



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA CHEMICKÁ

FACULTY OF CHEMISTRY

ÚSTAV CHEMIE MATERIÁLŮ

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE

STUDIUM MECHANISMU PŮSOBENÍ PŘÍRAD REDUKUJÍCÍ SMRŠTĚNÍ V ALKALICKY AKTIVOVANÝCH MATERIÁLECH

On the mechanisms of shrinkage reducing admixtures in alkali activated materials

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. KATEŘINA KOMOSNÁ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. LUKÁŠ KALINA, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání diplomové práce

Číslo diplomové práce: FCH-DIP1089/2016
Ústav: Ústav chemie materiálů
Student(ka): **Bc. Kateřina Komosná**
Studijní program: Chemie, technologie a vlastnosti materiálů (N2820)
Studijní obor: Chemie, technologie a vlastnosti materiálů (2808T016)
Vedoucí práce: **Ing. Lukáš Kalina, Ph.D.**
Akademický rok: 2016/2017

Název diplomové práce:

Studium mechanismu působení přísad redukující smrštění v alkalicky aktivovaných materiálech

Zadání diplomové práce:

měření povrchového napětí přísad redukující smrštění (SRA) v alkalických systémech
charakteristika porového roztoku alkalicky aktivované strusky
zjištění vlivu SRA na hydrataci, mechanické vlastnosti a smrštění alkalicky aktivovaného materiálu

Termín odevzdání diplomové práce: 5.5.2017

Diplomová práce se odevzdává v děkanem stanoveném počtu exemplářů na sekretariát ústavu. Toto zadání je součástí diplomové práce.

Bc. Kateřina Komosná
Student(ka)

Ing. Lukáš Kalina, Ph.D.
Vedoucí práce

prof. RNDr. Josef Jančář, CSc.
Ředitel ústavu

V Brně, dne 31.1.2017

prof. Ing. Martin Weiter, Ph.D.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zaměřuje na principy působení přísad redukujících smrštění (SRA) v alkalicky aktivovaných materiálech na bázi vysokopecní strusky. Hlavní náplní této práce je na základě provedených experimentů, vybrat nejvhodnější přísadu, pomocí které bude dosaženo minimálního smrštění a současně nebude mít negativní vliv na vlastnosti alkalicky aktivované strusky.

V experimentální části této práce bylo v první řadě měřeno povrchové napětí jak jednotlivých přísad, tak jejich směsi s porovým roztokem. Následně byly připraveny zkušební vzorky ze směsi vysokopecní strusky, vodního skla a přísady redukující smrštění. U těchto vzorků bylo měřeno jejich smrštění a úbytek hmotnosti. Kromě toho byly sledovány mechanické vlastnosti těchto vzorků jako pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku. Dále byl u těchto směsí stanoven počátek a konec tuhnutí pomocí Vicatova přístroje a v neposlední řadě také zpracovatelnost. Hydratační proces alkalicky aktivovaných materiálů při působení SRA byl měřen na základě kalorimetrické analýzy. Mikrostruktura připravených vzorků byla pozorována pomocí skenovací elektronové mikroskopie (SEM-EDS) a měření celkové porozity vzorků bylo provedeno pomocí rtuťového porozimetru.

KLÍČOVÁ SLOVA: Alkalická aktivace, vysokopecní struska, smrštění

ABSTRACT

This thesis is focused on the principles of behavior of shrinkage reducing agents (SRA) in alkali-activated materials based on blast furnace slag. The main focus of this work is selecting the most suitable admixture based on experiments, by which will be achieved through minimal shrinkage and will have negative effect on the properties of alkali-activated blast furnace slag at the same time.

In experimental section of this work, the surface tension as individual additives as their mixtures with pore solution were measured primarily. Then the testing samples composed of blast furnace slag, water glass and addition of SRA were prepared. Of these samples was measured shrinkage and weight loss. Moreover, their mechanical properties such as flexural and compressive strength were monitored. Next, the beginning and the end of solidification was studied using the Vicat device and last but not least workability. The hydration process of alkali-activated materials with SRA was measured calorimetrically. Finally the microstructure in prepared samples was observed using scanning electron microscopy (SEM-EDS) and the total porosity was determined by mercury porosimeter.

KEYWORDS: Alkali activation, blast furnace slag, shrinkage

KOMOSNÁ, K. *Studium mechanismu působení přísad redukující smrštění v alkalicky aktivovaných materiálech*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2017. 48 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Lukáš Kalina, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citovala. Diplomová práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího diplomové práce a děkana FCH VUT.

.....
Podpis studenta

Poděkování:

Ráda bych poděkovala vedoucímu mojí diplomové práce Ing. Lukáši Kalinovi, Ph.D. za věnovaný čas ke konzultacím, ochotu při řešení problémů a pomoc při vypracování této práce. Dále bych chtěla poděkovat Centru materiálového výzkumu za poskytnutí materiálu a přístrojů potřebných k realizaci experimentální části práce.

OBSAH

1	ÚVOD.....	7
2	CÍL PRÁCE.....	7
3	TEORETICKÁ ČÁST.....	8
3.1	Alkalicky aktivované materiály.....	8
3.1.1	Historie a současnost.....	8
3.1.2	Definice.....	8
3.1.3	Suroviny pro alkalickou aktivaci.....	9
3.1.3.1	Vysokopecní struska.....	9
3.1.3.2	Vodní sklo.....	10
3.1.4	Fyzikálně-chemické vlastnosti AAM.....	11
3.2	Smrštění.....	12
3.2.1	Princip smrštění.....	12
3.2.2	Autogenní smrštění.....	13
3.2.3	Plastické smrštění.....	13
3.2.4	Smrštění vysýcháním.....	14
3.2.5	Karbonatační smrštění.....	14
3.3	Přísady redukující smrštění.....	14
3.3.1	Struktura SRA.....	15
3.3.2	Vliv SRA na smrštění.....	16
3.3.3	Působení SRA v AAM.....	17
4	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	19
4.1	Výchozí suroviny a chemikálie.....	19
4.1.1	Vysokopecní struska.....	19
4.1.2	Kamenivo.....	19
4.1.3	Sodné vodní sklo.....	19
4.1.4	Voda.....	20
4.1.5	Přísady redukující smrštění (SRA).....	20
4.2	Měření povrchového napětí bublinovým tenziometrem.....	20
4.3	Emisní plazmová spektrometrie (ICP-OES).....	21
4.4	Příprava testovacích vzorků.....	22
4.4.1	Příprava konkrétních směsí.....	22

4.5	Stanovení smrštění.....	23
4.6	Rtuťová porozimetrie.....	23
4.7	Skenovací elektronová mikroskopie (SEM-EDS).....	24
4.8	Pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku.....	24
4.9	Izotermální kalorimetrie.....	24
4.10	Vicatův přístroj.....	25
4.11	Zkouška rozlitím.....	26
5	VÝSLEDKY A DISKUZE.....	27
5.1	Měření povrchového napětí.....	27
5.2	Měření smrštění.....	29
5.3	Měření porozity a distribuce velikosti pórů.....	32
5.4	Pozorování mikrostruktury a prvková analýza.....	33
5.5	Stanovení pevností.....	36
5.5.1	Pevnosti v tahu za ohybu.....	36
5.5.2	Pevnosti v tlaku.....	38
5.6	Kalorimetrická stanovení.....	39
5.7	Stanovení doby tuhnutí.....	40
5.8	Stanovení zpracovatelnosti.....	41
6	ZÁVĚR.....	43
7	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	45
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ.....	48

1 ÚVOD

V současné době zaznamenává stavební průmysl velký rozvoj, se kterým souvisí řada nových trendů. Vznikají výrobci i stavební společnosti zaměřující se na netradiční a inovativní produkty. Využívají se nové materiály, technologie a stavební postupy, díky nimž získáváme další možnosti v tomto odvětví.

Přestože jde vývoj stavebních postupů stále dopředu, je portlandský cement celosvětově nejvíce používaným stavebním pojivem již několik desítek let [1]. Výroba portlandského cementu je však energeticky i ekonomicky náročný proces. Největší nevýhodou tohoto pojiva je ale produkce velkého množství oxidu uhličitého, který vzniká při jeho výrobě. Příčinou uvolňování značného množství oxidu uhličitého je rozklad vápence při výpalu výchozí surovinové směsi. Emise tohoto oxidu tak spolu s dalšími plyny způsobuje skleníkový efekt v atmosféře, což následně vede k dalším klimatickým změnám jako je například globální oteplování [1]. Díky rostoucí produkci portlandského cementu narůstají i problémy s devastací životního prostředí v důsledku zvýšené těžby vápence v lomech. Proto je snaha najít nové metody a materiály, které nebudou tak zatěžovat přírodu a zároveň u nich bude docíleno lepších nebo alespoň podobných vlastností jako má portlandský cement.

Díky snaze o nalezení alternativních pojiv nezatěžujících životní prostředí se dostáváme k alkalicky aktivovaným materiálům, které se v posledních letech těší stále větší popularitě. Hlavní složkou těchto materiálů jsou hlinitokřemičitany, které jsou produkovány zejména jako odpadní nebo sekundární průmyslové suroviny z elektrárenského a metalurgického průmyslu (např. popílky a vysokopecní struska). Protože však nejsou alkalicky aktivované materiály dostatečně prozkoumané, nejsou ani jejich vlastnosti dovedeny až k takové dokonalosti, aby zcela nahradily portlandský cement coby nejpoužívanější stavební materiál.

Jednou z negativních vlastností alkalicky aktivovaných materiálů je výrazné smrštění oproti betonům z portlandského cementu, zejména pokud jsou aktivovány vodním sklem. Proto je v této práci studována problematika smrštění těchto materiálů, aby je bylo možné využít ve stavební praxi.

2 CÍL PRÁCE

Hlavním cílem této diplomové práce je co nejvíce prozkoumat a zároveň minimalizovat smrštění alkalicky aktivované strusky pomocí organických přísad. Na základě literární rešerše provést experimenty, které povedou ke zjištění toho, jak působí přísady redukcující smrštění v alkalicky aktivovaných systémech.

Jednotlivé kroky této práce jsou shrnuty v následujících bodech:

- Literární rešerše
- Měření povrchového napětí přísad redukcující smrštění (SRA) v alkalických systémech
- Charakteristika porového roztoku alkalicky aktivované strusky
- Zjištění vlivu SRA na hydrataci, mechanické vlastnosti a smrštění alkalicky aktivovaného materiálu

3 TEORETICKÁ ČÁST

3.1 Alkalicky aktivované materiály

3.1.1 Historie a současnost

První poznatky o alkalicky aktivovaných materiálech, na které bylo nahlíženo jako na vhodnou alternativu portlandského cementu, pochází již z první poloviny 20. století, konkrétně z roku 1908 [2].

Teprve až v roce 1969 byla tato pojiva složená z hlinitokřemičitanových odpadů, tedy různých typů strusek a alkalických roztoků průmyslového odpadu, patentována a to zejména díky výzkumu profesora Gluchovského [3].

Až do nedávné doby se však na alkalicky aktivované materiály nahlíželo jako na akademickou kuriozitu s možným uplatněním v průmyslu, a ne jako na plnohodnotnou náhradu portlandského cementu [2]. Tato pojiva jsou často založena na průmyslových vedlejších produktech nebo odpadech. Z této široké skupiny materiálů je alkalicky aktivovaná struska (AAS) pravděpodobně nejslibnějším materiálem pro stavební účely, protože může dosahovat lepších mechanických vlastností i při pokojové teplotě, a to zejména, pokud je aktivována vodním sklem. V nedávných studiích bylo zjištěno, že AAS má stejnou nebo dokonce lepší odolnost vůči agresivnímu prostředí, než má portlandský cement. AAS vyniká také odolností zvýšeným teplotám, zmrazování a rozmrazování. Nicméně, AAS má i své nevýhody, které značně omezují její praktické využití. Nevýhodami jsou zejména rychlé tuhnutí a vysoké autogenní smrštění a smrštění vysycháním [3, 4].

Smrštění vysycháním u AAS pojiv je obvykle několikanásobně vyšší než u portlandského cementu. Tento jev je většinou přisuzovaný vyššímu obsahu mesopórů v AAS nebo různé povaze CSH gelu [2, 4].

V současné době nacházejí alkalicky aktivované systémy hlavní a největší uplatnění ve stavebnictví. Protože vynikají dobrými mechanickými vlastnostmi, tvarovou stabilitou a žáruvzdorností, mohou být alkalicky aktivované betony využity zejména jako malty a betony v prefabrikovaném průmyslu ke konstrukci staveb. Velmi užitečné použití alkalicky aktivovaných materiálů lze nalézt i v procesu stabilizace odpadů. Smícháním odpadu s alkalicky aktivovaným pojivem, vzniká pevná monolitická látka a sníží se tak pravděpodobnost uvolňování nebezpečných složek do životního prostředí. Tohoto procesu se využívá hlavně při likvidaci nebezpečných a radioaktivních odpadů. Používání alkalicky aktivovaných materiálů je v posledních letech čím dál více populárnější a to zejména kvůli výhodám, které mají oproti cementovým tmelům, jako je například vysoká pevnost a dobrá chemická odolnost za cenu malých nákladů na energii [2, 5].

3.1.2 Definice

Alkalicky aktivované materiály (AAM) se řadí mezi anorganické sloučeniny, konkrétně jde o alkalické aluminosilikáty. Jak je již z názvu patrné, tyto materiály vznikají alkalickou aktivací aluminosilikátů a následně probíhá jejich polykondenzační reakce. Polykondenzace je proces, při němž dochází k propojení aniontů Al a Si přes sdílené atomy kyslíku [6]. Takto vzniklá pojiva tvoří trojrozměrnou síť, kde jsou náhodně uspořádány tetraedry SiO_4 a AlO_4 .

Tato struktura je zesítná tak, aby poskytovala dostatečně velké dutiny pro hydratované ionty sodíku nebo draslíku, které kompenzují záporný náboj hliníku přítomného ve struktuře [3].

AAM vznikají anorganickou polykondenzací při nízkých teplotách a tvoří zejména amorfni a semikrystalickou fázi. Složení a struktura alkalického aluminosilikátového gelu se může vzájemně lišit, protože závisí na velikosti, struktuře a koncentraci několika druhů iontů přítomných ve výchozích surovinách. Důležitá je pro tvorbu dané struktury také teplota, pH a délka ošetřování směsi [7, 8].

3.1.3 Suroviny pro alkalickou aktivaci

Nejvhodnějšími materiály pro alkalickou aktivaci jsou suroviny, které obsahují dostatečné množství aluminosilikátů. Stále nejpoužívanější pro výrobu alkalicky aktivovaných materiálů jsou vysokopecní struska a popílky. Tyto suroviny jsou vedlejšími produkty průmyslové výroby, proto jsou výhodné z ekologického i ekonomického hlediska. K alkalické aktivaci lze využít i metakaolín [5].

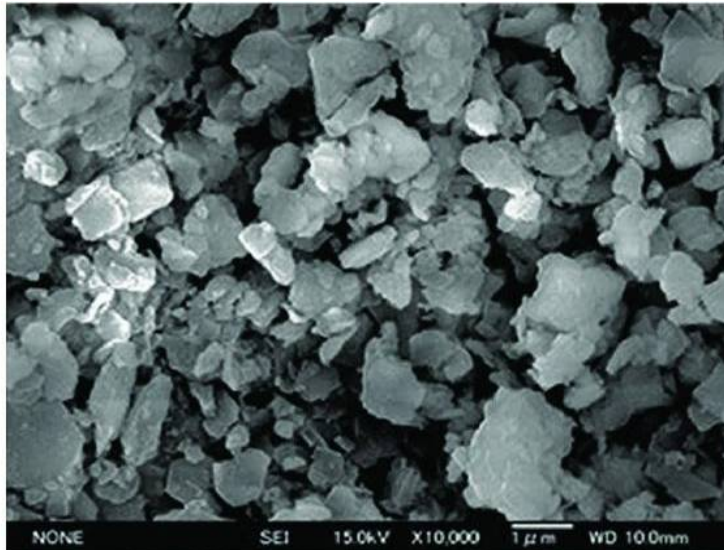
Vzhledem k tomu, že v experimentální části se pracovalo pouze s vysokopecní struskou a vodním sklem coby aktivátorem, budou následující kapitoly zaměřeny pouze na tyto dvě hlavní výchozí látky.

3.1.3.1 Vysokopecní struska

Struska, přesněji mletá vysokopecní struska je vedlejším produktem při výrobě surového železa ve vysoké peci. Do vysoké pece se při výrobě zavádí kromě železné rudy i struskotvorné přísady (např. dolomit, vápenec), aby nedocházelo k oxidaci železa. Tyto přísady se při vyšších teplotách rozkládají na oxid vápenatý a oxid uhličitý. Vzniklý oxid vápenatý poté na sebe může navázat všechny nečistoty obsažené v železné rudě a v koksu, čímž vzniká vysokopecní struska. Složení vysokopecní strusky se tedy liší podle typu rudy, která se používá. Na závěr se struska díky rozdílným hustotám oddělí od železa a ochladí se. Chlazení může probíhat několika způsoby a za různých podmínek, proto vzniká i více typů strusky s různou hydraulickou aktivitou [5].

Vzduchem chlazená vysokopecní struska je tvořena Ca-Al-Mg křemičitany. Díky pomalému chlazení neobsahuje tato struska mnoho skelné fáze, a tudíž většinou nemá žádné hydraulické schopnosti. Přesto se tento typ strusky využívá jako kamenivo do betonu [9].

Rychlým chlazením se vyrábí granulovaná vysokopecní struska, která je tvořena z větší části skelnou (amorfni) fází, díky níž má latentně hydraulické vlastnosti. Rychlého chlazení je dosaženo díky tryskajícímu velkému množství vody na roztavenou strusku a vzniknou tak amorfni částice. Takto zchlazená se poté kvůli velkému obsahu vody suší a následně se i mele, aby se zvýšil její měrný povrch a tím i reaktivita při hydrataci cementu. Granulovaná struska s různou distribucí částic (viz obr. 1) se používá jako materiál do směsných cementů [9, 10].



