



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA CHEMICKÁ**

FACULTY OF CHEMISTRY

**ÚSTAV CHEMIE MATERIÁLŮ**

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE

**VLIV VYBRANÝCH AKTIVÁTORŮ NA VLASTNOSTI  
ALKALICKY AKTIVOVANÝCH KOMPOZITŮ  
VYZTUŽENÝMI ČEDIČOVÝMI VLÁKNY**

EFFECT OF SELECTED ACTIVATORS ON THE PROPERTIES OF ALKALI-ACTIVATED COMPOSITES  
REINFORCED WITH BASALT FIBERS

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Daniel Švardala**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Lukáš Kalina, Ph.D**

**BRNO 2019**

## Zadání bakalářské práce

Číslo práce: FCH-BAK1349/2018  
Ústav: Ústav chemie materiálů  
Student: **Daniel Švardala**  
Studijní program: Chemie a chemické technologie  
Studijní obor: Chemie, technologie a vlastnosti materiálů  
Vedoucí práce: **Ing. Lukáš Kalina, Ph.D.**  
Akademický rok: 2018/19

### Název bakalářské práce:

Vliv vybraných aktivátorů na vlastnosti alkalicky aktivovaných kompozitů vyztuženými čedičovými vlákny

### Zadání bakalářské práce:

stanovení vlivu aktivátorů na vlastnosti alkalicky aktivovaných materiálů vyztuženými čedičovými vlákny

### Termín odevzdání bakalářské práce: 24.5.2019

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

---

Daniel Švardala  
student(ka)

---

Ing. Lukáš Kalina, Ph.D.  
vedoucí práce

---

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

V Brně dne 31.1.2019

---

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

## **ABSTRAKT**

Tato práce pojednává o alkalicky aktivovaných materiálech (AAM), jakožto o rozvíjejících se konstrukčních materiálech, a to hlavně díky jejich nízké ceně, šetrnosti k životnímu prostředí a zejména díky jejich dobrým mechanickým vlastnostem. Cílem této práce je výběr vhodného alkalického aktivátoru na vlastnosti alkalicky aktivovaného kompozitu vyztuženého čedičovými vlákny. Tato práce se zaměřuje především na stanovení vlivu přídavku čedičových vláken, jakožto výztuže, na mechanické vlastnosti, s ohledem na typ použitého alkalického aktivátoru. Vliv alkalického aktivátoru na čedičovou výztuž byl stanoven pomocí jednoduchých pevnostních zkoušek, jako je pevnost v tlaku a pevnost v ohybu. Interakce mezi matricí a vlákny, jakožto jeden z hlavních parametrů udávající kvalitu vyztužení materiálu, byla měřena pomocí elektronové rastrovací mikroskopie vybavené energodisperzním analyzátozem rentgenového záření (SEM-EDS). Provedeným výzkumem bylo zjištěno, že nejvýraznější vliv na zlepšení mechanických vlastností alkalicky aktivovaného materiálu byly u vzorků aktivovaných sodným a lithným vodním sklem, u těchto vzorků byly mechanické pevnosti vyztužených materiálů výrazně vyšší než u srovnávacích nevyztužených vzorků. AAM aktivované draselným vodním sklem, s čedičovou výztuží, dosahovaly stejných nebo velmi podobných mechanických pevností jako referenční nevyztužené vzorky. Při porovnání jednotlivých vodních skel je patrné, že mechanické vlastnosti se v závislosti na typu použitého vodního skla mění skokově, kdy materiály založené na alkalické aktivaci pomocí sodného vodního skla dosahují nejvyšších pevností, v porovnání s materiály aktivovaných pomocí lithného vodního skla, které dosahují daleko menších pevností. Na základě naměřených dat bylo zjištěno, že aktivace strusky pomocí sodného vodního skla se zdá být nejvhodnější, z hlediska největších dosažených pevností.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Alkalicky-aktivovaná pojiva, vysokopecní struska, čedičová vlákna, vlákny vyztužené kompozity.

## **ABSTRACT**

This paper deals with the alkali-activated materials (AAM) applicable as a construction material, thanks to low cost, environmental friendliness and good mechanical properties. The goal of this thesis is to search for suitable alkaline activator with respect to the final properties of alkali-activated composite reinforced with basalt fibers. This thesis is focused on the determination the effect of basalt fibers addition on the mechanical properties. The influence of alkaline activator to basalt reinforcement was determined by simply strength tests, like the compressive and flexural strength measurements. The matrix-fiber interaction, as one of the main parameters indicating the quality of the material reinforcement, was measured by electron scanning microscope equipped with an X-ray energy dispersing analyzer (SEM-EDS). It was found out that the most significant effect on the improvement of the mechanical properties of alkali-activated material was in the case of the samples activated by sodium and lithium waterglass. The mechanical strength of these reinforced materials was considerably higher compared to non-reinforced samples. AAM activated by potassium waterglass with and without the basalt reinforcement indicates the same or very similar

mechanical strength. The comparison of composites with different alkaline activator leads to the conclusion that the mechanical properties depend on the type of used waterglass. AAM activated by sodium waterglass achieve the highest strengths compared to potassium and lithium waterglass activated materials and therefore seems to be the most appropriate for basalt fiber composites preparation.

#### **KEY WORDS**

Alkali-activated binders, blast furnace slag, basalt fibres, fiber reinforced composites.



ŠVARDALA, D. *Vliv vybraných aktivátorů na vlastnosti alkalicky aktivovaných kompozitů vyztuženými čedičovými vlákny*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2019. 39 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Lukáš Kalina, Ph.D..

## **PODĚKOVÁNÍ**

Rád bych poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Lukáši Kalinovi, Ph.D. za cenné rady při zpracování práce, za velkou trpělivost a věnovaný čas. V neposlední řadě bych chtěl moc poděkovat rodině, která mě celou dobu podporovala.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že předložená práce je mým původním dílem, které jsem vypracoval samostatně. Veškerá literatura a zdroje, z nichž jsem během vypracovávání bakalářské práce čerpal, uvádím v seznamu použité literatury a zdrojů.

Brno \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
(Podpis autora)

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>ÚVOD</b> .....   | <b>8</b>  |
| <b>2</b> | <b>TEORETICKÁ ČÁST</b> .....  | <b>9</b>  |
| 2.1      | Strusko-alkalická pojiva .....  | 9         |
| 2.1.1    | Reakční mechanismus alkalické aktivace .....  | 9         |
| 2.1.2    | Hydratační produkty alkalické aktivace .....  | 10        |
| 2.1.3    | Aktivační prekurzory.....   | 11        |
| 2.1.3.1  | Vysokopevní struska .....   | 11        |
| 2.1.3.2  | Alkalické aktivátory .....  | 11        |
| 2.2      | Čedičová vlákna .....   | 12        |
| 2.2.1    | Výroba čedičových vláken .....  | 13        |
| 2.2.2    | Fyzikální a chemické vlastnosti čedičových vláken .....   | 14        |
| 2.2.2.1  | Chemické složení a chemická odolnost čedičových vláken .....  | 14        |
| 2.2.2.2  | Fyzikální vlastnosti čedičových vláken .....  | 16        |
| 2.2.2.3  | Čedičová vlákna v AAM .....   | 17        |
| <b>3</b> | <b>CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE</b> .....  | <b>18</b> |
| <b>4</b> | <b>EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST</b> .....  | <b>19</b> |
| 4.1      | Příprava vzorků.....  | 19        |
| 4.1.1    | Vysokopevní struska .....   | 20        |
| 4.1.2    | Alkalické aktivátory .....  | 20        |
| 4.1.3    | Čedičová vlákna .....   | 20        |
| 4.1.4    | Voda .....  | 21        |
| 4.2      | Stanovení mechanických vlastností.....  | 21        |
| 4.3      | Stanovení mezifázového rozhraní .....   | 21        |
| <b>5</b> | <b>VÝSLEDKY A DISKUZE</b> .....   | <b>23</b> |
| 5.1      | Stanovení optimálního množství čedičové výztuže pro AAS .....   | 23        |
| 5.2      | Stanovení pevnosti v tlaku a ohybu vzorků v závislosti na typu použitého alkalického aktivátoru ..... | 24        |
| 5.3      | Mezifázové rozhraní mezi výztuží a matricí .....  | 28        |
| 5.3.1    | SEM-EDS analýza vzorků aktivovaných sodným vodním sklem .....   | 29        |
| 5.3.2    | SEM-EDS analýza vzorků aktivovaných draselným vodním sklem .....                                      | 30        |
| 5.3.3    | SEM-EDS analýza vzorků aktivovaných lithným vodním sklem.....   | 31        |
| <b>6</b> | <b>ZÁVĚR</b> .....  | <b>34</b> |
| <b>7</b> | <b>LITERATURA</b> .....   | <b>36</b> |
| <b>8</b> | <b>SEZNAM ZKRATEK</b> .....   | <b>39</b> |

# 1 ÚVOD

V současné době, kdy dochází k vývoji nových stavebních a konstrukčních materiálů pro současné stavební technologie, je důležitým parametrem výroby šetrnost k životnímu prostředí, a hlavně také náklady spojené s výrobou. Z tohoto důvodu se hledají alternativní způsoby výroby stavebních materiálů, například ze sekundárních surovin nebo odpadních produktů.

Jedním z alternativních stavebních materiálů, jsou alkalicky aktivovaná pojiva, která mohou být připravována alkalickou aktivací vysokopecní strusky, což je sekundární produkt při výrobě železa. Výroba klasických portlandských cementů (PC) je doprovázena vznikem velkého množství oxidu uhličitého (přibližně 222 kg CO<sub>2</sub> na výrobu jedné tuny portlandského cementu [1]), který tvoří až 7 % světových emisí skleníkových plynů, kdežto při výrobě alkalicky aktivovaných cementů dochází až k polovičním či žádným emisím oxidu uhličitého, což je hlavní výhodou této výroby. Další výhodou jsou také náklady, které mohou být menší než u výroby pojiv na bázi klasických portlandských cementů, díky menší energetické náročnosti celého procesu a použití sekundárních surovin. Ačkoliv se jedná o materiál ze sekundární suroviny, vykazuje dobrou tepelnou odolnost [2], zpracovatelnost [3], trvanlivost a odolnost vůči agresivnímu prostředí [4]. Naopak vykazuje i řadu nevýhod, jako je například vznik mikrotrhlin jako důsledek smrštění materiálu nebo tvorbu solných výkvětů vlivem působení vlhkosti.

Výrazného zlepšení mechanických vlastností pojiv na bázi alkalické aktivace vysokopecní strusky, stejně jako pojiv na bázi klasických PC lze dosáhnout přidáním vláken, jakými mohou být například skleněná, uhlíková, aramidová, polypropylenová, polyethylenová nebo čedičová vlákna. Důležitým parametrem při výběru výztuže je nízká cena a ekologická náročnost procesu její výroby. Těmto požadavkům vyhovuje výroba čedičových vláken, protože surovinou je široce rozšířená přírodní hornina a proces výroby je založen na dvou základních jednoduchých krocích tavení drcené horniny a tažení.

Čedičová vlákna zvyšují pevnost v tlaku a v ohybu, ale jen v omezené míře, protože čedičová vlákna se v alkalickém prostředí rozpouštějí, což může být na druhou stranu výhodou, protože dojde ke zvýšení adhezních sil mezi matricí a vláknem.

Klíčovým procesem tedy je interakce čedičového vlákna s matricí, tvorba fázového rozhraní vlákno/matrice a následná soudržnost vlákna s matricí. Tato práce se zaměřuje na výběr vhodné matrice v závislosti na stabilitě čedičových vláken v alkalickém prostředí.

## 2 TEORETICKÁ ČÁST

### 2.1 Strusko-alkalická pojiva

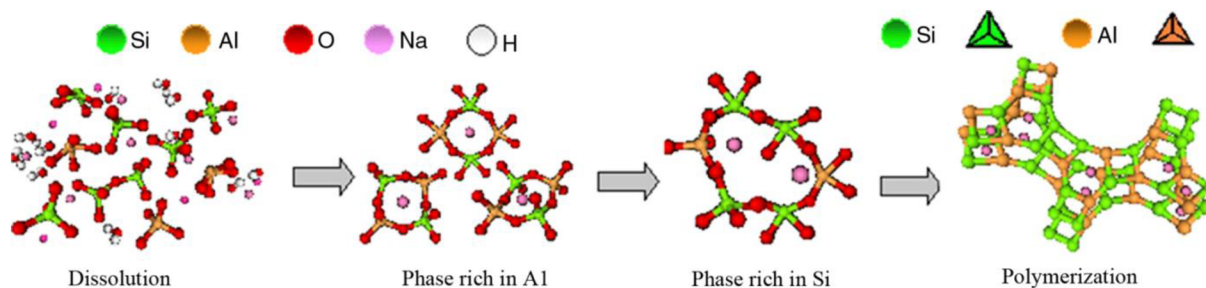
Strusko-alkalická pojiva (SAP) se řadí mezi hydraulická pojiva složená ze dvou základních substancí – vysokopecní strusky a alkalického aktivátoru. Reakce mezi vysokopecní struskou a alkalickým aktivátorem se nazývá alkalická aktivace (AA).

Alkalická aktivace je obecný pojem, který se uplatňuje při reakci pevného hlinitokřemičitanu (prekurzoru) za alkalických podmínek (indukovaných alkalickým aktivátorem), kdy dochází k tvorbě tvrdého pojiva, jehož podstatou je kombinace hydratovaných hlinitokřemičitanů alkalických kovů a kovů alkalických zemin. [5]

#### 2.1.1 Reakční mechanismus alkalické aktivace

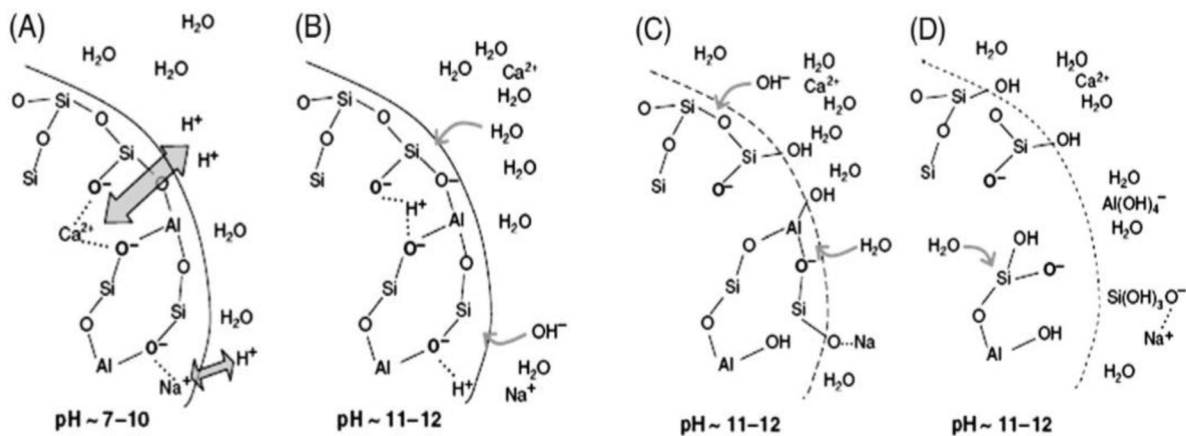
Přesný reakční mechanismus alkalické aktivace, který popisuje uspořádání a vytvrzování pojiva, nebyl dosud uspokojivě popsán, nicméně se předpokládá, že je závislý na složení vstupní suroviny a alkalického aktivátoru.

