VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

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

STUDIUM TRVANLIVOSTI BETONŮ S POPÍLKY V PROSTŘEDÍ XF

STUDY OF DURABILITY OF CONCRETE WITH FLY ASH IN AN XF

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE JIŘINA JELÍNKOVÁ
AUTHOR

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

BRNO 2014

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ

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

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Jiřina Jelínková
Název	Studium trvanlivosti betonů s popílky v prostředí XF
Vedoucí bakalářské práce	prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
Datum zadání bakalářské práce	30. 11. 2013
Datum odevzdání bakalářské práce	30. 5. 2014

V Brně dne 30. 11. 2013

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

Podklady a literatura

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

Zásady pro vypracování

Využívání elektrárenských popílků z klasického spalování jako aktivní příměsi do betonu se používá desítky let. Běžně se ovšem tato příměs i jako částečná náhrada cementu nepoužívá pro prostředí nasycení betonu vodou a následného cyklického zmrazování, případně i za přítomnosti chemických rozmrazovacích látek - prostředí XF. Vzhledem k pucolánovým vlastnostem, chemickému složení a granulometrii vysokoteplotních el. popílků z produkce ČEZ, a.s. se jeví jako bezpečné použití i pro tato prostředí, i když je to zejména v silničním stavitelství v ČR zakázáno. Cílem bakalářské práce bude vypracovat rozsáhlou rešerši z odborných publikací zaměřenou na problematiku využití těchto popílků ze spalování černého i hnědého uhlí pro betony v prostředí XF, resp. i podkladní vrstvy vozovek (KSC, SC, válcové betony). Zohlednit zejména rizika trvanlivosti při provozování 30 až 50 roků.
V praktické části navrhněte recepturu betonu C30/30XF3 neprovzdušněnou a C30/37XF4 provzdušněnou s použitím cementu CEM I 42,5 bez příměsí popílku jako referenční záměs. Následně navrhněte receptury s 15% a 30% náhradou CEM I 42,5 el. popílky z lokality Dětmarovice a Počerady. Na zkušebních tělesech ověřte 28 denní pevnosti v tlaku, mrazuvzdornost na 100 cyklů a odolnosti proti CHRL a vodotěsnosti betonů pro konzistenci S2.
Rozsah práce min. 45 stran textu

Předepsané přílohy

.....

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

Abstrakt

Práce je zaměřena na problematiku využití popílků ze spalování černého i hnědého uhlí v prostředí XF. Zabývá se vlivem létavého popílku na vlastnosti betonu a jejich experimentální ověření.

Klíčová slova

Trvanlivost betonů, prostředí XF, létavý popílek

Abstract

The work is focused on a problem of using ashes from burning black and brown coal in XF environment. It is oriented on influence of fly ash on properties of concrete and the experimental examining.

Keywords

Durability of concrete, XF environment, fly ash

Bibliografická citace VŠKP

JELÍNKOVÁ, Jiřina. *Studium trvanlivosti betonů s popílky v prostředí XF*. Brno, 2014. 57 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 29.5.2014

……

podpis autora

Jiřina Jelínková

Poděkování:

Na tomto místě bych ráda poděkovala zejména vedoucímu mé bakalářské práce panu prof. Ing. Rudolfu Helovi, CSc., dále pánům Vladimíru Klímovi a Františku Klímovi za veškerou pomoc v laboratořích a cenné rady. A v neposlední řadě také své rodině a snoubenci za podporu nejen při studiu.

V Brně 2014 Jiřina Jelínková

Obsah

1. Úvod ... 11
2. Teoretickáčást ... 11
   2.1 Popílek ... 11
      2.1.1 Elektrárenské popílky, dělení ... 11
      2.1.2 Vznik elektrárenských popílků ... 12
      2.1.3 Vlastnosti popílků ... 16
      2.1.4 Možnosti využití popílků ve stavebnictví ... 17
   2.2 Beton s obsahem elektrárenských popílků ... 18
      2.2.1 Využití popílků jako příměsi do betonu ... 18
      2.2.2 Vliv popílku na vlastnosti čerstvého a ztvrdlého betonu ... 18
      2.2.3 Trvanlivost betonů s příměsí popílků v silničních betonech ... 18
      2.2.4 Použití betonů s popílky v ČR ... 19
   2.3 Prostředí XF ... 20
3. Praktickáčást ... 21
   3.1 Metodika práce ... 21
   3.2 Použité suroviny ... 22
      3.2.1 Cement ... 22
      3.2.2 Kamenivo ... 22
      3.2.3 Voda ... 24
      3.2.4 Plastifikační přísada ... 24
      3.2.5 Provzdušňovací přísada ... 24
      3.2.6 Příměsi ... 24
   3.3 Navržené receptury ... 25
      3.3.1 Referenční směsi ... 25
      3.3.2 Náhrada části cementu popílkem Počerady ... 26
      3.3.3 Náhrada části cementu popílkem Dětmarovice ... 27

3.4 Výsledky provedených měření ... 29
3.4.1 Zkoušeníčerstvého betonu ... 29
3.4.2 Zkoušení zatvrdlého betonu ... 33
4. Závěr ... 42
5. Seznam použité literatury ... 43
6. Seznam příloh ... 44

Seznam obrázků

Obrázek 1: Pozice hydraulických a pucolánových látek v trojném diagramu [5] ... 12
Obrázek 2: Schéma uhelné elektrárny [2] ... 13
Obrázek 3: Schéma cyklonového odlučovače [2] ... 14
Obrázek 4: Schéma hadicového odlučovače [8] ... 15
Obrázek 5: Elektrostatický odlučovač popílku [2] ... 16
Obrázek 6: Základní požadavky na popílek do betonu [3] ... 19

Seznam grafů

Graf 1: Křivka zrnitosti frakce 8 ‑ 16 mm, Olbramovice ... 23
Graf 2: Křivka zrnitosti frakce 0 ‑ 4 mm, Žabčice ... 23
Graf 3: Sednutí kužele prostředí XF3 ... 29
Graf 4: Sednutí kužele prostředí XF4 ... 30
Graf 5: Objemová hmotnost betonu v čerstvém stavu, XF3 ... 32
Graf 6:Objemová hmotnost betonu v čerstvém stavu, XF4 ... 32
Graf 7: Objemová hmotnost v zatvrdlém stavu po 28 dnech, XF3 ... 33
Graf 8: Objemová hmotnost v zatvrdlém stavu po 28 dnech, XF4 ... 34
Graf 9: Pevnost v tlaku po 28 dnech, XF3 ... 35
Graf 10: Pevnost v tlaku po 28 dnech, XF4 ... 36
Graf 11: Hloubka průsaku tlakovou vodou, XF3 ... 37
Graf 12: Hloubka průsaku tlakovou vodou, XF4 ... 38
Graf 13: Úbytek hmotnosti po 100 cyklech zkoušky mrazuvzdornosti ... 40
Graf 14: Součinitel mrazuvzdornosti po 100 cyklech, XF3 ... 41
Graf 15: Součinitel mrazuvzdornosti po 100 cyklech, XF4 ... 41

Seznam tabulek

Tabulka 1:Minerální fáze křemičitého popílku [1] 17
Tabulka 2: Stupně vlivu prostředí dle EN 206-1 [4] 20
Tabulka 3: Sítový rozbor - Olbramovice 8 – 16 mm 22
Tabulka 4: Sítový rozbor - Žabčice 0 – 4 mm 23
Tabulka 5: Chemické složení popílků Dětmarovice a Počerady v % [12] 24
Tabulka 6: Měrný povrch dle Blaina a objemové hmotnosti popílků 25
Tabulka 7: Receptura 1, referenční XF3 25
Tabulka 8: Receptura 2, referenční XF4 26
Tabulka 9: Receptura 3, 15% náhrada hm. cementu popílkem Počerady, XF3 26
Tabulka 10: Receptura 4, 30% náhrada hm. cementu popílkem Počerady, XF3 26
Tabulka 11: Receptura 5, 15% náhrada hm. cementu popílkem Počerady, XF4 27
Tabulka 12: Receptura 6, 30% náhrada hm. cementu popílkem Počerady, XF4 27
Tabulka 13: Receptura 7, 15% náhrada hm. cementu popílkem Dětmarovice, XF3 27
Tabulka 14: Receptura 8, 30% náhrada hm. cementu popílkem Dětmarovice, XF3 28
Tabulka 15: Receptura 9, 15% náhrada hm. cementu popílkem Dětmarovice, XF4 28
Tabulka 16: Receptura 10, 30% náhrada hm. cementu popílkem Dětmarovice, XF4 28
Tabulka 17: Stanovení konzistence čerstvého betonu pomocí sednutí kužele 29
Tabulka 18: Obsah vzduchu v čerstvém betonu 30
Tabulka 19: Objemová hmotnost betonu v čerstvém stavu 31
Tabulka 20: Objemová hmotnost betonu v zatvrdlém stavu 33
Tabulka 21: Pevnost v tlaku po 28 dnech 35
Tabulka 22: Naměřené hodnoty hloubky průsaku 37
Tabulka 23: Výsledky zkoušky CHRL po 100 cyklech 39
Tabulka 24: Výsledky zkoušky mrazuvzdornosti 40

1. Úvod

Již desítky let se využívá elektrárenských popílků z vysokoteplotního spalování jako aktivní příměsi do betonů. Jeho využívání není žádoucí pouze z ekonomického hlediska, i když je to jeden z nejsilnějších faktorů. Popílek jakožto vedlejší produkt uhelných elektráren je ve srovnání s cenou cementu velmi levný. Také z ekologického hlediska je žádoucí jeho využití, aby se nemusel dále skladovat a snížila se tím i spotřeba cementu, jehož výroba je velmi neekologická s obrovskou produkcí CO_2.

Popílek navíc přináší pro beton obohacení jeho vlastností, zlepšuje některé vlastnosti jak čerstvého, tak i zatvrdlého betonu. Bohužel se u nás setkává s nedůvěrou v oblasti silničního stavitelství a prostředí XF obecně, kde je jako částečná náhrada cementu zakázán.

2. Teoretická část

2.1 Popílek

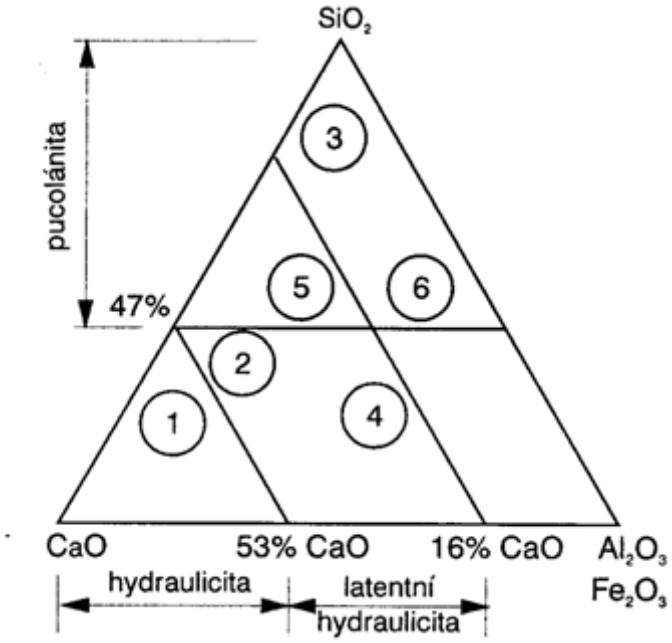
2.1.1 Elektrárenské popílky, dělení

Popílek je tuhý nerostný nespalitelný zbytek po spalování práškového uhlí, zachycený z kouřových plynů v odlučovačích. Skládá se především ze sklovitých kulovitých částic s převážným obsahem SiO_2 a Al_2O_3, přičemž dle EN 197-1 musí být obsah aktivního SiO_2 minimálně 25%.Složení může být proměnlivé vlivem typu spalovaného paliva, lokality či způsobu odlučování. Tato variabilita je výraznější u hnědouhelných popílků, z čehož plyne, že černouhelné popílky jsou pro použití do betonu vhodnější. Zrna černouhelných popílků jsou velikostí velmi podobná zrnům cementu, hnědouhelné popílky mají více nepravidelný tvar zrn. Popílky vykazují pucolánovou aktivitu, která se ovšem projevuje relativně pomalu, běžně je zjistitelná po 90 dnech. [4][5]

Pucolány jsou látky amorfní, tj. nekrystalické povahy na bázi amorfního SiO_2 a hlinitokřemičitanů (alumosilikátů), které po rozmíchání s vodou netuhnou, netvrdnou, nevykazují vaznost sami o sobě ani s přídavkem budiče. Jsou ale schopné reagovat ve vodném prostředí s Ca^{2+} a vytvářet hydratační splodiny, které jsou chemicko-mineralogicky obdobné jako hydratační splodiny portlandského cementu. Reakce je ovšem oproti portlandskému cementu velice pomalá. Při hydrataci alitu a belitu vznikají kalcium-hydro-silikáty - C-S-H systém.[6]

$$SiO_2 + Ca^{2+} + H_2O \rightarrow CaO - SiO_2 - H_2O$$

Obrázek 1: Pozice hydraulických a pucolánových látek v trojném diagramu [5]



1 – portlandské cementy, 2 – vysokopecní strusky, 3 – křemičité úlety, 4 – popílky bohaté na CaO, 5 – popílky bohaté na SiO_2, 6 – pucolánové popílky (Rankin).

