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

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

ABRIDGED VERSION OF DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE — Ing. Martin Ťažký

AUTHOR

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

SUPERVISOR

BRNO 2025

Klíčová slova

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

Keywords

Addition, secondary raw material, hightemperature fly ash, fluidized bed combustion fly ash, mechanical activation, chemical activation, durability, microstructure, conrete

Název pracoviště

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců

OBSAH

OBSAH ..... - 4 -
1. ÚVOD ..... - 5 -
2. CÍL PRÁCE ..... - 6 -
3. METODIKA PRÁCE ..... - 7 -
3.1 ETAPA I – VÝBĚR SUROVIN ..... - 7 -
3.2 ETAPA II – DOPADY SNCR NA VYSOKOTEPLOTNÍ POPÍLEK ..... - 7 -
3.3 ETAPA III – AKTIVACE POPÍLKŮ ..... - 8 -
3.4 ETAPA IV – VYUŽITÍ AKTIVOVANÝCH SMĚSÍ POPÍLKŮ PRO VÝROBU BETONU ..... - 8 -
3.5 ETAPA V – EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ VÝROBY BETONŮ S NOVĚ VYVINUTÝMI PŘÍMĚSEMI ..... - 9 -
4. VÝSLEDKY ..... - 9 -
4.1 VYBRANÉ VLASTNOSTI VYSOKOTEPLOTNÍCH A FLUIDNÍCH POPÍLKŮ ..... - 9 -
4.2 POPÍLEK PO PROCESU SNCR ..... - 11 -
4.3 MECHANICKÁ AKTIVACE POPÍLKŮ ..... - 13 -
4.4 CHEMICKÁ AKTIVACE POPÍLKŮ ..... - 14 -
4.5 OVĚŘENÍ POZNATKŮ V PRAXI ..... - 15 -
4.5.1 Výroba prefabrikovaných dílců ..... - 15 -
4.5.2 Výroba transportbetonu ..... - 20 -
4.6 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ VÝROBY BETONŮ S NOVĚ VYVINUTÝMI PŘÍMĚSEMI ..... - 26 -
5. Závěr ..... - 27 -
6. Přínos pro vědní obor a praxi ..... - 28 -
7. Seznam použité literatury ..... - 29 -
CURRICULUM VITAE ..... - 29 -
ABSTRACT ..... - 31 -

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 stáje 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.

Z důvodu výrazného poklesu produkce klasických druhotných materiálů používaných pro výrobu betonu, je proto 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 výrobu 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. [1] Výraznějšímu 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 žíháním. Výrazný nedostatek klasických vysokoteplotních úletových popílků dává dobrý základ k započetí efektivního využití ložových popílků za pomocí 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 pak 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 přídavkem 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 byly voleny s ohledem na jejich dostupnost a fyzikálně-chemické vlastnosti.

2. 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.

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 příměsi 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 popílky 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.

Hlavním cílem této disertační práce je 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 v rámci řešení disertační práce opíral 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, byl 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 byly poté dále ověřeny přímo v praxi. Tyto praktické poznatky byly důkladně vyhodnoceny z hlediska procesu výroby, finálních vlastností výrobku i z hlediska ekonomického aspektu provozu.

3. METODIKA PRÁCE

3.1 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 trhnu nabízeny dle platných předpisů normy ČSN EN 450-1 [N1], 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 popílky byly podrobeny několika základním zkouškám, které podávají obraz o jejich chemickém složení, morfologii a mineralogii a dalších fyzikálně-mechanických zkouškách.

3.2 ETAPA II – DOPADY SNCR NA VYSOKOTEPLOTNÍ POPÍLEK

V rámci řešení této etapy experimentální části disertační práce byly zkoumány možné dopady procesu selektivní nekatalytické redukce oxidu dusíku (SNCR) na vysokoteplotní popílek a následně na jeho využití jako aktivní příměsi pro výrobu betonu. Vysokoteplotní popílky po procesu SNCR byly zkoumány z pohledu dopadu procesu SNCR na jejich morfologii zrn, vybrané fyzikální parametry jako je například jemnost a rovněž na mechanické parametry, jako je index účinnosti nebo doby tuhnutí. Dále byl přímo v reálném provozu ověřen dopad obsažených amonných solí v popílku

po procesu SNCR nejen na samotnou výrobu a parametry betonové směsi, ale rovněž z pohledu kvality ovzduší, do nějž je emitován amoniak při práci s těmito popílky. Tento parametr byl sledován a hodnocen za účasti Zdravotního ústavu při výrobě betonové směsi a dále při její simulované ukládce do uzavřených nevětraných prostor. Všechny nabyté výsledky vedly mimo jiné k jejich interpretaci v podobě vypracování **Metodické příručky pro používání popílků po procesu SNCR**, jejíž jsem spoluautorem.

3.3 ETAPA III – AKTIVACE POPÍLKŮ

V této etapě zabývající se aktivací popílků pro jejich použití jako aktivní příměsi typu II do betonu byly 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. Pro výrobu této směsi mechanicky aktivovaných popílků bylo využito ložového vysokoteplotního a ložového fluidního popílku. Nejprve byla zkoumána závislost doby selektivního mletí na granulometrii a jemnost těchto popílků a následně byl navržen postup jejich společného mletí.

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. [2] Principem metodiky hledání optimálního poměru mísení obou druhů popílků bylo zkoumání ovlivnění průběhu měřených hydratačních teplot cementových past. Byly analyzovány poměry mísení vysokoteplotního a fluidního popílku v intervalu od 80:20 až po 50:50 při náhradě cementu touto směsí v množství 25, 35 a 50 %. Výsledkem bylo stanovení optimálního poměru mísení v závislosti na urychlení průběhu hydratační teploty. Tento princip chemické aktivace dal 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 z pohledu chemických, fyzikálních i mechanických parametrů.

3.4 ETAPA IV – VYUŽITÍ AKTIVOVANÝCH SMĚSÍ POPÍLKŮ PRO VÝROBU BETONU

Cílem této etapy experimentální části disertační práce bylo 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 (betonové dlažební desky 500×500×50 mm) za použití těchto příměsí a dále na podetapu výroby klasických transportbetonů za použití těchto příměsí. Před samotnou výrobou byly poznatky navržené metodiky stanovení optimálního poměru mísení vysokoteplotního a

fluidního popílku aplikovány na vstupní suroviny daného výrobního závodu. V případě výroby transportbetonu byla dále ověřena možnost použití navržených nových směsí popílků se směsným portlandským cementem CEM II/A-S 42,5 R. Před samotnou výrobou drobného prefabrikovaného zboží i transportbetonů byly provedeny analýzy všech vstupních surovin včetně kameniv, což vedlo k návrhu receptur.

V obou případech výroby byl poté 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.

