



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

STUDIUM ZEFEKTIVNĚNÍ VYUŽITÍ AKTIVNÍCH PŘÍMĚSÍ PRO VÝROBU BETONU

STUDY ON THE OPTIMIZATION OF ACTIVE ADDITIVE UTILIZATION IN CONCRETE
PRODUCTION

DISERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Martin Ťažký

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. RUDOLF HELA, CSc.

BRNO 2025

ABSTRAKT

Předložená disertační práce se zabývá problematikou zefektivnění využívání aktivních příměsí pro výrobu betonu, konkrétně poté elektrárenských popílků. Ekonomické a ekologické aspekty současnosti vedou obecně k výraznému zvyšování cen a výraznému poklesu produkce dnes běžně využívaných vedlejších energetických produktů, proto je třeba nalézt cesty jejich efektivnějšího využití. Tyto požadavky kladené na výrobce stavebních hmot vedly ke stanovení cílů této disertační práce.

Hlavním cílem této disertační práce je vývoj nových druhů směsí aktivovaných popílků, které by svým původem a dosaženými vlastnosti a dopadem na vlastnosti cementového kompozitu zapadaly do zpřísnujících se požadavků na enviromentální a ekonomickou stránku produkce stavebních hmot. V rámci experimentální části práce byly hledány jednak způsoby mechanické aktivace mletím dnes nevyužívaných ložových popílků a dále možné způsoby chemické aktivace vysokoteplotního úletového popílku přídatkem popílku fluidního. V obou případech bylo cílem vyvinout aktivní příměs, která by bezezbytku naplňovala požadavky legislativy a jejíž působení na cementový kompozit by bylo zcela bezpečné i z dlouhodobého hlediska. Proto byla značná část experimentální práce zaměřena na sledování trvanlivosti kompozitů v různém agresivním prostředí pomocí obsáhlého souboru metod, jemuž byly vystaveny po dobu až 360 dní. Kladen byl důraz i na analýzu mikrostruktury pomocí nejmodernějších postupů a vybavení.

Výsledky a dopad navržených směsí aktivovaných popílků byly přímo ověřené v praxi při prefabrikované výrobě drobného betonového zboží i při výrobě konstrukčních transportbetonů. Toto řešení obsáhlé experimentální části práce podává hodnotné odborné poznatky pro praxi i pro studovaný vědní obor.

KLÍČOVÁ SLOVA

příměs, vedlejší energetický produkt, vysokoteplotní popílek, fluidní popílek, mechanická aktivace, chemická aktivace, trvanlivost, mikrostruktura, beton

ABSTRACT

This dissertation focuses on improving the use of active mineral additives in concrete production, specifically fly ash from power plants. Due to economic and environmental factors, the prices of commonly used by-products from the energy sector are rising, while their availability is decreasing. Therefore, it is necessary to find more efficient ways to utilize them. These challenges in the construction materials industry led to the objectives of this research.

The main goal of this dissertation is to develop new types of activated fly ash blends that meet stricter environmental and economic requirements while maintaining or improving cement composite properties. The experimental part of the study explores two activation methods: (1) mechanical activation through grinding of currently unused bed ash and (2) chemical activation of high-temperature fly ash by adding fluidized bed ash. In both cases, the aim was to create an active additive that fully complies with regulations and ensures long-term safety in cement composites. A significant part of the research focused on testing the durability of these composites in various aggressive environments using an extensive set of methods over a period of up to 360 days. Advanced techniques were also used to analyze the microstructure in detail.

The proposed activated fly ash blends were tested in real-world applications, including the production of prefabricated concrete products and structural ready-mix concrete. The findings from this comprehensive experimental study provide valuable insights for both practical applications and the scientific field.

KEYWORDS

addition, secondary raw material, hightemperature fly ash, fluidized bed combustion fly ash, mechanical activation, chemical activation, durability, microstructure, concrete

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Ing. Martin Ťažký *Studium zefektivnění využití aktivních přísad pro výrobu betonu*. Brno, 2025. 215 s. Disertační 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 disertační práci s názvem Studium zefektivnění využití aktivních přísad pro výrobu betonu zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 27. 2. 2025

Ing. Martin Ťažký
autor práce

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané disertační práce s názvem Studium zefektivnění využití aktivních přísad pro výrobu betonu je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 27. 2. 2025

Ing. Martin Ťažký
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych chtěl poděkovat svému školiteli prof. Ing. Rudolfu Helovi, CSc. za trpělivost, odborné vedení, připomínky a rady, které vedly ke zpracování této disertační práce. Zvláštní poděkování patří celé mé rodině a zejména mé ženě a mým 3 synům, za podporu a neochvějnou trpělivost.

OBSAH

OBSAH.....	- 8 -
1. ÚVOD.....	- 13 -
2. SOUČASNÝ NÁHLED NA PŘÍMĚSI DO BETONU	- 16 -
2.1. DRUHY PŘÍMĚSÍ	- 17 -
2.1.1. Legislativa	- 17 -
2.1.1.1. Koncepce k-hodnoty.....	- 17 -
2.1.2. Specifické vlastnosti betonu s příměsí.....	- 19 -
2.1.2.1. Historie používání příměsí.....	- 19 -
2.1.2.2. Dopady vybraných druhů příměsí na vlastnosti čerstvého betonu	- 20 -
2.1.2.3. Dopady vybraných druhů příměsí na vlastnosti ztvrdlého betonu.....	- 28 -
2.1.2.3.1. Mechanické parametry	- 28 -
2.1.2.3.2. Trvanlivostní parametry	- 31 -
2.2. SOUČASNÉ TRENDY VYUŽITÍ PŘÍMĚSÍ.....	- 34 -
3. POPÍLKÝ DO BETONU.....	- 39 -
3.1. Druhy popílků, jejich vznik a vlastnosti.....	- 39 -
3.1.1. Vysokoteplotní popílek.....	- 40 -
3.1.2. Fluidní popílek.....	- 43 -
3.2. Proces SNCR.....	- 46 -
3.2.1. Selektivní nekatalytická redukce NO _x	- 46 -
3.2.2. Selektivní katalytická redukce NO _x	- 48 -
3.3. EFEKTIVNÍ VYUŽITÍ POPÍLKU	- 48 -
3.3.1. Mechanická aktivace popílků.....	- 49 -
3.3.2. Chemická aktivace	- 51 -
4. CÍL PRÁCE.....	- 54 -
5. METODIKA PRÁCE	- 56 -
5.1. ETAPA I – VÝBĚR SUROVIN	- 56 -
5.2. ETAPA II – DOPADY SNCR NA VYSOKOTEPLTNÍ POPÍLEK.....	- 57 -
5.3. ETAPA III – AKTIVACE POPÍLKŮ.....	- 58 -
5.4. ETAPA IV – VYUŽITÍ AKTIVOVANÝCH SMĚSÍ POPÍLKŮ PRO VÝROBU BETONU	- 59 -
5.4.1. PREFABRIKACE	- 60 -
5.4.2. TRANSPORTBETON.....	- 61 -

5.5.	ETAPA V – EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ VÝROBY BETONŮ S NOVĚ VYVINUTÝMI PŘÍMĚSEMI	- 62 -
------	---	--------

6. POPIS POUŽITÝCH ZKUŠEBNÍCH POSTUPŮ - 63 -

6.1.	VSTUPNÍ SUROVINY – POJIVA	- 63 -
6.1.1.	CHEMICKÉ SLOŽENÍ	- 63 -
6.2.	STANOVENÍ MĚRNÉ HMOTNOSTI – PYKNOMETRICKOU METODOU	- 63 -
6.3.	STANOVENÍ MĚRNÉHO POVRCHU – PERMEABILNÍ METODA (DLE BLAINA)	- 63 -
6.4.	STANOVENÍ GRANULOMETRIE A MORFOLOGIE ZRN	- 64 -
6.5.	STANOVENÍ MINERALOGICKÉHO SLOŽENÍ	- 66 -
6.6.	STANOVENÍ REOLOGIE CEMENTOVÉ PASTY	- 67 -
6.7.	STANOVENÍ KONZISTENCE MALTY ROZLITÍM	- 68 -
6.8.	STANOVENÍ POČÁTKU A DOBY TUHNUTÍ	- 68 -
6.9.	STANOVENÍ PRŮBĚHU HYDRATAČNÍCH TEPLOT	- 70 -
6.10.	STANOVENÍ MECHANICKÝCH PARAMETRŮ A INDEXU ÚČINNOSTI	- 70 -
6.11.	VSTUPNÍ SUROVINY – PLNIVA	- 71 -
6.11.1.	STANOVENÍ ZRNITOSTI SÍTOVÝM ROZBOREM	- 71 -
6.11.2.	STANOVENÍ OBJEMOVÉ HMOTNOSTI ZRN A NASÁKAVOSTI	- 72 -
6.11.3.	STANOVENÍ TVARU ZRN – TVAROVÝ INDEX	- 72 -
6.12.	BETONOVÁ SMĚS – ČERSTVÝ BETON	- 73 -
6.12.1.	STANOVENÍ KONZISTENCE	- 73 -
6.12.2.	STANOVENÍ OBJEMOVÉ HMOTNOSTI	- 73 -
6.12.3.	STANOVENÍ KVALITY OVZDUŠÍ - AMONIAK	- 73 -
6.13.	BETONOVÁ SMĚS – ZTVRDLÝ BETON	- 74 -
6.13.1.	STANOVENÍ OBJEMOVÉ HMOTNOSTI	- 74 -
6.13.2.	STANOVENÍ PEVNOSTI V TLAKU	- 74 -
6.13.3.	STANOVENÍ PEVNOSTI V PŘÍČNÉM TAHU	- 74 -
6.13.4.	STANOVENÍ CELKOVÉ NASÁKAVOSTI	- 75 -
6.13.5.	STANOVENÍ NASÁKAVOSTI VLIVEM KAPILARITY	- 76 -
6.13.6.	STANOVENÍ HLOUBKY PRŮSAKU TLAKOVOU VODOU	- 76 -
6.13.7.	STANOVENÍ MRAZUVZDORNOSTI	- 76 -
6.13.8.	STANOVENÍ ODLNOSTI PROTI PŮSOBNÍ VODY A CHEMICKÝCH ROZMRAZOVACÍCH LÁTEK	- 77 -
6.13.9.	STANOVENÍ ODLNOSTI PROTI AGRESIVNÍMU ULOŽENÍ	- 78 -
6.13.9.1.	STANOVENÍ PH BETONU	- 78 -
6.13.9.2.	STANOVENÍ DOBY PŘŮCHODU ULTRAZVUKU	- 79 -
6.13.9.3.	STANOVENÍ MIKROSTRUKTURNÍCH ZMĚN – ELEKTRONOVÁ MIKROSKOPIE	- 80 -
6.13.9.4.	STANOVENÍ MIKROSTRUKTURNÍCH ZMĚN – TGA A XRD	- 80 -

7.	DOSAŽENÉ VÝSLEDKY ETAPY I	- 81 -
7.1.	CEMENT	- 81 -
7.1.1.	<i>Chemické složení a fyzikální parametry</i>	- 81 -
7.1.2.	<i>Mechanické parametry</i>	- 82 -
7.2.	VYSOKOTEPLTNÍ POPÍLEK	- 82 -
7.2.1.	<i>Chemické složení a fyzikální parametry</i>	- 83 -
7.2.2.	<i>Granulometrie a morfologie zrn, mineralogické složení</i>	- 83 -
7.2.3.	<i>Index účinnosti</i>	- 86 -
7.3.	FLUIDNÍ POPÍLEK	- 87 -
7.3.1.	<i>Chemické složení a fyzikální parametry</i>	- 87 -
7.3.2.	<i>Granulometrie a morfologie zrn, mineralogické složení</i>	- 88 -
7.3.3.	<i>Index účinnosti</i>	- 91 -
7.4.	ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ ETAPY I	- 92 -
8.	DOSAŽENÉ VÝSLEDKY ETAPY II	- 93 -
8.1.	POPÍLEK PO PROCESU SNCR	- 93 -
8.1.1.	<i>Chemické složení a fyzikální parametry</i>	- 94 -
8.1.2.	<i>Granulometrie a morfologie zrn</i>	- 95 -
8.1.3.	<i>Index účinnosti</i>	- 97 -
8.2.	DOPAD PROCESU SNCR NA BETONOVOU SMĚS	- 98 -
8.2.1.	<i>Poloprovozní ověření výroby</i>	- 98 -
8.2.2.	<i>Uložení betonové směsi</i>	- 101 -
8.2.3.	<i>Mechanické parametry ztvrdlého betonu</i>	- 101 -
8.2.4.	<i>Ekologický aspekt výroby a finální vlastnosti betonu</i>	- 102 -
8.3.	METODICKÁ PŘÍRUČKA PRO POUŽÍVÁNÍ POPÍLKU PO PROCESU SNCR	- 104 -
9.	DOSAŽENÉ VÝSLEDKY ETAPY III	- 106 -
9.1.	MECHANICKÁ AKTIVACE POPÍLKŮ	- 106 -
9.1.1.	<i>Proces mletí</i>	- 106 -
9.1.2.	<i>Fyzikálně-mechanické parametry mechanicky aktivovaných popílků</i>	- 109 -
9.1.3.	<i>Návrh a vlastnosti výsledné aktivované směsi popílků</i>	- 110 -
9.1.4.	<i>Vyhodnocení výsledných parametrů směsi</i>	- 112 -
9.2.	CHEMICKÁ AKTIVACE POPÍLKŮ	- 113 -
9.2.1.	<i>Proces chemické aktivace</i>	- 114 -
9.2.2.	<i>Index účinnosti chemicky aktivovaných popílků</i>	- 121 -
9.2.3.	<i>Návrh a vlastnosti výsledné aktivované směsi popílků</i>	- 123 -
9.2.4.	<i>Vyhodnocení výsledných parametrů směsi</i>	- 125 -

9.3.	ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ ETAPY III.....	- 126 -
10.	DOSAŽENÉ VÝSLEDKY ETAPY IV	- 128 -
10.1.	VÝROBA PREFABRIKOVANÝCH DÍLCŮ	- 128 -
10.1.1.	<i>Vlastnosti vybraných vstupních surovin.....</i>	- 128 -
10.1.2.	<i>Proces výroby.....</i>	- 135 -
10.1.3.	<i>Zkoušení betonových dlažeb dle ČSN EN 1339.....</i>	- 136 -
10.1.3.1.	<i>Stanovení mechanických parametrů dle ČSN EN 1339.....</i>	- 137 -
10.1.3.2.	<i>Stanovení nasákavosti betonových dlažeb.....</i>	- 139 -
10.1.3.3.	<i>Trvanlivost betonových dlažeb.....</i>	- 140 -
10.1.3.4.	<i>Mikrostruktura betonových dlažeb vyrobených z CHAP.....</i>	- 142 -
10.1.3.5.	<i>Souhrnné zhodnocení použití CHAP pro výrobu vibrolisovaných betonových dlažeb</i>	- 149 -
10.2.	VÝROBA TRANSPORTBETONU	- 150 -
10.2.1.	<i>Vlastnosti vybraných vstupních surovin.....</i>	- 150 -
10.2.2.	<i>Proces výroby a vlastnosti čerstvého betonu.....</i>	- 153 -
10.2.3.	<i>Zkoušení ztvrdlého betonu.....</i>	- 155 -
10.2.3.1.	<i>Stanovení fyzikálně-mechanických parametrů.....</i>	- 155 -
10.2.3.2.	<i>Odolnost proti agresivnímu uložení a mikrostruktura betonu</i>	- 157 -
10.2.3.3.	<i>Souhrnné zhodnocení použití SMAP a CHAP pro výrobu transportbetonu... -</i>	<i>179 -</i>
10.3.	ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ ETAPY IV.....	- 180 -
11.	EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ VÝROBY BETONŮ S NOVĚ VYVINUTÝMI PŘÍMĚSEMI	- 181 -
11.1.	EKONOMICKÁ BILANCE PROCESU VÝROBY SMAP	- 181 -
11.2.	EKONOMICKÁ BILANCE PROCESU VÝROBY CHAP	- 182 -
11.3.	EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ VÝROBY BETONŮ	- 183 -
12.	DISKUZE O VÝSLEDKÁCH.....	- 187 -
13.	PŘÍNOS PRO VĚDNÍ OBOR A PRAXI.....	- 193 -
14.	ZÁVĚR.....	- 195 -
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	- 197 -
	POUŽITÁ LITERATURA.....	- 197 -
	POUŽITÁ LEGISLATIVA	- 202 -
	POUŽITÉ ZDROJE OBRÁZKŮ.....	- 204 -

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	- 207 -
SEZNAM TABULEK	- 208 -
SEZNAM OBRÁZKŮ	- 211 -

1. ÚVOD

Oblast stavebnictví a jmenovitě pak výroba stavebních materiálů patří mezi největší sektory průmyslu, což sebou přináší její značný dopad na globální ekonomickou i ekologickou stránku. Ačkoliv moderní technologie výrazně posouvají možnosti výroby stavebních materiálů specifických užitných vlastností, je stále větší důraz kladen rovněž na ekologizaci výroby a její udržitelnost z pohledu nákladů. Před vývojáři a producenty nových stavebních materiálů, potažmo i nových technologií výstavby, tak stojí nelehký úkol, kdy na jednu stranu jsou na materiály kladeny stále větší požadavky z pohledu snadné práce s nimi a z pohledu jejich vysokých užitných vlastností (mechanická stabilita, vysoká odolnost a trvanlivost a další) a na druhou stranu se jedním z hlavních aspektů prosazení na trhu stává cena výrobku.

Nastavené ekologické celosvětové trendy poté mají dále za následek výraznou transformaci energetického, metalurgického a dalších těžkých průmyslů, což je z pohledu stavebních hmot dále spojeno s nedostatkem jistých surovin, které sice často vznikají pouze jako druhotné suroviny daných odvětví průmyslu, avšak výroba moderních stavebních materiálů se bez nich již jen velmi těžko obejde. Dochází tak k výraznému nedostatku dříve hojně využívaných surovin a před vývojáři stojí úkol jejich nahrazení. Mezi tyto popisované druhotné suroviny lze jmenovat například vysokopecní granulovanou strusku jejíž produkce je úzce vázaná na metalurgický průmysl nebo vysokoteplotní úletový popílek, jehož produkce je vázaná na energetický a teplárenský průmysl.

Nelze však opomenout ani výrobu samotného portlandského cementu, jehož produkce je řazena mezi největší ekologické zátěže moderního průmyslu, kdy při výrobě 1 tuny cementu je do atmosféry uvolněna až cca 1 tuna CO₂ řazeného mezi škodlivé skleníkové plyny. Roční celosvětová produkce tohoto skleníkového plynu z výroby portlandského cementu je vyčíslena cca na 2,8 miliard tun, což představuje cca 8 % celoroční souhrnné produkce toho plynu. [1] Produkci CO₂ při výrobě portlandského cementu je třeba dále rozdělit na nevyhnutelnou produkci, která je dána samotným kalcinačním procesem vápence při výpalu cementu a tvoří cca 62 % z celkové produkce a zbylých 38 % tvoří produkce daná spalováním paliva pro výrobu cementu. [2] Z psaného je tedy zřejmé, že prakticky jedinou složkou produkce CO₂ při výrobě cementu, kterou lze výrazně omezit je ta, která je dána spalováním paliva. Z toho důvodu

dochází k modernizaci celých spalovacích systémů a rovněž k nahrazování fosilních paliv různými alternativy. Statistické ukazatele vydané českým Svazem výrobců cementů poukazují na pokles produkce CO₂ ze spalování fosilních paliv z hodnoty 1064 kt v roce 2000 na hodnotu 506 kt v roce 2023. Pokles produkce CO₂ pocházejícího ze samotného kalcinačního procesu činí poté cca 23 % ve stejném období. [3]

Současné trendy ekologizace výroby stavebních hmot a portlandského cementu nevyjímaje, vedou rovněž mimo poklesu produkce jistých druhotných surovin využívaných při výrobě stavebních směsí, rovněž ke změně produkce jednotlivých druhů cementů. Ačkoliv moderní technologie výroby betonů vysokých užitných vlastností se opírala o základní pilíř v podobě portlandského cementu třídy CEM I a dalšího selektivního dávkování vybraných druhů příměsí přímo na betonárně při výrobě betonu přesně dle požadavků daného typu konstrukce a stavby, dnes je již prakticky nemožné v evropském měřítku se o tento pilíř opírat. Produkce čistého CEM I výrazně klesá na úkor výroby zejména portlandských směsných cementů CEM II, případně až směsných cementů CEM V. Tento pokles v rámci zemí Evropské unie činí mezi léty 2000 až 2022 téměř 20 % a v rámci České republiky, jen mezi léty 2020 až 2023, cca 65 %. [4, 3]

Z výše psaných čísel a faktů, je zřejmé, že je nutné hledat cesty pro výrobu stavebních materiálů vysoké kvality a rovněž naplňovat požadavky ne ekonomickou stránku procesu a ekologizaci výroby. Jako nejvíce vhodné se dále jeví využívání druhotných materiálů, jejichž pozitivní dopady jsou již historicky ověřené. Z důvodu výrazného poklesu produkce klasických druhotných materiálů používaných pro výrobu betonu, je však třeba nalézt uplatnění pro nově produkované druhotné suroviny a pro druhotné suroviny prozatím pro výrobu betonových směsí nevyužívané. Cestou k naplnění cílů výroby a požadavků trhu je co nejefektivnější uplatnění cenově dostupných a ekologicky neutrálních surovin pro výroby stavebních směsí. Ekologická neutralita druhotných surovin je poté dána jejich nevyhnutelnou produkcí jiného odvětví průmyslu.

Zde se otvírá cesta z pohledu lokace střední Evropy navýšit potenciál využitelnosti zejména popílků vznikajících jako druhotné suroviny zejména energetického průmyslu. Tento pohled však musí být zaměřen nejen na efektivní využití dnes již využívaných popílků pro výrobu stavebních směsí a jmenovitě pak betonu, ale zejména s ohledem na využití dnes nevyužívaných zdrojů ložových popílků nebo popílků vzniklých z procesu

fluidního spalování. Z pohledu produkce klasických vysokoteplotních popílků na území Evropy je zaznamenán její výrazný pokles ze 44 milionů tun v roce 2002 na cca 20 milionů tun v roce 2020, přičemž produkce popílků z fluidního spalování se v tomto sledovaném období neustále drží na hladině cca 1 milionu tun ročně. [5] Výraznějším využívání ložových hrubozrnných popílků a strusek pro výrobu betonu brání zejména jejich nevhodná granulometrie, popřípadě další fyzikální a chemické vlastnosti. Jako příklad lze jmenovat vyšší hodnotu ztráty žiháním. Výrazný nedostatek klasických vysokoteplotních úletových popílků dává dobrý základ k započetí efektivního využití ložových popílků za pomoci procesu jejich mechanické aktivace. V případě využití fluidního popílku pro výrobu betonu je díky jeho chemickému složení výzvou zabezpečit jeho efektivní použití bez negativního dopadu na trvanlivost kompozitu. Provedené moderní výzkumy však dávají jinak nevhodnou chemickou skladbu fluidního popílku do souvislosti s možností jeho použití jako aktivátoru pro chemickou aktivaci vysokoteplotního popílku. Tato chemická aktivace se opírá o obsah většího množství volného CaO ve fluidních popílcích, který může posloužit jako aktivátor pucolánových reakcí.

Předložená disertační práce si proto dává za cíl ověřit oba výše psané způsoby efektivního využití popílků pro výrobu betonů, tedy nalézt vhodné produkce ložových popílků pro jejich mechanickou aktivaci a poté cestu jejich využití pro výrobu betonových směsí. Dále ověřit a navrhnout vhodný způsob chemické aktivace vysokoteplotního popílku přidávkem popílku fluidního. Vyvinutou směs popílků opět dále implementovat do výroby betonů. V obou případech ověřit dopady rovněž na dlouhodobé hledisko trvanlivosti pro dané druhy prostředí vyrobených betonových směsí s novými druhy popílků. Zdroje popílků budou voleny s ohledem na jejich dostupnost a fyzikálně-chemické vlastnosti.

2. SOUČASNÝ NÁHLED NA PŘÍMĚSI DO BETONU

Vývoj a pohled na využívání příměsí pro výrobu betonových směsí se mění s ohledem na ekonomickou náročnost jejich využití a jejich dostupností. Ačkoliv je známo už od středověho Říma využívání například přírodních pucolánů nebo sopečných popílků pro výrobu betonových směsí, trendy vývoje a uplatnitelnosti příměsí do betonů se neustále vyvíjí. Jako příklad lze jmenovat vývoj vysokopevnostních betonů za pomoci využití křemičitých úletů, které spadá až do novodobých dějin. Konkrétně v roce 1998 byl poprvé použit křemičitý úlet ve větším měřítku pro výrobu vysokopevnostního betonu, jmenovitě pro stavbu Two Union Square a Pacific First Center. [6]

Je tedy zřejmé, že využití příměsí pro výrobu betonu je závislé na jejich dostupnosti v případě přírodních produktů a produkci v případě druhotných surovin a moderním vývoji například v případě nanomateriálů.

Beton jako kompozitní materiál je z pohledu 21. století prakticky vždy tvořen následujícími složkami:

- Plnivo v podobě kameniva
- Pojivo v podobě portlandského cementu
- Příměsí v podobě selektivního dávkování nebo pocházejí ze směsných cementů
- Přísady zlepšující specifické vlastnosti betonu
- Voda záměsová i ošetřovací
- Vzduch daný nedokonalým hutněním nebo záměrně do kompozitu vnesený

Příměsí se tedy řadí mezi základní složky betonového kompozitu, přičemž jejich přítomnost v betonu je dána jejich selektivním dávkováním přímo při výrobě kompozitu nebo tvoří součást dnes hojně produkovaných a používaných směsných cementů. V obou případech je jejich použití však dáno z pohledu jejich pozitivního ovlivnění specifických vlastností kompozitu ať už v jeho čerstvém nebo ztvrdlém stavu.

Jednotlivé kapitoly a podkapitoly této teoretické části disertační práce se budou zabývat specifiky využití příměsí pro výrobu betonu, jejich dopadem na vlastnosti kompozitu a legislativou upravující vlastnosti a použití daných druhů příměsí.

2.1. Druhy příměsí

2.1.1. Legislativa

Na jednotlivé příměsi pro jejich použití do betonu lze nahlížet z pohledu jejich zapojení do hydratačních procesů jako na příměsi aktivní nebo příměsi pasivní. Toto dělení je obsaženo v již samotné základní betonářské normě ČSN EN 206+A2 [N1], která příměs označuje jako jemně mletou anorganickou složku, která je používána do betonu ke zlepšení určitých vlastností nebo k docílení speciálních vlastností. Touto normou jsou jednotlivé příměsi dále děleny na příměs typu I – téměř inertní příměs a příměs typu II – pucolánová nebo latentně hydraulická příměs.

Z pohledu dané legislativy jsou příměsi typu I obecně specifikovány jako filery nebo anorganické pigmenty a příměsi typu II jako popílký, křemičitý úlet a mletá granulovaná vysokopecní struska. Vlastnosti jednotlivých jmenovaných příměsí jsou poté stanoveny a sledovány dle příslušných norem.

2.1.1.1. Koncepce k-hodnoty

Aby bylo možné zohlednit pozitivní ovlivnění hydratačních procesů použitím aktivních příměsí typu II při návrhu a výrobě betonu, byla zavedena koncepce k-hodnoty, což je předepsaný normativní postup udávající, při jakém množství a v jakém poměru je možné uvažovat s přímou náhradou cementu danou aktivní příměsí. Tento postup je obecně založen na srovnání trvanlivosti nebo pevnosti referenčního betonu se zkouškami betonu, ve kterém je část cementu nahrazena příměsí, jejíž množství je započítáno do vodního součinitele. Norma ČSN EN 206+A2 [N1], dále doplněna o požadavky normy ČSN P 73 2404 [N2], poté již přímo udává jednotlivé použitelné hodnoty pro dané druhy aktivních příměsí vztahované i na druh použitého cementu následovně:

- k-hodnota pro popílek dle ČSN EN 450-1 [N3] je povolena 0,4 pro CEM I a CEM II/A a dále 0,2 pro CEM II/B a CEM III/A
- k-hodnota pro mletou granulovanou vysokopecní strusku dle ČSN EN 15167-1 [N4] se doporučuje 0,6
- k-hodnota pro křemičitý úlet třídy 1 dle ČSN EN 13263-1 [N5] se doporučuje 2,0 pro CEM I a CEM II/A s výjimkou cementů obsahující křemičitý úlet.

Pro každý druh příměsí jsou rovněž specifikována maximální započitatelná množství vycházejí z poměru dávky k hmotnosti cementu a další omezení, jako například nevhodnost použití pro daný druh stupně vlivu prostředí.

Použitá k-hodnota poté slouží k výpočtu skutečného množství cementu a skutečného vodního součinitele dle následujících vzorců:

- Vodní součinitel $w = \text{voda} / (\text{cement} + k\text{-hodnota} \times \text{příměs})$
- Množství cementu = cement + k-hodnota x příměs

Tyto vypočtené hodnoty slouží pro kontrolu návrhu betonové směsi z pohledu mezních hodnot a požadavků normy. Je však patrné, že stanovené k-hodnoty jsou stanovené obecně pro daný druh příměsí a již dále nezohledňují jejich rozdílnou kvalitu. Částečně je tato problematika řešena pomocí zásady koncepce ekvivalentních vlastností betonu (ECPC). Mnoho provedených výzkumů v oblasti efektivního využití příměsí pro výrobu betonu však podávají obraz o nedokonalém způsobu práce s normativními požadavky norem při návrhu betonových směsí.

Dále je známo, že ačkoliv je celá řada příměsí pro výrobu betonu klasifikována jako téměř inertní příměs typu I, mohou se tyto příměsí rovněž účastnit hydratačních procesů s pozitivním výsledkem. Jako typického zástupce lze jmenovat jemně mletý vápenc klasifikovaný jako filer do betonu dle normy ČSN EN 12620+A1. [N6] Velká řada výzkumných prací prokazuje tzv. skrytou aktivitu jemně mletých vápenců, kdy zrna velmi jemně mletých vápenců fungují jako krystalizační zárodky, na kterých se mohou reakční produkty slínku vysrážet. To má za důsledek rychlejší růst hydratačních krystalů a pozitivní ovlivnění celého procesu hydratace slínku. [7] Některé zahraniční studie dokázaly že díky přidavku menšího množství velmi jemně mletého vápence dochází k urychlení hydratace především C_3S , ale rovněž C_3A a C_4AF a zvyšují se tak počáteční pevnosti kompozitu díky tvorbě hydrátu uhličitanu vápenatého ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCO_3 \cdot 11H_2O$). [8] Je tedy otázkou, do jaké míry je správné z pohledu nabytého vědeckého poznání, uplatňování rozdělení příměsí a uplatňování koncepcí k-hodnoty dle normativních předpisů.

2.1.2. Specifické vlastnosti betonu s příměsí

Příměsí jsou pro výrobu betonových směsí využívány obecně ze dvou pohledů. Prvním pohledem je ekonomická stránka výroby, kdy historicky použití příměsí mělo pozitivní efekt na materiálové náklady výroby betonových kompozitů. Tento historicky platný úsudek je dnes však v některých specifických případech silně ovlivněn nedostatkem jistých druhů příměsí, kdy například využitelnost vysokopecní granulované jemně mleté strusky se na území České republiky, stává z důvodu jejího nedostatku a nárůstu cen prakticky nerentabilní pro její selektivní dávkování při výrobě betonu. Obdobný příklad se začíná projevovat při nedostatku vysokoteplotních popílků zejména v letních měsících, kdy silný konkurenční boj v jejich obchodovatelnosti strmě zvyšuje jejich cenu. Běžnou praxí 21. století se poté stává nahrazování těchto jindy ekonomicky výhodných surovin za jiné inertní příměsí na úkor dávky cementu a nebo přímo zvýšenou dávkou směsných cementů. Ačkoliv jsou směsné cementy vyrobené právě často za použití jmenovaných druhů příměsí, z pohledu ekonomické náročnosti výroby betonu je dopad jejich použití výrazně nižší než v případě jejich selektivního dávkování dle přesných požadavků na vlastnosti betonu pro danou stavbu.

Druhým pohledem je poté samotné ovlivnění vlastností betonové směsi vyrobené za použití daného druhu příměsí. V této oblasti se moderní technologie výroby betonu ještě ztelněji potýká s absencí jistých druhů příměsí a se zvýšenou produkcí směsných cementů. Následující podkapitoly se dále zabývají žádoucím či nežádoucím ovlivněním vlastností betonů při použití příměsí.

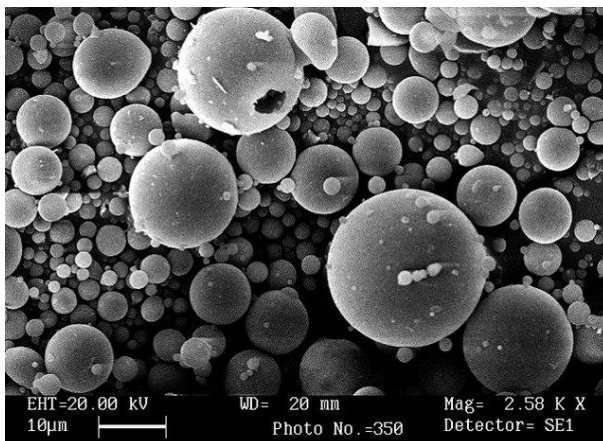
2.1.2.1. Historie používání příměsí

Z historického hlediska je známo první použití popílku pro výrobu stavebních hmot už ve starověkém Římě, kdy architekt Marcus Vitruvius Pollio hovoří ve svých knihách o architektuře o použití sopečného popela pro výrobu malt. Tento sopečný popel pocházel z okolí italského města Pozzuoli na úbočí sopky Vesuv a tato historická spojitost dala vzniknout slovu pucolán. [9] Na druhou stranu mezi nejnověji využívané příměsí pro výrobu cementových kompozitů lze řadit nanomateriály. Velká část nanomateriálů je poté synteticky připravovaná a jedná se o různé nanosiliky, nanojíly, nanovápence nebo i uhlíkové nanotrubičky, přičemž počátky výroby a práce s nanostrukturami jsou datovány do druhé poloviny 20. století. [10]

2.1.2.2. Dopady vybraných druhů příměsí na vlastnosti čerstvého betonu

Obecně je velká část příměsí pro výrobu betonu využívána právě pro ovlivnění jeho vlastností v čerstvém stavu bez dalšího očekávání výrazného zlepšení vlastností ve stavu ztvrdlém. Z pohledu čerstvého stavu je pro beton důležitá zejména jeho reologie a stabilita. Moderní výstavba používá architektonicky stále složitější tvary konstrukcí, a proto je kladen požadavek na vhodné reologické chování vyráběných betonových směsí. Dnes jsou produkovány betony o výrazně vyšší tekutosti, než tomu bylo v dobách minulých a výroba takové směsi nemůže být ve většině případů dána pouze zvýšenou hodnotou vodního součinitele nebo využitím moderních superplastifikačních přísad. Správné reologické chování směsi a její stabilita je dána již samotným návrhem použitých pojiv a kameniva.

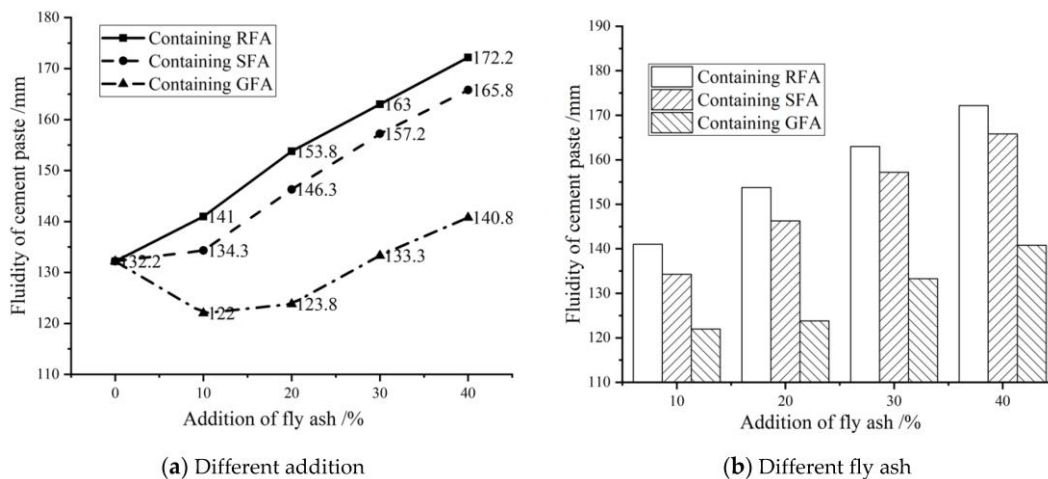
Obecně lze říci, že pro správné reologické chování dané betonové směsi je vhodné použití takových složek, které sami o sobě vykazují vhodnou morfologii zrn nebo jejichž pomocí je výrazně zvýšena stabilita čerstvého betonu. Jako zástupce příměsí mající výrazně pozitivní dopad na reologické chování betonové směsi lze jmenovat vysokoteplotní úletový popílek vzniklý spalováním především uhlí. Tento druh popílku disponuje velmi dobrou morfologií svých zrn, která jsou převážně kulovitěho tvaru a zeskelněné povahy, jak je patrné z Obr. 1.



Obr. 1: Zrna vysokoteplotního úletového popílku pod elektronovým mikroskopem (zdroj [O1])

U těchto druhů popílků je na základě publikovaných odborných prací znám jejich efekt ztv. kulového ložiska a přidavek takového druhu popílku, který zároveň činí náhradu adekvátního množství cementu má pozitivní dopad na konzistenci směsi při

zachování vodního součinitele. Tento jev byl pozorován například výzkumníky z North China University of Water Resources and Electric Power a výsledky ukazuje následující Obr. 2. V příložených grafech byl výzkumníky klasický vysokoteplotní úletový popílek označen jako RFA. [11]



Obr. 2: Konzistence cementopopilkové pasty (zdroj [O2])

Této vlastnosti je poté hojně využíváno například při výrobě vysokohodnotných samozhutnitelných betonů, jejichž reologické chování musí být takové, aby betonová směs dokázala bez dalších externích vlivů dokonale vyplnit tvar bednění a její využití spočívá ve výrobě tvarově složitých nebo hustě armovaných děl.

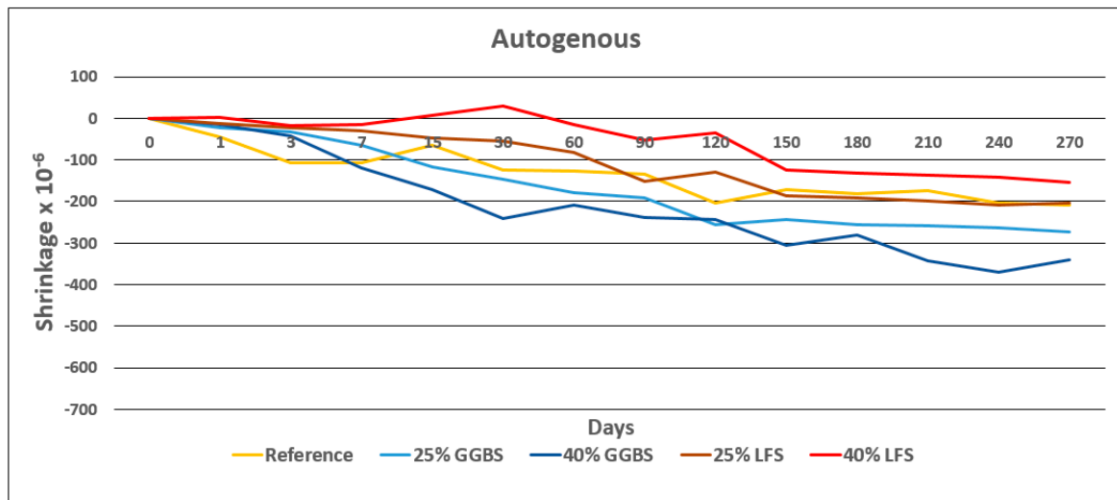
Na druhé straně poté stojí svou morfologií sice méně vhodné příměsi, ale jejich efektivita pro čerstvý beton spočívá ve zlepšení jeho stability. Mezi tyto příměsi lze řadit obecně suroviny vzniklé mletím na vysoký měrný povrch. Konkrétně se může jednat například o velmi jemně mleté vápence, kdy jejich efekt na zlepšení reologie čerstvé betonové směsi není zabezpečen vhodnou morfologií zrn, ale obecně doplněním jemných podílů, které zabezpečují správnou funkčnost superplastifikačních přísad a dobrou stabilitu směsi z pohledu nežádoucího efektu její krvácivosti nebo sedimentace kameniva.

S vhodnou reologií a stabilitou směsi se dále úzce pojí negativní objemové změny kompozitu. Objemové změny cementového kompozitu jsou nevyhnutelným procesem probíhajících hydratačních procesů portlandského cementu, ale rovněž procesem úzce se pojícím s návrhem směsi a ošetřováním. Použití příměsí majících přímý dopad na pozitivní ovlivnění reologie směsi, a tedy i na použitý vodní součinitel, je dobrým předpokladem pro omezení nežádoucího průběhu objemových změn kompozitu. Dále je

nutné dávat do souvislosti samotný průběh hydratačního procesu spojený s vývojem hydratačního tepla. Pro stanovení dopadu jednotlivých nejběžněji využívaných aktivních i inertních příměsí pro výrobu betonu bylo vybráno několik zahraničních studií.

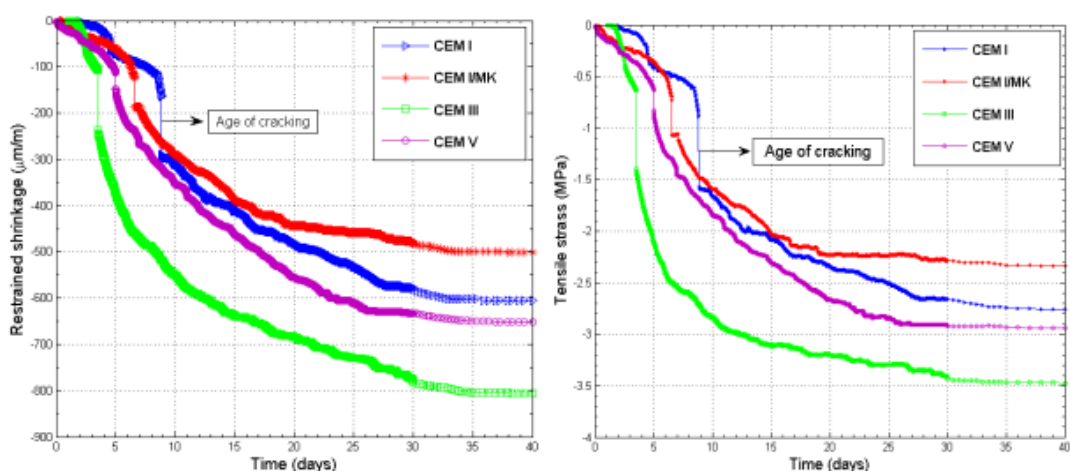
Studie vědců z Faculty of Engineering, Beirut Arab University se zabývala dopadem velmi jemně mletých vápenců na objemové změny kompozitu. V této studii byl sledován dopad různé dávky velmi jemně mletého vápence při konstantním vodním součiniteli na proces chemického a autogenního smrštění a smrštění vysycháním. Výsledky experimentu prokázaly, že ve všech případech objemových změn, vyjma smrštění autogenního, dochází s přidavkem vápence k negativnímu nárůstu hodnot. [12] Ke stejným výsledkům pozitivního ovlivnění pouze autogenního smrštění přidavkem jemně mletého vápence dospěli i autoři z Institute of Civil Engineering, Binzhou Polytechnic. [13] Na základě těchto výsledků lze tvrdit, že přidavek velmi jemně mletého vápence do betonové směsi má sice pozitivní dopad na její celkovou stabilitu a reologii, ale rovněž způsobuje vyšší hodnoty zejména smrštění chemického a vysycháním.

Autoři z Jižní Koreje publikovali svůj výzkum zabývající se dopadem vysokopecní jemně mleté granulované strusky na objemové změny betonu z pohledu studia autogenního smrštění. Výsledky studie prokázaly, že zvyšující se množství strusky v betonu tvořící náhradu cementu při zachování vodního součinitele má negativní vliv na výslednou hodnotu autogenního smrštění. Tento nárůst autogenního smrštění ve stáří 180 dní činil až téměř 30 % při 30% náhradě cementu. [14] Kolektiv autorů okolo Merzouki došel dále k závěrům, že přidavek strusky jako náhrady cementu může být pro nežádoucí objemové změny nebezpečný zejména s ohledem na delší dobu zrání, kdy připravené směsi obsahující vysokopecní strusku až do stáří 14 dní vykazovaly nižší autogenní smrštění než směs referenční bez strusky a poté došlo dle názorů autorů k následné chemické reakci strusky a dalšímu navýšení hodnot smrštění. [15] Tato skutečnost je patrná z následující Obr. 3, kde směsi označené jako 25% GGBS a 40% GGBS obsahují 25 nebo 40 % vysokopecní jemně mleté granulované strusky jako náhrady cementu při zachování vodního součinitele.



Obr. 3: Průběh autogenního smrštění cementových kompozitů s jemně mletou vysokopecní granulovanou struskou (zdroj [O3])

Tyto publikované výsledky podávají dobrý obrázek zejména o dlouhodobém chování betonových směsí obsahujících vysokopecní strusku z pohledu jejich objemových změn. Publikované závěry poukazují zejména na opožděný nástup objemových změn v případě použití vysokopecní strusky, což je záležitost známá a diskutovaná v případě použití strusky a struskových cementů pro výrobu průmyslových podlah. Obrázek chování struskových cementů z pohledu objemových změn poté podává studie Niknezhada a Kamali-Bernarda, která poukazuje na výrazně vyšší hodnoty smrštění struskového cementu CEM III oproti portlandskému cementu CEM I při výrobě samozhutnitelných betonů. [16] Tyto výsledky obsahuje následující Obr. 4.



Obr. 4: Průběh objemových změn a napětí během smrštění pro různé druhy cementů (zdroj [O4])

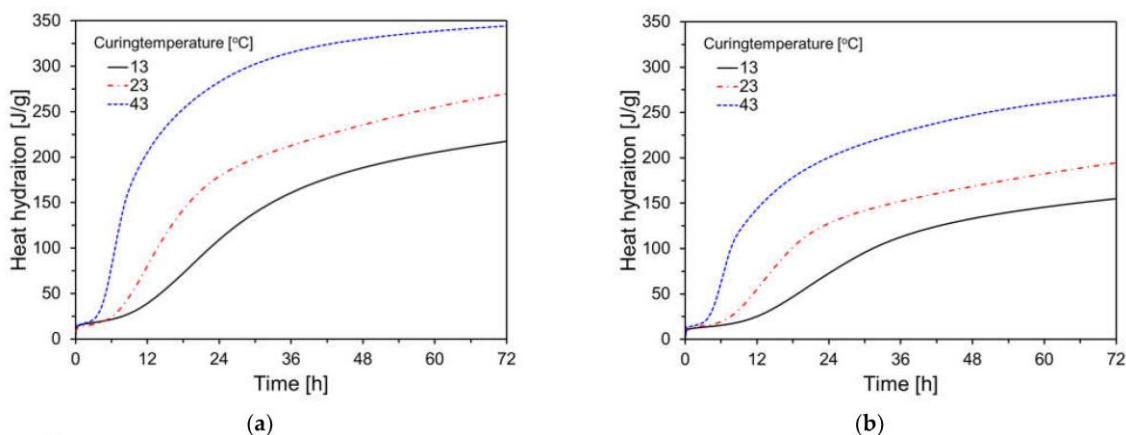
Následné analyzované studie se zabývají dopadem použití vysokoteplotního popílku na objemové změny betonu. Výsledky studie publikované Lei Wang a kolektivem zabývající se dopadem použití vysokoteplotního úletového popílku na objemové změny betonu jednoznačně prokazují, že zvyšující se dávka popílku tvořící náhradu cementu při zachování vodního součinitele (pro dosažení stejného stupně konzistence byla upravena dávka superplastifikační přísady), má velmi pozitivní dopad na výsledné hodnoty autogenního smrštění kompozitu. Toto ovlivnění je po 180 dnech cca 7 % při náhradě 10 % a cca 30 % při náhradě 40 % cementu popílkem. Ještě výraznější trend pozitivního ovlivnění byl pozorován po 3 dnech zrání. [17] Ke stejnému výsledku poté dospěla i studie kolektivu autorů z The Silesian University of Technology, Faculty of Civil Engineering, kteří zkoumali objemové změny samozhutnitelných betonů vyrobených pomocí různých druhů příměsí, přičemž beton vyrobený za použití vysokoteplotního úletového popílku vykazoval po 28 dnech až o 50 % nižší hodnoty celkového smrštění měřeného při podmínkách prostředí o teplotě 20 °C a relativní vlhkosti 50 %. [18]

Z pohledu objemových změn při použití fluidního úletového popílku je vedena celosvětová diskuze, při které se sice autoři jednotlivých studií shodují na expanzivní povaze fluidního popílku, avšak dále se rozchází v pohledu pozitivního využití této expanze na celkové smrštění betonu a zamezení jejího destruktivního chování. Všichni autoři poukazují na vznik ettringitu s expanzivními účinky, někteří autoři však dále předkládají výsledky, kde chemismus fluidního popílku dává v raných fázích zrání kompozitu vzniknout primárnímu ettringitu, který může ve směsi působit jako blokátor smrštění při efektu tzv. rozptýlené výztuže. Tato studie byla publikována například kolektivem autorů okolo prof. Helu na konferenci HealCON, kde výsledky smrštění betonů jednoznačně predikovaly pozitivní průběh smrštění ovlivněný vhodnou kombinací fluidního a vysokoteplotního popílku. [19] Jiná část autorů podává důkaz o výrazně vyšších hodnotách expanze se vzrůstajícím množstvím fluidního popílku ve směsi. Zároveň však byla zkoumána efektivnost eliminace této expanze nejen vhodným poměrem mísení s jinou příměsí (vysokoteplotním popílkem), ale rovněž i samotným kamenivem ve směsi. Převážná část publikovaných výsledků je totiž provedena pouze na cementových pastách. Touto problematikou se zabýval kolektiv autorů okolo Xuemei Chen, kde publikované výsledky prokazují, že více než 10 % expanze v systému cement:fluidní popílek bylo omezeno pouze při použití písku jako kameniva. [20]

Ze studovaných a předložených výsledků objemových změn betonových směsí s fluidním popílkem je zřejmé, že ačkoliv je nutné u těchto směsí počítat zejména v raných stádiích s jejich expanzivním chováním, je správný návrh betonové směsi cestou k eliminaci tohoto negativního chování a v ideálních případech ho může být i pozitivně využito.

Do oblasti na rozhraní čerstvého a ztvrdlého betonu patří stejně jako objemové změny rovněž průběh hydratačních teplot. Obecně platným úsudkem je skutečnost, že zvyšující se poměr příměsí na úkor dávky cementu má pozitivní vliv na průběh hydratačních teplot. Je zřejmé, že portlandský cement je hlavním producentem hydratačního tepla během průběhu hydratačních reakcí a jeho náhrada jinou aktivní či inertní složkou má za následek pokles vyprodukovaného tepla. Toho se vhodně využívá při výrobě betonových směsí určených pro masivní konstrukce. U tohoto typu konstrukcí spočívá hlavní riziko právě v dosažení vysokých teplot uvnitř konstrukce dané hydratačními procesy, které by měly za následek tzv. shoření betonu a silné ovlivnění výsledných mechanických a trvanlivostních parametrů. Je proto třeba vyrábět betony s nízkou nebo pomalou produkcí hydratačních tepel. Toho lze dosáhnout prakticky opět jen za pomoci využití vhodných příměsí. Z výše psaného je poté dále zřejmé, že u jistých druhů příměsí je však třeba dále uvažovat s potenciální vyšší hodnotou objemových změn (bez ohledu na hydratační teploty), což je opět z pohledu výroby masivních konstrukcí nežádoucí. Jako nejefektivnější se poté jeví využití vysokoteplotních popílků, případně jejich kombinace s další příměsí.

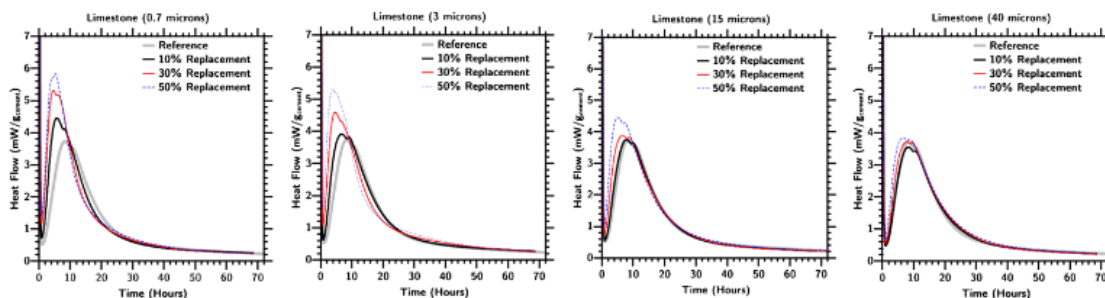
Studie Young-Cheol Choi prokazuje výraznou redukci vyprodukovaného hydratačního tepla betonu při 35% náhradě cementu vysokoteplotním popílkem při návrhu směsi, aby byly dosaženy srovnatelné mechanické parametry analyzovaných směsí. Tato redukce vyprodukovaného tepla oproti betonu pouze s portlandským cementem činí cca 30 % a celkově je průběh vývoje tepla pozvolnější. [21]



Obr. 5: Průběh vývoje hydratačního tepla cementových malt, a - referenční směs, b - směs s náhradou cementu popílkem (zdroj [O5])

Obdobný trend byl pozorován rovněž v případě použití vysokopecní jemně mleté granulované strusky při experimentu Han a jeho kolektivu. Z publikovaných výsledků je však patrné, že je struska v počátcích zrání kompozitu chemicky aktivnější, a proto její přínos pro redukci vývinu hydratačního tepla je v porovnání s vysokoteplotním popílkem o něco nižší. V publikovaném výzkumu došlo k redukci vyprodukovaného hydratačního tepla v případě 30% náhrady portlandského cementu struskou o cca 10 % a v případě 35% náhrady portlandského cementu vysokoteplotním popílkem o 27 % po 168 hodinách. [22]

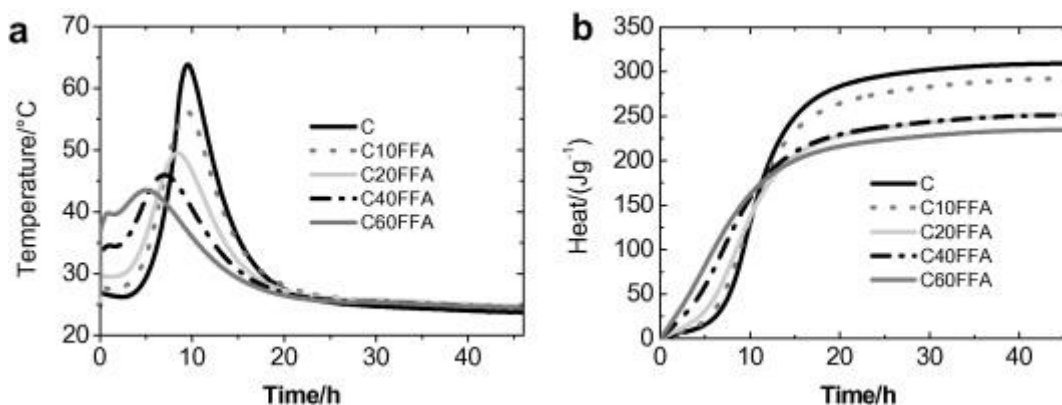
Efekt použití velmi jemně mletých vápenců může být z pohledu následných chemických procesů mírně neočekávaný z pozice, že se jedná klasifikačně o inertní příměs. Vezme-li v potaz, že jemnost vápence má přímý dopad na tvorbu krystalizačních zárodků cementu na těchto zrnech, je zřejmé, že nemusí být jeho přidávkem ovlivněna jen rychlost samotné hydratační reakce, ale rovněž vývin hydratačního tepla. Touto otázkou se zabývala studie Tandre Oey a jeho kolektivu, kdy bylo ze všech nabytých výsledků prokázáno, že přidavek velmi jemně mletých vápenců, má za důsledek rovněž zvýšení produkce hydratačního tepla cementu. Bylo prokázáno, že se zvyšující se jemností vápenců vzrůstá i jejich ovlivnění produkce hydratačního tepla, jak je zřejmé z následujícího Obr. 6. Celý experiment byl proveden však pouze na cementových pastách při konstantním vodním součiniteli 0,45. [23]



Obr. 6: Průběh vývoje hydratačního tepla cementových past s jemně mletým vápencem o různé jemnosti mletí (zdroj [O6])

Z publikovaných závěrů je tedy zřejmé, že v krajním případě, by přidavek velmi jemně mletých vápenců mohl mít za důsledek negativní ovlivnění průběhu hydratačních teplot. Z hlediska praxe technologie betonu je však třeba říci, že není zcela běžné používat velmi jemně mleté vápence jako náhradu cementu, ale spíše díky nim dochází k navyšování pojivové složky.

Pokud by byl fluidní popílek uvažován pro použití jako aktivní příměsi pro výrobu betonu, je díky jeho chemickému složení a jmenovitě zejména zvýšenému obsahu volného CaO nutné počítat rovněž s jeho ovlivněním hydratačních teplot. Touto problematikou se zabýval kolektiv okolo Šilera z Chemické fakulty VUT v Brně, kdy jejich experiment prokázal, že právě vyhašení volného CaO při styku s vodou se projeví na celkovém průběhu uvolněného hydratačního tepla kompozitu, jak je patrné z Obr. 7.



Obr. 7: Průběh vývoje hydratačního tepla cementových past s fluidním popílkem (zdroj [O7])

Z dosažených výsledků autorů vyplývá, že ačkoliv je průběh vývoje hydratačního tepla touto skutečností ovlivněn, náhrada cementu fluidním popílkem se na základě celkového vyprodukovaného tepla do stáří 48 hodin jeví jako výhodná. [24]

2.1.2.3. Dopady vybraných druhů příměsí na vlastnosti ztvrdlého betonu

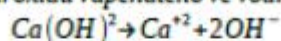
Stejně jako u předchozí podkapitoly bude v rámci této části disertační práce zkoumán vliv jednotlivých nejčastěji používaných druhů příměsí pro výrobu betonu a jeho vlastnosti ve ztvrdlém stavu.

2.1.2.3.1. Mechanické parametry

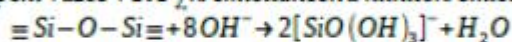
Používání aktivních příměsí je dáno zejména z důvodu jejich pucolánových a latentně hydraulických vlastností. Tyto vlastnosti pak mají za následek zejména pozitivní ovlivnění mechanických a trvanlivostních parametrů kompozitu.

Samotný průběh pucolánových reakcí je dán schopností zejména amorfního SiO_2 a Al_2O_3 reagovat ve vodném prostředí za přítomnosti vápenatých a hydroxylových iontů na CSH a CAH gely a průběh lze popsat pomocí několika chemických rovnic. [25]

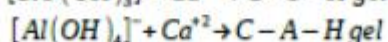
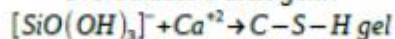
Disociace hydroxidu vápenatého ve vodném prostředí :



Rozštěpení vazeb v SiO_2 , křemičitanech a hlinito-křemičitanech:



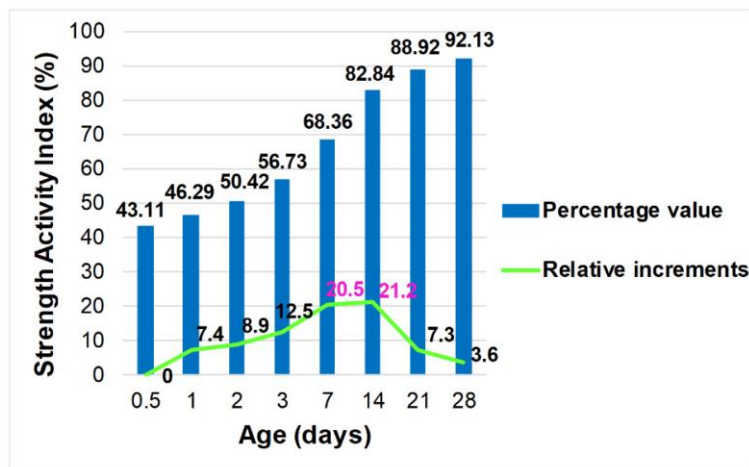
Tvorba CSH a CAH gelů:



V případě latentně hydraulických vlastností se jedná o obdobné chemické procesy pro jejichž nastartování je však nutná přítomnost aktivátoru, v případě betonu ho zastává cement.

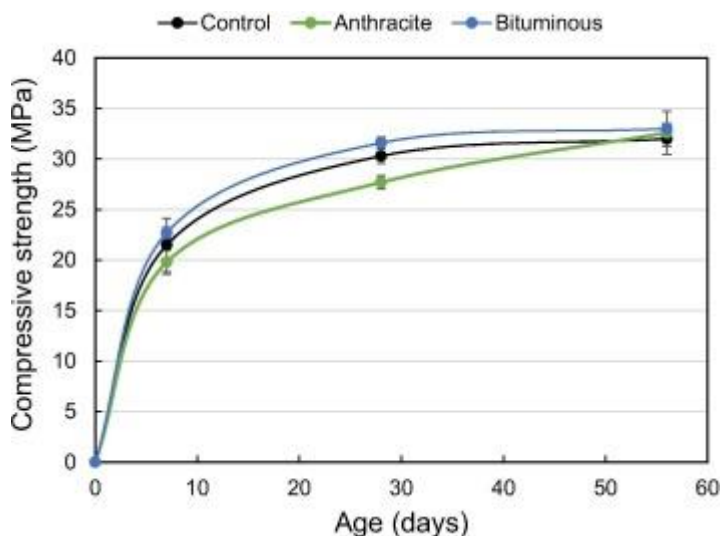
Bylo publikováno mnoho studií zabývajících se a podávajících obraz o průběhu pucolánových reakcí vysokoteplotních úletových popílků a jejich dopadu na mechanické parametry betonu. Jako příklad lze uvést výsledky Golewskeho z Faculty of Civil Engineering and Architecture, Lublin University of Technology, které tvrdí, že počátek pucolánové reakce byl zaznamenán po 2 až 3 dnech a následně byl sledován jeho průběh pomocí dosažených indexů aktivity popílku a elektronové mikroskopie mikrostruktury kompozitu. Dosažené výsledky indexů účinnosti při 25% náhradě cementu popílkem

zobrazuje následující Obr. 8 a je z nich zřejmé, že se vrůstajícím časem index narůstá a zlepšují se tak mechanické parametry kompozitu. [26]



Obr. 8: Vývoj indexů účinnosti vysokoteplotního popílku v čase (zdroj [O8])

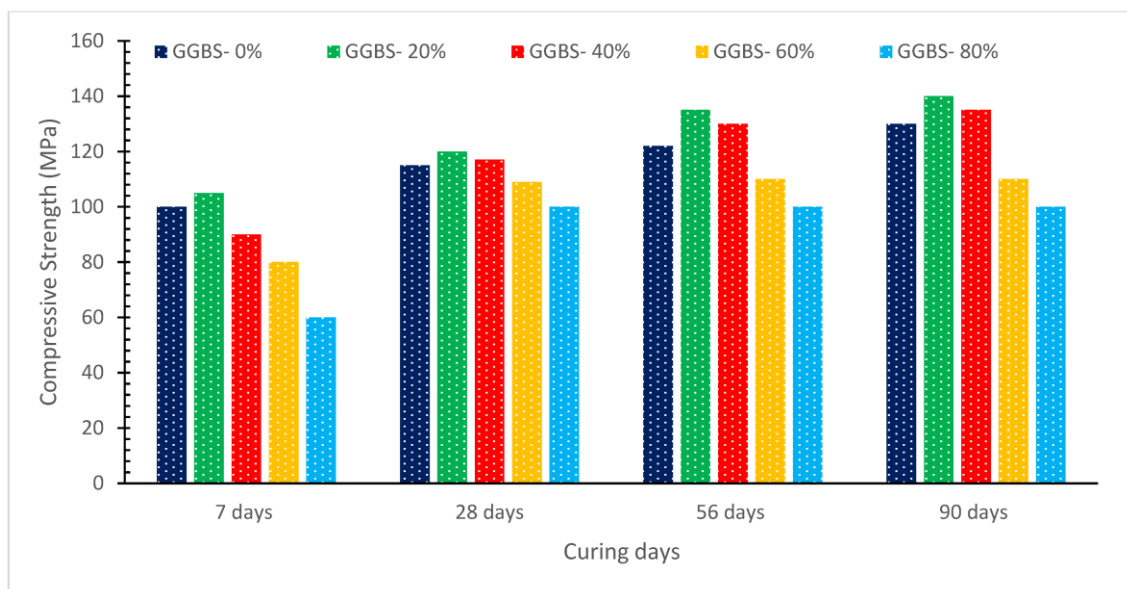
Výsledky studií dopadu použití fluidního popílku na mechanické parametry kompozitu se poté shodují, že ačkoliv má fluidní popílek značně negativní dopad na konzistenci směsi a je tak potřeba používat vyššího vodního součinitele, jsou dosažené hodnoty pevností kompozitu v tlaku vyšší při náhradě cementu popílkem než v případě referenční směsi bez popílku. Tyto výsledky jsou publikovány i v práci autorů z The Pennsylvania State University, kteří stanovovali dopad náhrady portlandského cementu v množství 20 % fluidním popílek za spalování černého a živičného uhlí. V obou případech se podařilo prokázat pozitivní vliv pucolánové reakce fluidního popílku na mechanické parametry kompozitu, jak zobrazuje Obr. 9. [27]



Obr. 9: Vývoj pevností cementového kompozitu s fluidním popílkem v čase (zdroj [O9])

Z výsledků je navíc patrné, že nástup pucolánové reakce a její vliv na výsledné mechanické parametry kompozitu je u fluidního popílku znatelně rychlejší a index aktivity již po 7 dnech může převyšovat výsledky referenční směsi.

Studium vlivu vysokopecní jemně mleté granulované strusky na mechanické parametry betonu se opět opírá o dosažené hodnoty indexů aktivity. Studie shrnující poznatky o využití a vlastnostech vysokopecní strusky při výrobě betonu vypracována Ahmadem a jeho kolektivem, prokazuje velmi dobré nárůsty mechanických parametrů betonů vyrobených za použití strusky. Tyto výsledky zobrazuje Obr. 10 a je z nich zřejmé, že i při 40% náhradě cementu struskou je možné dosahovat srovnatelných nebo vyšších pevností v tlaku než v případě referenční směsi bez strusky. Tyto výsledky jsou však dosahovány až po 28 dnech zrání a s rostoucím stářím se dále zlepšují. [28]



Obr. 10: Vývoj pevnosti cementového kompozitu s vysokopecní struskou v čase (zdroj [O10])

Jak již bylo zmíněno dříve, ačkoliv je velmi jemně mletý vápenec klasifikován normativně jako inertní příměs, mnoha autorům se podařilo prokázat jeho tzv. skrytou aktivitu. Jako příklad lze uvést studium tohoto efektu autory z Univerzity Amar TELIDJI, kteří ve své práci publikovali výsledky, které prokázaly, že 5% náhrada cementu jemně mletým vápencem může navýšit pevnost kompozitu v tlaku až o cca 5 %, ale s vyšší náhradou cementu vápencovým filerem než 10 %, již pevnosti klesají. [29]

2.1.2.3.2. Trvanlivostní parametry

Ačkoliv se téměř všechny v předchozí kapitole popsané příměsi nějak pozitivně podílí na finálních mechanických parametrech kompozitu, nelze totéž obecně předpokládat rovněž v případě jejich dopadu na trvanlivost kompozitu. Ve většině případů sice dochází díky probíhajícím pucolánovým reakcím a latentně hydraulickým procesům k zahušťování a vytvrzování mikrostruktury kompozitu, což má pozitivní dopad na její uvaření se proti vnikání agresivních médií. Pro některé typy příměsí je však známo, že jejich použití není vhodné do všech druhů prostředí. Jako příklad lze jmenovat vysokoteplotní popílků nebo jemně mleté vápence a jejich negativní dopad na životnost kompozitu v prostředí mrazu a případně chemických rozmrazovacích látek.