Dle typu spalování vzniká buď fluidní popílek, nebo létavý, vysokoteplotní popílek. Dále se popílky dělí:

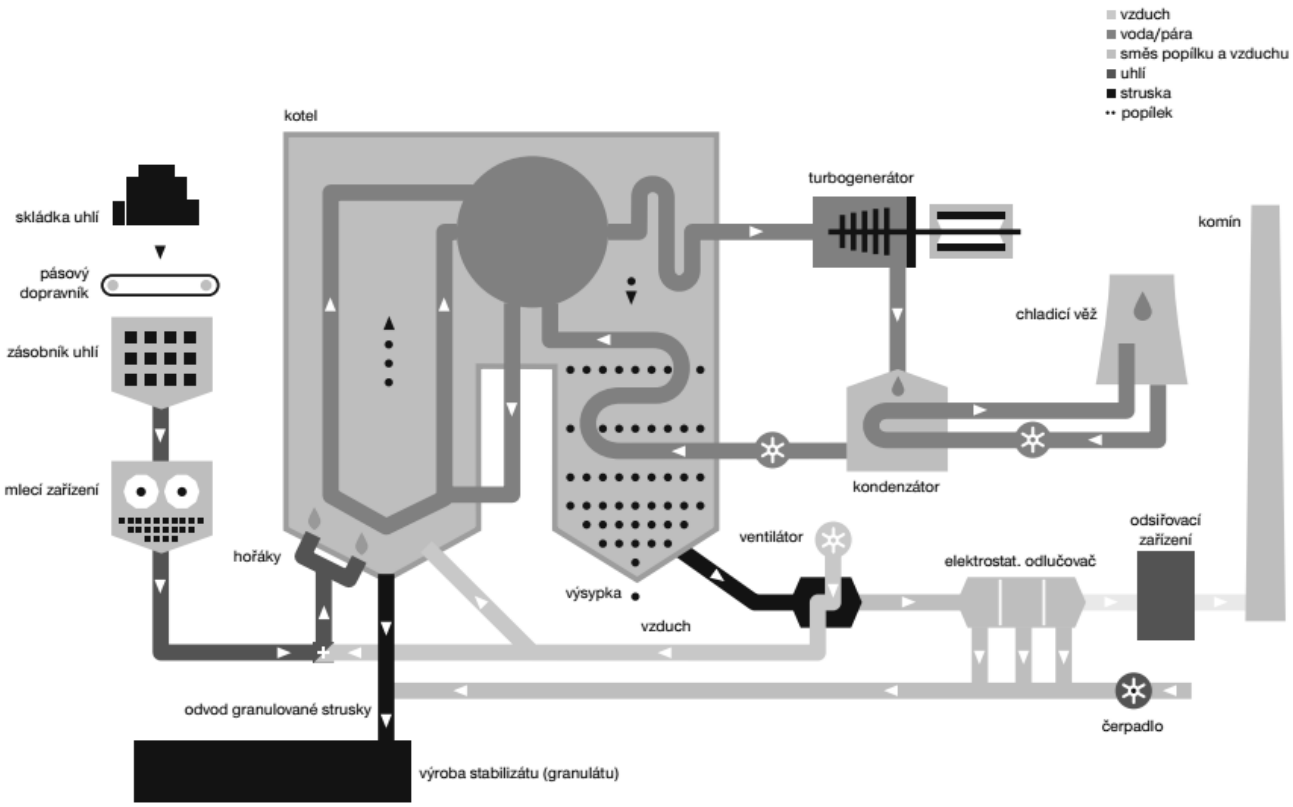
- křemičité: více než 25% SiO_2, max. 10% CaO;
- vápenaté: více než 25% CaO, max. 10% SiO_2. [15]

2.1.2 Vznik elektrárenských popílků

Létavý popílek vzniká při vysokoteplotním spalování práškového uhlí na teplotu 1400-1600 °C. Hrubší zrna se zachytí na mechanických odlučovačích, ta nejjemnější na elektrostatických. [7]

Při fluidním spalování přibližně na teplotu 850°C dochází k odsíření přímo při spalování díky příměsi vápence, případně dolomitu v mletém uhlí.Dochází ke vzniku tzv. fluidního popílku, kterýobsahuje směs popela, nerozpustného anhydritu ($CaSO_4$ II), částečně rozložených jílových minerálů, volného vápna (CaO), případně i uhličitan vápenatý. Přibližně obsahuje 7-20% SO^{3-}, 15-35% reaktivního Cao a někdy až 15% ztráty žíháním. [4][7]

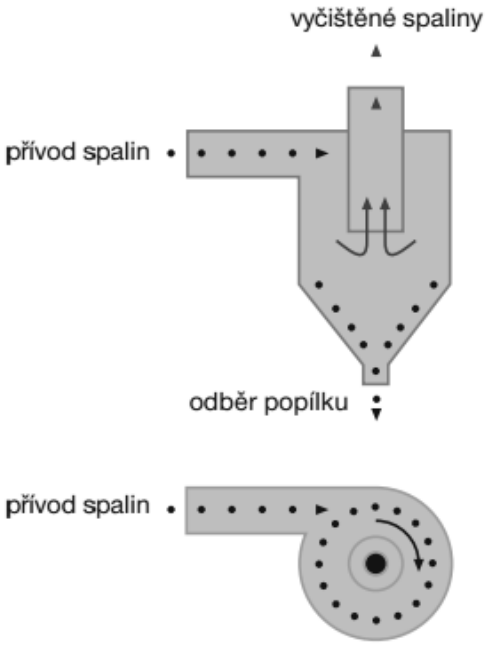
Obrázek 2: Schéma uhelné elektrárny [2]



Filtry pro odloučení popílku mohou být cyklónové, bateriové, hadicové nebo elektrofiltry. Poslední zmiňované jsou nejúčinnější s účinností až 100%. [6]

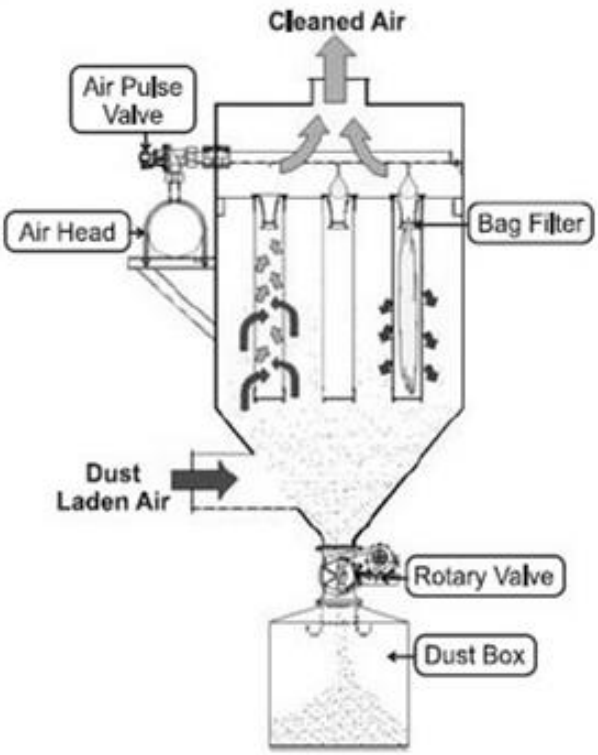
Cyklónový odlučovač je jedním z nejjednodušších, avšak s nízkou účinností jen kolem 85%. Vysokou rychlostí se do něj vhánějí spaliny, kinetická energie obsažených částeček se mění na potenciální a po okraji, kam byly vyneseny odstředivou silou, padají dolů, zatímco lehčíplyn je odváděn vzhůru do komína. [2][6]

Obrázek 3: Schéma cyklonového odlučovače [2]



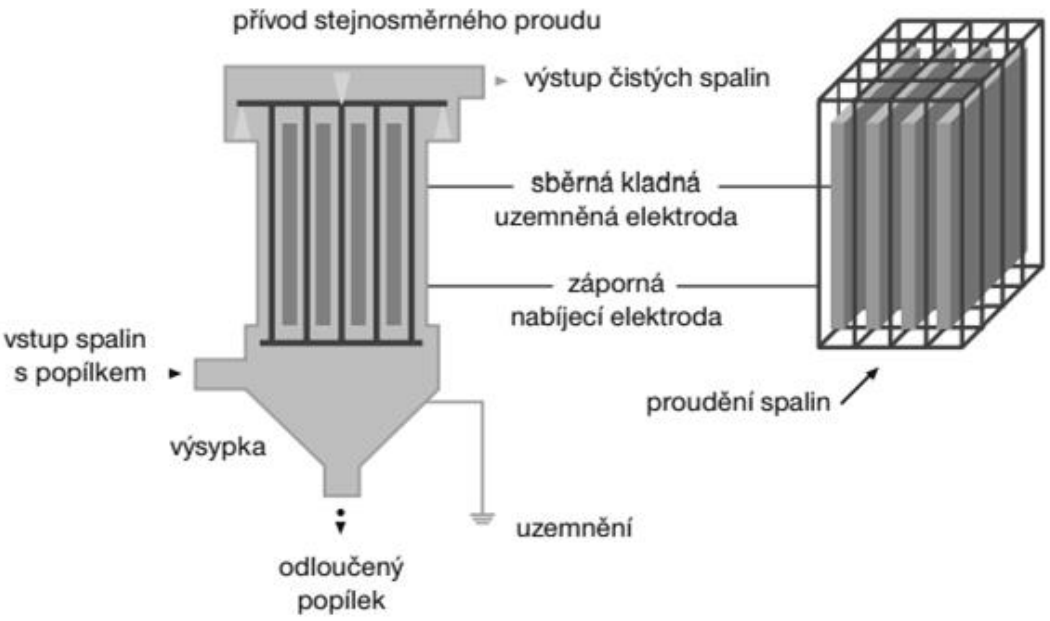
Hadicové odlučovače jsou jedny z nejčastějších. Pracují na principu podobném vysavači. Většinou jsou čtyř komorové, v každé komoře je asi 40 hadic. Na vnější povrch hadic se usazují odprašky, opadávají a šnekovým dopravníkem jsou odváděny pryč. Vnitřkem hadic odchází vyčištěný vzduch. Filtrace je periodická, když jsou hadice na povrchu plné, zastaví se tah spalin a dojde k oklepu odprašků, nebo se uvolní profouknutím protiproudým vzduchem. Hadice jsou nejčastěji textilní, mohou být opatřeny teflonovou úpravou. Pro teploty nad 130°C se používají skleněné tkaniny. Jejich účinnost je více než 98%, ale mají také vyšší spotřebu proudu na pohon kouřových ventilátorů. [6][2]

Obrázek 4: Schéma hadicového odlučovače [8]



Elektrostatické odlučovače mají účinnost vyšší než 99%, ale jsou dražší. Kouřové spaliny proudí rychlostí 1-2 m/s okolo záporných nabíjecích elektrod, kde se nabijí záporným nábojem a jsou pak přitahovány kladnými sběrnými deskovými elektrodami. Popílek se z elektrod buď mechanicky oklepává, nebo se elektrody přepólují a zrušením náboje dojde k jeho opadu. [2][6]

Obrázek 5: Elektrostatický odlučovač popílku [2]



2.1.3 Vlastnosti popílků

Popílky z mechanických odlučovačů jsou hrubší, obsah zrn nad 90µm je nad 20 % a sypná hmotnost 900-1200 kg/m^3. Z elektrostatických odlučovačů je velikost zrn nad 90µm do 20 % se sypnou hmotností asi 800 kg/m^3. [4]

Z mineralogického hlediska mohou popílky obsahovat tyto složky:

- hydraulicky aktivní (C_3A, C_2S, hlinito-křemičité minerály - SiO_2, Al_2O_3)
- nehydraulické (anhydrit, CaO, MgO) – někdy mohou působit jako budiče hydraulicity
- iniciátory hydraulicity (sulfidy, alkalické soli)
- inaktivní látky (krystalický křemen, mullit, hematit, magnetit, nespálené uhlí) [5]