Obr. 1: Částice vysokopecní strusky [5]

Dalším typem strusky vyrobené rychlým chlazením je pěněná vysokopecní struska. Postup chlazení u této strusky má dvě etapy: nejdříve se struska zchladí menším množstvím vody a ve druhém kroku je vyhozena do vzduchu pomocí lopatek a tak je dochlazena v podstatě pomocí vzduchu. Tento typ strusky obsahuje méně skelné fáze než granulovaná, ale stále dost na to, aby mohla být použita do vysokopecních cementů [10].

Po chemické stránce mají ve strusce největší zastoupení tyto oxidy: hlinitý, křemičitý, vápenatý a hořečnatý. Minoritní podíl strusky je tvořen sírou, oxidy železa, titanu a manganu [5].

3.1.3.2 Vodní sklo

Alkalický aktivátor je jednou z hlavních komponent pro přípravu alkalicky aktivovaných materiálů polykondenzační reakcí. Výběr vhodného aktivátoru velmi ovlivňuje vlastnosti vznikajících produktů. Dle obsahu ostatních složek surovinové směsi se pak volí množství aktivátoru [11].

V laboratorní praxi se často používá vodní sklo (křemičitan sodný), které se dodává ve formě roztoku nebo pevné látky (sušené vodní sklo) [12].

Sloučeniny s obecným vzorcem $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ jsou považovány za křemičitan sodný. Je-li tento křemičitan rozpuštěn ve vodě, dostáváme sodné vodní sklo ve formě koloidního roztoku. Sodné vodní sklo se v současné době průmyslově vyrábí dvěma metodami. První metoda je založena na tavení sklářského písku, kde obsah SiO_2 musí být 70 – 75 %. Tento písek se taví spolu s bezvodým uhličitanem sodným ve vanové peci při teplotách v rozmezí 1400 až 1600 °C. Roztavená sklovina se prudce ochladí, podrtí a následně rozpouští v autoklávu za zvýšeného tlaku a teploty na tekuté vodní sklo. Tímto způsobem lze vyrábět všechny typy vodních skel. Druhý způsob výroby spočívá v působení alkalického hydroxidu na čistý křemičitý písek. I tento způsob probíhá v autoklávu za zvýšeného tlaku a teploty. Přidáváním organických či anorganických aditiv do procesu rozpouštění v autoklávu lze vylepšovat parametry a vlastnosti vodních skel. Sodné vodní sklo se používá nejen jako aktivátor do AAM, ale také jako přísada do odmašťovacích, pracích a čisticích prostředků, jako pojivo při výrobě svařovacích drátů či pískových forem ve slévárnách. Použití nachází

také v čistírnách odpadních vod jako odstraňovač těžkých kovů a také jako lepidlo v papírenském průmyslu [13].

3.1.4 Fyzikálně-chemické vlastnosti AAM

Alkalicky aktivovaná pojiva nabývají vlastností, které jsou ovlivněny mnoha faktory, zejména jde o volbu výchozích surovin, u nichž záleží na jejich chemickém složení, a typ alkalického aktivátoru. Alkalicky aktivované materiály mohou vynikat ve vlastnostech, jako je vysoká pevnost a odolnost, vodotěsnost, mrazuvzdornost, nehořlavost, nerozpustnost ve vodě, tepelná odolnost (až 1200 °C) a vysoká chemická odolnost [14, 15].

Jak již zmíněno v předchozích kapitolách, alkalicky aktivované materiály jsou amorfní látky s jen velmi malým podílem krystalických látek. Proto jejich největší předností je jejich pevnost. Tyto materiály se vyznačují velmi rychlým nárůstem pevnosti – již po dvou až čtyřech hodinách dosahují pevnosti v tlaku v rozmezí 10 – 25 MPa. Běžná doba, kdy pevnosti AAM postupně narůstají, bývá jeden měsíc. Po uplynutí této doby narůstá pevnost už jen velmi pomalu, nebo se dokonce zastavuje. Běžná pevnost AAM se pohybuje od 40 – 120 MPa [16].

Co se týká úpravy mechanických a tepelných vlastností, lze docílit zlepšení těchto vlastností například nastavením vhodných reakčních podmínek nebo přidávkem vhodných přísad do surovinové záměsi [17].

V souvislosti s několika provedenými výzkumy se dospělo k závěru, že teplota vytvrzování urychluje reakce u AAM. Přidáme-li ještě parametry jako je doba vytvrzování a typ alkalického aktivátoru, zjistíme, že nám významně ovlivňují mechanickou pevnost. Ukázalo se totiž, že vyšší teplota a delší doba vytvrzování mají za následek vyšší pevnost v tlaku. Při studiu aktivátorů bylo zjištěno, že alkalický aktivátor, který obsahuje rozpustné křemičitany, zvyšuje rychlost alkalické aktivace, na rozdíl od alkalických roztoků, obsahujících pouze hydroxid. Navíc, s rostoucí koncentrací alkalického aktivátoru roste i mechanická pevnost materiálu [18, 19].

Van Jaarsveld et al (2002) dospěl k závěru, že vlastnosti alkalicky aktivovaných materiálů ovlivňují nejen podmínky vytvrzování, ale také obsah vody. Podle jeho výzkumu došlo u vytvrzování při velmi vysoké teplotě k popraskání a mělo negativní vliv na vlastnosti materiálu. Závěrem výzkumu také bylo, že při použití mírného vytvrzování tohoto materiálu se jeho fyzikální vlastnosti zlepšují [18].

Dále se na vlastnostech alkalicky aktivovaných materiálů podílí kationty alkalických kovů, které ovlivňují celý průběh polykondenzační reakce a následně tak fyzikálně-chemické vlastnosti produktů. Nejvýraznější vliv mají kationty K^+ a Na^+ . Tyto kationty totiž ovlivňují uspořádání iontů, strukturu, rozpustnost a orientaci iontů během vytvrzení [17, 20].

Alkalicky aktivované systémy však mají i negativní vlastnosti, které jsou problémem zejména při venkovních aplikacích. Je to především tvorba výkvětů, které vzhledově znehodnocují povrch výrobků z těchto materiálů [16].

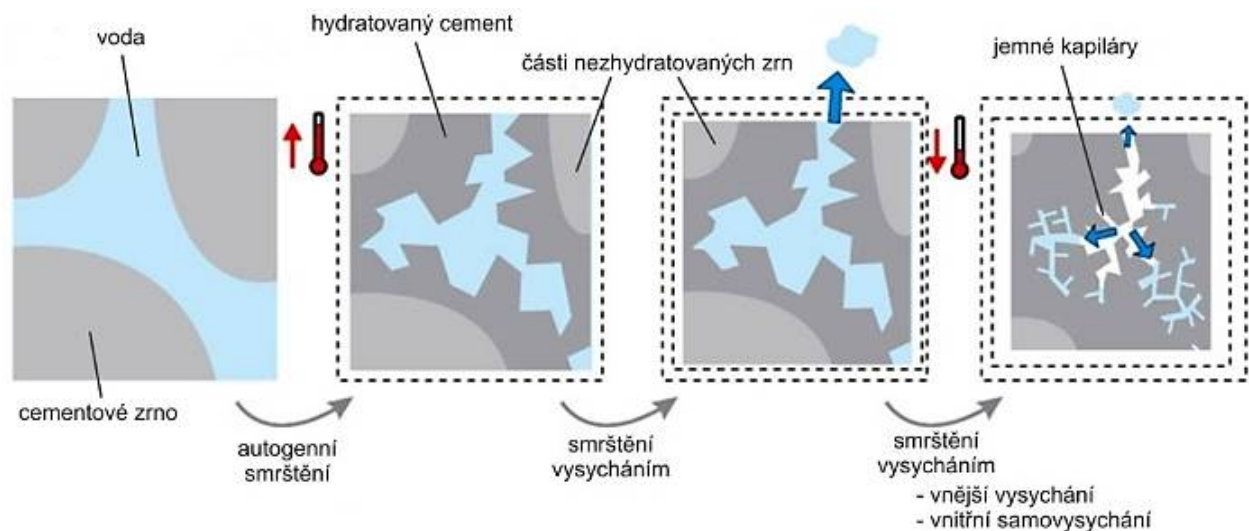
Dalším negativem těchto materiálů je značné smrštění, k němuž dochází při použití vodního skla jakožto alkalického aktivátoru. Následující kapitola se proto více věnuje této problematice za účelem objasnění příčin a mechanismu smrštění v AAM.

3.2 Smrštění

Smršťování betonu je deformace materiálu, která vzniká bez ohledu na působící zatížení. V případě betonových prvků, kde není bráněno jejich volné deformaci, je smršťování příčinou vzniku jednak deformace a jednak vlastních pnutí, tedy napětí, která jsou vzájemně v rovnováze, ale lokálně mohou dosahovat hodnot překračujících pevnost betonu v tahu, a tedy být důvodem ke vzniku trhlin. Obecně je smršťování betonu příčinou vzniku poruch betonových konstrukcí a snížení jejich pevnosti. V provozních stavech je proto nutné se deformacemi způsobenými smršťováním zabývat, protože mohou ovlivnit další užité vlastnosti betonových konstrukcí a zároveň jejich životnost [21].

Běžný kompozit, který je pojený cementem, se v průběhu vysychání a teplotních změn smršťuje. Smrštění souvisí s molekulami vody, které se nacházejí mezi zrny hydratujícího cementu, a velmi důležitou úlohu zde hraje kapilární kondenzace a povrchové napětí. Podle teorií dochází při smrštění k úniku molekul vody, které se nacházejí mezi vlákny C-S-H gelu [22].

U smršťování rozlišujeme čtyři typy smrštění: smrštění plastické, autogenní, smrštění způsobené vysycháním a karbonatační smršťování. Jednotlivé druhy smrštění jsou znázorněny na obr. 2. Z uvedených druhů smrštění je nejvýznamnější smrštění způsobené vysycháním tvrdnoucího betonu [22].



Obr. 2: Podstata různých typů smrštění [23]

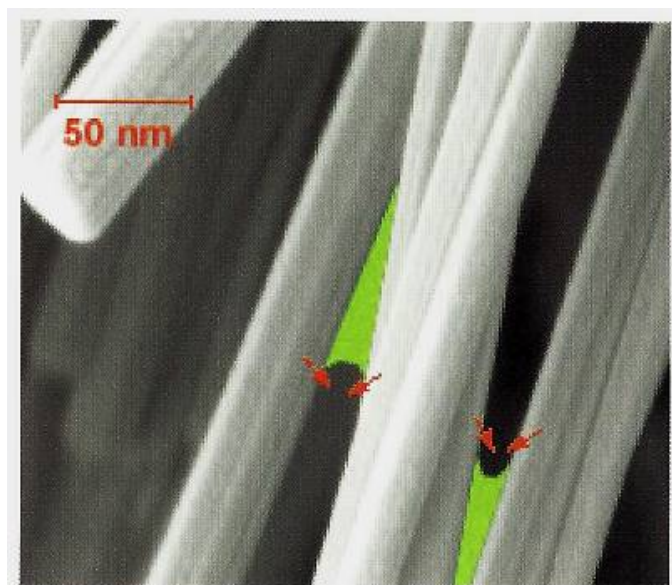
3.2.1 Princip smrštění

Hydratovaná cementová pasta je velmi porézní a obsahuje širokou distribuci velikosti pórů – od makrokapilár [μm] až po gelové póry v jednotkách nanometru [nm]. Tato porozita je způsobena převážně díky odpařování vody, která nevstupuje do hydratační reakce. Vznik kapilárních pórů je ovlivněn vodním součinitelem. Může však být významným způsobem ovlivněn i provzdušňujícími či ztekucujícími přísadami [24].

Obecně lze rozlišit dva typy sil potenciálně způsobující smršťování cementového tmelu:

- kapilární síly, působící podobně jako hydrostatický tlak,
- rozdělovací tlak, působící kolmo na mezifázové rozhraní.

Chování betonových materiálů během smrštění vysycháním je dáno termodynamickým chováním vody v pórech různé velikosti. Póry menších poloměrů jsou zaplněny kapalnou vodou, naproti tomu póry větších rozměrů obsahují pouze vzduch. Molekuly vody, které se nacházejí mezi vrstvami CSH gelu, v pórech vytváří menisky, které jsou znázorněny zelenými plochami na obr. 3, a tím pádem se vytváří kapilární napětí a při vysychání tak dojde ke smrštění. Kapilární napětí v menisku je tím větší, čím menší je velikost pórů, a výsledné smrštění je tedy vyšší [9, 24].



Obr. 3: Tvorba menisků v pórech mezi vrstvami CSH gelu [22]

Materiály obsahující alkalicky aktivovanou vysokopecní strusku mají méně porézní strukturu než portlandský cement, proto u nich dochází k většímu smrštění.

Aby bylo dosaženo menšího smrštění, lze použít speciálních přísad redukujících smrštění (SRA), díky kterým dojde ke změnám ve struktuře pórů a poklesne povrchové napětí vody v pórech. Přítomností přísad se totiž začínají tvořit větší póry, kde je kapilární napětí mnohem nižší než u malých kapilár, které se vyskytují v pojivech bez příměsí [24, 25].

3.2.2 Autogenní smrštění

K autogennímu smrštění dochází v případě, že je zabráněno výměně vody mezi betonem a okolím, tedy když je beton izolován od vnějšího prostředí. Při tomto jevu dochází k objemovým změnám, které jsou následkem toho, že výsledný produkt reakce mezi cementem a vodou má menší objem než vstupní látky. U běžných betonů je však tento typ smrštění většinou víceméně zanedbatelný. Pokud se ale jedná o vysokohodnotný beton s nízkým vodním součinitelem, zde už toto smrštění nabývá významných hodnot. Autogenní smrštění lze eliminovat ošetřováním betonu vodou nebo přidáním přísad redukujících smrštění [22].

3.2.3 Plastické smrštění

Jedná se o smrštění způsobené odpařováním vody z ještě nezatvrdlého betonu v plastickém stavu. Důsledkem vysoké rychlosti odpařování dochází ke vzniku mikrotrhlin. Tento typ smrštění tedy nastává obvykle 10 – 12 hodin po uložení betonu do formy, a pokud je beton

vystaven vysoké teplotě, větru a vzduchu s relativní vlhkostí menší než 95%. Toto smrštění může být redukováno pomocí ocelové výztuže, ošetřováním povrchu betonu vodou nebo kombinací obou postupů najednou [22].

3.2.4 Smrštění vysycháním

Tento typ smrštění je založen na výměně vody mezi betonem a okolním prostředím a závisí na mnoha faktorech. Jedná se například o vlhkost prostředí, složení betonu, množství výztuže a tvaru betonových prvků nebo dobu, po kterou je beton vystaven prostředí s nízkou vlhkostí. Každá složka betonu má na smrštění vysycháním jiný vliv [22].

Vysychání betonu je důsledkem odpařování části vody obsažené ve spleti kapilár, které jsou spojeny s povrchem betonu. Toto odpařování směřuje k vyrovnání relativní vlhkosti v kapilárách a v okolním prostředí. Nejdříve z betonu odchází voda obsažená ve velkých kapilárách blízko povrchu betonu, protože je vázána nejmenšími kapilárními silami. S ubývající vodou v betonu, se menisky tvoří ve stále jemnějších kapilárách a tím v betonu vznikají silnější kapilární síly. Čím silnější tyto kapilární síly jsou, tím silněji je voda v betonu vázána a tím pádem je těžší ji z betonu odpařit. Sled těchto probíhajících pochodů je podstatou smrštění vysycháním [5].

Důležitý faktor ovlivňující smrštění vysycháním je kamenivo, které působí jako překážka, která může zabraňovat hydratujícím cementovým zrnům, aby rozvíjely smrštění. Čím hutněji je kamenivo uspořádáno, tím více je bráněno smrštění od cementové pasty [22].

3.2.5 Karbonatační smrštění

Tento typ smrštění vzniká v důsledku karbonatace cementového tmele v dlouhodobém časovém intervalu. Vyskytuje se na povrchu betonových konstrukcí, které přicházejí do kontaktu se vzduchem obsahujícím CO_2 . Konkrétně reaguje oxid uhličitý s hydroxidem vápenatým, nebo také s kalciumsilikáthydráty, ve kterých se zmenšuje poměr mezi CaO a SiO_2 , a současně se snižuje obsah vody. Při tomto smrštění hraje důležitou úlohu relativní vlhkost. Při velmi nízké relativní vlhkosti je v pórech nedostatečné množství vody pro vznik kyseliny uhličitě. Naopak při vysoké relativní vlhkosti je karbonatace malá, protože póry jsou zaplněny vodou a oxid uhličitý nemůže do cementového kamene dobře pronikat. Karbonatační smrštění je ireverzibilním dějem [22].

3.3 Přísady redukující smrštění

Přísady snižující smrštění (SRA) byly používány k minimalizaci smrštění v cementových systémech už před více než třiceti lety. Tyto přísady patří ke skupině neiontových, organických povrchově aktivních látek, které snižují povrchové napětí pórových roztoků. Snižováním povrchového napětí vody v pórech se zmenší i kapilární síly působící v porézním tělese a tím se pak sníží i smrštění při odpařování přebytečné vody z povrchu betonu.

Vlastnosti těchto látek a jejich účinnost závisí na typu látky a koncentraci. Jejich neiontový charakter je nezbytný k zabránění adsorpci těchto látek na cementové fáze.

Neiontové povrchově aktivní látky používané jako SRA se mohou podle molekulární struktury dělit na:

- monoalkoholy, obsahující lineární, rozvětvené a cyklické řetězce,

- glykoly, obsahující alkandioly nebo oxyalkylenové glykoly,
- alkyletherové, oxyalkylenové glykoly, obsahující lineární struktury s hydrofobním a hydrofilním koncem,
- polymerní povrchově aktivní látky (dimery, trimery) obsahující vícero povrchově aktivních míst, nebo roubované polymery s hydrofilními postranními řetězci,
- další SRA, jako například aminoalkoholy, amidy atd.

