



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA CHEMICKÁ**

FACULTY OF CHEMISTRY

**ÚSTAV CHEMIE MATERIÁLŮ**

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE

**VLIV PODMÍNEK VYTVRZOVÁNÍ NA SMRŠTĚNÍ  
ALKALICKY AKTIVOVANÝCH SYSTÉMŮ**

EFFECT OF CURING CONDITIONS ON SHRINKAGE OF ALKALI ACTIVATED SYSTEMS

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Barbora Pragerová**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Lukáš Kalina, Ph.D.**

**BRNO 2020**

## Zadání bakalářské práce

Číslo práce: FCH-BAK1345/2018 Akademický rok: 2019/20  
Ústav: Ústav chemie materiálů  
Studentka: **Barbora Pragerová**  
Studijní program: Chemie a technologie materiálů  
Studijní obor: bez specializace  
Vedoucí práce: **Ing. Lukáš Kalina, Ph.D.**

### Název bakalářské práce:

Vliv podmínek vytvrzování na smrštění alkalicky aktivovaných systémů

### Zadání bakalářské práce:

stanovení optimálních podmínek vytvrzování alkalicky aktivovaných systémů s cílem redukovat smrštění

### Termín odevzdání bakalářské práce: 31.7.2020:

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

-----  
Barbora Pragerová  
student(ka)

-----  
Ing. Lukáš Kalina, Ph.D.  
vedoucí práce

-----  
doc. Ing. František Šoukal, Ph.D.  
vedoucí ústavu

V Brně dne 31.1.2020

-----  
prof. Ing. Martin Weiter, Ph.D.  
děkan

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá stanovením optimálních podmínek vytvrzování alkalicky aktivovaných systémů s cílem redukovat smrštění. V experimentální části byly testovány pasty vysokopecní granulované strusky aktivované vodním sklem. Bylo porovnáno šest podmínek vytvrzování. Tři série vzorků byly hned po odformování uloženy na vzduchu, ve vodě a ve folii. Další tři série byly nejdříve 14 dní uloženy ve vodě, a poté vyjmuty na vzduch, přičemž dvě z nich byly ošetřeny těsnícími prostředky na bázi křemičitanů lithia a akrylátové disperze. Optickou metodou byla sledována tvorba a množství trhlin. Procento trhlin bylo vyhodnoceno pomocí programu ImageJ. Nejvyšší množství trhlin se vytvořilo při uložení na vzduchu po 7. dnech vytvrzování. Následně se část z nich viditelně zacelila. U vzorků vytažených na vzduch po 14. dnech ve vodě, se také projevil rychlý nárůst trhlin, avšak jejich procento bylo poloviční. Těsnící prostředky zpomalily vývoj trhlin, ale jejich vzniku nezabránily. Po 36. dnech byly výsledky těchto typů uložení a ošetření srovnatelné. Pouze ve folii docházelo k minimálním trhlinám a ve vodním prostředí se netvořily vůbec. K nejmenšímu smrštění docházelo při uložení ve vodě a ve folii. Vzorky, které byly nejprve uloženy 14 dní ve vodě projevily stejný trend vysokého smrštění jako vzorky na vzduchu.

## **Abstract**

This bachelor thesis deals with the determination of optimal curing conditions of alkali-activated systems in order to reduce shrinkage. Hardened alkali-activated blast-furnace slag pastes activated by sodium silicate were tested in the empirical part. Six varieties of curing conditions were compared. Immediately after demolding process, three sets of samples were stored in air, water and plastic film. Another three sets were first placed in water for 14 days, then removed and two of them impregnate with lithium silicate and acrylate-based coatings. The formation and the number of cracks were monitored by an optical method. The percentage of cracks was evaluated by the ImageJ program. The highest number of cracks was formed after 7 days of curing, given the samples placed in the open air. Some them were filled later. Samples placed in the open air after being submerged in water for 14 days showed a rapid increase of cracks as well, but the percentage of cracks was reduced to 50 %. Treating agents reduced the development of cracks but have not stopped their formation. After 36 days of curing, the results of these types of curing conditions were comparable. Only the samples wrapped in plastic foil showed a minimum number of cracks and no cracks were observed if the samples were submerged in water. The lowest levels of shrinkage were reached with the samples placed in water, and with the ones wrapped in plastic foil. Samples stored in water for the first 14 days showed the identical tendency of high-level shrinkage, as did the ones placed in the open air.

## **Klíčová slova**

vysokopecní struska, alkalická aktivace, smrštění, podmínky vytvrzování, analýza obrazu

## **Keywords**

blast furnace slag, alkaline activation, shrinkage, curing conditions, image analysis

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citovala. 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.

.....  
Barbora Pragerová

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PRAGEROVÁ, Barbora. *Vliv podmínek vytvrzování na smrštění alkalicky aktivovaných systémů* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-29]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/115697>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, Ústav chemie materiálů. Vedoucí práce Lukáš Kalina.

## Poděkování

Tímto bych chtěla poděkovat především mému vedoucímu bakalářské práce Ing. Lukáši Kalinovi Ph.D. za odborné vedení, ochotu a trpělivost. Také děkuji za spolupráci s laboratoří kovů a koroze, kde mi doktorandi umožnili a velmi pomohli s focením na elektronovém mikroskopu.

## Obsah

|     |                                        |    |
|-----|----------------------------------------|----|
| 1   | Úvod.....                              | 6  |
| 2   | Teoretická část .....                  | 7  |
| 2.1 | Alkalicky aktivované materiály .....   | 7  |
| 2.2 | Alkalické aktivátory .....             | 7  |
| 2.3 | Prekurzory .....                       | 9  |
| 2.4 | Alkalická aktivace strusky .....       | 10 |
| 2.5 | Smrštění.....                          | 14 |
| 2.6 | Ošetření.....                          | 16 |
| 3   | Experimentální část.....               | 17 |
| 3.1 | Použité chemikálie.....                | 17 |
| 3.2 | Příprava vzorků.....                   | 18 |
| 3.3 | Měření pevnosti .....                  | 19 |
| 3.4 | Měření smrštění .....                  | 19 |
| 3.5 | Stanovení množství trhlin.....         | 19 |
| 3.6 | Skenovací elektronová mikroskopie..... | 19 |
| 4   | Výsledky a diskuze .....               | 21 |
| 4.1 | Měření pevnosti .....                  | 21 |
| 4.2 | Měření smrštění .....                  | 22 |
| 4.3 | Stanovení množství trhlin.....         | 24 |
| 4.4 | Skenovací elektronová mikroskopie..... | 28 |
| 5   | Závěr .....                            | 31 |
| 6   | Seznam použitých zdrojů.....           | 33 |
| 7   | Seznam použitých zkratk a symbolů..... | 38 |
| 8   | SEZNAM OBRÁZKŮ .....                   | 39 |
| 9   | SEZNAM TABULEK .....                   | 40 |

# 1 ÚVOD

V dnešní době se klade čím dál větší důraz na ekologii. Portlandský cement je stále nejvíce využívaným pojivem, bohužel jeho výroba vyžaduje značné množství energie. Alkalicky aktivované materiály (dále jen AAM) jsou ekologické materiály využívající druhotných surovin, které zlepšují mechanické vlastnosti betonu. Mají vysokou počáteční pevnost a vynikající trvanlivost. V budoucnu by mohly běžný cement úplně nahradit. Nicméně díky dobrému poměru cena/výkon a kvůli nedostatečnému prozkoumání nových materiálů je portlandský cement stále hojně využíván.

Výroba běžného portlandského cementu (dále jen OPC) jako hlavního betonového pojiva přispívá přibližně 7 % k celosvětové produkci emisí oxidu uhličitého. Energeticky nevýhodná je hlavně příprava slínku jako meziproduktu OPC. Podle studií by použití AAM jako pojiva mohlo snížit emise  $\text{CO}_2$  z výroby cementu až o 75 % [1; 2].

Hlavním omezujícím faktorem použití AAM je velké smrštění. To poté ovlivňuje mechanické vlastnosti výsledného materiálu. Cílem této práce je shrnout vliv uložení a ošetření AAM na smrštění. V teoretické části je popsán mechanismus a typy smrštění. Práce také shrnuje již proběhlé studie zaměřené na vliv uložení, zejména vliv vlhkosti teploty vytvrzování.

V experimentální části byly testovány pasty vysokopecní granulované strusky aktivované vodním sklem. Po odformování byly aplikovány tři způsoby uložení – na vzduchu, ve vodě a ve folii. Další 3 série vzorků byly ponechány 14 dní ve vodním prostředí a následně vyjmuty na vzduch. Dvě série z těchto vzorků byly ošetřeny těsníci nátery na bázi křemičitanů lithia a akrylátové disperze.

## 2 TEORETICKÁ ČÁST

### 2.1 Alkalicky aktivované materiály

Alkalický aktivovaný materiál se skládá z jedné nebo z kombinace minerálních složek (prekurzorů) na bázi hlinitokřemičitanů nebo hlinitokřemičitanů vápenatých a z jednoho nebo z kombinace alkalických aktivátorů. Podle typu alkalicky aktivované hlinitokřemičitanové složky se AAM mohou klasifikovat na:

- strusky
- pucolány
- vápenné pucolány a struska
- hlinitany vápenaté
- směsi portlandského cementu

Na základě chemického složení surovin lze AAM rozdělit na dvě skupiny. Tyto skupiny se liší reakčním mechanismem a hlavními produkty. První skupinu tvoří systémy s vysokým obsahem vápníku a  $\text{SiO}_2$  označované jako Ca + Si systémy. Druhou skupinu tvoří Si + Al systémy založené na aluminosilikátech. První skupina zahrnuje vysokopecní strusku, fosforovou strusku, struskový popílek a ocelovou strusku. Popisu alkalické aktivace strusky se věnuje kap. 2.4. Si + Al systémy tvoří např. popílků třídy F nebo metakaolín. Hlavními produkty druhé skupiny jsou NASH gely [3].

Pucolány jsou křemičité nebo hlinitokřemičité anorganické látky obsahující amorfni  $\text{SiO}_2$ . Samostatně nemají žádné nebo jen velmi slabé pojivové vlastnosti. V přítomnosti hydroxidu vápenatého však vytvářejí hydratační produkty, které jsou podobné produktům hydratace portlandského cementu. Pucolány mohou být přírodního původu – např. pemza, křemelina, nebo umělého původu – metakaolín, elektrárenské popílků nebo kalcinované břidlice.

Pro směs vápenatých pucolánů a strusky může být použit jako aktivátor pouze hydroxid alkalického kovu [4].

V porovnání s OPC jsou AAM odolnější proti kyselinám, síranům nebo mořské vodě [5].

### 2.2 Alkalické aktivátory

Jako alkalické aktivátory se obvykle používají roztoky hydroxidů a soli alkalických kovů. Podle jejich chemického složení byly podle Glukhovského (1980) klasifikovány šest skupin:

1. alkalické hydroxidy: MOH
2. soli slabých kyselin:  $\text{M}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{M}_2\text{SO}_3$ ,  $\text{M}_3\text{PO}_4$ , MF, apod.
3. silikáty:  $\text{M}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$
4. alumináty:  $\text{M}_2\text{O} \cdot n\text{Al}_2\text{O}_3$
5. aluminosilikáty:  $\text{M}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot (2-6) \text{SiO}_2$
6. soli silných kyselin:  $\text{M}_2\text{SO}_4$

Z těchto skupin jsou nejčastěji využívány aktivátory z první až čtvrté skupiny. Sloučeniny draslíku jsou omezené kvůli jejich dostupnosti a nákladům, nicméně již byly laboratorně testovány [6].

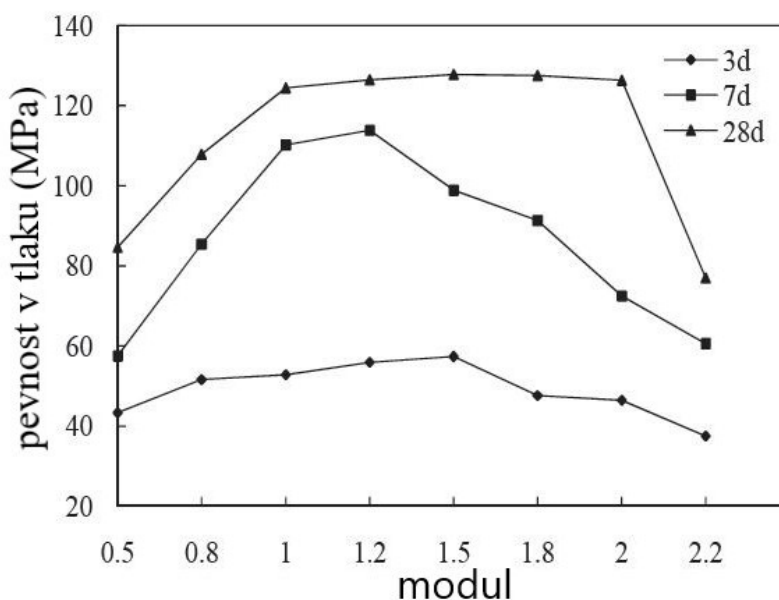
Výběr aktivátoru a jeho koncentrace je velmi důležitý. Např. pojiva aktivovaná hydroxidem jsou více porézní než aktivovaná alkalickým křemičitanem [7].

Aniontová část aktivátoru má mnohem vyšší účinek na mechanické a další vlastnosti výsledného materiálu než kationtová složka. Názorně to vysvětlili Wang a kol. [8], kteří porovnali účinek NaOH a vodního skla. Množství zreagované strusky bylo u obou aktivátorů stejné, avšak pevnost malt se výrazně lišila. Stejný trend pozorovali Lothenbach a kol. [9]. Použili strusku s vysokým obsahem MgO (13,2 hm. %), kterou aktivovali NaOH a vodním sklem. Velký rozdíl výsledné pevnosti v tlaku past byl naměřen např. po 360 dnech. Stupeň hydratace byl při započtení odchylky stejný, zatímco pevnost vzorků aktivovaných vodním sklem byl přibližně 3,7 krát vyšší oproti aktivaci NaOH.

Tato práce se dále věnuje pouze v experimentu použitým aktivátorem – vodním sklem.