Podle Glukhovského [6] je proces alkalické aktivace tvořen spojenými reakcemi destrukce a kondenzace, které zahrnují destrukci primárního materiálu do nižších strukturních stabilních jednotek, jejich následná interakce s koagulačními strukturami a vytváření kondenzačních struktur, jako je zobrazeno na obrázku 1. V prvním kroku dochází ke štěpení kovalentních vazeb Si-O-Si a Al-O-Si vlivem působení silného alkalického prostředí a tyto skupiny jsou pak přetvořeny v koloidní formy. Následně dojde k akumulaci koloidních intermediátů a k vytvoření koagulačních struktur, které vedou ke kondenzaci.



Obrázek 1: Schéma vzniku polymerních produktů při alkalické aktivaci [7]

Krizan a Živanovič [8] analyzovali reakční teplo, které se uvolňovalo během AA vysokopecní strusky a zjistili, že hydratační proces byl ovlivněn obsahem sodíku a silikátového modulu ( $M_s$ ). Vyšší obsah  $\text{Na}_2\text{O}$  a  $M_s$  souvisí s vyššími úrovněmi hydratace. Podle těchto autorů, proces aktivace začíná destrukcí kovalentních vazeb Ca-O, Mg-O, Si-O-Si, Al-O-Al a Al-O-Si ve strusce a poté následuje tvorba Si-Al vrstvy po celé ploše zrna strusky, a nakonec vznikají hydratační produkty. Tento proces je zobrazen na obrázku 2. [9]



Obrázek 2: Reakční schéma rozpouštění zrn vysokopecní strusky [10]

### 2.1.2 Hydratační produkty alkalické aktivace

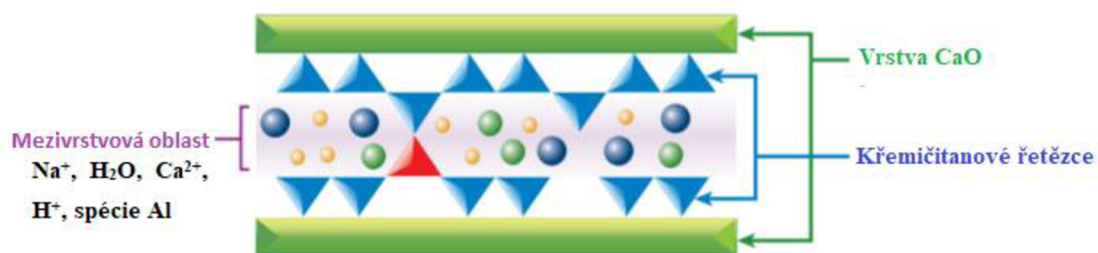
Shi a kol. [6] zjistili, že hlavním produktem alkalické aktivace vysokopecní strusky je CSH gel a xenotlit ( $[\text{Ca}_6(\text{Si}_6\text{O}_{17})(\text{OH})_2]$ ), což také potvrdil výzkum Wang a Scrivener [11], kteří zjistili nízký poměr Ca/Si. Tvorba CSH gelu a xenotlitu je pravděpodobně způsobena vysokým pH roztoku. Tito autoři uváděli tvorbu hydrotalcitu ( $\text{Mg}_6\text{Al}_2\text{CO}_3(\text{OH})_{16}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) vždy, když byl alkalický roztok složen pouze z hydroxidu sodného nebo s příměsí vodního skla. Při alkalické aktivaci pak nenašli žádnou zeolitickou fázi, ani složku ze slídové skupiny, která by obsahovala kationty alkalických kovů.

Oproti tomu Brough a kol. [12] objevili velké množství zeolitické fáze (tobermorithydroxysodalit a gismondit), což mohlo být způsobeno vysokým obsahem vody v pojivu, která způsobuje krystalizaci v systému  $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$  a  $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ .

Další autoři (Gifford a Gillot [13]) ve svém výzkumu uvádějí, že v systému nebyla přítomna žádná zeolitická forma sodných iontů, protože veškeré sodné ionty byly zakomponované v CSH gelu. Tento výrok byl potvrzen stanovením nízkého poměru Ca/Si, což znamená, že došlo k nahrazení  $\text{Na}^+$  iontů za  $\text{Ca}^{2+}$ . [9]

Hydratační produkty vzniklé při alkalické aktivaci jsou závislé na složení vysokopecní strusky, povaze a množství přidaného alkalického aktivátoru. Jednoznačně předvídat, jaké produkty vzniknou je velmi těžké, ovšem hlavní hydratační produkt při pokojové teplotě je CSH gel s nízkým poměrem Ca/Si. [14]

Nízký poměr Ca/Si také značí vysokou schopnost absorpce kationtů a molekul vody do své struktury. Při absorpci  $\text{Al}^{3+}$  kationtů dochází k nahrazení  $\text{Si}^{4+}$  kationtů za  $\text{Al}^{3+}$  v  $\text{SiO}_4$  tetraedrech, které tvoří křemičitanový řetězec. Začlenění tetraedrického hliníku do řetězce CSH gelu probíhá převážně v překlenovacích místech, jako je zobrazeno na obrázku 3.



Obrázek 3: Struktura CASH gelu tobermoritového typu [15]

Červený trojúhelník na obrázku výše znázorňuje substituovaný tetraedr v překlenovacím místě. Míra zesílení skrze CASH gel je dána poměrem Al/Ca, čím větší je tento poměr, tím více je gel zasíťován skrze Al-můstky. [15]

### 2.1.3 Aktivační prekurzory

Aktivačními prekurzory se rozumí materiály, které se účastní alkalické aktivace. Důležitým ukazatelem pro výběr prekurzorů je obsah křemičitanů nebo hlinitokřemičitanů a také jejich cena. Například vysokopecní struska, na kterou je tato práce zaměřená, nebo elektrárenské popílků jsou dostupnými surovinami, protože jsou produkovány ve velkém množství (1 miliarda tun ročně), avšak dostupnost těchto materiálů je omezená spotřebou těchto prekurzorů do portlandských cementů. Například ve Spojeném království je dostupnost těchto materiálů velmi omezená, protože veškeré množství produkce vysokopecní strusky a popílků je spotřebováno do výroby klasických PC. Oproti tomu v jiných zemích (například Čína, Austrálie, Jižní Afrika), je vysokopecní struska považována za odpadní produkt, který je potřeba zhodnotit.

#### 2.1.3.1 Vysokopecní struska

Vysokopecní struska je sekundární produkt, který se získává při výrobě železa ve vysoké peci nebo při metalurgických procesech zpracování surového železa, například při výrobě oceli. [16]

Složení vysokopecní strusky se může lišit v závislosti na způsobu granulace roztavené strusky a obsahu oxidů udávající alkalitu strusky, avšak chemické složení strusky je vyjádřeno převážně systémem oxidů  $\text{CaO-SiO}_2\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3$ .

Hlavní faktor, ovlivňující chemické složení strusky, a tedy také její vlastnosti, je tzv. kvarterní alkalita, který je vyjádřen poměrem  $(\text{CaO} + \text{MgO})/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2)$ . Součet oxidu vápenatého a hořečnatého udává celkovou bazicitu a součet oxidu hlinitého a křemičitého udává celkovou aciditu strusky. Úpravou těchto poměrů a obsahů jednotlivých oxidů lze experimentálně určit, na základě regrese, optimální složení vysokopecní strusky tak, aby měla co nejlepší reaktivitu, jako je uvedeno ve výzkumu Wanga. [17]

Vysokopecní struska (VS) se získává při výrobě surového železa. Vlivem vysoké teploty při tavení železa a následnému prudkému ochlazení strusky obsahuje struska vysoký podíl skelné fáze. Podobně jako je tomu u elektrárenských popílků, které taky obsahují velký podíl skelné fáze vlivem spalování uhlí, avšak obě tyto skelné fáze mají rozdílnou strukturu a rozdílné chemické složení a liší se především v reaktivitě, kdy vysokopecní struska je reaktivnější než popílek, díky většímu obsahu skelné fáze.

#### 2.1.3.2 Alkalické aktivátory

Alkalické aktivátory jsou další nedílnou součástí aktivačních prekurzorů. Glukhovský rozdělil alkalické aktivátory do šesti základních skupin, které jsou uvedeny v tabulce 1. [9]

Tabulka 1: Rozdělení alkalických aktivátorů dle Glukhovského [9]

| Skupina              | Sumární vzorec                         |
|----------------------|--|
| Alkalické hydroxidy  | MOH                                    |
| Soli slabých kyselin | $M_2CO_3$ ; $M_2SO_3$ ; $M_3PO_4$ ; MF |
| Křemičitany          | $M_2O \cdot nSiO_2$                    |
| Hlinitany            | $M_2O \cdot nAl_2O_3$                  |
| Hlinitokřemičitany   | $M_2O \cdot Al_2O_3 \cdot (2-6)SiO_2$  |
| Soli silných kyselin | $M_2SO_4$                              |

*Poznámka: M zastupuje ion alkalického kovu*

Z ekonomického hlediska je použití hydroxidu sodného, křemičitanu sodného a uhličitanu sodného nejlepší volbou, protože oproti analogickým sloučeninám draslíku, popř. lithia, jsou sodné sloučeniny levnější a ve většině případů dosahují větších pevností. [18]

Vodní sklo je chemickým složením hydratovaný křemičitan sodný/draselný nebo lithný a tyto aktivátory poskytují optimální mechanickou odolnost v alkalicky aktivovaných systémech a vyznačuje se také dlouhou trvanlivostí.

Množství křemičitanových fází přítomných v těchto materiálech způsobuje tvorbu speciálních struktur, kterých nejsou schopné jiné aktivátory, založené například na uhličitanech nebo solí alkalických kovů.

Křemičitany sodné jsou anorganické sloučeniny, které se vyrábějí v kombinaci různých poměrů  $SiO_2:Na_2O$ . Tento poměr je vyjádřen silikátovým modulem, označovaný jako  $M_s$  a udává poměr  $SiO_2/Na_2O$ . [19]

## 2.2 Čedičová vlákna

Jak již bylo zmíněno výše, pojiva na bázi klasického PC, stejně jako alkalicky aktivované materiály jsou bez plniv a výztuže křehké materiály a je potřeba tyto vlastnosti upravit, aby byly lépe využitelné ve stavebnictví. Mechanickou odolnost lze zvýšit přidáním výztuží – vláken, popřípadě kamenivem apod.

V největším měřítku jsou vyráběny betonové kompozity s ocelovou výztuží (železobeton), nicméně železo má tu nepříjemnou vlastnost, že v betonech koroduje. Koroze je způsobena například karbonací betonu, kdy se do betonu dostává vlhkost a oxid uhličitý skrz mikro defekty, tím dojde k reakci hydroxidu vápenatého s  $CO_2$  za vzniku uhličitanu vápenatého, což způsobí pokles hodnoty pH (z původní 12–13). Vlivem poklesu hodnoty pH dojde k narušení pasivační vrstvy, oxidaci železa a vznikne hydroxid-oxid železitý, známý také jako rez. Tato oxidace železa je doprovázena zvětšením objemu což dále způsobuje popraskání betonu. Vlivem koroze výztuže pak materiál ztrácí schopnost optimálně přenášet nárazy a tlakové napětí napříč celým kompozitem [20].

Další alternativou je použití skleněných vláken, které korozi na vzduchu nepodléhají, avšak kompozity vyztužené skleněnými vlákny nedosahují takových pevností, neboť materiály na bázi křemíku v silných alkalických prostředích křehnou a ztrácí tak svou pevnost, jako železobeton, proto je škála uplatnění takovýchto kompozitů velmi omezená. Další možností je použití kompozitů vyztuženými aramidovými vlákny, kdy aramidová vlákna jsou až dva a půl krát silnější než skleněná vlákna a téměř pětkrát silnější než ocelová vlákna, nevýhodou je malá odolnost vůči vlhku a ultrafialovému záření. Chemicky inertní, vysoce pevná a tuhá uhlíková vlákna jsou nevhodná z hlediska vysoké výrobní ceny stejně

jako skleněná vlákna nebo ocelová vlákna. Syntetická vlákna, jako například polypropylen, nylon a další, mají obvykle nízký modul pružnosti, nízkou teplotu tání a špatnou mezifázovou interakcí. [21][22]

Důležitým parametrem při výrobě vláken je také zátěž na životní prostředí, kdy výroba skleněných vláken, popř. železných, syntetických, jsou ekologicky náročné, proto se začaly používat kompozity vyztužené čedičovými vlákny, kdy výroba těchto vláken nezatěžuje natolik životní prostředí a výrobní náklady dosahují malých částek, neboť surovinou pro výrobu čedičových vláken je přírodní hornina čedičová ruda. [22]

### 2.2.1 Výroba čedičových vláken

Základní surovinou, pro výrobu čedičových vláken je čedičová hornina. Čedičová hornina je obecný pojem, používaný pro různé druhy vulkanické horniny, které vznikly po ztuhnutí roztavené lávy. Nejvýznamnější naleziště čedičových hornin jsou v Kola Peninsula, Severozápadní Sibiř, Sachalina, Uralu a hlavně Rusko, které má neomezené zdroje čedičových hornin.

Čedičové vlákno je materiál, který je složen z několika velmi tenkých filament čedičového skla, které se skládá z minerálu plagioklas, pyroxen a olivín. Plagioklas spadá pod skupinu sodných živců. Pyroxeny jsou skupinou důležitých hornin inosilikátových minerálů (inosilikát = řetězový křemičitan) nalezené v mnoha magmatických a metaformních horninách. Olivín je kosočtverečný minerál s chemickým vzorcem  $(Mg, Fe)_2SiO_4$ , který obsahuje proměnlivé množství železa a hořčíku, v závislosti na podmínkách při jeho vzniku. [23]

V současné době se vyrábí několik typů čedičových vláken, které jsou uvedeny v tabulce 2. Označení vláken je obecné a vyjadřuje pouze rozdíl, zda se jedná o kontinuální vlákno nebo sekané krátké vlákno.