Tabulka 1:Minerální fáze křemičitého popílku [1]

minerální fáze	podíly (hm. %) – černé uhlí	podíly (hm. %) – hnědé uhlí
sklo	65 – 83	< 75%
mullit	4 – 25	10 – 32
křemen	4 – 18	4 – 15
hematit	0,5 – 2	0,7 – 4
magnetit	1 – 7	0,5 – 5
polétavý koks	0,5 - 5	-

Létavý popílek z vysokoteplotního spalování neobsahuje síranové ionty, naopak obsahuje amorfní SiO_2, křemen, crystobalit, tridymit a mullit. Dále obsahuje také oxidy železa ve formě hematitu (α-Fe_2O_3) a maghemitu(γ-Fe_2O_3). Obsahuje více než 50% sklovité fáze – čím vyšší obsah tím je popílek reaktivnější. Je tvořen sklovitými částicemi kulovitého tvaru o velikosti 1-100 μm. Měrný povrch dle Blaina se pohybuje 200-300 m^2/kg, měrná hmotnost 2100-2400 kg/m^3 a sypná hmotnost 550-900 kg/m^3. Základní požadavky:

- ztráta sušením pod 1%;
- ztráta žíháním pod 4%;
- obsah SiO_2 nad 40%;
- obsah celkové síry do 3% a chloridů do 1%;
- radioaktivní nuklidy pod 150 Bq/kg.[6][7]

Díky kulatému tvaru zrn má popílek pozitivní vliv z hlediska použití vody. Popílky mohou vzhledem k obsahu uhlíku ovlivnit barvu betonu, což může být viditelné hlavně, pokud je beton bez a s popílkem vedle sebe. [16]

2.1.4 Možnosti využití popílků ve stavebnictví

Létavý popílek se používá jako příměs I druhu – filer, příměs II druhu – pucolán, pro výrobu pórobetonu, výroba směsných cementů, plnivo do betonu. Využívá se také jako zásypový materiál, např. pro rekultivaci starých dolů, na násypy a do podkladních vrstev. [7]

Díky nízkému hydratačnímu teplo jsou popílkové betony vhodné pro betonáže masivních konstrukcí nebo například pro betonáže v létě. Také mají pozitivní vliv na smrštění betonu. [15]

2.2 Beton s obsahem elektrárenských popílků

2.2.1 Využití popílků jako příměsi do betonu

Vzhledem k energetické náročnosti výroby cementu a faktu, že produkce popílků jakožto energetických produktů při spalování pevných paliv je nevyhnutelná, jeví se možnost využití popílků do betonu jakožto částečné náhrady cementu jako velmi pozitivní. I z ekonomického hlediska je použití popílku výhodné, neboť cena popílku je několikanásobně nižší než cena cementu. A vzhledem k pucolánové aktivitě popílků jsou přínosné i pro samotný beton. [1]

2.2.2 Vliv popílku na vlastnosti čerstvého a ztvrdlého betonu

Popílek zlepšuje zpracovatelnost čerstvého betonu a díky kulovitým tvarům zrn částečně pomáhá redukovat potřebné množství záměsové vody. Pozitivně ovlivňuje také dlouhodobé pevnosti betonu, hloubku karbonatace i třeba reversibilní smrštění. Dokončovací práce na popílkovém betonu jsou snazší a také má nižší sklony ke krvácení.[5][16]

Betony s příměsí popílku se projevují nižšími počátečními pevnostmi, které se začnou srovnávat asi po 56 a více dnech. S tím souvisí také nízké hydratační teplo.Tyto betony jsou velmi odolné vůči agresivnímu prostředí a tvorbě výkvětů. [6]

Popílek používaný jako příměs do betonu obsahuje amorfní SiO_2, které ve směsi po smíchání s vodou reaguje s $Ca(OH)_2$ za vzniku C-S-H gelů. Ty uzavírají kapiláry a zmenšují velikost pórů v betonu a tím příznivě ovlivňují chemickou odolnost betonu. [6]

Velikost zrn popílku může i nemusí mít vliv na vývin pevností, výzkum ale ukazuje, že čím jemnější popílek je, tím více je pucolánová reakceintenzivní.[17]

2.2.3 Trvanlivost betonů s příměsí popílků v silničních betonech

V ČR není povolené používat popílek v betonu na vozovky započítaný jako složku pojiva. V Německu proběhl dlouhodobý výzkum silničních betonů s obsahem popílku jako složkou pojiva a příměsi do betonu. Byly provedeny zkoušky odolnosti proti mrazu a rozmrazovacím prostředkům, pevnosti v tlaku, pórové struktury a karbonatace na vývrtech odebraných ze silničního úseku, kde byl experimentálně popílkový beton použit, a z k němu referenčnímu silničnímu úseku bez popílku. Neprojevily se žádné větší rozdíly a prokázalo se, že lze oba druhy betonů vzhledem k jejich odolnosti proti mrazu a rozmrazovacím prostředkům považovat za rovnocenné. Také díky pucolánové reakci došlo k pozitivnímu zmenšení rozdělení velikosti pórů. Tím se sníží vnikání chloridů do betonu,

a tudíž zvýší dlouhodobá trvanlivost popílkového silničního betonu. I novější výzkumné projekty ukázaly, že silniční betony vyrobené s příměsí popílku jsou přinejmenším srovnatelné s příslušnými betony bez popílku. [1]

Popílek se dá také výhodně používat do válcovaného betonu, kde díky kuličkovému tvaru zrn příznivě ovlivňuje čerstvou směs a umožňuje zde velmi žádaný nízký vodní součinitel se současně požadovanou pevností v tlaku i při nižším obsahu cementu. Popílek zde také pomáhá s požadovaným uzavřením povrchu. [1]

2.2.4 Použití betonů s popílky v ČR

Obrázek 6: Základní požadavky na popílek do betonu [3]

Vlastnost podle způsobu užití popílku	Jednotka	Pucolánová příměs druhu II	Filer jako kamenivo příměs druhu I
		ČSN EN 450	ČSN EN 12620
Ztráta žíháním	% hmot.	max. 5,0[1]	–
Obsah SO_3	% hmot.	max. 3,0	max. 0,8
Obsah celkové síry	% hmot.	–	1,0
Obsah chloridů v přepočtu na Cl-	% hmot.	max. 0,10	0,03/0,06/0,15[6]
Obsah volného CaO	% hmot.	max. 1,0[2]	–
Jemnost, zbytek na sítě 0,045 mm	% hmot.	max. 40[3]	–
Sítový rozbor, propad na sítě: 2 mm 0,125 mm 0,063 mm	%	–	 100 85 – 100 70 – 100
Obsah aktivního SiO_2	% hmot.	min. 25	–
Objemová stálost (roztažnost)	mm	max. 10[2]	–
Index účinnosti po 28 (90) dnech	%	min. 75 (85)	–
Měrná hmotnost (tolerance)	$kg.m^{-3}$	max. ±150[4]	–
Hmotnostní aktivita Ra^{226}	$Bq.kg^{-1}$	max. 200[5]	–

Vysvětlivky k tabulce z odkazů a poznámek uvedených norem:

[1] Na národní úrovni je dovoleno používat popílky se ztrátou žíháním až do 7% hmotnosti.

[2] Popílek s obsahem volného oxidu vápenatého více než 1,0% hmotnosti, ale méně než 2,5% hmotnosti je přijatelný za předpokladu, že vyhoví požadavkům na objemovou stálost.

[3] Jemnost mletí popílku nesmí kolísat o více než ±10% z průměrné hodnoty, která je stanovena za předem dané časové období výrobcem.

[4] Tolerance od průměrné hodnoty uváděné výrobcem.

[5] Limit hodnoty stanovený vyhláškou SÚJB č. 184/1997 Sb.

[6] Maximální hodnoty pro předpjatý, železový a prostý beton vodou rozpustných Cl^- k hmotnosti celkového kameniva.

V ČR se popílek běžně používá při výrobě transportbetonů a směsí s těmito vlastnostmi:

- obyčejné betony, pro které je jediným požadavkem pevnost v tlaku;
- čekatelné a lehkozhutnitelné betony;
- vodonepropustné betony (např. tzv. bílé vany) a betony odolné vůči vlivu chemicky agresivního prostředí XA;
- betony pro masivní konstrukce;
- směsi využívané pro speciální zakládání;
- směsi využívané pro budování hydraulicky stmelených vrstev vozovek (SC, KSC atd.). [1]

Dalším využitím popílku v ČR je betonáž pod vodou, kdy popílek přispívá k lepší čerpatelnosti doplněním jemných podílů, odolnosti směsi proti rozplavení a její celkové stabilitě a trvanlivosti ztvrdlého betonu. [1]

2.3 Prostředí XF

Tabulka 2: Stupně vlivu prostředí dle EN 206-1 [4]

Označení stupně	Popis prostředí	Příklady pro zařazení do stupňů vlivu prostředí
Napadení mrazem a táním (s i bez rozmrazovacích solí)		
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 a mrazu

Při pucolánové reakci popílku dochází vlivem tvorby C-S-H fází ke změně pórů z větších kapilárních na menší gelové (pod 0,1 μm). Ty jsou nepřístupné pro transport agresivních látek, čímž výrazně zlepšují odolnost betonu vůči korozi. [1]

3. Praktická část

3.1 Metodika práce

V první fázi praktické části byly navrženy receptury jednotlivých směsí. Ze zadání byl požadavek na navržení receptur betonu C30/37 XF3 neprovzdušněného a C30/37 XF4 provzdušněného za použití cementu CEM I 42,5 R. Referenční směsi byly bez příměsi popílku. Další receptury obsahovaly 15% a 30% náhradu cementu el. popílky z lokality Počerady a Dětmarovice. Kamenivo bylo navrženo těžené frakce 0 - 4 mm ze Žabčic a drcené frakce8 – 16 mm z Olbramovic. Plastifikační přísada byla použita CHRYSO®Plast 760 na bázi modifikovaných naftalenových polymerů. Pro provzdušněné směsi byla navržena provzdušňující přísada CHRYSO®Air A 50%. Směsi byly navrženy na konzistenci sednutí kužele 80 – 100 mm. Od každé receptury bylo namícháno 42 dm^3 směsi, ze kterých byla vyrobena následující tělesa:

- 7 krychlí 150x150x150 mm: - 3 na zkoušku 28 denních pevností ;
  - 2 na zkoušku CHRL, 100 cyklů;
  - 2 na zkoušku vodotěsnosti betonu, HV 8;
- 4 trámce 100x100x400 mm: - 2 na zkoušku mrazuvzdornosti, 100 cyklů;
  - 2 referenční pro zkoušku mrazuvzdornosti.

V druhé fázi se uskutečnilo vlastní míchání směsí a poté výroba výše uvedených těles. Na čerstvém betonu byly provedeny tyto zkoušky:

- stanovení konzistence betonu dle ČSN EN 12350-2 Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutím;
- stanovení obsahu vzduchu v čerstvém betonu u provzdušněných směsí dle ČSN EN 12350-7 Zkoušení čerstvého betonu – Část 7: Obsah vzduchu – Tlakové metody;
- stanovení objemové hmotnosti v čerstvém stavu dle ČSN EN 12350-6 Zkoušení čerstvého betonu – Část 6: Objemová hmotnost.

Ve třetí fázi byla tělesa odformována a uložena do vlhkého prostředí. Po 28 dnech byly na tělesech provedeny následující zkoušky:

- stanovení objemové hmotnosti zatvrdlého betonu dle ČSN EN 12390-7 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu;
- stanovení pevnosti v tlaku po 28 dnech dle ČSN EN 12390-3 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles;

- stanovení vodotěsnosti betonu HV8 dle ČSN 73 1321: Stanovení vodotěsnosti betonu;
- stanovení odolnosti povrchu při 100 cyklech dle ČSN 73 1326: Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek, metody A;
- stanovení mrazuvzdornosti betonu pro 100 cyklů dle ČSN 73 1322: Stanovení mrazuvzdornosti betonu.

3.2 Použité suroviny

3.2.1 Cement

Pro výrobu zkušebních těles byl použit balený portlandský cement CEM I 42,5 R z cementárny Mokrá. Mechanické, fyzikální a chemické vlastnosti viz. příloha č. 1.