### 2.2.1 Vodní sklo

Vodní sklo je roztok křemičitanu alkalického kovu. Obecným vzorcem lze zapsat jako  $M_2O \cdot SiO_2$ , kde M je alkalický kov. Složení bývá nejčastěji charakterizováno křemičitým (také silikátovým) modulem  $M_S$ , což je molární poměr  $SiO_2/Na_2O$  pro sodné sklo nebo  $SiO_2/K_2O$  pro draselné sklo. Komerční sodná skla mají  $M_S$  od 1,60 do 3,85. Pro alkalickou aktivaci se jako nejvýhodnější prokázaly hodnoty  $M_S$  od 1,3 do 2 s obsahem  $Na_2O$  v rozpětí od 2 do 7 hm. %. He a kol. [10] zkoumali vliv  $M_S$  na dobu vytvrzování a pevnost v tlaku (měřená po 3, 7 a 28 dnech). V rozsahu  $M_S$  0,5–2,2 se pevnost v tlaku nejprve zvyšuje, poté je konstantní a následně klesá, viz graf 1. Vyšší  $M_S$  než 2,0 způsobuje nízkou alkalitu vodního skla a zpomaluje tak hydrataci strusky. Nízký stupeň hydratace je pak zodpovědný za nižší pevnosti v tlaku.



graf 1: Vliv  $M_S$  na pevnost v tlaku alkalicky aktivované strusky (4 hm. %  $Na_2O$ ) [10]

Vodní skla se kromě křemičitého modulu charakterizují nejčastěji hustotou. Z hustoty pak známe i koncentraci roztoku a složení výchozího skla. Další charakteristikou je viskozita a také hodnota pH. Viskozita však může být zkreslena, protože vodní skla jsou nenewtonovské kapaliny. Vlastnosti vodních skel jsou velmi citlivé na jejich složení a skladování.

Vodní sklo je již využíváno jako urychlovač tuhnutí cementu, nebo suchá směs v lepidlech [6].

## 2.3 Prekurzory

### 2.3.1 Vysokopecní struska

Při výrobě železa ve vysokých pecích vzniká jako odpad vysokopecní struska. Na jednu tunu vyrobeného železa připadá 0,6 tuny strusky. Roční globální výroba strusky byla odhadnuta přibližně na 320 mil t. Výroba 1 tuny strusky vyžaduje asi 1300 MJ energie a produkuje pouze 0,07 tun CO<sub>2</sub>. V porovnání s ostatními prekurzory je tedy energeticky výhodná [1].

Všechny nečistoty obsažené v železné rudě a v koksu přecházejí do vysokopecní strusky. Po chemické stránce má však struska konstantní složení, protože se pomocí korigujících příměsí udržuje teplota tavení. Typické složení vysokopecní strusky podle materiálů Kotouč Štramberk, s. r. o. uvádí tab. 1. Roztavená struska se nachází nad roztaveným surovým železem, protože má menší hustotu. Teplota taveniny se pohybuje v rozmezí od 1400 °C do 1600 °C [6].

| oxid                           | zastoupení (%) |
|--------------------------------|----------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 25–45          |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4–15           |
| CaO                            | 26–45          |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | <1,5           |
| MgO                            | 4–15           |
| S <sup>-</sup>                 | >3             |

Tabulka 1: Složení vysokopecní strusky ČR

Proces chlazení ovlivňuje krystalickou strukturu. Při pomalém ochlazování strusky vznikají stabilní krystalické Ca–Al–Mg křemičitany. Nejběžnějším minerálem je melilit C<sub>2</sub>AS (pevný roztok gehlenitu) a akermanit C<sub>3</sub>MS<sub>2</sub>. Pomalu ochlazená krystalická struska má malou nebo žádnou hydratační vlastnost, ale má mechanické vlastnosti podobné čediči a mohou být použity jako kamenivo.

Pro lepší hydratační vlastnosti je tedy potřeba strusku ochladit rychle, čímž získáme téměř amorfni surovinu s velikostí částic menší než 4 mm. Struska se granuluje od roku 1983. Jeden ze způsobů granulace je lití do betonových jam naplněných vodou. V dnešní době se však dává přednost přímému vysokotlakému zkrápění vodou (asi 0,6 MPa). Granulovaná struska obsahuje asi 30 % vody. V Kanadě byl vyvinut peletizér, ve kterém je nejdříve struska ochlazená vodou a poté se vhání do rotačního bubnu rychlostí 300 ot./min. Hlavní výhodou

je malá spotřeba vody a pak také pouze 10% zbytkové vlhkosti. Další výhodou peletované strusky oproti granulované je menší spotřeba energie při mletí [6].

Daube a Bakker [11] definovali dva základní parametry, které určují hydraulické vlastnosti strusky – chemické složení a podíl sklovité fáze. Cheron a Lardinois pak definovali index hydraulické aktivity strusky. Indexy strusky mezi 1,65 a 1,85 se považují za normální.

$$\text{Index hydraulické aktivity} = \frac{(CaO + 1,4 MgO + 0,56 Al_2O_3)}{SiO_2}$$

### 2.3.2 Další prekursorzy

Ačkoliv vysokopecní granulovaná struska je nejčastějším prekurzorem, za zmínku stojí také další suroviny. Jsou jimi například: granulovaná fosforečná struska, ocelová struska, popílký, sopečné sklo, zeolit (hlinitokřemičitany), metakaolin.

Podobně jako vysokopecní struska je fosforečná struska složena hlavně z  $SiO_2$  a  $CaO$ . Obsah  $P_2O_5$  se pohybuje v rozmezí 0–2,5 %.

Pucolány, ať už přírodní (sopečné sklo) nebo průmyslové (popílek) jsou tvořeny z více než 70 %  $SiO_2$  a  $Al_2O_3$ . Dále pak oxidy železa a alkalických kovů. Celkový obsah  $K_2O$  a  $Na_2O$  může být vyšší než 10 %. Popílek je vedlejší průmyslový produkt pocházející ze spalování uhlí. Nečistoty, které jsou v uhlí obsaženy se nejprve roztaví ve spalovací komoře. Když malé kapičky nečistot opouští spalovací komoru tuhnou a vytváří kuličky. Tyto kuličky jsou rychle ochlazeny, nestačí krystalizovat, a proto tavenina  $SiO_2$  vytváří amorfni strukturu. Chemické složení popílku se velmi liší v závislosti na složení uhlí [12].

## 2.4 Alkalická aktivace strusky

Existují tři způsoby přidání aktivátoru do strusky: v roztoku, v pevném stavu a dohromady mletý se struskou, nebo v pevném stavu samostatně mletým a smíchaným s mletou struskou. Přidáním pevného aktivátoru do směsi by zjednodušilo praktické využití. Avšak mnohem vyšší pevnosti je dosaženo přidáním roztoku.

Alkalická reakce představuje komplexní proces, který ještě nebyl kompletně popsán. Jde o reakci alkalického aktivátoru ( $NaOH$ ,  $KOH$ , vodní sklo) s latentně hydraulickou látkou (struska, popílek) za vzniku fázových systémů podobného složení, jako je tomu u tuhnutí portlandského cementu. Nejlepší dávka aktivátoru je v rozmezí 3,0 až 5,5 %  $Na_2O$  vzhledem k hmotnosti strusky. Při reakci je ideální hodnota pH 11–13,5. Hlavním hydratačním produktem je CSH gel. Poměr  $Ca/Si$  je nižší než u portlandského cementu, což je způsobeno částečným nahrazením vápníku kationty alkalických kovů. V případě vysokého obsahu alkálií lze gel nazývat MeCSH ( $Me = Na, K$ ). CSH gel produkovaný struskou obsahuje větší množství nevázané vody, než je ve struktuře CSH gelu z OPC. Během vysychání se tato nevázaná voda vypařuje. Tím se dá tedy vysvětlit výrazně vyšší smrštění AAS oproti OPC [8; 13; 14; 15].

Reaktivita strusky závisí na podílu sklovité a krystalické fáze, chemickém a mineralogickém složení a také na velikosti částic. Struska s částicemi nad 20 mikronů

reagují velmi pomalu, zatímco ty s částicemi pod 2 mikrony plně reagují do 24 hodin po smíchání s alkalickými aktivátory (Wang et al., 2005). Optimální rozsah jemnosti strusky záleží na typu. Pro kyselé a neutrální strusky je uváděna optimální jemnost 4 500 až 6 500 cm<sup>2</sup>/g. Pro zásadité strusky je pak doporučená jemnost 4 000 až 5 500 cm<sup>2</sup>/g [12].

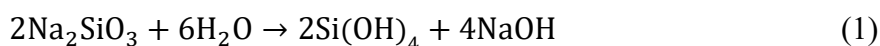
Sakulich a kol. [16] provedli studii zaměřenou na vliv Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, který přimíchali do strusky. Přídavek malého množství (2 hm. %) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> zvýšil pevnost v tlaku po 7 a 28 dnech, avšak přídavek 15 hm. % oxidu už mechanické vlastnosti nezlepšil.

Reakčními produkty alkalicky aktivovaných struskových cementů jsou hlavně amorfni CSH gely, (C,M)<sub>4</sub>AH<sub>13</sub>, hydrotalcit, fáze hydratovaných hlinitanů (C<sub>4</sub>AH<sub>13</sub> a C<sub>2</sub>ASH<sub>8</sub>–strätlingit) a ettringit [17].

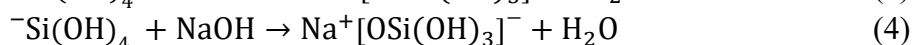
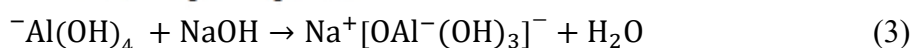
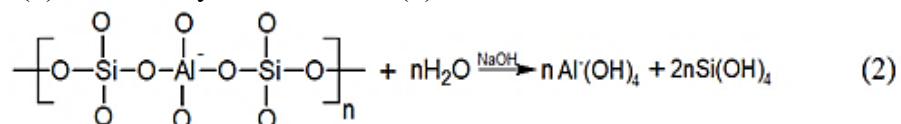
### 2.4.1 Hydratace

V souvislosti s alkalicky aktivovanými materiály je hydratací popisována chemická reakce mezi mletou struskou a vodou v přítomnosti aktivátoru. Ten může být přidán třemi způsoby: rozpuštěný ve vodě, přimíchán spolu se struskou, nebo smíchán se struskou před přidáním vody. Proces hydratace má zjednodušeně tento mechanismus: rozpouštění strusky, vznik hydratačních produktů a jejich následná kondenzace [10].

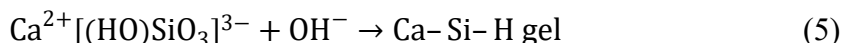
Po smíchání probíhá okamžitě hydrolyza, jejíchž výsledkem je kyselina orthokřemičitá a hydroxid sodný, viz reakce (1).



Vlivem alkalického prostředí se štěpí kovalentní vazby Si–O–Si, Si–O–Al a Al–O–Al. Vzniká hydroxid hlinitý a opět kyselina orthokřemičitá (2). Produkty spolu dále reagují za vzniku aluminátových (3) a silikátových monomerů (4).

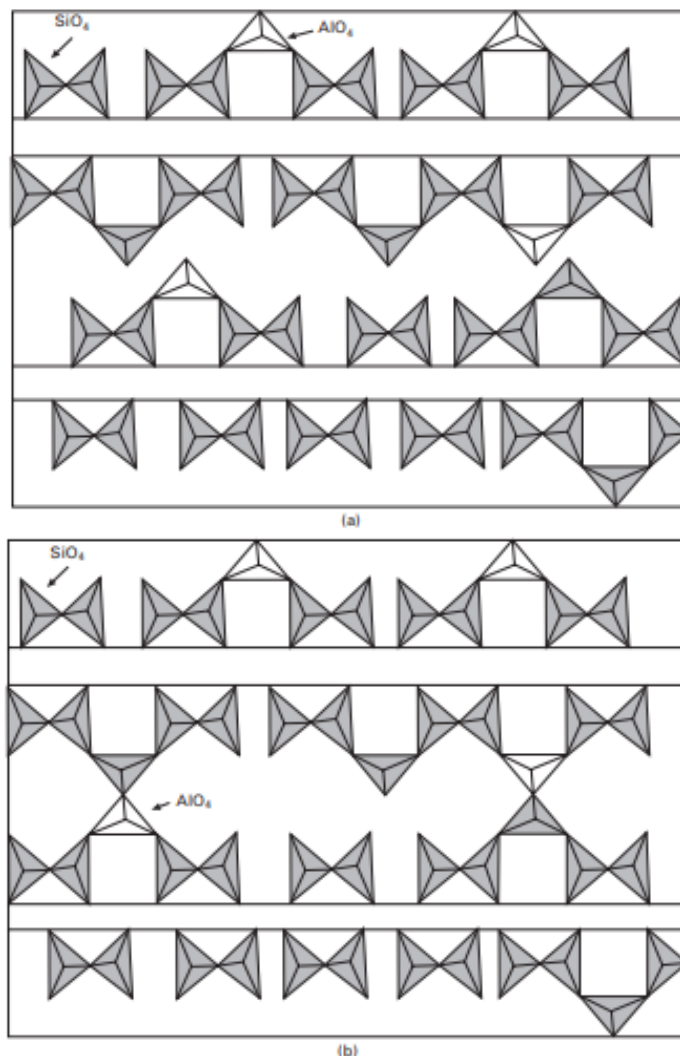


Polykondenzací vznikají nové fáze, jejíchž hlavní složkou je kalcium-silikát-hydrát (dále jen CSH gel). Vznik CSH gelu je popsán rovnicí (5). Struktura CSH gelu je amorfni a je tvořena propojenými články, které se skládají z tetraedrických jednotek SiO<sub>4</sub>. Pokud jsou v tetraedru atomy křemíku nahrazeny atomy hliníku, označuje se CASH gel [18].



Charakterizovat gely však není snadné kvůli jejich amorfni struktuře. Fernández Jiménez a kol. [19] navrhli na základě nukleární magnetické rezonance při rotaci vzorku (MAS-NMR) model lineárního řetězce CASH gelu. Ukázali, že přítomnost Al vede ke vzniku

gelu s delšími lineárními řetězci i možné propojení těchto řetězců za vzniku planární struktury, viz obr. 1.



Obrázek 1: Strukturní model pro CASH gel (a) lineárními řetězci;  
(b) lineárními řetězce s náhodnými vazbami, planární struktura [19]

Struska rychle hydratuje během prvních 24 hodin, poté se proces zpomalí. Zpomalení hydratace je způsobeno snížením difúze vody v nepřítomnosti alkalických iontů. Reakci zpomaluje také bariéra CSH gelu na povrchu zrn strusky. Po sedmi dnech se stupeň hydratace strusky pohybuje od 15 do 35 %. Rychlost hydratace strusky závisí na povaze aktivátoru a jemnosti strusky [14].

Lothenbach a kol. [9] zkoumali vliv množství MgO obsaženého ve strusce na hydrataci. V této studii porovnali 3 druhy strusek s obsahem MgO 7,7 hm. %, 10,5 hm. % a 13,2 hm. %. Použili dva různé aktivátory – NaOH a vodní sklo. Zjistili, že se zvyšujícím se obsahem MgO se stupeň hydratace zvyšuje u obou aktivátorů. Při nejmenším obsahu MgO pozorovali také rozdíl mezi aktivátory po 7 dnech. Zatímco stupeň hydratace po aktivaci NaOH dosáhl 33 %,

při použití vodního skla pouze 13 %. Tyto rozdíly se vyrovnaly po 28 dnech. Po 360 dnech se stupeň hydratace zkoumaných vzorků pohyboval v rozmezí 53–58 %.

