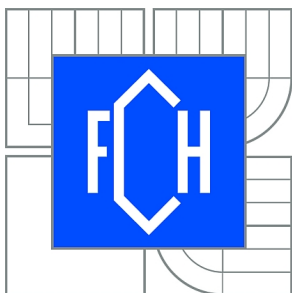




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA CHEMICKÁ
ÚSTAV CHEMIE MATERIÁLŮ
FACULTY OF CHEMISTRY
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE

OPTIMALIZACE BETONOVÝCH ZÁMĚSÍ NA BÁZI ALKALICKY AKTIVOVANÝCH DRUHOTNÝCH SUROVIN

OPTIMIZATION OF CONCRETE MIXTURE BASED ON ALKALI ACTIVATION OF SECONDARY
MATERIALS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MARTIN ŠAFÁŘ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. LUKÁŠ KALINA, Ph.D.

BRNO 2013



Vysoké učení technické v Brně
Fakulta chemická
Purkyňova 464/118, 61200 Brno 12

Zadání bakalářské práce

Číslo bakalářské práce:	FCH-BAK0699/2012	Akademický rok: 2012/2013
Ústav:	Ústav chemie materiálů	
Student(ka):	Martin Šafář	
Studijní program:	Chemie a chemické technologie (B2801)	
Studijní obor:	Chemie, technologie a vlastnosti materiálů (2808R016)	
Vedoucí práce	Ing. Lukáš Kalina, Ph.D.	
Konzultanti:		

Název bakalářské práce:

Optimalizace betonových záměsů na bázi alkalicky aktivovaných druhotných surovin

Zadání bakalářské práce:

literární rešerše na téma alkalické aktivace
charakteristika použitých surovin
vypracování návrhu betonové záměsi pro výrobu alkalicky aktivovaného betonu
sledování mechanických vlastností
charakteristika mikrostruktury navrženého betonu

Termín odevzdání bakalářské práce: 10.5.2013

Bakalářská práce se odevzdává ve třech exemplářích na sekretariát ústavu a v elektronické formě vedoucímu bakalářské práce. Toto zadání je přílohou bakalářské práce.

Martin Šafář
Student(ka)

Ing. Lukáš Kalina, Ph.D.
Vedoucí práce

prof. RNDr. Josef Jančář, CSc.
Ředitel ústavu

V Brně, dne 31.1.2013

prof. Ing. Jaromír Havlica, DrSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá návrhem, přípravou a optimalizací betonových záměsí na bázi alkalicky aktivovaných sekundárních surovin – vysokopecní strusky a vysokoteplotního popílku. Jako aktivátor byl použit hydroxid sodný, částečně nahrazený cementářskými odprašky z bypassu. Návrh záměsí byl vypracován na základě modelů vytvořených pro beton na bázi portlandského cementu. V experimentální části byla sledována konzistence čerstvých směsí, cena směsí a mechanické vlastnosti ztuhlých vzorků. Mikrostruktura a složení získaného materiálu byla zkoumána metodami SEM-EDX a XRD. K analýze vstupních surovin bylo použito metody XRF. Z výsledků bylo zvoleno optimální složení směsí pro danou aplikaci.

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with design, preparation and optimization of concrete mixture based on alkali activated secondary materials – blast furnace slag and fly ash. Sodium hydroxide partially replaced by bypass cement kiln dust was used as an activator. Mixture design was based on model made for Portland cement based concrete. Observed properties were workability of fresh mortar, price of mixtures and mechanical properties of concrete. Microstructure and composition of concrete was studied by SEM-EDX and XRD. Analysis of raw materials was based on XRF. The optimal mixture composition was chosen from obtained data.

KLÍČOVÁ SLOVA

geopolymer, alkalická aktivace, sekundární suroviny, cementářské odprašky

KEYWORDS

geopolymer, alkali activation, secondary materials, cement kiln dust

ŠAFÁŘ, M. *Optimalizace betonových záměsí na bázi alkalicky aktivovaných druhotných surovin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2013. 65 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Lukáš Kalina, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citoval. Bakalářská práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího bakalářské práce a děkana FCH VUT.

.....
podpis studenta

Poděkování

Děkuji svému vedoucímu Ing. Lukáši Kalinovi, Ph.D. za věnovaný čas, odborné vedení, cenné rady a připomínky. Dále děkuji Ing. Jakubu Tkaczovi za veškerou ochotu a pomoc při získávání snímků a analýz na skenovacím elektronovém mikroskopu, Ing. Jiřímu Másílkovi, Ph.D. za poskytnutí XRD analýz připravených směsí a Bc. Vlastimilu Bílkovi za pomoc při přípravě betonových směsí.

OBSAH

1	Úvod.....	7
2	Teoretická část.....	8
2.1	Geopolymery	8
2.2	Vznik geopolymérů	9
2.3	Alkalický aktivátor	11
2.3.1	Cementářské odprašky	12
2.4	Vstupní suroviny pro alkalickou aktivaci	13
2.5	Vysokopecní struska.....	14
2.5.1	Produkce vysokopecní strusky	14
2.5.2	Typy vysokopecních strusek	14
2.5.3	Chemické složení a struktura vysokopecní strusky.....	15
2.5.4	Hydraulická aktivita granulované vysokopecní strusky.....	15
2.5.5	Alkalická aktivace vysokopecní strusky	16
2.5.6	Hydratační produkty vysokopecní strusky	17
2.6	Vysokoteplotní popílek.....	18
2.6.1	Produkce vysokoteplotního popílku	18
2.6.2	Chemické složení vysokoteplotních popílků.....	18
2.6.3	Pucolánová reakce	18
2.6.4	Dělení popílků	19
2.6.5	Alkalická aktivace vysokoteplotních popílků	19
2.6.6	Současné využití elektrárenských popílků	20
2.7	Využití a nedostatky geopolymérů	20
3	Experimentální část.....	22
3.1	Charakterizace vstupních surovin.....	22
3.1.1	Kamenivo	22
3.1.2	Vysokopecní struska	22
3.1.3	Vysokoteplotní popílek	22
3.1.4	Cementářské odprašky	23
3.2	Návrh betonové směsi	23
3.2.1	Zpracovatelnost a dávka vody	23
3.2.2	Vodní součinitel	24
3.2.3	Pórovitost	26
3.2.4	Množství kameniva	27
3.2.5	Granulometrie kameniva	28

3.2.6	Vlhkost kameniva.....	29
3.2.7	Korekce receptury vzhledem ke skutečné objemové hmotnosti betonu	31
3.2.8	Příklad návrhu betonové směsi	31
3.3	Příprava betonových směsí.....	33
4	Diskuze a výsledky	35
4.1	Sledované závislosti a optimalizace betonových směsí	35
4.1.1	Zpracovatelnost	35
4.1.2	Mechanické vlastnosti	37
4.1.3	Cena.....	41
4.1.4	Vliv cementářských odprašků	42
4.1.5	Tvorba výkvětů	43
4.2	Volba optimálních směsí	44
4.3	Rentgenová difrakční analýza AAM	45
4.4	Studium mikrostruktury AAM	47
5	Závěr.....	55
	Seznam použitých zdrojů.....	56
	Seznam použitých zkratk a symbolů	60
	Seznam příloh	61

1 ÚVOD

Beton je v dnešní době jeden z nejvíce rozšířených stavebních materiálů. Oblíbený je především díky snadné zpracovatelnosti, výborné pevnosti v tlaku, trvanlivosti, nehořlavosti a vysoké tepelné akumulaci [2]. V souvislosti s betonem se téměř každému vybaví také pojem cement, což je surovina, která po smíchání s vodou hraje v betonu roli pojiva a je běžně velkoobjemově produkována ve všech částech světa. Celosvětová výroba hydraulického cementu v roce 2011 činila více než 3,4 miliard tun [4]. V tomto množství má největší zastoupení cement portlandský, jehož výroba však s sebou nese jisté nevýhody. Hlavní z nich je poměrně velká energetická náročnost (na výrobu jedné tuny cementu je třeba zhruba 4 GJ energie) [5]. Druhá je vznik značného množství oxidu uhličitého, který přispívá ke vzniku skleníkového efektu a globálnímu oteplování. Zhruba 5 % z celosvětové produkce CO₂ náleží produkci cementu (při výrobě jedné tuny cementového slínku vzniká přibližně jedna tuna CO₂) [1,5]. Spotřeba portlandského cementu navíc stále narůstá. Proto je z ekologického i ekonomického hlediska výhodné hledat alternativní stavební materiál obdobných vlastností, který by alespoň částečně nahradil klasický beton.

Jako vhodný kandidát k nahrazení portlandského cementu v některých aplikacích se jeví pojiva na bázi alkalicky aktivovaných sekundárních surovin. Materiály na této bázi bývají často nazývány jako „geopolymery“. Alkalicky aktivovaná pojiva využívají především vedlejší produkty z různých průmyslových odvětví (strusky, popílký aj.) Použití některých z nich je velmi omezené. Příkladem lze uvést popílek, produkováný tepelnými elektrárnami, který je v České Republice využit jen z 10–15 % [10]. Aktivátory sekundárních surovin (NaOH, KOH, aj.) bývají často nejdražší součástí materiálu. Proto lze část aktivátoru nahradit levnou sekundární surovinou z výroby cementu – cementářskými odprašky, které jsou samy o sobě bohaté na alkálie. Nízká cena, dobré užitné vlastnosti a ekologický aspekt alkalicky aktivovaných pojiv je činí silnou konkurencí pro pojiva na bázi portlandského cementu.

Ač je alkalická aktivace různých surovin intenzivně zkoumána, neexistuje zatím žádný model, pomocí kterého by bylo možné navrhovat betonové směsi na jejich bázi. Jednou z možností, která se nabízí při návrhu takových směsí, je využít technologie cementových betonů. Oba materiály jsou si totiž do jisté míry podobné. Zda je návrh betonových směsí na bázi cementu nějakým způsobem využitelný i pro geopolymerní betony zkoumá tato bakalářská práce.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Geopolymery

První rozsáhlejší laboratorní studii pojiv bez portlandského slínku provedl už v roce 1940 Purdon, který navazoval na předchozí pokusy o zjištění reaktivity strusky. K aktivaci strusky použil alkálie, což vedlo k obecnému názvu „alkalicky aktivované materiály“. Na Purdonovy pokusy navázal v roce 1957 Glukhovskij, který jako první navrhl funkční pojivo na bázi aluminosilikátů s nízkým obsahem vápníku aktivovaných roztokem alkalických kovů [6]. V roce 1981 profesor Joseph Davidovits z Francie připravil anorganické pojivo smícháním alkálií s metakaolinem. Protože se domníval, že pojivo vznikalo způsobem typickým pro organické makromolekulární látky, nazval jej „geopolymerem“ [16].

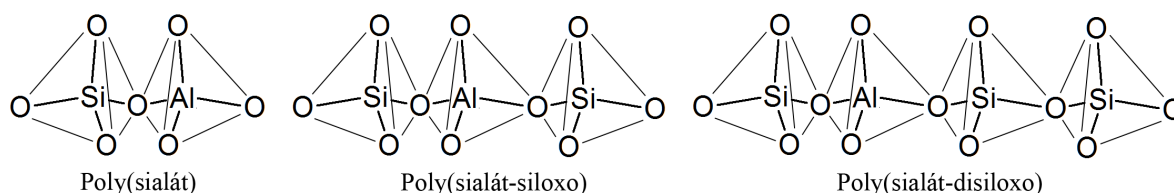
Davidovits svým výzkumem reagoval na požáry ve Francii v letech 1970–1973. Jeho cílem bylo vyvinout nehořlavý „polymerní“ materiál použitím anorganických látek. Toho se mu podařilo dosáhnout, když nechal reagovat alkálie s metakaolinem za nízkých teplot (100–150 °C). Těmto reakcím ve své době nebylo věnováno mnoho pozornosti, jelikož byl všeobecně zastáván názor, že anorganické žárovzdorné materiály mohou být vyráběny pouze za vysokých teplot. Alkalicky aktivovaným materiálům chyběl jasný popis, klasifikace a hlavně objasněný potenciál. Na Lucemburském sympóziu v roce 1981 proto Davidovits vystoupil s návrhem o zařazení a zviditelnění materiálů, které on sám nazval „geopolymery“ [17].

Geopolymery jsou řetězce minerálních molekul spojených kovalentní chemickou vazbou. Při teplotách do 500 °C vykazují převážně amorfni charakter. Vznikají procesem zvaným geopolimerace (anorganická polykondenzace), která může být prováděna v zásaditém, nebo kyselém prostředí. Použitím alkalické aktivace lze získat polysilikáty nebo polysialáty, zatímco v prostředí kyselém (H_3PO_4) jsou získány polyfosfosialáty, polyaluminofosfáty a další. Pro geopolymery byla Davidovitem vypracována terminologie i nomenklatura. Dle atomárního poměru a typu atomů v současné době rozlišujeme 10 základních strukturních jednotek geopolimerů [22]. Všechny z nich uvádí tabulka 1.

Tabulka 1: Strukturní jednotky geopolimerů [22]

Strukturní jednotka	Název jednotky
–Si–O–Si–O–	siloxo
–Si–O–Al–O–	sialát
–Si–O–Al–O–Si–O–	sialát-siloxo
–Si–O–Al–O–Si–O–Si–O–	sialát-disiloxo
–P–O–P–O–	fosfát
–P–O–Si–O–P–O–	fosfo-siloxo
–P–O–Si–O–Al–O–P–O–	fosfo-sialát
–(R)–Si–O–Si–O–(R)–	organo-siloxo
–Al–O–P–O–	alumino-fosfo
–Fe–O–Si–O–Al–O–Si–O–	ferro-sialát

Pozornost bude dále věnována pouze polysialátům. Ty lze chápat jako síť náhodně spojených tetraedrů SiO_4 a AlO_4 , kdy dva tetraedry sdílejí vždy jeden kyslík. Síť obsahuje dutiny, ve kterých jsou umístěny kladné ionty (Na^+ , K^+ , Li^+ , Ca^{2+} , Ba^{2+} , NH_4^+ , H_3O^+). Ty kompenzují záporný náboj čtyřmocného hliníku. Polysialáty lze popsat empirickým vzorcem $\text{M}_n\{-(\text{SiO}_2)_z-\text{AlO}_2\}_n \cdot w\text{H}_2\text{O}$, kde „M“ je přítomný kation, „n“ stupeň polykondenzace a „z“ vyjádření poměru $\text{SiO}_2 : \text{Al}_2\text{O}_3$. V tomto typu geopolymérů lze pozorovat 3 základní třídimenzionální struktury, znázorněné na obr. 1. Tyto struktury mohou být amorfni až semikrystalické [19].



Obr. 1: Základní polysialátové struktury a jejich pojmenování

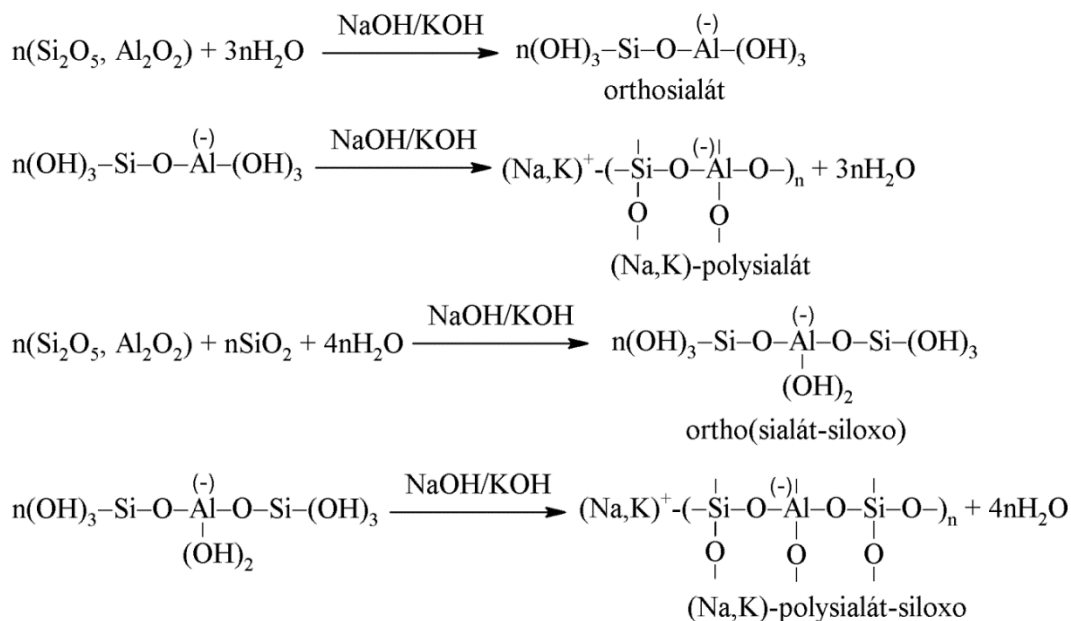
2.2 Vznik geopolymérů

Ačkoliv existuje řada výzkumů zabývajících se geopolymery, mechanismus jejich vzniku a tvrdnutí není stále zcela objasněn [20]. V současnosti uznávaný model začíná rozpuštěním výchozích aluminosilikátových surovin hydroxidovými ionty za vysokého pH (13–14). Do roztoku se přitom dostávají iontové útvary křemíku a hliníku. Jejich množství závisí na koncentraci alkalického roztoku, přítomném kationtu alkalického kovu, rychlosti míchání a struktuře výchozích surovin [23].

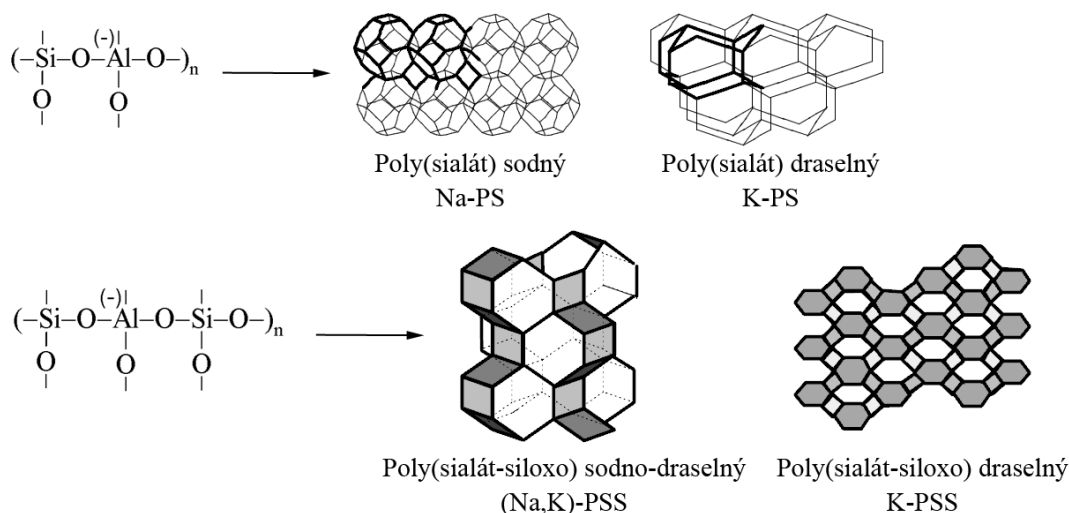
V druhém kroku dochází k transportu, orientaci křemičitých a hlinitanových komplexů a vzniku monomerních jednotek, nazývaných jako geopolymerní prekurzory (orthosialátových, ortho(sialát-siloxo), popř. ortho(sialát-disiloxo)). Důvodem pro preferenci vzniku vazby $\text{Al}-\text{O}-\text{Si}$ před $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ je nižší aktivační energie. Prekurzory mohou být získány i přímo z rozpouštění, jelikož se křemičitany i hlinitany rozpouští současně [23].

V posledním kroku reakce dochází k polykondenzaci monomerních jednotek, vzniku oligomerů, makromolekul a síťovaných struktur. Popsaný model se podobá syntéze organických polymerů a je znázorněn na obr. 2 [19,21].

Zesíťovaná struktura, jakožto konečný produkt geopolymera, nabývá v závislosti na poměru $\text{Si} : \text{Al}$ a kompenzujícím kationtům různých útvarů [17]. Pokud by vzniklá síť byla monolitická a krystalická, získaly bychom útvary znázorněné na obr. 3. Tyto útvary jsou analogiemi některých přírodních minerálů [31].

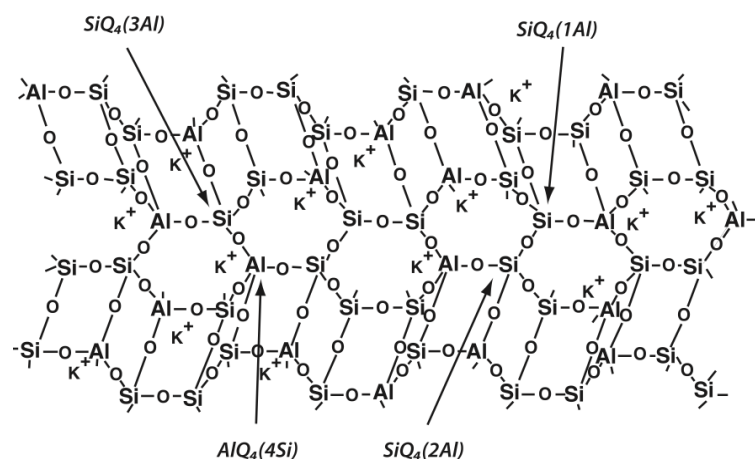


Obr. 2: Reakční schéma vzniku geopolymérů [18]

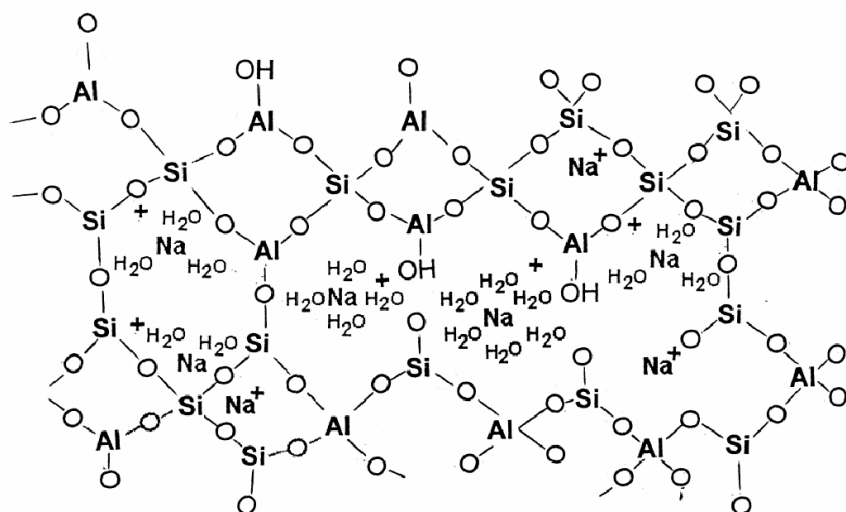


Obr. 3: Některé trojrozměrné monolitické struktury geopolymérů [19]

Davidovits předpokládal, že struktura geopolymérů, podobně jak u organických polymerů, monolitická je (viz obr. 4) [17]. Zkoumáním mikrostruktury produktů alkalické aktivace však bylo zjištěno, že se tomuto modelu blíží pouze zcela zreagovaný geopolymér. Protože ke kompletní geopolymeraci ve většině případů nedochází, navrhnul Barbosa upravený model, který předpokládá přítomnost dutin s uzavřenou vodou a v ní solvatovanými kationty. Některé kyslíky v tomto modelu nejsou můstkové a přítomná voda slouží pouze k přenosu alkalického aktivátoru nebo jako „reologická voda“ [7,9]. Po zatvrdnutí geopolyméru je voda uzavřena volně v kapilárních pórech [9]. Strukturální model upravil v roce 2004 ještě Rowles (viz obr. 5), který na základě výsledků MAS NMR konstatoval, že se sodné kationty nemusí vyskytovat pouze v solvované formě, ale mohou se také aktivně zapojovat do struktury geopolyméru [35].



Obr. 4: Struktura geopolymery navrhnutá Davidovitsem [31]



Obr. 5: Barbosova struktura geopolymery upravená Rowlesem [35]

2.3 Alkalický aktivátor

Látka, která vytváří vysoké počáteční pH prostředí, se nazývá alkalický aktivátor. Hlavní funkce aktivátoru je rozpuštění aluminosilikátových látek a katalýza polykondenzační reakce. V praxi jsou těmito látkami soli alkalických kovů nebo jejich hydroxidy. Nejčastěji je používán hydroxid sodný, křemičitan sodný (ve vodném roztoku též známý jako vodní sklo) a hydroxid draselný [6,7,18].

Množství rozpuštěných aluminosilikátů závisí přímo na koncentraci alkalického roztoku. Koncentrace alkalického roztoku tak ovlivňuje průběh reakce a hustotu polymerní sítě [24]. Experimentálně bylo zjištěno, že při použití NaOH dochází k rozpuštění většího množství minerálů, než při použití KOH. Navzdory tomu je však při použití hydroxidu draselného výsledná pevnost geopolymery vyšší, než je tomu u NaOH. Důvodem pro oba jevy je rozdílná tvorba silikátových oligomerů v důsledku rozdílné velikosti obou kationtů. Vzniklé oligomery totiž posouvají některé rovnováhy v rozpouštěcích a kondenzačních reakcích [23].