3.5 ETAPA V – EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ VÝROBY BETONŮ S NOVĚ VYVINUTÝMI PŘÍMĚSEMI

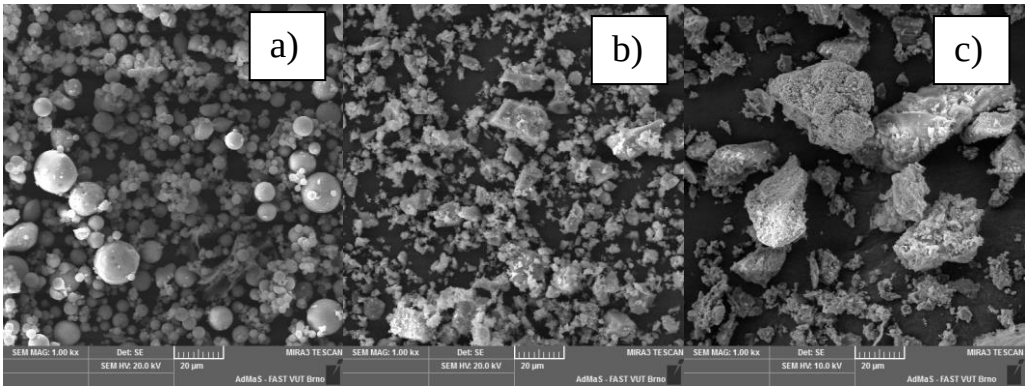
Poslední etapa experimentální části disertační práce byla zaměřena na aplikaci navržených nových aktivních příměsí do výroby. V této etapě jsou zhodnoceny ekonomické aspekty výroby samotných nově navržených směsí popílků a poté i betonů s využitím navržených nových aktivních příměsí na bázi aktivovaných popílků.

4. VÝSLEDKY

4.1 VYBRANÉ VLASTNOSTI VYSOKOTEPLOTNÍCH A FLUIDNÍCH POPÍLKŮ

Zkoušky byly provedeny na těchto vysokoteplotních a fluidních popílkách:

- Černouhelný úletový popílek Dětmarovice – EDE_U
- Černouhelný úletový popílek Rybnik – ERY_U
- Hnědouhelný úletový popílek Chvaletice – ECH_U
- Černouhelný ložový popílek Třebovice – ETR_L
- Fluidní úletový popílek Zlín – ALPIQ
- Fluidní úletový popílek Tisová – ETI
- Ložový fluidní popílek Třinec – TŽ_L



Obr. 1: Fotografie zrn vybraných popílků ze SEM ((a) – ERY_U, b) – ETR_L, c) - ALPIQ_L) - zvětšeno 1000 krát

Mineralogické složení bylo stanoveno za pomocí rentgenové difrakční analýzy (XRD) a ve všech případech vysokoteplotních popílků byla detekována především přítomnost mullitu a křemene a dále minerálů pocházejících z nespálených zbytků uhlí, jako jsou spinel, periklas nebo hematit.

Tab. 1: Dosažené hodnoty konzistence malty a indexů účinnosti vysokoteplotních popílků

Materiál	**Vlastnost**	**Rozlití**	**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

Z pohledu mineralogického složení fluidních popílků oproti popílkům vysokoteplotním byla na úkor vysokoteplotních fází křemene (mullit) navíc detekována přítomnost zejména anhydritu, 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

Tab. 2: 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

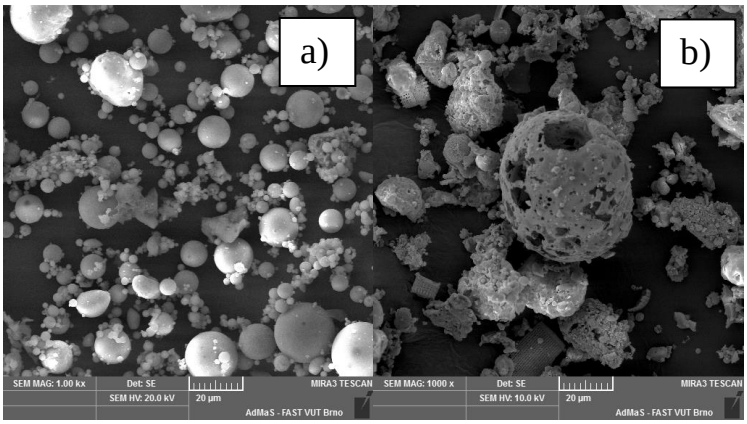
4.2 POPÍLEK PO PROCESU SNCR

Zkoušky byly provedeny na těchto vysokoteplotních popílkách:

- Vysokoteplotní úletový popílek Opatovice – EOP
  - Elektrárny Opatovice, a.s. – bez kontaminace, obsah solí amoniaku v koncentraci 75 ppm a 175 ppm
- Vysokoteplotní úletový popílek Nováky – ENO
  - Slovenské elektrárne, a.s. - bez kontaminace, obsah solí amoniaku v koncentraci 250 ppm

Tab.3: Výsledky vybraných fyzikálních parametrů popílků před a po procesu SNCR

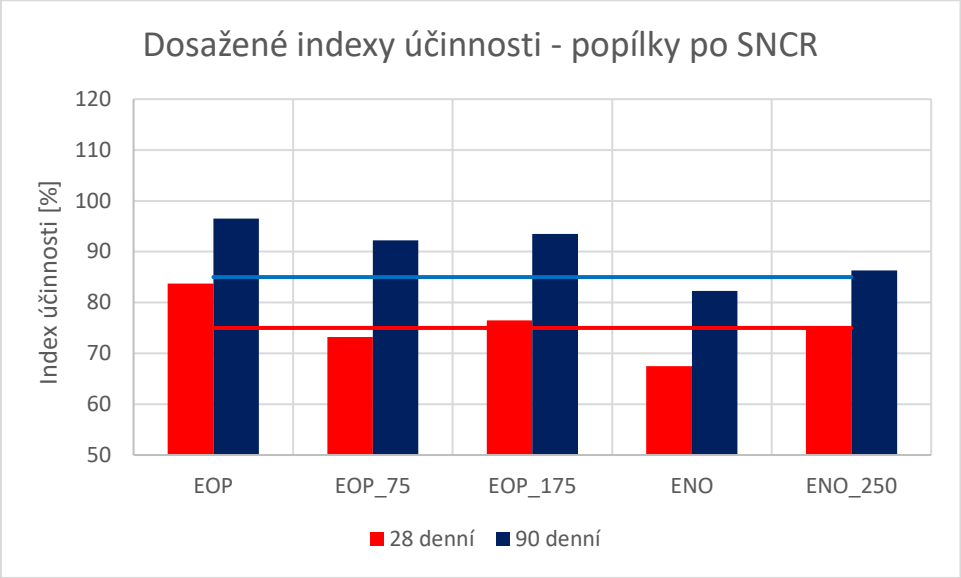
Materiál	**Vlastnost**	**Měrná hmotnost**	**Měrný povrch**	**Počátek tuhnutí**	**Doba tuhnutí**	**Objemová stálost**
-	**Jednotky**	g/cm^3	m^2/kg	min	min	mm
EOP	**Výsledek**	2,18	318	415	650	0,2
EOP_75		2,18	356	340	555	0,1
EOP_175		2,19	425	305	420	0,3
ENO		2,13	356	400	620	0,2
ENO_250		2,13	652	300	405	0,2



Obr.2: Zrna vybraných úletových popílků před a po procesu SNCR ze SEM ((a) - ENO, b) - ENO_250) - zvětšeno 1000 krát

Fotografie zrn popílků po procesu SNCR podávají jednoznačný obraz o dopadu denitrifikace na jejich morfologii. Zrna popílku po procesu SNCR již nevykazují téměř stejnorodý a dokonale kulovitý zeskelněný 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 vstřikováno 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 částeček.