#### 2.4.2 Vlastnosti alkalicky aktivovaných struskových systémů

Před použitím dané směsi AAS je třeba provést experimenty kvůli volbě vhodného aktivátoru a jeho koncentrace. AAS jsou velmi citlivé na přesnost poměrů výchozích surovin.

Důležité je také vyzkoušet dobu tuhnutí kvůli případnému transportu na určité místo. Výzkum Cahit a kol. [20] potvrdil trend z předchozích studií, že vyšší koncentrace  $\text{Na}_2\text{O}$  a vyšší  $M_s$  zkracují dobu tuhnutí. Příliš dlouhá doba tuhnutí by byla neekonomická.

#### 2.4.3 Pevnost alkalicky aktivovaných systémů

Ve srovnání s OPC dochází k dřívějšímu vývoji vyšších mechanických vlastností. Počáteční pevnosti v tlaku dosahují po 2–4 hodinách zrání 10–25 MPa. Pro AAS jsou hlavními faktory ovlivňující pevnosti cementových past a malt tyto:

- povaha strusky a aktivátoru (aktivátorů)
- dávkování aktivátorů a jejich načasování
- poměr hmotnosti vody ku hmotnosti strusky (w/b)
- vytvrzovací teplota
- jemnost strusky
- další přísady
- lisovací tlak (pro systém s velmi nízkým poměrem vody a strusky)

Největší pevnost v tlaku byla zjištěna v řadě studiích Bakharev a kol. [1] u aktivace pomocí vodního skla. Vyšší pevnost oproti OPC popsali také Krizan a Zivarovic [1]. V těchto studiích byly porovnávány ještě vzorky AAS aktivované pomocí  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  a  $\text{NaOH}$ . Výzkum Cengiz a kol. [1] ukázal, že vzorky aktivované  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  vykazovaly po 28. dnech o 30 % vyšší pevnost než vzorky aktivované  $\text{CaO}$  při 5–10 % koncentracích aktivátoru. Avšak při koncentracích aktivátoru mezi 10 a 20 % byla pevnost strusky aktivované  $\text{CaO}$  až čtyřikrát vyšší struska aktivovaná pomocí  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

Poměr w/b určuje mikrostrukturu cementové pasty nejen v čerstvém, ale i vytvrzeném stavu. Čím vyšší je poměr w/b, tím vyšší je pórovitost. Proto pro daný stupeň hydratace platí, že se zvyšujícím se poměrem w/b klesá pevnost v tahu za ohybu. Avšak pevnost v tlaku roste díky vyššímu stupni hydratace. Vliv změny poměru w/b na hydrataci strusky se může lišit podle povahy použitých aktivátorů. Při použití vodního skla je nárůst pevnosti při zvýšení vodního součinitele výraznější než při použití  $\text{NaOH}$  [21].

Zvýšení jemnosti obecně zvyšuje reaktivitu a pevnost cementových materiálů. Toto tvrzení je však omezeno zvýšením spotřeby vody při překročení určité hodnoty měrného povrchu. Při porovnání tří různě namletých strusek (od 300 do 600  $\text{m}^2/\text{kg}$ , při použití hydroxidu sodného jako aktivátoru) se projevilo snížení pevnosti při jemnosti 500 až 600  $\text{m}^2/\text{kg}$  [6].

Ve studii Chi a kol. [22] bylo prokázáno, že zvýšení teploty vytvrzování malty AAS zvyšuje počáteční pevnost v tahu. Konkrétně vzorky vytvrzované po dobu 12 hodin při 65 °C

a po dobu 6 hodin při 85 °C vykazovaly vyšší pevnost v tahu než ostatní malty AAS vytvrzené při 23 °C. Takto byly porovnány vzorky ve 3 a 7 dnech zrání. Další nárůst pevností u malt vytvrzených za zvýšené teploty je pomalejší než u ostatních vzorků. V případě vodního součinitele 0,44 byly pevnosti v 56 dnech srovnatelné [22].

## 2.5 Smrštění

Smrštění je obecně redukce objemu při konstantní teplotě a bez vnějších vlivů. Tento proces negativně ovlivňuje výsledné mechanické vlastnosti materiálů a jejich trvanlivost. U alkalicky aktivovaných struskových cementů ovlivňuje smršťování řada vnitřních a vnějších faktorů. Vnitřní faktory zahrnují vliv povahy strusky, druh a dávku aktivátoru, poměr voda/struska a stupeň hydratace. Vyšší poměr voda/struska vede obvykle k vyššímu smrštění kvůli vyšší počáteční porositě. Mezi vnější faktory patří teplota vytvrzování, přísady, relativní vlhkost, rychlost a dobu sušení.

AAS je citlivější na ztrátu vody než OPC nebo alkalicky aktivovaný popílek. Tento rozdíl chování je dán jemnější strukturou strusky, a tedy větším měrným povrchem. Mechanismus smrštění u AAS lze obecně klasifikovat do 3 skupin:

- autogenní smrštění
- smrštění vysycháním
- smrštění vlivem karbonatace [23]

Dále jsou někdy uváděny smrštění plastické, které se projevuje v počátcích tuhnutí při odpařování vody, a smrštění termální způsobeno poklesem teploty [24].

### 2.5.1 Autogenní smrštění

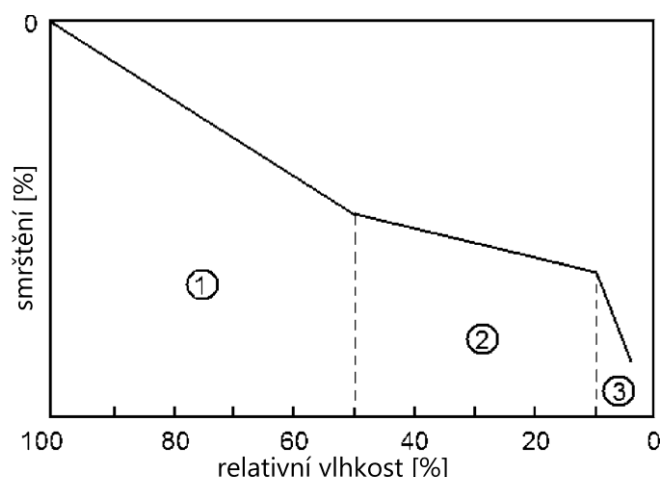
Autogenní smrštění může být definováno jako makroskopický výsledek účinků chemického smrštění a samovysychání. Příčinou je odstranění pórové vody z tvrdého pojiva. Systém je uzavřený, nedochází tedy k úniku vlhkosti do vnějšího prostředí. Dochází pouze ke snížení objemu při chemické reakci mezi činidlem a vodou. Hlavním (přibližně 92 %) hydratovaným produktem je CSH. Avšak hydratace vede k tvorbě prázdných pórů uvnitř materiálu. Porozita se pak projevuje v mechanických vlastnostech pasty.

Důležitým faktorem ovlivňující autogenní smrštění je množství křemičitanu obsaženého v aktivátoru. Zvýšením podílu křemičitanu sodného se zvyšuje stupeň hydratace a narůstá smrštění [25].

Z dosavadních výzkumů víme, že vyšší podíl popílku vede ke snížení smrštění samovysycháním. Vyšší množství oxidu sodného ve směsi alkalického pojiva vede také k poklesu smrštění [23].

### 2.5.2 Smrštění vysycháním

Nejdůležitějším ze zmíněných typů je smrštění vysycháním. Probíhá současně s autogenním smrštěním, pokud není vzorek izolován od okolního prostředí. Je způsobeno ztrátou vnitřní vody do vnějšího prostředí. Záleží tedy na relativní vlhkosti uvnitř a vně vzorku. Vztah mezi smrštěním při sušení a relativní vlhkostí vzduchu lze rozdělit do tří stupňů viz obr. 2.



Obrázek 2: Vztah mezi smrštěním betonu a relativní vlhkostí vzduchu, převzato z [6]

V prvním intervalu se odpařuje voda z pórů, v druhém jde o adsorbovanou vodu a třetí interval představuje ztrátu vody ze struktury CSH gelu [24].

Nad 45% relativní vlhkosti se voda odpařuje z pórů důsledkem kapilárního tlaku. Větší póry vyvíjejí nižší kapilární napětí. Z toho vyplývá, že významnější roli při vysychání hrají mezopóry. Pod 45% vlhkosti jsou hnací silou vysychání účinky povrchové energie [23].

Vztah mezi relativní vlhkostí, kapilárním tlakem a poloměrem menisku udává Laplace–Youngova rovnice:

$$p_c = -\frac{2\gamma \cdot \cos \theta}{r_c}, \quad (6)$$

kde  $p_c$  je kapilární tlak,  $\gamma$  je povrchové napětí vody v pórech,  $\theta$  je kontaktní úhel menisku v kapiláře a  $r_c$  je poloměr menisku [26].

Tato teorie kapilárního tlaku je uplatňována za relativní vlhkosti větší než 45 % a pro póry větší než 10 nm [27].

C. Shi [28] provedl charakteristiku pórové struktury malt OPC a AAS. Malty AAS vykazovaly výrazně nižší porozitu. Velmi odlišná byla také distribuce velikosti těchto pórů. Zatímco malty OPC obsahovaly póry s poloměrem od 5 do 1 200 nm, malty AAS obsahovaly póry s poloměry pouze menší než 10 a větší než 200 nm. Ve 28 dnech zrání však už malty vykazovaly podobnou distribuci pórů.

### 2.5.3 Smrštění vlivem karbonatace

Karbonatace je kontinuální chemická reakce mezi atmosférickým  $\text{CO}_2$  přítomným ve vzduchu a betonovým materiálem.  $\text{CO}_2$  se rozpouští v pórové vodě a vzniká kyselina uhličitá, která reaguje s anionty v roztoku. Po vysrážení uhličitánů klesá pH v pórech, což způsobuje rozpouštění pevných fází včetně CASH gelu. Z tohoto důvodu je tento typ smrštění také označován jako dekarbonatace. Dekarbonatace, tedy ztráta vápníku chemickou reakcí je rozšířeným mechanismem degradace betonových materiálů. Hnacími procesy jsou chemická degradace, vyluhování a síranová koroze [29].

## 2.6 Ošetření

Vodním ošetřováním, které je pro běžný beton nezbytné, se dosahuje co nejvyššího stupně hydratace a minimalizuje se smrštění. Pokud relativní vlhkost uvnitř kapiláry klesne pod 80 %, hydratace přestává probíhat. Díky vhodnému ošetřování je možné tedy zvýšit stupeň hydratace vedoucí k vyšší pevnosti. Existují různé způsoby ošetřování: mlžení, ponoření do vody, skrápění vodou nebo použití ošetřovacích membrán [24].

Z hlediska pórovitosti jsou sledovány mezopóry ( $2 \text{ nm} \leq r \leq 50 \text{ nm}$ ), jimiž dochází kvůli kapilárnímu tlaku k významné ztrátě vody. Vlhkost při vytvrzování ovlivňuje distribuci velikosti pórů. Vlhké vytvrzování (vodní lázeň, nebo folie) způsobuje menší velikosti pórů, tedy nižší pórovitost a menší množství mikrotrhlin než suché vytvrzování (na vzduchu) [30].

Výzkum Collinse a Sanjayana [6] z roku 2001 ukázal, že struskový beton vytvrzený ve vodě po celou dobu experimentu, tedy 365 dní zvyšuje svou pevnost. Při autogenních podmínkách se vývoj pevnosti ustálil po 90 dnech. Tento jev lze vysvětlit nedostatkem další vody pro hydrataci strusky uvnitř vzorku. Vzorky vytvrzené na vzduchu dosahují nejvyšší pevnosti po 28 dnech, poté hodnoty pevností klesají.

Velký vliv na výsledné chemické složení a fáze mikrostruktury AAM má také uzavřenost systému. V praxi to znamená např. použití folie. Po 7 dnech ještě nejsou pozorovatelné významné rozdíly mezi pastami vytvrzenými v uzavřeném a otevřeném systému. Až po 28 dnech se projevuje ztráta  $\text{Na}^+$  ze vzorků v neuzavřených systémech. Bylo zpozorováno rozdílné chemické složení gelu [29].

Thomas a kol. [23] porovnali pevnosti v tlaku po vytvrzení ve vlhkém prostředí (více než 95 % relativní vlhkosti, 23 °C) a při tepelném vytvrzení (48 hodin při 50 °C) a následném uložení v koncentrovaném roztoku  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Po 28 dnech vykazovaly vzorky v obou uloženích podobné hodnoty pevností v tlaku. Tepelné vytvrzení urychlilo hydrataci a bylo dosaženo menší ztráty vody, než při běžných laboratorních podmínkách.

Vzhledem k hydrataci je vytvrzování v prostředí s 99% relativní vlhkosti nejvýhodnější pro OPC. Tímto uložením AAM je na jednu stranu omezena vzdušná karbonatace, ale dochází k louhování a ztrátě alkálií. Nižší obsah alkálií poté karbonataci urychluje. Pro AAM se tedy doporučují uzavřené systémy (utěsnění folií) [29].

### 3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

#### 3.1 Použité chemikálie

Při experimentech byla míchána pasta složená z vysokopecní strusky, sodného vodního skla a vody. Na stanovení poměrů těchto složek byl použit ruční Vicatův přístroj (standartně používaný přístroj na určení doby tuhnutí cementu). Poměr celkové hmotnosti účinné vody ku hmotnosti cementu se nazývá vodní součinitel. V prováděném experimentu byl vodní součinitel vyjádřen jako poměr  $w/b$ , kde  $w$  je hmotnost vody a  $b$  je hmotnost pojiva – strusky.

- Vysokopecní struska

Byla použita velmi jemně mletá vysokopecní struska od výrobce Kotouč Štramberk, spol. s.r.o. s měrným povrchem cca 3800 cm<sup>2</sup>/g. Jedná se o latentně hydraulické pojivo, samotným přídavkem vody tedy netuhne ani netvrdne.

- Sodné vodní sklo

Jako alkalický aktivátor bylo v tomto experimentu použito sodné vodní sklo od společnosti Vodní sklo, a. s. Obsah Na<sub>2</sub>O ve vodním skle byl 16,63 % a SiO<sub>2</sub> 31,62 %. M<sub>s</sub> používaného aktivátoru byl tedy 2,0.

Pro experiment byla namíchána pasta s 8 hm. % Na<sub>2</sub>O (vztaženo k hmotnosti strusky). Trend zvyšování pevnosti s koncentrací aktivátoru ukázal výzkum z roku 2008 od Al-Otaibi [31]. Po 28 dnech vykazovaly pasty s 6 hm. % Na<sub>2</sub>O o třetinu vyšší pevnost v tlaku než pasty s dávkou 4 hm. % Na<sub>2</sub>O.

