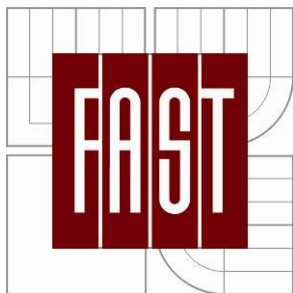


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ  
ÚSTAV CHEMIE  
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF CHEMISTRY

# GEOPOLYMERY NA BÁZI ELEKTRÁRENSKÝCH POPÍLKŮ A CIHELNÉHO STŘEPU

GEOPOLYMERS BASED ON FLY ASHES AND BRICK BODY

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE  
DOCTORAL THESIS

VĚDNÍ OBOR

3911V006 FYZIKÁLNÍ A STAVEBNĚ  
MATERIÁLOVÉ INŽENÝRSTVÍ

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Ing. Bohuslav Řezník

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

prof. RNDr. Pavla Rovnaníková, CSc.

BRNO 2014

---

## **Klíčová slova**

Geopolymer, alkalická aktivace, aktivátor, popílek, metakaolin, cihelný stěp, pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu, mikrostruktura, trvanlivost, agresivní prostředí.

## **Key words**

Geopolymer, alkali activation, activator, fly ash, metakaoline, brick body, compressive strength, tensile strength, microstructure, durability, aggressive environment.

## **Název pracoviště**

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav chemie

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>ZÁKLADY TECHNOLOGIE ALKALICKÉ AKTIVACE</b>                              | <b>5</b>  |
|          | <b>ALUMINOSILIKÁTŮ</b>   | <b>5</b>  |
| 1.1      | Geopolymery – alkalicky aktivované aluminosilikáty                         | 5         |
| 1.2      | Geopolymerace  | 6         |
| 1.3      | Suroviny vhodné pro alkalickou aktivaci (přípravu geopolymerů)             | 6         |
| 1.4      | Alkalické roztoky - aktivátory   | 7         |
| 1.5      | Geopolymery na bázi odpadních surovin a jejich vlastnosti                  | 7         |
| 1.5.1    | Využití popílku v geopolymerech  | 7         |
| <b>2</b> | <b>CÍL PRÁCE</b>   | <b>8</b>  |
| <b>3</b> | <b>METODIKA PRÁCE</b>  | <b>8</b>  |
|          | Schéma I. Etapy disertační práce   | 9         |
|          | Schéma II. Etapy disertační práce  | 10        |
|          | Schéma III. etapy disertační práce   | 11        |
|          | Schéma IV. etapy disertační práce  | 12        |
|          | Schéma V. etapy disertační práce   | 13        |
| <b>4</b> | <b>SHRUTÍ CHARAKTERIZACE SUROVIN</b>                                       | <b>13</b> |
| <b>5</b> | <b>ALKALICKÁ AKTIVACE POPÍLKU</b>  | <b>14</b> |
| 5.1      | Shrnutí výsledků aktivace popílku Chvaletice                               | 15        |
| 5.2      | Mikrostruktura popílkových geopolymerů                                     | 17        |
| 5.3      | Stanovení hodnot lomově-mechanických vlastností popílkových geopolymerů CH | 19        |
| 5.4      | Vliv působení agresivního prostředí na popílkové geopolymery               | 20        |
| <b>6</b> | <b>ALKALICKÁ AKTIVACE CIHELNÝCH STŘEPŮ</b>                                 | <b>22</b> |
| <b>7</b> | <b>DISKUSE VÝSLEDKŮ</b>  | <b>23</b> |
| <b>8</b> | <b>ZÁVĚR</b>   | <b>26</b> |
| <b>9</b> | <b>SEZNAM CITOVANÉ LITERATURY</b>  | <b>27</b> |
|          | <b>Curriculum vitae</b>  | <b>29</b> |

## ÚVOD

Trendem současné doby je neustále se zvyšující životní úroveň, a ta s sebou přináší i problémy související zejména se zvýšenou spotřebou primárních zdrojů a s tím související produkcí velkého množství odpadů. Nezbytnou součástí dnešní doby je také výzkum a vývoj nových materiálů, pro jejichž výrobu je možné použít vedlejších produktů. Tím se stávají surovinou a v mnoha případech s sebou přináší nejen ekologické, ale i ekonomické výhody. Ekologickým přínosem je spotřeba vedlejšího produktu a zároveň úspora primárních zdrojů, které je nutné zachovat pro budoucí generace. Ekonomickým přínosem je nižší cena výrobku oproti primární surovině. Významnou skupinou vedlejších produktů, jež jsou produkovány ve velkém množství nejen u nás, ale i ve světě jsou ty, které vznikají při výrobě elektrické energie. Jedná se zejména o popílky, které vznikají spalováním tuhých paliv v tepelných elektrárnách. Otázkou využití těchto popílků se naše společnost zabývá již řadu let a popílky již našly mnoho výhodných uplatnění. Nejvíce je popílek využíván jako příměs do betonu, pórobetonu, v keramice, pro stabilizaci zemin v krajině, při výrobě cementu aj. I přes mnoho výhodných aplikací popílku, je jeho část stále nevyužívána a ukládána na skládky, kde čeká na své případné využití. Skládkování je nejméně vhodná varianta, jak s popílkem nakládat. Je proto nutné nacházet stále nové možnosti jeho využití. Jednou z nových možností recyklace je výroba alkalicky aktivovaných materiálů, při jejichž výrobě lze tyto popílky uplatnit.

Alkalicky aktivované materiály, někdy nazývané geopolymery, jsou známé již mnoho let. Vznikají alkalickou aktivací aluminosilikátových látek v silně zásaditém prostředí a díky svým mechanickým vlastnostem jsou to materiály s velkým potenciálem a širokým rozsahem použití. Vznikají tzv. geopolymery, která probíhá během chemické reakce aluminosilikátů s křemičitany, uhličitany nebo hydroxidy alkalických kovů. Při tomto procesu se vytváří pevná struktura, avšak reakce vedoucí ke vzniku této struktury je odlišná od procesů tuhnutí a tvrdnutí cementových pojiv.

V případě nalezení optimálních podmínek alkalické aktivace vzhledem k použité vstupní surovině, je možné vyrobit pojivo, kde popílek není pouze částečnou náhradou základní suroviny, jako je tomu např. u směsných cementů, ale je základní surovinou tvořící toto pojivo.

Je zřejmé, že hovořit o úplné náhradě cementového pojiva pojivem vyrobeným alkalickou aktivací popílku je hodně nadsazené. Alkalická aktivace a výroba geopolymérů z popílku je však jednou z možností, která umožňuje využití popílku právě díky jeho specifickým vlastnostem a vzhledem k současnému množství spotřebovaného popílku, je to velmi zajímavá a diskutovaná možnost pro jeho využití ve velkých objemech.

Podobně jako popílky lze využívat pro alkalickou aktivaci také další odpady na bázi aluminosilikátů. Jedná se např. o pálené jíly (keramiku), které svojí podstatou mohou poskytnout zdroj aluminosilikátů, které budou se silně zásaditými látkami vytvářet pevnou hmotu a budou pojivem kompozitních materiálů.

# 1 ZÁKLADY TECHNOLOGIE ALKALICKÉ AKTIVACE ALUMINOSILIKÁTŮ

První zmínka alkalické aktivace v pojivových systémech je datována do roku 1930. V tomto roce Khul zkoumal tuhnutí směsi mleté granulované strusky s roztokem hydroxidu draselného a později také uhličitanu draselného [1]. V dalších letech navázal na tuto práci Chassevent [2] a také Purdon 1940 [3], který ve své práci zkoumal vysokopecní granulovanou strusku aktivovanou hydroxidem sodným a svou studií výrazně přispěl k vývoji alkalicky aktivovaných pojiv. Od 50. let minulého století se problematice alkalické aktivace věnoval podrobně prof. Glukovsky, který poprvé popsal možnost využití pojiv na bázi aluminosilikátů s nízkým obsahem vápníku (jílů) a roztoků sloučenin alkalických kovů. Tyto materiály pojmenoval „gruntocementy“ [4,5], které byly dokonce prakticky využívány ve stavebnictví v zemích bývalého Sovětského svazu. Od té doby bylo provedeno mnoho rozsáhlých vědeckých studií, jež stanovily trendy pro přípravu a průmyslovou aplikaci alkalicky aktivovaných pojiv a kompozitů z nich připravených, zejména pak vysoceužitných anebo environmentálně udržitelných alternativních pojiv k portlandskému cementu [6,7].

Během posledních přibližně patnácti let došlo k velkému rozvoji studia těchto materiálů na vědeckých pracovištích po celém světě. Mezi nejvýznamnější osobnosti zabývající se výzkumem geopolymérů patří prof. van Deventer z Austrálie, který se věnuje především studiu geopolymérů na bázi elektrárenských popílků pro přípravu kompozitů jako ekologičtější náhrady betonů z portlandského cementu [8-11]. Ve Španělsku se řadu let intenzivně věnují alkalické aktivaci aluminosilikátů Palomo a Puertas, jejich práce jsou zaměřeny zejména na mikrostrukturu, ale také na trvanlivost a degrační procesy těchto pojiv [13-16].

Také v ČR se tomuto tématu věnovala a věnuje značná pozornost, kdy průkopníkem v této oblasti byl prof. Brandštetr, který se zabýval vývojem a využitím alkalicky aktivovaných struskových pojiv (AAS pojiv). Od konce 90. let se tématice geopolymérů věnuje také doc. Škvára z VŠCHT v Praze [17,18], vysokoteplotnímu chování těchto pojiv se věnuje doc. Rovnaník [20].

## 1.1 Geopolymery – alkalicky aktivované aluminosilikáty

Pojem „geopolymer“ zavedl prof. Davidovits v 70. letech minulého století, který nazval a popsal alkalicky aktivované aluminosilikátové materiály, složení typu „polysialate“ a jeho varianty [7,21,22], které jsou někdy užívány v obecném popisu geopolymerních pojiv.

Geopolymery patří do skupiny minerálních pojiv blízké příbuzných přírodním zeolitům. Jejich struktury jsou složeny z polymerních Si-O-Al sítí podobné těm objevujícím se právě v zeolitech. Hlavním rozdílem je, že geopolymerní struktury jsou rentgenoamorfni a přesná podstata jejich amorfního charakteru není dodnes zcela objasněna.

Geopolymery vytvářejí nepřehlédnutelnou pozornost v mnoha oblastech díky jejich charakteristickým vlastnostem. Ať již se jedná o vysokoteplotní materiály díky jejich výjimečné teplotní stabilitě a schopnosti plnit jak funkci pojiva v kompozitech např. s uhlíkovými vlákny [23], tak je možné je použít i jako plnivo v systémech na bázi epoxidů [24]. Dlouhodobá chemická odolnost geopolymérů vytváří další velmi zajímavou možnost

jejich použití, a to v oblasti imobilizace toxických a radioaktivních odpadů, které se věnovalo několik zahraničních studií [25]. Geopolymerní materiály jsou atraktivní také díky svým vynikajícím mechanickým vlastnostem, trvanlivosti a odolnosti proti působení agresivního prostředí [26].

## 1.2 Geopolymerace

Geopolymerace je v podstatě jiný název pro alkalickou aktivaci materiálů s pucolánovými vlastnostmi. Geopolymerace je reakce aluminosilikátového materiálů v kontaktu s alkalickým roztokem s vysokou koncentrací  $\text{OH}^-$  iontů ( $\text{pH} > 12$ ). Počáteční tvorba geopolymery spojená s rozpouštěním aluminosilikátu v silně zásaditém prostředí je v podstatě alkalickou hydrolyzou sloučenin s kyslíkovými můstky mezi jednotlivými polyedry Si a Al, přičemž dochází k uvolňování  $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$ ,  $[\text{SiO}(\text{OH})_3]^-$  a  $[\text{SiO}_2(\text{OH})_2]^{2-}$  iontů.

Jelikož je rozpuštění amorfních aluminosilikátů poměrně velmi rychlé, dochází k rychlému vytvoření přesyceného aluminosilikátového roztoku obsahujícího monomerní složky  $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$ ,  $[\text{SiO}(\text{OH})_3]^-$  a  $[\text{SiO}_2(\text{OH})_2]^{2-}$ , které mezi sebou kondenzují a v roztoku vytvářejí aluminosilikátový gel formovaný kopolymerací jednotlivých monomerních křemičitých a hlinitých částic a dochází tvorbě nových aluminosilikátových intermediátů jejichž struktura je závislá na celkovém poměru atomů Si:Al.

Geopolymery jsou svým chemickým složením podobné zeolitům, ale vykazují amorfni mikrostrukturu. Tvoří se kopolymerací jednotlivých hliníkových a křemíkových atomů, které pocházejí z rozpuštění složek hliníku a křemíku obsažených ve výchozím materiálu při vysokém pH za přítomnosti rozpuštěných křemičitanů alkalického kovu. Geopolymerace zahrnuje chemické reakce mezi hlinitokřemičitany ( $\text{Al}^{3+}$  v koordinaci IV-V) a křemičitany, v silně zásaditých podmínkách, vytvářející polymerní Si-O-Al-O vazby. Fáze geopolymerního pojiva bývá často popisována jako amorfni, avšak mnoho autorů popisuje tvořící se fáze jako semikrystalické nebo polykrystalické [15, 19, 21], obzvláště u produktů vznikajících při vyšších teplotách [22]. Nicméně, fyzikálně-chemická podstata těchto fází byla zřídka podrobena detailním analýzám a je velmi obtížné ji stanovit z důvodu komplikovanosti vnitřní podstaty pojivových fází a přítomnosti značného množství nezreagované vstupní suroviny.