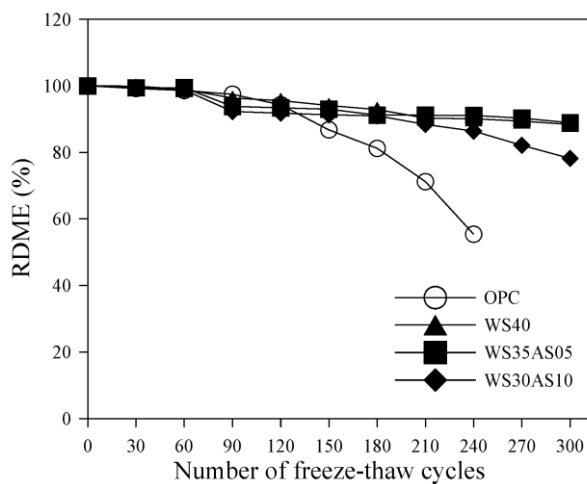
Touto problematikou se přesněji zabývá například studie S. Tsivilise a kolektivu, která prokazuje, že již 10% přídavek vápence jako náhrady portlandského cementu má negativní dopad na trvanlivost kompozitu proti cyklickému zmrazování a rozmrazování. [30]

Z hlediska dopadu použití vysokoteplotních popílků na betony vystavené prostředí XF neexistuje jednotný názor. Některé studie tvrdí, že samotný vysokoteplotní popílek působí destruktivně na uměle vytvořené mikropóry pomocí provzdušňovací přísady a zabezpečující zvýšenou trvanlivost kompozitu a rovněž poukazují na možné prorůstání volného prostoru v těchto pórech CSH gely v dlouhodobém horizontu. Díky tomu se nedoporučuje popílků do prostředí XF používat. Jiné studie však předkládají výsledky, kdy přídavek popílků a probíhající pucolánová reakce zvyšují odolnost kompozitu v prostředí vody a mrazu. Jako příklad takové studie lze jmenovat výsledky dosažené kolektivem okolo Jingjiing He, jejíž výsledky prokazují, že ideální náhrada cementu popílkem pro zlepšení odolnosti kompozitu proti mrazu a mořské vodě je 20 %. [31] Studie autorů z Department of Civil Engineering, Chittagong University of Engineering and Technology (CUET) podává výsledky v nichž tvrdí, že ideální náhrada cementu popílkem může pro zlepšení odolnosti proti působení mrazu a vody činit 30 až 40 %. [32]

Obě studie se teoreticky pak opírají i o stanovení permeability mikrostruktury kompozitu vyrobeného za použití vysokoteplotního popílků, která je měřena průnikem chloridových iontů. Touto zkouškou je pak jednoznačně prokázán pozitivní vliv probíhající pucolánové reakce. Z praktických zkušeností na území České republiky a

okolních zemí se začínají aplikace použití betonů s popílky pro prostředí XF hojněji využívat až nyní s nástupem produkce směsných portlandských cementů, které v některých případech popílky obsahují. Dosažené výsledky odolnosti takto vyrobených betonů jsou však zejména z pohledu stanovení odolnosti proti CHRL metodou dle ČSN 73 1326 [N7] značně nestejnorodé a diskutabilní.

Naopak využívání jemně mleté vysokopecní granulované strusky pro prostředí XF je již po mnoho let prakticky ověřeno. Tuto skutečnost teoreticky ověřuje i studie vedená Seung-Tae Lee, jejíž výsledky poukazují na zvýšení trvanlivosti betonů obsahujících vysokopecní strusku v náhradě až 40 % portlandského cementu. [33] Dosažené výsledky jsou patrné z následujícího Obr. 11.

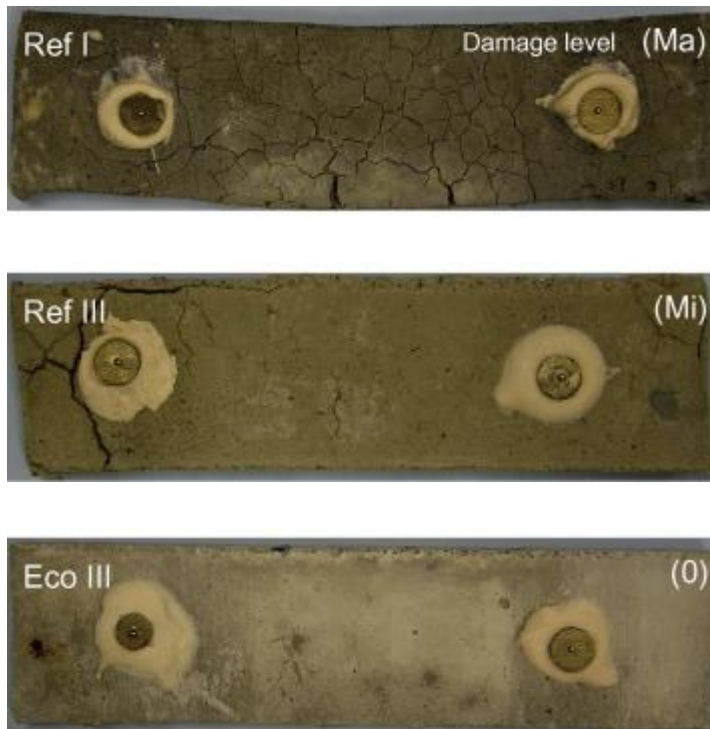


Obr. 11: Vývoj relativního dynamického modulu pružnosti cementového kompozitu se struskou jako závislosti odolnosti cementového kompozitu proti cyklickému zmrazování a rozmrazování (zdroj [O11])

Z pohledu praxe jsou obecně vysokopecní strusky nebo směsné cementy obsahující vysokopecní strusku pro prostředí XF nebo XA hojně využívané právě z důvodu zlepšení jejich trvanlivosti.

Konkrétně pro prostředí XA se právě vysokopecní struskový cement třídy CEM III jeví jako nejvhodnější a legislativně je často předepisován jako síranovzdorný cement. A to zejména z pohledu jeho dobré odolnosti proti síranovému prostředí. Výzkum vedený Mittermayerem prokázal výrazně se zvyšující odolnost cementových kompozitů vystavených expozici Na_2SO_4 se vzrůstajícím poměrem vysokopecní strusky na úkor slínku portlandského cementu. Rovněž bylo prokázáno, že tuto odolnost může ještě zvýšit optimalizovaný návrh směsi využívající nejen CEM III, ale i přídavek vysokoteplotního popílku a jemně mletého vápence. [34] Následující Obr. 12 pocházející z psaného

výzkumu ukazuje destruktivní účinky prostředí Na_2SO_4 v koncentraci 30 g/l a teplotě 8 °C při expozici 200 dní.

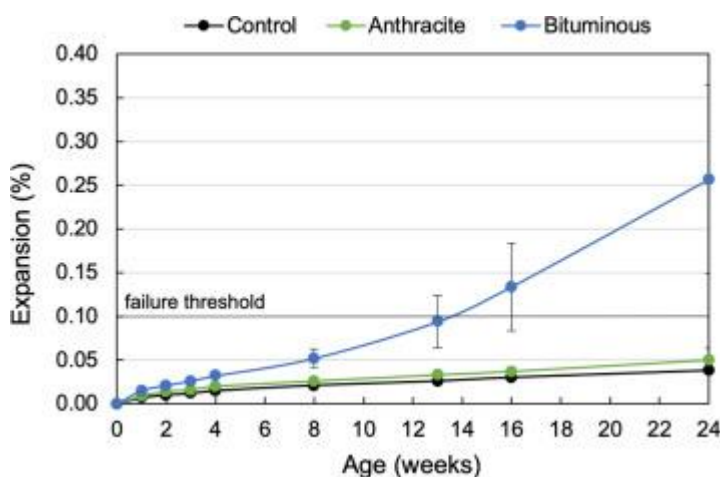


Obr. 12: Vzorky uložené 200 dní v agresivním prostředí Na_2SO_4 , Ref I - CEM I, Ref III - CEM III, Eco III - CEM III + vysokoteplotní popílek+ jemně mletý vápenec (zdroj [O12])

Z přiložených fotografií je patrné, že dobrá odolnost cementového kompozitu proti síranové korozi je dána především účinným snížením obsahu portlandského slínku. Je zřejmé, že čistý portlandský CEM I nedokáže dobře síranovému prostředí odolávat a to především z důvodu tvorby $\text{Ca}(\text{OH})_2$ v důsledku probíhající hydratační reakce, který se stává reaktantem pro tvorbu zplodin síranové koroze. Je-li tento minerál spotřebováván jako budič latentní hydraulicity strusky nebo pucolánovou reakcí popílku, dochází k eliminaci růstu produktů síranové koroze.

V případě odolnosti betonů proti agresivnímu prostředí obsahujících fluidní popílek lze vycházet z teorií platných pro klasický vysokoteplotní popílek. Chemická aktivita fluidního popílku je odvislá zejména od jeho chemického složení, ale ve všech případech lze očekávat jeho účastnění se pucolánové reakce. Výsledky experimentu autorů z The Pennsylvania State University poté podávají dále obraz o odolnosti betonových směsí s fluidním popílek z pohledu agresivního síranového prostředí. Bylo zjištěno, že na odolnost proti síranovému prostředí má převážný vliv množství CaO , přesněji aktivního CaO , které je zdrojem pro tvorbu $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Větší množství tohoto

minerálu, než se může účastnit pucolánové reakce se poté stává přímým reaktantem pro chemické pochody síranové koroze. Autoři ve výzkumu porovnávají dva fluidní popílky s různým obsahem aktivního CaO a dosažené výsledky objemové stálosti vyjádřené jako odolnost kompozitů při jejich uložení v roztoku Na₂SO₄ při koncentraci 50 g/l, poukazují, že fluidní popílek s nízkým obsahem CaO (5,06 % hm.) odolnost kompozitu nijak výrazně neovlivňuje, a naopak popílek s vysokým obsahem CaO (15,39 % hm.) tuto odolnost výrazně zhoršuje. Náhrada portlandského cementu fluidním popílkem v provedeném experimentu činila 20 %. [27] Výsledky jsou patrné z Obr. 13.



Obr. 13: Odolnost betonu s fluidními popílků s různým obsahem CaO v prostředí Na₂SO₄ (zdroj [09])

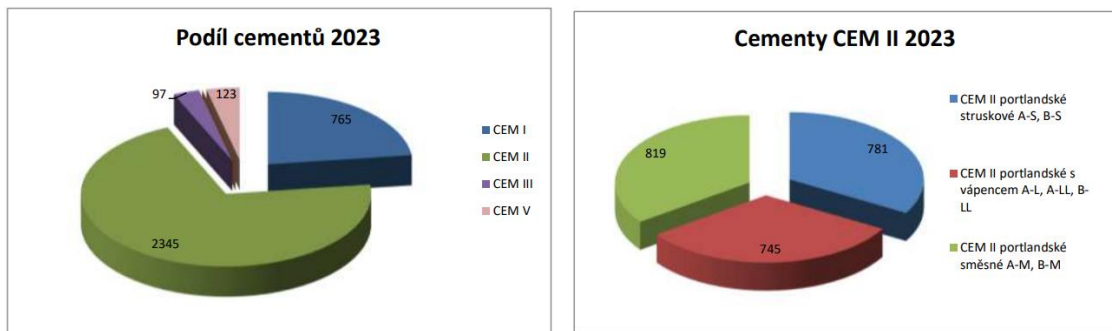
Tyto výsledky a tvrzení ohledně rozhodujícího množství CaO v popílků při odolnosti proti působení síranové koroze je v souladu s výsledky testování vysokoteplotních vápenatých popílků třídy C, které na rozdíl od klasických vysokoteplotních popílků třídy F zhoršují odolnost cementového kompozitu. [35]

2.2. Současné trendy využití příměsí

Pro správné pochopení nutnosti využití příměsí pro výrobu betonu je třeba uvažovat nejen selektivní dávkování příměsí k cementu, které probíhá na betonárně při výrobním procesu betonové směsi, ale rovněž dávkování příměsí již obsažených ve směsných cementech. Jak bylo psáno v úvodu disertační práce, právě produkce směsných cementů v posledních letech výrazně narůstá, což naopak vede ke snižování selektivně dávkovaných příměsí.

Ačkoliv se moderní technologie výroby betonu může opírat o provedené studie a poznatky v oblasti efektivního dávkování příměsí, je tento správný trend stále více

utlaččen produkcí směsných cementů na úkor cementu portlandského. Pro území České republiky se jedná konkrétně o pokles produkce CEM I mezi léty 2020 a 2023 o téměř 65 % a navýšení produkce CEM II o cca 40 %. Zbylé procenta připadají k navýšení produkce zejména CEM V. Rozložení podílu prodeje jednotlivých druhů cementů na území ČR je znázorněno na následujícím Obr. 14 a jedná se o oficiální data poskytnutá Svazem výrobců cementu ČR. [3]



Obr. 14: Podíl jednotlivých druhů cementů obchodovaných za území ČR v roce 2023 (zdroj [O13])

Z pohledu výrobce betonové směsi je poté velmi obtížný návrh specifických receptur betonů přesně dle požadavků dané stavby, protože směsné cementy již často obsahují různou kombinaci příměsí v producentem různě zvolených poměrech. Jak je patrné z Obr. 14, největší zastoupení v produkci CEM II mají právě třídy CEM II/A-M a B-M, kde se jedná vždy o kombinaci více příměsí. Aby bylo možné správně pochopit problematiku dalšího selektivního dávkování příměsí ke směsným cementům, je třeba objasnit meze složení jednotlivých druhů cementů dle normy ČSN EN 197-1. [N8] Tyto meze pro jednotlivé druhy cementu obsahuje následující Tab. 1, která je výtažkem z citované normy.

Tab. 1: Složení jednotlivých druhů cementů dle ČSN EN 197-1 (zdroj [N8])

Hlavní druhy	Označení 27 výrobků (druhy pro obecné použití)		Složení (poměry složek podle % hmotnosti ^{a)})										Doplňující složky	
			Hlavní složky											
			Sílinek	Vysokopecní struska	Křemičitý úlet	Pucolány		Popilek		Kalcinovaná břidlice	Vápenec			
						přírodní	přírodní kalcinované	křemičitý	vápenatý					
K	S	D ^b	P	Q	V	W	T	L	LL					
CEM I	Portlandský cement	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Portlandský struskový cement	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portlandský cement s křemičitým úletem	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portlandský pucolánový cement	CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portlandský popílkový cement	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
	Portlandský cement s kalcinovanou břidlicí	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
	Portlandský cement s vápenecem	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5
	Portlandský směsný cement ^c	CEM II/A-M	80-88	←----- 12-20 ----->									0-5	
CEM II/B-M		65-79	←----- 21-35 ----->									0-5		
CEM III	Vysokopecní cement	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM IV	Pucolánový cement ^c	CEM IV/A	65-89	-	←----- 11-35 ----->					-	-	-	0-5	
		CEM IV/B	45-64	-	←----- 36-55 ----->					-	-	-	0-5	
CEM V	Směsný cement ^c	CEM V/A	40-64	18-30	-	←----- 18-30 ----->			-	-	-	-	0-5	
		CEM V/B	20-38	31-49	-	←----- 31-49 ----->			-	-	-	-	0-5	

^a Hodnoty v tabulce se vztahují k součtu hlavních a doplňujících složek.

^b Obsah křemičitého úletu je omezen do 10 %.

^c Hlavní složky v portlandských směsných cementech CEM II/A-M a CEM II/B-M, v pucolánových cementech CEM IV/A a CEM IV/B a ve směsných cementech CEM V/A a CEM V/B mimo slínku musí být deklarovány v označení cementu (viz příklad v kapitole 8).

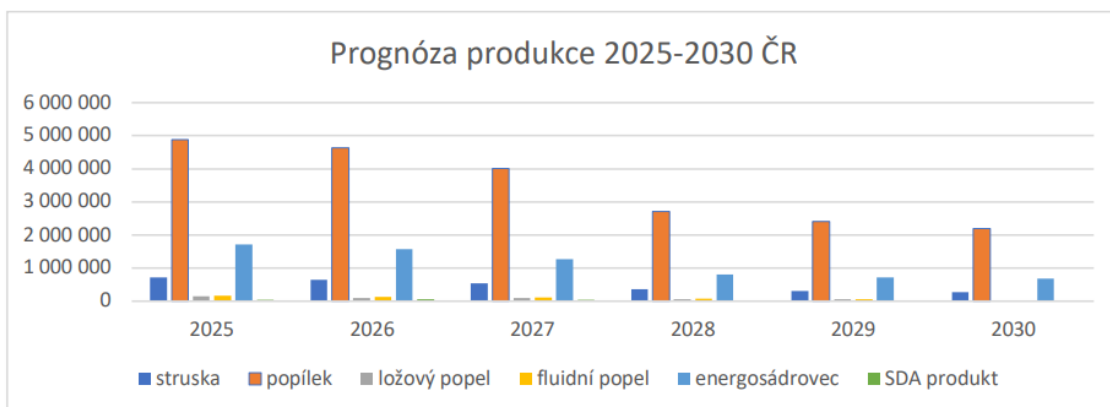
Při pohledu na tuto tabulku je zřejmé, že například pro portlandský směsný cement CEM II/A jsou meze dávkování příměsi 6 až 20 %. Prakticky takto otevřené hranice vedou při návrhu betonových směsí ke skutečnosti, že další případné selektivní dávkování příměsí na betonárně je založeno spíše na předpokladu, a ne nabytých vědomostech z celosvětových studií. Výroba betonových směsí se poté stává z pohledu jejich návrhu méně efektivní a často dochází k jejímu zbytečnému prodražování.

Současně výrazně klesá produkce vedlejších energetických produktů (VEP) a produktů z metalurgického průmyslu dále využívaných jako příměsí pro výrobu betonu. Následující Tab. 2 obsahuje informace o produkci a využití VEP v roce 2023 a Obr. 15 pak prognózu následné produkce VEP do roku 2030 vypracovanou Asociací stavebních a alternativních materiálů. [36]

Tab. 2: Produkce a využití VEP za území ČR v roce 2023 (zdroj [36])

VEP produkce 2023	Celkem t	Celkem %
Popílek ze spalování uhlí (klasické spalování)	5 088 190	58,0
Struska (škvára)	1 052 268	12,0
Popílek z fluidního spalování - uhlí nebo spoluspalování uhlí + biomasa do 20%	1 080 608	12,3
Popílek ze spalování biomasy - fluidní kotle	24 507	0,3
Popílek ze spalování biomasy - nefluidní kotle	4 649	0,1
SDA Produkt	111 688	1,3
Energosádrovec	1 416 052	16,1
Produkce VEP celkem	8 777 962	
Využití VEP 2023	Celkem t	Celkem %
1) beton, cement, pórobeton, cihlářské výrobky	1 023 622	11,7
2) komunikace, pozemní stavby – stabilizát, granulát	179 565	2,0
3) povrchové doly	4 350 122	49,6
4) hlubinné doly	36 251	0,4
5) ukládání na volný povrch (asanace a rekultivace postižených území)	1 924 608	21,9
6) sádrokartonové desky, sádra, cement	712 372	8,1
7) odpad	12 439	0,1
8) sklad EGS	92 019	1,0
9) ostatní	446 964	5,1

Pro porovnání produkce VEP lze uvést čísla zveřejněné Ministerstvem průmyslu a obchodu v roce 2012, kdy byla produkce stanovena na cca 13,0 milionů tun. [37]



Obr. 15: Prognóza produkce VEP na území ČR mezi léty 2025 až 2030 (zdroj [36])

Přiložená prognóza jednoznačně poukazuje na výrazný pokles produkce vysokoteplotních úletových popílků. Tento trend se již nyní velmi negativně projevil na nárůstu cen této nedostatkové komodity, kdy prodejní cena za poslední 3 roky v některých případech vzrostla až o 300 %. [36] Jak je patrné z Tab. 2 využití VEP v roce 2023 pro přímou výrobu stavebních hmot činilo pouze 11,7 % a naopak ukládání na volný povrch převyšuje 21 %. Je tedy zřejmé, že v období poklesu produkce vysoce kvalitních a pro výrobu betonu přímo využitelných vysokoteplotních úletových popílků je třeba hledat způsoby efektivnějšího využití těchto produktů a cesty pro využití aktuálně nevyužívaných produktů. Nabízí se otázka využitelnosti zejména hrubozrnných ložových popílků a strusek, případně popílků fluidních.

Obdobný trend výrazného poklesu produkce je zřejmý i v případě jemně mleté vysokopecní granulované strusky, jejíž produkce je přímo vázaná a metalurgický průmysl. V současné době jsou v provozu na území ČR již pouze 2 ze 4 vysokých pecí společnosti Liberty Steel Ostrava a 2 vysoké pece společnosti Třinecké Železářny. Nejcitelnější poklesy produkce byl zaznamenány ve spojitosti s odstavením z provozu vysokých pecí ve Vítkovických železárnách na přelomu milénia a dále při postupném odstavování pecí společnosti Liberty Steel Ostrava. Produkce všech odpadů spojených s výrobou kovů a jejich hutním zpracováním je mezi léty 2017 až 2023 cca 45 %, což podává obraz o útlumu tohoto odvětví produkující jako druhotnou surovinu i vysokopecní granulovanou strusku. [38]

3. POPÍLKY DO BETONU

Popílkem v rámci zájmů této disertační práce lze nazvat vedlejší energetický produkt (VEP) vzniklý při spalování anorganického materiálu složeného převážně z hnědého nebo černého uhlí. Použití popílku jako příměsi pro výrobu betonu bylo prokázáno již ve starověkém Římě, kdy například pro stavbu římského Pantheonu postaveného mezi lety 118 až 126 n.l. bylo použito přírodního pucolánu vulkanického původu. Použití elektrárenského popílku jako pucolánové příměsi do betonu se datuje k roku 1914. Nicméně první publikace k této problematice je z roku 1937 a autorem je Davis a kolektiv. [39]

Na území České republiky se první výraznější použití popílku jako příměsi pro výrobu betonu spojuje se stavbou Orlické přehrady, budované v letech 1954 až 1961. Použití popílku zajistilo odolnost konstrukce proti vzniku trhlin spojených s vývojem vysokých hydratačních teplot. Pro konstrukci přehrady byly použity dva druhy betonu – Vnitřní konstrukce je z betonu B80 s použitím 130 kg cementu a 50 kg popílku na 1 m³ betonu a povrchový beton je B170 s 200 kg cementu a 50 kg popílku na 1 m³ betonu. [40]

Již v 50. letech dvacátého století se poté objevují první zmínky o mechanismechemické aktivace popílků. Principy mechanické aktivace jsou poté datovány až do 90. let dvacátého století.

Česká republika se obecně v rámci Evropy řadila ke klasickým a výrazným producentům vysokoteplotních popílků, což bylo dáno historicky převažujícími technologiemi výroby elektrické energie v tepelných elektrárnách. Na území České republiky se vyskytovaly a stále vyskytují významné naleziště hnědého i černého uhlí, jeho těžba je však v posledních letech velmi výrazně utlumována a s ní i výroba elektrické energie v uhelných elektrárnách.

3.1. Druhy popílků, jejich vznik a vlastnosti

Z pohledu principu vzniku lze elektrárenské popílky dělit na vysokoteplotní a fluidní. Jedná se o dva používané a technologicky rozdílné principy spalování, při nichž současně popílky jako VEP vznikají. Z pohledu místa jejich zachytu a odloučení z kouřových plynů lze oba druhy popílků dále dělit na popílky úletové a popílky ložové nebo škváry.

3.1.1. Vysokoteplotní popílek

Jako vysokoteplotní popílek je označován VEP vznikající při spalování hnědého nebo černého uhlí klasickým roštovým způsobem při teplotách 1200 až 1700 °C. Spalované uhlí je nejprve roztřeno na uhlíkový prach a při jeho vhnání společně se spalovacím vzduchem do žároviště dochází během několika vteřin ke spálení organických složek. Nehořlavé částice větších rozměrů se poté usazují na dně spalovací komory v podobě ložového popílku a škváry a jemné částice jsou kouřovými plyny strhávány do komínového systému, kde jsou dále nejčastěji pomocí elektrostatických filtrů zachytávány. Následuje odsíření spalin pomocí vápencové vypírky, která však následuje až po odloučení popílku ze spalin. Díky tomu nevstupují produkty odsíření do chemických vlastností vysokoteplotních popílků. Jednoduché schéma vysokoteplotního spalování a vznik vysokoteplotního popílku je na Obr. 16.



Obr. 16: Princip vzniku vysokoteplotního popílku (zdroj [O14])

Chemické složení a další fyzikální parametry vysokoteplotních popílků pak mohou být relativně variabilní s ohledem na spalované uhlí a nastavení spalovacího cyklu. Pucolánové vlastnosti popílku jsou však dány především zastoupením SiO_2 a Al_2O_3 v amorfni podobě a dále CaO .

Zrna vysokoteplotních úletových popílků díky vysokým teplotám spalování disponují velmi dobrou morfologií, kdy se jedná především o kulovitý tvar se zesklenným povrchem. Vhodné morfologie zrn vysokoteplotních úletových popílků je vhodně využíváno pro pozitivní ovlivnění reologie cementového kompozitu, jak bylo popsáno pomocí několika studií v předchozích kapitolách disertační práce. Zesklenný povrch zrn je poté jedním z důvodů pomalého nástupu pucolánové reakce. Tato povrchová vrstva musí být nejprve v silně zásaditém prostředí při přebytku Ca^{2+} a OH^- iontů naleptána, aby se mohla dále reakčních pochodů účastnit. Samotný průběh a doba trvání pucolánové reakce je pak omezena prakticky vyčerpáním všech reaktantů, které jsou obsaženy v popílku a dále vznikají hydratačními procesy cementu. Je tak známo, že mechanické parametry betonů s vysokoteplotními popílků se zvyšují i po několika letech.

Fyzikální a chemické vlastnosti ložových vysokoteplotních popílků mohou být oproti popílkům úletovým mírně odlišné, přičemž prakticky vždy tyto popílků disponují větší hodnotou ztráty žíháním, která je dána především nespálenými organickými zbytky. Morfologie zrn ložových popílků je poté značně nestejnoroďa a nelze tak u těchto popílků uvažovat s pozitivním dopadem na reologii kompozitu.

Na území České republiky je v současnosti v provozu 8 uhelných elektráren spalujících klasickým způsobem hněďe nebo černé uhlí. Jejich provozovateli jsou skupina ČEZ, Sev.en Energy, Energetický a průmyslový holding (EPH) a Veolia Energie ČR. Konkrétně se jedná o provozy Dětmárovice, Chvaletice, Tušimice, Opatovice, Pruněřov, Třebovice, Mělník a Počerady. Do výčtu nejsou započítány malé provozy a spalovny převážně jiných produktů, než černého nebo hněďeho uhlí. Jak uvádí skupina ČEZ ve svém prohlášení, tak do roku 2025 hodlají snížit podíl elektřiny vzniklé výrobou z uhlí na 25 % a do roku 2030 na 12,5 %.

V současné době jsou vysokoteplotní popílků dodávané producenty na trh dle normy ČSN EN 450-1 [N3] pro použití do betonu, dle normy ČSN EN 12620+A1 [N6] pro použití jako fileru a nebo dle ČSN EN 197-1 [N8] použitelné jako příměsi pro výrobu cementu. Rozdíl mezi popílků nabízenými dle normy ČSN EN 450-1 a dle normy ČSN EN 12620+A1 je zejména v jejich granulometrii, která má přímý dopad na další mechanické parametry. Aby mohly být popílků na trhu nabízené dle normy ČSN EN 450-1 musí naplňovat kritéria této normy z pohledu chemického složení, fyzikálních i

mechanických parametrů. Následující Tab. 3 je výňatkem z této normy a obsahuje mezní hodnoty sledovaných parametrů popílků.

Tab. 3: Mezní hodnoty parametrů popílků sledované dle ČSN EN 450-1 (zdroj [N3])

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

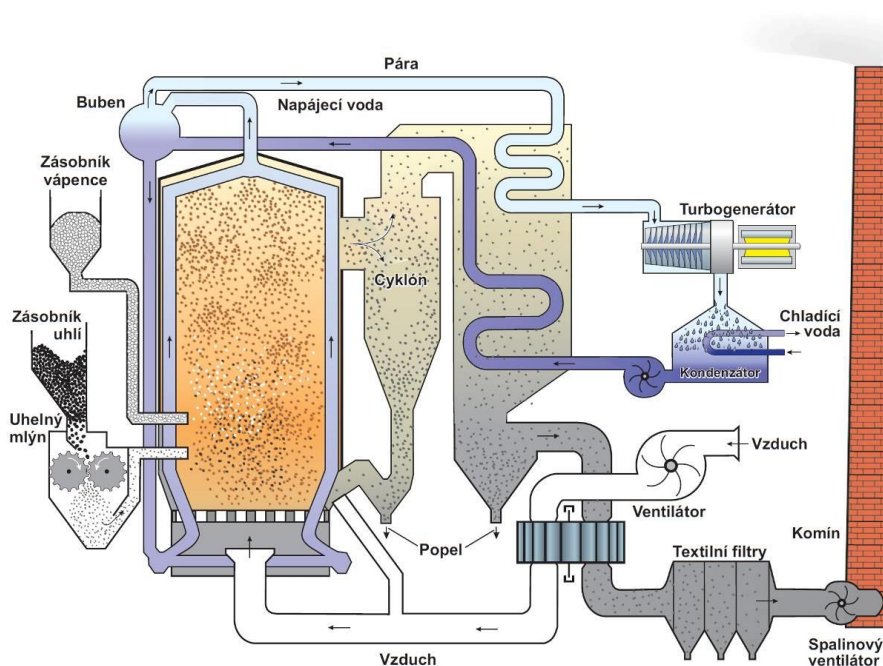
Jak je patrné z přiložené tabulky, u popílků klasifikovaných jako popílký pro výrobu betonů dle normy ČSN EN 450-1 je z hlediska fyzikálních parametrů sledována jejich jemnost, což je parametr vypovídající o granulometrii, počátek tuhnutí a objemová stálost. Z pohledu chemického složení je sledován obsah chloridů, obsah aktivního a volného CaO, obsah SO₃, MgO a alkálie a dále souhrnný obsah SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃. Dopad popílku na cementový kompozit je stanoven a sledován pomocí hodnoty indexu účinnosti ve stáří 28 a 90 dní.

V případě popílků dodávaných na trh jako filer do betonu z pohledu normy ČSN EN 12620+A1 je poté sledována pouze jejich granulometrie, měrná a případně sypná hmotnost a v rámci chemického rozboru obsah chloridů a síry. Tyto popílký tedy nemusí vykazovat žádný pozitivní dopad na cementový kompozit v rámci indexu účinnosti. Ačkoliv se tyto popílký mohou v omezené míře závislé zejména na jejich chemismu a jemnosti účastnit stejně jako popílký klasifikované dle normy ČSN EN 450-1 rovněž pucolánových reakcí, není možné s nimi počítat z pohledu k-hodnoty.

Mineralogie vysokoteplotních popílků je poté založena na obsahu amorfní fáze, křemene, mullitu a případně kristobalitu, periklasu a dále minerálů pocházejících zejména z nespáleného podílu (ztráta žiháním), které odpovídají spinelu, hematitu a případně slídkám a živcům u méně kvalitního uhlí.

3.1.2. Fluidní popílek

Fluidní technologie spalování je aktuálně nastupující modernější a účinnější forma spalování uhlí a dává vzniknout fluidnímu popílku. V porovnání s klasickou vysokoteplotní metodou spalování dochází k výraznému snížení teploty ve spalovací komoře při stejné nebo vyšší účinnosti. Tato teplota spalování se pohybuje okolo 850 °C a mletý uhelný prach je tentokrát do kotle dávkován společně s odsiřovacím činidlem, kterým je vápenec nebo dolomit. Hoření poté probíhá v cirkulující vrstvě ve vzosu a nespálené podíly v podobě ložových popílků a škváry nebo v podobě úletového popílku se dostávají do přímého kontaktu s odsiřovacím činidlem. Schéma fluidního spalování je vidět na následujícím Obr. 17.

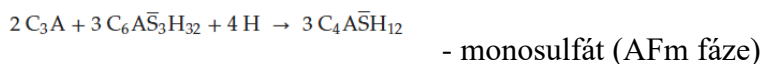
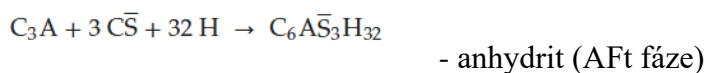


Obr. 17: Princip vzniku fluidního popílku (zdroj [O15])

Popílků z tohoto způsobu spalování poté disponují zcela odlišným chemickým složením a morfologií zrn než popílků vysokoteplotní. V případě úletových i hrubozrnných popílků jsou jejich zrna nestejnorodá a nepravidelného tvaru bez

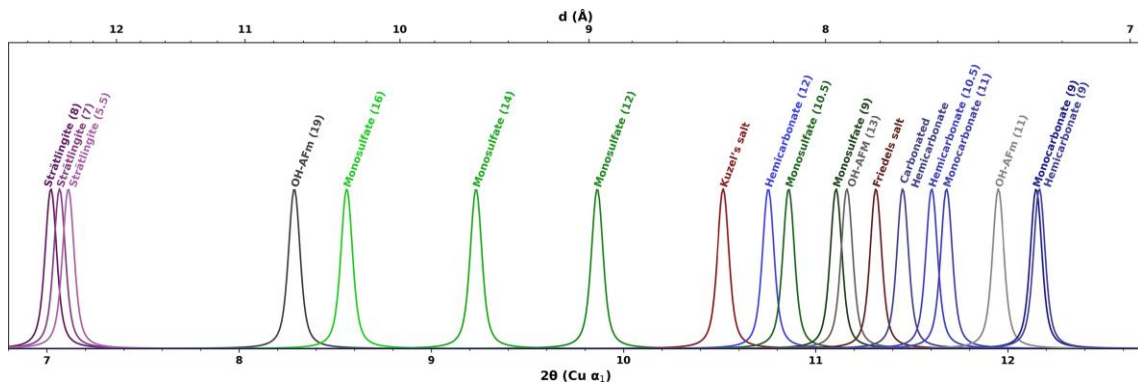
zeskelněného povrchu, který není vytvořen zejména díky nižší teplotě spalování. Naopak jsou zrna velmi porézního charakteru s velkým měrným povrchem. Tato skutečnost je dána mineralogickým složením fluidních popílků, které nejsou tvořeny převážně mullitem a případně vysokoteplotní modifikací křemene v podobě kristobalitu, ale zrna jsou tvořena křemenem a zbytky produktů odsíření, tedy anhydritem, portlanditem a vápencem. Zejména anhydrit pak tvoří vrstevnaté struktury mající velký měrný povrch. Stejně jako u vysokoteplotních popílků lze u popílků fluidních z pohledu mineralogie nalézt dále minerály spojené s nespáleným podílem, tedy zejména slídy a živce. Chemicky jsou dále přítomny produkty síry zejména v podobě oxidu siřičitého.

Z pohledu výše psaného je zjevné, že u fluidního popílku nelze očekávat jeho pozitivní vliv na reologii cementové pasty a jak prokázalo mnoho výzkumných prací, je tomu naopak. Silně porézní zrna velkého měrného povrchu jsou značně vodonáročná, kdy velká část vody je spotřebována téměř okamžitou exotermní reakcí na vyhašení volného CaO a jeho přechod na portlandit. Z pohledu chemického složení a fyzikálních parametrů jsou fluidní popílků ještě znatelněji nekonzistentní, což je dáno úpravou spalovacího procesu a procesu odsíření v závislosti na spalované surovině a jednotlivém kotli. Jak bylo popsáno v předchozí kapitole této teoretické části disertační práce, fluidní popílků mohou disponovat velmi dobrou hodnotou indexu účinnosti, jejich bezpečné použití pro výrobu cementových kompozitů je však ovlivněno zejména zvýšeným obsahem volného CaO a SO₃, které mají za důsledek tvorbu ettringitu a monosulfátu. Tyto minerály mohou mít na mikrostrukturu kompozitu až destruktivní účinek při jejich výrazném rozvoji. Následující rovnice popisují průběh reakce vzniku sulfátových produktů.



Jak je patrné z uvedených rovnic, při dostatečném reakční potenciálu a přítomnosti C₃A a vody je v delším časovém horizontu upřednostňován vznik monosulfátu, který dříve vzniklý ettringit pohlcuje. [41] Teorii vzniku AFt a AFm fází se zabývá mnoho odborných studií, přičemž nejnovější výzkumy prokazují, že od každého druhu existuje dále velká řada modifikací lišících se vzájemným zastoupením prvků ve sloučenině. Jako příklad lze uvést velmi podrobnou analýzu těchto druhů minerálů publikovanou týmem

okolo Lothenbach, která podává obraz o možném výskytu různých druhů hemikarbonátů, jejichž výskyt v cementovém kompozitu je možný, ačkoliv jejich jednotlivé rozlišení může být velmi složité a obecně se mluví pouze o ettringitu nebo monosulfátu. Pro ilustraci je na Obr. 18 vidět množství různých druhů hemikarbonátů při jejich detekci pomocí XRD. [42]



Obr. 18: Různé modifikace hemikarbonátů a jejich detekce na rentgenogramu XRD (zdroj [O16])

Jak ale poukazují některé provedené studie, přidavek fluidního popílku v ideálním množství by pro cementový kompozit mohl být pozitivní, zvláště obsahuje-li tento kompozit vysokoteplotní popílek, který by mohl být fluidním popílkem chemicky aktivován.

Produkce fluidního popílku v posledních letech na území České republiky mírně stoupá a nelze u ní očekávat nijak výrazný pokles, jako je tomu u produkce popílků vysokoteplotních. Aktuálně činila produkce fluidního popílku v roce 2023 cca 1 milion tun a jejich produkci zajišťuje 7 největších provozů v majetku opět zejména skupiny ČEZ, Sev.en Energy a United Energy. Jedná se o provozovny Zlín, Kladno, Tisová, Hodonín, Ledvice, Poříčí a Komořany.

Na trhu se nevyskytují fluidní popílky přímo použitelné pro výrobu betonu dle ČSN EN 450-1, což je dáno zejména jejich nevhodným chemickým složením. Znamé využití fluidních popílků ve stavebnictví je tedy jako suroviny pro výrobu stabilizačních směsí, umělých kameniv nebo jako dílčí suroviny pro výrobu pórobetonu, cementu nebo směsného hydraulického vápna. Z důvodu celosvětově zvyšující se produkce této suroviny jsou však stále pomocí výzkumných prací hledány další příležitosti pro její využití, a to především v rámci výroby cementových kompozitů.

3.2. Proces SNCR

Výroba elektrické energie spalováním uhlí je zatížena vznikem řady pevných (popílky, popeloviny, energosádrovce) a plyných (SO_2 a NO_x) sekundárních produktů. Moderní způsoby spalování již běžně uplatňují adsorpci plyného SO_2 pomocí odsiřovacích procesů. Tyto odsiřovací procesy se poté liší dle samotné technologie spalování, jak již bylo popsáno dříve.

Současná legislativní opatření na ochranu životního prostředí se však dále intenzivně zabývá eliminací oxidů dusíku NO_x z kouřových plynů. Nastavené limity jejich emisivity pro praxi znamenají zavádění nových procesů denitrifikace spalin. V praxi jsou používány dva způsoby eliminace tzv. *deNO_x procesy* – selektivní nekatalytická redukce NO_x [43] a selektivní katalytická redukce NO_x [44]. Oba *deNO_x* procesy významně snižují obsah NO_x v kouřových plynech na hranici emisního limitu $200 \text{ mg/m}^3 \text{ NO}_x$ [45].

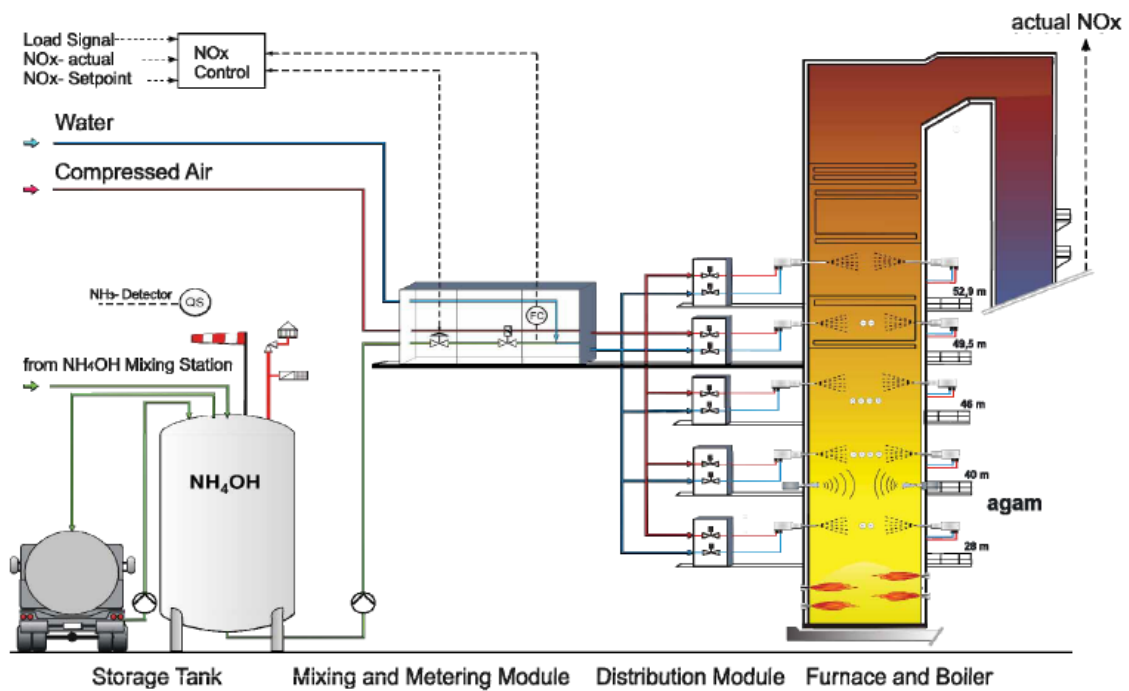
3.2.1. Selektivní nekatalytická redukce NO_x

Principem selektivní nekatalytické redukce oxidů dusíku (selective non-catalytic reduction, SNCR), je vstříkávání vodného roztoku amoniaku NH_4OH , močoviny $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ nebo kyanomočové kyseliny $(\text{HNCO})_3$ do proudu kouřových plynů, což má za následek rozklad NO_x na elementární prvky, jak je vidět z následujících rovnic.

- $4 \text{ NH}_4\text{OH} + 4 \text{ NO} + \text{O}_2 \rightarrow 4 \text{ N}_2 + 10 \text{ H}_2\text{O}$
- $\text{NH}_2\text{CONH}_2 + 2 \text{ NO} + \frac{1}{2} \text{ O}_2 \rightarrow 2 \text{ N}_2 + 2 \text{ H}_2\text{O} + \text{CO}_2$
- $4 \text{ NH}_3 + 5 \text{ O}_2 \rightarrow 4 \text{ NO} + 6 \text{ H}_2\text{O}$

Nekatalytické redukce jsou založeny na reakci iontů NH_2 s NO_x za vzniku molekulárního dusíku N_2 a vody H_2O (první dvě rovnice) při teplotách $850 - 1050 \text{ }^\circ\text{C}$. V oblasti s nízkou teplotou jsou nízké i reakční rychlosti, což má za následek zvýšení koncentrace amoniaku ve spalinách. V oblasti nad teplotou $1050 \text{ }^\circ\text{C}$ převažuje reakce iontu NH_2^- s kyslíkem O_2 , což má za následek zvýšení koncentrace NO_x ve spalinách (třetí rovnice) [45].

Tento proces s použitím roztoku močoviny je často používán v České republice a účinnost selektivní nekatalytické redukce se udává 40 až 60 % [45]. Schéma procesu SNCR v provozu je na následujícím Obr. 19.



Obr. 19: Schéma procesu SNCR ve spalovacím procesu (zdroj [O17])

Z principu metody je zřejmé, že produkovaný popílek se dostává do přímého styku s denitrifikačním činidlem, proto se řada autorů zabývala otázkou, jak se toto činidlo bude na popílek vázat. [46, 47] Některé tyto studie uvádí, že je amoniak z deNO_x procesů vázán na povrchu popílku ve formách amonných solí dle následujících chemických rovnic.

- $2 \text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{SO}_3 \rightarrow (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$
- $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{SO}_3 \rightarrow \text{NH}_4\text{HSO}_4$

Tyto soli se vytvářejí v teplotním intervalu 145 - 220 °C. Dominantní reakcí je vytvoření práškového síranu amonného $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. Minoritní hydrogensíran amonný NH_4HSO_4 je naopak lepivý, částečně kapalný a lpí na povrchu zrn popílku, která slepuje. Poměr těchto dvou složek je však variabilní a závisí na složení spalín a teplotách, při kterých dochází k reakci.

Porovnáním popílků po aplikaci procesu SNCR s modelovými směsmi popílku, který neprošel procesem SNCR se solí $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ nebo NH_4HSO_4 vyplývá, že popílek po procesu selektivní nekatalytické redukce převážně obsahuje $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. [48]

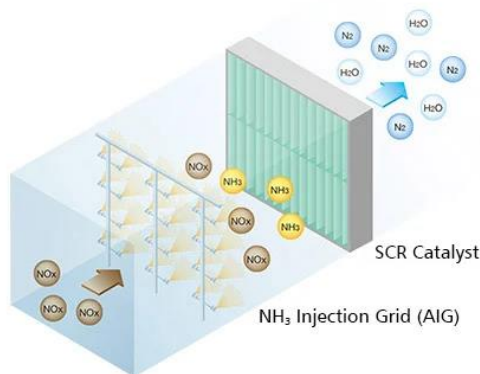
Pro popílkou produkované po technologii SNCR v České republice je právě tento způsob výskytu forem amonných iontů typický. Je to dáno profilem spalovacího procesu,

kde hlavní roli hraje palivo, tedy ve většině případů hnědé uhlí, teplotní profil kotlů, rychlost proudění spalin a nástřik redukčního činidla v podobě močoviny.

3.2.2. Selektivní katalytická redukce NO_x

Při selektivní katalytické redukci (selective catalytic reduction, SCR) oxidů dusíku kouřové plyny po předcházející injektáži amoniakální látky procházejí filtry s katalyzátorem, který redukuje NO_x na dusík N_2 . Tento proces je však možné používat prakticky pouze při spalování velmi čisté suroviny, převážně černého uhlí, proto je tento proces denitrifikace kouřových plynů v České republice používán z velkých provozů prakticky pouze v Elektrárně Dětmarovice a dochází při něm pouze k minimální kontaminaci popílku amonnými ionty.

Tento proces je prakticky znám i při aplikaci spalování paliva v dieslových agregátech, a to i v případě osobních automobilů. Jeho schéma je na následujícím Obr. 20.



Obr. 20: Schéma denitrifikace spalin metodou SCR (zdroj [O18])

3.3. Efektivní využití popílku

Ačkoliv je využívání elektrárenských popílků pro výrobu betonu díky jejich pozitivním dopadům na jeho vlastnosti v čerstvém i ztvrdlém stavu známo již mnoho desítek let, zejména nedostatek této suroviny nás nutí ke zvýšení efektivity jeho využití. Pod tímto slovním spojením si lze představit navýšení jeho pozitivního dopadu na kompozit. Celosvětově proto už řadu let probíhají výzkumy zabývající se obecně aktivací

elektrárenských popílků, přičemž popílky lze obecně aktivovat mechanicky, chemicky nebo termálně.

3.3.1. Mechanická aktivace popílku

Mechanickou aktivací popílků lze nazvat proces, během něhož dochází mechanicky k jeho úpravě, nejčastěji za účelem zvýšení jeho vazného potenciálu. Tato mechanická aktivace obecně využívá principu mísení jednotlivých frakcí popílků tak, aby daná směs dosahovala ideálního poměru zrn jednotlivých velikostí, což bude mít pozitivní dopad na hutnost vyrobené cementové matrice. Nebo principu mletí zrn popílků, díky čemu se jednotlivá zrna stávají reaktivnější.

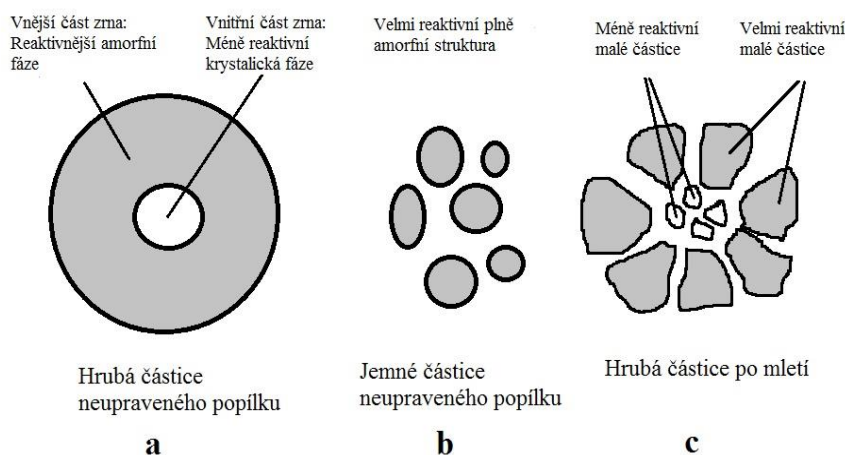
První zmíněná metoda mechanické aktivace popílků je možná pouze za předpokladu separace jednotlivých zrn popílků na základě jejich velikosti. To je možné dělat přímo v provozu, který tomu musí být přizpůsoben separátory, které umožňují záchyt a následný odběr jednotlivých frakcí popílků. Dalším způsobem je následné síťování popílků proudem vzduchu a rozdělení jejich zrn do jednotlivých frakcí. V obou případech je výsledná směs tvořena zastoupením jednotlivých frakcí, což má za následek tvorbu ideální křivky zrnitosti popílku, kterou lze dále pomocí různých metod tzv. packingu upravit a mísit společně s další pojivovou složkou. Touto problematikou se zabývá například studie Elrahman a Hillemeier, která zkoumá vliv optimálního dávkování příměsí zabezpečující maximální hutnost cementové matrice. Dosažené výsledky prokazují, že dávkování příměsí dle metodiky zabezpečující maximální hutnost matrice mohou výrazně přispět ke zlepšení mechanických a trvanlivostních parametrů a bylo prokázáno, že celková pórovitost kompozitu takto může být výrazně snížena. V rámci provedeného výzkumu konkrétně z 10 % při klasickém návrhu na 3 % při optimálním návrhu. [49] Princip mísení jednotlivých frakcí popílku jako způsob jeho mechanická aktivace, byl popsán i kolektivem okolo prof. Helu, přičemž nabyté výsledky prokazují pozitivní ovlivnění hutnosti struktury kompozitu, avšak dopad na mechanické parametry je dle shrnutí výsledků dán spíše množstevním zastoupením nejjemnější frakce popílku, která je zároveň nejvíce reaktivní. [50]

U principu mechanické aktivace popílku pouze jeho mísením zrn různých frakcí je tedy zřejmá její nevelká účinnost. Otázkou se navíc stává efektivní zpracování celého objemu vyprodukovaného úletového popílku, kdy každá frakce bude ve výsledné směsi zastoupena v jiném poměru a nebylo by tak možné zpracovat rovnoměrně celou produkci.

Jako přínosné se poté jeví oblast návrhu směsi pojivových složek včetně popílku zabezpečující maximální hutnost matrice. Tato metodika může přinášet očekávané výsledky z pozice výrazného zlepšení mechanických parametrů kompozitu při současné úspoře cementu. Touto problematikou se zabývala již má bakalářská práce. [51]

Hojně diskutovaným způsobem mechanické aktivace elektrárenských popílků je proto jejich mletí. Při tomto procesu by bylo možné zpracovat rovnoměrně celou produkci, a navíc i popílky, jejichž granulometrie v surovém stavu, je překážkou pro dobré mechanické parametry. Nevýhodou tohoto procesu mechanické aktivace je poté spotřeba elektrické energie na samotný proces mletí.

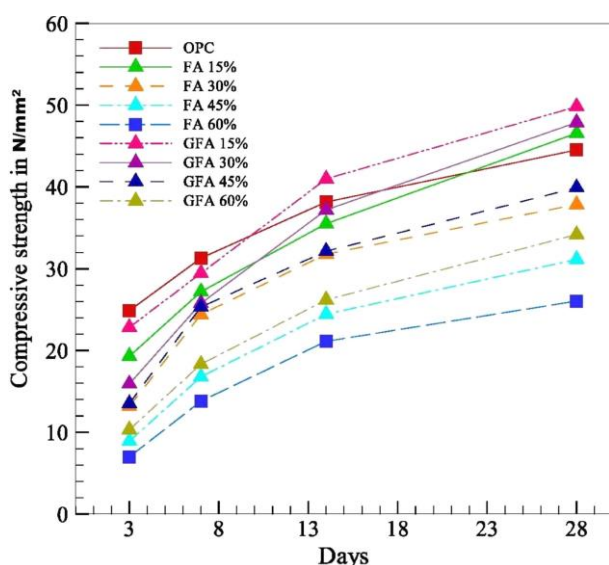
Samotným principem mechanické aktivace popílku mletím je skutečnost, že neupravené zrno vysokoteplotního popílku má svou povrchovou vrstvu tvořenu sice reaktivní amorfni fází, zatímco vnitřní část je nereaktivní krystalická fáze, avšak z pohledu průběhu pucolánové reakce musí nejprve dojít k narušení této zesklenné povrchové vrstvy. Jak ukazuje následující schéma procesu mletí zrn popílku na Obr. 21, mletím dochází k narušení této reaktivní sklovité vrstvy a zároveň rovněž k uvolnění jemné částice krystalické fáze z vnitřní části zrna popílku. Ačkoliv tato krystalická fáze není prakticky reaktivní, slouží jako filer zabezpečující další zvýšení hutnosti matrice, zatímco narušená sklovitá amorfni fáze se může dříve účastnit pucolánové reakce.



Obr. 21: Schématický princip mechanické aktivace popílku mletím (zdroj [O19])

Jako příklad studie zaměřené na efektivitu mletí popílků jako způsobu jeho mechanické aktivace lze jmenovat výzkum vedený na Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, SRM Institute of Science and Technology, India,

kteřý podává obraz o zvýšení mechanických parametrů cementového kompozitu až cca o 20 % v porovnání stejné dávky neupraveného a mletého popílku. Pozitivní vliv mechanické aktivace popílku mletím na výsledné mechanické parametry cementového kompozitu se dle nabytých výsledků této studie zvyšuje s procentuální náhradou cementu popílkem, v porovnání upravený a neupravený popílek. [52] Tyto výsledky porovnání pevností vyrobených malt v tlaku lze spatřit na následujícím Obr. 22.



Obr. 22: Vývoj pevností v tlaku cementového kompozitu s neupraveným a mechanicky aktivovaným popílkem mletím (zdroj [O20])

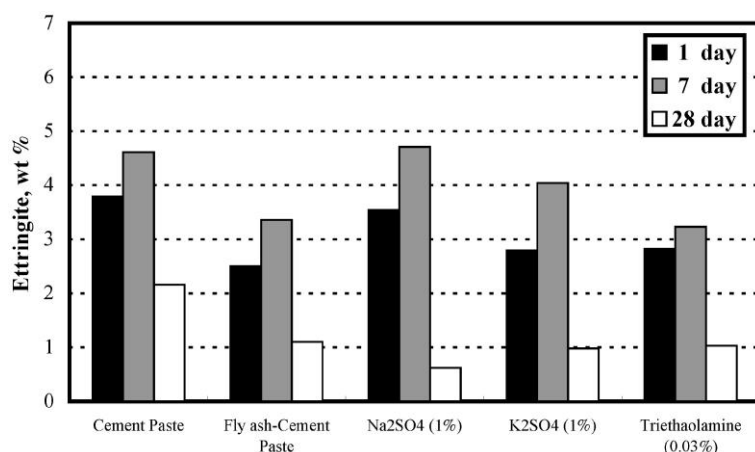
Mechanické aktivace popílků jejich mletím je hojně využíváno rovněž při technologii přípravy geopolymérů.

3.3.2. Chemická aktivace

Chemická aktivace popílků spočívá v přidavku nějakého reaktantu, který pozitivně ovlivní průběh pucolánové reakce. Počátek a samotný průběh pucolánové reakce je dán narušením povrchu amorfní zesklenné obálky zrn popílku, což se děje v silně zásaditém prostředí, jehož sycení je obecně zajištěno zejména zvyšující se přítomností portlanditu ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), který vzniká jako reakční produkt hydratace zejména alitu a belitu, jako základních slídkových minerálů. Vznikající hydroxylové ionty (OH^-) ve vodném systému jsou známy svou schopností urychlit stupeň reaktivity podpořením dislokace hlinitanových a silikátových vazeb. Původ hydroxylových iontů z hydratačního procesu cementu je však pomalý, a proto samotný průběh pucolánové reakce má opožděný nástup. Principem chemické aktivace vysokoteplotního popílku je proto dávkování hydroxylových iontů do systému pomocí jiných reaktantů. Těmito reaktanty mohou být

například hydroxid sodný (NaOH) nebo vodný silikát s nízkým $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ modulem, nebo ze slabých alkálií uhličitan sodný (Na_2CO_3) či přímo hydroxid vápenatý ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Další možností je aktivace pomocí sulfátových aktivátorů jako jsou Na_2SO_4 nebo K_2SO_4 .

Autoři CY Lee, HK Lee a KM Lee provedli studii zaměřenou na aktivaci vysokoteplotního popílku právě přidavkem sulfátových aktivátorů a výsledky poukazují na výrazné navýšení mechanických parametrů kompozitu zejména v ranném stáří. Výzkum byl proveden při 40% náhradě cementu vysokoteplotním popílkem, přičemž optimální dávka aktivátoru byla cca 0,5 až 2 % a při těchto dávkách došlo k navýšení pevnosti kompozitu v tlaku až o 70 % oproti směsi s neaktivovaným popílkem. Přídavek těchto sulfátových aktivátorů však vedl k výrazně vyšší tvorbě ettringitu a monosulfátu, což mělo nejspíše za důsledek tak výrazné navýšení mechanických parametrů v raném stáří. [53] Tento zvýšený vývoj množství AFt fází je zřejmý z následující Obr. 23 a je výstupem provedené studie.

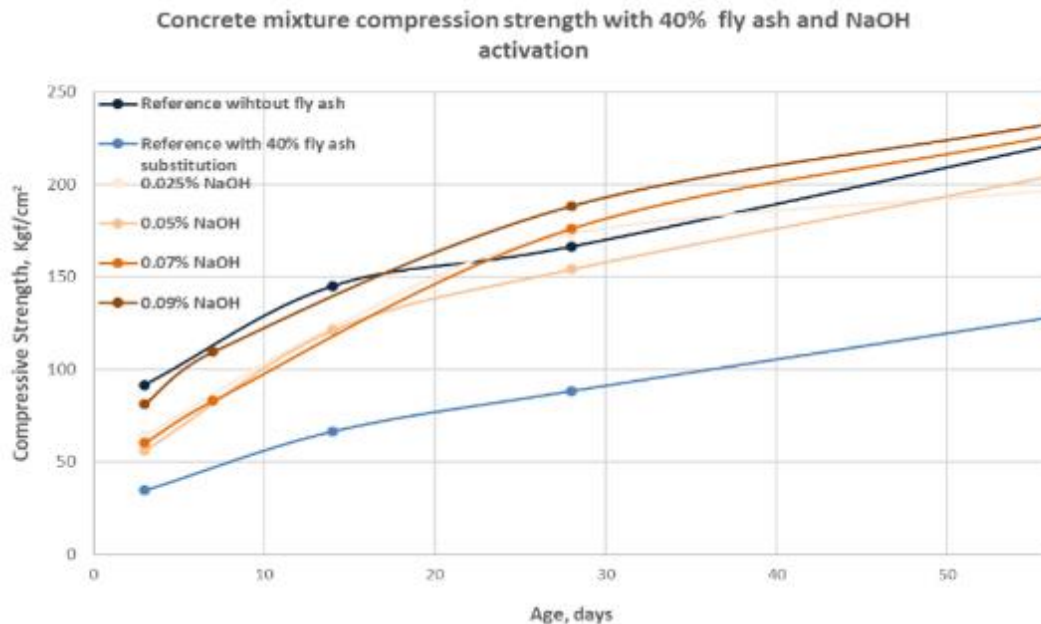


Obr. 23: Zastoupení ettringitu v cementovém kompozitu při použití principu chemické aktivace popílku sulfátovým aktivátorem (zdroj [O21])

Z pohledu trvanlivosti cementového kompozitu se proto způsob chemické aktivace za pomoci sulfátových aktivátorů nejeví jako bezpečný.

Aktivaci vysokoteplotního popílku za pomoci NaOH byl řešen García-Cáceres a kolektivem, přičemž zkoumali vliv přídavku NaOH jako aktivátoru k vysokoteplotnímu popílku, který tvořil 40% náhradu cementu. Dosažené výsledky prokázaly, že zvyšující se dávka aktivátoru v podobě NaOH má pozitivní vliv na dosažené mechanické parametry kompozitu. Nejvýraznější ovlivnění oproti směsi s neaktivovaným popílkem je opět nejvíce zřetelné v počátečních dnech zrání kompozitu, přičemž v rámci provedeného

experimentu bylo prokázáno, že směs se 40% náhradou cementu chemicky aktivovaným vysokoteplotním popílkem může dosahovat vyšší pevností než směs zcela bez popílku. [54] Dosažené výsledky jsou poté patrné z příloženého Obr. 24.



Obr. 24: Vývoj pevností v tlaku cementového kompozitu s chemicky aktivovaným popílkem pomocí přidavku NaOH (zdroj [O22])

Mezi novodobými výzkumy lze dále pozorovat možnosti chemické aktivace vysokoteplotního popílku přidavkem popílku fluidního. Tato teorie, jejíž jedním z výraznějších průkopníků v rámci dosažených výsledků, je tým okolo prof. Helu se opírá o chemickou skladbu fluidních popílků, které obsahují vyšší množství reaktivního CaO a dále SO₃ jako možný sulfátový aktivátor. Reaktivní forma volného CaO reaguje při styku s vodou na Ca(OH)₂, který může dle výše psaného pro vysokoteplotní popílek působit jako chemický aktivátor. Nabyté výsledky poukazují na možný předpoklad využití fluidních popílků jako aktivátorů vysokoteplotních popílků pro výrobu betonu.

4. CÍL PRÁCE

Účelnost využívání příměsí aktivních i pasivních pro výrobu cementových kompozitů, je již celá desetiletí prakticky prokazována výrobou směsí specifických vlastností. Aktuálnost této problematiky je však nyní dána sílící vlnou ekologizace celého průmyslu, stavebnictví nevyjímaje. Aby bylo možné naplňovat současné enviromentální požadavky výroby stavebních směsí, je nevyhnutelné se tématem efektivního využití příměsí zabývat. Jsou-li pro výrobu stavebních směsí dále zpracovávány odpadní produkty jiného odvětví, nejčastěji hutního nebo energetického průmyslu, dochází tím dokonale k naplnění současného trendu Green Deal.

Aby bylo možné odpadní nebo druhotné suroviny co nejefektivněji pro výrobu stavebních hmot využívat, je třeba detailně znát jejich vlastnosti a jejich dopad na finální produkt. Sílící ekonomické a enviromentální tlaky však přináší značný pokles produkce dříve hojně využívaných druhotných surovin, jako příklad lze jmenovat jemně mletou vysokopeční granulovanou strusku, nebo dochází ke změně vlastností těchto druhotných surovin zavedením nových procesů do jejich produkce, jako příklad lze v tomto případě jmenovat vysokoteplotní elektrárenský popílek. Tyto záležitosti nás nutí nalézat nové dostupné odpadní a druhotné suroviny využitelné pro výrobu stavebních hmot, a nebo výrazně zefektivnit využití těch stávajících.

Disertační práce je proto zaměřena na zefektivnění využití obecně elektrárenských popílků pro výrobu cementových kompozitů, konkrétně poté betonových směsí. Toto zefektivnění je obecně dáno zvýšením jejich potenciálu jako aktivní příměsí do betonu. V oblasti efektivního využití vysokoteplotních elektrárenských popílků pro výrobu betonu je aktuálně navíc třeba řešit zavedení procesu selektivní nekalytické redukce oxidu dusíku (SNCR) do procesu spalování, což sebou přináší produkci suroviny „kontaminované“ amoniakem. Jedním z dílčích cílů této disertační práce je proto spolehlivě ověřit vliv technologie SNCR na produkované vysokoteplotní popílků a dále jejich dopad na vlastnosti betonů z nich vyráběných a podat ucelený obraz a případné doporučení pro práci s tímto „novým“ druhem vysokoteplotního popílků.

Mimo výše popsany zásah SNCR do vzniku jakostních vysokoteplotních popílků využitelných pro výrobu betonů je se navíc třeba zabírat otázkou značného poklesu produkce této suroviny. Pokles její produkce je vázán na přechod výroby elektrické energie „čistou“ cestou, což má za následek prudký rozvoj odstavování jednotlivých kotlů

v tepelných elektrárnách na území ČR i Evropy. Aby bylo možné aspoň částečně naplnit požadavky trhu po vysokoteplotním popílku použitelném pro výrobu betonu, je třeba najít jeho nové zdroje. Mezi tyto nové zdroje je nutné bezpochyby zařadit zpětné efektivní využití hrubých ložových popílků. Je třeba nalézt vhodný způsob mechanické aktivace, dnes pro svou nevyhovující jemnost nevyužívaných ložových vysokoteplotních popílků, aby bylo možné tento potenciální produkt pro výrobu cementových kompozitů využít.

Dalším zdrojem létavých popílků, jejichž produkce každoročně stoupá, jsou tepelné elektrárny a spalovny fungující na fluidní technologii spalování. Tyto provozy dávají poté vzniknout fluidnímu popílku, jehož využití jako příměsi pro výrobu betonu je prozatím prakticky nulové, ačkoliv se jedná o vysoce aktivní surovinu, kterou by bylo možné klasifikovat jako aktivní příměs, bude-li nalezena vhodná metodika jejího efektivního a bezpečného využití pro výrobu betonu.

Hlavním cílem této disertační práce je proto vývoj nových potenciálních surovin na bázi popílků, které by bylo možné využívat bezpečně jako aktivních příměsí pro výrobu betonových směsí. Tyto suroviny budou svou podstatou vznikat mechanickou či chemickou aktivací popílků a budou tak produktem, který výrazně zefektivní využívání druhotných surovin vznikajících v energetickém průmyslu.

Vývoj těchto surovin se bude v rámci řešení disertační práce opírat o detailní analýzu vstupních bází a následně detailní analýzu všech podstatných vlastností samotného finálního produktu a také vlastností betonových směsí z něj vyrobených. Aby bylo možné jejich bezpečné další využití, bude v rámci řešení disertační práce kladen velký důraz na prokázání jejich vlivu rovněž na výslednou trvanlivost kompozitu v dlouhodobém časovém horizontu i při jeho využití v různých agresivních prostředích.

Dosažené výstupy laboratorní části experimentální práce poté budou ověřeny přímo v praxi. Tyto praktické poznatky budou důkladně vyhodnoceny z hlediska procesu výroby, finálních vlastností výrobku i z hlediska ekonomického aspektu provozu.

Všechny nabyté výsledky z laboratoře i praxe budou finálně přehledně vyhodnoceny i s ohledem na platnou legislativu a s ohledem rozvoje stavebně materiálového inženýrství.

5. METODIKA PRÁCE

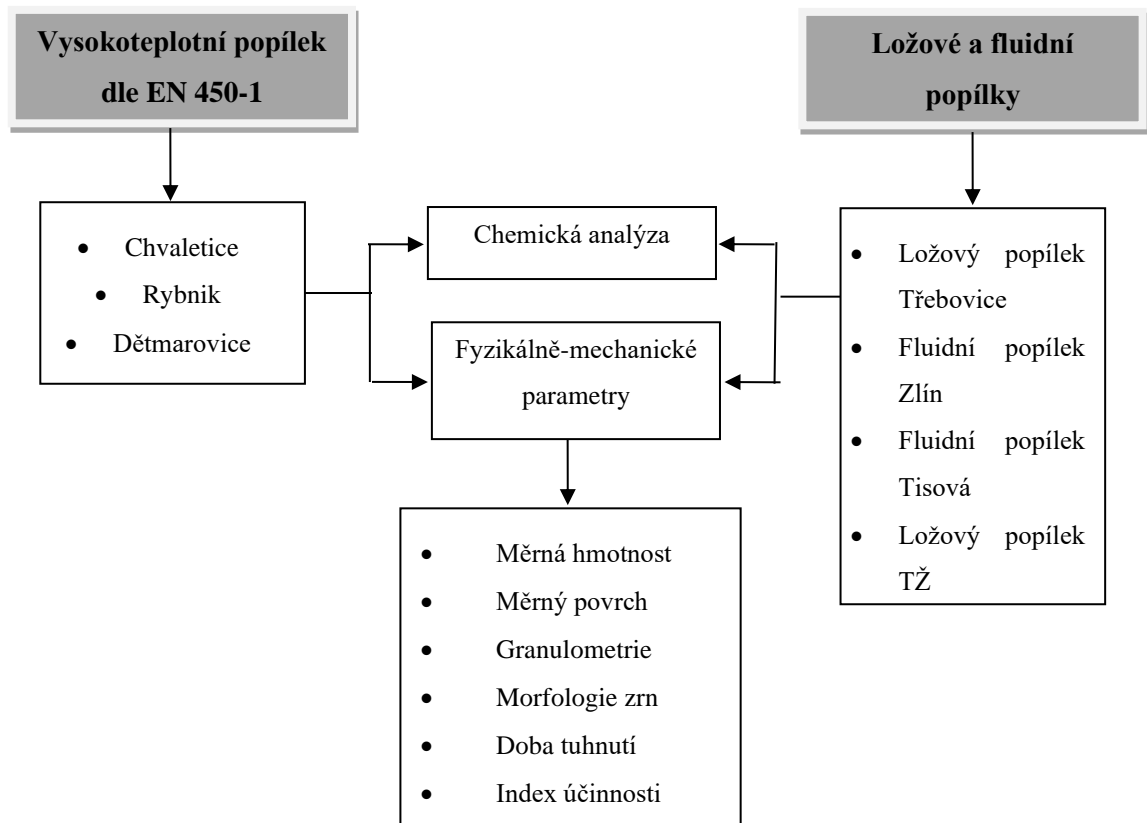
Experimentální část disertační práce je členěna do několika ucelených etap, které na sebe logicky navazují. Jednotlivé etapy jsou navrženy tak, aby v rámci řešení praktické části disertační práce bylo možné logicky postupovat na základě výsledků jednotlivých etap až k naplnění konkrétních cílů práce. Tyto etapy ilustrativně popisují následující diagramy a detailně jsou popsány v příslušných podkapitolách.