- Voda

Na přípravu směsí byla použita demineralizovaná voda. Hmotnost vody byla vypočtena z vodního součinitele, přičemž byla odečtena voda obsažená ve vodním skle. Poměr  $w/b$  byl experimentálně určen na 0,32. Literatura [29] uvádí trend zvyšování pevnosti se vzrůstajícím součinitelem. Pro experiment byl však záměrně zvolen nižší součinitel, aby se dalo lépe pozorovat smrštění a tvorba prasklin.

- Těsnicí prostředek A

Prostředek na bázi křemičitanů lithia a akrylátové disperze, vodou ředitelný. Je to mléčně bílá kapalina bez rozpouštědel a zápachu. Prostředek je určen pro utěsnění a dodatečné vytvrzení betonových povrchů. Oproti obdobným výrobkům na bázi křemičitanů sodíku či draslíku je při potencionálním předávkování méně náchylný k tvorbě těžce odstranitelných výkvětů [32].

- Těsnicí prostředek B

Prostředek na bázi akrylátové disperze určený pro ochranu a ošetření čerstvých betonových povrchů, vodou ředitelný. Nahrazuje dodatečné kropení a zakrytí folií, snižuje riziko vzniku mikrotrhlin [33].

## 3.2 Příprava vzorků

### 3.2.1 Složení směsi

Použité chemikálie byly již zmíněny v kapitole 3.1., jejich přesné poměry vyjadřuje tab. 2. Uvedené množství směsi bylo použito na 3 trámečky o rozměrech  $40 \times 40 \times 160$  mm.

| surovina            | hmotnost (g) |
|---------------------|--------------|
| vysokopecní struska | 1200         |
| vodní sklo          | 576          |
| voda                | 85           |

Tabulka 2: Složení používaných vzorků

### 3.2.2 Postup přípravy

Navážené suroviny byly smíchány a homogenizovány v normované laboratorní míchačce BS MI-CM 5AX od společnosti Beton System. Nejdříve bylo smícháno vodní sklo s vodou a poté byla přidána granulovaná struska. Cyklus míchání byl inspirován normou ČSN EN 196-1 [34] a byl již na míchačce nastaven na dobu 3 minut. Homogenizovaná směs byla nalita nejdříve do poloviny plastové formy a na 20 sekund umístěna na vibrační stůl. Poté byla forma doplněna a opět umístěna na vibrační stůl, aby byly minimalizovány vzduchové bubliny uvnitř trámeček. Formy byly uschovány ve folii po dobu 24 hodin. Poté byly trámečky z forem vyjmuty a uloženy. Pro každý typ uložení byly namíchány 3 vzorky na měření pevností a 3 vzorky na měření smrštění. Formy na smrštění splňující normu ASTM C596 [37] měly rozměry  $25 \times 25 \times 285$  mm. Postup přípravy byl zvolen shodný jako postup při přípravě vzorků na měření pevnosti.

V případě uložení 14 dní pod vodou a poté vytažením na vzduch byly 2 série vzorků ošetřeny těsnícími přípravky. Ošetření bylo prováděno nástřikem okamžitě po vytažení z vody a osušení ubrouskem. Po hodině, kdy první nátěr už téměř zaschnul, byl proveden druhý nátěr.

Pro elektronovou mikroskopii byly využity zlomené trámečky  $40 \times 40 \times 160$  mm. Vzorek byl mechanicky vypreparován z okrajové části lomové plochy. Na terčík byly poté malé vzorky nalepeny uhlíkovou páskou tak, aby byla zkoumána lomová plocha. Před vložením vzorků do elektronového mikroskopu byly vzorky naprášeny vrstvou zlata.

### 3.2.3 Způsoby uložení

Byly sledovány pevnosti, smrštění a porozita za těchto podmínek uložení:

- ve folii
- pod vodou
- laboratorní podmínky
- 14 dní pod vodou, poté ponechány na vzduchu při laboratorních podmínkách
- 14 dní pod vodou, ošetřeny prostředkem A, poté ponechány na vzduchu
- 14 dní pod vodou, ošetřeny prostředkem B, poté ponechány na vzduchu

Průměrná teplota v laboratoři byla 24,2 °C a vlhkost vzduchu po dobu experimentu byla průměrně 36 %.

### 3.3 Měření pevnosti

Pevnost v tlaku, příp. v tahu za ohybu, cementu byla měřena podle ČSN EN 196-1 na zkušebních tělesech ve tvaru hranolů o rozměrech 40 × 40 × 160 mm. K měření byl používán přístroj DESTEST 3310 od společnosti Beton Systém. Pro měření v tahu za ohybu byl používán lis BS-10 a k měření pevnosti v tlaku lis BS-300.

- Stanovení pevnosti v tahu za ohybu

Zkušební těleso se uloží do zkušebního stroje na jednu z bočních ploch na válcové podpěry tak, že jeho podélná osa je k válcovým opěrám kolmá. Vzdálenost os obou válcových podpěr je 100 mm. Zatížení se přenáší přes zatěžovací válec kolmo na protilehlou boční plochu zkušebního tělesa a zvyšuje se rovnoměrnou rychlostí až do zlomení. Poloviny trámečků se uchovávají na zkoušky pevnosti v tlaku.

- Stanovení pevnosti v tlaku

Poloviny trámečků se vloží bočními plochami mezi pomocné ocelové destičky, které přesně vymezují velikost tlačné plochy nepravidelného zlomku. Podle ČSN EN 196-1 jsou rozměry destiček z tvrzené oceli 40 × 40 mm a tloušťka min. 10 mm. Tyto destičky vymezují velikost plochy podrobené tlakovému namáhání (1600 mm<sup>2</sup>) [34].

Pevnosti byly měřeny v časových intervalech po 1, 7, 14, 21, 28 a 56 dnech zrání.

### 3.4 Měření smrštění

K tomuto měření bylo používáno měřidlo délkových změn dle normy ASTM C490 [37]. Zařízení se skládá z dvousloupového ocelového rámu s nastavitelným horním příčnickem, aby vyhovoval délce vzorku. Je osazeno s digitálním měřidlem o kroku 12,5 mm a přesnosti 0,001 mm. Délkové změny vzorků a také jejich hmotnosti byly zaznamenávány po dobu 28 dní zrání, a poté ještě v 56 dní.

### 3.5 Stanovení množství trhlin

Trámečky byly foceny digitálním zrcadlovým fotoaparátem Nikon D3200 po 1, 7, 14, 21, 28 a 56 dnech zrání.

Množství trhlin bylo stanovováno z nafocených fotografií vzorků pomocí programu ImageJ. Při vyhodnocení fotek ploch trámečků byly snímky v programu ImageJ převedeny do 8bitového formátu, poté byly pomocí funkce threshold odfiltrovány viditelné trhliny. Funkce threshold vytvořila černobílé snímky, na kterých však byly ještě viditelné také póry, které bylo nutné ručně odfiltrovat.

### 3.6 Skenovací elektronová mikroskopie

Pomocí skenovací elektronové mikroskopie (dále jen SEM) byla zkoumána mikrostruktura a prvková analýza lomových ploch vzorků. Analýza obrazu SEM poskytuje spolehlivou informaci o stupni hydratace.

Principem metody je interakce svazku tzv. primárních elektronů s povrchem vzorku. Zdrojem elektronů je elektronová tryska (popř. elektronové dělo). Elektronová tryska je v podstatě kovový drátek zapojený jako katoda. V prostředí silného vakua vzniká silné elektrické pole, které je schopno vytrhávat velké množství elektronů z povrchu kovového hrotu. Při dopadu urychleného primárního elektronového svazku na vzorek dochází k tomu, že pod povrchem vzorku se začnou primární elektrony pohybovat náhodným a velmi chaotickým způsobem. I přes chaotický pohyb elektronů lze přibližně určit, v jaké hloubce pod povrchem vznikají a jakého prostoru či objemu konkrétní druhy signálů dosahují. Platí, že rozptyl elektronu se zvyšuje se zvyšujícím se protonovým číslem vzorku. Takto lze provést prvkovou analýzu. Podmínkou měření je, aby byl vzorek elektricky vodivý. V případě nevodivých materiálu se vzorky lepí na podložný terčík uhlíkovou páskou. Následně jsou vzorky na terčících pozlaceny [35].

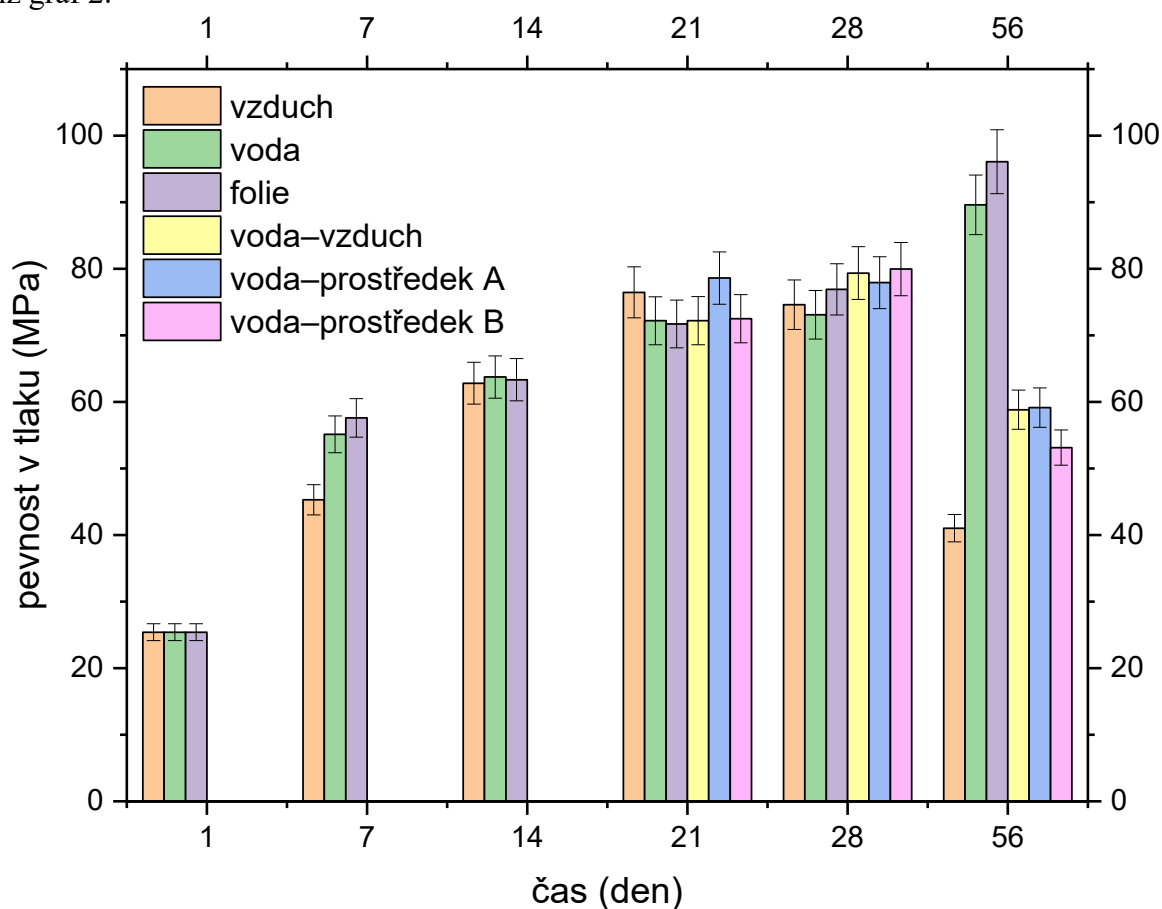
Při této práci byl použit elektronový mikroskop Zeiss EVO LS 10. Pracovní vzdálenost v procesu měření byla nastavena na 12 mm, dále bylo zvoleno urychlovací napětí 15 kV a EDS detektor 80 mm<sup>2</sup>. Energodisperzní analýza (EDS) je mikroanalytická metoda umožňující určit prvkové složení vzorku. Výstup z měření byl vyhodnocen pomocí Oxford AZtec System (Oxford Instruments, Plc., UK).

## 4 VÝSLEDKY A DISKUZE

V této kapitole jsou uvedeny naměřené výsledky pevností, smrštění, plochy prasklin a prvkové složení vybraných vzorků.

### 4.1 Měření pevnosti

Chi a kol. [22] zkoumali pevnosti a smršťovací účinky alkalicky aktivované struskové pasty a malty. Byly použity různé vodní součinitele. Pro porovnání byla vybrána strusková pasta s vodním součinitelem 0,44 a teplotou vytvrzování 23°C. Pevnost v tlaku byla vyvíjena rychle v ranném zrání do 14 dne, méně prudký nárůst byl zaznamenán po 28 dni zrání. Následně už byl nárůst pevnosti jen mírný. Stejný trend je pozorován i v této bakalářské práci, viz graf 2.

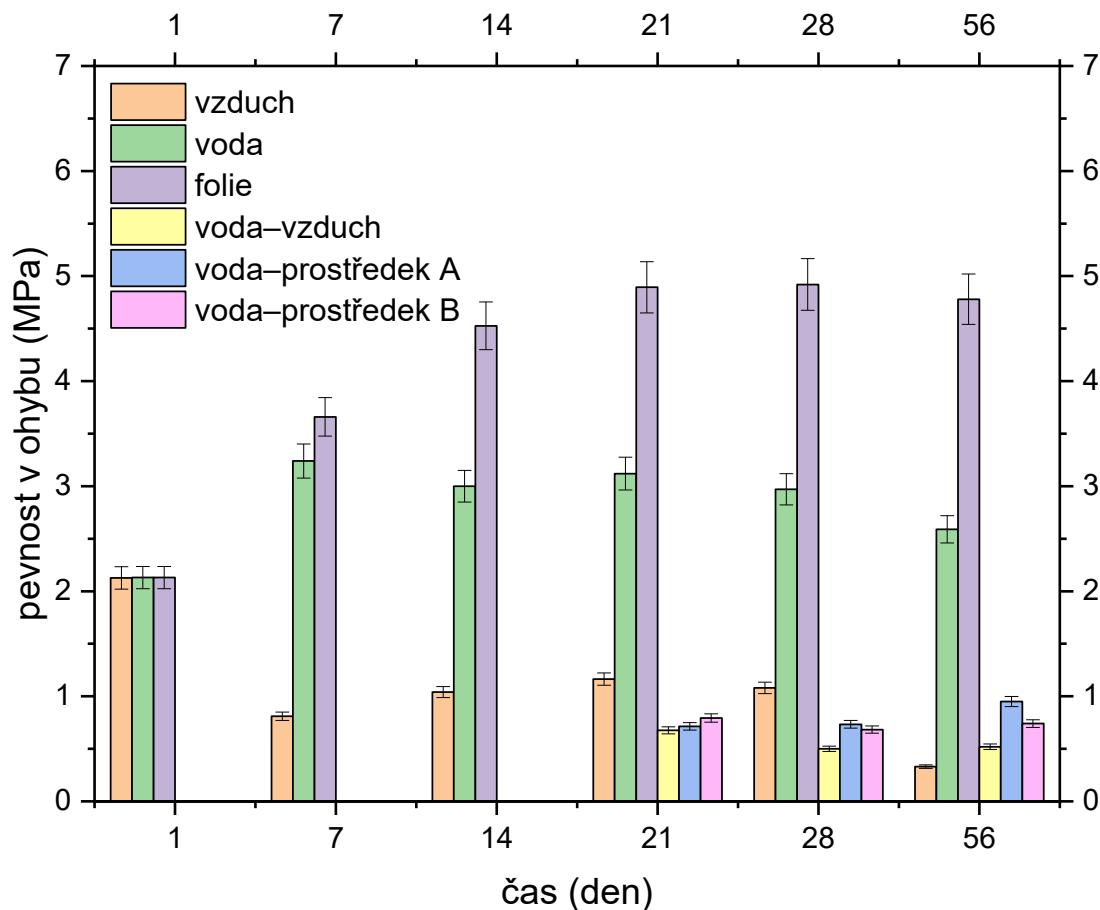


graf 2: Vývoj pevností v tlaku

Vývoj pevností, po 365. dnech, byl porovnán u vzorků na vzduchu a ve vodě. Srovnání provedli v roce 2001 Collins a Sanjayan [30]. Vzorky na vzduchu vykazovaly o 41,4% menší pevnost v tlaku. Za dlouhodobou pevnost lze v této práci považovat hodnoty z 56. dne. Porovnáním těchto dvou uložení je tedy potvrzen trend, který popsali Collins a Sanjayan.