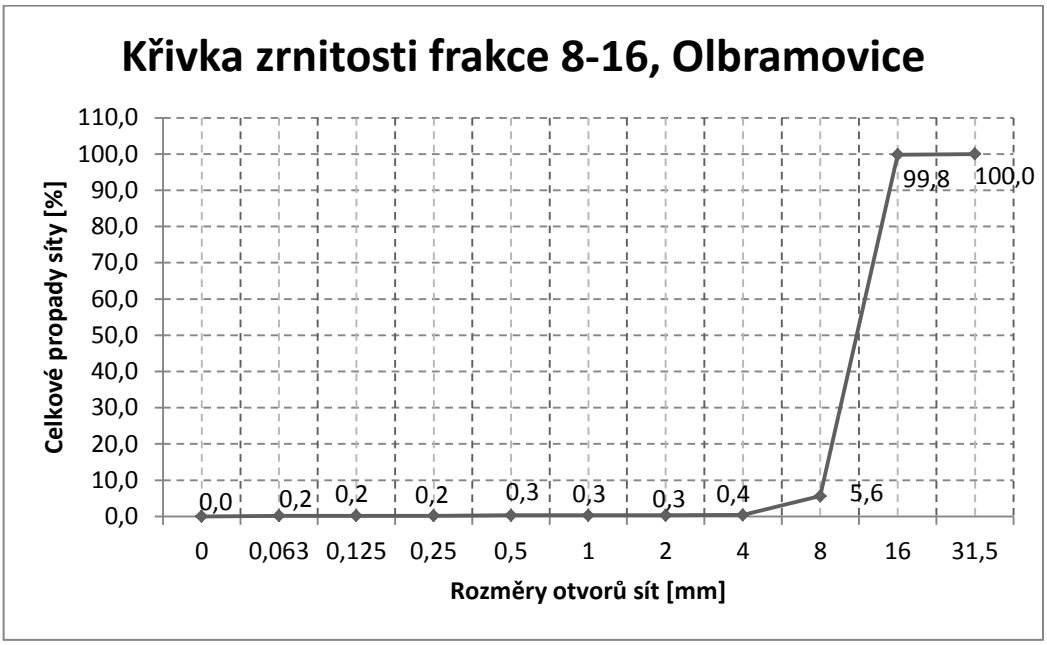
3.2.2 Kamenivo

Do všech směsí bylo použito těžené prané kamenivo frakce 0 – 4 mm z pískovny Žabčice a drcené hrubé kamenivo frakce 8 – 16 mm z kamenolomu Olbramovice. Na obou těchto kamenivech bylo provedeno stanovení zrnitosti dle ČSN EN 933-2: Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 2 : Stanovení zrnitosti - Zkušební síta, jmenovité velikosti otvorů.

Tabulka 3: Sítový rozbor - Olbramovice 8 – 16 mm

Rozměry ok na sítech [mm]	31,5	16	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	dno	Σ
Hmotnost dílčího zbytku R_i [g]	0	24,91	917,93	52,63	0,85	0,06	0,12	0,3	0,66	0,08	1,56	999,1
Dílčí zbytek na sítě [%]	0,0	2,5	91,9	5,3	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,2	100,0
Celkový zbytek na sítě [%]	0,0	2,5	94,4	99,6	99,7	99,7	99,7	99,8	99,8	99,8	100,0	
Celkový propad sítem [%]	100,0	97,5	5,6	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,0	

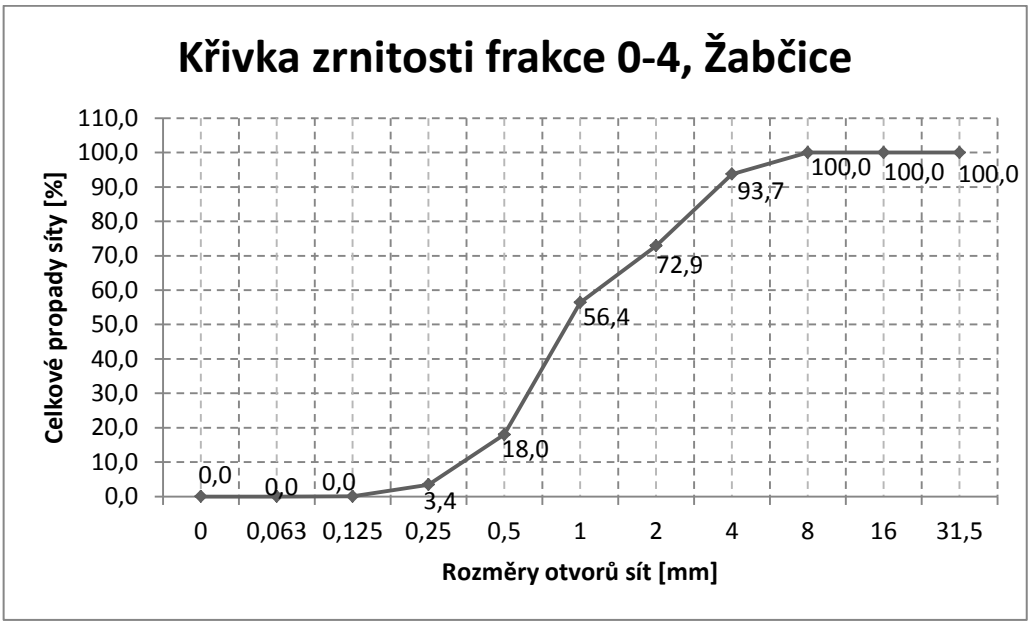
Graf 1: Křivka zrnitosti frakce 8 – 16 mm, Olbramovice



Tabulka 4: Sítový rozbor - Žabčice 0 – 4 mm

Rozměry ok na sítech [mm]	31,5	16	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	dno	Σ
Hmotnost dílčího zbytku R_i [g]	0	0	0	69,15	228,5	180,9	421,65	159,85	37,25	0,45	0	1097,75
Dílčí zbytek na sítě [%]	0,0	0,0	0,0	6,3	20,8	16,5	38,4	14,6	3,4	0,0	0,0	100,0
Celkový zbytek na sítě [%]	0,0	0,0	0,0	6,3	27,1	43,6	82,0	96,6	100,0	100,0	100,0	
Celkový propad sítem [%]	100,0	100,0	100,0	93,7	72,9	56,4	18,0	3,4	0,0	0,0	0,0	

Graf 2: Křivka zrnitosti frakce 0 – 4 mm, Žabčice



3.2.3 Voda

Byla použita pitná voda z vodovodního řadu, která dle ČSN EN 1008 Záměsová voda do betonu vyhovuje i bez potřeby provedení průkazních zkoušek.

3.2.4 Plastifikační přísada

Při výrobě navržených směsí byla použita plastifikační přísada CHRYSO®Plast 760 na bázi modifikovaných naftalenových polymerů. Vlastnosti viz. příloha č. 3.

3.2.5 Provzdušňovací přísada

Do provzdušněných směsí pro prostředí XF4 byla použita provzdušňující přísada CHRYSO®Air A 50%. Vlastnosti viz. příloha č. 2.

3.2.6 Příměsi

Jako částečná náhrada cementu byly použity el. popílky z lokality Počerady a Dětmarovice. Popílek z elektrárny Dětmarovice byl mletý, proto na něm bylo provedeno stanovení měrného povrchu dle Blaina a objemové hmotnosti. Vlastnosti použitých popílků:

Tabulka 5: Chemické složení popílků Dětmarovice a Počerady v %[12]

Chemické složení	Popílek Dětmarovice	Popílek Počerady
SiO_2	52,400	50,900
Al_2O_3	24,200	30,200
CaO	4,000	1,810
Fe_2O_3	6,400	5,310
K_2O	2,800	1,590
MgO	2,800	1,080
MnO	0,100	0,041
Na_2O	0,300	0,205
P_2O_5	0,400	0,134
SO_3	0,000	0,080
TiO_2	1,000	1,750

Tabulka 6: Měrný povrch dle Blaina a objemové hmotnosti popílků

Měrný povrch dle Blaina	S [cm^2/g]	D [g/cm^3]
Popílek Dětmarovice	3760	2,54
Popílek Počerady[12]	2970	2,21

Elektrárna Dětmarovice spaluje černé uhlí s průměrnou výhřevností 22 MJ/kg a obsahem síry pod 0,5%, nejvyšší teplota v kotli je 1400°C, odlučovače jsou elektrostatické. [13]

Palivem v elektrárně Počerady je hnědé energetické uhlí, od roku 1997 elektrárna postupně přešla na suchý odběr popílku. [14]

3.3 Navržené receptury

Byly navrženy receptury pevnostní třídy C30/37 XF3 neprovzdušněné a C30/37 XF4 provzdušněné a k nim referenční směsi. Receptury byly navrženy na předpokládanou konzistenci 80–100 mm sednutí kužele.

Prvnídvě recepturyjsou referenční, z nich druhá receptura je provzdušněná.U dalších receptur došlo k 15% a 30% náhradě hmotnosti cementu popílkem Počerady (P) a poté také popílkem Dětmarovice (D), každá ve verzi neprovzdušněné a provzdušněné. Neprovzdušněné receptury měly konstantní dávku plastifikační přísady. Provzdušněné směsi měli konstantní jak dávku plastifikační přísady, tak také té provzdušňovací.

3.3.1 Referenční směsi

Tabulka 7: Receptura 1, referenční XF3

Surovina	Složení na 1 m^3 [kg]
CEM I 42,5 R	360
0 – 4 Žabčice	880
8 – 16 Olbramovice	960
voda	169
Chryso 760	2,9

Tabulka 8: Receptura 2, referenční XF4

Surovina	Složení na 1 m^3 [kg]
CEM I 42,5 R	400
0 – 4 Žabčice	800
8 – 16 Olbramovice	915
voda	168
Chryso 760	3,2
Chryso Air	0,35

3.3.2 Náhrada části cementu popílkem Počerady

Tabulka 9: Receptura 3, 15% náhrada hm. cementu popílkem Počerady, XF3

Surovina	Složení na 1 m^3 [kg]
CEM I 42,5 R	306
0 – 4 Žabčice	880
8 – 16 Olbramovice	960
voda	168
Chryso 760	2,9
popílek (15% náhrada cem.) Počerady	54

Tabulka 10: Receptura 4, 30% náhrada hm. cementu popílkem Počerady, XF3

Surovina	Složení na 1 m^3 [kg]
CEM I 42,5 R	252
0 – 4 Žabčice	880
8 – 16 Olbramovice	960
voda	158
Chryso 760	2,9
popílek (30% náhrada cem.) Počerady	108

Tabulka 11: Receptura 5, 15% náhrada hm. cementu popílkem Počerady, XF4

Surovina	Složení na 1 m^3 [kg]
CEM I 42,5 R	340
0 – 4 Žabčice	800
8 – 16 Olbramovice	915
voda	168
Chryso 760	3,2
Chryso Air	0,35
popílek (15% náhrada cem.) Počerady	60

Tabulka 12: Receptura 6, 30% náhrada hm. cementu popílkem Počerady, XF4

Surovina	Složení na 1 m^3 [kg]
CEM I 42,5 R	280
0 – 4 Žabčice	800
8 – 16 Olbramovice	915
voda	168
Chryso 760	3,2
Chryso Air	0,35
popílek (30% náhrada cem.) Počerady	120

3.3.3 Náhrada části cementu popílkem Dětmarovice

Tabulka 13: Receptura 7, 15% náhrada hm. cementu popílkem Dětmarovice, XF3

Surovina	Složení na 1 m^3 [kg]
CEM I 42,5 R	306
0 – 4 Žabčice	880
8 – 16 Olbramovice	960
voda	168
Chryso 760	2,9
popílek (15% náhrada cem.) Dětmarovice	54

Tabulka 14: Receptura 8, 30% náhrada hm. cementu popílkem Dětmarovice, XF3

Surovina	Složení na 1 m^3 [kg]
CEM I 42,5 R	252
0 – 4 Žabčice	880
8 – 16 Olbramovice	960
voda	156
Chryso 760	2,9
popílek (30% náhrada cem.) Dětmarovice	108

Tabulka 15: Receptura 9, 15% náhrada hm. cementu popílkem Dětmarovice, XF4

Surovina	Složení na 1 m^3 [kg]
CEM I 42,5 R	340
0 – 4 Žabčice	800
8 – 16 Olbramovice	915
voda	168
Chryso 760	3,2
Chryso Air	0,35
popílek (15% náhrada cem.) Dětmarovice	60

Tabulka 16: Receptura 10, 30% náhrada hm. cementu popílkem Dětmarovice, XF4

Surovina	Složení na 1 m^3 [kg]
CEM I 42,5 R	280
0 – 4 Žabčice	800
8 – 16 Olbramovice	915
voda	168
Chryso 760	3,2
Chryso Air	0,35
popílek (30% náhrada cem.) Dětmarovice	120

3.4 Výsledky provedených měření

3.4.1 Zkoušení čerstvého betonu

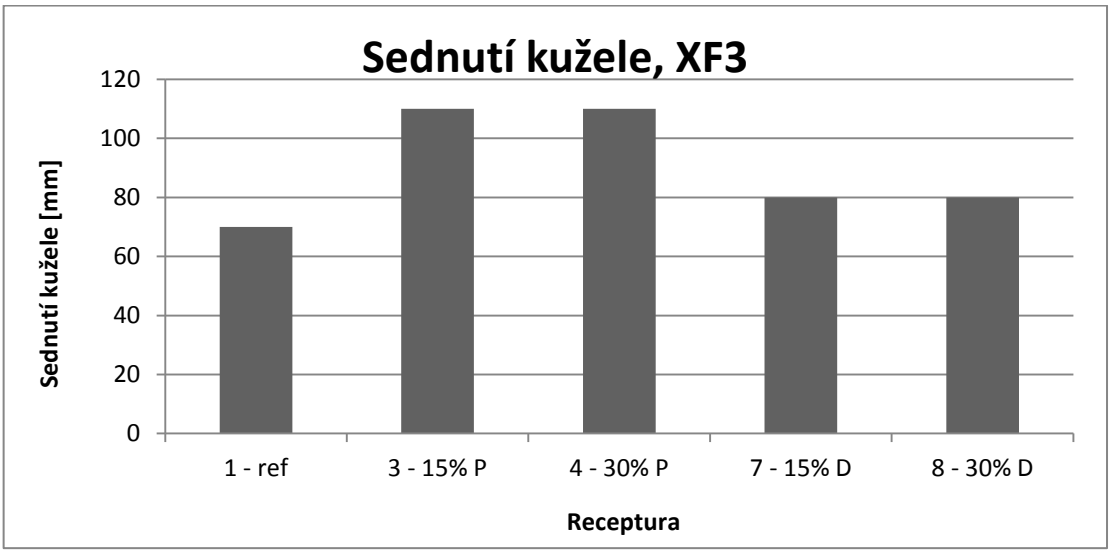
3.4.1.1 Stanovení konzistence pomocí sednutí kužele

Po zamíchání všech surovin v míchačce s nuceným oběhem byla provedena zkouška konzistence čerstvého betonu podle ČSN EN 12350-2 Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutím.

