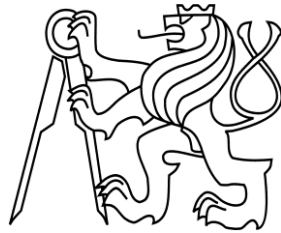


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA STAVEBNÍ



## **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

2017

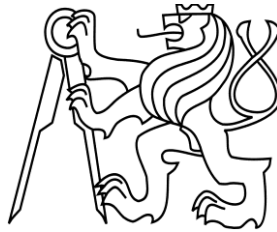
Bc. Nikol Alblová



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

Katedra materiálového inženýrství a chemie



**123DPM – Diplomová práce**

**VLASTNOSTI MATERIÁLŮ NA BÁZI  
ALKALICKY AKTIVOVANÉHO CIHELNÉHO  
PRACHU**

PROPERTIES OF ALKALI – ACTIVATED BRICK POWDER MATERIAL

Bc. Nikol Alblová

vedoucí práce: doc. Ing. Eva Vejmelková, Ph.D.

Praha, 2017



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Alblová Jméno: Nikol Osobní číslo: 380326  
Zadávající katedra: Katedra materiálového inženýrství a chemie  
Studijní program: Stavební inženýrství  
Studijní obor: Materiálové inženýrství

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Vlastnosti materiálů na bázi alkalicky aktivovaného cihelného prachu

Název diplomové práce anglicky: Properties of Alkali - Activated Brick Powder Material

Pokyny pro vypracování:

Rešerše na alkalickou aktivaci materiálů

Nastudování experimentálních metod

Provedení experimentálního programu

Zpracování a vyhodnocení výsledků

Diskuse k dosaženým výsledkům a formování závěrů

Seznam doporučené literatury:

Databáze WOS, Alkali-Activated Cements and Concretes

Jméno vedoucího diplomové práce: doc. Ing. Eva Vejmelková, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 13.10.2016 Termín odevzdání diplomové práce: 8.1.2017  
*Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku*

\_\_\_\_\_  
Podpis vedoucího práce

\_\_\_\_\_  
Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

*Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.*

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta(ky)

### **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně, pouze za odborného vedení doc. Ing. Evy Vejmelkové, Ph.D. a všechny použité prameny a literatura jsou uvedeny v seznamu citované literatury.

Nemám námitek proti použití tohoto školního díla ve smyslu §60 Zákona č.121/2000 sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 8.1.2017

.....

podpis

## **Poděkování**

Ráda bych poděkovala všem, kteří se nějakým způsobem podíleli na řešení mé diplomové práce, kolegům z Katedry materiálového inženýrství a chemie za jejich pomoc a připomínky. Především bych ráda poděkovala vedoucí mé diplomové práce doc. Ing. Evě Vejmelkové, Ph.D za její odborné vedení, gramatické úpravy i cenné rady.

V neposlední řadě bych ráda poděkovala všem mým blízkým, rodině a přátelům za jejich podporu a přízeň.

---

# Obsah

<b>Anotace</b>	.....	<b>III</b>
<b>Abstract</b>	.....	<b>III</b>
<b>Seznam použitých symbolů a zkratek</b>	.....	<b>IV</b>
<b>1 Úvod</b>	.....	<b>1</b>
<b>2 Historie alkalicky aktivovaných materiálů</b>	.....	<b>3</b>
<b>3 Geopolymery</b>	.....	<b>6</b>
3.1 Co jsou geopolymery	.....	6
3.2 Geopolymerace a struktura geopolymery	.....	7
3.3 Vlastnosti geopolymery	.....	10
3.4 Fixace těžkých kovů	.....	11
<b>4 Materiály vhodné pro alkalickou aktivaci</b>	.....	<b>14</b>
4.1 Vedlejší průmyslové produkty	.....	14
4.1.1 Mletá struska	.....	14
4.1.2 Popílký	.....	14
4.2 Metakaolin	.....	15
4.3 Bentonit	.....	15
4.4 Keramický odpad	.....	15
4.5 Vhodné aktivátory	.....	16
<b>5 Výzkum v oblasti alkalicky aktivovaných materiálů</b>	.....	<b>18</b>
5.1 Geopolymery na bázi popílků	.....	18
5.1.1 Alkalická aktivace popílků a biomasy	.....	18
5.1.2 Alkalická aktivace úletového popílků	.....	20
5.2 Geopolymery na bázi metakaolinu	.....	23
<b>6 Experimentální metody měření</b>	.....	<b>27</b>
6.1 Základní fyzikální vlastnosti	.....	27
6.1.1 Gravimetrická metoda měření	.....	27
6.1.2 Pyknometrická metoda měření	.....	28
6.2 Charakteristika pórového systému	.....	29
6.3 Mechanické vlastnosti	.....	30
6.3.1 Pevnost v tahu za ohybu	.....	30
6.3.2 Pevnost v tlaku	.....	32
6.4 Struktura studovaných materiálů	.....	33
6.5 Tepelná vodivost	.....	34
<b>7 Experimentální část</b>	.....	<b>35</b>
7.1 Charakteristika použitých surovin	.....	35
7.1.1 Cihelný prach	.....	35
7.1.2 Hydroxid sodný	.....	38
7.1.3 Vodní sklo	.....	39
7.1.4 Voda	.....	40
7.2 Použité směsi	.....	40