Při uložení na vzduchu se pevnost v ohybu dramaticky snížila po 7. dnech. Naopak ve vodním prostředí vzrostla, ale v následujících měřeních mírně klesala. Při uložení ve folii

se vyvíjela do 21. dne, poté byla konstantní. Vzorky, které byly nejprve uloženy 14 dní ve vodě projevily stejný trend snížení pevnosti v ohybu jako vzorky na vzduchu, viz graf 3. Těsnící prostředky zachovaly konstantní hodnoty pevností po 7 dnech od vytažení z vodního prostředí oproti referenčním vzorkům na vzduchu.

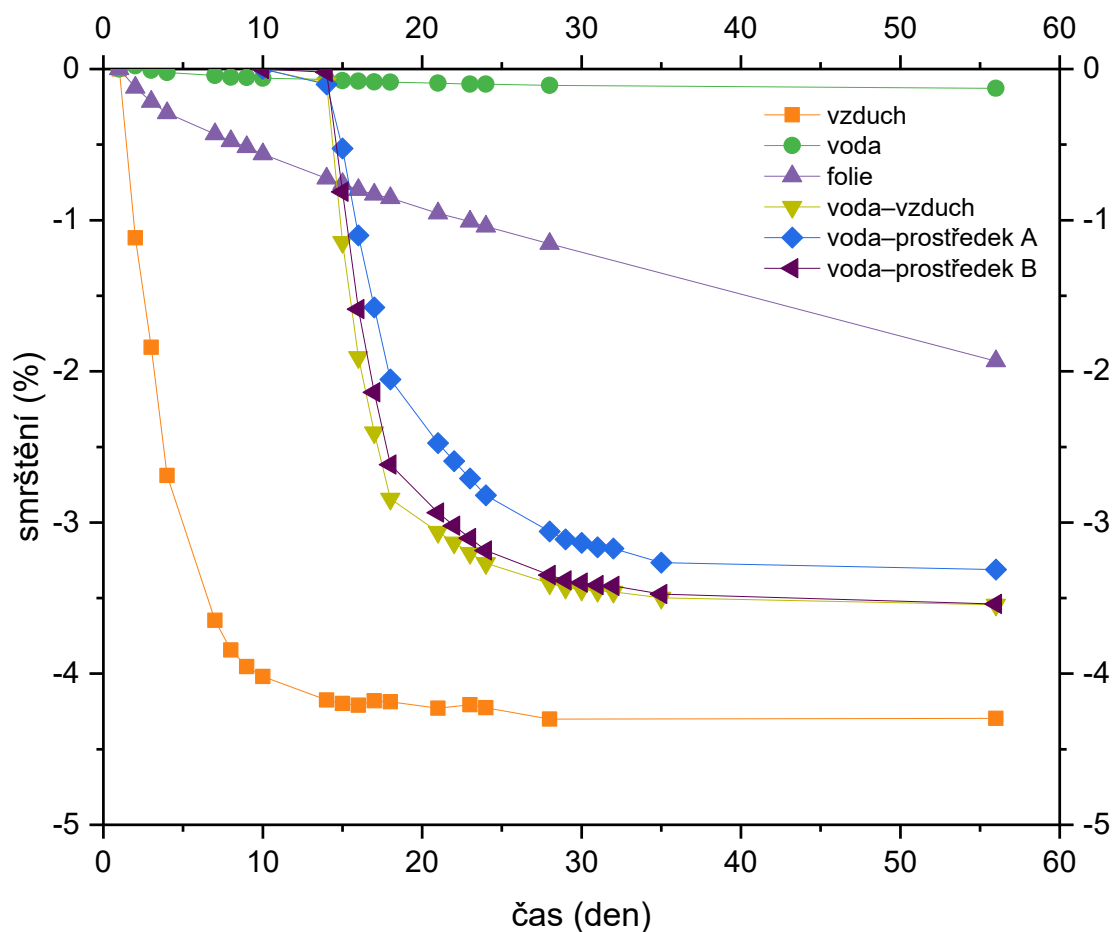


graf 3: Vývoj pevností v tahu za ohybu

## 4.2 Měření smrštění

Vzorky, u kterých byly zkoumány vlivy ošetření zůstávaly prvních 14 dní zrání ve vodě, kde dochází k minimálním délkovým změnám. Proto byly do grafu vyneseny hodnoty naměřené až po vytažení a ošetření.

Z grafu 4 vyplývá, že k největšímu smrštění dochází při ponechání na vzduchu, přičemž k největšímu rozdílu došlo v prvním týdnu zrání a poté se délka přibližně ustálila. Při autogenních podmínkách docházelo k mírnému postupnému smršťování. Ve vodě docházelo k minimálnímu smrštění – po 28. dnech byla naměřena změna délky 0,108 %.



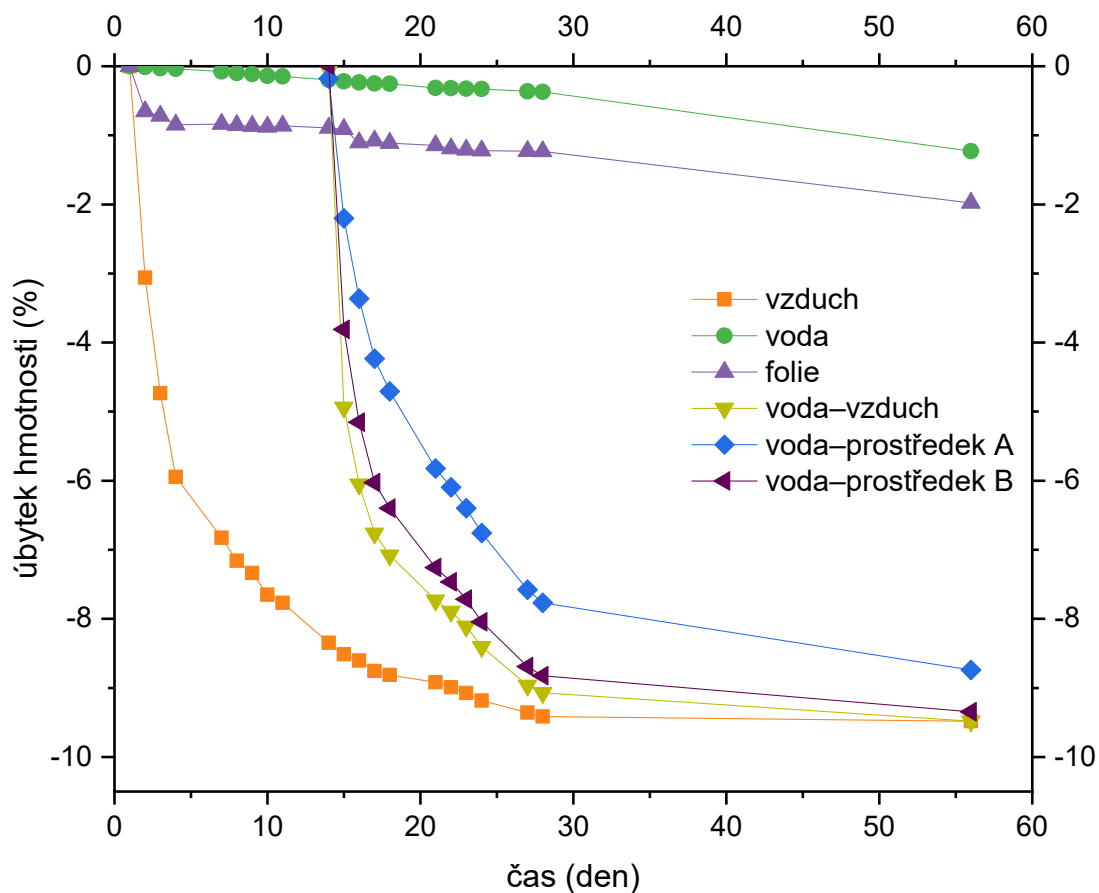
graf 4: Naměřená smrštění v čase

Vliv vytvrzovacích podmínek na smrštění zkoumali také Bilim a kol. [20] v roce 2012. Pro srovnání byly vybrány výsledky vzorků alkalicky aktivované strusky obsahující 6 hm. %  $\text{Na}_2\text{O}$ , aktivované vodním sklem s křemičitým modulem 1,00. Jedna série těchto vzorků byla uložena ve vlhkostní komoře s 95 % vlhkostí a druhá série byla vystavena 50 % vlhkosti. Z výsledků lze u obou sérií pozorovat velký nárůst smrštění v počátku vytvrzování. V případě první série se procento smrštění ustálilo již po 7 dnech. Větší smrštění vykazovala po celou dobu měření druhá série, která byla vystavena menší vlhkosti. Rozdíly zde nebyly tak výrazné jako při porovnání vytvrzování na vzduchu a ve vodě, ale je jasně patrný pozitivní vliv zvýšené vlhkosti.

Ye kol. [36] zkoumali vliv relativní vlhkosti na smrštění. Připravili 4 různé směsi malt, přičemž struska byla aktivována  $\text{NaOH}$ . Vytvrzování proběhlo za relativních vlhkostech: 85 %, 70 %, 50 % a 30 %. Všechny směsi vykazovaly nejmenší smrštění při 85 % vlhkosti. Potvrdili tak trend snížení celkového smrštění se stoupající vlhkostí, který je v podstatě pozorován také v experimentu této práce.

V souvislosti se smrštěním byly trámečky také váženy a byly zaznamenávány hmotnostní změny. Na počátku vytvrzování dochází vlivem sušení k velké ztrátě vody z vnitřního prostředí. Ztráta vody přímo souvisí s narůstajícím smrštěním, což je patrné z porovnání grafů

4 a 5. Z grafu hmotnostních změn lze však pozorovat dvě fáze, kdy první je především způsobena vysycháním a druhá je spojena s hydratačním procesem. První fáze, vysychání, je zcela logicky nejrozsáhlejší při uložení na vzduchu. Menší ztráta vody v druhé fázi je viditelná ve všech typech uložení. Tento trend ztráty vody je také popsán ve studii Melo Neto a kol. [25; 12].