Tabulka 2: Přehled typů komerčně dostupných vláken [24]

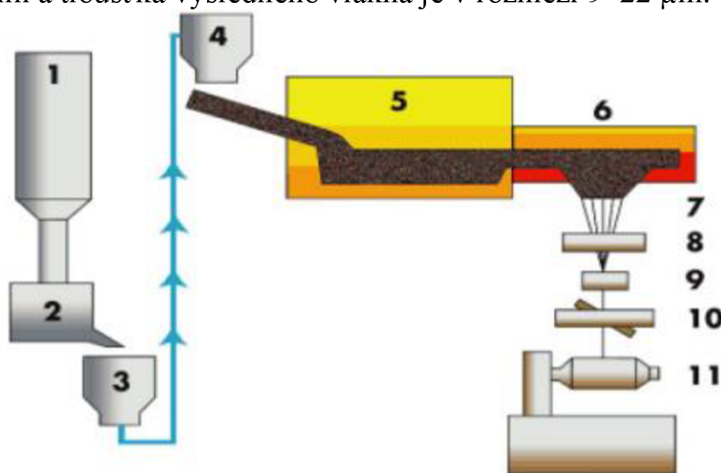
| Označení | Typ vlákna                         | Výrobce                 |
|----------|------------------------------------|-------------------------|
| SB       | „Short basalt fiber“               | Toplan s r. o., Německo |
| CB1      | „Continuous basalt fiber“<br>typ 1 | Kamenny Vek, Rusko      |
| CB2      | „Continuous basalt fiber“<br>typ 2 | D. S. E. Group, Izrael  |
| CB3      | „Continuous basalt fiber“<br>typ 3 | Technobasalt, Ukrajina  |

Čedičová vlákna se vyrábějí v jednom kroku, přímo z drcené čedičové horniny, která se taví. Výroba krátkých vláken (SB), probíhá Junkersovou metodou a touto metodou se vyrábí vlákna, u kterých není požadována vysoká kvalita, protože vlákna vyrobená touto metodou mají slabé a nerovnoměrné mechanické vlastnosti. Dalším způsobem výroby je metoda foukání taveniny, kdy se tavenina čedičové horniny nalije na soubor rotujících



ocelových válců, ve kterých jsou vzduchové trysky a při odfukování taveniny dochází k tvorbě vláken ve vzduchu, která ihned ztuhnou ve sklovité amorfní fázi.

Čedičová hornina je rozdrčena a roztavena při teplotě 1350–1420 °C, tavení probíhá ve dvou krocích: v prvním kroku dojde k hrubému roztavení horniny v inicializační tavíci zóně a poté je dopravována přes vytlačovací pouzdra do sekundární tavíci zóny s přesným řízením teplot (Obrázek 4). Tavení probíhá v rhodio-platinovém hrnci, který vede do zvlákňovací trysky, která je vyrobená ze stejného materiálu. Na dně zvlákňovací trysky jsou otvory, kterými tavenina protéká. 1–1,2 m pod tryskou je umístěno navíjení. Rychlost navíjení je 2000–5000 m/min a tloušťka výsledného vlákna je v rozmezí 9–22 μm.



Obrázek 4: Schéma výroby čedičových vláken: 1) Zásobník drčeného čediče; 2) dávkovací stanice; 3) dopravník; 4) dávkovací zařízení; 5) inicializační tavíci zóna; 6) sekundární tavíci zóna s přesnou regulací teploty; 7) Tvarování vláken; 8) velikostní aplikátor; 9) stanice pro vytváření pramenů; 10) napínací stanice vláken; 11) automatická navíjecí stanice [23]

Čedičové horniny jsou rozděleny do tří základních skupin na kyselé, zásadité a středně kyselé, podle obsahu  $\text{SiO}_2$ . Zásadité čedičové horniny obsahují do 46 hm. %  $\text{SiO}_2$ , středně kyselé obsahují 43–46 hm. %  $\text{SiO}_2$  a kyselé čedičové horniny obsahují nad 46 hm. %  $\text{SiO}_2$ . Barevný rozsah čedičových hornin z hnědé do šedé až tmavě zelené je způsoben chemickým složením horniny a chemické složení se liší v závislosti na místě naleziště. [24]

## 2.2.2 Fyzikální a chemické vlastnosti čedičových vláken

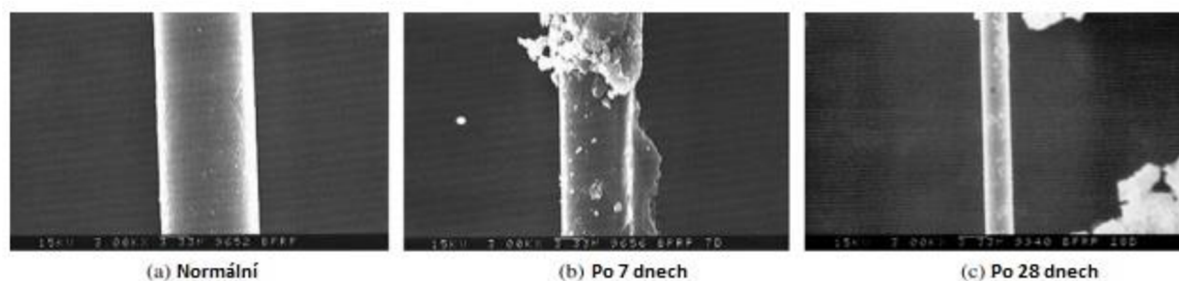
### 2.2.2.1 Chemické složení a chemická odolnost čedičových vláken

Chemické složení čedičových vláken je zobrazeno v tabulce 3. Všechny typy čedičových vláken mají jako základní složku  $\text{SiO}_2$ , s hmotnostním zastoupením 42–56 %. SB vlákna mají oproti CB vláken daleko menší obsah  $\text{SiO}_2$ , ale vyšší obsah  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Čedičová vlákna obsahují mimo jiné i další oxidy, jako například  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  a  $\text{TiO}_2$  a tyto oxidy, respektive jejich obsah, určují rozdíl mezi čedičovými a skleněnými vlákny. [24]

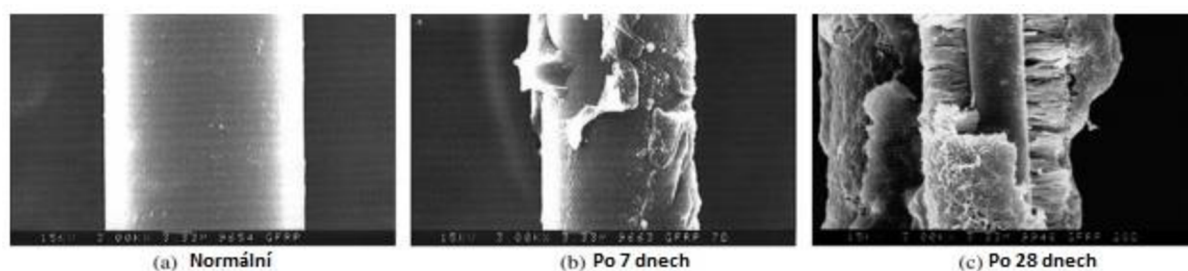
Tabulka 3: Chemické složení čedičových vláken v závislosti na typu vlákna [24]

| Oxid                           | Druh vlákna   |                |                |                |
|--------------------------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
|                                | SB<br>(hm. %) | CB1<br>(hm. %) | CB2<br>(hm. %) | CB3<br>(hm. %) |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 17.35         | 15.44          | 14.21          | 17.97          |
| SiO <sub>2</sub>               | 42.43         | 55.69          | 53.36          | 50.62          |
| CaO                            | 8.88          | 7.43           | 7.74           | 8.85           |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 11.68         | 10.80          | 10.98          | 11.11          |
| K <sub>2</sub> O               | 2.33          | 1.51           | 1.06           | 1.73           |
| MgO                            | 9.45          | 4.06           | 5.35           | 5.19           |
| Na <sub>2</sub> O              | 3.67          | 2.40           | 3.79           | 2.38           |
| TiO <sub>2</sub>               | 2.55          | 1.23           | 1.73           | 1.10           |

Hlavní výhodou čedičových vláken je chemická odolnost vůči zásaditému prostředí, kdy čedičová vlákna jsou schopná odolávat prostředí o vysokém pH, v porovnání se skleněnými vlákny jako je zobrazeno na obrázcích níže (Obrázek 5 a 6). Z obrázků je patrné, že skleněná vlákna odolávají daleko hůře zásaditému prostředí než vlákna čedičová, při působení alkalického roztoku na skleněná vlákna dochází k větším hmotnostním ztrátám než u čedičových vláken, a k silnému poškození struktury vlákna, což vede ke zhoršení mechanických vlastností. [24][25]



Obrázek 5: Chemická odolnost čedičových vláken vůči působení NaOH [25]



Obrázek 6: Chemická odolnost skleněných vláken vůči působení NaOH [25]

Chemická odolnost čedičových vláken v alkalickém prostředí je posuzována podle několika aspektů – ztráta hmotnosti čedičového vlákna, pokles mechanických pevností a změna chemického složení na povrchu vlákna. Existuje jistý nesoulad při stanovení chemické odolnosti čedičových vláken, podle některých studií [26] jsou čedičová vlákna odolná v silném alkalickém prostředí a podle jiných studií [27][28] vykazují čedičová vlákna nízkou odolnost.

Welter a kol. [26] nezjistili signifikantní změny na čedičovém vlákne při působení 12.5M roztoku NaOH při teplotě 40 °C po dobu 150 hodin, na druhou stranu Wei a kol. [29] zjistili 7% úbytek hmotnosti při působení 2M NaOH po 28 dnech. Další studie [28] vykazuje až 15% úbytek hmotnosti čedičového vlákna při působení 1M roztoku NaOH při teplotě 40 °C po 28 dnech. Lee a kol. [30] ve své studii porovnávají úbytek hmotnosti při působení 10% roztoku NaOH, 10% roztoku KOH, 30% roztoku NH<sub>3</sub> a nasyceného roztoku Ca(OH)<sub>2</sub> a zjistili, že úbytek hmotnosti čedičového vlákna je výraznější při působení 10% roztoku NaOH, než 10% roztoku KOH, avšak i při působení roztoku KOH byl úbytek hmotnosti výrazný (okolo 23 %). Na druhou stranu však zjistili, že čedičová vlákna jsou odolná velmi zředěným roztokům NaOH (0.4%), stejně jako roztokům NH<sub>3</sub> a Ca(OH)<sub>2</sub>.

Lee a kol. [30] se také zabývali změnou pevnosti v tahu čedičového vlákna při působení alkalického prostředí a zjistili, že k největšímu poklesu pevnosti dochází v prvních dnech alkalického působení na vlákna. Po 90 dnech je pevnost v tahu menší než 7 % jejich původních pevností. K výraznému poklesu pevnosti (přibližně 70 %) dochází také při působení zředěných roztoků NaOH, NH<sub>3</sub> a Ca(OH)<sub>2</sub>, navzdory tomu, že ztráta hmotnosti je v těchto roztocích zanedbatelná.

### 2.2.2.2 Fyzikální vlastnosti čedičových vláken

Materiály vyrobené z čediče vykazují vysoké hodnoty tvrdosti (5–9 na Mohrově stupnici tvrdosti). Vlákna vyrobená z čediče mají rovněž vysokou pevnost a odolnost, v závislosti na kvalitě vyrobeného vlákna. Vyrobená vlákna mohou obsahovat defekty, které jsou způsobeny převážně nehomogenitou látek v celém objemu vlákna.

Čedičová vlákna mají vynikající tepelné vlastnosti v porovnání se skleněnými vlákny (Tabulka 4). Čedičová vlákna dokážou odolávat teplotám až do 1200 °C po dobu několika hodin, aniž by došlo k fyzickému poškození.

Tabulka 4: Fyzikální vlastnosti čedičových a skleněných vláken [23]

| Vlastnosti            | Čedičové vlákno | Skleněné vlákno |
|-----------------------|-----------------|-----------------|
| Pevnost v ohybu [MPa] | 3.0–4.8         | 3.1–3.8         |
| Modul pružnosti [GPa] | 79.3–93.1       | 72.5–75.5       |
| Pevnost v tahu [MPa]  | 3.1             | 4.7             |
| Tloušťka vlákna [μm]  | 6–21            | 6–21            |
| Tepelná odolnost [°C] | -260 až +700    | -50 až +380     |

Tabulka 5: Tepelné vlastnosti čedičových a skleněných vláken [23]

| Tepelné vlastnosti                      | Čedičové vlákno | Skleněné vlákno |
|---|-----------------|-----------------|
| Maximální pracovní teplota [°C]         | 980             | 650             |
| Trvalá pracovní teplota [°C]            | 700             | 480             |
| Tepelná vodivost [W/mK]                 | 0.031–0.038     | 0.034–0.040     |
| Teplota tání [°C]                       | 1 280           | 1120            |
| Koeficient tepelné roztažnosti [ppm/°C] | 8.0             | 5.4             |

V tabulce č. 5 jsou porovnány tepelné vlastnosti čedičových a skleněných vláken. Hlavními důvody, proč jsou čedičová vlákna více a více používána ve stavebnictví, jsou vysoká tepelná odolnost, vysoká korozivzdornost, odolnost vůči alkáliím a kyselinám, vysoká pevnost, a hlavně nízká cena, neboť i malý přídavek čedičových vláken může způsobit zvýšení pevnosti v ohybu, pevnosti v tahu a vyšší odolnost vůči abrazi, avšak přídavek čedičových vláken může současně způsobit snížení pevnosti v tlaku. [21][24]

### **2.2.2.3 Čedičová vlákna v AAM**

Přídavek čedičových vláken do alkalicky aktivovaného materiálu má výrazný vliv na zlepšení mechanických pevností [31]. Dias a Thaumaturgo [32] zjistili, že přídavek čedičové výztuže nemá vliv pouze na zvýšení pevností, ale zvyšují také lomovou houževnatost kompozitu, kdy přídavek 1 hm. % čedičové výztuže zvýšil lomovou houževnatost až dvojnásobně v porovnání s lomovou houževnatostí nevyztuženého kompozitu.

Jiný zdroj [33] zase poukazuje na zvýšení tepelné odolnosti při přidavku čedičových vláken do alkalicky aktivovaného materiálu, kdy čedičová výztuž v tomto materiálu zvyšuje odolnost proti popraskání kompozitu při zahřívání na teplotu 500 °C. Použitelnost takového kompozitu se pohybuje v rozmezí teplot 600–1000 °C, což při použití polymerní výztuže není možné, neboť polymerní vlákna degradují při daleko nižších teplotách.

Ve výzkumu Xu a Li [34][35] byly také zkoumány mechanické vlastnosti AAM vyztuženého čedičovými vlákny, včetně pevnosti v tlaku, deformace a absorpční kapacity energie. Závěrem jejich výzkumu je, že přídavek čedičové výztuže může výrazně zlepšit deformační a absorpční kapacitu energie kompozitu, ale přídavek čedičové výztuže nemá výrazný vliv na zvýšení pevnosti v tlaku.

### **3 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

Cílem této práce je výběr vhodného alkalického aktivátoru, na vlastnosti alkalicky aktivovaných pojiv, vyztuženými čedičovými vlákny, na základě chemické odolnosti vláken v alkalicky aktivované matrici, stanovení mezifázového rozhraní, mezi vláknem a matricí a celkovému vlivu přídavku vláken na fyzikální vlastnosti kompozitu. K dosažení určených cílů je potřeba splnit následující dílčí cíle:

- Příprava testovacích vzorků s využitím čedičových vláken
- Testování mechanických vlastností připravených vzorků
- Stanovení mezifázového rozhraní vlákno/matrice

## 4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cílem experimentální části této práce je studium účinnosti vybraných alkalických aktivátorů na vlastnosti SAP s použitím čedičové výztuže. Dále pak určení nejvhodnějšího aktivátoru s ohledem na chemickou stabilitu v matrici a mezifázové rozhraní.