Vzhledem k molekulové konstrukci některých těchto látek je omezená jejich použitelnost v betonech a maltách. Kromě toho, že jsou některé přísady příliš drahé pro aplikace v betonu, jejich velkým nedostatkem je nízká molekulová hmotnost. Ta způsobuje problémy týkající se vysoké výbušnosti a nízkého bodu vzplanutí.

V praxi se používají i směsi SRA, které vykazují synergický efekt-mají mnohem větší účinek na snížení smrštění. Je známo, že tyto látky ovlivňují povrchové napětí cementových systémů v průběhu vysychání a tím zasahují do fázových přechodů a mají tak vliv i na mechanické vlastnosti.

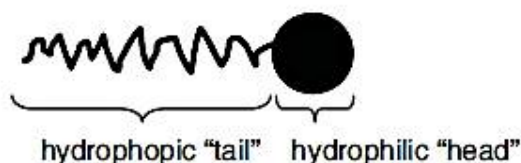
Jak už bylo zmíněno dříve, nejvíce se k redukci smrštění pomocí organických látek používají glykoly (zejm. ethylen glykoly a propylen glykoly) s různými typy řetězců nebo speciálně modifikované polymerní povrchově aktivní látky. Také ve většině studií zabývající se smrštěním byly jako neiontové SRA použity nejčastěji propylenové ethery nebo samotný propylen v kombinaci s glykoly. Tyto organické kapaliny jsou zcela odlišné od většiny jiných přísad, které jsou ve formě vodných roztoků. Tyto přísady jsou obvykle stoprocentně aktivní, jsou rozpustné ve vodě a mají často charakteristickou vůni. Jejich dávkování se běžně pohybuje nejvýše v pětiprocentním přídávku na hmotnost cementu, aby správně plnily svou funkci snížení smrštění vysycháním [31].

Často se používají i fluorované povrchově aktivní látky, které mohou snížit povrchové napětí až na 20 mN/m. Pro srovnání, uhlovodíkové povrchově aktivní látky mohou redukovat povrchové napětí asi na 30 mN/m [24].

Hlavním důvodem užití SRA v cementových systémech je snížení smrštění vysycháním. Je však dokázáno, že pomocí SRA lze účinně redukovat i plastické a autogenní smrštění [24].

3.3.1 Struktura SRA

SRA jakožto povrchově aktivní látky, představují celou řadu chemických látek, které modifikují povrch nebo rozhraní systémů, v nichž jsou obsaženy. Povrchově aktivní molekuly obvykle obsahují nepolární uhlovodíkové řetězce, tzv. „hydrofobní ocasy“, a polární funkční skupiny, tzv. „hydrofilní hlavy“. Vzhledem k jejich amfifilní povaze, vykazují povrchově aktivní látky silnou adsorpční afinitu k fázovému rozhraní kapalina/kapalina, kapalina/pevná látka, nebo kapalina/plyn. Jednoduché schéma molekuly povrchově aktivní látky je uvedeno na obr. 4 [24].



Obr. 4: Schéma povrchově aktivní látky [24]

Hydrofilní část molekuly je v nejjednodušším případě tvořena hydroxylovou skupinou monoalkoholu. Častěji se však skládá z poly-oxyalkylenového řetězce. Složitější struktury povrchově aktivních látek byly vyvinuty v průběhu několika let. Existují také struktury obsahující větší počet hydrofilních hlav a mohou mít rozvětvené nebo zkřížené hydrofobní ocase. Takové struktury se často vyskytují u nízkomolekulárních SRA.

Nové generace tenzidů jsou tzv. polymerní a oligomerní povrchově aktivní látky. Polymerní povrchově aktivní látky se skládají z amfifilních blokových nebo roubovaných polymerů. Pokud jde o oligomerní povrchově aktivní látky, ty jsou tvořeny vazbou mezi lineární částí oligomeru a hydrofobními skupinami druhé molekuly oligomeru, což má za následek vznik dimerů, trimerů nebo polyoligomerů. Polymerní i oligomerní povrchově aktivní látky poskytují široký rozsah molekulových struktur, které jim umožňují přizpůsobení se systémům, ve kterých mají účinkovat [24].

3.3.2 Vliv SRA na smrštění

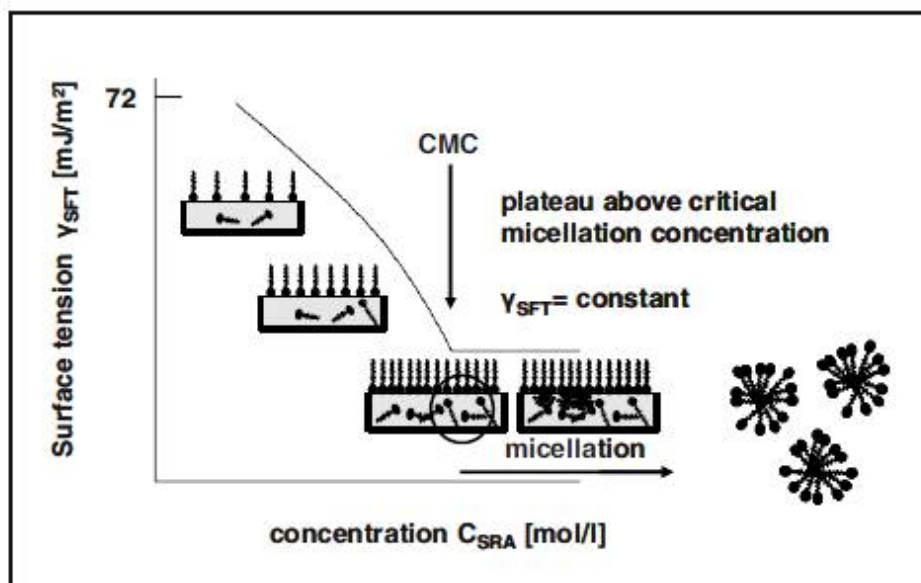
Při smršťování cementového tmelu vysycháním, jsou hydrostatické vlastnosti těchto nanoskopických systémů určeny především vlastnostmi jejich rozhraní. Z tohoto důvodu je velmi zajímavé, jak jsou tato rozhraní ovlivněna přítomností neiontových povrchově aktivních látek a jak tyto látky obecně působí na rozhraních cementových materiálů.

Vodné roztoky neiontových povrchově aktivních látek vykazují snížené povrchové napětí. Díky jejich amfifilní povaze se tyto látky adsorbují na rozhraní kapalina/pára tak, že hydrofilní část směřuje k vodné části a hydrofobní konec k páře. Působení SRA proti smršťování AAM je přisuzováno snížení povrchového napětí vody (γ), a tím i poklesu kapilárního tlaku p . Tento tlak je vyvolán tvorbou vodních menisků v kapilárních pórech, jež nesou zodpovědnost za smrštění. Kapilární tlak je dán povrchovým napětím (γ) podle následující rovnice (1):

$$p = \frac{2 \cdot \gamma}{r \cdot \cos \theta} \quad (1)$$

kde r je poloměr póru a θ je smáčecí úhel [22].

Na obr. 5 je znázorněno schéma dějů probíhajících v závislosti na koncentraci SRA. Z obrázku je patrné, že s rostoucí objemovou koncentrací dochází k adsorpci stále většího množství molekul povrchově aktivní látky na rozhraní kapalina/pára a tím se snižuje povrchové napětí vodného roztoku. To umožňuje systému snížení jeho volné energie. Při dosažení kritické objemové koncentrace, nastává ostrý bod zlomu, kdy dojde k radikálnímu poklesu vlivu SRA na povrchové napětí. Bod zlomu je způsoben tím, že rozhraní kapalina/pára je již dostatečně obohaceno SRA a další molekuly těchto látek se již neadsorbují. Při koncentracích nacházejících se nad tímto bodem, pak dochází k samovolné asociaci molekul SRA a tvorbě micel. Nad tímto bodem tedy zůstává povrchové napětí prakticky stejné. Objemová koncentrace SRA v bodě zlomu se nazývá kritická micelární koncentrace (CMC).



Obr. 5: Závislost povrchového napětí na koncentraci SRA [24]

Pokud jde o použití SRA v cementových materiálech, snížení povrchového napětí je omezeno CMC. Kromě toho, v průběhu hydratace je část záměsové vody chemicky vázána v hydrátech, čímž se zvýší objemová koncentrace SRA. Během hydratace, kdy se snižuje množství porového roztoku, může docházet k většímu zakonzentrovávání SRA, až do doby, kdy se roztok nasýtí a začnou se tvořit micely. CMC bod tedy může nastat dříve [24].

Molekuly SRA se mohou také adsorbovat na rozhraní pevná látka/kapalina, což je u cementových systémů známé jako fyzikální adsorpce, k níž dochází díky vazbě mezi polární hlavou molekuly SRA a polárním povrchem. Tento jev je nežádoucí, protože snižuje účinnost SRA, takže nejsou tyto molekuly pak schopné snižovat povrchové napětí a tedy i smrštění. Tato adsorpce tak může negativně ovlivnit i vlastnosti daného betonu [26].

Koncentrace SRA na rozhraní kapalina/pára, které je zodpovědné za snížení smrštění, může být ovlivněna různými faktory, jako např. molekulární struktura, povaha a koncentrace elektrolytů, teplota, adsorpce atd. Tyto faktory je třeba vzít v úvahu, chceme-li kvantifikovat účinky SRA v cementových systémech [24].

3.3.3 Působení SRA v AAM

Až dosud bylo publikováno jen několik studií zkoumající účinek organických chemických přísad, které snižují smrštění. Palacios a Puertas studovali vliv SRA na bázi polypropylenglykolu (PPG) na smrštění a další vlastnosti strusky aktivované vodním sklem. Při 50 % relativní vlhkosti vzduchu bylo smrštění vysycháním u struskových malt sníženo přibližně o 7 % a 35 % pro dávky SRA 1 % a 2 %. Zatímco snížení smrštění při relativní vlhkosti 99 % bylo podstatně větší: 50 % a 75 % při stejných dávkách. Tento výsledek koreluje s uvedeným prohlášením, že SRA ztrácejí svou schopnost snižovat smrštění při nižších hodnotách relativní vlhkosti. Palacios a Puertas vysvětlují redukci smrštění také snížením vodního součinitele, jelikož SRA zlepšují zpracovatelnost; dále snížením povrchového napětí kapaliny v pórech, a také modifikací distribuce velikosti pórů - díky SRA se tvoří větší póry, kde kapilární napětí nejsou tak výrazná [27].

Také Bilim et al. použili SRA na bázi PPG k redukci smrštění AAS malt, ale při vyšších dávkách aktivátoru: 5,4 % a 8,1 % Na₂O. Opět se ukázalo, že smrštění vysycháním, stejně jako smrštění při vlhkém uložení, bylo významně sníženo (až do 40 % po 180 dnech) [28].

Dále Bilim et al. pozoroval také snížení smrštění pomocí nějaké nespecifikované přísady založené na modifikovaném kapalném polymeru (pravděpodobně šlo o lignosulfonát), která snižovala obsah vody v záměsi. Ukázalo se ale, že není tak účinný jako SRA [28, 29].

Vliv různých organických přísad na smrštění u materiálů na bázi AAS byl také studován Bakharevem et al.. Došli k závěru, že provzdušňovací přísady obsahující rozpustné soli alkylaryl sulfonátu jsou nejvhodnější pro AAS systémy, protože velmi zlepší zpracovatelnost a účinnost redukce smrštění byla podobná jako při použití nějaké nestandardní SRA. Tyto přísady snižují dlouhodobé smrštění vysycháním přibližně o 70 % [30].

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Tato kapitola uvádí přehled výchozích surovin použitých na přípravu zkušebních vzorků. Dále jsou zde zmíněny použité metody analýzy, které byly aplikovány na připravené vzorky.

4.1 Výchozí suroviny a chemikálie

4.1.1 Vysokopecní struska

Použitá vysokopecní (VP) struska do alkalicky aktivovaných směsí byla granulovaná velmi jemně mletá vysokopecní struska s označením SMŠ 400 od výrobce Kotouč Štramberk, spol. s.r.o. Jak vyplývá z označení strusky, její měrný povrch je 400 m²/kg. Složení této strusky je uvedeno v tab. 1.

Tab. 1: Chemické složení použité vysokopecní strusky

Složení strusky	[hm.%]
SiO ₂	34,7
Al ₂ O ₃	9,1
CaO	41,1
MgO	10,5
SO ₃	1,4
Na ₂ O	0,4
K ₂ O	0,9
TiO ₂	1,0
MnO	0,6
Fe ₂ O ₃	0,3

4.1.2 Kamenivo

Směsi, z nichž byly připraveny trámečky podle normy ČSN EN 196-1 na pevnostní měření a také na měření smrštění, obsahovaly kamenivo tří různých frakcí, které pochází z pískovny Polešovice. Byly tedy použity tři typy písků: normový zkušební písek jemný (PG I), normový zkušební písek střední (PG II) a normový zkušební písek hrubý (PG III).

Směsi připravené pro měření na Vicatově přístroji písky neobsahovaly, byly tedy připraveny pouze cementové pasty.

4.1.3 Sodné vodní sklo

Do připravovaných směsí bylo nutné přidat alkalický aktivátor, proto bylo použito sodné vodní sklo od firmy Vodní sklo, a.s. Toto vodní sklo má silikátový modul $M_S = 2,01$ (molární poměr SiO₂/Na₂O). V tab. 2 je uvedeno složení sodného vodního skla. Množství vodního skla bylo vždy zvoleno tak, aby podíl Na₂O vůči strusce byl 4 %.

Tab. 2: Složení sodného vodního skla

M_S	Na ₂ O [%]	SiO ₂ [%]	H ₂ O [%]
2,01	16,15	30,7	53,15

4.1.4 Voda

K přípravě směsi byla použita destilovaná voda. Hodnota vodního součinitele byla pro směs použitou na měření na Vicatově přístroji 0,4. Tento součinitel byl zvolen proto, aby směs nevytékala ze zkušební formy ve tvaru prstence. Pro ostatní směsi byl zvolen vodní součinitel 0,5. Vodní součinitel vyjadřuje poměr w/c (voda/cement). V tomto experimentu však používáme strusku, proto ho lze označit w/s, kde do podílu vody musí být započtena i voda obsažená ve vodním skle.

4.1.5 Přísady redukující smrštění (SRA)

Jako vhodné přísady do tohoto experimentu byly zvoleny dvě látky: propylenglykol (PG), polypropylenglykol (PPG). Přičemž PPG byl použit s pěti různými molekulovými hmotnostmi (200, 425, 725, 1000, 2000). Dávkování SRA do jednotlivých směsí bylo stanoveno na základě tenziometrické analýzy, kde byly měřeny různé dávky SRA. Na základě tohoto měření byl poté určen CMC bod, podle něhož bylo zvoleno optimální dávkování do připravovaných malt a past. Přehled přísad pro tenziometrickou analýzu je uveden v tabulce 3 v další kapitole.

Pro všechny další analýzy bylo dávkování již stejné, přičemž množství přísady se vždy vztahovalo na množství použité strusky. Konkrétní hodnota přísady je uvedena v tabulce 5 v kapitole 4.4.1.

4.2 Měření povrchového napětí bublinovým tenziometrem

K měření povrchového napětí jednotlivých přísad a také jejich směsí s pórovým roztokem byl použit bublinový tlakový analyzátor KSV INSTRUMENTS BPA 800p. Jedná se o přístroj pro rychlé a snadné určení dynamického povrchového napětí kapalin metodou měření tlaku v bublinkách. Analyzátor měří tlak, který je potřebný k vytlačení bublinky z kapiláry do kapaliny. Během této procedury dosáhne tlak maximální hodnoty, který je ukazatelem povrchového napětí kapaliny. Z hodnoty maximálního tlaku, kterou získáme, přístroj vypočítá povrchové napětí a vypočítanou hodnotu zobrazí na displeji. Protože povrchové napětí závisí také na teplotě měřené kapaliny, je za zasunutou kapilárou umístěné teplotní čidlo. Naměřená teplota se zobrazuje a ukládá s hodnotou naměřeného povrchového napětí.

Ještě před začátkem měření bylo třeba provést autokalibraci přístroje, aby se zjistilo, zda přístroj i kapilára dobře fungují. Autokalibrace přístroje byla prováděna s destilovanou vodou. Základní technické parametry pro tenziometr BPA 800p jsou uvedeny v tab. 3:

Tab. 3: Základní technické parametry kapiláry tenziometru BPA 800p

Poloměr	0,130 mm
Referenční objem bublin	5,560 mm ³
Hloubka ponoření	5,000 mm
Referenční mrtvý čas	0,044 sec
Rovnovážný tlak	1345,317 Pa
Korekční koeficient	0,853592

Povrchové napětí je přístrojem automaticky vypočítáno podle vztahu:

$$\gamma = f \cdot \frac{r \cdot P}{2} \quad (4)$$

Přičemž γ je povrchové napětí, r je poloměr bubliny, P je příslušný tlak a f je korekční faktor pro kapiláry o poloměru menším než 0,1 mm. Příslušný tlak odpovídá vztahu:

$$P = P_S - P_H - P_D \quad (5)$$

kde P_S je nejvyšší naměřený tlak v bublině, P_H je hydrostatický tlak a P_D je tlak odporu vzduchu [32]. Samotné měření bylo prováděno standardní metodou, to znamená, že čas potřebný pro tvorbu bubliny (respektive průtok vzduchu) se měnil od 10 ms do přibližně 10 s. Přibližná doba jednoho experimentu byla tedy 5 minut. Doba experimentu závisela také na viskozitě roztoků, při viskóznějších roztocích byla doba experimentu o něco delší.

Dávkování jednotlivých přísad použitých k této analýze jsou shrnuty v tab. 4. Přičemž množství přísad je vztaženo na množství strusky, které je aktivováno 40 g alkalického aktivátoru, sestávajícího z 20 g vodního skla a 20 g vody. A objem porového roztoku odpovídá objemu alkalického aktivátoru.