Obr. 3: Grafické vyhodnocení dosažených indexů účinnosti analyzovaných popílků před a po procesu SNCR

Tab.4: 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.

4.3 MECHANICKÁ AKTIVACE POPÍLKŮ

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.

Tab. 5: 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

Tab.6: Vybrané mechanické parametry mletých popílků

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

Na základě dosažených výsledků pro jednotlivé ložové popílky 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.

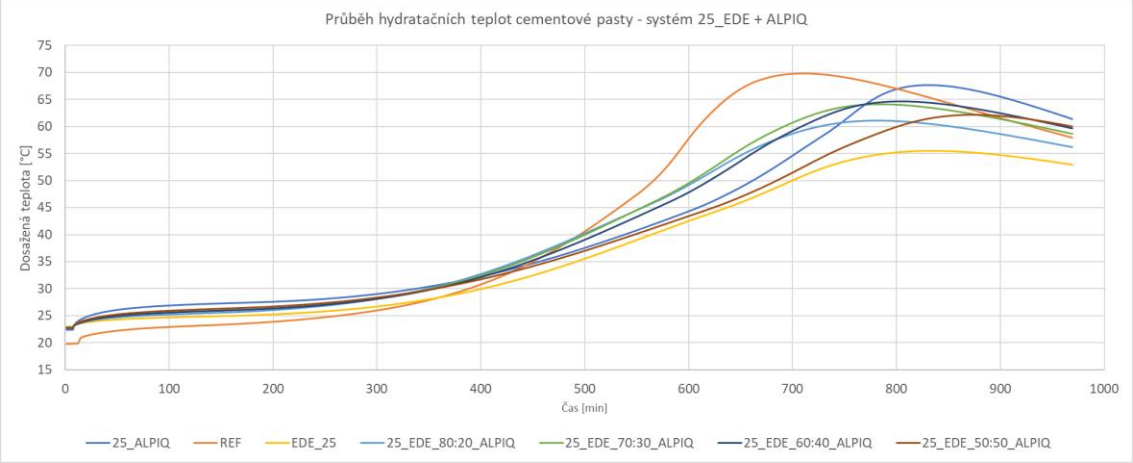
Tab. 7: Vyhodnocení parametrů směsi SMAP dle požadavků normy

Parametr	Požadavek normy	SMAP	Vyhodnocení
Ztráta žíháním	≤ 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**

$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$	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**

4.4 CHEMICKÁ AKTIVACE POPÍLKŮ

Chemická aktivace popílků sledovaná a aplikovaná v této disertační práci byla založena na nalezení ideálního poměru mísení vysokoteplotního úletového a fluidního úletového popílku. Nalezení tohoto ideálního poměru bylo vázáno přímo na sledování průběhu hydratačních procesů, konkrétně poté z pohledu průběhu hydratačních teplot. Pro tuto část disertační práce byly vybrány vysokoteplotní úletové popílky pocházející z procesu spalování převážně hnědého nebo černého uhlí a fluidní popílky byly voleny s ohledem na jejich snadnou dostupnost a zajištěnou produkci v rámci oblasti Moravy i Čech. Stanovením vlastností použitých popílků se zabývala Etapa I experimentální části této disertační práce.



Obr. 4: Průběh hydratačních teplot cementové pasty - systém 25_EDE+ALPIQ

Tab. 8: 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 popílků a rovněž bez závislosti na náhradě cementu směsí popílků, poměr mísení **70 % vysokoteplotního a 30 % fluidního popílku.** Tato směs byla pro potřeby disertační práce nazvaná jako **CHAP** – chemicky aktivovaný popílek.

Tab. 9: Porovnání parametrů směsi CHAP s požadavky normy

Parametr	**Požadavek normy**	**CHAP**	**Vyhodnocení**
Ztráta žíháním	≤ 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**
$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$	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**

4.5 OVĚŘENÍ POZNATKŮ V PRAXI

4.5.1 Výroba prefabrikovaných dílců

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
- Černouhelný úletový popílek Rybnik – ERY_U
- DTK 0/2 mm Tovačov
- DDK 0/4 mm Jakubčovice + HDK 4/8 mm Jakubčovice
- Směs CHAP – vysokoteplotní popílek Rybnik + fluidní popílek ALPIQ Zlín

Tab. 10: 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.

Tab. 11: Složení jednotlivých receptur jádrové vrstvy

Surovina/Označení	REF	C+P+20F	C+P+30F
CEM I 42,5 R Ladce	245	245	245
Popílek Rybnik	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

Pro ověření možnosti výroby a následných vlastností vibrolisovaných betonových dlažeb s využitím navržených CHAP byla navržená 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. Ve výrobě bylo celkem vyrobeno z každé

receptury 30 kusů betonových dlažeb, které byly následně podrobeny laboratorním zkouškám.

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

Tab. 12: Dosažené mechanické parametry vyrobených vibrolisovaných dlažeb

Stáří	**7 dny**			**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 poukázaly na již dříve zjištěný trend, že nejvyšších indexů aktivity (poměr pevnosti směsi s CHAP ku pevnosti referenční) 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 [N2] na mechanické parametry a v případě vibrolisovaného zboží je nutné brát v potaz možnost výraznější variability výsledků.

Výsledky celkové nasákavosti podávaly obraz, že v případě vzorků vyrobených za použití směsi CHAP nelze pozorovat zvýšené hodnoty oproti vzorkům referenčním a opět bylo možné všechny výsledky klasifikovat již při stáří 28 dní prakticky jako vyhovující dle normy ČSN EN 1339. Z dosažených výsledků byla však opět patrná jejich značná variabilita v čase. Obecně bylo možné ale říci, že hodnota celkové nasákavosti u všech vzorků v čase klesá. Obdobný trend byl poté pozorován u

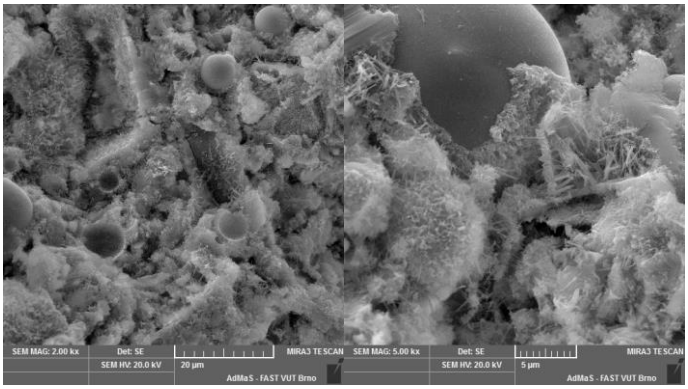
výsledků kapilární nasákavosti jádrové vrstvy. Výsledky kapilárních nasákavostí jádrové vrstvy poté neprokázaly zhoršující se hodnoty s dobou stáří a nebylo možné tak soudit na negativní degradaci mikrostruktury při použití fluidního popílku, která by se projevovala tvorbou mikroporuch a zvýšenou hodnotou nasákavosti.