### 4.1 Příprava vzorků

Vzorky byly připravovány z pasty, tvořené vysokopecní granulovanou struskou, alkalického aktivátoru, vody a čedičových vláken. Pasta byla míchána 2,5 minuty a tento proces přípravy směsi lze popsat jednotlivými dílčími kroky:

- Vysokopecní granulovaná struska a adekvátní množství čedičových vláken (1 hm. % vztaženo na hmotnost pasty), byla vložena do mísy. Tato směs byla poté míchána elektrickým míchačem po dobu 10 minut, aby se zajistila dispergace vláken a rovnoměrná distribuce vláken v matrici.
- Účinná dispergace svazku vláken a jejich následná rovnoměrná distribuce v matrici je velmi zásadním dílčím krokem při přípravě AAM vyztuženého čedičovými vlákny. Prvotním pokusem byla dispergace pomocí ultrazvuku ve vodní lázni za zvýšené teploty. Tato metoda se však ukázala jako nevhodná a nepoužitelná, protože vlákna, používaná pro výztuž kompozitu ve formě 1,2cm vláken tvořila ve vodném roztoku vodního skla sedlinu. Proto byla zvolena metoda dispergace suchou cestou pomocí stolní míchačky. Na obrázku 7 je zobrazen příčný lom zkušební vzorku AAS aktivovaného pomocí lithného vodního skla s přídavkem 1 hm. % čedičové výztuže.



Obrázek 7: Pohled na příčný lom zkušební vzorku vyztuženého čedičovými vlákny

- Poté bylo ke směsi přidáno vypočítané množství alkalického aktivátoru tak, aby výsledné těsto obsahovalo 4 hm. % oxidu alkalického kovu  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ , s výjimkou lithného alkalického aktivátoru, při použití tohoto aktivátoru bylo množství upraveno na 1,1 hm. %  $\text{Li}_2\text{O}$ .
- Následně bylo ke směsi přidáno množství vypočítané vody tak, aby byl vodní součinitel celé směsi roven 0,35.
- Směs byla míchaná nízkými otáčkami elektrického míchače po dobu 30 sekund. Po této době bylo míchání přerušeno, těsto ulpělé na stěně mísky bylo setřené plastovou stěrkou a poté bylo těsto mícháno ještě 2 minuty při větších otáčkách.

- Následně bylo těsto hutněno na vibračním stole po celkovou dobu 1 minuty.
- Vzorky byly ošetřovány dle normy na ošetřování cementových trámečků a až do doby zkoušky byly uloženy ve vodě.

#### 4.1.1 Vysokopecní struska

Vysokopecní granulovaná struska od firmy Kotouč Štramberk s r. o. má specifický povrch  $400 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$  (uvedeno na obalu) o chemickém složení, které je uvedeno v tabulce 6.

Tabulka 6: Chemické složení vysokopecní strusky [36]

| Chemické složení vysokopecní strusky (hm. %) |                  |      |                                |                 |                  |                  |     |                   |                                |
|--|------------------|------|--------------------------------|-----------------|------------------|------------------|-----|-------------------|--------------------------------|
| CaO  | SiO <sub>2</sub> | MgO  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SO <sub>3</sub> | TiO <sub>2</sub> | K <sub>2</sub> O | MnO | Na <sub>2</sub> O | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |
| 41.1   | 34.7             | 10.5 | 9.1                            | 1.4             | 1.0              | 0.9              | 0.6 | 0.4               | 0.3                            |

Použitá vysokopecní struska obsahuje 84 % amorfni fáze a 16 % krystalické fáze, složené z akermanitu (9,5 %), kalcit (3,7 %), merwinit (2,3 %), křemen (0,5 %). [36]

#### 4.1.2 Alkalické aktivátory

V této práci bylo použito sodné vodní sklo (Na<sub>2</sub>O/SiO<sub>2</sub> o  $M_s = 1.83$ ), draselné vodní sklo (K<sub>2</sub>O/SiO<sub>2</sub> o  $M_s = 1.76$ ) a lithné vodní sklo (Li<sub>2</sub>O/SiO<sub>2</sub> o  $M_s = 2.64$ ) o různém chemickém složení a různé hustotě, jako je uvedeno v tabulce 7.

Tabulka 7: Chemické složení a hustota použitých vodních skel

| Alkalický aktivátor | SiO <sub>2</sub> (hm. %) | M <sub>2</sub> O (hm. %) | $M_s$ | $\rho$ (kg.m <sup>-3</sup> ) |
|---------------------|--------------------------|--------------------------|-------|------------------------------|
| Sodné vodní sklo    | 30.10                    | 16.65                    | 1.83  | 1640.09                      |
| Draselné vodní sklo | 28.37                    | 25.28                    | 1.76  | 1578.93                      |
| Lithné vodní sklo   | 17.13                    | 3.23                     | 2.64  | 1177.75                      |

Dodavatelem vodních skel je firma Vodní sklo a. s. a SChem a. s. Chemické složení bylo stanoveno konduktometrickou analýzou. Hustota vodních skel byla stanovena pyknometricky.

#### 4.1.3 Čedičová vlákna

Použitá čedičová výztuž, od firmy Kammeney Vek, byla ve formě krátkých (1.2cm) svazků filament a chemické složení čedičových vláken je uvedena v tabulce 8.

Tabulka 8: Chemické složení čedičových vláken [36]

| Chemické složení čedičových vláken (hm. %) |                                |                                |      |      |                   |                  |                  |               |
|--|--------------------------------|--------------------------------|------|------|-------------------|------------------|------------------|---------------|
| SiO <sub>2</sub>                           | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO  | MgO  | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | TiO <sub>2</sub> | Ostatní prvky |
| 55.69                                      | 15.44                          | 10.80                          | 7.43 | 4.06 | 2.40              | 1.51             | 1.23             | 1.44          |



#### 4.1.4 Voda

Pro přípravu vzorků byla použita demineralizovaná voda, produkovaná Fakultou chemickou. Celkové množství použité vody na přípravu vzorků bylo upraveno o množství vody obsažené ve vodním sklem.

#### 4.2 Stanovení mechanických vlastností

Mechanické vlastnosti AAM jsou v této práci určeny pomocí stanovení pevnosti v tlaku a pevnosti v ohybu materiálu (třibodový ohyb). Vzorky pro stanovení pevnosti v ohybu mají definovanou velikost a tvar v podobě trámečků o velikosti  $40 \times 40 \times 160$  mm, pevnost v tlaku je poté měřena na dvou vzorcích, které vzniknou po zlomení trámečku. Pevnost v ohybu a pevnost v tlaku byla testována vždy na referenčním vzorku bez vláknové výztuže a na vzorcích s vláknovou výztuží, a to po 7, 14, 28 a 56 dnech od namíchání pasty.

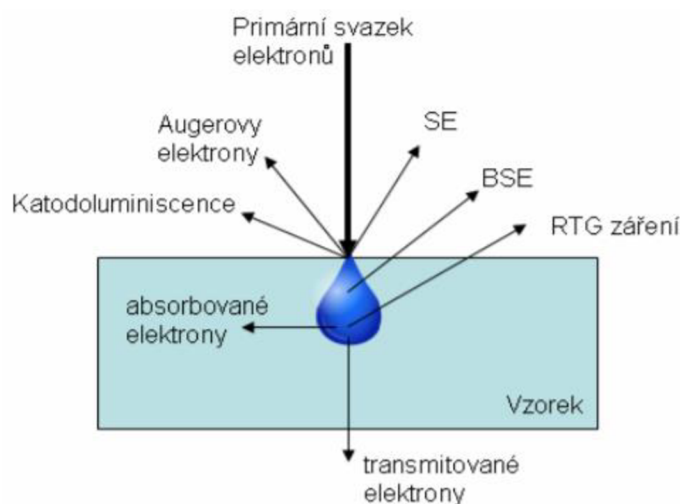
Pro každý časový interval byly měřeny mechanické vlastnosti na třech vzorcích s čedičovou výztuží a třech referenčních vzorcích bez výztuže. K měření byl použit přístroj Desttest 4310 Compact A (Beton Systém s. r. o.).

#### 4.3 Stanovení mezifázového rozhraní

Mezifázové rozhraní je jedním z klíčových faktorů, které ovlivňují mechanické vlastnosti testovaných vzorků. Mezifázové rozhraní mezi vláknem a matricí bylo sledováno pomocí rastrovací elektronové mikroskopie (SEM).

Princip SEM je takový, že na každý kousek vzorku je zaměřen úzký paprsek elektronů (elektrony na vzorek dopadají po řádcích), které jsou emitovány z katody a následně urychleny elektrickým polem. Interakcí elektronů s povrchem vzorku vznikají různé detekovatelné složky. Při pohybu paprsku po vzorku s proměnlivým povrchem vznikají změny v úrovni signálu v detektoru.

Při dopadu elektronů na vzorek dochází k několika interakcím – vznik sekundárních elektronů (SE), elektrony se zpětně odrazí (BSE), vznik Augerových elektronů (AE), emise fotonů, vznik RTG záření a také dochází k absorpci elektronů. Všechny tyto interakce jsou zobrazeny na obrázku 8.



Obrázek 8: Interakce vzorku po dopadu svazku elektronů při SEM měření [37]



Zdrojem informace o povrchu materiálu je dána především SE interakcí, kdežto BSE je zdrojem informací o prvkovém složení materiálu nebo krystalografii materiálu. Výsledný obraz vznikne díky kontrastům. Kdy lehčí prvky, které mají menší počet protonů, tvoří ve výsledném obraze tmavší místa a těžší prvky s větším počtem protonů vytvářejí světlejší místa. Důležitý je také povrch materiálu, kdy dutiny poskytují menší intenzitu signálu než vyvýšená místa.

Prvkové složení vzorku bylo měřeno skenovacím elektronovým mikroskopem vybaveným energodisperzním analyzátozem rentgenového záření (SEM-EDS). EDS využívá detekci a analýzu charakteristického rentgenového záření k vytvoření spektra určujícího frekvenci rentgenových signálů v jednotlivých energetických oblastech. Toto spektrum tedy obsahuje píky charakteristické k jednotlivým prvkům a výška těchto píků vyjadřuje kvantitu prvků ve vzorku. [37]

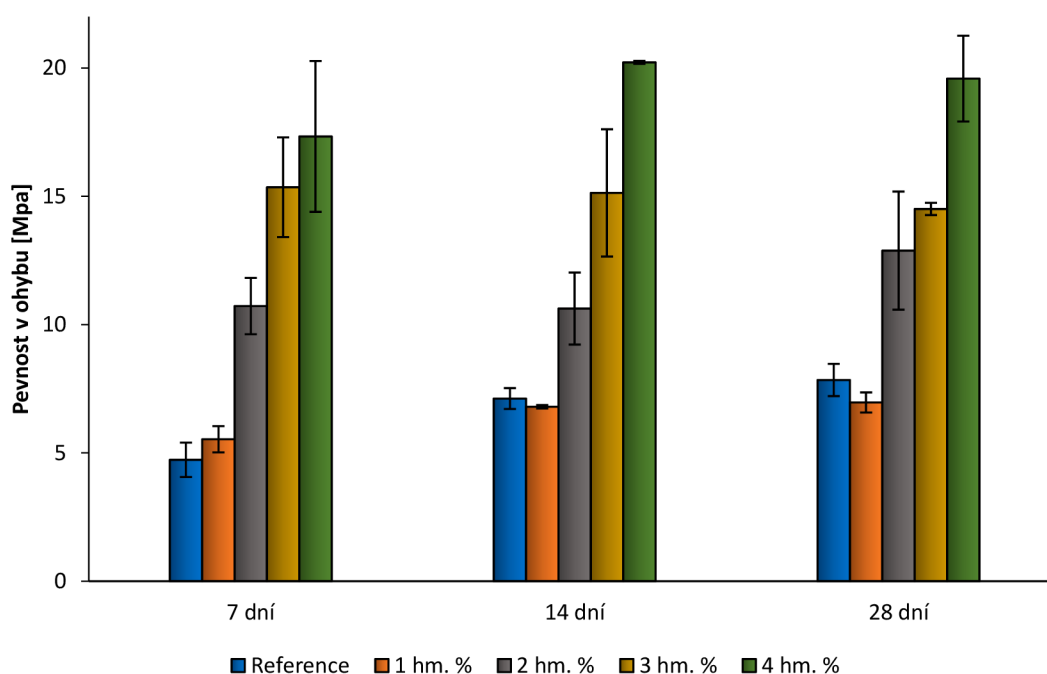
Mezifázové rozhraní bylo určeno na vzorcích s výztuží v časovém intervalu 7 a 28 dní od namíchání pasty. Vzorky pro SEM-EDS byly připraveny rozbitím zkušebního vzorku, po testování pevnosti v tlaku na malé částičky, a vybráním takové části vzorku ( $\pm 2$  mm), který viditelně obsahoval čedičová vlákna. Vzorek byl následně potažen tenkou vrstvou zlata (vzorek AAM není vodivý a SEM analýza by nebyla možná) a měřen při urychlovacím napětí 15 keV, v pracovní vzdálenosti (WD – working distance) 15 mm, programem AZtec.

## 5 VÝSLEDKY A DISKUZE

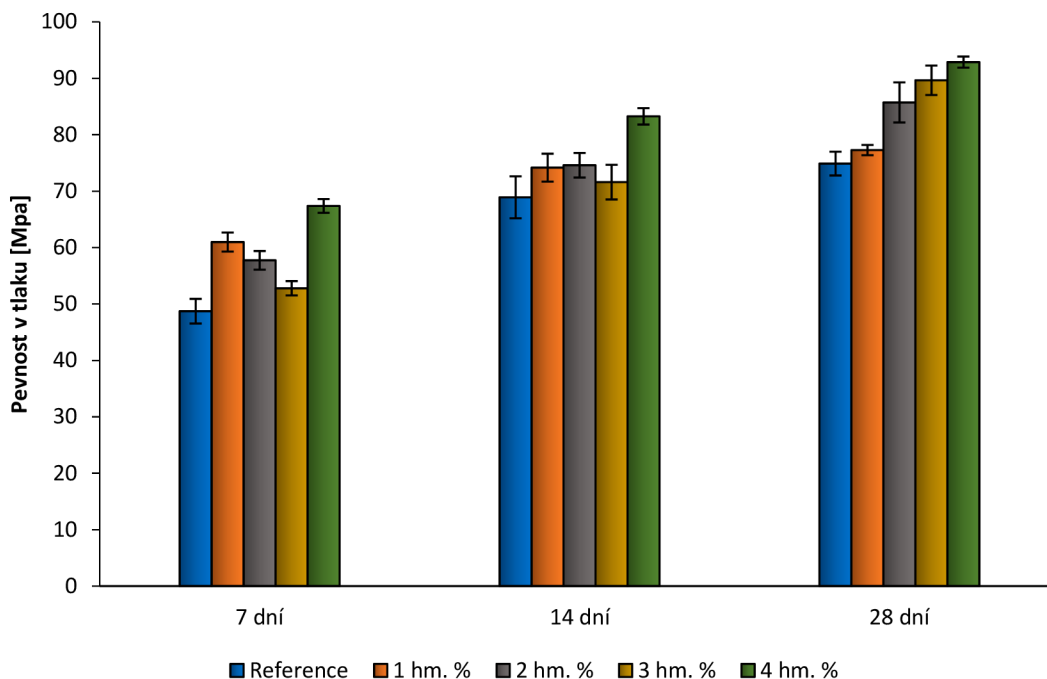
Byly testovány vzorky alkalicky aktivovaných systémů, vyztužené čedičovými vlákny, aktivované pomocí tří typů vodních skel – sodné vodní sklo, draselné vodní sklo a lithné vodní sklo. U těchto vzorků byla testována pevnost v tlaku a pevnost v ohybu v časových intervalech 7, 14, 28 a 56 dní. Na vzorcích po 7 a 28 dnech byl také provedeno SEM-EDS měření ke sledování mezifázového rozhraní mezi vláknem a maticí.

