstupním otvorem, poté již následuje přepadová trubka pro odvod nosného média zbaveného tuhých částic. Princip odloučení je založen na využití odstředivé síly, která působí na částice při spirálovém pohybu plynu válcovou nebo kuželovou komorou odlučovače a vyvolává relativní rychlost částice kolmou k odlučovacím plochám. Plyny jsou tedy uváděny do rotačního pohybu, přičemž částice se dostávají ke stěně odlučovače, na které se odloučí z proudu plynu. Ze stěny odloučené částice padají do výsypky odlučovače, z nichž jsou poté odváděny. V praxi se tyto cyklony používají pro odprášení spalin menších kotlů. Cyklon propouští částice pod 10 μm. [5]



Obr. 10 Schéma cyklonového odlučovače [5]

3.3.2 Mokré odlučovače

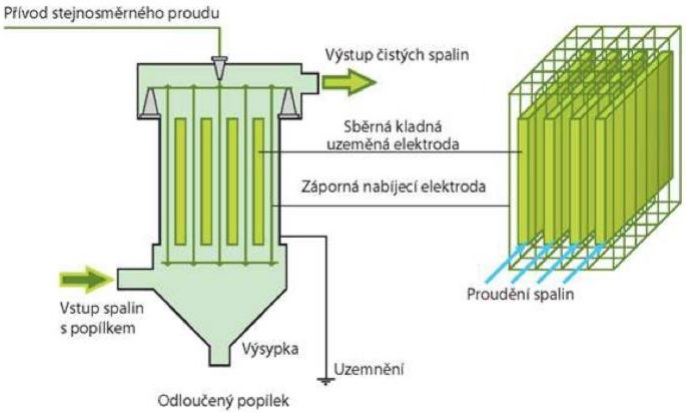
K odloučení částic dochází na principu smočení částice vodou buď nárazem na hladinu, nebo nástřikem vody. Využívají odstředivých, nebo gravitačních sil. Tyto odlučovače lze obvykle používat i pro absorpci plynných znečišťujících látek odpadních plynů. Mokré odlučovače ve srovnání se suchými mají vyšší účinnost, jsou vhodné pro abrazní a lepivé prachy a mají možnost současného odloučení i plynných znečišťujících látek. Nevýhodou je vysoká spotřeba vody a nutnost kalového hospodářství. [5]



Obr. 11 Schéma mokrého odlučovače [5]

3.3.3 Elektrostatické odlučovače

Částice jsou v elektrostatickém poli nabíjeny a přitahovány k usazovací elektrodě opačné polarity, a tím jsou z plynu odloučeny. Periodickým oklepem usazovacích elektrod jsou pak částice sráženy do výsypky. V současné době se elektrostatické odlučovače používají zejména k odstranění velkých částic. Tyto odlučovače jsou poměrně finančně nákladné. Provedení elektrostatického odlučovače je buď v suché variantě, kam konkrétně patří vertikální trubkový odlučovač a horizontální komorový odlučovač. Mokré elektrostatické odlučovače slouží obvykle pro odloučení aerosolových částic. [5]



Obr. 12 Schéma elektrostatického odlučovače [5]

3.4 Vlastnosti popílků

Popílek, jako každý odpad, má proměnlivé chemické, mineralogické i granulometrické složení podle druhu spalovaného uhlí, lokality (technické řešení spalovacího procesu) a způsobu odlučování z exhalátů. Popílek z černého uhlí má menší variabilitu vlastností a je vhodnější do příměsí do betonu, než popílek z hnědého uhlí (v ČR je 80 % popílků z hnědého uhlí). [6]

3.4.1 Chemické složení

Popílek je heterogenní materiál složený z částic o rozdílném chemickém složení. Popílky vznikají při spalování tuhých paliv zpravidla v jemně mletém stavu. Při spalování jsou všechny složky vystaveny různě dlouhou dobu vysokým teplotám a navíc ještě mohou procházet oxidačním, nebo redukčním prostředím. Z toho vyplývá různorodé složení. Vzhledem k velmi krátké době průchodu spalovaných částic vysokou teplotou topenišť, dochází zpravidla k jejich roztavení, a tím k reakci v kapalné fázi jen na povrchu. Popílky vždy obsahují mimo nerostných zbytků ještě zbytky původního nebo do různého stupně přeměněného paliva. Podle chemického složení lze popílky rozdělit v zásadě do skupin podle druhu a původu spalovaného uhlí. Chemické složení popílku podle druhu paliva je v Tab. 1 a podle způsobu spalování v Tab. 2.

Tab. 1 Chemické složení popílku podle druhu paliva [2]

Chemická složka	Zastoupení složky [%]								
	SiO_2	Al_2O_3	FeO	CaO	K_2O	MgO	SO_3	TiO_2	Na_2O
Hnědé uhlí	43–60	19–34	3,0–6,0	4–6	0–2	0–2	0–5	1–7	0,5–1,0
Černé uhlí	50–57	25–30	3,5–8,0	2–4	2,5–5,0	1,5–3,0	0,5–1,2	0–1	0,2–2,0

Tab. 2 Chemické složení popílku podle způsobu spalování [2]

Popílek	Zastoupení složky [%]									
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	K_2O	MgO	SO_3	TiO_2	Na_2O	ZŽ
Fluidní	42,3	19,4	5,8	18,2	1,4	2,5	5,3	1,6	0,4	10,7
Vysoko-teplotní	52,2	28,0	9,7	3,1	1,6	1,4	0,6	2,4	0,5	5,9

Fluidní popílky hodnocené jako celek mají poměr SiO_2:Al_2O_3 zhruba zachovalý 2:1, jako je tomu u klasických popílků, ale tyto složky tvoří asi jenom 60 % hmoty (u klasických popílků je to 80 %). K tomuto snížení dochází v důsledku zvýšeného obsahu CaO. [7], [2]

3.4.2 Minerální složení

Podle mineralogického složení lze v popílkách určit složky:

- hydraulicky aktivní složky (Ca-aluminát, Ca-silikáty, Ca-ferity, skla, hlinito-křemičité minerály),
- nehydraulické minerály, někdy působící jako budiče hydraulicity (anhydrit, CaO, MgO),
- iniciační (budící) složky hydraulicity (sulfidy, alkalické soli),
- inaktivní látky (krystalický křemen, hematit, magnetit, mullit, kyselé silikáty, nově vzniklé uhličitany). [6]

Průměrné mineralogické složení je uvedeno v Tab. 3.

Tab. 3 Mineralogické složení popílku [7]

Minerál	Zastoupení složky [%]
Křemen (SiO_2)	4,8–22,7
Mullit ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$)	3,4–26,5
Hematit (Fe_2O_3)	5,1–7,1
Rutil (TiO_2)	0,3–2,5
Anatas (TiO_2)	0,5–1,4
Cristobalit (SiO_2)	0,0–0,6
Uhlík (C)	0,6–2,3
Sklovitá fáze	63,1–67,1

3.4.3 Fyzikální vlastnosti

Příznivé vlastnosti popílku v čerstvém betonu jsou určovány v podstatě tvarem zrn a granulometrickým složením. Při roztavení velmi jemných částic uhlí v kotli vyvolá povrchové napětí nastupující fáze tavení tvorbou kulovitých částic s uzavřeným povrchem. Kromě nepórovitých plných kuliček se mohou jednotlivě vyskytovat i duté kuličky (tzv. cenosféry). Výsledné objemové hmotnosti jsou asi 2300 kg/m^3. Zrnitost popílků je závislá na použitých odlučovačích, z mechanických odlučovačů je popílek hrubší (zrna větší než 0,09 mm jsou obsaženy nad 20 %, sypná hmotnost je 900–1200 kg/m^3), než z elektrostatických odlučovačů (zrna nad 0,09 mm do 20 %, sypná hmotnost cca 800 kg/m^3). [6]

Tab. 4 Základní fyzikální vlastnosti [1]

Veličina	Jednotka	Rozmezí
Objemová hmotnost	[kg/m^3]	2000–2500
Sypná hmotnost	[kg/m^3]	800–1100
Průměr zrna	[μm]	10–30
Měrný povrch dle Bleina	[m^2/kg]	200–550

3.4.4 Index účinnosti

Je poměr pevnosti v tlaku normalizovaných trámečků z malty připravené ze 75 % hmotnosti referenčního cementu a 25 % hmotnosti popílku, k pevnosti v tlaku tráměčků z malty připravené bez popílků, zkoušených ve stejném stáří. [6]

3.5 Požadavky dle legislativy

Do betonu je možné použít zásadně jen popílek dle ČSN EN 450-1 Popílek do betonu. Takto musí být deklarován výrobcem či dodavatelem. Kvalitativní požadavky pro použití popílku jako příměsi do betonu jsou uvedeny v Tab. 5. [8]

Tab. 5 Kvalitativní požadavky dle ČSN EN 450-1 [8]

Vlastnost	Požadavek	Mezní hodnota	Zkušební metoda
Ztráta žíháním (1 hod)	Kat. A ≤ 5 % Kat. B 2 – 7 % Kat. C 4 – 9 %	+ 2 % + 2 % + 2 %	EN 196-2
Obsah chloridů (Cl^-)	≤ 0,1 %	0 %	EN 196-2
Obsah SO_3	≤ 3 %	+ 0,5 %	EN 196-2
Volný CaO	≤ 2,5 %[1)]	+ 0,1 %	EN 451-1
Aktivní CaO	≤ 10 %	+ 1 %	EN 197-1
Aktivní SiO_2	≥ 25 %	- 3 %	EN 197-1
Σ SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3	≥ 70 %	- 5 %	EN 196-2
Obsah alkálií $Na_2O_{ekv.}$	≤ 5 %	+ 0,5 %	EN 196-2
Obsah MgO	≤ 4 %	+ 0,5 %	EN 196-2
P_2O_5[2)]	≤ 4 %	110 mg/kg	EN 450-1
Zbytek na sítě (0,045 mm)	Kat. N ≤ 40 % Kat. S ≤ 12 %	± 10 % + 1 %	EN 451-2
Index účinnosti	Za 28 dní 75 % Za 90 dní 85 %	- 5 %	EN 196-1
Objemová stálost[3)]	≤ 10 mm	-	EN 196-3
Variabilita měrné hmotnosti	Max ± 200 kg/m^3 od deklarované	+ 25 kg/m^3	EN 196-6
Počátek tuhnutí	Ne 2× delší než směs jen z cementu	+ 20 min	EN 196-3
Požadavek na množství vody	95 % (jen kategorie S)	+ 2 %	EN 450-1

[1)] Pokud je ≥ 1 %, nutná zkouška na objemovou stálost.

[2)] Obsah rozpustného fosforečnanu vyjádřený jako P_2O_5.

[3)] 50 % popílku a 50 % cementu.

3.5.1 Koncepce k-hodnoty

Maximální množství popílku, které lze uvažovat u koncepce k-hodnoty, musí vyhovovat požadavku hmotnostního poměru:

- popílek/cement ≤ 0,33

  Jestliže se přidá větší množství popílku, pak se přebývající část nemůže brát v úvahu pro výpočet součinitele $\frac{\text{voda}}{\text{cement} + \text{k} \times \text{popílek}}$, ani pro minimální obsah cementu.

- Pro beton obsahující cement druhu CEM I podle ČSN EN 197-1 je dovoleno použít následujících k-hodnot:
  - CEM 32,5 k = 0,2
  - CEM 42,5 k = 0,4

  Hodnota k = 0,2 se používá pro cementy CEM II/A-S, CEM II/B-S, CEM III A.

Minimální obsah cementu se může snížit maximálně o množství k × (minimální obsah cementu – 200 kg/m^3, avšak množství (cement + popílek) nesmí být menší než je minimální obsah cementu požadovaný v ČSN EN 206-1. [8]

4 Použití popílků

Popílek představuje díky svému vzniku a z něj vyplývajících vlastností umělý pucolán, kladně působící svými pucolánovými vlastnostmi na utváření pevnosti a struktury cementového kamene a tudíž se posuzuje jako součást pojiva. [1]

4.1. Popílek jako příměs

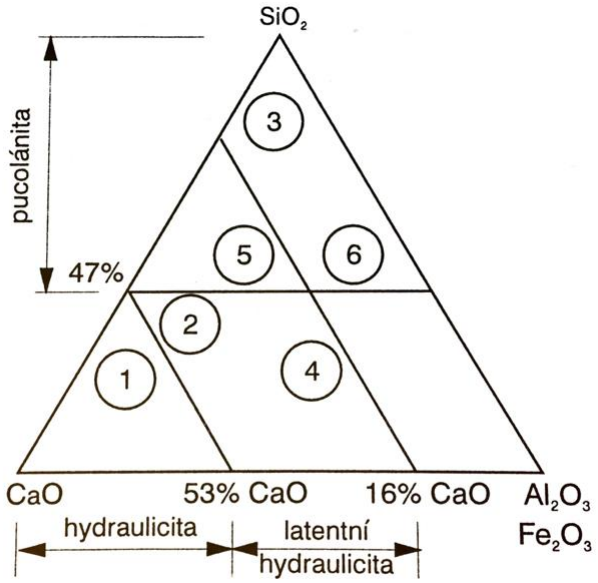
Příměsi jsou většinou práškovité látky přidávané do čerstvého betonu za účelem zlepšení některých vlastností nebo docílení zvláštních vlastností. Dělí se na dva typy:

a) Typ I: Inertní příměsi, fillery (kamenná moučka) dle ČSN EN 12620 nebo pigmenty dle ČSN EN 12878.

b) Typ II: Pucolány nebo latentně hydraulické příměsi, popílek dle ČSN EN 450-1, mikrosilika (křemičitý úlet) dle ČSN EN 13263 nebo struska dle ČSN EN 15167-1.

ad. b)

Tyto látky se vyznačují pucolánovými nebo latentně hydraulickými vlastnostmi. Jsou práškovité látky s vysokým měrným povrchem určitého chemického a mineralogického složení. Podle chemického složení posuzujeme hydraulické, pucolánové a latentně hydraulické vlastnosti v potrojném diagramu $CaO – SiO_2 – Al_2O_3 + Fe_2O_3$ dle Rankina Obr. 13. [9], [6]



Obr. 13 Trojný diagram dle Rankina [6]

1 – portlandské cementy, 2 – vysokopecní strusky, 3 – křemičité úlety, 4 – popílky bohaté na CaO, 5 – popílky bohaté na SiO_2, 6 – pucolánové popílky [6]

Hydraulické vlastnosti se také hodnotí podle modulů, tj. poměry obsahu jednotlivých oxidů

$$\frac{C}{S+A} \geq 1, \qquad \frac{C}{S} > 1, \qquad \frac{S}{C+M} < 1$$

Symboly: C – CaO, M – MgO, S – SiO_2, A – Al_2O_3.

Podmínkou aktivity těchto látek je velký měrný povrch, který bývá přibližně stejný jako měrný povrch cementu. Velmi reaktivní křemičité látky mají však měrný povrch i více jako 15000 m^2/kg. [10]

4.1.1 Latentní hydraulicita

Hydraulická aktivita je schopnost látky tvrdnout ve vodním prostředí za normální teploty. Latentní hydraulicita je schopnost látky reakcí s $Ca(OH)_2$ za normální teploty ve vodném prostředí tvrdnout. Podobné vlastnosti mají pucolánové látky, které se vyznačují vysokým obsahem aktivního SiO_2. Podmínkou chemické reakce je alkalické prostředí vytvářené v roztoku i jinými chemickými sloučeninami, které nazýváme budiče hydraulicity. Ve svých technologických důsledcích je pucolanita i latentní hydraulicita totožná, rozdíly jsou pouze v obsahu některých minerálů. Latentně hydraulické příměsi se přidávají jako složky do cementu při mletí slinku nebo do čerstvého betonu při jeho míchání. Z chemického hlediska je lze rozdělit do tří skupin.

1. Látky obsahující amorfní SiO_2, v množství nad 47 %, rozpustný v kyselém i alkalickém prostředí, vykazující pucolánové vlastnosti. Patří sem diatomity, opál, křemičité úlety a uměle vyráběné křemičité látky.
2. Pálené hlíny, popílky, struska vykazují latentní vlastnosti. Popílky vykazují tím větší reaktivit, čím více obsahují SiO_2 ve sklovité fázi a málo mullitu $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$. Reaktivitu negativně ovlivňuje větší množství spalitelných látek (= ztráta žíháním).
3. Látky obsahující sopečné sklo vzniklé rychlým ochlazením magmatu. Jsou to pravé pucolány (podle městečka Pozuoli na úpatí Vesuvu, kde těžili již Římané před naším letopočtem), jako tufy, trasy, sopečné sklo. [6]

4.2 Popílek do cementu

Popílek se často používá jako součást cementů, kde nahrazuje část portlandského slinku. V takovém případě se jedná o tzv. portlandský popílkový cement (CEM II/A, B-V a CEM II/A, B-W), portlandský směsný cement (CEM II/A, B-M), pucolánový cement (CEM IV/A, B) nebo směsný cement (CEM V/A, B). V cementářském průmyslu se popílek používá i na regulaci tuhnutí cementu namísto tradičního sádrovce. Mimo tradičních betonů a cementů se popílek používá i jako příměs do jiných necementových pojiv. Přidává se především k pojivům na bázi vápence a sádry, ale i strusky a alkalických aktivátorů. Popílek je možné použít taktéž jako náhradu části vápence při výpalu cementového slinku. [1]

4.3 Transportbeton

V současnosti je většina druhotně zpracovaného popílku využívána ve stavebním průmyslu, při výrobě odlišných stavebních materiálů. Nejběžnější způsob použití popílku ve stavebnictví je ve formě příměsi do betonu. Přidaný popílek takto nahrazuje část cementu, přičemž jsou zachované, respektive vylepšené vlastnosti čerstvého betonu. Jelikož popílky mají pucolánové vlastnosti, podílejí se i na zabezpečování pevnostních charakteristik zatvrdlého betonu. Z hlediska zpracovatelného množství se jako perspektivní jeví technologie tzv. HVFA Concrete (High Volume Fly Ash Concrete – beton s vysokým obsahem popílku), kde je poměr vyšší jako 1 (popílek/cement). [1]

5 Vlastnosti betonu s popílkem

Popílek má vliv na vlastnosti betonu jak v čerstvém, tak i zatvrdlém stavu, svým reologickým působením, účinkem jako plnivo a pucolánovou aktivitou. Rozpětí změn vlastností závisí na způsobu použití a složení receptur. Praxe ukázala, že se aplikují různé varianty použití popílku. V první řadě jako náhrada cementu popílkem, při nezměněném obsahu vody. To souvisí se zachováním vodního součinitele. Další možností může být přídavek popílku jako plniva pro zlepšení čáry zrnitosti. Do většiny standartních betonů se používá těžené drobné kamenivo frakce 0–4 mm, které se získává těžením z vody. Při těžení voda s sebou odnáší i jemné podíly, které v betonu potřebujeme pro plynulou křivku zrnitosti. Přidáním popílku, můžeme chybějící jemné podíly doplnit, a tím zlepšit vlastnosti betonu. [1]