---

7.2.1	SMĚSI A - směsi s rozdílným Ms .....	40
7.2.2	SMĚSI B - směsi se stejným Ms .....	42
7.3	Pracovní postup .....	43
<b>8</b>	<b>Experimentální výsledky měření.....</b>	<b>45</b>
8.1	Směsi typu A – prosátý cihelný prach – frakce do 0,125 mm.....	45
8.1.1	Základní fyzikální vlastnosti.....	45
8.1.2	Charakteristika pórového systému.....	46
8.1.3	Mechanické vlastnosti .....	48
8.1.4	Struktura materiálu .....	49
8.2	Směsi typu B – prosátý cihelný prach - frakce do 0,125 mm.....	50
8.2.1	Základní fyzikální vlastnosti.....	50
8.2.2	Charakteristika pórového systému.....	52
8.2.3	Mechanické vlastnosti .....	53
8.2.4	Struktura materiálu .....	54
8.3	Směsi typu A – neprosátý cihelný prach .....	55
8.3.1	Základní fyzikální vlastnosti.....	55
8.3.2	Charakteristika pórového systému.....	56
8.3.3	Mechanické vlastnosti .....	58
8.3.4	Struktura materiálu .....	59
8.3.5	Tepelné vlastnosti .....	60
8.4	Směsi typu B – neprosátý cihelný prach.....	60
8.4.1	Základní fyzikální vlastnosti.....	60
8.4.2	Charakteristika pórového systému.....	61
8.4.3	Mechanické vlastnosti .....	63
8.4.4	Struktura materiálu .....	63
8.4.5	Tepelné vlastnosti .....	65
8.5	Směsi typu A - srovnání jednotlivých vlastností směsí typu K a N .....	65
8.5.1	Základní fyzikální vlastnosti.....	65
8.5.2	Mechanické vlastnosti .....	66
8.6	Směsi typu B - srovnání jednotlivých vlastností směsí typu K a N.....	68
8.6.1	Základní fyzikální vlastnosti.....	68
8.6.2	Mechanické vlastnosti .....	69
<b>9</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>72</b>
	<b>Seznam obrázků.....</b>	<b>75</b>
	<b>Seznam tabulek.....</b>	<b>78</b>
	<b>Literatura .....</b>	<b>79</b>

---



---

## **Anotace**

Cílem práce bylo najít vhodnou alkalicky aktivovanou směs s použitím odpadního materiálu, tedy cihelného prachu, u kterého byly prokázány dobré pucolánové vlastnosti. V této práci bylo studováno sedm druhů směsí, které se pak mezi sebou porovnávají. Směsi byly připraveny ve dvou variantách, přičemž první varianta byla vytvořena z prosátého cihelného prachu o velikosti zrn do 0,125 mm a druhá varianta obsahovala cihelný prach neprosátý z výroby. Studovány pak byly základní fyzikální vlastnosti materiálu, charakteristika pórového systému, mechanické vlastnosti, struktura a tepelné vlastnosti materiálu.

### **Klíčová slova**

Alkalická aktivace, geopolymery, průmyslový odpad, základní fyzikální vlastnosti, mechanické vlastnosti, charakteristika pórového systému, mikrostruktura.

## **Abstract**

The purpose of thesis was to find a suitable alkali-activated mixture by using industrial waste. The waste material was ceramic powder with good pozzolanic properties. In this thesis seven mixture types were studied and mutually compared. They were prepared in two versions. One was created from sieved ceramic powder of grain size up to 0.125 mm, while the other included non-sieved ceramic powder from factory. Basic physical properties of the material, characterization of the porous system, mechanical properties, structure and thermal properties were then investigated.