Tab. 4: Množství PPG a PG použité k analýze

Množství přísad v [hm. %]	Množství přísad [g]
0,025	0,022
0,5	0,044
0,125	0,11
0,25	0,22
0,5	0,44
1,0	0,88

4.3 Emisní plazmová spektrometrie (ICP-OES)

ICP-OES neboli emisní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem je stopová analytická metoda, která je využívána zejména ke stanovení obsahu stopových i významných koncentrací jednotlivých prvků v analyzovaném vzorku. Tato metoda umožňuje stanovení široké škály hlavních, vedlejších i stopových prvků s citlivostí od jednotek ppb po stovky ppm.

Princip této metody spočívá ve zmlžení roztoku analytického vzorku, čímž vzniká aerosol, který je proudem argonu veden do hořáku, v němž je za pomoci střídavého vysokofrekvenčního magnetického pole udržováno argonové plazma o vysoké teplotě. V plazmatu se rozpouštědlo okamžitě odpaří a zanikají chemické vazby v molekulách přítomných sloučenin. Energie v plazmatu je dostatečná k tomu, aby došlo k excitaci elektronů přítomných atomů do vyšších energetických hladin. Protože excitovaný stav atomu je nestabilní, vrací se vybuzené elektrony zpět na své původní energetické hladiny a přitom emitují světlo o přesně definované vlnové délce, určené energetickým rozdílem obou hladin. Emitované světlo je poté vedeno na monochromátor, který rozdělí zachycené světelné záření podle jeho vlnových délek a fotony tohoto rozděleného světla dopadají na citlivý detektor, který převede intenzitu dopadajícího záření na elektrický signál. Intenzita signálu odpovídá charakteristické vlnové délce světla vznikajícího přechodem energetických stavů

analyzovaného prvku, což je pak i měrou množství prvku, přítomného v analyzovaném roztoku [33].

Tato analytická metoda byla použita ke stanovení prvkového složení porového roztoku alkalicky aktivované strusky v různých časech. Z těchto dat se poté vycházelo při syntéze porového roztoku, který byl s přísady SRA měřen na tenziometru.

4.4 Příprava testovacích vzorků

Zkušební vzorky byly připraveny vždy ze čtyř základních surovin a dané přísady. Základními surovinami byly destilovaná voda, sodné vodní sklo, granulovaná vysokopecní struska a tři různé frakce písků. Experimentálně bylo odzkoušeno šest přísad. Směsi obsahující PPG a PG byly připraveny v půlprocentním zastoupení každé z přísad, vztaženém na hmotnost strusky. Kromě toho byl ještě připraven i referenční vzorek, který neobsahoval žádnou přísadu.

Směs byla homogenizována v míchačce, kam se nejdříve umístilo vodní sklo a destilovaná voda a poté se přisypávala struska s písky a nakonec přísada. Směs byla míchána po dobu tří minut. Následovalo vylití směsi do dvou forem o rozměrech 40×40×160 mm a do jedné formy o rozměrech 25×25×280 mm. Od každého vzorku bylo tedy zhotoveno celkem šest zkušebních trámečků na měření pevností a tři trámečky menších rozměrů ke stanovení smrštění. Pro zhutnění vzorku byla forma umístěna na vibrační stůl. Poté byla horní strana trámečků uhlazena pomocí špachtle a forma se umístila do vlhka pod fólii, kde ztuhla. Po zhruba 24 hodinách byly vzorky vyjmuty z forem a umístěny do vlhkostní komory, kde byly udržovány stále podmínky (25 °C, 50 % vlhkosti). Odtud byly vytaženy vždy po sedmi a osmadvaceti dnech pro měření pevností v tlaku a ohybu. Trámečky pro stanovení smrštění byly z komory vyjmuty kvůli potřebě měření častěji (první týden od namíchání denně, poté už jen každý třetí den po dobu 28 dní).

4.4.1 Příprava konkrétních směsí

V experimentální části bylo připraveno a testováno celkem 7 vzorků. Šest vzorků s přísadami a jeden vzorek bez přísad (reference). Jednotlivými přísadami zde byly PG a PPG s pěti molekulovými hmotnostmi (200, 425, 725, 1000, 2000), které byly do směsí přidávány v 0,5 % – ním přísadkou vztaženém na hmotnost strusky (viz tab. 5). Vodní součinitel byl 0,5.

Tab. 5: Množství jednotlivých surovin ve směsích

Surovina	Množství [g]
Struska	400
Písek jemný (PG I)	400
Písek střední (PG II)	400
Písek hrubý (PG III)	400
Voda	147,3
Vodní sklo	99,1
Přísada 0,5 % (PG, PPG)	2,0

4.5 Stanovení smrštění

Měření smrštění spočívá v měření délkových a objemových změn normovaných trámečků o rozměrech 25×25×280 mm po dobu 28 dní. Stanovení smrštění probíhalo na základě normy ASTM C596. Trámečky mají ve středu čel umístěné měřicí kontakty a jejich délkové změny jsou měřeny v pravidelných intervalech jako změna délky mezi kontakty. První týden od namíchání dochází k největšímu smrštění, proto jsou intervaly mezi měřeními kratší. Měření bylo prováděno na měřicím zařízení ASTM C490, jehož součástí byl i etalon (viz obr. 6). Před samotným měřením trámečků byl nejdříve změřen etalon, pomocí něho byly vypočteny délkové změny trámečků v hm. %. Následně byly změřeny trámečky, jejichž hodnoty byly odečteny z displeje na tři desetinná místa. Hodnoty v grafech jsou aritmetickým průměrem minimálně ze dvou hodnot.



Obr. 6: Zařízení na měření smrštění

4.6 Rtuťová porozimetrie

Rtuťová porozimetrie je destruktivní metoda, kdy po měření zůstává v pórech nezanedbatelné množství nebezpečné rtuti a při měření je na vzorek vyvíjen tlak až 414 MPa, který může nevratně zničit původní strukturu. Metoda je založena na zvyšování tlaku nesmáčivé intruzní kapaliny a postupném zaplňování pórů od největších po nejmenší. Přístroj pracuje ve dvou režimech. První z nich je nízkotlaký režim, kdy se začíná zaplňovat evakuovaný vzorek a pokračuje přes normální tlak až do 3 – 4 atmosfér (4 μ m velkých pórů). Ve druhém režimu se pak vzorek přesune do vysokotlaké části, kde se měří mezi atmosférickým tlakem a maximálním tlakem 414 MPa. V současné praxi je metoda limitována shora velikostí pórů asi 1 mm, což je způsobeno vysokou hustotou a tím i hydrostatickým tlakem rtuti. Nejmenší stanovitelné póry jsou velikosti 3 nm, tato metoda tedy umožňuje stanovení celé distribuce makro i mezopórů [37].

Celková porozita a distribuce velikosti pórů byla stanovena pomocí rtuťového porozimetru Poremaster (Quantachrome Instruments, USA). Rozmezí pracovního tlaku bylo od 0,14 do 231 MPa, který pokryl velikosti pórů v rozsahu od 0,007 do 1000 nm. Všechna měření byla

prováděna za těchto podmínek: povrchové napětí rtuti bylo 0,480 N/m, kontaktní úhel rtuti byl 140 a režim skenování byl vybrán tak, aby průměrná hodnota byla vytvořena z 11 bodů. Získaná data byla vztažena na hmotnost a objem vzorků.

4.7 Skenovací elektronová mikroskopie (SEM-EDS)

Tato metoda slouží k pozorování strukturních útvarů a jednotlivých fází přítomných ve vzorcích. V neznámých systémech pomáhá definovat strukturu, naopak ve známých systémech lze zase ověřovat změny chemického složení fází, ke kterým dochází účinkem difúze a definovat minoritní složky.

Elektronová rastrovací mikroskopie používá pro osvětlení svazek elektronů. V procesu zobrazování se mění vzájemná poloha svazku elektronů a povrchu vzorku tak, že svazek postupuje bod po bodu a řádek po řádku. Elektronový paprsek proniká do malé hloubky pod povrch vzorku a interakcí vzniká vhodný signál tvořící výsledný obraz: sekundární emitované elektrony, zpětně odražené elektrony, spojitě a charakteristické rentgenové záření nebo je proud absorbován vzorkem.

Skenovací elektronová mikroskopie byla použita k prozkoumání lomové plochy vzorku po 28 dnech zrání. Na odkryté plochy byla naprášena vrstvička zlata a pozorování probíhalo v režimu zpětného rozptylu pomocí elektronového mikroskopu ZEISS EVO LS10. Výsledky analýzy EDS mapování povrchu vzorku byly získány na vybraných místech pomocí softwaru Oxford Aztec System [36].

4.8 Pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku

U připravených normovaných trámečků o rozměrech 40×40×160 mm byly stanoveny pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku pomocí zkušebního lisu DESTTEST 3310. Podle normy ČSN EN 196-1 byly vzorky podrobeny zkoušce pevnosti v tahu za ohybu na lisu BS-10 tak, že se umístily na lis na spodní podpěrné výstupky a byly plynule zatěžovány konstantní rychlostí až do porušení. Poté byla na lisu BS-300 stanovena pevnost v tlaku, při níž dochází k porušení celistvosti trámečků. Tyto pevnostní zkoušky byly provedeny vždy po 1, 7 a 28 dnech. Hodnoty naměřených pevností jsou vyjádřeny v MPa, přičemž výsledné hodnoty v tabulkách jsou vždy průměrem minimálně ze dvou hodnot.

4.9 Izotermální kalorimetrie

Kalorimetrická analýza umožňuje sledování tepelných změn během probíhajících chemických reakcí, jimiž jsou u anorganických pojiv zejména tuhnutí a tvrdnutí. Díky této metodě lze zjistit vliv daných přísad na průběh hydratačních reakcí a také určit počátek a konec tuhnutí.

Vývoj hydratačního tepla byl monitorován pomocí TAM Air izotermického kalorimetru. Testované vzorky obsahovaly vysokopecní strusku, která byla navážena a uložena do uzavřených skleněných ampulí o obsahu 15 ml. Roztok vody, aktivátoru a dané přísady byl zvážen do injekční stříkačky. Měření uvolněného tepla se provádělo při konstantní teplotě 25 °C ± 0,02 °C. Před samotným měřením byla provedena autokalibrace, kdy byly ampule se struskou a také stříkačka s aktivátorem, vodou a přísadou zahřáty na teplotu, při níž mělo

probíhat vlastní měření. Když bylo dosaženo tepelné rovnováhy, v kalorimetru se smíchala struska s alkalickým aktivátorem vstříknutím roztoku ze stříkačky do ampule. Doba míchání byla 3 minuty. Vývoj tepla byl zaznamenán jako tepelný tok (mW/g).

4.10 Vicatův přístroj

Stanovení doby tuhnutí, které je popsáno v normě ČSN EN 196-3, se provádí pomocí Vicatova přístroje (viz obr. 7) a je založeno na vnikání jehly do pojivové směsi, které se opakuje, dokud není dosaženo předepsané hodnoty.



Obr. 7: Vicatův přístroj

Čerstvě namíchaná pasta se naleje do zkušební formy ve tvaru prstence. Ocelová jehla, která se do prstence spustí, se zajistí v takové poloze, aby se hrotem dotýkala povrchu vzorku ve formě. Po určitých časových intervalech se jehla spustí do vzorku. Za počátek tuhnutí se označí čas, kdy vzdálenost mezi jehlou a podložní destičkou je 6 ± 3 mm. Vpichy jehly se opakují na různých místech stejné cementové kaše, dokud není dosaženo žádané hodnoty.

Postup pro stanovení konce tuhnutí je takový, že se obrátí Vicatův prstenec použitý při stanovení počátku tuhnutí a opět se postaví pod penetrační jehlu. Jehla se opět nejdříve zajistí v poloze těsně nad povrchem cementové kaše. Poté se uvolní a nechá se svisle vniknout do cementové kaše. Vpichy se opakují ve vhodném časovém intervalu, dokud není dosaženo žádané hodnoty hloubky průniku, která činí 0,5 mm [34].

Pro toto stanovení byla vždy namíchána pouze pasta, takže směs neobsahovala písky a dále byl snížen vodní součinitel na 0,4, aby směs nevytékala z prstence. Složení výchozí záměsi je popsáno v tab. 6.

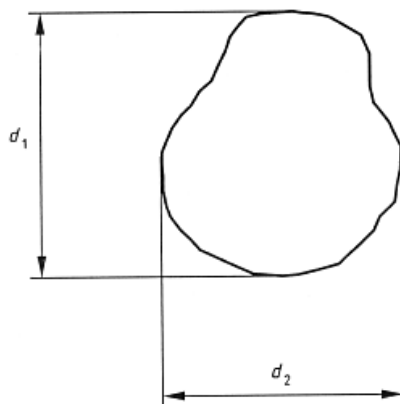
Tab. 6: Složení záměsi na Vicatovu analýzu

Surovina	Množství [g]
Struska	300
Voda	80,5
Vodní sklo	74,3
Přísada 0,5 % (PG, PPG)	1,5

4.11 Zkouška rozlitím

Tato zkouška byla provedena podle normy ČSN EN 12350-5 a pomocí ní byl stanoven rozliv jednotlivých namíchaných směsí. Byl tedy pozorován vliv jednotlivých přísad (PG, PPG) na zpracovatelnost čerstvé záměsi.

Tato zkouška se provádí pomocí střešacího stolku, který se umístí na rovnou, vodorovnou plochu, která není ovlivněna vnějšími vibracemi ani otřesy. Kuželová forma se umístí na střed horní desky stolku a naplní se pomocí lopatky záměsí až po horní hranu formy. Po 30 sekundách od urovnání povrchu záměsí ve formě, se zvedne forma svisle nahoru. Poté se pomalu zvedne horní deska střešacího stolku až k horní zarážce. Horní deska se nechá volně dopadnout na spodní zarážku. Tento cyklus se opakuje 15x, přičemž každý cyklus nesmí být kratší než 1 sekundy a ne delší než 3 sekundy. Následně se pravítkem nebo metrem změří největší rozměr rozlitého betonu ve dvou směrech d_1 a d_2 (viz obr. 8), a obě měření se zaznamenají, zaokrouhlené na nejbližších 10 mm [35].



Obr. 8: Měření rozlití [35]

5 VÝSLEDKY A DISKUZE

V této části práce jsou popsány výsledky analýz, kterým byly podrobeny jednotlivé SRA přísady a také jejich vliv na vlastnosti alkalicky aktivované strusky.

5.1 Měření povrchového napětí

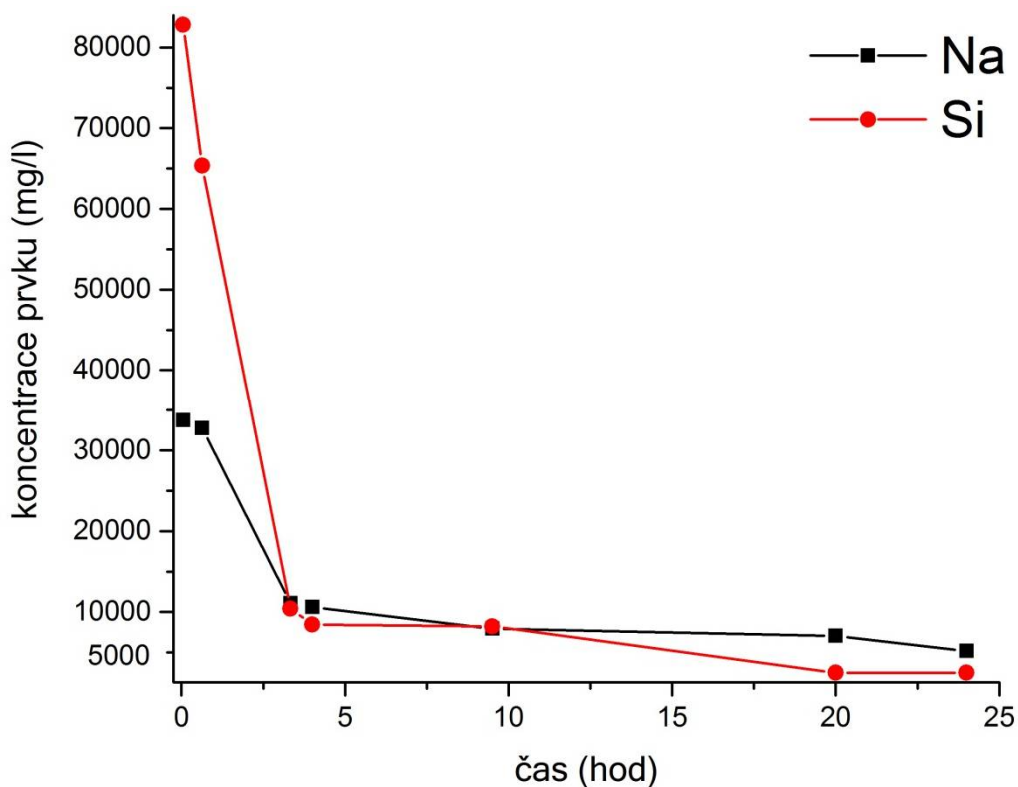
V této kapitole jsou shrnuty výsledky měření povrchového napětí směsí PG a PPG s porovým roztokem a dále výsledky ICP-OES analýzy, která byla potřeba ke zjištění složení porového roztoku, konkrétně jak se mění jeho prvkové složení v čase.

Nejprve byly pomocí ICP-OES změřeny vzorky porového roztoku odebrané v různých časech (viz tab. 7), kdy docházelo k změnám koncentrací jednotlivých prvků.