Při použití vodního skla je výrazně zvýšeno množství křemičitých komplexů v roztoku s čímž roste i pravděpodobnost vzniku oligomerů typu sialát-siloxo a sialát-disiloxo. Reakcí draselného kationtu se zmíněnými oligomery se uvolní více tepla, než při reakci se sodným kationtem. Z těchto důvodů byl Deventerem vysloven názor, že by geopolymery získané aktivací KOH měly mít vyšší pevnost [23]. Nicméně někteří autoři jako Komljenović získali experimentálně odlišné výsledky, v nichž bylo aktivací NaOH dosaženo vyšších pevností, než při použití KOH [12].

Zejména sodné aluminosilikáty, u kterých byl při tvorbě vysoký poměr $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$, mohou trpět viditelnými výkvěty. Ty jsou způsobeny přebytkem nezreagovaného NaOH a relativně slabou vazbou sodných kationtů v geopolymerní struktuře. Sodné kationty jsou ve velkém množství solvatovány v pórech a mohou být nahrazeny. Vzhledem k pórovité mikrostruktuře materiálu často dochází ke kapilárnímu pohybu, kdy spolu s vodou unikají na povrch i kationty alkálií. Ty poté reagují s oxidem uhličitým ve vzduchu a tvoří povlak bílé zbarvených uhličitánů a jejich hydrátů [24]. Omezení popsání nežádoucího jevu může být dosaženo použitím draselných aktivátorů. Draslík má na rozdíl od sodíku větší atomový poloměr, což snižuje jeho vyluhovatelnost z matrice. [24]. Kani též dosáhl úspěšného snížení tvorby výkvětů použitím surovin s vyšším obsahem hliníku, nebo uchováváním vzorků po dobu tvrdnutí v prostředí o vysoké vlhkosti a zvýšené teplotě. Zvýšením obsahu hliníku je dosaženo vyšší hustoty sítě a nižší mobility alkálií [24].

Z předchozích odstavců je zřejmé, že použití draselného aktivátoru vede k lepším vlastnostem výsledného materiálu. Největším problémem těchto aktivátorů je však jejich znatelně vyšší cena, což velmi omezuje jejich aplikaci v praxi. Aktivátor obecně tvoří při použití sekundárních surovin nejdražší součást geopolymerního pojiva. Za účelem snížení celkové ceny pojiva tak lze hledat náhradu v oblasti sekundárních surovin. Vhodné se jeví použití cementářských odprašků, o kterých pojednává následující kapitola.

2.3.1 Cementářské odprašky

Cementářské odprašky, anglicky označované jako cement kiln dust (CKD), jsou vedlejším produktem při výrobě cementu. Vznikají v rotační peci při produkci portlandského slínku a lze je v zásadě rozdělit na dva typy. První typ vzniká unikem mikročástic spolu se spalovacími plyny na začátku přehřívacího pásma. Mikročástice se zachytávají na elektrostatických filtrech. Složení tohoto typu odprašků je podobné složení portlandského cementu se zvýšeným obsahem volného vápna, alkálií a sloučenin síry [11].

Druhý typ souvisí se zařazením tzv. bypassu mezi rotační pec a přehřívací pásmo. Proto jsou tyto odprašky někdy označovány jako bypassové (anglicky CBPD – cement bypass dust). V bypassovém systému je část plynu z rotační pece odvedena chladícím plynem. Dochází tak ke krystalizaci alkalických sloučenin na povrchu prachových částic, odvedených ze spalovacího plynu. Částice jsou pak zachyceny na filtru, zatímco ochlazený plyn putuje dál do chladiče slínku a následně zpět do rotační pece. Bypassové odprašky obsahují hlavně alkálie a chloridové a sulfátové soli [43]. Právě tento typ odprašků je v experimentální části využit jako náhrada aktivátoru.

Výrobu cementu dělíme dle přípravy vstupní směsi na mokrý způsob, suchý způsob a polosuchý způsob. Při prvním z nich se vápenec mele za přítomnosti vody a zároveň homogenizuje s ostatními složkami. Kal je poté sušen a pálen do slinutí. Při druhém způsobu jsou suroviny sušeny již před mletím nebo během mletí. Polosuchý způsob je kombinací obou předchozích. Suchý způsob je v současné době ekonomicky nejvýhodnější a více využíván, nicméně při použití mokrého nebo polosuchého způsobu jsou alkálie rozpuštěny již při homogenizaci a není potřeba je dále odvádět pomocí bypassu [3].

Díky vysokému obsahu alkálií a volného vápna lze odprašky z bypassu užít právě jako aktivátoru latentně hydraulických látek, mezi které patří i vysokopecní struska. U těchto látek v prostředí s pH nižším, než cca 11,5 nedochází k rozpouštění aluminosilikátu, který pokrývá jejich povrch a zabraňuje jejich hydrataci. Do roztoku uniká pouze větší množství kationtů Mg^{2+} a Ca^{2+} . Přídavek cementářských odprašků, bohatých na sodné a draselné soli, způsobí vzájemnou výměnu Ca^{2+} a OH^- iontů, vznik NaOH, KOH a zvýšení pH. Následně dochází k rozpouštění aluminosilikátového skla [26]. Této reakce lze úspěšně využít při nahrazování drahého alkalického aktivátoru.

V současné době jsou cementářské odprašky využívány při stabilizaci půd, či solidifikaci odpadů díky jejich absorpčním a redukčním schopnostem [3,11,13]. Navzdory výše uvedeným aplikacím však stále velké množství odprašků zůstává nevyužito, což činí jejich cenu téměř zanedbatelnou.

2.4 Vstupní suroviny pro alkalickou aktivaci

K přípravě alkalicky aktivovaných materiálů je nutné, aby vstupní suroviny obsahovaly ve velké míře rozpustné křemičitany a hlinitany. Zmíněné sloučeniny obsahuje poměrně široká škála surovin. K nejpoužívanějším z nich patří vysokopecní struska, struska po výrobě fosforu, ocelářské strusky, popílký, vulkanická skla, zeolity, metakaolin, křemičitý úlet a strusky po výrobě neželezných kovů [18].

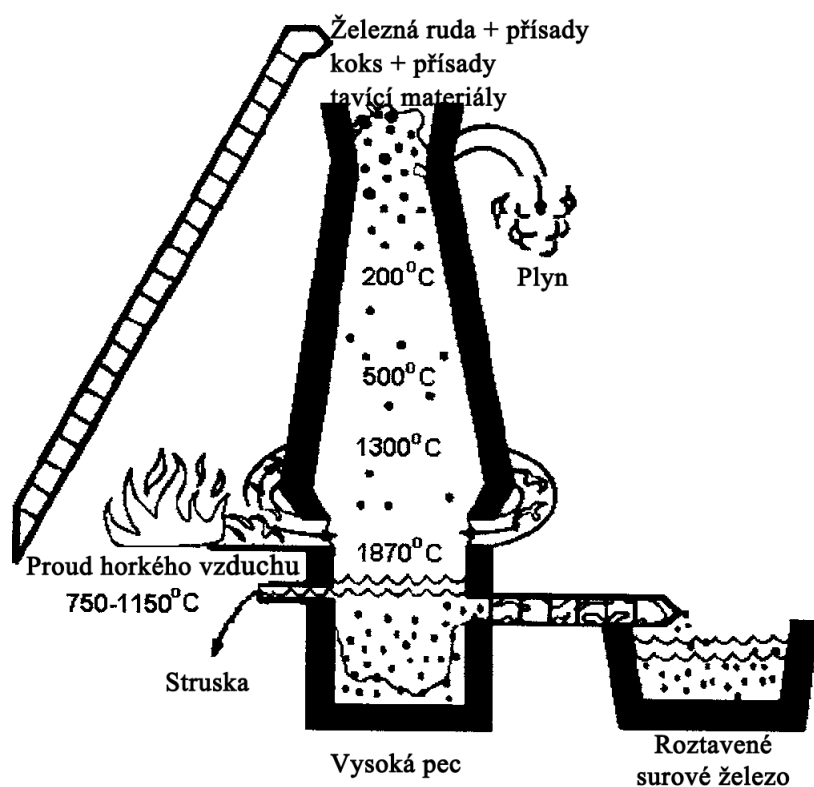
Chemické složení vstupních surovin výrazně ovlivňuje mikrostrukturu, vzniklé fáze, mechanické a chemické vlastnosti výsledného materiálu. V těchto charakteristikách hraje svou roli i poměr Si/Al. Bylo experimentálně zjištěno, že zvyšování tohoto poměru do určité hranice zvyšuje výslednou pevnost betonu. Hodnoty hranice tohoto poměru se však často liší, což je pravděpodobně způsobeno užitým různými surovinami a způsobů přípravy [18,28]

Pro účely této práce byly jako vstupní suroviny zvoleny vysokopecní struska a vysokoteplotní popílek, jejichž popisu budou věnovány další kapitoly.

2.5 Vysokopecní struska

2.5.1 Produkce vysokopecní strusky

Vysokopecní struska je vedlejším produktem výroby železa. Při této výrobě je do vysoké pece nepřetržitě dávkována vsázka složená z železné rudy, paliva a struskotvorných přísad. Jako palivo slouží hutnický koks, který má vysokou výhřevnost a redukční schopnosti. Struskotvorné přísady tvoří vápenec, dolomit nebo přechodný dolomitický vápenec [3]. Při teplotách kolem 2000 °C vzniká vyredukované železo a struska. Díky rozdílu hustot surové roztavené železo klesá ke dnu, zatímco struska zůstává na hladině. Schéma popsaného procesu je znázorněno na obr. 6. Princip vzniku strusky spočívá v navázání nežádoucích látek z železné rudy (především křemíku) oxidem vápenatým, který vzniká rozkladem struskotvorných přísad. Kromě odstraňování nečistot také struska chrání vyredukované železo před opětovnou oxidací atmosférickým kyslíkem. Při kontinuálním dávkování vsázky je třeba strusku i surové železo souvisle odvádět. Roztavená struska dosahuje výstupní teploty překračující 1500 °C [11,15].



Obr. 6: Schéma vysoké pece a produkce vysokopecní strusky [6]

2.5.2 Typy vysokopecních strusek

Dle způsobu chlazení a následného zpracování můžeme strusku rozdělit do čtyř skupin: vzduchem chlazenou, hutní pemzu, peletizovanou strusku a granulovanou strusku. Při chlazení vzduchem vzniká materiál obsahující vzduchové póry a kapsy, který je následně drcen za vzniku hrubých částic o velkém povrchu. Díky tomu má struska velmi dobrou přilnavost k pojivům a lze ji použít například jako kamenivo do betonů. Hutní pemza vzniká

řízeným chlazením strusky vodou. V důsledku unikající vodní páry vzniká ve strusce vyšší množství pórů, než při chlazení vzduchem. Produktem je tedy pórovitý materiál o nízké hustotě, který lze využít například k izolaci [14,15]. Další možností je vypouštět strusku na vibrující plát za současného postřiku vodou. Voda způsobuje vznik pórů, které jsou ovšem díky vibracím velmi malé. Proud částečně zchlazené strusky poté putuje na rotující žebrovaný buben, který strusku disperguje do vzduchu. Dispergované částice, které okamžitě tuhnou, mají tvar pelet. Tento druh strusky lze opět uplatnit u lehkých betonů. Oproti hutní pemze mají pelety nižší nasákavost [15].

Granulovaná vysokopecní struska, anglicky ground granulated blast furnace slag (GGBS), využívá chlazení velkým množstvím vody pomocí vysokotlakých trysek. Roztavená struska je proudem vody téměř okamžitě ochlazená, čímž vznikají amorfnní částice obvykle nepřekračující velikost 5 mm. Granulovaná struska je poté odvodněna, vysušena a mleta v rotačním kulovém mlýně na velmi jemný práškovitý šedobílý materiál. Struska zpracovaná tímto způsobem je převážně přidávána do směsných cementů. Využít ji však lze i jako vstupní surovinu v alkalicky aktivovaných pojivech [15]

2.5.3 Chemické složení a struktura vysokopecní strusky

Složení vysokopecní strusky samozřejmě závisí na vstupních surovinách (především železné rudě) a typu vyráběného železa. V rámci jedné produkce je však složení strusky v podstatě konstantní. Obecně jsou ve strusce nejvíce formálně zastoupeny oxidy vápenatý, křemičitý, hlinitý a hořečnatý. Porovnáním několika vzorků z různých částí světa lze zjistit velmi podobný obsah CaO a SiO_2 , zatímco obsah dalších oxidů poměrně kolísá [6,11].

Chemické vlastnosti vysokopecní strusky jsou závislé na způsobu chlazení. Při pomalém chlazení, například vzduchem, vznikají stabilní krystalické Ca-Al-Mg silikáty. Nejvíce zastoupeným minerálem je v této strusce melilit, což je pevný roztok gehlenitu (C_2AS) a akermanitu (C_2MS_2). Pomalu chlazená struska nemá téměř žádné hydraulické vlastnosti, tudíž ji nelze využít v pojivových systémech [6].

Při rychlém chlazení je většina vzniklé strusky amorfnní a má latentně hydraulické vlastnosti. Z předchozích typů tak lze charakterizovat granulovanou a peletizovanou strusku. Struktura amorfnní strusky může být znázorněna pomocí dvourozměrné křemičitanové sítě podobně jak u skla.

2.5.4 Hydraulická aktivita granulované vysokopecní strusky

Jelikož se v dnešní době struska již běžně používá v různých druzích cementu, je snaha o to co nejlépe předvídat její latentně hydraulické vlastnosti na základě určitých charakteristik. Bylo zjištěno, že největší vliv na tyto vlastnosti hraje obsah skelné fáze, chemické složení, mineralogické složení, jemnost částic a typ aktivace strusky [30].

Ač je obsah skelné fáze ve strusce důležitý vzhledem k její hydraulické aktivitě, nebyla mezi jím a aktivitou strusky pozorována definovaná závislost. Některé testy prokázaly, že i strusky s obsahem skelné fáze 30–65 % mohou mít vhodnou aktivitu. Proto se většinou standardně vhodnost strusky nestanovuje podle obsahu skelné fáze. Obecně je však uznáváno, že by struska měla být více než z 90% amorfnní, aby měla uspokojivé latentně hydraulické vlastnosti [30].

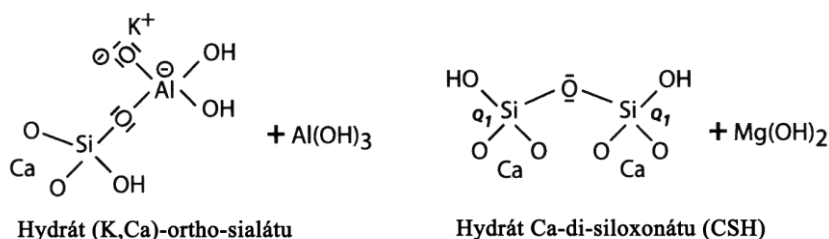
Chemické složení strusky určuje strukturu její skelné fáze. Dle Zachariasenovy teorie jsou ve skelném systému tři prvky: síťotvorné, síťové modifikátory a intermediáty. V amorfní strusce mohou být síťotvornými prvky křemík a fosfor. Tyto prvky jsou ve skle obklopeny čtyřmi atomy kyslíku a tvoří spolu neuspořádanou trojrozměrnou síť. Síťové modifikátory mají vyšší koordinační číslo, iontový poloměr a nižší vazebnou energii s kyslíkem, než síťotvorné prvky. Jejich přítomnost přispívá k depolymerizaci sítě a její vyšší neuspořádanosti. Ve strusce to jsou atomy draslíku, sodíku a vápníku. Intermediáty se mohou chovat obojím způsobem a jejich typickým příkladem jsou amfoterní kovy jako například hliník. Obecně je akceptován názor, že čím je vyšší neuspořádanost a depolymerizace struktury strusky, tím vyšší je její hydraulická aktivita. Z tohoto hlediska je ve skelné fázi strusky výhodný vysoký obsah síťových modifikátorů (vápníku, sodíku a draslíku). K vyšší aktivitě přispívá i hliník, jehož vazba s kyslíkem je slabší, než vazba Si–O [6].

Velikost částic mleté strusky nepřímo závisí na jejich celkovém povrchu a reaktivitě. V praxi je jemnost částic omezena ekonomickými a technologickými faktory. Obvykle se granulovaná struska mele na velikost povrchu $375\text{--}425\text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ dle Blaina [30].

2.5.5 Alkalická aktivace vysokopecní strusky

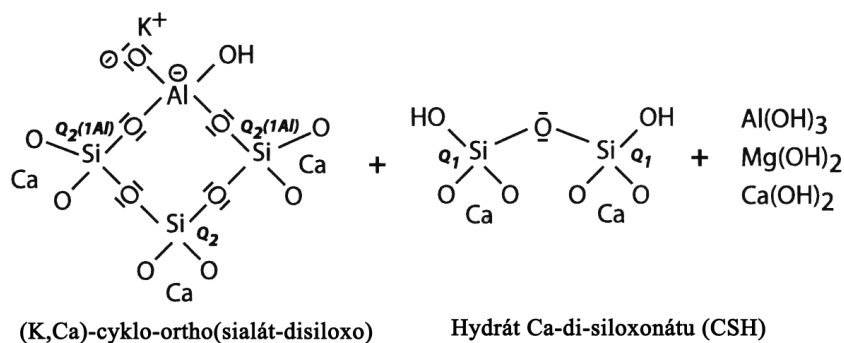
Z předchozích odstavců vyplývá, že se v dobře vyhašené vysokopecní strusce nejvíce vyskytuje amorfní melilit, ve kterém můžeme dále rozeznávat gehelenit a akermanit. Jako geopolymerní prekursor lze brát především gehelenit, jelikož akermanit neobsahuje hliník.

Davidovits popisuje aktivaci vysokopecní strusky následujícím způsobem. Po smíchání s aktivátorem dochází v gehlenitické strusce k porušení vazeb Si–O, Al–O a Ca–O vlivem OH^- skupin. Do roztoku se uvolní hydratované molekuly (K,Ca)-ortho-sialátu a s nimi zároveň hydroxid hlinitý. Z akermanitu vzniká hydratovaný Ca-di-siloxonát (C-S-H) a hydroxid hořečnatý (viz obr. 7). Podobně jako akermanit reaguje i merwinit (C_3MS_2), který ještě navíc uvolňuje hydroxid vápenatý.



Obr. 7: Látky uvolněné v prvním kroku aktivace vysokopecní strusky [31]

V druhém kroku může dojít ke kondenzaci hydratovaných ortho-sialátů s Ca-di-siloxonáty a vzniku čtvercových ortho-(sialát-disiloxo) molekul, v cementové chemii nazývaných C_3AS_3 (viz obr. 8). Hlavním produktem nicméně zůstává C-S-H gel, který precipituje z roztoku. Vzniklé volné hydroxidy (hlinitý, hořečnatý, vápenatý) jsou vysráženy a po kontaktu s atmosférickým CO_2 vytváří jednoduché uhličitany a hydrotalcit [31].



Obr. 8: Produkty alkalické aktivace vysokopecní strusky [31]

Alkalickou aktivaci vysokopecní strusky lze alternativně přirovnat ke vzniku C-S-H gelu v portlandském cementu. Důležitou odlišností u alkalicky aktivované strusky je však možná přítomnost můstkového hliníku mezi dvěma dimery C-S-H (Davidovítsem nazývaný „sialátový můstek“ nebo spojení „Si–O–Al–O“). Popsaný „můstek“ prodlužuje délku C-S-H fáze oproti té nacházející se v hydratovaném portlandském cementu. Tento alternativní popis je však méně vhodný vzhledem k tomu, že geopolymerní prekurzory mají spíše tendenci vytvářet cyklické molekuly, než lineární řetězce [31].

2.5.6 Hydratační produkty vysokopecní strusky

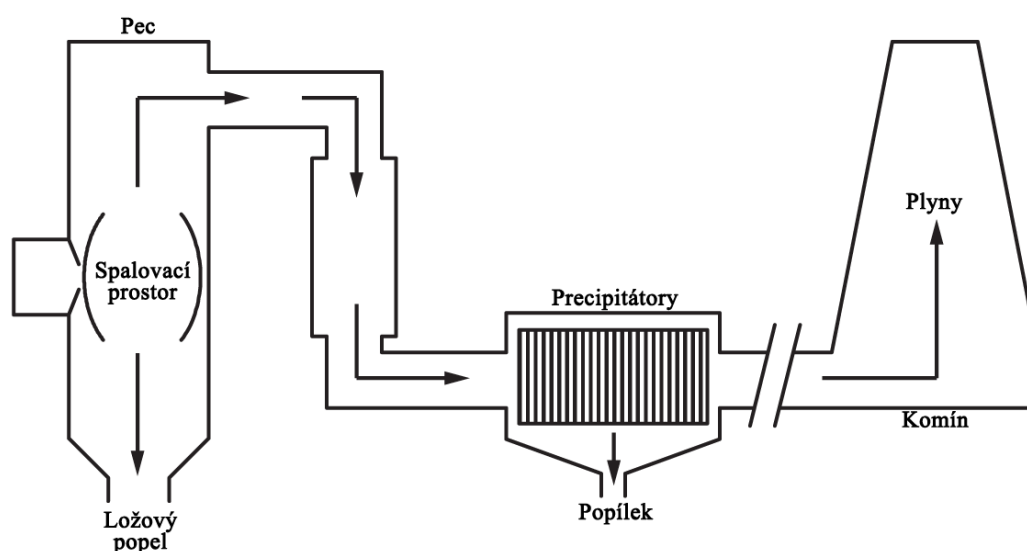
Studiem produktů hydratace vysokopecní strusky se zabývala již řada vědců. Je obecně uznáváno, že hlavním hydratačním produktem je C-S-H gel jak již bylo uvedeno výše, avšak vedlejší hydratační produkty se mohou lišit dle povahy strusky a aktivátoru [6]. Struska většinou neobsahuje mnoho hořčíku a její produkty mohou být znázorněny ve fázovém diagramu $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$. Produkty tohoto systému mohou být C-S-H, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, C_4AH_{13} , C_2ASH_8 a CS_2H . Při použití hydroxidu sodného jako aktivátoru vznikají fáze C_4AH_{13} a C_2ASH_8 . Pokud je ve strusce vyšší koncentrace hořčíku, vytváří se M_4AH_{13} místo C_4AH_{13} . Ve strusce aktivované hydroxidem sodným se také objevuje již dříve zmíněná krystalická sloučenina hydrotalcit ($\text{Mg}_6\text{Al}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_{16} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$). Někteří vědci jako například Glukhovskij dále v hydratované strusce objevili další krystalické sloučeniny zahrnující natrolit, analcit a další zeolitické fáze. Přítomnost těchto fází se však mnoha dalším vědcům prokázat nepodařilo [6].

C-S-H neboli kalcium-silikátový hydrát je amorfni mikroporézní materiál s velkým povrchem. Jako hlavní hydratační produkt je nositelem pevnosti jak v cementových pojivech, tak v alkalicky aktivovaných pojivech na bázi vysokopecní strusky. Dle poměru Ca/Si (C/S) jsou rozeznávány dva druhy C-S-H gelu. První, označen římskou číslicí I má nízký poměr C/S ($<1,5$), existuje od pH 10 a jeho struktura je podobná tobermoritu. Právě tento druh vzniká alkalickou aktivací strusky [39]. C-S-H (II) má vyšší poměr C/S ($>1,5$), existuje od pH 11,9 a jeho struktura je podobná jennitu. Tento druh je dominantní v hydratovaném cementu. C-S-H gel dokáže v závislosti na poměru C/S a měrném povrchu zadržovat alkálie. S klesající hodnotou tohoto poměru roste množství zadržených alkálií. Při zvýšení teploty stoupá krystalinita C-S-H fáze, snižuje se její měrný povrch a s ním i maximální množství zadržených alkálií [6].

2.6 Vysokoteplotní popílek

2.6.1 Produkce vysokoteplotního popílku

Vysokoteplotní popílek je vedlejší produkt spalování uhlí v tepelných elektrárnách. Do pece je jemně mleté uhlí vháněno společně s horkým vzduchem a za vstupních teplot kolem 1500 °C okamžitě dochází ke spálení této suspenze. Nespalitelné anorganické látky, nazývané popeloviny (nejčastěji jílovité materiály), jsou roztaveny a rychle ochlazeny během jejich únosu spalinami. Vzniká tak práškovitý materiál složený především z kulovitých amorfních částic, který je zachycován na mechanických, či elektrostatických odlučovačích. Tento typ popílku je nazýván létavý. Kromě něj v peci vzniká také ložový popel, který po spálení uhlí padá na dno. Celý proces je znázorněn na obr. 9. Velikost částic létavého popílku velmi závisí na zachycovacím systému a jemnosti namletí spalovaného uhlí. Může nabývat hodnot od desetin mikrometru až do 150 µm. Obecně je popílek jemnější, než portlandský cement [6,11,31].



Obr. 9: Schéma produkce vysokoteplotního popílku

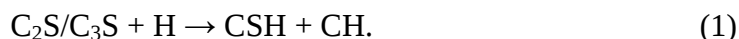
2.6.2 Chemické složení vysokoteplotních popílků

Formální oxidy obsažené ve vysokoteplotních popílcích jsou především SiO_2 , Al_2O_3 a Fe_2O_3 . Přesné složení závisí na použitém uhlí [6,11]. Částice vysokoteplotních popílků jsou obvykle z největší části amorfní. Obsah krystalických fází kolísá od 5 do 50 %. V krystalické fázi lze pozorovat minerály jako křemen, mullit, hematit, spinel, magnetit, melilit a další [6,11].

2.6.3 Pucolánová reakce

Vysokoteplotní létavé popílky se řadí mezi tzv. pucolány, což jsou látky, jejichž hydraulická aktivita je podmíněna přítomností volného vápna. Když je vápno do systému přidáno, vytváří s vodou hydroxid vápenatý a reaguje s amorfním SiO_2 , označovaným též jako silika. Schopnost uskutečnit tuto reakci se nazývá pucolánová aktivita.