5.1. Etapa I – Výběr surovin

První etapa experimentální části disertační práce byla zaměřena na výběr vhodných vstupních surovin. Jedná se především o výběr dostupných vysokoteplotních popílků, které jsou na trhu nabízeny dle platných předpisů normy ČSN EN 450-1 [N3], ale dále rovněž o dostupné suroviny pro aktivaci popílků, ať už mechanickou nebo chemickou cestou. Suroviny byly vybírány dle jejich dostupnosti a potenciálu jejich snadného případného začlenění do výrobního procesu.

Z pohledu cementu byl v této první etapě volen čistý portlandský cement bez dalších příměsí a přísad, aby byl lépe identifikovatelný dopad využití aktivovaných popílků a nových aktivních příměsí z nich vyrobených. V dalších částech disertační práce byla dále ověřena přenositelnost výsledků při použití portlandských směsných cementů.

Vybrané popílků byly podrobeny několika základním zkouškám, které podávají obraz o jejich chemickém složení, morfologii a mineralogii a dalších fyzikálně-mechanických zkouškách. Schéma této etapy je systematicky zobrazeno na následujícím Obr. 25.

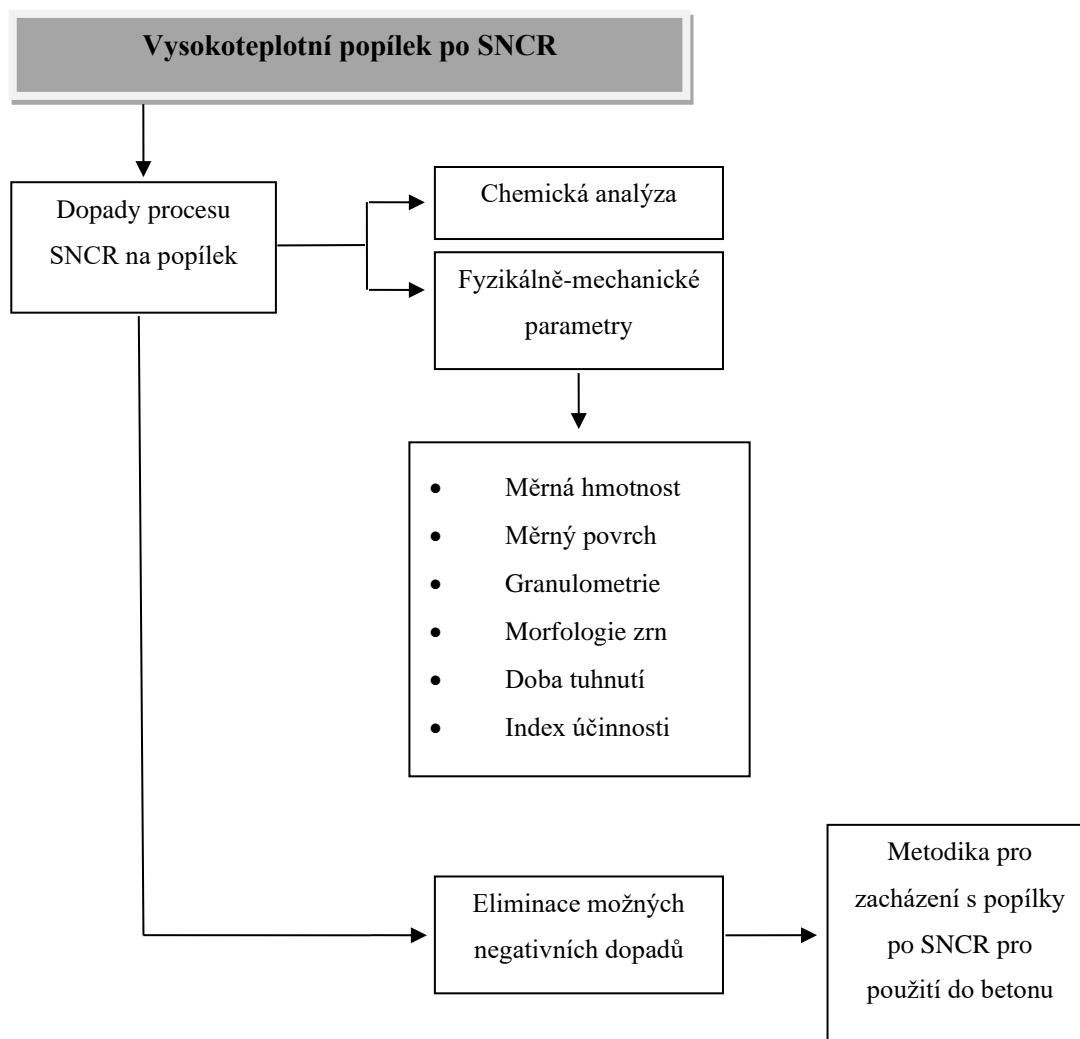


Obr. 25: Schéma řešení Etapy I experimentální části

5.2. Etapa II – Dopady SNCR na vysokoteplotní popílek

V rámci řešení této etapy experimentální části disertační práce budou zkoumány všechny možné dopady procesu selektivní nekatalytické redukce oxidu dusíku (SNCR) na vysokoteplotní popílek a následně na jeho využití jako aktivní příměsi pro výrobu betonu. Snahou bude případné negativní dopady eliminovat nebo navrhnout obecnou metodiku pro zacházení s popílky po procesu SNCR pro využití, jako aktivní příměsi pro výrobu betonu. Všechny parametry budou zohledněny nejen z pohledu možného dopadu na cementový kompozit, ale rovněž z pohledu zdravotní nezávadnosti při zacházení s popílky po procesu SNCR.

Schéma řešení této etapy je zobrazeno na následujícím Obr. 26.



Obr. 26: Schéma řešení Etapy II experimentální části

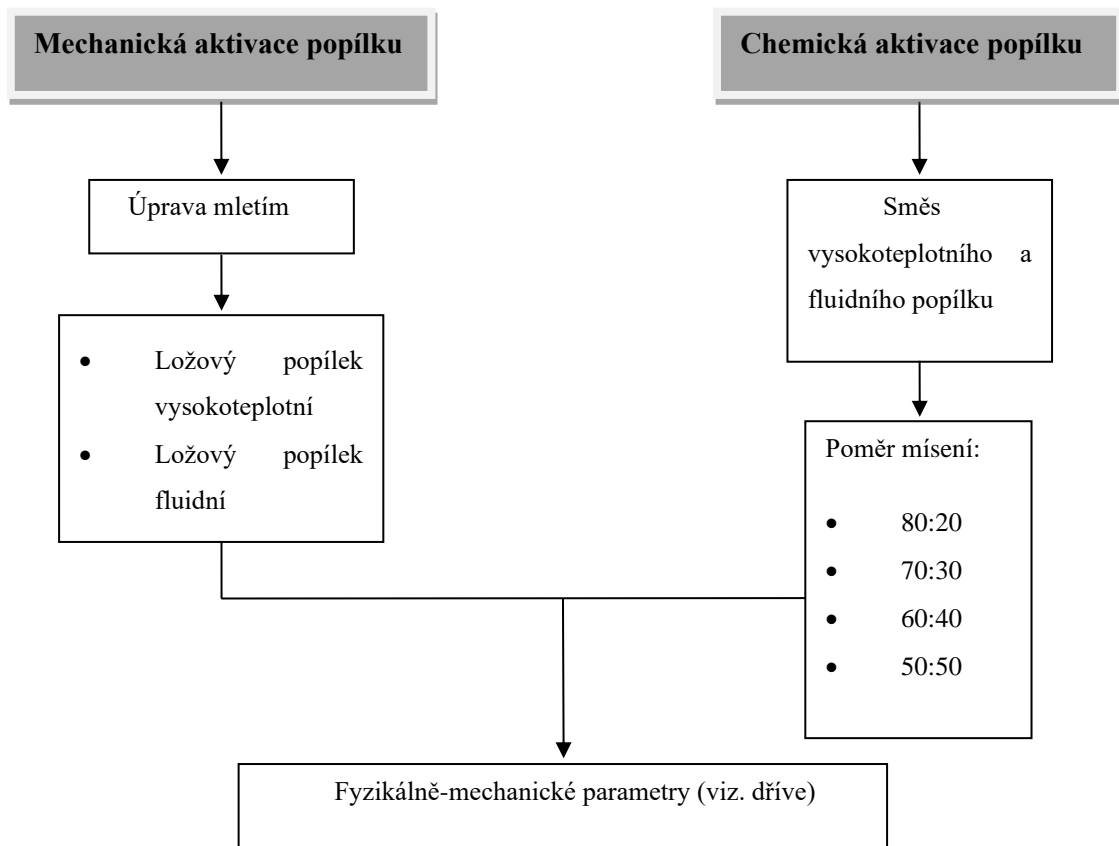
5.3. Etapa III – Aktivace popílků

V této etapě zabývající se aktivací popílků pro jejich použití jako aktivní příměsi typu II do betonu jsou již detailně zkoumány možnosti zefektivnění vazného potenciálu popílku. Zvýšení vazného potenciálů použitých popílků bylo naplněno mechanickým způsobem aktivace, kdy byla vyrobena směs ložových popílků, ke které bylo dále přistupováno, jako k nové příměsi typu II na bázi popílků a byly tak na ni kladeny stejné požadavky jako na klasický vysokoteplotní popílek dle ČSN EN 450-1. [N3]

Dalším způsobem zvýšení vazného potenciálu popílku bylo zkoumání chemického způsobu jeho aktivace. Při tomto procesu docházelo k hledání možností a optimálního poměru mísení vysokoteplotního a fluidního popílku. Tento způsob chemické aktivace

vycházel z předpokladů zkoumaných již v diplomové práci a byl dále výrazně rozšířen. [55] Tato chemická aktivace dává poté vzniknout další nové aktivní příměsi typu II na bázi popílků, proto na ni byly rovněž kladeny stejné požadavky jako na popílky dle ČSN EN 450-1. [N3]

Schéma této obsáhlé kapitoly experimentální části disertační práce je zobrazeno na následujícím Obr. 27.



Obr. 27: Schéma řešení Etapy III experimentální části

5.4. Etapa IV – Využití aktivovaných směsí popílků pro výrobu betonu

Cílem této etapy experimentální části disertační práce je obsáhnout dopad v předchozích etapách nově navržených aktivních příměsí na bázi popílků na beton v jeho čerstvém i ztvrdlém stavu a rovněž z pohledu jeho trvanlivosti.

Aby byl obraz o použitelnosti v praxi co nejobecnější, byla tato etapa dále rozdělena na podetapu výroby prefabrikovaných dílců za použití těchto příměsí a dále na podetapu výroby klasických transportbetonů za použití těchto příměsí.

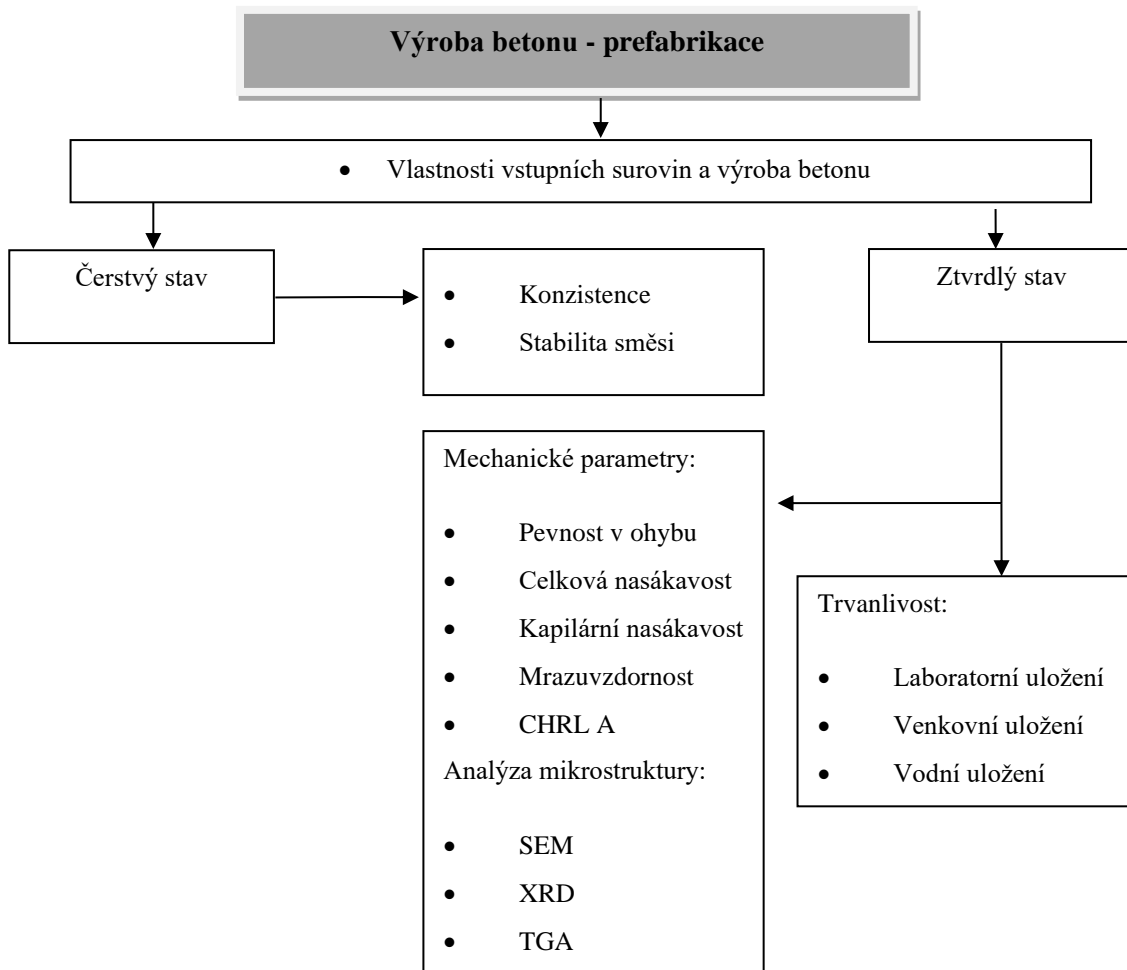
V obou případech byl již kladen důraz na požadavky praxe a dále pak na podrobnou analýzu případných nežádoucích dopadů nově navržených aktivních příměsí na trvanlivost betonů. Pro tyto účely byly vyrobené vzorky testovány například na odolnosti proti cyklickému zmrazování a odolnosti proti chemickým rozmrazovacím látkám, ale rovněž byly uloženy v různých agresivních prostředích a vždy poté byly mimo mechanických parametrů sledovány i dopady na samotnou mikrostrukturu kompozitu za použití nejmodernějších zařízení, jako jsou SEM, XRD, TGA a další.

5.4.1. Prefabrikace

Pro ověření možnosti využití nově navržených směsí popílků byly tyto směsi použity pro výrobu betonu přímo v provozu výroby drobného prefabrikovaného zboží. Jmenovitě se jednalo o výrobu betonových dlažebních desek dle ČSN EN 1339 [N9] o rozměrech 500×500×50 mm a tato výroba byla realizována na karuselovém lisu. Pro ověření efektivnosti nově navržených aktivních příměsí byly pro porovnání vyrobeny taktéž vzorky pouze s použitím klasického vysokoteplotního popílku splňujícího požadavky normy ČSN EN 450-1. [N3] Výroba byla řízena plně automaticky a vyrobené vzorky poté byly dále laboratorně testovány po dobu až 360 dní.

Z pohledu testování vzorků byly aplikovány požadavky normy ČSN EN 1339 [N9] a dále další vybrané laboratorní zkoušky prokazující bezpečné použití nově navržených příměsí pro výrobu drobného prefabrikovaného zboží.

Schéma této podetapy je zachyceno na následujícím Obr. 28.

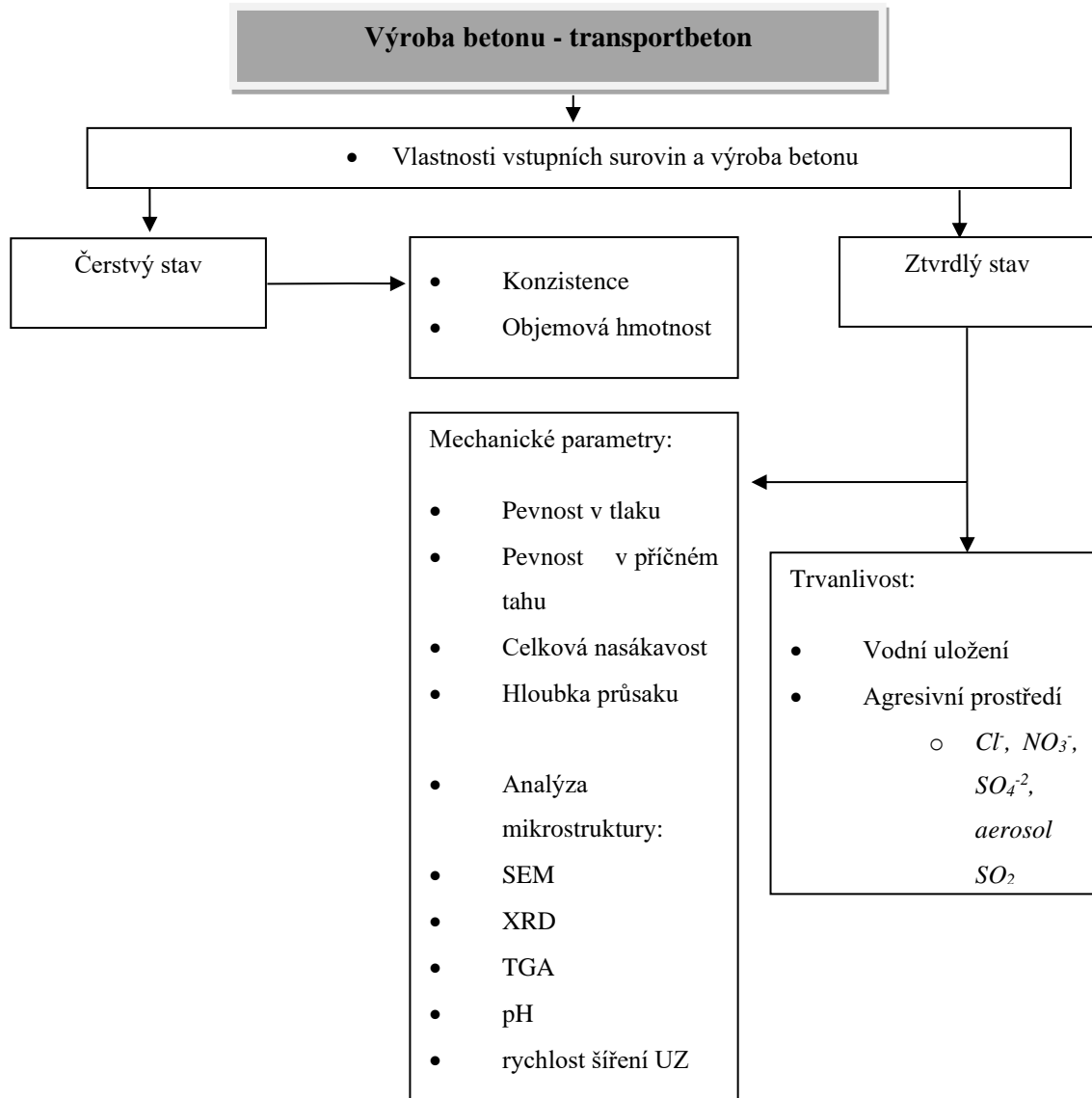


Obr. 28: Schéma řešení Etapy IV experimentální části - prefabrikace

5.4.2. Transportbeton

Výroba standartních konstrukčních betonů pro dopravu autodomíchávači byla realizována v poloprovozních podmínkách betonárny a návrh receptur přímo vycházel z požadavků a zvyklostí praxe. U těchto druhů betonů byl kladen velký důraz na vlastnosti čerstvé betonové směsi z pohledu doby zpracovatelnosti a následně na trvanlivost při různém agresivním uložení. Trvanlivost v agresivním uložení pak byla sledována zejména kvůli zastoupení fluidního popílku v navržených směsích aktivovaných popílků.

Jednotlivé druhy agresivního uložení včetně použitých postupů v této podetapě jsou schematicky zobrazeny na následujícím diagramu.



Obr. 29: Schéma řešení Etapy IV experimentální části - transportbeton

5.5. Etapa V – Ekonomické zhodnocení výroby betonů s nově vyvinutými příměsemi

Poslední etapa experimentální části disertační práce je zaměřena na aplikaci navržených nových aktivních příměsí do výroby. V této etapě jsou zhodnoceny ekonomické aspekty výroby betonů s využitím navržených nových aktivních příměsí na bázi aktivovaných popílků.

6. POPIS POUŽITÝCH ZKUŠEBNÍCH POSTUPŮ

6.1. Vstupní suroviny – pojiva

6.1.1. Chemické složení

Stanovení chemického složení všech vybraných vstupních surovin i výsledných směsí bylo provedeno v expertních chemických laboratořích, jmenovitě u společnosti LABTECH s.r.o. Chemické analýzy použitých cementů byly dodány přímo výrobcí a ve všech případech se opírají o požadavky platné legislativy.

U vzorků popílků byly provedeny zkoušky v souladu s požadavky normy ČSN EN 450-1 [N3] a dále zkoušky, jejichž výsledky byly přínosem pro pochopení správného procesu aktivace popílku. Do oblasti chemického složení byla dále zařazena zkouška stanovení ztráty žíháním.

6.2. Stanovení měrné hmotnosti – pyknometrickou metodou

Postup pro stanovení měrné hmotnosti cementu je vázán na postup dle normy ČSN 72 2113. [N10]

Tento postup byl na základě možností, jimiž moderní Cetrum AdMaS disponuje, modifikován a měrná hmotnost všech pojivových složek byla stanovována pomocí automatického heliového pyknometru AccuPyc 1340 od firmy micrometrics. Princip tohoto stanovení hustoty pevných látek spočívá na pyknometrickém principu, při kterém je automaticky stanovena přesná tzv. skeletální hustota pevné látky. Automatický přístroj měří objem vzorku pomocí rovnice ideálního plynu při expanzi z/do referenční cely o známém objemu.

Dosažené výsledky jsou průměrnou hodnotou z 10-ti stanovení a je tak zaručena vysoká přesnost metody.

6.3. Stanovení měrného povrchu – permeabilní metoda (dle Blaina)

Měrný povrch jemných sypkých směsí nebo jemnost mletí cementu byla v rámci experimentální části práce stanovena dle normy ČSN EN 196-6 [N11], tedy permeabilní metodou dle Blaina. Hodnota měrného povrchu je vypočtena z času, který je potřebný pro průtok určitého množství vzduchu zhutněným cementovým lůžkem dané velikosti a porozity.

Přístroj sestává z průtokové komory s perforovanou destičkou, na niž je vložen filtrační papír a následně je vytvořeno cementové lůžko. Množství analyzovaného materiálu pro vytvoření cementového lůžka, je dáno jeho stanovenou měrnou hmotností dle následující rovnice, kde ρ je měrná hmotnost vzorku a V objem cementového/popílkového lůžka.

$$m_1 = 0,500 \cdot \rho \cdot V$$

Na vsypaný analyzovaný vzorek do průtokové komory je uložen filtrační papír a vzorek je následně pomocí pístu stlačen, aby bylo dosaženo požadované porozity.

Do kuželového hrdla na horní straně manometru je vložena průtoková komora uzavřená zátkou. Kohout je otevřen a lehkým nasáváním se natáhne kapalina k horní značce. Kohout se uzavře a sejme se zátka. Měří se čas t mezi dosažením prostřední a spodní značky. Na stejném vzorku je provedena zkouška dvakrát. Hodnota měrného povrchu je stanovena dle následující rovnice.

$$S = \frac{52,43 \cdot K \cdot \sqrt{t}}{\rho} [cm^2/g]$$

K... konstanta přístroje [-]

t...čas [s]

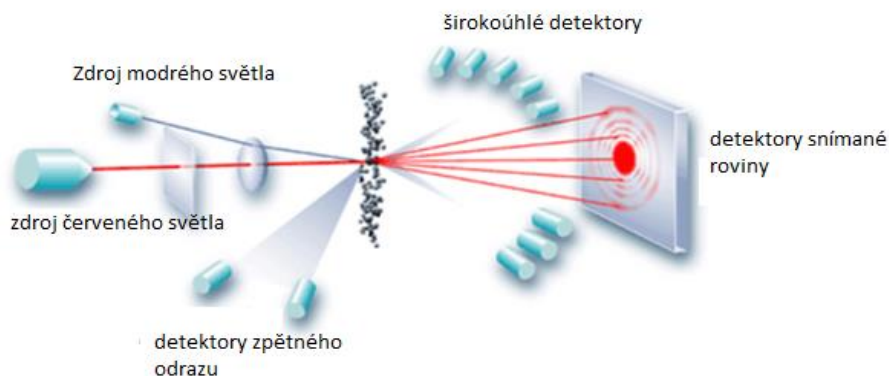
ρ ...měrná hmotnost vzorku [g/cm³]

Pro potřeby disertační práce bylo využito moderního automatického Blainova přístroje fungujícího na popsaném principu. Výsledkem je vždy průměrná hodnota ze 3 automatizovaných stanovení.

6.4.Stanovení granulometrie a morfologie zrn

Granulometrie pojivových složek byla stanovena pomocí laserového granulometru MASTERSIZER 2000 britského výrobce Malvern s dispergační jednotkou Hydro 2000 MU.

Princip měření tohoto přístroje spočívá v laserové difrakci, která je založena na principu, kdy částice, které přijdou do cesty laserovému paprsku rozptýlí jeho světlo pod úhlem, který přímo souvisí s jejich velikostí. S klesající velikostí částic, rozptylující úhel logaritmičsky roste. Velké částice rozptylují světlo v úzkém úhlu s vysokou intenzitou, zatímco malé částice rozptylují v širším úhlu, ale s nízkou intenzitou.

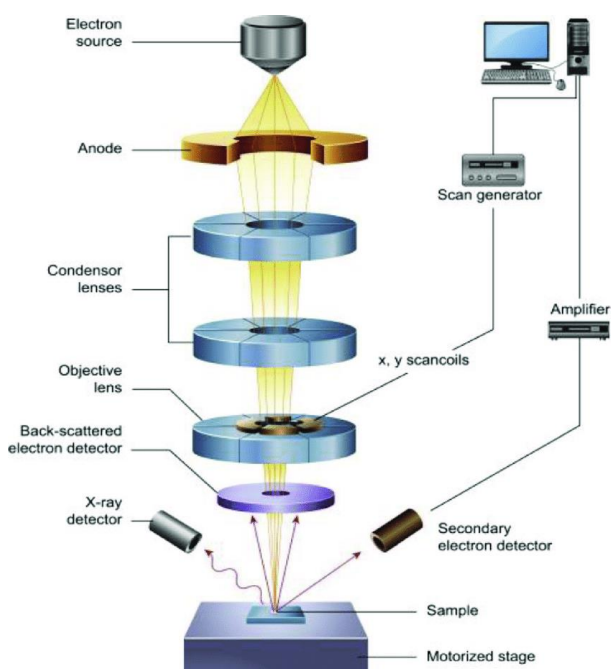


Obr. 30: Schéma funkce laserového granulometru (zdroj [O23])

Rozsah měřitelných velikostí je přímo závislý na schopnosti změřit úhly různých rozsahů. Moderní přístroje provádějí měření v rozsahu úhlů od $0,02^\circ$ do 135° . Logaritmicky seřazená detekce, kde jsou detektory seskupeny blízko sebe v širokých úhlech, vykazuje optimální citlivost. Pro provádění této zkoušky platí mezinárodní norma ISO 13 320. [N12]

Pro jednoznačnou přenositelnost do praxe a požadavky normy pak byly granulometrie výsledných směsí dále podrobeny normovému postupu dle ČSN EN 933-10. [N13]

Morfologie zrn byla pro pochopení její závislosti na vodonáročnost a celkovou reologii sledována pomocí skenovací elektronové mikroskopie (SEM), kdy byly nejprve dané vzorky naprášeny zlatem, pro zajištění jejich vodivosti a následně sledovány při zvětšení až v řádů tisíců. V rámci práce byl použit přístroj TESCAN MIRA3 XMU. Skenovací elektronový mikroskop (Scanning Elektron Microscope SEM) využívá na získávání informací o objektu fokusovaný elektronový svazek, který se zkoumaným vzorkem interaguje. V porovnání s optickým mikroskopem využívajícím na osvětlení vzorku proud fotonů s vlnovou délkou ve viditelné oblasti. Elektronový mikroskop má přibližně o tři řády lepší teoretickou rozlišovací schopnost. Proud elektronů je tvořen Schottkyho autoemisní katodou.



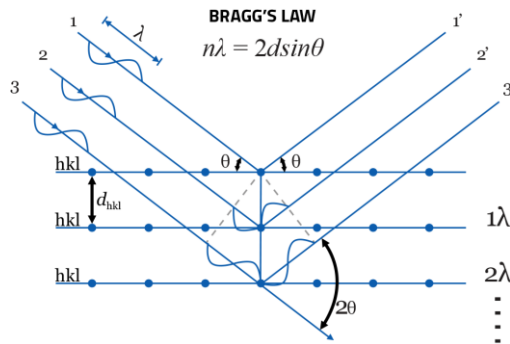
Obr. 31: Schéma fungování elektronového skenovacího mikroskopu SEM (zdroj [O24])

6.5. Stanovení mineralogického složení

Mineralogie použitých popílků byla stanovena pomocí rentgenové difrakční analýzy (XRD – X-ray Diffraction) na přístroji PANALYTICAL EMPYREAN v prostorách Centra AdMaS. Přístroj XRD sestává ze tří hlavních částí – zdroje rentgenova záření, držáku vzorku a detektoru.

Rentgenové záření produkované zdrojem emituje vzorek. Je-li vzorek krystalické povahy, tak obsahuje tzv. krystalické mřížky, na nichž je proud rentgenova záření rozptýlen nebo dále difraktován a je takto zachycen detektorem. Vzorek umístěný v nosiči je proudu rentgenova záření vystaven pod různým úhlem dopadu a detektor tak zachycuje a měří intenzitu a difrakční data. Pro každý jednotlivý minerál je pak difraktogram jedinečný a dostupné virtuální knihovny obsahující tyto údaje jednotlivých minerálů, pak napomáhají vyhodnotit souhrnný difraktogram analyzovaného vzorku. Tento princip vychází z Braggovy rovnice, zabývající se jedinečností difraktogramu v závislosti na znalosti úhlu dopadu záření, mezimřížkové vzdálenosti a vlnové délce. Výsledkem je stanovení zastoupení jednotlivých minerálů ve vzorku.

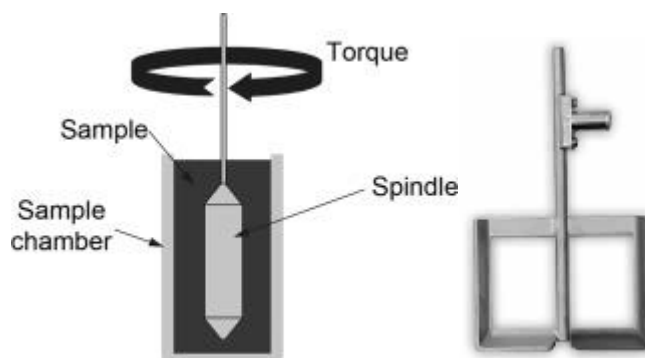
Zde je princip Braggovy rovnice.



Obr. 32: Princip použití Braggovy rovnice (zdroj [O25])

6.6. Stanovení reologie cementové pasty

Reologii cementové pasty je možné sledovat pomocí rotačních viskozimetrů, které nám podávají podrobný obraz o průběhu torzního momentu v závislosti na rychlosti otáček a času. Pro potřeby této práce byl použit rotační viskozimetr VISKOMAT NT od firmy Schleibinger Geräte, jehož princip je založen na snímání odporu tekutiny stacionární lopatkou, která je umístěna v rotační nádobě. Během procesu měření je přesně zaznamenávám torzní moment a rovněž teplota směsi. Toto použité zařízení navíc umožňuje umístit nádobu se vzorkem během procesu měření do temperované lázně, díky čemu jsou eliminovány dopady okolního prostředí nebo naopak lze simulovat okrajové podmínky okolního prostředí z pohledu teploty. Princip měření a druh použité lopatky jsou zobrazeny na následujícím Obr. 33.



Obr. 33: Princip měření reologie cementové pasty pomocí rotačního viskozimetru a druh použité míchací lopatky (zdroj [O26])

6.7. Stanovení konzistence malty rozlívím

Konzistence cementové malty byla v rámci disertační práce stanovena pomocí střešovacího stolku a zkušební postup odpovídá normě ČSN EN 1015-3. [N14]

Pro samotné stanovení se používá rozlívový stolek a Hagermannův kužílek, který je po naplnění ve dvou vrstvách a zhuštění 10-ti lehkými údery dusadlem zvednut a malta je na stolku rozlita jeho 15-ti údery. Výsledná hodnota rozlívání je průměrná hodnota dvou na sebe kolmých měření rozlívání.

6.8. Stanovení počátku a doby tuhnutí

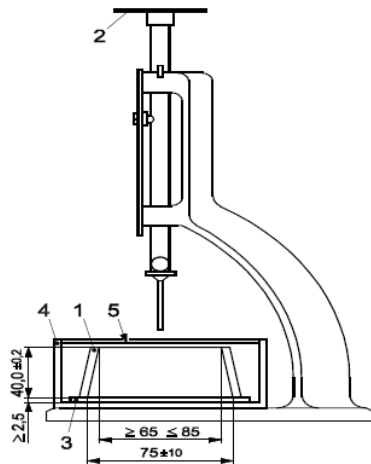
Stanovení počátku a doby tuhnutí cementu (i s přídavkem popílku) je řízeno normou ČSN EN 196-3. [N15] Tato norma rovněž popisuje stanovení objemové stálosti pomocí Le Chatelierovy objímky.

Pro stanovení počátku a doby tuhnutí se používá Vicatova přístroje v manuálním nebo automatickém provedení. Nejprve, než je cementová kaše podrobena zkoušce stanovení počátku a doby tuhnutí, je potřeba stanovit dávku vody pro výrobu kaše normální konzistence. Pro toto stanovení se rovněž používá Vicatova přístroje, jehož hrot je opatřen penetračním válečkem, který se při zkoušce musí zastavit ve vzdálenosti 6 ± 2 mm od podkladní destičky. Pro výrobu kaše normální konzistence je použito 500 ± 1 g cementu a dávka vody dle výsledků zkoušky. Tato dávka se nejčastěji pohybuje v rozmezí cca 20 až 30 %. Samotná výroba kaše probíhá v cementové míchačce dle normou přesně daného postupu:

- do nádoby se vlije voda a přidá se cement → následuje míchání 90 vteřin nízkou rychlostí → během 30 vteřin, kdy je míchačka zastavená, dojde k setření kaše stěrkou ze dna a stěn nádoby → následuje míchání dalších 90 vteřin nízkou rychlostí

Po stanovení nutné dávky vody pro výrobu kaše normální konzistence je s touto dávkou vody cementová pasta vyrobena a umístěna do prstence Vicatova přístroje na nějž je nyní nasazena penetrační jehla. Naplněný prstenec s cementovou kaší se vloží do vodní lázně a umístí se do Vicatova přístroje. Počátek tuhnutí cementové kaše je poté čas od styku pojiva s vodou do doby, kdy se penetrační jehla Vicatova přístroje během zkoušky zastaví 6 ± 3 mm nad podkladní destičkou. Jako konec doby tuhnutí je pak označován

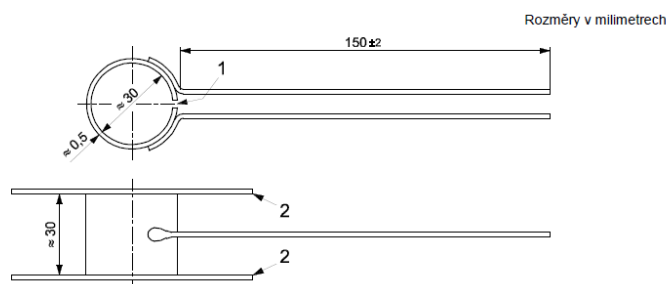
čas, kdy penetrační jehla vnikne do cementové kaše pouze do hloubky 0,5 mm. Schéma Vicatova přístroje je na následujícím Obr. 34.



Obr. 34: Schéma manuálního Vicatova přístroje (zdroj [N15])

V případě zkoušky doby tuhnutí modifikované cementové kaše popílkem je dle normy ČSN EN 450-1 [N3] postup shodný s normou ČSN EN 196-3 [N15], avšak náhrada cementu popílkem činí 25 %.

Objemová stálost se zkouší za použití Le Chatelierovy objímky, jejíž nákres je vidět na Obr. 35.



Obr. 35: Tvar a rozměry Le Chatelierovy objímky (zdroj [N15])

Princip zkoušky spočívá ve stanovení rozevření hrotů objímky naplněné cementovou kaší normální konzistence, kdy nejprve je kaše v objímce ponechána při teplotě 20 ± 1 °C po dobu 24 hodin \pm 30 minut ve vlhkém nebo vodním uložení a následně je celá objímka vložena do hrnce s vodou, která je během 30 ± 5 minut přivedena k varu a po dobu 3 hodin je v těchto podmínkách ponechána. Výsledkem je rozdíl rozevření hrotů objímky před varem a po opětovném ochlazení po varu. Z hlediska zkoušky cementové pasty modifikované popílkem činí náhrada cementu popílkem 30 %.

6.9. Stanovení průběhu hydratačních teplot

Průběh hydratačních teplot u cementových past byl v rámci řešení experimentální části disertační práce sledován pomocí přístroje CALMETRIX F-CAL 8000. Jedná se o přenositelný přístroj, který obsahuje 8 tepelně izolovaných měřících komor, kde pomocí softwaru lze prakticky online sledovat vývoj a průběh teplot. Toto zařízení odpovídá požadavkům normy ASTM C1753 [N16] a je do jisté míry obdobou zkušební postupu dle normy ČSN EN 196-9. [N17] Na základě kalibrace kalorimetru by bylo možné z teplotního průběhu vypočítat hydratační teplo. Pro účely disertační práce, však bylo stěžejní znát průběh vývoje teplot spojených s hydratací pojiva, dosažení maximální teploty a čas jejího dosažení.



Obr. 36: Přístroj CALMETRIX F-CAL 8000 (zdroj [O27])

6.10. Stanovení mechanických parametrů a indexu účinnosti

Mezi základní mechanické parametry cementu patří jeho pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu. Obě zkoušky se řídí postupem dle normy ČSN EN 196-1. [N18]

Metoda určuje stanovení pevnosti v tlaku a pevnosti v tahu za ohybu na zkušebních tělesech tvaru trámečku o rozměrech 40×40×160 mm. Tělesa jsou zhotovena ze záměsi malty obsahující jeden hmotnostní díl cementu, tři hmotnostní díly normalizovaného písku CEN a půl dílu vody. Mísení této malty probíhá následujícím způsobem:

- do nádoby se vlije voda a přidá se cement → následuje míchání 30 vteřin nízkou rychlostí → během dalších 30 vteřin při míchání nízkou rychlostí je

přidán do směsi písek → následuje míchání dalších 30 vteřin vysokou rychlostí → míchání se zastaví na 90 vteřin a během prvních 30 vteřin dojde k setření materiálu stěrkou ze dna a ze stěn nádoby → následuje 60 vteřin míchání vysokou rychlostí

Z připravené směsi se vyrobí zkušební tělesa, která jsou zkoušena na pevnosti nejčastěji po 2, případně 7 a následně po 28 dnech normového zrání. Nejprve je poté pomocí zkušební lisu stanovena pevnost v tahu za ohybu, kdy je využito 3-bodové rozložení a následně je na zlomcích stanovena pevnost v tlaku.

Index účinnosti se stanovuje u popílků dle normy ČSN EN 450-1. [N3] Princip spočívá v porovnání pevností v tlaku zkušebních těles vyrobených pouze z cementu dle normy ČSN EN 196-1 [N18] a pevností zkušebních těles vyrobených stejným způsobem, kdy náhrada CEM I popílkem činí 25 %. Jako stěžejní stáří pro stanovení indexu účinnosti se dle normy považuje 28 a 90 dní.

6.11. Vstupní suroviny – plniva

6.11.1. Stanovení zrnitosti síťovým rozborem

Stanovení zrnitosti kameniva síťovým rozborem se řídí normou ČSN EN 933-1. [N19] Nejprve je kamenivo mokřím promýváním přes síto o velikosti 0,063 mm zbaveno jemných částic, jejichž objem v % je stanoven z rozdílů hmotností vysušené zkušební navážky před praním a po praní. Následně je vysušený zbytek zbavený jemných částic přesítován přes sadu normových sít pomocí mechanického vibračního zařízení. Jednotlivá síta mají následující velikosti ok:

- dno – 0,063 mm – 0,125 mm – 0,250 mm – 0,5 mm – 1,0 mm – 2,0 mm – 4,0 mm – 5,6 mm – 8,0 mm – 11,2 mm – 16,0 mm – 22,4 mm a 32,0 mm

Během procesu mechanického třepání propadávají jednotlivá zrna kameniva síty (seřazeno dle velikosti ok síta od největšího po nejmenší) a následně jsou zachyty na jednotlivých sítích zváženy a je stanovena výsledná křivka zrnitosti udávající propad v % jednotlivými sítí.

6.11.2. Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti

Objemová hmotnost zrn kameniva a jeho nasákavost po 24 hodinách je stanovena dle normy ČSN EN 1097-6. [N20]

Objemová hmotnost zrn a nasákavost kameniva se stanovuje pro běžné kamenivo pomocí pyknometrů a používá se vždy kamenivo zbaveno jemných částic. Výsledkem zkoušky je poté několik hodnot objemových hmotností v závislosti na stavu zrn – zdánlivá objemová hmotnost, objemová hmotnost zrn vysušených v sušárně a objemová hmotnost zrn nasáklých a povrchově osušených. Z hlediska výpočtu skladky betonové směsi se jako nejvhodnější jeví využívat hodnotu objemové hmotnosti zrn vysušených v sušárně a ve výpočtech dále uvažovat s nasákavostí kameniva pro výpočet potřebné dávky vody a výpočet vodního součinitele.

Hodnota objemové hmotnosti zrn vysušených v sušárně a hodnota nasákavosti po 24 h ponoření do vody se stanoví dle následujících vzorců:

$$\rho_{rd} = \rho_w \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)} \quad \text{a} \quad WA_{24} = \frac{M_1 - M_4}{M_4} \times 100, \text{ kde}$$

ρ_w hustota vody při zkušební teplotě, v Mg/m³

M_1 hmotnost vodou nasáklého a povrchově osušeného kameniva na vzduchu, v g;

M_2 hmotnost pyknometru obsahujícího vzorek nasáklého kameniva a vodu, v g;

M_3 hmotnost pyknometru naplněného pouze vodou, v g;

M_4 hmotnost v sušárně vysušené zkušební navážky na vzduchu, v g.

6.11.3. Stanovení tvaru zrn – tvarový index

Tvarový index zrn kameniva je jednou ze základních charakteristik kameniva, která má přímý dopad na reologii betonové směsi a podává nám obraz o kvalitě zrn z pohledu jejich stejnoměrnosti, co se tvaru týká.

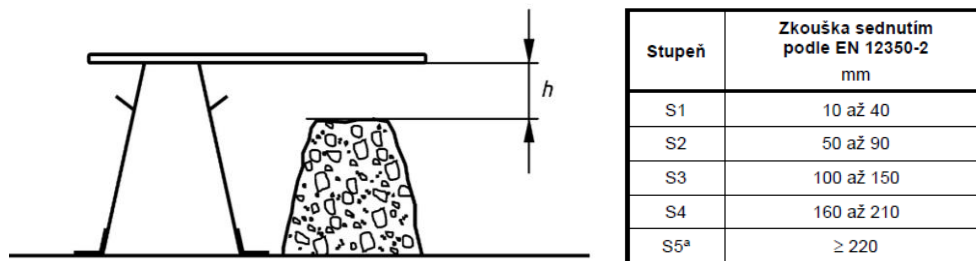
Tvarový index kameniva se stanovuje dle normy ČSN EN 933-4 [N21] za použití speciálního dvoučelistového posuvného měřítka. Pomocí tohoto měřítka jsou ze zkušební navážky vyseparována zrna mající vzájemný poměr jejich nejdelší (délka) a nejkratší strany (tloušťka) větší než 3. Taková zrna jsou jehlicovitého nebo plochého charakteru a pro výrobu betonu nejsou z pohledu jeho reologických vlastností příliš vhodná. Touto zkouškou je tedy stanoveno, kolik % tvoří zrna mající poměr délky a tloušťky větší než 3.

6.12. Betonová směs – čerstvý beton

6.12.1. Stanovení konzistence

Konzistenci čerstvého betonu lze stanovit několika způsoby, v praxi je však zřejmě nejběžnější metoda sednutím dle normy ČSN EN 12350-2. [N22]

Metoda posuzuje konzistenci čerstvého betonu na základě změny tvaru po sejmutí kuželové formy (Abramsova kužele). Měří se rozdíl h mezi původní výškou zkušebního kužele a nejvyšším bodem sednuté betonové směsi. Kužel je plněn ve 3 vrstvách a každá vrstva je zhutněna 25 vpichy zhutňovací tyčí. Na základě této metody se konzistence betonu dělí do 5 tříd S1 až S5.



Obr. 37: Princip stanovení konzistence ČB sednutím kužele (zdroj [N22])

6.12.2. Stanovení objemové hmotnosti

Objemová hmotnost čerstvého betonu se stanovuje dle normy ČSN EN 12350-6. [N23] Pro stanovení objemové hmotnosti čerstvého betonu je třeba znát přesný objem nádoby, ve které se tento parametr stanovuje. Lze tak úspěšně využít například nádobu pro stanovení obsahu vzduchu v čerstvém betonu nebo pro méně přesné stanovení i formy pro výrobu zkušebních těles. Samotná objemová hmotnost čerstvého betonu je zaokrouhlována na celé 10 kg/m^3 a dochází tak k eliminaci určité chyby při nedokonalém stanovení objemu nádoby. Výpočet je poté založen na poměru hmotnosti betonu a přesně známého objemu naplněné formy v kg/m^3 .

6.12.3. Stanovení kvality ovzduší - amoniak

Při procesu selektivní nekatalytické redukce oxidu dusíku (SNCR) během procesu spalování dochází ke kontaminaci popílku solemi amoniaku. Amoniak je látkou, která při zvýšené koncentraci může být zdraví škodlivá. V jedné z kapitol této disertační práce, proto byla Zdravotním ústavem sledována kvalita ovzduší a výskyt amoniaku při práci s betonem, pro jehož výrobu byl kontaminovaný popílek použit. Byly použity postupy

dle Nařízení vlády č. 361/2007 Sb. [N24], dle Vyhlášky Ministerstva zdravotnictví ČR č. 6/2003 Sb. [N25]

Dále byly použity zrychlené metody stanovení množství amonných iontů v popílku pomocí testovací sady na bázi indikátorových sad, umožňující semikvantitativní analýzu – Quantofix – ammonium. Z dlouhodobého hlediska byly stanoveny výluhy amoniaku z betonu dle normy ČSN ISO 7150-1. [N26]

6.13. Betonová směs – ztvrdlý beton

6.13.1. Stanovení objemové hmotnosti

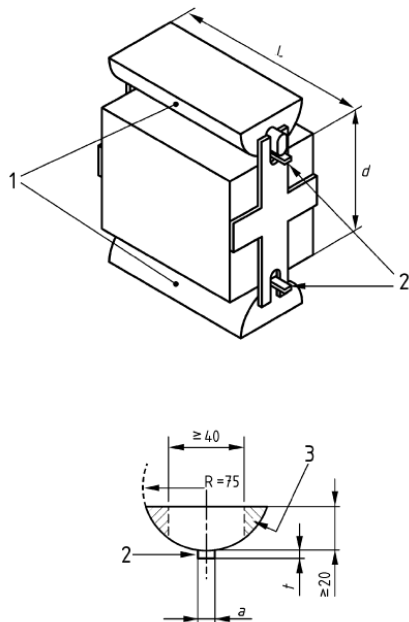
Objemová hmotnost ztvrdlého betonu se stanovuje v souladu s normou ČSN EN 12390-7. [N27] Tento parametr lze stanovit ze skutečně změřených rozměrů, jmenovitých rozměrů a nebo hydrostaticky při nepravidelném tvaru vzorku. V rámci řešení disertační práce byla objemová hmotnost ztvrdlého betonu stanovena vždy ze skutečně změřených rozměrů a v nasyceném stavu nebo při laboratorním uložení.

6.13.2. Stanovení pevnosti v tlaku

Pevnost v tlaku betonu je jedním z jeho základních mechanických parametrů a stanovuje se dle normy ČSN EN 12390-3. [N28] Nejčastěji se pro stanovení pevnosti betonu v tlaku používají zkušební tělesa tvaru krychle o hraně 150 mm. Tato tělesa jsou vložena do lisu kolmo na směr zhutnění a následně plynule zatěžována konstantní rychlostí až do porušení. Pevnost v tlaku betonu je vypočtena jako poměr nejvyšší dosažené síly při porušení a zatěžovací plochy zkušební tělesa.

6.13.3. Stanovení pevnosti v příčném tahu

Pro stanovení pevnosti betonu v příčném tahu byla v rámci této disertační práce použita zkušební tělesa tvaru krychle o hraně 100 mm. Zkušební postup se řídil normou ČSN EN 12390-6. [N29] Zkušební tělesa jsou opět kolmo na směr zhutnění vložena do zkušební lisu, ale tentokrát na roznášecí pásky břitů zkušební přípravku, dle Obr. 36.



Obr. 38: Tvar a rozměry přípravku pro stanovení pevnosti betonu v příčném tahu (zdroj [N29])

Následně je těleso plynule zatěžováno konstantní rychlostí až dojde k jeho porušení. Pevnost betonu v příčném tahu je pak spočítána dle následujícího vzorce:

$$f_{ct} = \frac{2 \times F}{\pi \times L \times d}$$

, kde

- f_{ct} je pevnost v příčném tahu, v Megapascálech (MPa) nebo v Newtonech na čtvereční milimetr nebo v N/mm^2 ;
- F maximální zatížení, v Newtonech (N);
- L délka dotykové přímky tělesa, v milimetrech (mm);
- d zjištěný příčný rozměr tělesa, v milimetrech (mm).

6.13.4. Stanovení celkové nasákavosti

Celkovou nasákavostí lze hodnotit míru schopnosti vzorku pohlcovat vodu až do ustálené hmotnosti. Zkušební těleso je nejprve ponořeno do vodní lázně a je v ní ponecháno až do ustálení hmotnosti a následně dochází k jeho nucenému vysychání pomocí sušárny nejčastěji při 105 °C, opět až do ustálené hmotnosti. Výsledkem je poměr pohlcené vody ku celkové hmotnosti vysušeného tělesa v %.

Z pohledu legislativy lze nasákavosti betonu stanovit pomocí dnes již neplatného normového postupu dle ČSN 73 1316 [N30] a v případě betonových dlažebních desek dle normy ČSN EN 1339. [N9]

6.13.5. Stanovení nasákavosti vlivem kapilarity

Nasákavost betonu vlivem kapilarity se dnes vyskytuje prakticky pouze v normovém postupu pro betonové zdíky dle ČSN EN 772-11. [N31]

Pro potřeby této disertační práce byl však daný postup shodně aplikován i na jádrovou vrstvu betonových dlažebních desek. Principem zkoušky je vychladlé prvky vysušené do konstantní hmotnosti následně vystavit nasákavosti vody vlivem kapilarity, přičemž čas nasakování trvá 600 vteřin a zkušební těleso je položeno na podložky o půdorysné ploše nejvýše 400 mm² a je zalito do výšky 5 ± 1 mm. Po uplynutí času nasakování, je těleso z lázně vyjmuto, povrchově ořeno a opět zváženo. Výsledná hodnota kapilární nasákavosti je vypočtena dle následujícího vzorce:

$$C_{w,s} = \frac{m_{s0,s} - m_{dry,s}}{A_s \cdot t_{s0}} \times 10^8 [g/(m^2 \cdot s)]$$

, kde

$m_{dry,s}$ hmotnost vzorku po vysušení, (g)

$m_{s0,s}$ hmotnost vzorku po ukončení nasycování po dobu t , (g)

A_s celková velikost plochy vzorku ponořené do vody, (mm²)

t_{s0} doba nasycování, (s)

6.13.6. Stanovení hloubky průsaku tlakovou vodou

Hloubka průsaku tlakovou vodou byla stanovena dle normy ČSN EN 12390-8. [N32]

Jedná se o zkušební postup, kdy zkušební těleso tvaru krychle o hraně 150 mm se upne do vodotlačné stolice jinou hranou než výrobním povrchem a nechá se na něj působit vodní tlak 500 ± 50 kPa po dobu 72 ± 2 hodiny. Po skončení předepsané doby působení vodního tlaku, je těleso vyňato ze zařízení a ořeno od přebytečné vody. Těleso je rozlomeno v polovině. Na lomové ploše je změřena viditelná hloubka průsaku vodou.

6.13.7. Stanovení mrazuvzdornosti

Mrazuvzdornost betonu je stanovena na zkušebních tělesech tvaru trámce o rozměrech 100×100×400 mm, přičemž pro zkoušku je potřeba celkem 6 zkušebních těles. 3 zkušební tělesa se na počátku zkoušky po jejich nasycení vodou odzkouší na pevnost v tahu ohybem a zbylá 3 zkušební tělesa se umístí na automatického mrazícího zařízení, kde dochází k cyklování teploty cca -20°C a následného zalití vodou o teplotě cca +20 °C. Takto proběhne předepsaný počet zkušebních cyklů, který se standartně dělá na

100 nebo 150 cyklů a poté jsou tyto cyklicky namáhaná tělesa rovněž odzkoušena na pevnost v tahu ohybem.

Výsledkem mrazuvzdornosti betonu dle normy ČSN 73 1322 [N33] je poměr pevností v tahu ohybem nezmrazovaných a zmrazovaných těles.

Pro potřeby této disertační práce byly stejným způsobem odzkoušeny betonové dlažební desky, kdy byly pro výpočet indexu mrazuvzdornosti použity hodnoty pevností v ohybu stanovených dle normy ČSN EN 1339. [N9]

6.13.8. Stanovení odolnosti proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek

Zkušební postup pro stanovení odolnosti betonu proti působení chemických rozmrazovacích látek určuje norma ČSN 73 1326/Z1. [N7]

Účelem zkoušky je posoudit odolnost povrchu cementových betonů v zimním období při použití chemických rozmrazovacích látek.

Vyrobená zkušební tělesa jsou vložena do korozivzdorné misky a zalita do výšky 5 ± 1 mm 3% roztokem chloridu sodného. Miska se vzorkem je uložena do automatického cyklovacího zařízení, kde je vzorek střídavě zmrazován a rozmrazován. Cyklus sestává ze schlazení zkušební roztoku na teplotu -15°C , na této teplotě se udržuje po dobu 15 minut. Pak následuje ohřev zkušební roztoku na teplotu 20°C . Na této teplotě se opět udržuje po dobu 15 minut. Celkem je provedeno 4×25 cyklů. Po dokončení každých 25-ti zkušebních cyklů, je roztok z misky přemístěn do vysoušecí keramické misky a povrch zkušební tělesa je do této misky proudem vody rovněž opláchnut. Pevné zbytky se v keramické misce vysuší při teplotě 105°C a následně zváží. Odolnost povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek je dána hmotností odpadu na jednotku plochy dle uvedeného vzorce, kde M_i jsou hmotnosti po 25-ti cyklech a A je plocha působení roztoku na zkušební těleso.

$$\rho_a = \frac{\sum M_i}{A} \left[\frac{g}{\text{cm}^2} \right]$$

6.13.9. Stanovení odolnosti proti agresivnímu uložení

Zkušební vzorky tvaru krychle o hraně 100 mm byly po dobu až 360 dní uloženy v různých agresivních prostředích. K uložení těles do těchto prostředí došlo po 28 dnech jejich normového zrání.

Pro potřeby disertační práce byly vyrobeny a udržovány následující chemicky agresivní prostředí:

- Roztok chloridů (nasycený roztok NaCl v koncentraci 261g/l)
- Roztok Na₂SO₄ v koncentraci 34 600 mg/l
- Roztok KNO₃ v koncentraci 180 mg/l
- Aerosol SO₂ v koncentraci 3,4 ml/l při zvýšené teplotě

Koncentrace připravených roztoků byla po celou dobu expozice těles pravidelně kontrolována a případně upravována. V případě expozice v aerosolu SO₂ bylo využito automatizovaného přístroje, korozivní plynové komory typu HK 800 od výrobce Köhler Automobiltechnik GmbH. Jedná se o zařízení pro simulaci vlivu škodlivých plynů (oxidy síry, dusíku, uhlíku apod.) s regulovatelnou teplotou a relativní vlhkostí, s vnitřním prostorem pro zkoušky škodlivými plyny (temperování vzduchovým pláštěm).

Samotný průběh zkoušky v tomto zařízení měl následující parametry:

- 1,5 hodiny nárůst teploty vnitřního prostoru komory na 40 °C → dále výdrž 6,5 hodiny na této teplotě → následuje 16 hodin vysoušení a chlazení na laboratorní teplotu
- Během ohřevu se zvyšuje zároveň relativní vlhkost uvnitř komory nasycenou vodní párou. Dno komory je zahříváno a na dně je cca 2-3 cm vody

Zkoušky prováděné na zkušebních tělesech před jejich vystavení agresivnímu prostředí a vždy po jisté době uložení v agresivním prostředí jsou popsány v následujících podkapitolách.

6.13.9.1. Stanovení pH betonu

Hodnota pH betonu byla stanovena na vodném roztoku připraveném z 10 g jemně mletého analyzovaného vzorku a 100 g demineralizované vody. Samotné stanovení bylo

prováděno pomocí automatického pH metru od firmy Mettler Toledo a vzorek byl před zkouškou namlet na největší zrno o velikosti 0,063 mm. Pro kontrolu byly vždy průběžně používané kalibrační roztoky.

6.13.9.2. Stanovení doby průchodu ultrazvuku

Měření ultrazvukovou impulsovou metodou probíhalo dle normy ČSN 73 1371. [N34] Pomocí dosažených hodnot rychlostí šíření ultrazvuku byl následně vypočten dynamický modul pružnosti betonu.

Na zkoušených vzorcích byly na protilehlých stranách vyznačeny body, na které byly při měření přitlačovány stejnou silou sondy, na kterých byl nanesen vazební prostředek, konkrétně sonogel. Bez použití tohoto prostředku by mezi sondou a vzorkem vznikla vzduchová mezera, která by způsobila velký odraz ultrazvukových vln a zkoušeným vzorkem by prošlo velice nízké množství impulsů. Měření se na každém zkušebním místě provádí dvakrát, a pokud se od sebe naměřené hodnoty neliší o více než 1 %, vypočítá se aritmetický průměr těchto hodnot.

Rychlost šíření ultrazvukového impulsu se stanoví dle následujícího vztahu:

$$v_L = \frac{L}{T}, \text{ kde}$$

v_L je rychlost impulsu, v $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$;

L délka měřicí základny, v mm;

T čas včetně t_{kor} , který uplyne při průběhu impulsu měřicí základnou, v μs , tj. $T = T_L \pm t_{kor}$;

t_{kor} korekce, která se skládá z tzv. mrtvého času přístroje a z rozdílu času šíření impulsů UZ vln, který se případně zjistí při kalibraci přístroje.

A následně je vypočtena hodnota dynamického modulu pružnosti betonu v tlaku dle vzorce:

$$E_{cu} = \rho \cdot v_L^2 \cdot \frac{1}{k}, \text{ kde}$$

ρ je objemová hmotnost betonu v $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$;

v_L impulzová rychlost podélného UZ vlnění v $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$;

k součinitel rozměrnosti prostředí

Tato nedestruktivní metoda může při správné interpretaci napomoci odhalit případné nežádoucí mikrostrukturní poruchy.

6.13.9.3. Stanovení mikrostrukturních změn – elektronová mikroskopie

Pomocí dříve popsané skenovací elektronové mikroskopie lze v mikrostruktuře betonu identifikovat případný růst nežádoucích novotvarů, které mohou mít pro kompozit s delším časovým horizontem až destruktivní účinky. Mezi tyto minerály lze jmenovat například ettringit nebo monosulfát. Rovněž lze však pomocí elektronové mikroskopie sledovat průběh pucolánové reakce popílku, kdy dochází k zahušťování mikrostruktury převážně vznikajícími CSH gely.

6.13.9.4. Stanovení mikrostrukturních změn – TGA a XRD

Difrakční metody strukturní analýzy byly již popsány dříve. Ve struktuře betonu lze XRD analýzou identifikovat například fáze vznikající hydratací cementu (např. portlandit, kalciumhydrosilikátové a kalciumaluminátové fáze, ettringit, monosulfát apod.), fáze vznikající jejich následnou karbonatací (zejména kalcit, aragonit, vaterit), minerály pocházející z kameniva (zejména křemen, živce, slídy, jíly atd.) nebo taktéž původní mineralogické produkty slínku, které ještě neprošly hydratačním procesem (zejména C_3S , C_2S). Touto analýzou lze dále prokázat výskyt minerálů v cementové matrici, které nejsou běžnými hydratačními produkty, popřípadě produkty, které vznikly v důsledku degradačních procesů.

Diferenční termická analýza (DTA) je dynamická, tepelně analytická metoda. Je založena na měření rozdílů teplot mezi zkoušeným materiálem a inertním standardem (u moderních přístrojů je tento standard virtuální) současně zahřívány v peci. Tepelné zabarvení reakcí, ke kterým ve vzorku při zahřívání dochází, se projeví maximy a minimy v exotermní a endotermní oblasti. Současně je sledována změna hmotnosti doprovázející jednotlivé reakce. Výstupem analýzy je pak stanovení obsahu jednotlivých složek v hodnoceném vzorku. DTA analýza se tedy zpravidla využívá jako doplněk XRD analýzy pro přesnější kvantifikaci obsahu jednotlivých složek cementové matrice.

7. DOSAŽENÉ VÝSLEDKY ETAPY I

7.1. Cement

Pro prvotní analýzy a vývoj nových druhů aktivních příměsí na bázi popílků byl použit čistý portlandský cement CEM I 42,5 R z provozovny Mokrá společnosti Heidelberg Materials CZ, a.s.

Tento cement byl podroben základním fyzikálně-mechanickým parametrům a chemické parametry byly převzaty z dokumentů deklarovaných výrobcem. Na cementu byly provedeny následující zkoušky:

- Stanovení chemického složení – převzato od výrobce
- Stanovení měrné hmotnosti a jemnosti mletí
- Stanovení počátku a doby tuhnutí, objemové stálosti
- Stanovení pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku po 2 a 28 dnech

7.1.1. Chemické složení a fyzikální parametry

Chemické složení použitého portlandského cementu CEM I 42,5 R v souladu s požadavky normy ČSN EN 197-1 [N8] bylo stanoveno a poskytnuto výrobcem. Následující Tab. 5 obsahuje všechny dosažené výsledky, které jsou průměrnou statistikou za měsíc výroby.

Zkoušky fyzikálních parametrů cementu byly provedeny pomocí přístrojů Centra AdMaS a výsledky dosažených hodnot obsahuje rovněž Tab. 4.

Tab. 4: Chemické složení a vybrané fyzikální parametry CEM I 42,5 R Mokrá

Vlastnost	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Obsah Cl	Na ₂ O ekv.	Obsah síranů (SO ₃)
Jednotky	%							
Výsledek	19,46	4,68	3,30	62,92	1,41	0,063	0,76	3,03
Vlastnost	Měrná hmotnost	Jemnost mletí	Počátek tuhnutí	Doba tuhnutí	Objemová stálost			
Jednotky	g/cm ³	m ² /kg	min	min	mm			
Výsledek	3,09	408	205	275	0,3			

7.1.2. Mechanické parametry

Pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku dle normy ČSN EN 196-1 [N18] byla pro daný cement stanovena po 2 a 28 dnech normového zrání. Pro výrobu zkušební malty byla použita Hobartova míchačka a tělesa byla hutněna pomocí vibračního stolku. Výsledky provedených zkoušek obsahuje následující Tab. 5.

Tab. 5: Výsledky pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku CEM I 42,5 R Mokrá

Vlastnost	Objemová hmotnost		Pevnost v tahu za ohybu		Pevnost v tlaku	
Jednotky	kg/m ³		MPa		MPa	
Stáří	2	28	2	28	2	28
Výsledek	2280	2290	6,1	8,7	28,8	61,7

7.2. Vysokoteplotní popílek

V této podkapitole experimentální části disertační práce budou shrnuty všechny stanovené parametry pro použité druhy popílků pocházejících z vysokoteplotního spalování, tedy popílků úletové i popílek ložový. Všechny parametry popílků vyjma chemických analýz byly stanoveny pomocí zařízení Centra AdMaS. Chemické analýzy popílků poté byly provedeny v externí odborné chemické laboratoři společnosti LABTECH s.r.o.

Zkoušky byly provedeny na těchto vysokoteplotních popílkách:

- Černouhelný úletový popílek Dětmorovice – EDE_U
 - ČEZ Energetické produkty, s.r.o.
- Černouhelný úletový popílek Rybník – ERY_U
 - PGE Ekoserwis sp. z o. o.
- Hnědouhelný úletový popílek Chvaletice – ECH_U
 - SEV.EN ČESKÁ ENERGIE, A.S.
- Černouhelný ložový popílek Třebovice – ETR_L
 - Veolia Energie ČR, a.s.

7.2.1. Chemické složení a fyzikální parametry

Výsledky stanovení chemického složení, měrné hmotnosti a měrného povrchu jsou uvedeny v Tab. 6. Výsledky počátku a konce doby tuhnutí a objemová stálost u hrubozrnného popílku jsou stanoveny po namletí materiálu v laboratorním planetovém mlýnku. Tento materiál byl namlet na vyhovující jemnost stanovenou dle ČSN EN 450-1. [N3]

Tab. 6: Vybrané chemické a fyzikální parametry vysokoteplotních popílků

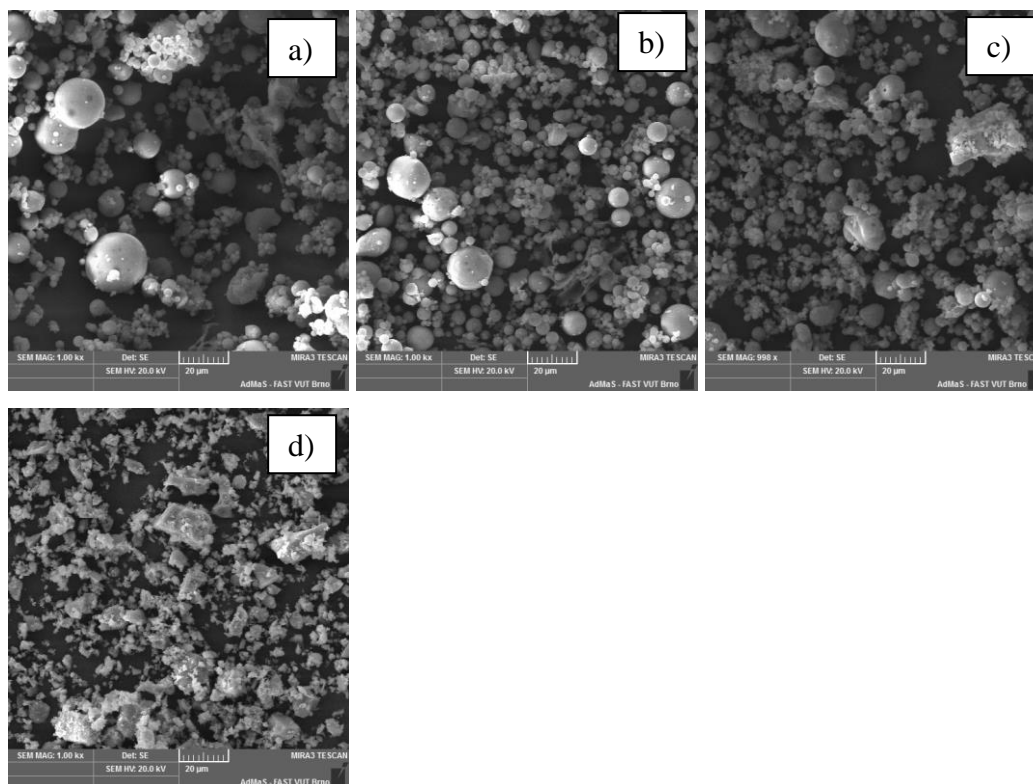
Materiál	Vlastnost	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	CaO volný	Obsah síranů (SO ₃)	Ztráta žiháním
-	Jednotky	%						
EDE_U	Výsledek	53,9	25,2	7,13	2,79	0,13	0,00	2,0
ERY_U		54,0	27,7	6,72	3,21	0,01	0,02	2,9
ECH_U		55,2	27,9	7,05	1,35	0,01	0,08	1,6
ETR_L		49,9	22,8	6,60	2,39	0,01	0,04	5,7
Materiál	Vlastnost	Měrná hmotnost	Měrný povrch	Počátek tuhnutí	Doba tuhnutí	Objemová stálost		
-	Jednotky	g/cm ³	m ² /kg	min	min	mm		
EDE_U	Výsledek	2,23	320	370	520	0,4		
ERY_U		2,26	308	385	510	0,3		
ECH_U		2,22	557	325	420	0,2		
ETR_L		2,54	52	300*	445*	0,6*		

* Pozn.: Uvedené hodnoty jsou výsledky zkoušek na namletém vzorku

Z výsledků fyzikálních a chemických parametrů analyzovaných vysokoteplotních popílků je patrné, že úletové popílky naplňují požadavky ČSN EN 450-1 [N3] Pouze výsledek ztráty žiháním u ložového popílku Třebovice překračuje limitní hodnotu pro kategorii A.