Tab. 7: Množství prvků v jednotlivých časech

Čas [min]	Množství prvku v porovém roztoku [mg/l]							
	Ca	K	Mg	Na	Al	Fe	Mn	Si
3	574,0	722,8	113,6	33736,6	87,0	20,6	5,2	82839,2
38	3065,8	674,6	507,6	32743,8	771,6	11,8	25,2	65367,4
200	84,8	381,2	6,4	11090,4	186,8	4,4	0,4	10433,8
240	76,0	193,0	3,8	10615,6	104,8	5,0	0,2	8453,4
570	86,4	131,6	9,2	7952,1	128,4	15,6	0,4	8229,2
1200	76,0	193,0	3,8	7067,2	65,4	5,8	0,2	2487,1
1440	11,5	189,0	1,5	5182,0	0,0	0,0	0,0	2483,5

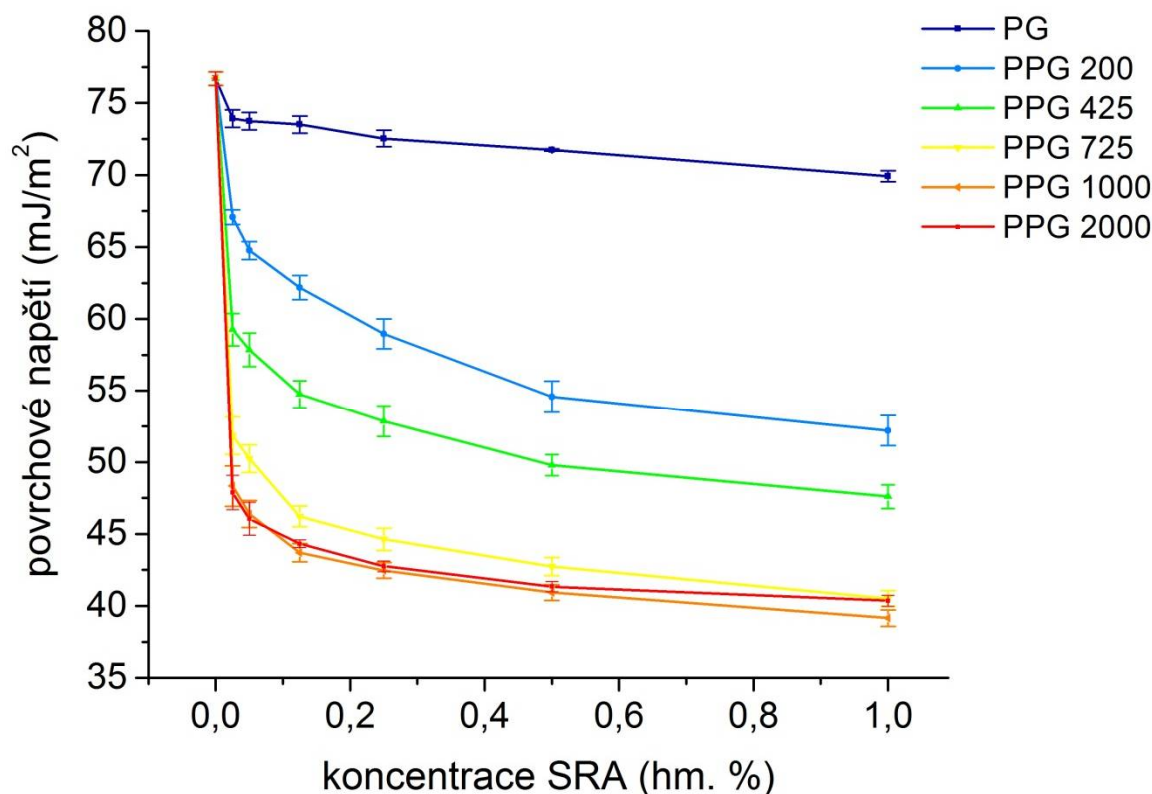
Z tab. 7 je patrné, že s rostoucím časem dochází víceméně k postupnému poklesu koncentrací u většiny sledovaných prvků. Pozornost se soustředí zejména sodík a křemík a to proto, že jejich koncentrace jsou největší a tudíž se dá předpokládat, že ionty těchto prvků nejvíce ovlivňují chemické složení porového roztoku. Tyto prvky (Na, Si) zároveň vykazují snížení koncentrace s narůstající dobou izolace porového roztoku. Dochází totiž k jejich zabudování do trojrozměrné struktury alkalicky aktivovaného systému. Tento trend je lépe vidět v grafu na obr. 9, který znázorňuje úbytek koncentrace těchto dvou prvků v závislosti na čase. Na základě Hofmeisterovy řady je známo, že sodné ionty podporují snížení povrchového napětí, kdežto ionty křemíku tento efekt nevykazují [24].



Obr. 9: Závislost koncentrace prvků na času izolace porového roztoku

Na základě předchozí analýzy byl syntetizován porový roztok podle chemického složení po 24 hodinách. Tento čas byl vybrán proto, že po této době už se neočekávají větší výkyvy ve složení porového roztoku, což je vidět i z grafu na obr. 9, kde je trend koncentrace sledovaných prvků v roztoku po 24 hodinách víceméně konstantní. Navíc byl po uplynutí této doby měřen také začátek smrštění.

K syntetizovanému roztoku se složením po 24 hodinách byly tedy následně přidány jednotlivé PPG a PG a bylo provedeno měření povrchového napětí, jehož výsledky jsou shrnuty v grafu na obr. 10.



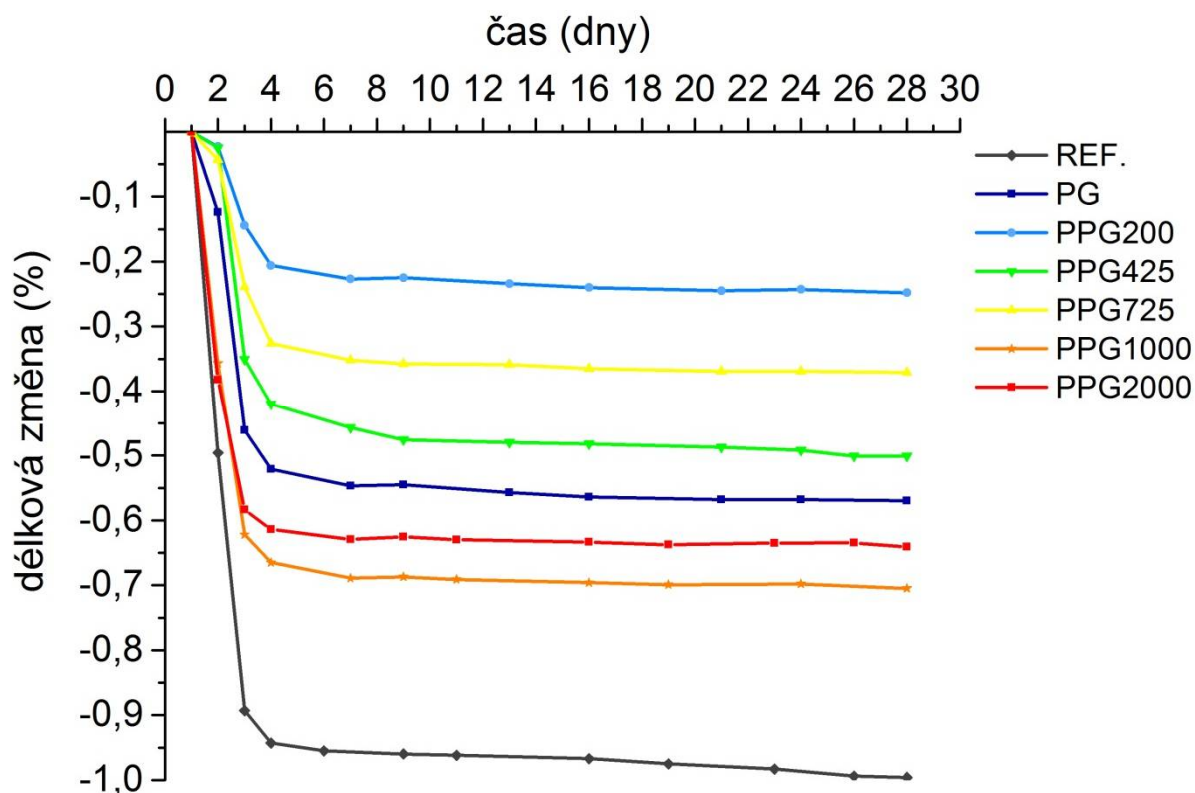
Obr. 10: Závislost povrchového napětí na koncentraci daných SRA

Z obr. 10 je vidět, že čím vyšší je obsah povrchově aktivní látky v roztoku, tím více snižuje povrchové napětí až do dosažení kritické micelární koncentrace (CMC). V případě, polypropylenglykolů, CMC odpovídá povrchovému napětí v rozmezí od 40 do 55 mJ/m², tedy 0,5 hm. %, což je přepočteno na strusku. Dále je zřetelné, že nejmenší vliv na snížení povrchového napětí měl PG a u polypropylenglykolů bylo s rostoucí délkou řetězce dosaženo nižších hodnot. U PPG 1000 a PPG 2000 se křivky víceméně překrývají, proto lze tedy usoudit, snižují povrchové napětí nejvíce, protože délka jejich řetězce je nejvyšší.

5.2 Měření smrštění

V této kapitole jsou popsány délkové a také hmotnostní změny připravených vzorků. Všechny vzorky obsahovaly 0,5 % přídavek PG nebo PPG.

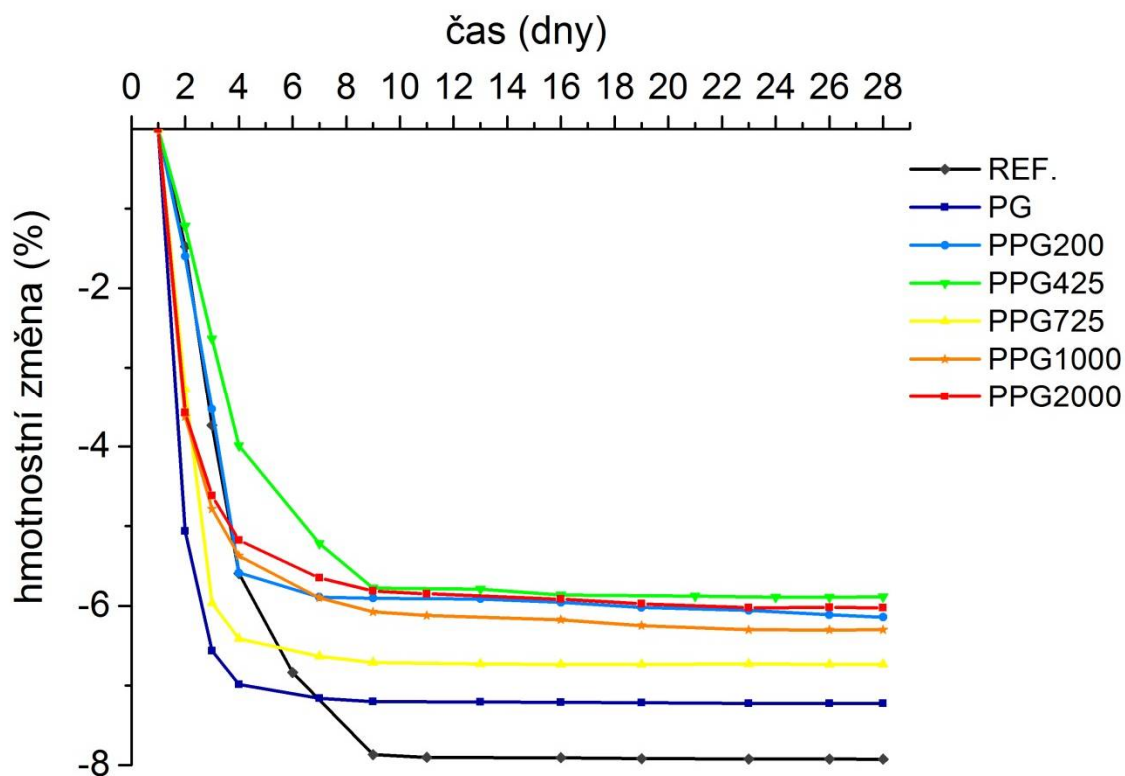
Obr. 11 znázorňuje graf závislosti délkových změn na stáří vzorků. Z grafu je vidět, že všechny použité povrchově aktivní látky snižují smrštění v porovnání s referenčním vzorkem. Dále je patrné, že při redukci smrštění hraje také podstatnou roli molekulární charakter použitých propylenglykolů. Měření délkových změn překvapivě ukázalo, že nejvíce došlo ke snížení smrštění při použití PPG 200 a nejmenší vliv na smrštění měl naopak PPG 1000. Tyto výsledky jasně ukazují, že schopnost snižovat povrchové napětí nemusí být v souladu s redukcí smrštění. Existují totiž i jiné faktory, které je třeba vzít v úvahu.



Obr. 11: Závislost změny délky na stáří trámečeků

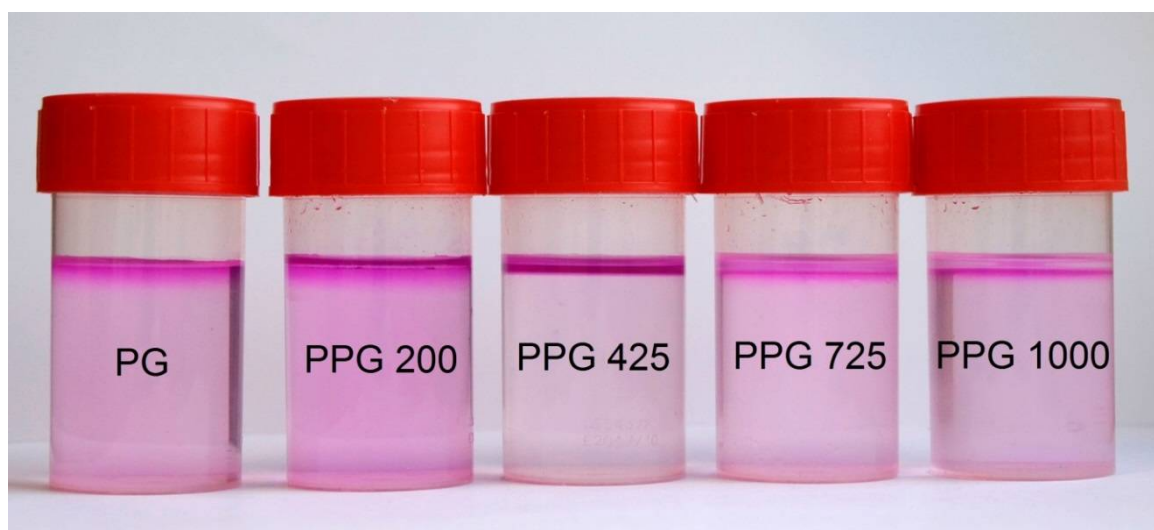
Graf na obr. 12 ukazuje účinek SRA na změny hmotnosti v průběhu smršťování. Z grafu je u všech přísad patrné zvýšení ztráty hmotnosti zejména v průběhu počátečních fází vysychání. U všech použitých přísad byl však zaznamenán menší úbytek hmotnosti ve srovnání s referenčním vzorkem. Největší vliv na hmotnostní změny měl přidavek PPG 425, který způsobil nejmenší hmotnostní úbytek a to méně než 6 %. Podobné výsledky byly získány i při použití PPG 2000. Na druhé straně byl naměřen největší úbytek hmotnosti v případě vzorku s PG, který však pořád dosahoval nižších hodnot než reference.

V literatuře je bohužel nedostatek informací o účinku SRA na ztrátu hmotnosti AAS pro porovnání získaných výsledků.



Obr. 12: Závislost změny hmotnosti na stáří trámečků

Jedním z důležitých faktorů ovlivňující smrštění je mísitelnost použité povrchově aktivní látky s alkalickým roztokem. V případě glykolů je tvorba micel spojena s celkovou mísitelností a ta je řízena molekulovou hmotností, jak je uvedeno v Seguin et al. [38]. Vyšší objem micel způsobuje nepravidelnou distribuci povrchově aktivního činidla v porovém roztoku, což pak vede k většímu smrštění v určitých oblastech alkalicky aktivovaného systému. Na obr. 13 jsou roztoky použitých povrchově aktivních látek v 0,5 hm. % přídatku v alkalickém aktivátoru. Zde je vidět, že s rostoucí molekulovou hmotností je tendence k většímu odměšování polypropylenglykolů. Pro zdůraznění tohoto efektu byla do každého roztoku přidána kapka fenolftaleinu.



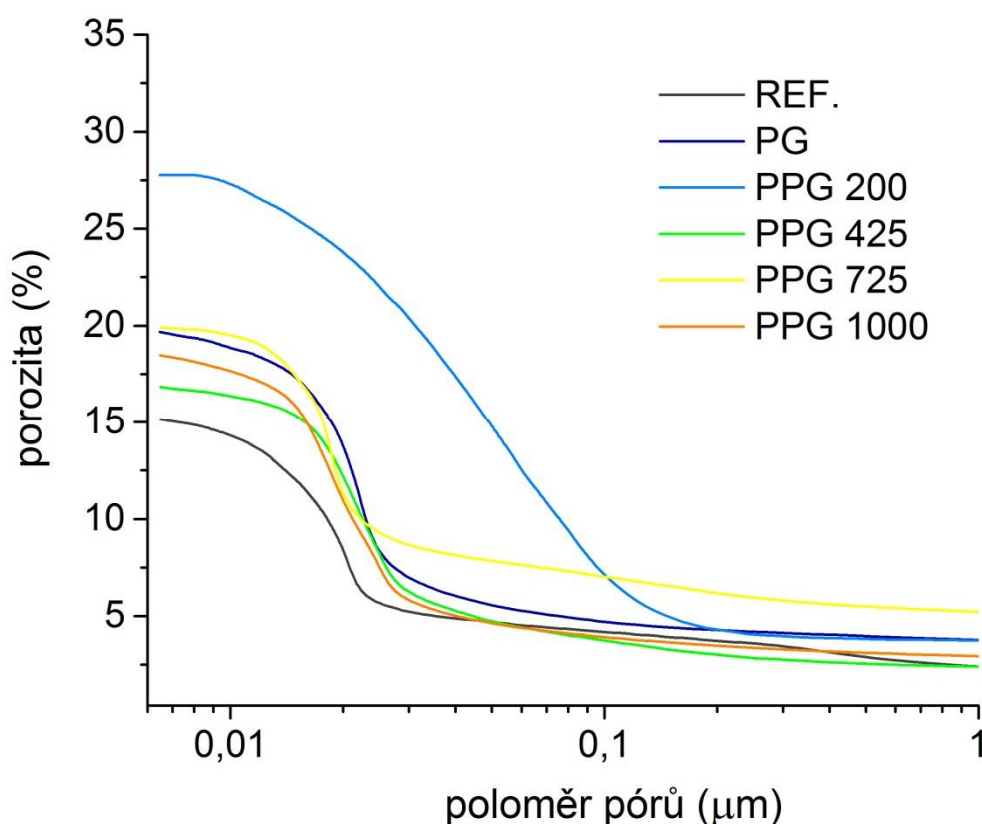
Obr. 13: Mísitelnost SRA v alkalickém aktivátoru

Z uvedených výsledků vyplývá, že smrštění je závislé na chování povrchově aktivní látky, jako je její povrchové napětí, mísitelnost a pórovitost. Tyto faktory pak hrají klíčovou roli v konečném snížení smrštění.