Pucolánů je úspěšně využíváno ve směsi s portlandským cementem, jelikož portlandský cement samotný při hydrataci uvolňuje Ca(OH)_2 (zkratkou CH) dle reakce



Pucolánovou reakcí vzniká sekundární C-S-H gel, který přispívá k lepším mechanickým vlastnostem výsledného produktu [29]

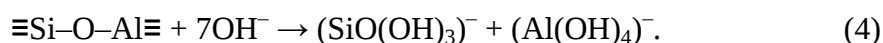
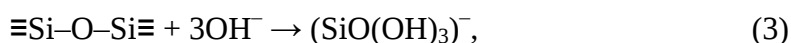


2.6.4 Dělení popílků

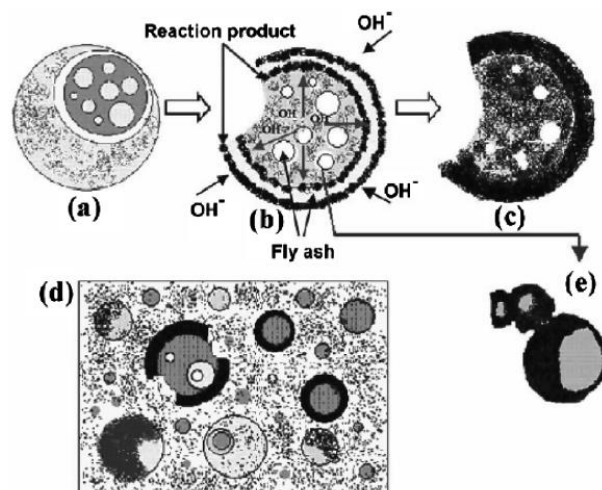
V současné době je známa již řada pucolánových materiálů. Norma ASTM dělí pucolány a létavé popílků do tří kategorií. Třída N zahrnuje přírodní pucolány jako například křemelinu, pemzu, tufy, sopečný popel, kalcinované břidlice, laterit a další. Ve třídě F jsou zařazeny létavé popílků ze spalování antracitu a černého uhlí. Takto vzniklé popílků samy o sobě vykazují pouze pucolánové vlastnosti. Poslední třída C obsahuje létavé popílků ze spalování jiných typů uhlí (hnědé, lignit, hnědo-černé). Tyto popílků jsou bohaté na vápník a vykazují nejen pucolánové ale částečně i pojivové vlastnosti díky přítomnosti již dříve zmíněných hydraulických fází. Vyšší obsah vápníku je činí i více reaktivnějšími [11].

2.6.5 Alkalická aktivace vysokoteplotních popílků

Při popisování reakčního mechanismu alkalické aktivace popílků lze u počáteční fáze vycházet z modelu syntézy zeolitů [32]. Kontaktem částic popílků s alkalickým aktivátorem dochází k rozpouštění výchozích amorfních aluminosilikátů (první část nukleace). Rozpouštění probíhá depolymerizací kovalentních vazeb Si–O–Si a Al–O–Al, přičemž vznikají monosilikátové a aluminátové částice



V druhé části nukleace vznikají zárodky, které po dosažení určité velikosti začnou přerůstat ve vyšší útvary. V praxi alkálie vytvoří v částici popílků otvor, kterým proniknou dovnitř (obr. 10a) a působí na vnitřní stěnu (pokud je částice dutá), nebo na další, zde přítomné menší částice popílků (obr. 10b). Dochází tedy k tvorbě produktů uvnitř i vně částice popílků až do stádia, kdy je částice rostoucími produkty pohlcena (obr. 10c). Mikrostruktura zreagovaného popílků je zobrazena na obr. 10d [32].



Obr. 10: Schéma alkalické aktivace vysokoteplotního popílku [32]

Při růstu se uplatňuje reakce popsaná v kapitole 2.2, jejímiž produkty jsou amorfni až částečně krystalické, zesíťované (Na,K)-polysialáty různých typů (takzvaný N(K)ASH gel). Přítomná voda je nejprve pohlcena při vzniku oligomerů a následně uvolněna za tvorby zesíťovaných struktur, ve kterých zůstává uzavřena.

2.6.6 Současné využití elektrárenských popílků

Nespalitelný podíl tvoří asi 20–30 % původního objemu paliva a v současnosti je využíván k několika účelům. Největší část je po odsíření s vodou použita na výrobu stabilizátu a aglomerátu. Ty jsou vhodné k sanaci důlních výsypek, revitalizaci krajiny nebo jako náplně do filtrů pro čištění odpadních vod. Odsířením je získáván energosádrovec, který může být využit např. při výrobě pórobetonu, či cementu. Suchý popílek lze mírně upravit a použít ve směsných cementech nebo k výrobě umělého kameniva. Část popílku je také používána na zaplnění vytěžených dolních prostor [34]. Jak již bylo zmíněno v úvodu, popílek produkováný tepelnými elektrárnami v České Republice je využit jen z 10–15 % [10].

2.7 Využití a nedostatky geopolymérů

Geopolymerní materiály mají široké spektrum užití, které se odvíjí od jejich vlastností. Davidovits aplikace geopolymérů dělí dle poměru Si : Al, který udává polymerní charakter struktury. Při velmi vysoké hodnotě tohoto poměru vzniká spíše dvourozměrná pružnější struktura, zatímco u jeho nízkých hodnot získáváme rigidní trojrozměrnou síť [31]. Znázornění aplikací v závislosti na tomto poměru je zobrazen na obr. 11. V některých odvětvích jsou geopolymery již komerčně užívány.

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 Charakterizace vstupních surovin

V této kapitole budou charakterizovány použité vstupní suroviny, zejména součásti pojiva – vysokopecní struska, popílek a náhrada aktivátoru – cementářské odprašky. K prvkové analýze bylo použito rentgenové fluorescence na přístroji Xenometrics EX-6600 SSD, fázové složení vstupních surovin bylo zkoumáno rentgenovou difrakční analýzou pomocí přístrojů Siemens D-5005 a Empyrean PANalytical s 3D detektorem PIXcel^{3D}.

3.1.1 Kamenivo

Jako plnivo v alkalicky aktivovaném materiálu sloužilo běžně užívané kamenivo do betonů dle normy ČSN EN 12620. V závislosti na velikosti připravených vzorků byly zvoleny frakce o velikosti zrn 0–4 mm, 4–8 mm a 8–16 mm. Nejmenší frakce kameniva (0–4 mm) byla tvořena jemným, středním a hrubým normovaným pískem do malt. Písky byly smíchány v hmotnostním poměru 1 : 1 : 1. Frakci 4–8 mm a 8–16 mm tvořilo drcené kamenivo do betonů z pískovny Tovačov. Ilustrační fotografie použitých frakcí jsou uvedeny na obr. 12, 13 a 14.



Obr. 12: Frakce kameniva
0–4 mm



Obr. 13: Frakce kameniva
4–8 mm



Obr. 14: Frakce kameniva
8–16 mm

3.1.2 Vysokopecní struska

Jako hlavní složka pojiva sloužila granulovaná vysokopecní struska z Ostravy. Struska byla mletá na měrný povrch $380 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ dle Blaina. Z hlediska formálního oxidového složení struska obsahovala především CaO, SiO₂, MgO a Al₂O₃. Podrobné oxidové složení uvádí příloha A.1. Rentgenovou difrakcí bylo zjištěno, že struska má značné množství amorfni fáze, což podmiňuje její vhodnost. Důležité krystalické fáze tvořil merwinít a melilit (tuhý roztok gehlenitu a akermanitu) společně s malým množstvím kalcitu a různých křemičitanů. Získané spektrum je uvedeno jako příloha B.1. Ilustrační fotografie vysokopecní strusky je uvedena na obr. 15.

3.1.3 Vysokoteplotní popílek

V kombinaci s vysokopecní struskou byl v pojivu použit také vysokoteplotní popílek z páteho bloku tepelné elektrárny Počerady. Rentgenovou fluorescenční analýzou bylo zjištěno, že nejvíce zastoupené oxidy v tomto popílku jsou SiO₂, Al₂O₃ a Fe₂O₃. Kromě nich však popílek obsahuje velké množství jiných prvků v nižších koncentracích. Podrobné oxidové složení

popílku uvádí příloha A.2. Přítomné železo dodává popílku tmavě šedé zbarvení (viz obr. 16). Použitý popílek je převážně krystalický, přičemž nejvíce zastoupené fáze tvoří mullit a křemen. Méně zastoupenými fázemi jsou hematit, magnetit, cristobalit, anatas a různé živce. Získaný rentgenogram je uveden jako příloha B.2.

3.1.4 Cementářské odprašky

Bypassové odprašky z cementárny Mokrá byly ve směsi použity jako částečná náhrada drahého aktivátoru – hydroxidu sodného. Odprašky obsahovaly především velké množství vápníku a draslíku ve formě volného vápna a KCl, což umožňuje jejich užití popsáním způsobem. Část odprašek tvořily sírany a larnit, který je zde přítomen ve své hydraulicky neaktivní γ modifikaci. Vzhledem se odprašky podobají vysokopecní strusce (viz obr. 17). Podrobné prvkové složení uvádí příloha A.3 a získaný rentgenogram příloha B.3.



Obr. 15: VP struska
Ostrava 380



Obr. 16: Popílek
Počerady 5B



Obr. 17: Cementářské odprašky
Mokrá

3.2 Návrh betonové směsi

Pro betony na bázi portlandského cementu existuje poměrně dobře zpracovaná metodika návrhu. Návrhy těchto betonových směsí vychází ze znalosti chování portlandského cementu a předpokladu jeho konečných vlastností. Alkalicky aktivovaná pojiva mají o mnoho širší škálu vstupních surovin, které se od sebe mohou značně lišit složením. Dalším faktorem u těchto pojmů je aktivátor, jeho koncentrace, popř. směs více aktivátorů. Závislost složení vstupních surovin a použitého aktivátoru na získaných vlastnostech alkalicky aktivovaného betonu je v současnosti intenzivně zkoumána, nicméně zatím nedostačuje k vytvoření obecného modelu pro návrh takovéto betonové směsi. Proto bylo při návrhu betonové směsi na bázi alkalicky aktivovaných druhotných surovin použito modelů vytvořených pro betony na bázi portlandského cementu. Některé části návrhu byly upraveny, aby více vyhovovaly povaze připravovaného materiálu. Postup při navrhování betonové směsi popisují následující podkapitoly.

3.2.1 Zpracovatelnost a dávka vody

Prvním z nejdůležitějších faktorů je zpracovatelnost, což je vlastnost betonové směsi se pohybovat a být zhuťována [29]. Jinými slovy jde o viskozitu, či „tekutost“ směsi. K jejímu měření bylo navrženo množství metod, jejichž princip, vhodnost a míra použití se liší. Nejjednodušší a nejpoužívanější z nich je metoda sednutí kužele (ČSN EN 12350-2). V této metodě je betonová směs umístěna do tzv. Abramsova kužele, což je kovová forma kuželovitého tvaru a definovaných rozměrů. Po jeho naplnění a odstranění je měřen pokles

výšky (sednutí) betonové směsi od původní hodnoty 300 mm. Podle sednutí je zpracovatelnost čerstvého betonu rozdělena do pěti tříd, které uvádí tabulka 2.

Tabulka 2: Stupně konzistence a sednutí kužele [29]

Třída konzistence	Sednutí [mm]	Zažité označení
S1	10–40	tuhá
S2	50–90	plastická
S3	100–150	měkká
S4	160–210	velmi měkká
S5	> 210	tekutá

K uvedeným třídám konzistence navrhl Lyse empiricky množství záměsové vody [42]. S vyšším množstvím vody ve směsi roste zpracovatelnost a směs má vyšší „tekutost“. Na zpracovatelnost mají vliv také jiné faktory, jako například rozměr maximálního zrna kameniva, křivka zrnitosti, modul jemnosti písku, zda je kamenivo drcené nebo těžené a další. Závislost dávky vody na rozměru maximálních zrn kameniva a konzistenci udává tabulka 3.

Tabulka 3: Závislost dávky vody na rozměru maximálního zrna kameniva a požadované zpracovatelnosti dle Lyseho [42]

Konzistence	S1	S2	S3	S4	S5
Označení v práci	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5
Max. zrno [mm]	Dávka vody podle stupňů konzistence [kg · m⁻³]				
8	195	210	230	250	255
16	185	200	220	240	245

Voda plní ve směsích na bázi portlandského cementu funkci hydratační a reologickou. Podstatou první z nich je tvorba hydratačních produktů s cementem a druhé zajištění jeho tvárnosti a plastičnosti v čerstvém stavu [36]. U alkalicky aktivovaných pojiv slouží voda především k transportu alkálií, rozpuštěných aluminosilikátů a geopolymerní reakci. Po zatvrdnutí směsi zůstává velká část vody uzavřena v pórech se solvovanými kationty alkalických kovů.

Protože se oba mechanismy liší, lze očekávat, že získané konzistence alkalicky aktivované betonové směsi nebudou odpovídat konzistencím, které udává tabulka 3. Označovat tedy připravené vzorky různých konzistencí „S1“, „S2“, „S3“, apod. by bylo zavádějící. Proto je v dalších částech práce užito označení „Z1“, „Z2“ a „Z3“, pro vzorky s odlišným množstvím záměsové vody. Toto označení pro názornost obsahuje i tabulka 3.

3.2.2 Vodní součinitel

Pojem „vodní součinitel“ je v technologii betonu důležitý a již dlouho užívaný. Jeho původním smyslem je udávat hmotnostní poměr záměsové vody k cementu (zkratka w/c – water/cement). Ač je tento koncept spolehlivý a zažitý, při použití jakékoliv příměsi poněkud ztrácí svůj smysl, jelikož získáváme směs cementu a dalších látek, u kterých není zcela jasné,

zda můžou portlandský cement zastupovat. Ařtein pro vysokohodnotné betony, které zpravidla nemají za pojivo čistý portlandský cement, zavádí vlastní poměr voda/pojivo (zkratkou w/b – water/binder) [33]. Tato terminologie je obecnější a přijatelná i v alkalicky aktivovaném systému. Pro jednoduchost a přehlednost bude při popisu tohoto poměru užívána pouze zkratka „ w/b “ a slovní označení „vodní součinitel.“

Ze zvoleného množství záměsové vody w a vodního součinitele w/b lze vypočítat množství pojiva b pomocí vzorce

$$b = \frac{w}{(w/b)} \quad (5)$$

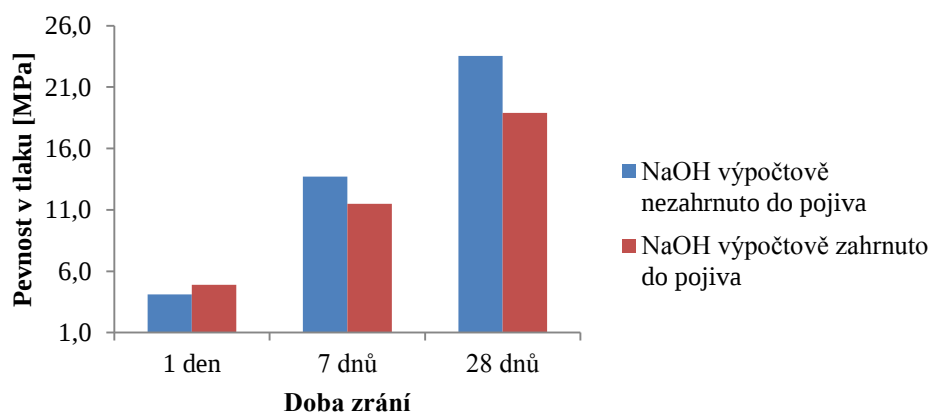
Důležité je vymezit, které složky do výpočtového „pojiva“ zahrnout. Za skutečné pojivo lze v této práci jednoznačně označit vysokopecní strusku a vysokoteplotní popílek. Alkalický aktivátor (NaOH, cementářské odprašky) v návrzích klasického betonu nemá žádnou obdobu. Je třeba tedy rozhodnout, zda je ve výpočtech zařadit, či nezařadit do pojiva.

Cementářské odprašky byly do pojiva ve výpočtech zařazeny, jelikož musely dodržovat určitý poměr s popínkem a struskou. Nezařazení odprašku do pojiva by komplikovalo výpočet a zvyšovalo odchylku teoretické měrné hmotnosti betonu od reálné.

Hydroxid sodný byl na základě experimentu z „pojiva“ vyloučen. Experiment spočíval v přípravě vzorků s NaOH započteným a nezapočteným v pojivu. Množství NaOH v obou vzorcích bylo stejné a odvozené od množství záměsové vody dle vzorce

$$A = \frac{w \cdot c_A}{100 - c_A} \quad (6)$$

kde A představuje množství NaOH v $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, w množství záměsové vody v $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ a c_A požadovanou koncentraci hydroxidu sodného v %hm. Pokud je NaOH zahrnuto ve výpočtech do pojiva, ubude na jeho úkor strusky, popínku i odprašků. Z obr. 18 je patrné, že v tomto případě má výsledná směs vyšší počáteční pevnost v tlaku, ale nižší konečnou pevnost v tlaku, než směs s NaOH v pojivu nezahrnutým. Z tohoto důvodu bylo množství hydroxidu sodného vypočítáváno zvlášť a neovlivňovalo jiné složky směsi.



Obr. 18: Srovnání vývoje pevností v tlaku směsí s NaOH výpočtově zahrnutým a nezahrnutým v pojivu

Samotná hodnota vodního součinitele hraje velmi důležitou roli v konečných vlastnostech, smršťování a mikrostruktuře materiálu. Z ekonomického hlediska je výhodné volit co nejvyšší vodní součinitel. V případě prostých betonů na bázi PC je možné volit hodnoty w/c v rozsahu 0,45–0,7 [29]. Pod hodnotu vodního součinitele 0,4 se vlastnosti betonu výrazně mění. Aitcin tento beton nazval vysokohodnotným [33]. Se snížením vodního součinitele se tedy zvyšuje množství portlandského cementu, cena i výsledné pevnosti. Zhoršuje se však výrazně zpracovatelnost.

Volba vodního součinitele u betonů na bázi PC závisí na několika parametrech. Prvním z nich je požadovaná konečná pevnost. Ta bývá zjištěna z grafu závislosti krychelné pevnosti betonu na vodním součiniteli. Druhým parametrem je agresivita prostředí, s jejíž rostoucí hodnotou je třeba vodní součinitel snižovat.

Při volbě vodního součinitele pro alkalicky aktivovaný materiál nelze příliš vycházet z předem popsáných závislostí. Výsledné pevnosti a vlastnosti jsou odlišné od betonů na bázi portlandského cementu. Davidovits ve své knize doporučuje u alkalicky aktivovaného materiálu na bázi popílku vodní součinitel v rozmezí 0,3–0,45 [31]. Předpokládané prostředí pro připravovanou betonovou směs spadá do kategorie XF4, což je prostředí značně nasyceno vodou s rozmrazovacími prostředky. V této kategorii je pro klasický beton udán maximální vodní součinitel 0,45 [29]. Tato hodnota byla zvolena i pro základní směsi.

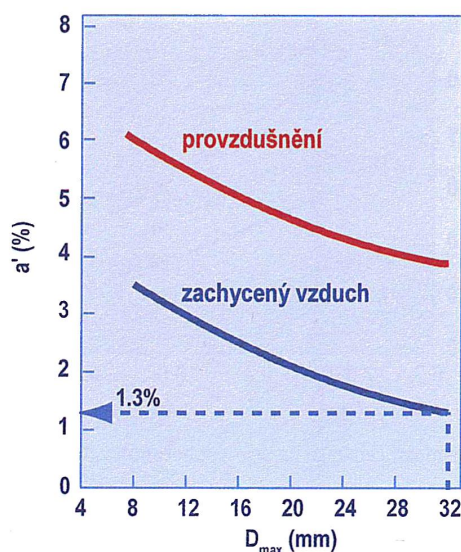
3.2.3 Pórovitost

Vlastnosti betonu jsou silně ovlivněny přítomností pórů. Podle velikosti a umístění můžeme póry rozdělit do pěti hlavních skupin. První z nich jsou makropóry vzniklé nedokonalým ztuhnutím betonové směsi. Vzduch, takto zachycený v betonu, vytváří kaverny nepravidelného tvaru náhodně rozmístěné v celém vzorku. Druhým typem jsou póry přítomné v zrnech kameniva, které zlepšují tepelně izolační vlastnosti, ale zhoršují mechanické vlastnosti. Třetím druhem jsou póry vzniklé provzdušněním. Mají sférický tvar, velikost 0,1–0,3 mm a jsou v betonu záměrně vytvářeny ke zlepšení mrazuvzdornosti. Do čtvrté kategorie spadají tzv. "kapilární póry," které vznikají mezi zrny hydratujícího cementu a mají velikost 0,1–10 μm . Tyto póry závisí na hodnotě vodního součinitele a stupni hydratace PC. Do poslední skupiny patří póry vznikající uvnitř hydrátů (např. C-S-H gelu) a lze je označit jako gelové póry nebo nanopóry jelikož jejich velikost je 1–10 nm. Tyto póry nelze ovlivnit způsobem přípravy [29].

Alkalicky aktivované materiály vykazují odlišný výskyt pórů od betonů na bázi PC. Shi udává, že beton na bázi vysokopecní strusky obsahuje více gelových pórů a méně kapilárních, než klasický beton [6]. Díky jiné struktuře pórů a přítomnosti rozdílných elektrolytů má roztok v pórech alkalicky aktivovaných materiálů nižší bod mrazu a odlišný mechanismus tuhnutí. Alkalicky aktivované materiály jsou tedy obecně odolnější vůči mrazu. Samozřejmě závisí také na použitých surovinách, aktivátoru a způsobu přípravy směsí [6].

Z hlediska návrhu betonové směsi na bázi PC je třeba dosáhnout určitého množství vzduchu v kapilárních pórech, aby měl beton vyšší odolnost vůči mrazu. Pokud je množství zachyceného vzduchu pod limitní hranicí, je třeba směs provzdušnit. Hranice pro třídu betonů XF4 (viz předchozí podkapitola) jsou nejméně 4 % zachyceného vzduchu, aby byl beton

mrazuvzdorný. Obr. 19 znázorňuje závislost zachyceného vzduchu na maximální velikosti zrna kameniva pro betony na bázi portlandského cementu.



Obr. 19: Závislost množství zachyceného vzduchu nebo provzdušnění na maximální velikosti kameniva pro betony na bázi PC [29]

Z hlediska odlišné struktury pórů v alkalicky aktivovaném materiálu nelze předpokládat, že by tato závislost platila i v tomto případě. V dalších výpočtech je však třeba množství zachyceného vzduchu nějak zohlednit. Proto bylo grafu využito pro velmi orientační výpočtové hodnoty.

3.2.4 Množství kameniva

V předchozích podkapitolách byla vysvětlena volba množství vody, vodního součinitele a s ním svázaného množství pojiva (strusky, popílku a odprašků). K výpočtu množství kameniva slouží následující vzorec:

$$V_k = V_{\text{beton}} - V_w - V_b - V_a \quad (7)$$

Tímto vzorcem lze zjistit, jaký objem kameniva je třeba k vytvoření 1 m^3 betonu. Objem betonu ve vzorci představuje V_{beton} a jeho hodnota je tedy 1 m^3 . V_w je objem vody ve směsi, V_b objem pojiva, V_a objem zachyceného vzduchu a V_k zjišťovaný objem kameniva. Z předchozích podkapitol jsou získány hmotnosti složek (vody, pojiva) potřebných k přípravě 1 m^3 betonu. Jejich objemy lze získat dělením příslušnými hustotami (resp. měrnými hmotnostmi).

Měrná hmotnost pojiva byla stanovena pyknometricky. Složky pojiva byly nejprve smíchány v daném poměru, homogenizovány a váženy v pyknometrech s petrolejem, aby nedocházelo k jejich hydrataci. Hustota petroleje byla opět stanovena pyknometricky vůči destilované vodě, jejíž hustota byla při dané teplotě určena z analytických tabulek.