5.1 Čerstvý beton

Popílek jako příměs do betonu umožňuje regulovat množství pojiva v betonu, jehož dostatečné množství je nevyhnutelné pro dobrou zpracovatelnost čerstvého betonu, a to vlivem zvyšováním jemných podílů. Příznivý vliv popílku na zrnitost směsi a zpracovatelnost čerstvého betonu je viditelný okamžitě, už jen při kontrole zpracovatelnosti. Betony s lepší zpracovatelností jsou výhodné nejen pro odběratele, ale také pro výrobce. Kromě zlepšení zpracovatelnosti betonové směsi má popílek značný vliv i na kvalitu čerstvého betonu, a to především zabránění segregace a krvácení. Tyto vlivy jsou nežádoucí zejména u betonu typu

SCC (Self Compacting Concrete - samozhutnitelný beton) proto použití popílků do těchto specifických betonů je výhodné. [1]

5.1.1 Zpracovatelnost

Použití popílku vede ke zlepšení zpracovatelnosti nezávisle na dosažitelné úspoře vody. A to zejména ke zlepšení čerpatelnosti (viskozita), soudržnosti a také zhutnitelnosti. Všechny tři aspekty jsou prioritní pro použití popílku jako příměsi u transportbetonu, kde potřebujeme tyto podmínky zajistit. Tím se snižují náklady na dopravu, ukládání a zhutňovaní BS. [1]

5.1.2 Redukce vody

Náhrada části cementu vede ke snížení spotřeby vody při zachování určité míry rozlití. Při zachování obsahu vody je velmi často míra rozlití větší. Tento plastifikační účinek se často charakterizuje pojmem „efekt kuličkového ložiska“. Pojem je odvozen z tvaru zrn popílku, který je víceméně dokonale kulovitý a sklovitý. Mechanizmy působení popílku zkoumali Wierig, Freimann a Sybertz a dávali je do souvislosti s tvarem částic a granulometrickým složením. Jemnost popílku má také vliv na konzistenci betonových směsí. Čím jemnější zrna popílku, tím je směs tekutější. Negativní vliv na spotřebu vody má bohužel větší obsah nespáleného uhlí v důsledku nepravidelného tvaru a pórovitost. U větších frakcí popílku se nachází nepravidelně tvarované částice. Z těchto dvou souvislostí vyplývá nepřímý vliv, že jemnější popílky mají menší spotřebu vody. Z těchto důvodů se normě DIN EN 450-1 kladou požadavky na jemnost a ztrátu žíháním. Freimann dále zjistil, že účinek popílku na systém čerstvého betonu je daný nejen vlastnostmi popílku, ale i složením směsi a druhem vstupních surovin. [1]

5.2 Zatvrdlý beton

Dostatečné množství pojiva zabezpečí hutnou strukturu zatvrdlého betonu. Hutnost této fáze je docílena objemem pórů, který se zmenšuje použitím popílku. Použití popílku vede ke snížení objemové hmotnosti betonu, jelikož hustota popílku je nižší než hustota cementu. Proces tuhnutí a tvrdnutí betonu při nahrazení části cementu popílkem je pomalejší. Tento jev souvisí se sníženou dávkou cementu a se skutečností, že pucolánová reakce probíhá pomaleji než hydratace cementu. Z toho důvodu je nutné zvážit používání popílku jako náhrady za část cementu při výrobě betonu za nízkých teplot nebo při potřebě

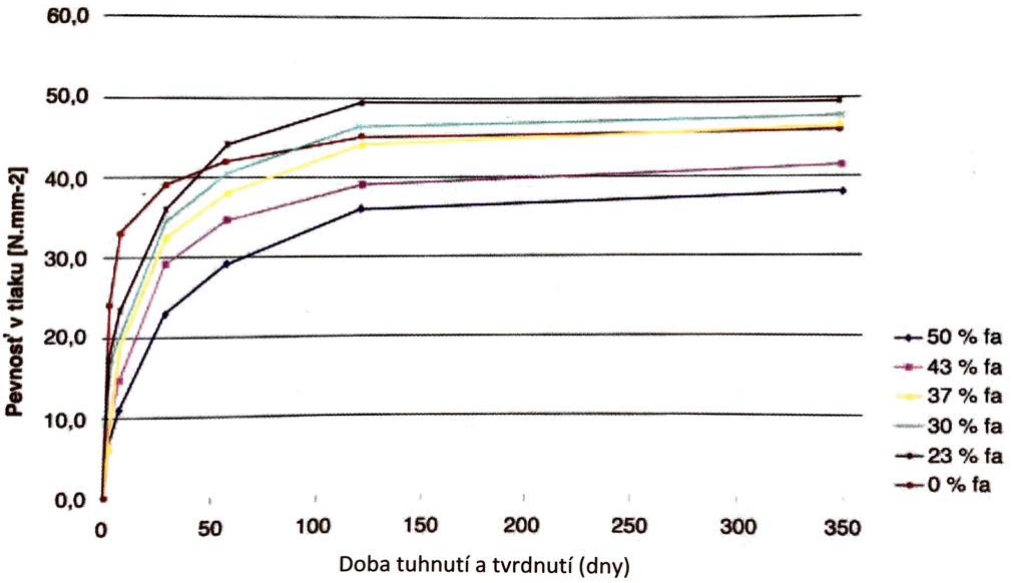
rychlého nárůstu počátečních pevností. V těchto případech je žádaný rychlý vývin hydratačního tepla, a proto je popílek pro tyto situace nevhodný. Naopak je tento jev žádoucí u masivních staveb, kde se snažíme cíleně zabránit rychlému nárůstu hydratačního tepla a následnému vzniku smršťovacích trhlin. Použití latentně hydraulických příměsí, tedy i popílku, v betonu se z hlediska zrání významně projevuje i po uplynutí 28 dní. Z praktického hlediska je výhodné znát vývoj pevností aspoň do stáří 56 nebo i 90 dní. [1]

5.2.1 Pevnost betonu

Beton je navrhován většinou jako tlačený prvek, kde přenáší tlakové síly, tudíž jeho hlavním parametrem je pevnost v tlaku. V případě použití v tažených konstrukcích se beton navrhuje v kombinaci s ocelí, tedy jako železobetonová konstrukce nebo předpjatá konstrukce, kde veškeré tahové síly přebírá ocel, která odolává vysokým tahovým silám. Z toho důvodu je pevnost v tahu zanedbatelná a většinou se nevyžaduje. Pro dokonalé spolupůsobení betonu s ocelí je důležitá soudržnost betonu s ocelí. [1]

5.2.1.1 Pevnost v tlaku

Záměrným používáním popílku lze ovlivnit pevnosti betonu v delším časovém intervalu. Při zohlednění k hodnoty a tedy zachování ekvivalentní hodnoty vodního součinitele, lze při náhradě cementu popílkem dosáhnout stejných pevností jako u betonu bez přidání popílku. Když zachováme vodní součinitel, počáteční reakce se kompenzuje snížením potřebné vody. Vlivem pucolánové reakce, tedy pomalejším vytvrzováním, bude beton vykazovat vyšší konečnou pevnost než referenční beton (bez popílku). Díky této reakci, v průběhu několika dalších let, toto může vést k dalšímu zvýšení pevnosti. U popílkových betonů, většinou konečné pevnosti výrazně převyšují pevnosti srovnatelného betonu pouze z portlandského cementu. [1]



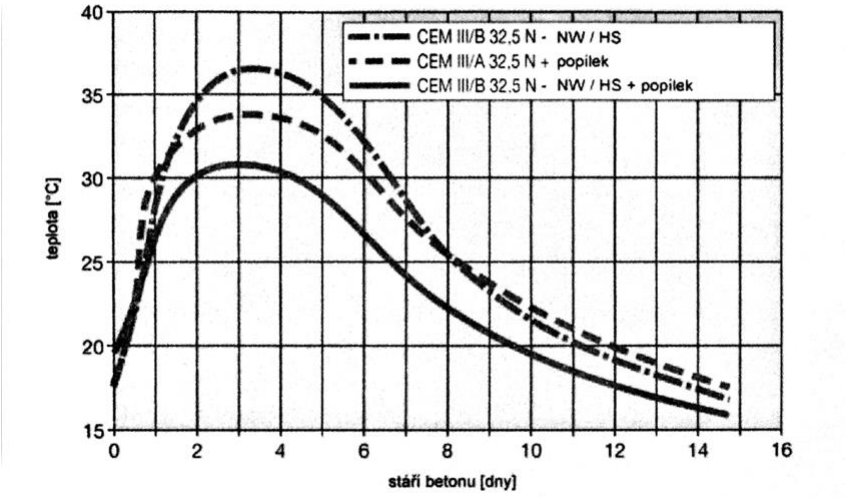
Obr. 14 Závislost pevnosti v tlaku na množství popílku a době tvrdnutí [1]

5.2.1.2 Pevnost v tahu

Popílek ovlivňuje pevnost betonu v tahu stejnou mírou jako pevnost v tlaku. Betony obsahující popílek mají většinou nepatrně vyšší pevnosti v tahu jako betony bez popílku se shodnou pevností v tlaku. Tato zvýšená pevnost v tahu se dává do souvislosti především se zmenšením tloušťky kontaktní zóny (viz. 5.4) mezi kamenivem a cementovou fází, čímž se zlepší přenos síly mezi těmito dvěma složkami. [1]

5.2.2 Vznik trhlin na základě vývoje hydratačního tepla

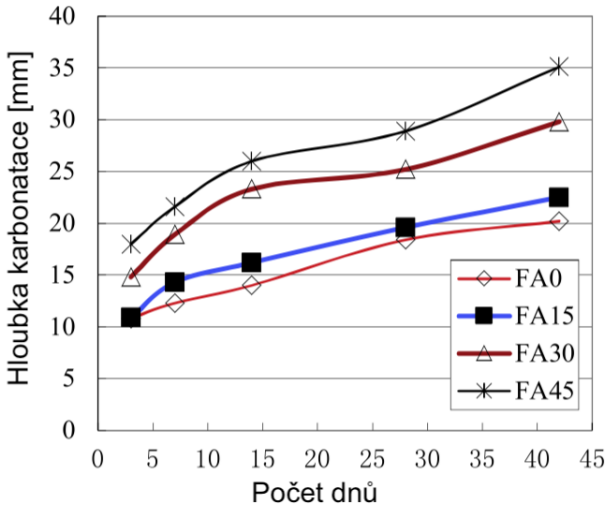
Jedním z nejdůležitějších dopadů popílku na betonovou směs je určité snížení teploty hydratace. Celková teplota směsi i její vývoj jsou sníženy probíhajícími reakcemi popílku pro směsi se střední dobou hydratace. Náhradou určitého podílu portlandského cementu, který nejvíce uvolňuje teplo, popílkem sníží celkový potenciál pro nárůst tepla, neboť je známo, že popílek nevydává teplo při prvních dnech hydratace. Pro stavbu betonových vozovek a tunelů v geotermálních oblastech jsou cementové směsi s popílkem obzvláště vhodné z důvodu omezeného výskytu trhlin způsobených teplem. Vývoj hydratačního tepla betonu s obsahem popílku a bez obsahu popílku můžeme vidět na Obr. 15. [11], [1]



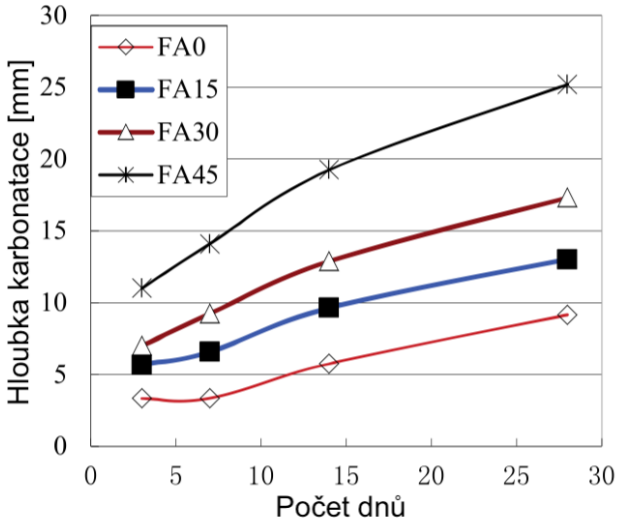
Obr. 15 Vývin hydratačního tepla [1]

5.3 Karbonatace betonu

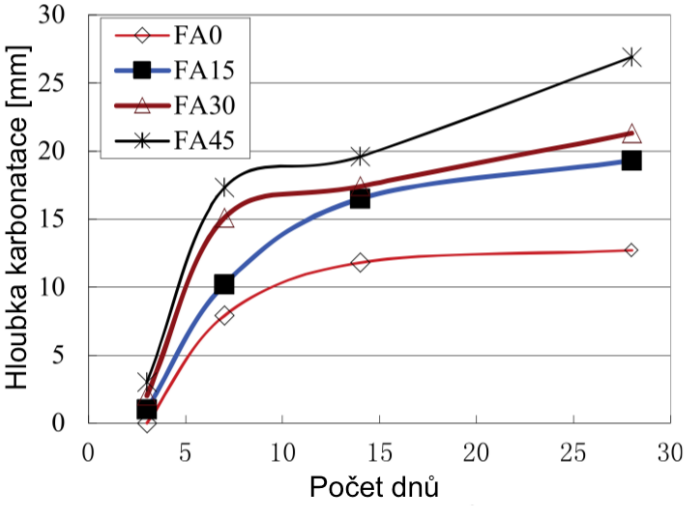
Zatímco karbonatace je hlavním důvodem koroze oceli v atmosférickém prostředí, je důležité zjistit hloubku karbonatace a její míru šíření směrem k vložené výztužné oceli. V dané studii byl použit běžný beton (referenční) a popílkový beton s poměrem 15 %, 30 % a 45 % hmotnostních procent nahrazení cementu. Při zohlednění pucolánových reakcí popílku a karbonačních reakcí v betonu byly analyzovány účinky obsahu popílku a mikroklimatických podmínek (teplota a relativní vlhkost) z hlediska hloubky karbonatace. Výsledky ukazují, že hloubka karbonatace se zvyšuje postupně se stářím. S nárůstem náhrady cementu popílkem se zvýšila hloubka karbonatace. Zvláště u popílkového betonu obsahujícího 45% popílku byla hloubka karbonatace přibližně dva až třikrát vyšší než hloubka kontrolní směsi. Teplota prostředí měla jen malý vliv, nicméně čím vyšší byla teplota prostředí, tím hlouběji byla zóna karbonatace. Hloubka karbonatace klesala s rostoucí relativní vlhkostí mikroprostředí. [12]



Obr. 16 Relativní vlhkost 60 %, teplota 26 °C [12]



Obr. 17 Relativní vlhkost 70 %, teplota 6 °C [12]



Obr. 18 Relativní vlhkost 80 %, teplota 20 °C [12]

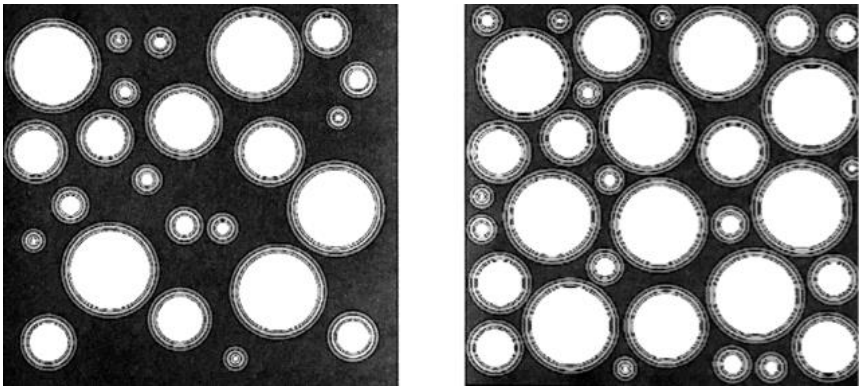
5.4 Kontaktní zóna

Za předpokladu, že kostru betonu tvoří hutné kamenivo, transport iontů, plynů a kapalin se děje prostřednictvím fáze cementového kamene. Tato fáze je v blízkosti povrchu zrn kameniva uspořádaná jinak než v jiných místech. Kontaktní zóna je pórovitější, má vyšší difuzní koeficient a při běžných cementových betonech má relativně velkou tloušťku, takže dochází k překrývání jednotlivých styčných zón tvořených okolo sousedních zrn kameniva. Skrz tato místa se mohou snáz transportovat všechny externí cizorodé látky. Přidáním popílku do betonu se současným snížením množství kameniva v betonu se zvětšuje podíl cementového tmele. Pucolánovou reakcí popílku se snižuje tloušťka kontaktní zóny kameniva a cementového tmele, zhutňuje se struktura cementového tmele a snížením množství kameniva se zmenšuje velikost oblastí, kde se jednotlivé styčné plochy překrývají. K transportu iontů nebo plynů v betonu u hutného kameniva dochází přes základní fázi cementového kamene. Celá řada výzkumů dokazuje, že mikrostruktura základní fáze cementového kamene je v blízkosti povrchu kameniva jinak uspořádaná než uprostřed základní fáze cementového kamene. Například pórovitost se v rámci základní fáze cementového kamene zmenšuje směrem od povrchu kameniva k neporušené základní fázi cementového kamene, takže se v pórovitějších oblastech dají očekávat zvýšené míry difúze. Toto se děje zejména tehdy, když se objem kameniva zvětší tak, až se pórovité mezní plochy navzájem spojí. Podstatnými příčinami vytváření takového pórovité kontaktní zóny v betonu jsou:

- okrajové efekty, například na stykových zónách v blízkosti bednění,
- jednosměrně zacílený růst produktů hydratace,
- tvorba vodních filmů na kamenivu po přidání vody.

Kromě zvýšené pórovitosti má kontaktní zóna celkově hrubší pórovou strukturu, méně C-S-H fází a větší množství $Ca(OH)_2$. U portlandských cementových betonů se pro tloušťku kontaktní zóny udávají hodnoty mezi 50–100 μm. Tím je rozsah kontaktní zóny přibližně v oblasti velikosti částic cementu. Působením plniva a tvorbou C-S-H fází v důsledku reakce s hydroxidem vápenatým zmenšují pucolánové příměsi, jako například právě popílek tloušťku kontaktní zóny, čímž se zlepší spojení mezi zrny kameniva a základní fází cementového kamene. Tento

účinek se zvětšuje se snižující se velikostí zrn a se zvyšující se reaktivitou příměsí.



Obr. 19 Překrývaní se oblastí kontaktních zón [1]

U betonových směsí obsahujících popílek mají difúzní koeficienty při srovnatelných objemech kameniva značně nižší hodnoty, přičemž na rozdíl od portlandského cementu je možné pozorovat výraznou závislost na stáří. Nižší difúzní koeficienty malt s obsahem popílku vykazují homogenní strukturu betonu jednoznačně se zmenšenými limitními plochami, relevantními pro transport. [1]

6 Prostředí XF

Tab. 6 Stupně vlivu prostředí dle ČSN EN 206-1 [10]

Napadení mrazem a táním		
XF1	Mírné nasycení vodou bez rozmrazovacích látek	Svislé povrchy vystavené dešti a mrazu
XF2	Mírné nasycení vodou s rozmrazovacími látkami	Svislé povrchy vozovek vystavené mrazu a vzduchem naneseným rozmrazovacích solí
XF3	Silné nasycení vodou bez rozmrazovacích solí	Vodorovné povrchy vystavené dešti a mrazu
XF4	Vysoké nasycení vodou s rozmrazovacími látkami	Vozovky a mostovky, svislé povrchy betonu vystavené postřiku rozmrazovacími solemi mrazu

Požadavky na odolnost betonu vůči působení prostředí jsou dány buď mezními hodnotami pro složení betonu a stanovenými vlastnostmi betonu, nebo mohou být požadavky odvozeny z návrhu složení betonu s určitou vlastností. Požadavky musí vzít v úvahu předpokládanou provozní životnost betonové konstrukce. Pro betonové konstrukce se uvažuje minimální provozní životnost v délce:

- všeobecně 50 let
- pro konstrukce dopravních staveb a jiné mimořádné konstrukce 100 let.