5.3 Měření porozity a distribuce velikosti pórů

Jak již bylo zmíněno, SRA mají schopnost měnit distribuci velikosti pórů, které mohou významně ovlivnit smrštění. Je známo, že smrštění vysycháním je velmi závislé na ztrátě vody z malých (2,5 až 10,0 nm) až středních (10,0 až 50,0 nm) mezopórů. Dřívější studie ukazují, že alkalicky aktivovaná pojiva obsahují póry právě těchto velikostí, což způsobuje, že kapilární tahové síly jsou větší, a proto výsledné smrštění je větší.

Naměřená data, jejichž závislost je znázorněna na obr. 14, ukazují, že v případě testovaných glykolů dochází ke zvýšení porozity a hrubší distribuci pórů. Vzorky s přídavkem povrchově aktivních látek vykazují vyšší pórovitost v porovnání s referenčním vzorkem. Nicméně, důležitým faktorem je obsah malých a středních pórů v celkové porozitě materiálu. Tabulka č. 8 shrnuje procentuální podíl mezopórů v jejich kritickém rozmezí velikostí (6,5 až 50,0 nm). Když se vzorky uspořádají v pořadí podle zvyšujícího se obsahu pórů v dané oblasti jejich velikostí, vznikne následující řada: PPG 200 < PPG 725 < REF. < PPG 425 < PG < PPG 1000. Tento trend je podobný naměřenému smrštění u všech vzorků (viz obr. 11), tedy kromě referenčního vzorku, který neobsahoval žádnou příměs snižující povrchové napětí pórového roztoku.



Obr. 14: Distribuce velikosti pórů u vzorků alkalicky aktivované strusky

Tab. 8: Porozita vzorků alkalicky aktivované strusky

Vzorek	Celková porozita (%)	Obsah pórů ve velikosti od 6,5 do 50,0 nm (%)
REF.	15,08	69,89
PG	19,59	73,10
PPG 200	27,81	54,36
PPG 425	16,83	73,02
PPG 725	19,80	61,26
PPG 1000	18,43	76,18

5.4 Pozorování mikrostruktury a prvková analýza

U všech vzorků včetně referenčního byla pozorována struktura jejich lomových ploch a provedena prvková analýza pomocí skenovacího elektronového mikroskopu (SEM). Pozorování mikrostruktury bylo prováděno u vzorků po 28 dnech zrání. Zastoupení jednotlivých prvků ve vzorcích a jejich obsahy jsou shrnuty v tab. 9.

Tab. 9: Atomové složení prvků ve vzorcích po 28 dnech

Typ vzorku	Prvky – atomové složení [%]					
	O	Na	Mg	Al	Si	Ca
REF.	58,95	4,16	1,55	3,41	18,75	13,18
PG	63,49	4,94	1,59	2,60	15,75	11,62
PPG 200	59,57	5,36	1,64	2,53	17,60	13,83
PPG 425	58,84	5,26	2,21	2,70	17,39	13,60
PPG 725	63,63	5,37	3,15	2,92	15,09	9,94
PPG 1000	59,91	5,42	1,40	2,82	17,77	12,94
PPG 2000	61,46	5,11	3,40	3,31	16,27	10,44

Prvková analýza byla u všech vzorků prováděna ve spektru oblasti pojivové fáze, protože analýzy z oblasti zrna strusky nebo kameniva by mohly výsledky zkreslovat. Z naměřených hodnot je vidět, že obsah prvků ve všech vzorcích je poměrně podobný a hodnoty pouze kolísají v řádech jednotek procent.

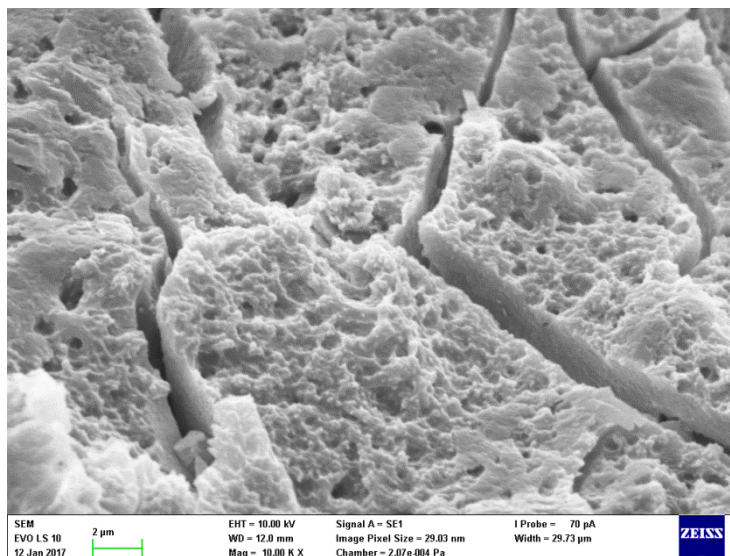
Všechny snímky (viz obr. 15–21) pořízené při pozorování mikrostruktury byly pořízeny při zvětšení 10 000x. Na obrázcích je patrné, k jakým strukturním změnám dochází s přidávkou jednotlivých SRA.

Na obr. 15 je vidět struktura referenčního vzorku, na němž se vyskytují četné praskliny, které vznikly pravděpodobně v důsledku smrštění. Dále je zde také patrné jen malé množství pórů. S přidávkou PPG 200 je už ve vzorku značně zvýšená porozita (obr. 17), což koresponduje i s výsledky z porozimetrie uvedenými v předchozí kapitole, kde tento vzorek měl celkově nejvyšší obsah pórů. Z dalších snímků je vidět, že porozita narůstá u vzorků s přidávkou PPG vyšších molekulových hmotností.

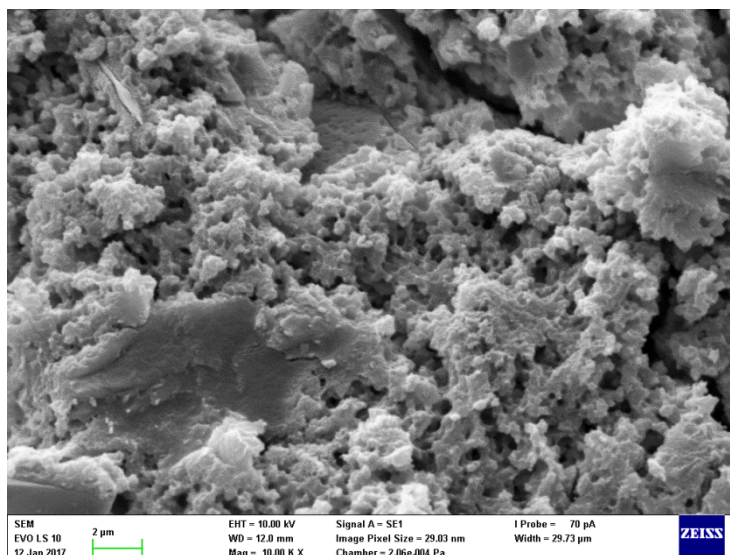
Na snímcích na obr. 18 a 19, znázorňující strukturu vzorků s PPG 425 a 725 je porozita zhruba srovnatelná. Tyto výsledky korespondují s výsledky z měření smrštění uvedených již

v kap. 5.2, kdy největší redukce smrštění bylo dosaženo pomocí PPG 200, 425 a 725. To odpovídá i teoriím, které předpokládají, že čím větší póry se nacházejí ve struktuře, tím menší vzniká smrštění.

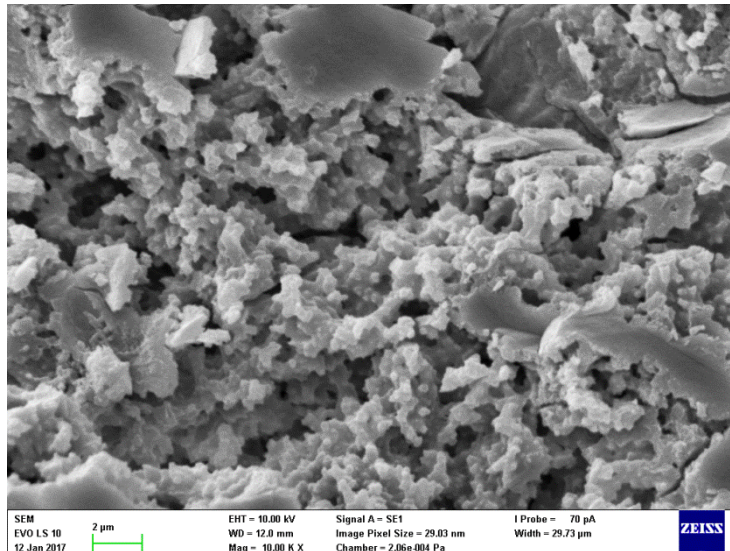
Při přidavku PPG 1000 se už ale mikrostruktura na obr. 20 jasně liší od ostatních. Na tomto snímku lze vidět, že struktura, kterou vytváří CSH gel je méně porézní oproti předchozím vzorkům. Na obr. 21, kde je znázorněna lomová plocha vzorku s PPG 2000, je vidět, že struktura je ještě o něco kompaktnější než u předchozího vzorku a neobsahuje téměř žádné praskliny, jako tomu bylo u referenčního vzorku. Málo porézní struktura těchto vzorků opět odpovídá výsledkům z měření smrštění, kde měly tyto dva vzorky nejmenší vliv na snížení smrštění.



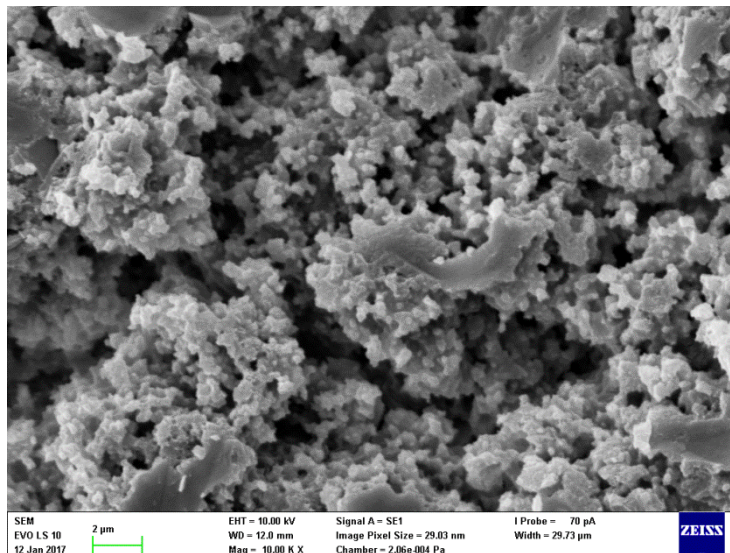
Obr. 15: Mikrostruktura referenčního vzorku při zvětšení 10 000x



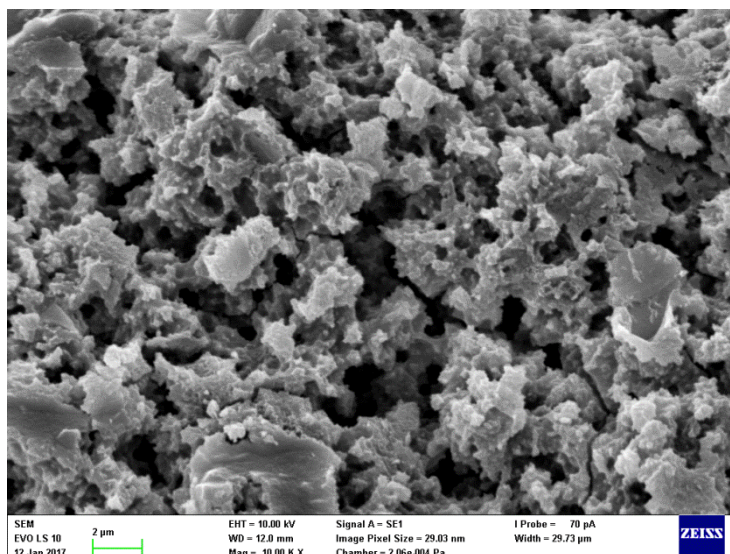
Obr. 16: Mikrostruktura vzorku s PG



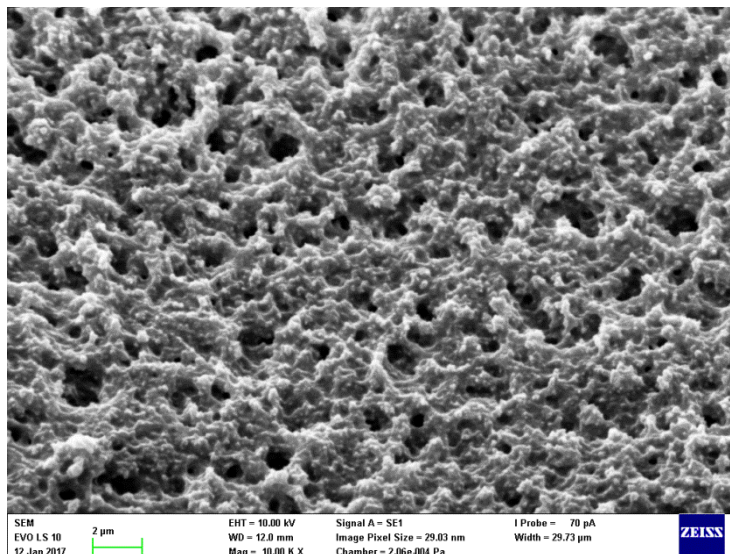
Obr. 17: Mikrostruktura vzorku s PPG 200



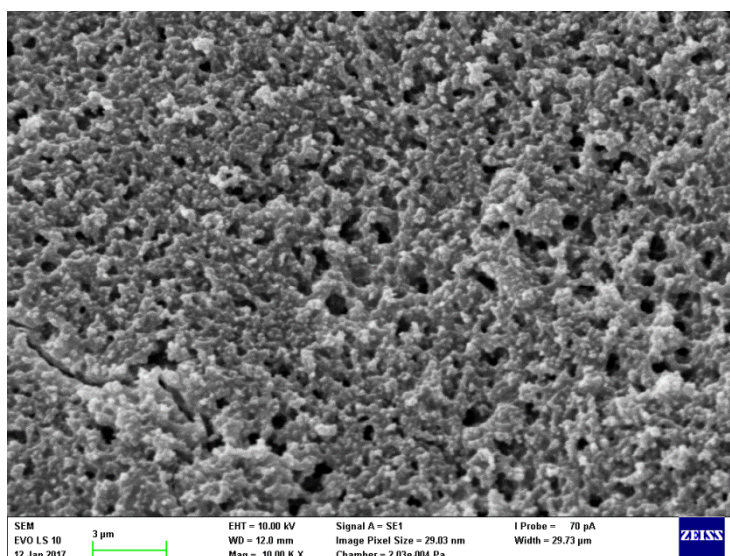
Obr. 18: Mikrostruktura vzorku s PPG 425



Obr. 19: Mikrostruktura vzorku s PPG 725



Obr. 20: Mikrostruktura vzorku s PPG 1000



Obr. 21: Mikrostruktura vzorku s PPG 2000

5.5 Stanovení pevností

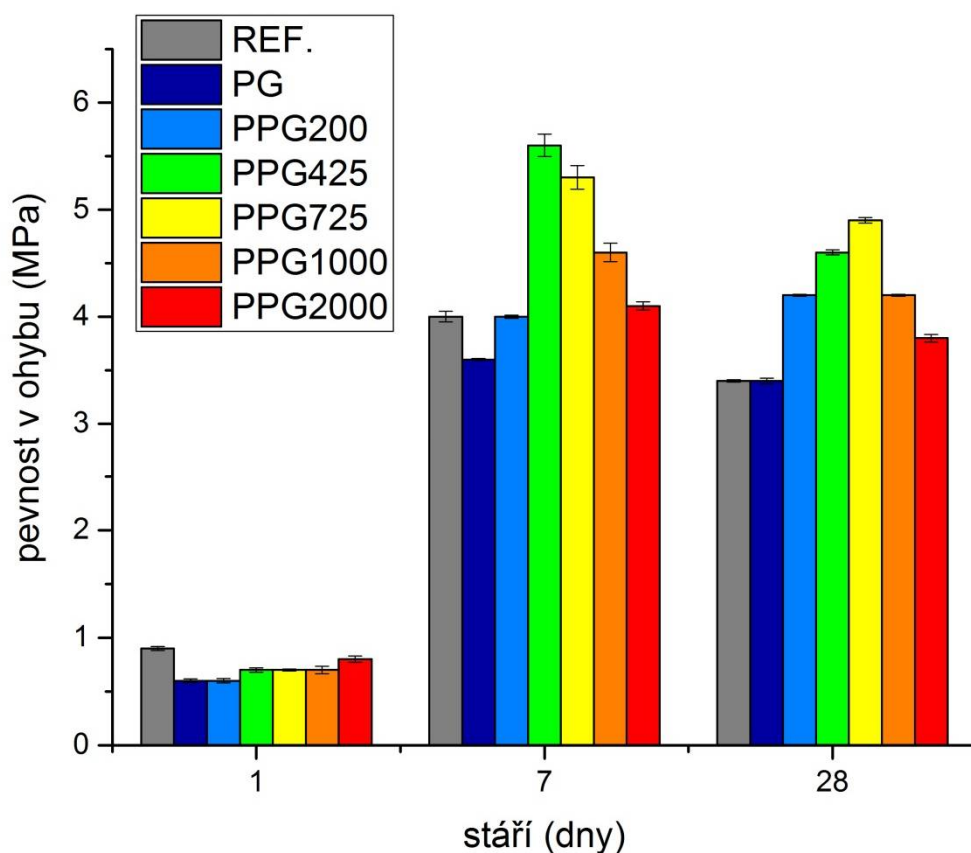
V následující kapitole je popsán vliv jednotlivých SRA na vývoj pevností v tahu a v tlaku během 28 dní zrání.