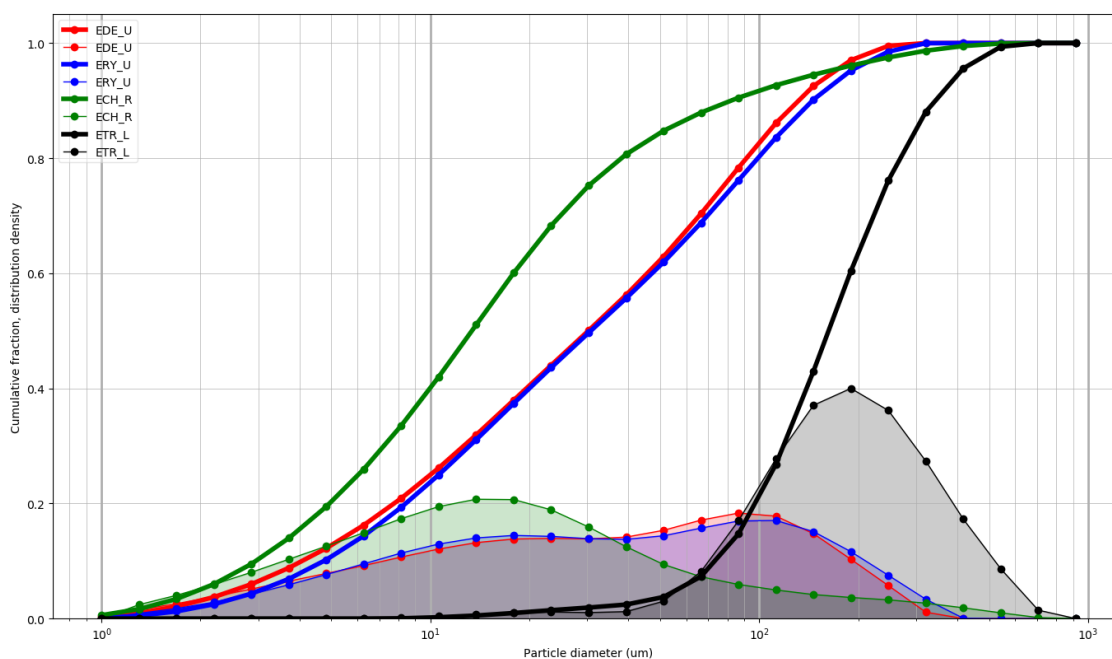
7.2.2. Granulometrie a morfologie zrn, mineralogické složení

Zkoušky granulometrie i morfologie zrn byly pro všechny analyzované popílky provedeny na vysušených vzorcích při 40 °C, a tyto popílky nebyly nijak dále upraveny. Z granulometrie provedené pomocí laserového granulometru byla dále stanovena jemnost popílků dle normy ČSN EN 450-1 [N3], přičemž se jedná o hodnotu zůstatku na síť o velikosti oka 0,045 mm v % a tato hodnota by neměla překročit 40 % pro kategorii popílků N a 12 % pro kategorii popílků S.



Obr. 39: Snímky zrn vysokoteplotních popílků ze SEM ((a) - EDE_U, b) - ERY_U, c) - ECH_U, d) - ETR_L) – zvětšeno 1000 krát

Následující Obr. 40 zobrazuje křivky zrnitosti jednotlivých analyzovaných vysokoteplotních popílků. (EDE, ERY, ECH, ETR)



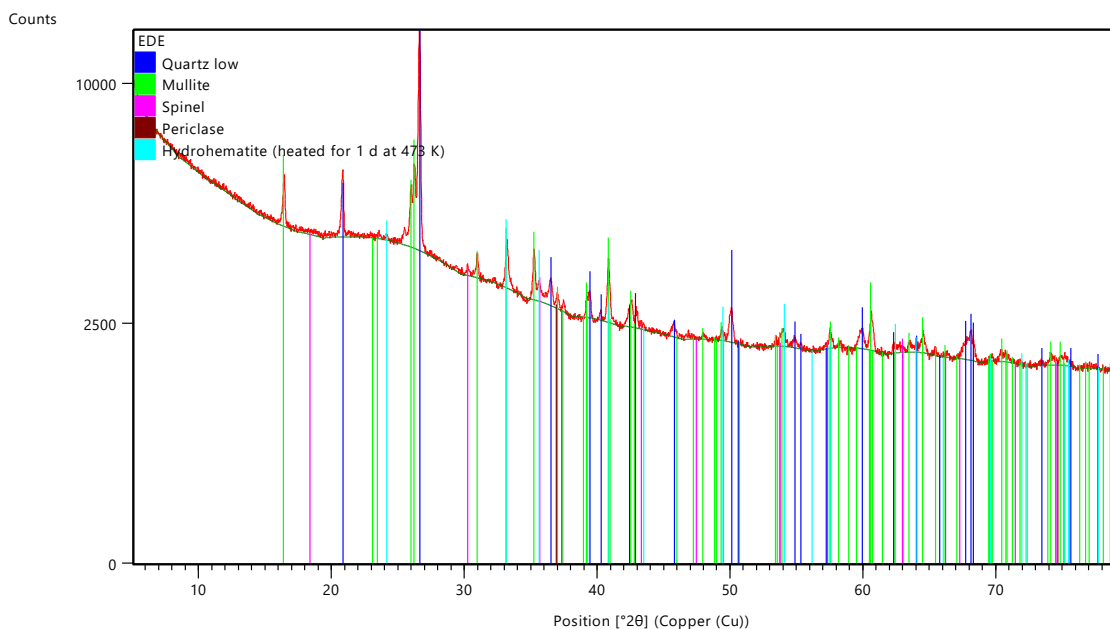
Obr. 40: Křivky zrnitosti analyzovaných vysokoteplotních popílků

Tab. 7: Výsledky stanovené jemnosti analyzovaných vysokoteplotních popílků

Vlastnost	Materiál	EDE_U	ERY_U	ECH_U	ETR_L
Jednotky	%				
Jemnost	Výsledek	40,6	41,3	17,2	97,1

Morfologie zrn jednotlivých analyzovaných vysokoteplotních popílků podává obraz u úletových popílků o téměř dokonalých kulovitých zrnech, což odpovídá předpokladům, kdežto v případě popílků ložového se jedná převážně o částice nestejnorožného tvaru. U ložového popílku je zřejmá jeho nevhodná granulometrie a jemnost, jedná se o vstupní materiál pro proces mechanické aktivace.

Mineralogické složení bylo stanoveno za pomoci rentgenové difrakční analýzy (XRD) a ve všech případech byla detekována především přítomnost mullitu a křemene a dále minerálů pocházejících z nespálených zbytků uhlí, jako jsou spinel, periklas nebo hematit, což je patrné z přiloženého ilustrativního rentgenogramu na Obr. 41.



Obr. 41: Rentgenogram vysokoteplotního popílku Dětmárovice

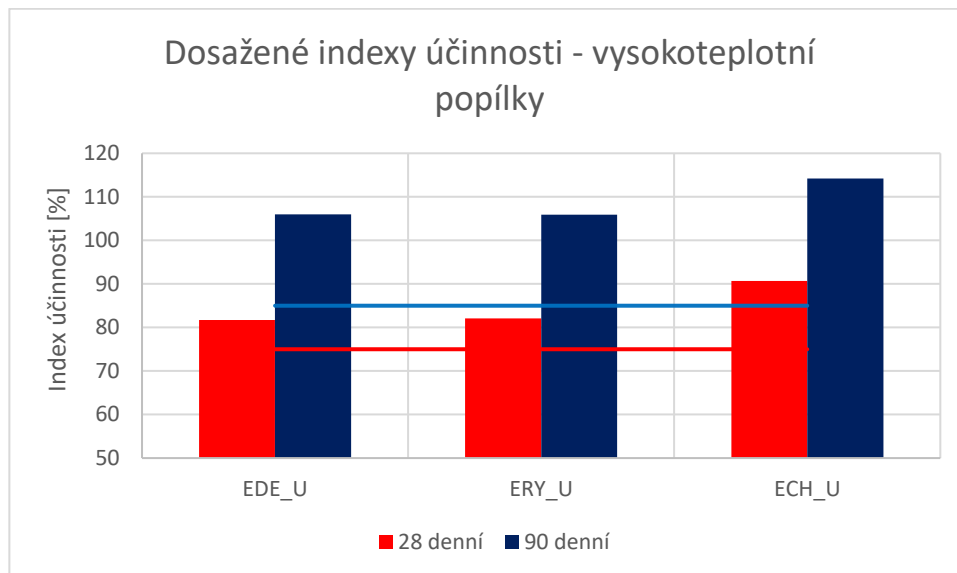
7.2.3. Index účinnosti

Index účinnosti analyzovaných vysokoteplotních popílků byl stanoven pro stáří 2, 7, 28, 56 a 90 dní podle normy ČSN EN 450-1. [N3] Vyrobena zkušební tělesa byla ihned po vyjmutí z formy (cca 24 hodin od výroby) vložena do vodní lázně. Pro všechny vyrobené malty byla rovněž stanovena jejich konzistence pomocí střešacího stolku dle normy ČSN EN 1015-3. [N14]

Následující Tab. 8 obsahuje všechny dosažené výsledky pouze pro úletové vysokoteplotní popílků, protože ložový popílek byl pro výrobu cementových trámečků příliš hrubý a jeho index účinnosti bude sledován až z pohledu jeho mechanické aktivace.

Tab. 8: Dosažené hodnoty konzistence malty a indexů účinnosti vysokoteplotních popílků

Materiál	Vlastnost	Rozlítí	Index účinnosti				
			2 denní	7 denní	28 denní	56 denní	90 denní
-	Jednotky	mm	%				
REF	Výsledek	170	-	-	-	-	-
EDE_U		170	61,5	68,5	81,7	81,9	106,0
ERY_U		160	66,8	69,8	82,1	84,1	105,9
ECH_U		160	79,5	80,2	90,7	102,4	114,2



Obr. 42: Grafické vyhodnocení dosažených indexů účinnosti analyzovaných vysokoteplotních popílků

Dosažené indexy účinnosti poukazují na velmi výraznou aktivitu popílků Chvaletice, který disponuje zároveň velmi příznivou hodnotou jemnosti, přesto se nijak

negativně tato vysoká jemnost neprojevila na konzistenci čerstvé malty. Všechny úletové vysokoteplotní popílků vykazují vyhovující parametry indexu účinnosti z pohledu normy ČSN EN 450-1. [N3]

7.3. Fluidní popílek

V této podkapitole experimentální části disertační práce budou shrnuty všechny stanovené parametry pro použité druhy popílků pocházejících z fluidního spalování. Všechny parametry popílků vyjma chemických analýz, byly stanoveny pomocí zařízení Centra AdMaS. Chemické analýzy popílků poté byly provedeny v externí odborné chemické laboratoři společnosti LABTECH s.r.o.

Zkoušky byly provedeny na těchto fluidních popílkách:

- Fluidní úletový popílek Zlín – ALPIQ
 - SEV.EN ČESKÁ ENERGIE, A.S.
- Fluidní úletový popílek Tisová – ETI
 - Elektrárna Tisová, a.s.
- Ložový fluidní popílek Třinec – TŽ_L
 - TŘINECKÉ ŽELEZÁRNY, a.s.

7.3.1. Chemické složení a fyzikální parametry

Výsledky stanovení chemického složení, měrné hmotnosti a měrného povrchu jsou uvedeny v Tab. 9. U těchto druhů popílků je očekáván zejména vyšší obsah volného CaO a síranů. Obecně jsou právě tyto chemické sloučeniny překážkou pro naplnění požadavků normy ČSN EN 450-1. [N3] Výsledky počátku a konce doby tuhnutí a objemová stálost u hrubozrnného popílku jsou stanoveny po namletí materiálu v laboratorním planetovém mlýnku. Tento materiál byl namlet na vyhovující jemnost stanovenou dle ČSN EN 450-1. [N3]

Tab. 9: Vybrané chemické a fyzikální parametry analyzovaných fluidních popílků

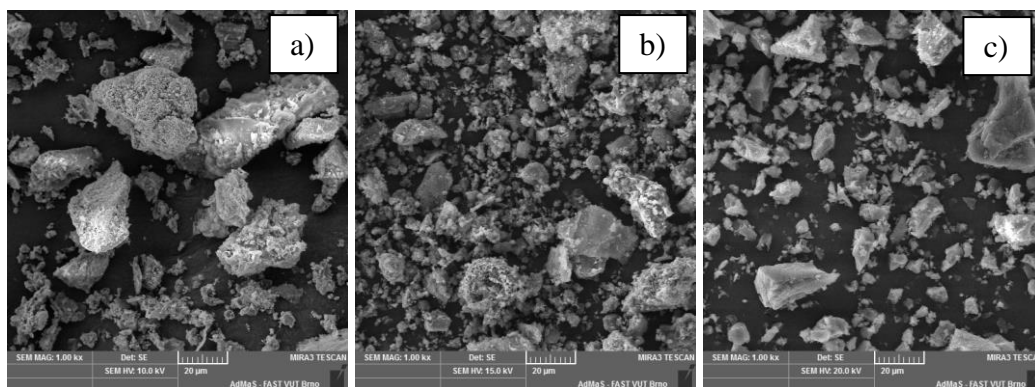
Materiál	Vlastnost	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	CaO volný	Obsah síranů (SO ₃)	Ztráta žháním
-	Jednotky	%						
ALPIQ	Výsledek	34,0	20,1	4,44	25,4	8,7	9,7	6,3
ETI		35,6	23,5	5,68	21,2	11,1	7,6	3,7
TŽ_L		51,0	19,8	6,30	12,4	4,13	0,12	0,7
Materiál	Vlastnost	Měrná hmotnost	Měrný povrch	Počátek tuhnutí	Doba tuhnutí	Objemová stálost		
-	Jednotky	g/cm ³	m ² /kg	min	min	mm		
ALPIQ	Výsledek	2,82	993	310	420	0,4		
ETI		3,04	12542	305	430	0,8		
TŽ_L		2,75	69	305*	430*	0,8*		

* Pozn.: Uvedené hodnoty jsou výsledky zkoušek na namletém vzorku

Výsledky chemického rozboru fluidních popílku potvrzují předpoklad o vyšším zastoupení volného CaO a SO³. Z pohledu měrného povrchu jsou u úletových popílků patrné výrazně vyšší hodnoty než u klasických vysokoteplotních úletových popílků. Dosažené hodnoty metodou dle Blaine jsou však pro tuto metodu příliš vysoké a mohou tak být nepřesné. Pro tento druh materiálu by byla vhodnější metoda BET. Tento parametr bude dále diskutován s ohledem na morfologii zrn. Počátek a doba tuhnutí jsou pak ovlivněny chemickým složením, kdy přítomnost volného CaO a SO³ dává předpoklad k téměř okamžitému nástupu hydratačních procesů. Požadavek normy ČSN EN 450-1 [N3] pro objemovou stálost byl i pro tyto popílků naplněn. Jeho maximální povolená hodnota 10 mm je vysoká.

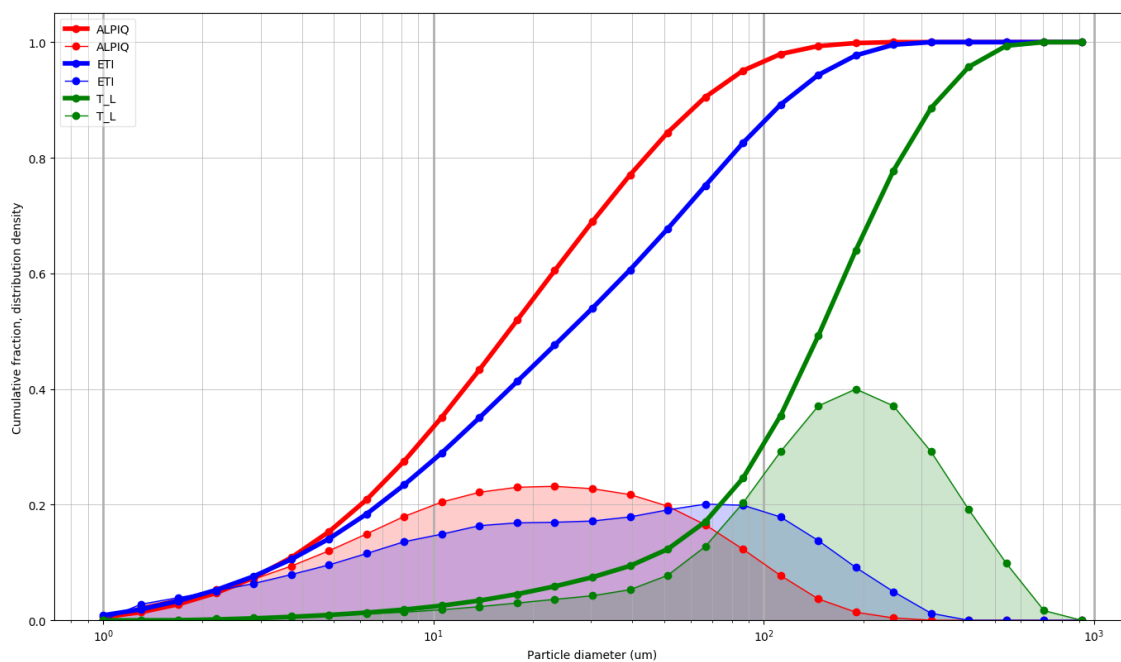
7.3.2. Granulometrie a morfologie zrn, mineralogické složení

Zkoušky granulometrie i morfologie zrn byly pro všechny analyzované popílků provedeny na vysušených vzorkách při 40 °C. Z granulometrie provedené pomocí laserového granulometru byla dále stanovena jemnost popílků dle normy ČSN EN 450-1 [N3], přičemž se jedná o hodnotu zůstatku na síti o velikosti oka 0,045 mm v % a tato hodnota by neměla překročit 40 % pro kategorii popílků N a 12 % pro kategorii popílků S.



Obr. 43: Fotografie zrn analyzovaných fluidních popílků ze SEM ((a) - ALPIQ, b) - ETI, c) - TŽ_L) - zvětšeno 1000 krát

Následující Obr. 44 zobrazuje křivky zrnitosti jednotlivých analyzovaných fluidních popílků. (ALPIQ, ETI, TŽ)



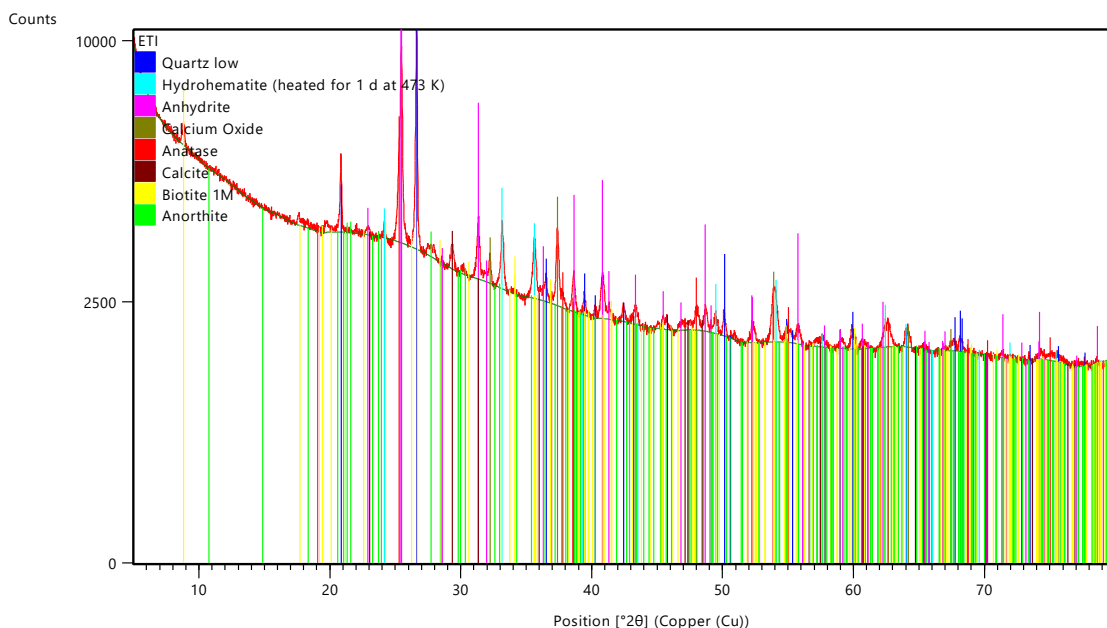
Obr. 44: Křivky zrnitosti analyzovaných fluidních popílků

Tab. 10: Hodnoty jemností analyzovaných fluidních popílků

Vlastnost	Materiál	ALPIQ	ETI	TŽ_L
Jednotky	%			
Jemnost	Výsledek	19,2	36,0	89,3

Morfologie zrn analyzovaných fluidních popílků podává obraz o výrazné pórovitosti a nesejnorodosti těchto zrn, což má za následek u úletových popílků vysoké hodnoty měrného povrchu. Výsledky jemnosti popílků stanovené z jejich granulometrie tento úsudek dále potvrzují, kdy je zřejmé, že hodnoty jemnosti nejsou ve stejné korelaci s měrným povrchem, jako je tomu u vysokoteplotních úletových popílků. Zejména nevhodná morfologie zrn je poté u fluidních popílků důvodem jejich časté zvýšené vodonáročnosti oproti popílkům vysokoteplotním.

Mineralogické složení bylo stanoveno za pomoci rentgenové difrakční analýzy (XRD) a oproti popílkům vysokoteplotním byla na úkor vysokoteplotních fází křemene (mullit) navíc detekována přítomnost zejména anhydritu a ostře přepáleného CaO a kalcitu jako karbonizovaného CaO a portlanditu. Dále byly opět detekovány minerály pocházející z nespálených složek uhlí jako jsou slídy a živce, což je patrné z přiloženého ilustrativního rentgenogramu na Obr. 5. Původ anhydritu a CaO, potažmo kalcitu a portlanditu je dán způsobem odsíření fluidních kotlů a rovněž nižší dosaženou teplotou spalování.



Obr. 45: Rentgenogram fluidního popílku Tisová

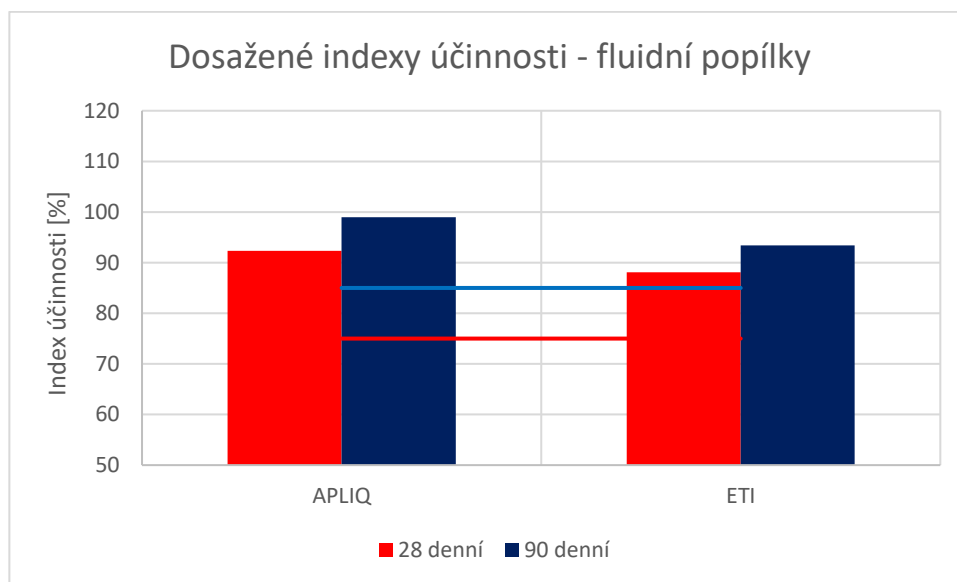
7.3.3. Index účinnosti

Index účinnosti analyzovaných fluidních popílků byl stanoven rovněž pro stáří 2, 7, 28, 56 a 90 dní podle normy ČSN EN 450-1. [N3] Vyrobená zkušební tělesa byla opět ihned po vyjmutí z formy (cca 24 hodin od výroby) vložena do vodní lázně. Pro všechny vyrobené malty byla rovněž stanovena jejich konzistence pomocí střešacího stolku dle normy ČSN EN 1015-3. [N14]

Následující Tab. 11 obsahuje všechny dosažené výsledky pouze pro úletové fluidní popílek, protože ložový popílek byl pro výrobu cementových trámečků příliš hrubý a jeho index účinnosti bude sledován až z pohledu jeho mechanické aktivace.

Tab. 11: Dosažené hodnoty konzistence malty a indexů účinnosti analyzovaných fluidních popílků

Materiál	Vlastnost	Rozlití	Index účinnosti				
			2 denní	7 denní	28 denní	56 denní	90 denní
-	Jednotky	mm	%				
REF	Výsledek	170	-	-	-	-	-
ALPIQ		110	83,7	86,2	92,3	93,6	99,0
ETI		100	75,1	75,7	88,1	90,5	93,4



Obr. 46: Grafické zobrazení hodnot dosažených indexů účinnosti analyzovaných fluidních popílků

Hodnoty indexu účinnosti fluidních úletových popílků stanovené dle normy ČSN EN 450-1 [N3] dosahují pro stáří 28 i 90 dní vyhovující čísel. Za povšimnutí stojí zejména hodnoty indexů účinnosti v ranných dnech zrání. Naopak celkový průběh vývoje indexů

účinnosti až do stáří 90 dnů poukazuje na dřívější vyčerpání potenciálu fluidního popílku, než je tomu u popílků vysokoteplotních, kde rozdíl hodnot indexů účinnosti mezi stářími 28 a 90 dní je výraznější. U obou analyzovaných fluidních popílků je však třeba brát v potaz jejich výrazný negativní dopad na konzistenci malty a je zřejmé, že pro praktické použití bude potřeba vyšších dávek záměsové vody, což sebou bude nejspíše přinášet pokles mechanických parametrů.

7.4. Zhodnocení výsledků Etapy I

Výsledky dosažené v rámci řešení Etapy I experimentální části disertační práce, která se zabývala důkladnou analýzou vstupních surovin, podávají ucelený obraz o základních chemických, fyzikálních a mechanických parametrech vybraných surovin – popílků a cementu. Rovněž byla důkladně zkoumána morfologie zrn jednotlivých popílků, kde byl potvrzen předpoklad téměř dokonale kulovitých zrn vysokoteplotních úletových popílků, a naopak byla nalezena přímá spojitost mezi vysokými hodnotami měrných povrchů fluidních popílků a jejich tvarem zrn. Tyto popílky disponují značně porézními zrny, což sebou dále přináší negativní dopad na výslednou vodonáročnost, ačkoliv hodnoty jemnosti dle normy nejsou vyšší, než je tomu například u vysokoteplotního úletového popílku produkce elektrárny Chvaletice.

8. DOSAŽENÉ VÝSLEDKY ETAPY II

Při procesu spalování uhlí v tepelných elektrárnách a teplárnách vzniká řada pevných (popílky, popeloviny, energosádrovce) a plynných (SO_2 a NO_x) sekundárních produktů. Plynný produkt tvořený SO_2 je zachycován v odsiřovacích procesech. Samotný proces denitrifikace kouřových plynů byl detailně popsán v samostatné podkapitole teoretické části této disertační práce.

Etapa II experimentální části disertační práce je proto podrobně zaměřena na dopad procesu selektivní nekalytické redukce oxidu dusíku (SNCR), který je aktuálně nejčastější způsob procesu odstranění NO_x z kouřových plynů používaný na území ČR. Při tomto procesu je vodný roztok amoniaku, případně močovina nebo kyanomočová kyselina dávkován nástřikem přímo do kouřových plynů, kterými je však unášen rovněž vysokoteplotní úletový popílek. Aplikované amoniakální soli jsou pak vázány přímo na zrna popílku.

8.1. Popílek po procesu SNCR

Z výše psaného je zřejmé, že vlastnosti popílku kontaminovaného solemi amoniaku po procesu SNCR mohou být ovlivněny, proto je tato teorie dále studována. Všechny parametry popílků vyjma chemických analýz, byly stanoveny pomocí zařízení Centra AdMaS. Chemické analýzy popílků poté byly provedeny externí odbornou chemickou laboratoří společnosti LABTECH s.r.o.

Zkoušky byly provedeny na těchto vysokoteplotních popílkách:

- Vysokoteplotní úletový popílek Opatovice – EOP
 - Elektrárny Opatovice, a.s.
- Vysokoteplotní úletový popílek Nováky – ENO
 - Slovenské elektrárne, a.s.

Z obou jmenovaných zdrojů byly analyzované popílky před uplatněním procesu SNCR i po jeho aplikaci, a to rovněž s jejich rozdílnou kontaminací amoniakem.

8.1.1. Chemické složení a fyzikální parametry

Samotný požadavek na maximální množství amonných solí nebo dalších sloučenin spojených se SNCR není v normě ČSN EN 450-1 [N3] zakotven. Producenty analyzovaných popílků byly však poskytnuty údaje o kontaminaci jednotlivých popílků amoniakem.

Tab. 12: Výsledky vybraných chemických a fyzikálních parametrů popílků před a po procesu SNCR

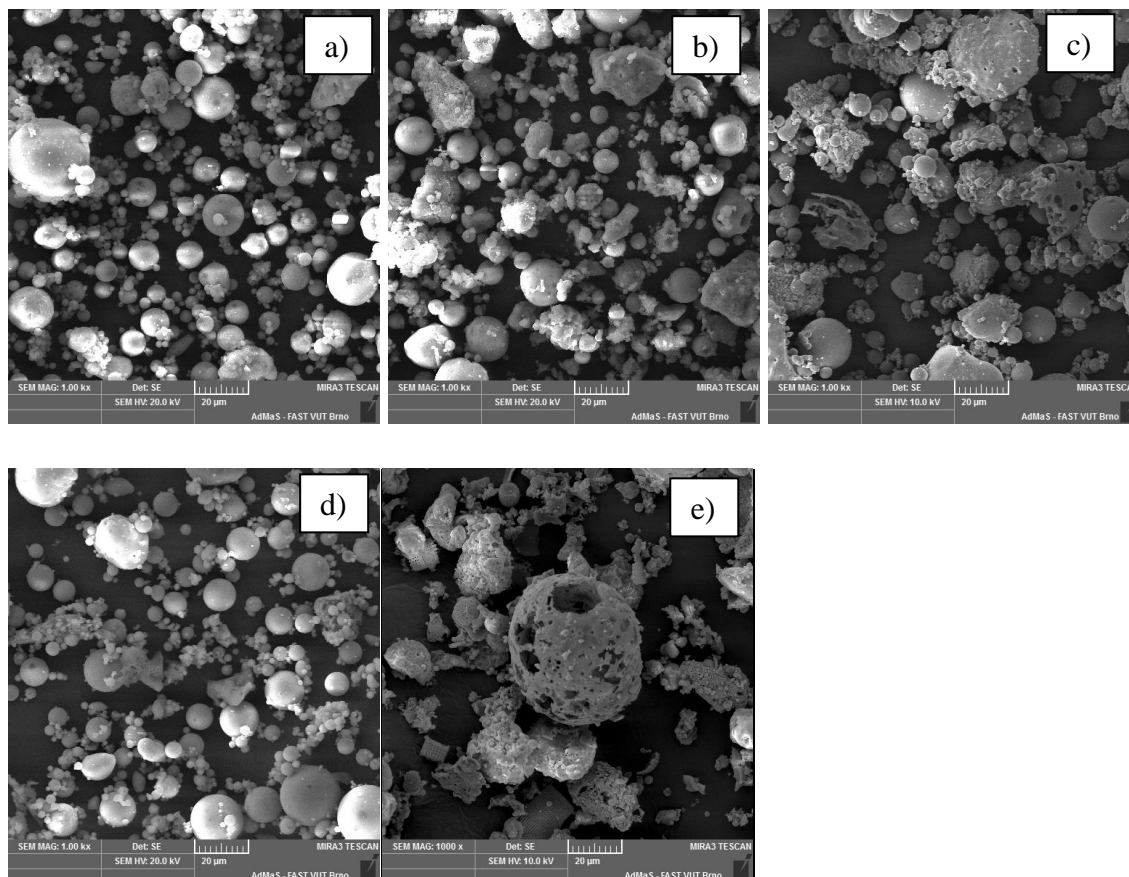
Materiál	Vlastnost	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	CaO volný	Ztráta žiháním	Soli amoniaku
-	Jednotky	%						ppm
EOP	Výsledek	51,6	30,0	8,8	2,91	0,06	1,3	-
EOP_75		-	-	-	-	-	1,6	75
EOP_175		-	-	-	-	-	1,6	175
ENO		48,3	16,3	9,55	6,29	0,01	1,4	-
ENO_250		-	-	-	-	-	1,7	250
Materiál	Vlastnost	Měrná hmotnost	Měrný povrch	Počátek tuhnutí	Doba tuhnutí	Objemová stálost		
-	Jednotky	g/cm ³	m ² /kg	min	min	mm		
EOP	Výsledek	2,18	318	415	650	0,2		
EOP_75		2,18	356	340	555	0,1		
EOP_175		2,19	425	305	420	0,3		
ENO		2,13	356	400	620	0,2		
ENO_250		2,13	652	300	405	0,2		

Z výsledků měrného povrchu a následně stanovené doby tuhnutí je patrné, že popílků kontaminované amonnými solemi po procesu SNCR vykazují odlišné parametry jako popílků ze stejného zdroje před zavedením procesu denitrifikace kouřových plynů.

Dosažené výsledky poukazují na zvyšující se měrný povrch se vzrůstající kontaminací popílku amonnými solemi a společně s tím klesá doba tuhnutí cementopopílkové pasty.

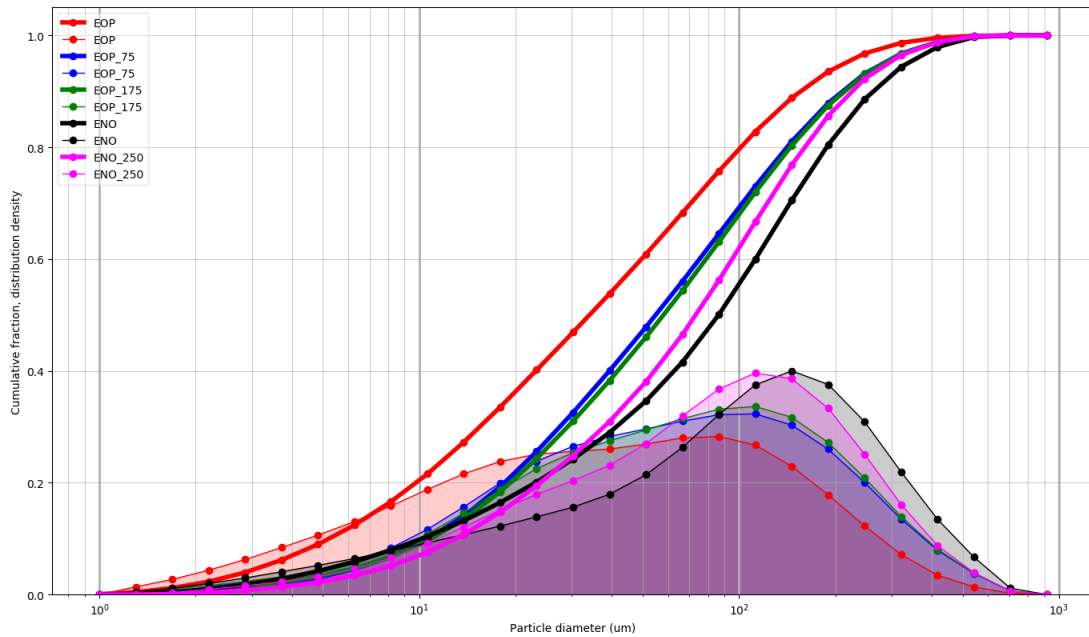
8.1.2. Granulometrie a morfologie zrn

Tyto zkoušky byly provedeny a vyhodnoceny stejně jako v předchozí kapitole experimentální části disertační práce. Zejména detailní pohled na morfologii zrn před a po procesu denitrifikace metodou SNCR, by mohl podat obraz k dosaženým výsledkům ovlivnění měrného povrchu a dob tuhnutí tímto procesem.



Obr. 47: Zrna úletových popílků před a po procesu SNCR ze SEM ((a) - EOP, b) - EOP_75, c) - EOP_175, d) - ENO, e) - ENO_250) - zvětšeno 1000 krát

Následující Obr. 48 zobrazuje křivky zrnitosti jednotlivých analyzovaných popílků kontaminovaných solemi amoniaku. (EOP, EOP_75, EOP_175, ENO, ENO_250)



Obr. 48: Křivky zrnitosti analyzovaných popílků před a po procesu SNCR

Tab. 13: Hodnoty jemností analyzovaných popílků před a po procesu SNCR

Vlastnost	Materiál	EOP	EOP_75	EOP_175	ENO	ENO_250
Jednotky	%					
Jemnost	Výsledek	42,8	56,2	57,8	68,4	65,7

Fotografie zrn popílků po procesu SNCR podávají jednoznačný obraz o dopadu denitrifikace na jejich morfologii. Je zřejmé, že tento proces denitrifikace má přímý dopad na zrna popílku, která po procesu již nevykazují téměř stejnorodý a dokonale kulovitý zesklenný povrch, ale jedná se o zastoupení spíše většího počtu deformovaných zrn nebo jejich úlomků, které pak dále tvoří shluky. V některých případech byl přímo nalezen důkaz o rozpadu jinak kulovitého zrna. Tento trend je zřejmě daný aplikací redukčního činidla, které je nejčastěji vstřikováváno přímo do prostor spalovací komory o teplotě 900 až 1100 °C. Díky této aplikaci lze očekávat částečnou změnu morfologie popílku unášeného spalinami během náhlého teplotního šoku. Náhlý teplotní šok, může způsobit explozi a částečný rozpad zrn popílku a následné shlukování těchto drobných částic.

Tento efekt byl prakticky prokázán i za pomoci stanovení granulometrie a jemnosti analyzovaných popílků. Ačkoliv měrný povrch popílků po denitrifikačním procesu má stoupající tendenci, samotná stanovená jemnost může vykazovat opačný trend. To je nejspíše způsobeno následným shlukováním rozpadlých zrn, které se z hlediska

granulometrie poté tváří jako celek, ačkoliv jejich značná poréznost navyšuje hodnotu měrného povrchu. Díky výše psanému lze však předpokládat, že tento částečně negativní dopad na hodnoty jemnosti, je dán pouze metodikou jeho stanovení a nebude mít přílišný dopad na požadavky normy ČSN EN 450-1. [N3]

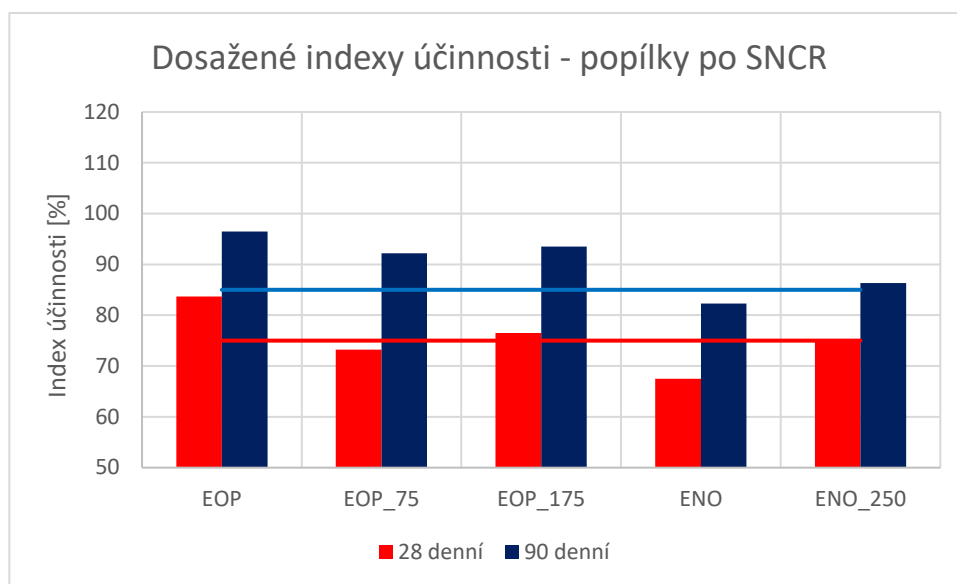
8.1.3. Index účinnosti

Dopad procesu denitrifikace kouřových plynů metodou SNCR na index účinnosti analyzovaných vysokoteplotních popílků byl stanoven pro stáří 2, 7, 28, 56 a 90 dní podle normy ČSN EN 450-1. [N3] Vyrobená zkušební tělesa byla ihned po vyjmutí z formy (cca 24 hodin od výroby) vložena do vodní lázně. Pro všechny vyrobené malty byla rovněž stanovena jejich konzistence pomocí střešacího stolku dle normy ČSN EN 1015-3. [N14]

Následující Tab. 14 obsahuje všechny dosažené výsledky.

Tab. 14: Dosažené hodnoty rozlití malty a indexů účinnosti analyzovaných popílků před a po procesu SNCR

Materiál	Vlastnost	Rozlití	Index účinnosti				
			2 denní	7 denní	28 denní	56 denní	90 denní
-	Jednotky	mm	%				
EOP	Výsledek	165	56,0	67,0	83,7	84,6	96,5
EOP_75		160	61,7	68,8	73,2	80,1	92,2
EOP_175		140	66,3	74,2	76,5	81,2	93,5
ENO		155	59,4	61,2	67,5	76,9	82,3
ENO_250		135	66,2	69,5	75,1	80,1	86,3



Obr. 49: Grafické vyhodnocení dosažených indexů účinnosti analyzovaných popílků před a po procesu SNCR

Dosažené hodnoty indexů účinnosti podávají obraz o zvýšené aktivitě popílků po procesu SNCR v prvních dnech zrání. Tento trend je nejspíše dán narušenou strukturou zrn, což bylo prokázáno na snímcích ze SEM, kdy se narušená zrna zřejmě dříve začínají účastnit hydratačních procesů. Z toho vyplývá, že použitelnost popílků po procesu SNCR, by z hlediska dopadu denitrifikačního procesu na mechanické parametry výsledných malt dle ČSN EN 450-1 [N3], neměla být negativně ovlivněna.

8.2. Dopad procesu SNCR na betonovou směs

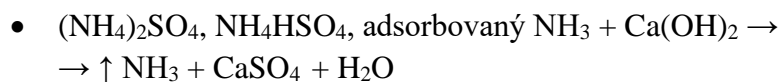
Pro stanovení dopadu procesu SNCR na betonovou směs byla provedena reálná poloprovozní výroba betonů s popílky kontaminovanými amonnými solemi. Poloprovozní ověření bylo provedeno na betonárně Semtín II společnosti CEMEX Czech Republic, s.r.o. a pro výrobu byl použit popílek z elektrárny Opatovice o koncentraci amoniaku cca 135 ppm. Na vyrobeném betonu byly sledovány základní mechanické a fyzikální parametry v čerstvém i ztvrdlém stavu a dále dopad použití kontaminovaného popílku na limity amoniaku v ovzduší z pohledu nezávadnosti pracovního prostředí.

8.2.1. Poloprovozní ověření výroby

Výroba betonové směsi probíhala na betonárně Semtín II společnosti CEMEX Czech Republic, s.r.o. a celý proces výroby byl řízen automatickým softwarem. Betonárna disponuje míchacím zařízením AMMANN ELBA, typ EMS 1000F. V rámci

ověření byl vyroben beton pevnostní třídy C 25/30 v objemu 3,5 m³. Betonová směs byla po výrobě přemístěna do automixu, který po celou dobu měření vlastností čerstvého betonu směs pomalu promíchával.

Z pohledu poloprovozního ověření byl kladen důraz zejména na možné negativní dopady na kvalitu ovzduší pracovního prostředí při použití popílku po procesu denitrifikace. Tento parametr byl sledován z důvodu chemické reakce při použití popílku po procesu SNCR při styku s cementem. Během této chemické reakce dochází téměř k okamžitému uvolňování plynného amoniaku při smíchání těchto popílků s cementem a vodou. Při hydrataci slínekových minerálů přítomných v portlandském cementu vzniká hydroxid vápenatý Ca(OH)₂, který zvyšuje pH prostředí k hodnotám pH ≥ 11. Ve vodném alkalickém prostředí se z materiálu pak začíná uvolňovat amoniak dle následující rovnice.



Stanovení kvality ovzduší během procesu výroby a následně i během procesu ukládání betonové směsi s kontaminovaným popílkem bylo provedeno Zdravotním ústavem se sídlem v Ústí nad Labem.

Pro porovnání byla vyrobena betonová směs o stejném objemu a stejné pevnostní třídě zcela bez popílku. Na vyrobených betonech byly sledovány základní parametry v čerstvém a ztvrdlém stavu a hodnota výluhu amonných iontů ze ztvrdlého betonu v různém časovém horizontu.

Přesné složení sledovaných betonů a dosažené hodnoty sledovaných parametrů v čerstvém stavu obsahuje následující Tab. 15.

Tab. 15: Složení zkušebních betonových směsí a dosažené vlastnosti ČB

Označení	C 25/30_BEZ	C 25/30_Popílek
Složení	kg/m ³	
CEM I 42,5 R Prachovice	260	230
Popílek Opatovice	-	120
DTK 0/4 mm Čeperka	930	855
HTK 8/16 mm Čeperka	950	875
Voda	170	186
Plastifikační přísada Cemex Isoplast 1235	1,4	1,4
Plastifikační přísada Cemex Isoflex 833	1,2	1,2
Vlastnosti ČB		
Sednutí [mm] v čase 5 minut od výroby	180	190
Sednutí [mm] v čase 30 minut od výroby	170	150
Sednutí [mm] v čase 60 minut od výroby	150	140

Během procesu míchání bylo prokázáno, že pro dosažení požadovaného stupně konzistence není i přes negativní dopad procesu SNCR na morfologii zrn popílku, potřeba nijak výrazně navyšovat dávku záměsové vody. Je tedy zřejmé, že z hlediska návrhu betonových směsí dle normy ČSN EN 206+A2 [N1], případně ČSN P 73 2404 [N2] nebude potřeba přístupu k návrhu betonů s popílky po procesu denitrifikace nijak upravovat.

Zkouška sednutí kužele čerstvého betonu v čase poukázala na mírně rychlejší pokles konzistence oproti betonové směsi bez popílku. Tento pokles však není nijak významný, ale z hlediska praxe mu bude možné zřejmě efektivně předcházet správným návrhem a dávkováním plastifikačních přísad.

Během procesu výroby byly zdravotním ústavem monitorovány hodnoty koncentrace amoniaku v prostředí. Výsledkům tohoto měření se podrobně věnuje podkapitola 8.2.4 této disertační práce.

8.2.2. Uložení betonové směsi

Vyrobená betonová směs s popílkem byla následně pomocí automixu dopravena na místo ukládky. Toto místo bylo v objektu areálu elektrárny Opatovice. Pro potřeby pokusu byl ve starém objektu obestavěn prostor pomocí OSB desek a tento prostor byl následně utěsněn. V tomto prostoru byla z betonové směsi vyrobené za použití popílku po procesu denitrifikace vybetonována podlaha. Celý prostor byl po dokončení ukládky uzavřen a utěsněn. Rozměry místnosti byly cca 3,7×3,7×2,7 metrů. Ilustrativní podmínky pokládky jsou vidět na následujících Obr. 50.



Obr. 50: Ukládka betonu s popílkem po procesu SNCR

Pro možnost odběru vzorku vzduchu pro analýzu obsahu amoniaku byly do prostoru místnosti umístěny odběrné trubičky. Tyto odběrné trubičky byly umístěny cca do středu místnosti ve výšce 130 cm od podlahy.

Z vyrobených betonových směsí byla dále zhotovena zkušební tělesa pro stanovení mechanických parametrů a čerstvé betonové směsi o objemu cca 5 litrů byly dále přemístěny do uzavíratelných plastových boxů, které byly společně s vyrobenými vzorky umístěny ve zrací komoře v areálu betonárny. Tyto uzavíratelné plastové boxy se vzorky betonů složily rovněž k následným odběrům vzorků pro stanovení koncentrace amoniaku.

8.2.3. Mechanické parametry ztvrdlého betonu

Vyrobená zkušební tělesa z obou směsí byla použita pro stanovení objemové hmotnosti ztvrdlého betonu dle normy ČSN EN 12390-7 [N27] a pro stanovení pevnosti betonu v tlaku dle ČSN EN 12390-3. [N28] Tyto parametry byly stanoveny ve stáří 28 a 90 dní a zkušební tělesa byla po celou dobu zrání umístěna ve zrací komoře o teplotě cca 21 °C a relativní vlhkosti 95 %. Následující tabulka obsahuje dosažené výsledky.

Tab. 16: Výsledky mechanických parametrů betonů bez a s popílkem po procesu SNCR

Označení	C 25/30_BEZ	C 25/30_Popílek
Vlastnost	Stáří 28 dní	
Objemová hmotnost ZB	2280	2240
Pevnost v tlaku ZB	36,7	36,1
Vlastnost	Stáří 90 dní	
Objemová hmotnost ZB	2280	2260
Pevnost v tlaku ZB	37,6	42,5

Výsledky dosažených pevností betonu v tlaku odpovídají předpokladu pro navrženou pevnostní třídu betonu a u receptury s popílkem je zřejmý očekávaný výraznější nárůst pevnosti mezi 28 a 90 dny oproti receptuře bez popílku.

8.2.4. Ekologický aspekt výroby a finální vlastnosti betonu

V případě práce s popílkem s obsahem amonných solí v podobě klasického nahrazování cementu při výrobě betonu, bude docházet k výskytu amoniaku ve velice nízkých koncentracích a předpokládá se, že na provozní podmínky výroby betonu použití tohoto materiálu nebude mít vliv. Podle nařízení vlády č. 361/2007/Sb, příloha 2, část A v platném znění [N24], kterým se stanoví podmínky pro ochranu zdraví při práci, jsou přípustné expoziční limity (PEL) a nejvyšší přípustné koncentrace (NPK-P) chemických látek za 8 hodin následující:

Tab. 17: Nejvyšší přípustné limity PEL a NPK-P pro amoniak

Látka	Číslo CAS	PEL	NPK-P
		mg/m ³	
Amoniak	7664-41-7	14	36

V Česku platí limity PEL (Přípustný Expoziční Limit) 14 mg/m³ a NPK-P (Nejvyšší Přípustné Koncentrace) 36 mg/m³. [N24] Kvalita ovzduší v obytných místnostech je řešena Vyhláškou Ministerstva zdravotnictví ČR č. 6/2003 Sb. [N25], kterou se stanoví limity chemických, fyzikálních a biologických ukazatelů pro vnitřní prostředí obytných místností staveb, a tato koncentrace činí 200 µg/m³.

Během poloprovozního ověření Zdravotní ústav se sídlem v Ústí nad Labem stanovil, dle platných metodik v souladu s nařízením vlády, koncentraci amoniaku

v ovzduší. Tato koncentrace byla z pohledu výroby stanovena u míchacího zařízení během výroby betonové směsi. Dále byla sledována koncentrace během procesu ukládání betonové směsi v dříve popsaných prostorách a poté po 7 a 14 dnech, odběrem vzduchu z uzavřeného prostoru, kde byla betonová směs uložena. Stejně měření probíhalo i při odběru vzorku vzduchu s uzavřených nádob se vzorky betonu. Výsledky stanovení obsahuje následující Tab. 18 a tyto výsledky jsou převzaty z protokolu o měření od Zdravotního ústavu se sídlem v Ústí nad Labem – Centrum hygienických laboratoří.

Tab. 18: Stanovené hodnoty koncentrace amoniaku v ovzduší

Místo odběru	Označení betonu	Objem odebraného vzorku [l]	Koncentrace amoniaku v ovzduší [mg/m ³]
Míchací zařízení – osobní odběr	C 25/30_BEZ	6,75	0,133
	C 25/30_popílek	13,69	0,647
Míchací zařízení – osobní krátkodobý odběr	C 25/30_BEZ	1,25	0,400
	C 25/30_popílek	2,05	0,829
Utěsněná místnost pokládky – osobní odběr	C 25/30_popílek	9,00	4,044
Utěsněná místnost pokládky – statický krátkodobý odběr	C 25/30_popílek	7,34 – po ukládce	0,045
	C 25/30_popílek	7,36 – po 7 dnech	< 0,033 PMS
	C 25/30_popílek	7,44 – po 14 dnech	< 0,032 PMS
Uzavíratelná nádoba s betonem – statický krátkodobý odběr	C 25/30_BEZ	5,56 – po 7 dnech	1,960
	C 25/30_popílek	6,17 – po 7 dnech	25,283
	C 25/30_BEZ	5,56 – po 14 dnech	3,723
	C 25/30_popílek	6,17 – po 14 dnech	63,695

Interpretované výsledky zdravotním ústavem prokazují na výrazně vyšší koncentraci amoniaku v ovzduší při výrobě betonu s popílkem kontaminovaným amoniakálními solemi než u betonu zcela bez popílku. Všechny naměřené hodnoty během procesu výroby a pokládky jsou však řádově nižší než limitní hodnoty PEL. Nejvyšší hodnoty koncentrace amoniaku v ovzduší jsou zřejmé při pokládce betonové směsi s popílkem po procesu SNCR v uzavřené místnosti. I tyto naměřené hodnoty jsou však znatelně nižší než limitní hodnoty PEL a dále je patrné, jak koncentrace amoniaku v ovzduší i v této uzavřené místnosti s časem od pokládky velmi výrazně klesá.

Jako problematické se tak ze stanovených výsledků mohou jevit pouze hodnoty stanovení v uzavíratelných nádobách při jejich uložení ve zrací komoře, kde nedochází k zcela žádnému odvětrání emitovaného amoniaku do ovzduší. To jsou však prakticky nedosažitelné podmínky.

Dále byly provedeny zkoušky vyluhování amonných iontů z již ztvrdlého betonu. Pro tento účel byl ve stáří 2, 7 a 28 dní od výroby analyzován vodný roztok v poměru 1:10 namletého vzorku betonu s popílkem a destilované vody. Tato analýza byla provedena laboratoří společnosti LABTECH s.r.o. a výsledky ze stanovení jsou uvedeny v následující Tab. 19. Vzorky byly připraveny nadržemím a následným pomletím vzorku betonu, který byl před zkouškou uložen v laboratorním prostředí.

Tab. 19: Výsledky stanovení obsahu amonných iontů ve vodném výluhu z betonu s popílkem po procesu SNCR

Stáří vzorku	Označení betonu	Obsah amonných iontů [mg/l]
2 dny	C 25/30_popílek	7,50
7 dní	C 25/30_popílek	3,11
28 dní	C 25/30_popílek	0,14

Výsledky stanovení vyluhovatelnosti amonných iontů z betonu vyrobeného s popílkem po procesu denitrifikace prokazují velmi výrazný trend poklesu detekovaných amonných iontů se stářím betonu. Z výsledků lze říci, že hodnota po 28 dnech je cca 50 krát menší než hodnota stanovená ve stáří betonu 2 dny.

8.3. Metodická příručka pro používání popílku po procesu SNCR

Nabyté výsledky kapitoly zabývající se dopadem procesu SNCR na popílek a jeho následnou použitelnost pro výrobu betonu, byly podkladem pro tvorbu metodické příručky pro producenty popílku a zejména výrobce betonových směsí s popílkem, který prošel procesem SNCR. Zpracovatelé této metodické příručky jsou vyjma mé osoby a mého školitele prof. Ing. Rudolfa Helu, CSc. navíc zástupci společnosti Asociace pro využití energetických produktů, z.s. a zástupci producentů a obchodníků s těmito popílkem.

Cílem metodické příručky je seznámení distributorů popílků a výrobců betonových směsí s možnými negativy, které proces SNCR přináší a zároveň stanovit hranici koncentrace amonných solí v popílků a metody její stanovení pro bezpečné využívání a práci s těmito popílků. **Navrhujeme limitní hodnotu pro bezpečné použití v betonech 150 mg/kg.** Použití vyšších koncentrací NH_4^+ iontů v popílků je možné, ale je nutné významně snižovat dávkování a upravit receptury betonů. Na základě konkrétní zvýšené hodnoty lze dle Přílohy B této příručky a grafů v ní uvedených, dopočítat maximální množství uvolněného plynného amoniaku při daných vstupních obsazích koncentrace amonných iontů a celkového obsahu popílků v betonu. [N36]

Tato příručka není nijak legislativně závazný dokument, pokud není smluvně uvedeno jinak.

9. DOSAŽENÉ VÝSLEDKY ETAPY III

Výsledky této etapy jsou logicky členěny na oblast mechanické aktivace hrubozrnných ložových popílků a chemické aktivace vysokoteplotních popílků přidavkem popílků fluidních. Pro oba způsoby aktivace byly použity suroviny, jejichž podrobnou analýzu obsahují podkapitoly řešení Etapy I experimentální části této disertační práce.

9.1. Mechanická aktivace popílků

Pro aktivaci mletím byly zvoleny ložové popílků, někdy označované jako škvára, z provozovny elektrárny Třebovice a z provozu Třineckých železáren. V obou případech se jedná o suroviny pro výrobu betonových směsí nevyužívané, protože ve své surové podobě nenaplnějí požadavky normy ČSN EN 450-1. [N3]

Provedené chemické rozbory obou surovin však podávají obraz o možné pucolánové aktivitě stejně jako je tomu v případě klasických vysokoteplotních nebo fluidních úletových popílků. U ložového vysokoteplotního popílku Třebovice byla zaznamenána vyšší hodnota ztráty žíháním. Předpokladem je však společné mísení obou surovin tak, aby z obou bylo maximálně využito jejich potenciálu, a naopak došlo k potlačení negativ, jako je například zmíněná vysoká hodnota ztráty žíháním nebo vyšší hodnota volného vápna a SO_3 v případě fluidního ložového popílku. Kapacity obou produktů, jejichž uplatnění je aktuálně malé a ve velké míře se pouze skládají, jsou tak pro budoucí využití zajištěny. Následující podkapitoly této etapy popisují vývoj výsledné směsi mechanicky aktivovaných popílků.

9.1.1. Proces mletí

V laboratorních podmínkách byl proces mletí simulován pomocí laboratorního kulového mlýnu. Předpokladem přenositelnosti do praxe je v co nejvyšší možné míře využití stejných postupů výroby.

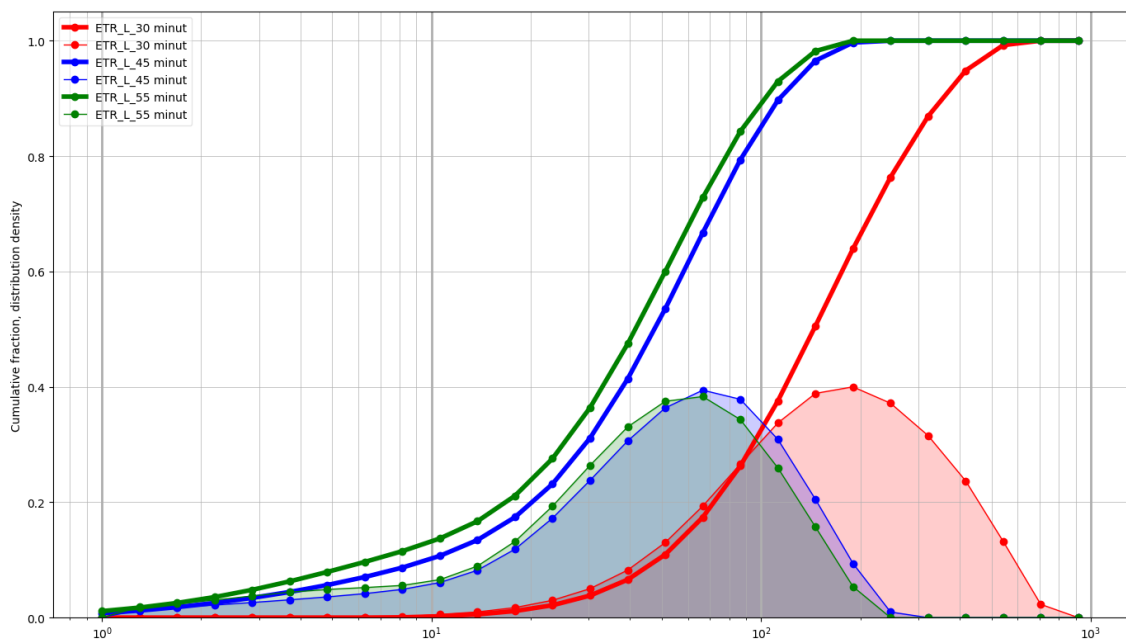
Nejprve bylo nutné pro oba zdroje ložových popílků nalézt vhodné mlecí parametry a následně na namletém produktu odzkoušet zejména jeho index účinnosti, který bude podávat obraz o možnosti jejich využití.

Následující tabulka obsahuje parametry mletí a dosažené výsledky měrného povrchu na základě těchto parametrů mletí.

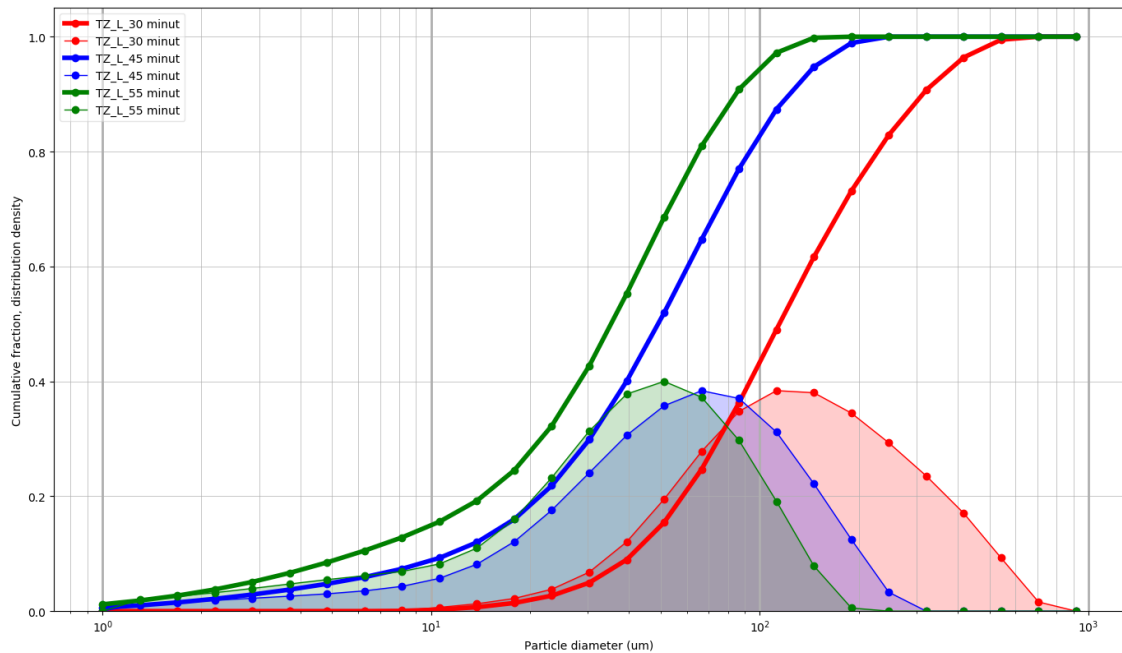
Tab. 20: Hodnoty měrného povrchu a jemnosti mletých popílků

Produkt	Parametry mletí	Měrný povrch [m ² /kg]	Jemnost [%]
ETR_L	15 minut / 49 otáček/min	neměřeno – hrubé	neměřeno – hrubé
	30 minut / 49 otáček/min	355	91,2
	45 minut / 49 otáček/min	420	51,9
	55 minut / 49 otáček/min	438	45,0
TŽ_L	15 minut / 49 otáček/min	neměřeno – hrubé	neměřeno – hrubé
	30 minut / 49 otáček/min	308	87,7
	45 minut / 49 otáček/min	433	53,4
	55 minut / 49 otáček/min	451	37,2

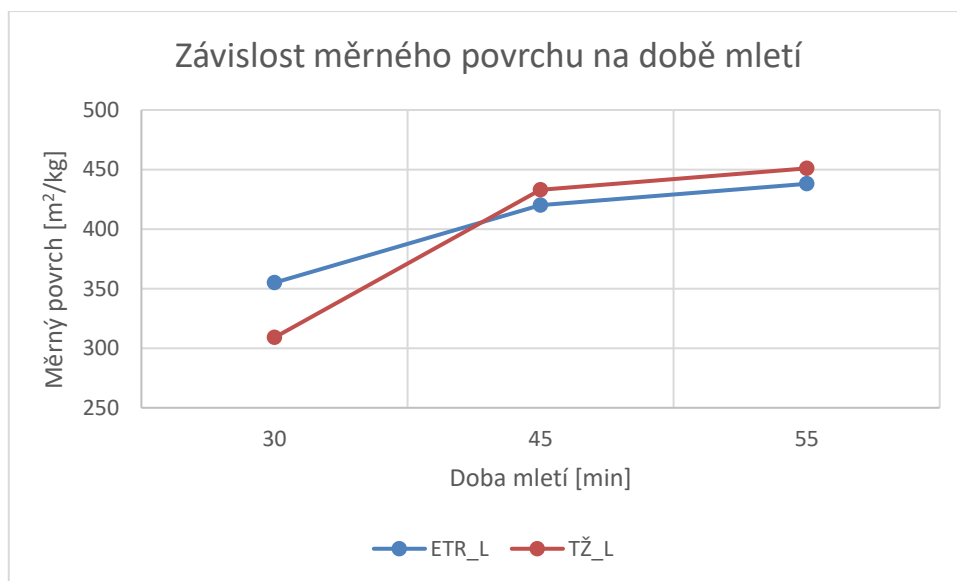
Výsledky jednoznačně prokazují nepřímou úměru doby mletí na nárůstu měrného povrchu aktivovaných popílků. Jako pozitivní lze poté hodnotit, že oba analyzované ložové popílků lze mlet na stejný mlecí cyklus pro dosažení srovnatelných měrných povrchů a vyhovující jemnost z pohledu požadavků normy ČSN EN 450-1. [N3]



Obr. 51: Křivky zrnitosti v závislosti na procesu mletí popílku ETR_L



Obr. 52: Křivky zrnitosti v závislosti na procesu mletí popílku TŽ_L



Obr. 53: Závislost měrného povrchu popílků na době mletí

Na Obr. 53 je zobrazena účinnost mletí, přičemž je zřejmé, že s rostoucím časem se účinnost mletí snižuje. Tento trend je obecně známý i pro mletí jiných příměsí nebo cementů a dosažení vysokého měrného povrchu je ekonomicky velmi náročné a technicky složitě proveditelné, protože při mletí na vysoký měrný povrch se již začínají jednotlivé částice díky svému povrchovému napětí shlukovat a proces mletí je tak dále výrazně omezen.

9.1.2. Fyzikálně-mechanické parametry mechanicky aktivovaných popílků

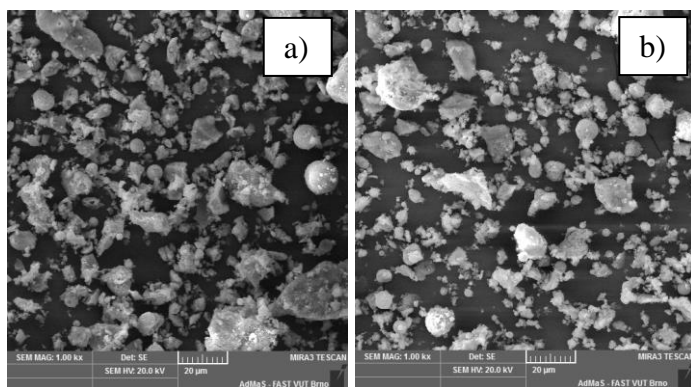
Nejdříve bylo třeba ověřit základní fyzikální a mechanické parametry dílčích mechanicky aktivovaných popílků, aby poté mohlo dojít ke správnému návrhu výsledné aktivované směsi tvořené z těchto dvou vstupních surovin.

Mleté ložové popílky byly podrobeny stejným zkouškám jako dříve klasické vysokoteplotní popílky. Těmto zkouškám byly podrobeny až popílky po finálním procesu mletí, tedy po mletí 55 minut při 49 otáčkách za minutu na laboratorním kulovém mlýnu. Následující tabulka obsahuje všechny dosažené fyzikální i mechanické parametry.

Tab. 21: Vybrané fyzikální a mechanické parametry mletých popílků

Materiál	Vlastnost	Měrná hmotnost	Měrný povrch	Počátek tuhnutí	Doba tuhnutí	Objemová stálost
-	Jednotky	g/cm ³	m ² /kg	min	min	mm
ETR_L	Výsledek	2,49	438	355	420	2,2
TŽ_L		2,75	451	285	365	3,5
Materiál	Vlastnost	Rozlití	Index účinnosti			
			7 denní	28 denní	90 denní	
-	Jednotky	mm	%			
REF	Výsledek	175	-	-	-	
ETR_L		155	69,2	76,6	84,8	
TŽ_L		170	80,7	84,5	91,9	

Z výsledků indexů účinnosti je patrný značný potenciál mechanicky aktivovaných ložových popílků. Oba mleté ložové popílky vykazují dostatečné hodnoty indexů účinnosti z pohledu normy a tyto hodnoty jsou srovnatelné s hodnotami klasických vysokoteplotních úletových popílků. Dříve stanovená vyšší hodnota ztráty žiháním u ložového popílku Třebovice se při výrobě cementových trámečků negativně projevila na vyšší vodonáročnosti, a tím na poklesu konzistence při zachování stejného vodního součinitele pro všechny směsi. Mírný pokles konzistence u malty s mletým ložovým popílkem z Třineckých železáren je poté spojen se samotnou morfologií zrn fluidních popílků a dále s narušením zrn procesem mletí, kdy morfologie mletých popílků je značně odlišná od morfologie zrn klasických vysokoteplotních úletových popílků. Toto tvrzení je dále podloženo fotkami zrn mletých popílků ze SEM.