3.2.5 Granulometrie kameniva

Jelikož je kamenivo polydisperzní látka, je třeba při návrhu směsi uvažovat jeho granulometrii neboli zrnitost. Ta vyjadřuje skladbu různě velikých zrn různého tvaru. Kamenivo musí mít vhodnou zrnitost, aby částice nejmenšího průměru mohly vyplnit prostor mezi částicemi větších rozměrů. V úvahu je třeba brát i příspěvek částic pojiva. Před granulometrickými výpočty je třeba zvolit maximální rozměr zrn kameniva. Jeho hodnota nesmí překročit čtvrtinu nejmenšího rozměru betonového výrobku. V komerčně nabízených směsích je obvykle rozměr maximálního zrna kameniva volen 16 nebo 22 mm. Lze dokázat, že k dosažení nejnížší mezerovitosti musí mít rovnice ideální křivky zrnitosti celku kamenivo/pojivo následující tvar

$$P = 100 \cdot \sqrt{\frac{d}{D_{\max}}} \quad (8)$$

Tato rovnice se nazývá Fuller-Thomsonův vztah a P v něm představuje propad sítem o velikosti oka síta d . Veličina $D_{\max}$ je velikost maximálního zrna kameniva [29]. Z předchozích kroků je znám objem pojiva na 1 m³ betonu (V_b) a objem veškerého kameniva (V_k). S jejich pomocí lze stanovit obsah pojiva v systému pojivo/kamenivo rovnicí

$$B = \frac{V_b}{V_b + V_k} \cdot 100 \quad (9)$$

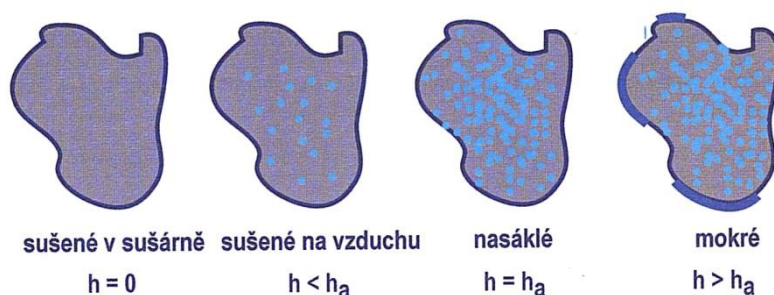
jejíž výsledek je vyjádřen v objemových procentech. Když je pak tato rovnice použita ve vztahu (8), získáme Fuller-Thomsonův vztah pro samotné kamenivo

$$P = \frac{100 \cdot \sqrt{\frac{d}{D_{\max}}} - B}{100 - B} \cdot 100 \quad (10)$$

Pomocí tohoto vztahu je možné zjistit poměr mísení jednotlivých frakcí. Pokud je mísen například písek (částice 0–4 mm), štěrk (částice 4–8 mm) a hrubý štěrk (částice 8–16 mm), poměr mísení je řešen následujícím způsobem. Procentuální množství písku je získáno dosazením hodnot $d = 4 \text{ mm}$, $D_{\max} = 16 \text{ mm}$ a zjištěné hodnoty B . Výsledná hodnota propadu (označeno P_4) udává jakou část z celkového objemu kameniva má tvořit písek. Dosazením $d = 8 \text{ mm}$ je získáno P_8 , které udává, jakou část z objemu kameniva tvoří společně písek a štěrk. Objemový zlomek štěrku získáme odečtením hodnoty P_4 od hodnoty P_8 . Hrubý štěrk, pak tvoří zbytek objemu, tudíž procentuálně

$$P_{16} = 100 - P_4 - P_8 \quad (11)$$

Pokud je kamenivo vysušené v sušárně při teplotě 110 °C, neobsahuje v otevřených pórech žádnou vodu. Pokud je sušeno na vzduchu, zpravidla nejsou všechny póry vodou zaplněné ani zcela prázdné. V obou těchto stavech pak kamenivo odebírá vodu ze směsi, snižuje vodní součinitel a zpracovatelnost. V případě, že jsou póry zaplněny vodou, ale povrch kameniva je suchý, nachází se kamenivo ve stavu nasyceném a povrchově suchém (NPSK). V tomto stavu kamenivo ve směsi nesnižuje ani nezvyšuje množství vody. Právě tento stav je uvažován při výpočtech hmotností kameniva. V posledním případě může mít kamenivo vodou zaplněné póry i povrch, což má za následek zvýšení záměsové vody, zvýšení vodního součinitele a snížení konečných pevností [29].



Obr. 21: Možné stavy vlhkosti kameniva [29]

Podle vlhkosti kameniva tedy musí být upravena dávka vody i kameniva samotného. Nasákavost kameniva je definována jako vlhkost při stavu NPSK (h_{NPSK})

$$h_{\text{NPSK}} = \frac{m_{\text{NPSK}} - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad (13)$$

V tomto vztahu je m_{NPSK} hmotnost kameniva ve stavu NPSK a m_0 hmotnost kameniva vysušeného v sušárně při teplotě 110 °C. Vlhkost kameniva je definována podobně, pouze místo stavu NPSK v něm vystupuje hmotnost kameniva ve vlhkém stavu (m)

$$h = \frac{m - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad (14)$$

Hmotnost kameniva ve stavu NPSK, získanou výpočtem při návrhu směsi a označenou jako k , je třeba zvýšit, pokud kamenivo obsahuje přebytek vody a snížit, pokud je vysušeno. Upravená hmotnost kameniva k' je vypočtena následujícím způsobem

$$k' = \frac{h + 100}{h_{\text{NPSK}} + 100} \cdot k \quad (15)$$

Slovně lze vzorec vysvětlit tak, že k přípravě 1 m³ směsi s kamenivem ve stavu NPSK o hmotnosti k , je třeba navážít k' kg vlhkého, nebo suchého kameniva. S tímto kamenivem v záměsi přibude, či ubude voda o hmotnosti $|k' - k|$. Takovou vodu je pak třeba buď odečíst, či přičíst k původnímu množství vody v návrhu [29].

Frakce 0–4 mm použitá v experimentální části byla ve stavu vysušeném na vzduchu a její vlhkost nebyla měřena. Frakce 4–8 mm byla vlhká a její přibližná vlhkost ve stavu NPSK byla stanovena s použitím suché tkaniny, pomocí které byl vysušen povrch kameniva před zvážením. Tato frakce i frakce 8–16 mm byly vysušeny také v sušárně při teplotě 110 °C do konstantní hmotnosti pro zjištění celkové vlhkosti. U frakce 8–16 mm nebylo možné použít předešlou metodu stanovení vlhkosti ve stavu NPSK, jelikož bylo kamenivo pokryto jemným nánosem hlíny. Po vysušení povrchu tkaninou byla hmotnost kameniva nižší, než po vysušení v sušárně. Pro vlhkost tohoto kameniva ve stavu NPSK bylo proto použito hodnoty vlhkosti kameniva vysušeného na vzduchu, která se spíše blížila stavu NPSK, než hodnota získaná vysušením v sušárně.

Přesnost zjištění vlhkosti ve stavu NPSK z hlediska hledání optimální betonové směsi nehraje příliš velkou roli. Kamenivo mělo po celou dobu konstantní vlhkost, což dělá vzorky srovnatelnými. Problém by mohl vzniknout vzhledem k opakovatelnosti s jiným kamenivem. Předpokládaný vodní součinitel nemusel zcela přesně odpovídat reálné hodnotě, zůstával však konstantní.

3.2.7 Korekce receptury vzhledem ke skutečné objemové hmotnosti betonu

I s použitím správných hustot a měrných hmotností nemusí skutečný objem betonu odpovídat receptuře. Proto je třeba recepturu upravit dle skutečně získaného objemu a hmotnosti. U připravovaného betonu je tato korekce obzvlášť důležitá, jelikož bylo použito návrhu pro betony na bázi PC. Skutečná objemová hmotnost byla zjišťována měřením rozměrů vzorků pomocí posuvného měřítka a jejich vážením na vahách s přesností 0,01 g. Poměrem skutečné měrné hmotnosti betonu (ρ_{beton}) k součtu hmotností všech složek návrhu je získán korekční koeficient

$$p = \frac{\rho_{\text{beton}}}{\sum m_i}, \quad (16)$$

kterým je třeba poté vynásobit všechny složky v návrhu.

3.2.8 Příklad návrhu betonové směsi

Pro názornost je zde řešen postup návrhu jedné z betonových směsí. V této směsi je užito frakcí kameniva 0–4 a 4–8 mm, je požadována zpracovatelnost Z1 a vodní součinitel 0,45. Vlhkost frakce kameniva 4–8 mm je 2,0 % a vlhkost této frakce ve stavu NPSK je 0,7 %. Koncentrace NaOH ve vzorku má být 15 %_{hm}. Ve výpočtu není provedena korekce vzhledem ke skutečné měrné hmotnosti betonu. Postup je následující:

- 1) Pro zpracovatelnost Z1 a maximální zrno kameniva $D_{\text{max}} = 8$ mm je množství záměsové vody w rovno $195 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (viz tabulka 3).
- 2) Množství pojiva je dáno vztahem $b = \frac{w}{(w/b)} = \frac{w}{0,45} = \frac{195}{0,45} = 433,33 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.
- 3) Množství pojiva je rozděleno mezi strusku, popílek a cementářské odprašky dle daného poměru.

- 4) Dle obr. 19 je množství zachyceného vzduchu pro $D_{\max} = 8 \text{ mm}$ rovno 3,5 %.
- 5) V 1 m^3 betonu toto množství vzduchu představuje objem $V_a = 0,035 \cdot 1 = 0,035 \text{ m}^3$.
- 6) Je vypočten objem záměsové vody pomocí vztahu $V_w = \frac{w}{\rho_w} = \frac{195}{1000} = 0,195 \text{ m}^3$.
- 7) Obdobně je vypočten objem pojiva $V_b = \frac{b}{\rho_b} = \frac{433,33}{2542,9} = 0,1704 \text{ m}^3$.
- 8) Ze zjištěných hodnot lze spočítat objem kameniva
 $V_k = V_{\text{beton}} - V_w - V_b - V_a = 1 - 0,195 - 0,1704 - 0,035 = 0,5996 \text{ m}^3$.
- 9) Ke granulometrickým výpočtům je třeba zjistit objemovou koncentraci pojiva v systému kamenivo/pojivo vzorcem $B = \frac{V_b}{V_b + V_k} \cdot 100 = \frac{0,1704}{0,1704 + 0,5996} \cdot 100 = 22,13 \text{ \%obj.}$
- 10) Procentuální množství frakce 0–4 mm je vypočteno následovně

$$P_4 = \frac{100 \cdot \sqrt{\frac{d}{D_{\max}}} - B}{100 - B} \cdot 100 = \frac{100 \cdot \sqrt{\frac{4}{8}} - 22,13}{100 - 22,13} \cdot 100 = 62,39 \text{ \%obj.}$$
- 11) Procentuální množství frakce 4–8 mm je zjištěno odečtem procentuálního množství předchozí frakce $P_8 = 100 - P_4 = 100 - 62,39 = 39,61 \text{ \%obj.}$
- 12) Je určena navážka frakce 0–4 mm ve stavu NPSK vzorcem

$$m_4 = V_4 \cdot \rho_4 = V_k \cdot \frac{P_4}{100} \cdot \rho_4 = 0,5996 \cdot \frac{62,39}{100} \cdot 2700 = 1010,04 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$
- 13) Obdobně je vypočtena i navážka frakce 4–8 mm ve stavu NPSK

$$m_8 = V_8 \cdot \rho_8 = V_k \cdot \frac{P_8}{100} \cdot \rho_8 = 0,5996 \cdot \frac{39,61}{100} \cdot 2500 = 593,75 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$
- 14) U frakce 4–8 mm je třeba provést korekci na vlhkost. Nejprve je vypočtena nová navážka této frakce $m'_8 = \frac{h + 100}{h_{\text{NPSK}} + 100} \cdot m_8 = \frac{2 + 100}{0,7 + 100} \cdot 593,75 = 601,42 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.
- 15) Následně je vypočteno množství vody, které s kamenivem přibude ve směsi

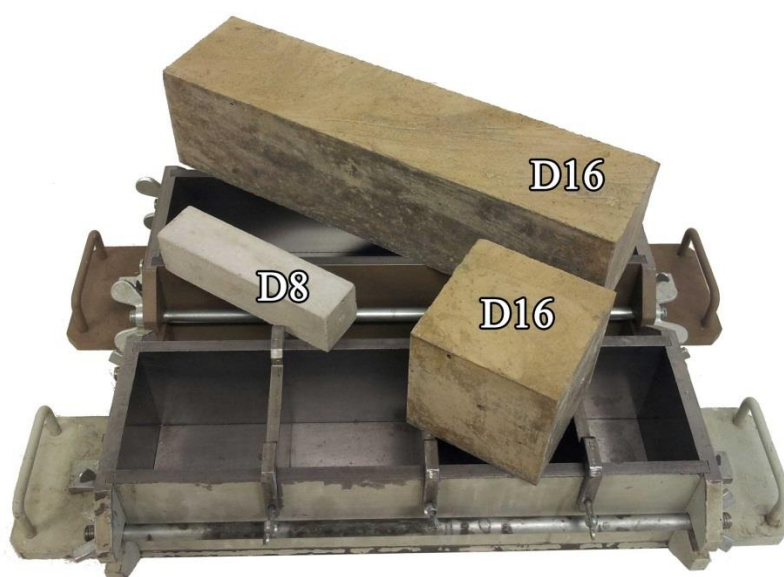
$$m_{\text{korekce}} = m'_8 - m_8 = 601,42 - 593,75 = 7,7 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$
- 16) Toto množství je třeba zohlednit v základním množství záměsové vody. Její upravená hodnota je vypočítána ze vztahu $w' = w - m_{\text{korekce}} = 195 - 7,7 = 187,3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.
- 17) Nakonec je vypočtena navážka 100% NaOH (A) k vytvoření směsi o koncentraci 15 %hm. (c_A). K tomuto výpočtu je použito neupravené množství záměsové vody w následujícím způsobem $c_A = \frac{A}{A + w} \Rightarrow A = \frac{w \cdot c_A}{1 - c_A} = \frac{195 \cdot 0,15}{1 - 0,15} = 34,41 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

3.3 Příprava betonových směsí

V experimentální části práce byly připravovány 2 základní typy alkalicky aktivovaných betonových směsí: směsi nízkého objemu s maximálním zrnem kameniva 8 mm a směsi vyššího objemu s maximálním zrnem kameniva 16 mm. Maximální zrno kameniva bylo voleno dle rozměrů připravovaných vzorků.

První typ směsí byl připravován na kuchyňském robotu značky KitchenAid. Nejprve byly v nerezové nádobě smíchány součásti pojiva – struska, popílek a odprašky. Hned po zapnutí mixéru byl ke směsi přidán vodný roztok hydroxidu sodného a po dalších 30 sekundách přidáno kamenivo. Půl minuty od přidání kameniva byly zvýšeny otáčky mixéru, směs byla mísená dalších 30 vteřin a poté bylo mísení přerušeno na 2 minuty. Během této doby byly setřeny nesmísené zbytky na stěnách nádoby pomocí stěrky. Směs byla dále míchána ještě další minutu při vyšších otáčkách. Na čerstvé směsi byla provedena zkouška konzistence. Směs byla následně vpravena do ocelových forem o rozměrech $4 \times 4 \times 16$ cm a vibrována na vibračním stole po dobu jedné minuty. Takto připravené vzorky byly uzavřeny do neprodyšné fólie, ponechány 24 hodin zrát při laboratorní teplotě, následně byly odformovány a skladovány v komoře s regulací teploty a vlhkosti.

Druhý typ směsí byl připravován v laboratorní míchačce na beton BS LBM-75 značky Beton System. V této míchačce bylo připravováno cca 25 litrů betonové směsi. Veškeré pevné složky v tomto případě byly umístěny do míchačky a smíseny s částí roztoku NaOH. Okamžitě následovalo zapnutí míchačky a po 30 sekundách míchání byla do směsi přidána zbylá část roztoku. Celková doba míchání byla 4 minuty bez přestávky. Na čerstvé směsi byla provedena zkouška konzistence a směs byla vpravena do krychlových forem s délkou strany 10 nebo 15 cm. K orientační zkoušce pevnosti v tahu za ohybu bylo použito i kvádrových forem o rozměrech $10 \times 10 \times 40$ cm. Po naplnění forem byly směsi 1 minutu zhutňovány na vibračním stolku, poté zakryty neprodyšnými sáčky a ponechány 24 hodin zrát při laboratorní teplotě. Po této době byly vzorky odformovány a skladovány ve vlhkém prostředí při laboratorní teplotě.



Obr. 22: Vzorky D16, jejich formy a srovnání se vzorkem D8

Pro účely této práce a jednodušší orientaci bude první typ směsí označen jako „D8“ a druhý typ jako „D16“. Čísla v těchto označeních představují maximální rozměr zrn kameniva. Hlavní parametry směsí shrnuje tabulka 4. Směsi D8 sloužily ke zkouškám v laboratorním měřítku, zatímco směsi D16 se měly více blížit reálnému použití. Vzorky D16 a jejich formy jsou ilustrativně uvedeny na obr. 22 (bez krychlí o hraně 15 cm). Na tomto obrázku je pro srovnání uveden i vzorek směsí D8.

Tabulka 4: Hlavní parametry míchaných směsí

Označení směsí	Množství vody	Vodní součinitel	Rozměr max. zrna kameniva	Výpočetní obsah zachyceného vzduchu
D8	Z1, Z2, Z3	0,45	8 mm	3,5 %
D16	Z2	0,37	16 mm	2,5 %

4 DISKUZE A VÝSLEDKY

4.1 Sledované závislosti a optimalizace betonových směsí

U připravovaných směsí byly sledovány 4 základní parametry: zpracovatelnost čerstvé směsi, pevnost betonu v tahu za ohybu, pevnost betonu v tlaku a cena směsi. Dále byla také testována prospěšnost cementářských odprašků a tendence směsí D16 k tvorbě výkvětů. V návrhu vzorků typu D8 bylo použito vstupního množství vody odpovídajícího označením Z1, Z2 a Z3, vodního součinitele o hodnotě 0,45, maximálního zrna kameniva 8 mm a koncentrací NaOH 10, 15, 20 a 25 %hm. Ze získaných výsledků byla pro směsi typu D16 navržena optimální zpracovatelnost Z2. V těchto směších bylo použito i frakce kameniva 8–16 mm a vodní součinitel byl snížen na hodnotu 0,37. Hydroxid sodný byl použit v koncentracích 10, 14, 18 a 20 %hm. Postup při optimalizaci bude podrobněji probrán u jednotlivých závislostí.

4.1.1 Zpracovatelnost

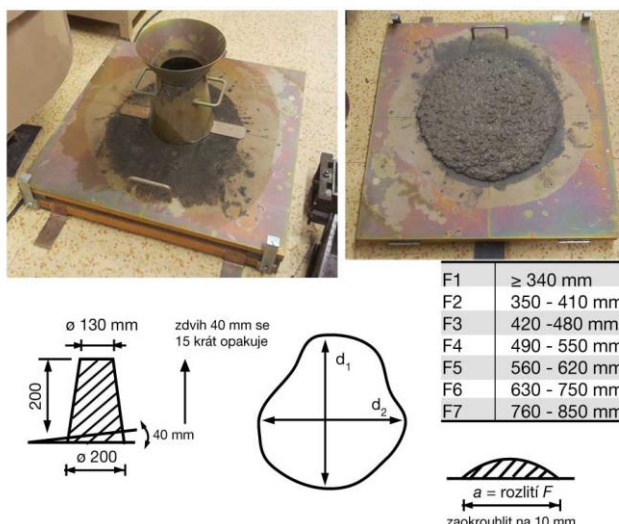
Zpracovatelnost směsí D8 byla zkoumána pomocí střešacího stolku (ČSN EN 1015-3). U směsí D16 byla použita zkouška rozlitím (ČSN EN 12350-5). Obě zkoušky jsou založeny na stejném principu, rozdílné jsou rozměry a konstrukce zkušebních zařízení.

Zkouška pomocí střešacího stolku je určena ke stanovení konzistence malt pro zdivo. Vyžaduje nižší objem směsi a velikost kameniva, což jsou důvody pro jeho použití u směsí D8. Střešací stolek je zařízení s pohyblivou deskou upevněnou na kovovém rámu. Pomocí hřídele se zvedací vačkou je deska nadzvednuta a poté spuštěna volným pádem do výchozí pozice, čímž je směs střešána. Směs je na desce umístěna do kuželovité formy, která je poté odstraněna a dochází k rozlití směsi. Otáčením hřídele je směs 15krát střesena. Nakonec jsou změřeny dva kolmé průměry vzniklého koláče s přesností 1 mm. Střešací stolek, používaný k této zkoušce, je zobrazen na obr. 23.

U zkoušky rozlitím je deska střešacího stolku větší a na jedné straně připevněna k pohyblivým pantům. Volný pád je zajištěn zvedáním desky do určitého úhlu a jejím následným pouštěním. Do kuželovité formy je dávkováno větší množství směsi. Počet střesů je opět 15 a způsob měření vzniklého koláče je stejný jako v předchozím případě, pouze průměrné výsledky se zaokrouhlují na 10 mm. U této metody jsou dle rozlití směsi děleny do sedmi tříd zpracovatelnosti označených F1–F7. Návrh této metody včetně rozdělení tříd je uveden na obr. 24. Nejvhodnější konzistence pro betonovou směs měřená rozlitím je od 360 do 400 mm, což odpovídá třídě F2 [39].



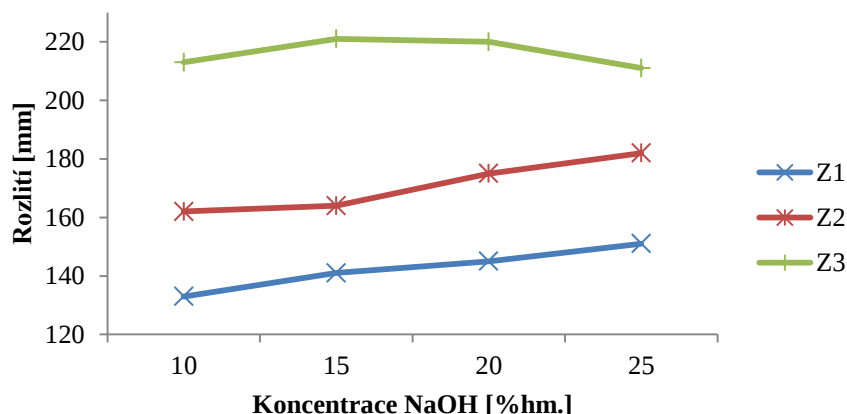
Obr. 23: Střásací stolek pro stanovení konzistence čerstvé malty



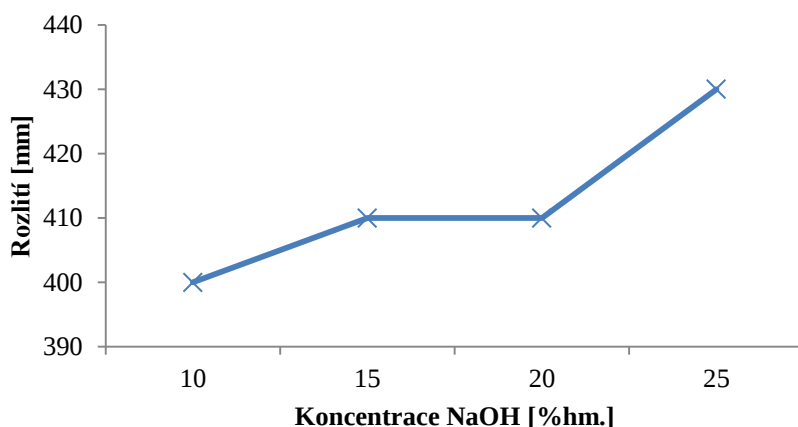
Obr. 24: Stanovení konzistence čerstvého betonu zkouškou rozlitím [38]

Výsledky měření konzistence směsí udává obr. 25 a 26. Z grafu směsí D8 je patrné, že zvyšování podílu vody ve směsi na úkor kameniva zlepšuje zpracovatelnost, což bylo předpokládáno již při návrhu. Lepší zpracovatelnost směsí je výhodná při její manipulaci, avšak zvyšuje riziko segregace – sedimentace kameniva a odměšování vody. Při zhutňování vzorků Z3 po dobu jedné minuty byla pozorována mírná sedimentace větších zrn kameniva. Proto bylo pro vzorky D16 navrženo použití konzistence Z2. Konzistence Z3 by byla vhodná v případě, že by směs z nějakého důvodu nemohla být zhutněna v dostatečné míře.

Dále lze z grafů pozorovat zvyšování zpracovatelnosti se zvyšováním koncentrace NaOH. Domnívám se, že tato skutečnost mohla být způsobena zvyšováním rozpuštěného množství aluminosilikátů s rostoucí koncentrací NaOH, což by způsobilo snížení pevného podílu ve směsi. Tuto hypotézu nepotvrzují směsi se zpracovatelností Z3. Zde mohlo nějakým způsobem hrát roli vysoké množství záměsové vody, nebo nepřesnost měření. Zpracovatelnost směsí D16 v závislosti na koncentraci NaOH vykazuje podobnou závislost, jak u směsí D8. Hodnoty rozlivu těchto směsí se pohybují na hranici tříd F2 a F3, což je vhodná konzistence.



Obr. 25: Výsledky měření konzistence směsí D8



Obr. 26: Výsledky měření konzistence směsí D16

4.1.2 Mechanické vlastnosti

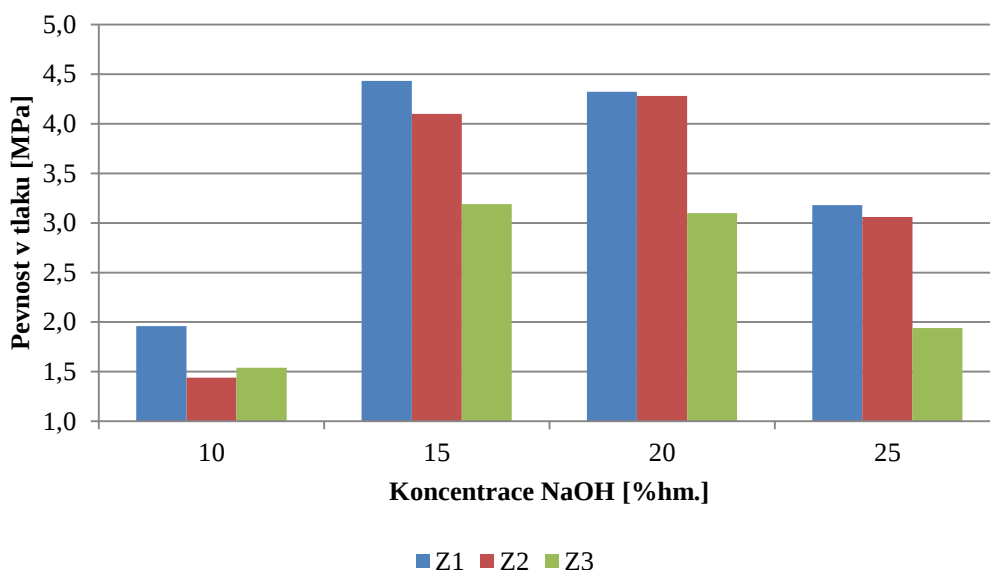
U připravených vzorků byly zkoumány dvě základní mechanické vlastnosti: pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku. Tyto vlastnosti byly měřeny na hydraulickém lisu DESTTEST 3310 od firmy Beton System v intervalu 1 den, 7 dnů a 28 dnů.