### 5.1 Stanovení optimálního množství čedičové výztuže pro AAS

V první řadě bylo stanoveno optimální množství čedičových vláken v systému. Výběr vhodného množství čedičových vláken bylo určeno na základě přípravy variace hmotnostních procent čedičových vláken na množství připravené pasty. Byly připraveny vzorky s obsahem 1, 2, 3 a 4 hm. %, za použití sodného vodního skla a na těchto vzorcích byla měřena pevnost v tlaku a v ohybu.



Graf 1: Závislost pevnosti v ohybu na čase pro řadu 1, 2, 3 a 4 hm. %



Graf 2: Závislost pevnosti v tlaku na čase pro řadu 1, 2, 3 a 4 hm. %

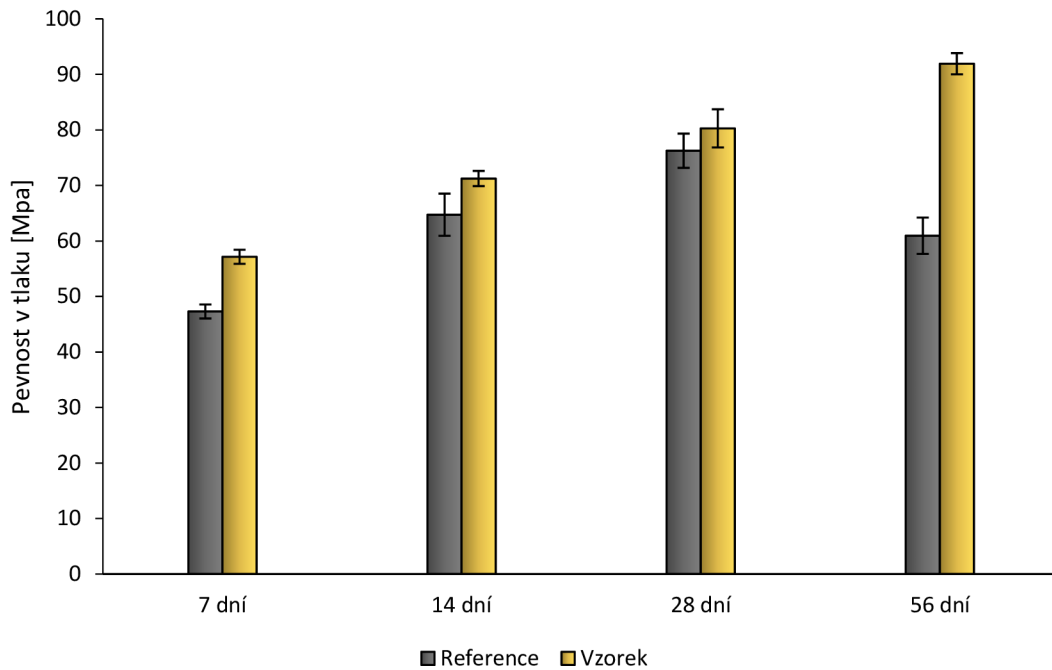
Z naměřených dat bylo vybráno jako optimální množství 1 hm. % čedičových vláken na celkové množství směsi. Ze získaných hodnot pevnosti v tlaku bylo zjištěno, že pevnost v tlaku vždy roste s časem, v závislosti na množství přidané výztuže, což je patrné z grafu 2, avšak významným faktorem, ovlivňující výběr optimálního množství čedičové výztuže byl zpracovatelnost těsta, kdy větší obsah čedičových vláken zhoršoval zpracovatelnost těsta a také bylo obtížnější dosáhnout rovnoměrné dispergace vláken v celém objemu vzorku, která způsobovala vznik nehomogenních míst ve vzorku a tyto nehomogenity způsobovaly vysoký rozptyl naměřených dat pevnosti v ohybu, což je patrné z velikosti směrodatných odchylek zobrazených v grafu 1.

## 5.2 Stanovení pevnosti v tlaku a ohybu vzorků v závislosti na typu použitého alkalického aktivátoru

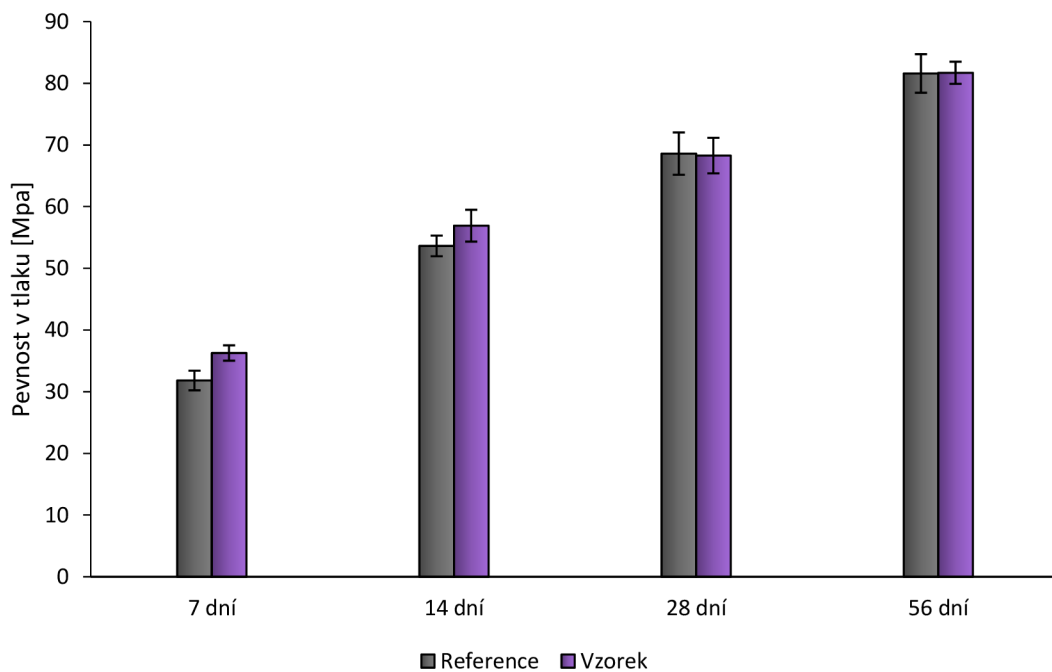
Z grafických závislostí pevnosti na čase (doba zrání) vyplývá, že největších pevností je možné dosáhnout alkalickou aktivací vysokopecní strusky pomocí sodného vodního skla (Graf 3), kdy při této aktivaci bylo dosaženo maximální pevnosti v tlaku 91.92 MPa po 56 dnech u vyztužených vzorků. Oproti tomu systém aktivovaný lithným vodním sklem s čedičovou výztuží dosahoval maximální pevnosti v tlaku o 22 % (zaokrouhleno) menší než u systému aktivovaného sodným vodním sklem viz graf 5. Vysokých pevností dosahovaly také vzorky aktivované pomocí draselného vodního skla (81.70 MPa pevnost v tlaku vyztužených vzorků po 56 dnech).

Nárůst pevnosti v tlaku u vzorků vyztužených čedičovými vlákny byla nejvýraznější u alkalické aktivace vysokopecní strusky sodným a lithným vodním sklem. Při aktivaci lithným vodním sklem bylo dosaženo i dvojnásobných počátečních pevností u vyztužených vzorků v porovnání s referenčními vzorky. U aktivace sodným vodním sklem tento rozdíl v pevnosti nebyl tak výrazný, avšak směrodatný. Čedičová výztuž nehraje významnou roli v AAS

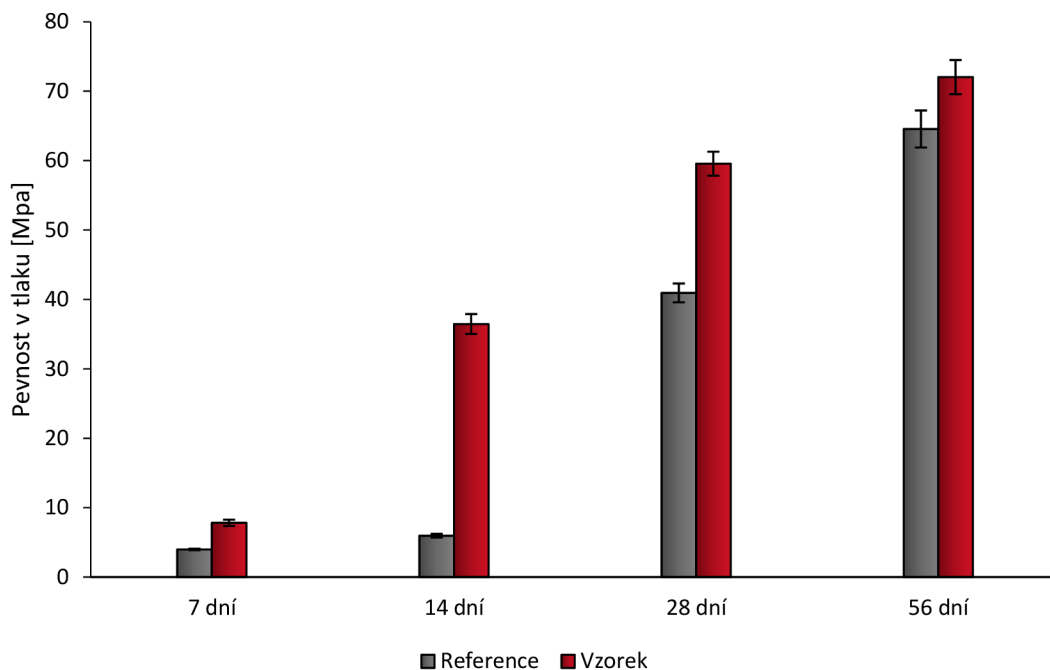
aktivovaného draselným vodním sklem. Zde byly naměřené velmi podobné hodnoty pevnosti u vyztužených a srovnávacích vzorků, viz graf 4.



Graf 3: Závislost pevnosti v tlaku na čase pro AAS aktivovaný pomocí sodného vodního skla



Graf 4: Závislost pevnosti v tlaku pro AAS aktivovaný pomocí draselného vodního skla



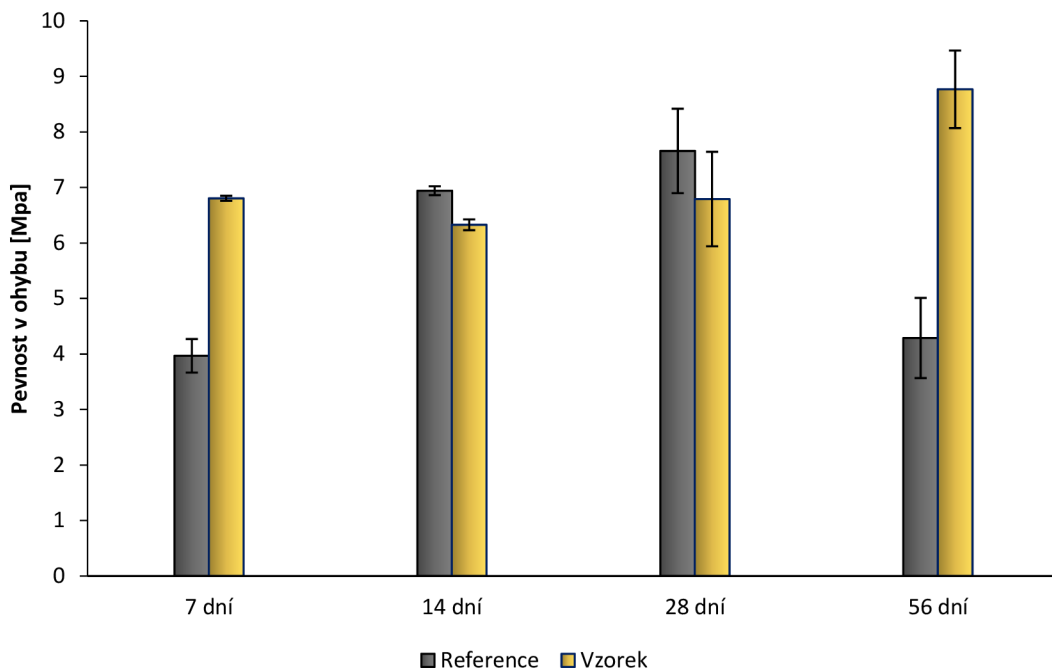
Graf 5: Závislost pevnosti v tlaku na čase pro AAS aktivovaný pomocí lithného vodního skla

Co se týče pevností v ohybu, největších pevností dosahovaly vzorky aktivované sodným vodním sklem, kdy byla naměřena pevnost v ohybu vyztužených vzorků 8.77 MPa po 56 dnech (Graf 6). V porovnání s lithným vodním sklem, se hodnoty pevností velmi blížily, maximální pevnost v ohybu u AAS na bázi lithného vodního skla byla přibližně o 7 % nižší (Graf 8). Vysokých pevností v ohybu dosahovaly i vzorky aktivované draselným vodním sklem, u těchto AAM byla naměřena maximální pevnost v ohybu o 13 % nižší, než při aktivaci sodným vodním sklem (Graf 7).