### **Keywords**

Alkali activation, geopolymers, industrial waste, basic physical properties, mechanical properties, characterization of porous system, microstructure.

---

## Seznam použitých symbolů a zkratek

### Latinské symboly

A	Plocha	$m^2$
$c_p$	Objemová tepelná kapacita	$J/m^3 \cdot K$
a	Součinitel teplotní vodivosti	$m^2/s$
V	Objem	$m^3$
m	Hmotnost	kg
$m_w$	Hmotnost vzorku při maximální saturaci	kg
$m_a$	Hmotnost vzorku určená Archimedovými vahami	kg
$m_d$	Hmotnost vysušeného vzorku	kg
$w_{sat}$	Nasyčený obsah vlhkosti	$kg/m^3$
$R_c$	Pevnost v tlaku	MPa
F	Nejvyšší dosažené zatížení	N
$R_f$	Pevnost v tahu za ohybu	MPa
l	Vzdálenost mezi podpěrami při měření pevnosti	m
b, h	Rozměry průřezu trámečku	m
p	Tlak	MPa
r	Poloměr	m
T	Teplota	$^{\circ}C$

### Řecké symboly

$\lambda$	Součinitel tepelné vodivosti	$W/(m \cdot K)$
$\rho$	Objemová hmotnost	$kg/m^3$
$\rho_w$	Hustota vody	$kg/m^3$
$\rho_{mat}$	Hustota matrice materiálu	$kg/m^3$
$\psi_0$	Otevřená pórovitost	-

---

$\gamma$	Povrchové napětí rtuť	N/m
$\theta$	Úhel smáčení povrchu porézní látky rtuť	°

### Zkratky

K	Prosátý cihelný prach o frakci < 0,125
N	Neprosátý cihelný prach
K9	Vzorek z prosátého cihelného prachu po 90 dnech
N9	Vzorek z neprosátého cihelného prachu po 90 dnech
MK	Metakaolin
Ms	Silikátový modul
NaOH	Hydroxid sodný
EM	Elektronová mikroskopie

# 1 Úvod

Alkalicky aktivované materiály, někdy také nazývány geopolymery, jsou známi již mnoho let. Geopolymery jsou na první pohled nerozeznatelné od kamene, svými vlastnostmi jej však převyšují. Nabízejí velké množství modifikací a dosahují jedinečných kombinací vlastností. Mezi kladné vlastnosti těchto materiálů patří především jejich vysoká pevnost v tlaku, odolnost vůči vysokým teplotám, které se pohybují až do 1000 °C, kde již cement nelze použít. Dále také vykazují odolnost vůči kyselým dešťům, bakteriím a ohni [1]. Tento materiál významně šetří životní prostředí, jelikož při jeho výrobě vzniká daleko menší množství CO<sub>2</sub> než při výrobě cementu. Pro výrobu alkalicky aktivovaného materiálu lze použít i odpadní suroviny, které by jinak byly zátěží.

Geopolymery jsou anorganické polymerní materiály, vyrobené z hlinitokřemičitanových materiálů, způsobené geopolymerací v zásaditém prostředí za normální teploty a tlaku [2]. Patří do skupiny minerálních pojiv blíže příbuzných přírodním zeolitům [3]. Geopolymerací lze přeměnit řadu odpadních surovin, jako jsou například elektrárenské popílky, vysokopeční strusky, křemičité úlety, nebo i cihelný odpad.

Při přípravě geopolimerů vzniká daleko menší množství CO<sub>2</sub>, než je tomu u portlandského cementu. Tyto materiály totiž můžeme označit jako materiály šetřící životní prostředí, jelikož při přípravě tohoto materiálu je vznik emisí CO<sub>2</sub> snížen o více než 50 %. Další výhodou těchto materiálů je stabilizace nebezpečných a radioaktivních odpadů. Oproti jiným metodám stabilizace odpadů pomocí vertifikace či cementace je tento způsob daleko méně energeticky náročný. Geopolymerní matrice je díky svým vlastnostem výhodnější oproti klasickým cementovým nebo skelným matricím. Tento fakt je prokázán ve studiích v oblasti stabilizace odpadů obsahujících těžké kovy nebo nebezpečný radioaktivní odpad [4].