U směsí D8 měly vzorky výhradně tvar kvádru o stranách délky $4 \times 4 \times 16$ cm. Při zkoušce byl vždy kvádr podroben nejprve zkoušce v tahu za ohybu a následně byly jeho zlomky využity ke zkoušce pevnosti v tlaku. Na každou zkoušku pevnosti v tahu za ohybu bylo pro veškeré směsi D8 použito dvou vzorků. Výsledky zkoušek pevností v tahu za ohybu udává tabulka 4. U této mechanické vlastnosti nelze ze získaných výsledků konstatovat s jistotou, že by měla určitou závislost. Důvodem nekonzistentních výsledků je pravděpodobně nedostatečné množství testovaných vzorků. Beton je sám o sobě heterogenní materiál závislý svými vlastnostmi na různých podmínkách. Pevnost v tahu za ohybu je více závislá na druhu kameniva, jeho rozhraní s pojivovou fází a přítomných mikrotrhlinách, než pevnost v tlaku [29,33]. Z těchto důvodů získané výsledky pevností v tahu za ohybu, které obsahuje tabulka 5, slouží pouze ilustrativně.

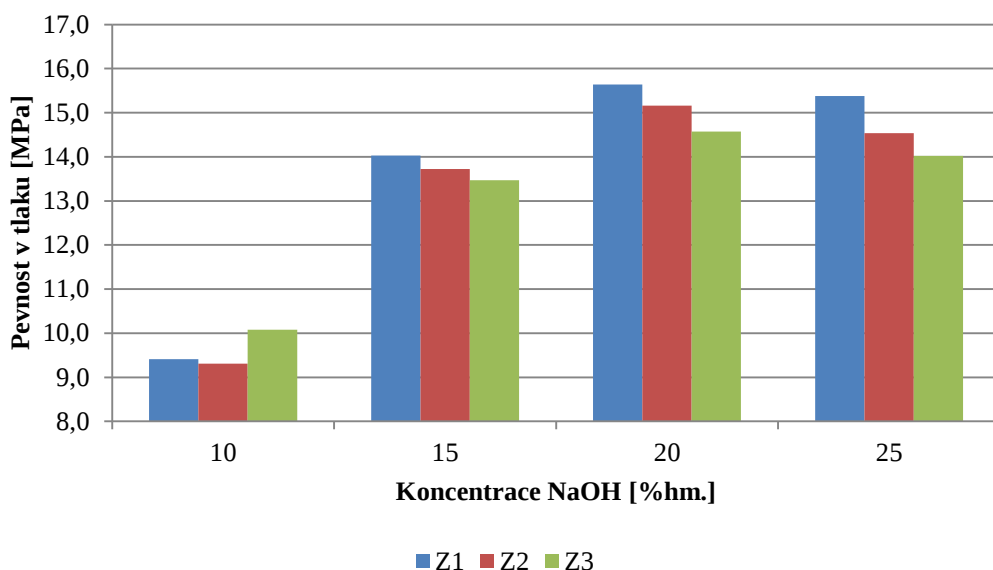
Tabulka 5: Výsledky zkoušek pevností vzorků D8 v tahu za ohybu

Koncentrace NaOH [%hm.]			10	15	20	25
		Doba zrání vzorků	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]			
Zpracovatelnost	Z1	1 den	0,5	1,6	1,4	1,1
		7 dnů	2,4	2,9	3,1	3,8
		28 dnů	2,9	3,6	3,5	3,9
	Z2	1 den	0,4	1,3	1,6	1,1
		7 dnů	2,6	3,2	3,5	3,8
		28 dnů	2,8	3,0	4,0	3,7
	Z3	1 den	0,4	1,0	1,1	0,9
		7 dnů	2,6	2,8	3,6	3,9
		28 dnů	3,2	3,3	3,7	4,3

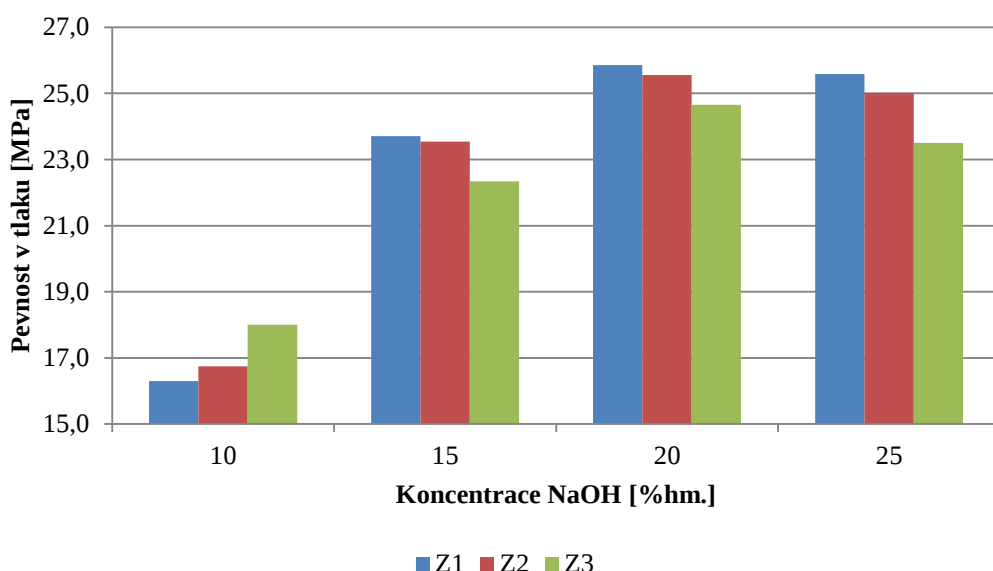
Pevnosti v tlaku směsí D8 znázorňují dle doby zrání obr. 27, 28 a 29. Ze získaných výsledků lze konstatovat, že se zvyšováním množství vody a pojiva v záměsí na úkor kameniva klesají pevnosti vzorků v tlaku, což souhlasí s chováním betonů na bázi portlandského cementu. Jedinou výjimkou byly vzorky s koncentrací NaOH 10 %hm. Tyto vzorky měly obecně značně nižší pevnosti v tlaku oproti směsím s vyšší koncentrací NaOH, což naznačuje odlišné chování od zbytku směsí. Zvyšování koncentrace NaOH má za následek vyšší pevnosti v tlaku, avšak pouze do určité hranice. Dokazují to vzorky s koncentrací NaOH 25 %hm., které dosahovaly nižších pevností v tlaku, než vzorky s koncentrací 20 %hm. Směsi D8 dosahují po 28 dnech maximálních pevností v tlaku kolem 25 MPa. Bylo možno očekávat, že při zvýšení maximálního zrna kameniva klesnou výsledné pevnosti v tlaku. Proto byl u směsí D16 snížen vodní součinitel na hodnotu 0,37. Jelikož došlo u směsí s nejvyšší koncentrací NaOH k poklesu pevností v tlaku, nebylo této koncentrace využito ve směsích D16.



Obr. 27: Pevnosti v tlaku směsí D8 získané po 1 dnu zrání



Obr. 28: Pevnosti v tlaku směsí D8 získané po 7 dnech zrání



Obr. 29: Pevnosti v tlaku směsí D8 získané po 28 dnech zrání

U směsí D16 bylo využito třech různých forem. Na betonových krychlích o délce hrany 10 cm byly prováděny zkoušky pevnosti v tlaku po 7 a 28 dnech. Krychlí o hraně 15 cm bylo využito ke zkoumání jednodenních pevností v tlaku. Kvádry o rozměrech $10 \times 10 \times 40$ cm byly použity k měření pevností v tahu za ohybu. Z jedné směsi byly vždy získány 2 větší krychle, 9 menších krychlí a 2 kvádry. Větší krychle byly použity z důvodu nízkých počátečních pevností směsí v tlaku, které by lis na menších krychlích nezaznamenal. Kvádry byly po jednom kusu použity k měření pevnosti v tahu za ohybu po 7 a 28 dnech. Z důvodu nízkého počtu vzorků lze považovat získané hodnoty pevností v tahu za ohybu a pevností v tlaku po jednom dnu za orientační.

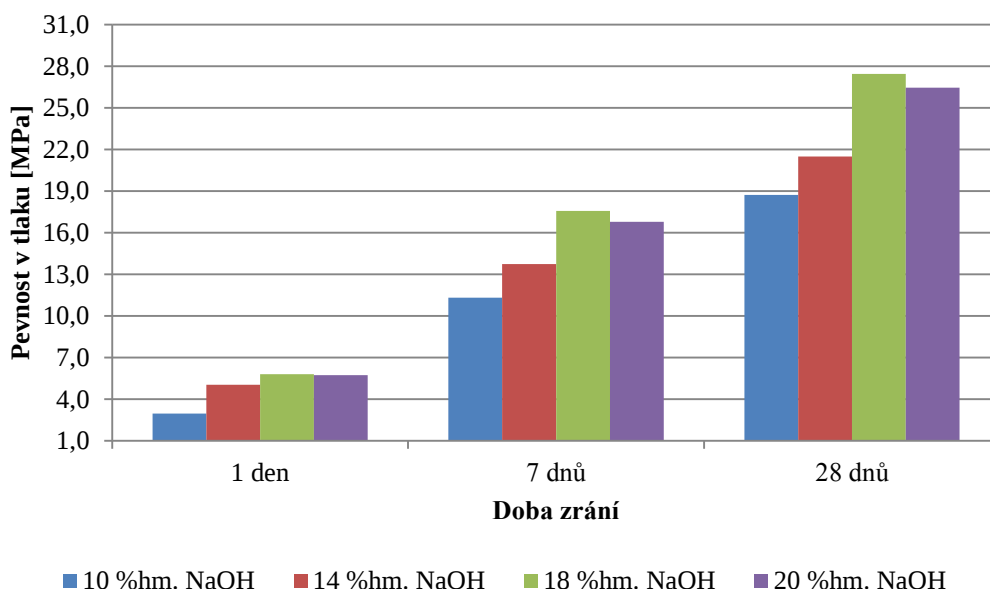
Získané pevnosti v tahu za ohybu shrnuje tabulka 6. Jejich hodnoty jsou vzájemně podobné a kromě směsi s koncentrací NaOH 18%hm. se liší maximálně o 1 MPa.

Tabulka 6: Výsledky zkoušek pevností vzorků D16 v tahu za ohybu

Koncentrace NaOH [%hm.]	10	14	18	20
Doba zrání vzorků	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]			
7 dnů	3,6	3,7	4,2	4,2
28 dnů	4,1	4	6,2	5,2

Získané pevnosti v tlaku směsí D16 jsou uvedeny na obr. 30. Je třeba zdůraznit, že oproti směsem D8 s koncentrací NaOH 15 %hm. byly použity koncentrace NaOH 14 a 18 %hm. Veškeré směsi D16 obsahovaly stejné množství záměsové vody (zpracovatelnost Z2).

Z grafu je možné pozorovat podobnou závislost jako u směsí D8. Pevnosti v tlaku rostou s koncentrací NaOH do určité limitní hodnoty. Nejvyšších hodnot pevností v tlaku dosahovaly vzorky s koncentrací NaOH 18 %hm. To značí, že je tato koncentrace blíže limitní hodnotě, než koncentrace 20 %hm. Nejvyšší získané pevnosti v tlaku směsí D16 po 28 dnech se pohybují kolem hodnoty 27 MPa, což je srovnatelné s nejvyššími pevnostmi směsí D8. Je důležité si však uvědomit, že u směsí D16 došlo ke snížení vodního součinitele, protože bylo předpokládáno dosažení nižších pevností oproti vzorkům D8. Srovnatelné pevnosti směsí D8 a D16 tedy dokazují, že snížení vodního součinitele má za následek růst pevností v tlaku.



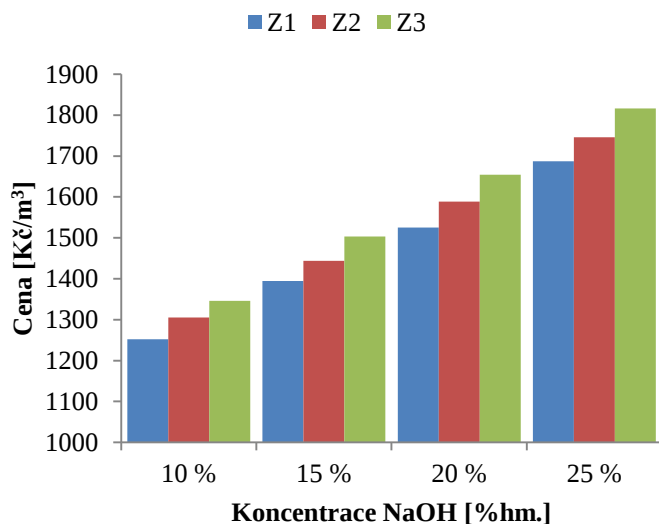
Obr. 30 Vývoj pevností v tlaku směsí D16

4.1.3 Cena

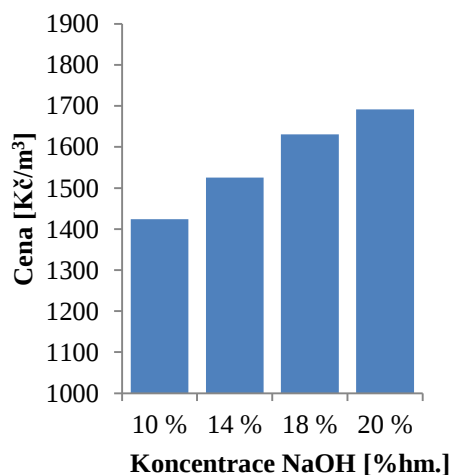
Jeden z nejdůležitějších parametrů materiálů v dnešní době je cena a je nutné brát ji v úvahu i při optimalizaci směsí v této práci. Ve výpočtu cen směsí bylo použito cen výchozích surovin (s DPH), které uvádí tabulka 7. Cena vody nebyla zahrnuta, jelikož se může dle provozu lišit. V některých případech voda nemusí být zpoplatněna vůbec. Vypočtené ceny směsí jsou znázorněny na obr. 31 a 32. Cena směsí stoupá se zvyšováním koncentrace NaOH a se zlepšováním zpracovatelnosti. Ceny směsí D16 jsou vyšší, než ceny srovnatelných směsí D8 Z2 s menším kamenivem, což je způsobeno především snížením vodního součinitele. Optimalizaci pojiva na základě ceny dále řeší kapitola 4.2.

Tabulka 7: Ceny složek alkalicky aktivovaného materiálu [44]

Položka	Cena (s DPH) [Kč/t]
Voda	–
NaOH (100%)	10 000
Cementářské odprašky	1
Vysokoteplotní popílek	135
Vysokopecní struska	1600
Kamenivo frakce 0–4 mm	303
Kamenivo frakce 4–8 mm	448
Kamenivo frakce 8–16 mm	448



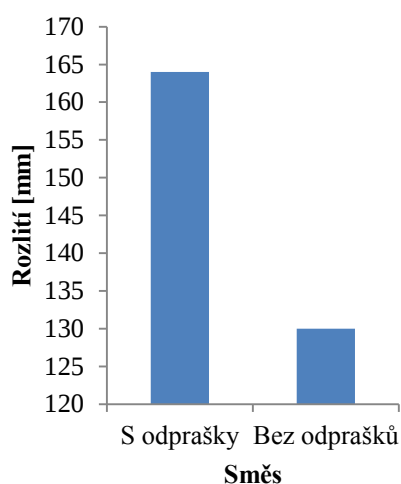
Obr. 31: Ceny směsí D8 (s DPH)



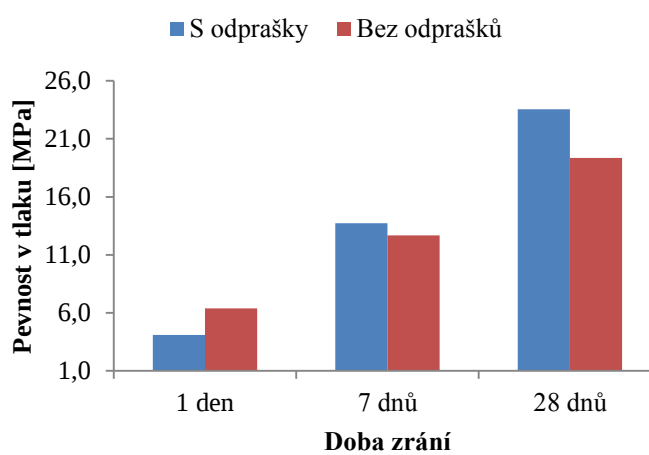
Obr. 32: Ceny směsí D16 (s DPH)

4.1.4 Vliv cementářských odprašků

Prospěšnost cementářských odprašků byla zkoumána přípravou směsi stejného složení, jako má směs D8 zpracovatelnosti Z2 s koncentrací NaOH 15 %hm. Pouze množství odprašků bylo nahrazeno struskou a popílkem. Srovnání směsí s odprašky a bez nich uvádí obr. 33 a 34. Z grafů je patrné, že u směsi bez odprašků došlo ke značnému poklesu zpracovatelnosti. Počáteční pevnosti vzorků v tlaku jsou vyšší bez použití odprašků, avšak jejich konečné pevnosti jsou oproti směsi s odprašky nižší zhruba o 4 MPa. Z toho vyplývá, že použití odprašků je prospěšné, protože je zvýšena výsledná pevnost materiálu a zpracovatelnost. Nejdůležitější je však jejich přínos z hlediska ceny betonu. V případě diskutovaných dvou směsí přítomnost odprašků snižuje cenu o zhruba 60 Kč/m³.



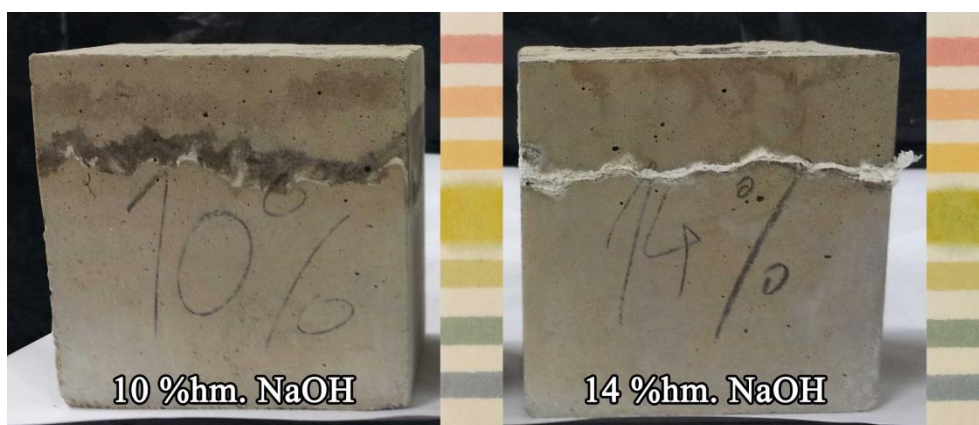
Obr. 33: Srovnání zpracovatelnosti směsí s odprašky a bez nich



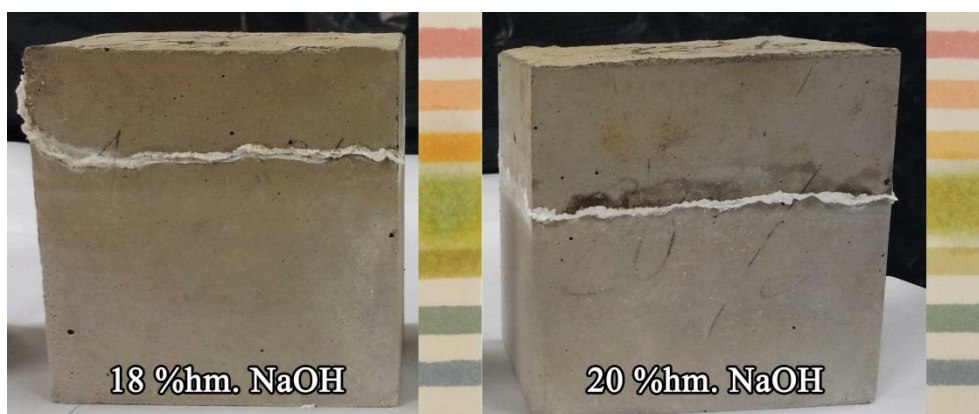
Obr. 34: Srovnání vývoje pevností v tlaku směsí s odprašky a bez nich

4.1.5 Tvorba výkvětů

K největším problémům alkalicky aktivovaných materiálů patří tvorba výkvětů. Princip jejich tvorby a složení byl probrán v kapitole 2.3. Na vzorcích směsí D16 byl proveden jednoduchý test tvorby výkvětů. Betonové kvádry byly z poloviny ponořeny do destilované vody. Do vody unikaly z materiálu alkálie a po kontaktu se vzduchem tvořily na povrchu betonu výkvěty. Vzorky byly ve vodě po dobu 7 dnů, následně byly z vody vytaženy a vysušeny na vzduchu. Jejich vzhled byl zdokumentován barevnými fotografiemi uvedenými na obr. 35 a 36. Na vysušeném povrchu bylo také orientačně stanoveno pH pomocí pH papírků, jejichž fotografie jsou uvedeny na stejných obrázcích vedle fotografií vzorků.



Obr. 35: Pozorované výkvěty a povrchové pH vzorků směsí s koncentracemi NaOH 10 a 14 %hm.



Obr. 36: Pozorované výkvěty a povrchové pH vzorků směsí s koncentracemi NaOH 18 a 20 %hm.

Z fotografií je patrné, že veškeré vzorky trpí v určité míře viditelnými výkvěty. Nejlépe na tom je směs s 10%hm. koncentrací NaOH. Intenzita výkvětů u ostatních vzorků je srovnatelná. Podobně je to i s povrchovým pH, kdy směs s nejnižší koncentrací NaOH vykazuje pH téměř neutrální, zatímco ostatní směsi mírně zásadité.

4.2 Volba optimálních směsí

V předchozí kapitole byly prezentovány zjišťované vlastnosti alkalicky aktivovaných betonových záměsí. Na jejich základě budou navrženy optimální směsi pro praktické využití. Požadavky na směs jsou následující: dobrá zpracovatelnost, vysoká pevnost v tlaku, nízká cena a nízká tvorba výkvětů. Je zřejmé, že bude třeba volit kompromis.

Z hlediska zpracovatelnosti byly jako nevhodné vyhodnoceny směsi Z1. Tyto směsi sice vykazují nejvyšší pevnosti v tlaku a nejnižší cenu, ale jejich doprava ve velkém měřítku by byla velmi obtížná, stejně jako jejich zhutňování. Dle požadavků lze doporučit třídy zpracovatelnosti Z2 a Z3. U vyšších tříd zpracovatelnosti (Z4, Z5) hrozí riziko segregace.

Z hlediska mechanických vlastností a ceny je vhodné srovnat alkalicky aktivovaný materiál s klasickým betonem. Tabulka 8 uvádí pevnostní třídy betonu na bázi portlandského cementu a jejich přibližné ceny za m^3 (s DPH). V této tabulce je také uveden rozsah cen pro směsi alkalicky aktivovaného materiálu, které by spadaly do dané pevnostní třídy. Do tabulky nejsou zahrnuty směsi D8 s koncentrací NaOH 25 %hm. a směsi D16 s koncentrací NaOH 20 %hm. Důvodem je skutečnost, že jsou tyto směsi nejdražší ze všech, ovšem dosahují nižších pevností, než směsi s nejbližší nižší koncentrací NaOH. Jejich použití by tedy bylo neefektivní a neekonomické. Dle požadavků na pevnost betonu je tedy výhodné volit koncentrace NaOH od 10 do 18 %hm. Pokud jsou požadavky na pevnost nízké, lze doporučit směsi s koncentrací NaOH 10%hm., jelikož jsou nejlevnější a mají nejmenší tendenci k tvorbě výkvětů.

Z hodnot, které uvádí tabulka 8, je patrné, že jsou směsi betonu na bázi alkalicky aktivovaných sekundárních surovin o několik set korun levnější, než klasický beton. Tento rozdíl není zcela směrodatný, jelikož u alkalicky aktivovaného materiálu není zahrnuta cena spojená s energií potřebnou k míchání betonu, transportem výchozích surovin a marží. Lze však předpokládat, že i po zahrnutí těchto položek bude alkalicky aktivovaný materiál levnější.