Mezní hodnoty pro složení betonu použitého na území České republiky jsou uvedeny v následujících tabulkách a jsou normativní. [8]

Tab. 7 Normové požadavky na vlastnosti a složení betonu (50 let) [8]

Stupeň vlivu prostředí	Max w/c	Minimální množství cementu [kg/m^3]	Min. pevnostní třída	Min. V_z [%]	Maximální průsak vody při zkoušce [mm][b)]
XF1	0,55	300	C 25/30	-	50
XF2	0,55	300	C 25/30	4,0[a)]	50
XF3	0,50	320	C 25/30	4,0[a)]	35
XF4	0,45	340	C 30/37	4,0[a)]	35
Stupeň vlivu prostředí	Odolnost vůči zmrazování a rozmrazování – metoda/počet cyklů/odpad [g/m^2]		Jiné požadavky		
XF1	-		Kamenivo dle ČSN EN 12620 s dostatečnou mrazuvzdorností		
XF2	A/75/1250				
XF3	A/100/1250				
XF4	A/100/1000				

[a)] Beton nemusí být provzdušněn na předepsanou hodnotu (může být částečně provzdušněn, anebo vůbec), pokud jsou provedena příslušná opatření (např. příměs křemičitého úletu současně s vodním součinitelem nižším než 0,4) a vyhoví přitom kritériu odolnosti. Pokud beton bez provzdušnění nesplní při PZ kritéria odolnosti a vodonepropustnosti, je nutno beton provzdušnit.

[b)] Platí pro konstrukce objektů v přímém styku s vodou. Hodnoty platí, nepožaduje-li specifikátor jinak. Zkouší se dle ČSN EN 12390-8 při KZ i PZ dle přílohy A normy, nezkouší se u provzdušněného betonu, při PZ dle přílohy A normy musí být hodnoty průsaku o 20 % nižší. [8]

7 Betony s popílkem v oblasti dopravních staveb

Kryty vozovek a mostní opěry, stejně jako ostění tunelů v dopravním stavitelství v oblasti vstupu, jsou příklady části konstrukcí, které jsou vystaveny cyklickému zmrazování a tání při současném působení chemických rozmrazovacích látek.

7.1 Beton s vysokou odolností proti mrazu a CHRL

Betony v nasáklém stavu vystavené působení cyklického zmrazování a rozmrazování, popřípadě současnému působení chemických rozmrazovacích látek (dále „CHRL“), se musí navrhnout a vyrobit tak, aby vyhověly nebo alespoň v dostatečné míře odolávaly účinkům těchto vlivů, které jsou každodenním náporem, především v zimních obdobích. [1]

7.1.1 Betony s vysokou odolností proti mrazu

Betony s vysokou odolností proti mrazu se v Německu vyrábějí obvykle bez provzdušnění. Dostatečná odolnost proti mrazu je zajištěna nízkou kapilární pórovitostí a vysokou pevností. Zavedením umělých pórů docílíme dodatečné zvýšení odolnosti proti mrazu. V DIN 1045-2 se omezuje obsah cementu a pevností třída betonu na minimální hodnoty a hodnota vodního součinitele na maximální hodnoty pro expoziční třídy XF1 a XF3 (viz. 6). Na základě systematických zkoumání a zkušeností z praxe se dokázalo, že popílkové betony nevykazují při stejné pevnosti v tlaku a při dostatečném ošetření o nic menší odolnost proti namáhání mrazem než příslušné bez popílku. Z toho důvodu je povoleno snížit obsah cementu na 270 kg/m^3, jestliže obsah cementu plus popílku odpovídá alespoň minimálnímu obsahu cementu příslušného referenčnímu betonu. Když se současně započítá popílek s použitím ekvivalentní hodnoty vodního součinitele w_{ekv} = v/(c + 0,4 p). Přidávané množství popílku je směrem nahoru omezeno pouze regulací obsahu jemných podílů. [1]

7.1.2 Beton s vysokou odolností proti CHRL

Betony vystavené cyklickému zmrazování a tání při současném působení chemických rozmrazovacích látek se řadí k expozičním třídám XF2 a XF4 (viz. 6). Betony expoziční třídy XF2 se mohou vyrábět s nebo bez provzdušnění. Betony expoziční třídy XF4 se musí zpravidla vyrábět jako provzdušněné, pouze

zavlhnuté betony s v/c ≤ 0,40 se mohou vyrábět bez provzdušnění. Podle nové německé legislativy je nyní povoleno u expozičních tříd XF2 a XF4 při použití popílku snížit minimální množství cementu a započítat ho do ekvivalentního vodního součinitele poté, co byly předloženy výsledky průkazných zkoušek. Další příměsi typu II, tedy aktivní příměsi (viz. 4.1), se mohou přidávat, ale nesmí se započítat do obsahu cementu nebo do hodnoty vodního součinitele. Při současném použití křemičitého úletu a popílku je započítání zcela vyloučeno. V oblasti platnosti „Dodatečné technické smluvní podmínky a směrnice pro inženýrské stavby“, je započítání popílku v současnosti přípustné pouze pro expoziční třídu XF2, a to jen pro betony vnitřního ostění tunelů. U betonů pro vnitřní ostění tunelů se může v expoziční třídě XF2 započítat popílek s dosazenou hodnotou k do minimálního obsahu cementu a do hodnoty vodního součinitele tehdy, pokud se zkouškou prokázalo, že hodnota nasycení popílkového betonu nepřekročí 85% a hodnota nasycení popílkového betonu je nižší než příslušná hodnota referenčního betonu. [1]

7.2 Beton vystavený extrémním klimatickým podmínkám

V příspěvku jsou prokazovány výborné funkční vlastnosti betonu obsahující alternativní cementové materiály (ACM), jakým je popílek v solí nasyceném prostředí. Odolnost vykazována těmito betony se vztahuje k mobilitě iontů chloridu, a to snížením počtu propojených mezer, což je výsledkem buď pucolánové reakce, nebo chemické vazby cementových hydrátů. Obsahem tohoto příspěvku je posouzení odolnosti povrchu betonu proti odlupování a sledování změn odolnosti betonu proti vnikání chloridů v závislosti na obsahu popílku k celkové hmotnosti cementu, a stejně tak i doba zrání. [13]

7.2.1 Beton

Zkoušky byly prováděny na drobnozrnném betonu. Použil se běžný portlandský cement CEM I 32,5 R. Fázové složení popílku bylo stanoveno difrakční analýzou rentgenovými paprsky, kde byly zjištěny dvě krystalické fáze, a to β-křemen a mulit. Popílek také obsahoval anhydrit, oxid vápenatý a velmi malé množství vápníku a sádrovce. Obsah volného CaO podle analytické zkoušky byl 0,25 %. Ztráta žíháním sledovaná po dobu 25 dní nepřekročila 4,8 %. Specifická hmotnost minerální příměsi byla 2,23 kg/dm^3. Jako drobné kamenivo

bylo použito těžené říční kamenivo o maximální velikosti zrna 2 mm a jako hrubé čedičové kamenivo o maximální velikosti zrna 8 mm.

Zkušební tělesa byla připravena ze směsí s třemi odlišnými hodnotami obsahu popílku (10 %, 20 % a 30 %) z hmotnosti cementu, a také referenční tělesa bez přídavku popílku. Obsah cementu v referenčním betonu byl 350 kg/m^3. Voda v poměru s pojivem byla u všech směsí konstantní. [13]

7.2.2 Zkušební postup

Zkušební postupy byly provedeny dle švédské normy SS 13 7244 Zkušební metody betonu. Odolnost betonu proti odlupování vystavené cyklickému zmrazování, rozmrazování a nasycení v rozmrazovací soli bylo provedeno podle standartní Borásovy metody. Jedná se o „nejtvrdší“ metodu při zkoušení mrazuvzdornosti. Chování betonu při vystavení extrémním klimatickým podmínkám je simulováno, typ poruchy je objeven v reálných strukturách.

Zrychlená zkouška difúze chloridů (RCMT) byla použita pro stanovení hodnoty koeficientu difúze. Použil se externí elektrický potenciál v ose válcového tělesa, a tím začala difúze jednotlivých iontů chloridu. Použité napětí a doba zkoušky závisely na měřeném počátečním proudu, ačkoliv byl efekt zahřívání tělesa eliminován. Válcová betonová tělesa byla vystavena napětí pomocí externích nerezových elektrod umístěných na druhém konci tělesa. Katodový roztok byl 10% NaCl a anodový roztok byl 0,3 mol/dm^3 NaOH. Na konci zkoušky bylo betonové válcové těleso rozděleno na dva půlválce. Nově vystavený povrch byl nastříkán indikačním roztokem ($AgNO_3$) pro stanovení hloubky vniknutí chloridů. Kolorimetrická metoda použitím $AgNO_3$ reaguje změnou barvy při koncentraci chloridů c_d = 0,07 mol/dm^3. Hloubka vniknutí chloridů byla měřena viditelnou bílo stříbrnou chloridovou sraženinou na 7 bodech plochy povrchu. Průměrná hloubka vniknutí x_d je výsledným parametrem zkušebního postupu. [13]

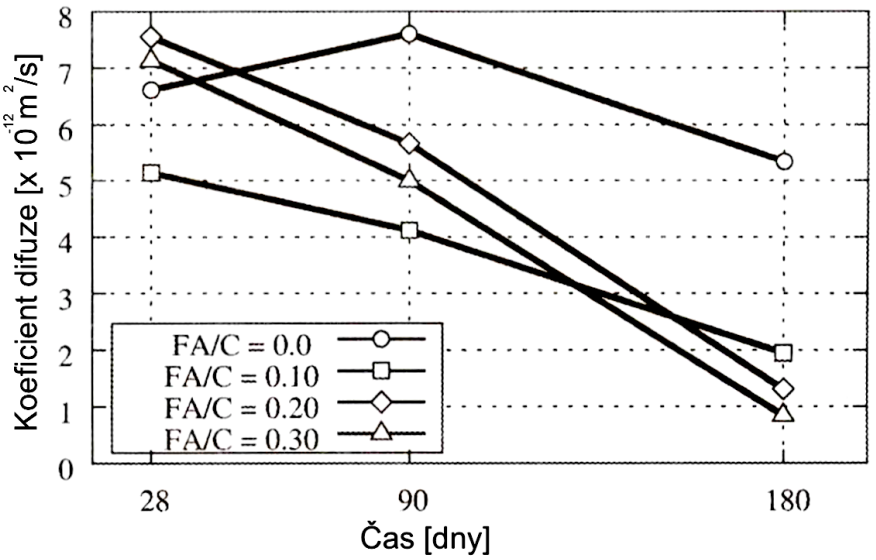
7.2.3 Výsledky

Před posuzováním odolnosti betonu proti agresivním vlivům byly zkoušeny základní vlastnosti zatvrdlého betonu.

Tab. 8 Vlastnosti betonu po 28 dnech zrání [13]

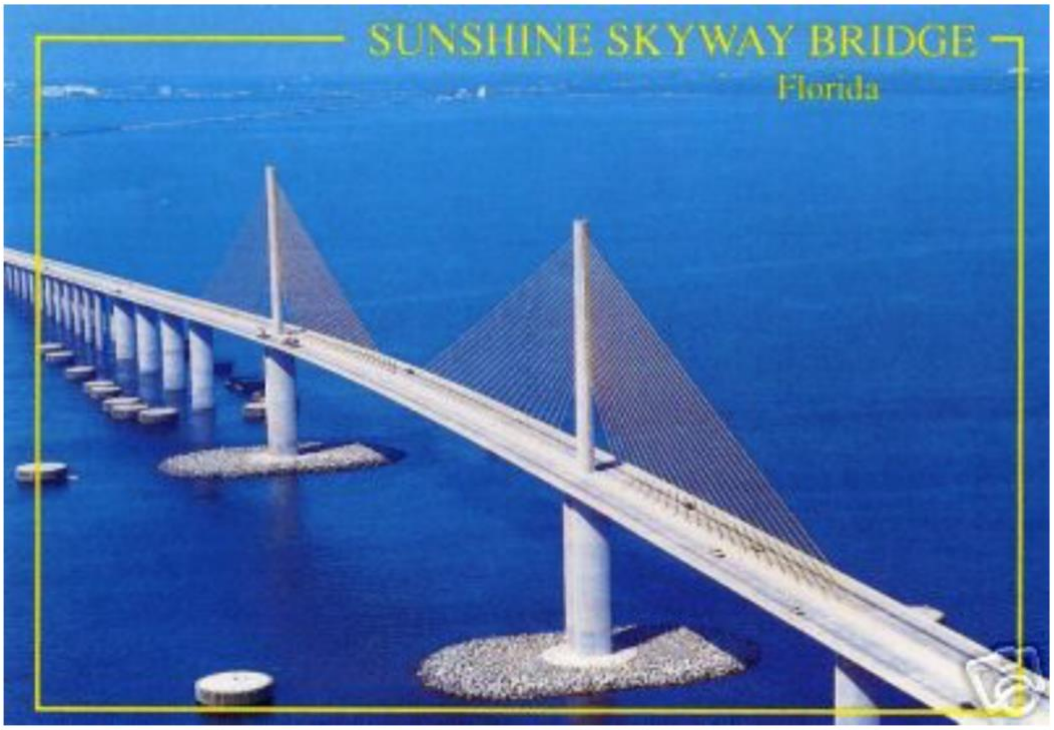
Poměr popílek/cement FA/C	Objemová hmotnost [kg/m^3]	Nasákavost [%]	Kapilární zdvih 3% NaCl roztok [kg/m^2]	Mezerovitost [%]
0,0	2223	5,57	0,396	19,45
0,1	2280	5,01	0,373	15,55
0,2	2267	5,11	0,142	15,11
0,3	2257	5,41	0,212	17,64

Jak ukazuje tabulka, příměs popílku nemá žádný zásadní vliv na objemovou hmotnost a velmi malý vliv na nasákavost. Vlastnost spojená s odolností proti odlupování – schopnost beton kapilárního zdvihu 3% roztokem NaCl je tím nižší, čím je vyšší obsah popílku v betonové směsi.



Obr. 20 Koeficient difúze v závislosti na čase [13]

Přidání popílku do cementu má významný vliv na koeficient difúze chloridů. Analýza dosažených výsledků prokázala pozitivní vliv prodloužené doby zrání a obsahu popílku ve směsi na difúzi chloridu do betonu. [13]

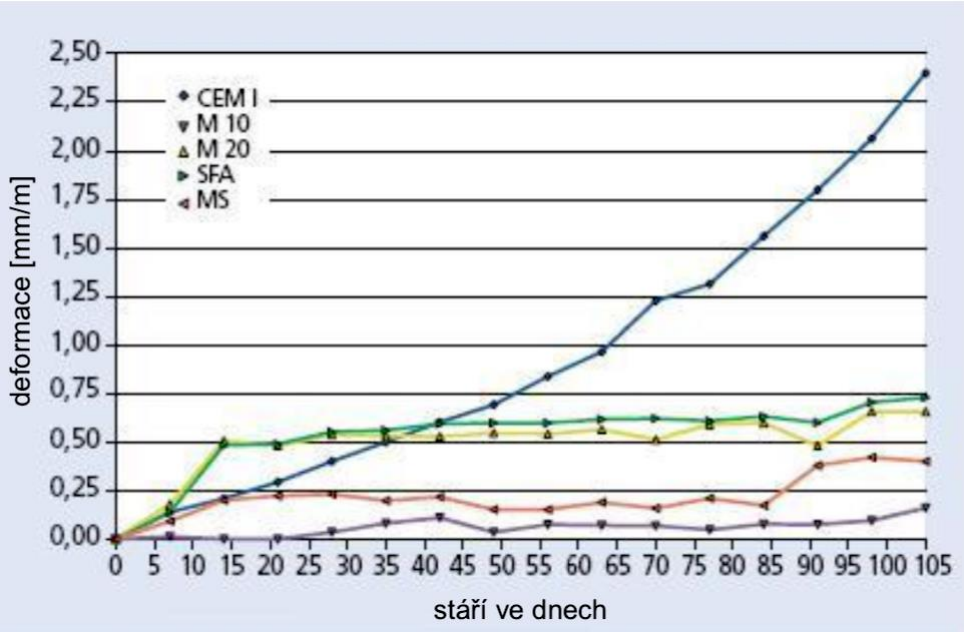


Obr. 21 Betonová směs s obsahem popílku použitá na výstavbu mostovky a pilíře mostu v Tampa Bay ve státě Florida [11]

7.3 Vysoce odolný beton – odolnost proti síranům

Ke stanovení odolnosti proti pronikání síranů byly směsi s jemným popílkem (černouhelným) zkoušeny podle zkušební metody SVA (zkušebního metody expertního výboru) a srovnávány se směsi pouze s portlandským cementem. U zkušební metody SVA se stanovuje podélné přetvoření plochých hranolů (160 × 40 × 40 mm) rozpínáním při působení síranů (30 g SO_4^{2-}/l). Ze vzniklého podélného přetvoření je substrahováno „přirozeně“ podélné přetvoření, které je měřeno paralelně na referenčním zkušebním hranolu stejného složení v nasyceném roztoku hydroxidu vápenatého. Hraniční hodnota, která vzniká z podélného přetvoření pro matrici odolnou vůči síranům, je pro ploché hranoly ze směsi po 91 dnech 0,5 mm/m.

Na Obr. 22 jsou znázorněna podélná přetvoření příslušných zkušebních těles v závislosti na čase. Výsledky ukazují, že hraniční hodnota pro směs odolnou vůči síranům i pro směs s mikrosilikou a také směs M10 byla podstatně překročena, přičemž podélné přetvoření směsi s jemným popílkem SFA bylo asi 5krát menší než podélné přetvoření s mikrosilikou.