Cílem této práce bylo studium alkalicky aktivovaného materiálu, ve kterém byl použit cihelný prach. Pro aktivaci navržených optimalizovaných směsí bylo použito vodní sklo a hydroxid sodný. Použitý odpadní materiál, tedy vypálený jemně mletý cihelný střep lze díky jeho vlastnostem zařadit k materiálům s pucolánovou aktivitou. Je to tedy materiál, který má sám o sobě malé, nebo žádné pojivové vlastnosti, ale pokud je v jemně mleté formě a v přítomnosti vlhkosti, reaguje s hydroxidem vápenatým při běžných teplotách za tvorby sloučenin s významnými pojivovými vlastnostmi [2].

V této práci byl cihelný prach alkalicky aktivován vodním sklem a hydroxidem sodným. Bylo vyrobeno 7 druhů směsí, přičemž v první variantě byl použit cihelný prach prosátý o frakci do 0,125 mm a v druhé variantě byl použit cihelný prach neprosátý, přímo z výroby. Následně byly porovnávány základní fyzikální vlastnosti materiálů, charakteristika pórového systému, mechanické vlastnosti, struktura studovaného materiálu a tepelná vodivost.

## 2 Historie alkalicky aktivovaných materiálů

Novodobé výzkumy spojené s rozvojem znalostí geopolymerů ukazují, že tento materiál nemusí být pro lidstvo ničím zcela převratným, ale že v historii byl používán již mnohokrát na různých místech světa. Jedná se o informace založené jak na chemických analýzách daných materiálů, tak interpretaci starých textů v novém světle současných poznatků [5, 6].

První použití alkalicky aktivovaných materiálů s největší pravděpodobností spadá již do starověku, kde se polemizuje zejména o jejich užití při stavbě pyramid v Egyptě a zikkuratů v Mezopotámii. Například v roce 1974 totiž přišel francouzský profesor chemie Joseph Davidovits s tím, že každý kámen lze vytvořit uměle. Jeho hypotézu přednesl v roce 1974 na egyptologickém kongresu v Lyonu. Řekl, že pyramidy jsou postaveny z umělého kamene a tento materiál nazval geopolymerem [6].

Davidovits tvrdil, že stavebníci ke stavbě pyramid využívali období záplav, kdy se Nil rozlil a oni tak využili mokré písek z nejbližšího okolí. Na místě ho pak pěchovali do forem, smísili s aktivačními prostředky a pak nechali směs postupně vysoušet sluncem, až se proměnila v litý kámen [1].

Teorie Josepha Davidovitse není zcela potvrzena, ale dle jeho prohlášení, materiál z kterého jsou pyramidy postaveny, obsahuje vodu, pohlcuje záření a jsou v něm nepatrné vzduchové bubliny. Žádná z těchto vlastností se ale u přírodních kamenů nevyskytuje. Navíc ve vzorcích jsou některé složky amorfní – nekrystalizované. Dalším důkazem může být fakt, že pokud vedeme kvádrem řez, zjistíme, že ve spodní části je hustější než v horní části, nebo že v kvádrech byly nalezeny vlasy [1].

Podle Davidovitse tvárnice obsahují 93 – 97 % složek přírodního vápence a zbytek tvoří pojivo. V pojivu převažuje kaolinitický jíl z vápence v Gíze a přídavek žíravé sody, který je podstatný, jelikož výslednou hmotu pojiva změnil v geologické lepidlo [1].



Obrázek 1. Průřez pyramidové tvárnice [1]

Jednou z prvních aplikací ve stavebnictví byly žáru odolné dřevoštěpkové panely vyrobené v letech 1972 – 1976. Jednalo se o desky složené z dřevěného jádra a vnější vrstvy z SILIFACE Q nanokompozitního nátěru. Vývoj panelů trval 4 roky a následně byl patentován.