Tab. 13: Výsledky mrazuvzdornosti a odolnosti proti CHRL vyrobených vibrolisovaných betonových dlažeb

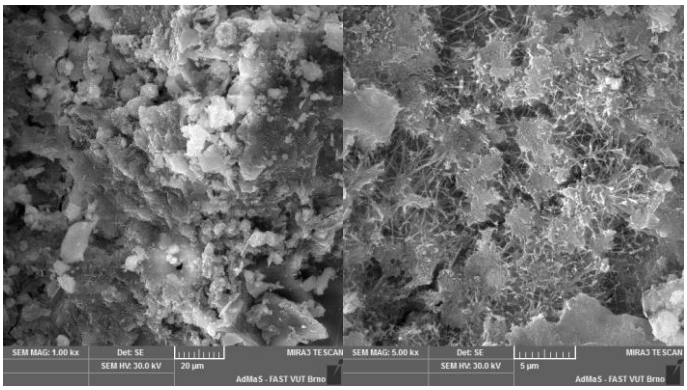
Označení / vlastnost	Mrazuvzdornost T150		CHRL A
	Změna hmotnosti [%]	Index mrazuvzdornosti [-]	Načítaný odpad po 100 cyklech [g/m^2]
REF	-0,10	0,87	115,2
C+P+20F	+0,48	0,90	108,6
C+P+30F	+0,57	0,89	96,6

Z dosažených výsledků bylo patrné, že vyrobené vzorky byly dobře odolné i z hlediska působení mrazu a vody. Betonové ploché dlažby vyrobené ze směsí chemicky aktivovaných popílků (CHAP) vykazovaly 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 přídavkem fluidního popílku nijak negativně neovlivňuje výslednou trvanlivost vrstvy nášlapné a její dokonalé propojení s vrstvou jádrovou.

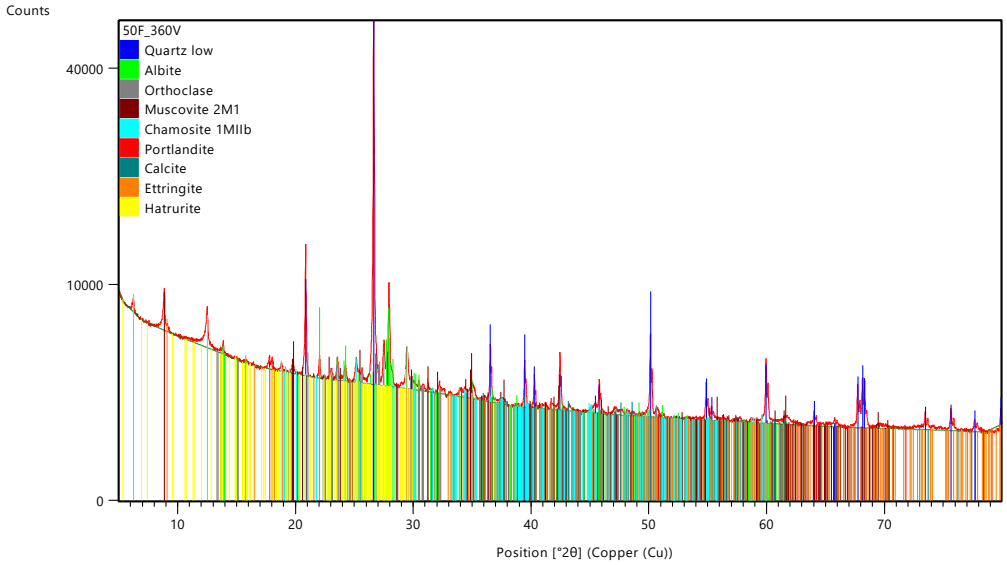
Mikrostruktura vzorků byla analyzována ve stáří 7, 28 a 360 dní (laboratorní i venkovní uložení) a u vzorků pro zkoušku mrazuvzdornosti před i po ní (vodní uložení).



Obr.5: Fotografie mikrostruktury vzorku C+P+30F po 7 dnech zrání – patrná ještě nezreagovaná zrna vysokoteplotního popílku, tvořící se CSH gely a přítomnost ettringitu

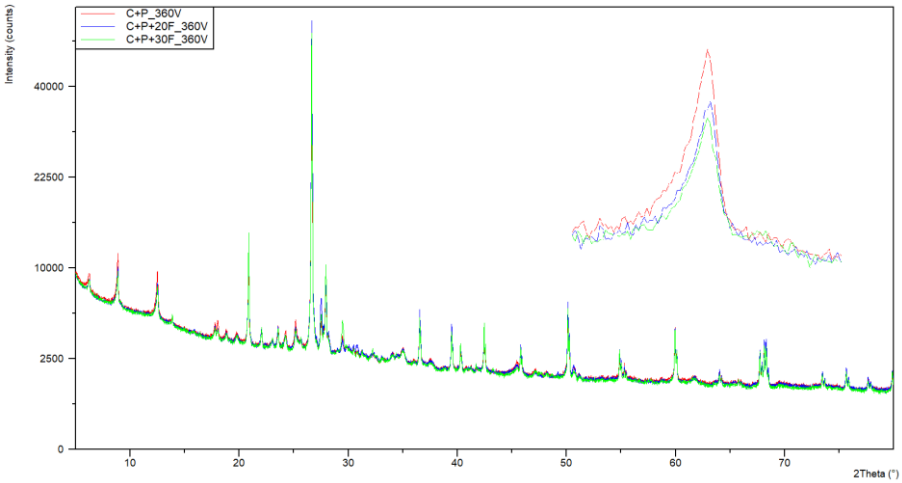


Obr.6: Fotografie mikrostruktury vzorku C+P+30F po 360 dnech zrání – výrazné zahušťování mikrostruktury vznikajícími produkty pucolánové reakce a prorůstání jehlic primárního ettringitu CSH gely



Obr.7: Vyhodnocený rentgenogram vzorků C+P+30F po 360 dnech uložení ve venkovním prostředí

Podle výsledků XRD bylo možné říci, že analyzované vzorky vyjma běžných minerálů pocházejících z kameniva (křemen, živce, jílovit-slídové minerály) obsahovaly 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 byla poté dána nízkým vodním součinitelem při výrobě daných vzorků metodou vibrolisování a uložením vzorků v přirozeném prostředí bez značného přísunu vody.