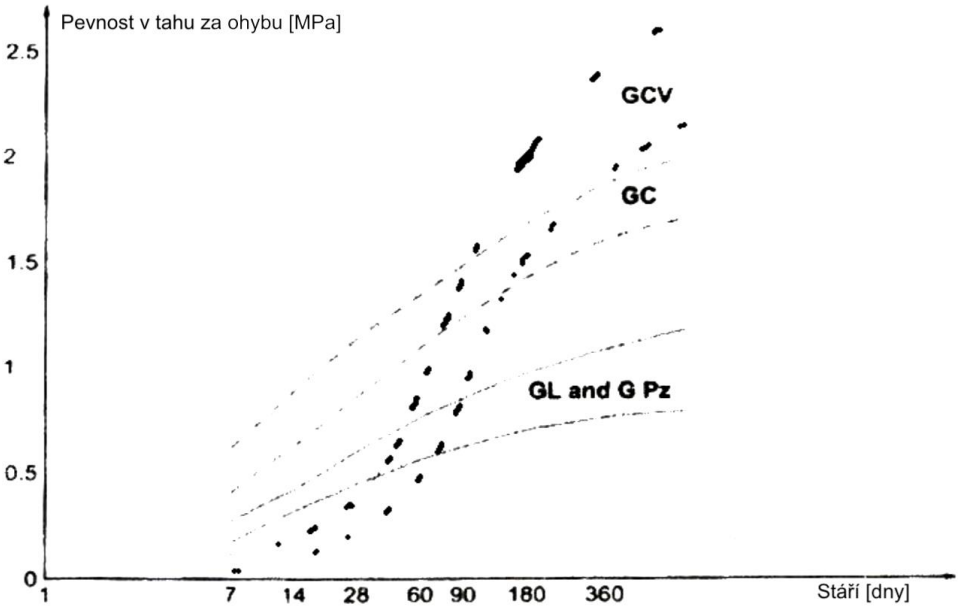


Obr. 22 Podélné přetvoření zkušebních těles při působení síranů [14]

Souhrnné výsledky ukazují, že s jemnými popílky je možné vyrobit maltové, ale i betonové směsi, které vykazují velmi vysokou odolnost proti síranům. V současné době probíhají další výzkumy, které mají prokázat, že použitím popílku je možné vyrobit maltové a betonové směsi, které mají stejně vysokou odolnost proti rozpouštění kyselinami. [14]

7.4 Podkladní vrstvy vozovky

Zatímco se betonové směsi s popílkem používají do prolévaných vrstev vozovky již po mnoho let, používání směsí pro stabilizace s pojivem z popílku a cementu nemá takovou tradici. Když v sedmdesátých letech minulého století vzrostla cena betonu, byl používán popílek v široké míře jako náhrada za určitý podíl cementu ve směsích pro stabilizace. K výběru popílku jako částečné náhrady cementu vedlo mnoho faktorů, i když ten ekonomický byl nejdůležitější, neboť cena popílku oproti cementu je zanedbatelná. Z dalších faktorů je především pozitivní dopad přídavku popílku do betonových směsí na vlastnosti směsi, jak vyplývá z mnohaletého zkoušení. Očekávalo se, že obdobný dopad bude mít popílek i kvalitativně nižší, směsi pro stabilizace. [11]



Obr. 23 Pevnost v tahu za ohybu v závislosti na čase [11]

Legenda: GC = hubený beton, GCV = popílkový beton, GL = struskový, G Pz = pucolánový

Brzy bylo prokázáno, že směsi pro stabilizaci budou mít dobrý vliv zejména pro jejich kontinuální nárůst pevnosti v tahu i po dobu několika let po pokládce vrstvy dosahující vysokých hodnot pevnosti v tahu. [11]

7.5 Beton na kryty vozovek

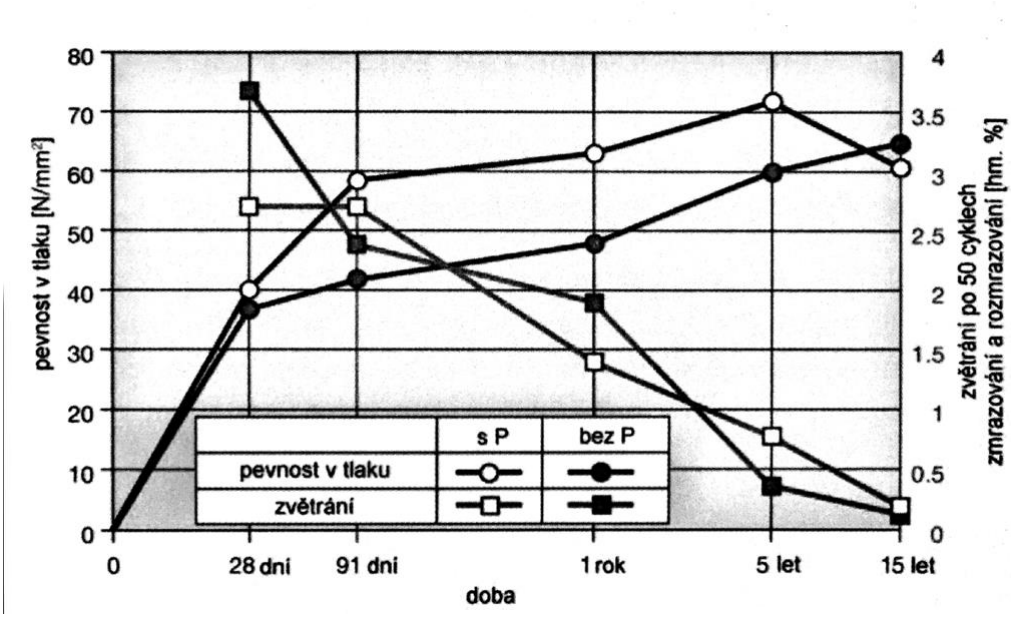
Podle platných německých předpisů, doplňkových technických smluvních podmínek a směrnic na stavbu nosných vrstev s hydraulickými pojivy a vozovek z betonu (ZTV Beton-StB 07) se mohou přidávat příměsi do betonu. Popílek dle EN 450-1 se může přidávat do betonu pro vozovky, nesmí se však započítat jako složka pojiva cementu. Institut pro stavební výzkum RWTH Aachen vykonal už v roce 1988 průkazní zkoušky pro silniční betony s obsahem popílku jako složku pojiva a příměsi do betonu. Po porovnání se složením betonu tehdy obvyklým v silničním stavitelství (330 kg/m^3 portlandského cementu) se zkoumaly směsi se shodným obsahem vzduchu a reologickými vlastnostmi s obsahem:

- 300 kg/m^3 cementu + 60 kg/m^3 popílku,
- 270 kg/m^3 cementu + 90 kg/m^3 popílku,
- 270 kg/m^3 cementu + 120 kg/m^3 popílku.

Zkouška odolnosti proti mrazu a rozmrazovacím prostředkům byla provedena metodou „VZD“ po 28 dnech na zkušebních krychlích s délkou hrany 100 mm.

Jako rozmrazovací prostředek se použil 3% roztok chloridu sodného a k tomu pro směs s obsahem 270 kg/m^3 a 90 kg/m^3 popílku 5% roztoku glykolu. Provedlo se vždy 50 cyklů zmrazování a rozmrazování.

Demonstrační aplikací se v roce 1990 na 500 m dlouhé vnitropodnikové komunikaci elektrárny v Dortmundu na základě průkazních zkoušek prokázalo, že na vlastnosti čerstvého a zatvrdnutého betonu kladně působí použití popílku i v betonu pro vozovky, a že beton vyhovuje všem požadavkům platných předpisů.



Obr. 24 Narušení po 50-ti cyklech zmrazování a rozmrazování v porovnání s vývojem pevnosti v tlaku [1]

Kryt vozovky průmyslového závodu se realizoval finišerem s kluznými bočnicemi o šířce 7 m v jedné vrstvě o tloušťce 22 cm. Aby se umožnilo přímé porovnání, byla v souladu s výše zmiňovanou průkazní zkouškou vybudována polovina cesty se silničním betonem obvyklého složení s 330 kg/m^3 cementu. Beton druhé poloviny vozovky obsahoval 90 kg/m^3 popílku, jako příměsi do betonu a 270 kg/m^3 cementu tak, jako beton pro výše uvedené zkoušky zmrazování a rozmrazování. Obsah vzduchu byl přibližně 5 % u obou záměsí.

Tab. 9 Složení betonu pro kryty vozovek [15]

Surovina		Beton bez popílku	Beton s popílkem
Druh cementu a pevnostní třída		CEM I 32,5 R	CEM I 42,5 R
Cement	kg/m^3	330	270
Popílek	kg/m^3	-	90
Voda	kg/m^3	145	141
Vodní součinitel		0,44	0,52
Kamenivo			
Přírodní písek 0–2 mm	kg/m^3	534	505
Křemencová drť 5–11 mm	kg/m^3	186	201
Čedičová drť 8–22 mm	kg/m^3	1263	1233
Provzdušňovací přísada	kg/m^3	1,32	1,2
Obsah jemných podílů	kg/m^3	364	391

Použitím popílku se zlepšila zhutnitelnost, snížil se sklon k pocení a příznivě se ovlivnila kvalita povrchu. Všechny výsledky zkoušek zatvrdlého betonu na odebraných vývrtech ze silničního úseku, zcela potvrdily očekávání vkládaná do betonu s přídavkem popílku (Tab. 10).

Tab. 10 Parametry zatvrdnutého betonu [15]

Parametr		Stáří betonu	Beton	
			bez popílku	s popílkem
Pevnost v tlaku	N/mm^2	28 dní	45	45
		90 dní	47	52
		1 rok	49	51
		5 let	51	58
Objemová hmotnost zatvrdlého betonu	kg/m^3	28 dní	2460	2440
		5 let	2460	2490
Obsah vzduchu	%	28 dní	4,5	3,1
Součinitel prostorového rozložení	mm	28 dní	0,06	0,07

Při zkoumání pórové struktury se prokázal posun rozdělení velikosti pórů od větších kapilárních pórů směrem k drobnějším gelovým pórům následkem pucolánové reakce popílku. Tento kladný efekt způsobuje, že se podstatně sníží vnikání chloridů do betonu, čímž se významně zlepší dlouhodobá trvanlivost popílkového silničního betonu.

Novější výzkumné projekty k prokazování trvanlivosti povrchů popílkových silničních betonů a vlivu popílku na trvanlivost silničního betonu s kamenivem citlivým na alkálie ukázaly, že silniční betony vyrobené s popílkem jako příměsí do betonu jsou ve všech ohledech minimálně srovnatelné s referenčními betony bez popílku. V porovnání trvanlivosti z hlediska ekologie a ekonomie výrazně převyšují klady v použití popílku v silničním betonu. [1]

II. Praktická část

8 Cíl praktické části

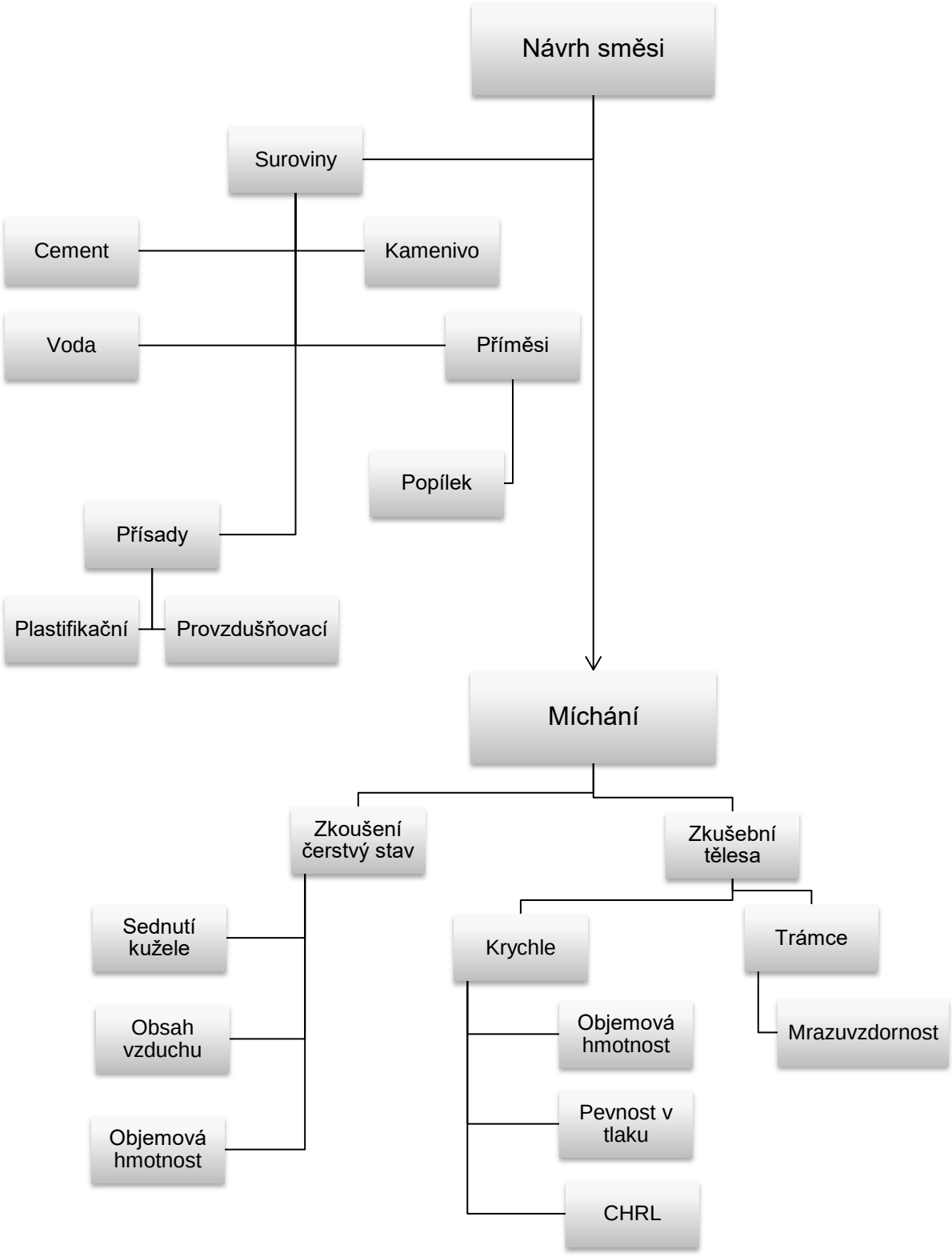
Cílem praktické části je ověřit vliv aktivní příměsi, a to konkrétně elektrárenského popílku na vlastnosti betonu v čerstvém i zatvrdlém stavu. Vlastnosti betonu budou ověřeny pro prostředí XF3 a XF4, které jsou definovány v teoretické části. Popílek bude na základě konzultace s vedoucím práce nahrazovat 30 % dávky cementu. Tato dávka byla zvolena jak z ekonomického tak ekologického hlediska. Výsledkem by mělo být zachování, v lepším případě zlepšení, vlastností betonu především v zatvrdlém stavu. Jednotlivé zkoušky, jak v čerstvém tak i zatvrdlém stavu budou prováděny, dle uvedené metodiky, která je uvedená níže.

9 Metodika práce

Dle zadání a následné konzultace s vedoucím bakalářské práce, byla navržena jedna pevnostní třída, která je specifikována v následující kapitole (viz. 10). Jednotlivé suroviny jsou podrobně rozebrány níže (viz. 11).

V první fázi, kde jsme pozorovali vlastnosti čerstvého betonu, byly stěžejními vlastnosti, především dosažení vhodné konzistence a obsahu vzduchu. Jelikož pro prostředí XF4 je dle normy vyžadováno provzdušnění, proto byl pro některé receptury kladen důraz na procento vzduchu v BS. Konzistence dle zadání BP je předepsána na sednutí kužele S3 a navíc bylo navržena konzistence S4 s vyšším obsahem cementu.

V druhé fázi jsme se zabývali vlastnosti v zatvrdlém stavu. Potenciálem této práce je použití těchto betonů pro pozemní komunikace. Nejdůležitějšími zkoumanými vlastnostmi bylo především CHRL, pevnost v tlaku a mrazuvzdornost. Tyto vlastnosti jsme zkoušeli po 28 dnech, pevnost v tlaku i po 60 dnech, kvůli pucolánové aktivitě popílku. Zkoušky CHRL a pevnost v tlaku byly prováděny na krychlích a mrazuvzdornost na trámcích. Pro přehlednost jednotlivých zkoušek, je možno metodiku práce sledovat v následujícím schématu Obr. 25.



Obr. 25 Schéma metodiky práce experimentální části BP

10 Receptury

Jak už bylo zmíněno výše, byla navržena jedna pevnostní třída, a to konkrétně beton třídy C 30/37. Konzistence byla dle zadání navržena S3 a navíc byla navržena varianta betonu C 30/37 s větším množstvím cementu a tedy konzistencí S4. Těchto pevností bychom měly dosáhnout po 28 dnech zrání ve vlhkém prostředí. Tyto dvě varianty betonu byly následně rozděleny na další, které jsou uvedeny v tabulkách níže Tab. 11 až Tab. 16.

Tab. 11 Receptura 1, C 30/37, S3 – provzdušněno

Surovina		Výrobce	Množství [kg]
CEM I 42,5 R		Mokrá	350
DTK 0–4 mm		Žabčice	826
HDK 4–8 mm		Olbramovice	211
HDK 8–16 mm			704
Voda		FAST VUT	169
Mapefluid N200	0,90 % z m_c	Mapei	3,42
Microporan	0,13 % z m_c	Stachema	0,5

Tab. 12 Receptura 2, C 30/37, S3 – 30 % popílku

Surovina		Výrobce	Množství [kg]
CEM I 42,5 R		Mokrá	245
DTK 0–4 mm		Žabčice	856
HDK 4–8 mm		Olbramovice	226
HDK 8–16 mm			753
Voda		FAST VUT	165
Mapefluid N200	0,90 % z m_c	Mapei	3,15
Popílek	30 % z m_c	Rybnik	105

Tab. 13 Receptura 3, C 30/37, S3 – provzdušněno + 30 % popílku

Surovina		Výrobce	Množství [kg]
CEM I 42,5 R		Mokrá	245
DTK 0–4 mm		Žabčice	856
HDK 4–8 mm		Olbramovice	226
HDK 8–16 mm			753
Voda		FAST VUT	165
Mapefluid N200	0,90 % z m_c	Mapei	3,15
Popílek	30 % z m_c	Rybnik	105
Microporan	0,13 % z m_c	Stachema	0,5

Tab. 14 Receptura 4, C 30/37, S4 – provzdušněno

Surovina		Výrobce	Množství [kg]
CEM I 42,5 R		Mokrá	395
DTK 0–4 mm		Žabčice	760
HDK 4–8 mm		Olbramovice	205
HDK 8–16 mm			720
Voda		FAST VUT	161
Mapefluid N200	0,90 % z m_c	Mapei	3,69
Microporan	0,13 % z m_c	Stachema	0,5

Tab. 15 Receptura 5, C 30/37, S4 – 30 % popílku

Surovina		Výrobce	Množství [kg]
CEM I 42,5 R		Mokrá	275
DTK 0–4 mm		Žabčice	798
HDK 4–8 mm		Olbramovice	230
HDK 8–16 mm			758
Voda		FAST VUT	167
Mapefluid N200	0,90 % z m_c	Mapei	3,56
Popílek	30 % z m_c	Rybnik	120

Tab. 16 Receptura 6, C 30/37, S4 – provzdušněno + 30 % popílku

Surovina		Výrobce	Množství [kg]
CEM I 42,5 R		Mokrá	275
DTK 0–4 mm		Žabčice	798
HDK 4–8 mm		Olbramovice	230
HDK 8–16 mm			758
Voda		FAST VUT	167
Mapefluid N200	0,90 % z m_c	Mapei	3,56
Popílek	30 % z m_c	Rybnik	120
Microporan	0,13 % z m_c	Stachema	0,5

11 Suroviny

Veškeré vstupní suroviny musí splňovat technické požadavky i normy. Silniční betony pro použití do prostředí XF musí navíc splňovat požadavky ŘSD, které jsou v našem státě velmi přísné.