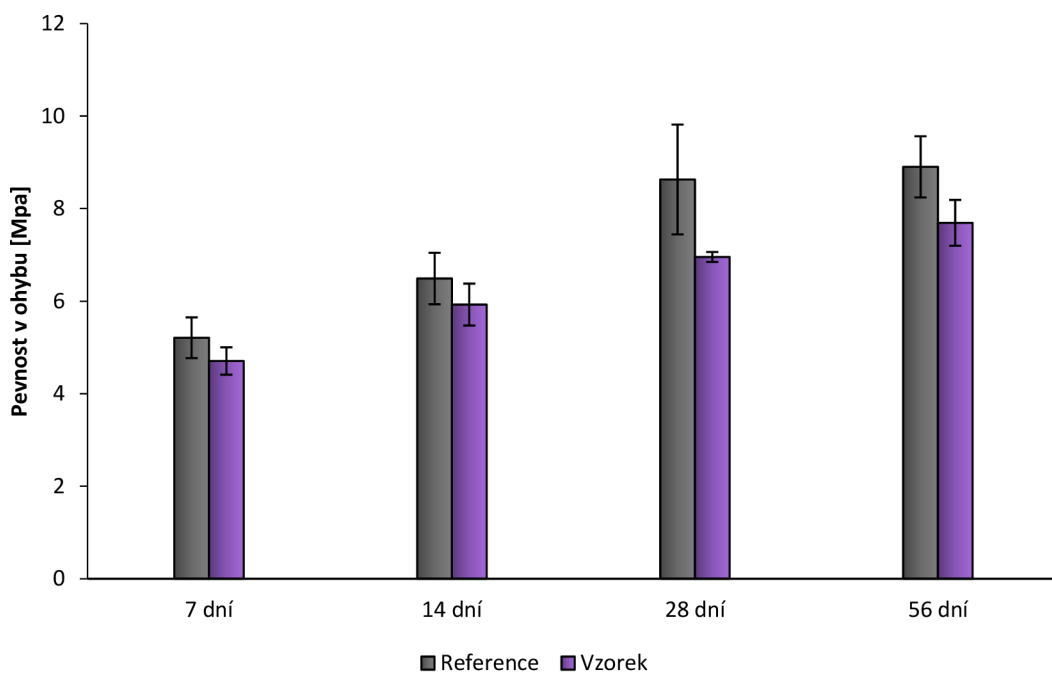
Z hlediska nárůstu pevnosti v ohybu po přidavku výztuže, byly pozorovány signifikantní rozdíly při aktivaci sodným a lithným vodním sklem. U vyztužených vzorků na bázi lithného vodního skla bylo dosaženo výrazných rozdílů v počátečních pevnostech v porovnání s referencí, po 56 dnech však vzorky s čedičovými vlákny a bez nich dosahovaly podobných pevností. Při použití sodného vodního skla na alkalickou aktivaci bylo rovněž dosaženo vyšší počáteční pevnosti u vzorku s výztuží než u reference, avšak po 14 a 28 dnech byly naměřeny srovnatelné pevnosti vyztužených vzorků a referenčních. Maximální pevnost po 56 dnech byla opět významně vyšší než pevnost nevyztuženého vzorku.

Hlavním důvodem, proč docházelo k velkým rozdílům v pevnostech vzorků, je použití vodních skel o různém silikátovém modulu ( $M_s$ ). Pevnost materiálu roste v závislosti na rostoucím silikátovém modulu, což dokazuje také výzkum Krizana a Živanoviče [8]. Největší silikátový modul mělo lithné vodní sklo ( $M_s = 2.63$ ), avšak při použití tohoto aktivátoru nebylo dosaženo největších pevností. Největších pevností bylo dosaženo při aktivaci vysokopeční strusky sodným vodním sklem o  $M_s = 1.83$  a to proto, že použité lithné vodní sklo sice má nejvyšší silikátový modul, avšak z hlediska složení má nejmenší obsah  $\text{SiO}_2$  (Tabulka 7), který způsobuje nižší stupeň polymerizace matrice, naopak sodné vodní sklo má vysoký obsah  $\text{SiO}_2$ , stejně jako draselné vodní sklo. Při srovnání pevností vzorků AAS na bázi sodného a draselného

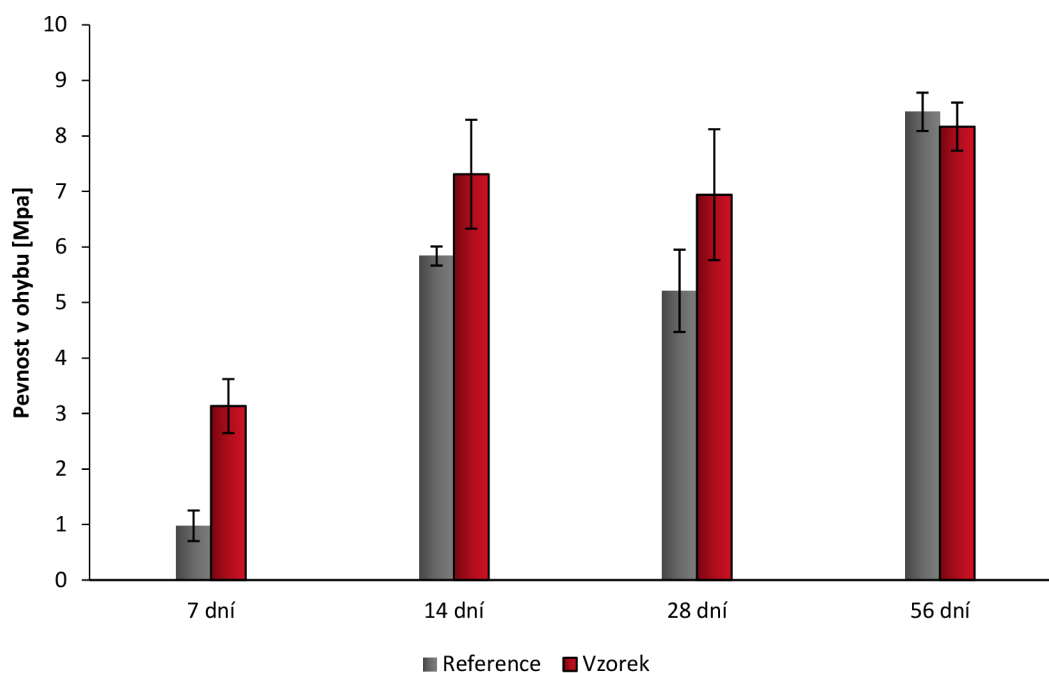
vodního skla je patrná závislost nárůstu pevnosti s rostoucím silikátovým modulem použitého alkalického aktivátoru.



Graf 6: Závislost pevnosti v ohybu na čase pro AAS aktivovaný pomocí sodného vodního skla



Graf 7: Závislost pevnosti v ohybu na čase pro AAS aktivovaný pomocí draselného vodního skla



Graf 8: Závislost pevnosti v ohybu na čase pro AAS aktivovaný pomocí lithného vodního skla

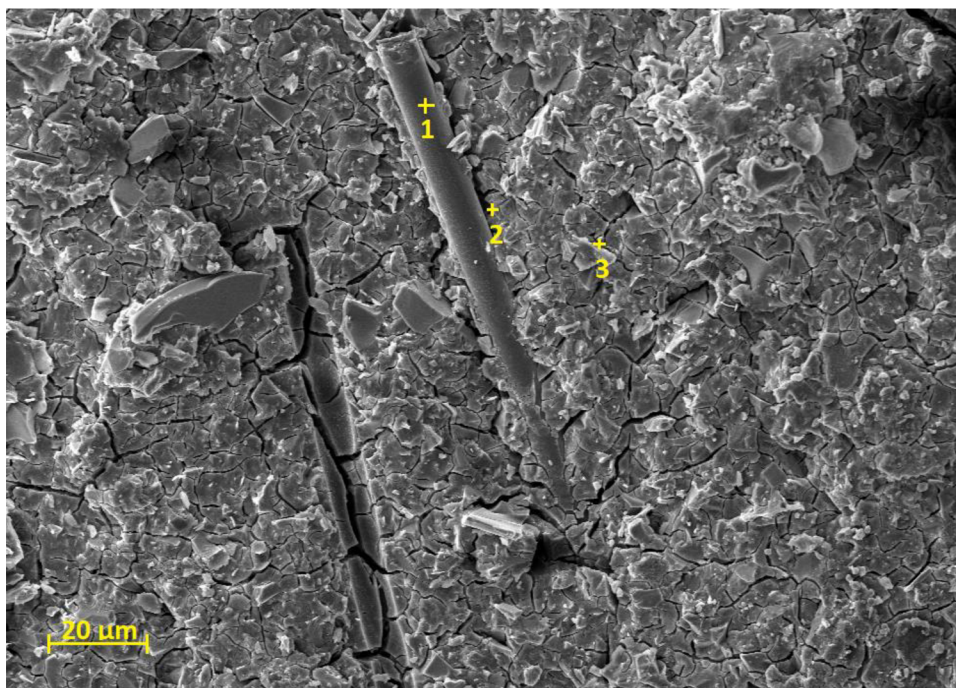
Další faktor ovlivňující pevnost SAP je hustota použitého alkalického roztoku. S rostoucí hustotou roztoku roste také pevnost vzorku. Vyšší hustota způsobuje vyšší počáteční pevnosti, tímto faktem se také ve své práci zabýval Zahrada [38], který pomocí teoretických výpočtů matematického plánování experimentu určil, že s rostoucí hustotou alkalického roztoku roste pevnost SAP. Tento teoretický výpočet koresponduje se získanými hodnotami pevností vzorků. Použité sodné vodní sklo v této práci má největší hustotu a bylo dosaženo největších počátečních i maximálních pevností v tlaku i ohybu, v porovnání s ostatními alkalickými aktivátory. Nesrovnalost v tomto tvrzení představuje fakt, že maximální pevnost v ohybu u vzorku aktivovaného lithným vodním sklem byla nižší než maximální pevnost u vzorku aktivovaného draselným vodním sklem, navzdory tomu, že použité draselné vodní sklo má vyšší hustotu. Jedním z důvodů, proč došlo k tomuto nepředpokládanému výsledku je to, že vyšší hustota roztoku také zhoršuje homogenizaci těsta, čímž může docházet ke vzniku nehomogenních míst ve vzorku, které se poté projeví na nižší pevnosti celého vzorku vlivem výskytu nezreagovaných částí strusky. Toto tvrzení dokládá velikost směrodatných odchylek ze souboru naměřených dat pevností referenčních vzorků.

### 5.3 Mezifázové rozhraní mezi výztuží a maticí

Posledním krokem bylo stanovení mezifázového rozhraní mezi vláknem a maticí pomocí SEM-EDS analýzy, kdy měření (skenování) probíhalo vždy ve třech bodech (Obrázek 9). Tyto body byly vybrány proto, že nejlépe charakterizují změny, které se odehrávají v průběhu dozrávání vzorku.

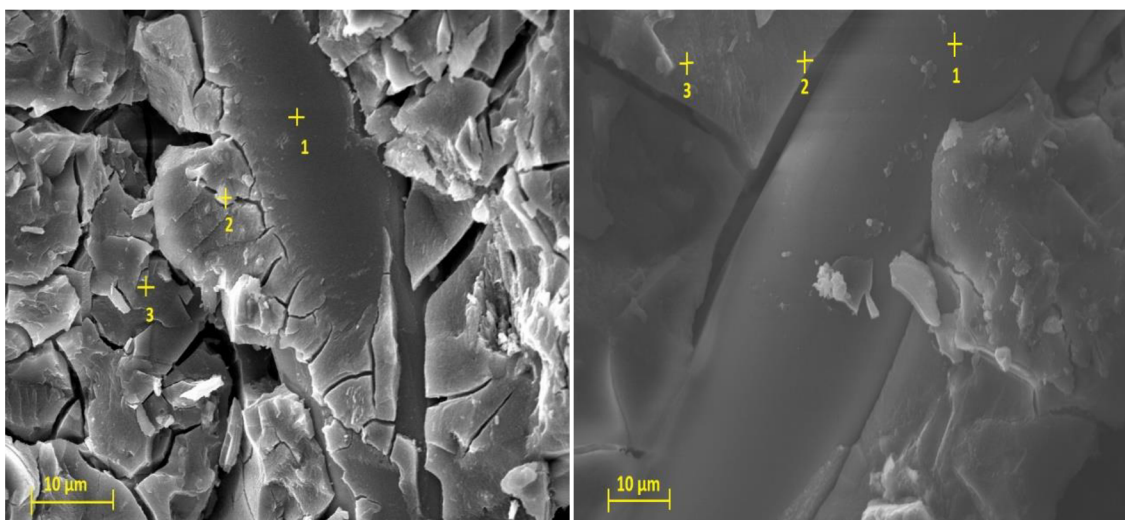
Bod 1 představuje změny, které se odehrávají na vlákně. Bod 2 ukazuje míru interakce vlákna s maticí a bod 3 charakterizuje samotnou matici. V těchto bodech pak byla provedena analýza vyskytujících se atomů. Z atomů Ca, Si, Al a atomu alkalického kovu (K, Na), resp. z jejich atomárních procent byly vypočítány poměry Ca/Si a Al/Ca.





Obrázek 9: AAS aktivovaný pomocí sodného vodního skla s čedičovou výztuží

### 5.3.1 SEM-EDS analýza vzorků aktivovaných sodným vodním sklem



Obrázek 10: SEM-EDS analýza sodné vodní sklo po 7 (vlevo) a 28 dnech (vpravo)

SEM-EDS analýzou na vzorcích aktivovaných sodným vodním sklem (Obrázek 10) po 7 dnech nebyla zjištěna přítomnost uhlíku v daných bodech. Vzorky po 28 dnech vykazují obsah uhlíku ve všech bodech. Z uvedených dat vyplývá, že obsah atomu sodíku v matici klesl, v časovém úseku od 7 do 28 dní, o 20 %. V případě rozhraní vlákno/matrice klesl obsah sodíkových atomů o necelých 15 %.