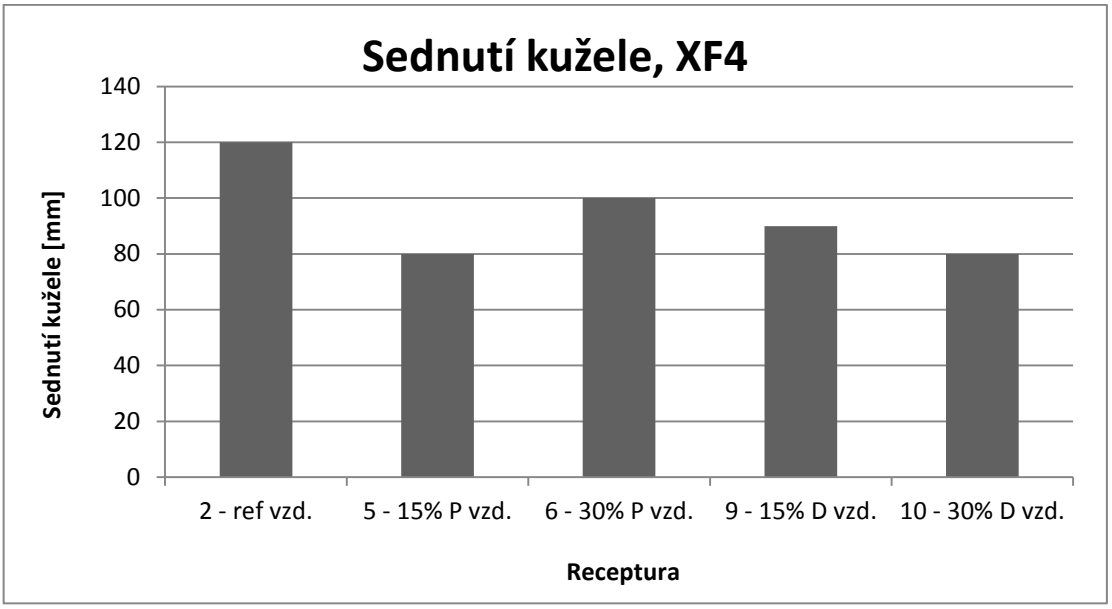
Tabulka 17: Stanovení konzistence čerstvého betonu pomocí sednutí kužele

Receptura	Sednutí kužele [mm]	zatřízení
1 –ref. XF3	70	S2
2 – ref. XF4	120	S3
3 - 15% P XF3	110	S3
4 - 30% P XF3	110	S3
5 - 15% P XF4	80	S2
6 - 30% P XF4	100	S3
7 - 15% D XF3	80	S2
8 - 30% D XF3	80	S2
9 - 15% D XF4	90	S2
10 - 30% D XF4	80	S2

Graf 3: Sednutí kuželeprostředí XF3



Graf 4: Sednutí kužele prostředí XF4



Při navrhování receptur a míchání směsí byla snaha docílit sednutí kužele 80 – 100 mm. To se u některých směsí nepodařilo, byly buď více, nebo méně tekutější. Při míchání se vzhledem ke konzistenci na místě částečně upravovalo množství záměsové vody tak, aby výsledná konzistence byla co nejblíže té požadované, proto nelze srovnávat vliv popílků na reologii čerstvého betonu, což ani nebylo cílem této práce, jelikož v záměsích není konstantní množství vody.

3.4.1.2 Stanovení obsahu vzduchu v čerstvém betonu provzdušněných směsí (XF4)

Po zamíchání směsi byla dle ČSN EN 12350-7 Zkoušení čerstvého betonu – Část 7: Obsah vzduchu – Tlakové metody u provzdušněných směsí provedena zkouška obsahu vzduchu v čerstvém betonu.

Tabulka 18: Obsah vzduchu v čerstvém betonu

Receptura	Konzistence	Obsah vzduchu [%]
2 –ref. XF4	S3	4,0
5 - 15% P XF4	S2	3,4
6 - 30% P XF4	S3	3,6
9 - 15% D XF4	S2	4,1
10 - 30% D XF4	S2	3,9

I když byla dávka provzdušňovací přísady ve všech směsích stejná, množství vzduchu bylo ve směsích mírně odlišné. To mohlo být ovlivněné dobou míchání směsi nebo konzistencí čerstvého betonu. Provzdušňovací přísada se do betonů v prostředí XF4 přidává pro zlepšení mrazuvzdornosti, vodotěsnosti. Ideálně by v tomto případě měl čerstvý beton obsahovat 4 – 6 % vzduchu. Vzhledem k tomu by bylo vhodnější zvýšit dávku provzdušňovací přísady ve zkoušených směsích, aby se zvýšil obsah vzduchu a tím i mrazuvzdornost betonu. [15]

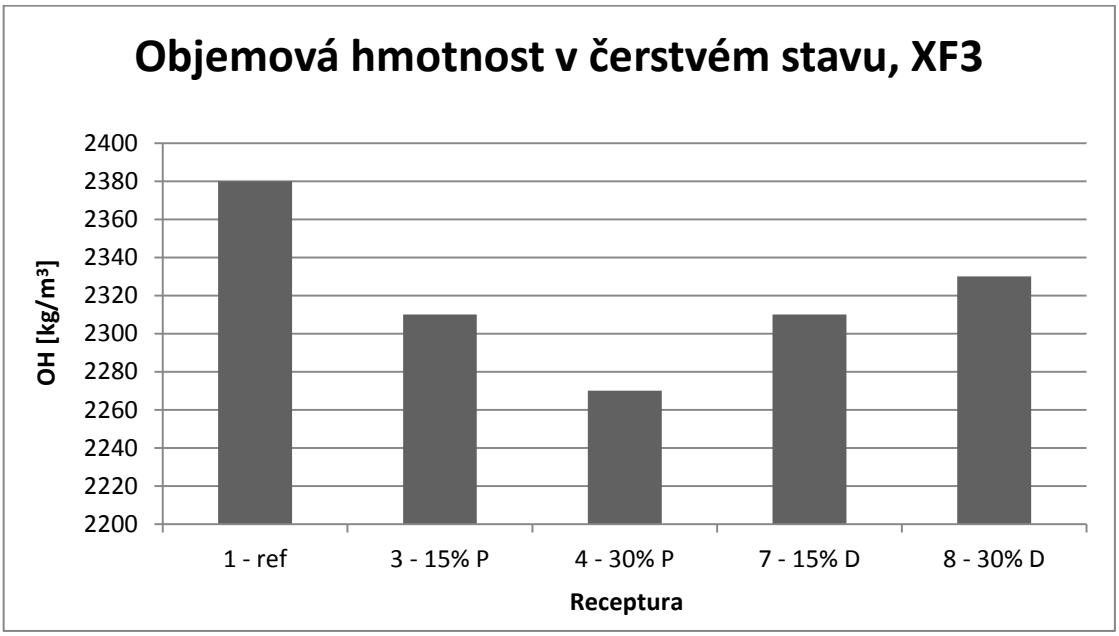
3.4.1.3 Stanovení objemové hmotnosti betonu v čerstvém stavu

Stanovení objemové hmotnosti zhutněného betonu v čerstvém stavu bylo provedeno dle normy ČSN EN 12350-6 Zkoušení čerstvého betonu – Část 6: objemová hmotnost. Ke stanovení byly použity krychlové formy o hraně délky 150 mm.

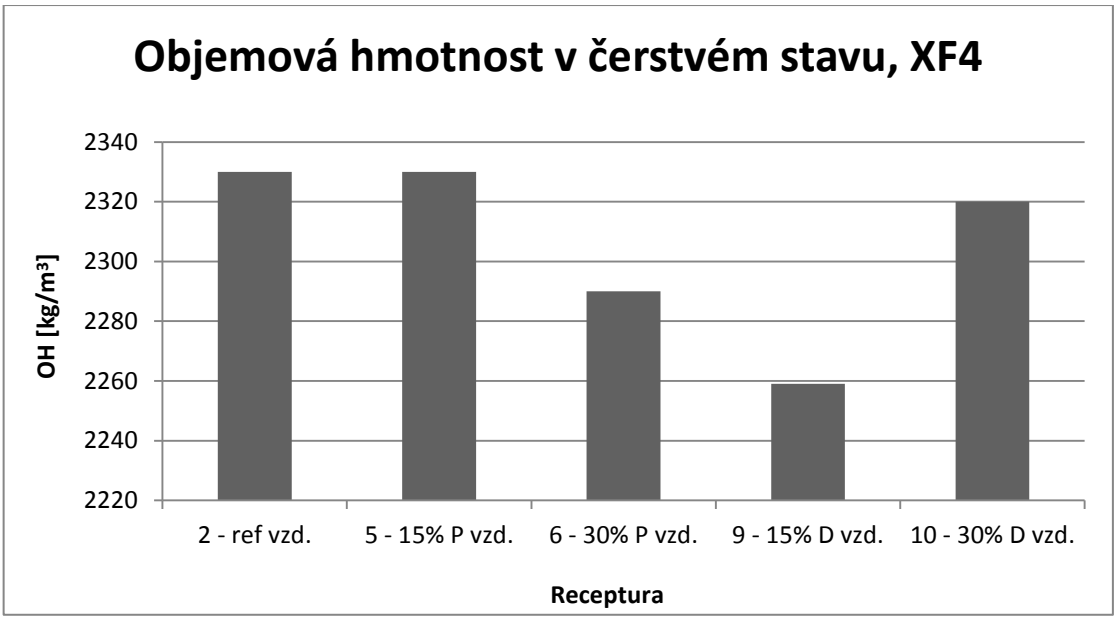
Tabulka 19: Objemová hmotnost betonu v čerstvém stavu

Receptura	OH [kg/m^3]
1 – ref. XF3	2380
2 – ref. XF4	2330
3 - 15% P XF3	2310
4 - 30% P XF3	2300
5 - 15% P XF4	2310
6 - 30% P XF4	2280
7 - 15% D XF3	2330
8 - 30% D XF3	2320
9 - 15% D XF4	2300
10 - 30% D XF4	2300

Graf 5: Objemová hmotnost betonu v čerstvém stavu, XF3



Graf 6:Objemová hmotnost betonu v čerstvém stavu, XF4



Z výsledků logicky vyplívá, že provzdušněné směsi mají převážně nižší objemovou hmotnost než ty neprovzdušněné. Referenční směsi mají vyšší objemové hmotnosti, protože měrná hmotnost cementu je vyšší než popílku (měrná hmotnost použitého cementu 3,11 g/cm^{3}zatímco použité popílky mají měrnou hmotnost Dět.: 2,54 g/cm^3 a Poč.: 2,21 g/cm^3).