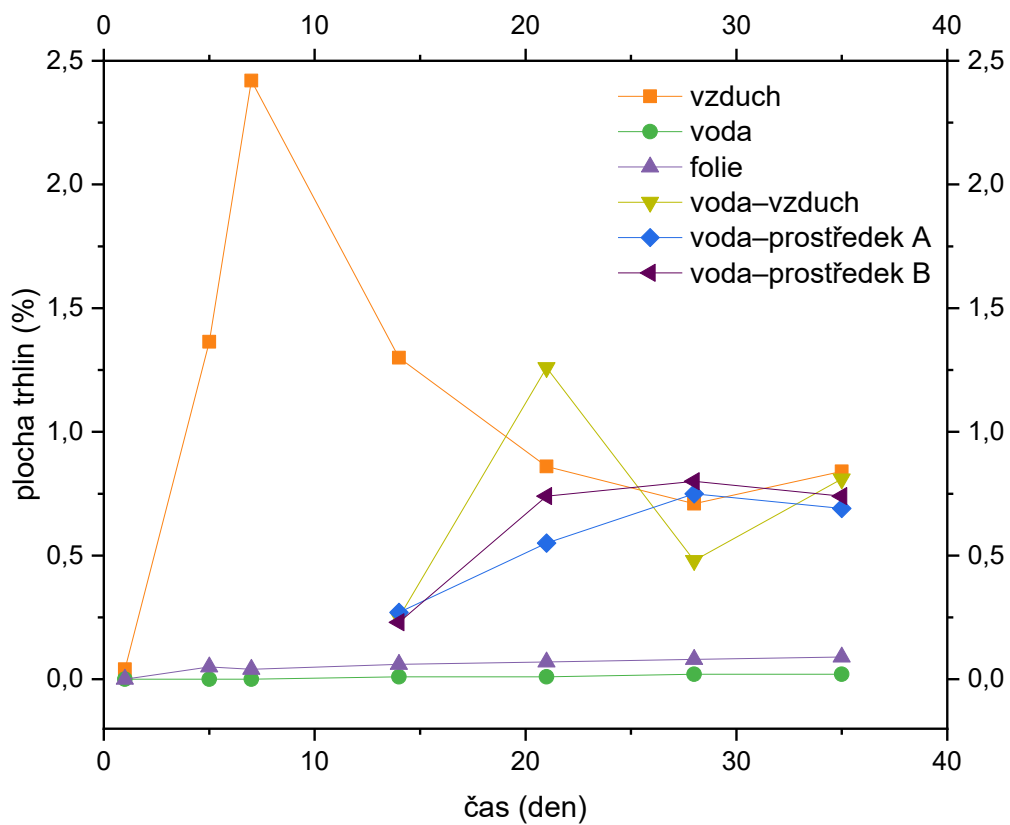


graf 5: Hmotnostní změny v čase

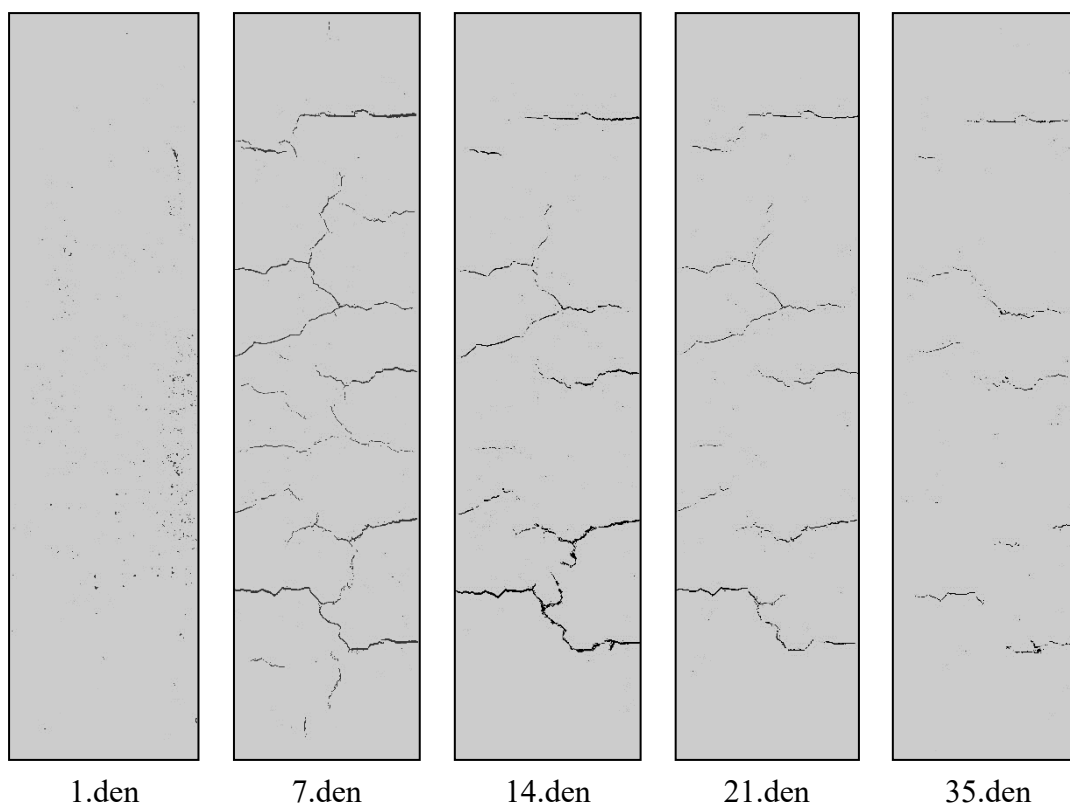
### 4.3 Stanovení množství trhlin

Na obr. 3–8 jsou porovnány vybrané snímky před vyhodnocením. V grafu 6 je vyjádřeno množství trhlin v procentech. K tvorbě největšího množství trhlin dochází při uložení na vzduchu, a to hned v prvním týdnu zrání. Následně je z grafu 6 a zároveň na fotkách z 14. dne zrání patrné zacelení části trhlin. Při ponechání vzorků 14 dní ve vodě a následném vyjmutí a ošetření byl tento jev pozorován také. Zajímavým poznatkem je dosažení obdobných výsledků po 36.dni zrání u všech typů vzorků kromě autogenního a vodního uložení, kde k tvorbě trhlin nedocházelo prakticky vůbec.

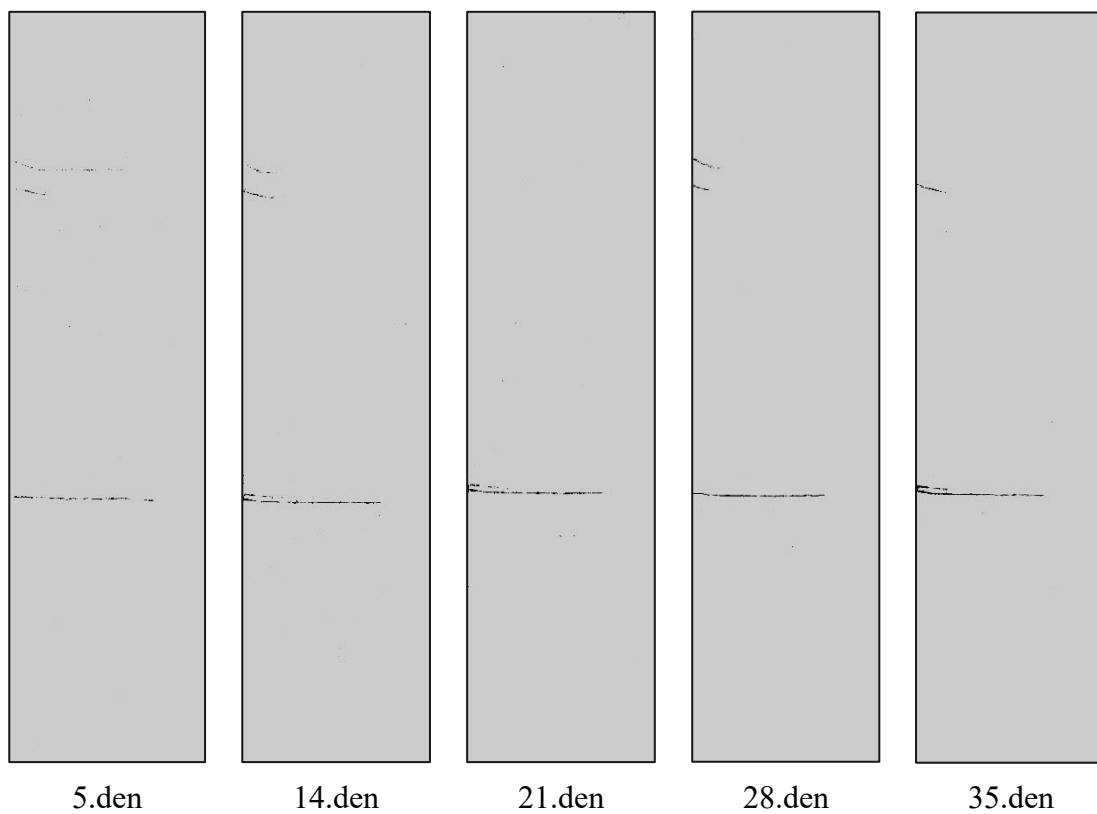
Použití těsnících prostředků napomohlo ke snížení tvorby trhlin po 7 dnech od vyjmutí na vzduch, avšak z dlouhodobého hlediska vykazovaly srovnatelné množství trhlin s ostatními typy uložení.



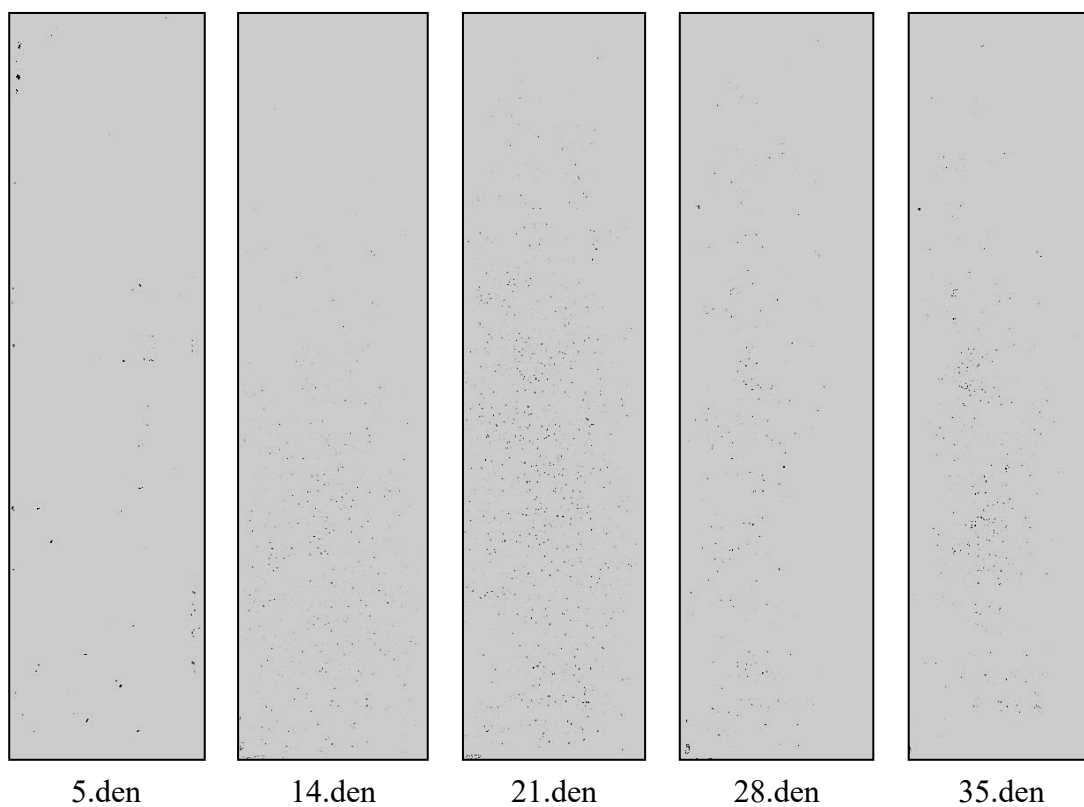
graf 6: Závislost plochy trhlin na čase zrání



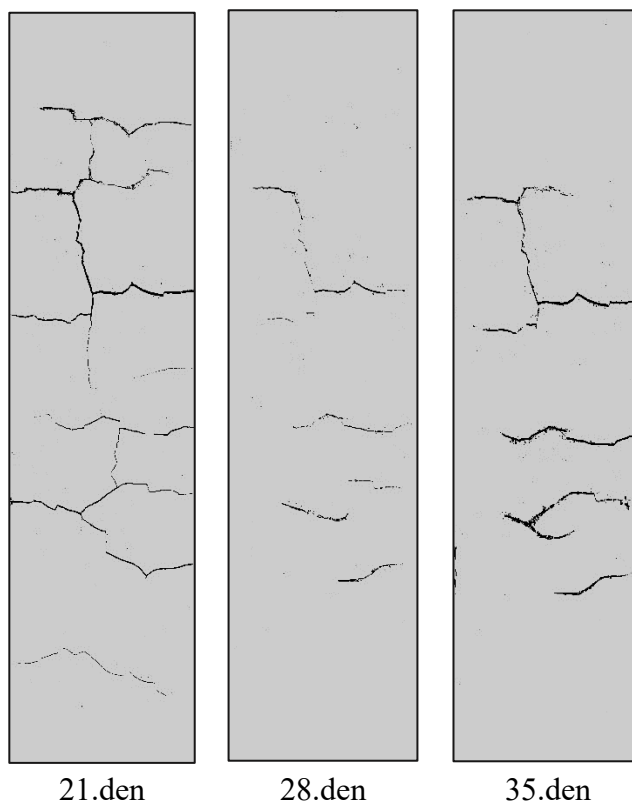
Obrázek 3: Vývoj prasklin vzorku uloženého na vzduchu



Obrázek 4: Vývoj prasklin vzorku uloženého ve folii



Obrázek 5: Vývoj prasklin vzorku uloženého ve vodě

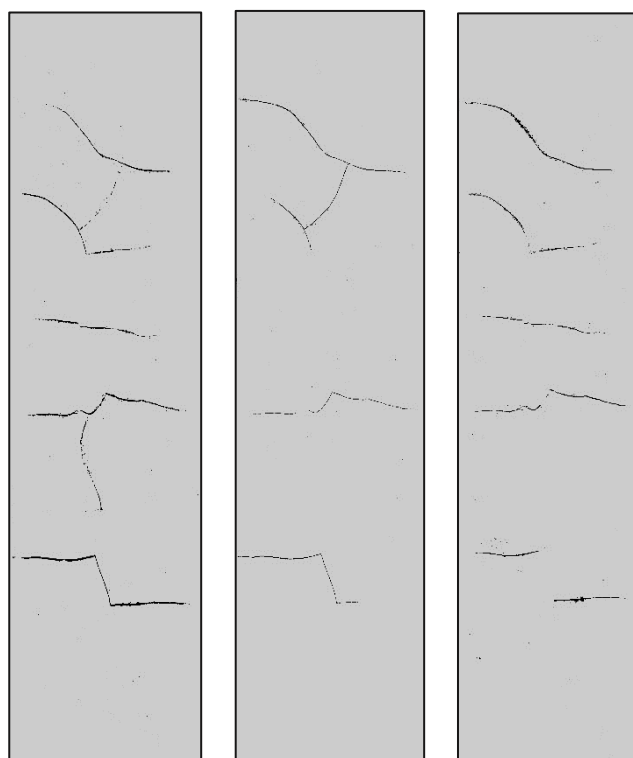


21.den

28.den

35.den

Obrázek 6: Vývoj trhlin vzorku voda-vzduch

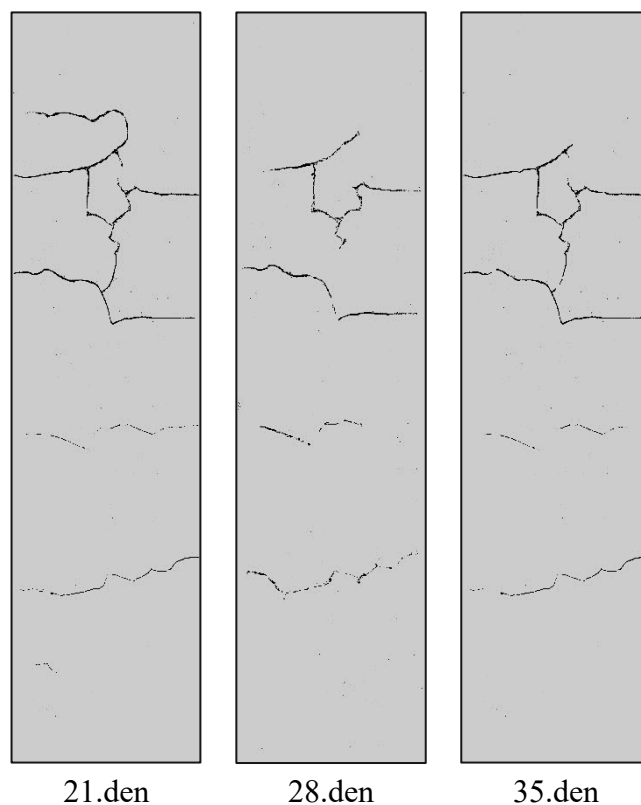


21.den

28.den

35.den

Obrázek 7: Vývoj trhlin vzorku voda-prostředek A



Obrázek 8: Vývoj trhlin vzorku voda-prostředek B

#### 4.4 Skenovací elektronová mikroskopie

Prvková analýza byla provedena po 7 a 14 dnech zrání. Byly zkoumány 3 typy uložení: na vzduchu, ve vodě a ve folii. U jednotlivých uložení je rozlišeno prvkové složení ve středu a na kraji vzorku. V tab. 3 a tab. 4 jsou uvedena zastoupení jednotlivých prvků. Bylo zavedeno značení vzorků, kde počáteční písmena značí uložení (vzduch=VZ, voda=V a folie=F), následuje den zrání, a dále je označeno místo analýzy (střed=S, kraj=K). Např. VZ7S tedy značí vzorek uložený na vzduchu, analyzován po 7 dnech zrání, ve středu vzorku. Všechny výsledné hodnoty jsou průměrem 3 naměřených hodnot.