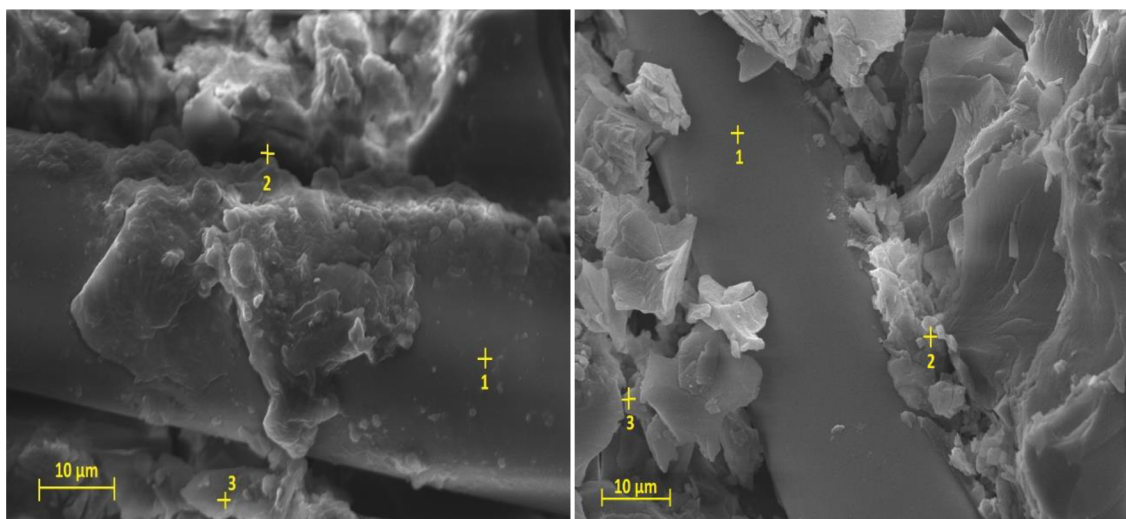
Tabulka 9: Obsah atomů [atom. %] a jejich poměrů v bodech 1, 2, 3

| Atom  | 7 dní |       |       | 28 dní |       |       |
|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|
|       | 1     | 2     | 3     | 1      | 2     | 3     |
| C     | -     | -     | -     | 12.12  | 19.9  | 13.52 |
| O     | 48.82 | 65.14 | 54.8  | 56.24  | 51.39 | 55.96 |
| Na    | 2.74  | 4.19  | 2.35  | 1.56   | 3.58  | 1.88  |
| Mg    | 2.65  | 3.49  | 3.87  | 1.85   | 1.24  | 3.12  |
| Al    | 9.68  | 2.50  | 3.83  | 6.35   | 1.83  | 2.31  |
| Si    | 27.23 | 15.5  | 17.12 | 16.31  | 12.67 | 11.92 |
| Ca    | 5.03  | 9.19  | 18.05 | 2.60   | 9.37  | 11.06 |
| Fe    | 3.81  | -     | -     | 2.10   | -     | -     |
| Ca/Si | 0.18  | 0.59  | 1.05  | 0.16   | 0.74  | 0.93  |
| Al/Ca | 1.93  | 0.27  | 0.21  | 2.44   | 0.20  | 0.21  |

V bodě 1 u vzorku po 7 a 28 dnech byl stanoven vysoký poměr Al/Ca, který však nehraje důležitou roli v posuzování soudržnosti vlákna s matricí, protože měření probíhalo na vlákně, které má vysoký obsah hliníku (Tabulka 8). V bodě 2 a 3 je však poměr rovněž vysoký, což způsobuje větší stupeň polymerace řetězců skrze Al-přemostění. Vzniká CASH gel, který má výrazný vliv na konečnou pevnost materiálu. V tabulce 9 je rovněž uveden poměr Ca/Si, který určuje typ vzniklého CSH gelu v průběhu vytvrzování a udává také míru absorpce vody a kationtů kovů ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Al}^{3+}$  atd.). V bodě 2 a 3 na vzorcích po 7 a 28 dnech tento poměr charakterizuje vznik CSH gelu I typu.

V daných bodech byly stanoveny také atomy jiných prvků (K, Cl, Ti, Mn, S), které jsou považovány za nečistoty, a proto byly ze souboru dat vyjmuty a přepočítány mezi ostatní atomy.

### 5.3.2 SEM-EDS analýza vzorků aktivovaných draselným vodním sklem



Obrázek 11: SEM-EDS analýza draselné vodní sklo po 7 (vlevo) a 28 dnech (vpravo)

Přítomnost uhlíku u těchto vzorků byla stanovena vždy na mezifázovém rozhraní (bod 2) a v matrici ve vzorku po 7 dnech (Tabulka 10).

Při aktivaci draselným vodním sklem (Obrázek 11) klesl obsah draslíku v matrici o 21 % v závislosti na době stáří vzorku a na rozhraní vlákno/matrice množství draslíku vzrostlo o 47 %.

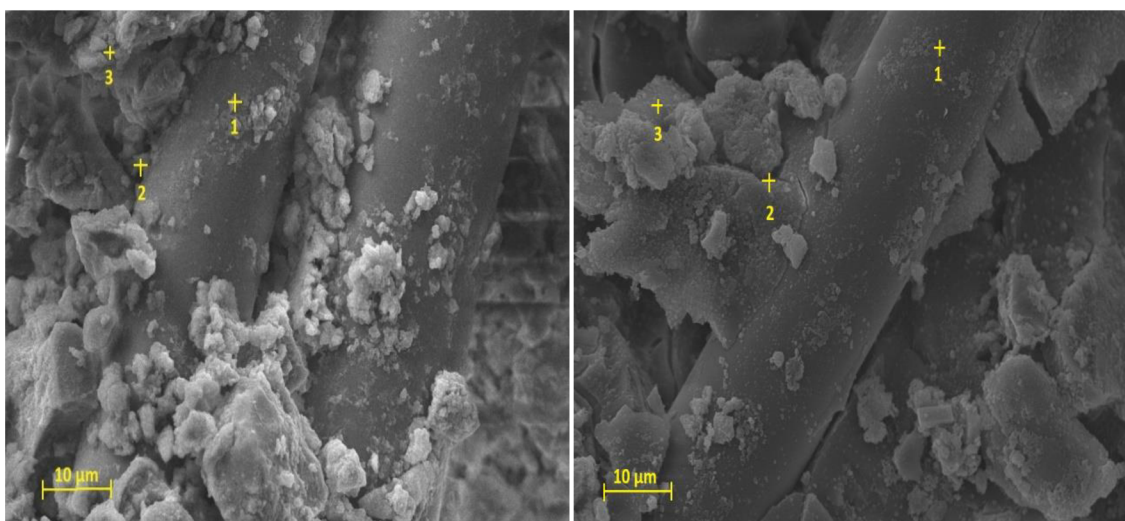
Tabulka 10: Obsah atomů [atom. %] a jejich poměrů v bodech 1, 2, 3

| Atom  | 7 dní |       |       | 28 dní |       |       |
|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|
|       | 1     | 2     | 3     | 1      | 2     | 3     |
| C     | -     | 66.01 | 55.24 | -      | 16.38 | -     |
| O     | 60.09 | 20.37 | 28.82 | 63.23  | 62.57 | 58.85 |
| K     | 0.74  | 0.85  | 2.07  | 0.79   | 1.62  | 1.63  |
| Mg    | 2.25  | 0.58  | 0.65  | 2.42   | 1.44  | 3.45  |
| Al    | 8.02  | 2.27  | 2.21  | 7.90   | 1.39  | 3.13  |
| Si    | 20.83 | 4.98  | 4.36  | 20.21  | 7.73  | 14.8  |
| Ca    | 3.27  | 4.43  | 5.99  | 3.10   | 8.30  | 18.12 |
| Fe    | 2.62  | 0.44  | -     | 2.31   | 0.75  | -     |
| Ca/Si | 0.16  | 0.89  | 1.37  | 0.15   | 1.07  | 1.22  |
| Al/Ca | 2.45  | 0.51  | 0.37  | 2.55   | 0.17  | 0.17  |

Poměr Ca/Si v bodech 2 a 3 u vzorku po 7 a 28 dnech rovněž vykazuje vznik CSH gelu prvního typu. Vysoký poměr Al/Ca v bodech 1 je stejně jako v předchozím případě způsoben přítomností velkého množství hliníku ve vláknu. Z poměrů v bodech 2 a 3 je opět patrná vysoká polymerizace přes Al-můstky.

Nečistoty v tomto vzorku byly F, Mn, Ti, S, Na, které byly přepočítány na atomární procenta ostatních prvků.

### 5.3.3 SEM-EDS analýza vzorků aktivovaných lithným vodním sklem



Obrázek 12: SEM-EDS analýza lithné vodní sklo po 7 (vlevo) a 28 dnech (vpravo)

Ve vzorcích aktivovaných lithným vodním sklem (Obrázek 12) nebylo detekováno žádné množství atomů lithia, a to v žádném bodě měření, neboť lithium je pro SEM-EDS nedetekovatelné. Ve vzorcích byly detekovány pouze atomy sodíku a draslíku. Přítomnost

atomu uhlíku byla stanovena pouze u vzorku po 7 dnech, ve všech bodech měření. Při měření po 28 dnech nebyla zjištěna přítomnost uhlíku v žádném bodě měření viz tabulka 11.

Tabulka 11: Obsah atomů [atom. %] a jejich poměrů v bodech 1, 2, 3

| Atom  | 7 dní |       |       | 28 dní |       |       |
|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|
|       | 1     | 2     | 3     | 1      | 2     | 3     |
| C     | 11.05 | 19.46 | 20.53 | -      | -     | -     |
| O     | 63.37 | 64.18 | 63.93 | 55.71  | 57.92 | 46.42 |
| Na    | 0.51  | 0.57  | 0.35  | 1.91   | 1.11  | 0.36  |
| Mg    | 1.15  | 1.52  | 1.73  | 2.43   | 2.01  | 1.92  |
| Al    | 3.71  | 1.04  | 1.14  | 8.73   | 3.40  | 2.53  |
| Si    | 11.51 | 7.28  | 5.96  | 23.34  | 19.30 | 14.39 |
| K     | 0.98  | 1.14  | 0.43  | 0.87   | 2.57  | 1.95  |
| Ca    | 4.67  | 4.61  | 5.93  | 3.88   | 13.23 | 32.43 |
| Fe    | 3.05  | 0.20  | -     | 3.12   | 0.45  | -     |
| Ca/Si | 0.41  | 0.63  | 0.99  | 0.14   | 0.69  | 2.25  |
| Al/Ca | 0.80  | 0.22  | 0.19  | 2.65   | 0.26  | 0.08  |

Poměr Ca/Si opět ukazuje vznik CSH gelu prvního typu, až na výjimku v bodě 3 ve vzorku po 28 dnech, kdy je tento poměr vyšší jak 1.5, což značí vznik CSH gelu II typu. Jelikož se takto vysoký poměr neopakuje ve více měření, je spíše pravděpodobné, že měření EDS proběhlo v místě s nezreagovanou struskou. Poměr Al/Ca udává vysoký stupeň polymerizace v bodech 2 a 3, jako tomu bylo u předchozích aktivátorů.

Stejně jako v předchozích případech, byly nečistoty přítomné ve vzorcích (Mn, Ti, S) přepočteny na atomární obsah ostatních atomů.

Na celkovou maximální pevnost matrice má vliv vzniklý CSH gel. Z výsledků EDS analýzy vyplývá, že ve všech případech, kromě vzorku s lithným vodním sklem, vznikl CSH(I) gel tobermoritového typu. Poměr Al/Ca, který způsobuje vyšší stupeň polymerizace a konečnou pevnost matrice skrze Al-můstky, byl nejvyšší u vzorku aktivovaného sodným vodním sklem a nejnižší při aktivaci lithným vodním sklem. Z toho vyplývá, čím menší poměr Al/Ca, tím menší pevnost matrice. Toto tvrzení koreluje s výsledky práce Kaliny [39], který se ve své práci zabýval alkalickou aktivací vysokopecní strusky a popílků. Ve své práci však uvádí, že pro alkalickou aktivaci vysokopecní strusky je typická hodnota poměru Al/Ca rovna  $\pm 0.1$ , u mých vzorků byl však poměr až dvakrát větší, což může být způsobeno vysokým obsahem hliníku v použité strusce.

Na mezifázovém rozhraní nebyly pozorovány signifikantní změny v obsahu jednotlivých atomů, tudíž nedocházelo ani k velkým rozdílům v poměrech Al/Ca a Ca/Si, při porovnání s obsahy atomů v samotné matrici. Stejně tak při srovnání obsahu atomů ve vlákne, nedocházelo k výrazným změnám, z čehož plyne, že nedocházelo k výrazným destrukcím a rozpouštění vlákna v matrici. Pouze u vzorku s draselným a lithným vodním sklem byla na mezifázovém rozhraní zjištěna přítomnost železa. Jelikož bylo železo identifikováno pouze v blízkosti vlákna, které obsahuje značné množství atomů železa, lze předpokládat, že došlo k jistým interakcím mezi vláknem a matricí, která může mít vliv na výslednou pevnost kompozitu. Tento předpoklad však příliš nekoreluje se získanými hodnotami pevností, neboť největších pevností bylo dosaženo u vzorku se sodným vodním sklem, ve kterém nebylo

nalezeno železo na mezifázovém rozhraní. Na druhou stranu, u alkalické aktivace lithným vodním sklem bylo dosaženo značných rozdílů pevností v tlaku i ohybu, v porovnání vyztuženého vzorku se vzorkem referenčním, z čehož lze usuzovat, že při této aktivaci byla interakce vlákna s matricí klíčová. Faktem však je, že čedičová vlákna jsou rezistentní vůči působení silného alkalického prostředí, což potvrzuje i výzkum Ganga a kol. [40], kteří podrobovali čedičová vlákna různým korozním prostředím, přičemž silnému alkalickému prostředí velmi dobře odolávali bez zjištění výrazných destrukčních účinků. Další rozdíl je v obsahu atomů uhlíku. U aktivace sodným a lithným vodním sklem byl zjištěn atomární obsah uhlíku ve všech bodech, na vzorku 28 dní pro sodný aktivátor a 7 dní pro lithný aktivátor, do 21 atomárních procent. Tento fakt poukazuje na možnost vzniku uhličitanu (poměr C:O je  $\pm 1:3$ ), avšak u vzorků na bázi draselného vodního skla je atomární obsah uhlíku mnohem větší ( $>50$ ), takto vysoká hodnota značí, že by se mohlo jednat o organický uhlík, z povrchové úpravy vlákna. Vysoký obsah atomů uhlíků stanovený u tohoto vzorku by mohl být způsoben tím, že organická látka, používaná na povrchovou úpravu vláken je nestabilní a rozpouští se pouze při určitém pH a pouze v určitých podmínkách, kterých mohlo být dosaženo, avšak tento předpoklad je potřeba podrobit dalšímu výzkumu.

## 6 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo stanovit vliv vybraných alkalických aktivátorů na vlastnosti alkalicky aktivovaných materiálů vyztužených čedičovými vlákny. V této práci byly použity tři typy alkalických aktivátorů – sodné, draselné a lithné vodní sklo.

V první řadě byl stanoven vliv přídavku čedičové výztuže na mechanické vlastnosti AAM. Mechanické vlastnosti byly zkoumány měřením pevnosti v tahu a pevnosti v ohybu, a to vždy po 7, 14, 28 a 56 dnech od namíchání vzorku. Měření bylo vždy provedeno na třech vzorcích s čedičovou výztuží a třech nevyztužených srovnávacích vzorcích, pro každý časový interval.

Z naměřených hodnot bylo zjištěno, že přídavek 1 hm.% způsobil největší nárůst pevnosti v tlaku u vzorku aktivovaného lithným vodním sklem, v porovnání s pevností referenčního nevyztuženého vzorku. Při alkalické aktivaci lithným vodním sklem byly pozorovány největší rozdíly v pevnostech v tlaku po 7 a 14 dnech. Vzorek po 7 dnech dosahoval o více jak 49 % větších pevností než referenční vzorek a po 14 dnech byl nárůst pevnosti vyšší o 84 % v porovnání s referencí. Po 28 a 56 dnech už nedocházelo k takto strmému nárůstu pevnosti vyztužených vzorků, avšak rozdíly pevností v tlaku vyztužených vzorků byly stále výrazně vyšší než pevnosti srovnávacích vzorků. Pozitivní vliv přídavku čedičové výztuže, na mechanické vlastnosti, byl také pozorován u AAM sodným vodním sklem. Na těchto vzorcích byly naměřeny vždy vyšší hodnoty pevností v tlaku vyztužených vzorků než pevnosti vzorků bez čedičových vláken. Tyto rozdíly však nebyly tak výrazné, jako tomu bylo při použití lithného vodního skla, až na pevnost dosaženou po 56 dnech, kdy byla pevnost v tlaku reference o 34 % menší, jak pevnost materiálu s čedičovými vlákny. Ačkoliv nebyly rozdíly v pevnostech v tlaku natolik výrazné, jako při aktivaci vysokopecní strusky lithným vodním sklem, jsou i přesto tyto rozdíly směrodatné. Aktivací draselným vodním sklem nebyl pozorován pozitivní efekt přídavku čedičových vláken, na mechanické vlastnosti, v žádném bodě měření.