Obr. 54: Fotografie zrn mletých popílků ze SEM ((a) - ETR_L, b) - TŽ_L) - zvětšeno 1000 krát

Následující podkapitoly se budou na základě pozitivních dosažených výsledků zabývat návrhem směsi složené z obou těchto vstupních surovin a jejími finálními parametry.

9.1.3. Návrh a vlastnosti výsledné aktivované směsi popílků

Na základě dosažených výsledků pro jednotlivé ložové popílků a jejich možnosti produkce byl zvolen vzájemný poměr mísení 60:40 %, tedy 60 % vysokoteplotního popílku (škváry) z produkce elektrárny Třebovice a 40 % ložového fluidního popílku z produkce Třineckých železáren. Výsledná směs byla pro potřeby disertační práce označena zkratkou SMAP – Směs mechanicky aktivovaných popílků.

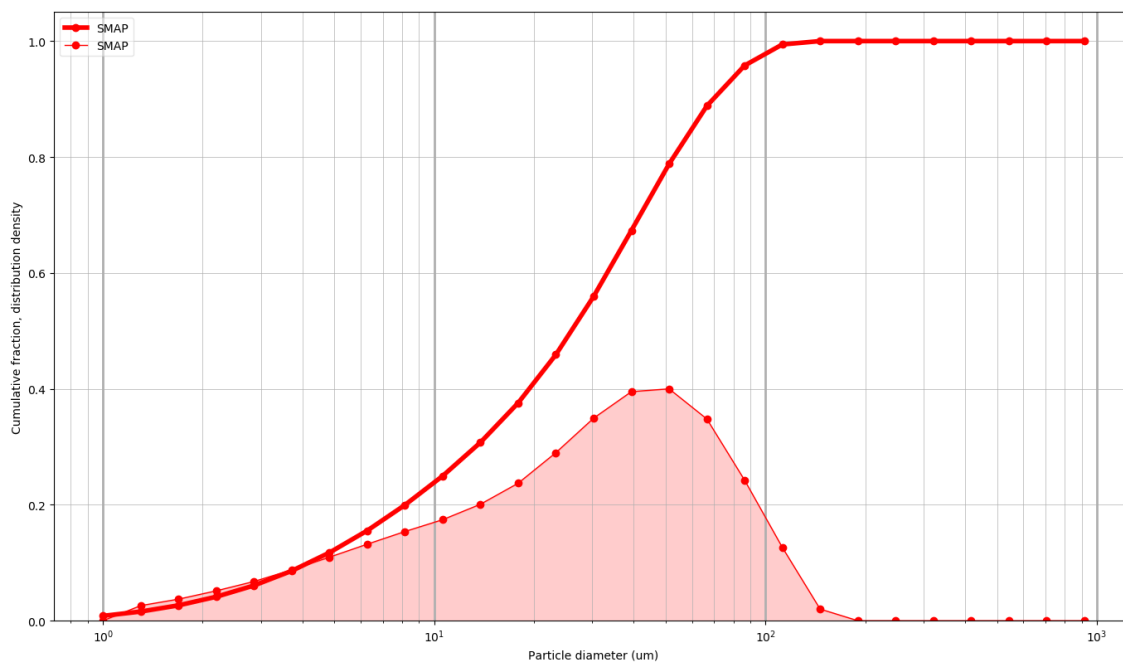
Vstupní suroviny, vysušené při teplotě 40 °C, byly v tomto poměru smíchané a společně mleté dle dříve stanoveného mlecího cyklu. Následně byla výsledná směs aktivovaných popílků podrobena všem důležitým zkouškám z pohledu požadavků normy ČSN EN 450-1. [N3]

Dosažené výsledky obsahuje následující Tab. 22. Pro přesnost byly opětovně zkoušky provedeny i na CEM I 42,5 R a tyto výsledky rovněž Tab. 22 obsahuje.

Tab. 22: Výsledky vybraných chemických, fyzikálních a mechanických parametrů CEM I 42,5 R a směsi SMAP

Materiál	Vlastnost	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	CaO volný	Ztráta žháním
-	Jednotky	%						
CEM I	Výsledek	19,5	4,9	3,45	62,17	2,97	-	3,3
SMAP		52,5	18,6	6,86	9,02	0,08	2,81	3,2
Materiál	Vlastnost	Měrná hmotnost	Měrný povrch / jemnost	Počátek tuhnutí	Doba tuhnutí	Objemová stálost		
-	Jednotky	g/cm ³	m ² /kg / %	min	min	mm		
REF	Výsledek	3,10	402	220	325	0,6		
SMAP		2,66	408 / 33,6	315	405	2,6		
Materiál	Vlastnost	Rozlití	Index účinnosti					
			7 denní	28 denní	90 denní			
-	Jednotky	mm	%					
REF	Výsledek	180	-	-	-			
SMAP		175	72,9	77,3	89,5			

Dosažené výsledky prokazují, že zvolený mlecí cyklus dává požadované výsledky jemnosti. Při podrobné analýze výsledků selektivního mletí jednotlivých ložových popílků a výsledků jejich společného mletí v poměru mísení 60:40 %, lze však spatřit nesoulad v dosaženém měrném povrchu a jemnosti popílku. Při selektivním mletí jednotlivých ložových popílků bylo dosaženo vyššího měrného povrchu při větší hodnotě jemnosti, než je tomu při jejich společném mletí. Z toho lze soudit, že zrna jednoho druhu popílku se melou snadněji na úkor druhého a při společném mletí nedochází zřejmě k tak výrazné tvorbě shluků jednotlivých úlomků zrn popílků jako v případě selektivního mletí. Tato teorie o vytváření shluků úlomků při selektivním mletí by vysvětlovala vyšší hodnotu měrného povrchu a neodpovídající jemnost. Na následujícím grafu je znázorněna výsledná křivka zrnitosti SMAP.



Obr. 55: Výsledná křivka zrnitosti směsi SMAP

9.1.4. Vyhodnocení výsledných parametrů směsi

Směs mechanicky aktivovaných ložových popílků byla navržena za účelem jejího využití v souladu s normou ČSN EN 450-1 [N3], tedy jako popílek použitelný pro výrobu betonu. Dosažené výsledky chemických, fyzikálních i mechanických parametrů navržené směsi SMAP je proto třeba vyhodnotit dle požadavků této normy. Toto vyhodnocení obsahuje pro přehlednost následující Tab. 23.

Tab. 23: Vyhodnocení parametrů směsi SMAP dle požadavků normy

Parametr	Požadavek normy	SMAP	Vyhodnocení
Ztráta žiháním	≤ 5 % - kategorie A	3,2	splněno
CaO	max 10 %	9,02	splněno
Volný CaO	max 1,5 % nebo ověření objemové stálosti	2,81	nesplněno – ověřena objemová stálost
SiO ₂	min 25 %	52,5	splněno
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	min 70 %	77,96	splněno
SO ₃	≤ 3 %	0,08	splněno
Jemnost	≤ 40 % - kategorie N	33,6	splněno
Index účinnosti – po 28 dnech	min 75 %	77,3	splněno
Index účinnosti – po 90 dnech	min 85 %	89,5	splněno
Objemová stálost	max 10 mm	2,6	splněno
Počátek tuhnutí	max 2 krát doba cementu	315 (CEM – 220)	splněno

Dosažené výsledky porovnané s požadavky normy ČSN EN 450-1 [N3] prokazují obecnou použitelnost této navržené směsi mechanicky aktivovaných popílků pro výrobu betonů. Otázkou použitelnosti pro praxi by proto bylo zavedení celého systému výroby do dohledového SŘV (systém řízení výroby) a získání certifikátu na daný produkt jako popílku do betonu dle ČSN EN 450-1. [N3] V této podkapitole nebyl uvažován další vliv použitého fluidního popílku pro jeho nevhodnou počáteční zrnitost z pohledu možné chemické aktivace.

9.2. Chemická aktivace popílků

Chemická aktivace popílků sledovaná a aplikovaná v této disertační práci je založena na nalezení ideálního poměru mísení vysokoteplotního úletového a fluidního úletového popílku. Nalezení tohoto ideálního poměru je vázáno přímo na sledování průběhu hydratačních procesů, konkrétně poté z pohledu průběhu hydratačních teplot. Pro tuto část disertační práce byly vybrány vysokoteplotní úletové popílků procházející z procesu spalování převážně hnědého i převážně černého uhlí a fluidní popílků byly voleny s ohledem na jejich snadnou dostupnost a zajištěnou produkci v rámci oblasti

Moravy i Čech. Stanovením vlastností použitých popílků se zabývá etapa I experimentální části této disertační práce.

9.2.1. Proces chemické aktivace

Proces chemické aktivace vysokoteplotního popílku byl v první fázi pro stanovení optimálního poměru mísení vysokoteplotního a fluidního popílku sledován pomocí stanovení průběhu hydratačních teplot. Tento způsob stanovení optimálního poměru mísení obou popílků byl důkladně studován již v mé diplomové práci, na kterou tato disertační práce navazuje.

Pro přímou přenositelnost nabytých výsledků do praxe byly všechny cementové pasty vyrobené na stejný stupeň konzistence, díky čemuž byl do procesu zařazen rovněž negativní dopad přídavku fluidního popílku na vodonáročnost směsi. Konzistence cementové pasty byla stanovena pomocí rozlivu dle normy ČSN EN 1015-3. [N14]

Aby bylo možné celou metodiku co nejvíce zobecnit bez ohledu na skutečně použité dávky popílku pro výrobu jednotlivých směsí betonu, byl proveden ucelený soubor zkoušek pro celkovou náhradu cementu popílkem o hodnotě 25, 35 a 50 %. Sledovaný poměr mísenou obou druhů popílků, pak byl 80:20 až 50:50 %. Následující Tab. 24 obsahuje schematicky složení jednotlivých cementových past a všechny dávky jsou uvedeny v gramech bez ohledu na výpočet rovnice absolutních objemů.

Tab. 24: Složení cementových past pro stanovení optimálního poměru mísení vysokoteplotního a fluidního popílku

Označení/surovina	CEM I 42,5 R	EDE_U / ECH_U	ALPIQ / ETI
Referenční			
REF	500	-	
Náhrada 25 %			
EDE_25 / ECH_25	375	125	-
ALPIQ_25 / ETI_25	375	-	125
25_EDE/ECH_80:20_ALPIQ/ETI	375	100	25,0
25_EDE/ECH_70:30_ALPIQ/ETI	375	87,5	37,5
25_EDE/ECH_60:40_ALPIQ/ETI	375	75,0	50,0
25_EDE/ECH_50:50_ALPIQ/ETI	375	62,5	62,5

Náhrada 35 %			
EDE_35 / ECH_35	325	175	-
ALPIQ_35 / ETI_35	325	-	175
35_EDE/ECH_80:20_ALPIQ/ETI	325	140,0	35,0
35_EDE/ECH_70:30_ALPIQ/ETI	325	122,5	52,5
35_EDE/ECH_60:40_ALPIQ/ETI	325	105,0	70,0
35_EDE/ECH_50:50_ALPIQ/ETI	325	87,5	87,5
Náhrada 50 %			
EDE_50 / ECH_50	250	250	-
ALPIQ_50 / ETI_50	250	-	250
50_EDE/ECH_80:20_ALPIQ/ETI	250	200	50
50_EDE/ECH_70:30_ALPIQ/ETI	250	175	75
50_EDE/ECH_60:40_ALPIQ/ETI	250	150	100
50_EDE/ECH_50:50_ALPIQ/ETI	250	125	125

Označení směsí v tabulce odpovídá jejich vzájemné skladbě, procentuální náhradě cementu a poměru mísení jednotlivých druhů popílků. Dávka vody byla stanovena na požadovanou konzistenci rozlitím pomocí střešacího stolku 150 ± 5 mm. Následující Tab. 25 a Tab. 26 již obsahují jednotlivé dávky vody, spočítaný vodní součinitel (bez uplatnění koncepce k-hodnoty) a dosažené výsledky maximální teploty a doby dosažení této maximální teploty. Poté následují grafy průběhu jednotlivých hydratačních teplot.

Tab. 25: Vodní součinitel cementových past a dosažené výsledky maximálních teplot – popílek EDE

Označení/surovina	Voda [g]	Vodní součinitel [-]	T _{max} [°C]	Doba dosažení T _{max} [min]
Referenční				
REF	165	0,33	69,8	707
Náhrada 25 %				
EDE_25	165	0,33	56,9	888
ALPIQ_25	232	0,46	67,7	828
ETI_25	265	0,53	69,1	952
25_EDE_80:20_ALPIQ	165	0,33	61,1	778
25_EDE_70:30_ALPIQ	175	0,35	64,1	780
25_EDE_60:40_ALPIQ	185	0,37	64,6	804
25_EDE_50:50_ALPIQ	195	0,39	62,2	873
25_EDE_80:20_ETI	165	0,33	61,0	906
25_EDE_70:30_ETI	192	0,38	61,7	929
25_EDE_60:40_ETI	200	0,40	64,2	929
25_EDE_50:50_ETI	210	0,42	65,0	926
Náhrada 35 %				
EDE_35	155	0,31	51,1	883
ALPIQ_35	175	0,35	66,7	822
ETI_35	295	0,59	59,2	979
35_EDE_80:20_ALPIQ	170	0,34	53,0	899
35_EDE_70:30_ALPIQ	183	0,37	57,2	923
35_EDE_60:40_ALPIQ	196	0,39	57,8	935
35_EDE_50:50_ALPIQ	210	0,42	61,6	906
35_EDE_80:20_ETI	175	0,35	54,7	944
35_EDE_70:30_ETI	200	0,40	56,9	1026
35_EDE_60:40_ETI	220	0,44	57,6	1032
35_EDE_50:50_ETI	235	0,47	56,3	1112

Náhrada 50 %				
EDE_50	150	0,30	43,3	1051
ALPIQ_50	297	0,59	60,2	953
ETI_50	370	0,74	51,2	1124
50_EDE_80:20_ALPIQ	175	0,35	43,0	1142
50_EDE_70:30_ALPIQ	193	0,39	49,2	1140
50_EDE_60:40_ALPIQ	211	0,42	50,6	1141
50_EDE_50:50_ALPIQ	230	0,46	55,8	1052
50_EDE_80:20_ETI	190	0,38	46,8	1154
50_EDE_70:30_ETI	210	0,42	47,3	1311
50_EDE_60:40_ETI	235	0,47	47,0	1355
50_EDE_50:50_ETI	260	0,52	49,4	1341

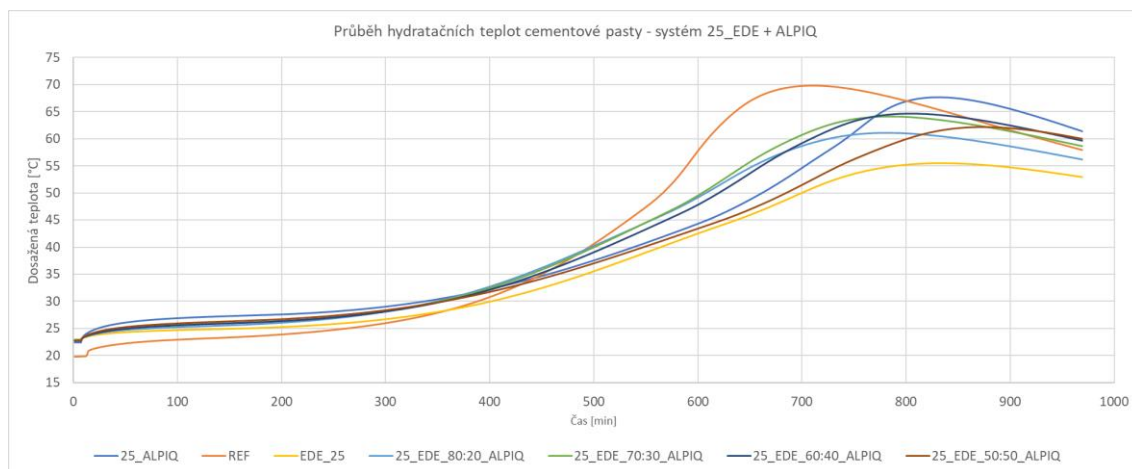
Tab. 26: Vodní součinitel cementových past a dosažené výsledky maximálních teplot – popílek ECH

Označení/surovina	Voda [g]	Vodní součinitel [-]	T _{max} [°C]	Doba dosažení T _{max} [min]
Referenční				
REF	165	0,33	69,8	707
Náhrada 25 %				
ECH_25	175	0,35	56,4	828
ALPIQ_25	232	0,46	67,7	828
ETI_25	265	0,53	69,1	952
25_ECH_80:20_ALPIQ	180	0,36	58,0	827
25_ECH_70:30_ALPIQ	187	0,37	61,1	842
25_ECH_60:40_ALPIQ	195	0,39	59,8	874
25_ECH_50:50_ALPIQ	202	0,40	60,6	876
25_ECH_80:20_ETI	180	0,36	62,9	818
25_ECH_70:30_ETI	187	0,37	63,4	818
25_ECH_60:40_ETI	200	0,40	65,5	836
25_ECH_50:50_ETI	210	0,42	63,8	876

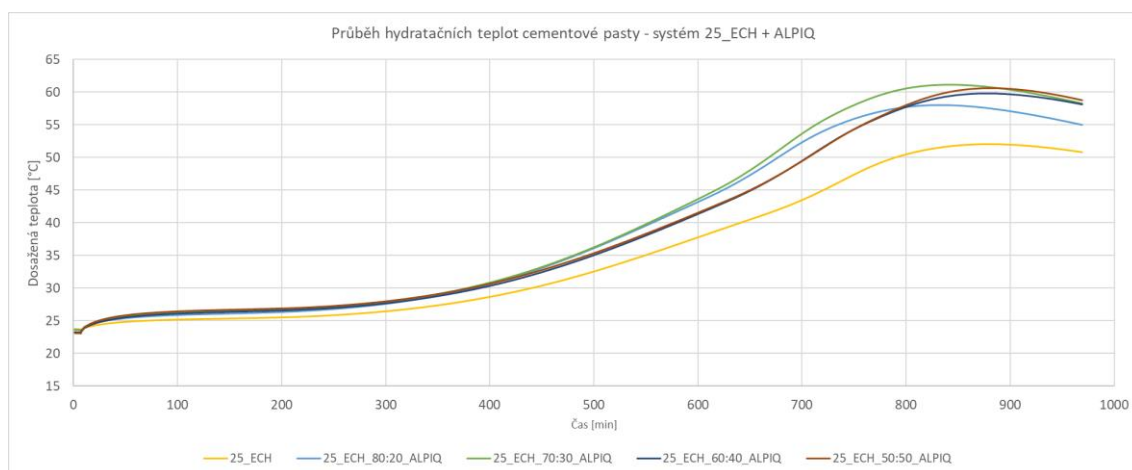
Náhrada 35 %				
ECH_35	162	0,32	50,5	889
ALPIQ_35	175	0,35	66,7	822
ETI_35	295	0,59	59,2	979
35_ECH_80:20_ALPIQ	185	0,37	56,1	857
35_ECH_70:30_ALPIQ	200	0,40	57,7	926
35_ECH_60:40_ALPIQ	210	0,42	58,8	937
35_ECH_50:50_ALPIQ	220	0,44	59,7	920
35_ECH_80:20_ETI	182	0,36	52,6	850
35_ECH_70:30_ETI	210	0,42	56,1	1013
35_ECH_60:40_ETI	227	0,45	58,8	980
35_ECH_50:50_ETI	235	0,47	58,9	971
Náhrada 50 %				
ECH_50	170	0,34	42,1	1064
ALPIQ_50	297	0,59	60,2	953
ETI_50	370	0,74	51,2	1124
50_ECH_80:20_ALPIQ	195	0,39	45,4	1060
50_ECH_70:30_ALPIQ	214	0,43	49,5	1096
50_ECH_60:40_ALPIQ	230	0,46	50,6	1129
50_ECH_50:50_ALPIQ	245	0,49	49,1	1145
50_ECH_80:20_ETI	195	0,39	43,8	1002
50_ECH_70:30_ETI	222	0,44	44,5	1230
50_ECH_60:40_ETI	250	0,50	47,8	1243
50_ECH_50:50_ETI	272	0,54	45,6	1268

Z dosažených výsledků je zřejmé, že cementové pasty vyrobené za použití fluidního popílku Tisová vyžadují pro dosažení srovnatelné konzistence výrazně vyšší dávku vody než běžné popílky vysokoteplotní, ale rovněž i než fluidní popílek Alpiq Zlín. Tento jev se dále projevil na průběhu hydratačních teplot, kde zřejmě zejména díky nižšímu vodnímu součiniteli se jeví popílek Alpiq aktivnější, a to i z hlediska chemické aktivace popílku vysokoteplotního. V rámci chemického hlediska obou fluidních popílků mezi nimi není rozdíl nijak výrazný, a naopak větší množství zastoupeného volného vápna u fluidního popílku Tisová, by mělo činit tento popílek aktivnější z hlediska následné chemické aktivace popílku vysokoteplotního. Přesnější obraz o průběhu

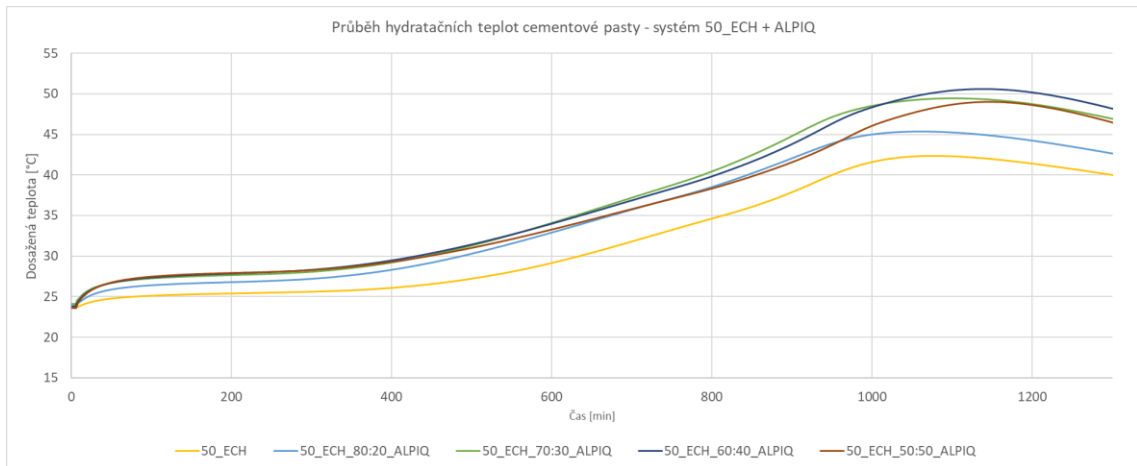
hydratačních teplot podávají následující Obr. 56 až 59. V rámci přehlednosti dosažených výsledků, byly vybrány pro grafické zobrazení pouze některé systémy a následná tabulka Tab. 27 obsahuje přehled všech dosažených výsledků.



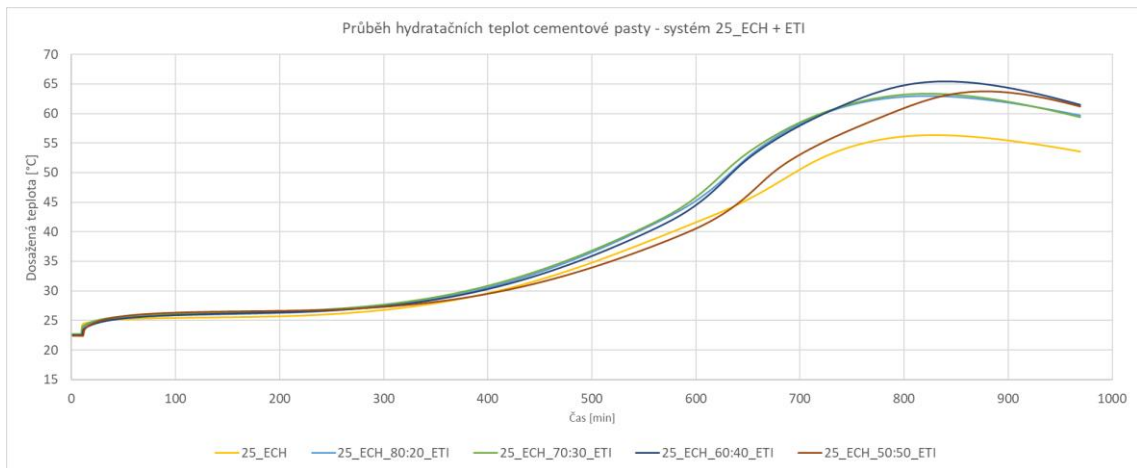
Obr. 56: Průběh hydratačních teplot cementové pasty - systém 25_EDE+ALPIQ



Obr. 57: Průběh hydratačních teplot cementové pasty - systém 25_ECH+ALPIQ



Obr. 58: Průběh hydratačních teplot cementové pasty - systém 50_ECH+ALPIQ



Obr. 59: Průběh hydratačních teplot cementové pasty - systém 25_ECH+ETI

Přiložené grafy průběhu hydratačních teplot podávají obraz zejména o počátku hydratačních procesů, který je v rámci této navržené metodiky stanovení optimálního poměru mísení vysokoteplotního a fluidního popílku pro chemickou aktivaci podstatný. Z grafů lze spatřit, že prakticky bez rozdílu druhu vysokoteplotního i fluidního popílku a bez rozdílu celkové náhrady cementu popílky, se nejdříve začíná chemických procesů spojených s nárůstem teploty účastnit směs tvořená ze 70 % vysokoteplotním a 30 % fluidním popílkem (zelená křivka). Ve srovnání s průběhem teplot cementu pouze s vysokoteplotním popílkem je poté patrný vliv chemické aktivace, kdy přidavek fluidního popílku prakticky ve všech případech přináší rychlejší nástup hydratační teploty. Z pohledu této zkoušky je tak možno říci, že byl kladně potvrzen proces chemické aktivace vysokoteplotního popílku přidavkem popílku fluidního. Následující Tab. 27

obsahuje výsledky optimálního poměru mísení vycházejících z provedených zkoušek pro jednotlivě směsi.

Tab. 27: Optimální poměry mísení vysokoteplotního a fluidního popílku

Systém	Optimální poměr mísení	Alternativa
25_EDE_ALPIQ	70:30	80:20
25_EDE_ETI	70:30	60:40
25_ECH_ALPIQ	70:30	80:20
25_ECH_ETI	70:30	80:20
35_EDE_ALPIQ	70:30	80:20
35_EDE_ETI	80:20	70:30
35_ECH_ALPIQ	80:20	70:30
35_ECH_ETI	80:20	60:40
50_EDE_ALPIQ	60:40	70:30
50_EDE_ETI	80:20	70:30
50_ECH_ALPIQ	70:30	60:40
50_ECH_ETI	60:40	70:30

Ze všech uvedených výsledků vychází jako obecně nejvhodnější poměr mísení vysokoteplotního a fluidního popílku bez závislosti na zdroji obou druhů popílku a rovněž bez závislosti na náhradě cementu směsí popílků, poměr mísení **70 % vysokoteplotního a 30 % fluidního popílku.**

9.2.2. Index účinnosti chemicky aktivovaných popílků

Index účinnosti byl proveden nejprve s ohledem na požadavky normy ČSN EN 450-1 [N3], tedy při 25% náhradě cementu navrženou směsí popílků a konstantním vodním součinitelem a následně s ohledem na využitelnost směsí v praxi, s vodním součinitelem upraveným pro dosažení stejné konzistence čerstvé malty odpovídající hodnotě referenční malty ± 5 mm.

Zkouška indexu účinnosti byla provedena pro poměry mísení fluidních a vysokoteplotních popílků 70:30 a výsledky obsahují následující Tab. 28 a Tab. 29. Tabulka Tab. 28 obsahuje pro přehlednost i výsledky indexů účinnosti použitých samostatných vysokoteplotních úletových a fluidních popílku, které byly stanoveny v etapě I experimentální části této disertační práce.

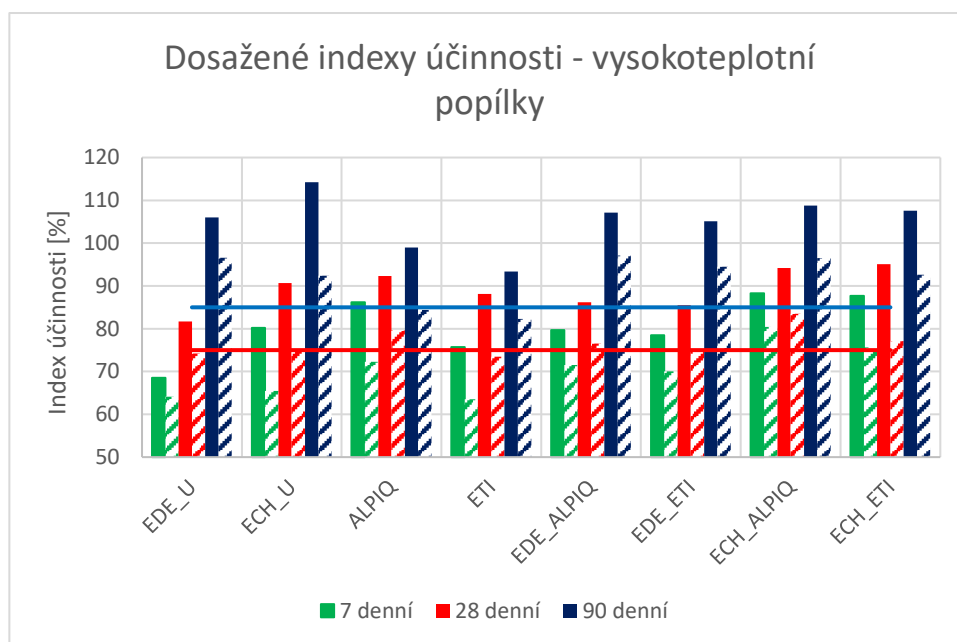
Tab. 28: Výsledky hodnot indexů účinnosti směsi vysokoteplotního a fluidního popílku - $w = 0,5$

Materiál	Vlastnost	Rozliti	Index účinnosti – $w = 0,5$		
			7 denní	28 denní	90 denní
-	Jednotky	mm	%		
REF	Výsledek	180	-	-	-
EDE_U		170	68,5	81,7	106,0
ECH_U		160	80,2	90,7	114,2
ALPIQ		110	86,2	92,3	99,0
ETI		100	75,7	88,1	93,4
EDE_ALPIQ		160	79,7	86,2	107,1
EDE_ETI		150	78,5	85,5	105,1
ECH_ALPIQ		155	88,3	94,2	108,8
ECH_ETI		145	87,7	95,1	107,6

Tab. 29: Výsledky hodnot indexů účinnosti směsi vysokoteplotního a fluidního popílku - konstantní rozliti

Materiál	Vlastnost	Rozliti	Vodní součinitel	Index účinnosti – konstantní rozliti		
				7 denní	28 denní	90 denní
-	Jednotky	mm	-	%		
REF	Výsledek	180	0,50	-	-	-
EDE_U		180	0,51	64,1	74,2	96,6
ECH_U		175	0,53	65,5	75,1	92,4
ALPIQ		185	0,58	72,3	79,6	84,4
ETI		180	0,61	63,5	73,5	82,3
EDE_ALPIQ		180	0,53	71,5	76,5	97,1
EDE_ETI		175	0,54	70,0	74,9	94,5
ECH_ALPIQ		175	0,54	80,4	83,5	96,5
ECH_ETI		180	0,56	75,6	77,1	92,6

Dosažené výsledky indexů účinnosti potvrzují vhodnost přídavku fluidního popílku k popílku vysokoteplotnímu pro jeho chemickou aktivaci. Zejména v raném stáří kompozitu je zřejmý pozitivní dopad na nárůst mechanických parametrů, který se však s delším časovým horizontem snižuje. Tento trend lze spatřit i na následujícím grafickém vyhodnocení indexů účinnosti.



Obr. 60: Grafické vyhodnocení dosažených indexů účinnosti směsi vysokoteplotních a fluidních popílků (plná čára – $w=0,5$, šrafovaná čára – konstantní rozlití)

Pro praktické použití jsou pozitivní výsledky stanovení indexů účinnosti při míchání malt na konstantní konzistenci rozlitím, přičemž i v tomto případě je zřejmý pozitivní dopad přidavku fluidního popílků, ačkoliv tento efekt z důvodu navýšení vodního součinitele již není tak výrazný. V praxi při výrobě betonu bude možné tento trend negativního navýšování vodního součinitele nejspíše částečně eliminovat použitím vhodné superplastifikační přísady. Další podkapitoly této etapy experimentální části disertační práce se budou zabývat možností využití navržených modelových směsí vysokoteplotních a fluidních popílků pro výrobu betonu v souladu s platnou legislativou.

9.2.3. Návrh a vlastnosti výsledné aktivované směsi popílků

Pro další podrobnější analýzy a porovnání navržených chemicky aktivovaných směsí popílků byla vybrána pouze směs vysokoteplotního úletového popílků Dětmárovice a fluidního úletového popílků Alpiq Zlín. Poměr mísení obou těchto popílků vychází z dosažených výsledků a činí 70:30 %. Výsledná směs byla pro potřeby disertační práce označena zkratkou CHAP – Chemicky aktivovaný popílek.

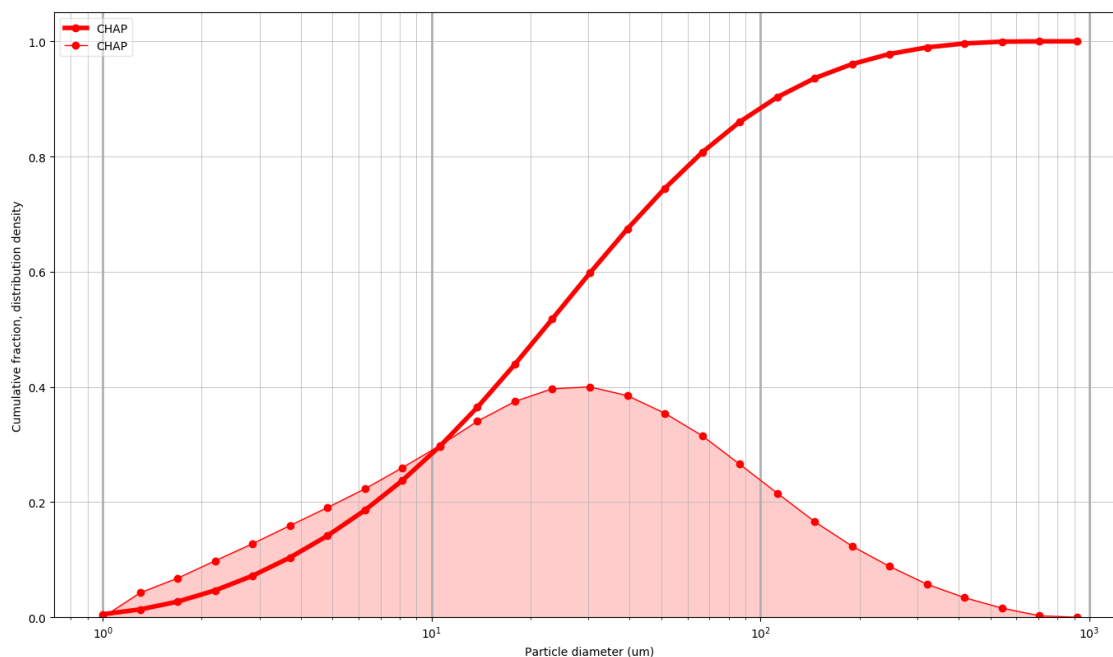
Vysokoteplotní a fluidní popílek, byly v navrženém poměru smíchané a důkladně zhomogenizované pomocí laboratorního vertikálního homogenizátoru. Následně byla výsledná směs aktivovaných popílků podrobena všem důležitým zkouškám z pohledu požadavků normy ČSN EN 450-1. [N3]

Dosažené výsledky obsahuje následující Tab. 30.

Tab. 30: Vybrané chemické a fyzikální parametry CEM I 42,5 R a směsi popílků CHAP

Materiál	Vlastnost	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	CaO volný	Ztráta žháním
-	Jednotky	%						
CEM I	Výsledek	19,5	4,9	3,45	62,17	2,97	-	3,3
CHAP		44,2	23,8	6,54	8,11	0,08	2,31	3,4
Materiál	Vlastnost	Měrná hmotnost	Měrný povrch / jemnost	Počátek tuhnutí	Doba tuhnutí	Objemová stálost		
-	Jednotky	g/cm ³	m ² /kg / %	min	min	mm		
REF	Výsledek	3,10	402	220	325	0,6		
CHAP		2,35	615 / 29,9	345	470	0,5		

Všechny dosažené výsledky budou dále opět porovnány s požadavky normy ČSN EN 450-1 [N3] pro legislativní použitelnost navržené směsi popílků do betonu.



Obr. 61: Výsledná křivka zrnitosti směsi CHAP

9.2.4. Vyhodnocení výsledných parametrů směsi

Směs chemicky aktivovaného vysokotepelného popílku byla navržena za účelem jejího využití pro výrobu betonu a cementových kompozitů. Je známo, že samotné fluidní popílky nenaplnějí požadavky normy ČSN EN 450-1 [N3], proto budou nyní s požadavky této normy porovnané parametry navržené směsi CHAP. Toto vyhodnocení obsahuje pro přehlednost následující Tab. 31.

Tab. 31: Porovnání parametrů směsi CHAP s požadavky normy

Parametr	Požadavek normy	CHAP	Vyhodnocení
Ztráta žháním	≤ 5 % - kategorie A	3,4	splněno
CaO	max 10 %	8,11	splněno
Volný CaO	max 1,5 % nebo ověření objemové stálosti	2,31	nesplněno – ověřena objemová stálost
SiO ₂	min 25 %	44,2	splněno
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	min 70 %	74,54	splněno
SO ₃	≤ 3 %	0,08	splněno
Jemnost	≤ 40 % - kategorie N	29,9	splněno
Index účinnosti – po 28 dnech	min 75 %	86,2	splněno
Index účinnosti – po 90 dnech	min 85 %	107,1	splněno
Objemová stálost	max 10 mm	0,5	splněno
Počátek tuhnutí	max 2 krát doba cementu	345 (CEM – 220)	splněno

Dosažené výsledky porovnané s požadavky normy ČSN EN 450-1 [N3] prokazují, že při vhodném návrhu směsi vysokotepelného a fluidního popílku by tato směs mohla naplňovat základní požadavky na popílky dle citované normy. Z pohledu normativních požadavků by však musela být dále jednoznačně ošetřena otázka případného spoluspalování dle kapitoly 4 této normy. Samotná bezpečnost betonů vyrobených z této směsi popílku z hlediska její trvanlivosti bude podrobně studována v následující etapě experimentální části této disertační práce.

9.3. Zhodnocení výsledků Etapy III

V rámci řešení Etapy III experimentální části disertační práce byly sledovány možnosti aktivace popílků jejich mletím (mechanická aktivace ložových popílků) a pomocí přídatku fluidního úletového popílku k popílku vysokoteplotnímu úletovému (chemická aktivace).

Jako vstupní suroviny pro mechanickou aktivaci byly zvoleny ložové popílků, které na základě chemického rozboru disponují srovnatelnými parametry jako klasické vysokoteplotní úletové popílků. To byl dobrý předpoklad pro nalezení vhodného způsobu aktivace těchto popílků jejich mletím, pro jejich následné použití pro výrobu betonu. Pro analyzované popílků byl nalezen vhodný mlecí cyklus, který zabezpečí jejich vyhovující parametry jemnosti a je kladen důraz na ekonomiku celého procesu. Jednotlivé vstupní suroviny (ložové popílků) byly poté dále analyzovány z hlediska jejich vazného potenciálu a vodonáročnosti. Dosažené výsledky prokázaly vyhovující indexy účinnosti obou mletých ložových popílků z pohledu normativních předpisů a rovněž byla prokázána výrazná vodonáročnost jednoho analyzovaného produktu, což má nejspíše úzkou spojitost s jeho vysokou hodnotou ztráty žíháním.

Z toho důvodu byla navržena směs pro mechanickou aktivaci složená z obou těchto analyzovaných popílků při poměru jejich mísení 60:40 % s předpokladem potlačení negativních parametrů jednotlivých vstupních surovin a využití jejich pozitivních vlastností v maximální možné míře. Takto navržena směs obou ložových popílků byla následně mechanicky aktivována pomocí navrženého procesu mletí a dále byla podrobena zkouškám dle normy ČSN EN 450-1 a výsledky zkoušek byly v souladu s požadavky této normy vyhodnoceny.

Na základě dosažených výsledků bylo prokázáno, že navržena mechanicky aktivovaná směs ložových popílků, pojmenovaná pro potřeby této disertační práce jako SMAP, vyhovuje na všechny mechanické a fyzikální parametry požadavků normy ČSN EN 450-1 a bylo by tak zřejmě možné tento produkt v souladu s požadavky legislativy certifikovat jako popílek pro výrobu betonu. Výroba takového produktu by mohla výrazně napomoci zefektivnit využívání popílků pro výrobu betonu při zpracování velkého množství druhotných surovin. Vzhledem ke kapacitním možnostem vstupních surovin v rámci jejich skládkování by se dále mohlo jednat o popílek dostupný celoročně bez ohledu na provoz tepelných elektráren a tepláren.

Druhá část této etapy disertační práce byla zaměřená na chemickou aktivaci vysokoteplotního úletového popílku pomocí přídatku popílku fluidního. Pro obecné ověření navržené metodiky chemické aktivace vysokoteplotního popílku byla tato metodika sledována pro vysokoteplotní úletový popílek vzniklý spalováním převážně černého uhlí i převážně hnědého uhlí a rovněž pro dva zdroje fluidního popílku. Pro stanovení optimálního poměru mísení vysokoteplotního a fluidního popílku pro proces chemické aktivace byla zvolena metoda sledování průběhu hydratačního procesu pomocí stanovení průběhu hydratačních teplot. Předpokladem bylo urychlení nástupu hydratačních reakcí spojené s dřívějším nárůstem hydratačních teplot. Z nabytých výsledků byl stanoven optimální poměr vzájemného mísení 70:30 %, který byl prakticky nejlépe hodnocený z průběhu hydratačních teplot u všech směsí nezávisle na použité lokalitě vysokoteplotního úletového popílku a použité lokalitě fluidního popílku. Tento vzájemný poměr mísení byl hodnocen jako nejuniverzálněji použitelný rovněž při různých náhradách cementu směsí popílku, kdy byly analyzovány náhrady 25, 35 a 50 %.

Při dodržení navrženého poměru mísení vysokoteplotního a fluidního popílku byly vyrobeny směsi pro ověření dopadu na index účinnosti. Nabyté výsledky prokázaly vhodnost navrženého způsobu chemické aktivace vysokoteplotního úletového popílku přídatkem popílku fluidního, kdy nejvíce je trend nárůstu indexu účinnosti patrný v ranných stádiích zrání kompozitu a konkrétní nárůst při stáří 7 dní činí až 16 % a při stáří 28 dní cca 5 %. Při stáří malt 90 dní se již výsledky chemicky aktivovaného a neaktivovaného popílku prakticky srovnávají.

Pro představu legislativní možnosti využití navržené směsi chemicky aktivovaného vysokoteplotního popílku byla navržená směs, pojmenována pro potřeby této disertační práce jako CHAP, složená ze 70 % vysokoteplotním úletovým popílkem Dětmárovice a ze 30 % z fluidním úletovým popílkem Alpiq Zlín, podrobena zkouškám na požadavky dle ČSN EN 450-1. Dosažené výsledky prokázaly, že z pohledu vhodného poměru mísení obou druhů popílku dochází k výrazné eliminaci negativ spojených s fluidním popílkem z pohledu jeho chemického složení (množství CaO, volného CaO a SO₃) a navržená směs dosahuje vyhovujících chemických a fyzikálně-mechanických parametrů pro použití jako popílku do betonu dle normy ČSN EN 450-1. V následující etapě experimentální části disertační práce bude kladen důraz na ověření možností využití těchto navržených směsí SMAP a CHAP pro výrobu betonu a dále na důkladnou analýzu bezpečného využití z hlediska následné trvanlivosti betonu.

10. DOSAŽENÉ VÝSLEDKY ETAPY IV

Cílem této etapy experimentální části disertační práce je prakticky ověřit použitelnost nově navržené mechanicky (SMAP) a chemicky (CHAP) aktivované směsi popílků pro výrobu betonu. Teta etapa je členěna na oblast výroby drobných betonových prefabrikovaných dílců a dále na oblast výroby standartních konstrukčních transportbetonů.

10.1. Výroba prefabrikovaných dílců

V této dílčí podetapě byla ověřena využitelnost navržené chemicky aktivované směsi popílků CHAP. Ověření spočívalo v reálně průmyslové výrobě vibrolisovaných betonových dlažeb za použití této směsi popílků a v následné analýze mechanických a trvanlivostních parametrů vyrobených dílců. Z důvodu aplikace do reálného provozu výroby, bylo nejprve nutné provést analýzu vstupních surovin a proces návrhu chemicky aktivovaného popílku implementovat na v daném provozu využívané suroviny.

10.1.1. Vlastnosti vybraných vstupních surovin

Betonová vibrolisovaná dlažba je dnes standartně vyráběna jako dvouvrstvá, přičemž horní vrstva o mocnosti nejčastěji do 1 cm je obrusná a spodní vrstva o mocnosti závislé na celkové tloušťce prvku je jádrová. Tato jádrová vrstva je běžně vyráběna za použití vysokoteplotních úletových popílků. Pro účely experimentu proto byla vybrána tato jádrová vrstva, pro jejíž výrobu je v provozu běžně využíváno následujících vstupních surovin:

- Cement CEM I 42,5 R z cementárny Ladce
 - Povážská cementáreň, a.s.
- Černouhelný úletový popílek Rybník – ERY_U
 - PGE Ekoserwis sp. z o. o.
- DTK 0/2 mm Tovačov
 - Heidelberg Materials CZ, a.s.
- DDK 0/4 mm Jakubčovice
 - EUROVIA Kamenolomy, a.s.
- HDK 4/8 mm Jakubčovice
 - EUROVIA Kamenolomy, a.s.

Pro návrh a výrobu CHAP byl dále zvolen fluidní úletový popílek z provozovny ALPIQ Zlín, jehož vlastnosti jsou detailně analyzovány v předchozích etapách experimentální části disertační práce.

Pro všechny pojivové složky byly nejprve stanoveny jejich mechanické parametry dle ČSN EN 196-1 [N18] a u popílků dále spočítán index účinnosti s daným cementem dle ČSN EN 450-1. [N3] Tyto výsledky obsahuje následující tabulka Tab. 32.

Tab. 32: Mechanické parametry vstupních surovin

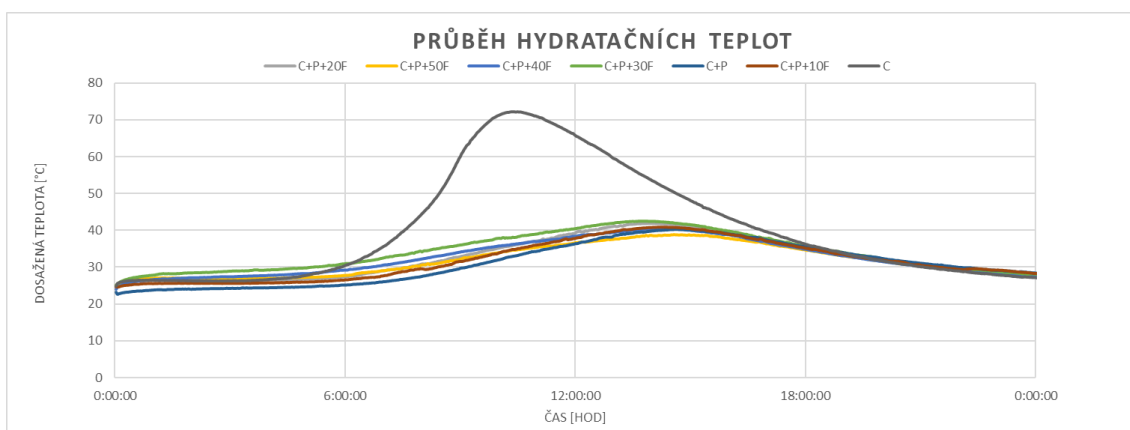
Materiál	Vlastnost	Pevnost v tahu za ohybu / Pevnost v tlaku	
		7 denní	28 denní
-	Jednotky	MPa	
CEM I	Výsledek	6,2 / 38,8	7,6 / 55,8
ERY		5,9 / 33,3	7,5 / 46,8
ALPIQ		6,5 / 41,3	7,5 / 59,1
Materiál	Vlastnost	Index účinnosti	
		7 denní	28 denní
-	Jednotky	%	
ERY	Výsledek	85,8	83,9
ALPIQ		106,4	105,9

Dále byla aplikována navržená metodika nalezení optimálního poměru mísení vysokoteplotního úletového popílku a fluidního úletového popílku pro výrobu směsi CHAP. V následující Tab. 33 je uvedeno složení analyzovaných cementových past, kdy dávka vody byla opět řízena požadavkem na dosažení shodné konzistence všech vyrobených cementopopílkových past, jejíž hodnota byla stanovena na 170 ± 5 mm rozlitem na střešacím stolku dle ČSN EN 1015-3. [N14] Vzájemný poměr mísení cementu a vysokoteplotního popílku Rybník byl zvolen stejný, jako se v daném provozu používal pro výrobu jádrové vrstvy daných vibrolisovaných dílců.

Tab. 33: Složení cementových past pro nalezení optimálního poměru mísení vysokoteplotního a fluidního popílku

Označení/surovina	CEM I 42,5 R (C)	Rybník (P)	ALPIQ (F)	Voda	Vodní součinitel w
C	500	-	-	160	0,32
C+P	287	213	-	168	0,34
C+P+10F	287	192	21	175	0,35
C+P+20F	287	171	42	183	0,37
C+P+30F	287	149	64	195	0,39
C+P+40F	287	128	85	201	0,40
C+P+50F	287	107	106	208	0,42

Průběh hydratačních teplot obsahuje následující graf a vyhodnocení poté následující Tab. 34.



Obr. 62: Průběh hydratačních teplot cementových past systému ERY+ALPIQ

Tab. 34: Dosažené výsledky maximálních teplot a optimálního poměru mísení vysokoteplotního popílku ERY a fluidního popílku ALPIQ

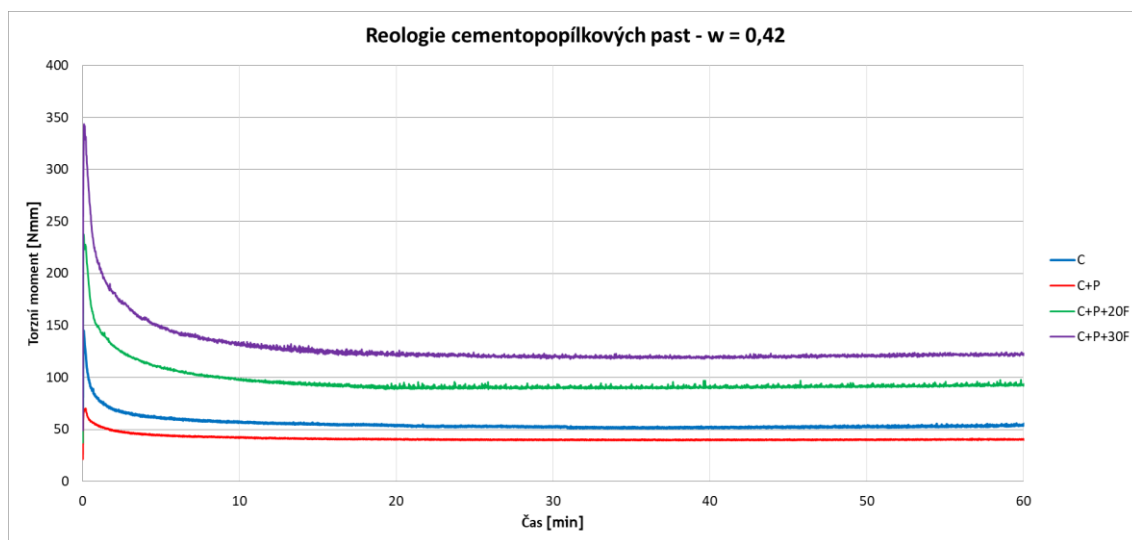
Označení/surovina	T_{\max} [°C]	Doba dosažení T_{\max} [hod:min]	Optimální poměr mísení
C	72,3	10:24	70:30
C+P	40,3	14:38	
C+P+10F	40,8	14:14	
C+P+20F	41,9	13:54	
C+P+30F	42,6	13:44	
C+P+40F	40,4	14:16	
C+P+50F	38,9	14:34	

Dosažené výsledky opět prokazují ideální poměr míchání vysokoteplotního a fluidního popílku v poměru 70:30 %. Pro další části experimentu byl rovněž použit poměr mísení 80:20 %, který by se dal zvolit jako alternativní.

Pro detailnější obraz o možném ovlivnění konzistence betonové směsi při použití navržené směsi CHAP byly dále cementopopílkové pasty analyzované z pohledu jejich reologie na rotačním viskozimetru VISKOMAT NT od společnosti Schleibinger Geräte Teubert u. Greim GmbH. Popis této metody obsahuje kapitola zabývající se použitými zkušebními postupy. Složení cementových a cementopopílkových past pro danou zkoušku obsahuje následující Tab. 35. Poměr mísení je stejný jako při stanovení optimálního poměru mísení popílků a vodní součinitel byl zvolen konstantní 0,42. Tato tabulka obsahuje rovněž dosažené střední hodnoty torzních momentů. Samotný průběh reologického chování jednotlivých směsí je zobrazen na Obr. 63. Zkušební cyklus byl zvolen na dobu 60 minut při konstantních otáčkách 100 ot/min při vložení nádoby se směsí do lázně o teplotě 20 °C.

Tab. 35: Složení cementové pasty a dosažené hodnoty torzních momentů z rotačního viskozimetru

Označení/surovina	CEM I 42,5 R (C)	Rybník (P)	ALPIQ (F)	Voda	Mean Value [Nmm]
C	750	-	-	315	53,2
C+P	429,75	320,25	-	315	40,1
C+P+20F	429,75	256,20	64,05	315	92,0
C+P+30F	429,75	224,18	96,08	315	121,4



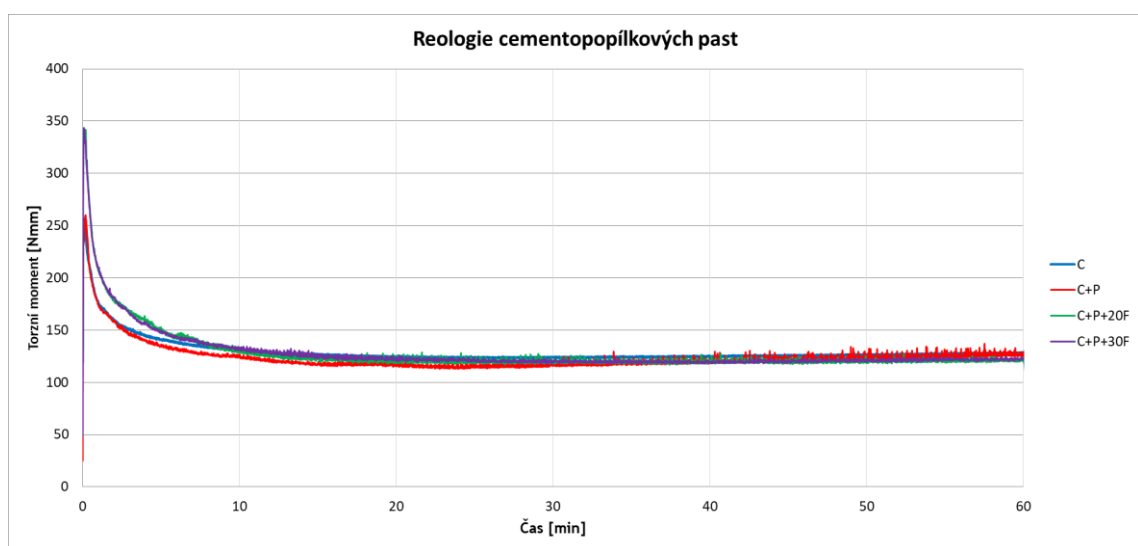
Obr. 63: Průběh torzních momentů cementových past při zkoušce reologie

Z dosažených výsledků a průběhu torzních momentů jednotlivých cementopopílkových past je zřejmé, že zvyšující se dávka fluidního popílku ve směsi, výrazně zhoršuje její reologii. Naopak cementopopílková pasta obsahující pouze vysokoteplotní úletový popílek vykazuje nejnižší hodnotu torzního momentu po celou dobu měření. Tato skutečnost potvrzuje pozitivní dopad klasického vysokoteplotního úletového popílku na reologii směsi díky jeho téměř dokonale kulatým a zeskelněným zrnům.

Díky skutečnosti, že pro výrobu jádrové receptury daného vibrolisovaného zboží se již dále neužívá žádných plastifikační přísad, díky kterým by mohl být negativní dopad přídavku fluidního popílku na konzistenci směsi eliminován, bylo nutné dále stanovit dávku vody, díky které budou všechny analyzované cementopopílkové směsi vykazovat shodné reologické parametry. Tuto dávku vody a výsledné hodnoty středních hodnot torzních momentů obsahuje následující Tab. 36.

Tab. 36: Složení cementových past vykazujících shodné reologické chování na rotačním viskozimetru

Označení/surovina	CEM I 42,5 R (C)	Rybník (P)	ALPIQ (F)	Voda / vodní součinitel	Mean Value [Nmm]
C	750	-	-	270,0 / 0,36	127,5
C+P	429,75	320,25	-	262,5 / 0,35	128,1
C+P+20F	429,75	256,20	64,05	300,0 / 0,40	120,4
C+P+30F	429,75	224,18	96,08	315,0 / 0,42	121,4



Obr. 64: Průběh torzních momentů cementových past při zkoušce reologie s upraveným vodním součinitelem

Pro dosažení shodného reologického chování směsi s 30% náhradou vysokoteplotního popílku fluidním popílkem, bylo nutné navýšení vodního součinitele z hodnoty 0,35 až na hodnotu 0,42.

V rámci analýzy vstupních surovin byly dále stanoveny počátky a doby tuhnutí jednotlivých cementopopílkových past při zachování stejného složení jako v případě stanovení průběhu hydratačních teplot.

Tab. 37: Výsledky stanovení počátku a doby tuhnutí cementopopílkových past

Označení/vlastnost	Počátek tuhnutí [hod:min]	Doba tuhnutí [hod:min]
C+P	7:25	10:30
C+P+20F	7:10	10:40
C+P+30F	7:15	11:10

Z výsledků je patrné, že ani vyšší dávka záměsové vody v případě směsi s fluidním popílkem nemá negativní dopad na hodnotu počátku doby tuhnutí, díky čemuž byl opět potvrzen úsudek o rychlejším nástupu hydratačních procesů při chemické aktivaci vysokoteplotního popílku přidavkem popílku fluidního.

Následně byly vyrobeny cementové malty pro stanovení jejich mechanických parametrů. Tyto cementové malty byly vyrobeny za použití DTK 0/2 mm z lokality Tovačov namísto standardizovaného CEN písků a poměr mísení jednotlivých pojivových složek odpovídal předchozím experimentům. Jednotlivé malty byly vyrobeny opět na stejný stupeň konzistence metodou rozlití pomocí střešacího stolku. Skladba jednotlivých směsí je obsažena v následující Tab. 38. a dávkování všech surovin je uvedeno v gramech.

Tab. 38: Složení cementových malt s pískem DTK 0-2 mm Tovačov

Označení/surovina	CEM I 42,5 R (C)	Rybník (P)	ALPIQ (F)	Písek	Voda / vodní součinitel
C	450	-	-	1350	184,5 / 0,40
C+P	257,85	192,15	-	1350	180,0 / 0,41
C+P+20F	257,85	153,72	38,43	1350	202,5 / 0,45
C+P+30F	257,85	134,51	57,65	1350	211,5 / 0,47

Z použitých dávek vody pro výrobu cementových malt je patrné zachování trendu navýšení vodního součinitele jako v případě analýzy reologického chování jednotlivých cementopopílkových past. Rozdíly vodních součinitelů pro dosažení stejného stupně konzistence jsou shodné jako v případě reologie stanovené pomocí rotačního viskozimetru. Mechanické parametry byly stanoveny při stáří 2, 7, 14 a 28 dní a tělesa byla po celou dobu zrání uchována v plastové uzavíratelné nádobě bez vody. Uvedený index aktivity je vypočten jako poměr dosažené pevnosti v tlaku malty pouze z vysokoteplotního popílku a dosažené pevnosti v tlaku malty se směsí vysokoteplotního a fluidního popílku (CHAP).

Tab. 39: Mechanické parametry vyrobených malt se směsí CHAP

Stáří	2 dny			7 dní		
Vlastnost / Označení	C+P	C+P+20F	C+P+30F	C+P	C+P+20F	C+P+30F
Objemová hmotnost [kg/m ³]	1860	1830	1810	1870	1880	1880
Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	1,6	1,7	1,3	2,4	2,6	2,6
Pevnost v tlaku [MPa]	7,6	7,2	6,3	11,3	12,0	11,7
Index aktivity [%]	-	-5,3	-17,1	-	+6,2	+3,5
Stáří	14 dní			28 dní		
Vlastnost / Označení	C+P	C+P+20F	C+P+30F	C+P	C+P+20F	C+P+30F
Objemová hmotnost [kg/m ³]	1830	1830	1800	1870	1810	1870
Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	2,6	2,6	2,6	2,9	3,1	2,6
Pevnost v tlaku [MPa]	11,3	12,4	12,0	11,9	13,3	12,8
Index aktivity [%]	-	+9,7	+6,2	-	+11,8	+7,6

Dosažené výsledky mechanických parametrů potvrzují vhodnost aktivace vysokoteplotního popílku přidávkem popílku fluidního, ačkoliv v tomto případě disponovaly vyrobené malty konzistencí odpovídající provozní výrobě vibrolisovaných dílců a dosažené nižší hodnoty pevností i objemových hmotností poukazují na jejich nedokonalé zhutnění. Přesto lze soudit, že i přes nutnou vyšší dávku záměsové vody při

použití navržených směsí CHAP, je jejich zvýšená aktivita oproti samotnému vysokoteplotnímu popílku zřejmá již po 7 dnech zrání.

Dle všech nabytých výsledků došlo k návrhu finálních receptur jádrové vrstvy pro výrobu vibrolisovaných betonových dlažeb. Tyto receptury obsahuje následující Tab. 40, přičemž referenční receptura vychází z běžné výroby. Všechny receptury jsou uvedené na 1 m³ a dávkování jednotlivých složek je v kg.

Tab. 40: Složení jednotlivých receptur jádrové vrstvy

Surovina/Označení	REF	C+P+20F	C+P+30F
CEM I 42,5 R Ladce	245	245	245
Popílek Rybník	183	146	128
Popílek ALPIQ Zlín	-	37	55
DTK 0/2 mm Tovačov	968	940	932
DDK 0/4 mm Jakubčovice	494	477	747
HDK 4/8 mm Jakubčovice	454	455	443
Voda	93	110	119

10.1.2. Proces výroby

Pro ověření možnosti výroby a následných vlastností vibrolisovaných betonových dlažeb s využitím navržených CHAP byla navržena betonová směs vyrobená ve výrobně a následně z ní byly vyrobeny dvouvrstvé dlažební desky o rozměrech 500×500×50 mm. Výroba těchto betonových dílců probíhala na hermetickém karuselovém lisu od výrobce Masa GmbH.

Během procesu výroby směsí C+P+20F a C+P+30F byly nakonec navržené receptury jádrové vrstvy upraveny s ohledem na dávku použité záměsové vody. Praktická výroba prokázala, že ovlivnění konzistence betonové směsi použitím přídatku fluidního popílku, není pro daný způsob výroby nijak zásadní a bylo možné u všech vyráběných směsí dodržet prakticky shodný vodní součinitel.

Ve výrobě bylo celkem vyrobeno z každé receptury 30 kusů betonových dlažeb, které byly následně podrobeny laboratorním zkouškám.

10.1.3. Zkoušení betonových dlažeb dle ČSN EN 1339

Vyrobené vibrolisované betonové dlažby musí svými parametry vyhovět požadavkům normy ČSN EN 1339. [N9] Z pohledu mechanických parametrů se jedná především o dosažení požadované hodnoty pevnosti v ohybu a lomového zatížení a z hlediska trvanlivosti o nepřekročení povolených limitů pro hodnotu celkové nasákavosti a odolnosti proti mrazu a chemickým rozmrazovacím látkám (CHRL) a případně pro hodnotu obrusnosti.

V rámci řešení disertační práce bylo dále mezi portfolio zkušebních postupů zařazeno stanovení kapilární nasákavosti jádrové vrstvy, odolnost proti cyklickému působení mrazu a vody a analýza mikrostruktury. Všechny tyto jmenované zkoušky vyjma analýzy mikrostruktury, vychází z principů normových postupů, ale byly dále modifikovány pro potřeby této disertační práce.

Jmenovitě postup stanovení kapilární nasákavosti vychází z požadavků normy pro zdíci prvky ČSN EN 772-11 [N31] a v tomto případě byl zařazen pro jádrovou vrstvu z důvodu ověření případně vzniklých mikroporuch, jejichž výskyt by mohl být zaznamenán právě zvýšenou hodnotou kapilární nasákavosti.

Zkouška mrazuvzdornosti byla provedena na výřezech z vibrolisovaných dlažeb, které byly vystaveny 150-ti zmrazovacím cyklům dle normy ČSN 73 1322 [N33] a následně byl stanoven jejich index mrazuvzdornosti v ohybu, při jeho provedení dle normy ČSN EN 1339. [N9]

Mikrostruktura vzorků pak byla sledována za pomoci skenovací elektronové mikroskopie, diferenční termické analýzy a XRD. Tato mikrostruktura byla sledována v různém stáří vzorků a rovněž po zkoušce mrazuvzdornosti.

Vyrobené betonové dlažební desky byly 3 dny po výrobě převezeny do prostor laboratoře, kde byly vzorky po celou dobu zkoušení ponechány v laboratorních podmínkách a náhodně vybrané vzorky byly přemístěny do venkovního reálného prostředí, kde byly ponechány po dobu 360 dní a následně byly rovněž podrobeny zkouškám.

Ilustrativní fotografie vyrobených vzorků a jejich venkovní uložení zobrazují následující Obr. 3 až 5.



Obr. 65: Fotografie betonové dlažby vyrobené za použití směsi CHAP



Obr. 66: Venkovní uložení náhodně vybraných betonových dlažeb

10.1.3.1. Stanovení mechanických parametrů dle ČSN EN 1339

Mechanické parametry byly stanoveny ve stáří 7, 28, 60, 90, 180 a 360 dnech při laboratorním uložení vzorků a dále po 360 dnech při venkovním uložení vzorků.

Všechny dosažené výsledky obsahuje souhrnně následující Tab. 41 a tato tabulka opět obsahuje vypočtené hodnoty indexu aktivity stejnou metodikou jako v předchozím případě u cementových malt.

Výsledky jsou vždy průměrnou hodnotou ze 3 stanovení. Zbytky dílců po ohybové zkoušce poté byly použity pro další zkoušky.

Tab. 41: Dosažené mechanické parametry vyrobených vibrolisovaných dlažeb

Stáří	7 dní			28 dní		
Vlastnost / Označení	REF	C+P+20F	C+P+30F	REF	C+P+20F	C+P+30F
Pevnost v ohybu [MPa]	4,0	4,2	4,2	4,7	4,7	5,1
Index aktivity [%]	-	+5,0	+5,0	-	0,0	+8,5
Stáří	60 dní			90 dní		
Vlastnost / Označení	REF	C+P+20F	C+P+30F	REF	C+P+20F	C+P+30F
Pevnost v ohybu [MPa]	5,7	5,6	6,7	6,2	6,0	6,8
Index aktivity [%]	-	-1,8	+17,2	-	-3,2	+9,7
Stáří	180 dní			360 dní		
Vlastnost / Označení	REF	C+P+20F	C+P+30F	REF	C+P+20F	C+P+30F
Pevnost v ohybu [MPa]	7,0	6,7	6,9	7,5	6,9	7,2
Index aktivity [%]	-	-4,3	-1,4	-	-8,0	-4,0
Stáří	360 dní – venkovní uložení					
Vlastnost / Označení	REF	C+P+20F	C+P+30F			
Pevnost v ohybu [MPa]	7,0	6,8	7,3			
Index aktivity [%]	-	-2,9	+4,2			

Dosažené výsledky ohybových pevností poukazují na již dříve zjištěný trend, že nejvyšších indexů aktivity je dosahováno pro menší doby stáří a z dlouhodobého hlediska může docházet k jeho poklesu. Ve všech případech však byly naplněny požadavky normy ČSN EN 1339 [N9] na mechanické parametry a v případě vibrolisovaného zboží je nutné brát v potaz možnost výraznější variability výsledků.

10.1.3.2. Stanovení nasákavosti betonových dlažeb

Celková i kapilární nasákavost byla stanovena vždy na zlomcích po ohybové zkoušce, přičemž pro tyto zkoušky byly ze zlomků připraveny výřezy o rozměrech 200×200×50 mm. Pro možné ovlivnění výsledků byly navíc vzorky pro stanovení celkové nasákavosti sušeny do konstantní hmotnosti při 40 i 105 °C. Nižší teplota sušení byla zvolena s ohledem na možný rozklad vzniklých degradačních novotvarů v mikrostrukturu vyšší teplotou. Výsledky obsahuje následující tabulka.