Z procentuálního zastoupení prvků byly vypočteny dva poměry – Ca/Si a Al/Ca. V amorfní struktuře CASH gelu se uvádí poměr Ca/Si v rozmezí 0,9 až 1,2. Poměr Al/Ca vypovídá o planární struktuře vytvořené Al–přemostěním. Tyto vazby zvyšují stupeň zesítnění, a tím ovlivňují výslednou pevnost materiálu.

| prvek | VZ7S  | VZ7K  | V7S   | V7K   | F7S   | F7K   |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| C     | 20,53 | 21,88 | 24,41 | 24,60 | 15,94 | 21,43 |
| O     | 45,08 | 47,64 | 50,25 | 47,72 | 55,52 | 43,75 |
| Na    | 6,84  | 4,95  | 4,31  | 3,43  | 6,15  | 6,17  |
| Mg    | 2,18  | 3,13  | 2,03  | 2,18  | 1,96  | 1,78  |
| Al    | 1,61  | 1,50  | 1,08  | 1,21  | 1,12  | 1,70  |
| Si    | 15,21 | 12,34 | 10,32 | 12,00 | 10,64 | 16,39 |
| S     | 0,40  | 0,10  | 0,64  | 0,30  | 0,15  | 0,41  |
| K     | 0,21  | 0,22  | 0,12  | 0,19  | 0,11  | 0,24  |
| Ca    | 7,85  | 8,15  | 6,35  | 8,06  | 7,83  | 8,15  |
| Ca/Si | 0,52  | 0,66  | 0,62  | 0,67  | 0,74  | 0,50  |
| Al/Ca | 0,21  | 0,18  | 0,17  | 0,15  | 0,14  | 0,21  |

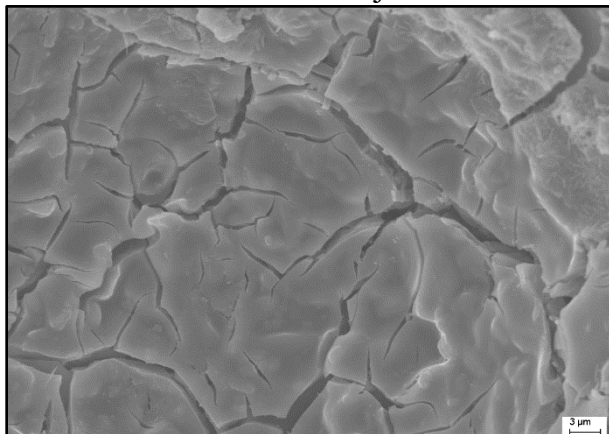
Tabulka 3: Zastoupení prvků po 7 dnech zrání

| prvek | VZ14S | VZ14K | V14S  | V14K  | F14S  | F14K  |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| C     | 7,52  | 7,39  | 10,50 | 9,43  | 7,72  | 6,91  |
| O     | 39,51 | 44,21 | 37,82 | 43,85 | 40,83 | 44,31 |
| Na    | 7,17  | 5,72  | 5,26  | 5,42  | 4,99  | 7,44  |
| Mg    | 2,12  | 3,88  | 2,27  | 1,36  | 3,66  | 1,49  |
| Al    | 1,93  | 2,28  | 2,11  | 1,49  | 3,42  | 2,04  |
| Si    | 20,07 | 16,89 | 20,02 | 18,37 | 19,83 | 20,63 |
| S     | 0,16  | 0,47  | 0,12  | 0,39  | 0,53  | 0,62  |
| K     | 0,41  | 0,49  | 0,43  | 0,27  | 0,93  | 0,33  |
| Ca    | 20,86 | 18,42 | 21,46 | 19,42 | 18,37 | 16,06 |
| Ca/Si | 1,04  | 1,09  | 1,07  | 1,06  | 0,93  | 0,78  |
| Al/Ca | 0,09  | 0,12  | 0,10  | 0,08  | 0,19  | 0,13  |

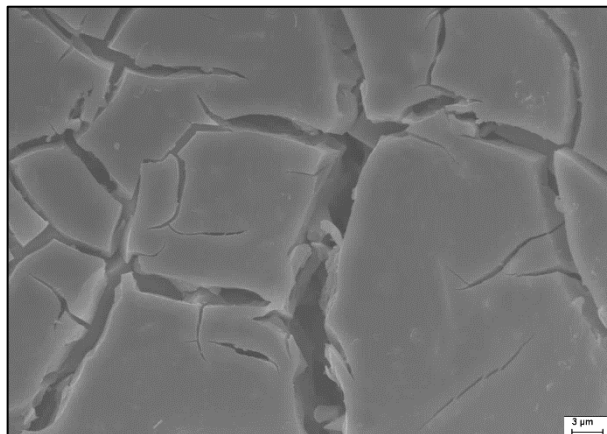
Tabulka 4: Zastoupení prvků po 14 dnech zrání

Z tab. 3 a 4 lze vyčíst nárůst poměru Ca/Si ve všech typech uložení a oblastech analýzy. Výrazné rozdíly mezi jednotlivými uloženími se neprojeví. Pouze vzorky uložené ve folii vykazovaly nejdříve, v 7 dni zrání, vyšší poměr Ca/Si. Naopak, po 14 dnech, měly vzorky ve folii tento poměr Ca/Si nejmenší. Poměr Al/Ca byl nejvyšší také při autogenních podmínkách, což koresponduje s naměřenými pevnostmi, které tento poměr ovlivňuje.

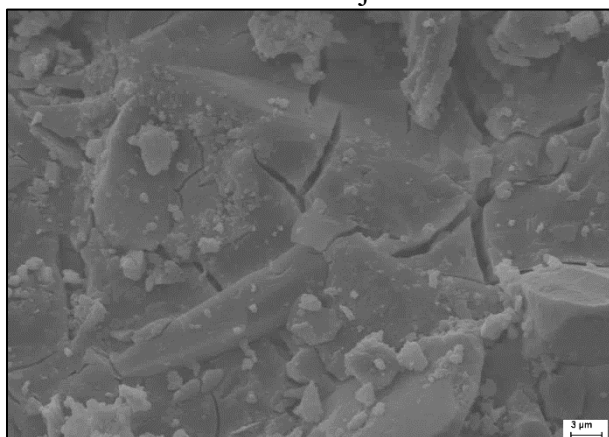
vzduch kraj



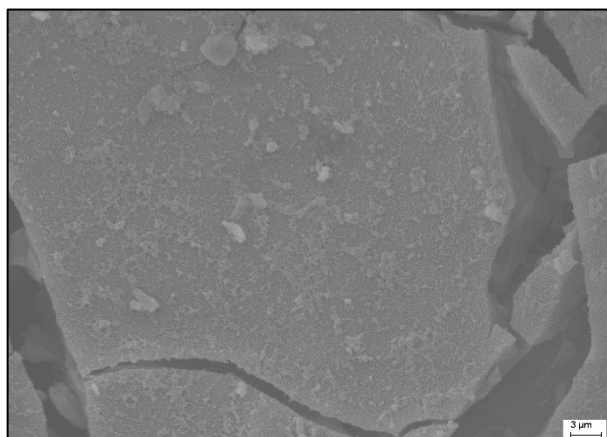
vzduch střed



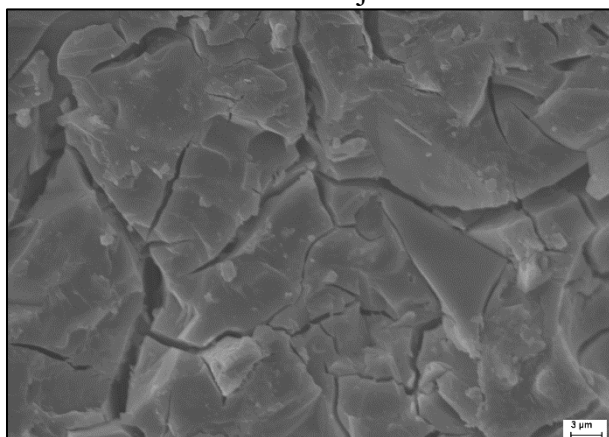
voda kraj



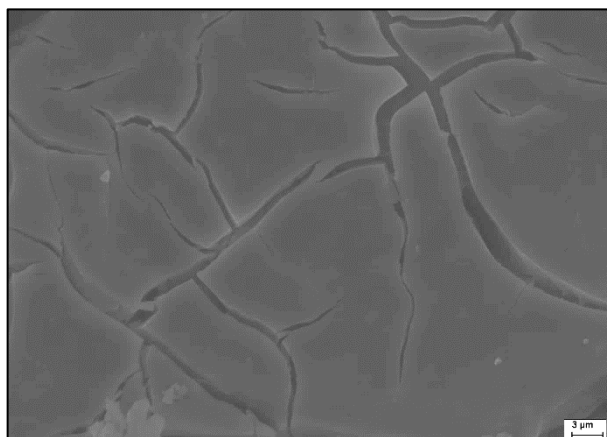
voda střed



folie kraj



folie střed



Tabulka 5: Snímky elektronového mikroskopu ze 7 dne při zvětšení 5000×

## 5 ZÁVĚR

Alkalicky aktivované materiály mají potenciál nahradit běžný portlandský cement. Hlavní motivací pro uvedení těchto materiálů do praxe je omezení emisí  $\text{CO}_2$  a využití druhotných surovin, které zatím končí na skládkách. Současné normy neumožňují použití AAM jako náhrady za OPC. Jsou však zavedeny jako přísady do OPC a jejich množství je omezeno. Zásadním problémem těchto nových materiálů je jejich velké smrštění.

Cílem této práce bylo redukovat smrštění stanovením optimálních podmínek vytvrzování AAM. V závislosti na použitých surovinách mají AAM velmi odlišné vlastnosti. Praktická část byla zaměřena na vysokopecní granulovanou strusku aktivovanou sodným vodním sklem. Připravené pasty byly podrobeny šesti různým vytvrzovacím podmínkám. Bylo testováno uložení na vzduchu, autogenní podmínky ve folii, vodní prostředí a další 3 série byly 14 dní uloženy ve vodě a poté vystaveny laboratorním podmínkám, z toho 2 série vzorků byly ošetřeny těsnicími prostředky na bázi křemičitanů lithia a akrylátové disperze.

V průběhu experimentu byly v časových intervalech po 1, 7, 14, 21, 28 a 56 dnech vytvrzování zaznamenávány mechanické vlastnosti – pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu. Délkové a hmotnostní změny byly měřeny po dobu 28. dní a následně ještě po 56. dnech. Množství trhlin, přesněji jejich plocha, byla stanovena na základě fotografií vzorků programem ImageJ. Pomocí skenovací elektronové mikroskopie byly porovnány 3 typy uložení (na vzduchu, ve vodě a ve folii) z hlediska jejich prvkového složení.

Pevnost v tlaku se nejvýrazněji vyvíjela u všech typů uložení do 28. dne vytvrzování. Po 56. dnech se pevnost v tlaku dále zvyšovala pouze při uložení ve vodě a folii. Tento jev lze vysvětlit pokračující hydratací a tvorbou CSH gelu odpovědného za pevnost. Ve vodním prostředí probíhá hydratace déle díky absorpci vody. Z dlouhodobého hlediska lze tedy předpokládat, že pevnost se bude nejdéle vyvíjet u vzorků ve vodě. Ve folii bylo pomocí výsledků z prvkové analýzy pozorováno pomalejší vytvrzování. Je zřejmé, že ve folii dojde v určitém čase k vyčerpání vody uvnitř materiálu, a to zastaví hydrataci, tedy i nárůst pevnosti. Při vytvrzování na vzduchu dojde matici voda pro hydrataci nejrychleji. To potvrzují výsledky experimentu, kdy do 28. dne docházelo k výraznému poklesu hmotnosti způsobeného odpařováním vody. Rozdíl hmotnosti ve 28 a 56 dnech nebyl výrazný, což vypovídá o nepřítomnosti nevázané vody. Následné degradující procesy způsobily, že dlouhodobá pevnost v tlaku poklesla přibližně na polovinu původní hodnoty. Vzorky, které byly nejdříve vytvrzovány ve vodním prostředí se po vytažení na vzduch chovaly stejně. Vliv těsnících prostředků na pevnost nebyl pozorován.

Pevnost v tahu za ohybu přímo souvisí s tvorbou trhlin. Po 7 dnech vytvrzování se největší množství trhlin vytvořilo u vzorků uložených na vzduchu. To se projevilo na pevnosti v tahu za ohybu, která poklesla o více než polovinu oproti výchozí hodnotě po odformování. Následně se pak část trhlin zacelila. Tento jev byl pozorován na fotografiích, zejména po zpracování v programu ImageJ (po úpravě do černobílého formátu a následně odfiltrování pórů). Procento trhlin vzorků uložených na vzduchu bylo po 14 dnech poloviční oproti procentu po 7 dnech. Trhliny se pravděpodobně zacelují hydratačními produkty, které mají větší objem než jejich výchozí látky. Nárůst hydratačních produktů v intervalu od 7. do 14.

dne zrání potvrzují výsledky prvkové analýzy. Výsledky prvkové analýzy byly zaměřeny na dva poměry – Ca/Si a Al/Ca. Poměr Ca/Si vypovídá o množství hlavního hydratačního produktu – CSH gelu. U všech uložení se tento poměr téměř dvakrát zvýšil.

Pevnost v tahu za ohybu dále po 7 dnech rostla u vzorků uložených v autogenních podmínkách a ve vodě. Při autogenních podmínkách docházelo k nepatrným trhlinám a byl zaznamenán malý úbytek hmotnosti, za který však bylo pravděpodobně odpovědné nedokonalé utěsnění vzorků. Ve vodním prostředí se trhliny netvořily prakticky vůbec. Těsnící prostředky projevily mírné zlepšení pevností v tahu za ohybu. Zejména těsnící prostředek na bázi křemičitanů lithia a akrylátové disperze (prostředek A) zmírnil ztrátu vody a tím napomohl k lepším mechanickým vlastnostem. Po 36. dnech se vývoj trhlín ustálil již u všech uložení. Bylo zjištěno, že z dlouhodobého hlediska nemá na plochu trhlín vliv ani 14denní vodní vytvrzování, ani ošetření těsnícími prostředky. Všechny vzorky vystavené vzduchu vykazovaly po 36. dnech srovnatelné procento trhlín. Tato práce potvrzuje, že účinným způsobem, jakým lze zabránit vzniku trhlín je uložení materiálu do vodního prostředí nebo zajistit autogenní podmínky.

Z diskutovaných výsledků se jako neoptimálnější ukázalo vytvrzování ve vodním prostředí. V praxi by však bylo použití těchto podmínek mnohdy složité a je tedy třeba hledat další řešení pro redukci smrštění AAM. Těmi mohou být např. přísady redukující smrštění.