11.1 Kamenivo

Hlavní nosnou kostrou betonu je kamenivo. Pro naše účely bylo použito kamenivo 3 frakcí a to konkrétně 0–4 mm, 4–8 mm a 8–16 mm. Drobné kamenivo (= písek) frakce 0–4 mm je z lomu Žabčice. Jedná se o kamenivo těžené prané, poměrně vhodného tvarového indexu tvaru. Nevýhodou je nízký podíl jemných

částic, naopak výhodou je nízké procento jílových minerálů. Hrubé drcené kamenivo frakcí 4–8 mm a 8–16 mm pochází z lomu Olbramovice.

Obr. 26 DTK Žabčice 0–4 mm

Obr. 27 HDK Olbramovice 4–8 mm

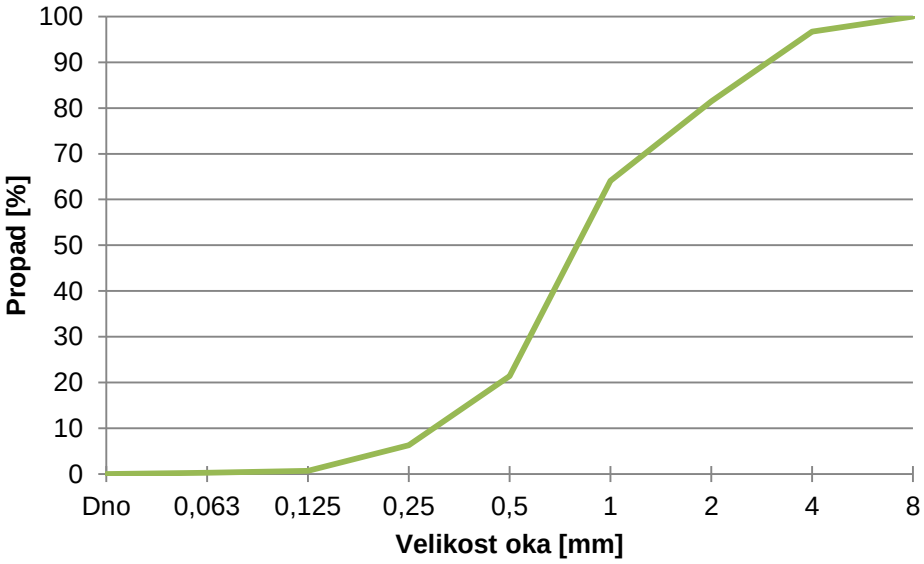
Obr. 28 HDK Olbramovice 8–16 mm

11.1.1 Sítový rozbor

Zkouška byla provedena dle ČSN EN 933-1 Sítový rozbor.

Tab. 17 Sítový rozbor – propady frakce 0–4 mm

Velikost ok [mm]	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	Dno	Σ
Hmotnost dílčího zbytku [g]	16,37	76,34	86,68	213,01	75,48	27,96	2,17	1,42	499,43
Dílčí zbytek na sítě [%]	3,28	15,29	17,36	42,65	15,11	5,60	0,43	0,28	100,00
Celkový zbytek na sítě [%]	3,28	18,57	35,93	78,58	93,69	99,29	99,72	100,00	-
Celkový propad [%]	96,72	81,43	64,07	21,42	6,31	0,71	0,28	0,00	-



Graf 1 Sítový rozbor – křivka zrnitosti kameniva frakce 0–4 mm

Obr. 29 Sítový rozbor písku z lomu Žabčice frakce 0–4 mm

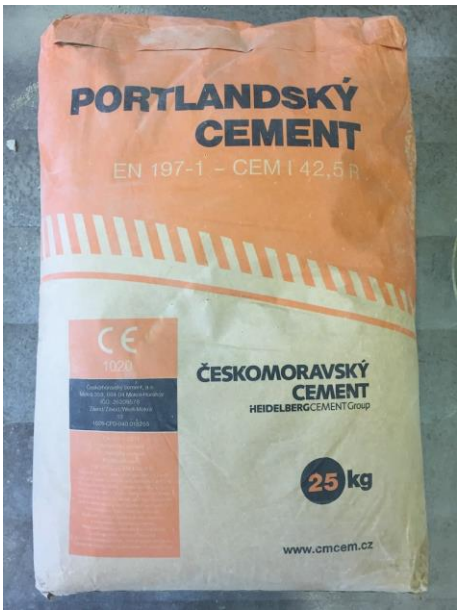
11.2 Cement

Do všech receptur byl použit balený portlandský cement CEM I 42,5 R. Distributorem i výrobcem tohoto konkrétního cementu je Českomoravský cement – Závod Mokrá, který vlastní HeidelbergCement. Podrobné informace jsou uvedeny v technickém listě, který je součástí této práce. Základní vlastnosti můžeme vidět v tab. 12.

Tab. 18 Vybrané parametry cementu

Parametr	Průměrná hodnota	
	7 denní	28 denní
Pevnost v tlaku	53 N/mm^2	61 N/mm^2
Pevnost v tahu za ohybu	8 N/mm^2	9 N/mm^2
Počátek tuhnutí	219 min	
Konec tuhnutí	286 min	
Měrný povrch	374 m^2·kg^{-1}	
Měrná hmotnost	3110 kg·m^{-3}	
Hydratační teplo	310 J·g^{-1}	

Hlavními přednostmi tohoto cementu je rychlý nárůst pevností s čím souvisí i rychlý nárůst hydratačního tepla. Díky těmto parametrům je cement vhodný pro betonování za nízkých teplot v zimním období a při betonáži, kde je rychlý nárůst pevností očekávaný (např. předpjatý beton). Podrobné informace jsou uvedeny v technickém listu, který je součástí této práce.



Obr. 30 Fotodokumentace cement CEM I 42,5 R

11.3 Popílek

Dle zadání bakalářské práce měl být použit vysokoteplotní popílek z elektrárny Opatovice. Bohužel tento popílek nebyl na skladě, proto na doporučení vedoucího bakalářské práce byl použit jiný popílek. Jedná se o černouhelný popílek z elektrárny Rybnik na území Polska nedaleko českých hranic.

Obr. 31 Fotodokumentace popílek Rybnik

11.4 Voda

Do všech záměsí byla použita voda z vodovodního řádu, komplexu Vysokého učení technického – Fakulta stavební a to konkrétně z budovy D. Dodavatelem pitné vody jsou Brněnské vodárny a kanalizace, a.s. Voda splňuje všechny náležitosti legislativy pro použití do betonu jako záměsové vody.

11.5 Přísady

Přísady jsou chemické sloučeniny, které se přidávají během míchání do betonu v množství od 0,2 do 5 % hmotnosti cementu za účelem modifikace vlastností čerstvého nebo tvrdnoucího betonu. Celkové množství přísad, pokud se používají, nesmí překročit maximální dávkování doporučené výrobcem přísady.

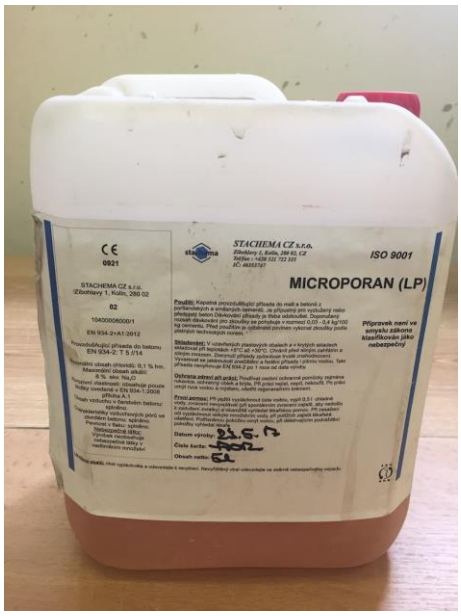
11.5.1 Plastifikační přísady

Plastifikační přísady redukují potřebné množství vody pro dosažení stejné zpracovatelnosti čerstvého betonu. Superplastifikační přísady jsou látky, které výrazně redukují potřebné množství vody, při stejné zpracovatelnosti čerstvého betonu. V recepturách byl použit superplastifikátor Mapefluid N200 od firmy Mapei. Podrobné informace jsou uvedeny v technickém listu, který je součástí této práce.

Obr. 32 Fotodokumentace plastifikátor Mapefluid N200

11.5.2 Provzdušovací přísady

Látky, které po přidání během míšení čerstvého betonu, vytváří ve velkém počtu uzavřené vzduchové póry jemně distribuované v betonu. V recepturách byla použita provzdušovací přísada MICROPORAN od firmy Stachema. Specifické informace jsou uvedeny v technickém listě.



Obr. 33 Fotodokumentace MICROPORAN

12 Zkoušení čerstvého betonu dle ČSN EN 12350

12.1 ČSN EN 12350 – Část 2: Zkouška sednutím

12.1.1 Podstata zkoušky

Zkouška je vhodná pro betony, kde maximální zrno kameniva je 40 mm. Výsledek zkoušky by se měl pohybovat v intervalu 10–200 mm.

12.1.2 Pomůcky

Abramsův kužel (d_s = 200 ± 2 mm, d_h = 100 ± 2 mm, h = 300 ± 2 mm), propichovací tyč, pravítko, nádoba na promíchání, podkladní deska, stopky, lopatka, násypka, hadřík.

12.1.3 Postup

Navlhčíme všechny pomůcky a formu přišlápneme k podkladní desce a plníme ve 3 vrstvách. Každou vrstvu propichujeme 25 vpichy propichovací tyčí.

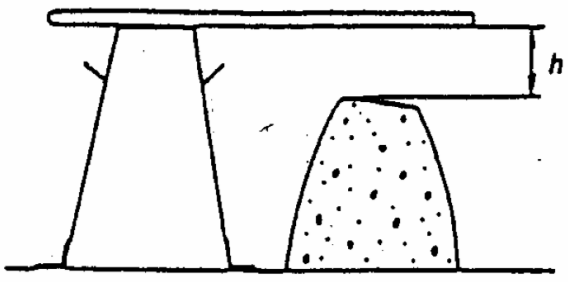
Druhou a třetí vrstvu propichujeme tak, aby vpichy zasahovaly do předchozí vrstvy. Poslední vrstvu naplníme přes okraj, odstraníme násypku a zarovnáme povrch betonu valivým pohybem tyče po okraji formy. Přitlačíme formu k desce, sestoupíme z ní a poté formu zvedneme svislým pohybem vzhůru během 2–5 s. Následně odečteme rozdíl výšky formy a nejvyššího bodu sednutého kužele. Výsledné sednutí zaokrouhlíme na celé desítky mm. Celá délka zkouška od plnění formy až po zvednutí musí být maximálně 150 s.

12.1.3 Vyhodnocení zkoušky

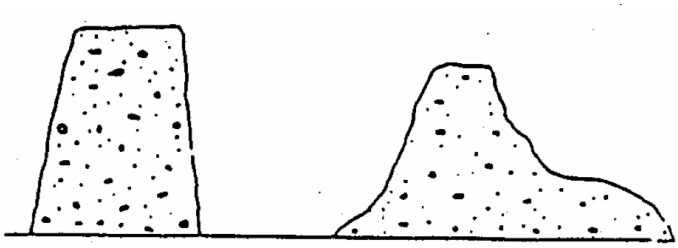
Zkouška je platná za předpokladu, že dojde k sednutí bez porušení betonu a kužel je symetrický. Jestliže dojde ke zborcení nebo usmyknutí kužele, zkouška se musí opakovat (Obr. 35). Pokud i u následující zkoušky nedojde k symetrickému sednutí potom má beton nedostatečnou plasticitu, a je tedy nevhodný.

Tab. 19 Zatřídění dle normy

Stupeň	Sednutí [mm]
S1	10–40
S2	50–90
S3	100–150
S4	160–210
S5	≥220



Obr. 34 Měření sednutí



Obr. 35 Symetrické sednutí (vlevo), zborcení (vpravo)

12.2 ČSN EN 12350 – Část 6: Objemová hmotnost

12.2.1 Podstata zkoušky

Stanovení objemové hmotnosti betonu v čerstvém stavu po zhutnění.

12.2.2 Pomůcky

Forma 150 × 150 × 150 mm, lžíce, srovnávací pravítko, vibrační stůl s elektromagnetem, váhy.

12.2.3 Postup

Zvážíme si prázdnou formu a naplníme betonem alespoň ve dvou vrstvách, každou vrstvu zhutníme pomocí vibračního stolu. Hutníme, dokud z betonu nepřestane odcházet vzduch. Přebytečný beton odstraníme lžící a očistíme nečistoty z povrchu nádoby. Následně nádobu zvážíme a vypočteme objemovou hmotnost. Výsledek zaokrouhlíme na desítky kg/m^3.

12.2.3 Vyhodnocení zkoušky

$$D = \frac{(m_2 - m_1)}{V}$$

D – objemová hmotnost čerstvého betonu [kg/m^3]

V – objem nádoby [m^3]

m_1 – hmotnost prázdné nádoby [kg]

m_2 – hmotnost naplněné nádoby [kg]

12.3 ČSN EN 12350 – Část 7: Obsah vzduchu – tlaková metoda

12.3.1 Podstata zkoušky

Vzduch o známém objemu i tlaku je propojen v uzavřené nádobě s neznámým objemem vzduchu ve vzorku betonu.

12.3.2 Pomůcky

Tlakový hrnec, zhutňovací zařízení, palička, střička, lopatka.

12.3.3 Postup

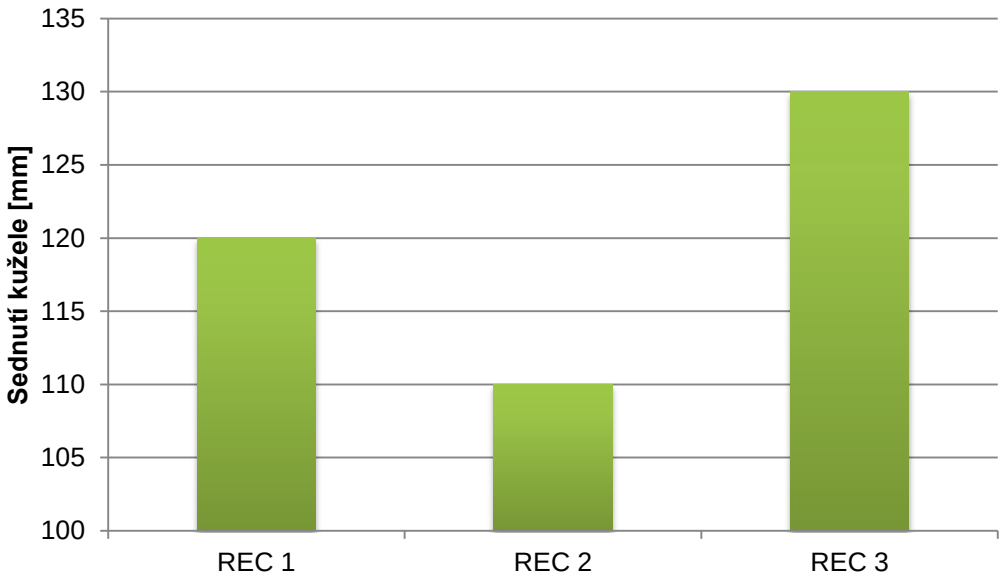
Tlaková nádoba se naplní vzorkem betonu v jedné nebo více vrstvách, aby bylo docíleno dokonalého zhutnění. Zhutnění jsme v našem případě prováděli pomocí vibračního stolu. Okraj se očistí, osuší a připevní se víko pomocí svorek. Hlavní ventil se uzavře a otevřou se pouze dva vedlejší ventily. Z jedné strany se pomocí střičky začne zaplňovat nádoba vodou, dokud nezačne druhým ventilem vytékat přebytečná voda. Paličkou se poklepe nádoba, aby se odstranily vzduchové bubliny a zavřeme hlavní ventil. Do nádoby se natlačí vzduch, nastaví se ukazatel na počáteční hodnotu a spustíme měření. Odečteme hodnotu na budíku s přesností na 0,1 %.

12.4 Vyhodnocení zkoušek čerstvého betonu

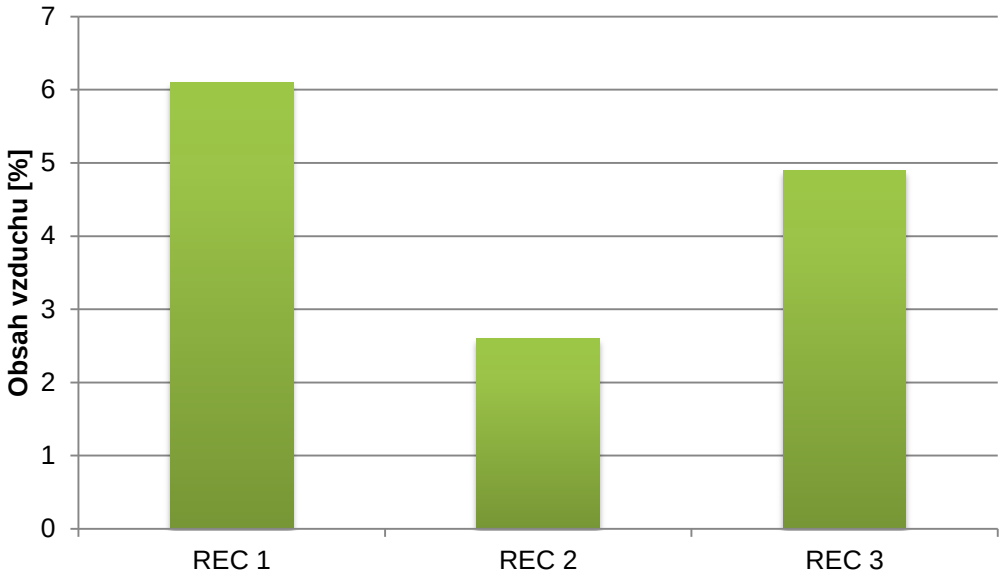
12.4.1 C 30/37, S3

Tab. 20 Vyhodnocení zkoušek čerstvého betonu C 30/37, S3

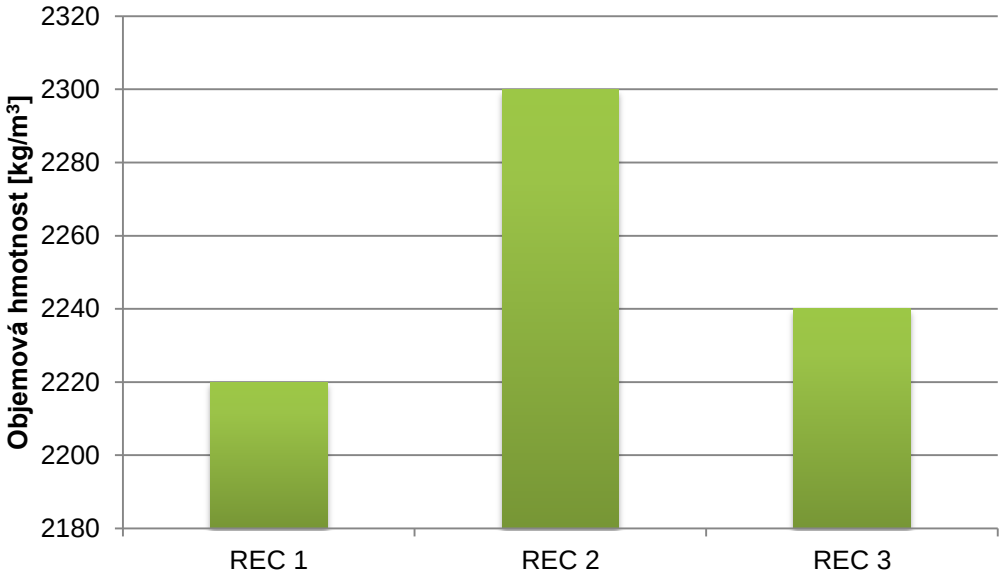
Receptura	Sednutí [mm]	Zatřídění	Obsah vzduchu [%]	$D_{ČB}$ [kg/m^3]
REC 1	120	S3	6,1	2220
REC 2	110	S3	2,6	2300
REC 3	130	S3	4,9	2240