3.4.2 Zkoušení zatvrdlého betonu

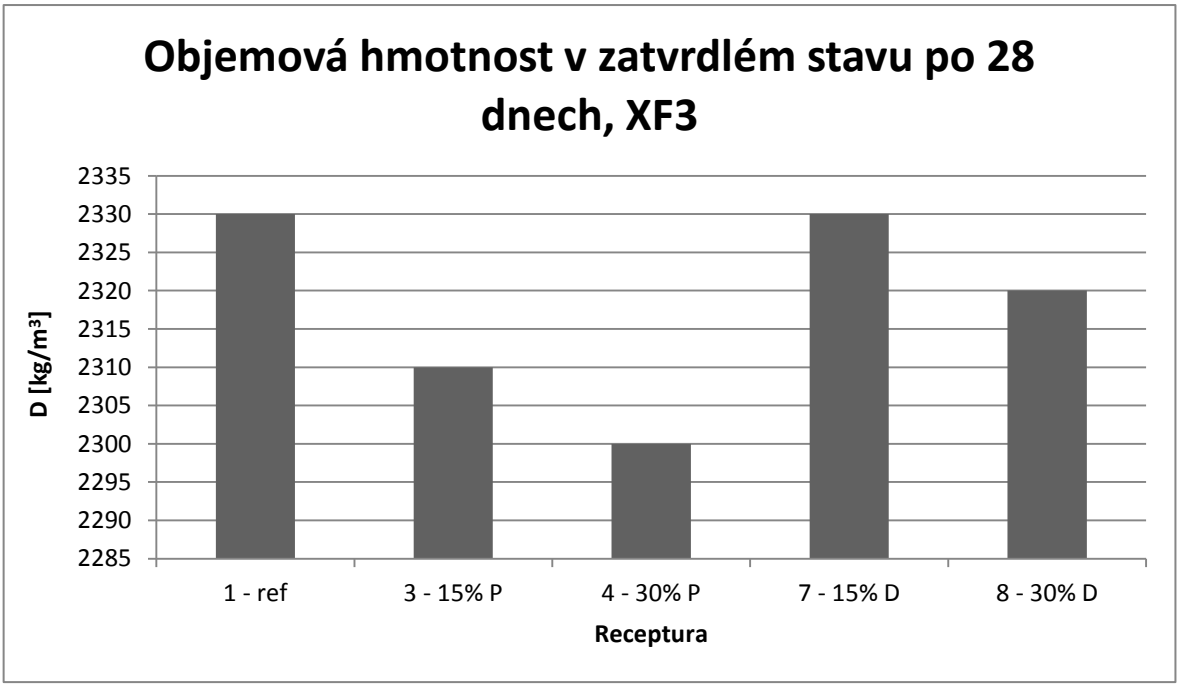
3.4.2.1 Stanovení objemové hmotnosti betonu v zatvrdlém stavu po 28 dnech

Stanovení objemové hmotnosti betonu v zatvrdlém stavu bylo provedeno vždy na 7 krychlích o hraně délky 150 mm dle ČSN EN 12350-7 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu po 28 dnech od vytvoření.

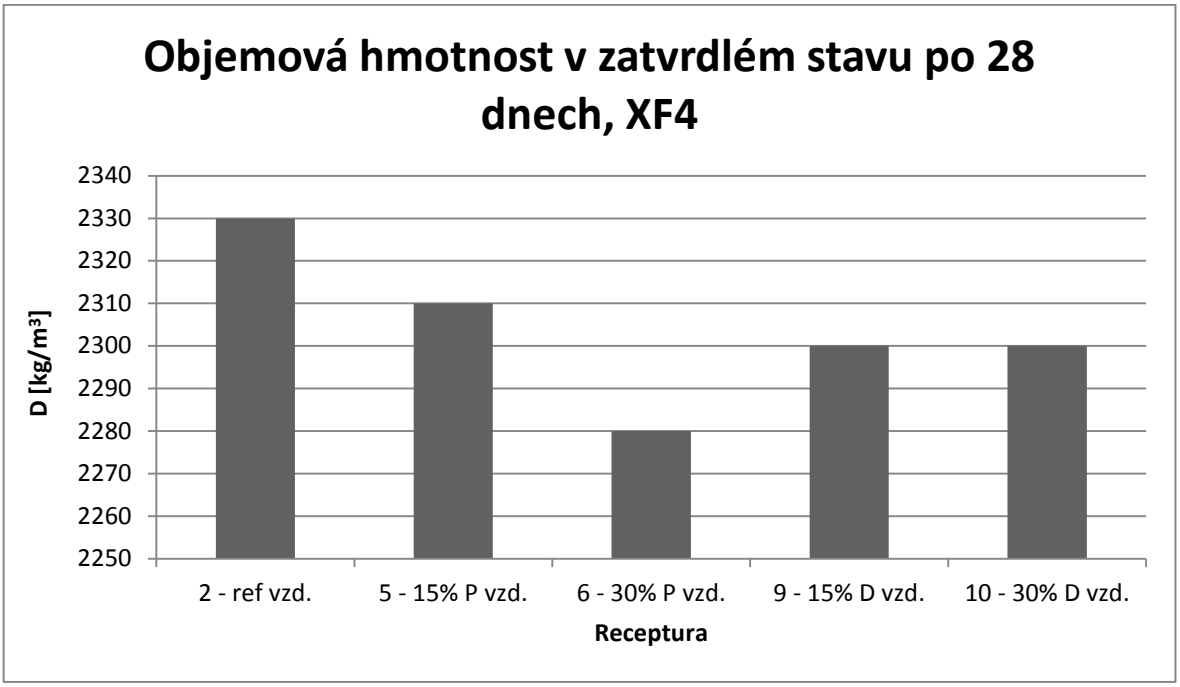
Tabulka 20: Objemová hmotnost betonu v zatvrdlém stavu

Receptura	D [kg/m^3]
1 – ref. XF3	2330
2 – ref. XF4	2330
3 - 15% P XF3	2310
4 - 30% P XF3	2300
5 - 15% P XF4	2310
6 - 30% P XF4	2280
7 - 15% D XF3	2330
8 - 30% D XF3	2320
9 - 15% D XF4	2300
10 - 30% D XF4	2300

Graf 7: Objemová hmotnost v zatvrdlém stavu po 28 dnech, XF3



Graf 8:Objemová hmotnost v zatvrdlém stavu po 28 dnech, XF4



Opět platí, stejně jako u objemové hmotnosti čerstvého betonu, že referenční směsi s větším podílem cementu mají vyšší objemovou hmotnost. Nižší hodnoty u směsí s popílkem Počerady jsou nespíše způsobeny jeho mírně nižší měrnou hmotností.

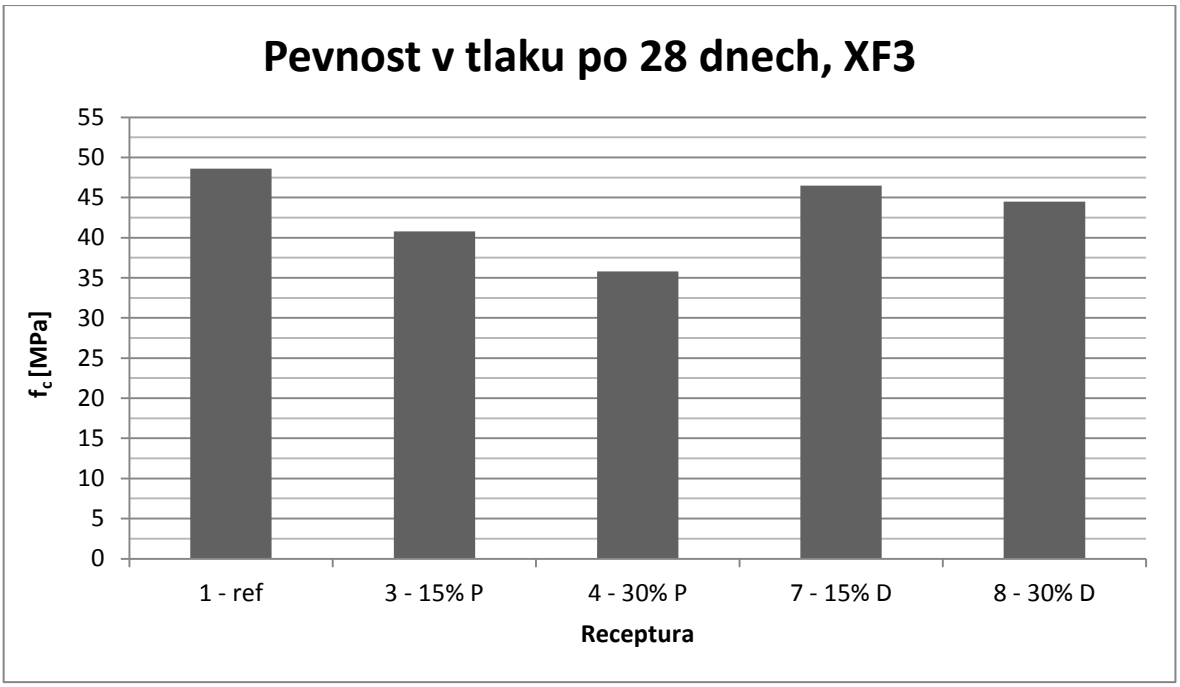
3.4.2.2 Stanovení pevností v tlaku po 28 dnech

Pevnost v tlaku byla zkoušena dle ČSN EN 12390-3 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles vždy na třech krychlích o hraně délky 150 mm ve stáří 28 dní. Vzorky byly až do provedení zkoušek uloženy ve vlhkém prostředí.

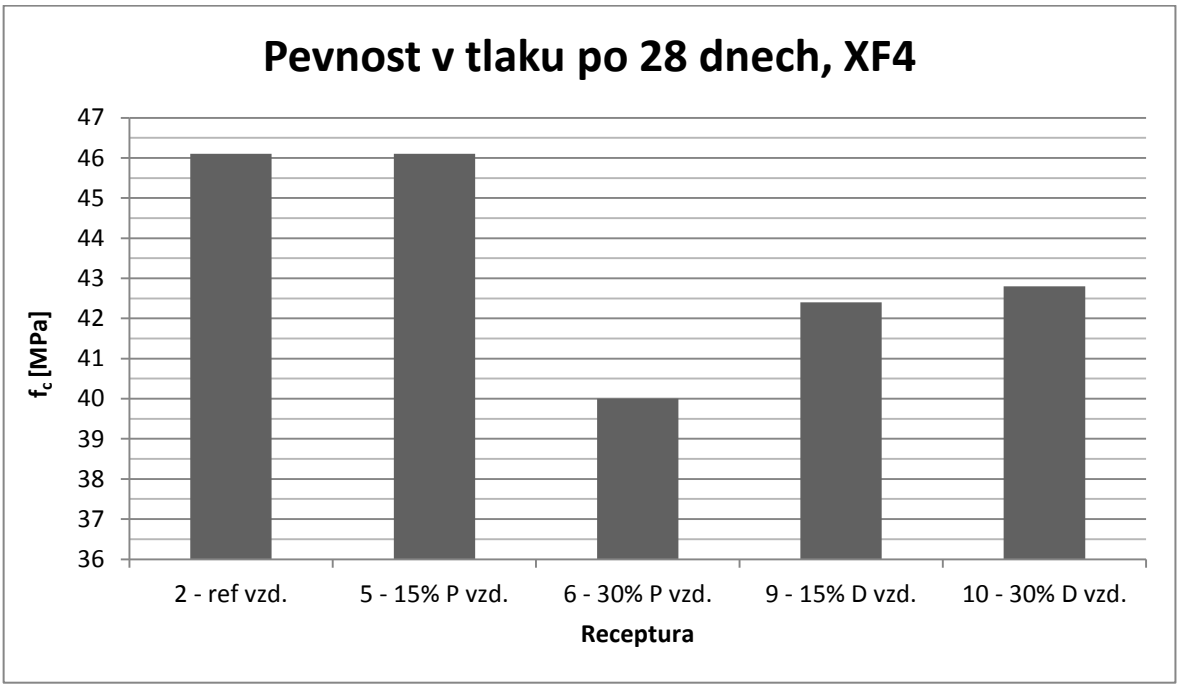
Tabulka 21: Pevnost v tlaku po 28 dnech

Receptura	f_c [MPa]
1 – ref. XF3	48,6
2 – ref. XF4	46,1
3 - 15% P XF3	40,8
4 - 30% P XF3	35,8
5 - 15% P XF4	46,1
6 - 30% P XF4	40,0
7 - 15% D XF3	46,5
8 - 30% D XF3	44,5
9 - 15% D XF4	42,4
10 - 30% D XF4	42,8

Graf 9: Pevnost v tlaku po 28 dnech, XF3



Graf 10: Pevnost v tlaku po 28 dnech, XF4



Pevnosti v tlaku provzdušněných směsí jsou nižší, protože každé 1% vzduchu v betonu navíc snižuje jeho pevnost v tlaku asi o 5 MPa. [15] Nejnižších pevností dosáhly směsi s 30% náhradou cementu popílkem Počerady. Relativně dobrých výsledků v porovnání s referenčními směsmi, které dosahují nevyšších pevností, dosáhly směsi s mletým popílkem Dětmarovice. Z toho by se dalo usuzovat, že pomletím popílku a tím pádem zvětšením jeho měrného povrchu se zvýší také jeho reaktivnost. Do budoucího výzkumu by bylo zajímavé sledovat další vývin pevností po více dnech, v porovnání se směsí s nepomletým popílkem a referenční směsí.