## 1.3 Suroviny vhodné pro alkalickou aktivaci

Vzhledem k předpokladu alkalické aktivace materiálů obsahujících Si a Al, je možné pro přípravu geopolymery potenciálně použít širokou škálu výchozích surovin, a to přírodních, uměle vyrobených, ale i odpadních materiálů z různých průmyslových odvětví s významnými pucolánovými nebo latentně hydraulickými vlastnostmi. V současné době po celém světě probíhají výzkumy zaměřené na využití surovin potenciálně vhodných pro přípravu geopolymery. Patří sem vysokopecní strusky, elektrárenské popílky z vysokoteplotního spalování uhlí, fluidní popílky, dále různé typy popelů s vysokým obsahem amorfni aluminátové fáze (popílky ze spalování biomasy), jíly, kaoliny, metakaolin, a další řada přírodních pucolánů (tufy, tufity, křemelina, diatomit a další). Geopolymery mohou vznikat alkalickou aktivací v normálních podmínkách nebo za zvýšené teploty [8,15],

z pálených jíílů [21,26], vyvřelých aluminosilikátů [38], přírodních minerálů [11], nebo směsí dvou a více těchto výchozích materiálů [27,28], stejně tak jako vysokoteplotních popíků [15,19,21], vysokopecní strusky [5] a dalších odpadních materiálů. Aktivace je dosažena přidávkem vysoce koncentrovaného hydroxidu alkalického kovu nebo roztoku alkalického křemičitanu s vhodným silikátovým modulem. Pro zlepšení požadovaných vlastností, včetně pevnosti a objemové hmotnosti, mohou být použity jemnozrnné materiály včetně běžných kameniv do betonu [21]. Nicméně charakterizovat strukturu zejména odpadních materiálů, stejně tak jako geopolymérů z nich vyrobených je obecně poměrně komplikované, díky vysoké proměnlivosti těchto systémů, vzhledem k proměnlivému složení těchto surovin.

Pro alkalickou aktivaci jsou obecně vhodné pucolány. Pucolány lze definovat v souladu s ASTM C 618 [29] jako křemičité nebo hlinito-křemičité látky, které samy o sobě nemají žádnou vazebnou schopnost, ale v rozmělněném stavu za přítomnosti vody reagují s hydroxidem vápenatým za běžných teplot za vzniku sloučenin, které tuhnou, tvrdnou a jsou stálé na vzduchu i pod vodou [30].

## 1.4 Alkalické roztoky - aktivátory

Na alkalickou aktivaci aluminosilikátových materiálů je obecně možné použít zásaditě reagující látky, jako jsou alkalické hydroxidy, nebo některé soli alkalických kovů – alkalické uhličitany či křemičitany (např. vodní sklo sodné nebo draselné).

Nejvíce používanými aktivátory jsou komerční snadno dostupné látky. Jedná se zejména o sodné aktivátory jako je hydroxid sodný, uhličitan sodný a křemičitan sodný. Stejně tak mohou být použity draselné aktivátory, především hydroxid a křemičitan draselný. Poměrně často jsou pro aktivaci využívány kombinace hydroxidu sodného nebo hydroxidu draselného a vodního skla, jehož působením na výsledné vlastnosti vzniklých geopolymerních materiálů se zabývalo mnoho zahraničních studií [3,11-13,16,19].

## 1.5 Geopolymery na bázi odpadních surovin a jejich vlastnosti

Centrem zájmu současného zkoumání jsou geopolymerní materiály vyrobené z vedlejších produktů, kdy jejich trvanlivost, pevnost, odolnost proti ohni mnohdy překonávají tradiční materiály používané ve stavebním průmyslu.

### 1.5.1 Využití popílku v geopolymerech

Vývoj techniky pro zpracování a výrobu geopolymérů, která umožňuje kontrolovat složité a náročné reologické vlastnosti popílkových geopolymerních past, malt a betonů dává možnost výroby velkých objemů geopolymerních produktů a je považována za klíč k širšímu využití této technologie pro výrobu těchto materiálů. Zahraniční studie uvádějí, že náhled do reologické charakteristiky geopolymérů poskytuje možnost nastavení jejich chování a vlastností a znalost těchto vlastností může být použita jako způsob kontroly nastavení chování a je potřebná pro komerční využití těchto materiálů jako náhrady stávajících betonů [12]. Souhrnně je možné říci, že hlavní charakteristiky popílku použitelného pro přípravu geopolymerních materiálů poměrně dobrých mechanických vlastností jsou, že popílek obsahuje nanejvýš 5 % nespáleného materiálu, obsah oxidu železitého není vyšší než 10 %, popílek obsahuje do 10 % CaO, obsah reaktivního oxidu křemičitého se pohybuje mezi 40 až

50 %, obsah částic s velikostí menší než 45  $\mu\text{m}$  je mezi 80 až 90 %, a také obsahuje vysoký podíl skelné fáze [14].

## 2 CÍL PRÁCE

Disertační práce je zaměřena na vývoj, přípravu a studium vlastností geopolymerního pojiva na bázi elektrárenských popílků a jemně mletého cihelného střeput. Hlavním cílem této práce je studium procesu alkalické aktivace popílků vznikajících při spalování uhlí v tepelných elektrárnách na území ČR, které nejsou dosud plně využívány v technologii betonu ani v jiných technologiích, a dále cihelného střeput, který vzniká jako vedlejší produkt při výrobě kalibrovaných cihelných prvků.

Cíle práce lze definovat v následujících bodech:

- Charakterizace surovin vhodných pro alkalickou aktivaci
- Identifikace faktorů ovlivňujících geopolymerní reakci
- Optimalizace geopolymerní reakce
- Stanovení vlastností geopolymerních – mechanické a lomově-mechanické vlastnosti, fázové složení, mikrostrukturu, odolnost proti agresivnímu prostředí
- Doporučení vhodného způsobu aktivace vybraných surovin.

## 3 METODIKA PRÁCE

Metodika práce je rozdělena do 5 základních etap, které jsou podrobně rozpracovány v následujících odstavcích a konkretizovány v blokových schématech.

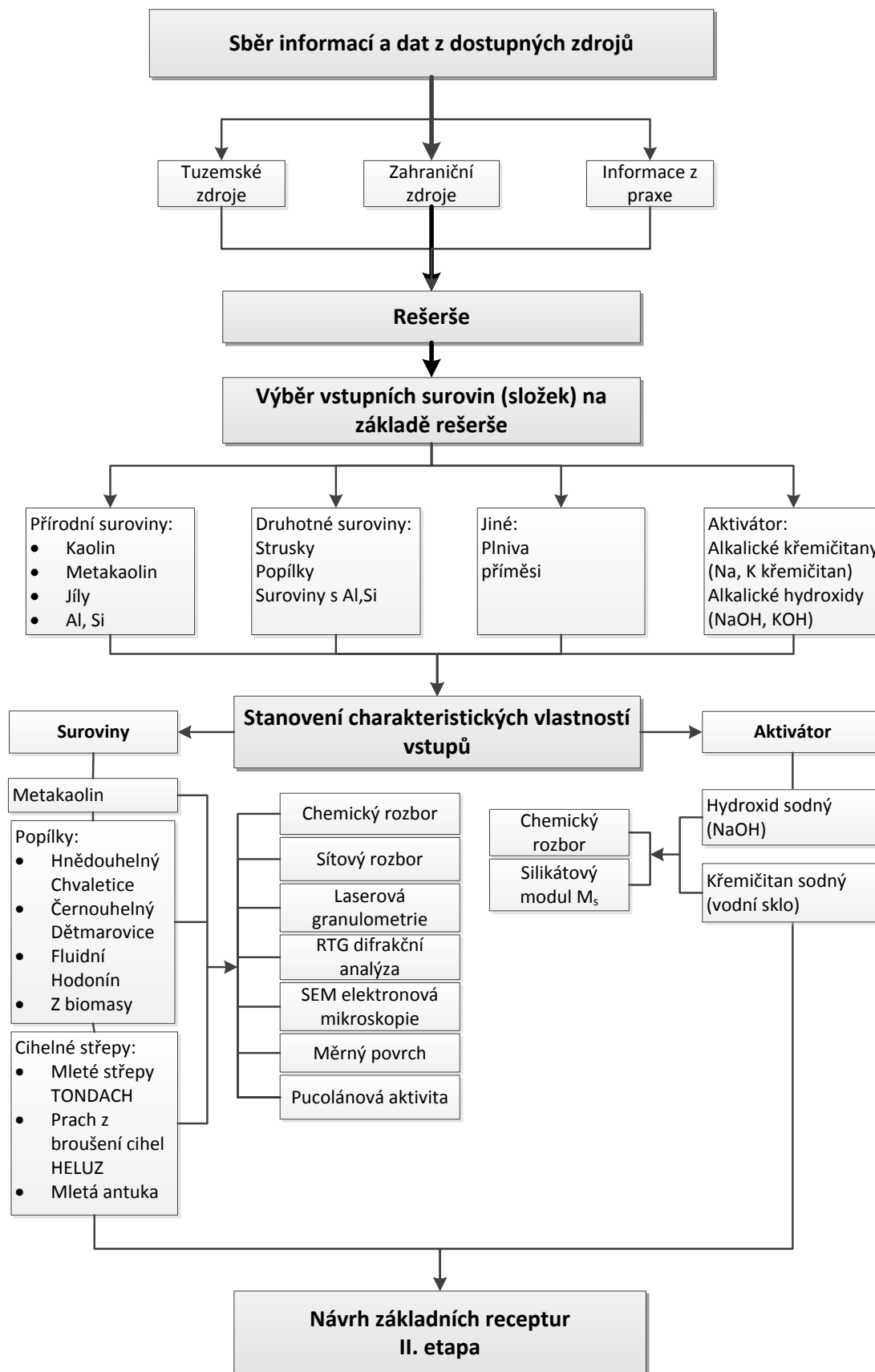
Stěžejním krokem první etapy byl výběr vstupních surovin na základě získaných informací z dostupných zdrojů, vhodných pro možnou alkalickou aktivaci a syntézu geopolymerních. Vstupní suroviny byly v této části práce podrobeny analýzám, z jejichž výsledků byly vyvozeny závěry, které sloužily pro stanovení jejich využití. Na základě získaných výsledků a poznatků z první etapy byly v druhé etapě navrženy základní receptury, které sloužily pro prvotní ověření možnosti použití alkalické aktivace vybraných popílků pro přípravu geopolymerních. Třetí etapa práce byla zaměřena na podrobné studium vybraného geopolymerního na bázi hnědouhelného popílku z Elektrárny Chvaletice a.s. V této etapě byly zkoumány faktory ovlivňující průběh geopolymerní reakce a vlastnosti vzniklých produktů.

Čtvrtá etapa byla zaměřena na zkoušku aktivace cihlářských surovin ve formě mletých cihelných střeput, prachu z broušení přesných pálených cihel a antuky. Podstatnou součástí této etapy bylo stanovení vlastností ztvrdlého produktu, tj. pevnost v tlaku, v tahu za ohybu, pórovitost a objemová hmotnost. Pozornost byla věnována také mikrostrukturu vzniklých geopolymerních. Pátou etapu lze označit jako etapu geopolymerních se směsnými pojivy. V této etapě byly na základě dosažených výsledků z předchozích etap navrženy receptury tvořené kombinací popílku a mletých cihelných střeput, z nichž byly připraveny geopolymerní. Vyroběné směsné geopolymerní byly podrobeny zkouškám a analýzám jako v předchozích kapitolách.