Obr.8: Ilustrativní rentgenogram vzorků uložených 360 dní ve venkovním prostředí + detail oblasti výskytu AFt fází

Přiložený ilustrativní rentgenogram potvrdil dále závěry výsledků elektronové mikroskopie, kdy nebyly 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.

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

4.5.2 Výroba transportbetonu

V této dílčí podetapě byla ověřena využitelnost navržené chemicky aktivované směsí 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 provézt analýzu vstupních surovin.

- Cement CEM II/A-S 42,5 R z cementárny Mokrá
- Černouhelný úletový popílek Dětmarovice – EDE_U
- Směs SMAP
  - Černouhelný ložový popílek Třebovice – ETR_L
  - Ložový fluidní popílek Třinec – TŽ_L
- Směs CHAP
  - Černouhelný úletový popílek Dětmarovice – EDE_U

    - Fluidní úletový popílek Zlín – ALPIQ
- DTK 0/4P mm Žabčice + HTK 4/8P mm Žabčice + HTK 8/16P mm Žabčice
- Superplastifikační přísada MAPEI Dynamon PCT 629

Tab. 14: Indexy účinnosti popílků s CEM II/A-S 42,5 R

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

Dle nabytých výsledků došlo k návrhu finálních receptur konstrukčních betonů pro dopravu automixy. Jednalo se o receptury pro neprovzdušněný beton třídy C 30/37 v konzistenci sednutí kužele S4.

Tab. 15: Navržené receptury transportbetonů

Surovina/Označení	**REF**	**EDE**	**SMAP**	**CHAP**
CEM II/A-S 42,5 R Mokrá	335	260	260	260
Popílek Dětmarovice	-	140	-	-
SMAP / CHAP	-	-	140	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

Betonové směsi byly vyrobené na betonárně s planetovou míchačkou EUROMECC Fivetech1000S s automatickým, počítačem řízeným provozem a každá receptura byla vyrobená v množství 3 m^3, ze kterého byla následně vyrobena zkušební tělesa a systémové legobloky a silniční panely. Výroba těchto konstrukčních prvků je doplňkovou činností daného producenta betonu.

Během procesu výroby bylo prokázáno bezproblémové použití směsi SMAP a CHAP pro výrobu transportbetonu a vlastnosti v čerstvém stavu tento úsudek potvrdily. Vyšší dávka superplastifikační přísady a záměsové vody odpovídala

závěrům předchozích etap experimentální části disertační práce zabývající se reologií směsí při použití směsi popílků CHAP.

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.

- Roztok chloridů (nasycený roztok NaCl v koncentraci 261g/l)
- Roztok Na_2SO_4 v koncentraci 34 600 mg/l
- Roztok KNO_3 v koncentraci 180 mg/l
- Aerosol SO_2 v koncentraci 3,4 ml/l při zvýšené teplotě

Tab. 16: Mechanické a fyzikální parametry ztvrdlých transportbetonů

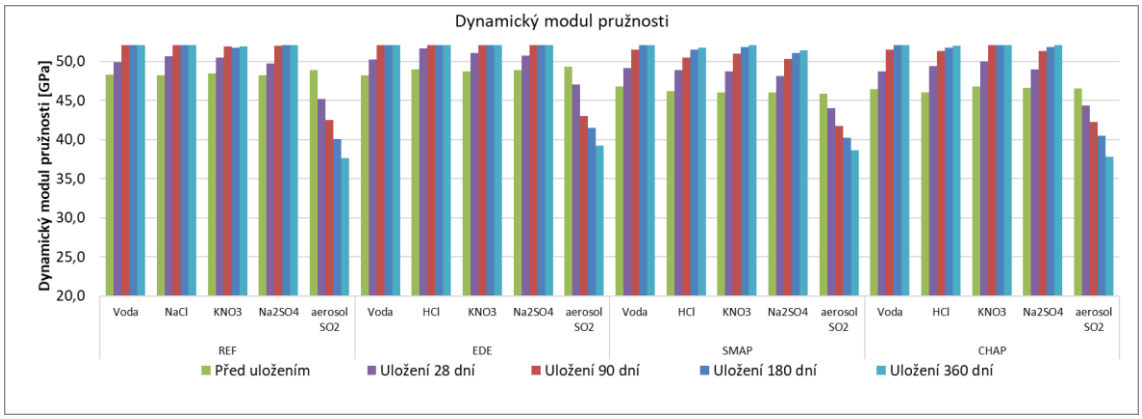
Stáří	**7 dny**				**28 dní**			
Vlastnost / Označení	**REF**	**EDE**	**SMAP**	**CHAP**	**REF**	**EDE**	**SMAP**	**CHAP**
Objemová hmotnost [kg/m^3]	2370	2350	2340	2350	2370	2360	2340	2360
Pevnost v tlaku [MPa]	36,3	32,6	32,5	40,5	49,9	47,1	44,8	57,5
Index aktivity [%]	-	-	**-0,3**	**+24,2**	-	-	**-4,9**	**+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/m^3]	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 poukázaly 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 vykazovaly ve stáří 7 a 28 dní výrazně vyšší hodnoty pevností v tlaku než receptura s klasickým vysokoteplotním popílkem a toto navýšení pevností činilo 22 % ve stáří 28 dnů. S rostoucím stářím betonu bylo zřejmé, že počáteční vysoká aktivita směsi CHAP klesá a výsledky se srovnávaly s výsledky směsí

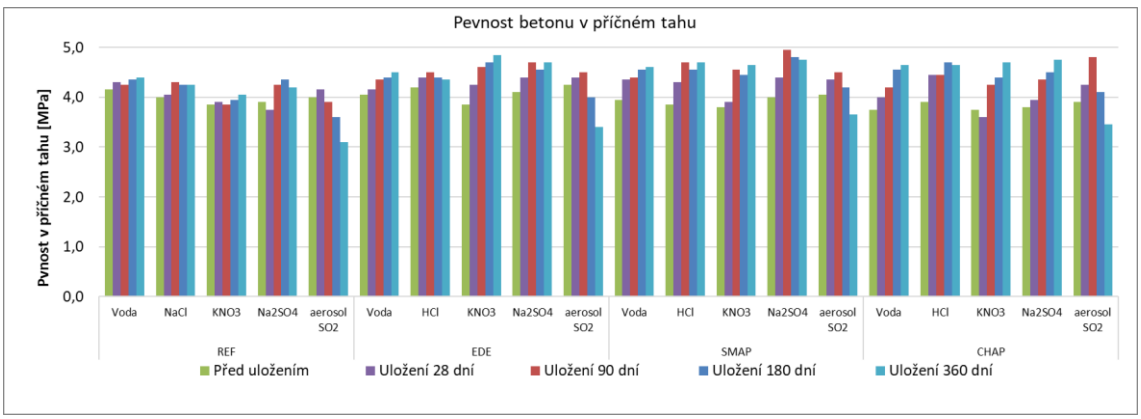
s popílkem Dětmarovice. Tento trend byl pozorován i v předešlých experimentech této disertační práce a je zřejmé, že na něj nemá výrazný vliv ani druh cementu.