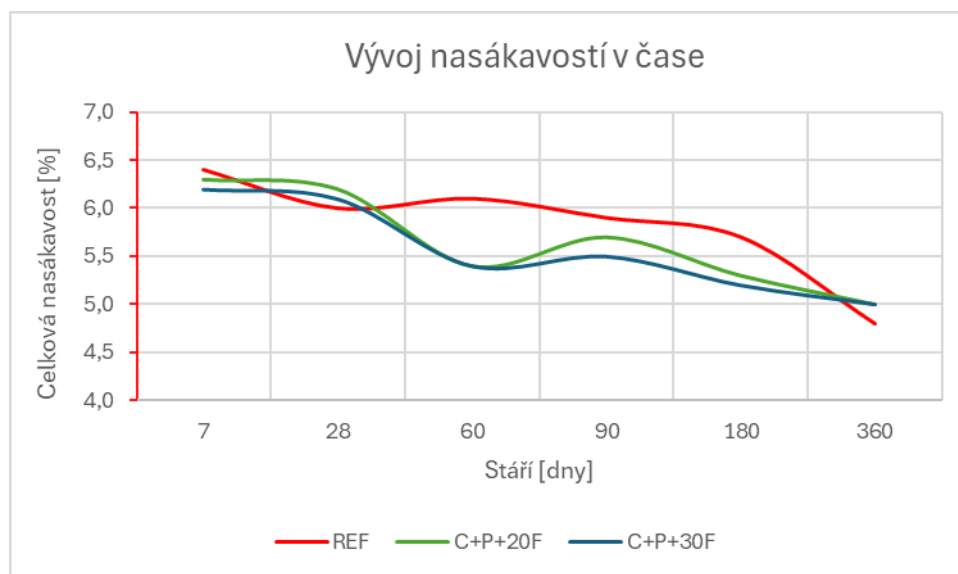
Tab. 42: Dosažené výsledky nasákavosti vyrobených vibrolisovaných betonových dlažeb

Stáří	7 dny			28 dní		
Vlastnost / Označení	REF	C+P+20F	C+P+30F	REF	C+P+20F	C+P+30F
Celková nasákavost [%]	3,5 / 6,4	3,4 / 6,3	3,4 / 6,2	3,9 / 6,0	4,3 / 6,2	4,4 / 6,1
Kapilární nasákavost [g/(m ² ·s)]	1,6 / 2,1	2,4 / 2,2	2,5 / 2,3	1,5 / 2,1	2,5 / 2,4	2,7 / 2,4
Stáří	60 dní			90 dní		
Vlastnost / Označení	REF	C+P+20F	C+P+30F	REF	C+P+20F	C+P+30F
Celková nasákavost [%]	3,4 / 6,1	3,5 / 5,4	3,4 / 5,4	3,6 / 5,9	3,3 / 5,7	3,2 / 5,5
Kapilární nasákavost [g/(m ² ·s)]	1,3 / 2,2	2,6 / 2,1	2,6 / 2,1	1,5 / 1,8	2,4 / 2,2	2,5 / 2,3
Stáří	180 dní			360 dní		
Vlastnost / Označení	REF	C+P+20F	C+P+30F	REF	C+P+20F	C+P+30F
Celková nasákavost [%]	3,5 / 5,7	3,3 / 5,3	3,1 / 5,2	3,4 / 4,8	2,9 / 5,0	2,7 / 5,0
Kapilární nasákavost [g/(m ² ·s)]	1,4 / 2,0	2,5 / 2,4	2,5 / 2,4	1,3 / 1,9	2,2 / 2,0	2,3 / 2,0
Stáří	360 dní – venkovní uložení					
Vlastnost / Označení	REF	C+P+20F	C+P+30F			
Celková nasákavost [%]	3,6 / 5,3	3,2 / 5,1	2,9 / 4,8			
Kapilární nasákavost [g/(m ² ·s)]	1,6 / 2,1	2,4 / 2,3	2,4 / 2,2			

Pozn.: Číslo před lomítkem je výsledek při sušení na 40 °C a číslo za lomítkem při sušení na 105 °C

Výsledky celkové nasákavosti podávají obraz, že v případě vzorků vyrobených za použití směsi CHAP nelze pozorovat zvýšené hodnoty oproti vzorků referenčním a opět lze všechny výsledky klasifikovat již při stáří 28 dní prakticky jako vyhovující dle normy

ČSN EN 1339. [N9] Z dosažených výsledků je však rovněž opět patrná jejich značná variabilita v čase. Obecně lze ale říci, že hodnota celkové nasákavosti u všech vzorků v čase klesá. Obdobný trend lze poté pozorovat u výsledků kapilární nasákavosti jádrové vrstvy. Tento trend je lépe vidět na následujícím Obr. 67. Výsledky kapilárních nasákavostí jádrové vrstvy poté neprokazují zhoršující se hodnoty s dobou stáří a nelze tak soudit na negativní degradaci mikrostruktury při použití fluidního popílku, která by se projevovala tvorbou mikroporuch a zvýšenou hodnotou nasákavosti. Hodnoty kapilárních nasákavostí jádrové vrstvy jsou však obecně mírně vyšší u vzorků vyrobených se směsí CHAP, než u vzorků referenčních vyrobených pouze za použití vysokoteplotního úletového popílku.



Obr. 67: Vývoj celkové nasákavosti vibrolisovaných betonových dlažeb v čase

Na základě těchto poznatků je možné říci, že z pohledu nasákavostí nebyla pozorována možná degradace mikrostruktury v čase, která by měla za následek zvýšenou absorpci vody.

10.1.3.3. Trvanlivost betonových dlažeb

Vzorky pro stanovení mrazuvzdornosti byly připraveny řezáním na rozměr 250×250×50 mm a pro zkoušku odolnosti proti CHRL na rozměrech 100×100×50 mm. Vzorky byly až do stáří 28 dnů uloženy ve vodním prostředí. Zkouška mrazuvzdornosti betonu byla provedena na 150 zmrazovacích cyklů a zkouška odolnosti proti CHRL metodou automatického cyklování A, byla provedena na 100 zkušebních cyklů. U vzorků pro mrazuvzdornost betonu byl stanoven index mrazuvzdornosti pevnosti v ohybu

zkoušené dle normy ČSN EN 1339 [N9], který je porovnáním dosažených ohybových pevností na srovnávacích vzorkách a na vzorkách zmrazovaných.

Následující tabulka zobrazuje souhrnně dosažené výsledky.

Tab. 43: Výsledky mrazuvzdornosti a odolnosti proti CHRL vyrobených vibrolisovaných betonových dlažeb

Označení / vlastnost	Mrazuvzdornost T150		CHRL A
	Změna hmotnosti [%]	Index mrazuvzdornosti [-]	Načítaný odpad po 100 cyklech [g/m ²]
REF	-0,10	0,87	115,2
C+P+20F	+0,48	0,90	108,6
C+P+30F	+0,57	0,89	96,6

Struktura jádrové vrstvy receptury označené jako C+P+30F po zkoušce mrazuvzdornosti a provedení ohybové zkoušky je patrná z následujících ilustrativních fotografií.



Obr. 68: Detail jádrové vrstvy na zlomu

Z dosažených výsledků i přiložených fotografií je patrné, že vyrobené vzorky jsou dobře odolné i z hlediska působení mrazu a vody. Betonové ploché dlažby vyrobené ze

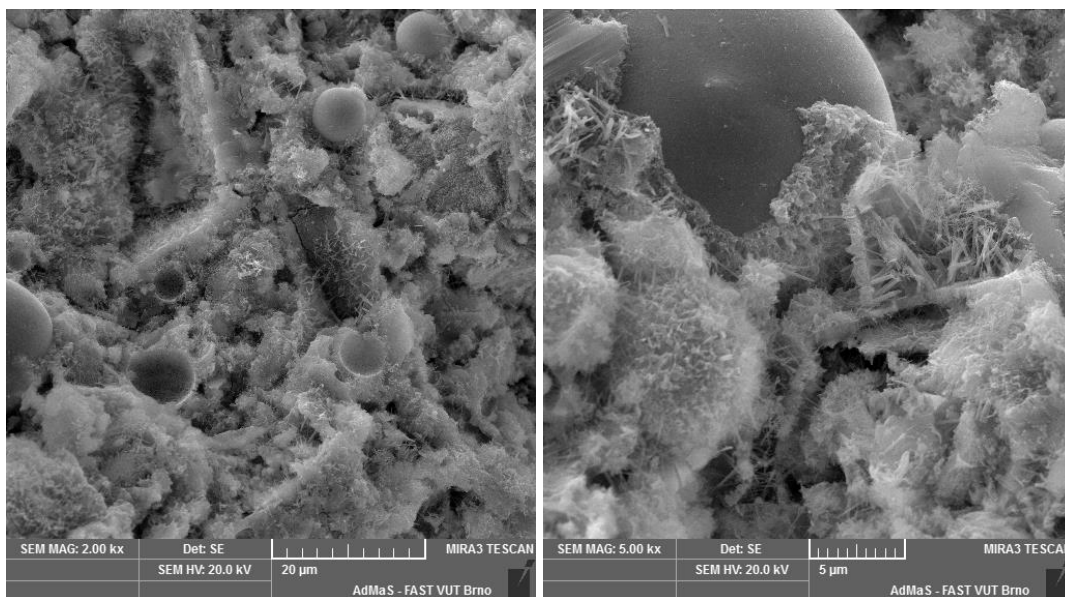
směsí chemicky aktivovaných popílků (CHAP) vykazují dokonce mírně vyšší hodnoty indexu mrazuvzdornosti a je tak patrné, že tyto navržené směsi CHAP nejsou překážkou pro výrobu vysoce trvanlivých betonových vibrolisovaných prvků. V případě odolnosti analyzovaných zkušebních vzorků proti CHRL bylo prokázáno, že jádrová vrstva modifikovaná přidávkem fluidního popílku nijak negativně neovlivňuje výslednou trvanlivost vrstvy nášlapné a její dokonalé propojení s vrstvou jádrovou.

10.1.3.4. Mikrostruktura betonových dlažeb vyrobených z CHAP

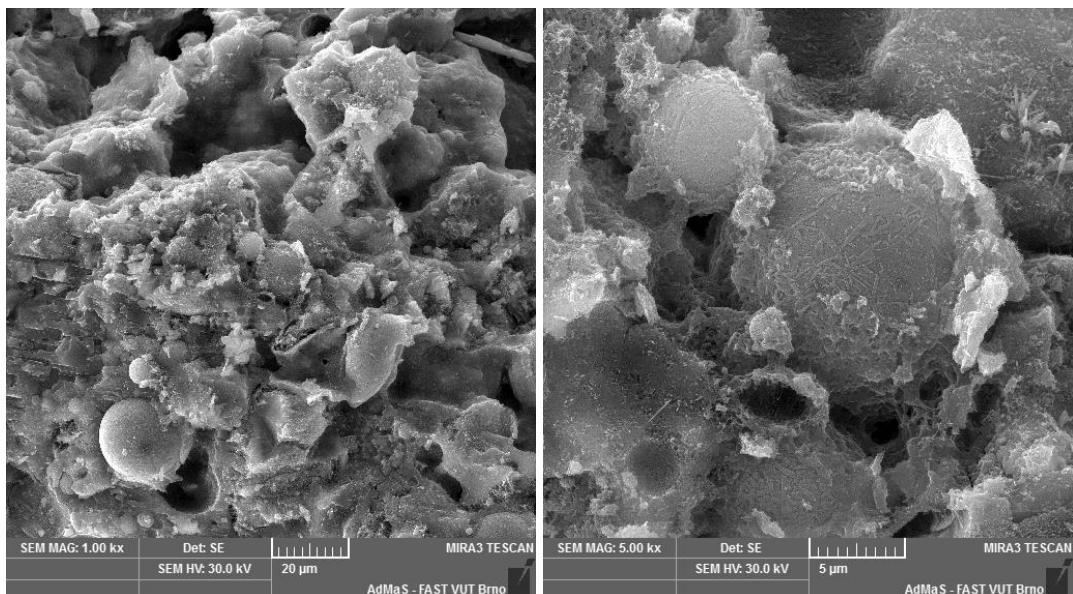
Sledování mikrostruktury bylo založeno zejména na snímcích ze skenovacího elektronového mikroskopu a následně ze stanovené mineralogie pomocí XRD a DTA.

Mikrostruktura vzorků byla analyzována ve stáří 7, 28 a 360 dní (laboratorní i venkovní uložení) a u vzorků pro zkoušku mrazuvzdornosti před i po ní (vodní uložení), přičemž všechny analyzované vzorky byly odebrané vždy přibližně ze středu vzorku po zkoušce pevnosti v ohybu a následně byly vysušeny při 40 °C a pro zkoušky XRD a DTA dále pomlety na největší zrno 0,063 mm.

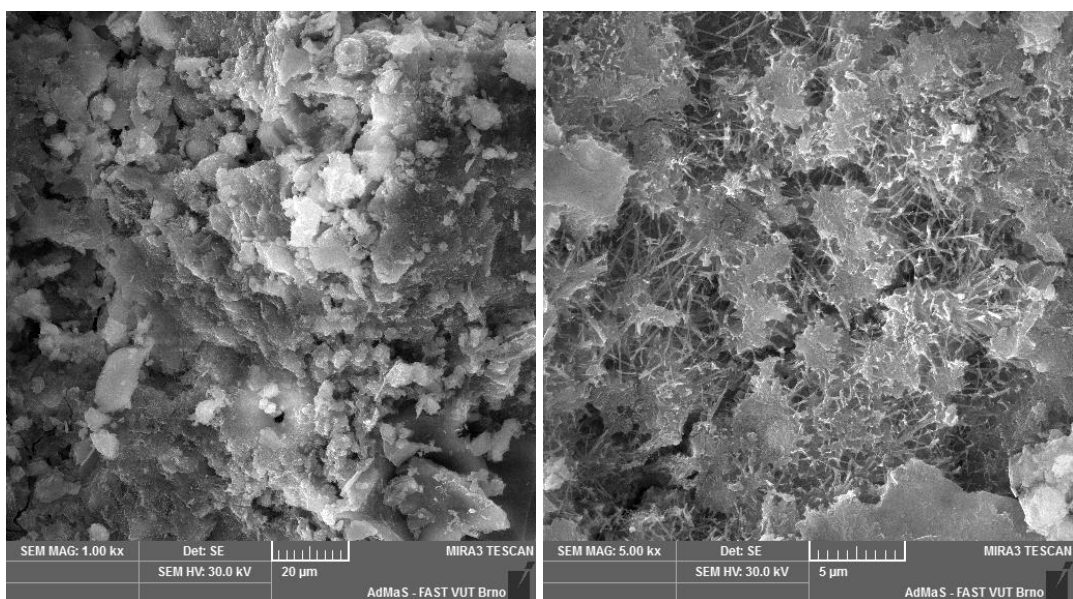
Následující vybrané snímky z elektronového mikroskopu podávají jednoznačný obraz o průběhu pucolánové reakce a o růstu případných nežádoucích novotvarů.



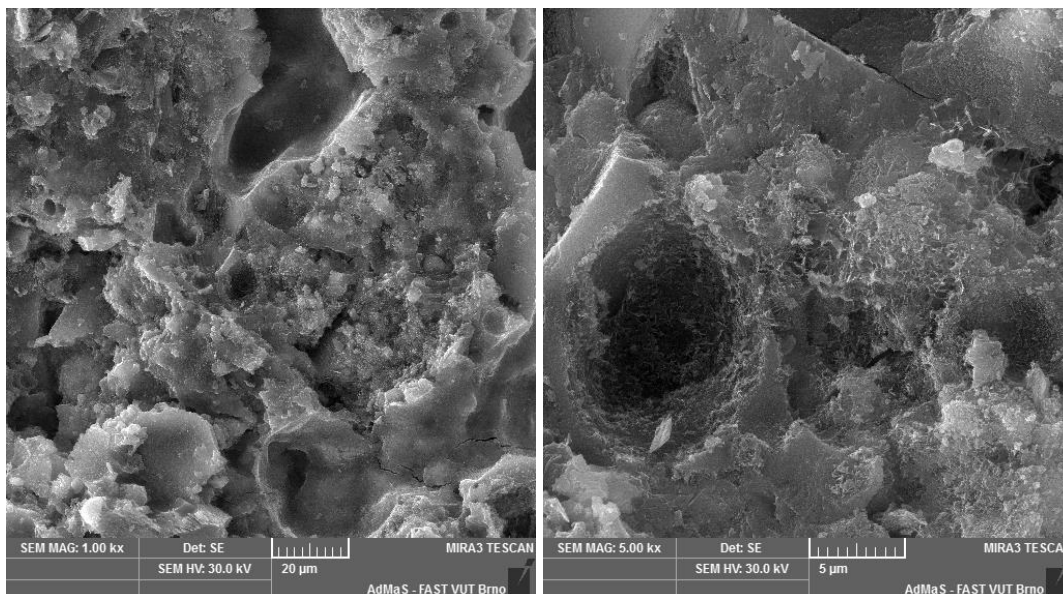
Obr. 69: Fotografie mikrostruktury vzorku C+P+30F po 7 dnech zrání – patrná ještě nezreagovaná zrna vysokoteplotního popílku, tvořící se CSH gely a přítomnost ettringitu



Obr. 70: Fotografie mikrostruktury vzorku C+P+30F po 28 dnech zrání – patrný průběh pucolánové reakce zrn vysokoteplotního popílku a zahušťování mikrostruktury



Obr. 71: Fotografie mikrostruktury vzorku C+P+30F po 360 dnech zrání – výrazné zahušťování mikrostruktury vznikajícími produkty pucolánové reakce a prorůstání jehlic primárního ettringitu CSH gely

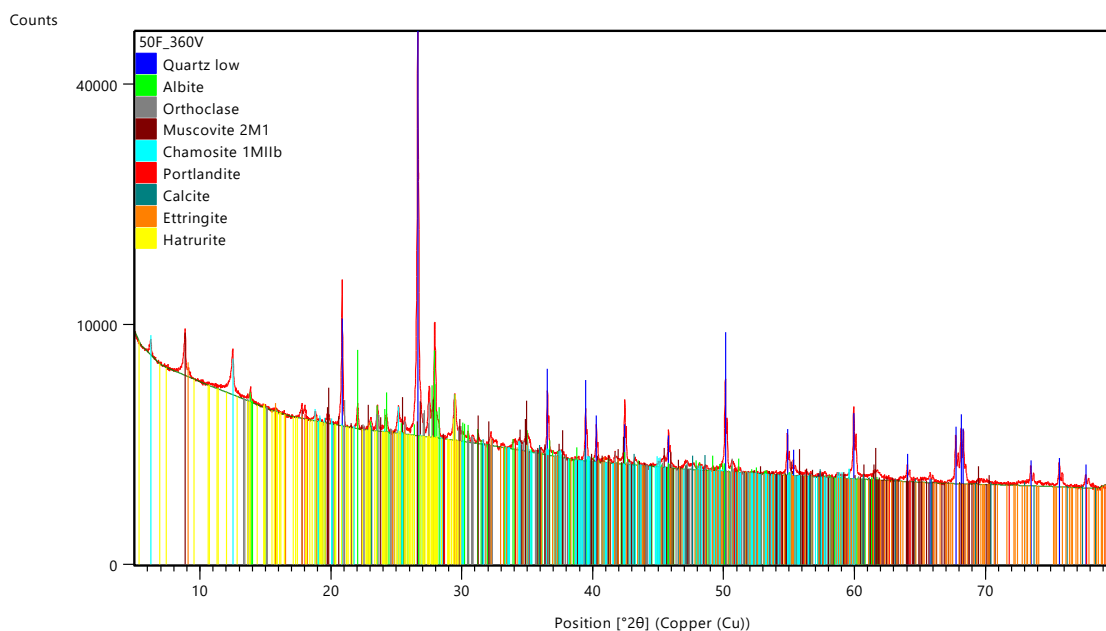


Obr. 72: Fotografie mikrostruktury vzorku C+P+30F po zkoušce mrazuvzdornosti – bez výskytu mikroporuch, kompaktní mikrostruktura zahušťována produkty pucolánové reakce

Na snímcích z elektronového mikroskopu jsou patrné pochody probíhající pucolánové reakce v čase a dále tvorba nežádoucích novotvarů zejména v podobě jehlic ettringitu. U snímků po 360 dnech od výroby je však patrné, že jehlice ettringitu jsou již spíše prorůstány produkty pucolánových reakcí a lze tak soudit, že jeho tvorba je již upozaděna na úkor žádoucích a mikrostrukturu vyplňujících gelových struktur.

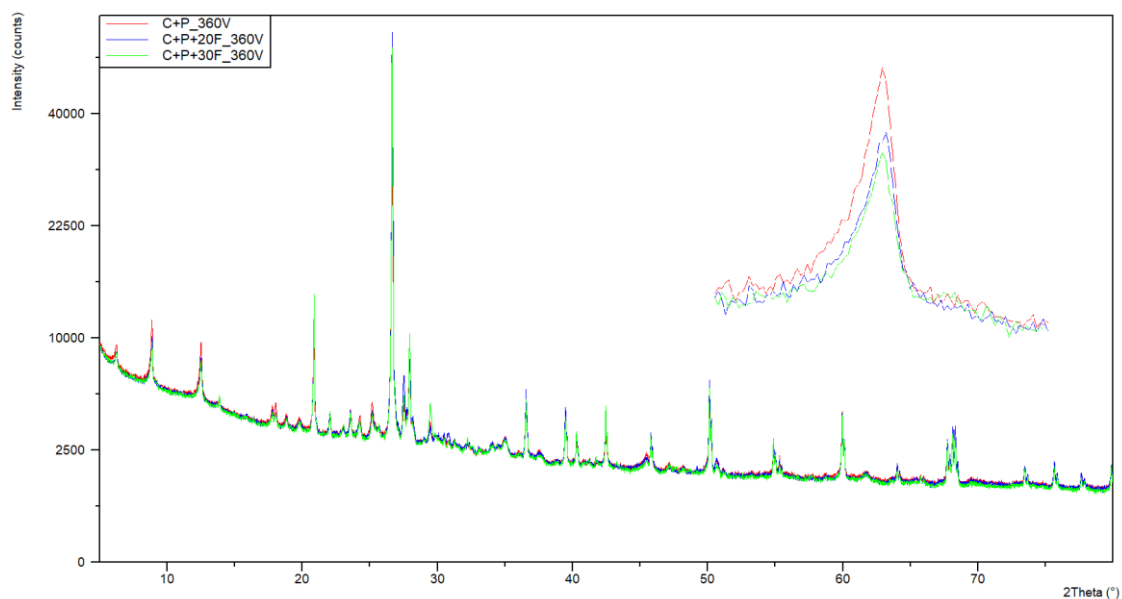
Po zkoušce mrazuvzdornosti poté nejsou sledovány žádné výrazné mikrostrukturní změny oproti srovnávacím vzorkům, což vysvětluje jen malé poklesy ohybových pevností.

Následující detailně vyhodnocený rentgenogram podává obraz o mineralogickém složení vzorku C+P+30F po uložení 360 dní ve venkovním prostředí. Další obrázky rentgenogramů slouží k porovnání výsledků XRD jednotlivých vzorků.

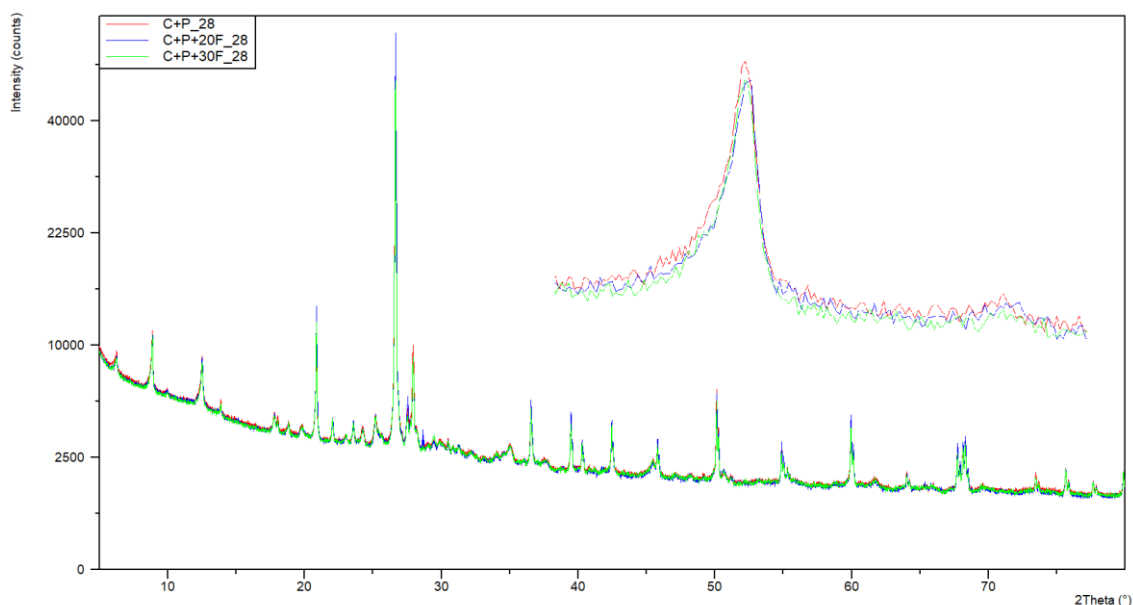


Obr. 73: Vyhodnocený rentgenogram vzorků C+P+30F po 360 dnech uložení ve venkovním prostředí

Podle výsledků XRD je patrné, že vzorek vyjma běžných minerálů pocházejících z kameniva (křemen, živce, jílovit-slídové minerály) obsahuje navíc zbytky nezhydratovaných fází cementu (hatrurit) a probíhajících hydratačních a následně karbonatačních reakcí (kalcit a portlandit) a rovněž sulfátové AFt fáze (ettringit). Z výčtu minerálů se jako potenciálně nebezpečný pro ztvrdlý cementový kompozit jeví pouze ettringit. Proto následující porovnávací rentgenogramy budou obsahovat dále porovnání píků odpovídajících tomuto minerálu. Přítomnost nezreagovaných fází cementu je poté dána nízkým vodním součinitelem při výrobě daných vzorků metodou vibrolisování a uložení vzorků v přirozeném prostředí bez značného přísunu vody.



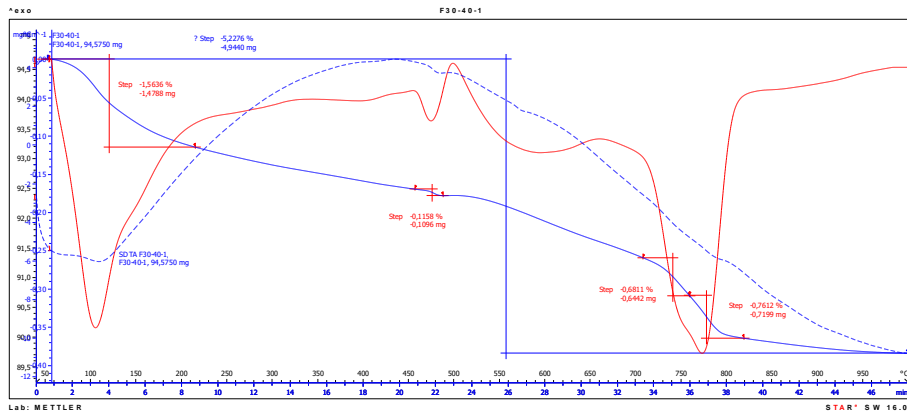
Obr. 74: Ilustrativní rentgenogram vzorků uložených 360 dní ve venkovním prostředí + detail oblasti výskytu hemikarbonátů



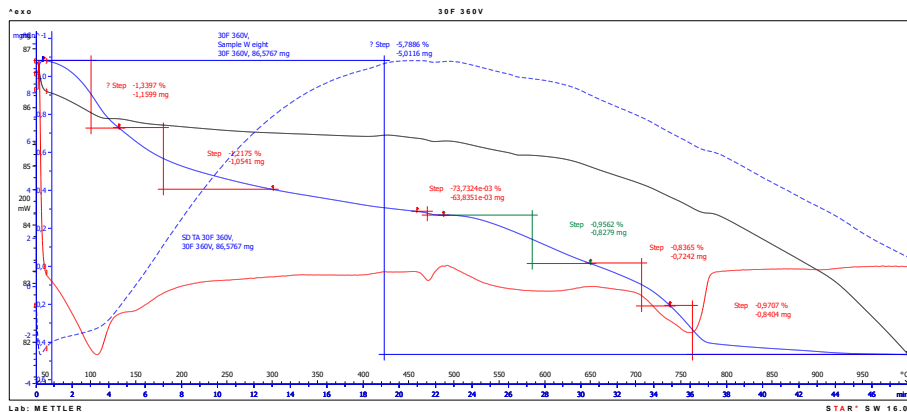
Obr. 75: Ilustrativní rentgenogram vzorků uložených 28 dní ve vodním uložení + detail oblasti výskytu hemikarbonátů

Příložené ilustrativní rentgenogramy potvrzují dále závěry výsledků elektronové mikroskopie, kdy nejsou patrné výrazné rozdíly v zastoupení jednotlivých minerálů u analyzovaných vzorků. Ve všech případech byla detekována přítomnost ettringitu bez ohledu na uložení vzorků a zastoupení fluidního popílku. Dále nebyl pozorován výskyt žádných dalších pro beton degradačních minerálů. Množstevní zastoupení jednotlivých

minerálů včetně ettringitu však nelze touto metodou jednoznačně určit, protože se jedná primárně o metodu kvalitativní.



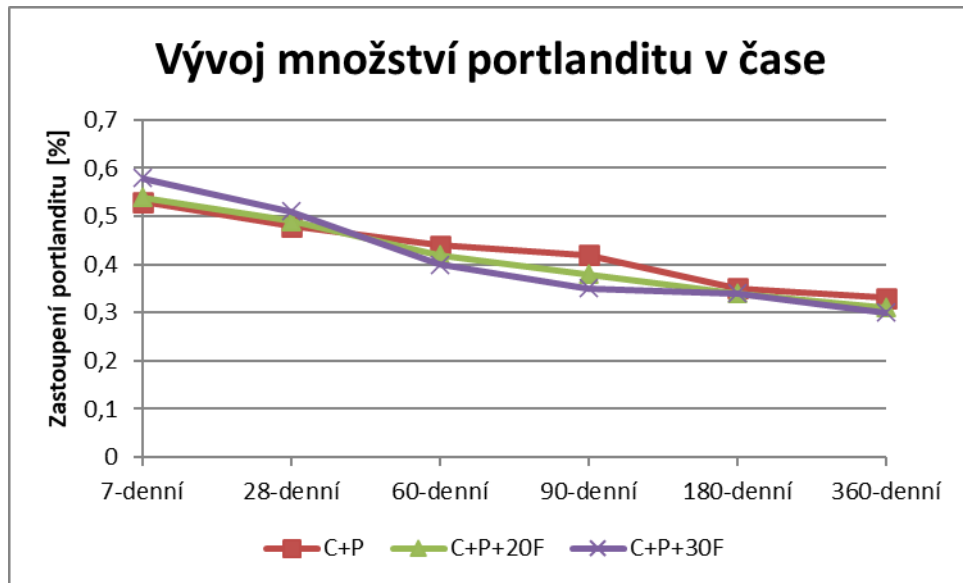
Obr. 76: Výsledek termogravimetrické analýzy pro vzorek C+P+30F při stáří 7 dní



Obr. 77: Výsledek termogravimetrické analýzy pro vzorek C+P+30F po uložení 360 dní ve venkovním prostředí

Výsledky termogravimetrické analýzy dále potvrzují výsledky stanovené za pomoci SEM a XRD a navíc podávají obraz o průběhu pucolánové reakce s ohledem na množství zastoupení portlanditu, který je pucolánovou reakcí spotřebováván. Přítomnost a množství zastoupení ettringitu nebo monosulfátu je i z této metody složité určit, protože teplotní rozklad těchto minerálů se děje v teplotním pásmu typickém rovněž pro teplotní rozklady gelových struktur a odchod zbytkové fyzikálně vázané vody. Pro přesnou analýzu zastoupení množství ettringitu a monosulfátu by bylo navíc potřeba provést velice nákladnou analýzu par, které během průběhu TGA odchází.

Ze všech dosažených výsledků TGA lze však vyhodnotit úbytek portlanditu v čase a tyto výsledky obsahuje následující Obr. 78.



Obr. 78: Vývoj množství portlanditu v čase u vzorků vibrolisovaných betonových dlažeb uložených v laboratorním prostředí

Graf vývoje zastoupení portlanditu v čase ukazuje očekávaný sestupný trend, který poukazuje na průběh pucolánových reakcí, při kterých je portlandit spotřebováván. Výsledky rovněž poukazují na trend zvýšeného množství portlanditu u vzorků obsahujících fluidní popílek, přičemž pokles jeho zastoupení v čase je výraznější. Tento jev zvýšeného množství portlanditu v raných dnech zrání kompozitu je nejspíše dán jeho tvorbou po styku fluidního popílku s vodou, kdy dochází k chemické reakci, při níž se zastoupené volné aktivní CaO mění právě na portlandit, který se však může ihned účastnit následných hydratačních a pucolánových reakcí. Nabyté výsledky tak prokazují princip chemické aktivace vysokoteplotního popílku přidávkem popílku fluidního.

10.1.3.5. Souhrnné zhodnocení použití CHAP pro výrobu vibrolisovaných betonových dlažeb

Experimentem zaměřeným na praktickou výrobu byla prokázána možnost využití směsí CHAP pro výrobu drobných prefabrikovaných betonových dílců. Nejprve byla ověřena navržená metodika stanovení optimálního poměru mísení jednotlivých druhů popílků pro výrobu CHAP, přičemž nabyté výsledky prokázaly univerzálnost navrženého poměru mísení v předešlých kapitolách experimentální části disertační práce.

Reálný proces výroby betonových dlažebních desek přímo v provozu prokázal bezproblémové využití směsí CHAP pro výrobu betonů a následně pro výrobu samotných prefabrikovaných dílců na karuselovém lisu. Vyrobené betonové dlažby poté byly podrobeny velkému množství zkoušek, které jednak odpovídaly požadavkům normy ČSN EN 1339 [N9], která je přímým normativním dokumentem pro daný druh výrobku, ale rovněž byly zařazeny zkoušky, které by mohly napomoci důkladně zkoumat pozitivní nebo negativní vliv směsi CHAP na výsledný produkt.

Zkoušky byly prováděny z dlouhodobého hlediska až do stáří 1 roku a během procesu zkoušení nebyl pozorován žádný negativní dopad směsi CHAP na vyrobené betonové dlažby. Dosažené výsledky byly prakticky srovnatelné a v některých případech lepší než v případě dlažeb referenčních vyrobených pouze za použití klasického vysokoteplotního popílku. Z hlediska mikrostruktury nebyly rovněž zaznamenány žádné negativní procesy nekontrolovatelného růstu nežádoucích novotvarů, které by na kompozit mohly působit destruktivně a spíše byl prokázán dobrý proces zahušťování mikrostruktury žádoucími gelovými strukturami vznikajícími zejména procesy pucolánových reakcí popílků.

Tento dílčí experiment prokázal možnost využití směsí CHAP pro výrobu betonu v rámci drobné prefabrikace, což by mělo pozitivní dopad na ekonomiku výrobního procesu, ale rovněž na ekologii při dalším efektivním využití v současné době prakticky odpadní suroviny v podobě fluidního popílku. Ačkoliv se jeho využití v posledních letech zvyšuje, což má za následek i růst jeho ceny, tato cena je stále nižší než v případě vysokoteplotního úletového popílku, jehož produkce se výrazně omezuje.

10.2. Výroba transportbetonu

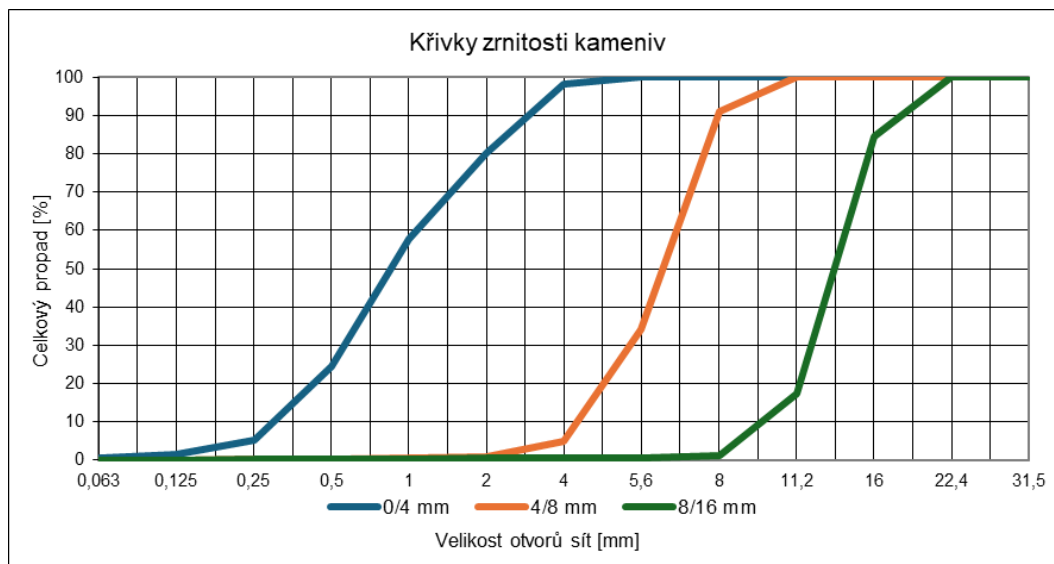
V této dílčí podetapě byla ověřena využitelnost navržené chemicky aktivované směsi popílků CHAP a navržené mechanicky aktivované směsi popílků SMAP pro výrobu konstrukčních transportbetonů. Ověření spočívalo v poloprovozní výrobě betonu na betonárně za použití těchto směsí popílků a v následné analýze mechanických a trvanlivostních parametrů vyrobených zkušebních těles. Z důvodu aplikace do reálného provozu výroby, bylo nejprve nutné provést analýzu vstupních surovin.

10.2.1. Vlastnosti vybraných vstupních surovin

Pro výrobu betonových směsí byly využity následující vstupní suroviny:

- Cement CEM II/A-S 42,5 R z cementárny Mokrá
 - Heidelberg Materials CZ, a.s.
- Černouhelný úletový popílek Dětmorovice – EDE_U
 - ČEZ Energetické produkty, s.r.o.
- Směs SMAP
 - Černouhelný ložový popílek Třebovice – ETR_L
 - Veolia Energie ČR, a.s.
 - Ložový fluidní popílek Třinec – TŽ_L
 - TŘINECKÉ ŽELEZÁRNY, a.s.
- Směs CHAP
 - Černouhelný úletový popílek Dětmorovice – EDE_U
 - ČEZ Energetické produkty, s.r.o.
 - Fluidní úletový popílek Zlín – ALPIQ
 - SEV.EN ČESKÁ ENERGIE, A.S.
- DTK 0/4P mm Žabčice
 - PÍSEK ŽABČICE spol. s r.o.
- HTK 4/8P mm Žabčice
 - PÍSEK ŽABČICE spol. s r.o.
- HTK 8/16P mm Žabčice
 - PÍSEK ŽABČICE spol. s r.o.
- Superplastifikační přísada MAPEI Dynamon PCT 629
 - MAPEI, spol. s r.o.

Pro návrh receptur bylo nejprve nutné stanovit vlastnosti kameniva a následně vlastnosti jednotlivých popílků a směsí popílků z pohledu indexu účinnosti s daným druhem cementu. Následující grafy a tabulky zobrazují dosažené analyzované vlastnosti kameniv, použitých popílků a cementu, jehož chemické parametry byly převzaty od výrobce.



Obr. 79: Křivky zrnitosti kameniv

Tab. 44: Vybrané fyzikální parametry kameniv

Materiál	Vlastnost	Obsah jemných částic	Tvarový index	Objemová hmotnost zrn ρ_{rd}	Nasákavost za 24 hodin
-	Jednotky	%	%	Mg/m ³	%
0/4 mm	Výsledek	0,42	-	2,61	0,6
4/8 mm		0,21	8	2,55	1,6
8/16 mm		0,11	10	2,56	1,3

Tab. 45: Vybrané chemické a fyzikální parametry CEM II/A-S 42,5 R

Vlastnost	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Obsah Cl	Na ₂ O ekv.	Obsah síranů (SO ₃)
Jednotky	%							
Výsledek	22,65	5,39	2,76	58,15	2,58	0,047	0,64	2,62
Vlastnost	Měrná hmotnost		Jemnost mletí		Počátek tuhnutí	Doba tuhnutí	Objemová stálost	
Jednotky	g/cm ³		m ² /kg		min	min	mm	
Výsledek	3,110		465		225	320	0,9	

Tab. 46: Mechanické parametry pojiv a indexy účinnosti popílků

Materiál	Vlastnost	Pevnost v tahu za ohybu / Pevnost v tlaku	
		7 denní	28 denní
-	Jednotky	MPa	
CEM II/A-S	Výsledek	6,1 / 34,7	9,7 / 59,9
EDE		5,7 / 29,9	7,8 / 43,0
SMAP		5,8 / 29,2	7,5 / 41,6
CHAP		6,3 / 31,3	8,5 / 47,6
Materiál	Vlastnost	Index účinnosti	
		7 denní	28 denní
-	Jednotky	%	
EDE	Výsledek	86,2	71,8
SMAP		84,1	69,4
CHAP		90,2	79,5

Výsledky indexů účinnosti nedosahují u vysokoteplotního úletového popílku Dětmárovice a směsi SMAP mezní hodnoty 75 % po 28 dnech dle ČSN EN 450-1 [N3], což je však dáno skutečností, že pro výrobu malt byl použit směsný portlandský cement CEM II/A-S 42,5 a ne normou vyžadovaný portlandský cement CEM I 42,5 R. Pro potřeby experimentu, bylo však nutné znát reálné chování s daným druhem cementu.

Dle nabytých výsledků došlo k návrhu finálních receptur konstrukčních betonů pro dopravu automixy. Jedná se o receptury pro neprovzdušněný beton třídy C 30/37 v konzistenci sednutí kužele S4. Tyto receptury obsahuje následující Tab. 47, přičemž všechny receptury jsou uvedené na 1 m³ a dávkování jednotlivých složek je v kg. Pro účely experimentu byly vyrobeny celkem 4 receptury a dávka vody a plastifikační přísady byla volena s ohledem na dosažení srovnatelného stupně konzistence. Procentuální zastoupení jednotlivých frakcí kameniv je navrženo pro všechny receptury neměnné.

Tab. 47: Navržené receptury transportbetonů

Surovina/Označení	REF	EDE	SMAP	CHAP
CEM II/A-S 42,5 R Mokrý	335	260	260	260
Popílek Dětmorovice	-	140	-	-
SMAP	-	-	140	-
CHAP	-	-	-	140
DTK 0/4P mm Žabčice	860	835	840	805
HTK 4/8P mm Žabčice	145	140	142	138
HTK 8/16 mm Žabčice	790	737	750	720
Mapei Dynamon PCT629	3,0	3,2	3,3	4,0
Voda	175	168	170	190
Vodní součinitel [-]	0,47	0,53	0,54	0,61
Dávka pojiva [kg]	335	286	286	286

Vodní součinitel a dávka pojiva byly stanoveny za užití koncepce k-hodnoty, která je pro daný druh cementu 0,4 při započitatelném množství popílek/cement $\leq 0,25$. Pro výpočet vodního součinitele bylo rovněž uvažováno s nasákavostí kameniva a dávkou plastifikační přísady, v případě, že její dávka překračuje 3,0 l na 1 m³. Na směsi SMAP a CHAP bylo v rámci k-hodnoty nahlíženo jako na popílky dle ČSN EN 450-1. [N3]

10.2.2. Proces výroby a vlastnosti čerstvého betonu

Betonové směsi byly vyrobené na betonárně s planetovou míchačkou EUROMECC Fivetech1000S s automatickým, počítačem řízeným provozem a každá receptura byla vyrobená v množství 3 m³, ze kterého byla následně vyrobena zkušební tělesa a systémové legobloky a silniční panely. Výroba těchto konstrukčních prvků je doplňkovou činností daného producenta betonu. Výroba betonové směsi a vyrobené konstrukční prvky jsou vidět na následujících fotografiích. Konzistence betonové směsi byla stanovena na vzorku odebraném z automixu před výrobou zkušebních těles a následně po 60 minutách pomalého promíchávání v automixu.



Obr. 80: Výroba navržených transportbetonů



Obr. 81: Vyrobené systémové legobloky a silniční panely

Vlastnosti čerstvého betonu zobrazuje následující Tab. 48.

Tab. 48: Vlastnosti čerstvého betonu

Označení	Vlastnost	Sednutí kužele		Objemová hmotnost
		5 minut od výroby	60 minut od výroby	
-	Jednotky	mm		kg/m ³
REF	Výsledek	190	160	2360
EDE		210	170	2340
SMAP		190	170	2340
CHAP		210	160	2330

Během procesu výroby bylo prokázáno bezproblémové použití směsi SMAP a CHAP pro výrobu transportbetonu a vlastnosti v čerstvém stavu tento úsudek potvrzují. Vyšší dávka plastifikační přísady a záměsové vody odpovídala závěrům předchozích etap experimentální části disertační práce zabývající se reologií směsí při použití směsi popílků CHAP.

10.2.3. Zkoušení ztvrdlého betonu

Vyrobená zkušební tělesa byla cca po 24 hodinách od výroby vyjmuta z forem a byla dopravena do laboratoře, kde na nich byly dále prováděny zkoušky fyzikálních, mechanických a trvanlivostních parametrů. V laboratoři byla všechna zkušební tělesa uložena ve vodní lázni o teplotě cca 21 °C. Po 28 dnech normového zrání poté byla náhodně vybraná zkušební tělesa přemístěna a uložena do agresivního uložení, jejichž parametry jsou popsány dále v podkapitole 10.2.3.2 a v kapitole experimentální části této disertační práce zabývající se popisem využitých zkušebních postupů.

10.2.3.1. Stanovení fyzikálně-mechanických parametrů

Základní mechanické parametry v podobě stanovení pevnosti betonu v tlaku dle ČSN EN 12390-3 [N28] byly provedeny při stáří 7, 28 a 90 dní při současném stanovení objemové hmotnosti ztvrdlého betonu dle ČSN EN 12390-7. [N27] Dále byly ve stejném stáří stanoveny hodnoty hloubky průsaku tlakovou vodou dle ČSN EN 12390-8 [N32] a celková nasákavost betonu na zlomcích po zkoušce hloubky průsaku tlakovou vodou dle ČSN 73 1316. [N30] Všechny jmenované zkoušky byly provedeny na zkušebních tělesech tvaru krychle o hraně 150 mm a jednotlivé výsledky daných zkoušek jsou průměrnou hodnotou ze 3 stanovení.

Dosažené výsledky obsahuje následující Tab. 49. Index aktivity uvedený v této tabulce je počítán jako poměr dosažené pevnosti v tlaku v daném stáří směsi EDE a směsi SMAP nebo CHAP.

Tab. 49: Mechanické a fyzikální parametry ztvrdlých transportbetonů

Stáří	7 dny				28 dní			
	REF	EDE	SMAP	CHAP	REF	EDE	SMAP	CHAP
Objemová hmotnost [kg/m³]	2370	2350	2340	2350	2370	2360	2340	2360
Pevnost v tlaku [MPa]	36,3	32,6	32,5	40,5	49,9	47,1	44,8	57,5
Index aktivity [%]	-	-	-0,3	+24,2	-	-	-4,9	+22,1
Hloubka průsaku [mm]	15	11	13	15	10	10	7	9
Celková nasákavost [%]	6,3	6,5	6,6	6,7	5,4	5,3	5,5	5,7
Stáří	90 dní							
Vlastnost / Označení	REF	EDE	SMAP	CHAP				
Objemová hmotnost [kg/m³]	2370	2360	2350	2360				
Pevnost v tlaku [MPa]	57,6	65,5	64,1	66,6				
Index aktivity [%]	-	-	-2,1	+1,7				
Hloubka průsaku [mm]	8	6	6	7				
Celková nasákavost [%]	5,1	5,2	5,0	5,4				

Stanovené výsledky indexů aktivity poukazují na prakticky shodné parametry směsi s klasickým vysokoteplotním úletovým popílkem Dětmarovice a receptury vyrobené za použití navržené směsi SMAP. Naopak betony vyrobené za použití navržené směsi CHAP vykazují ve stáří 7 a 28 dní výrazně vyšší hodnoty pevností v tlaku než receptura s klasickým vysokoteplotním popílkem a toto navýšení pevností činí 22 % ve stáří 28 dnů. S rostoucím stářím betonu je zřejmé, že počáteční vysoká aktivita směsi CHAP klesá a výsledky se srovnávají s výsledky směsi s popílkem Dětmarovice. Tento trend byl pozorován i v předešlých experimentech této disertační práce a je zřejmé, že na něj nemá výrazný vliv ani druh cementu.

Z pohledu hodnot hloubek průsaku tlakovou vodou a celkové nasákavosti lze říci, že ve všech případech dochází ke zlepšování těchto parametrů se stářím vzorků a

receptura se směsí CHAP vykazuje jen nepatrně vyšší hodnotu celkové nasákavosti ve srovnání s ostatními.

10.2.3.2. Odolnost proti agresivnímu uložení a mikrostruktura betonu

Odolnost vyrobených betonů proti agresivnímu uložení byla sledována s cílem vyvolat případné nežádoucí chemické procesy v daném druhu prostředí ve spojitosti s navrženými směsí SMAP a CHAP, které jsou vyrobeny za použití fluidních popílků. Vyrobena zkušební tělesa byla uložena ve stáří 28 dní do následujících agresivních prostředí:

- Roztok chloridů (nasycený roztok NaCl v koncentraci 261 g/l)
- Roztok Na₂SO₄ v koncentraci 34 600 mg/l
- Roztok KNO₃ v koncentraci 180 mg/l
- Aerosol SO₂ v koncentraci 3,4 ml/l při zvýšené teplotě

Vliv agresivního uložení byl poté pozorován pomocí stanovení doby průchodu ultrazvuku a následně vypočtené hodnoty dynamického modulu pružnosti betonu. Předpokladem vhodnosti této metody je skutečnost, že doba průchodu ultrazvukové vlny betonem je odvislá na homogenitě jeho mikrostruktury. Bude-li mikrostruktura jednotlivých betonů degradována vlivem působení agresivních médií, které budou impulsem pro chemické procesy spojené s růstem nežádoucích minerálů mající vliv na kompaktnost mikrostruktury kompozitu, bude docházet ke zpomalování průchodu ultrazvukových vln. Dále byly vzorky podrobeny zkoušce stanovení pevnosti betonu v příčném tahu dle normy ČSN EN 12390-6 [N29], kdy je předpokladem, že případné porušení homogenity mikrostruktury betonu bude zřetelněji identifikovatelné pomocí tahových zkoušek betonu než tlakových. Po zkoušce pevnosti betonu v příčném tahu byly odebrány úlomky pro stanovení hodnoty pH betonu a pro zkoušky jeho mikrostruktury pomocí elektronové mikroskopie, XRD a termogravimetrie. Odběr úlomků vždy probíhal stejně cca ze středu vzorku. Všechny navržené zkoušky by měly prokázat, zda-li lze považovat použití navržených směsí SMAP a CHAP pro výrobu betonu za bezpečné z pohledu jeho trvanlivosti.

Pro vliv agresivního prostředí na dané betony byla vyrobena zkušební tělesa tvaru krychle o rozměrech 100x100x100 mm a dosažené výsledky jsou vždy průměrnou hodnotou ze 3 stanovení.

Popsané zkoušky byly provedeny před vystavením vzorků agresivnímu uložení a následně v intervalu 28, 90, 180 a 360 dní od uložení do daného agresivního prostředí. Výsledky obsahují následující Tab. 50 až Tab. 54, které jsou dělené podle druhu uložení.

Tab. 50: Dosažené výsledky zkoušky při vodní uložení vzorků

Doba uložení	Před				28 dní			
Vlastnost / Označení	REF	EDE	SMAP	CHAP	REF	EDE	SMAP	CHAP
Objemová hmotnost [kg/m ³]	2400	2370	2360	2370	2340	2370	2360	2370
Pevnost v příčném tahu [MPa]	4,15	4,05	3,95	3,75	4,30	4,15	4,35	4,00
Dynamický modul pružnosti [GPa]	48,3	48,2	46,8	46,5	49,9	50,2	49,1	48,8
pH [-]	12,4	12,1	12,0	12,1	12,3	12,2	12,1	12,0
Doba uložení	90 dní				180 dní			
Vlastnost / Označení	REF	EDE	SMAP	CHAP	REF	EDE	SMAP	CHAP
Objemová hmotnost [kg/m ³]	2390	2370	2360	2370	2400	2370	2370	2360
Pevnost v příčném tahu [MPa]	4,25	4,35	4,40	4,20	4,35	4,40	4,55	4,55
Dynamický modul pružnosti [GPa]	52,4	52,3	51,5	51,5	52,7	52,6	52,1	52,4
pH [-]	12,4	11,8	12,2	12,3	12,5	12,1	12,3	12,2
Doba uložení	360 dní							
Vlastnost / Označení	REF	EDE	SMAP	CHAP				
Objemová hmotnost [kg/m ³]	2390	2370	2370	2370				
Pevnost v příčném tahu [MPa]	4,40	4,50	4,60	4,65				
Dynamický modul pružnosti [GPa]	53,0	53,1	52,4	52,5				
pH [-]	12,4	12,3	12,2	12,2				

Tab. 51: Dosažené výsledky zkoušky při uložení vzorků v roztoku NaCl

Doba uložení	Před				28 dní			
Vlastnost / Označení	REF	EDE	SMAP	CHAP	REF	EDE	SMAP	CHAP
Objemová hmotnost [kg/m ³]	2400	2370	2370	2360	2340	2370	2370	2370
Pevnost v příčném tahu [MPa]	4,00	4,05	3,85	3,90	4,05	4,40	4,30	4,45
Dynamický modul pružnosti [GPa]	48,2	49,0	46,2	46,0	50,6	51,6	48,9	49,4
pH [-]	12,3	12,1	12,1	12,2	12,4	12,2	12,3	12,4
Doba uložení	90 dní				180 dní			
Vlastnost / Označení	REF	EDE	SMAP	CHAP	REF	EDE	SMAP	CHAP
Objemová hmotnost [kg/m ³]	2390	2370	2360	2350	2400	2370	2360	2360
Pevnost v příčném tahu [MPa]	4,30	4,50	4,70	4,45	4,25	4,40	4,55	4,70
Dynamický modul pružnosti [GPa]	52,1	53,2	50,5	51,3	52,2	53,2	51,5	51,7
pH [-]	12,5	12,3	12,1	12,2	12,4	12,3	12,1	12,2
Doba uložení	360 dní							
Vlastnost / Označení	REF	EDE	SMAP	CHAP				
Objemová hmotnost [kg/m ³]	2400	2370	2370	2370				
Pevnost v příčném tahu [MPa]	4,40	4,35	4,70	4,65				
Dynamický modul pružnosti [GPa]	52,4	53,1	51,7	52,0				
pH [-]	12,4	12,3	12,2	12,2				

Tab. 52: Dosažené výsledky zkoušky při uložení vzorků v roztoku Na_2SO_4

Doba uložení	Před				28 dní			
Vlastnost / Označení	REF	EDE	SMAP	CHAP	REF	EDE	SMAP	CHAP
Objemová hmotnost [kg/m ³]	2390	2370	2360	2350	2390	2360	2370	2360
Pevnost v příčném tahu [MPa]	3,90	4,10	4,00	3,80	3,75	4,40	4,40	3,95
Dynamický modul pružnosti [GPa]	48,2	48,9	46,0	46,6	49,7	50,7	48,1	49,0
pH [-]	12,2	12,2	12,3	12,1	12,3	12,1	12,3	12,2
Doba uložení	90 dní				180 dní			
Vlastnost / Označení	REF	EDE	SMAP	CHAP	REF	EDE	SMAP	CHAP
Objemová hmotnost [kg/m ³]	2390	2350	2360	2370	2400	2350	2360	2350
Pevnost v příčném tahu [MPa]	4,25	4,70	4,95	4,35	4,35	4,55	4,80	4,50
Dynamický modul pružnosti [GPa]	52,0	53,1	50,3	51,3	52,2	52,9	51,1	51,8
pH [-]	12,3	12,2	12,3	12,4	12,3	12,2	12,3	12,2
Doba uložení	360 dní							
Vlastnost / Označení	REF	EDE	SMAP	CHAP				
Objemová hmotnost [kg/m ³]	2400	2360	2360	2350				
Pevnost v příčném tahu [MPa]	4,20	4,70	4,75	4,75				
Dynamický modul pružnosti [GPa]	52,4	53,0	51,4	52,4				
pH [-]	12,2	12,0	12,3	12,2				

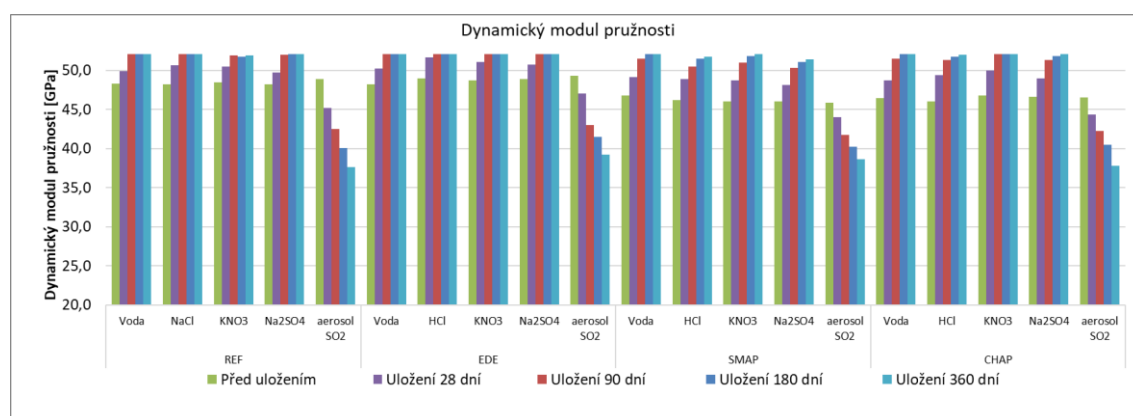
Tab. 53: Dosažené výsledky zkoušky při uložení vzorků v roztoku KNO_3

Doba uložení	Před				28 dní			
Vlastnost / Označení	REF	EDE	SMAP	CHAP	REF	EDE	SMAP	CHAP
Objemová hmotnost [kg/m ³]	2390	2370	2360	2360	2390	2360	2360	2360
Pevnost v příčném tahu [MPa]	3,90	3,85	3,80	3,75	3,90	4,25	3,90	3,60
Dynamický modul pružnosti [GPa]	48,4	48,7	46,1	46,8	50,5	51,1	48,7	50,0
pH [-]	12,3	12,3	12,1	12,0	12,2	12,2	12,4	12,3
Doba uložení	90 dní				180 dní			
Vlastnost / Označení	REF	EDE	SMAP	CHAP	REF	EDE	SMAP	CHAP
Objemová hmotnost [kg/m ³]	2400	2370	2360	2350	2390	2360	2370	2360
Pevnost v příčném tahu [MPa]	3,85	4,60	4,55	4,25	3,95	4,70	4,45	4,40
Dynamický modul pružnosti [GPa]	51,9	53,7	51,0	52,3	51,7	53,5	51,8	51,8
pH [-]	12,2	12,3	12,2	12,1	12,5	12,2	12,3	12,4
Doba uložení	360 dní							
Vlastnost / Označení	REF	EDE	SMAP	CHAP				
Objemová hmotnost [kg/m ³]	2390	2350	2360	2360				
Pevnost v příčném tahu [MPa]	4,05	4,85	4,65	4,75				
Dynamický modul pružnosti [GPa]	51,9	53,6	52,3	52,6				
pH [-]	12,3	12,1	12,3	12,2				

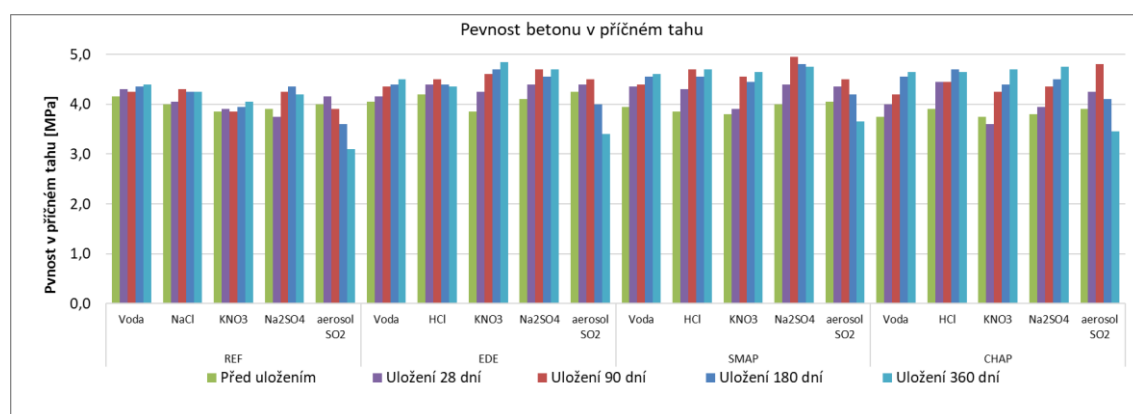
Tab. 54: Dosažené výsledky zkoušky při uložení vzorků v prostředí aerosolu SO₂

Doba uložení	Před				28 dní			
Vlastnost / Označení	REF	EDE	SMAP	CHAP	REF	EDE	SMAP	CHAP
Objemová hmotnost [kg/m ³]	2400	2370	2360	2380	2400	2370	2360	2360
Pevnost v příčném tahu [MPa]	4,00	4,25	4,05	3,90	4,15	4,40	4,35	4,25
Dynamický modul pružnosti [GPa]	48,9	49,3	45,9	46,5	45,2	47,0	44,0	44,3
pH [-]	12,3	12,1	12,2	12,3	12,4	12,3	12,3	12,2
Doba uložení	90 dní				180 dní			
Vlastnost / Označení	REF	EDE	SMAP	CHAP	REF	EDE	SMAP	CHAP
Objemová hmotnost [kg/m ³]	2390	2360	2370	2360	2370	2350	2340	2350
Pevnost v příčném tahu [MPa]	3,90	4,50	4,50	4,80	3,60	4,00	4,20	4,10
Dynamický modul pružnosti [GPa]	42,5	43,0	41,7	42,3	40,1	41,5	40,2	40,5
pH [-]	12,1	12,3	12,2	12,1	11,8	12,3	12,4	12,3
Doba uložení	360 dní							
Vlastnost / Označení	REF	EDE	SMAP	CHAP				
Objemová hmotnost [kg/m ³]	Nestanoveno							
Pevnost v příčném tahu [MPa]	3,10	3,40	3,65	3,45				
Dynamický modul pružnosti [GPa]	37,6	39,2	38,6	37,8				
pH [-]	11,7	11,9	12,2	12,0				

Dosažené výsledky jednoznačně prokazují zejména silně degradační účinek aerosolu SO₂ na beton, kdy u všech receptur došlo po uložení 360 dní již prakticky k rozpadu zkušební tělesa, proto při tomto stáří nebyla stanovena objemová hmotnost. Ilustrativní obrázek zkušební tělesa po 360 dnech uložení v tomto prostředí je na Obr. 82. Dosažené hodnoty dynamických modulů pružnosti a pevnosti betonu v příčném tahu jsou dále obsaženy v grafickém vyhodnocení.

Obr. 82: Těleso po expozici 360 dní v prostředí aerosolu SO₂

Obr. 83: Grafické vyhodnocení dosažených dynamických modulů pružnosti



Obr. 84: Grafické vyhodnocení dosažených pevností betonu v příčném tahu

Dle grafického vyhodnocení výsledků spočítaných dynamických modulů pružnosti a stanovených pevností betonu v příčném tahu je zřejmý zejména výrazný pokles těchto parametrů při dlouhodobém uložení v agresivním prostředí aerosolu SO₂. Výsledky

prokazují, že nejméně je tomuto prostředí odolná referenční receptura zcela bez popílků. Ostatní agresivní uložení neměly na dané betony z hlediska sledovaných parametrů prakticky žádný negativní dopad a spíše během zvyšujícího se stáří betonů docházelo k růstu sledovaných mechanických parametrů. Dosažené výsledky příčných tahů betonu pak vykazují mírně kolísavý charakter u jednotlivých receptur a jejich uložení v agresivním prostředí, což je však třeba připisovat samotnému druhu zkoušky, kdy výsledky dosahované v rámci stanovení tahových vlastností betonu vykazují obecně větší míru variability než výsledky tlakové.

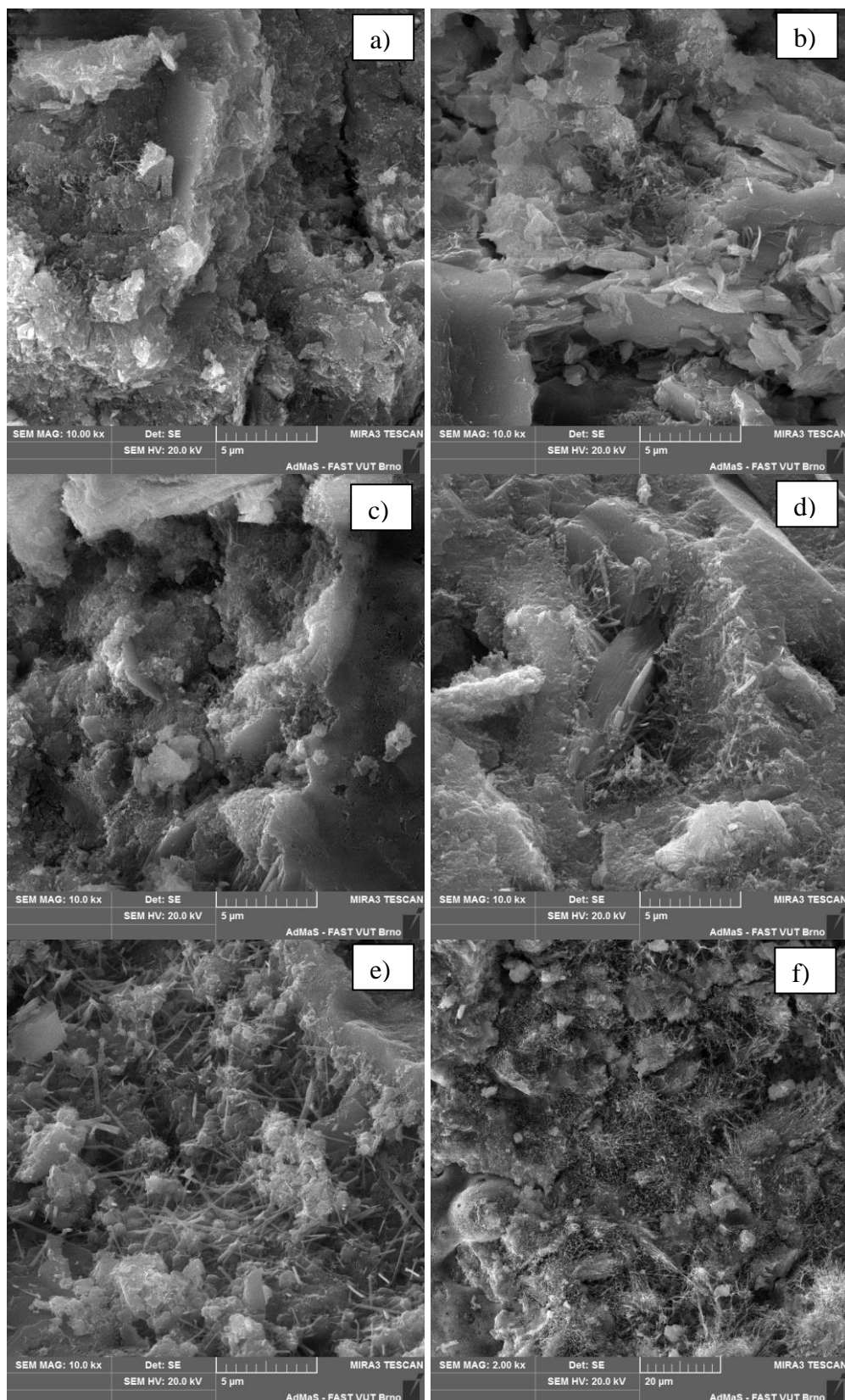
Ze stanovených hodnot pH betonu lze rovněž soudit, že všechny vyrobené zkušební směsi betonů jsou dostatečně odolné proti danému typu prostředí, vyjma prostředí agresivního aerosolu SO₂.

Nabyté výsledky pak lze z pohledu bezpečného použití navržených směsí SMAP a CHAP pro výrobu betonů hodnotit jako velice dobré, protože ani během dlouhodobého vystavení betonových směsí vyrobených za použití těchto příměsí nebyl zaznamenán odlišný trend, než je tomu v případě použití klasického vysokoteplotního popílku. Na provedené zkoušky proto dále navazovaly zkoušky analýzy mikrostruktury kompozitů.