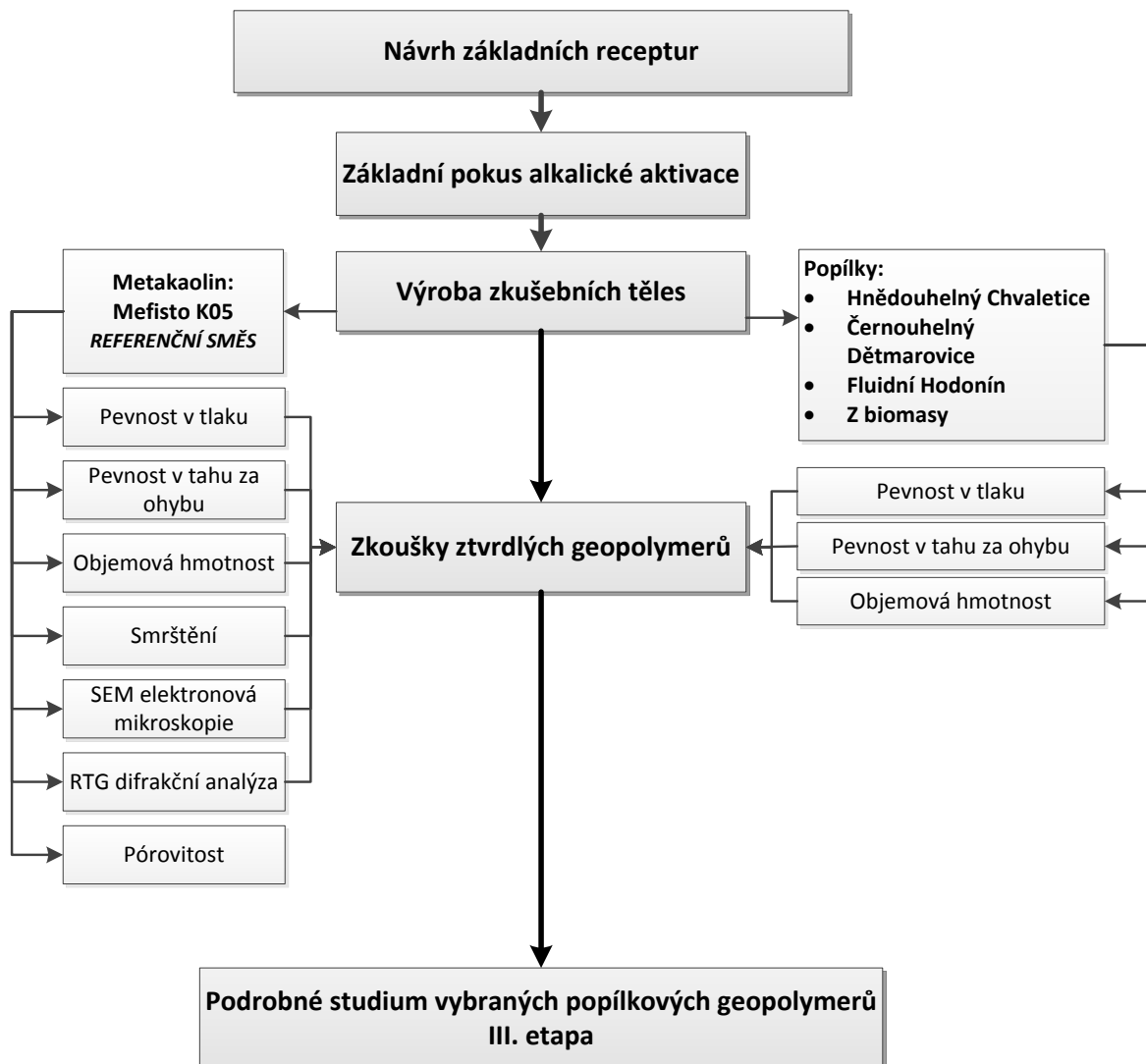
## Schéma I. Etapy disertační práce

## I. ETAPA



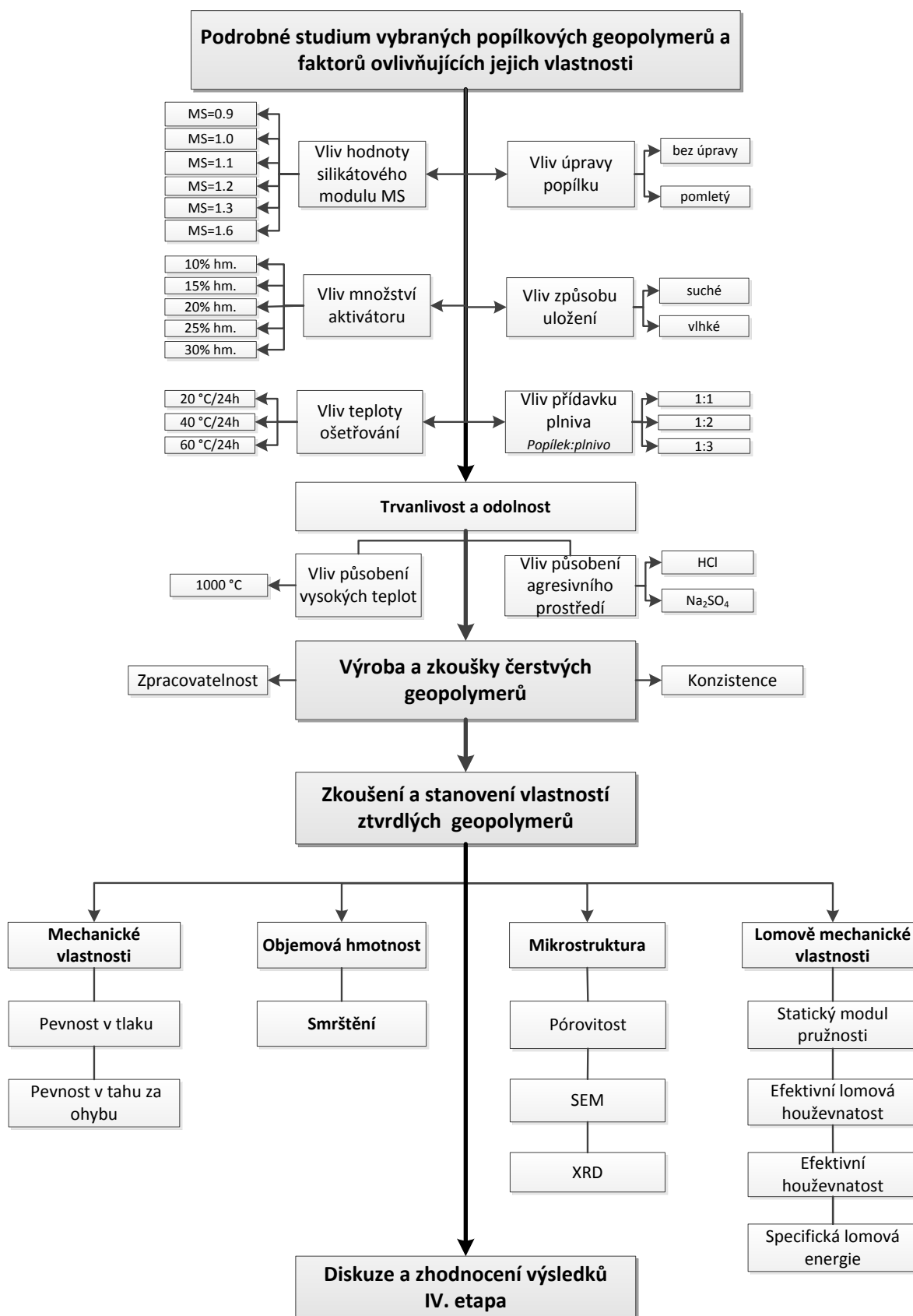
## Schéma II. Etapy disertační práce

## II. ETAPA



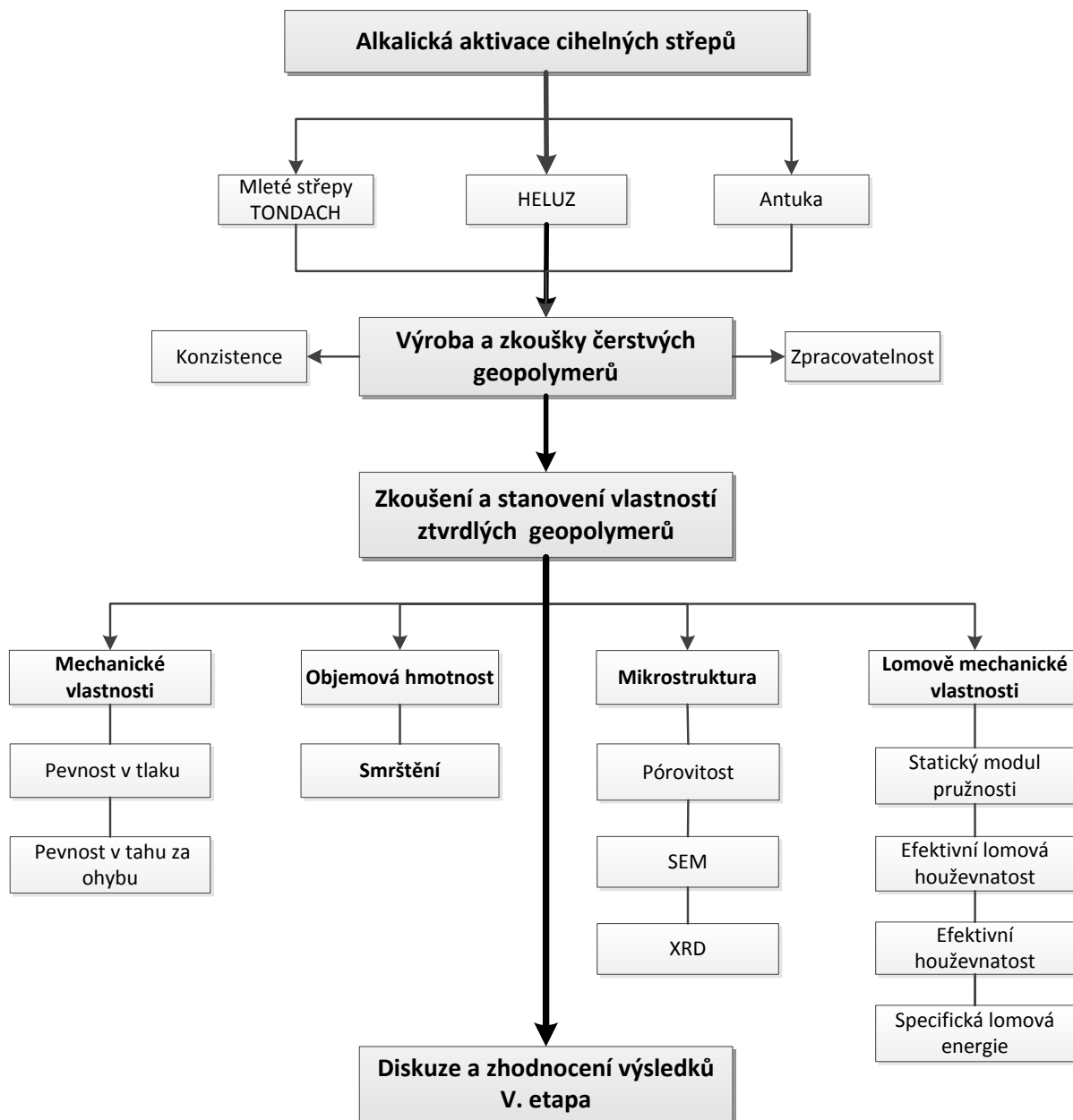
## Schéma III. etapy disertační práce

## III. ETAPA



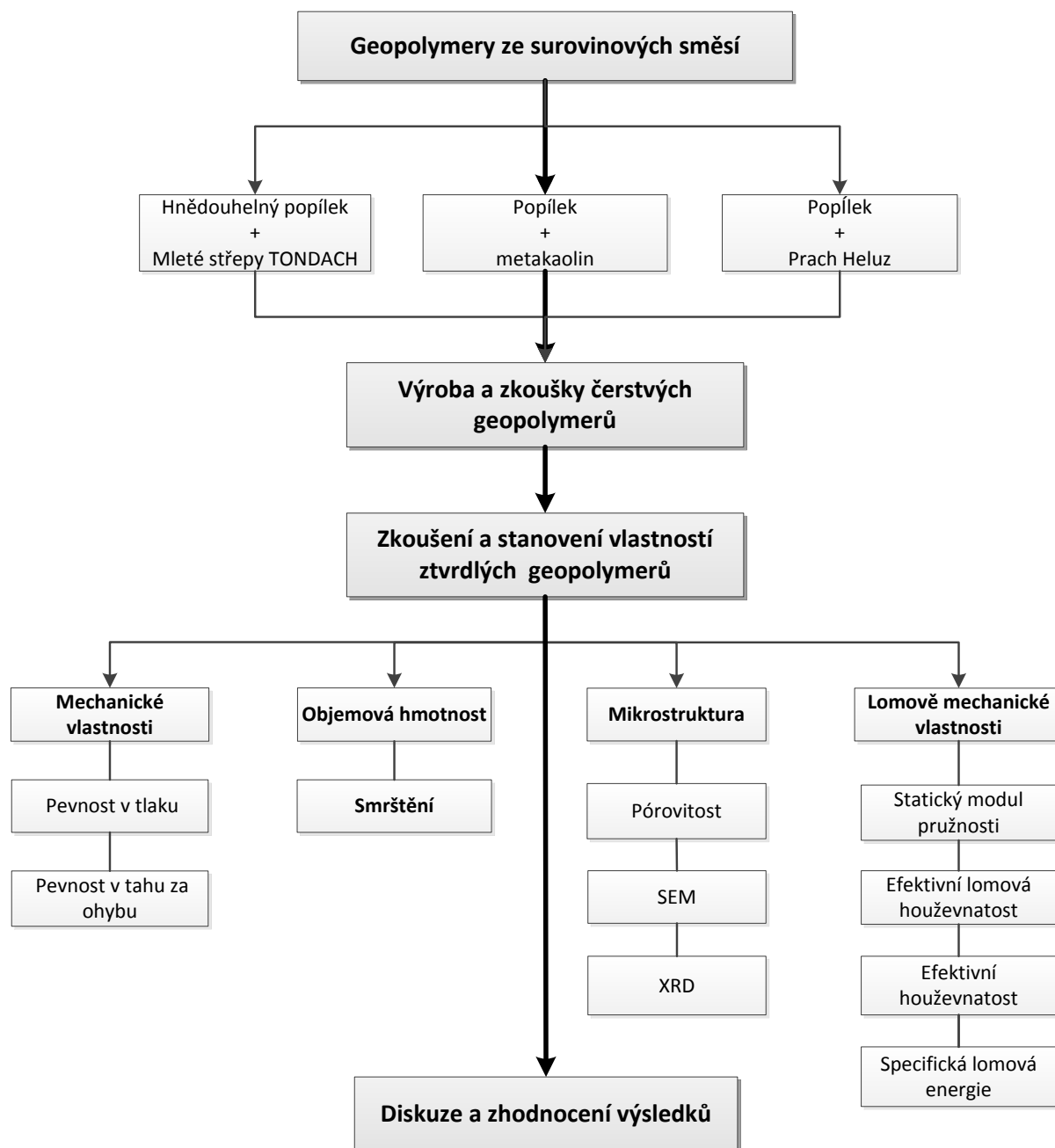
## Schéma IV. etapy disertační práce

## IV. ETAPA



## Schéma V. etapy disertační práce

## V. ETAPA



#### 4 SHRNU TÍ CHARAKTERIZACE SUROVIN

Vstupní suroviny byly podrobeny analýzám a rozborům. Stanovovala se granulometrie, mineralogické složení, byl proveden chemický rozbor a byla provedena REM analýza. V některých případech bylo nutné provést úpravu granulometrie mletím. Jednalo se o popílek z biomasy, odpadní cihelné střeby a antuku. Ostatní použité suroviny byly pro aktivaci použity bez úprav.

Chemická analýza prokázala, že metakaolin (MK), popílky ze spalování uhlí (CH, D) i cihelné střepy (ST, PH a AN) mají vysoký podíl  $\text{SiO}_2$  (49 – 63 %) a  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (cca 15 – 39 %). Vysoký obsah oxidů křemíku a hliníku dává první předpoklad možnosti alkalické aktivace. V případě popílku ze spalování biomasy a fluidních popílků byl obsah oxidů křemíku a hliníku nižší,  $\text{SiO}_2$  (28 – 32 %) a  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (4 – 17 %). Tyto popílky obsahovaly mnohem více  $\text{CaO}$  (26 – 33 %). V případě vyššího obsahu  $\text{CaO}$  dochází k ovlivnění průběhu geopolymerační reakce, zejména její rychlosti a vznikají rozdílné produkty, než je tomu v případě surovin s nižším obsahem  $\text{CaO}$ .

Rentgenová difrakční analýza odhalila u všech vstupních surovin přítomnost  $\beta$ -křemene. U popílků ze spalování uhlí (CH, D) byla stanovena přítomnost mullitu a oxidů železa (hematitu a magnetitu), živců (albitu, ortoklasu a anortitu). V popílcích ze spalování uhlí a v metakaolinu bylo přítomno výrazné množství skelné fáze. U popílku ze spalování biomasy, který má vysoký obsah  $\text{CaO}$ , byla identifikována přítomnost portlanditu, kalcitu a oxidu vápenatého. U keramických surovin a metakaolinu byla identifikována přítomnost illitu a/nebo muskovitu.

## 5 ALKALICKÁ AKTIVACE POPÍLKU

V této části práce byl zkoumán vliv hodnoty silikátového modulu  $M_s$  a dávky roztoku aktivátoru na dlouhodobé pevnosti, v časovém horizontu do 360 dnů u vybraných geopolymérů na základě dosažených výsledků z pilotních experimentů. Dále byl stanoven vliv teploty při tvrdnutí, vliv vlhkosti při uložení popílkových geopolymérů, vliv přídavku kameniva, lomově-mechanické parametry, vliv působení vysokých teplot a korozní odolnost geopolymérů. Pozornost také byla věnována mineralogickému složení a mikrostruktuře. Složení směsí uvádí tab. 1, vlastnosti zkušebních těles jsou v tab. 2.