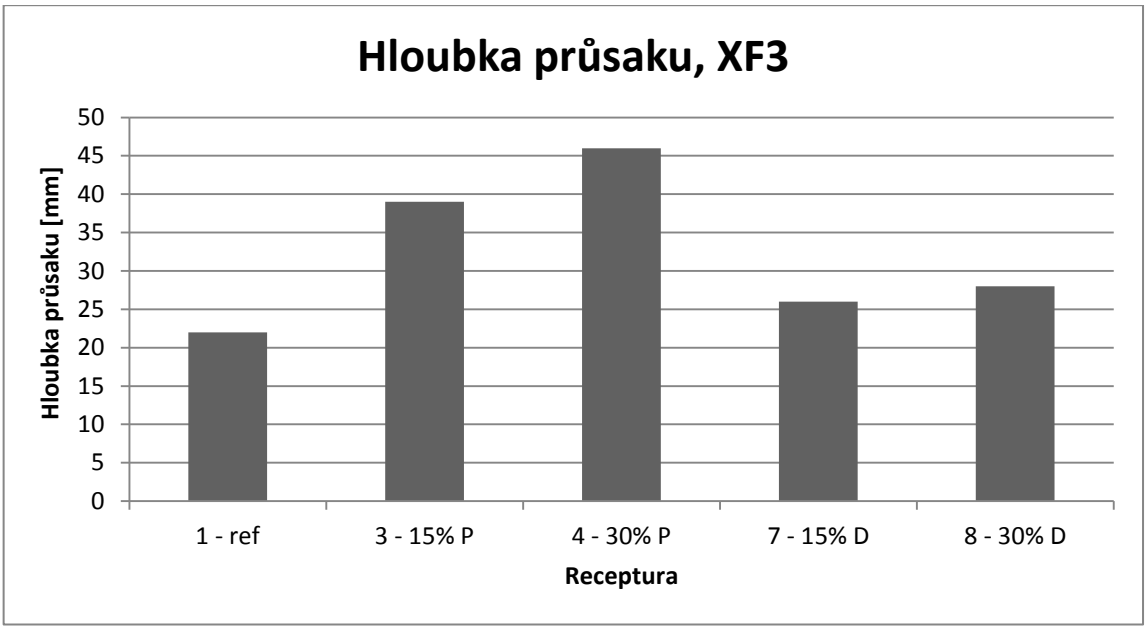
3.4.2.3 Stanovení vodotěsnosti betonu

Stanovení vodotěsnosti betonu bylo provedeno dle ČSN 73 1321: Stanovení vodotěsnosti betonu vždy na 2 krychlích o délce hrany 150 mm v minimálním stáří 28 dní na horní ploše po osekání cementového tmele. Vzorky se upnuly do vodotlačné stolice, prvních 24 hodin působil tlak 0,2 MPa, dalších 24 hodin tlak 0,4 MPa a posledních 24 hodin tlak 0,8 MPa. Poté se tělesa vyjmula a ihned v polovině rozlomila. Změřila se maximální hodnota průsaku a zakreslil se tvar průniku vody do vzorku.

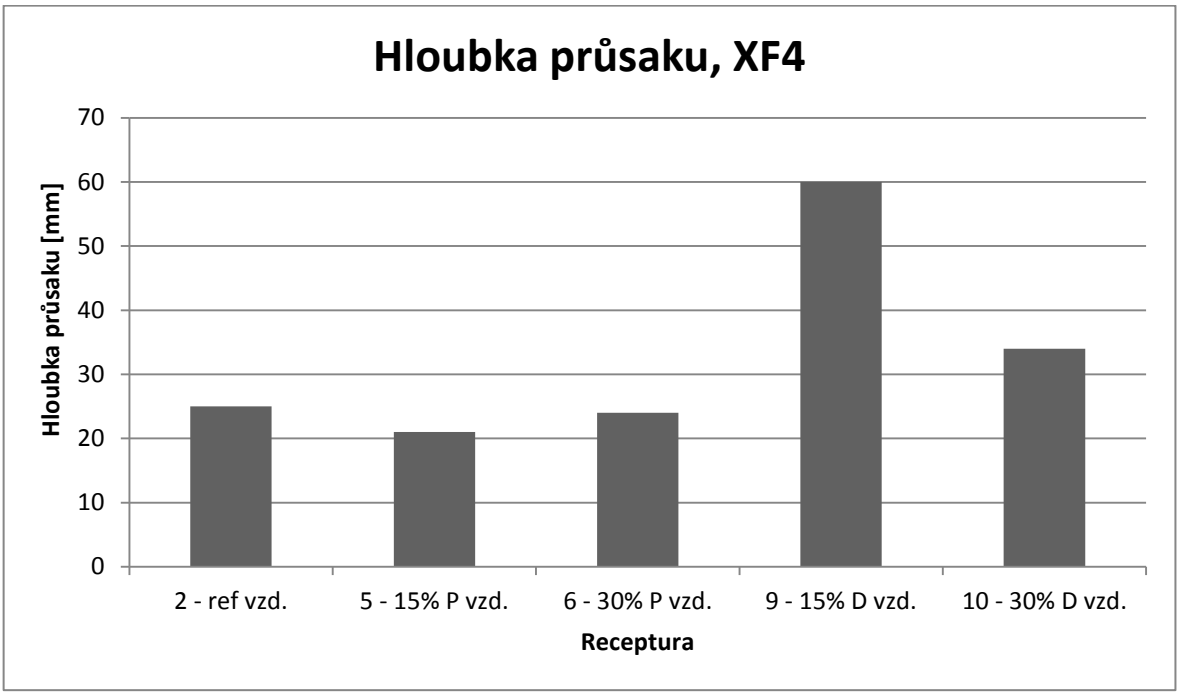
Tabulka 22: Naměřené hodnoty hloubky průsaku

Receptura	Hloubka průsaku [mm]		
	jednotlivé průsaky		Ø
1 – ref. XF3	26	17	22
2 – ref. XF4	22	27	25
3 - 15% P XF3	29	49	39
4 - 30% P XF3	**75**	16	46
5 - 15% P XF4	20	22	21
6 - 30% P XF4	22	26	24
7 - 15% D XF3	28	24	26
8 - 30% D XF3	27	29	28
9 - 15% D XF4	**71**	40	60
10 - 30% D XF4	36	31	34

Graf 11: Hloubka průsaku tlakovou vodou, XF3



Graf 12: Hloubka průsaku tlakovou vodou, XF4



Směsi s příměsí popílku Počerady v provzdušněné verzi vyšly velmi dobře, dokonce lépe než referenční směs, ale v neprovzdušněné verzi vyšly naopak nejhůře. Oproti tomu směsi s příměsí popílku Dětmarovice vyšly lépe neprovzdušněné a nejhůře provzdušněné.

Teoreticky by provzdušněné směsi měly vycházet lépe, protože vnesené póry mění pórovitou strukturu cementového kamene a porušují síť kapilár, které vedou vodu dovnitř betonu. To by vysvětlovalo výsledky směsí s popílkem Počerady.

3.4.2.4 Stanovení odolnosti povrchu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek

Dle ČSN 73 1326: Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek, metody A byly zkoušeny vždy dvě kostky o hraně délky 150 mm od každé směsi na odolnost povrchu po vystavení 100 zmrazovacím a rozmrazovacím cyklům ve stáří 28 dní.

Tabulka 23: Výsledky zkoušky CHRL po 100 cyklech

Receptura	Odpad při zkoušce CHRL [g/m^2]	Stupeň porušení
1 – ref. XF3	rozpad po 75 cyklech	-
2 – ref. XF4	2145	4 – silně narušen
3 - 15% P XF3	rozpad po 75 cyklech	-
4 - 30% P XF3	rozpad po 75 cyklech	-
5 - 15% P XF4	rozpad po 50 cyklech	-
6 - 30% P XF4	rozpad po 50 cyklech	-
7 - 15% D XF3	rozpad po 75 cyklech	-
8 - 30% D XF3	rozpad po 75 cyklech	-
9 - 15% D XF4	3603	5 – rozpadlý
10 - 30% D XF4	6752	5 - rozpadlý

Zkouška odolnosti povrchu proti působení vody a rozmrazovacích látek vyšla velmi špatně. Většina vzorků měla od začátku velký odpad a v průběhu cyklování došlo až k jejich rozpadu ještě před dosažením 100 cyklů. U některých vzorků byl patrný špatný povrch již před provedením zkoušky, docházelo k oddrolování povrchové vrstvičky pouhým přejetím ruky přes ni. To mohlo být způsobeno přílišným užitím odbedňovacího prostředku na formu nebo jiným nevhodným postupem přípravy vzorků. Zkouška CHRL by měla být dle mého názoru zopakována, nejlépe i se zkoušením vzorků starších 28 dní. Starší vzorky by mohly prokazovat lepší odolnost povrchu vzhledem k pomalejší pucolánové aktivitě popílků.

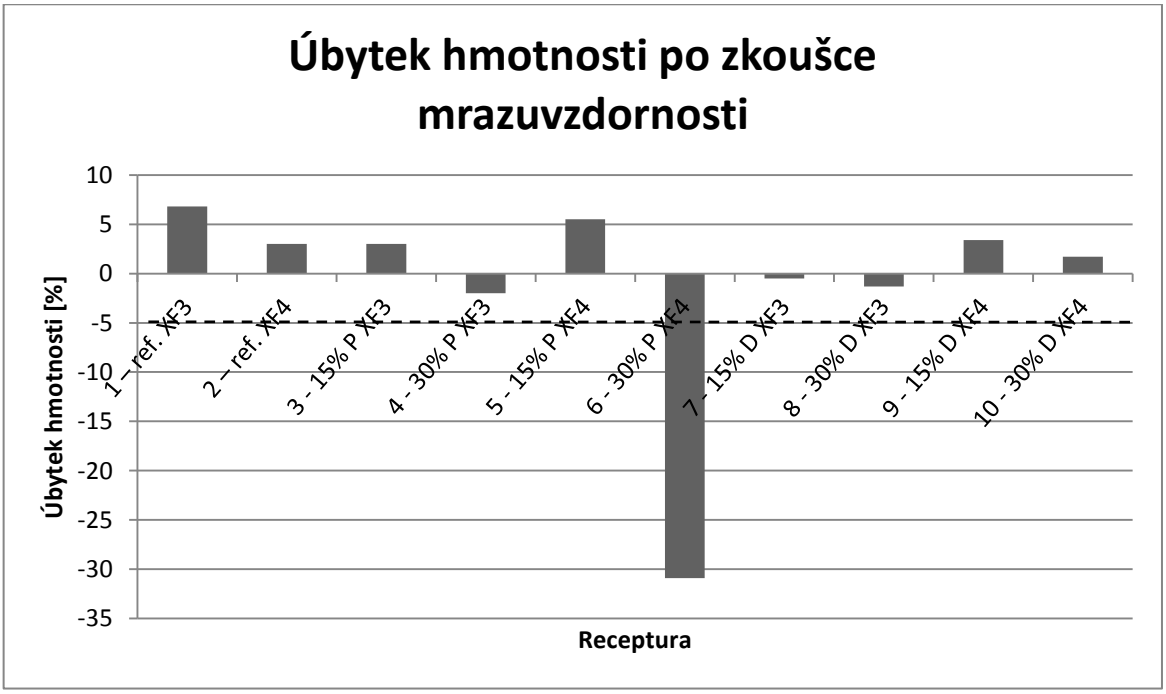
3.4.2.5 Stanovení mrazuvzdornosti betonu

Mrazuvzdornost byla zkoušena dle ČSN 73 1322: Stanovení mrazuvzdornosti betonu u každé směsi na dvou trámcích 100x100x400 mm s porovnáním s dvěma referenčními trámci, které zmrazovacím cyklům vystaveny nebyly. Trámce byly zkoušeny ve stáří 28 dnech po třech dnech ponoření ve vodě.