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 [N3], 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 měly prokázat, zda-li lze považovat použití navržených směsí SMAP a CHAP pro výrobu betonu za bezpečné z pohledu jeho trvanlivosti.

Pro stanovení vlivu 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.



Obr.9: Grafické vyhodnocení dosažených dynamických modulů pružnosti

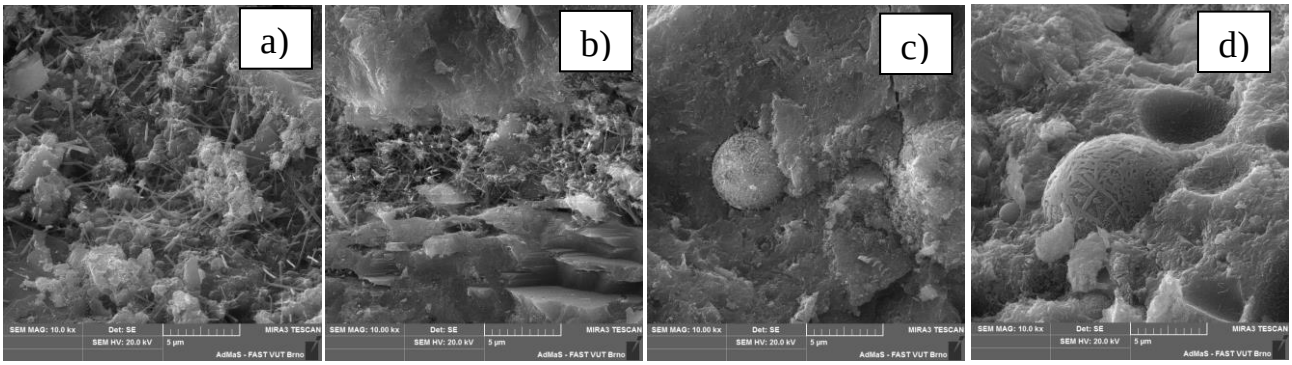


Obr. 10: Grafické vyhodnocení dosažených pevností betonu v příčném tahu

Dle grafického vyhodnocení výsledků spočítaných dynamických modulů pružnosti a stanovených pevností betonu v příčném tahu byl zřejmý zejména výrazný pokles těchto parametrů při dlouhodobém uložení v agresivním prostředí aerosolu SO_2. Výsledky prokázaly, 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.

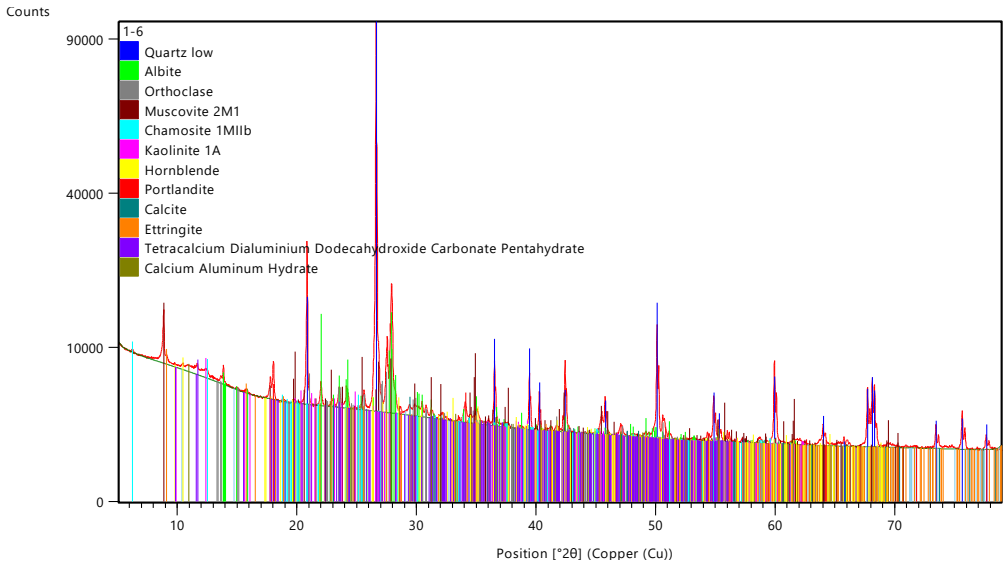
Nabyté výsledky pak bylo možné z pohledu bezpečného použití navržených směsí SMAP a CHAP pro výrobu betonů hodnotit jako velice dobré, protože ani během dlouhodobého vystavení betonových směsi vyrobených za použití těchto příměsí nebyl zaznamenán odlišný trend, než je tomu v případě použití klasického 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.



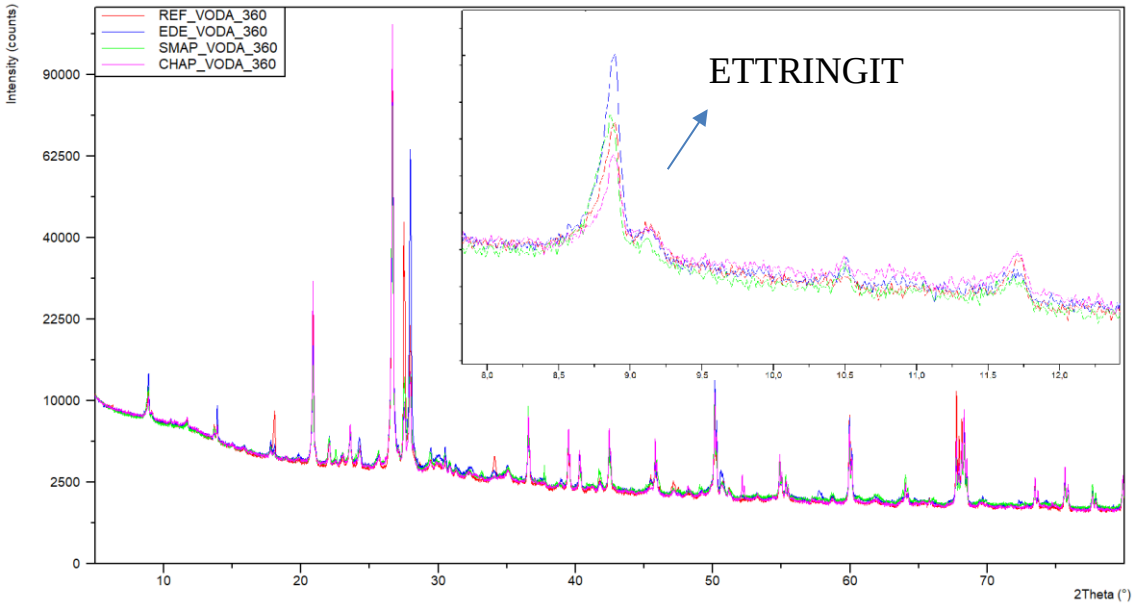
Obr. 11: Snímky mikrostruktury ze SEM při uložení vzorků 180 dnů v agresivním prostředí aerosolu SO_2 ((a) - REF, b) – EDE, c) - SMAP, d) - CHAP) - zvětšení 10 000 krát

Následující podrobně vyhodnocený rentgenogram podává obraz o mineralogickém složení vzorku REF po uložení 360 dní ve vodě.