Tab. 1 Složení směsí pro výrobu popílkových geopolymérů

| Směs            | Popílek | Vodní sklo | Hydroxid sodný NaOH | Přidaná voda $\text{H}_2\text{O}$ | Vodní součinitel w | Silik. modul $M_s$ | Rozlítí na střešacím stolku |
|-----------------|---------|------------|---------------------|-----------------------------------|--------------------|--------------------|-----------------------------|
| ozn.            | [g]     | [g]        | [g]                 | [g]                               | [-]*               | [-]                | [mm]                        |
| <b>CH20A1,0</b> |         | 357,0      | 43,0                | 290                               | 0,25               |                    | 196                         |
| <b>CH25A1,0</b> | 2000    | 446,0      | 54,0                | 232                               | 0,24               | 1,0                | 198                         |
| <b>CH30A1,0</b> |         | 535,0      | 65,0                | 160                               | 0,23               |                    | 200                         |
| <b>CH20A1,3</b> |         | 383,3      | 16,7                | 290                               | 0,26               |                    | 196                         |
| <b>CH25A1,3</b> | 2000    | 479,0      | 21,0                | 248                               | 0,26               | 1,3                | 197                         |
| <b>CH30A1,3</b> |         | 575,0      | 25,0                | 155                               | 0,24               |                    | 198                         |
| <b>CH20A1,6</b> |         | 400,0      | -                   | 301                               | 0,27               |                    | 197                         |
| <b>CH25A1,6</b> | 2000    | 500,0      | -                   | 232                               | 0,25               | 1,6                | 200                         |
| <b>CH30A1,6</b> |         | 600,0      | -                   | 158                               | 0,25               |                    | 201                         |

\*Vodní součinitel je dán poměrem  $\text{H}_2\text{O}$  ( $\text{H}_2\text{O}$  ve vodním skle +  $\text{H}_2\text{O}$  přidávaná) / CH

Tab. 2 Vlastnosti zkušebních těles připravených aktivací CH různými aktivátory různých dávek - suché uložení

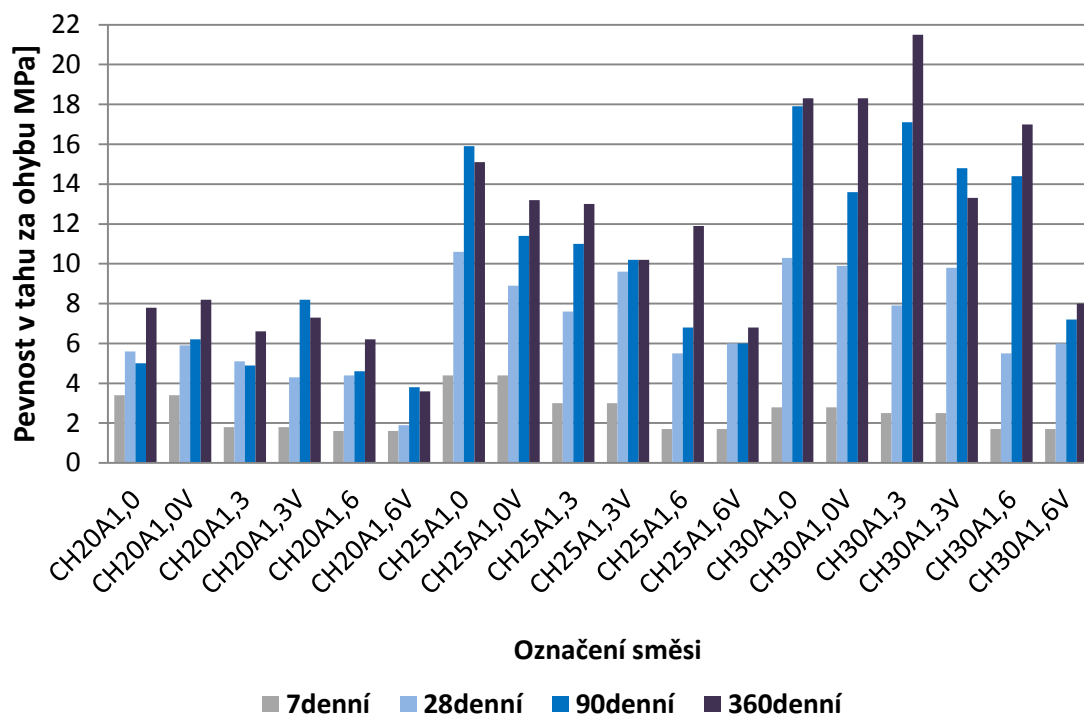
| Směs<br>ozn.    | Pevnost v tahu za ohybu<br>[MPa] |      |      |      | Pevnost v tlaku<br>[MPa] |      |      |      | Objemová<br>hmotnost<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | Smrštění<br>stárnutím<br>[%] |
|-----------------|----------------------------------|------|------|------|--------------------------|------|------|------|--|------------------------------|
|                 | 7d                               | 28d  | 90d  | 360d | 7d                       | 28d  | 90d  | 360d |  |                              |
| <b>CH20A1,0</b> | 3,4                              | 5,6  | 5,0  | 7,8  | 12,0                     | 26,3 | 36,6 | 49,3 | 1509   | 1,8                          |
| <b>CH25A1,0</b> | 4,4                              | 10,6 | 15,9 | 15,1 | 10,4                     | 44,1 | 68,8 | 74,3 | 1598   | 1,8                          |
| <b>CH30A1,0</b> | 2,8                              | 10,3 | 17,9 | 18,3 | 14,2                     | 45,6 | 72,7 | 88,5 | 1625   | 2,5                          |
| <b>CH20A1,3</b> | 1,8                              | 5,1  | 4,9  | 6,6  | 7,6                      | 27,2 | 30,1 | 36,3 | 1533   | 1,9                          |
| <b>CH25A1,3</b> | 3,0                              | 7,6  | 11,0 | 13,0 | 8,6                      | 40,5 | 59,9 | 69,2 | 1595   | 2,0                          |
| <b>CH30A1,3</b> | 2,5                              | 7,9  | 17,1 | 21,5 | 12,0                     | 44,0 | 67,3 | 86,8 | 1633   | 2,6                          |
| <b>CH20A1,6</b> | 1,6                              | 4,4  | 4,6  | 6,2  | 4,7                      | 15,6 | 20,8 | 23,9 | 1498   | 1,6                          |
| <b>CH25A1,6</b> | 1,7                              | 5,5  | 6,8  | 11,9 | 6,9                      | 26,2 | 38,8 | 60,4 | 1524   | 2,0                          |
| <b>CH30A1,6</b> | 1,7                              | 5,5  | 14,4 | 17,0 | 9,1                      | 30,0 | 61,2 | 65,5 | 1575   | 2,4                          |

## 5.1 Shrnutí výsledků aktivace popílku Chvaletice

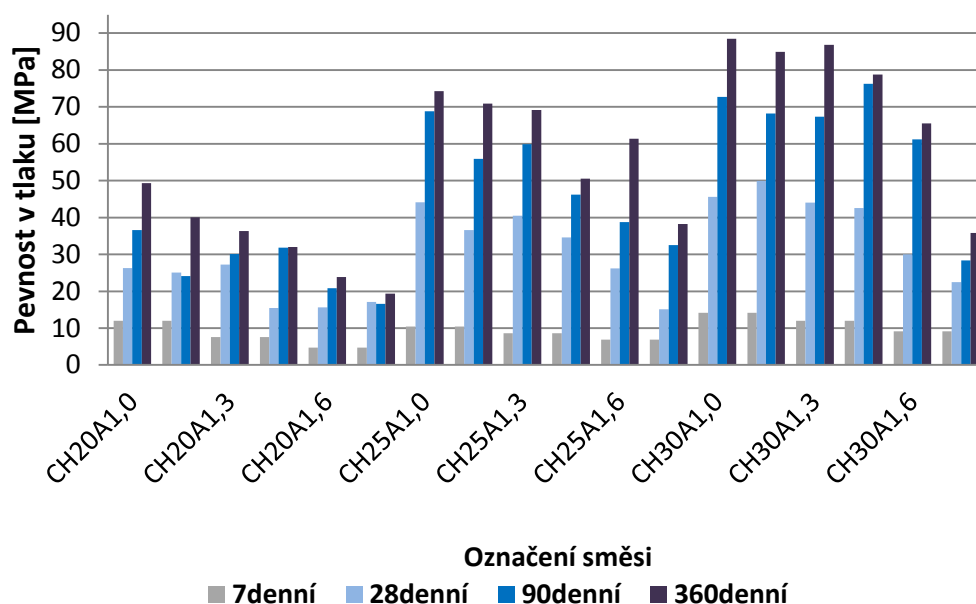
Souhrnné výsledky pevnosti v tahu za ohybu jsou graficky zobrazeny na obr. 1. Ze znázorněné závislosti je zřejmé že geopolymery připravené ze směsí CH20A1,0 až 1,6 dosáhly nejnižších pevností. Při jejich aktivaci bylo použito pouze 20 % hm. aktivátoru. Při dávce aktivátoru 25 % hm. byly pevnosti v tahu za ohybu geopolymery výrazně vyšší (směsi CH25A1,0 až 1,6) a nejvyšší pevnosti v tahu za ohybu dosáhly geopolymery připravené při dávce aktivátoru 30 % hm. V případě směsi CH30A1,3 dosahovaly geopolymery pevnosti v tahu za ohybu 21,5 MPa po 360 dnech uložení v laboratorních podmínkách, což je pevnost pro tento typ materiálů velmi vysoká. Z obr. 1 je dále patrné, že pevnosti geopolymery výrazně ovlivňovala i hodnota silikátového modulu  $M_s$ , kdy s jeho rostoucí hodnotou docházelo ke snižování pevností v tahu za ohybu vzniklých geopolymery.

Pevnost v tlaku geopolymery korespondovala s pevností v tahu za ohybu. Nejnižší pevnosti v tlaku dosáhly opět geopolymery připravené pouze s 20 % hm. aktivátoru. S rostoucí dávkou a klesající hodnotou  $M_s$  roztoku aktivátoru pevnost v tlaku geopolymery vzrůstala.

Ze závislostí znázorněných na obr. 1 a 2 je dále zřejmé, že pevnosti v tlaku i v tahu za ohybu rostly s dobou uložení. Nárůst pevností geopolymery byl poměrně výrazný jak mezi 28. a 90. dnem, tak i mezi 90. a 360. dnem uložení. Tento nárůst pevností ukázal, že geopolymeryzační reakce, a s ní související tvorba vnitřní prostorové struktury jako nositele pevnosti geopolymery, probíhá v dlouhém časovém období. Toto chování se výrazně liší od chování běžného portlandského cementu. Na základě experimentů prováděných po celém světě se prokázalo, že k nárůstu pevností dochází i po delším časovém intervalu než 360 dní. Je tedy možné předpokládat, že by mohlo dojít ještě k dalšímu spíše již menšímu nárůstu pevností popílkových geopolymery. Nárůst pevností v dlouhém časovém intervalu bude zcela jistě ovlivněn druhem suroviny a použitým aktivátorem.



Obr. 1 Souhrný graf hodnot pevností v tahu za ohybu popílkových geopolymérů v závislosti na dávce a hodnotě silikátového modulu  $M_s$  aktivátoru, stáří a způsobu uložení zkušebních těles.



Obr. 2 Souhrný graf pevností v tlaku popílkových geopolymérů v závislosti na dávce a hodnotě silikátového modulu  $M_s$  aktivátoru, stáří a způsobu uložení zkušebních těles.



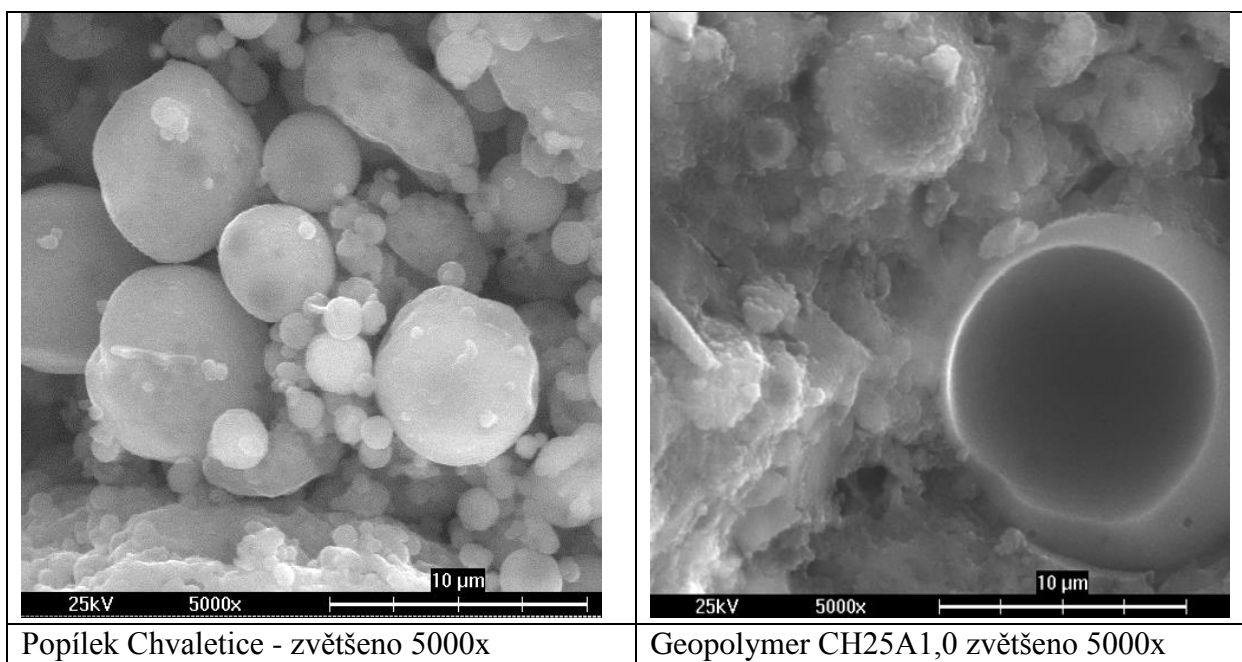
Pevnosti popílkových geopolymérů nejvýznamněji ovlivňuje hodnota silikátového modulu roztoku aktivátoru, kdy s jeho klesající hodnotou dochází k výraznému zvýšení pevností geopolymérů. Dalším významným faktorem ovlivňujícím pevnosti vzniklých geopolymérů je dávka aktivátoru, kdy pevnost roste s vyšší dávkou aktivátoru. Experiment ukázal jen zanedbatelné rozdíly mezi vzorky uloženými v suchém prostředí v laboratoři a vzorky uloženými ve vlhkém prostředí.