5.5.1 Pevnosti v tahu za ohybu

Jednotlivé SRA byly ve všech vzorcích v přídatku 0,5 hm. % vztažených na množství strusky. V závislosti na typu propylenglykolu se pak liší jednotlivé hodnoty pevností, což je viditelné v tab. 10. Vývoj pevností v ohybu tuhnuoucích malt AAS je znázorněn na obr. 22.

Tab. 10: Průměrné hodnoty pevností v ohybu

Typ přísady (0,5 hm. %)	σ_{ohyb} [MPa]		
	1. den	7. den	28. den
REF	0,9	4,0	3,4
PG	0,6	3,6	3,4
PPG 200	0,6	4,0	4,2
PPG 425	0,7	5,6	4,6
PPG 725	0,7	5,3	4,9
PPG 1000	0,7	4,6	4,2
PPG 2000	0,8	4,1	3,8



Obr. 22: Graf závislosti pevnosti v tahu za ohybu na stáří vzorků s SRA

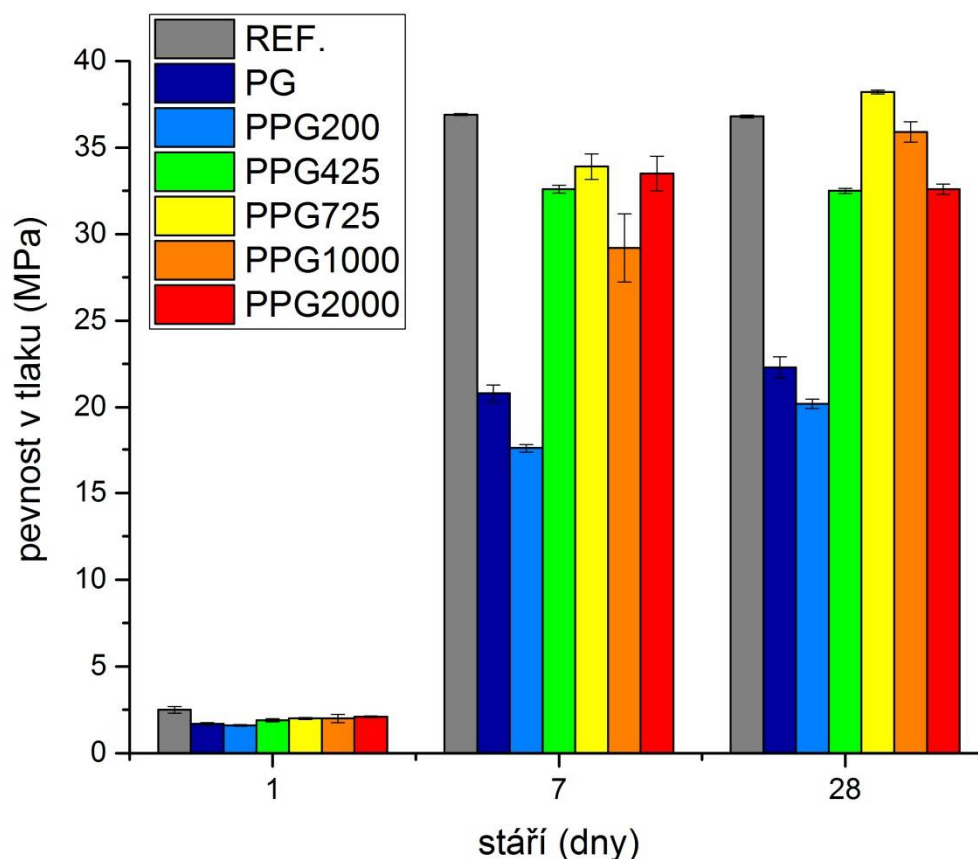
Z grafu je zřejmé, že po prvním dnu mají všechny vzorky obsahující SRA pevnosti v ohybu nižší než reference. Výsledky měření po týdnu už ale ukazují jisté odlišnosti. Zde dosahují nejvyšších pevností vzorky s PPG 425 a za ním v závěsu jsou vzorky s PPG 725. Nejnižších pevností nabývá vzorek s PG, ostatní se pohybují víceméně okolo pevnosti referenčního vzorku. Po 28 dnech se trend pevností dále příliš nemění, pouze jsou všechny pevnosti o několik desetin menší.

5.5.2 Pevnosti v tlaku

Dále byly měřeny pevnosti v tlaku u všech vzorků s SRA, jejichž konkrétní hodnoty jsou v přehledu v tab. 11. Graf vytvořený z těchto hodnot, znázorňující vývoj pevností vzorků s různými druhy povrchově aktivních látek je uveden na obr. 23.

Tab. 11: Průměrné hodnoty pevností v tlaku

Typ přísady (0,5 hm. %)	σ_{tlak} [MPa]		
	1. den	7. den	28. den
REF	2,5	36,9	36,8
PG	1,7	20,8	22,3
PPG 200	1,6	17,6	20,2
PPG 425	1,9	32,6	32,5
PPG 725	2,0	33,9	38,2
PPG 1000	2,0	29,2	35,9
PPG 2000	2,1	33,5	32,6



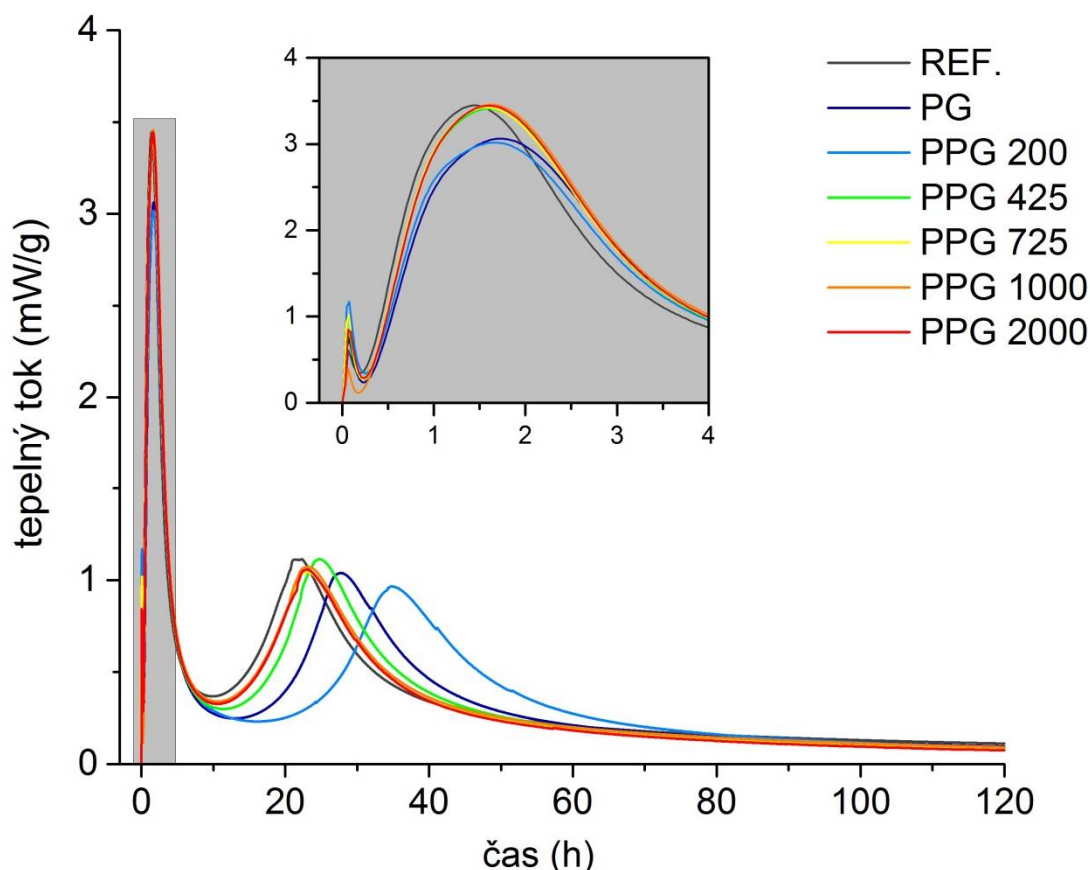
Obr. 23: Graf závislosti pevností v tlaku na stáří vzorků s SRA

Z výše uvedeného grafu pevností je vidět, že po 24 hodinách nedosahuje žádný ze vzorků pevnosti reference a navíc je zde patrný pokles pevnosti vzorků s přísadkou PG a PPG 200. Tato naměřená data jsou plně v souladu s měřeními kalorimetrie uvedenými v kapitole 5.6. Kalorimetrická křivka, jejíž druhý velký pík odpovídající době hydratace, nastává mnohem

později u vzorků s PG a PPG 200. Pokles pevností u těchto vzorků je mnohem lépe patrný po 7 dnech zrání vzorků. Výsledky dosažené po 28 dnech vypovídají o účinnosti přísad redukujících smrštění. Zatímco v případě vzorků s PG, PPG 200, PPG 425 a PPG 2000 zůstávají pevnosti v tlaku téměř stejné ve srovnání se vzorky starými 7 dnů, při použití PPG 725 a PPG 1000 se ukázalo postupné zvyšování pevností. Celkově nejvyšší pevnosti dosáhl vzorek s PPG 725 a to 38,2 MPa, což je zároveň i jediná hodnota přesahující pevnost referenčního vzorku (36,8 MPa). Kromě toho, povrch referenčního vzorku bez přidání glykolů byl pokryt viditelnými drobnými prasklinami, které jen potvrzují význam použití povrchově aktivních látek.

5.6 Kalorimetrická stanovení

V následující kapitole je popsán vliv jednotlivých přísad (SRA) na tepelný průběh procesu tuhnutí a tvrdnutí. Díky zaznamenanému vývoji tepla je také zjištěno, zda přídavek aditiv ovlivňuje kinetický průběh tuhnutí. SRA jsou ve vzorcích v přídavku 0,5 hm. % a pro každou směs je zaznamenána vlastní kalorimetrická křivka (viz obr. 24).



Obr. 24: Kalorimetrické křivky pro vzorky s přídavky SRA

Z naměřené závislosti je patrné, že první vrchol se objevuje ihned po přidání aktivátoru a je vždy spojen se smáčením a rozpouštěním zrn vysokopevní strusky. Ze zvětšené oblasti je zřejmé, že druhý pík, který je spojený s tvorbou primárního CSH gelu, se snižuje u vzorku s propylenglykolem (PG) a ještě více u polypropylenglykolu 200. Tento jev nastává mezi první a druhou hodinou od namíchání a dochází při něm k největšímu vývinu tepla (až 3,5 mW/g).

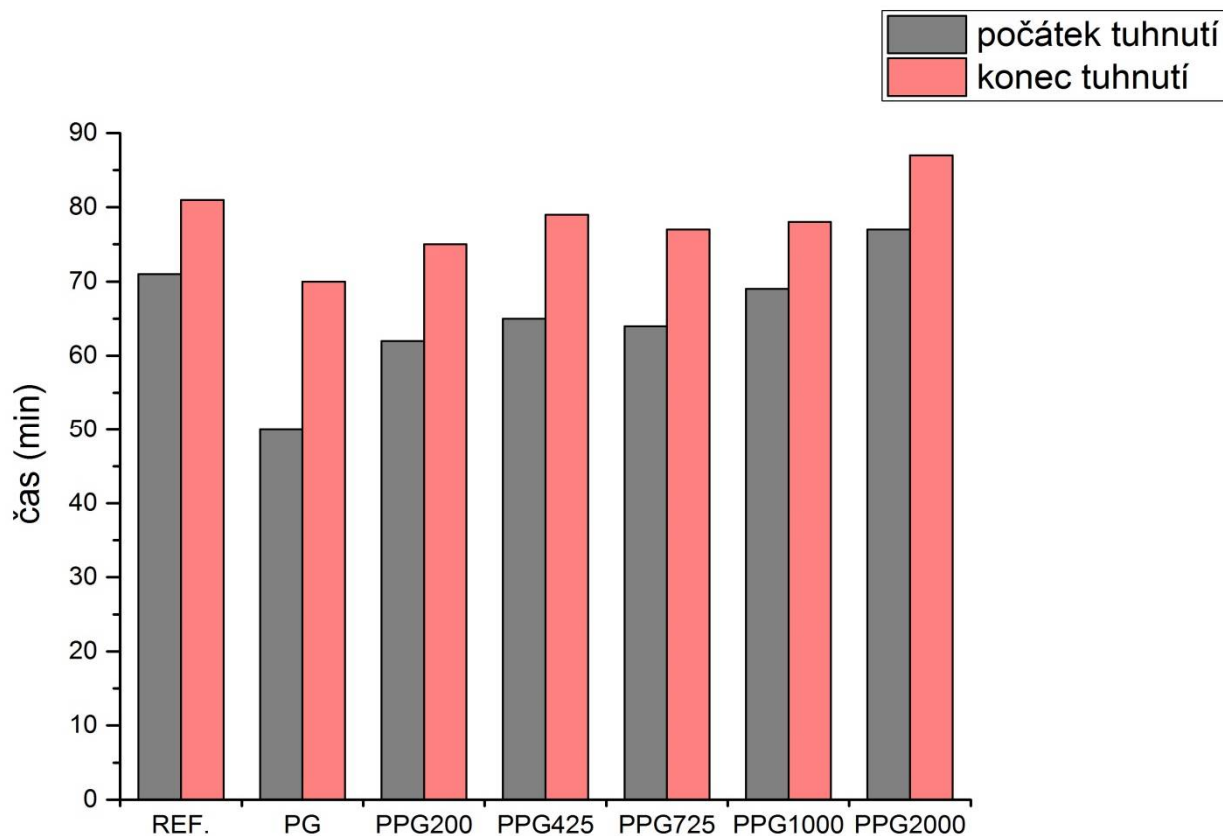
Zpomalení hydratace v případě těchto dvou glykolů lze také velmi dobře pozorovat na třetím vrcholu, který nastává asi po 28 hodinách od namíchání u PG a po 35 hodinách u PPG 200. V této fázi dochází k sekundární tvorbě CSH gelu. Ostatní povrchově aktivní látky významně neovlivnily proces alkalické aktivace, protože jejich křivky se příliš neliší od křivky referenčního vzorku. Tyto výsledky naznačují, že polypropylenglykoly s kratší délkou řetězce jsou odpovědné za zpomalení doby hydratace směsi a tvorbu menšího množství pojivové fáze, což pak způsobuje zhoršení krátkodobých mechanických vlastností, které byly popsány v kap. 5.5.2.

5.7 Stanovení doby tuhnutí

V této kapitole jsou shrnuty výsledky měření doby tuhnutí, které byly stanoveny pomocí Vicatova přístroje. Jednotlivé časy počátku a konce tuhnutí se liší v závislosti na typu použitého SRA a jsou uvedeny v tab. 12. Trend vývoje doby tuhnutí je znázorněn v grafu na obr. 25.

Tab. 12: Hodnoty časů doby tuhnutí směsí s SRA

Typ přísady (0,5 hm. %)	Doba tuhnutí [min]	
	počátek	konec
REF	71	81
PG	50	70
PPG 200	62	75
PPG 425	65	79
PPG 725	64	77
PPG 1000	69	78
PPG 2000	77	87



Obr. 25: Závislost doby tuhnutí na typu SRA

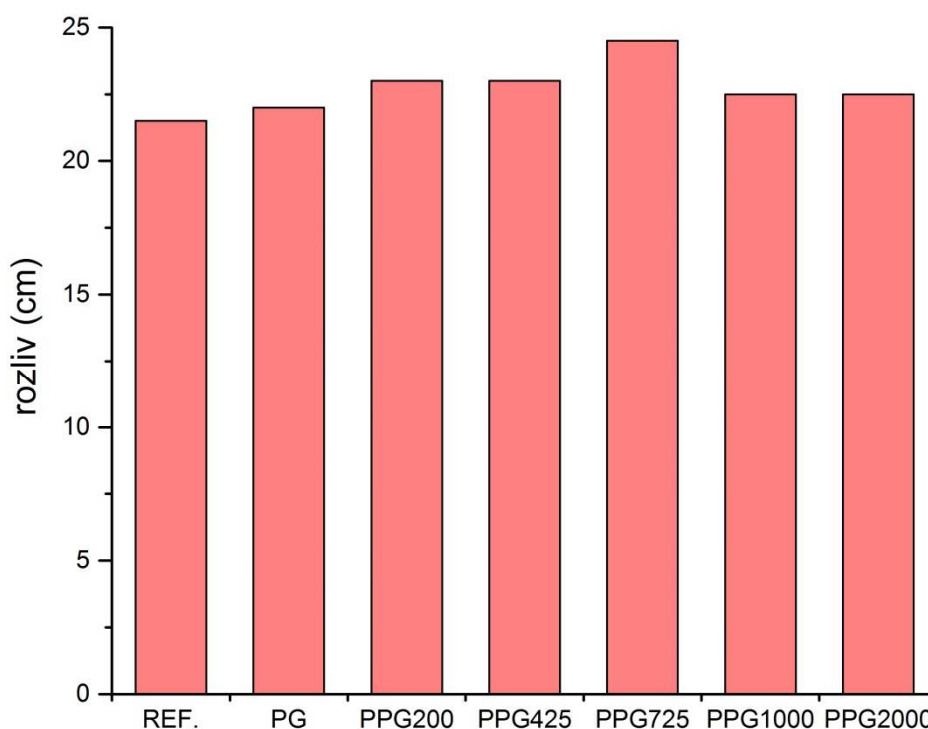
Z uvedeného grafu lze vyčíst, že PPG 2000 jako jediný z použitých povrchově aktivních látek prodlouží jak počátek, tak konec tuhnutí. Prodloužení však není nijak markantní, jedná se pouze o změnu v řádech jednotek minut. Nejvíce dobu tuhnutí naopak zkracuje PG, který zkrátí počátek tuhnutí až o 19 minut oproti referenčnímu vzorku. Na druhou stranu je u této směsi nejdelší prodleva mezi počátkem a koncem tuhnutí vzhledem k ostatním vzorkům a to 20 minut. U všech ostatních přísad bylo dosaženo časů kratších než u reference, ale byl zde patrný trend prodloužení doby tuhnutí s rostoucí molekulovou hmotností polypropylenglykolů. Tento trend se projevil při stanovení počátku i konce tuhnutí.