## 6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] AWOYERA, Paul a Adeyemi ADESINA. A critical review on application of alkali activated slag as a sustainable composite binder. *Case Studies in Construction Materials* [online]. 2019, 11 [cit. 2020-03-27]. DOI: 10.1016/j.cscm.2019.e00268. ISSN 22145095. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214509519302098>
- [2] YANG, Keun-Hyeok, Jin-Kyu SONG a Jae-Sam LEE. Properties of alkali-activated mortar and concrete using lightweight aggregates. *Materials and Structures* [online]. 2010, 43(3), 403-416 [cit. 2020-06-02]. DOI: 10.1617/s11527-009-9499-6. ISSN 1359-5997. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1617/s11527-009-9499-6>
- [3] GAO, X., Q.L. YU a H.J.H. BROUWERS. Assessing the porosity and shrinkage of alkali activated slag-fly ash composites designed applying a packing model. *Construction and Building Materials* [online]. 2016, 119, 175-184 [cit. 2020-06-02]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.026. ISSN 09500618. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061816307474>
- [4] SHI, Caijun, A. Fernández JIMÉNEZ a Angel PALOMO. New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement. *Cement and Concrete Research* [online]. 2011, 41(7), 750-763 [cit. 2020-04-05]. DOI: 10.1016/j.cemconres.2011.03.016. ISSN 00088846. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884611000925>
- [5] PUERTAS, F., M. PALACIOS, H. MANZANO, J.S. DOLADO, A. RICO a J. RODRÍGUEZ. A model for the C-A-S-H gel formed in alkali-activated slag cements. *Journal of the European Ceramic Society* [online]. 2011, 31(12), 2043-2056 [cit. 2020-05-31]. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2011.04.036. ISSN 09552219. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0955221911002159>
- [6] SHI, Caijun, P. V. KRIVENKO a D. M. ROY. *Alkali-activated cements and concretes*. New York: Taylor & Francis, 2006. ISBN 0415700043
- [7] ZHANG, Z. a H. WANG. Analysing the relation between pore structure and permeability of alkali-activated concrete binders. *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes* [online]. Elsevier, 2015, 2015, s. 235-264 [cit. 2020-05-12]. DOI: 10.1533/9781782422884.2.235. ISBN 9781782422761. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9781782422761500095>
- [8] WANG, Shao-Dong, Karen L. SCRIVENER a P.L. PRATT. Factors affecting the strength of alkali-activated slag. *Cement and Concrete Research* [online]. 1994, 24(6), 1033-1043 [cit. 2020-04-24]. DOI: 10.1016/0008-8846(94)90026-4. ISSN 00088846. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0008884694900264>
- [9] HAHA, M. Ben, B. LOTHENBACH, G. LE SAOUT a F. WINNEFELD. Influence of slag chemistry on the hydration of alkali-activated blast-furnace slag — Part I: Effect of MgO. *Cement and Concrete Research* [online]. 2011, 41(9), 955-963 [cit. 2020-06-06]. DOI: 10.1016/j.cemconres.2011.05.002. ISSN 00088846. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884611001414>

- [10] He, J. & Cai, J. & Sun, Z.. (2018). Hydration characteristics of alkali-activated slag cement. *Revista Romana de Materiale/ Romanian Journal of Materials*. 48. 168-176.
- [11] SIDDIQUE, Rafat a Mohammad IQBAL KHAN. Ground Granulated Blast Furnace Slag. SIDDIQUE, Rafat a Mohammad Iqbal KHAN. *Supplementary Cementing Materials* [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, 2011-3-25, s. 121-173 [cit. 2020-04-24]. *Engineering Materials*. DOI: 10.1007/978-3-642-17866-5\_3. ISBN 978-3-642-17865-8. Dostupné z: [http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-17866-5\\_3](http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-17866-5_3)
- [12] Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes: 3 - Crucial insights on the mix design of alkali-activated cement-based binders. 2015. Waltham, MA: Woodhead Pub., 2015, 49-73. ISBN 9781782422761.
- [13] Alkali activated materials: state-of-the-art report, RILEM TC 224-AAM. Editor John L. PROVIS, editor Jannie S.J VAN DEVENTER. Dordrecht: Springer, c2014. ISBN 978-94-007-7671-5.
- [14] STADE, H. On the reaction of CSH with alkali hydroxides. *Cement and Concrete Research*, 19:802–10, 1989.
- [15] HUMAD, Abeer M., John L. PROVIS a Andrzej CWIRZEN. Effects of Curing Conditions on Shrinkage of Alkali-Activated High-MgO Swedish Slag Concrete. *Frontiers in Materials* [online]. 2019, 6 [cit. 2020-06-05]. DOI: 10.3389/fmats.2019.00287. ISSN 2296-8016. Dostupné z: <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fmats.2019.00287/full>
- [16] HAHA, M. Ben, B. LOTHENBACH, G. LE SAOUT a F. WINNEFELD. Influence of slag chemistry on the hydration of alkali-activated blast-furnace slag — Part II: Effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *Cement and Concrete Research* [online]. 2012, 42(1), 74-83 [cit. 2020-05-26]. DOI: 10.1016/j.cemconres.2011.08.005. ISSN 00088846. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884611002274>
- [17] ROCHA-RANGEL, Enrique, M. Juana Martínez ALVARADO a Manuela DÍAZ-CRUZ. Effect of Temperature on the Hydration of Activated Granulated Blast Furnace Slag. SINGH, J. P., Narottam P. BANSAL, Takashi GOTO, Jacques LAMON, Sung R. CHOI, Morsi M. MAHMOUD a Guido LINK, ed. *Processing and Properties of Advanced Ceramics and Composites IV* [online]. Hoboken, NJ, USA: John Wiley, 2012, 2012-09-27, s. 29-35 [cit. 2020-04-23]. *Ceramic Transactions Series*. DOI: 10.1002/9781118491867.ch4. ISBN 9781118491867. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/9781118491867.ch4>
- [18] ROVNANÍK, Pavel. Vliv působení vysokých teplot na stavební materiály na bázi alkalicky aktivovaných aluminosilikátových pojiv: Effect of high temperature treatment on bulding [i.e. building] materials based on alkali activated aluminosilicate binders : teze habilitační práce. Brno: VUTUM, 2012. ISBN 978-80-214-4512-3.
- [19] GARCÍA-LODEIRO, I., A. FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ a A. PALOMO. Alkali-activated based concrete. *Eco-Efficient Concrete* [online]. Elsevier, 2013, 2013, s.

- 439-487 [cit. 2020-05-26]. DOI: 10.1533/9780857098993.4.439. ISBN 9780857094247. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780857094247500177>
- [20] BILIM, Cahit, Okan KARAHAN, Cengiz Duran ATIŞ a Serhan İLKENTAPAR. Influence of admixtures on the properties of alkali-activated slag mortars subjected to different curing conditions. *Materials & Design* [online]. 2013, 44, 540-547 [cit. 2020-05-13]. DOI: 10.1016/j.matdes.2012.08.049. ISSN 02613069. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261306912005882>
- [21] Science and technology of concrete admixtures. Editor Pierre-Claude AÏTCIN, editor Robert J FLATT. Amsterdam: Elsevir, 2016. Woodhead Publishing series in civil and structural engineering, no. 59. ISBN 978-0-08-100693-1.
- [22] CHI, Mao-chieh, Jiang-jhy CHANG a Ran HUANG. Strength and Drying Shrinkage of Alkali-Activated Slag Paste and Mortar. *Advances in Civil Engineering* [online]. 2012, 2012, 1-7 [cit. 2020-04-21]. DOI: 10.1155/2012/579732. ISSN 1687-8086. Dostupné z: <http://www.hindawi.com/journals/ace/2012/579732/>
- [23] THOMAS, R.J., Diego LEZAMA a Sulapha PEETHAMPARAN. On drying shrinkage in alkali-activated concrete: Improving dimensional stability by aging or heat-curing. *Cement and Concrete Research* [online]. 2017, 91, 13-23 [cit. 2020-03-23]. DOI: 10.1016/j.cemconres.2016.10.003. ISSN 00088846. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884616303131>
- [24] AÏTCIN, Pierre-Claude. Vysokohodnotný beton. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) a Českou betonářskou společnost vydalo Informační centrum ČKAIT, 2005. Betonové stavitelství. ISBN 80-86769-39-9.
- [25] MELO NETO, Antonio, Maria Alba CINCOTTO a Wellington REPETTE. Drying and autogenous shrinkage of pastes and mortars with activated slag cement. *Cement and Concrete Research*. 2008, 2008(38), 565-574. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.11.002>.
- [26] YE, Hailong a Aleksandra RADLIŃSKA. Shrinkage mechanisms of alkali-activated slag. *Cement and Concrete Research* [online]. 2016, 88, 126-135 [cit. 2020-06-02]. DOI: 10.1016/j.cemconres.2016.07.001. ISSN 00088846. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884616300928>
- [27] LURA, Pietro, Ole Mejlhede JENSEN a Klaas VAN BREUGEL. Autogenous shrinkage in high-performance cement paste: An evaluation of basic mechanisms. *Cement and Concrete Research* [online]. 2003, 33(2), 223-232 [cit. 2020-06-05]. DOI: 10.1016/S0008-8846(02)00890-6. ISSN 00088846. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884602008906>
- [28] SHI, Caijun. Strength, pore structure and permeability of alkali-activated slag mortars. *Cement and Concrete Research* [online]. 1996, 26(12), 1789-1799 [cit. 2020-04-20]. DOI: 10.1016/S0008-8846(96)00174-3. ISSN 00088846. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884696001743>

- [29] NEDELJKOVIĆ, Marija. Carbonation mechanism of alkali-activated fly ash and slag materials: In view of long-term performance predictions. Servië, 2019. Doctoral thesis. Delft University of Technology.
- [30] COLLINS, Frank a J.G SANJAYAN. Microcracking and strength development of alkali activated slag concrete. *Cement and Concrete Composites* [online]. 2001, 23(4-5), 345-352 [cit. 2020-05-12]. DOI: 10.1016/S0958-9465(01)00003-8. ISSN 09589465. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946501000038>
- [31] AL-OTAIBI, Saud. Durability of concrete incorporating GGBS activated by water-glass. *Construction and Building Materials* [online]. 2008, 22(10), 2059-2067 [cit. 2020-04-24]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2007.07.023. ISSN 09500618. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095006180700205X>
- [32] SIKA CZ, S.R.O. Technický list Sikafloor®-CureHard GL. Brno, 2014. Dostupné také z: [https://cze.sika.com/content/czech\\_republic/main/cs/solutions\\_products/document\\_download/PDS/PDS\\_G\\_Sikafloor\\_CureHard.html](https://cze.sika.com/content/czech_republic/main/cs/solutions_products/document_download/PDS/PDS_G_Sikafloor_CureHard.html)
- [33] SIKA CZ, S.R.O. Technický list Sikafloor®-CureHard GL. Brno, 2014. Dostupné také z: [https://cze.sika.com/content/czech\\_republic/main/cs/solutions\\_products/document\\_download/PDS/PDS\\_G\\_Sikafloor\\_ProSeal.html](https://cze.sika.com/content/czech_republic/main/cs/solutions_products/document_download/PDS/PDS_G_Sikafloor_ProSeal.html)
- [34] ČSN EN 196-1 (722100). Metody zkoušení cementu – Část 1: Stanovení pevnosti. 1. Praha: CNI, 2016.
- [35] KUBÍNEK, Roman, Klára ŠAFÁŘOVÁ a Milan VŮJTEK. Elektronová mikroskopie [online]. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2011 [cit. 2017-05-04]. ISBN 978-80-244-2739-3. Dostupné z: <http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/elmikro.pdf>
- [36] YE, Hailong, Christopher CARTWRIGHT, Farshad RAJABIPOUR a Aleksandra RADLIŇSKA. Understanding the drying shrinkage performance of alkali-activated slag mortars. *Cement and Concrete Composites* [online]. 2017, 76, 13-24 [cit. 2020-06-09]. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2016.11.010. ISSN 09589465. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946516307843>
- [37] ASTM C596-18, Standard Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Hydraulic Cement, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, [www.astm.org](http://www.astm.org)
- [38] ROY, Della M. Alkali-activated cements Opportunities and challenges. *Cement and Concrete Research* [online]. 1999, 29(2), 249-254 [cit. 2020-04-23]. DOI: 10.1016/S0008-8846(98)00093-3. ISSN 00088846. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884698000933>
- [39] YE, Hailong a Aleksandra RADLIŇSKA. Carbonation-induced volume change in alkali-activated slag. *Construction and Building Materials* [online]. 2017, 144, 635-644 [cit. 2020-06-03]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.238. ISSN 09500618. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061817306335>
- [40] ZHANG, Yao Jun, Yong Lin ZHAO, Hai Hong LI a De Long XU. Structure

characterization of hydration products generated by alkaline activation of granulated blast furnace slag. *Journal of Materials Science*. 2008, 43(22), 7141-7147. DOI: 10.1007/s10853-008-3028-9

## **7 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ**

|         |                                                                                          |
|---------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| AAM     | alkalicky aktivované materiály                                                           |
| AAS     | alkalicky aktivovaná struska                                                             |
| CSH     | kalcium-silikát-hydrát                                                                   |
| EDS     | energodisperzní analýza                                                                  |
| MAS NMR | magnetické rezonance při rotaci vzorku (Magic Angle Spinning Nuclear Magnetic Resonance) |
| OPC     | běžný portlandský cement                                                                 |
| SEM     | skenovací elektronová mikroskopie                                                        |

## 8 SEZNAM OBRÁZKŮ

|                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obrázek 1: Strukturní model pro CASH gel (a) lineárními řetězci; .....                   | 12 |
| Obrázek 2: Vztah mezi smrštěním betonu a relativní vlhkostí vzduchu, převzato z [4]..... | 15 |
| Obrázek 3: Vývoj prasklin vzorku uloženého na vzduchu .....                              | 25 |
| Obrázek 4: Vývoj prasklin vzorku uloženého ve folii .....                                | 26 |
| Obrázek 5: Vývoj prasklin vzorku uloženého ve vodě .....                                 | 26 |
| Obrázek 6: Vývoj trhlin vzorku voda–vzduch .....                                         | 27 |
| Obrázek 7: Vývoj trhlin vzorku voda-prostředek A.....                                    | 27 |
| Obrázek 8: Vývoj trhlin vzorku voda-prostředek B.....                                    | 28 |

## 9 SEZNAM TABULEK

|                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabulka 1: Složení vysokopecní strusky ČR.....                               | 9  |
| Tabulka 2: Složení používaných vzorků .....                                  | 18 |
| Tabulka 3: Zastoupení prvků po 7 dnech zrání .....                           | 29 |
| Tabulka 4: Zastoupení prvků po 14 dnech zrání .....                          | 29 |
| Tabulka 5: Snímky elektronového mikroskopu ze 7 dne při zvětšení 5000× ..... | 30 |