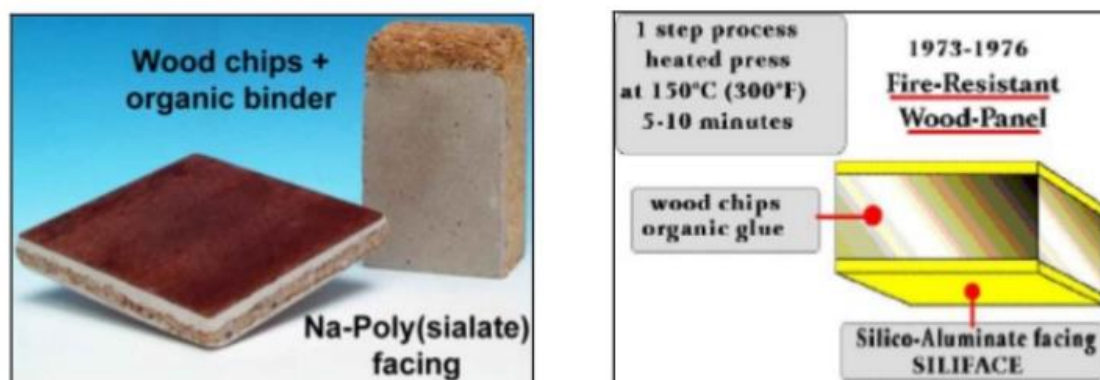


Figure 1!: Manufacture of fire-resistant wood-chipboards faced with geopolymer (Na-Poly(sialate))

Obrázek 2. Žáruodolné dřevoštěpkové panely [7]

V letech 1977 – 1982 byla vynalezena technologie L.T.G.S. kde v zásaditém prostředí geopolymerní směs schne při teplotách 50 °C – 250 °C. Směs obsahovala v koncentracích od 2 do 6 % váhy keramickou pastu a vznikl tak vodě odolný materiál, který vykazoval vysokou mechanickou pevnost [1, 6, 8].

V letech 1979 – 1995 byla skupinou vědců vyvinuta tekutá pojiva, která byla anorganickým ekvivalentem organických pryskyřic. Obchodní názvy těchto produktů byly: GEOPOLYMIT, TROLIT WILLIT. Dalšími geopolymerními pojivy byly například napěněné gopolymerní hmoty [1, 6, 8].

V roce 1983 vznikla francouzská společnost QUAZITE, která vyráběla materiály z minerálních surovin kombinovaných s polymery a monomery, tedy vlastně beton s organickým pojivem. Společnost se rozhodla začít vyvíjet první vysokopevnostní geopolymerní pojiva a po měsíci tak vznikla dceřiná společnost PYRAMENT. Geopolymerní cement byl vyroben z portlandského cementu, popílkou, metakaolinu, mleté strusky a uhličitanu draselného. Materiál vykazoval vysoké počáteční pevnosti, po 4 hodinách zrání byly pevnosti cementu již okolo 20 MPa, po 28 dnech kolem 70 – 100 MPa. Díky těmto vlastnostem tak mohl být použit na opravu letištních ploch.

Dále byl v roce 1989 v ruském městě Lipeck postaven dvacetiposchodový dům ze struskoalkalického betonu bez použití portlandského cementu [1, 6, 8].

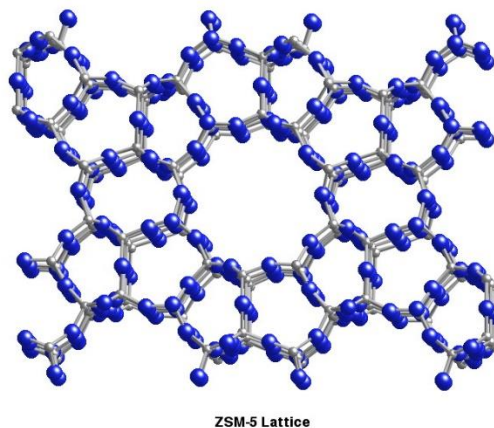


## 3 Geopolymery

### 3.1 Co jsou geopolymery

Pojem geopolymery zavedl prof. Davidovits v sedmdesátých letech minulého století. Nazval a popsal alkalicky aktivované aluminosilikátové materiály, složení typu polysialát a jeho varianty, které jsou někdy užívány v obecném popisu geopolymerních pojiv [3].

Geopolymery patří do skupin minerálních pojiv, které jsou blízce příbuzné přírodním zeolitům. Jejich struktury jsou složeny z polymerních sítí Si-O-Al podobných těm, které se objevují v zeolitech. Hlavním rozdílem je rentgenoamorfni charakter geopolymery, zatímco zeolity jsou krystalické [3].