5.8 Stanovení zpracovatelnosti

V této kapitole jsou zpracovány výsledky ze zkoušky rozlitím, která byla provedena u malt s jednotlivými přísadami pomocí střešovacího stolku. Naměřené průměrné hodnoty jsou uvedené v tab. 13 a graf vytvořený z těchto dat je znázorněn na obr. 26.

Tab. 13: Průměrné hodnoty rozlivu u směsí s SRA

Typ přísady (0,5 hm. %)	Rozliv [cm]
REF	21,5
PG	22,0
PPG 200	23,0
PPG 425	23,0
PPG 725	24,5
PPG 1000	22,5
PPG 2000	22,5



Obr. 26: Graf závislosti zpracovatelnosti na typu SRA

Výsledky tohoto experimentu ukazují, že s přidavkem jakéhokoliv SRA dojde ke zvětšení průměru rozlité směsi. Největší rozliv byl zaznamenán u směsi s PPG 725, který byl až o 3 cm větší než u referenčního vzorku. Nejmenší vliv na zpracovatelnost měl zase PG, u něhož byl naměřen průměr koláče jen o 0,5 cm větší než u reference. Celkově však všechny testované povrchově aktivní látky zlepšily zpracovatelnost připravených směsí.

6 ZÁVĚR

Tato práce byla zaměřena na redukci smrštění alkalicky aktivované strusky pomocí organických povrchově aktivních látek. V teoretické části byly zmíněny základní informace o alkalicky aktivovaných pojivech, jejich vlastnostech a výchozích látkách. Podrobněji se však teorie zabývala samotným smrštěním, jeho principy a také mechanismem působení povrchově aktivních látek v těchto systémech.

Cílem této práce bylo zjistit, jakým způsobem redukuje povrchově aktivní látky smrštění v AAS. Nejprve tedy bylo změřeno povrchové napětí SRA pomocí tenziometru, a na základě toho byly zhotoveny trámečky, na nichž se měřily délkové a hmotnostní změny. Poté se sledovaly další vlastnosti připravených směsí s SRA jako pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku, zpracovatelnost nebo doba tuhnutí. Dále byly vzorky podrobeny kalorimetrickým stanovením a analýze na skenovacím elektronovém mikroskopu.

Testovaných směsí v experimentální části práce bylo celkem sedm, přičemž bylo použito šest přísad redukující smrštění a každá z nich byla přidána vždy v 0,5 hm. % přidavku vztaženého na vysokopecní strusku, a zároveň byly srovnávány s referenčním vzorkem.

Z výsledků měření povrchového napětí SRA v pórovém roztoku vyplývá, že látky, které nejvíce snižují povrchové napětí, jsou PPG 1000 a PPG 2000. Propylenglykoly s kratšími délkami řetězce dosáhly o poznání horších výsledků. Dále bylo zjištěno, že s rostoucím obsahem SRA v roztoku se stále více snižovalo povrchové napětí až do dosažení CMC, která byla v tomto případě v rozmezí od 40 do 55 mJ/m².

Měření smrštění ukázalo, že všechny SRA použité v této práci snížily smrštění oproti referenčnímu vzorku, avšak největší vliv na redukci smrštění měl vzorek s PPG 200. Naproti tomu nejméně redukoval smrštění PPG 1000. Tyto výsledky tak dokazují, že ačkoliv vzorek s PPG 1000 dosahoval nejnižších povrchových napětí, nemusí to nutně znamenat, že také nejvíce sníží smrštění. Hrají zde totiž důležitou úlohu také další vlivy, z nichž nejvýznamnější je porozita, která je pak dobře vidět na výsledcích ze SEM-EDS a také ze samotného měření rtuťovým porozimetrem. V případě PPG 200 totiž dojde k vytvoření pórovitější struktury AAS a tím se sníží napětí, které zapříčiňuje prasknutí na základě smrštění.

Data získaná pomocí porozimetru ukazují, že při použití glykolů dochází celkově ke zvýšení porozity oproti referenčnímu vzorku. Co se týká obsahu malých a středních mezopórů, nejméně jich obsahoval vzorek s PPG 200 a nejvíce naopak vzorek s PPG 1000. Tyto výsledky tedy korespondují s výsledky měření smrštění, kde vzorek s PPG 200 snížil smrštění nejvíce a naproti tomu PPG 1000 měl nejmenší vliv na redukci smrštění a to v důsledku většího obsahu mezopórů kritické velikosti.

Strukturní a prvková analýza pomocí skenovacího elektronového mikroskopu byla provedena u všech vzorků po 28 dnech zrání. Na snímcích z mikroskopu jsou vidět rozdílné struktury při použití daných SRA. Zatímco u referenčního vzorku je struktura málo porézní a značně popraskaná v důsledku smrštění, u vzorků s PPG 200, 425 a 725 je porozita mnohem více rozvinutá. Toto zjištění tedy vypovídá o tom, že porozita opravdu hraje důležitou roli při celkovém smrštění, protože tyto látky také nejvíce zredukovaly smrštění. Vzorky s propylenglykoly vyšších molekulových hmotností měly mnohem kompaktnější a méně pórovitou strukturu, proto neměly tak velký vliv na snížení smrštění.

Z naměřených pevností bylo zjištěno, že absolutně nejvyšších pevností v tlaku dosahuje vzorek s PPG 725 po 28 dnech. Hodnota jeho pevnosti je 38,2 MPa. Obecně u všech ostatních naměřených pevností jak v tahu za ohybu, tak v tlaku, pak bylo vždy dosaženo pevností nižších než u referenčního vzorku.

Výsledky kalorimetrických závislostí ukázaly, že přísady některých SRA mají určitý vliv na průběh tuhnutí a tvrdnutí. U všech směsí se objevuje první počáteční pík ihned po přidání aktivátoru, kdy dochází ke smáčení a rozpouštění zrn strusky. Poté nastává první větší vývin tepla, který se časově pohybuje průměrně okolo jedné až dvou hodin od namíchání. V tomto čase dochází také ke tvorbě primární C-S-H fáze. Další vývoj tepla, který nabývá menších hodnot a odpovídá hydratačnímu píku, nastává u směsí s PG a PPG 200 mnohem později než u referenčního vzorku. Doba hydratace je zde tedy delší, což vede ke snížení jednodenních pevností oproti referenčnímu vzorku. U ostatních SRA docházelo k hydrataci zhruba ve stejné době jako u referenčního vzorku a proto i jednodenní pevnosti dosáhly podobných hodnot.

Data naměřená pomocí Vicatova přístroje ukázala, že doba tuhnutí (počátek i konec) byla prodloužena pouze pomocí PPG 2000. U všech ostatních přísad byly naměřeny časy vždy kratší než u referenčního vzorku, jehož počátek tuhnutí byl stanoven na 71 minut a konec na 81 minut. Z výsledků bylo také patrné, že ačkoliv byla doba tuhnutí oproti referenci kratší, celkově se doba tuhnutí prodlužovala s molekulovou hmotností PPG.

Z výsledků experimentu na stanovení zpracovatelnosti bylo zřejmé, že největší účinek na rozliv měl vzorek s PPG 725. Ostatní testované povrchově aktivní látky sice také zlepšily zpracovatelnost připravených směsí, ale ne tak razantně.

Závěrem této práce lze tedy říci, že všechny testované SRA mají pozitivní vliv na redukci smrštění alkalicky aktivované strusky. Pomocí provedených analýz bylo zjištěno a potvrzeno, že při redukci smrštění nehraje hlavní roli pouze snížení povrchového napětí, ale také další faktory, z nichž je nejvýznamnější porozita. Právě změna v distribuci velikosti pórů ve struktuře AAS pomocí SRA má za následek snížení smrštění při vysychání. Z tohoto důvodu by bylo dobré se zaměřit na podrobnější výzkum vlivu dalších typů SRA na mikrostrukturu a snahu o zvýšení jejich účinnosti na redukci smrštění AAM.

7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] MITCHELL, John F. B. The “Greenhouse” effect and climate change. *Reviews of Geophysics* [online]. 1989, vol. 27, issue 1, p. 115–139 [cit. 2015-12-12]. DOI: 10.1029/RG027i001p00115. ISSN: 8755-1209. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1029/RG027i001p00115>
- [2] Alkali activated materials: state-of-the-art report, RILEM TC 224-AAM. Editor John L Provis, Jannie S van Deventer. Dordrecht: Springer, c2014, xiv, 388 s. ISBN 978-94-007-7671-5.
- [3] ŠKVÁRA, F. Alkali activated materials or geopolymers?. 2007. Dostupné z: http://www.ceramics-silikaty.cz/2007/pdf/2007_03_173.pdf
- [4] VAN DEVENTER, J., L. PROVIS, P. DUXSON a D. G. BRICE. Chemical Research and Climate Change as Drivers in the Commercial Adoption of Alkali Activated Materials. *Waste and Biomass Valorization*. 2010, vol. 1, issue 1, s. 145-155. DOI: 10.1007/s12649-010-9015-9. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s12649-010-9015-9>.
- [5] AĪTCIN, P. Vysokohodnotný beton. 1. české vyd. Praha: ČKAIT, 2005, 320 s. *Betonové stavitelství*. ISBN 80-867-6939-9.
- [6] DAVIDOVITS, Edited by Joseph. Geopolymer, green chemistry and sustainable development solutions: proceedings of the World Congress Geopolymer 2005 = Géopolymère, chimie verte et solutions pour le développement durable : rapports du Congrès Mondial Géopolymère 2005. Saint-Quentin (France): Geopolymer Institute, 2005. ISBN 29-514-8200-0.
- [7] DAVIDOVITS, J. Geopolymer: chemistry. 2nd ed. Saint-Quentin: Institute Géopolymère, 2008, 587 s. ISBN 29-514-8201-9.
- [8] BOHÁČOVÁ, J., S. STANĚK a M. VAVRO. Possible Applications of Alkali-Activated Systems in Construciton Možnosti Aplikace Alkalicky Aktivovaných Systémů Ve Stavebnictví. 2. vydání. Ostrava: Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské, 2012. ročník, XII. ISBN 10.2478/v10160-012-0012-8
- [9] SHI, C. Alkali-activated cements and concretes. London: Taylor, 2006, ix, 376 s. ISBN 04-157-0004-3.
- [10] 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* [online]. 2010, vol. 40, issue 9, s. 1341-1349 [cit. 2016-10-21]. DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.03.020. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S000888461000089X>.
- [11] PACHECO-TORGAL, F., J. CASTRO-GOMES a S. JALALI. Alkali-activated binders: A review. *Construction and Building Materials*. 2008, vol. 22, issue 7, s. 1305-1314. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2007.10.015. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061807002462>
- [12] INDRA, I. Kompozitní materiály na bázi alkalicky aktivované vysokopecní strusky s přídavkem elektrárenských popílků. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta chemická,

2010. 62 l. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická. Vedoucí práce Ing. Tomáš Opravil, Ph.D.
- [13] OxyChem: The OxyChem Sodium Silicates Handbook [online]. [cit. 2016-10-22]. Dostupné z: <http://www.oxy.com/ourbusinesses/chemicals/products/documents/silicates/silicate.pdf>
- [14] Some thermodynamic, structural and behavioral aspects of materials accentuating non-crystalline states. Editor Jaroslav Šesták, Miroslav Holeček, Jiří Málek. Nymburk, 2009, 18, 607 s. ISBN 978-80-87269-06-0.
- [15] PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. Jakob (ed.). Geopolymers: structures, processing, properties and industrial applications. Elsevier, 2009.
- [16] FERNÁNDEZ – JIMENÉZ A., PALOMO A. Characterisation of fly ashes. Potential reactivity as alkaline cements. Fuel, 82 (18), 2259-2265.
- [17] DAVIDOVITS, J. Properties of geopolymer cements. In: First international conference on alkaline cements and concretes. 1994. p. 131-149.
- [18] HARDJITO, D., et al. Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete. Perth, Australia: Curtin University of Technology, 2005.
- [19] FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A.; REVUELTA, D. Alkali activation of industrial by-products to develop new Earth-friendly cements. In: 11th International Conference on Non-conventional Materials And Technologies (NOCMAT 2009), Bath, UK. CD-ROM proceedings. 2009.
- [20] XU, H. a J.S.J. VAN DEVENTER. The geopolymerisation of alumino-silicate minerals. International Journal of Mineral Processing. 2000, vol. 59, issue 3, s. 247-266. DOI: 10.1016/S0301-7516(99)00074-5. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301751699000745>
- [21] VINKLER, Marek a Jan L. VÍTEK. Vysychání a smršťování betonu. Beton [online]. 2016, 2016(2), 40-46 [cit. 2016-10-30]. Dostupné z: <http://www.betontks.cz/sites/default/files/2016-2-40.pdf>
- [22] COLLEPARDI, Mario. Moderní beton. 1. vyd. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009. Betonové stavitelství. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [23] Smršťování betonu. Ebeton.cz [online]. Praha 4: Web Design Factory, spol. s r.o. [cit. 2017-01-25]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/smrstovani-betonu>
- [24] ARND BERND EBERHARDT. On the mechanisms of shrinkage reducing admixtures in self consolidating mortars and concretes. 2011. Aachen: Shaker, 2011. ISBN 978-384-4000-276.
- [25] SAKULICH, A.R., BENTZ, D.P.: Mitigation of autogenous shrinkage in alkali activated slag mortars by internal curing. Mater. Struct. 46 , 1355–1367 (2013).
- [26] AİTCIN P., FLATT R.J., Science and Technology of Concrete Admixtures. United Kingdom: Woodhead Publishing, 2015. ISBN: 9780081006931.
- [27] PALACIO M., PUERTAS M., Effect of shrinkage-reducing admixtures on the properties of alkali-activated slag mortars and pastes. Cem. Concr. Res. 37 (2007) 691-702.

- [28] BILIM C., KARAHAN O., Effects of chemical admixtures and curing conditions on some properties of alkali-activated cementless slag mixtures. *KSCE J. Civ. Eng.* 19 (2015) 733-741.
- [29] BILIM C., KARAHAN O., Influence of admixtures on the properties of alkali-activated slag mortars subjected to different curing conditions. *Mater. Des.* 44 (2013) 540-547.
- [30] BAKHAREV T., SANJAYAN J.G., CHENG Y.B., Effect of admixtures on properties of alkali-activated slag concrete. *Cem. Concr. Res.* 30 (2000) 1367-1374.
- [31] COLLEPARDI, M.. *The new concrete*. S.l.: Grafiche Tintoretto, 2006, vii, 421 s. ISBN 88- 901-4694-X.
- [32] Tensiometers. Attension [online]. [cit. 2017-01-25]. Dostupné z: <http://www.attension.com/tensiometers>
- [33] SOMMER, L., KANICKÝ, V., OTRUDA, V., TOMAN, J. *Optická emisní spektrometrie v indukčně vázaném plazmatu a vysokoteplotních plamenech*. 1.vyd. Praha: Academia, 1992.
- [34] PTÁČEK, P. 2012. *Praktikum z preparativních a testovacích metod*. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 153 s. ISBN 978-80-214-4392-1.
- [35] ČSN EN 12350-5. *Zkoušení čerstvého betonu - Část 5: Zkouška rozlitím*. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 1.10.2009.
- [36] *Praktikum z kovových materiálů: Rastrovací elektronová mikroskopie* [online]. [cit. 2017-01-27]. Dostupné z: https://moodle.vutbr.cz/pluginfile.php/212307/mod_resource/content/1/SEM_EDS.pdf
- [37] ROUQUEROL J., et al. *Liquid intrusion and alternative methods for the characterization of macroporous materials (IUPAC Technical Report)*, *Pure and Applied Chemistry*, Volume 84, Issue 1 (2011).
- [38] SEGUIN, C., EASTOE, J., CLAPPERTON, R., HEENAAN, R. K., GRILLO, I., *Alternative non-aqueous water-miscible solvents for surfactants*, *Colloids and Surfaces a-Physicochemical and Engineering Aspects*, V. 282, Jul 20. 2006, pp. 134-42.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

AAM	alkalicky aktivované materiály
AAS	alkalicky aktivovaná struska
ASTM	American Society for Testing and Materials
CMC	kritická micelární koncentrace (Critical Micellation Concetration)
C–S–H	kalcium silikátový hydrát
ČSN	česká technická norma
d_1, d_2	rozměr rozlitého betonu ve dvou směrech
EN	evropská norma
f	korekční faktor
ICP-OES	emisní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem (inductively coupled plasma optical emission spectrometry)
M_S	silikátový modul
p	kapilární tlak
P_D	tlak odporu vzduchu
P_H	hydrostatický tlak
P_S	nejvyšší naměřený tlak
PG	propylenglykol
PPG	polypropylenglykol
r	poloměr pórů
REF.	referenční vzorek
SEM-EDS	skenovací elektronový mikroskop s energiově-disperzním spektrometrem (scanning electron microscopy with energy dispersive spectroscopy)
SRA	přísady redukující smrštění (shrinkage reducing agents)
VP	vysokopeční struska
w/c	poměr voda/cement
w/s	poměr voda/struska
γ	povrchové napětí
θ	smáčecí úhel
σ_{ohyb}	pevnost v tahu za ohybu
σ_{tlak}	pevnost v tlaku