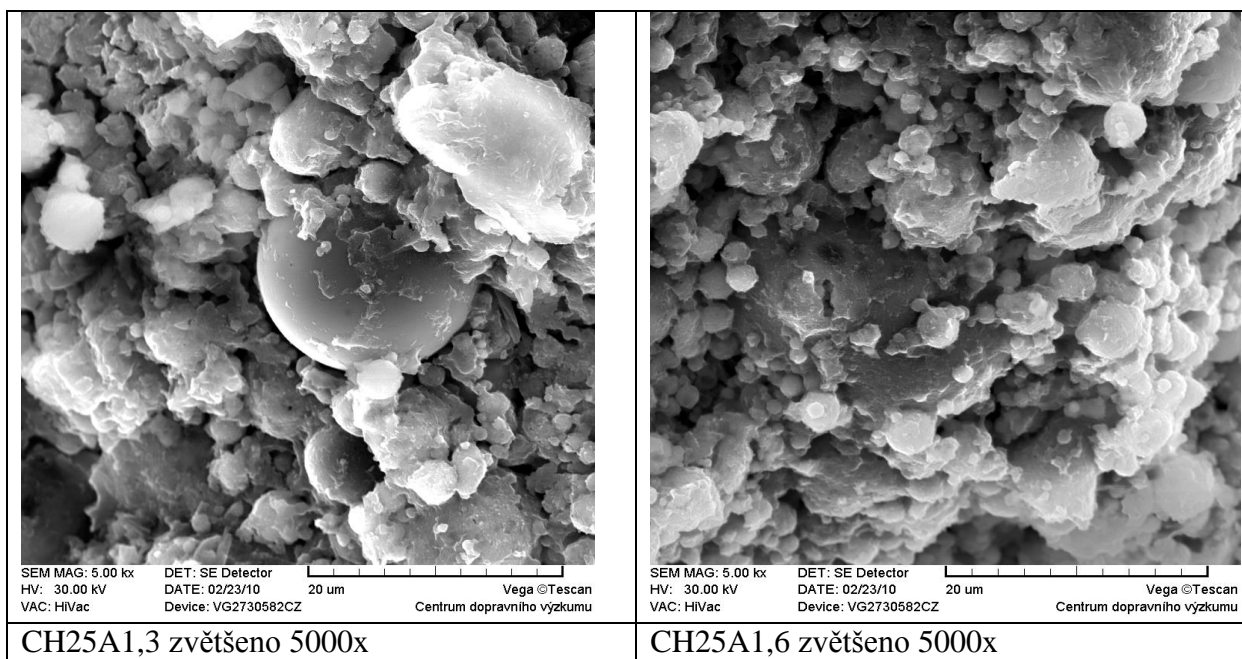
## 5.2 Mikrostruktura popílkových geopolymérů

Při pohledu na mikrostrukturu vzorků aktivovaných roztokem aktivátoru o  $M_s=1,0$  (obr. 3) se jeví struktura vzniklého produktu poměrně kompaktní. Ve struktuře jsou místy patrná nezreagovaná zrna popílku. Značná část zrn popílku je však částečně nebo zcela rozpuštěna a tvoří produkt geopolymerační reakce vytvářející pojivovou fázi. Tato fáze bývá označována někdy jako hlinitokřemičitý gel tvořící pojivovou složku v geopolymerních systémech.

Ze snímků mikrostruktury vzorků, které byly aktivované roztokem aktivátoru o  $M_s= 1,3$  je patrné, že geopolymér nevykazuje takovou míru kompaktnosti jako je tomu u vzorků aktivovaných roztokem o  $M_s = 1,0$ . Mikrostruktura je více nehomogenní a ve struktuře je také vidět větší množství popílkových zrn různých velikostí, které nezreagovaly s alkalickým roztokem nebo reagovaly jenom částečně. Ve struktuře je méně pojivové fáze, která místy pouze obaluje zrna popílku.

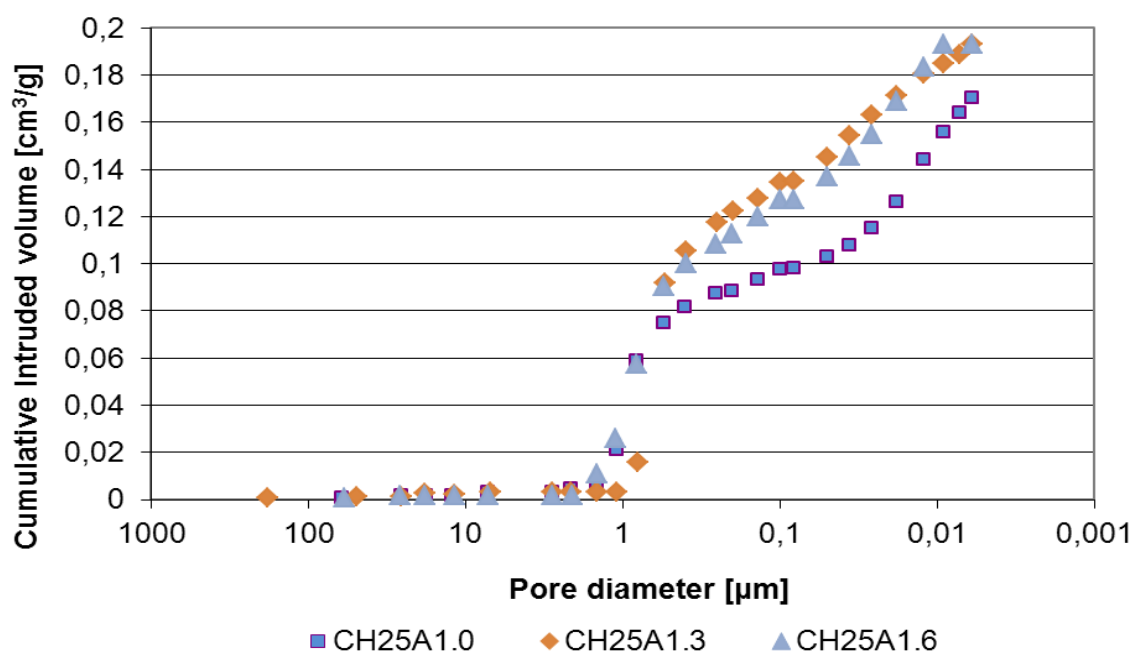
Vzorky aktivované roztokem aktivátoru o  $M_s=1,6$  vykazují nejmenší míru kompaktnosti struktury. Ve struktuře je možné pozorovat velké množství nezreagovaných popílkových zrn. Jednotlivá zrna popílku jsou spojena spíše bodově, což ukazuje, že reakce popílkových zrn s alkalickým roztokem aktivátoru probíhá omezeně, spíše jen na povrchu zrn popílku.





Obr. 3 Snímky z REM neaktivovaného popílku a popílkového geopolymery aktivovaného roztokem aktivátoru o  $M_s = 1,0, 1,3$  a  $1,6$ , dávce aktivátoru 25 % hm.

Srovnáním všech tří druhů popílkových geopolymery, lišících se hodnotou silikátového modulu  $M_s$  roztoku aktivátoru, je vidět, že při nižší hodnotě  $M_s$  roztoku vykazují geopolymery hutnější mikrostrukturu s větší mírou homogenity. S rostoucí hodnotou silikátového modulu roztoku aktivátoru míra homogenity a kompaktní struktura geopolymery klesá, což koresponduje s naměřenými údaji zjištěnými při měření porozity popílkových geopolymery a projevuje se i na pevnostech.



Obr. 4 Výsledky rtuťové porozimetrie popílkových (CH) geopolymery

Výsledky získané z měření porozity jsou pro jednotlivé popílkové geopolymery uvedeny na obr. 4. Z obrázku je patrné, že hodnota silikátového modulu roztoku aktivátoru ovlivňuje pórovou strukturu. Všechny tři zkoušené geopolymery měly velmi podobnou velikost a distribuci pórů. Všechny vzorky vykazovaly interval velikosti pórů v rozpětí 1 až 0,01  $\mu\text{m}$ . Pouze geopolymer CH25A1,0 měl jiný sklon křivky ukazující na odlišnou velikost a distribuci pórů tohoto geopolymery a vykázal celkově nižší kumulativní objem pórů.

Pro rentgenovou difrakční analýzu byl vybrán popílkový geopolymer CH25A1,0. Srovnáním difraktogramů popílkového geopolymery a popílku neukázalo žádné výraznější změny v mineralogickém složení mezi popílkem a popílkovým geopolymery. V obou vzorcích je převažující fází mullit, křemen a oxidy železa (magnetit a hematit). Ve srovnání s neaktivovaným popílkem, byl v popílkovém geopolymery identifikován pouze thenardit ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ). Ačkoliv XRD analýza prokázala přítomnost krystalických struktur stejných, jako byly identifikovány v neaktivovaném popílkem, nelze zcela vyloučit, že ke vzniku semikrystalických až krystalických struktur během geopolymeryzace dochází, ale vzhledem k velikosti krystalů a omezené detekční schopnosti XRD analyzátoru je není možné identifikovat. Pro jejich identifikaci by bylo nutné použití jiných vysoce rozlišovacích technik.

### 5.3 Stanovení hodnot lomově-mechanických vlastností popílkových geopolymeryů CH

U popílkových geopolymeryů byly provedeny zkoušky vedoucí k objasnění lomových charakteristik těchto materiálů, což může být důležité například u teplotně namáhaných materiálů. V tab. 3 jsou uvedeny relativní hodnoty parametrů, vztažené k hodnotám vzorku PCHL1.

Tab. 3 Relativní hodnoty sledovaných vlastností [-] (1,0...PCHL1)

| Vlastnost                     | Kompozit |       |
|-------------------------------|----------|-------|
|                               | PCHL2    | PCHL3 |
| Objemová hmotnost             | 1,01     | 1,06  |
| Statický modul pružnosti      | 1,62     | 2,53  |
| Efektivní lomová houževnatost | 2,65     | 3,77  |
| Efektivní houževnatost        | 4,33     | 5,72  |
| Specifická lomová energie     | 4,29     | 5,50  |

Na základě stanovených hodnot lomových vlastností lze tyto materiály zařadit mezi velmi křehké (na úrovni např. ztvrdlé cementové pasty, případně jemnozrnného betonu). Konkrétně se dají vyvodit následující závěry:

- velikost silikátového modulu roztoku aktivátoru ( $M_s$ ) podstatně ovlivňuje hodnoty statického modulu pružnosti – s nižšími hodnotami  $M_s$  narůstá u těchto kompozitů tuhost (což by pro stejné zatížení odpovídalo podstatně nižšímu přetvoření);

- se snižující se hodnotou  $M_s$  dochází k velmi podstatnému zhouževnatění kompozitu (mnohonásobně se zvyšuje odpor proti šíření trhlin); pro nejnižší hodnotu  $M_s=1,0$  kompozit vykázal zvýšenou proměnlivost výsledků<sup>1</sup>.

#### 5.4 Vliv působení agresivního prostředí na popílkové geopolymery

Experiment byl zaměřen na ověření působení agresivního prostředí na geopolymery připravené aktivací hnědouhelného popílku Chvaletice. V experimentu byla použita dvě různá korozní prostředí, roztok kyseliny chlorovodíkové a roztok síranu sodného.

Zkušební tělesa byla ponořena po dobu 60 dní v roztoku kyseliny chlorovodíkové (HCl) o koncentraci 0,001 mol/l což odpovídá hodnotě pH=3 a v 1% roztoku síranu sodného (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).

Naměřené hodnoty pevností zkušebních těles vystavených působení agresivního prostředí byly porovnány s hodnotami pevností těles uložených volně na vzduchu v laboratoři. Porovnáním hodnot byl stanoven tzv. koeficient korozivní odolnosti  $K_{C-COR}$  a  $K_{F-COR}$ , který je vyjádřen poměrem pevnosti zkušebních těles po vystavení působení agresivního prostředí k pevnosti vzorků uložených v referenčním prostředí (volně na vzduchu). Výsledky uvádí tab. 4.