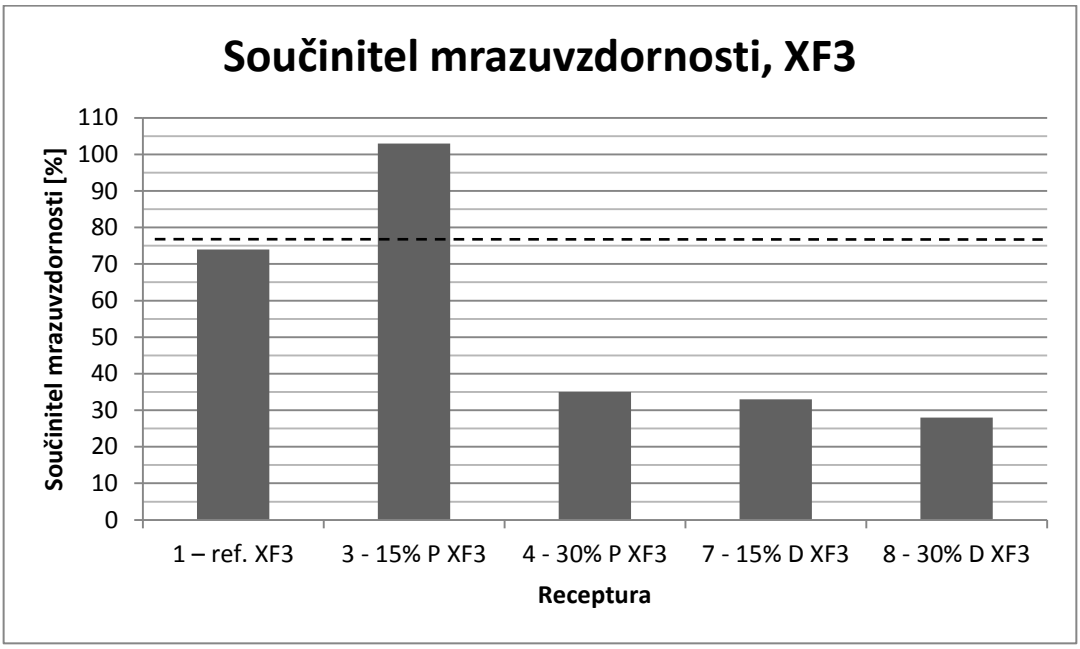
Tabulka 24: Výsledky zkoušky mrazuvzdornosti

Receptura	Součinitel mrazuvzdornosti [%]	Úbytek hmotnosti [%]	Posouzení
1 – ref. XF3	**74**	+ 6,8	nevyhoví
2 – ref. XF4	93	+ 3,0	vyhoví
3 - 15% P XF3	103	+ 3,0	vyhoví
4 - 30% P XF3	**35**	- 2,0	nevyhoví
5 - 15% P XF4	**38**	+ 5,5	nevyhoví
6 - 30% P XF4	**56**	**- 30,9**	nevyhoví
7 - 15% D XF3	**33**	- 0,5	nevyhoví
8 - 30% D XF3	**28**	- 1,3	nevyhoví
9 - 15% D XF4	110	+ 3,4	vyhoví
10 - 30% D XF4	94	+ 1,7	vyhoví

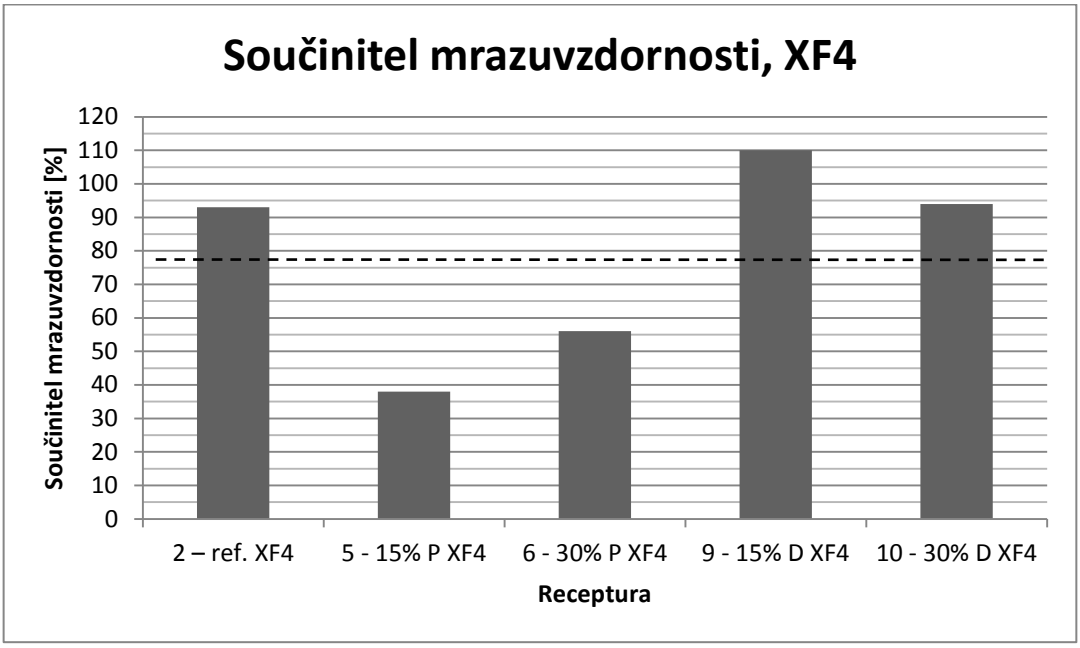
Graf 13: Úbytek hmotnosti po 100 cyklech zkoušky mrazuvzdornosti



Graf 14: Součinitel mrazuvzdornosti po 100 cyklech, XF3



Graf 15: Součinitel mrazuvzdornosti po 100 cyklech, XF4



U směsi číslo 6 došlo k částečnému rozpadu jednoho konce jednoho ze dvou vzorků. Tento měl poté také velmi nízké ohybové i tlakové pevnosti a tím ovlivnil výsledek celé směsi. Druhý ze dvou vzorků měl pevnosti mnohem vyšší. Pokud bychom částečně rozpadlý vzorek vyloučili, druhý by ve zkoušce mrazuvzdornosti vyhověl, ale posouzení by poté bylo pouze na základě výsledků jednoho trámce, což by bylo dosti neobjektivní.

Všechny ostatní směsi požadavek na maximální 5% úbytek hmotnosti splnily, většinou docházelo po zkoušce mrazuvzdornosti z nárůstu hmotnosti.

U neprovzdušněných směsí splnila minimální 75% součinitel mrazuvzdornosti pouze jedna směs a to s příměsí 15% popílku Počerady. Zbylé tři popílkové směsi měli součinitel pouze kolem 30%.

Provzdušněné směsi již vyšli lépe, což se dalo také očekávat. Přídavkem provzdušňovací přísady byly do betonu vnesené póry, které přerušují síť kapilár a tím pomáhají zlepšovat mrazuvzdornost betonu. Voda se přerušenými kapilárami nemůže šířit dál do vzorku, kde by po zmrznutí zvětšila svůj objem a tím narušila strukturu betonu. Vnesené póry jsou velké v řádech mikrometrů (cca do 300 μm), kvůli povrchovému napětí vody nedojde k jejich celému zaplnění vodou (zaplní se asi jen z 60%), takže v póru zůstává místo, kam se voda při změně na led může rozšířit a nepoškodit tak samotný beton.

Nejlépe vyšly směsi s popílkem Dětmarovice, což může být opět způsobeno jeho pomletím a teoretickou vyšší reaktivností. Popílky svojí pucolánovou aktivitou vytváří C-S-H gely, které ucpávají kapiláry a tím pádem působí podobně jako vnesené mikro póry kladně na zlepšení mrazuvzdornosti betonu.

Vzorky byly zkoušeny ve stáří 28 dní, což je na projevení se pucolánové aktivity teoreticky ještě moc brzo. Při dalším zkoumání a zjišťování mrazuvzdornosti po více než 28 dnech (až 90 a více dní) by výsledky díky postupné reakci popílku měli být viditelně lepší.

4. Závěr

Cílem této práce bylo posouzení vlivu užití elektrárenských popílků jako aktivní příměsi do betonu s částečnou náhradou cementu v prostředí XF. Zahraniční zkušenosti a výzkumy potvrzují pozitivní vliv popílku na vlastnosti betonu i silničním stavitelství.

Betony s popílkem vykazují větší odolností v agresivním prostředí a proti korozi betonu, větší vodotěsností, nižším hydratačním teplem a vysokými dlouhodobými pevnostmi.

Pro pozitivní výsledky musí být beton kvalitně navrhnut a namíchán a vyrobená tělesa musí být pečlivě ošetřována.

Pevnosti po 28 dnech byly u směsí s obsahem popílku mírně nižší než u referenčních směsí, lepších výsledků dosahovala tělesa z mletého popílku Dětmarovice. Předpoklad je, že po delší době by se pevnosti postupně vyrovnávaly.

U zkoušky vodotěsnosti měla tělesa s obsahem popílku Počerady lepší výsledky v provzdušněné formě, naopak vzorky s popílkem Dětmarovice vycházely lépe v neprovzdušněné formě. Opět zde vlivem pucolánové aktivity platí předpoklad postupného zlepšování výsledků a mělo by se pokračovat ve výzkumu.

Zkouška mrazuvzdornosti vyšla logicky lépe pro provzdušněné směsi. Pozitivně se zde projevilo pomletí popílku Dětmarovice v provzdušněných směsích. Dalším výzkumem by se dal ověřit dlouhodobější vývoj. 28 dní je pro projevení se pozitivních vlastností popílku relativně málo.

Zkouška CHRL nebyla provedena adekvátně, pravděpodobně došlo ke špatnému vytvoření povrchu zkušebních těles, nebyla dobře ošetřována nebo došlo k jinému chybnému postupu. Testování by mělo být zopakováno, nejlépe na větším množství těles a také po více než jen 28 dnech.

Na tělesech bylo patrné, že je opravdu velmi důležité dodržení všech technologických zásad a správného ošetřování vzorků.

Navrhuji další zkoumání této problematiky po delší časový úsek pro potvrzení všech očekávaných vlivů popílku na beton.

5. 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, 166 s. ISBN 978-80-260-4226-6.

[2] ČEZ. *Uhelné elektrárny skupiny ČEZ.*[online] [cit. 2014-05-28] Dostupné z: http://www.cez.cz/edee/content/micrositesutf/odpovednost/content/pdf/cez_group_and_coal_power_plants.pdf.

[3] SVOBODA, L. a kol. *Stavební hmoty.* Praha: 2013, 950 s.ISBN 978-80-260-4972-2.

[4] HELA, R. *Technologie betonu*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, 2005, 110 s. ISBN 978-80-260-4972-2.

[5] PYTLÍK, P. *Technologie betonu*. 2. vyd. Brno: VUTIUM, 2000, 390 s. ISBN 80-214-1647-5.

[6] FRIDRICHOVÁ, M. *Maltoviny II – přednášky.* Brno: 2014.

[7] BYDŽOVSKÝ, J. *Vybrané statě z technologie stavebních hmot – přednášky.* Brno: 2014.

[8] GETEC. *Bag Filter (Air Pollution Treatment, Filter).* [Online] [cit. 2014-05-29] Dostupné z: http://getec.en.ec21.com/Bag_Filter_Air_Pollution_Treatment--6802956_6802972.html.

[9] CHRYSO. *CHRYSO®Plast 760.* [Online] [cit. 2014-05-29] Dostupné z: http://chryso.cz/upload/t_documents/Fichier_L1/48946/ChrysoPlast_760.pdf.

[10] CHRYSO. *CHRYSO®Air A 50%.* [Online] [cit. 2014-05-29] Dostupné z:http://chryso.cz/upload/t_documents/Fichier_L1/49000/ChrysoAir_A_50.pdf.

[11] HEIDELBERG CEMENT. *CEM I 42,5 R, výrobní závod Mokrá.* [Online] [cit. 2014-05-29]Dostupné z: http://www.heidelbergcement.com/NR/rdonlyres/60E2BD84-3DE6-4CF9-A4B2-76790EF7BBF9/0/TechnickylistPortlandskycementCEMI425RMokra20130322.pdf.

[12] ELFMARKOVÁ, E. *Vliv jemnozrnných příměsí na charakter pórového systému betonu.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2012. 18 s. Vedoucí Studentské vědecké a odborné činnosti: prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

[13] CEZEP. *Elektrárna Dětmarovice.*[Online] [cit. 2014-05-29] Dostupné z: http://www.cezep.cz/detmarovice.html?id=117.

[14] CEZEP. *Elektrárna Počerady.*[Online] [cit. 2014-05-29] Dostupné z: http://www.cezep.cz/pocerady.html?id=122.

[15] HELA, R. *Technologie betonu I – přednášky.* Brno: 2012.

[16] NEVILLE, A. *Proparties of concrete*. 4th and finaled. Harlow: Longman Group, 1995, 844 s. ISBN 05-822-3070-5.

[17] POPOVICS, A. *Concrete materials: properties, specifications and testing*. 2nd ed. Park Ridge, N.J.: NoyesPublications, 1992, xix, 844 s. ISBN 0-8155-1308-9.

6. Seznam příloh

Příloha č. 1: Technický list CEM 42,5 R Mokrá [11]

Příloha č. 2: Technický list CHRYSO®Air A 50% [10]

Příloha č. 3: Technický list CHRYSO®Plast 760[9]