Obr. 12: Celkově vyhodnocený rentgenogram vzorku REF po jeho uložení 360 dní ve vodě

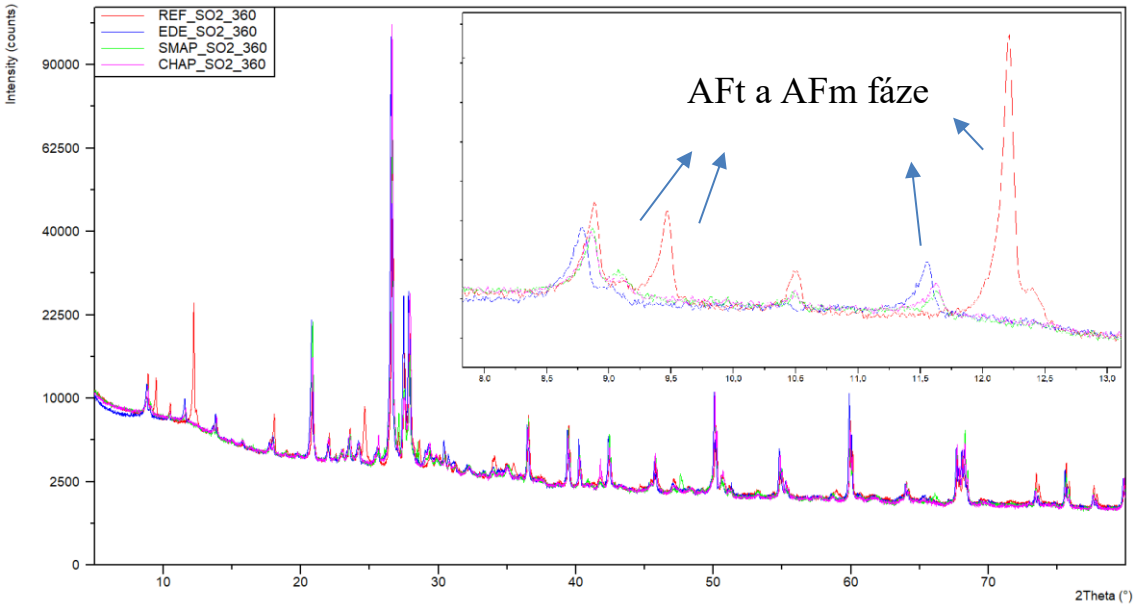
Podle výsledků XRD bylo patrné, že vzorek REF uložený po dobu 360 dní ve vodě vyjma běžných minerálů pocházejících z kameniva (křemen, živce, jílovit-slídové minerály) obsahoval navíc minerály probíhajících hydratačních a následně karbonatačních reakcí (kalcit a portlandit) a rovněž sulfátové AFt fáze (ettringit) a další modifikace AFm, AFt fází a hemikarbonátů vyskytujících se na rentgenogramu v oblasti cca 7 až 12,5°. Z výčtu minerálů se jako potenciálně nebezpečný pro ztvrdlý cementový kompozit jeví především AFt a AFm fáze a případně další hemikarbonáty. Proto následující porovnávací rentgenogramy obsahují dále porovnání píků odpovídajících této oblasti minerálu.



Obr. 13: Rentgenogramy všech vzorků při jejich uložení 360 dní ve vodě + detail oblasti výskytu AFt, AFm fází a hemikarbonátů

V případě expozice vzorku REF v **prostředí NaCl** po dobu 360 dní byla pomocí XRD navíc detekována přítomnost **halitu**, což je vykrystalizovaná forma NaCl. 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**. 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 nebyly tedy ani v jednom případě těchto agresivních uložení očekávány žádné výrazně negativní důsledky.

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. Vyhodnocení XRD poukázalo na výrazné zastoupení různých modifikací AFm a AFt fází. Tyto minerály síranové koroze byly detekovány navíc oproti zbylým minerálům, které jsou shodné jako v případě vodního uložení. Přesná analýza těchto fází se opírala o studii vedenou Barbarou Lothenbach, ve které jsou přesně definované AFm a AFt fáze v jednotlivých modifikacích. [3]



Obr. 14: Rentgenogramy všech vzorků při jejich uložení 360 dní v prostředí aerosolu SO_2 + detail oblasti výskytu AFt, AFm fází a hemikarbonátů

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.

Výsledky termogravimetrické analýzy z pohledu zastoupení portlanditu potvrdily dříve psané závěry, tedy, že jeho množství u betonů s popílky klesá během probíhajícího procesu pucolánových reakcí. V případě aktivace vysokoteplotního popílku přídavkem popílku fluidního je pak tento proces ještě umocněn a u některých vzorků při jejich vysokém stáří, již nebyla přítomnost portlanditu zaznamenána vůbec. Dále byl patrný nárůst celkové ztráty žíháním do 1000 °C u všech vzorků s dobou jejich uložení a rovněž nárůst ztráty žíháním do 300 °C. Je tedy zřejmé, že tyto dva parametry spolu úzce souvisí a zejména zvyšující se hodnotu ztráty žíháním do 300 °C lze připisovat zvyšujícímu se množství gelových struktur a případně produktů síranové koroze v mikrostruktuře betonu.

4.6 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ VÝROBY BETONŮ S NOVĚ VYVINUTÝMI PŘÍMĚSEMI

Pro ekonomické zhodnocení výroby betonů s vyvinutými příměsemi SMAP a CHAP byly zvoleny 3 modelové příklady betonových směsí o pevnostní třídě C 12/15, C 20/25 a C 30/37.

Nejprve bylo nutné stanovit cenu výroby nově vyvinutých směsí popílků, přičemž výpočet této ceny byl založen na cenách vstupních komodit a dále na procesu jejich zušlechtění procesem mletí nebo procesem mísení.

Pro reálnou představu byly modelové příklady výpočtů materiálových nákladů na výrobu betonových směsí založeny na výpočtu z cen vstupních surovin včetně jejich dopravy na betonárnu v lokalitě Brno a dále nebylo pro jednoduchost výpočtu uvažováno se spotřebou elektrické energie a dalšími provozními nálady 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 byla jejich výroba v místě produkce převážné části vstupních surovin, tedy lokalita Dětmarovice.

Tab. 17: 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 Dětmarovice	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 prokázaly, 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 m^3 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.