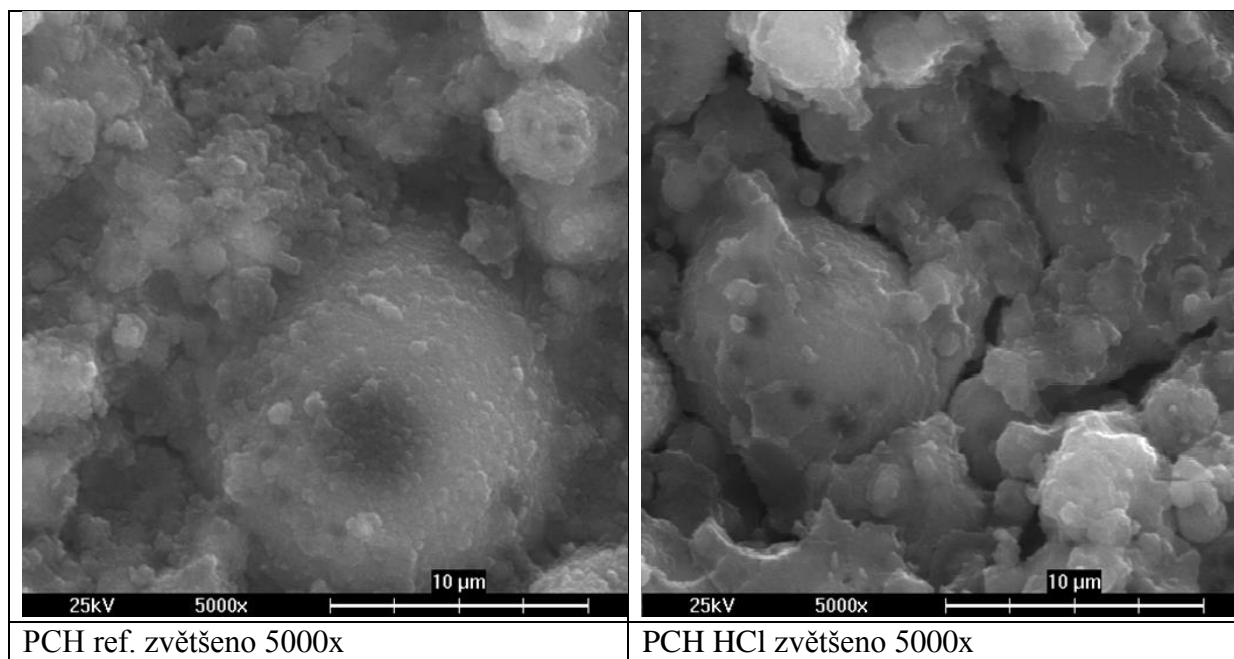
Tab. 4 Hodnoty pevností a korozních koeficientů popílkových geopolimerů uložených v korozních prostředích síranu sodného a kyseliny chlorovodíkové

| označení směsi  | Pevnost v tahu za ohybu $R_f$ [MPa] |                          |                    | Korozní koeficient $K_{f-COR}$ [-] |      | Pevnost v tlaku $R_b$ [MPa] |                          |                    | Korozní koeficient $K_{C-COR}$ [-] |      |
|-----------------|-------------------------------------|--------------------------|--------------------|------------------------------------|------|-----------------------------|--------------------------|--------------------|------------------------------------|------|
|                 | Suché uložení                       | Uložení v roztoku síranu | Uložení v kyselině | Síran                              | Kys. | Suché uložení               | Uložení v roztoku síranu | Uložení v kyselině | Síran                              | Kys. |
|                 |                                     |                          |                    |                                    |      |                             |                          |                    |                                    |      |
| <b>CH20A1,0</b> | 7,8                                 | 7,9                      | 8                  | 1,0                                | 1,02 | 49,3                        | 38,4                     | 31,9               | 0,8                                | 0,65 |
| <b>CH20A1,3</b> | 6,6                                 | 7,0                      | 6,2                | 1,1                                | 1,00 | 36,3                        | 31,4                     | 26,9               | 0,9                                | 0,74 |
| <b>CH20A1,6</b> | 6,2                                 | 5,4                      | 3,6                | 0,9                                | 0,58 | 23,9                        | 21,7                     | 17,9               | 0,9                                | 0,75 |
| <b>CH25A1,0</b> | 15,1                                | 15,8                     | 7,3                | 1,1                                | 0,48 | 74,3                        | 61,3                     | 44                 | 0,8                                | 0,59 |
| <b>CH25A1,3</b> | 13,0                                | 9,0                      | 9,1                | 0,7                                | 0,7  | 69,2                        | 61,4                     | 43                 | 0,9                                | 0,62 |
| <b>CH25A1,6</b> | 11,9                                | 8,0                      | 5,8                | 0,7                                | 0,49 | 61,4                        | 48,2                     | 35,8               | 0,8                                | 0,58 |
| <b>CH30A1,0</b> | 18,3                                | 22,0                     | 9,8                | 1,2                                | 0,53 | 88,5                        | 102,3                    | 62                 | 1,2                                | 0,7  |
| <b>CH30A1,3</b> | 21,5                                | 19,6                     | 12,1               | 0,9                                | 0,56 | 86,8                        | 70,1                     | 73,2               | 0,8                                | 0,84 |
| <b>CH30A1,6</b> | 17,0                                | 15,2                     | 10,7               | 0,9                                | 0,63 | 61,5                        | 46,3                     | 52                 | 0,8                                | 0,84 |

Pro detailnější pochopení vlivu působení agresivních prostředí na vlastnosti popílkových geopolimerů, byly jak referenční, tak i vzorky vystavené agresivnímu prostředí, studovány pomocí rastrovací elektronové mikroskopie.

Snímky mikrostruktury zkoumaných geopolimerů získané pomocí REM jsou znázorněny na obr. 5.

<sup>1</sup> Lomově mechanické parametry byly vyhodnoceny ve spolupráci s prof. Ing. Zbyňkem Keršnerem, CSc.



Obr. 5 Snímky mikrostruktury referenčních popílkových geopolymérů připravených aktivací popílku Chvaletice.

Referenční popílkový geopolymer obsahuje značný podíl nekystalických fází jako produktů geopolymerizační reakce, pojící nezreagovaná zrna popílku, zbytky rozpuštěných nebo částečně zreagovaných zrn popílku. Celkově je struktura referenčního geopolyméru poměrně kompaktní, hutná a málo pórovitá. Nezreagovaná zrna popílku se jeví pevně zabudována do struktury a rozhraní mezi zrnem popílku a geopolymerní matricí je téměř nezatelné.

Srovnáním snímků vnitřní struktury referenčního a geopolyméru vystaveného působení agresivního prostředí kyseliny chlorovodíkové ukazuje pórovitější strukturu a trhliny ve struktuře zkoušeného geopolyméru, způsobené degradací geopolymerních produktů, jednotlivá zrna popílku nejsou tak hojně pokryta a obklopena reakčními produkty geopolymerizační reakce jako je tomu u vzorku referenčního. Úbytek reakčních produktů (hliníkokřemičitého gelu) nasvědčuje tomu, že zřejmě vlivem působení kyseliny dochází k rozpouštění a vyluhování části geopolymerních produktů ze struktury geopolyméru, a to má za následek pokles jeho mechanických vlastností.

U popílkových geopolymérů vystavených působení agresivního prostředí síranu nebyly pozorovány žádné výraznější změny ve struktuře geopolyméru.

Pokles pevností se výrazněji projevil při působení roztoku kyseliny. Ačkoliv jsou geopolymery obecně poměrně dobře odolné a trvanlivé při vystavení působení agresivních prostředí, tak v případě působení kyselin bylo zjištěno, že jejich degradace je spojena s depolymerizací aluminosilikátových polymerů, uvolněním kyseliny křemičité a výměnou kationtu  $\text{Na}^+$  za kationty vodíku a dealuminací geopolymerní struktury, vedoucí ke ztrátě pevnosti. V kyselém prostředí dochází ke ztrátě pevnosti také díky tvorbě trhlin v amorfni geopolymerní matrici. V případě působení roztoku síranu sodného nebyl zaznamenán výraznější pokles pevností zkušebních těles, v některých případech dokonce došlo k mírnému nárůstu pevností geopolymérů. Vzhledem k povaze a struktuře geopolymérů je možné říci, že

jsou poměrně dobře odolné vůči působení kyselin i solí ve srovnání s portlandským cementem. Jejich odolnost je lepší zejména z důvodu výrazně menšího množství Ca obsaženého v jejich struktuře, který je nejvíce napadán působením jak kyselin, tak síranů v případě kompozitů na bázi portlandského cementu.

## 6 ALKALICKÁ AKTIVACE CIHELNÝCH STŘEPŮ

K aktivaci byly použity cihelné střepy, které vznikají jako odpad při výrobě cihlářského zboží. Konkrétně byly použity mleté cihelné střepy (dále jen CM), vznikající z nedodělků jako odpad při výrobě pálené střešní krytiny v závodě TONDACH s.r.o. ve Šlapanicích a cihelný prach (dále jen PH) vznikající při broušení přesných cihel v závodě HELUZ cihlářský průmysl, v. o. s. v Hevlíně. Také byla použita mletá antuka (dále jen AM) od firmy CIVAS s.r.o. vyráběná z odpadů vznikajících při výrobě cihlářských prvků, při demolicích budov z plných pálených cihel a při rekonstrukcích střech z pálené střešní krytiny.

Keramické suroviny vypálené na teplotu 800 až 900 °C získávají pucolánovou aktivitu, kdy po výpalu obsahuje cihelný střep dehydroxylované hlinitokřemičitany. V případě alkalické aktivace cihlářských surovin sodnými aktivátory vznikají během geopolymerizační reakce jiné sloučeniny, než při reakci pucolánu s hydroxidem vápenatým. Výsledné vlastnosti vzniklých geopolymerů pak závisí na reaktivitě dané cihlářské suroviny s alkalickým aktivátorem, která se odvíjí od teploty výpalu, chemického a mineralogického složení primární suroviny, a na velikosti částic. Složení směsí je uvedeno v tab. 5, vlastnosti zkušební těles v tab. 6.

Tab. 5 Složení směsí pro výrobu zkušebních těles geopolymerů připravených aktivací cihelných střepů

| Směs   | Popílek | Vodní sklo | Hydroxid sodný NaOH | Přidaná voda H <sub>2</sub> O | Vodní součinitel w | Silik. modul M <sub>s</sub> |
|--------|---------|------------|---------------------|-------------------------------|--------------------|-----------------------------|
| ozn.   | [g]     | [g]        | [g]                 | [g]                           | [-]*               | [-]                         |
| CM 1,0 |         | 156,0      | 19,0                | 110                           | 0,29               | 1,0                         |
| CM 1,3 | 700     | 167,8      | 7,3                 | 115                           | 0,30               | 1,3                         |
| CM 1,6 |         | 175,0      | 0,0                 | 118                           | 0,31               | 1,6                         |
| PH 1,0 |         | 223,0      | 27,0                | 169                           | 0,30               | 1,0                         |
| PH 1,3 | 1000    | 239,6      | 10,4                | 171                           | 0,31               | 1,3                         |
| PH 1,6 |         | 250,0      | 0,0                 | 173                           | 0,32               | 1,6                         |
| AM 1,0 | 1000    | 223,0      | 27,0                | 192                           | 0,32               | 1,0                         |
| AM 1,3 |         | 239,6      | 10,4                | 195                           | 0,33               | 1,3                         |
| AM 1,6 |         | 250,0      | 0,0                 | 198                           | 0,34               | 1,6                         |

\*Vodní součinitel je dán poměrem H<sub>2</sub>O (H<sub>2</sub>O ve vodním skle + H<sub>2</sub>O přidávaná) / CM

Tab. 6 Vlastnosti zkušebních těles geopolymérů připravených aktivací CM

| Směs          | Pevnost v tahu za ohybu [MPa] |     |      |      | Pevnost v tlaku [MPa] |      |      |      | Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ] | Smrštění stárnutím [%] |       |
|---------------|-------------------------------|-----|------|------|-----------------------|------|------|------|--|------------------------|-------|
|               | ozn.                          | 7 d | 28 d | 90 d | 360 d                 | 7 d  | 28 d | 90 d |  |                        | 360 d |
| <b>CM 1,0</b> |                               | 4,2 | 6,2  | 10,6 | 11,8                  | 14,6 | 22,3 | 49,0 | 60,1                                   | 1685                   | 6,7   |
| <b>CM 1,3</b> |                               | 4,5 | 6,3  | 10,9 | 13,2                  | 21,3 | 29,5 | 38,1 | 45,5                                   | 1672                   | 4,8   |
| <b>CM 1,6</b> |                               | 3,8 | 8,3  | 8,1  | 9,6                   | 18,4 | 32,4 | 34,2 | 39                                     | 1643                   | 3,9   |
| <b>PH 1,0</b> |                               | 1,8 | 6,3  | 12,5 | 13,8                  | 6,7  | 21,8 | 41,3 | 48,6                                   | 1721                   | 4,4   |
| <b>PH 1,3</b> |                               | 2,3 | 7,9  | 11,1 | 11,4                  | 8,4  | 26,0 | 36,5 | 53,9                                   | 1689                   | 4,4   |
| <b>PH 1,6</b> |                               | 2,8 | 6,3  | 8,2  | 8,3                   | 11,9 | 24,5 | 35,6 | 38,1                                   | 1632                   | 3,6   |
| <b>AM 1,0</b> |                               | 1,7 | 4,7  | 5,6  | 7,4                   | 5,8  | 13,7 | 22,4 | 27,5                                   | 1667                   | 3,2   |
| <b>AM 1,3</b> |                               | 2,1 | 4,4  | 7,0  | 7,9                   | 6,4  | 14,4 | 24,8 | 29,8                                   | 1640                   | 3,0   |
| <b>AM 1,6</b> |                               | 1,3 | 5,0  | 5,8  | 5,6                   | 4,9  | 14,0 | 19,3 | 22,1                                   | 1579                   | 2,1   |

Nejvyšší pevnost byla naměřena u vzorků CM 1,0 aktivovaných roztokem aktivátoru  $M_s = 1,0$  a činila po 360 dnech uložení v laboratorních podmínkách 60,1 MPa. S rostoucí hodnotou  $M_s$  pevnost vzorků klesala. Jak je vidět, pevnost rostla se stářím vzorků, a to dokonce i mezi 90. a 360. dnem uložení, což ukazuje, že geopolymizační reakce a tvorba pevné struktury probíhá v dlouhém časovém intervalu. Podobný trend byl zaznamenán i u popílkových geopolymérů a geopolymérů připravených aktivací metakaolinu.

Snímky z REM pořízené při studiu vnitřní struktury bylo zjištěno, že struktura cihelného geopolyméru je poměrně hutná s nízkou pórovitostí. Ve struktuře byly pozorovány nezreagované částice cihelného střepu, které jsou obklopeny geopolymerním pojivem tvořeným produkty vzniklými při reakci mezi surovinou a aktivátorem během aktivace.

Z XRD analýzy bylo zjištěno, že hlavní rozdíl mezi aktivovaným vzorkem a původní surovinou je, že ve vzorku cihelného geopolyméru je přítomno výrazně nižší množství illitu/muskovitu, což ukazuje na reakci těchto složek s alkalickým aktivátorem a tvorbu geopolymerních produktů. Jiná výrazná změna v mineralogickém složení nebyla identifikována.

## 7 DISKUSE VÝSLEDKŮ

Předložená práce byla zaměřena na ověření možnosti použití vybraných surovin pro alkalickou aktivaci a přípravu geopolymérů, kdy při základních experimentech byly použity jako vstupní suroviny:

- metakaolin Mefisto K05 z Českých lupkových závodů a.s. (zkratka – MK);
- hnědouhelný popílek z elektrárny Chvaletice a.s., patřící do skupiny Severní energetická a.s. (zkratka CH);
- černouhelný popílek z elektrárny Dětmarovice a.s., patřící do skupiny ČEZ a.s. (zkratka D);
- popílek ze spalování biomasy ze závodu Pražan Polička s.r.o. (zkratka B);
- mleté cihelné střepy TONDACH s.r.o. (zkratka ST);
- cihelný prach z broušení cihel HELUZ FAMILY (zkratka PH);

- fluidní popílek z elektrárny Hodonín a.s, patřící do skupiny ČEZ a.s. (zkratka FH).