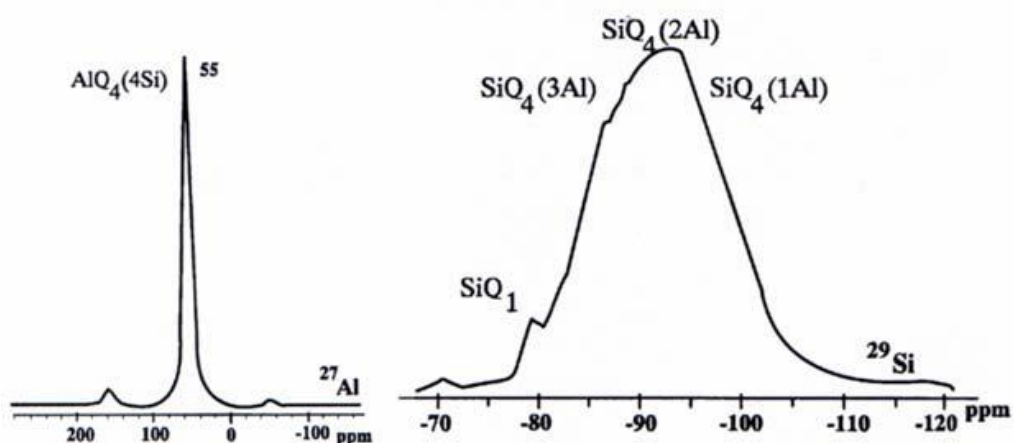
Obrázek 3. Struktura zeolitu [9]



Obrázek 4. Struktura geopolymery [10]

Geopolymery jsou anorganické uměle vyrobené (polymerní) materiály, které vznikají z reakcí základních hlinito-křemičitých materiálů v zásaditém prostředí za normální teploty a tlaku. Tato reakce je označována jako geopolymrace. Díky této reakci můžeme využít velké množství odpadních surovin a přeměnit je tak na plnohodnotné geopolymerní materiály [1].

Podle Davidovitse má pojem geopolimer striktně danou definici, kde  $^{27}\text{Al}$  NMR spektra musí mít pík při 55 ppm. Dál pak Al smí být jen a pouze v koordinaci 4, což je patrné v následujícím obrázku 5. Jinak tyto látky dle Davidovitse nesmí být nazývány geopolymery, nýbrž jen pouze alkalicky aktivované látky. Tato striktně prosazovaná definice ale platí jen pro látky vzniklé alkalickou aktivací čistého metakaolinu [11].



Obrázek 5. Al a Si NMR spektra podle Davidovitse [12]

Pokud opustíme striktní definici geopolimeru podle Davidovitse (vázané na čistý metakaolin), dostáváme se k velmi rozsáhlé nové skupině anorganických pojiv se značným ekologickým a energetickým potenciálem [11].

### 3.2 Geopolymrace a struktura geopolimeru

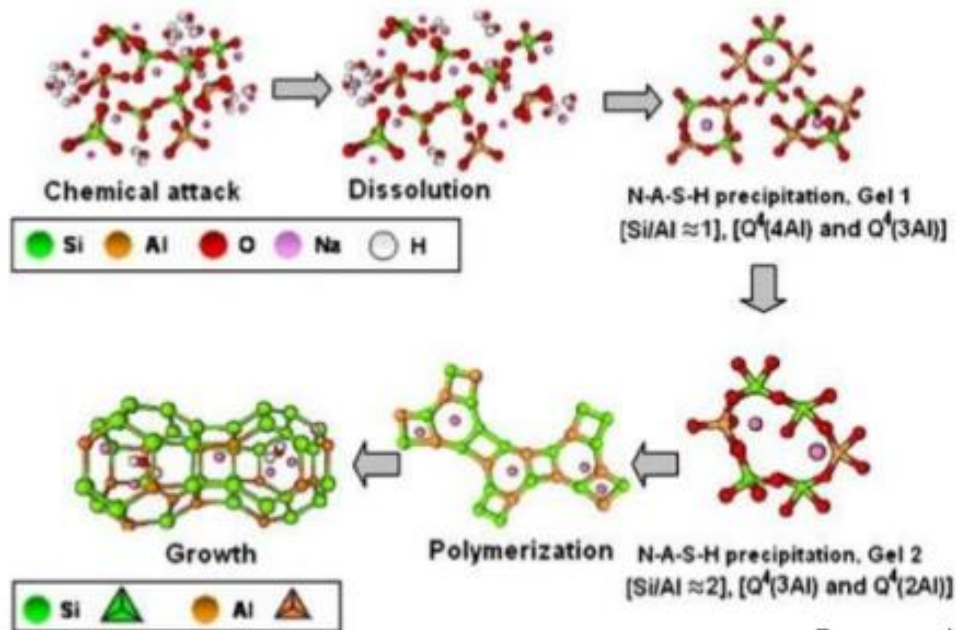
Podstatou geopolymrace je alkalická aktivace, což je proces, při kterém aluminosilikátové složky, obsažené v surovině, reagují se sloučeninami alkalických kovů, nejčastěji s křemičitany. [3]