Graf 2 Grafické znázornění sednutí kužele; C 30/37, S3



Graf 3 Grafické znázornění obsahu vzduchu; C 30/37, S3

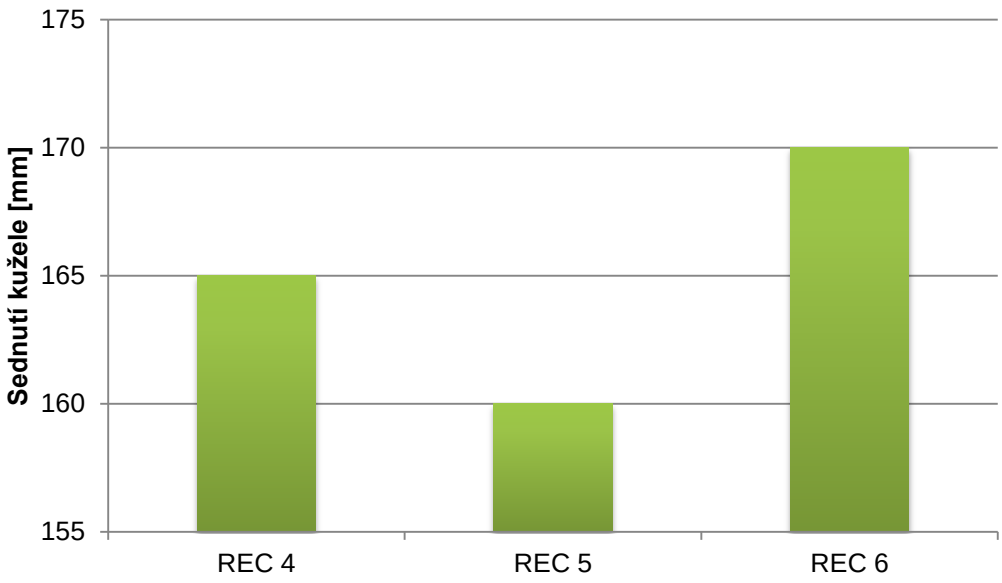


Graf 4 Grafické znázornění $D_{čB}$; C 30/37, S3

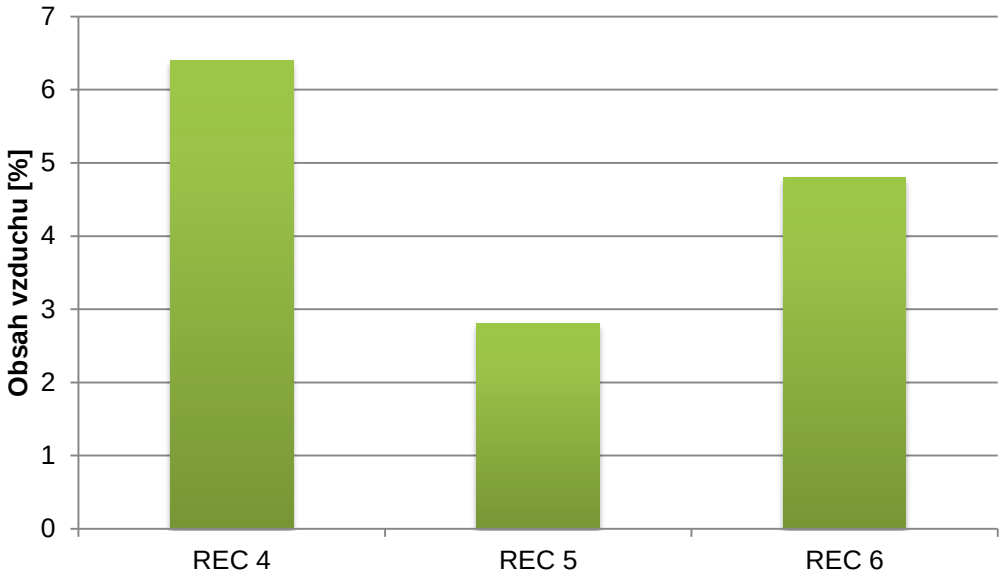
12.4.2 C 30/37, S4

Tab. 21 Vyhodnocení zkoušek čerstvého betonu C 30/37, S4

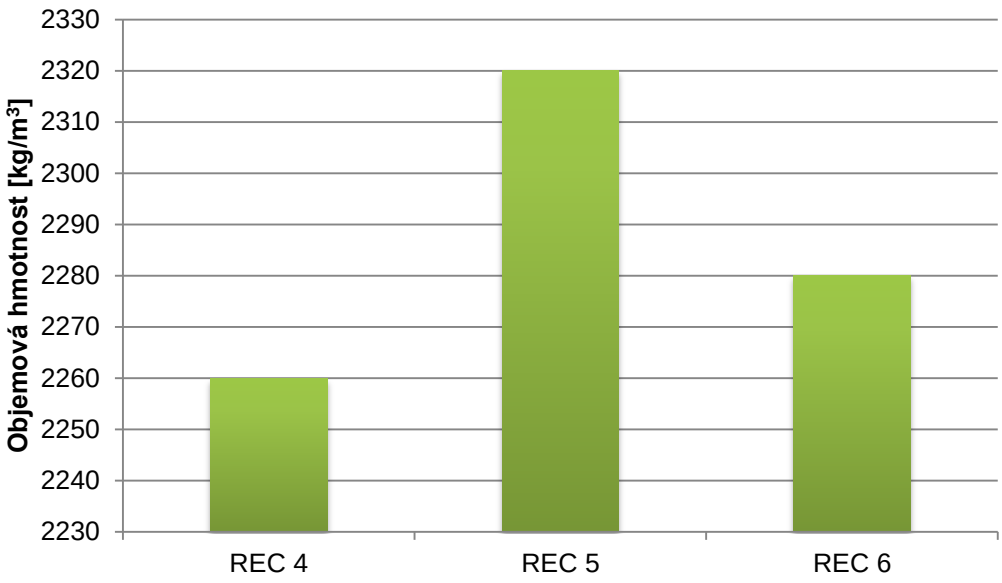
Receptura	Sednutí [mm]	Zatřídění	Obsah vzduchu [%]	$D_{čB}$ [kg/m^3]
REC 4	165	S4	6,4	2260
REC 5	160	S4	2,8	2320
REC 6	170	S4	4,8	2280



Graf 5 Grafické znázornění sednutí kužele; C 30/37, S4



Graf 6 Grafické znázornění obsahu vzduchu; C 30/37, S4



Graf 7 Grafické znázornění $D_{čB}$; C 30/37, S4

12.5 Diskuze zkoušek v čerstvém stavu

Popílek jako aktivní příměs, má značný vliv na výsledné vlastnosti betonu v čerstvém stavu. Z hlediska konzistence byl vliv popílku celkem viditelný. Receptury, kde byl použit popílek, se prokazují lepší zpracovatelností. Konkrétně o 10 mm, při konzistenci S3 a u konzistence S4 o 5 mm, od referenční směsi bez popílku. Nejhorší konzistence, dle předpokladu dosahovaly směsi, kde byl sice použit popílek, ale beton nebyl provzdušněn.

Vliv popílku na obsah vzduchu v čerstvém betonu je negativní. Při použití popílku se provzdušnění betonu snížilo o více jak 1,0 %. Betony bez použití příměsí přesahují hodnotu 6,0 %, zatímco při použití příměsi betony nedosahují ani 5,0 %.

Poslední zkouškou v čerstvém stavu je objemová hmotnost, kde použití popílku má také značný vliv na vlastnosti BS. Příměs popílku v našem případě zvyšuje objemovou hmotnost v čerstvém stavu asi o 20 kg/m^3. Nejvyšší objemové hmotnosti dosáhli betony, které nebyly provzdušněny. Tento výsledek byl očekáván, jelikož vnášením aktivního vzduchu do betonu snižujeme objemovou hmotnost.

13 Zkoušení zatvrdlého betonu dle ČSN EN 12390

13.1 ČSN EN 12390 – Část 3: Pevnost v tlaku

13.1.1 Podstata zkoušky

Postupné zatěžování vzorku (krychle o hraně 150 mm) až do jeho porušení.

13.1.2 Pomůcky

Zatěžovací lis, úhelník, posuvné měřítko.

13.1.3 Postup

Vyjmeme těleso z vodní lázně a osušíme jej. Změříme rozměry prvku, tlačenou plochu vždy ve třech místech a výšku v jednom. Vzorek se umístí do lisu kolmo na směr hutnění a do středu tlačených desek. Na zkušebním zařízení nastavíme rychlost zatěžování a zatěžujeme plynule bez nárazu. Zaznamenáme maximální dosažené zatížení a zkontrolujeme porušení těles (vyhovující způsoby porušení Obr. 36)

13.1.4 Vyhodnocení zkoušky

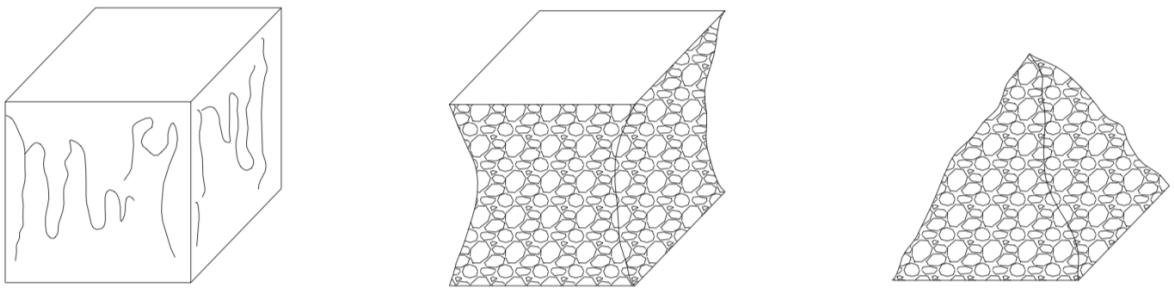
$$f_c = \frac{\mathrm{F}}{A_c}$$

f_c – pevnost betonu v tlaku [N/mm^2]

F – maximální zatížení [N]

A_c – tlačená plocha [mm^2]

Pevnost v tlaku se zaokrouhlí na nejbližších 0,5 N/mm^2.



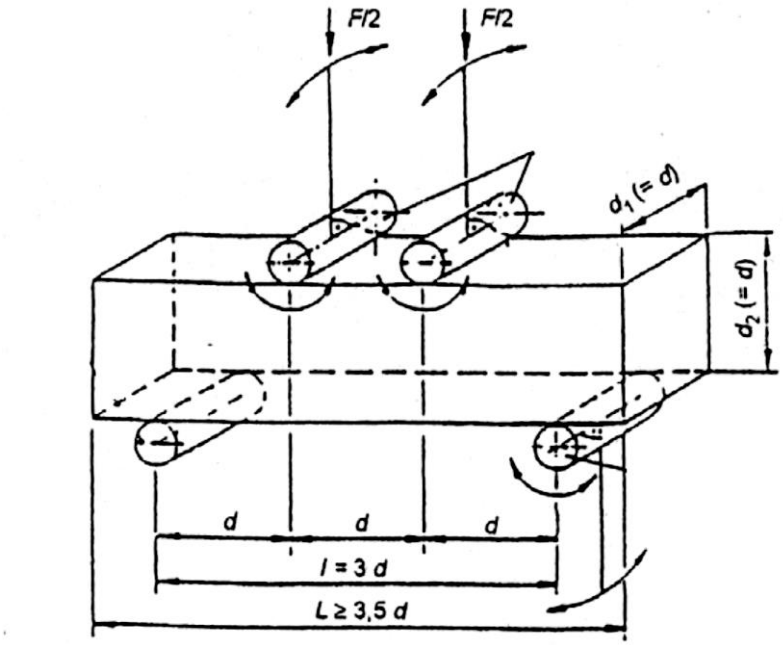
Obr. 36 Vyhovující způsoby porušení

13.2 ČSN EN 12390 – Část 5: Pevnost v tahu ohybem (čtyřbodový)

13.2.1 Podstata zkoušky

Hranolová zkušební tělesa jsou vystavena ohybovému momentu od zatížení přenášeného prostřednictvím horních zatěžovacích a spodních podpěrných válečků.

13.2.2 Zkušební zařízení



Obr. 37 Schéma uložení ve zkušebním zařízení

13.3.4 Vyhodnocení zkoušky

$$f_{cf} = \frac{\mathrm{F} \cdot \mathrm{l}}{d_1 \cdot d_2^2}$$

f_{cf} – pevnost betonu v tahu za ohybu [N/mm^2]

F – maximální zatížení [N]

d_1, d_2 – rozměry příčného řezu tělesa [mm]

l – vzdálenost mezi podporami [mm]

Pevnost v tahu ohybem se zaokrouhlí na nejbližší 0,1 N/mm^2.

13.3 ČSN 73 1326: Stanovení odolnosti cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek

13.3.1 Podstata zkoušky

Při zkoušení metodou automatického cyklování se zkušební povrch tělesa ochladí z kladné teploty na zápornou, na této teplotě je předepsanou dobu

udržován. Pak se zahřeje na kladnou teplotu a je na ní předepsanou dobu udržován.

13.3.2 Zkušební vzorky

Krychle o hraně 150 mm se po vyjmutí z formy uloží do vlhkého prostředí na 28 dnů, zkouší se horní povrch tělesa.

13.3.3 Pomůcky

Automatické programovatelné cyklovací zařízení umožňující provádění cyklického zmrazování a rozmrazování podle požadavků normy, váhy, sušárna, roztok rozmrazovací látky (3% NaCl), misky, střička.

13.3.4 Postup

Připravené vzorky se vloží do misky s roztokem předepsané koncentrace v takovém množství, aby byl vzorek ponořen na výšku 5 ± 1 mm. Pak se vzorky rozloží po dně zkušebního přístroje. Ve zkušebním prostoru se vzorky podrobí střídavému zamrzání a rozmrazování. Cyklus sestává se zchlazení zkušební plochy vzorku na teplotu -15 °C, na této teplotě se udržuje, po dobu 15 min. Pak následuje ohřev zkušební plochy na teplotu 20 °C. Na této teplotě se opět udržuje, po dobu 15 min. Tím končí 1 cyklus a počínají se další. Po každém 25 cyklu přístroj automaticky zkoušení přeruší. Vzorky se vyjmou a proudem vody ze střičky se splaví uvolněné částice. Ty se následně vysuší a zváží s přesností na 0,1 g.

13.3.5 Vyhodnocení

Odolnost povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek je dána hmotností odpadu na jednotku plochy.

$$\rho_a = \frac{\sum m}{A}$$

ρ_a – hmotnost odpadu [g/m^2]

Σm – součet všech hmotností [g]

A – velikost zkušebního povrchu [m^2]

Tab. 22 Zatřídění povrchů zkušebních ploch

Stupeň porušení	ρ_a [g/m^2]	Charakter odpadu
1 – nenarušený	do 50	Velmi jemné prachové částice do 1 mm
2 – slabě porušený	do 500	Jako u stupně 1, větší množství částic do 1 mm, podíl částic do 2 mm menší než 50% hmotnosti odpadu
3 – narušený	do 1 000	Jako u stupně 2, podíl částic nad 2 mm přes 500 g/m^2
4 – silně narušený	do 3 000	Jako u stupně 2, podíl částic nad 2 mm přes 500 g/m^2
5 – rozpadlý	přes 3 000	Jako u stupně 4, podíl částic na 4 mm více jak 20 % hmotnosti odpadu

13.4 ČSN 73 1322: Stanovení mrazuvzdornosti betonu

13.4.1 Podstata zkoušky

Základní zkouškou mrazuvzdornosti betonu je zkouška střídavého zmrazování a rozmrazování vodou nasycených betonových trámců počtem cyklů, který podle požadavků na stupeň mrazuvzdornosti betonu je dán příslušenými normami.

13.4.2 Zkušební vzorky

Betonové trámce o rozměrech 100 × 100 × 400 mm, 25 dní uloženy ve vlhkém prostředí a 3 dny ve vodě do konstantní hmotnosti.

13.4.3 Zkušební zařízení

Mrazící prostor s regulovatelnou teplotou do -20 °C.

13.4.4 Postup

Zmrazování a rozmrazování zkušebních těles probíhá ve zmrazovacích cyklech, při kterých musí být teplota mrazícího prostředí -15 °C až -20 °C. Jeden zmrazovací cyklus se skládá ze 4 hodin zmrazování a dvou hodin rozmrazování. Při zmrazování se zkušební tělesa ukládají do prostoru, který musí mít předem požadovanou teplotu, při rozmrazování se zkušební tělesa ukládají do vody 20 °C. V mimopracovní době jsou zkušební tělesa uložena v mrazícím prostoru požadované teploty. Zkušební trámce se před prvním vložením do mrazícího prostoru zváží. Nato se podrobí požadovanému počtu zmrazovacích cyklů po etapách (25 nebo 50). Po ukončení každé zmrazovací etapy se vždy změří

rozměry, zváží se. Pak se zkušební trámce zkoušejí na pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku na koncích trámců.

13.4.5 Vyhodnocení

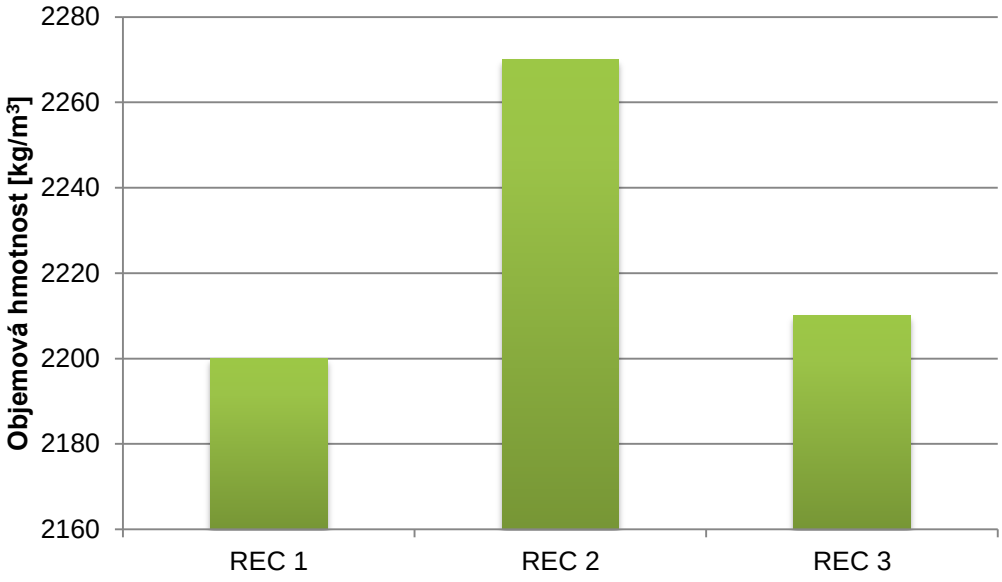
Jako výsledek zkoušky se uvádějí zjištěné úbytky hmotnosti v %, pevnost v tahu za ohybu, pevnost v tlaku a součinitel mrazuvzdornosti. Součinitel mrazuvzdornosti je poměr hodnoty aritmetického průměru pevnosti zmrazovaných trámců v tahu za ohybu k hodnotě aritmetického průměru pevnosti porovnávaných trámců v tahu za ohybu. Beton je mrazuvzdorný na ten počet cyklů, při kterém součinitel mrazuvzdornosti není menší než 75 %.