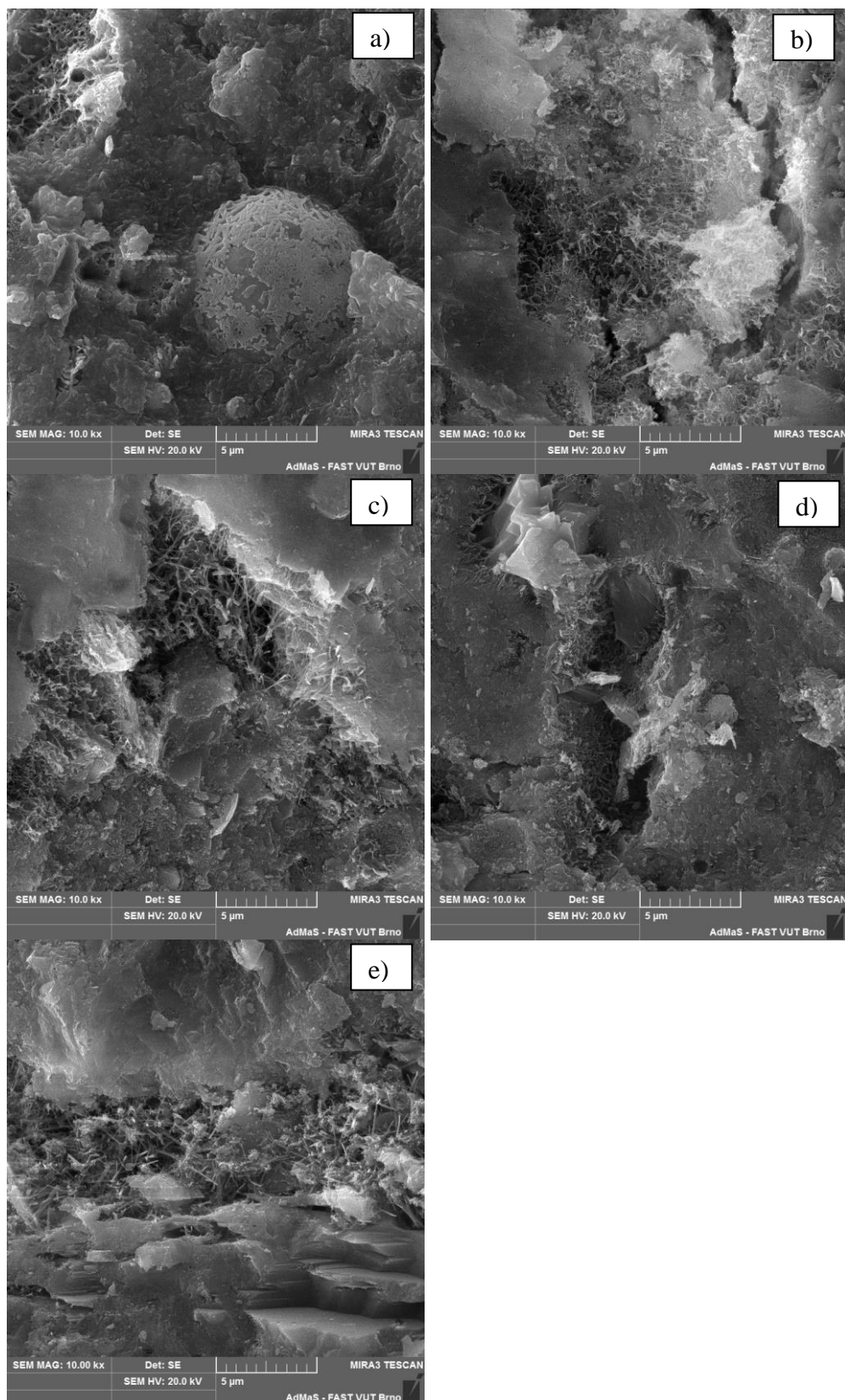
Sledování mikrostruktury bylo založeno zejména na snímcích ze skenovacího elektronového mikroskopu a následně ze stanovené mineralogie pomocí XRD a DTA.

Mikrostruktura vzorků byla analyzována v každém intervalu provádění předchozích zkoušek, přičemž všechny analyzované vzorky byly odebrané vždy přibližně ze středu vzorku po zkoušce pevnosti v příčném tahu a následně byly vysušeny při 40 °C a pro zkoušky XRD a DTA dále pomlety na největší zrno 0,063 mm.

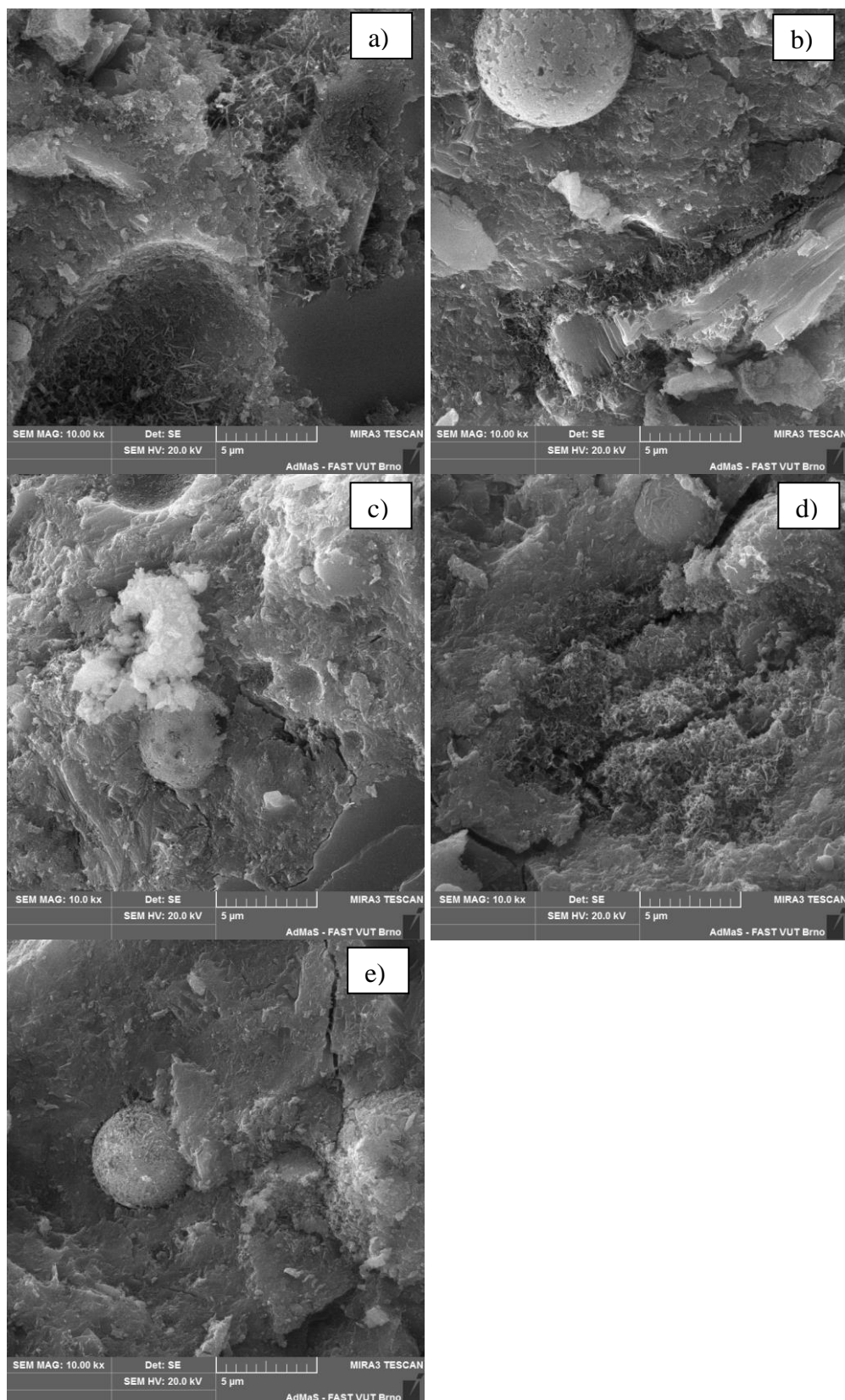
Následující vybrané snímky z elektronového mikroskopu podávají jednoznačný obraz o dopadu agresivního uložení na vyrobené betonové směsi.



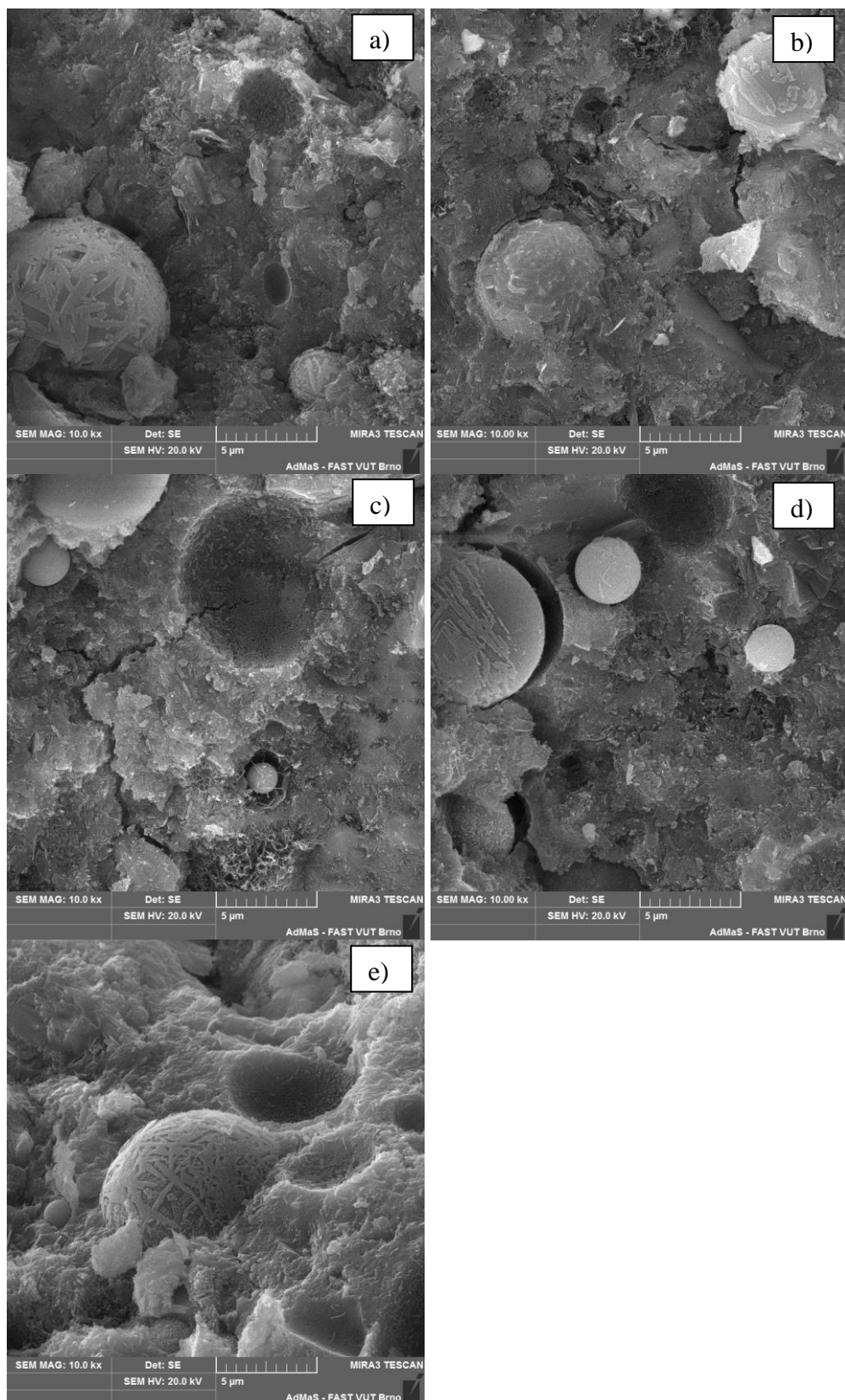
Obr. 85: Snímky mikrostruktury ze SEM pro vzorek REF při jeho uložení 180 dnů v agresivním prostředí ((a) - voda, b) - NaCl, c) - KNO₃, d) - Na₂SO₄, e) - aerosol SO₂, f) – uložení 360 dnů v prostředí aerosolu SO₂) - zvětšení 10 000 krát a 2000 krát



Obr. 86: Snímky mikrostruktury ze SEM pro vzorek EDE při jeho uložení 180 dnů v agresivním prostředí ((a) - voda, b) - NaCl, c) - KNO₃, d) - Na₂SO₄, e) - aerosol SO₂) - zvětšení 10 000 krát



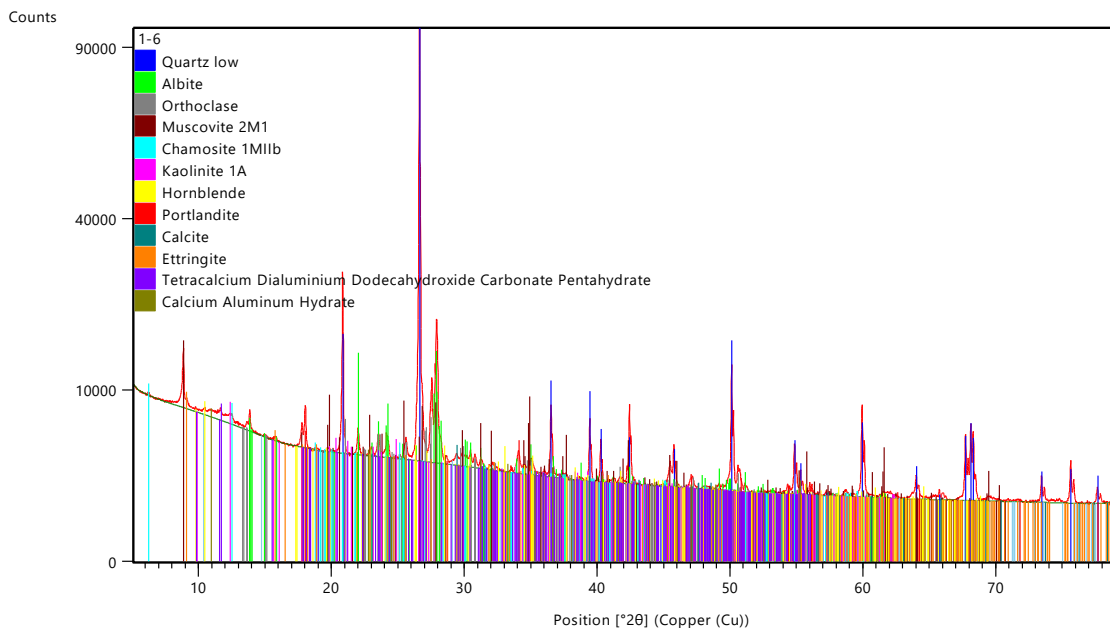
Obr. 87: Snímky mikrostruktury ze SEM pro vzorek SMAP při jeho uložení 180 dnů v agresivním prostředí ((a) - voda, b) - NaCl, c) - KNO₃, d) - Na₂SO₄, e) - aerosol SO₂) - zvětšení 10 000 krát



Obr. 88: Snímky mikrostruktury ze SEM pro vzorek CHAP při jeho uložení 180 dnů v agresivním prostředí ((a) - voda, b) - NaCl, c) - KNO₃, d) - Na₂SO₄, e) - aerosol SO₂) - zvětšení 10 000 krát

Ze snímků elektronové mikroskopie jsou dobře patrné zejména produkty pucolánových reakcí a zrna popílků, která se pucolánových reakcí účastní. Jako velmi pozitivní lze hodnotit skutečnost, že vzorky vyrobené za použití směsí SMAP a CHAP nevykazují žádné mikroporuchy dané tvorbou nežádoucího ettringitu, a to prakticky ani v případě uložení se síranů. Naopak u vzorků s popínkem Dětmarovice a zcela bez popínku je patrný právě zvýšený růst ettringitu při agresivním uložení na bázi síranů. U referenčního vzorku je pak tvorba produktů síranové koroze velmi rozvinutá, což dokazuje jedna z fotografií po uložení vzorku 360 dní v aerosolu SO₂.

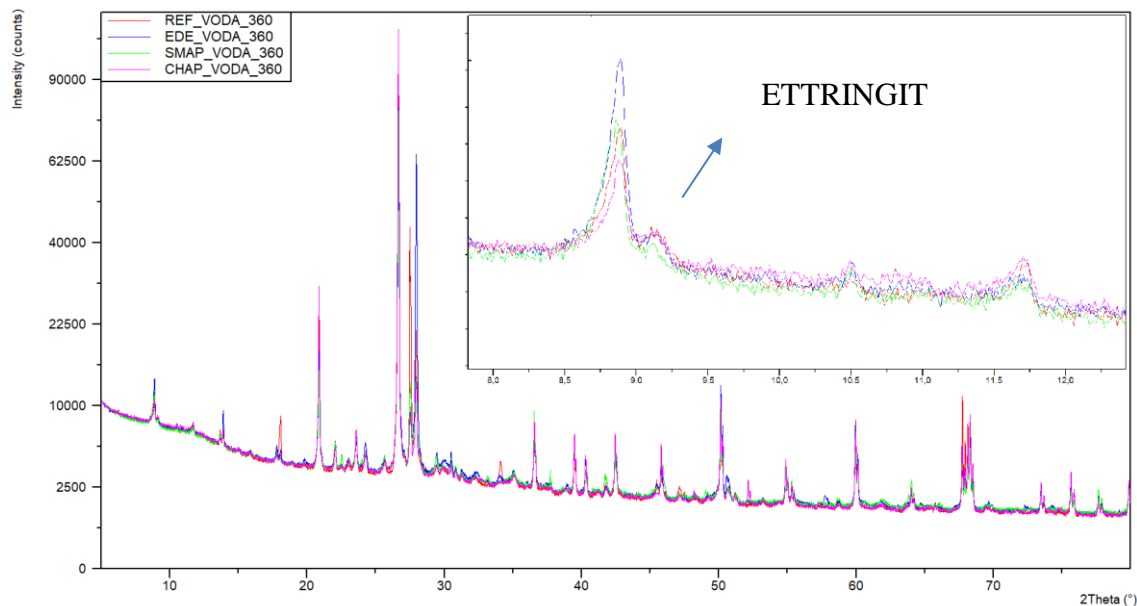
Následující podrobně vyhodnocený rentgenogram podává obraz o mineralogickém složení vzorku REF po uložení 360 dní ve vodě. Následující obrázky rentgenogramů slouží k porovnání výsledků XRD jednotlivých směsí při stejném stáří a stejných podmínkách uložení.



Obr. 89: Celkově vyhodnocený rentgenogram vzorku REF po jeho uložení 360 dní ve vodě

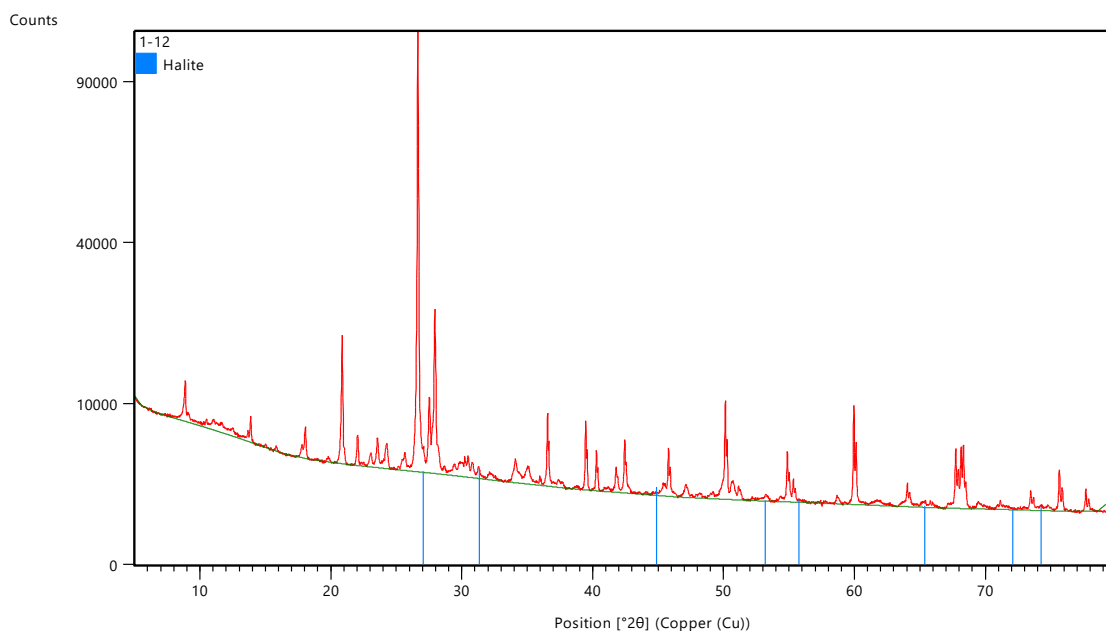
Podle výsledků XRD je patrné, že vzorek REF uložený po dobu 360 dní ve vodě vyjma běžných minerálů pocházejících z kameniva (křemen, živce, jílovit-slídové minerály) obsahuje navíc minerály a probíhajících hydratačních a následně karbonatačních reakcí (kalcit a portlandit) a rovněž sulfátové AFt fáze (ettringit) a další hemikarbonáty vyskytující se na rentgenogramu v oblasti cca 7 až 12,5°. Z výčtu minerálů se jako potenciálně nebezpečný pro ztvrdlý cementový kompozit jeví především

ettringit a případně další hemikarbonáty. Proto následující porovnávací rentgenogramy budou obsahovat dále porovnání píků odpovídajících této oblasti minerálu.



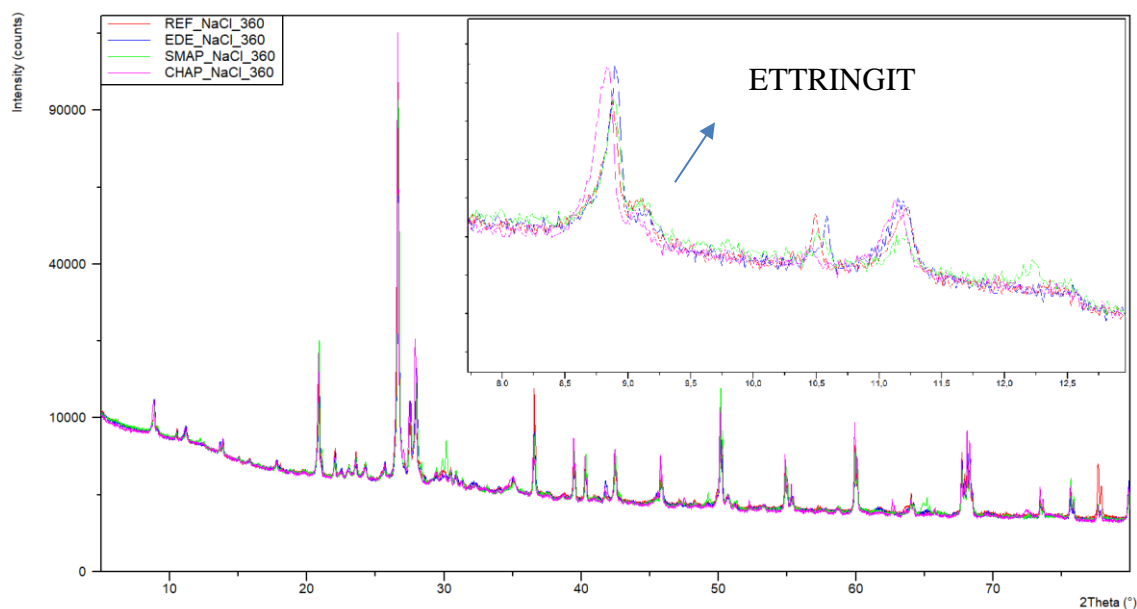
Obr. 90: Rentgenogramy všech vzorků při jejich uložení 360 dní ve vodě + detail oblasti výskytu hemikarbonátů

Stejným způsobem budou následovat vyhodnocení pro všechny druhy uložení, přičemž dále bude kladen důraz navíc na případnou detekci nově vzniklých degradačních minerálů odpovídajících danému prostředí.

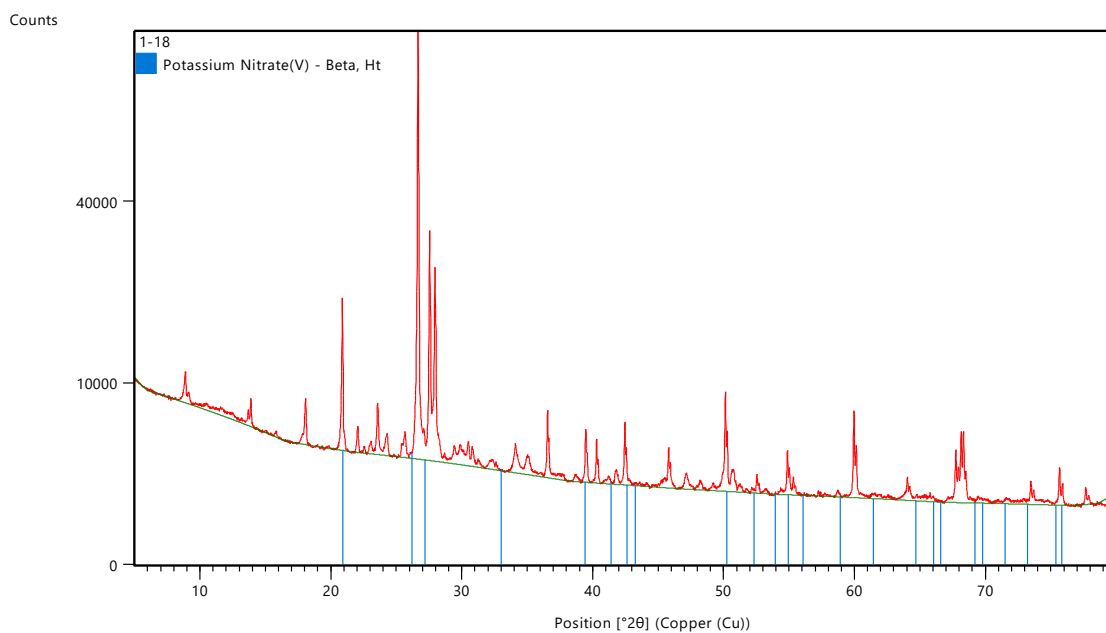


Obr. 91: Rentgenogram pro vzorek REF po 360 dnech uložení v prostředí NaCl s detekcí halitu

V případě expozice vzorku REF prostředí NaCl po dobu 360 dní byla pomocí XRD navíc detekována přítomnost halitu, což je vykrystalizovaná forma NaCl. Z pohledu dopadu na samotnou mikrostrukturu betonu nelze tedy očekávat žádné výrazně negativní důsledky.

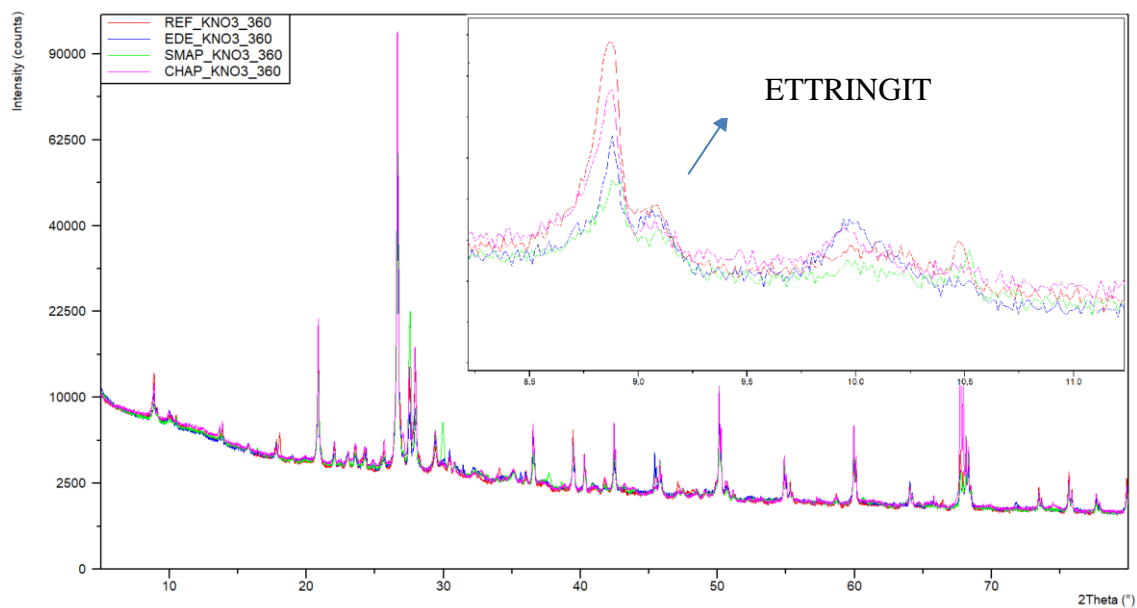


Obr. 92: Rentgenogramy všech vzorků při jejich uložení 360 dní v prostředí NaCl + detail oblasti výskytu hemikarbonátů

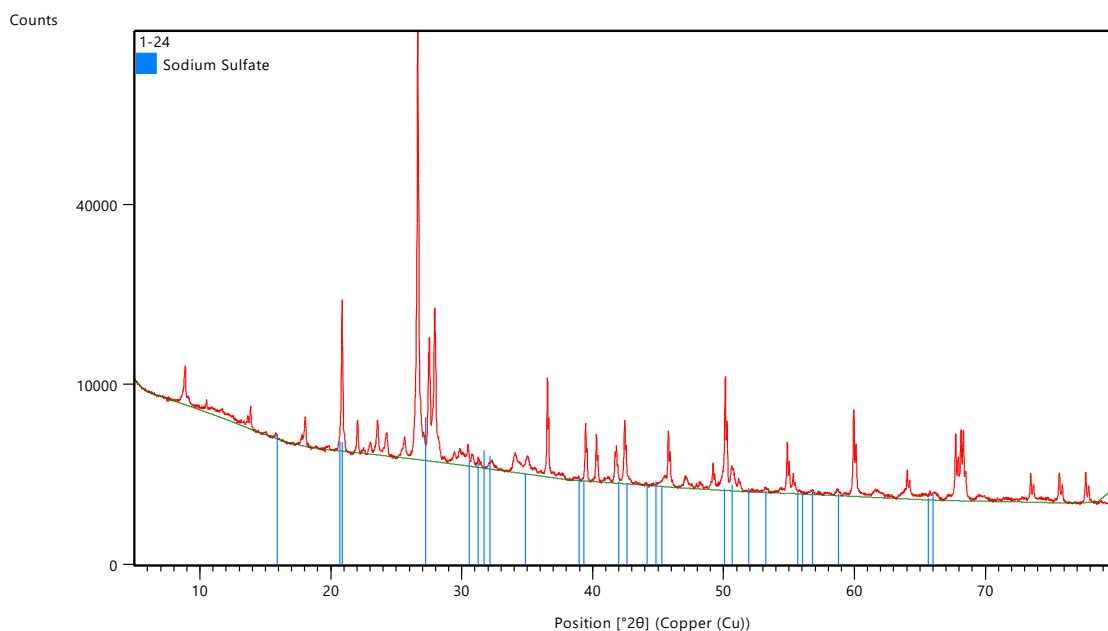


Obr. 93: Rentgenogram pro vzorek REF po 360 dnech uložení v prostředí KNO_3 s detekcí krystalické fáze KNO_3

Analýza vzorku REF v prostředí KNO_3 po dobu 360 dní pomocí XRD prokázala oproti uložení ve vodě navíc pouze přítomnost samotného vykrystalizovaného KNO_3 . Z pohledu dopadu na samotnou mikrostrukturu betonu nelze tedy opět očekávat žádné výrazně negativní důsledky.

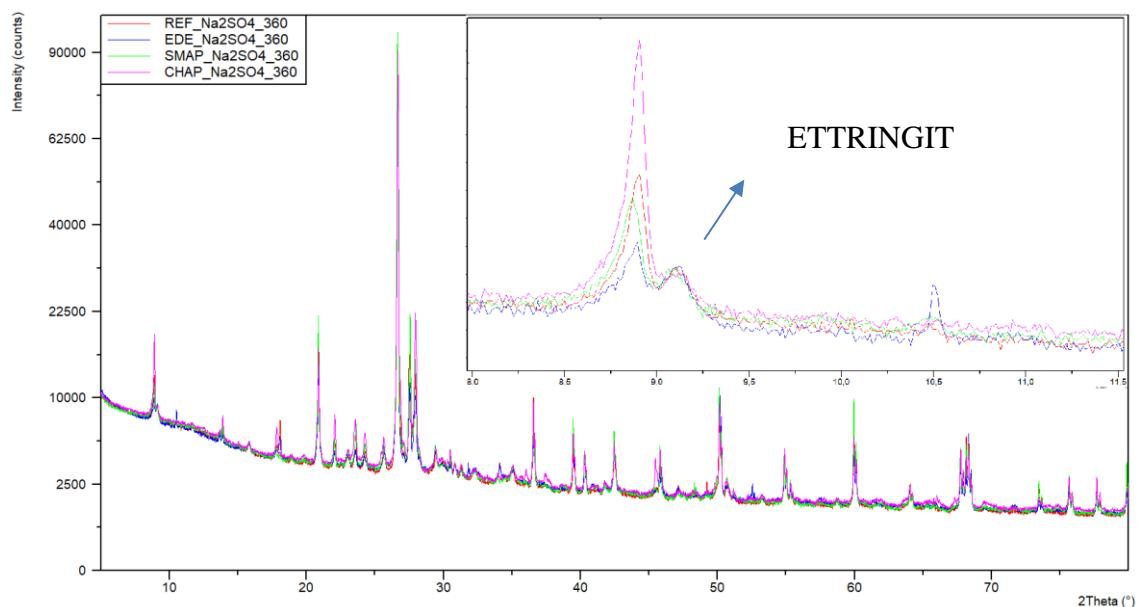


Obr. 94: Rentgenogramy všech vzorků při jejich uložení 360 dní v prostředí KNO_3 + detail oblasti výskytu hemikarbonátů

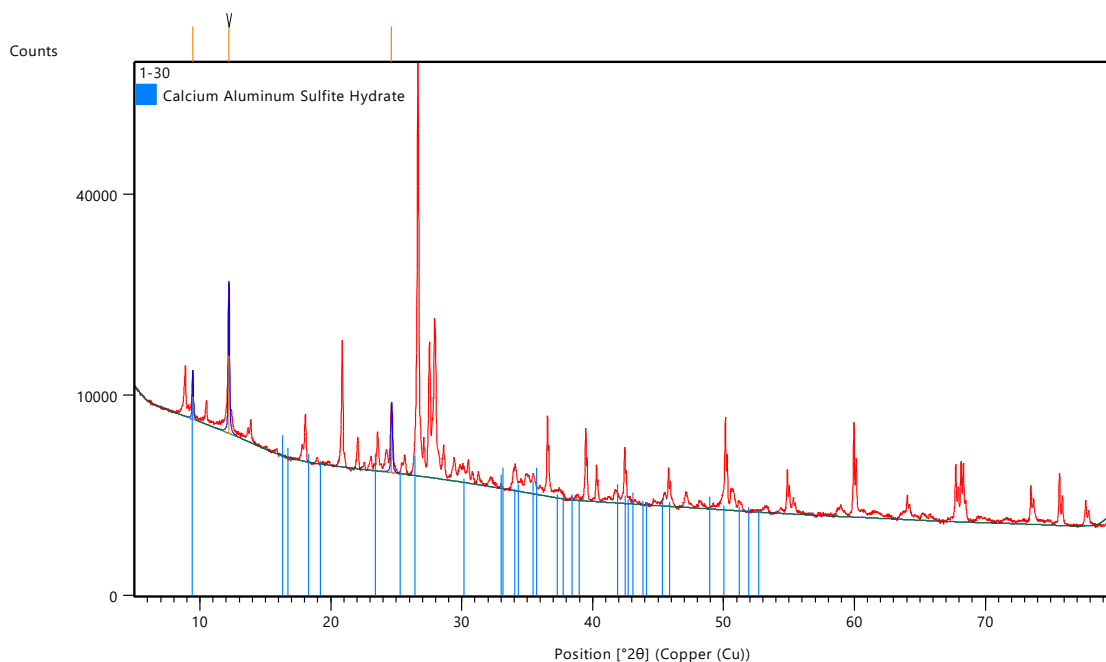


Obr. 95: Rentgenogram pro vzorek REF po 360 dnech uložení v prostředí Na_2SO_4 s detekcí krystalické fáze Na_2SO_4

Rovněž analýza vzorku REF v prostředí Na_2SO_4 po dobu 360 dní pomocí XRD prokázala oproti uložení ve vodě navíc pouze přítomnost samotného vykrystalizovaného agresivního média, v tomto případě Na_2SO_4 . Z pohledu dopadu na samotnou mikrostrukturu betonu nelze tedy opět očekávat žádné výrazně negativní důsledky.

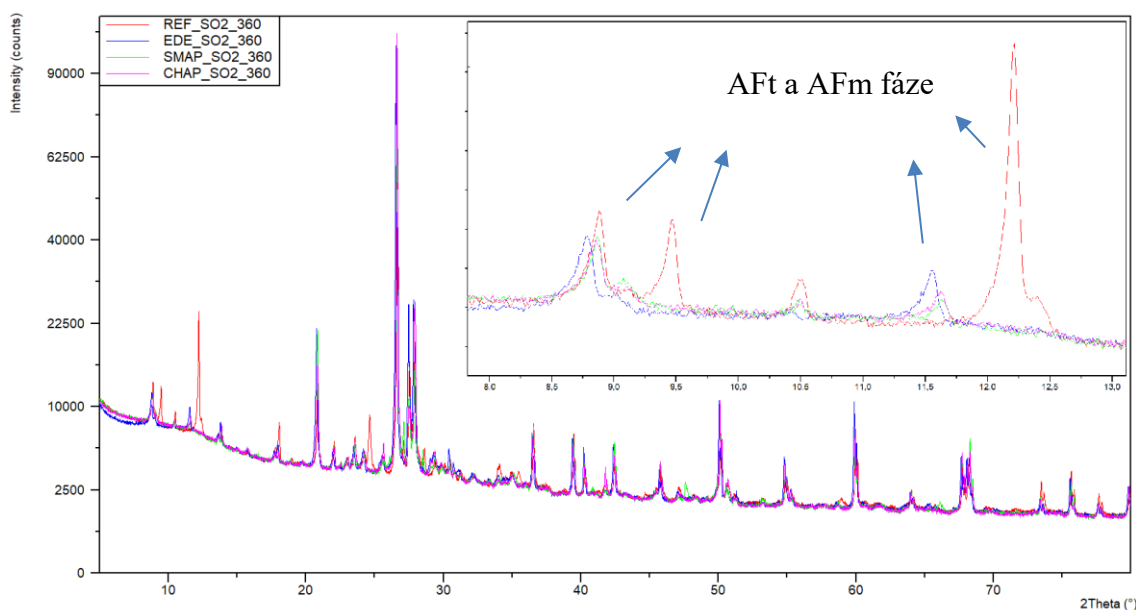


Obr. 96: Rentgenogramy všech vzorků při jejich uložení 360 dní v prostředí Na_2SO_4 + detail oblasti výskytu hemikarbonátů



Obr. 97: Rentgenogram pro vzorek REF po 360 dnech uložení v prostředí aerosolu SO_2 s detekcí různých modifikací hemikarbonátů

Zajímavé výsledky odpovídající fotografiím z elektronového mikroskopu poskytla analýza mineralogie pomocí XRD u vzorku REF vystavenému po dobu 360 dní prostředí aerosolu s SO_2 . Přiložený vyhodnocený rentgenogram poukazuje na výrazné zastoupení různých modifikací AFm a AFt fází. Tyto minerály síranové koroze jsou detekovány navíc oproti zbylým minerálům, které jsou shodné jako v případě vodního uložení. Přesná analýza těchto fází se opírá o studii vedenou Barbarou Lothenbach, ve které jsou přesně definované AFm a AFt fáze v jednotlivých modifikacích. [42]



Obr. 98: Rentgenogramy všech vzorků při jejich uložení 360 dní v prostředí aerosolu SO_2 + detail oblasti výskytu hemikarbonátů

Dosažené výsledky analýz XRD byly vyhodnoceny zejména za účelem vzájemných rozdílů a porovnání receptury vyrobené za použití klasického vysokoteplotního popílku a receptur vyrobených za použití vyvinutých směsí SMAP a CHAP. Toto vzájemné porovnání je důležité z důvodu, že navržené směsi mechanicky aktivovaných popílků (SMAP) a chemicky aktivovaných popílků (CHAP) by měly být přímou alternativou ke klasickým vysokoteplotním úletovým popílkům. Z tohoto hlediska je možné říci, že nebyl pozorován výskyt nových nežádoucích minerálů odlišných od výskytu při použití vysokoteplotního úletového popílku Dětmárovice ve všech použitých agresivních prostředích. Naopak u referenčního vzorku zcela bez popílku byla i pomocí XRD prokázána výrazná degradace produkty síranové koroze v případě uložení vzorků v agresivním prostředí s výskytem síry. Jedná se o prostředí aerosolu SO_2 a z dosažených výsledků byla jednoznačně prokázána vhodnost použití klasického úletového popílku nebo směsi aktivovaných popílků pro použití betonu do tohoto druhu agresivního prostředí. Tento pozitivní dopad lze připisovat obecně při použití popílků skutečnosti, že jejich přítomnost nahradila adekvátní část portlandského cementu, který během svých hydratačních pochodů dává vzniknout reaktantům pro průběh síranové koroze. Z pohledu probíhající pucolánové reakce popílků lze navíc předpokládat, že při jejím procesu jsou dále reaktanty nutné pro průběh síranové koroze spotřebovávány pro samotnou pucolánovou reakci, konkrétně se jedná o portlandit. Přítomnost fluidního popílku ve směsi SMAP a CHAP v tomto případě dále pouze umocňuje, díky dalšímu

sycení prostředí reaktanty sulfátové koroze, transformaci již během zrání kompozitu vzniklých AFt fází a AFm fází.

Výsledky XRD analýz tedy potvrdily, že bezpečné využití směsi SMAP i CHAP pro výrobu betonu je možné i v případě styku s vybranými agresivními médii a trvanlivost betonového kompozitu by tak použitím těchto směsí popílků neměla být nijak negativně ovlivněna.

Z výsledků provedených zkoušek TGA bylo možné opět vyčíst převážně množství zastoupení portlanditu a uhličitánů vápenatých a hodnotu celkové ztráty žiháním při 1000 °C. V případě pomnutí rozboru teplotních rozkladů jednotlivých sloučenin do teploty 300 °C a v případě předpokladu, že všechny analyzované vzorky byly stejně vysušeny do konstantní hmotnosti, lze velmi orientačně a pouze ilustrativně porovnat i hmotností úbytky v teplotním intervalu do 300 °C, které by mohly naznačit zastoupení zejména gelových struktur, ettringitu a monosulfátu (obecně všech modifikací hemihydrátů) v jednotlivých vzorcích. Tyto výsledky společně s ostatními obsahují následující Tab. 55 až Tab. 59.

Tab. 55: Výsledky TGA analýzy pro vodní uložení vzorků

Doba uložení	28 dní				90 dní			
Vlastnost / Označení	REF	EDE	SMAP	CHAP	REF	EDE	SMAP	CHAP
Ztráta žiháním [%]	5,0	5,3	5,1	5,8	6,1	5,8	5,1	7,7
Portlandit [%]	1,8	1,3	1,2	1,1	2,0	1,1	0,6	0,9
Uhličitany vápenaté [%]	2,6	3,0	2,8	2,9	2,3	2,9	1,6	2,5
Ztráta žiháním do 300 °C [%]	2,8	1,3	1,2	1,1	4,0	3,5	3,6	5,6
Doba uložení	180 dní				360 dní			
Vlastnost / Označení	REF	EDE	SMAP	CHAP	REF	EDE	SMAP	CHAP
Ztráta žiháním [%]	8,1	9,5	8,1	7,1	8,3	9,5	8,4	7,5
Portlandit [%]	3,6	1,2	0,5	0,7	3,8	1,0	0,6	0,5
Uhličitany vápenaté [%]	3,8	2,6	2,9	3,4	4,0	2,7	3,1	3,3
Ztráta žiháním do 300 °C [%]	4,5	6,2	5,5	4,3	4,7	6,7	5,9	4,6

Tab. 56: Výsledky TGA analýzy pro uložení vzorků v prostředí NaCl

Doba uložení	28 dní				90 dní			
Vlastnost / Označení	REF	EDE	SMAP	CHAP	REF	EDE	SMAP	CHAP
Ztráta žiháním [%]	4,9	4,8	5,7	5,4	7,0	5,7	6,2	7,9
Portlandit [%]	1,7	0,9	1,1	0,9	2,0	0,8	0,8	0,7
Uhličitany vápenaté [%]	2,7	2,8	3,0	2,6	3,4	2,6	2,7	2,7
Ztráta žiháním do 300 °C [%]	2,7	2,6	3,3	3,2	4,2	3,4	4,0	5,6
Doba uložení	180 dní				360 dní			
Vlastnost / Označení	REF	EDE	SMAP	CHAP	REF	EDE	SMAP	CHAP
Ztráta žiháním [%]	8,7	8,7	7,0	7,2	8,5	8,4	7,9	8,2
Portlandit [%]	3,2	1,0	0,0	0,0	3,4	0,8	0,1	0,0
Uhličitany vápenaté [%]	4,3	3,0	2,6	3,3	4,5	3,2	3,2	3,4
Ztráta žiháním do 300 °C [%]	4,7	5,2	4,3	4,2	4,5	5,1	4,8	4,6

Tab. 57: Výsledky TGA analýzy pro uložení vzorků v prostředí KNO₃

Doba uložení	28 dní				90 dní			
Vlastnost / Označení	REF	EDE	SMAP	CHAP	REF	EDE	SMAP	CHAP
Ztráta žiháním [%]	5,9	5,2	5,4	5,3	7,1	6,5	6,8	8,2
Portlandit [%]	2,0	1,5	1,8	1,5	2,3	2,2	1,8	0,6
Uhličitany vápenaté [%]	3,9	3,4	3,2	3,0	4,1	3,4	3,2	3,5
Ztráta žiháním do 300 °C [%]	2,8	2,5	2,6	2,7	3,7	3,3	3,7	4,8
Doba uložení	180 dní				360 dní			
Vlastnost / Označení	REF	EDE	SMAP	CHAP	REF	EDE	SMAP	CHAP
Ztráta žiháním [%]	16,4	8,2	10,1	9,7	8,5	8,1	9,5	9,7
Portlandit [%]	3,3	2,3	0,0	0,0	3,5	1,7	0,2	0,2
Uhličitany vápenaté [%]	6,3	4,9	5,8	5,8	6,5	5,2	6,2	6,2
Ztráta žiháním do 300 °C [%]	4,8	4,0	4,6	4,6	4,9	4,5	5,1	4,8

Tab. 58: Výsledky TGA analýzy pro uložení vzorků v prostředí Na_2SO_4

Doba uložení	28 dní				90 dní			
Vlastnost / Označení	REF	EDE	SMAP	CHAP	REF	EDE	SMAP	CHAP
Ztráta žiháním [%]	5,1	4,6	5,2	5,7	6,6	6,0	5,9	6,9
Portlandit [%]	1,5	1,1	1,1	1,1	2,1	1,1	0,8	0,6
Uhličitany vápenaté [%]	2,9	2,7	2,9	2,9	3,4	3,0	2,4	2,6
Ztráta žiháním do 300 °C [%]	2,8	2,5	2,8	3,3	3,8	3,5	3,8	4,7
Doba uložení	180 dní				360 dní			
Vlastnost / Označení	REF	EDE	SMAP	CHAP	REF	EDE	SMAP	CHAP
Ztráta žiháním [%]	8,0	7,8	7,9	9,1	8,2	8,5	8,1	9,2
Portlandit [%]	3,2	0,9	1,1	0,7	3,4	0,8	0,6	0,4
Uhličitany vápenaté [%]	3,7	3,8	3,5	4,2	3,9	4,1	3,8	3,9
Ztráta žiháním do 300 °C [%]	4,6	4,7	4,9	5,5	4,9	4,5	4,8	5,1

Tab. 59: Výsledky TGA analýzy pro uložení vzorků v prostředí aerosolu SO_2

Doba uložení	28 dní				90 dní			
Vlastnost / Označení	REF	EDE	SMAP	CHAP	REF	EDE	SMAP	CHAP
Ztráta žiháním [%]	6,1	4,8	4,9	5,7	5,7	5,6	5,6	6,5
Portlandit [%]	1,7	1,1	0,9	0,9	1,5	0,8	0,7	0,6
Uhličitany vápenaté [%]	5,4	3,2	2,9	3,1	3,0	3,2	2,4	3,0
Ztráta žiháním do 300 °C [%]	2,6	2,4	2,5	3,1	3,2	3,2	3,4	4,1
Doba uložení	180 dní				360 dní			
Vlastnost / Označení	REF	EDE	SMAP	CHAP	REF	EDE	SMAP	CHAP
Ztráta žiháním [%]	7,6	7,9	8,2	6,4	7,7	8,2	8,1	7,1
Portlandit [%]	2,9	0,9	0,8	0,8	3,0	0,7	0,5	0,5
Uhličitany vápenaté [%]	3,7	3,4	2,1	2,5	4,2	3,8	2,5	2,7
Ztráta žiháním do 300 °C [%]	4,3	5,2	3,7	4,1	4,6	5,3	4,2	4,6

Výsledky termogravimetrické analýzy z pohledu zastoupení portlanditu potvrzují dříve psané závěry, tedy, že jeho množství u betonů s popílky klesá během probíhajícího

procesu pucolánových reakcí. V případě aktivace vysokoteplotního popílku přidavkem popílku fluidního je pak tento proces ještě umocněn a u některých vzorků při jejich vysokém stáří, již nebyla přítomnost portlanditu zaznamenána vůbec. Dále je patrný nárůst celkové ztráty žiháním do 1000 °C u všech vzorků s dobou jejich uložení a rovněž nárůst ztráty žiháním do 300 °C. Je tedy zřejmé, že tyto dva parametry spolu úzce souvisí a zejména zvyšující se hodnotu ztráty žiháním do 300 °C lze připisovat zvyšujícímu se množství gelových struktur a případně produktů síranové koroze v mikrostruktuře betonu.

Z pohledu vyhodnocení dopadu využití vyvinutých směsí SMAP a CHAP pro výrobu betonu na následnou mikrostrukturu betonu lze říci, že nebyly pozorovány žádné negativní dopady těchto směsí, a naopak byl pozorován příznivý průběh pucolánových reakcí, kdy vznikající gelové struktury dále zahušťují mikrostrukturu kompozitu a případně zacelují drobné mikroporuchy vzniklé v raném stádiu zrání.

10.2.3.3. Souhrnné zhodnocení použití SMAP a CHAP pro výrobu transportbetonu

Pomocí obsáhlého experimentu zaměřeného na bezpečné použití vyvinutých směsí mechanicky aktivovaných popílků (SMAP) a chemicky aktivovaných popílků (CHAP) určených pro výrobu betonu, bylo prokázáno, že tyto směsi mohou být dobrou alternativou ke klasickým vysokoteplotním úletovým popílkům pro výrobu transportbetonů. Samotná výroba betonových směsí byla ověřena přímo na betonárně a následně byl proveden obsáhlý experiment na vyrobených zkušebních tělesech v laboratorních podmínkách. Byl navržený experiment, v němž byl kladen velký důraz na simulaci krajně nevhodných podmínek z pohledu chemismu okolního prostředí, které mohou na beton působit, tak, aby za všech okolností byly sledovány možné pozitivní, ale především negativní dopady navržených směsí popílků pro výrobu betonu.

Všechny nabyté poznatky z tohoto obsáhlého experimentu podávají obraz o bezpečném použití těchto navržených směsí popílků pro výrobu transportbetonu prakticky ve všech simulovaných podmínkách. Vzorky betonu vyrobené za použití SMAP i CHAP vykazovaly ve všech případech srovnatelné nebo i lepší mechanické, fyzikální i trvanlivostní parametry, jak beton vyrobený za použití klasického úletového vysokoteplotního popílku. Jako velmi pozitivní se jeví výsledek, že ani poměrně výrazně navýšená hodnota vodního součinitele a dávka plastifikační přísady, nemá negativní

dopad na parametry tohoto betonu s CHAP, ale naopak tyto betony vykazují velmi dobrý nárůst mechanických a trvanlivostních parametrů. Díky provedenému experimentu tak byla dále ověřena možnost klasifikace navržených směsí popílků dle platné legislativy, jmenovitě dle požadavků normy ČSN EN 450-1. [N3]

10.3. Zhodnocení výsledků Etapy IV

V Etapě IV experimentální části disertační práce byl již přímo prakticky řešen dopad použití navržených směsí popílků SMAP a CHAP na parametry čerstvých i ztvrdlých betonů. Pro obecnost dosažených závěrů byly navrženy experimenty pro použití těchto směsí při výrobě drobného prefabrikovaného betonového zboží i při výrobě klasických konstrukčních transportbetonů. V obou případech respektovaly navržené experimenty požadavky na dané druhy výrobků z pohledu legislativy i z pohledu praktického použití.

Díky provedení a následnému vyhodnocení velmi obsáhlých experimentů pro obě oblasti výroby betonových směsí za použití vyvinutých SMAP i CHAP je možné říci, že pro obě tyto směsi nebyla pozorována žádná negativa, při jejich použití pro výrobu betonů, z pohledu mechanických a trvanlivostních parametrů. Zejména s ohledem na zachování dlouhé životnosti bez negativních dopadů navržených směsí na mikrostrukturu kompozitu, byly vyrobené betony sledovány a zkoušky vyhodnocovány až do více než 360 dní od výroby. Byla velmi podrobně sledována mikrostruktura vyrobených cementových kompozitů, a to i při jejich uložení v agresivním prostředí po dobu až 360 dní.

Ze všech nabytých výsledků této etapy experimentální části lze soudit, že obě navržené směsi popílků by se mohly prakticky stát plnohodnotnou alternativou používání vysokoteplotních úletových popílků pro výrobu betonu. Mají-li se však stát vyvinuté směsi popílků náhradou za klasické popílky vysokoteplotní, bude třeba u obou produktů podstoupit proces jejich zlegalizování dle normy ČSN EN 450-1 certifikační autoritou.

11. EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ VÝROBY BETONŮ S NOVĚ VYVINUTÝMI PŘÍMĚSEMI

Pro ekonomické zhodnocení výroby betonů s vyvinutými příměsemi SMAP a CHAP budou zvoleny 3 modelové příklady betonových směsí o pevnostní třídě C 12/15, C 20/25 a C 30/37. Ve všech případech se jedná o praktické zástupce produkce betonáren, pro jejichž výrobu se hojně využívá vysokoteplotních úletových popílků. Jedná se o neprovzdušněné betony určené pro spodní zakládání staveb, pilotové zakládání, betony pro drobného koncového zákazníka anebo betony určené pro staticky nenáročné konstrukce, které nejsou vystavené působení vody a mrazu. S využitím vyvinutých druhů příměsí pro výrobu provzdušněných konstrukčních betonů není uvažováno. Dále není ve výpočtech pro jednoduchost uvažováno s cenou za emisní povolenky produkce jednotlivých druhů příměsí.

Nejprve je však nutné stanovit cenu výroby nově vyvinutých směsí popílků, přičemž výpočet této ceny bude založen na cenách vstupních komodit a dále na procesu jejich zušlechtní procesem mletí nebo procesem mísení. Výpočet ceny za proces mletí bude stanoven na modelovém příkladu výroby v cementové mlýnici, kde je využíváno kulového mlýnu a jsou známy parametry jeho energetické náročnosti při mletí cementu a dalších příměsí.

11.1. Ekonomická bilance procesu výroby SMAP

Pro modelový příklad byla zvolena reálná cementová mlýnice sestávající ze 2 typů mlýnů:

- Předemílací kotoučový mlýn Pfeiffer MPS 2500BC s hlavním pohonem 800 kW a ventilátorem 400 kW
- Finální jednokomorový kulový mlýn Polysius TM-C 3,2×9,0 v otevřeném okruhu s jednotnou náplní 60 t koulí o průměru 15 mm a s hlavním pohonem 800 kW

V rámci tohoto výpočtu ekonomické bilance výroby směsi popílků SMAP je ilustrativně uvažováno i s jejich případným vysoušením před procesem mletí, v případě, že by bylo pro její výrobu využito komodity ze složiště. Na ložové popílků je jejich producenty v současnosti nahlíženo spíše jako na odpadní surovinu, a proto jejich skládkování probíhá spíše na složištích po jejich smísení s vodou. Z toho důvodu je

v obecném výpočtu ekonomické bilance výroby směsi SMAP třeba počítat i s jejich vysoušením, v ideálním případě pomocí zbytkové tepla z provozu, například při výrobě cementu, pokud by se daný produkt vyráběl v cementárnách, nebo vysoušením při spotřebě nejčastěji zemního plynu. Z praktických zkušeností by se spotřeba zemního plynu na vysušení vstupních produktů dala orientačně stanovit na 4,5 m³/1 tunu popílku. Následující tabulka obsahuje orientační obecný výpočet výroby směsi SMAP v modelové výrobě. Všechny ceny jsou uvedeny bez DPH a bez dopravy. Cenu dopravy lze v aktuálně stanovit cca na 50 Kč/km.

Tab. 60: Modelový výpočet výroby navržené směsi SMAP

Ekonomická bilance výroby směsi SMAP - stav v roce 2024			
Spotřeba zemního plynu pro sušení [m ³ /t]	4,5	Cena za sušení vstupního materiálu [Kč/t]	44,6
Cena zemního plynu [Kč/m ³]	9,9		
Energetická náročnost na mletí [kWh/t]	52,5	Cena za mletí vstupního materiálu [Kč/t]	288,75
Cena silové elektřiny včetně poplatků [Kč/kWh]	5,5		
Cena ložového popílku Třebovice [Kč/t] - bez dopravy			60
Cena ložového popílku TŽ [Kč/t] - bez dopravy			100
Vzájemný poměr mísení 60:40			-
Cena výroby produktu SMAP [Kč/t]			409,3

Výsledná cena modelového příkladu výroby směsi SMAP by v roce 2024 činila cca 410 Kč/t materiálu bez dopravy. Tato cena výsledného produktu je tedy v aktuálních cenových hladinách srovnatelná s nabídkami vysokoteplotních úletových popílků, kdy jejich cena však v posledních letech výrazně stoupá a jejich dostupnost se zejména v letních měsících stává velmi problematickou.

11.2. Ekonomická bilance procesu výroby CHAP

Výpočet ekonomické bilance výroby navržené směsi CHAP vychází z cen vstupních surovin a samotného procesu mísení, který byl modelově zvolen pomocí mísícího centra suchých sypaných směsí. Z hlediska praktického využití by však bylo možné i selektivní dávkování jednotlivých vstupních surovin, díky čemu by odpadly náklady na jejich samotné mísení, avšak bylo by třeba počítat s navýšením nákladů na skladování obou druhů popílků v silech ve výrobnách.

Obchodovatelnost fluidního úletového popílku se v posledních letech skokově začíná navyšovat, proto jeho producenti na poptávku již nyní reagují stále se zvyšující cenou této komodity. Pro ilustraci vývoje cen za poslední roky, obsahuje následující Tab. 5 výpočet ekonomické náročnosti výroby směsi CHAP za poslední 3 roky.

Tab. 61: Modelový výpočet výroby navržené směsi CHAP

Ekonomická bilance výroby směsi CHAP - stav v roce 2024	
Cena vysokoteplotního úletového popílku Dětmárovice [Kč/t] - bez dopravy	415
Cena fluidního úletového popílku ALPIQ Zlín [Kč/t] - bez dopravy	465
Cena za proces míchání [Kč/t]	200
Vzájemný poměr mísení 70:30	-
Cena výroby produktu CHAP [Kč/t]	630
Ekonomická bilance výroby směsi CHAP - stav v roce 2023	
Cena vysokoteplotního úletového popílku Dětmárovice [Kč/t] - bez dopravy	415
Cena fluidního úletového popílku ALPIQ Zlín [Kč/t] - bez dopravy	415
Cena za proces míchání [Kč/t]	200
Vzájemný poměr mísení 70:30	-
Cena výroby produktu CHAP [Kč/t]	615
Ekonomická bilance výroby směsi CHAP - stav v roce 2022	
Cena vysokoteplotního úletového popílku Dětmárovice [Kč/t] - bez dopravy	395
Cena fluidního úletového popílku ALPIQ Zlín [Kč/t] - bez dopravy	295
Cena za proces míchání [Kč/t]	200
Vzájemný poměr mísení 70:30	-
Cena výroby produktu CHAP [Kč/t]	565

Z provedených výpočtů je zřejmé, že cena výsledného produktu v posledních letech výrazně narůstá a v roce 2024 by činila cca 630 Kč/t směsi bez DPH a dopravy. Jedná se však o cenu finálního hotového produktu určeného přímo pro výrobu betonových směsí. V případě, že by byly jednotlivé vstupní materiály dávkovány a uskladněny ve výrobně selektivně, odpadá z výpočtu položka na proces míchání a cena výsledného produktu se tak srovnává s cenou klasických vysokoteplotních úletových popílků, jejichž produkce a dostupnost však klesá a cena se zvyšuje.

Vzhledem k nabytým výsledkům, je možné dále počítat s možným snížením dávky pojiva pro výrobu betonů požadovaných mechanických parametrů, což bude mít pozitivní dopad na výslednou cenu výroby betonové směsi. Předchozí dosažené výsledky poukázaly na navýšení mechanických parametrů betonu se směsí CHAP po 28 dnech až o 22 % oproti betonu s klasickým vysokoteplotním úletovým popínkem.

11.3. Ekonomické zhodnocení výroby betonů

Následující podkapitola již analyzuje cenovou náročnost výroby modelových příkladů betonů, pro jejichž výrobu byly použity vyvinuté směsi popílků SMAP a CHAP.

Pro reálnou představu jsou modelové příklady výpočtů založeny na výpočtu z cen vstupních surovin včetně jejich dopravy na betonárnu v lokalitě Brno a dále není pro

jednoduchost výpočtu uvažováno se spotřebou elektrické energie a dalšími provozními náklady pro výrobu směsi a obsluhu betonárny, které lze u betonů vyrobených za použití klasického vysokoteplotního popílku nebo za použití vyvinutých směsí SMAP a CHAP považovat za konstantní. Předpokladem stanovení ceny za dopravu u směsí SMAP a CHAP je jejich výroba v místě produkce převážné části vstupních surovin, tedy lokalita Dětmarovice.

Tab. 62: Ekonomická bilance výroby modelových betonů na betonárně v Brně

Ekonomická bilance výroby modelových betonů - stav v roce 2024											
Pevnostní třída / Surovina	CEM II/A-S 42,5 R	Popílek Dětmorovice	SMAP	CHAP		DTK 0/4 Žabčice	HTK 4/8 Žabčice	HTK 8/16 Žabčice	Voda	PCT 629	Materiálové náklady
	Kč/t	Kč/t	Kč/t	Kč/t - směs	Kč/t - selektivně	Kč/t	Kč/t	Kč/t	Kč/t	Kč/t	Kč/m ³
Cena	3170	750	740	940	740	240	355	355	97	37	
C12/15	210	110	0	0	0	865	145	750	180	2,7	1291
	210	0	110	0	0	875	148	758	180	2,8	1296
	205	0	0	110	0	860	135	735	195	3,5	1288
	205	77	0	0	33	860	135	735	195	3,5	1266
C20/25	245	95	0	0	0	855	145	760	175	3,0	1391
	245	0	95	0	0	863	145	765	177	3,1	1394
	238	0	0	95	0	855	142	755	182	3,6	1385
	238	66,5	0	0	28,5	855	142	755	182	3,6	1367
C30/37	260	140	0	0	0	850	145	766	168	3,2	1473
	260	0	140	0	0	845	145	766	170	3,3	1471
	250	0	0	140	0	825	142	758	188	3,9	1460
	250	98	0	0	42	825	142	758	188	3,9	1433

Vypočítané výrobní náklady pro modelové třídy betonů prokazují, že při správné aplikaci směsi CHAP lze dosáhnout nižších nákladů pro výrobu betonové směsi, a to i za předpokladu zvýšeného dávkování vody a plastifikační přísady než v případě použití pouze vysokoteplotního úletového popílku. Výpočty rovněž poukazují, že cenový rozdíl materiálových nákladů pro výrobu betonů s již připravené směsi CHAP a při selektivním dávkování vysokoteplotního a fluidního popílku, z nichž je směs vyrobená, činí v modelových příkladech cca 20 až 30 Kč na 1 m³ betonu.

Materiálové náklady na výrobu betonových směsí za použití směsí SMAP jsou prakticky srovnatelné s materiálovými náklady při výrobě pouze z vysokoteplotního popílku. Z pohledu problematického soutěžení dodávek vysokoteplotních popílků na trhu, a to zejména v letních měsících, a z pohledu navyšování jeho ceny, je tento výsledek pozitivní.

12. DISKUZE O VÝSLEDKÁCH

V první etapě řešení experimentální části disertační práce, byly vybrány vysokoteplotní popílký vzniklé spalováním převážně černého (elektrárna Dětmorovice a Rybník) i převážně hnědého (elektrárna Chvaletice) uhlí a tyto popílký byly podrobeny vybraným chemickým, fyzikálním a mechanickým zkouškám. Mezi výběr vysokoteplotních popílků úletových byl zařazen i jeden ložový vysokoteplotní popílek z produkce elektrárny Třebovice. Tento popílek byl vybrán pro následnou mechanickou aktivaci mletím.

Pro analyzované popílký bylo stanoveno jejich chemické složení podávající obraz o zastoupení základních chemických sloučenin jako jsou SiO_2 , Al_2O_3 a Fe_2O_3 , ale rovněž zastoupení CaO celkové a CaO aktivní a sloučeniny SO_3 a celkové ztráty žiháním. Z pohledu fyzikálních parametrů byla stanovena granulometrie a jemnost popílků, měrný povrch a měrná hmotnost. Získané výsledky byly doplněny o studium mineralogie a morfologie zrn jednotlivých popílků. Dále byly pro analyzované popílký stanoveny indexy účinnosti v různém stáří vypovídající o aktivitě jednotlivých popílků.

Stejným zkouškám byly podrobeny také vybrané popílký z fluidního způsobu spalování a jednalo se o fluidní úletové popílký z provozoven Zlín a Tisová a jeden ložový fluidní popílek z provozu Třineckých železáren. Tento ložový popílek byl opět zvolen jako potenciální zdroj pro mechanickou aktivaci mletím.

Z nabytých výsledků bylo možné stanovit rozdílné chemismy především vysokoteplotních a fluidních popílků, kdy lze říci, že fluidní popílký obsahují více CaO , a to rovněž v jeho aktivní podobě a také disponují výrazně vyšším množstvím SO_3 . Dále byl pomocí studia mineralogie a mikrostruktury zrn fluidních popílků objasněn jejich značně negativní dopad na reologii cementopopílkové směsi. Sledovaná zrn vysokoteplotních úletových popílků jsou převážně zeskelněné povahy a tvaru téměř dokonale kulovitého, naopak zrna fluidních popílků jsou výrazně nestejnorodá a je u nich zřejmá jejich značná pórovitost. Tato pórovitost je ovlivněna samotnou mineralogií fluidních popílků, kdy přítomnost zejména aluminosilikátů a CaSO_4 je na snímcích zrn patrná svou vrstevnatou strukturou tvořící velkou pórovitost. V případě popílků ložových se u původu z vysokoteplotního i fluidního spalování jedná spíše o ostrohranná zrna nepravidelných tvarů a struktur. Stanovená jemnost popílků poté poukázala na velké rozdíly běžných vysokoteplotních popílků, deklarovaných dle normy ČSN EN 450-1 jako

popílky do betonu, kdy popílek z elektrárny Chvaletice dosahuje výrazně větší jemnosti z pohledu granulometrie, než popílky Dětmárovice a Rybník, ale zároveň všechny fluidní úletové popílky dosahují téměř řádově vyšších hodnot měrných povrchů stanovených metodou dle Blaine než popílky vysokoteplotní.

Stanovené hodnoty indexů účinnosti poté prokázaly výraznou aktivitu fluidních popílků zejména v raném stáří zrání vzorků.

V první etapě byl rovněž analyzován pro další zkoušky využívaný cement. Jednalo se o portlandský cement CEM I 42,5 R z provozovny Mokrý. Čistý portlandský cement byl pro základní provedení zkoušek volen s ohledem na omezení vlivu dalších příměsí, které by do procesu vývoje nových směsí popílků vstupovaly v případě použití cementů směsných. V etapě experimentální části zabývající se již možným využitím nabytých výsledků v praxi, byl tento cement nahrazen dnes běžněji používaným portlandským směsným cementem CEM II/A-S 42,5 R rovněž z provozovny Mokrý.

Druhá etapa experimentální části disertační práce se zabývala možným dopadem procesu denitrifikace kouřových plynů, konkrétně pomocí selektivní nekatalytické redukce oxidu dusíku, na vlastnosti úletových popílků. Tato etapa byla do řešení disertační práce zařazena z důvodu objasnění nově zavedených procesů SNCR s ohledem na popílek a jeho budoucí využitelnost. Bylo nutné před řešením dalších kroků disertační práce objasnit dopady procesu SNCR na popílek, aby s popílky po tomto procesu mohlo být dále pro výrobu betonu uvažováno.

V průběhu řešení této dílčí etapy experimentální práce bylo zjištěno, že samotný proces denitrifikace pomocí SNCR může mít znatelný vliv na morfologii zrn popílků, kdy aplikace redukčního činidla do kouřových plynů unášejících i úletové popílky o vysoké teplotě, může způsobovat až destrukci jinak zeskelněných a kulovitých zrn. Popílky po procesu SNCR se tak mohou stávat více vodonáročné. Pomocí dalších provedených analýz byly stanoveny dopady popílků po procesu SNCR na cementové malty nebo beton, přičemž jako pozitivní se jeví, že vyjma výše psaného nebyly pozorovány žádná další výrazná úskalí k použití takových popílků pro výrobu betonu. Naopak bylo zjištěno, že narušení povrchu zrn může mít pozitivní dopad na jejich dřívější aktivitu z pohledu průběhu pucolánové reakce, což se projevilo mírným zvýšením počátečních indexů účinnosti.