Tabulka 8: Ceny betonu na bázi PC a alkalicky aktivovaného materiálu v závislosti na pevnostní třídě [44]

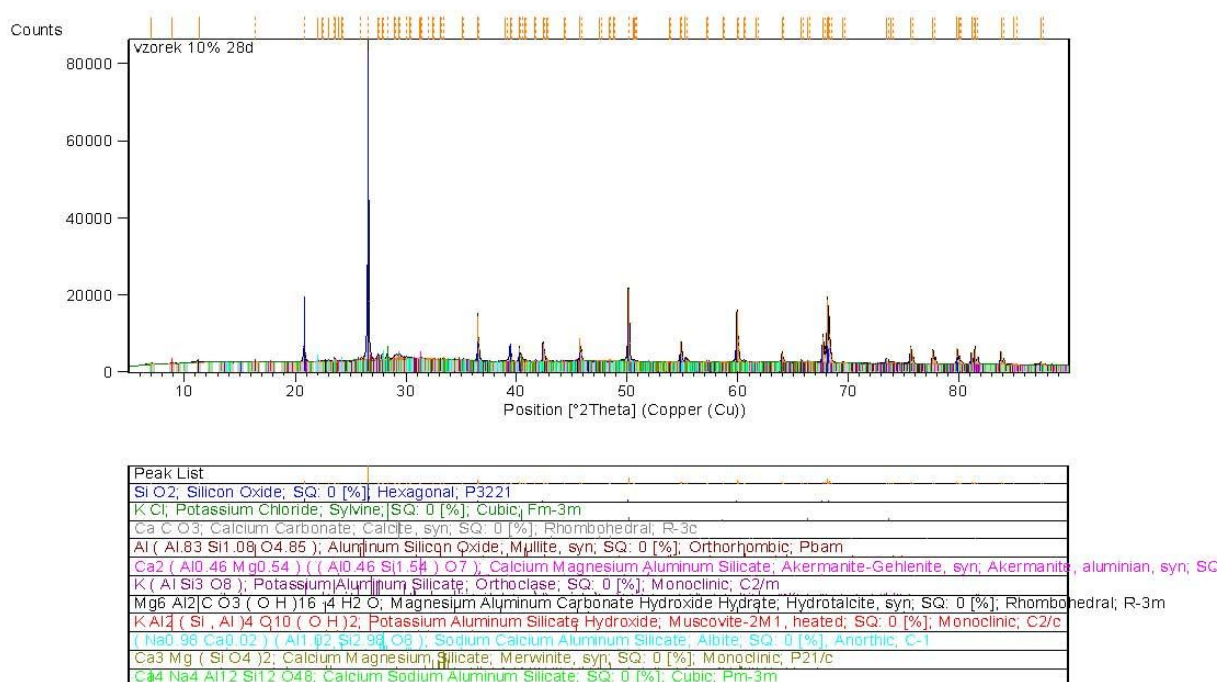
Pevnostní třída	Cena betonu na bázi PC (s DPH) [Kč/m ³]	Cena alkalicky aktivovaného materiálu (s DPH) [Kč/m ³]
C12/15	2051 – 2178	1252 – 1424
C16/20	2148 – 2384	1395 – 1653
C20/25	2275 – 2517	1525 – 1631

Shrnutím předchozích odstavců lze tedy pro budoucí aplikace alkalicky aktivovaného betonu na bázi vysokopecní strusky a popílku doporučit použití počátečního množství vody odpovídajícího konzistencím Z2 nebo Z3 a koncentrací NaOH 10 – 18 %hm. Lepší poměr cena/pevnost v tlaku by mohlo přinést snížení vodního součinitele, což v této práci nebylo dostatečně prozkoumáno.

4.3 Rentgenová difrakční analýza AAM

Ke zjištění fázového složení pojiva různých směsí bylo použito rentgenové difrakční analýzy na přístroji Empyrean od firmy PANalytical. Zkoumány byly konkrétně směsi D8 s koncentracemi NaOH 10, 15, 20 a 25 %hm. Vzorky směsí byly odebírány po jednom, sedmi a osmadvaceti dnech z trámů po jejich zkoušce v tlaku. Trámec byl vždy rozbit kladivem, vzorky pojiva byly odebrány do třetí misky, kde byl po vybrání středních a větších zrn kameniva vzorek rozetřen a analyzován. Tento způsob odběru vzorků však nebyl vhodný, jelikož signál křemíku z kameniva byl i po vybrání větších zrn příliš vysoký a překryl téměř veškeré ostatní fáze. K uspokojivé XRD analýze pojiva by zřejmě bylo třeba vytvořit vzorky bez kameniva, což z časových důvodů nebylo provedeno.

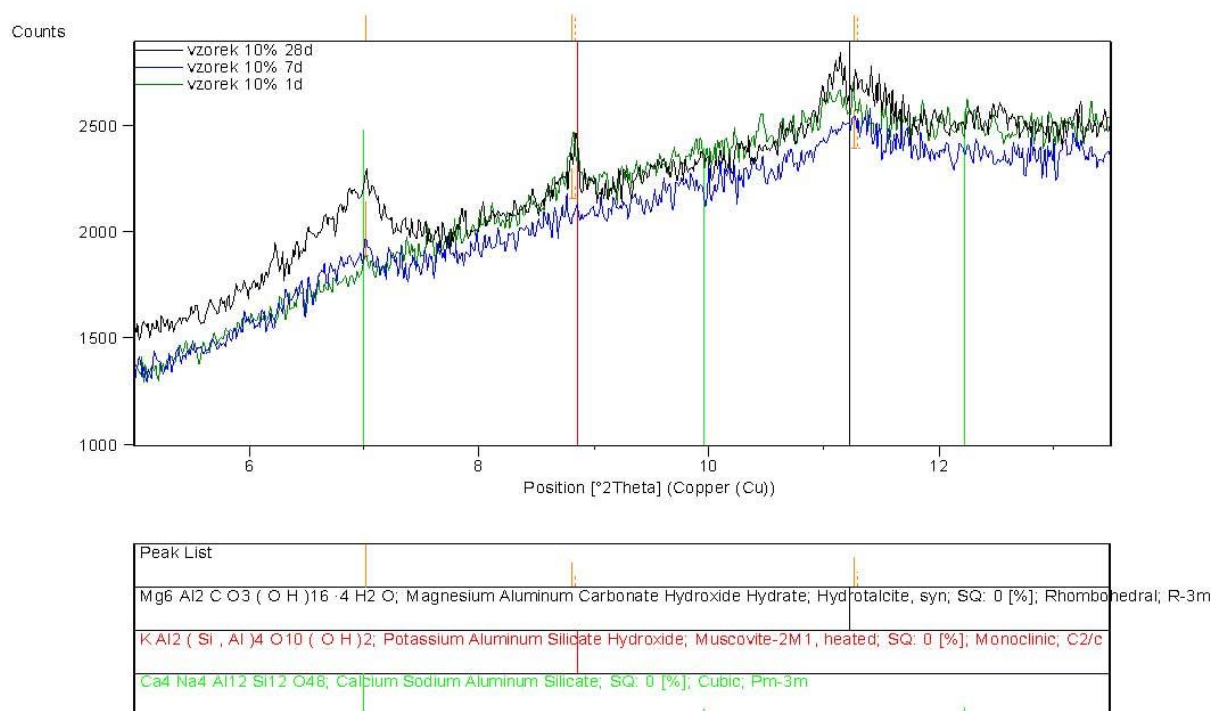
Na obr. 37 je uvedeno získané spektrum vzorku D8 zpracovatelnosti Z3 s koncentrací NaOH 10 %hm. po 28 dnech (rozsah difrakčních úhlů 5–90 °2θ). Na spektru je jasně vidět hlavní difrakční pík oxidu křemičitého (cca 27 °2θ), jehož vysoká intenzita znemožňuje jasnou viditelnost dalších fází. Ty však bylo možno nalézt vyhodnocováním spekter ve větším přiblížení (v menším rozsahu úhlů). Kromě oxidu křemičitého byla ve vzorku identifikována přítomnost gehlenitu, akermanitu a merwinitu původem ze strusky, mullitu původem z popílku a KCl původem z cementářských odprašků. Z kameniva pocházely fáze ortoklasu, muskovitu a albitu. Rozeznatelné vzniklé fáze tvořil hydrotalcit a uhličitán vápenatý. Nalezena byla také jedna zeolitická fáze. Některé z nich budou dále probírány při bližším studiu spekter v následujících odstavcích.



Obr. 37: XRD spektrum směsi D8 Z3 s koncentrací NaOH 10 %hm.

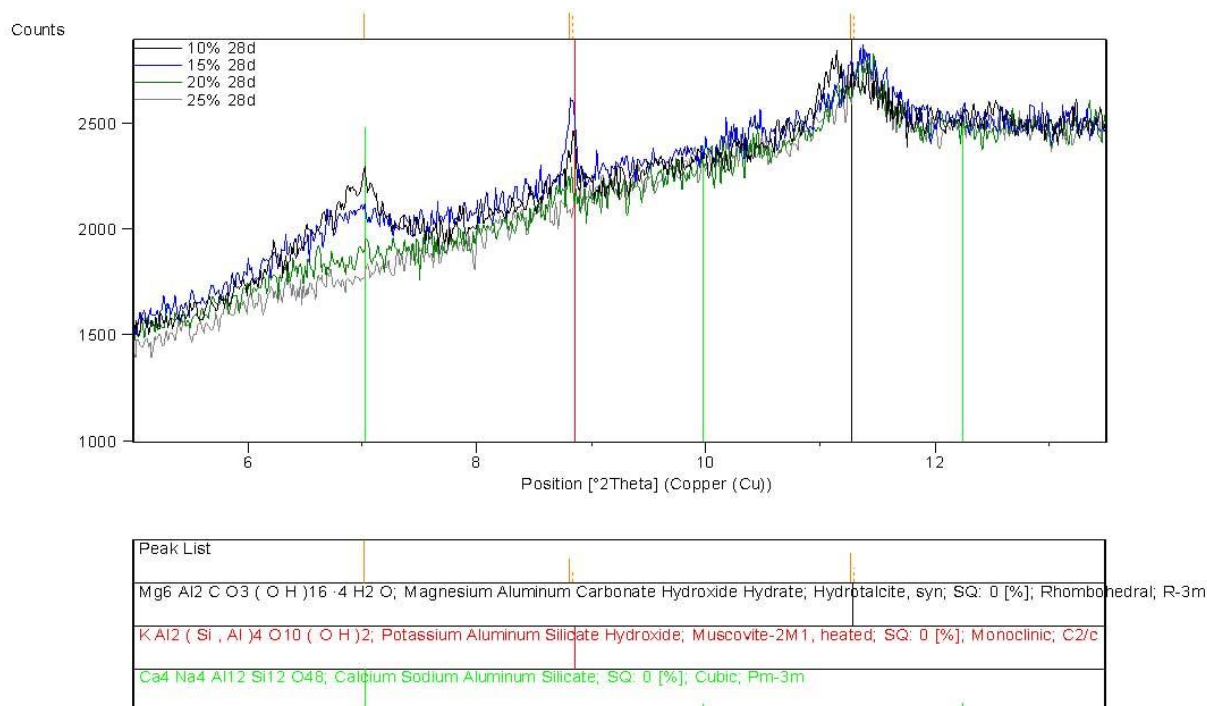
Na obr. 38 je uveden vývoj fází v čase pro stejný vzorek. Rozsah difrakčních úhlů byl omezen na 5–13,5 °2θ. V tomto rozsahu jsou viditelné píky 3 fází: hydrotalcitu, muskovitu a zeolitické fáze. Muskovit (cca 7 °2θ) pochází z kameniva a jeho množství se může měnit v individuálních zrnech kameniva. Proto například ve vzorku po 7 dnech není pozorován. Závislost množství hydrotalcitu (úhel přibližně 11 °2θ) na čase zrání není ze spektra příliš jasná, jelikož po jednom dni bylo zjištěné množství hydrotalcitu vyšší, než po 7 dnech. Domnívám se však, že množství hydrotalcitu v čase roste a zmíněná odchylka byla způsobena pouze odlišným poměrem složek ve vzorku po 7 dnech (mohlo zde být např. více kameniva).

Píku v zeolitické fázi (cca 5 °2θ) odpovídal nejlépe zeolit 5A. Tento zeolit souhlasí s charakterem pojiva, jelikož je tvořen křemičitanovými a hlinitanovými tetraedry. Jejich náboj může být vyvážen sodnými, draselnými nebo vápenatými kationty. Podle přítomných kationtů se liší velikost zeolitických pórů. Pokud náboj vyvažuje sodík, je velikost pórů 0,4 nm, pokud větší draslík tak 0,3 nm. Velikost pórů zeolitu 5A je 5 Å (0,5 nm), což odpovídá kompenzaci nábojů vápenatými kationty. Oproti draslíku a sodíku je vápníku, v důsledku jeho vyššího kladného náboje, v zeolitu potřeba poloviční množství. Proto jsou póry s jeho přítomností větší [45]. Z vývoje spektra v čase je patrné, že tato fáze vzniká po delší době zrání.



Obr. 38: Srovnání XRD spekter vzorků D8 Z3 s koncentrací NaOH 10 %hm. po 1, 7 a 28 dnech

Poslední spektrum uvedené na obr. 39 srovnává směsi D8 zpracovatelnosti Z3 s různou koncentrací NaOH po 28 dnech. Opět je použito stejného rozsahu úhlů, jak v předchozím případě a ve spektru jsou viditelné stejné fáze. Ze spektru vyplývá, že se s koncentrací hydroxidu nemění množství vzniklého hydrotalcitu. Přítomnost muskovitu je dána kamenivem v odebraném vzorku, jak již bylo řečeno v předchozím spektru. Bylo zjištěno, že zeolitická fáze se neobjevuje při vyšších koncentracích NaOH (20 a 25 %hm.). Důvod pro tento jev nebyl objasněn.



Obr. 39: Srovnání XRD spekter vzorků D8 Z3 s různými koncentracemi NaOH

4.4 Studium mikrostruktury AAM

Ke studiu mikrostruktury alkalicky aktivovaného materiálu bylo použito skenovací elektronové mikroskopie (SEM) pomocí mikroskopu Zeiss EVO LS 10 vybaveným energodisperzním analyzátozem rentgenového záření (EDX). Zkoumány byly vzorky směsi D8 zpracovatelnosti Z2 s koncentrací NaOH 15 %hm. po 7 a 28 dnech zrání. Z trámčů byla vždy vyříznuta tenká destička, která byla zlomena. Lomová plocha byla pozlacená a umístěna do komory mikroskopu.

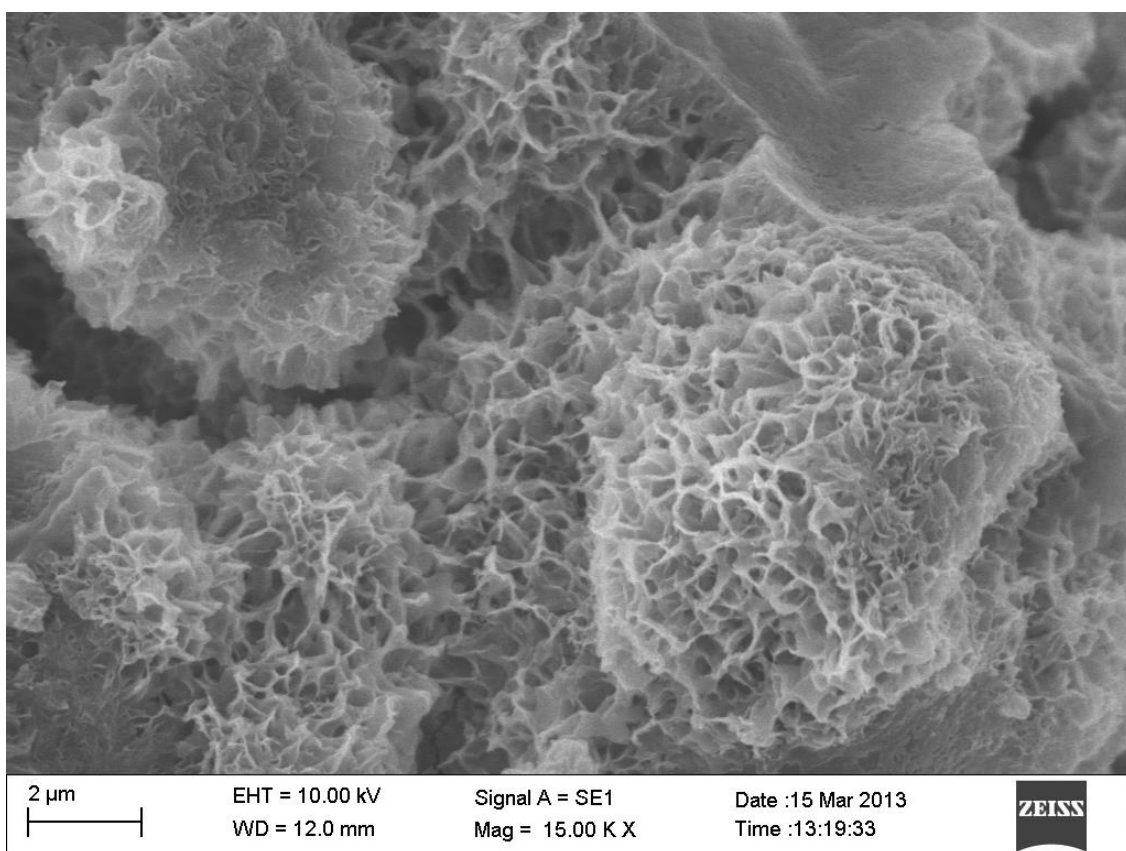
Na obr. 40 je zachycena pojivová fáze alkalicky aktivovaného materiálu po 7 dnech. Základ pojiva tvořila vysokopecní struska, jejíž aktivací vzniká především C-S-H gel. Od C-S-H gelu vznikajícího z portlandského cementu se tento gel však výrazně odlišuje v několika základních ohledech. Je málo krystalický, je v něm zakomponován hliník a má nižší poměr C/S. Prvkové složení pojivové fáze po 7 dnech udává

tabulka 9. Hliník přítomný v C-S-H gelu je můstkový, čímž prodlužuje délku řetězců a míru celkového zesílení. Poměr C/S se u hydratovaného portlandského cementu pohybuje v rozmezí 1,5 – 1,7 [40]. Z hodnot, které udává tabulka 9, vyplývá, že poměr C/S v alkalicky aktivovaném materiálu je zhruba 1,1. Právě nižší hodnota tohoto poměru podmiňuje možnost

zakomponování alkálií ve struktuře C-S-H gelu alkalicky aktivovaných materiálů. Hořčík, pocházející především ze strusky, se nepodílí na tvorbě C-S-H gelu a v materiálu se vyskytuje především ve formě hydrotalcitu, jehož přítomnost byla dokázána pomocí XRD analýzy [39]. Draslík přítomný v materiálu může být součástí chloridu draselného, původem z cementářských odprašků, popř. zakomponován v C-S-H gelu (solvatován v pórech).

Tabulka 9: EDX analýza pojivové fáze AAM po 7 dnech (v celé ploše obr. 40)

Prvek	O	Na	Mg	Al	Si	Cl	K	Ca
Obsah [%at.]	61,8	6,6	2,2	2,5	10,8	2,3	2,6	11,3

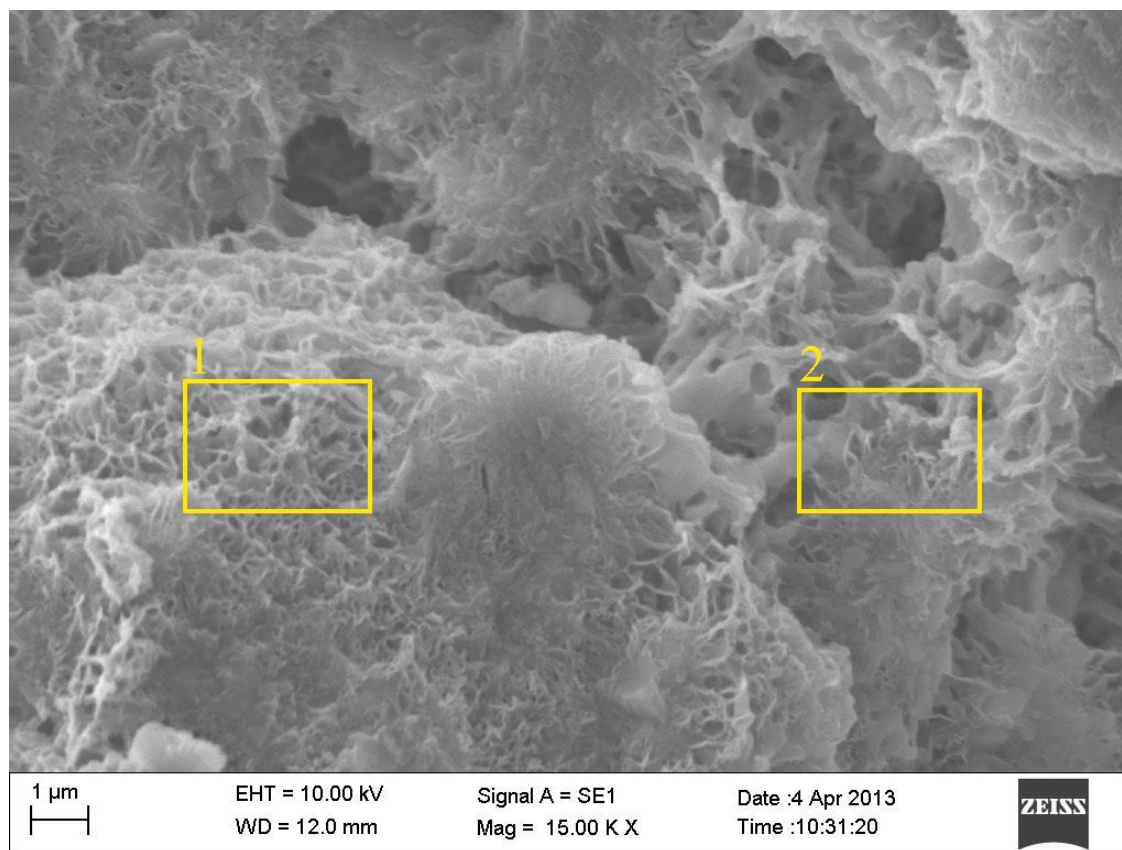


Obr. 40: Pojivová fáze v AAM po 7 dnech

Pojivová fáze po 28 dnech zrání je uvedena na obr. 41. V porovnání s obr. 40 je fáze hustší a na lomové ploše vzorku pokrývala většinu povrchu. Tabulka 10 udává složení dvou měřených míst této pojivové fáze. Ze získaných dat je zjevné, že se po 28 dnech výrazně zvýšil obsah uhlíku. V některých případech se uhlík může vyskytovat ve formě organických zbytků a zkreslovat tak měření. Z XRD analýzy však vyplývá, že v tomto případě je uhlík především součástí vznikajícího hydrotalcitu.

Tabulka 10: EDX analýza pojivové fáze AAM po 28 dnech

Místo	Obsah prvku [%at.]										
	C	O	Na	Mg	Al	Si	Cl	K	Ca	Fe	S
1	11,9	51,6	6,4	2,9	2,9	9,5	3,2	3,4	7,7	0,5	–
2	12,6	52,4	7,6	0,6	1,8	8,7	4,2	5,0	6,5	–	0,8

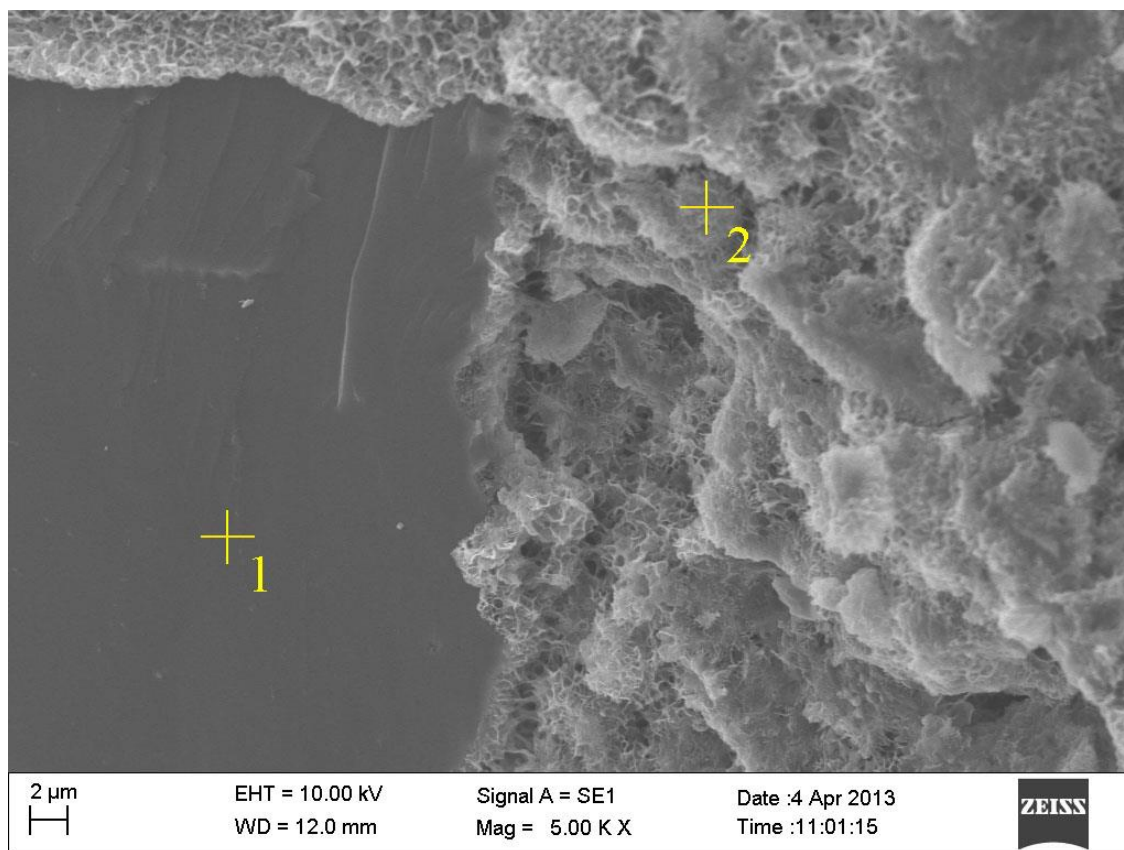


Obr. 41: Pojivová fáze AAM po 28 dnech

Obr. 42 znázorňuje rozhraní kamenivo/pojivo po 28 dnech. Tmavě šedá plocha na levé straně je kamenivo, což bylo dokázáno EDX analýzou (viz tabulka 11). Pojivová fáze obrůstá kamenivo a tvoří s ním kompaktní, pevný celek. Složení pojivové fáze je srovnatelné s pojivovou fází zkoumanou na obr. 41.