13.5 Vyhodnocení zkoušek zatvrdlého betonu

13.5.1 Objemová hmotnost

Tab. 23 Objemová hmotnost v zatvrdlém stavu; C 30/37, S3

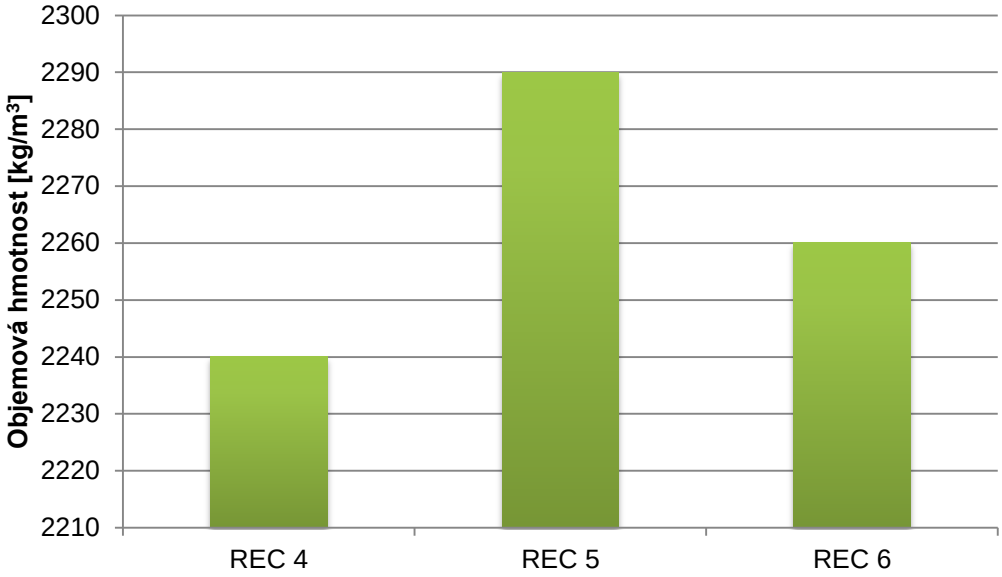
Receptura	D_{ZB} [kg/m^3]
REC 1	2200
REC 2	2270
REC 3	2210



Graf 8 Grafické znázornění D_{ZB}; C 30/37, S3

Tab. 24 Objemová hmotnost v zatvrdlém stavu; C 30/37, S4

Receptura	D_{ZB} [kg/m^3]
REC 4	2240
REC 5	2290
REC 6	2260

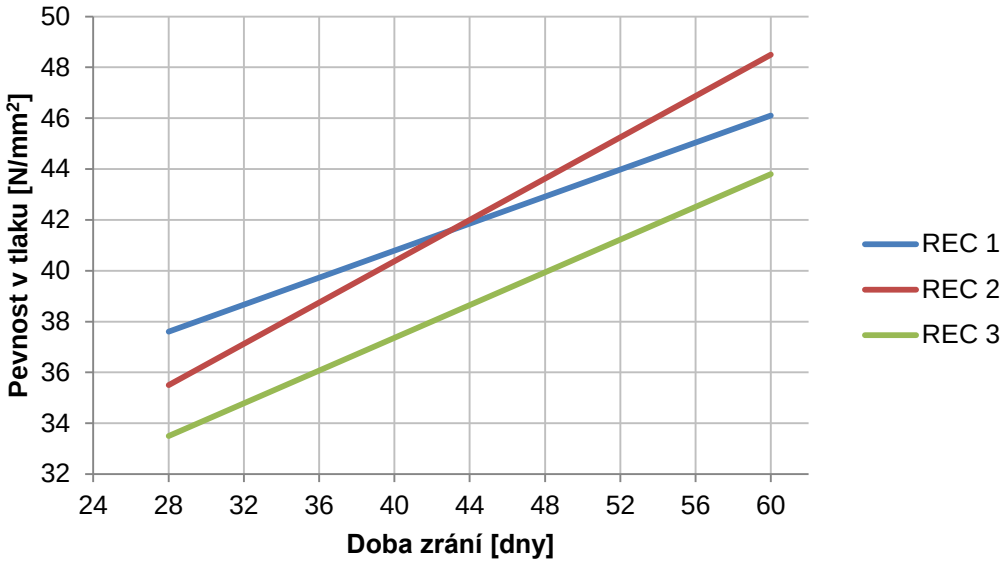


Graf 9 Grafické znázornění D_{ZB}; C 30/37, S4

13.5.2 Pevnost v tlaku

Tab. 25 Vyhodnocení pevnosti tlaku po 28 a 60 dnech zrání; C 30/37, S3

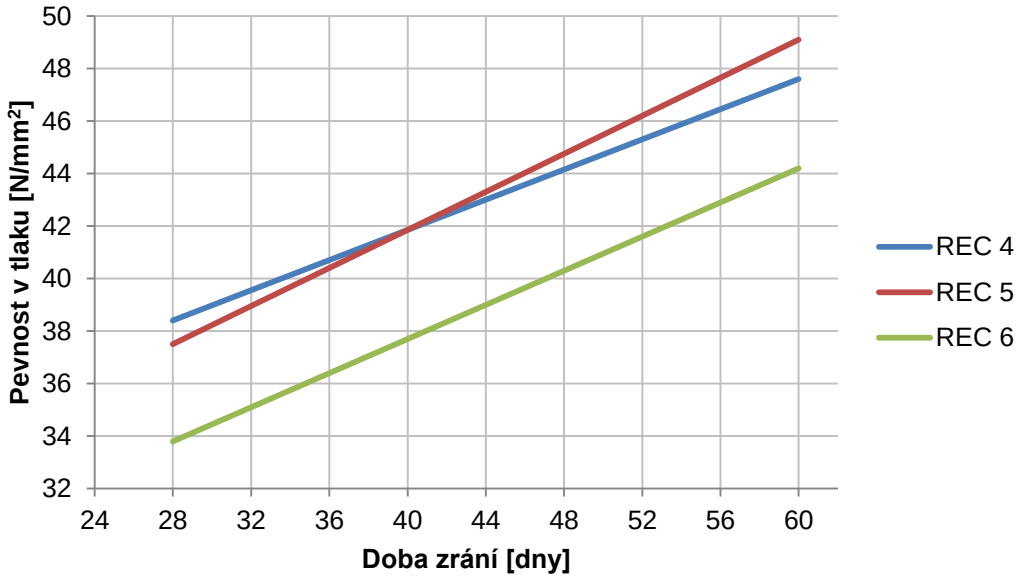
Receptura	Pevnost v tlaku po 28 dnech [N/mm^2]	Pevnost v tlaku po 60 dnech [N/mm^2]
REC 1	37,6	46,1
REC 2	35,5	48,5
REC 3	33,5	43,8



Graf 10 Závislost pevnosti v tlaku na době zrání; C 30/37, S3

Tab. 26 Vyhodnocení pevnosti tlaku po 28 a 60 dnech zrání; C 30/37, S4

Receptura	Pevnost v tlaku po 28 dnech [N/mm^2]	Pevnost v tlaku po 60 dnech [N/mm^2]
REC 4	38,4	47,6
REC 5	37,5	49,1
REC 6	33,8	44,2



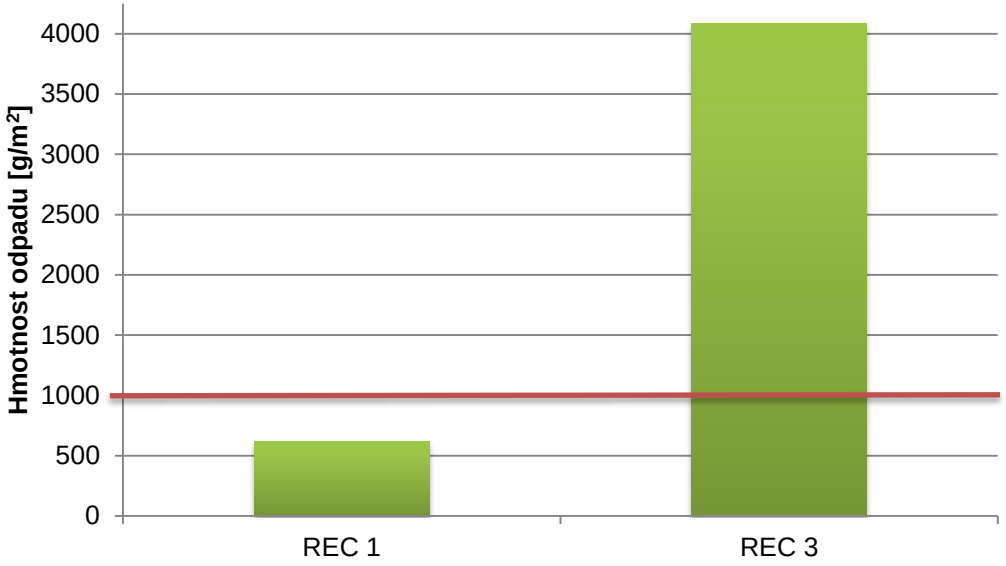
Graf 11 Závislost pevnosti v tlaku na době zrání; C 30/37, S4

13.5.3 CHRL

Tab. 27 Vyhodnocení CHRL; C 30/37, S3

Receptura	Hmotnost odpadu ρ_a [g/m^2]		Zatřídění
	75 cyklů	100 cyklů	
REC 1	532,9	620,1	Narušený
REC 2*	4568,2	-	Rozpadlý
REC 3	3451,8	4080,9	Rozpadlý

*vzorky, které byly neprovzdušněny, dosahovaly extrémního odpadu už při 75 cyklech zkoušení, proto bylo zkoušení přerušeno.

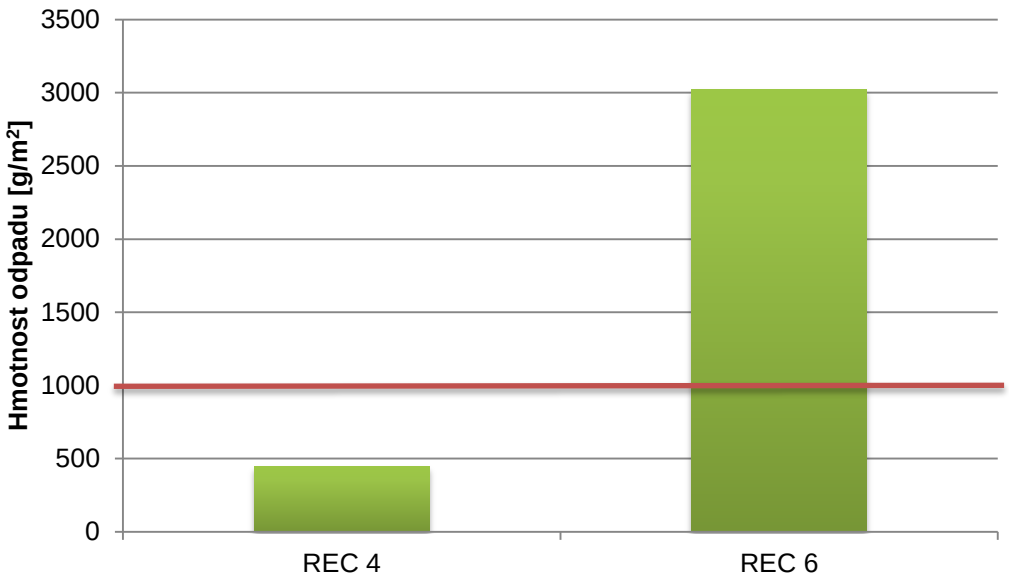


Graf 12 Grafické znázornění s limitou pro prostředí XF4; C 30/37, S3

Tab. 28 Vyhodnocení CHRL; C 30/37, S4

Receptura	Hmotnost odpadu ρ_a [g/m^2]		Zatřídění
	75 cyklů	100 cyklů	
REC 4	247,3	448,7	Slabě narušený
REC 5*	4152,7	-	Rozpadlý
REC 6	2657,2	3 021,3	Rozpadlý

*vzorky, které byly neprovzdušněny, dosahovaly extrémního odpadu už při 75 cyklech zkoušení, proto bylo zkoušení přerušeno.

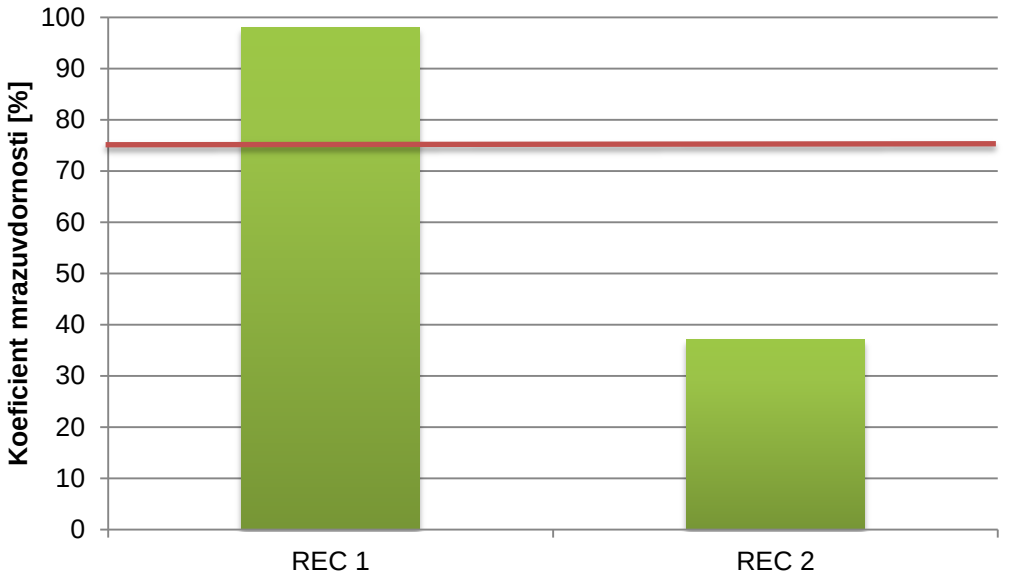


Graf 13 Grafické znázornění s limitou pro prostředí XF4; C 30/37, S4

13.5.4 Mrazuvzdornost

Tab. 29 Vyhodnocení mrazuvzdornosti; C 30/37, S3

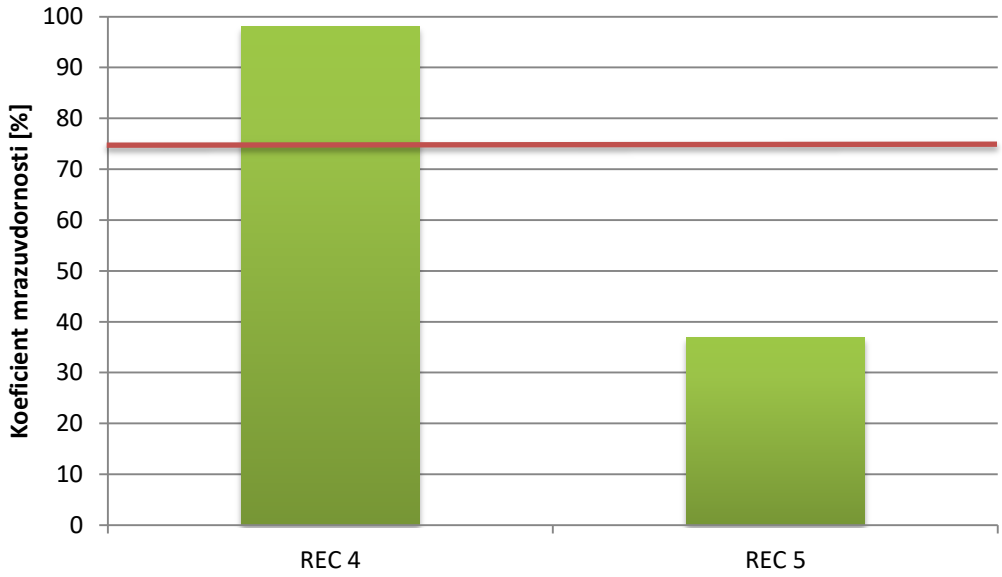
	Doba	f_{cf} [N/mm^2]	f_c [N/mm^2]	Koeficient mrazuvzdornosti [%]	Úbytek hmotnosti [%]
REC 1	Před	5,6	54,0	98,0	0,8
	Po	5,5	53,8		
REC 2	Před	3,5	36,4	37,0	0,9
	Po	1,3	35,9		



Graf 14 Grafické znázornění s limitou pro mrazuvzdorné betony; C 30/37, S3

Tab. 30 Vyhodnocení mrazuvzdornosti C 30/37; S4

	Doba	f_{cf} [N/mm^2]	f_c [N/mm^2]	Koeficient mrazuvzdornosti [%]	Úbytek hmotnosti [%]
REC 4	Před	5,6	55,0	98,0	0,3
	Po	5,5	54,5		
REC 5	Před	3,6	41,5	36,0	1,1
	Po	1,3	40,9		



Graf 15 Grafické znázornění s limitou pro mrazuvzdorné betony; C 30/37, S3

13.6 Diskuze zkoušek v zatvrdlém stavu

První testovanou vlastností v zatvrdlém stavu byla objemová hmotnost. Objemová hmotnost v zatvrdlém stavu má dle předpokladu podobný průběh jako ve stavu čerstvém. Popílek jako příměs nám mírně zvyšuje objemovou hmotnost. Jedná se o zanedbatelnou hodnotu, u konzistence S3 objemová hmotnost stoupla o 10 kg/m^3 a u konzistence S4 o 20 kg/m^3.

Další zkouškou v pořadí byla zkouška pevnosti v tlaku po 28 a 60 dnech zrání. Testování ve dvou časových intervalech jsme prováděly z celkem prostého důvodu, a to nárůstu pevnosti u betonu s náhradou popílku vlivem pucolánové aktivity. Tento teoretický předpoklad se potvrdil i v experimentální části. V grafickém vyjádření můžeme vidět průběh nárůstu pevností v závislosti na čase.

Po 28 dnech zrání dosáhl nejvyšších pevností beton pouze s portlandským cementem, a to konkrétně u konzistence S3 – 37,6 N/mm^2, zatímco beton s částečnou náhradou popílku dosáhl pouze 33,5 N/mm^2, tedy nedosahuje ani předepsané třídy betonu. Hutný neprovzdušněný beton s použitím popílku měl po 28 dnech 35,5 N/mm^2. Avšak v závislosti na čase můžeme vidět, že pevnost betonu bez popílku stoupá pomaleji, než u betonu pouze s cementem. Nejvyšší pevnosti, dle předpokladu dosáhl neprovzdušněný beton, a to 48,5 N/mm^2. Beton bez popílku měl 46,1 N/mm^2 a provzdušněný beton s použitím popílku 43,8 N/mm^2. Beton s použitím pouze portlandského cementu dosahuje pořád vyšších pevností, ale lze předpokládat, že v závislosti na čase, tj. například po 90 dnech zrání, bude beton s použitím popílku dosahovat větších pevností než beton bez popílku, u kterého se nepředpokládá velký nárůst pevností. Porušení všech vzorků bylo vyhovující Obr. 38. Výsledný průběh zkoušky u konzistence S4 je téměř totožný s konzistencí S3, jedná se pouze o nepatrné rozdíly v pevnostech vlivem většího množství cementu.