Důsledkem procesu SNCR je však rovněž navázání amonných solí na zrna popílku během tohoto procesu. Při styku takového popílku s vodou a zásaditým prostředím (cement) dochází k nežádoucímu uvolňování zápachajícího amoniaku. Z toho důvodu byl naplánován a přímo ve výrobě betonu provozně ověřen experiment výroby betonů s popílkem po procesu SNCR. V průběhu výroby a následné ukládky betonu byla kvalita ovzduší z pohledu zastoupení amoniaku sledována Zdravotním ústavem. Během experimentu byly simulovány nejméně příznivé podmínky ukládky betonu v uzavřených nevětraných prostorech a následně byly stanovené hodnoty koncentrace amoniaku v ovzduší porovnány s limity dle Vyhlášky Ministerstva zdravotnictví pro pracovní prostředí i pobytové místnosti.

Na základě všech nabytých výsledků z laboratorního testování dopadu popílků po procesu SNCR na beton i z provozního ověření dopadu na kvalitu ovzduší byla v kolektivu dalších autorů vypracována Metodická příručka pro zacházení s těmito popílkami, která by měla sloužit jako informativní dokument pro producenty a prodejce kontaminovaných popílků po procesu SNCR a pro výrobce betonových směsí z těchto popílků.

Navazující třetí etapa experimentální části byla zaměřena na možnosti mechanické aktivace vybraných ložových popílků procesem mletí a dále na možnost chemické aktivace vysokoteplotního úletového popílku přidávkou fluidního úletového popílku. Obe dílčí podetapy byly řešeny nezávisle na sobě a z každé vznikl finální nový produkt směsí popílků.

V části zabývající se mechanickou aktivací vybraných ložových popílků bylo nejprve nutné nalézt vhodný mlecí cyklus pro tyto popílkami pro dosažení jejich požadované jemnosti a dále pro ně stanovit základní fyzikální a mechanické parametry. Proces mletí byl sledován na laboratorním kulovém mlýnu. Dosažené fyzikální a mechanické parametry jednotlivých ložových popílků prokázaly jejich dobrou aktivitu, ale zároveň zvýšenou vodonáročnost ložového popílku z elektrárny Třebovice, která je dána zejména vysokou ztrátou žiháním tohoto popílku. Aby byly co nejvíce eliminovány zjištěné negativní vlastnosti jednotlivých mletých ložových popílků, byl navržen jejich poměr mísení v surovém stavu v poměru 60:40 % (Třebovice:Třinecké železářny). Takto připravená surová směs byla dále mechanicky aktivována mletím a byly stanoveny její výsledné chemické, fyzikální a mechanické parametry, aby následně mohly být tyto

parametry porovnány s požadavky normy ČSN EN 450-1. Dosažené finální výsledky prokázaly, že tato navržená směs mechanicky aktivovaných popílků pojmenována jako SMAP, vykazuje srovnatelné fyzikální a mechanické parametry jako klasické vysokoteplotní úletové popílků a dle požadavků normy ČSN EN 450-1 disponuje vyhovujícími hodnotami.

Ve druhé části experimentu zabývající se chemickou aktivací vysokoteplotního úletového popílku přidávkem fluidního úletového popílku, bylo nejprve nutné stanovit vhodnou metodiku pro nalezení jejich optimálního poměru mísení. Použitá metodika vychází z principu sledování hydratačních procesů na základě průběhu hydratačních teplot cementopopílkových past. Bylo prokázáno, že správný poměr mísení obou složek může zabezpečit dřívější nástup hydratačních reakcí spojený s dřívějším nárůstem hydratační teploty. Z obsáhlého experimentu zkoumajícího možnosti ideálního poměru mísení obou druhů popílků byl stanoven jejich optimální poměr 70:30 % (vysokoteplotní:fluidní popílek). Tento poměr byl zvolen jako optimální v případě různých celkových náhrad cementu popílkem i v případě kombinací různých zdrojů vysokoteplotních popílků s různými zdroji fluidních popílků. Lze tak říci, že nalezený poměr se jeví jako obecně nejvhodnější.

V tomto poměru byla vyrobena směs chemicky aktivovaných popílků, které byla pojmenována CHAP a byla dále opět podrobena základním chemickým, fyzikálním a mechanickým parametrům z pohledu požadavků normy ČSN EN 450-1. Z dosažených výsledků chemického složení bylo zřejmé, že pomocí této vhodné kombinace došlo k výrazné eliminaci celkového zastoupení nežádoucích SO_3 a aktivního CaO v popílků. Dále byl prokázán velmi dobrý index účinnosti této směsi, ačkoliv je třeba počítat s vyšší vodonáročností této příměsi, což bude mít prakticky za důsledek navýšení vodního součinitele pro dosažení požadovaného stupně konzistence. To může mít dále negativní dopad na výsledné mechanické parametry kompozitu. V praxi však bude možné tento efekt dále potlačit rovněž za pomoci vhodné superplastifikační přísady.

Navazující čtvrtá etapa byla provedena s cílem praktického ověření využitelnosti navržených směsí SMAP a CHAP pro výrobu betonů. Aby bylo toto ověření co nejvíce univerzální, bylo provedeno při výrobě prefabrikovaných betonových dlažeb i při výrobě standartního konstrukčního transportbetonu.

Vyrobené prefabrikované betonové dlažby byly podrobeny celé řadě zkoušek z pohledu jejich mechanické únosnosti a dále trvanlivosti. Navržená směs CHAP byla v reálné výrobě použita pro výrobu jádrové vrstvy a zkoušky na vyrobených dlažbách byly prováděny až do jejich stáří 360 dní. Pomocí těchto zkoušek se podařilo prokázat, že vzorky vyrobené za použití směsi CHAP disponují srovnatelnými parametry v rámci mechanické odolnosti i trvanlivosti, jako vzorky vyrobené pouze za použití vysokoteplotního popílku. V rámci experimentu byl kladen důraz i na analýzu mikrostruktury kompozitu. Ačkoliv byla tvorba nežádoucího ettringitu u vzorků se směsí CHAP zaznamenána, v delším časovém úseku docházelo spíše k zahušťování mikrostruktury kompozitu produkty pucolánových reakcí a vzniklé jehlice ettringitu byly rovněž obrůstány gelovými strukturami. Navíc z hlediska provedených zkoušek nebyl prokázán negativní dopad výskytu menšího množství ettringitu ve vzorkách.

Výroba transportbetonu byla ověřena pomocí výroby betonových směsí na betonárně, kdy byla ověřena výroba referenční směsi zcela bez popílku, směsi pouze s vysokoteplotním popílkem Dětmarovice a betony vyrobené za použití vyvinutých SMAP a CHAP. Všechny betonové směsi byly navrženy pro pevnostní třídu C 30/37 při využití lokálních surovin, jejichž vlastnosti byly na počátku experimentu stanoveny.

Z vyrobených betonů byly zhotoveny zkušební vzorky, které byly následně až do stáří 360 dní sledovány z pohledu mechanických a trvanlivostních parametrů. Ačkoliv bylo pro výrobu betonu se směsí CHAP třeba užít vyšší dávku záměsové vody a vyšší dávku superplastifikační přísady, dosažené mechanické parametry po normových 28 dnech zrání u tohoto betonu převyšovaly až o více než 20 % mechanické parametry betonu vyrobeného za použití vysokoteplotního úletového popílku. Betony vyrobené za použití směsi SMAP poté vykazovaly srovnatelné parametry s betonem s popílkem Dětmarovice.

Rozsáhlý experiment bezpečného využití navržených směsí SMAP a CHAP spočíval v expozici zkušebních vzorků betonů v různých agresivních prostředích, kde byly tyto vzorky uloženy až po dobu 360 dní. Předpokladem tohoto experimentu byl případný impuls různých agresivních prostředí k degradaci mikrostruktury betonu spojené s využitím fluidních popílků. Tyto možné procesy degradace byly sledovány v různých dobách uložení pomocí rychlosti průchodu vln ultrazvuku vzorkem, pomocí stanovení pevností v příčném tahu a dále pomocí studia mikrostruktury kompozitu.

Z pohledu nabytých výsledků se jako velmi přínosné jeví, že ani u vzorků se směsí SMAP a ani u vzorků se směsí CHAP nebyly zaznamenány žádné odlišnosti trvanlivosti s ohledem na sledovanou mikrostrukturu vzorků oproti betonu vyrobeného za použití pouze popílku Dětmarovice. Naopak bylo v rámci experimentu prokázáno, že všechny použité popílky napomáhají k eliminaci degradačních pochodů síranové koroze při uložení vzorků v prostředí bohatém na zastoupení síry.

Díky dosaženým výsledkům z obsáhlého experimentu a ověření výroby betonů přímo v reálných provozech, byly ověřeny dobré užitné vlastnosti vyvinutých směsí mechanicky aktivovaných popílků SMAP a chemicky aktivovaných popílků CHAP pro výrobu betonu.

V poslední etapě byl ekonomicky zhodnocen proces výroby jednotlivých navržených směsí popílků pro výrobu betonu a dále na modelových případech vybraných pevnostních tříd byla spočítána materiálová náročnost výroby betonů srovnatelných vlastností při použití pouze klasického vysokoteplotního popílku, směsí SMAP nebo směsí CHAP. Pro lepší představu byl výpočet proveden včetně nákladů na dopravu jednotlivých vstupních surovin do lokality Brno. Z vypočtených výsledků vyplývá, že výroba betonů za pomoci směsí SMAP je aktuálně prakticky za 1 m³ betonu srovnatelná s výrobou z vysokoteplotního popílku Dětmarovice a použití směsí CHAP naopak výrobu betonové směsi může o 5 až 40 Kč na 1 m³, v závislosti na pevnostní třídě betonu, zlevnit.

13. PŘÍNOS PRO VĚDNÍ OBOR A PRAXI

Přínosem pro vědní obor lze jmenovat dosažení konkrétních cílů efektivního zpracování vysokoteplotních a fluidních popílků pro výrobu betonových kompozitů vysokých užitných vlastností. Řada prací vedených na toto téma na Ústavu technologie stavebních hmot a dílců podávala obraz o možnostech různých druhů aktivací a zlepšení využitelnosti popílků pro výrobu cementových kompozitů, bylo však třeba pomocí rozsáhlých experimentů ověřit tyto možnosti rovněž v praxi a z pohledu trvanlivosti v rámci dlouhodobého hlediska.

Bylo prokázáno, že pomocí vysoce moderního přístrojového vybavení Centra AdMaS je možné provádět vědecké experimenty úzce související s potřebami praxe. Nabyté výsledky a navržené metodiky experimentů poté mohou být dále využity pro rozvoj znalostí o efektivním využití popílků ve stavebnictví a zároveň mohou být odrazovým můstkem pro ověření nabytých výsledků rovněž v kombinaci se směsnými cementy, které jsou vyrobeny s přidávkou různých druhů příměsí jako jsou jemně mleté vápence, popílků, strusky atd. V praxi jsou stále častěji využívány cementy třídy CEM II/B-M a CEM II/C-M a v jednotlivých případech až CEM V/A.

Vyvinutá metodika stanovení optimálního poměru mísení vysokoteplotního a fluidního popílku pro výrobu směsi CHAP se ukázala v rámci experimentu jako obecně platná a přenositelná s ohledem na různé lokality použitých popílků a lze ji tak dále v rámci vědního oboru rozvíjet.

Dále byl podán jednoznačný důkaz o zvýšené trvanlivosti betonů s popílků v prostředí síranů. Pomocí podrobné analýzy XRD byla prokázána přítomnost různých modifikací AFt a AFm fází zejména u referenčního vzorku bez popílku a tato přítomnost poté mohla být dále detailně analyzována za pomoci vědeckých studií zabývajících se přesnou syntézou a zkoumáním daných minerálů. Z pohledu vědního oboru se tak jedná o porovnání a provázání výsledků studií pro synteticky připravené minerály s přirozeně se vyvinutými minerály.

Z pohledu praxe byly vyvinuty nové směsi popílků, které by mohly být dobrou alternativou ke klasickým vysokoteplotním úletovým popílkům, jejichž produkce pro použitelnost do betonu klesá. Je proto nutné hledat alternativy jejichž produkce je prozatím pro brzkou budoucnost zabezpečena a zároveň hledat cesty efektivního využití

dnes prakticky odpadních surovin v podobě skládkovaných ložových popílků. Ekonomické hledisko výroby betonů z navržených mechanicky i chemicky aktivovaných směsí popílků podává obraz o další možnosti ušetření materiálových nákladů výrobců betonu, při jejich správné implementaci do výrobního procesu.

14. ZÁVĚR

Předložená disertační práce se zabývala studiem efektivního využití příměsí pro výrobu betonu. Teoretická část disertační práce je zaměřená na přehled možností používání příměsí pro výrobu betonu z pohledu jejich vlastností, dopadů na vlastnosti betonu v čerstvém i ztvrdlém stavu a z pohledu legislativy. Byly podrobně zkoumány současné trendy využívání příměsí v technologii betonu a pozvolný přechod od produkce čistých portlandských cementů k cementům směsným. Převážná část teoretické části je poté věnována samotným popílkům, jejich vzniku a vlastnostem z pohledu použití pro výrobu betonu. Rovněž byly studovány legislativní požadavky ať už pro nakládání s popílkou z pohledu producentů a nebo pro jejich použití pro výrobu betonu. Důraz byl kladen i na studii zefektivnění jejich využití, zkušenosti z praxe s možnostmi různých druhů jejich aktivace a dopady těchto aktivací na ekonomické a ekologické hledisko zpracování popílků, jako druhotných surovin pro výrobu betonu.

V experimentální části práce byly zkoumány možnosti výroby nových druhů směsí popílků vzniklých jejich mechanickou nebo chemickou aktivací. Byly navrženy a ověřeny metodiky sloužící k procesu výroby mechanicky a chemicky aktivovaných popílků. Možnosti využití vyvinutých směsí aktivovaných popílků byly ověřeny přímo v praktické výrobě drobného prefabrikovaného zboží i ve výrobě transportbetonu. Vyrobené betonové směsi byly podrobeny velkému množství zkoušek zejména s ohledem na mechanické vlastnosti a trvanlivost kompozitu.

Pomocí provedených zkoušek bylo prokázáno, že vyvinuté směsi by bylo možné implementovat do výrobního procesu, pokud by byly legislativně certifikovány jako popílek do betonu dle ČSN EN 450-1, přičemž požadavky této normy byly v rámci provedených experimentů naplněny.

V současné době je kladen velký důraz na ekonomiku a ekologii výroby stavebních hmot a implementace vyvinutých směsí aktivovaných popílků do výroby by byla v souladu s těmito cíli. Aktuálně dochází ve velké míře k potlačování produkce vysokoteplotních popílků, protože jejich proces je spojen s neekologickým provozem tepelných elektráren. Přesto je třeba mít na paměti, že současná technologie betonu se v jistých aplikacích bez popílků pro výrobu betonu neobejde. Jako speciální aplikace lze jmenovat například masivní konstrukce s nízkým vývinem hydratačního tepla nebo betony s pozvolným nárůstem pevností. Praxe musí být připravena co nejdéle odolávat

tlakům Green Dealu a to aspoň za pomoci zpracování dnes nevyužívaných a často pouze skládkovaných druhotných produktů nebo odpadů.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

Použitá literatura

- [1] Andrew, R. M.: Global CO₂ emissions from cement production, *Earth Syst. Sci. Data*, 10, 195–217, <https://doi.org/10.5194/essd-10-195-2018>, 2018.
- [2] *Referenční dokument o nejlepších dostupných technikách: PRŮMYSLOVÁ ODVĚTVÍ VÝROBY CEMENTU, VÁPNA A OXIDU HOŘEČNATÉHO*. Pdf. 2010. Dostupné z: https://mpo.gov.cz/assets/cz/prumysl/prumysl-a-zivotni-prostredi/ippc-integrovana-prevence-a-omezovani-znecistení/referencni-dokumenty-bref/2016/12/BREF-Cement-vapno_konecny.pdf.
- [3] SVAZ VÝROBCŮ CEMENTU ČR. *Statistiky*. Online. <https://svcement.cz/>. 2023. Dostupné z: <https://svcement.cz/statistiky/vyroba-cementu/2023>. [cit. 2025-01-18].
- [4] *KEY FACTS & FIGURES*. Online. In: Cembureau.eu. June 2024. Dostupné z: <https://cembureau.eu/media/00ejjcfj/key-facts-figures-publication-june-2024.pdf>. [cit. 2025-01-31].
- [5] SHUN FUI PEI, Jason; SOH, Megan; SIUNG CHOO, Chung; EK LEONG ONG, Dominic; MUK NG, Sing et al. Harnessing fluidised bed combustion fly ash as a potential green binder: Origin, characteristics, mechanisms, and products properties. Online. 2023, vol. 1, no. 2, article 100015, s. 195-217. ISSN 2949-8228. Dostupné z: ScieceDirect, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.nxmate.2023.100015>. [cit. 2025-02-02].
- [6] BIGRENTZ. *The History of Concrete From Prehistory to Modern Times*. Online. <https://www.bigrentz.com/>. 2023. Dostupné z: <https://www.bigrentz.com/blog/the-history-of-concrete?srsId=AfmBOorojN4A2aAhLJcHRJd1IePHMCaV8V0ZFgaCSJmbLTzx0QfHvQ8Q>. [cit. 2025-02-02].
- [7] TĚHNÍK, Vladimír, Radovan NEČAS a Dana KUBÁTOVÁ. Vápenec jako základní maltovin [online]. [cit. 2025-02-02]. Dostupné z: s3.eu-central-1.amazonaws.com/uploads.mangoweb.org/shared-prod/svcement.cz/uploads/2016/07/sd2008prednaska-vt-vapence.pdf
- [8] PROSKE, Tilo, Moien REZVANI, Sebastian PALM, Christoph MÜLLER a Carl Alexander GRAUBNER. Concretes made of efficient multi-composite cements with slag and limestone [online]. 2018, (Volume 89), Pages 107-119 [cit. 2025-02-02]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0958946517308909>
- [9] MARK. *Volcanic Ash Concrete: The Marvel of Roman Engineering*. Online. In: Everything Latin. 2024. Dostupné z: <https://everythinglatin.co.uk/2024/10/07/volcanic-ash-concrete-the-marvel-of-roman-engineering/>. [cit. 2025-01-27].
- [10] FEYNMAN, Richard P. *Plenty of Room at the Bottom*. Online. In: . 1959. Dostupné z: https://web.pa.msu.edu/people/yang/RFeynman_plentySpace.pdf. [cit. 2025-01-27].
- [11] MA, Juntao, Huifang ZHANG, Daguang WANG, Huixian WANG a Gonglian CHEN. Rheological Properties of Cement Paste Containing Ground Fly Ash Based on Particle

Morphology Analysis. *Crystals* [online]. 2022, **2022**(12) [cit. 2025-02-02]. ISSN 2073-4352. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.3390/cryst12040524>

[12] KHATIB, Jamal, Rawan RAMADAN, Hassan GHANEM a Adel ELKORDI. Volume Stability of Cement Paste Containing Limestone Fines. *Buildings* [online]. 2021, **2021**(11) [cit. 2025-02-02]. ISSN 2075-5309. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.3390/buildings11080366>

[13] WANG, Bin, Youping DING, Jing GAO, Jinfang SUN, Miaomiao CUI a Long HAN. Effect of Limestone Powder on Autogenous Shrinkage of Concrete. *Applied Mechanics and Materials*; Zurich 2011, (88-89), 10.4028/www.scientific.net/AMM.88-89.767. pp 767-771 ISSN 1660-9336. [cit. 2025-02-12]. Dostupné DOI: z: https://search.proquest.com/docview/1443433936?rfr_id=info%3Axri%2Fsid%3Aprimo

[14] LEE, K.M.; LEE, H.K.; LEE, S.H. a KIM, G.Y. Autogenous shrinkage of concrete containing granulated blast-furnace slag. Online. *Cement and Concrete Research*. 2006, vol. 36, no. 7, s. 1279-1285. ISSN 0008-8846. [cit. 2025-02-12]. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.01.005>.

[15] Rubio-Cintas, M.D.; Parron-Rubio, M.E.; Perez-Garcia, F.; Bettencourt Ribeiro, A.; Oliveira, M.J. RUBIO-CINTAS, Maria Dolores, Maria Eugenia PARRON-RUBIO, Francisca PEREZ-GARCIA, António ELKOBETTENCOURT RIBEIRORDI a Miguel José OLIVEIRA. Influence of Steel Slag Type on Concrete Shrinkage. *Sustainability* [online]. 2021, **2021**(13) [cit. 2025-02-02]. ISSN 2071-1050. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.3390/su13010214>

[16] Niknezhad, D., & Kamali-Bernard, S. (2016). Restrained shrinkage and cracking tendency of Self-Compacting Concrete incorporating supplementary cementitious materials (SCMs). *Academic Journal of Civil Engineering*, *34*(1), 627-634. . [cit. 2025-02-12]. Dostupné z: <https://doi.org/10.26168/ajce.34.1.76>

[17] Wang, L.; Yu, Z.; Liu, B.; Zhao, F.; Tang, S.; Jin, M. Effects of Fly Ash Dosage on Shrinkage, Crack Resistance and Fractal Characteristics of Face Slab Concrete. *Fractal Fract.* **2022**, *6*, 335. cit. 2025-02-10]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/fractalfract6060335>

[18] KLEMCZAK, Barbara; GOŁASZEWSKI, Jacek; SMOLANA, Aneta; GOŁASZEWSKA, Małgorzata a CYGAN, Grzegorz. Online. *Construction and Building Material*. Vol. 400, no. 12, article 132608. ISSN 0950-0618. [cit. 2025-02-10]. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132608>.

[19] ŤAŽKÝ, M.; HELA, R.; OSUSKÁ, L.; BODNÁROVÁ, L. *Reduction of concrete's shrinkage by controlled formation of monosulphate and trisulphate*. Deft, The Netherladn: TuDelft, 2016. p. 1-4.

[20] CHEN, Xuemei; GAO, Jianming; YAN, Yun a LIU, Yuanzheng. Nvestigation of expansion properties of cement paste with circulating fluidized bed fly ash. Online. *Construction and Building Materials*. 2017, vol. 157, no. 30, s. 1154-1162. ISSN 0950-0618. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.159>. [cit. 2025-02-10].

[21] Choi, Y.-C. Hydration and Mechanical Properties of High-Volume Fly Ash Cement under Different Curing Temperatures. *Materials* **2024**, *17*, 4716. [cit. 2025-02-10]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ma17194716>

- [22] HAN, Fanghui, Rengguang LIU, Dongmin WANG a Peiyu YAN. Characteristics of the hydration heat evolution of composite binder at different hydrating temperature. *Thermochimica acta* [online]. Elsevier B.V, 2014, 20. 06. 2014, 586, 6 [cit. 2025-02-12]. ISSN 0040-6031. Dostupné z: doi:10.1016/j.tca.2014.04.010
- [23] OEY, Tandr , Aditya KUMAR, Jeffrey W. BULLARD, Narayanan NEITHALATH a Gaurav SANT. The Filler Effect: The Influence of Filler Content and Surface Area on Cementitious Reaction Rates. *Journal of the American Ceramic Society* [online]. Columbus: Blackwell Publishing Ltd, Wiley Subscription Services, 2013, 01. 06. 2013, 96(6), 13 [cit. 2025-02-12]. ISSN 0002-7820. Dostupné z: doi:10.1111/jace.12264
- [24] ŠILER, Pavel, Petr BAYER, Tomáš SEHNAL, Iva KOL ŘOV , Tomáš OPRAVIL a František ŠOUKAL. Effects of high-temperature fly ash and fluidized bed combustion ash on the hydration of Portland cement. In: *Construction and Building Materials* [online]. 78. March 2015, s. 181-188 [cit. 2025-02-12]. ISSN 0950-0618. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061815000525?via%3Dihub>
- [25] NAVR TILOV , Eva. *Metody stanoven  pucol nov  aktivity*. Brno. VUT v Brn , Fakulta stavebn , ústav chemie. 2010
- [26] GOLEWSKI, Grzegorz Ludwik. The Role of Pozzolanic Activity of Siliceous Fly Ash in the Formation of the Structure of Sustainable Cementitious Composites. *Sustainable Chemistry* [online]. 2022, **2022**(3(4)), 520-534 [cit. 2025-02-12]. ISSN 2673-4079. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.3390/suschem3040032>
- [27] ZAHED, Mona, Khashayar JAFARI a Farshad RAJABIPOUR. Properties and durability of concrete containing fluidized bed combustion (FBC) fly ash. *Construction and Building Materials* [online]. 2020, **2020**(258) [cit. 2025-02-13]. ISSN 0950-0618. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119663>
- [28] AHMAD, Jawad, Karolos J. KONTOLEO, Ali MAJDI, Muhammad Tayyab NAQASH, Ahmed Farouk DEIFALLA, Nabil Ben KAHLA, Haytham F. ISLEEM a Shaker M. A. QAIDI. A Comprehensive Review on the Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS) in Concrete Production. *Sustainability* [online]. 2022, **2022**(14) [cit. 2025-02-13]. ISSN 2071-1050. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/14/8783>
- [29] BEDERINA, Madani, Zoubir MAKHLOUFI a Tayeb BOUZIANI. Effect of Limestone Fillers the Physic-Mechanical Properties of Limestone Concrete. *Physics Procedia* [online]. **2011**(21), 28-34 [cit. 2025-02-13]. ISSN 1875-3892. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.10.005>
- [30] TSIVILIS, S., G. BATIS, E. CHANIOTAKIS, Gr. GRIGORIADIS a D. THEODOSSIS. Properties and behavior of limestone cement concrete and mortar. *Cement and Concrete Research* [online]. 2000, **2000**(30), 1679-1683. ISSN 0008-8846. Dostupné z: doi:[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00372-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00372-0)
- [31] HE, Jingjing, Chuanwu SUN a Xuezhi WANG. Study on the Effect of Fly Ash on Mechanical Properties and Seawater Freeze–Thaw Resistance of Seawater Sea Sand Concrete. *Buildings* [online]. 2024, **2024**(14) [cit. 2025-02-13]. ISSN 2075-5309. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.3390/buildings14072191>

- [32] ISLAM, Md. M., Mohammad Tarequl ALAM a Md. S. ISLAM. Effect of fly ash on freeze–thaw durability of concrete in marine environment. *Australian Journal of Structural Engineering* [online]. **2018**(19), 146-161 [cit. 2025-02-14]. ISSN 1328-7982. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1080/13287982.2018.1453332>
- [33] LEE, Seung-Tae, Se-Ho PARK, Dong-Gyou KIM a Jae-Mo KANG. Effect of Freeze–Thaw Cycles on the Performance of Concrete Containing Water-Cooled and Air-Cooled Slag. *Applied Sciences* [online]. 2021, **2021**(11) [cit. 2025-02-14]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.3390/app11167291>
- [34] MITTERMAYER, Florian, Moien REZVANI, Andre BALDERMANN, Stefan HAINER, Peter BREITENBÜCHER, Joachim JUHART, Carl-Alexander GRAUBNER a Tilo PROSKE. Sulfate resistance of cement-reduced eco-friendly concretes. *Cement and Concrete Composites* [online]. 2015, **2015**(55), 364-373 [cit. 2025-02-14]. ISSN 0958-9465. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.09.020>
- [35] S.G., Shashiprakash a Thomas M.D.A. Sulfate resistance of mortars containing high-calcium fly ashes and combinations of highly reactive pozzolans and fly ash. In: *7th CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete*. Chennai: American Concrete Institute, 2001, s. 21 - 237. ISBN 978-087031026-3. ISSN 01932527.
- [36] SOKOL, Pavel, Pavel DONÁT, Zuzana TOMEŠOVÁ a Petr FORMÁČEK. *Analyza současného stavu komodit druhotných surovin pro MPO_08_2024: 6. VEDLEJŠÍ ENERGETICKÉ PRODUKTY* [pdf.]. Asociace stavebních a alternačních materiálů ve spolupráci s ČEZ Energetické produkty, 2024.
- [37] *POLITIKA DRUHOTNÝCH SUROVIN ČESKÉ REPUBLIKY* [pdf.]. MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU, 2011.
- [38] *Produkce odpadů za odvětví CZ-NACE* [Online]. 2025. Dostupné také z: <https://vdb.czso.cz/vdbvo2/faces/cs/index.jsf?page=vystup-objekt&pvokc=&katalog=30842&pvo=ZPR23&z=T#w=>
- [39] CRUMPTON, Carl F. a Woodrow J. HALSTEAD,. *Use of fly ash in concrete*. In: . Washington, D.C.: Transportation Research Board, National Research Council, 1986. ISBN 0309044014.
- [40] ZOBAL, Ondřej, Zdeněk BITTNAR a Pavel PADEVĚT. Development of Strength of Concrete from Orlik Dam. In: *Proceedings of the 3rd Conference, Nano and Macro Mechanics 2012*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2012, s. 259-263. ISBN 978-80-01-05205-1.
- [41] SZUDEK, Wojciech, Jakub SZYDŁOWSKI, Ilona Buchała BUCHAŁA a Ewa KAPELUSZNA. Synthesis and Characterization of Calcium Sulfoaluminate Hydrates—Ettringite (AFt) and Monosulfate (AFm). *Materials* [online]. **2024**(17) [cit. 2025-02-14]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.3390/ma17215216>

- [42] GEORGET, Fabien, Barbara LOTHENBACH, William WILSON, Franco ZUNINO a Karen L. SCRIVENER. Stability of hemicarbonat under cement paste-like conditions. *Cement and Concrete Research* [online]. 2022, **2022**(153) [cit. 2025-02-14]. ISSN 0008-8846. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106692>
- [43] Bernd von der Heide. NO_x Reduction for the Future with the SNCR Technology for Medium and Large Combustion Plants. In *Advanced SNCR Technology for the Future*. Power engineering and environment, Ostrava, Česká republika, 1. – 3. 9. 2010; VŠB - Technická univerzita Ostrava.
- [44] MCGILL AIRCLEAN LLC. *DeNO_x Selective Catalytic Reduction (SCR) Reactors* [online]. [cit. 2025-02-15]. Dostupné z: <https://www.mcgillairclean.com/proddenox>
- [45] GRÝCMANOVÁ, Markéta a Rostislav ZBIEG. BIOM.CZ. Metody dosažení emisních limitů emisí NO_x kotlů velkých výkonů. *Biom.cz* [online]. 2010 [cit. 2025-02-15]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/metody-dosazeni-emisnich-limitu-emisi-nox-kotlu-velkych-vykonu>
- [46] KRERKCHAIWAN, SURANGKHANA. *Effect of ammonia contaminated fly ash on properties of mortars*. Thammasat University, 2017. Thesis. Sirindhorn international institute of technology thammasat university.
- [47] *Impacts of Ammonia Contamination of Fly Ash on Disposal and Use*, EPRI, Palo Alto, CA, 2001: 1004609.
- [48] RUBEL A. M. Forms of ammonia on SCR, SNCR, and FGC combustion ashes. *Fuel Chemistry Division Preprints*, **2002**, 47 (2), 834–835.
- [49] ELRAHMAN, Mohamed Abd a Bernd HILLEMEIER. Combined effect of fine fly ash and packing density on the properties of high performance concrete: An experimental approach. *Construction and Building Materials* [online]. 2014, **2014**(58), 225-233 [cit. 2025-02-15]. ISSN 0950-0618. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.024>
- [50] ORSÁKOVÁ, Denisa, Alexandra MASÁROVÁ, Jaroslav VÁLEK, Petr NOVOSAD a Rudolf HELA. Mixing of Different Particle-Size Fractions of Fly Ash to Increase its Activity in Cement Composites. In: *Advanced Materials Research*. 897. Trans Tech Publications, 2014. ISSN 1662-8985. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.897.297>
- [51] ŤAŽKÝ, Martin. *Vývoj konstrukčních betonů s elektrárenskými popílky*. Brno, 2014. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNOLOGIE V BRNĚ.
- [52] KRISHNARAJ, L. a P.T. RAVICHANDRAN. Investigation on grinding impact of fly ash particles and its characterization analysis in cement mortar composites. *Ain Shams Engineering Journal* [online]. 2019, **2019**(10), 267-274 [cit. 2025-02-15]. ISSN 2090-4479. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.asej.2019.02.001>
- [53] LEE, C.Y., H.K. LEE a K.M. LEE. Strength and microstructural characteristics of chemically activated fly ash–cement systems. *Cement and Concrete Research* [online]. 2003, **2003**(33), 425-431 [cit. 2025-02-15]. ISSN 0008-8846. Dostupné z: doi:[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00973-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00973-0)
- [54] SALAZAR-CARREÑO, Dimelsa, Rafael Guillermo GARCÍA-CÁCERES a Alejandra SANTA. High volume fly ash concrete activated with naoh, sodium sulfate and limestone. *INGE*

CUC [online]. 2022, **2022**(18), 243–250 [cit. 2025-02-15]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.17981/ingecuc.18.1.2022.1755>

[55] ŤAŽKÝ, Martin. *Aktivace vysokoteplotního popílku přidavkem popílku fluidního pro výrobu betonu*. Brno, 2016. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNOCKÉ V BRNĚ.

Použitá legislativa

- [N1] ÚNMZ. ČSN EN 206+A2 Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. 2021.
- [N2] ÚNMZ. ČSN P 73 2404 Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda - Doplňující informace. 2024.
- [N3] ÚNMZ. ČSN EN 450-1 Popílek do betonu - Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody. 2013.
- [N4] ÚNMZ. ČSN EN 15167-1 Mletá granulovaná vysokopecní struska pro použití do betonu, malty a injektážní malty - Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody. 2006.
- [N5] ÚNMZ. ČSN EN 13263-1 Křemičitý úlet do betonu - Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody. 2009.
- [N6] ČNI. ČSN EN 12620-A1 Kamenivo do betonu. 2008.
- [N7] ČNI. ČSN 73 1326/Z1 Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek. 2003.
- [N8] ÚNMZ. ČSN EN 197-1 Cement - Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití. 2012.
- [N9] ČNI. ČSN EN 1339 Betonové dlažební desky – Požadavky a zkušební metody. 2004.
- [N10] ČNI. ČSN 72 2113/Z1 Stanovení měrné hmotnosti cementu. 1993.
- [N11] ÚNMZ. ČSN EN 196-6 Metody zkoušení cementu - Část 6: Stanovení jemnosti mletí. 2019.
- [N12] ISO. ISO 13320 Particle size analysis – Laser diffraction methods. 2020.
- [N13] ÚNMZ. ČSN EN 933-10 Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 10: Posouzení jemných částic – Zrnitost fileru (prosévání proudem vzduchu). 2010.
- [N14] ČNI. ČSN EN 1015-3 ZMĚNA A2 Zkušební metody malt pro zdivo - Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešovacího stolku). 2007.
- [N15] ÚNMZ. ČSN EN 196-3 Metody zkoušení cementu - Část 3: Stanovení dob tuhnutí a objemové stálosti. 2017.
- [N16] ASTM. ASTM C1753 Standart Practice for Evaluating Early Hydration of Hydraulic Cementitious Mixtures Using Thermal Measurements. 2015.
- [N17] ÚNMZ. ČSN EN 196-9 Metody zkoušení cementu - Část 9: Stanovení hydratačního tepla – Semiadiabatická metoda. 2010.
- [N18] ÚNMZ. ČSN EN 196-1 Metody zkoušení cementu - Část 1: Stanovení pevnosti. 2016.

- [N19] ÚNMZ. ČSN EN 933-1 Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 1: Stanovení zrnitosti – Síťový rozbor. 2012.
- [N20] ÚNMZ. ČSN EN 1097-6 Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva - Část 6: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti. 2023.
- [N21] ČNI. ČSN EN 933-4 Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 4: Stanovení tvaru zrn – Tvarový index. 2008.
- [N22] ÚNMZ. ČSN EN 12350-2 Zkoušení čerstvého betonu - Část 2: Zkouška sednutím. 2020.
- [N23] ÚNMZ. ČSN EN 12350-6 Zkoušení čerstvého betonu - Část 6: Objemová hmotnost. 2020.
- [N24] Ministerstvo práce a sociálních věcí ČR. Nařízení vlády č. 361/2007 Sb., kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví při práci. 2007
- [N25] Ministerstvo zdravotnictví ČR. Vyhláška Ministerstva zdravotnictví ČR č. 6/2003 Sb., kterou se stanoví hygienické limity chemických, fyzikálních a biologických ukazatelů pro vnitřní prostředí pobytových místností některých staveb. 2003
- [N26] ČNI. ČSN ISO 7150-1/Z1 Jakost vod – Stanovení amonných iontů - Část 1: Manuální spektrometrická metoda. 2007.
- [N27] ÚNMZ. ČSN EN 12390-7 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu. 2020.
- [N28] ÚNMZ. ČSN EN 12390-3 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. 2020.
- [N29] ÚNMZ. ČSN EN 12390-6 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles. 2024.
- [N30] Vydavatelství norem. ČSN 73 1316 Stanovení vlhkosti, nasákavosti a vztlínivosti betonu. 1989.
- [N31] ÚNMZ. ČSN EN 772-11 Zkušební metody pro zdící prvky - Část 11: Stanovení nasákavosti betonových tvárnic a zdících prvků z umělého a přírodního kamene vlivem kapilarity a počáteční rychlosti nasákavosti pálených zdících prvků. 2011.
- [N32] ÚNMZ. ČSN EN 12390-8 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou. 2020.
- [N33] ČNI. ČSN 73 1322 Stanovení mrazuvzdornosti betonu. 1968.
- [N34] ÚNMZ. ČSN 73 1371 Nedestruktivní zkoušení betonu – Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu. 2011.

Použité zdroje obrázků

- [O1] TERZANO, Roberto, Matteo SPAGNUOLO, Luca MEDICI, Fabio TATEO a Pacifico RUGGIERO. CHARACTERIZATION OF DIFFERENT COAL FLY ASHES FOR THEIR APPLICATION IN THE SYNTHESIS OF ZEOLITE X AS CATION EXCHANGER FOR SOIL REMEDIATION. *Fresenius Environmental Bulletin* [online]. 2013, **2013**(14) [cit. 2025-02-01]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/236462335_CHARACTERIZATION_OF_DIFFERENT_COAL_FLY_ASHES_FOR_THEIR_APPLICATION_IN_THE_SYNTHESIS_OF_ZEOLITE_X_AS_CATION_EXCHANGER_FOR_SOIL_REMEDIATION
- [O2] MA, Juntao, Huifang ZHANG, Daguang WANG, Huixian WANG a Gonglian CHEN. Rheological Properties of Cement Paste Containing Ground Fly Ash Based on Particle Morphology Analysis. *Crystals* [online]. 2022, **2022**(12) [cit. 2025-02-02]. ISSN 2073-4352. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.3390/cryst12040524](https://doi.org/10.3390/cryst12040524)
- [O3] Rubio-Cintas, M.D.; Parron-Rubio, M.E.; Perez-Garcia, F.; Bettencourt Ribeiro, A.; Oliveira, M.J. RUBIO-CINTAS, Maria Dolores, Maria Eugenia PARRON-RUBIO, Francisca PEREZ-GARCIA, António ELKOBETTENCOURT RIBEIRORDI a Miguel José OLIVEIRA. Influence of Steel Slag Type on Concrete Shrinkage. *Sustainability* [online]. 2021, **2021**(13) [cit. 2025-02-02]. ISSN 2071-1050. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.3390/su13010214](https://doi.org/10.3390/su13010214)
- [O4] Niknezhad, D., & Kamali-Bernard, S. (2016). Restrained shrinkage and cracking tendency of Self-Compacting Concrete incorporating supplementary cementitious materials (SCMs). *Academic Journal of Civil Engineering*, *34*(1), 627-634. [cit. 2025-02-12]. Dostupné z: <https://doi.org/10.26168/ajce.34.1.76>
- [O5] Choi, Y.-C. Hydration and Mechanical Properties of High-Volume Fly Ash Cement under Different Curing Temperatures. *Materials* **2024**, *17*, 4716. [cit. 2025-02-10]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ma17194716>
- [O6] OEY, Tandr , Aditya KUMAR, Jeffrey W. BULLARD, Narayanan NEITHALATH a Gaurav SANT. The Filler Effect: The Influence of Filler Content and Surface Area on Cementitious Reaction Rates. *Journal of the American Ceramic Society* [online]. Columbus: Blackwell Publishing Ltd, Wiley Subscription Services, 2013, 01. 06. 2013, *96*(6), 13 [cit. 2025-02-12]. ISSN 0002-7820. Dostupné z: [doi:10.1111/jace.12264](https://doi.org/10.1111/jace.12264)
- [O7] ŠILER, Pavel, Petr BAYER, Tomáš SEHNAL, Iva KOLÁŘOVÁ, Tomáš OPRAVIL a František ŠOUKAL. Effects of high-temperature fly ash and fluidized bed combustion ash on the hydration of Portland cement. In: *Construction and Building Materials* [online]. 78. March 2015, s. 181-188 [cit. 2025-02-12]. ISSN 0950-0618. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061815000525?via%3Dihub>
- [O8] GOLEWSKI, Grzegorz Ludwik. The Role of Pozzolanic Activity of Siliceous Fly Ash in the Formation of the Structure of Sustainable Cementitious Composites. *Sustainable Chemistry* [online]. 2022, **2022**(3(4)), 520-534 [cit. 2025-02-12]. ISSN 2673-4079. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.3390/suschem3040032](https://doi.org/10.3390/suschem3040032)
- [O9] ZAHED, Mona, Khashayar JAFARI a Farshad RAJABIPOUR. Properties and durability of concrete containing fluidized bed combustion (FBC) fly ash. *Construction and Building*

Materials [online]. 2020, **2020**(258) [cit. 2025-02-13]. ISSN 0950-0618. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119663>

[O10] AHMAD, Jawad, Karolos J. KONTOLEO, Ali MAJDI, Muhammad Tayyab NAQASH, Ahmed Farouk DEIFALLA, Nabil Ben KAHLA, Haytham F. ISLEEM a Shaker M. A. QAIDI. A Comprehensive Review on the Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS) in Concrete Production. *Sustainability* [online]. 2022, **2022**(14) [cit. 2025-02-13]. ISSN 2071-1050. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/14/8783>

[O11] ISLAM, Md. M., Mohammad Tarequl ALAM a Md. S. ISLAM. Effect of fly ash on freeze–thaw durability of concrete in marine environment. *Australian Journal of Structural Engineering* [online]. **2018**(19), 146-161 [cit. 2025-02-14]. ISSN 1328-7982. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1080/13287982.2018.1453332>

[O12] MITTERMAYR, Florian, Moien REZVANI, Andre BALDERMANN, Stefan HAINER, Peter BREITENBÜCHER, Joachim JUHART, Carl-Alexander GRAUBNER a Tilo PROSKE. Sulfate resistance of cement-reduced eco-friendly concretes. *Cement and Concrete Composites* [online]. 2015, **2015**(55), 364-373 [cit. 2025-02-14]. ISSN 0958-9465. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.09.020>

[O13] *Podrobné statistiky SVC ČR: Podíl jednotlivých cementů na domácím prodeji (kt)* [pdf.]. 2024. SVC ČR, 2024.

[O14] Silotransport, Produkty: Popílek. Silotransport.cz [online]. 2014 [cit. 2014- 01-2]. Dostupné z:<http://www.silotransport.cz/popilek>

[O15] ŤAŽKÝ, Martin. *Aktivace vysokoteplotního popílku přidávkem popílku fluidního pro výrobu betonu*. Brno, 2016. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNOCKÉ V BRNĚ.

[O16] GEORGET, Fabien, Barbara LOTHENBACH, William WILSON, Franco ZUNINO a Karen L. SCRIVENER. Stability of hemicarbonat under cement paste-like conditions. *Cement and Concrete Research* [online]. 2022, **2022**(153) [cit. 2025-02-14]. ISSN 0008-8846. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106692>

[O17] GRYSMANOVÁ, Markéta a Rostislav ZBIEG. BIOM.CZ. Metody dosažení emisních limitů emisí NOx kotlů velkých výkonů. *Biom.cz* [online]. 2010 [cit. 2025-02-15]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/metody-dosazeni-emisnich-limitu-emisi-nox-kotlu-velkych-vykonu>

[O18] MITSUBISHI POWER. Selective Catalytic Reduction (SCR) System. <https://power.mhi.com/> [online]. [cit. 2025-02-10]. Dostupné z: <https://power.mhi.com/products/aqcs/lineup/flue-gas-denitration>

[O19] FELEKOĞLU, Burak, Selçuk TÜRKEL a Hasan KALYONCU. Optimization of fineness to maximize the strength activity of high-calcium ground fly ash – Portland cement composites. *Construction and Building Materials* [online]. 2009, **2009**(23), 2053-2061 [cit. 2025-02-10]. ISSN 0950-0618. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.08.024>

[O20] KRISHNARAJ, L. a P.T. RAVICHANDRAN. Investigation on grinding impact of fly ash particles and its characterization analysis in cement mortar composites. *Ain Shams Engineering*

Journal [online]. 2019, **2019**(10), 267-274 [cit. 2025-02-15]. ISSN 2090-4479. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.asej.2019.02.001>

[O21] LEE, C.Y., H.K. LEE a K.M. LEE. Strength and microstructural characteristics of chemically activated fly ash–cement systems. *Cement and Concrete Research* [online]. 2003, **2003**(33), 425-431 [cit. 2025-02-15]. ISSN 0008-8846. Dostupné z: doi:[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00973-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00973-0)

[O22] SALAZAR-CARREÑO, Dimelsa, Rafael Guillermo GARCÍA-CÁCERES a Alejandra SANTA. High volume fly ash concrete activated with naoh, sodium sulfate and limestone. *INGE CUC* [online]. 2022, **2022**(18), 243–250 [cit. 2025-02-15]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.17981/ingecuc.18.1.2022.1755>

[O23] RAWLE, Alan a Paul KIPPAX. AMERICAN LABORATORY. Setting New Standards for Laser Diffraction Particle Size Analysis. AMERICAN LABORATORY. <https://www.americanlaboratory.com/> [online]. 2010, January 7, 2010 [cit. 2025-02-10]. Dostupné z: <https://www.americanlaboratory.com/913-Technical-Articles/606-Setting-New-Standards-for-Laser-Diffraction-Particle-Size-Analysis/>

[O24] UNIVERSALLAB BLOG. Scanning Electron Microscope (SEM) Knowledge. UNIVERSALLAB BLOG. <https://universallab.org/> [online]. 2024, April 15, 2024 [cit. 2025-02-10]. Dostupné z: https://universallab.org/blog/blog/scanning_electron_microscope_sem_knowledge/

[O25] VEQTER, RESIDUAL STRESS EXPERTS. The X-ray Diffraction (XRD) technique is the most widely used non-destructive technique, specialising in the measurement of surface residual stresses. VEQTER, RESIDUAL STRESS EXPERTS. <https://www.veqter.co.uk/> [online]. [cit. 2025-02-10]. Dostupné z: <https://www.veqter.co.uk/residual-stress-measurement/x-ray-diffraction>

[O26] HAJIKARIMI, Pouria a Fereidoon Moghadas NEJAD. Chapter 7 - Application of viscoelasticity for experimental tests. In: HAJIKARIMI, Pouria a Fereidoon Moghadas NEJAD. *Applications of Viscoelasticity*. Elsevier, 2021, s. 141-180. ISBN 978-0-12-821210-3.

[O27] CALMETRIX. *F-Cal Semi-Adiabatic Calorimeter* [online]. 2024 [cit. 2025-02-12]. Dostupné z: <https://www.calmetrix.com/f-cal-8000>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

ČR	Česká republika
VUT	Vysoké učení technické
VEP	vedlejší energetický produkt
SNCR	selektivní nekatalytická redukce oxidů dusíku
SCR	selektivní katalytická redukce oxidů dusíku
REACH	Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals
ECPC	koncepce ekvivalentních vlastností betonu
w	vodní součinitel
XRD	rentgenová difrakční analýza
SEM	rastrovací elektronový mikroskop
TGA	termogravimetrická analýza
DTA	diferenční termická analýza
pH	vodíkový exponent
ppm	jednotka – parts per milion (jedna miliontina)
DTK	drobné těžené kamenivo
DDK	drobné drcené kamenivo
HTK	hrubé těžené kamenivo
HDK	hrubé drcené kamenivo
XF	stupeň vlivu prostředí – působení mrazu a rozmrazování s rozmrazovacími prostředky nebo bez nich
XA	stupeň vlivu prostředí – chemické působení
CHRL	chemické rozmrazovací látky
C ₃ S	slinkový minerál – trikalciumpilát
C ₃ A	slinkový minerál – trikalciualuminát
C ₄ AF	slinkový minerál – tetrakalciualuminátferit
CSH	kalciumhydrosilikát
CAH	kalciumhydroaluminát
AFt	hemikarbonát – ettringit
AFm	hemikarbonát – monosulfát
CO ₂	oxid uhličitý
CaO	oxid vápenatý
SiO ₂	oxid křemičitý
Al ₂ O ₃	oxid hlinitý
Na ₂ SO ₄	síran sodný
Ca(OH) ₂	hydroxid vápenatý (portlandit)
Ca ²⁺	vápenatý iont
OH ⁻	hydroxylový iont
Fe ₂ O ₃	oxid železitý
SO ₃	oxid sírový
NO _x	oxidy dusíku
SO ₂	oxid siřičitý
NH ₂	zásaditá aminoskupina
O ₂	kyslík
NaOH	hydroxid sodný
K ₂ SO ₄	síran draselný
Na ₂ O	oxid sodný
NaCl	chlorid sodný
KNO ₃	dusičnan draselný
CaCO ₃	uhličitán vápenatý

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Složení jednotlivých druhů cementů dle ČSN EN 197-1 (zdroj [N8])	36 -
Tab. 2: Produkce a využití VEP za území ČR v roce 2023 (zdroj [36])	37 -
Tab. 3: Mezní hodnoty parametrů popílků sledované dle ČSN EN 450-1 (zdroj [N3])	42 -
Tab. 4: Chemické složení a vybrané fyzikální parametry CEM I 42,5 R Mokrá.....	81 -
Tab. 5: Výsledky pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku CEM I 42,5 R Mokrá	82 -
Tab. 6: Vybrané chemické a fyzikální parametry vysokoteplotních popílků.....	83 -
Tab. 7: Výsledky stanovené jemnosti analyzovaných vysokoteplotních popílků.....	85 -
Tab. 8: Dosažené hodnoty konzistence malty a indexů účinnosti vysokoteplotních popílků .-	86 -
Tab. 9: Vybrané chemické a fyzikální parametry analyzovaných fluidních popílků.....	88 -
Tab. 10: Hodnoty jemností analyzovaných fluidních popílků	89 -
Tab. 11: Dosažené hodnoty konzistence malty a indexů účinnosti analyzovaných fluidních popílků	91 -
Tab. 12: Výsledky vybraných chemických a fyzikálních parametrů popílků před a po procesu SNCR	94 -
Tab. 13: Hodnoty jemností analyzovaných popílků před a po procesu SNCR.....	96 -
Tab. 14: Dosažené hodnoty rozlité malty a indexů účinnosti analyzovaných popílků před a po procesu SNCR.....	97 -
Tab. 15: Složení zkušebních betonových směsí a dosažené vlastnosti ČB.....	100 -
Tab. 16: Výsledky mechanických parametrů betonů bez a s popínkem po procesu SNCR ..-	102 -
Tab. 17: Nejvyšší přípustné limity PEL a NPK-P pro amoniak.....	102 -
Tab. 18: Stanovené hodnoty koncentrace amoniaku v ovzduší	103 -
Tab. 19: Výsledky stanovení obsahu amonných inotů ve vodném výluhu z betonu s popínkem po procesu SNCR.....	104 -
Tab. 20: Hodnoty měrného povrchu a jemnosti mletých popílků.....	107 -
Tab. 21: Vybrané fyzikální a mechanické parametry mletých popílků	109 -
Tab. 22: Výsledky vybraných chemických, fyzikálních a mechanických parametrů CEM I 42,5 R a směsi SMAP	111 -
Tab. 23: Vyhodnocení parametrů směsi SMAP dle požadavků normy	113 -
Tab. 24: Složení cementových past pro stanovení optimálního poměru mísení vysokoteplotního a fluidního popínku.....	114 -
Tab. 25: Vodní součinitel cementových past a dosažené výsledky maximálních teplot – popílek EDE.....	116 -
Tab. 26: Vodní součinitel cementových past a dosažené výsledky maximálních teplot – popílek ECH.....	117 -
Tab. 27: Optimální poměry mísení vysokoteplotního a fluidního popínku	121 -

Tab. 28: Výsledky hodnot indexů účinnosti směsi vysokoteplotního a fluidního popílku - w = 0,5.....	122 -
Tab. 29: Výsledky hodnot indexů účinnosti směsi vysokoteplotního a fluidního popílku - konstantní rozlití	122 -
Tab. 30: Vybrané chemické a fyzikální parametry CEM I 42,5 R a směsi popílků CHAP ...	124 -
Tab. 31: Porovnání parametrů směsi CHAP s požadavky normy	125 -
Tab. 32: Mechanické parametry vstupních surovin	129 -
Tab. 33: Složení cementových past pro nalezení optimálního poměru mísení vysokoteplotního a fluidního popílku.....	130 -
Tab. 34: Dosažené výsledky maximálních teplot a optimálního poměru mísení vysokoteplotního popílku ERY a fluidního popílku ALPIQ	130 -
Tab. 35: Složení cementové pasty a dosažené hodnoty torzních momentů z rotačního viskozimetru.....	131 -
Tab. 36: Složení cementových past vykazujících shodné reologické chování na rotačním viskozimetru.....	132 -
Tab. 37: Výsledky stanovení počátku a doby tuhnutí cementopopílkových past	133 -
Tab. 38: Složení cementových malt s pískem DTK 0-2 mm Tovačov	133 -
Tab. 39: Mechanické parametry vyrobených malt se směsí CHAP	134 -
Tab. 40: Složení jednotlivých receptur jádrové vrstvy	135 -
Tab. 41: Dosažené mechanické parametry vyrobených vibrolisovaných dlažeb.....	138 -
Tab. 42: Dosažené výsledky nasákavosti vyrobených vibrolisovaných betonových dlažeb -	139 -
Tab. 43: Výsledky mrazuvzdornosti a odolnosti proti CHRL vyrobených vibrolisovaných betonových dlažeb.....	141 -
Tab. 44: Vybrané fyzikální parametry kameniv.....	151 -
Tab. 45: Vybrané chemické a fyzikální parametry CEM II/A-S 42,5 R.....	151 -
Tab. 46: Mechanické parametry pojiv a indexy účinnosti popílků	152 -
Tab. 47: Navržené receptury transportbetonů.....	153 -
Tab. 48: Vlastnosti čerstvého betonu.....	155 -
Tab. 49: Mechanické a fyzikální parametry ztvrdlých transportbetonů.....	156 -
Tab. 50: Dosažené výsledky zkoušky při vodní uložení vzorků.....	158 -
Tab. 51: Dosažené výsledky zkoušky při uložení vzorků v roztoku NaCl	159 -
Tab. 52: Dosažené výsledky zkoušky při uložení vzorků v roztoku Na ₂ SO ₄	160 -
Tab. 53: Dosažené výsledky zkoušky při uložení vzorků v roztoku KNO ₃	161 -
Tab. 54: Dosažené výsledky zkoušky při uložení vzorků v prostředí aerosolu SO ₂	162 -
Tab. 55: Výsledky TGA analýzy pro vodní uložení vzorků	176 -
Tab. 56: Výsledky TGA analýzy pro uložení vzorků v prostředí NaCl.....	177 -
Tab. 57: Výsledky TGA analýzy pro uložení vzorků v prostředí KNO ₃	177 -

Tab. 58: Výsledky TGA analýzy pro uložení vzorků v prostředí Na ₂ SO ₄	- 178 -
Tab. 59: Výsledky TGA analýzy pro uložení vzorků v prostředí aerosolu SO ₂	- 178 -
Tab. 60: Modelový výpočet výroby navržené směsi SMAP	- 182 -
Tab. 61: Modelový výpočet výroby navržené směsi CHAP	- 183 -
Tab. 62: Ekonomická bilance výroby modelových betonů na betonárně v Brně.....	- 185 -

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Zrna vysokoteplotního úletového popílku pod elektronovým mikroskopem (zdroj [O1]).	- 20 -
Obr. 2: Konzistence cementopopílkové pasty (zdroj [O2])	- 21 -
Obr. 3: Průběh autogenního smrštění cementových kompozitů s jemně mletou vysokopecní granulovanou struskou (zdroj [O3])	- 23 -
Obr. 4: Průběh objemových změn a napětí během smrštění pro různé druhy cementu (zdroj [O4])	- 23 -
Obr. 5: Průběh vývoje hydratačního tepla cementových malt, a - referenční směs, b - směs s náhradou cementu popílkem (zdroj [O5])	- 26 -
Obr. 6: Průběh vývoje hydratačního tepla cementových past s jemně mletým vápencem o různé jemnosti mletí (zdroj [O6])	- 27 -
Obr. 7: Průběh vývoje hydratačního tepla cementových past s fluidním popílkem (zdroj [O7])	- 27 -
Obr. 8: Vývoj indexů účinnosti vysokoteplotního popílku v čase (zdroj [O8])	- 29 -
Obr. 9: Vývoj pevností cementového kompozitu s fluidním popílkem v čase (zdroj [O9])	- 29 -
Obr. 10: Vývoj pevnosti cementového kompozitu s vysokopecní struskou v čase (zdroj [O10])	- 30 -
Obr. 11: Vývoj relativního dynamického modulu pružnosti cementového kompozitu se struskou jako závislosti odolnosti cementového kompozitu proti cyklickému zmrazování a rozmrazování (zdroj [O11])	- 32 -
Obr. 12: Vzorky uložené 200 dní v agresivním prostředí Na ₂ SO ₄ , Ref I - CEM I, Ref III - CEM III, Eco III - CEM III + vysokoteplotní popílek+ jemně mletý vápenec (zdroj [O12])	- 33 -
Obr. 13: Odolnost betonu s fluidními popílkem s různým obsahem CaO v prostředí Na ₂ SO ₄ (zdroj [O9])	- 34 -
Obr. 14: Podíl jednotlivých druhů cementů obchodovaných za území ČR v roce 2023 (zdroj [O13])	- 35 -
Obr. 15: Prognóza produkce VEP na území ČR mezi léty 2025 až 2030 (zdroj [36])	- 37 -
Obr. 16: Princip vzniku vysokoteplotního popílku (zdroj [O14])	- 40 -
Obr. 17: Princip vzniku fluidního popílku (zdroj [O15])	- 43 -
Obr. 18: Různé modifikace hemikarbonátů a jejich detekce na rentgenogramu XRD (zdroj [O16])	- 45 -
Obr. 19: Schéma procesu SNCR ve spalovacím procesu (zdroj [O17])	- 47 -
Obr. 20: Schéma denitrifikace spalin metodou SCR (zdroj [O18])	- 48 -
Obr. 21: Schématický princip mechanické aktivace popílku mletím (zdroj [O19])	- 50 -

Obr. 22: Vývoj pevností v tlaku cementového kompozitu s neupraveným a mechanicky aktivovaným popílkem mletím (zdroj [O20])	51 -
Obr. 23: Zastoupení ettringitu v cementovém kompozitu při použití principu chemické aktivace popílku sulfátovým aktivátorem (zdroj [O21])	52 -
Obr. 24: Vývoj pevností v tlaku cementového kompozitu s chemicky aktivovaným popílkem pomocí přídavku NaOH (zdroj [O22]).....	53 -
Obr. 25: Schéma řešení etapy I experimentální části	57 -
Obr. 26: Schéma řešení etapy II experimentální části.....	58 -
Obr. 27: Schéma řešení etapy III experimentální části	59 -
Obr. 28: Schéma řešení etapy IV experimentální části - prefabrikace	61 -
Obr. 29: Schéma řešení etapy IV experimentální části - transportbeton.....	62 -
Obr. 30: Schéma funkce laserového granulometru (zdroj [O23]).....	65 -
Obr. 31: Schéma fungování elektronového skenovacího mikroskopu SEM (zdroj [O24])	66 -
Obr. 32: Princip použití Braggovy rovnice (zdroj [O25]).....	67 -
Obr. 33: Princip měření reologie cementové pasty pomocí rotačního viskozimetru a druh použité míchací lopatky (zdroj [O26]).....	67 -
Obr. 34: Schéma manuálního Vicatova přístroje (zdroj [N15]).....	69 -
Obr. 35: Tvar a rozměry Le Chtelierovy objímky (zdroj [N15])	69 -
Obr. 36: Příklad CAMLETRIX F-CAL 8000 (zdroj [O27])	70 -
Obr. 37: Princip stanovení konzistence ČB sednutím kužele (zdroj [N22])	73 -
Obr. 38: Tvar a rozměry přípravku pro stanovení pevnosti betonu v příčném tahu (zdroj [N29])	75 -
Obr. 39: Snímky zrn vysokoteplotních popílků ze SEM ((a) - EDE_U, b) - ERY_U, c) - ECH_U, d) - ETR_L) – zvětšeno 1000 krát.....	84 -
Obr. 40: Křivky zrnitosti analyzovaných vysokoteplotních popílků	84 -
Obr. 41: Rentgenogram vysokoteplotního popílku Dětmárovice	85 -
Obr. 42: Grafické vyhodnocení dosažených indexů účinnosti analyzovaných vysokoteplotních popílků	86 -
Obr. 43: Fotografie zrn analyzovaných fluidních popílků ze SEM ((a) - ALPIQ, b) - ETI, c) - TŽ_L) - zvětšeno 1000 krát.....	89 -
Obr. 44: Křivky zrnitosti analyzovaných fluidních popílků	89 -
Obr. 45: Rentgenogram fluidního popílku Tisová	90 -
Obr. 46: Grafické zobrazení hodnot dosažených indexů účinnosti analyzovaných fluidních popílků	91 -
Obr. 47: Zrna úletových popílků před a po procesu SNCR ze SEM ((a) - EOP, b) - EOP_75, c) - EOP_175, d) - ENO, e) - ENO_250) - zvětšeno 1000 krát.....	95 -
Obr. 48: Křivky zrnitosti analyzovaných popílků před a po procesu SNCR	96 -

Obr. 49: Grafické vyhodnocení dosažených indexů účinnosti analyzovaných popílků před a po procesu SNCR.....	98 -
Obr. 50: Ukládka betonu s popílkem po procesu SNCR.....	101 -
Obr. 51: Křivky zrnitosti v závislosti na procesu mletí popílku ETR_L	107 -
Obr. 52: Křivky zrnitosti v závislosti na procesu mletí popílku TŽ_L	108 -
Obr. 53: Závislost měrného povrchu popílků na době mletí.....	108 -
Obr. 54: Fotografie zrn mletých popílků ze SEM ((a) - ETR_L, b) - TŽ_L) - zvětšeno 1000 krát	110 -
Obr. 55: Výsledná křivka zrnitosti směsi SMAP	112 -
Obr. 56: Průběh hydratačních teplot cementové pasty - systém 25_EDE+ALPIQ.....	119 -
Obr. 57: Průběh hydratačních teplot cementové pasty - systém 25_ECH+ALPIQ	119 -
Obr. 58: Průběh hydratačních teplot cementové pasty - systém 50_ECH+ALPIQ	120 -
Obr. 59: Průběh hydratačních teplot cementové pasty - systém 25_ECH+ETI.....	120 -
Obr. 60: Grafické vyhodnocení dosažených indexů účinnosti směsi vysokoteplotních a fluidních popílků (plná čára – w=0,5, šrafovaná čára – konstantní rozlití).....	123 -
Obr. 61: Výsledná křivka zrnitosti směsi CHAP	124 -
Obr. 62: Průběh hydratačních teplot cementových past systému ERY+ALPIQ.....	130 -
Obr. 63: Průběh torzních momentů cementových past při zkoušce reologie.....	131 -
Obr. 64: Průběh torzních momentů cementových past při zkoušce reologie s upraveným vodním součinitelem	132 -
Obr. 65: Fotografie betonové dlažby vyrobené za použití směsi CHAP	137 -
Obr. 66: Venkovní uložení náhodně vybraných betonových dlažeb.....	137 -
Obr. 67: Vývoj celkové nasákavosti vibrolisovaných betonových dlažeb v čase.....	140 -
Obr. 68: Detail jádrové vrstvy na zlomu.....	141 -
Obr. 69: Fotografie mikrostruktury vzorku C+P+30F po 7 dnech zrání – patrná ještě nezreagovaná zrna vysokoteplotního popílku, tvořící se CSH gely a přítomnost ettringitu .-	142 -
Obr. 70: Fotografie mikrostruktury vzorku C+P+30F po 28 dnech zrání – patrný průběh pucolánové reakce zrn vysokoteplotního popílku a zahušťování mikrostruktury.....	143 -
Obr. 71: Fotografie mikrostruktury vzorku C+P+30F po 360 dnech zrání – výrazné zahušťování mikrostruktury vznikajícími produkty pucolánové reakce a prorůstání jehlic primárního ettringitu CSH gely	143 -
Obr. 72: Fotografie mikrostruktury vzorku C+P+30F po zkoušce mrazuvzdornosti – bez výskytu mikroporuch, kompaktní mikrostruktura zahušťována produkty pucolánové reakce	144 -
Obr. 73: Vyhodnocený rentgenogram vzorků C+P+30F po 360 dnech uložení ve venkovním prostředí	145 -

Obr. 74: Ilustrativní rentgenogram vzorků uložených 360 dní ve venkovním prostředí + detail oblasti výskytu hemikarbonátů	146 -
Obr. 75: Ilustrativní rentgenogram vzorků uložených 28 dní ve vodním uložení + detail oblasti výskytu hemikarbonátů	146 -
Obr. 76: Výsledek termogravimetrické analýzy pro vzorek C+P+30F při stáří 7 dní	147 -
Obr. 77: Výsledek termogravimetrické analýzy pro vzorek C+P+30F po uložení 360 dní ve venkovním prostředí	147 -
Obr. 78: Vývoj množství portlanditu v čase u vzorků vibrolisovaných betonových dlažeb uložených v laboratorním prostředí	148 -
Obr. 79: Křivky zrnitosti kameniv	151 -
Obr. 80: Výroba navržených transportbetonů	154 -
Obr. 81: Vyrobené systémové legobloky a silniční panely	154 -
Obr. 82: Těleso po expozici 360 dní v prostředí aerosolu SO ₂	163 -
Obr. 83: Grafické vyhodnocení dosažených dynamických modulů pružnosti	163 -
Obr. 84: Grafické vyhodnocení dosažených pevností betonu v příčném tahu	163 -
Obr. 85: Snímky mikrostruktury ze SEM pro vzorek REF při jeho uložení 180 dnů v agresivním prostředí ((a) - voda, b) - NaCl, c) - KNO ₃ , d) - Na ₂ SO ₄ , e) - aerosol SO ₂ , f) – uložení 360 dnů v prostředí aerosolu SO ₂) - zvětšení 10 000 krát a 2000 krát	165 -
Obr. 86: Snímky mikrostruktury ze SEM pro vzorek EDE při jeho uložení 180 dnů v agresivním prostředí ((a) - voda, b) - NaCl, c) - KNO ₃ , d) - Na ₂ SO ₄ , e) - aerosol SO ₂) - zvětšení 10 000 krát	166 -
Obr. 87: Snímky mikrostruktury ze SEM pro vzorek SMAP při jeho uložení 180 dnů v agresivním prostředí ((a) - voda, b) - NaCl, c) - KNO ₃ , d) - Na ₂ SO ₄ , e) - aerosol SO ₂) - zvětšení 10 000 krát	167 -
Obr. 88: Snímky mikrostruktury ze SEM pro vzorek CHAP při jeho uložení 180 dnů v agresivním prostředí ((a) - voda, b) - NaCl, c) - KNO ₃ , d) - Na ₂ SO ₄ , e) - aerosol SO ₂) - zvětšení 10 000 krát	168 -
Obr. 89: Celkově vyhodnocený rentgenogram vzorku REF po jeho uložení 360 dní ve vodě	169 -
Obr. 90: Rentgenogramy všech vzorků při jejich uložení 360 dní ve vodě + detail oblasti výskytu hemikarbonátů	170 -
Obr. 91: Rentgenogram pro vzorek REF po 360 dnech uložení v prostředí NaCl s detekcí halitu	171 -
Obr. 92: Rentgenogramy všech vzorků při jejich uložení 360 dní v prostředí NaCl + detail oblasti výskytu hemikarbonátů	171 -
Obr. 93: Rentgenogram pro vzorek REF po 360 dnech uložení v prostředí KNO ₃ s detekcí krystalické fáze KNO ₃	172 -

Obr. 94: Rentgenogramy všech vzorků při jejich uložení 360 dní v prostředí KNO_3 + detail oblasti výskytu hemikarbonátů	- 172 -
Obr. 95: Rentgenogram pro vzorek REF po 360 dnech uložení v prostředí Na_2SO_4 s detekcí krystalické fáze Na_2SO_4	- 173 -
Obr. 96: Rentgenogramy všech vzorků při jejich uložení 360 dní v prostředí Na_2SO_4 + detail oblasti výskytu hemikarbonátů	- 173 -
Obr. 97: Rentgenogram pro vzorek REF po 360 dnech uložení v prostředí aerosolu SO_2 s detekcí různých modifikací hemikarbonátů	- 174 -
Obr. 98: Rentgenogramy všech vzorků při jejich uložení 360 dní v prostředí aerosolu SO_2 + detail oblasti výskytu hemikarbonátů.....	- 175 -