Tabulka 11: EDX analýza rozhraní kamenivo/pojivo po 28 dnech

Místo	Obsah prvku [%at.]									
	C	O	Na	Mg	Al	Si	Cl	K	Ca	Fe
1	7,9	66,2	0,2	25,6	–	25,6	–	–	0,2	–
2	13,5	51,4	6,7	1,8	1,8	6,7	6,3	6,7	5,0	0,3

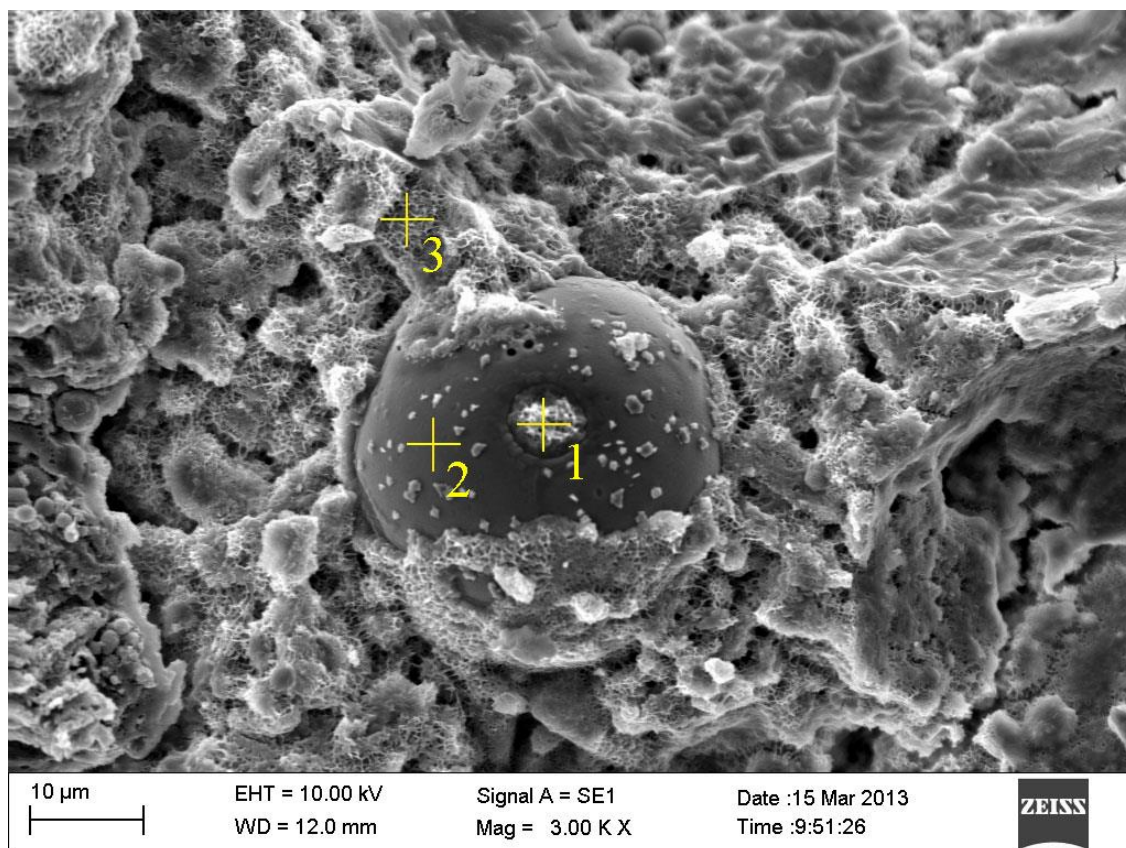


Obr. 42: Rozhraní kamenivo/pojivo po 28 dnech

Na obr. 43 lze názorně pozorovat jedno ze stádií alkalické aktivace popílku. Uprostřed částice popílku je otvor, kterým dovnitř pronikly alkálie (místo 1), reagovaly s obsahem částice a vytvořily pojivovou fázi, která je v otvoru viditelná. Výsledky EDX analýzy různých míst na snímku uvádí tabulka 12. Vysoký obsah alkálií v místě 1 potvrzuje uvedený mechanismus aktivace. Na nezreagovaném povrchu popílku (místo 2) je obsah alkálií velmi nízký a byly zde měřeny i kovové prvky obsažené v popílku (Fe, Ti, V). Použitý popílek je bohatý na hliník, což je zjevné i z analýzy místa 2. Vysoké množství hliníku bylo měřeno i v pojivové fázi blízko popílku (místo 3).

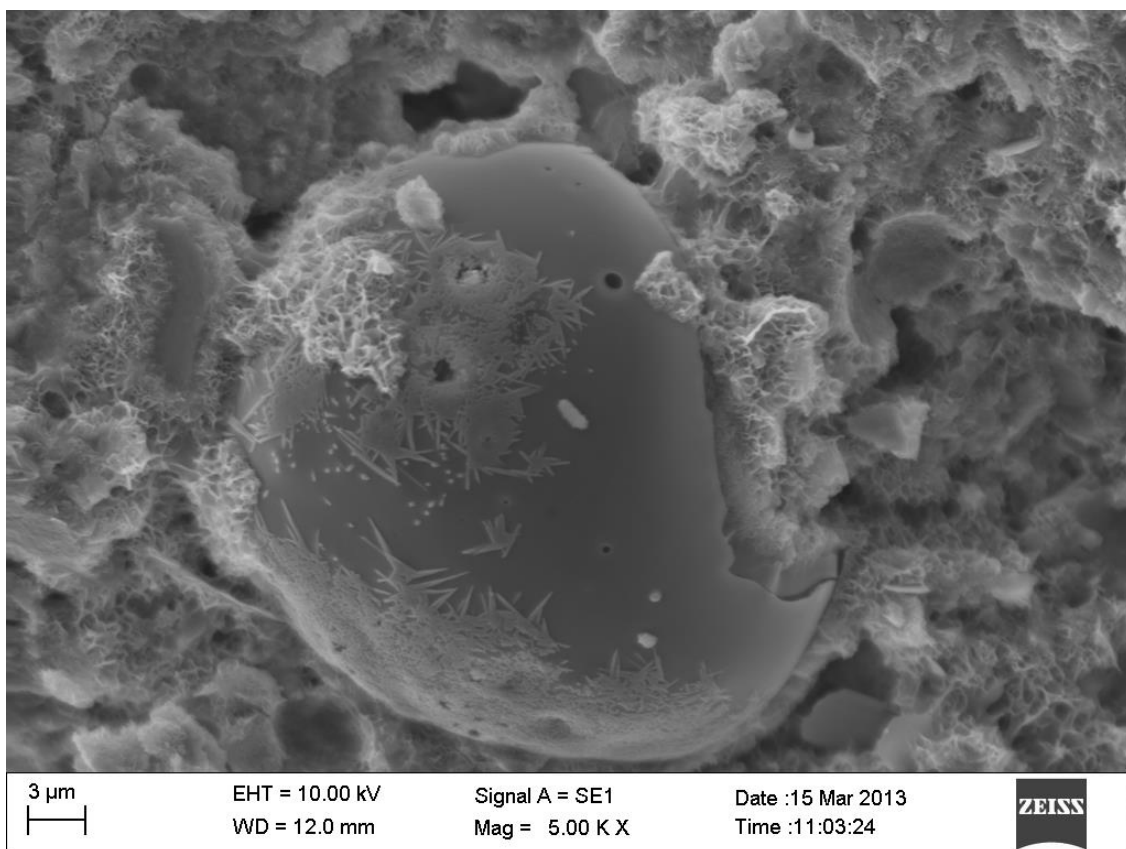
Tabulka 12: EDX analýza částice popílku po 7 dnech

Místo	Obsah prvku [%at.]											
	C	O	Na	Mg	Al	Si	Cl	K	Ca	Fe	Ti	V
1	–	61,1	11,3	1,0	2,7	9,6	2,3	2,8	9,3	–	–	–
2	7,9	59,4	1,3	2,0	9,7	10,6	–	–	5,1	1,6	2,3	0,2
3	–	42,7	6,0	0,3	10,4	23,3	3,6	6,0	7,0	–	0,9	–



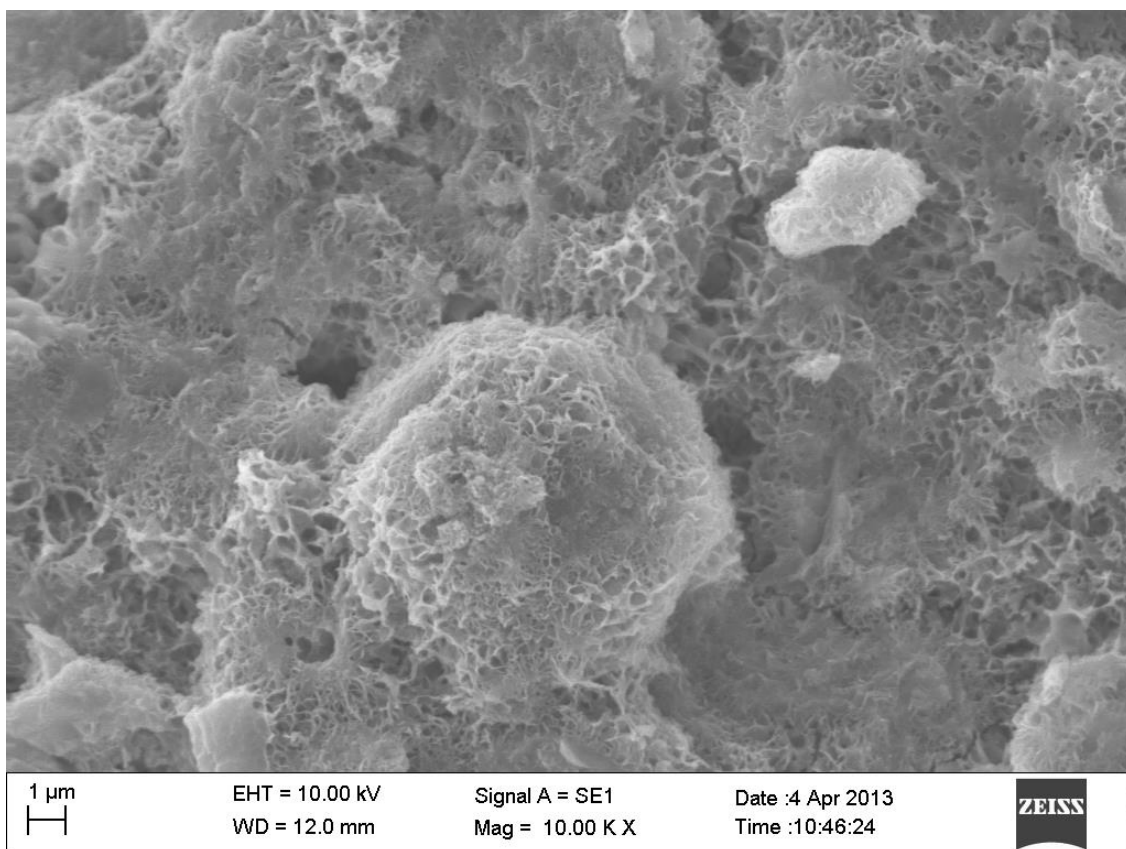
Obr. 43: Částice popílku obklopená pojivovou fází po 7 dnech

Krom již popsané částice popílku byla na lomové ploše nalezena ještě další částice popílku uvedená na obr. 44. Na této částici se nachází jisté krystalické útvary. Použití EDX analýzy by v tomto případě bylo zbytečné, jelikož by byl detekován i povrch popílku. Není teda zcela jasné, o jakou sloučeninu se jedná. Vzhledem k povaze zkoumaného materiálu je možné se domnívat, že jde o některou zeolitickou fázi. Tuto domněnku podporuje XRD analýza, která potvrdila přítomnost fáze zeolitu 5A.

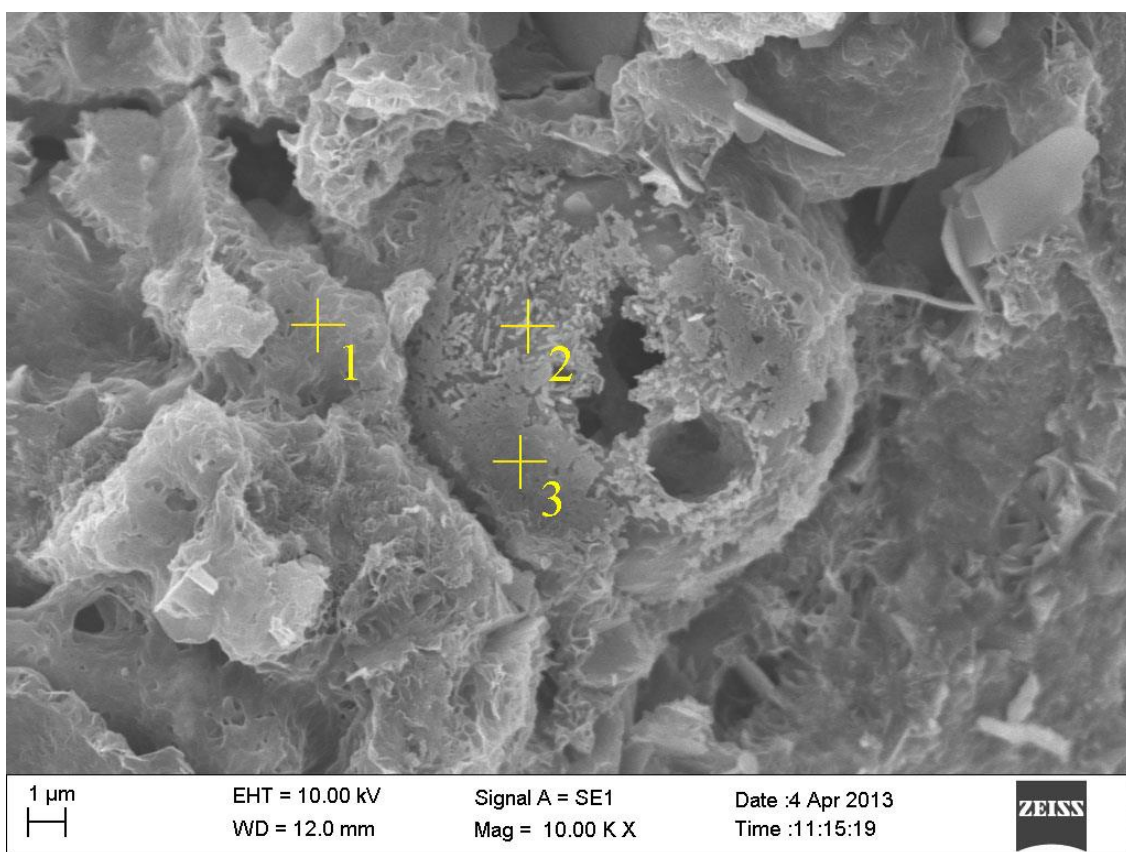


Obr. 44: Částice popílku s krystalickými útvary na povrchu (po 7 dnech)

Částice popílku po 7 dnech dále reagují s přítomnými alkáliemi a vytváří pojivovou fázi. Částice po 28 dnech může být touto fází zcela obklopena, jak je pozorováno na obr. 45. Pokročilé stádium reakce popílku po 28 dnech také znázorňuje obr. 46. Zde je povrch popílku již značně narušen a více pokryt krystalickými útvary, dříve pozorovanými na obr. 44. EDX analýzu této částice uvádí tabulka 13. Pojivová fáze (místo 1) opět obsahuje uhlík především ve formě hydrotalcitu. Analýza v místech 2 a 3 prostupuje přes krystalické útvary až na povrch popílku, což lze usuzovat z přítomnosti Ti, Fe a vysoké koncentrace hliníku.



Obr. 45: Částice popílku pokrytá pojivovou fází po 28 dnech



Obr. 46: Zreagovaná částice popílku po 28 dnech

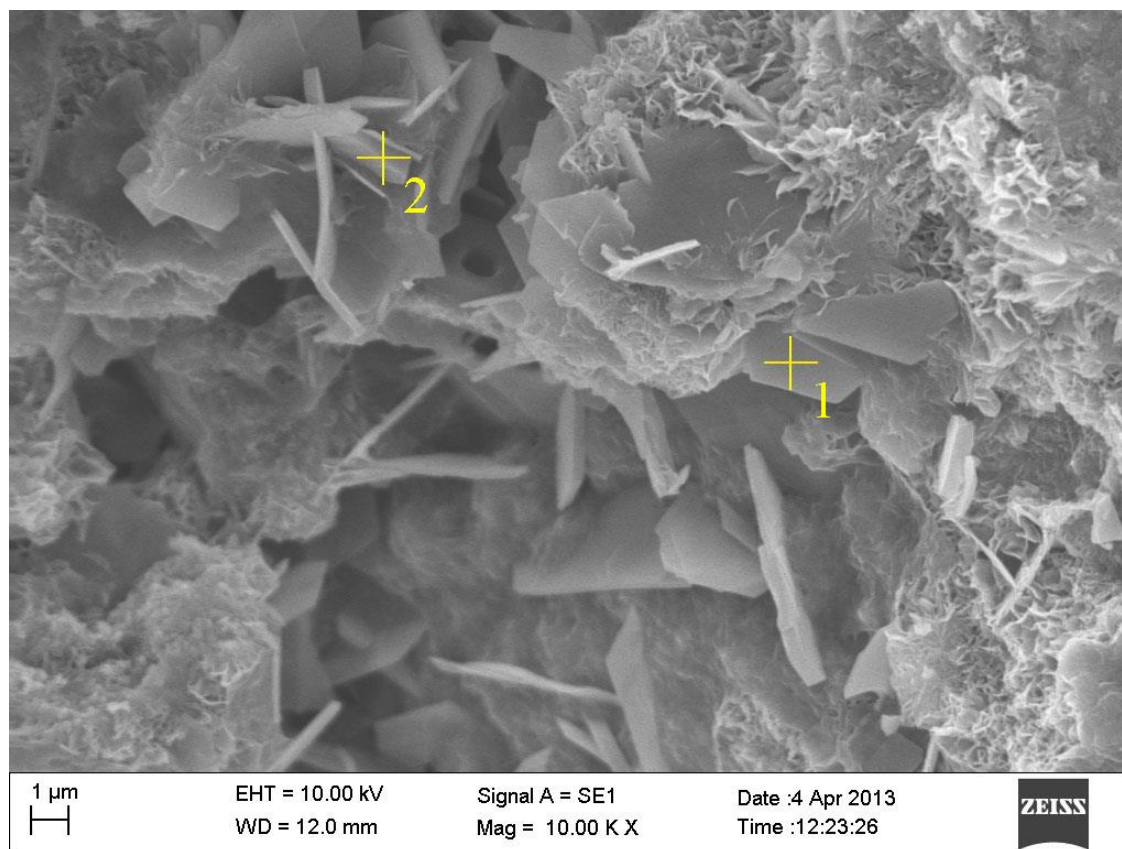
Tabulka 13: EDX analýza zreagované částice popílku po 28 dnech

Místo	Obsah prvku [%at.]										
	C	O	Na	Mg	Al	Si	Cl	K	Ca	Ti	Fe
1	9,2	51,3	5,9	1,0	3,2	12,5	2,0	2,9	12,0	–	0,1
2	8,5	63,5	0,6	0,5	12,3	11,8	–	0,6	0,6	0,5	0,5
3	–	65,6	0,6	0,6	15,2	14,9	–	0,8	1,0	0,7	0,7

Na lomové ploše vzorku po 28 dnech bylo nalezeno jedno ložisko krystalických útvarů znázorněné na obr. 47. EDX analýza těchto útvarů byla provedena celkem na 7 různých místech. Složení dvou z nich uvádí tabulka 14. Hlavními prvky v těchto útvech byl vždy vápník a kyslík v atomárním poměru 1:1, což jsem identifikoval jako tvrdě pálené vápno. Toto vápno je získáno pálením při vysokých teplotách a hydratuje velmi pomalu. Vápno bylo zřejmě součástí cementářských odprašků. Jeho výskyt v alkalicky aktivovaném materiálu po 28 dnech je však velmi kuriózní, jelikož alkálie spíše urychlují jeho hydrataci [41].

Tabulka 14: EDX analýza nalezené krystalické sloučeniny po 28 dnech

Místo	Obsah prvku [%at.]							
	C	O	Na	Al	Si	Cl	K	Ca
1	–	42,5	1,6	1,0	3,5	1,0	3,5	46,9
2	9,4	45,7	1,9	0,8	4,2	1,1	2,4	34,6



Obr. 47: Krystaly tvrdě páleného vápna v AAM po 28 dnech

5 ZÁVĚR

Tato práce se zabývala návrhem a optimalizací betonových záměsí na bázi alkalicky aktivované vysokopecní strusky a vysokoteplotního popílku. K aktivaci byl použit hydroxid sodný, částečně nahrazený levnými cementářskými odprašky. Sekundární suroviny byly charakterizovány pomocí rentgenové fluorescenční spektrometrie.

Návrh záměsí byl založen na modelu určeném pro betony na bázi portlandského cementu. Experimentálně bylo zjištěno, že tento model po několika úpravách dostačuje k návrhu betonu na bázi alkalicky aktivovaných sekundárních surovin.

Ze zjištěných vlastností připravovaných směsí lze konstatovat, že zvyšování vody a pojiva na úkor kameniva (aby byl dodržen konstantní vodní součinitel) vede ke zlepšení zpracovatelnosti podobně, jak u směsí na bázi PC. Podobně je také snížením vodního součinitele dosaženo lepších mechanických vlastností betonu. Vliv vodního součinitele však nebyl dostatečně prozkoumán. Se zvyšováním koncentrace hydroxidu sodného roste cena směsí a také jejich pevnost v tlaku. Pevnost v tlaku ovšem roste pouze do určité limitní hodnoty, která byla stanovena na 18 %hm. NaOH ve vodném roztoku. Experimentálně bylo potvrzeno, že při použití cementářských odprašků je dosaženo lepších mechanických vlastností výsledného materiálu, než bez nich. Jejich přítomnost také snižuje cenu směsí.

Z hlediska výsledné ceny, pevností v tlaku a zpracovatelnosti lze doporučit připravené směsi se záměsovým množstvím vody Z2 nebo Z3 a koncentrací NaOH v rozmezí 10–18 %hm. Volba konkrétního složení závisí na požadovaných mechanických vlastnostech a výsledné ceně.

Veškeré vzorky jevily tendence k tvorbě výkvětů, což je jeden z největších problémů alkalicky aktivovaných materiálů. Nejmenší intenzitu výkvětů vykazovaly vzorky s koncentrací NaOH 10 %hm.

Na vzorcích jedné ze směsí byla pozorována mikrostruktura pomocí skenovacího elektronového mikroskopu s rentgenovým energodisperzním analyzátozem. Bylo potvrzeno, že hlavním produktem alkalické aktivace systému vysokopecní struska/popílek je málo krystalický C-S-H gel bohatý na alkálie, s nízkým poměrem C/S. V jeho struktuře jsou také přítomny přemostující hlinitanové tetraedry.

Rentgenovou difrakční analýzou bylo prokázáno, že v materiálu vzniká hydrotalcit a zeolitická fáze identifikovaná jako zeolit 5A. Množství hydrotalcitu nebylo závislé na koncentraci NaOH, zatímco zeolit 5A vznikal pouze při nižších koncentracích NaOH.