Obr. 38 Fotodokumentace porušení při zkoušce pevnosti v tlaku

Dále byla provedena zkouška stanovení odolnosti cementového betonu proti působení vody a chemickým rozmrazovacích látek (dále „CHRL“). Zkoušení probíhalo po 28 dnech zrání a na vzorcích zcela nasycených vodou. U vzorků

bez provzdušnění s použitím popílku nastal rozpad už při 75 cyklech zkoušení, kdy odpad dosahoval přes 4000 g/m^2. Tento výsledek nám potvrdil fakt, že pro vyhovující výsledek zkoušky CHRL musí být beton dostatečně provzdušněn. Avšak tento teoretický předpoklad nám dokazuje testování receptur 1 a 4, kdy se jedná právě o provzdušněný beton a výsledek splňuje požadavky pro prostředí XF4 a to 1000 g/m^2 po 100 cyklech. Konkrétní hodnoty jsou pro konzistenci S3 - 620,1 g/m^2 po 100 cyklech a pro konzistenci S4 - 448,7 g/m^2 taktéž po 100 cyklech. Vizuální pohled na vzorky po zkoušce můžeme vidět na Obr. 39.

Obr. 39 Fotodokumentace po zkoušce CHRL – REC1

Následovalo zkoušení provzdušněných betonu s částečnou náhradou cementu popílkem. Výsledek tohoto zkoušení byl velmi špatný, odpady po 100 cyklech zkoušení byly velké. Po 100 cyklech zkoušení činil odpad u konzistence S3 - 4080,9 g/m^2 a konzistence S4 - 3021,3 g/m^2. Tento rozdíl je možno přiřazovat k většímu množství cementu u konzistence S4. Avšak i přesto je odpad 3krát až 4krát větší, než je normovaná hodnota pro prostředí XF4. Povrch zkušebních vzorků je možno pozorovat na Obr. 40.

Obr. 40 Fotodokumentace po zkoušce CHRL – REC6

Poslední prováděnou zkouškou byla mrazuvzdornost, která byla prováděna pouze na 4 recepturách z důvodu časové náročnosti. Zkouška v závislosti na zkoušku CHRL měla podobný průběh, kdy betony s popílkem bez provzdušnění dosahují v obou případech mrazuvzdornosti okolo 37 %, zatímco provzdušněný beton dosahuje mrazuvzdornosti 98 %. Hranice pro betony odolné vůči mrazu je 75 %.

14 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo ověření trvanlivosti betonu s elektrárenskými popílky pro prostředí XF3 a XF4. Jaký vliv má popílek jako aktivní příměs na vlastnosti betonu v čerstvém i zatvrdlém stavu. Především zahraniční studie potvrzují, že při vhodném složení, použití popílku zlepšuje vlastnosti betonu jak v čerstvém, tak i zatvrdlém stavu. Musí však být kladen důraz, na technologický postup, při samotném míchání a zpracování směsi. Při nedodržení těchto postupů, může mít beton s popílkem, horší vlastnosti než beton pouze s portlandským cementem. S tím souvisí i nízký vodní součinitel, a tedy používání superplastifikačních přísad. Dalšími poznatky je, že v průběhu zrání musí být beton vhodně a delší dobu ošetřován. Jedná-li se o betony pro prostředí XF4 a tedy betony, které jsou vysoce nasyceny vodou s rozmrazovacími prostředky, pak musí být dostatečně provzdušněn. Díky částečné náhradě cementu popílkem je hydratační teplo u těchto betonů nižší a tím pádem je beton i méně náchylný ke vzniku trhlin. S vývinem hydratačního tepla souvisí i výsledné pevnosti v tlaku. Betony s použitím popílku dosahují vyšších pevností než bez popílku, avšak v závislosti na čase. Tento proces je pomalejší díky pucolánové reakci. Nevýhodou těchto betonů i přes dodržení všech technologických zásad, je beton méně odolný vůči mrazu, chemicky rozmrazovacím látkám, a také karbonataci, která může být při 30% náhradě cementu popílkem až o 50 % horší než u tradičního betonu pouze s portlandským cementem.

V experimentální části byly testovány 2 varianty pevnostní třídy C 30/37. Tyto 2 varianty se lišily pouze v množství cementu a tedy i konzistenci. Byl použit černouhelný popílek z elektrárny Rybnik v Polsku. Zkoušky v čerstvém stavu, dle poznatků z teoretické části byly potvrzeny. Betony s přídavkem, respektive s částečnou náhradou cementu vykazují lepší zpracovatelnost než betony pouze s portlandským cementem. Hlavním důvodem je zlepšení reologických vlastností betonu. Navíc většina těžených písků z vody, má nízké procento podílů pod 0,125 mm, díky popílku se tato frakce „doplňuje“ a vzniká nám plynulá křivka. V konkrétních hodnotách rozdíl zpracovatelností není ovšem moc rozdílný, avšak tento problém si lze odůvodnit použitím superplastifikačních a provzdušňovacích přísad, které obecně zlepšují zpracovatelnost.

Zkoušení v zatvrdlém stavu, a to konkrétně pevnosti v tlaku dopadly dle očekávání. Po 28 dnech zrání byly pevnosti betonu s portlandským cementem vyšší než betony s částečnou náhradou popílku. Jak už bylo uvedeno výše, tento vývoj je zapříčiněn pucolánovou reakcí popílku. Proto je důležité v návrhu betonové směsi s tímto vlivem počítat Je vhodné tuto vlastnost využít a zakomponovat do samotného návrhu.

Vyhodnocení zkoušky CHRL nebylo adekvátní z důsledku vnesení chyby při úpravě povrchu a hutnění. Tedy nelze zhodnotit vliv elektrárenského popílku v odolnosti vůči CHRL. Chyba vznikla zřejmě vyplavením jednotlivých zrn popílku na povrch, jelikož objemová hmotnost popílku je nižší než objemová hmotnost cementu. Povrch tedy byl nehomogenní a při jeho namáhání byl výsledek zkreslený. Pro potřebu upřesnění této zkoušky, doporučuji zkoušku opakovat na více tělesech a je třeba dbát na zvýšenou pečlivost při hutnění a úpravě povrchu. Tato problematika je s největší pravděpodobností i důvodem pro výslednou mrazuvzdornost betonu, která nedosahuje taktéž adekvátních hodnot.

Problém uvedený výše by mohlo, řešit použití popílkového betonu do zavlhlých až suchých betonových směsí, kde hutnění probíhá vibrolisováním, tedy vibrováním za zvýšeného tlaku. Dle zkušeností získaných od výrobců drobných betonových prvků, je možno dosáhnout téměř „nulových“ odpadů u zkoušky CHRL. V závislosti na nízkém vodním součiniteli se zvyšuje i pevnost v tlaku. Jedná se pouze o získané teoretické předpoklady, které je nutno ověřit.

Na základě této práce, nevidím důvod, proč legislativa zakazuje použití popílkového betonu v oblasti dopravních staveb. V zahraničí se tyto betony používají a výsledné vlastnosti jsou při nejmenším stejném ne-li lepší. Praktická část bohužel tyto parametry neprokázala, avšak je potřeba brát v potaz, že komunikace se většinou zhotovují v konzistenci zavlhlých směsí, pomocí „finišerů“, lze tedy očekávat, že snížením vodního součinitele a změnou hutnění lze dosáhnout požadované trvanlivosti, jak prokazují zahraniční studie.

15 Seznam použité literatury

[1] **BENSCHEIDT, N. a Rudolf HELA.** *Příručka Popílek v betonu: základy výroby a použití.* Hostivice : ČEZ Energetické produkty vydává pro ASVEP, 2013. ISBN 978-80-260-4226-6.

[2] **FEČKO, Peter.** *Popílky.* Ostrava : Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2003. ISBN 80-248-0327-5.

[3] **ČERNÝ, Vít.** *Technologie výroby umělého popílkového kameniva.* Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie hmot a dílců.

[4] —. *Technologie výroby nových spékaných kameniv: Disertační práce.* Brno, 2011, 188 s. : Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.

[5] **ZÁRYBNICKÁ, Michaela.** *Odloučení tuhých částic ve splalinách.* Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav.

[6] **PYTLÍK, Petr.** *Technologie betonu.* 2. vyd. Brno : VUTIUM, 2000. ISBN 80-214-1647-5.

[7] **RŮŽIČKOVÁ, Zdenka, Jaroslav SRB a Jiří VIDLÁŘ.** *Druhotné suroviny - nové zdroje průmyslu.* Praha : SNTL, 1989. ISBN 80-03-00020-3.

[8] *Příručka technologa - Beton.* [online] : Českomoravský cement, 2013.

[9] **PYTLÍK, Petr.** *Technologie betonu I.* Brno : Vysoké učení technické v Brně, 1994. ISBN 80-85867-07-9.

[10] **HELA, Rudolf.** *Technologie betonu I.* Brno : Vysoké učení technické Brno, 2005.

[11] **DIMTER, S., RUKAVINA, T., MINAZEK, K.** *Použití popílku v cementobetonovém krytu pozemní.*

[12] **LU Cai-feng, WANG Wei, LI Qing-tao, HAO Ming, XU Yuan.** *Effects of micro-environmental climate on the carbonation depth and the pH value in fly ash concrete.* China University of Mining & Technology : [online], 2018.

[13] **LELUSZ, M., KOSIOR-KAZBERUG, M.** *Trvanlivost betonu s popílkem vystavenému extrémním klimatickým podmínkám.* 2012.

[14] **BRANDENBURGER, Dirk, HERTEN a HÜTTL, Roland.** *Vysoce odolný beton s popílkem jako přísadou do betonu.* Berlin : [online], 2007.

[15] **KOCH, H. - J., LUTZE, D.** *Fahrbahndecken aus Beton.* Beton 47 : [online], 1997.

16 Seznam použitých norem

ČSN EN 206 Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda

ČSN EN 450–1 Popílek do betonu – Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody

ČSN EN 12350–2 Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutím

ČSN EN 12350–6 Zkoušení čerstvého betonu – Část 6: Objemová hmotnost

ČSN EN 12350–7 Zkoušení čerstvého betonu – Část 6: Obsah vzduchu

ČSN EN 12390–3 Zkoušení zatvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku

ČSN EN 12390–5 Zkoušení zatvrdlého betonu – Část 5: Pevnost v tahu ohybem

ČSN 731326 Stanovení odolnosti cementového betonu proti působení vody a chemickým rozmrazovacích látek

ČSN 731322 Stanovení mrazuvzdornosti betonu

17 Seznam zkratek

EU	Evropská unie
ČR	Česká republika
C	Uhlík
CEM	Cement
HVFA	Beton s vysokým obsahem popílku
SCC	Samozhutnitelný beton
BS	Betonová směs
FA	Popílek
V_z	Obsah vzduchu
w/c (v/c)	Vodní součinitel
PZ	Průkazné zkoušky
w_{ekv}	Ekvivalentní vodní součinitel
CHRL	Chemické rozmrazovací látky
ACM	Alternativní cementové materiály
RCTM	Zrychlená zkouška difúze chloridů
c_d	Koncentrace chloridů
x_d	Hloubky vniknutí
FA/C	Poměr popílku/cementu
SVA	Zkušební metody experimentálního výboru
MS	Mikrosilika
BP	Bakalářská práce
DTK	Drobné těžené kamenivo
HDK	Hrubé drcené kamenivo
FAST VUT	Vysoké učení technické v Brně – Fakulta stavební
m_c	Hmotnost cementu
REC	Receptura
ŘSD	Ředitelství silnic a dálnic

18 Seznam obrázků

Obr. 1 Poměr produkce jednotlivých druhů energetických produktů v EU (statistika ECOBA) [1] 13
Obr. 2 Použití popílku ve stavebním průmyslu v Evropě v roce 2009 (statistika ECOBA) [1] 14
Obr. 3 Vznik popílku [2] 16
Obr. 4 Vysokoteplotní způsob spalování [3] 17
Obr. 5 Vysokoteplotní popílek zvětšení 300x [4] 17
Obr. 6 Vysokoteplotní popílek zvětšení 1500x [4] 17
Obr. 7 Fluidní způsob spalování [3] 18
Obr. 8 Fluidní popílek zvětšení 300x [4] 19
Obr. 9 Fluidní popílek zvětšení 1500x [4] 19
Obr. 10 Schéma cyklonového odlučovače [5] 20
Obr. 11 Schéma mokrého odlučovače [5] 21
Obr. 12 Schéma elektrostatického odlučovače [5] 22
Obr. 13 Trojný diagram dle Rankina [6] 27
Obr. 14 Závislost pevnosti v tlaku na množství popílku a době tvrdnutí [1] 32
Obr. 15 Vývin hydratačního tepla [1] 33
Obr. 16 Relativní vlhkost 60 %, teplota 26 °C [12] 34
Obr. 17 Relativní vlhkost 70 %, teplota 6 °C [12] 34
Obr. 18 Relativní vlhkost 80 %, teplota 20 °C [12] 34
Obr. 19 Překrývaní se oblastí kontaktních zón [1] 36
Obr. 20 Koeficient difúze v závislosti na čase [13] 41
Obr. 21 Betonová směs s obsahem popílku použitá na výstavbu mostovky a pilíře mostu v Tampa Bay ve státě Florida [11] 42
Obr. 22 Podélné přetvoření zkušebních těles při působení síranů [14] 43
Obr. 23 Pevnost v tahu za ohybu v závislosti na čase [11] 44
Obr. 24 Narušení po 50-ti cyklech zmrazování a rozmrazování v porovnání s vývojem pevnosti v tlaku [1] 45
Obr. 25 Schéma metodiky práce experimentální části BP 49
Obr. 26 DTK Žabčice 0–4 mm 53
Obr. 27 HDK Olbramovice 4–8 mm 53
Obr. 28 HDK Olbramovice 8–16 mm 53
Obr. 29 Sítový rozbor písku z lomu Žabčice frakce 0–4 mm 54
Obr. 30 Fotodokumentace cement CEM I 42,5 R 56
Obr. 31 Fotodokumentace popílek Rybnik 56
Obr. 32 Fotodokumentace plastifikátor Mapefluid N200 57
Obr. 33 Fotodokumentace MICROPORAN 58
Obr. 34 Měření sednutí 59
Obr. 35 Symetrické sednutí (vlevo), zborcení (vpravo) 60
Obr. 36 Vyhovující způsoby porušení 65

Obr. 37 Schéma uložení ve zkušebním zařízení 66
Obr. 38 Fotodokumentace porušení při zkoušce pevnosti v tlaku 75
Obr. 39 Fotodokumentace po zkoušce CHRL – REC1 76
Obr. 40 Fotodokumentace po zkoušce CHRL – REC6 77

19 Seznam tabulek

Tab. 1 Chemické složení popílku podle druhu paliva [2] 22
Tab. 2 Chemické složení popílku podle způsobu spalování [2] 23
Tab. 3 Mineralogické složení popílku [7] 24
Tab. 4 Základní fyzikální vlastnosti [1] 24
Tab. 5 Kvalitativní požadavky dle ČSN EN 450-1 [8] 25
Tab. 6 Stupně vlivu prostředí dle ČSN EN 206-1 [10] 36
Tab. 7 Normové požadavky na vlastnosti a složení betonu (50 let) [8] 37
Tab. 8 Vlastnosti betonu po 28 dnech zrání [13] 41
Tab. 9 Složení betonu pro kryty vozovek [15] 46
Tab. 10 Parametry zatvrdnutého betonu [15] 46
Tab. 11 Receptura 1, C 30/37, S3 – provzdušněno 50
Tab. 12 Receptura 2, C 30/37, S3 – 30 % popílku 50
Tab. 13 Receptura 3, C 30/37, S3 – provzdušněno + 30 % popílku 51
Tab. 14 Receptura 4, C 30/37, S4 – provzdušněno 51
Tab. 15 Receptura 5, C 30/37, S4 – 30 % popílku 52
Tab. 16 Receptura 6, C 30/37, S4 – provzdušněno + 30 % popílku 52
Tab. 17 Sítový rozbor – propady frakce 0–4 mm 54
Tab. 18 Vybrané parametry cementu 55
Tab. 19 Zatřídění dle normy 59
Tab. 20 Vyhodnocení zkoušek čerstvého betonu C 30/37, S3 61
Tab. 21 Vyhodnocení zkoušek čerstvého betonu C 30/37, S4 62
Tab. 22 Zatřídění povrchů zkušebních ploch 68
Tab. 23 Objemová hmotnost v zatvrdlém stavu; C 30/37, S3 69
Tab. 24 Objemová hmotnost v zatvrdlém stavu; C 30/37, S4 70
Tab. 25 Vyhodnocení pevnosti tlaku po 28 a 60 dnech zrání; C 30/37, S3 70
Tab. 26 Vyhodnocení pevnosti tlaku po 28 a 60 dnech zrání; C 30/37, S4 71
Tab. 27 Vyhodnocení CHRL; C 30/37, S3 72
Tab. 28 Vyhodnocení CHRL; C 30/37, S4 72
Tab. 29 Vyhodnocení mrazuvzdornosti; C 30/37, S3 73
Tab. 30 Vyhodnocení mrazuvzdornosti C 30/37; S4 74

20 Seznam grafů

Graf 1 Sítový rozbor – křivka zrnitosti kameniva frakce 0–4 mm 54
Graf 2 Grafické znázornění sednutí kužele; C 30/37, S3 61
Graf 3 Grafické znázornění obsahu vzduchu; C 30/37, S3 62
Graf 4 Grafické znázornění $D_{ČB}$; C 30/37, S3 62
Graf 5 Grafické znázornění sednutí kužele; C 30/37, S4 63
Graf 6 Grafické znázornění obsahu vzduchu; C 30/37, S4 63
Graf 7 Grafické znázornění $D_{ČB}$; C 30/37, S4 64
Graf 8 Grafické znázornění D_{ZB}; C 30/37, S3 69
Graf 9 Grafické znázornění D_{ZB}; C 30/37, S4 70
Graf 10 Závislost pevnosti v tlaku na době zrání; C 30/37, S3 71
Graf 11 Závislost pevnosti v tlaku na době zrání; C 30/37, S4 71
Graf 12 Grafické znázornění s limitou pro prostředí XF4; C 30/37, S3 72
Graf 13 Grafické znázornění s limitou pro prostředí XF4; C 30/37, S4 73
Graf 14 Grafické znázornění s limitou pro mrazuvzdorné betony; C 30/37, S3 73
Graf 15 Grafické znázornění s limitou pro mrazuvzdorné betony; C 30/37, S3 74

21 Seznam příloh

1. TECHNICKÝ LIST – Portlandský cement

2. TECHNICKÝ LIST – Mapefluid N200

3. TECHNICKÝ LIST – Microporan