Metakaolin byl jedinou záměrně vyrobenou surovinou použitou pro přípravu geopolymérů a dle prof. Davidovitse z něj vzniká „čistý geopolymér“, proto geopolymér na bázi metakaolinu sloužil jako etalon při výběru vstupních surovin, které jsou vedlejšími produkty v technologiích. Geopolymér na bázi metakaolinu vykazoval vysoké pevnosti v tahu za ohybu (po 360 dnech 12,3 MPa) i v tlaku (po 360 dnech 85,6MPa). Hutná struktura geopolyméru byla pozorována na snímcích ze SEM analýzy. Výhodou geopolyméru připraveného aktivací metakaolinu je jeho čistá světlá béžová barva a hladký lesklý povrch. Určitou nevýhodou metakaolinu pro výrobu geopolyméru je jeho horší zpracovatelnost při výrobě čerstvé pasty, a také jeho vysoká cena. Použití geopolymérů na bázi metakaolinu by bylo tedy vhodné zejména pro specifické případy, kde se využijí jeho vynikajících pevnosti a další fyzikální vlastnosti.

Bylo zjištěno, že pro alkalickou aktivaci jsou vhodné elektrárenské popílků. Ačkoliv obecně bývají vhodnější pro aktivaci černouhelné popílků, vykazovaly lepší výsledky geopolymery připravené z hnědouhelného popílku Chvaletice (CH). Popílkové geopolymery z popílku Chvaletice dosahovaly v základních pokusech vyšších pevností v tlaku než geopolymery na bázi černouhelného popílku Dětmárovice (D). V případě geopolymérů na bázi fluidního popílku z elektrárny Hodonín, dosahovaly vzorky velmi nízkých hodnot pevností. Navíc, při použití pouze popílku filtrového docházelo k praskání vzorků a pevnosti byly neměřitelné. Z toho důvodu nebyly další experimenty s fluidním popílkem prováděny. V případě popílku ze spalování biomasy bylo chování směsí i pevnosti připravených geopolymérů podobné jako u fluidního popílku. Docházelo k velmi rychlému tunutí a tvrdnutí směsi, které bylo s největší pravděpodobností způsobeno vysokým obsahem vápníku, který urychluje průběh geopolymerační reakce což bylo pozorováno i v některých zahraničních studiích. Přídavek silně alkalického aktivačního roztoku k popílků obsahujícího vápník vede k rychlému rozpouštění vápníku z popílku a následnému vysrážení v podobě  $\text{Ca(OH)}_2$ . Tento efekt vede ke snížení hodnoty pH aktivačního roztoku díky vázání  $\text{OH}^-$  iontů, které pak výrazně ovlivní rychlost procesu dalšího rozpouštění/srážení při geopolymerační reakci.

Po prvotních experimentech se ukázal jako nejvhodnější pro geopolymerizaci hnědouhelný popílek Chvaletice. Byly zkoumány některé faktory ovlivňující vlastnosti výsledných geopolymérů. Studován byl vliv množství aktivátoru, silikátový modul  $M_s$ , aktivátoru, vliv teploty ošetřování, vliv přídavku plniva, vliv úpravy popílku, vliv působení vysokých teplot a agresivních prostředí, vliv způsobu uložení (vlhké×suché) a stáří vzorků, lomově-mechanické vlastnosti a mikrostruktura geopolymérů. Bylo zjištěno, že nejvyšší pevnosti v tlaku i v tahu za ohybu bylo dosaženo při použití aktivátoru o silikátovém modul  $M_s = 1,0$ . Jako nejvhodnější dávka aktivátoru byla zvolena 25 % hm. z hmotnosti popílku. Při těchto parametrech dosahovaly vzorky popílkového geopolyméru pevnosti po 360 dní uložení volně v laboratoři až 74,3 MPa v tlaku a 15,1 MPa pevnosti v tahu za ohybu a při dávce aktivátoru 30 % hm. byla naměřena pevnost až 88,5 MPa v tlaku a 18,3 MPa v tahu za ohybu. V případě vlhkého uložení byla pevnost v některých případech nepatrně nižší. Z toho důvodu je možné říci, že nebyl pozorován žádný výrazný vliv způsobu uložení na vlastnosti geopolymérů. Při ošetřování geopolymérů vyššími teplotami (40 a 60 °C) byl zaznamenán



výrazný nárůst rychlosti geopolymerační reakce, ale výsledné pevnosti vzorků nedosahovaly takových hodnot jako v případě vzorků, jejichž tuhnutí a tvrdnutí probíhalo při laboratorních podmínkách. Reakce se vlivem teploty výrazně zrychlí a dochází k výraznému urychlení geopolymerační reakce a nárůstu počátečních pevností, kdy rozdíl mezi 7 a 28 denními pevnosti je minimální. Nicméně, bylo pozorováno, že s rostoucí teplotou roste velikost pórů a kumulativní objem pórů, což se projevuje negativně na výsledných pevnostech. Stejně chování zaznamenal ve své práci i doc. Rovnaník [20]. Ověření pojivových vlastností geopolymerní popílkové pasty bylo zkoušeno přidáním zkušebního křemenného písku o třech frakcích. Popílkové geopolymerní malty vykazovaly pevnosti po 90 dnech 60,6 MPa v tlaku v případě dávky plniva 1:1 k popílku. Při poměru pojiva k plnivu 1:3 klesla pevnost až na 26,6 MPa. Z výsledků je zřejmé, že plnivo výrazně snížilo pevnosti ve srovnání s pevnostmi, které byly naměřeny na popílkové geopolymerní pastě. Popílkové geopolymerní malty byly také zkoušeny na teplotní odolnost proti působení vysoké teploty. Vzorky byly vystaveny teplotě 1000 °C s výdrží 60 minut, a poté došlo k pozvolnému ochlazení vzorků. Bylo zjištěno, že vzorky vystavené vysoké teplotě vykazovaly vyšší pevnosti, než vzorky referenční, uložené volně v laboratoři. U vzorků aktivovaných aktivátorem s vyšší hodnotou  $M_s$  došlo až ke zdvojnásobení pevností i v případě užití křemenného písku. Z tohoto důvodu zřejmě došlo ke vzniku taveniny a následnému slinování a tvorbě nových pevnějších keramických vazeb, které způsobily nárůst pevnosti. Tvorbu taveniny a slinování nasvědčuje i poměrně velké smrštění vzorků, které bylo až 3,7 %. Další experimenty popílkových geopolymerů byly zaměřeny na jejich odolnost proti působení agresivních prostředí simulovaných kyselinou chlorovodíkovou a síranem sodným. Bylo zjištěno, že kyselina způsobila výraznější pokles pevností, a to více než 40 %. Kyselina působí degradačními účinky ve dvou krocích, kdy v prvním kroku dochází k iontové výměně mezi strukturními kationty kompenzujícími náboj v aluminosilikátové struktuře geopolymeru, tj. sodíkem a ionty  $H^+$  nebo  $H_3O^+$  z roztoku a souběžně dochází k elektrofilnímu ataku polymerních vazeb Si-O-Al kyselým protonem, který způsobuje uvolnění tetraedrálních iontů  $AlO_4$  z aluminosilikátové mřížky. Ve druhém kroku pak dochází k difúzi uvolněných iontů do kyselého roztoku. Tento popis průběhu degradace popílkových geopolymerů popsal ve své práci prof. Škvára.

Aktivace cihelných střepů prokázala možnost využití těchto surovin pro alkalickou aktivaci a přípravu geopolymerů. V případě aktivace mletých cihelných střepů ze závodu TONDACH Šlapanice vykazovaly geopolymery z nich připravené poměrně vysoké pevnosti, kdy vzorky připravené aktivací aktivátorem o  $M_s = 1,0$  dosahovaly po 360 dnech uložení 60,1 MPa v tlaku a 11,8 MPa v tahu za ohybu. Při aktivaci prachu z broušení přesných cihel zn. FAMILY dosahovaly vzorky nižších hodnot pevností, a to 48,6 MPa v tlaku a 13,8 MPa v tahu za ohybu. Nejnižší pevnosti byly naměřeny u geopolymerů připravených aktivací mleté antuky, která byla směsí cihelných střepů různého původu. Vzorky vykazovaly po 360 dnech uložení a  $M_s=1,3$  pevnost jen 29,8 MPa v tlaku a 7,9 MPa v tahu za ohybu. Při přípravě geopolymerních past bylo nutné v případě prachu z broušení a mleté antuky přidávat poměrně velké množství vody pro vytvoření požadované konzistence pro přípravu vzorků, vzhledem k velké jemnosti cihelného prachu a antuky, ale také díky velké nasákavosti spojené s obecnou povahou cihelných střepů. Výhodou “cihelných” geopolymerů je jejich červená barva.

Experimenty prováděné na popílko-metakaolinových geopolymerech ukázaly, že přídavek i relativně malého množství metakaolinu k popílku vedl k výraznému navýšení

výsledných pevností geopolymérů. Byly zkoušeny tři různé hmotnostní přídavky metakaolinu, a to 10, 20 a 30 % hm. z hmotnosti popílku. Neoptimálnější variantou se ukázala náhrada jen 10 % hm., kdy vzorky dosahovaly po 28 dnech uložení pevností 70,1 MPa v tlaku a 11,5 MPa v tahu za ohybu. Při vyšší dávce metakaolinu byly pevnosti srovnatelné, nebo dokonce horší, než měl samotný popílkový geopolymér. Experiment také ukázal výrazné zrychlení nárůstu počátečních zejména 7denních pevností, kdy byl jejich nárůst trojnásobný ve srovnání se samotným popílkem. Přídavek 10 % hm. metakaolinu k popílku při výrobě geopolymérů může výrazně pomoci pro zvýšení a urychlení nárůstu počátečních pevností, které jsou v případě aktivace samotného popílku poměrně nízké a vytváří určitou nevýhodu, např. v případě užití geopolymerační reakce pro výrobu prefabrikovaných geopolymerních popílkových prvků, kde je kladen důraz na obrátkovost forem a vyžaduje se tedy rychlý nárůst pevností nutných pro odformování.

## 8 ZÁVĚR

Získané výsledky analýz a experimentů prováděných v předložené práci ukázaly, že v ČR jsou dostupné suroviny, produkované ve velkém množství, které jsou vhodné pro přípravu geopolymérů, dosahujících velmi zajímavých vlastností. Z vybraných surovin byl jako nejvhodnější odpadní surovinou pro výrobu geopolymérů vybrán hnědouhelný popílek z elektrárny Chvaletice. Ostatní vybrané popílků (ze spalování biomasy a fluidní popílek z elektrárny Hodonín) se ukázaly jako nevhodné pro přípravu geopolymérů vzhledem k jejich charakteristickým vlastnostem, ať už se jednalo o velké množství hrubých podílů v případě popílku ze spalování biomasy, nebo naopak velká jemnost v případě filtrového fluidního popílku nebo chemického a mineralogického složení. U zmíněných popílků byl vysoký obsah vápníku, který výrazně ovlivňuje geopolymerační reakci a povahu vzniklých produktů.

Jako velmi zajímavou surovinou dostupnou v ČR vhodnou pro přípravu geopolymérů se ukázaly být cihelné střepy, a to jak v případě mletých střepů ze závodu TONDACH ve Šlapanicích, vznikajících jako odpad při výrobě pálené střešní krytiny, tak i v případě prachu z broušení přesných cihel HELUZ Family ze závodu v Hevlíně. Při aktivaci byly vyrobeny geopolymery dosahující pevností až 60 MPa v tlaku a téměř 12 MPa v tahu za ohybu. V případě antuky byly pevnosti výrazně nižší, zřejmě vzhledem k rozmanitému množství použitých cihelných materiálů pro její výrobu. Nevýhodou v případě cihelných střepů TONDACH a antuky při výrobě geopolymérů je nutnost úpravy mletím před vlastním použitím, která v případě prachu z broušení cihel HELUZ není nutná. Určitou výhodou je červená barva vzniklých geopolymérů, která může být plus v případě uplatnění v praxi např. na výrobu replik atypických keramických prvků.

Experimenty dále ukázaly, že je možné jednotlivé suroviny mezi sebou bez problémů kombinovat a ovlivňovat tak nejen vlastnosti vzniklých geopolymérů, ale v případě kombinace popílku a cihelných střepů i barvu výsledného geopolyméru, což může být velkou výhodou při použití v praxi.

Nejvhodnější surovinou pro přípravu geopolyméru je metakaolin, který dosahoval nejlepších vlastností ve srovnání s ostatními surovinami a byl v podstatě surovinou referenční. Výhodou metakaolinu je jeho použití jako zušlechťující příměs k popílkovým geopolymérům,

kdy při relativně malé dávce došlo k nárůstu zejména počátečních, ale i konečných pevností geopolymérů.

Na základě výsledků a analýz z předložené práce lze konstatovat, že alkalická aktivace je velmi perspektivní způsob pro zhodnocení a použití odpadních surovin pro přípravu geopolymerních materiálů, dosahujících nepřehlédnutelných charakteristických vlastností, které je možné s úspěchem a v návaznosti na další experimenty úspěšně aplikovat při výrobě nových stavebních materiálů, případně alternativě k materiálům stávajícím, tak jak tomu je např. v Austrálii, ale i jiných zemích.

Disertační práce rozvíjí vědní obor materiálového inženýrství o poznatky možnosti použití alkalické aktivace na přípravu geopolymerních pojiv a materiálů s využitím odpadu z výroby stavebních hmot a vedlejších energetických produktů. Práce je zaměřena na aktivaci popílku z vysokoteplotního spalování hnědého uhlí, který se jeví jako vhodná surovina pro přípravu geopolymérů. Významným přínosem jsou výsledky alkalické aktivace cihelného střepu a stanovení vlastností vzniklého geopolyméru. Ukázalo se, že i tento vedlejší produkt vytváří geopolymerní strukturu, která vede k vysokým pevnostem produktu. Výsledky tohoto tyto geopolyméru nebyly v dostupné literatuře dosud publikovány.