5. Závěr

Předložená disertační práce se zabývá studiem efektivního využití příměsí pro výrobu betonu. Teoretická část disertační práce byla 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 byla poté věnována samotným popílkům, jejich vzniku a vlastnostem z pohledu použití pro výrobu betonu. Rovněž byly studovány legislativní požadavky ať už pro nakládání s popílky z pohledu producentů a nebo pro jejich použití pro výrobu betonu. Důraz byl kladen i na studii zefektivnění jejich využití, zkušenosti z praxe s možností 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 a zkušební vzorky 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 pomocí zpracování dnes nevyužívaných a často pouze skládkovaných druhotných produktů nebo odpadů.

6. Přínos pro vědní obor a praxi

Z dosažených výsledků lze pro vědní obor a praxi vyvodit následující přínosy:

- Práce shrnuje poznatky o současném stavu produkce vybraných druhotných surovin a dopad ekologizace průmyslu na jejich produkci a případné vlastnosti.
- Přínosem pro vědní obor lze jmenovat dosažení konkrétních cílů efektivního zpracování vysokoteplotních a fluidních popílků pro výrobu betonových kompozitů vysokých užitných vlastností
- 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 popílky 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 pomocí 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.

7. Seznam použité literatury

[1] 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: ScineceDirect, https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.nxmate.2023.100015. [cit. 2025-02-02].

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

[3] GEORGET, Fabien, Barbara LOTHENBACH, William WILSON, Franco ZUNINO a Karen L. SCRIVENER. Stability of hemicarbonate 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

[N1] ÚNMZ. *ČSN EN 450-1 Popílek do betonu - Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody*. 2013.

[N2] ČNI. *ČSN EN 1339 Betonové dlažební desky – Požadavky a zkušební metody*. 2004.

[N3] ÚNMZ. *ČSN EN 12390-6 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles*. 2024.

CURRICULUM VITAE

Osobní údaje:

Jméno a příjmení:	Ing. Martin Ťažký
Datum narození:	10. 1. 1990
Stav:	ženatý
Bydliště:	Obora 145, 679 01 Skalice nad Svitavou

Dosažené vzdělání:

2016 – dosud:	Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, doktorský studijní program, Obor: Fyzikální a stavebně materiálové inženýrství, Státní doktorandská zkouška absolvována 16. 5. 2019.
2010 – 2016:	Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Obor: Stavebně materiálové inženýrství, získán titul inženýr.
2005 – 2009:	Gymnázium Šternberk, obor všeobecný

Pracovní zkušenosti:

08/2023 – dosud:	Externí manažer kvality, Zkušební laboratoř CONSULTEST s.r.o.
07/2023 – dosud:	Zástupce vedoucího a technický vedoucí, Zkušební laboratoř ITTB Brno, Institut technologie a testování betonu, s.r.o.
03/2015 – 06/2023:	Zkušební pracovník, AZL při ÚTHD FAST VUT v Brně, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební
03/2015 – 06/2023:	Technicko-hospodářský pracovník, Centrum AdMaS – VP1 - TSH, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební.
08/2014 – 11/2014:	Výzkumný pracovník, CEMEX Research Group AG, Švýcarsko

Vybraná publikační činnost:

- ŤAŽKÝ, M.; BODNÁROVÁ, L.; ŤAŽKÁ, L.; HELA, R.; MERUŇKA, M.; HLAVÁČEK, P. The Effect of the Composition of a Concrete Mixture on Its Volume Changes. *Materials,* 2021, roč. 14, č. 4, s. 1-26. ISSN: 1996-1944.
- BODNÁROVÁ, L.; HELA, R.; ŤAŽKÁ, L.; ŤAŽKÝ, M. Effect of type of aggregate on abrasion resistance of concrete. In *3rd International Symposium on Advanced Material Research, ISAMR 2019. Materials Science Forum.* 2020. s. 39-43. ISBN: 978-3-0357-1464-7. ISSN: 0255-5476.
- HELA, R.; ŤAŽKÝ, M.; OSUSKÁ, L. PROPERTIES OF HIGH TEMPERATURE FLY ASHES AFTER APPLICATION SNCR TECHNOLOGY FROM THE CONCRETE PRODUCERS POINT OF VIEW. In *EuroCoalAsh 2019.* Dundee: University of Dundee, 2019. s. 157-164. ISBN: 9780957326323.
- ŤAŽKÝ, M.; HELA, R.; NOVOSAD, P.; OSUSKÁ, L. *Development of new trends in green concrete technology by using secondary raw materials and waste materials.* Conference proceeding - 2017 Bangkok Thailand. Waset - conference proceedings. Bangkok, Thajsko: Waset, 2017. s. 2111-2116. ISSN: 2522-3631.
- ŤAŽKÝ, M.; BODNÁROVÁ, L.; HELA, R. Physico-mechanical properties of lightweight concrete with fluidized bed combustion fly ash based light weight aggregate. In *Materials Science Forum. Materials Science Forum.* Switzerland: Trans Tech Publication, 2017. s. 106-110. ISBN: 978-3-0357-1157-8. ISSN: 0255-5476.
- ŤAŽKÝ, M.; HELA, R. Development of structural concrete with fly ash - mixing of different particle-size fractions of fly ash and cement. In *Fly ash - properties, analysis and performance.* New York, USA: Nova Publisher, Inc., 2017. s. 219-236. ISBN: 978-1-5361-0516-2.
- ŤAŽKÝ, M.; HELA, R. Elimination of negative influence of fluidized bed combustion fly ash on viscosity of cement mix. In *Binders, Materials and Technologies in Modern Construction II. Materials Science Forum.* Switzerland: Trans Tech Publication, 2016. s. 12-16. ISBN: 9783038357407. ISSN: 0255-5476.
- ŤAŽKÝ, M.; HELA, R. Synergistic Effect of High Temperature Fly Ash with Fluidized Bed Combustion Fly Ash in Cement Composites. In *Key Engineering Materials. Key Engineering Materials (print).* Switzerland: Trans Tech Publication, 2016. s. 113-118. ISBN: 9783035710793. ISSN: 1013-9826.

Zapojení do vybraných projektů

- **FW01010061**, Komplexní technologie zpracování zbytků po těžbě rud pro stabilizaci vytěžených prostor a pro podkladní vrstvy liniových staveb, zahájení: 01.01.2020, ukončení: 31.12.2023
- **FV40343**, Konstrukční systémy zpevněných ploch a komunikací na bázi silikátů pro ekologické hospodaření se srážkovou vodou, zahájení: 01.05.2019, ukončení: 30.04.2022
- **GA18-25035S**, Studium účinků proudících kapalin na opotřebení cementových kompozitů a následné modelování mechanické koroze, zahájení: 01.01.2018, ukončení: 31.01.2020
- **FV30325**, Aplikace laserových a radarových měření vozovek a diagnostiky cementobetonových krytů dálnic, uplatnění mikroskopických a chemických analýz betonů pro omezení degradačních procesů betonů snižujících dobu životnosti dálničních vozovek, zahájení: 01.01.2018, ukončení: 30.09.2021
- **FV20019**, Optimalizace granulometrie jemných částic v betonu pro získání vysokohodnotných betonů, zahájení: 01.07.2017, ukončení: 31.12.2020

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.