Přídavek 1 hm. % čedičových vláken do AAM měl také pozitivní vliv na zvýšení pevnosti v ohybu, při AA strusky lithným vodním sklem na vzorcích po 7, 14 a 28 dnech. V těchto intervalech byly pozorovány výrazné rozdíly v pevnostech vyztužených a nevyztužených vzorků. Po 56 dnech však došlo k mírnému poklesu pevnosti oproti referenci. Alkalickou aktivací vysokopecní strusky sodným vodním sklem byl zjištěn nárůst pevnosti vzorků s vlákny po 7 a 56 dnech při srovnání s referenčními vzorky. Po 14 a 28 dnech byl zjištěn pokles pevnosti vyztužených vzorků. Přídavek čedičových vláken do AAM draselným vodním sklem způsobil snížení pevnosti v ohybu ve všech bodech měření.

Porovnáním použitých alkalických aktivátorů a maximálních dosažených pevností je patrné, že nejvyšších pevností bylo dosaženo při použití sodného vodního skla. AA sodným vodním sklem bylo dosaženo nejvyšších maximálních pevností v tlaku i ohybu. Nejnižší maximální pevnosti v tlaku bylo dosaženo alkalickou aktivací lithným vodním sklem a nejnižší maximální pevnosti v ohybu bylo dosaženo při použití draselného vodního skla.

Dále byla zkoumána interakce mezi vláknem a matricí po 7 a 28 dnech. SEM-EDS analýzou bylo zjištěno, že nedocházelo k výrazným destrukcím vláken v silném alkalickém prostředí alkalicky aktivovaného materiálu, protože nedocházelo k výrazným změnám atomového složení vláken. Na vlákně a na rozhraní vlákno/matrice byl pozorován pouze rozdílný obsah atomu uhlíku a železa. V alkalickém prostředí sodného vodního skla a lithného vodního skla, bylo na vlákně naměřeno množství uhlíku do 20 atom. %. U aktivace draselným

vodním sklem byl tento obsah po 7 dnech až dvakrát větší. Přítomnost železa byla stanovena na mezifázovém rozhraní pouze u vzorku s draselným a lithným vodním sklem po 7 i 28 dnech, přičemž došlo ke zvýšení atomárního obsahu v závislosti na čase. Z tohoto atomárního nárustu vyplývá, že vlákna při použití těchto aktivátorů podléhala nepatrnému rozpouštění. Naměřené pevnosti AAM draselným a sodným vodním sklem však poukazují na to, že přítomnost železa v bezprostřední blízkosti vlákna není explicitním důkazem vytvoření mezifázového rozhraní, které by mělo vliv na soudržnost vlákna s matricí a na celkovou pevnost kompozitu.

## 7 LITERATURA

- [1] WORRELL, E, L PRICE, N MARTIN, C HENDRIKS, L MEIDA a E WORRELL. Carbon Dioxide Emissions from the Global Cement Industry. *Annual Review of Energy and the Environment* [online]. 2001, **26**, 303-329 [cit. 2019-05-15]. ISSN 1056-3466.
- [2] CHENG, T.W. a J.P. CHIU. Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag. *Minerals Engineering*. 2003, **16**(3), 205-210. DOI: 10.1016/S0892-6875(03)00008-6. ISSN 08926875.
- [3] DEB, Partha Sarathi, Pradip NATH a Prabir Kumar SARKER. *The effects of ground granulated blast-furnace slag blending with fly ash and activator content on the workability and strength properties of geopolymer concrete cured at ambient temperature*. 2014, **62**, 32-39. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.05.001. ISSN 02613069.
- [4] BERNAL, Susan A., Ruby MEJÍA DE GUTIÉRREZ a John L. PROVIS. Engineering and durability properties of concretes based on alkali-activated granulated blast furnace slag/metakaolin blends. *Construction and Building Materials*. 2012, **33**, 99-108. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.01.017. ISSN 09500618.
- [5] PROVIS, John L. Alkali-activated materials. *Cement and Concrete Research*. 2018, **114**, 40-48. DOI: 10.1016/j.cemconres.2017.02.009. ISSN 00088846.
- [6] Glukhovskiy VD, Rostovskaja GS, Rumyna GV. *High strength slag alkaline cements*. In: *Proceedings of the seventh international congress on the chemistry of cement, vol. 3; 1980*. p. 164-8.
- [7] PALOMO, A., P. KRIVENKO, I. GARCIA-LODEIRO, E. KAVALEROVA, O. MALTSEVA a A. FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ. A review on alkaline activation: new analytical perspectives. *Materiales de Construcción*. 2014, **64**(315). DOI: 10.3989/mc.2014.00314. ISSN 1988-3226.
- [8] Darko Krizan, Branislav Zivanovic *Effects of dosage and modulus of water glass on early hydration of alkali-slag cements* *Cement Concrete Res*, 32 (2002), pp. 1181-1188.
- [9] PACHECO-TORGAL, Fernando, João CASTRO-GOMES a Said JALALI. Alkali-activated binders: A review. *Construction and Building Materials*. 2008, **22**(7), 1305-1314. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2007.10.015. ISSN 09500618.
- [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*. 2010, **40**(9), 1341-1349. DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.03.020. ISSN 00088846.
- [11] Shao-Dong Wang, Karen Scrivener *Hydration products of alkali activated slag cement* *Cement Concrete Res*, 25 (1995), pp. 561-571.
- [12] A.R. Brough, A. Katz, T. Bakharev, G. Sun, R. Kirkpatrick, L. Struble, et al. *Microstructural aspects of zeolite formation in alkali activated cements containing high level of flyash* *Mater Res Soc Proc*, 370 (1996), pp. 199-208.
- [13] P.M. Gifford, J.E. Gillot *Alkali-silica reactions (ASR) and alkali-carbonate reaction (ACR) in activated blast furnace slag cement (ABFSC) concrete* *Cement Concrete Res*, 26 (1996), pp. 21-26.
- [14] *Alkali-activated cements and concretes*. New York, 2006, s. 82-105. ISBN 978-0-415-70004-7.
- [15] PROVIS, John L. a Susan A. BERNAL. Geopolymers and Related Alkali-Activated Materials. *Annual Review of Materials Research*. 2014, **44**(1), 299-327. DOI: 10.1146/annurev-matsci-070813-113515. ISSN 1531-7331.



- [16] CHOTĚBORSKÝ, Rostislav. *Nauka o materiálu*. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2011. ISBN 978-80-213-2236-3.
- [17] WANG, Hui, Su Ping CUI a Xiao Long SHANG. Optimization Chemical Composition of the Blast Furnace Slag with Uniform Design. *Materials Science Forum*. 2013, **743-744**, 210-215. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.743-744.210. ISSN 1662-9752.
- [18] BOHÁČOVÁ, Jana, Stanislav STANĚK a Martin VAVRO. MOŽNOSTI APLIKACE ALKALICKY AKTIVOVANÝCH SYSTÉMŮ VE STAVEBNICTVÍ. In: *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava*. Technická univerzita Ostrava: Vysoká škola báňská, 2012, s. 51-56. ISSN 1213-1962.
- [19] TORRES-CARRASCO, Manuel, Carlos RODRÍGUEZ-PUERTAS, María del Mar ALONSO a Francisca PUERTAS. Alkali activated slag cements using waste glass as alternative activators. Rheological behaviour. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*. 2015, **54**(2), 45-57. DOI: 10.1016/j.bsecv.2015.03.004. ISSN 03663175.
- [20] BERTOLINI, Luca. *Steel corrosion and service life of reinforced concrete structures. Structure and Infrastructure Engineering*. 2008, **4**(2), 123-137. DOI: 10.1080/15732470601155490. ISSN 1573-2479.
- [21] JALASUTRAM, Sruthi, Dipti Ranjan SAHOO a Vasant MATSAGAR. Experimental investigation of the mechanical properties of basalt fiber-reinforced concrete. *Structural Concrete*. 2017, **18**(2), 292-302. DOI: 10.1002/suco.201500216. ISSN 14644177.
- [22] BRANSTON, John, Sreekanta DAS, Sara Y. KENNO a Craig TAYLOR. Mechanical behaviour of basalt fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*. 2016, **124**, 878-886. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.009. ISSN 09500618.
- [23] A Short Review on Basalt Fiber. *International Journal of Textile Science*. 2012, **1**(4), 19-28. DOI: 10.5923/j.textile.20120104.02.
- [24] DEÁK, Tamás a Tibor CZIGÁNY. Chemical Composition and Mechanical Properties of Basalt and Glass Fibers: A Comparison. *Textile Research Journal*. 2009, **79**(7), 645-651. DOI: 10.1177/0040517508095597. ISSN 0040-5175.
- [25] WANG MINGCHAO, ZHANG ZUOGUANG, LI YUBIN, LI MIN a SUN ZHIJIE. *Chemical Durability and Mechanical Properties of Alkali-proof Basalt Fiber and its Reinforced Epoxy Composites. Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2008, **27**(4), 393-407. DOI: 10.1177/0731684407084119. ISSN 0731-6844.
- [26] WELTER, M., M. SCHMÜCKER, MACKENZIE K. J. D. Evolution of the Fibre-Matrix Interactions in Basalt-Fibre-Reinforced Geopolymer-Matrix Composites after Heating. *Journal of Ceramic Science and Technology*. 2015, **06**(01), 17-24. DOI: 10.4416/JCST2014-00034.
- [27] SIM, Jongsung, Cheolwoo PARK a Do Young MOON. Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures. *Composites Part B: Engineering*. 2005, **36**(6-7), 504-512. DOI: 10.1016/j.compositesb.2005.02.002. ISSN 13598368.
- [28] FUNKE, Henrik, Sandra GELBRICH a Lothar KROLL. The Durability and Performance of Short Fibers for a Newly Developed Alkali-Activated Binder. *Fibers*. 2016, **4**(4). DOI: 10.3390/fib4010011. ISSN 2079-6439.
- [29] WEI, Bin, Hailin CAO a Shenhua SONG. *Tensile behavior contrast of basalt and glass fibers after chemical treatment*. 2010, **31**(9), 4244-4250. DOI: 10.1016/j.matdes.2010.04.009. ISSN 02613069.



- [30] LEE, Jung Jin, Jiyeon SONG a Hodong KIM. Chemical stability of basalt fiber in alkaline solution. *Fibers and Polymers*. 2014, **15**(11), 2329-2334. DOI: 10.1007/s12221-014-2329-7. ISSN 1229-9197.
- [31] PROVIS, John L. a Jan Stephanus Jakob VAN DEVENTER. *Geopolymers: structure, processing, properties and industrial applications*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2009. Woodhead Publishing in materials. ISBN 978-184-5694-494.
- [32] DIAS, Dylmar Penteado a Clelio THAUMATURGO. Fracture toughness of geopolymeric concretes reinforced with basalt fibers. *Cement and Concrete Composites*. 2005, **27**(1), 49-54. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2004.02.044. ISSN 09589465.
- [33] MASI, Giulia, William D.A. RICKARD, Maria Chiara BIGNOZZI a Arie VAN RIESSEN. The effect of organic and inorganic fibres on the mechanical and thermal properties of aluminate activated geopolymers. *Composites Part B: Engineering*. 2015, **76**, 218-228. DOI: 10.1016/j.compositesb.2015.02.023. ISSN 13598368.
- [34] LI, Weimin a Jinyu XU. Mechanical properties of basalt fiber reinforced geopolymeric concrete under impact loading. *Materials Science and Engineering: A*. 2009, **505**(1-2), 178-186. DOI: 10.1016/j.msea.2008.11.063. ISSN 09215093.
- [35] LI, Weimin a Jinyu XU. Impact characterization of basalt fiber reinforced geopolymeric concrete using a 100-mm-diameter split Hopkinson pressure bar. *Materials Science and Engineering: A*. 2009, **513-514**, 145-153. DOI: 10.1016/j.msea.2009.02.033. ISSN 09215093.
- [36] HRUBÝ, Petr. *Využití čedičových vláken v alkalicky aktivovaných materiálech*. Purkyňova 464/118, 612 00 Brno-Medlánky, 2018. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická.
- [37] WASSERBAUER, Jaromír, Jakub TKACZ a Matěj BŘEZINA. *Praktikum z kovových materiálů: soubor návodů pro laboratorní cvičení ze zkušebních metod pro charakterizaci kovových materiálů - oceli, mosazi, hliníkových a jiných slitin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2017. ISBN 978-80-214-5463-7.
- [38] ZAHRADA, Jiří. *Návrh složení struskoalkalických betonů*. Brno, 1985. Kandidátská dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. Vedoucí práce Prof. Ing. František Příbyl, CSc.
- [39] KALINA, Lukáš. *SYNTÉZA ALUMINOSILIKÁTOVÝCH SYSTÉMŮ NA BÁZI GEOPOLYMERŮ ORIENTOVANÁ NA VYUŽÍVÁNÍ SEKUNDÁRNÍCH SUROVIN*. Brno, 2011. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta Chemická.
- [40] WU, Gang, Xin WANG, Zhishen WU, Zhiqiang DONG a Guangchao ZHANG. Durability of basalt fibers and composites in corrosive environments. *Journal of Composite Materials*. 2014, **49**(7), 873-887. DOI: 10.1177/0021998314526628. ISSN 0021-9983.

## 8 SEZNAM ZKRATEK

|       |   |
|-------|---|
| SAP   | Strusko-alkalická pojiva  |
| AA    | Alkalická aktivace  |
| AAS   | Alkalicky aktivovaný systém                                       |
| SEM   | „Scanning electron microscope“ - Rastrovací elektronový mikroskop |
| $M_s$ | Silikátový modul  |
| CSH   | Vápník-křemík-hydrát  |
| CASH  | Vápník-hliník-křemík-hydrát                                       |
| VS    | Vysokopecní struska   |
| SB    | „Short basalt“ – Čedičové krátké vlákno                           |
| CB    | „Continous basalt“ – Dlouhé čedičové vlákno                       |
| AAM   | Alkalicky aktivovaný materiál                                     |
| RTG   | Rentgenové záření   |
| AE    | Augerovy elektrony  |
| SE    | Sekundární elektrony  |
| BSE   | „Back scattered electron“ – Zpětně odražené elektrony             |
| WD    | „Working distance“ – Pracovní vzdálenost                          |
| EDS   | Energiodisperzní spektroskopie                                    |