Výsledky práce mají význam pro praxi; ukazuje se, že lze využít odpadní aluminosilikáty vznikající při průmyslových technologiích (výroba elektrické energie, výroba cihelných prvků) pro alkalickou aktivaci, která vede ke vzniku geopolymerního materiálu s velmi zajímavými mechanickými a obecně užitnými vlastnostmi. „Cihelný“ geopolymér má díky cihelnému prachu červenou barvu, a proto se jako možné využití nabízí možnost oprav nebo náhrada poškozených keramických prvků atypických tvarů, nacházejících se na historických budovách a objektech.

## 9 SEZNAM CITOVANÉ LITERATURY

- [1] KÜHL, H. *Zement*, 1930, 19.
- [2] CHASSEVENT, L. Hydraulicity of slags. *Comptes Rendus*, 1937, 205, 670-672.
- [3] PURDON, A. O. The action of alkalis on blast furnace slag. *Journal of the Society of Chemical Industry*. 1940, vol. 59, p. 191–202.
- [4] GLUKHOVSKY, V. D. *Soil Silicates (Gruntosilikaty)*. Kiev, SSSR: Budivel`nyk Publisher. 1959.
- [5] GLUKHOVSKY, V. D. *Slag-alkali concretes produced from fine-grained aggregate*. Vyssha shkola Publisher, Kiev 1981.
- [6] DAVIDOVITS, J. Chemistry of Geopolymeric Systems Terminology. In *Proceedings of the 2nd International Conference on GÉOPOLYMERE'99*. Saint-Quentin, 1999.
- [7] DAVIDOVITS, J. 30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications. Market Trends and Potential Breakthroughs. In *Proceedings of 2002 Conference on GÉOPOLYMERE*. Saint-Quentin, France, 2002, 1–16.
- [8] VAN JAARSVELD, J.G.S., VAN DEVENTER, J.S.J., LUKEY, G.S. The effect of composition and temperature on the properties fly ash- and kaolinite-based geopolymers. *Chemical Engineering Journal*, 2002, Vol. **89**, 63-73.

- [9] DUXSON, P., FERNÁNDEZ-JIMENEZ, A., PROVIS, J. L., LUKEY, G. C., PALOMO, A., VAN DEVENTER, J. S. J. Geopolymer technology: the current state of art. *Journal of Material Science*, 2007, Vol. **42**, 2917-2933.
- [10] SOFI, M., VAN DEVENTER, J. S. J., MENDIS, P. A., LUKEY, G. C. Engineering properties of inorganic polymer concretes (IPCs). *Cement and Concrete Research*, 2007, Vol. **37**, 251-257.
- [11] XU H., VAN DEVENTER, J.S.J. The geopolymerisation of alumino-silicate minerals. *International Journal of Mineral Processing*, 2000, Vol. **59**, 247-266.
- [12] PHAIR, J. W., SMITH, J. D., VAN DEVENTER, J. S. J. Characteristics of aluminosilicate hydrogels related to commercial "Geopolymers". *Materials Letters*, 2003, Vol. **57**, No. 28, 4356-4367.
- [13] FERNÁNDEZ-JIMENEZ, A., GARCÍA-LODEIRO, I., PALOMO, A. Durability of alkali-activated fly ash cementitious materials. *Journal of Material Science*, 2007, Vol. **42**, 3055-3065.
- [14] FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A., PALOMO, A. Characterisation of fly ashes. Potential reactivity as alkaline cements. *Fuel*, 2003, Vol. **82**, No. 18, 2259-2265.
- [15] PALOMO, A., GRUTZEK, M. W., BLANCO, M. T. Alkali-activated fly ash – A cement for the future. *Cement and Concrete Research*, 1999, Vol. **29**, 1323-1329.
- [16] MIRANDA, J. M., FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A., GONZÁLEZ, J. A., PALOMO, A. Corrosion resistance in activated fly ash mortars. *Cement and Concrete Research*, 2005, Vol. **35**, 1210-1217.
- [17] TALLING, B., BRANDŠTETR, J. Present state and future of alkali-activated slag concretes. In *3<sup>rd</sup> International Conference on Fly ash, Silica Fume, Slag and Natural*
- [18] ŠKVÁRA, F., JÍLEK, T., KOPECKÝ, L. Geopolymer materials based on fly ash. *Ceramic-Silikáty*, 2005, Vol. **49**, 195-204.
- [19] VAN JAARSVELD, J. G. S., VAN DEVENTER, J. S. J., LUKEY, G. C. The characterization of source materials in fly ash-based geopolymers. *Materials Letters*, 2003, Vol. **57**, No. 7, 1272-1280.
- [20] ROVNANÍK, P. Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer. *Construction and Building Materials*. 2010, Vol. **24**, 1176–1183.
- [21] DAVIDOVITS, J. *Geopolymer Chemistry and Applications*. 2nd ed. Saint Quentin: Institut Géopolymère, 2008. 592 p.
- [22] DAVIDOVITS, J. Geopolymers: Inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis*, 1991, Vol. **37**, 1633-1656.
- [23] LYON, R. E. *et al.* Fire resistant aluminosilicate composites. *Fire and Materials*, 1997, **21**, 67-73.
- [24] HUSSAIN, M., VARLEY, R. J., CHENG, Y. B., SIMON, G. P. Investigation of thermal and fire performance of novel hybrid geopolymer composites. *Journal of Materials Science*, 2004, Vol. **39**, No. 14, 4721-4726.
- [25] VAN JAARSVELD, J. G. S., VAN DEVENTER, J. S. J. The effect of metal contaminants on the formation and properties of waste-based geopolymers. *Cement and Concrete Research*, 1999a, Vol. **29**, 1189-1200.

- [26] PALOMO, A., GLASSER, F. P. Chemically-bonded cementitious materials based on metakaolin. *British Ceramic Transactions and Journal*, 1992, Vol. **91**, No. 4, 107-112.
- [27] XU, H. VAN DEVENTER, J. S. J. Geopolymerisation of multiple minerals. *Minerals Engineering*, 2002b, Vol. **15**, No. 12, 1131-1139.
- [28] XU, H. VAN DEVENTER, J. S. J. Effect of source materials on geopolymerization. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2003a, Vol. **42**, No. 8, 1698-1706.
- [29] ASTM C 618, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete, Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.01. Cement; Lime; Gypsum, American Society for Testing & Materials, 2003, Philadelphia.
- [30] DONATELLO, S., TYRER, M., CHEESEMAN, C. R. Comparison of test methods to assess pozzolanic activity. *Cement and Concrete Composites*, 2010, Vol. **32**, No. 2, 121-127.

## Curriculum vitae

### Osobní údaje:

|                         |                              |
|-------------------------|------------------------------|
| Jméno a příjmení:       | Bohuslav Řezník              |
| Datum a místo narození: | 10.8.1983, Boskovice         |
| Stav:                   | svobodný                     |
| Trvalé bydliště:        | Drnovice 13, 679 76 Drnovice |

### Dosažené vzdělání:

|            |  |
|------------|--|
| 1998–2002  | <b>Víceleté gymnázium Rájec-Jestřebí</b>   |
| 2002–2007  | Magisterské studium na <b>Vysokém učení technickém v Brně</b> , Fakultě stavební, Obor: Materiálové inženýrství, získán titul inženýr  |
| 2007–dosud | Postgraduální studium na <b>Vysokém učení technickém v Brně</b> , Fakultě stavební, Obor: Fyzikální a stavebně materiálové inženýrství, státní doktorská zkouška absolvována 22.5.2009 |

### Pracovní zkušenosti:

|            |   |
|------------|---|
| 2009–2010  | <b>Práce na pozici stavbyvedoucího u firmy elitbau s.r.o.</b> <i>Realizované stavby:</i> RN – Bítov, RN – Stálky, Rekonstrukce VN Pálava I. a II. Blansko, VN – Boří, Rybník FARČATA, HB – Sychotínský potok I. a II. RD – Blažovice – komunikace |
| 2011–dosud | <b>Práce na pozici vedoucího betonárny PRESTA-mix, spol. s r.o.:</b> <i>popis práce:</i> vedení pracovního týmu a chodu betonárny, fakturace, obchod, tvorba cenových nabídek, prezentace a reklama firmy, objednávky aj.                         |

**Publikační činnost:**

- [1] ŘEZNÍK, B. Vliv působení agresivního prostředí na mechanické vlastnosti alkalicky aktivovaného popílku. *Sborník konference JUNIORSTAV 2011. 13<sup>th</sup> odborná konference doktorského studia*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2011, ISBN: 978-80-214-4232-0
- [2] ŘEZNÍK, B., FRÝBORTOVÁ, I., ROVNANÍKOVÁ, P. Properties of alkali-activated fly ash with respect to silicate modulus of aktivátor. *Non-Traditional Cement & Concrete IV*. Vysoké učení technické v Brně, 2011, ISBN: 978-80-214-4301-3.
- [3] FRÝBORTOVÁ I., ROVNANÍK P., ŘEZNÍK B. Thermal Resistance of Alkali Activated Blast Furnace Slag Composite with Chamotte Aggregate. *Non-Traditional Cement & Concrete IV*. Vysoké učení technické v Brně, 2011, ISBN: 978-80-214-4301-3.
- [4] ŘEZNÍK, B., BAYER, P. Vlastnosti geopolymerních materiálů na bázi popílku a mletého cihelného střepu. *Sborník konference RECYCLING 2010 "Možnosti a perspektivy recyklace stavebních odpadů jako zdroje plnohodnotných surovin"*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Brno, 2010, ISBN: 978-80-214-4061-6.
- [5] ŘEZNÍK, B. Vliv hodnoty silikátového modulu roztoku aktivátoru na vlastnosti geopolymeru na bázi mletého cihelného střepu. *Sborník konference Construmat 2010 - Conference about structural materials*. Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2010, ISBN: 978-80-227-3297-0.
- [6] ŘEZNÍK, B. Alkalická aktivace vybraných aluminosilikátových surovin. *Sborník konference Juniorstav 2010 - 12<sup>th</sup> odborná konference doktorského studia*. Vysoké učení technické v Brně, 2010, ISBN: 978-80-214-4042-5.
- [7] ŘEZNÍK, B., ROVNANÍKOVÁ, P. Alkalická aktivace mletého cihelného střepu a popílku. *Sborník konference Sanace a rekonstrukce staveb 31<sup>th</sup> konference (11. konference WTA CZ)*. Vědecko-technická společnost pro sanace staveb a péči o památky - WTA CZ, Praha, 2009, ISBN: 978-80-02-02190-2.
- [8] ŘEZNÍK, B., KERŠNER, Z., ROVNANÍKOVÁ, P., SCHMID, P. Vliv velikosti silikátového modulu na hodnoty lomově-mechanických vlastností geopolymerů na bázi popílku. *Sborník konference Recyklace odpadů XIII*, ŤU VŠB Ostrava, 2009, ISBN: 978-80-248-2073-6.
- [9] ŘEZNÍK, B. Vliv přídatku metakaolinu na mechanické vlastnosti alkalicky aktivovaného popílku. *Sborník konference Metakaolin 2009*. Vysoké učení technické v Brně, 2009, Fakulta stavební, Ústav chemie, ISBN: 978-80-214-3843-9.
- [10] ŘEZNÍK, B. Studium mechanických vlastností alkalicky aktivovaného popílku v závislosti na množství aktivátoru. *Sborník konference 15<sup>th</sup> CONSTRUMAT 2009 – Conference about structural materials*, ČVUT v Praze, 2009, s 51-59, ISBN: 978-80-01-0435.

- [11] ŘEZNÍK, B. Vliv silikátového modulu roztoku aktivátoru na mechanické vlastnosti alkalicky aktivovaného popílku. *Sborník konference RECYCLING 2009 – „Možnosti a perspektivy recyklace stavebních odpadů jako zdroje plnohodnotných surovin“*. VUT v Brně, 2009, s. 119 – 125. ISBN: 978-8-214-3842-2.
- [12] ŘEZNÍK, B. Vliv množství aktivátoru na mechanické vlastnosti alkalicky aktivovaných popílků ze spalování uhlí a biomasy, *sborník konference JUNIORSTAV 2009 – Odborná konference doktorského studia*. VUT v Brně, 2009, s. 297. ISBN: 978-80-214-3810-1.
- [13] ŘEZNÍK, B. Příprava alkalicky aktivovaného pojiva na bázi metakaolinu a popílku, *sborník konference CONSTRUMAT 2008 – Conference about structural materials*, VUT v Brně, 2008 s. 24-25. ISBN: 978-80-214-3660-2.
- [14] SMETANOVÁ, L., ŘEZNÍK, B. Výroba obkladových prvků s využitím kamenných odprašků a kalů, *sborník konference CONSTRUMAT 2007 – Conference about structural materials*, Banská Bystrica 2007, s. 125-128, ISBN: 978-80-214-3660-2.

#### ABSTRACT

In line with the current focus on utilizing side products of various production processes, this dissertation thesis analyzes the process of alkali activation of particular side products: fly ash and brick fragments. This activation produces geopolymeric materials widely used in civil engineering. The thesis aims to optimize the geopolymerization process so that the resulting geopolymer is both ecologically and economically viable. To that end, the thesis studies the course of geopolymeric reaction between the alkali activator and fly ash from: (i) the Chvaletice power plant, (ii) the Dětmarovice power plant, and (iii) biomass combustion, as well as (iv) fluid fly ash from the Hodonin power plant. All experiments of geopolymeric reaction have focused on the factors influencing the synthesis of geopolymers—that is: composition of the alkali activator, the ratio of alumino-silicate to the activator, and the impact of temperature on structure of the synthesized geopolymer. Further, the thesis analyzed the synthesized polymer's microstructure, phase composition, resistance against corrosive conditions, and compressive strength, as well as mechanical-fracture properties of selected fly-ash geopolymers. The thesis finds that the most suitable for geopolymeric synthesis appears to be the fly ash from the Chvaletice power plant in which case the obtained geopolymers showed best properties in the studied areas. The fly ash from the Dětmarovice power plant, biomass fly ash, and fluid fly ash have failed to reach acceptable properties. Separately, the thesis studies the geopolymerization of brick body that could be suitable input for alkali activation. The geopolymers synthesized from brick fragments resulted in materials of superior mechanical strength. A mixed use of fly ash and brick fragments failed to show a synergetic effect. Properties of the resulting geopolymers have been inferior to the properties of geopolymers produced using just fly ash or just brick body.