Srovnáním cen a výsledných mechanických vlastností připravených betonů lze konstatovat, že beton na bázi alkalicky aktivovaných sekundárních surovin je značně levnější, než beton na bázi portlandského cementu při zachování stejných mechanických vlastností. Připravovaný beton zároveň klade důraz na ekologii využitím sekundárních surovin. K úspěšné aplikaci těchto betonů je třeba hlubšího výzkumu jejich vlastností, zejména trvanlivosti.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] The concrete conundrum. *Chemistry World*. 2008, Vol 5, No 3, s. 62–66. Dostupné z: http://www.rsc.org/images/Construction_tcm18-114530.pdf
- [2] SVAZ VÝROBCŮ BETONU. *EBeton - Specialista na beton* [online]. © 2010 [cit. 2012-11-10]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/encyklopedie/>
- [3] JIRÁSEK, Jakub a Martin VAVRO. *Nerostné suroviny a jejich využití*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2008, 1 CD-ROM. ISBN 978-80-248-1378-3.
- [4] *Mineral Commodity Summaries 2012*. Geological Survey. ISBN 978-141-1333-499.
- [5] KHURANA, Shaleen, Rangan BANERJEE a Uday GAITONDE. Energy balance and cogeneration for a cement plant. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2002, roč. 22, č. 5, s. 485-494 [cit. 2012-11-10]. ISSN 13594311. DOI: 10.1016/S1359-4311(01)00128-4. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359431101001284>
- [6] SHI, C., P. V. KRIVENKO a D. ROY. *Alkali-activated cements and concretes*. London: Taylor, 2006, ix, 376 s. ISBN 04-157-0004-3.
- [7] ŠKVÁRA, F. Alkali activated materials or geopolymers. *Ceramics - Silikáty*. Říčany: SK Press, 2007, roč. 51, č. 3, s. 173-177. ISSN 0862-5468.
- [8] PALOMO, A. a A. FERNANDEZ-JIMÉNEZ. Alkaline activation of fly ashes. Manufacture of concretes not containing portland cement. In: EDITED BY ENRIC VÁZQUEZ, Charles F a Use of Recycled Materials ORGANIZED BY RILEM TC 198-URM. *International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures: Barcelona, Spain, 8-11 November 2004*. Bagneux, France: RILEM Publications, 2004, s. 863-870. ISBN 2-912143-52-7.
- [9] ŠKVÁRA, F. Aluminosilikátové polymery (geopolymery). *Sklář a keramik*. 2010, č. 60, s. 61-63. ISSN 0037-637x.
- [10] LEDEREROVÁ, Jaroslava a Pavel LEBER. Využití průmyslových odpadních materiálů při výrobě stavebních hmot. *Časopis stavebnictví: časopis stavebních inženýrů, techniků a podnikatelů*. Brno: EXPO DATA, 2008, č. 4. ISSN 1802-2030.
- [11] SIDDIQUE, Rafat. *Waste materials and by-products in concrete*. Berlin: Springer, c2008, xvi, 413 p. ISBN 35-407-4293-X.
- [12] KOMLJENović, M., Z. BAŠČAREVIĆ a V. BRADIĆ. Mechanical and microstructural properties of alkali-activated fly ash geopolymers. *Journal of Hazardous Materials*. 2010, roč. 181, 1-3, s. 35-42. ISSN 03043894. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2010.04.064. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304389410005108>
- [13] SIDDIQUE, Rafat a Anita RAJOR. Use of cement kiln dust in cement concrete and its leachate characteristics. *Resources, Conservation and Recycling*. 2012, roč. 61, s. 59-68. ISSN 09213449. DOI: 10.1016/j.resconrec.2012.01.006. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921344912000079>

- [14] PIŠTĚKOVÁ, Marie, Vítězslav OTRUBA a Viktor KANICKÝ. Analýza vysokopecních strusek optickou emisní spektrometrií s indukčně vázaným plazmatem s laserovou ablací. *Chemické listy* [online]. 2010, vol. 104, č. 7, s. 697-703 [cit. 2013-02-02]. ISSN 1213-7103. Dostupné z:
http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2010_07_697-703.pdf
- [15] NATIONAL SLAG ASSOCIATION. *SLAG: The Construction Material of Choice*. Wayne (Pennsylvania), 2009. Dostupné z:
http://www.nationalslag.org/archive/nsa_blast_furnace_brochure.pdf
- [16] DAVIDOVITS, Joseph. GEOPOLYMERS: Man-Made Rock Geosynthesis and the Resulting Development of Very Early High Strength Cement. *The Journal of materials education*. 1994, roč. 16, 2&3, s. 91-139. ISSN 0738-7989. Dostupné z: http://www.geopolymer.org/fichiers_pdf/NASTS.pdf
- [17] DAVIDOVITS, Joseph. The need to create a new technical language for the transfer of basic scientific information. In: GIBB, J a Denis NICOLAY. *Transfer and exploitation of scientific and technical information: proceedings of the symposium held by the Commission of the European Communities, Directorate-General Information Market and Innovation in Luxembourg, 10 to 12 June 1981*. [Washington, D.C.: Sold by European Community Information Service], 1982c1981, s. 316-320. ISBN 92-825-2837-5.
- [18] KHALE, Divya a Rubina CHAUDHARY. Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review. *Journal of Materials Science*. 2007-2-12, roč. 42, č. 3, s. 729-746. ISSN 0022-2461. DOI: 10.1007/s10853-006-0401-4. Dostupné z: <http://www.springerlink.com/index/10.1007/s10853-006-0401-4>
- [19] DAVIDOVITS, Joseph. Properties of geopolymer cements. In: *Proceedings First International Conference on Alkaline Cements and Concretes*. Kiev, Ukraine: Scientific Research Institute on Binders and Materials, 1994, s. 131-149.
- [20] MUSTAFA AL BAKRI, A. M., H. KAMARUDIN, M. BNHUSSAIN, I. KHAIRUL NIZAR a W. I. W. MASTURA. Mechanism and Chemical Reaction of Fly Ash Geopolymer Cement- A Review. *Journal of Asian Scientific Research*. 2011, roč. 1, č. 5, s. 247-253. Dostupné z:
<http://econpapers.repec.org/scripts/redir.pf?u=http%3A%2F%2Fwww.aessweb.com%2Fdownload.php%3Fid%3D1054;h=repec:asi:joasrj:2011:p:247-253>
- [21] BARBOSA, Valeria F.F, Kenneth J.D MACKENZIE a Clelio THAUMATURGO. Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers. *International Journal of Inorganic Materials*. 2000, roč. 2, č. 4, s. 309-317. ISSN 14666049. DOI: 10.1016/S1466-6049(00)00041-6. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1466604900000416>
- [22] INSTITUT GÉOPOLYMÈRE. *Geopolymer Institute* [online]. © 1996-2013 [cit. 2013-02-10]. Dostupné z: <http://www.geopolymer.org/>
- [23] XU, Hua. *Geopolymerisation of Aluminosilicate Minerals*. Melbourne, 2002. Dissertation. University of Melbourne.

- [24] NAJAFI KANI, Ebrahim, Ali ALLAHVERDI a John L. PROVIS. Efflorescence control in geopolymer binders based on natural pozzolan. *Cement and Concrete Composites*. 2012, roč. 34, č. 1, s. 25-33. ISSN 09589465. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2011.07.007. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946511001272>
- [25] KONSTA-GDOUTOS, Maria S. a Surendra P. SHAH. Hydration and properties of novel blended cements based on cement kiln dust and blast furnace slag. *Cement and Concrete Research* [online]. 2003, roč. 33, č. 8, s. 1269-1276 [cit. 2013-03-02]. ISSN 00088846. DOI: 10.1016/S0008-8846(03)00061-9. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884603000619>
- [26] SIDDIQUE, Rafat. Utilization of cement kiln dust (CKD) in cement mortar and concrete – an overview. *Resources, Conservation and Recycling*. 2006, roč. 48, č. 4, s. 315-338. ISSN 09213449. DOI: 10.1016/j.resconrec.2006.03.010. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921344906000450>
- [27] KUPWADE-PATIL, Kunal a Erez ALLOUCHE. *Effect of Alkali Silica Reaction on Geopolymer Concrete*. World of Coal Ash Conference, Denver, 2011. Dostupné z: <http://www.flyash.info/2011/155-Patil-2011.pdf>
- [28] DUXSON, Peter, John L. PROVIS, Grant C. LUKEY, Seth W. MALLICOAT, Waltraud M. KRIVEN a Jannie S.J. VAN DEVENTER. Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2005, roč. 269, 1-3, s. 47-58. ISSN 09277757. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2005.06.060. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0927775705004966>
- [29] COLLEPARDI, Mario. *Moderní beton*. 1. vyd. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009, 342 s. Betonové stavitelství. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [30] PAL, S.C, A MUKHERJEE a S.R PATHAK. Investigation of hydraulic activity of ground granulated blast furnace slag in concrete. *Cement and Concrete Research*. 2003, roč. 33, č. 9, s. 1481-1486. ISSN 00088846. DOI: 10.1016/S0008-8846(03)00062-0. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884603000620>
- [31] DAVIDOVITS, Joseph. *Geopolymer: chemistry*. 2nd ed. Saint-Quentin: Institute Géopolymère, 2008, 587 s. ISBN 29-514-8201-9.
- [32] FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A., A. PALOMO a M. CRIADO. Microstructure development of alkali-activated fly ash cement: a descriptive model. *Cement and Concrete Research*. 2005, roč. 35, č. 6, s. 1204-1209. ISSN 00088846. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.08.021. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884604004053>
- [33] AÏTCIN, Pierre-Claude. *Vysokohodnotný beton*. 1. české vyd. Praha: ČKAIT, 2005, 320 s. Betonové stavitelství. ISBN 80-867-6939-9.
- [34] Využití vedlejších produktů uhelných elektráren. ČEZ, a. s. *Skupina ČEZ* [online]. Copyright 2013 [cit. 2013-03-25]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/odpovedna-firma/zivotni-prostredi/programy-snizovani-zateze-zp/vyuziti-vedlejsich-produktu-uhelných-elektřáren.html>

- [35] ROWLES, Matthew Ryan. *The structural nature of aluminosilicate inorganic polymers: a macro to nanoscale study*. Bentley, W.A., 2004. PhD Thesis. Curtin University of Technology.
- [36] PYTLÍK, Petr. *Technologie betonu*. 2. vyd. Brno: VUTIUM, 2000, 390 s. ISBN 80-214-1647-5.
- [37] KALINA, L. *Syntéza aluminosilikátových systémů na bázi geopolymérů orientovaná na využívání sekundárních surovin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2011. 106 s. Školitel prof. Ing. Jaromír Havlica, DrSc.
- [38] KLEČKA, Tomáš. ČESKOMORAVSKÝ CEMENT, a.s. *Beton: příručka technologa*. 1. vyd. 2010. Dostupné z:
http://www.heidelbergcement.com/NR/rdonlyres/3C0A2CE4-C25E-472C-9690-570271F4E311/0/Prirucka_technologa_BETON.pdf
- [39] LI, Chao, Henghu SUN a Longtu LI. A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+Ca) and metakaolin (Si+Al) cements. *Cement and Concrete Research*. 2010, roč. 40, č. 9, s. 1341-1349. ISSN 00088846. DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.03.020. Dostupné z:
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S000888461000089X>
- [40] BEAUDOIN, James J., Laila RAKI, Rouhollah ALIZADEH a Lyndon MITCHELL. Dimensional change and elastic behavior of layered silicates and Portland cement paste. *Cement and Concrete Composites*. 2010, roč. 32, č. 1, s. 25-33. ISSN 09589465. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2009.09.004. Dostupné z:
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946509001462>
- [41] DENG, Min, Dongwen HONG, Xianghui LAN a Mingshu TANG. Mechanism of expansion in hardened cement pastes with hard-burnt free lime. *Cement and Concrete Research* [online]. 1995, roč. 25, č. 2, s. 440-448 [cit. 2013-04-21]. ISSN 00088846. DOI: 10.1016/0008-8846(95)00030-5. Dostupné z:
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0008884695000305>
- [42] Lyse, I., "Tests on consistency and strength of concrete having constant water content, Proc. ASTM, Vol. 32 (1932), p. 629, Reprint No. 32 (32-7)" (1932). *Fritz Laboratory Reports*. Paper 2. Dostupné z: <http://preserve.lehigh.edu/engr-civil-environmental-fritz-lab-reports/2>
- [43] TAIHEIYO CEMENT CORP [JP]. *Cement kiln chlorine/sulfur bypass system* [online]. Inventor: Harada Hiroshi. EP1574487 (B1). Int. Cl. B01D50/00; B07B7/08; C04B7/36; C04B7/60; F27B7/20; F27D17/00. Appl. no. EP20030812673 20030813. European Patent. [vid. March 3 2013]. Available from:
<http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?CC=EP&NR=1574487B1&KC=B1&FT=D>
- [44] ČESKOMORAVSKÝ BETON, a.s. *Katalog transportbetonu a značkových produktů*. Brno, 2013.
- [45] Zeolite Molecular Sieve. XINYUAN TECHNOLOGY CO., Ltd. *Xinyuan Molecular Sieve* [online]. © 2006 - 2011 [cit. 2013-04-25]. Dostupné z:
http://www.molecularsieve.org/Zeolite_Molecular_Sieve.htm

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

AAM	alkalicky aktivovaný materiál
ASTM	American Society for Testing and Materials
C/S	poměr vápník/křemík
CBPD	cementářské odprašky z bypassu (cement bypass dust)
CKD	cementářské odprašky (cement kiln dust)
C-S-H	kalciurn-silikátový-hydrát
EDX	energo-disperzní analýza rentgenového záření
GBBS	mletá granulovaná vysokopecní struska (ground granulated blast furnace slag)
CH	hydroxid vápenatý
MAS NMR	Magic Angle Spinning Nuclear Magnetic Resonance
NPSK	nasycené, povrchově suché kamenivo
N(K)ASH	alkalický aluminosilikátový hydrát
PC	portlandský cement
S*	amorfní SiO ₂
SEM	skenovací elektronová mikroskopie
VP struska	vysokopecní struska
w/b	vodní součinitel (poměr voda/pojivo)
w/c	vodní součinitel (poměr voda/cement)
XRD	rentgenová difrakce (X-ray Diffraction)
XRF	fluorescenční prvková analýza (X-ray Fluorescence)

SEZNAM PŘÍLOH

A Fluorescenční prvková analýza (XRF)

- A.1 VP struska Ostrava 380
- A.2 Vysokoteplotní popílek Počerady 5B
- A.3 Cementářské odprašky

B Rentgenová difrakční analýza (XRD)

- B.1 VP struska Ostrava 380
- B.2 Vysokoteplotní popílek Počerady 5B
- B.3 Cementářské odprašky

A FLUORESCENČNÍ PRVKOVÁ ANALÝZA (XRF)

A.1 VP struska Ostrava 380

Hlavní oxidy										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	SO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅
%	34,7	9,05	41,1	0,41	0,9	10,5	1,46	0,25	0,96	0,02
Doplňkové oxidy										
	MnO	SrO	ZrO ₂							
%	0,55	0,08	0,03							

A.2 Vysokoteplotní popílek Počerady 5B

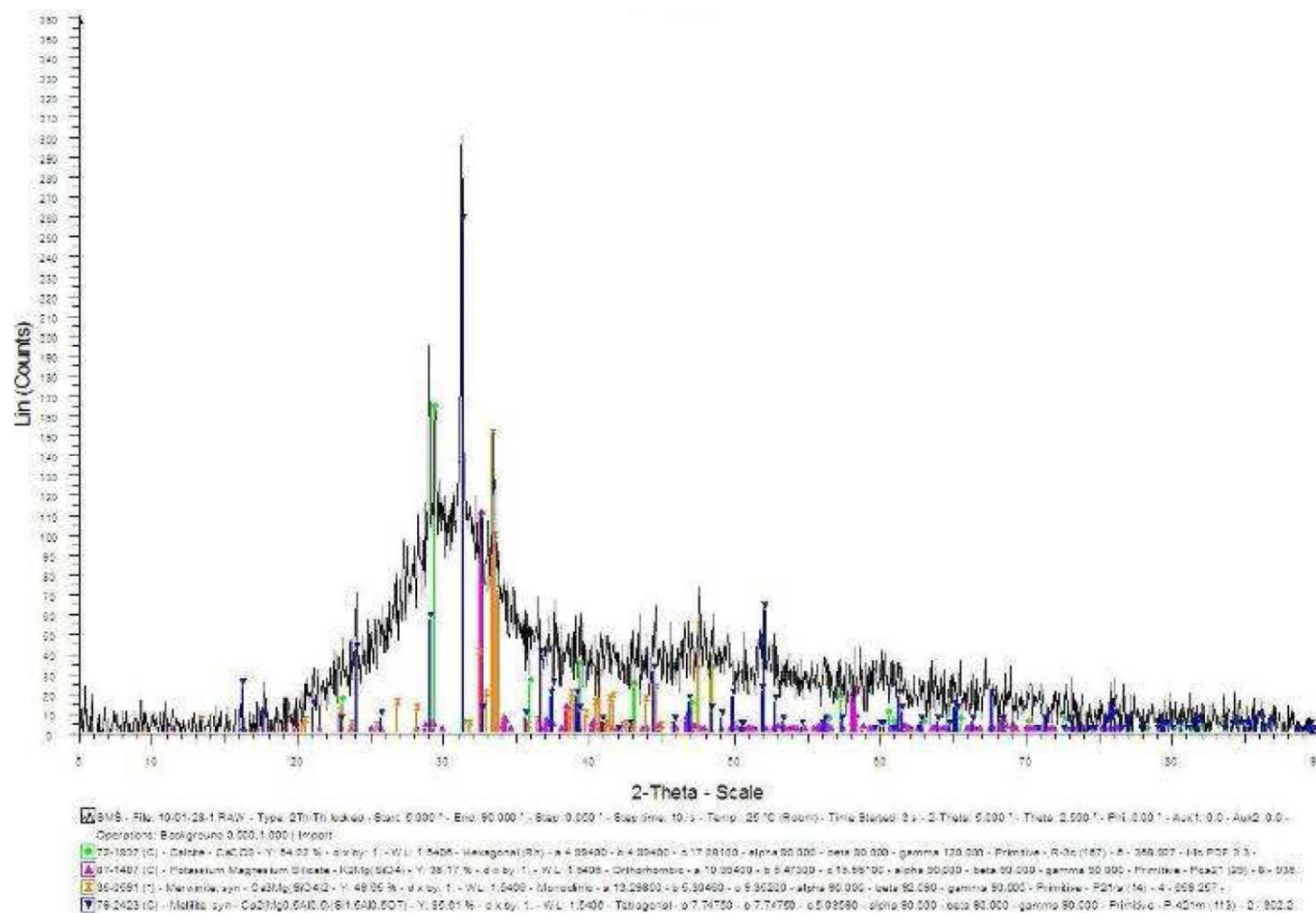
Hlavní oxidy										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	SO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅
%	47,3	29,8	4,31	0,88	1,51	1,29	1,06	19,2	1,43	0,27
Doplňkové oxidy										
	Cr ₂ O ₃	MnO	V ₂ O ₅	CoO	NiO	CuO	ZnO	As ₂ O ₃	Rb ₂ O	ZrO ₂
%	0,02	0,18	0,07	0,02	0,02	0,03	0,07	0,08	0,02	0,03
	SrO	BaO	CeO ₂	Tb ₄ O ₇						
%	0,04	0,1	0,04	0,02						

A.3 Cementářské odprašky

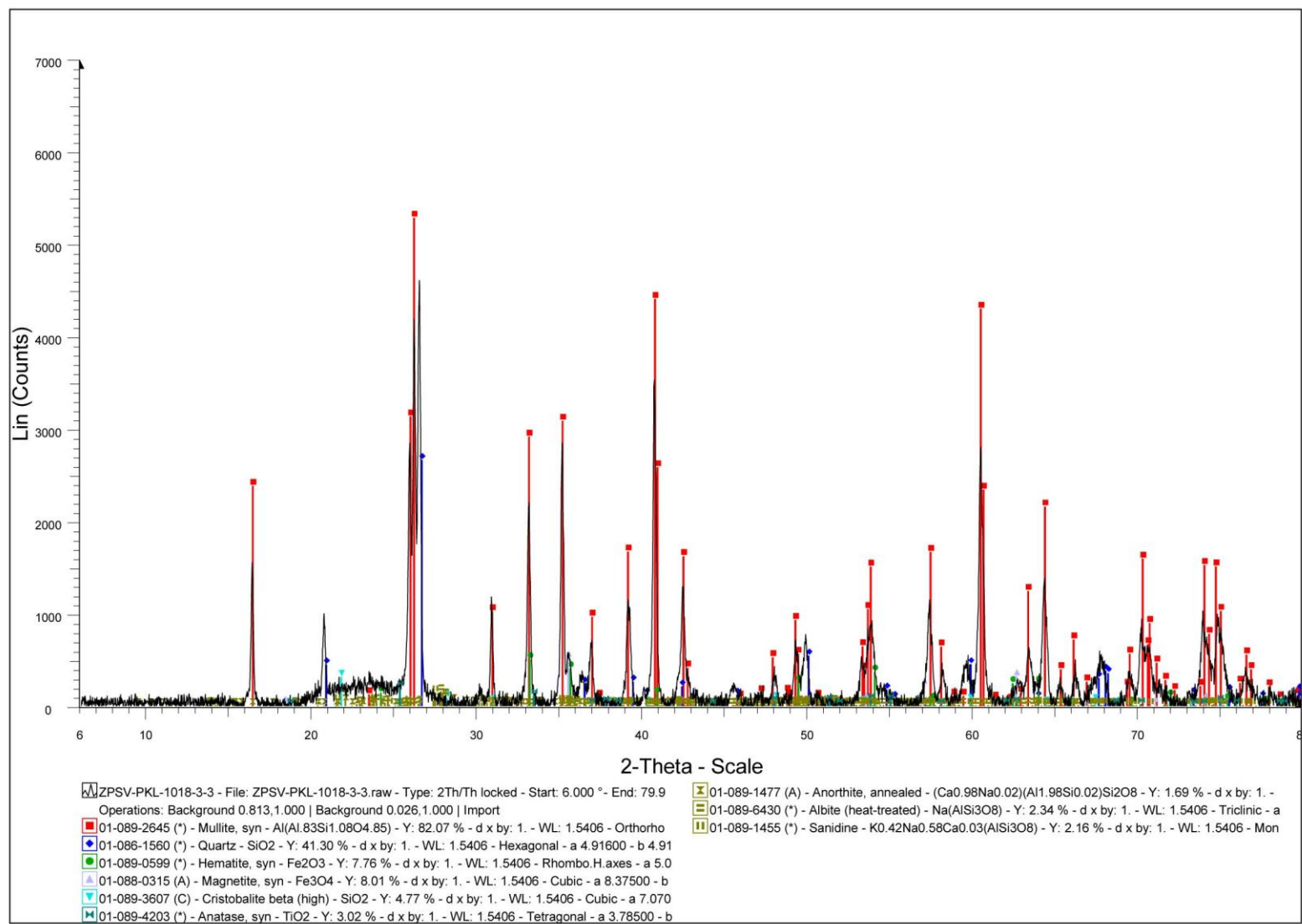
Prvek	Ca	Br	Pb	Cu	K	Cl	S	Fe	Zn
%	21,3	1,4	1,8	0,1	36,2	31,8	5,1	1,2	1,0

B RENTGENOVÁ DIFRAKČNÍ ANALÝZA (XRD)

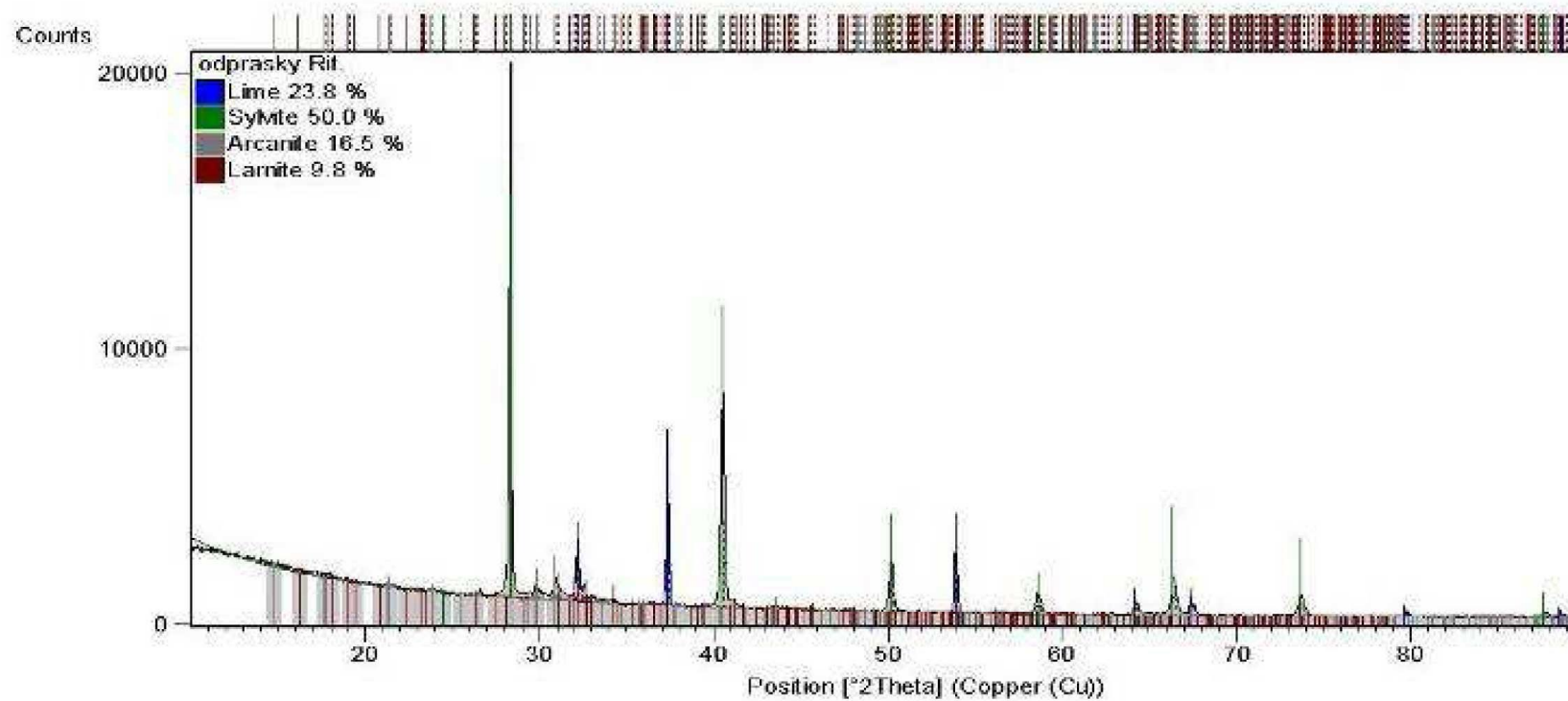
B.1 VP struska Ostrava 380



B.2 Vysokoteplotní popílek Počerady 5B



B.3 Cementářské odprašky



Peak List
Ca4.00 O4.00; Lime; Lime; SO: 21 [%]
K4.00 CH.00; Sylvite; Sylvite; SO: 42 [%]
K8.00 S4.00 O16.00; Arcanite; Arcanite; SO: 18 [%]
Ca8.00 Si4.00 O16.00; Larnite; Larnite; SO: 19 [%]