Geopolymrace je reakce aluminosilikátového materiálu s alkalickým roztokem s vysokou koncentrací  $\text{OH}^-$  iontů, kdy je pH větší než 12. Počáteční tvorba geopolimeru, spojená s rozpuštěním aluminosilikátu v silně zásaditém prostředí, je v podstatě alkalickou hydrolyzou sloučenin s kyslíkovými můstky mezi jednotlivými  $\text{SiO}_4^{4-}$  a  $\text{AlO}_4^{4-}$ .

Rozpouštění amorfních aluminosilikátů je poměrně rychlé, a to vede k rychlému vytvoření přesyceného roztoku obsahujícího monomerní složky  $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$ ,  $[\text{SiO}(\text{OH})_3]^-$ ,  $[\text{SiO}_2(\text{OH})_2]^{2-}$ . Tyto složky mezi sebou kondenzují a vytvářejí aluminosilikátový gel, který následně vede k tvorbě nových aluminosilikátových sloučenin, jejichž struktura je závislá na celkovém poměru Si:Al [3].

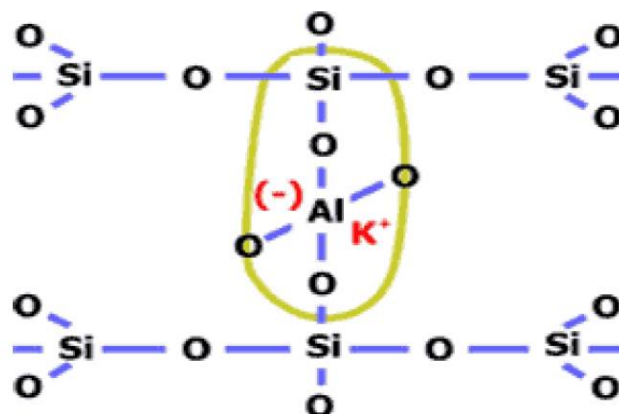
Podle některých zdrojů lze geopolymerační proces shrnout do tří následujících fází:

1. Uvolňování Si a Al atomů z původního výchozího materiálu pomocí hydroxylových iontů
  - Pokud se výchozí materiál dostane do kontaktu s alkalickým roztokem, pak dochází k rozpuštění základního materiálu ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  a  $\text{SiO}_2$ ) a z pevné látky do roztoku přechází v podobě křemičitanu a tetrahydroxhlinitanu.
2. Transport a orientace nebo kondenzace prekurzorových iontů do monomerů:
  - Po rozpuštění části  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a  $\text{SiO}_2$  z povrchu částic výchozího materiálu začíná tato část difundovat do gelové fáze. Tento proces způsobuje snížení koncentrace těchto složek na povrchu hlinito-křemičitých částic, což se projevuje dalším rozpouštěním  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a  $\text{SiO}_2$  z povrchu částic.
3. Polykondenzace (polymerace) monomerů do polymerických struktur:
  - V této fázi se do geopolymerace zapojuje křemičitan, což je jedna z nejdůležitějších reagujících látek. Křemičitan polykondenzuje s hlinitanem do té doby, než se  $\text{Al}_2\text{O}_3$  rozpustí z povrchu hlinitokřemičitanového výchozího materiálu. Tato fáze může být významně ovlivněna vyšším pH a vyšší teplotou [13].



Obrázek 6. Geopolymerization process [14]

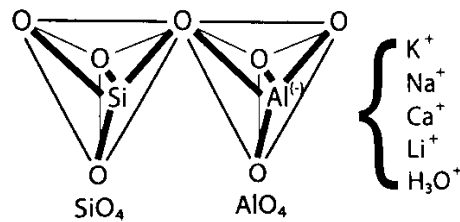
Geopolymery jsou amorfní až semikrystalické 3D aluminosilikátové materiály, které jsou tvořeny polymerními řetězci typu Si-O-Al-O [15].



Obrázek 7. Si-O-Al-O řetězce [1]

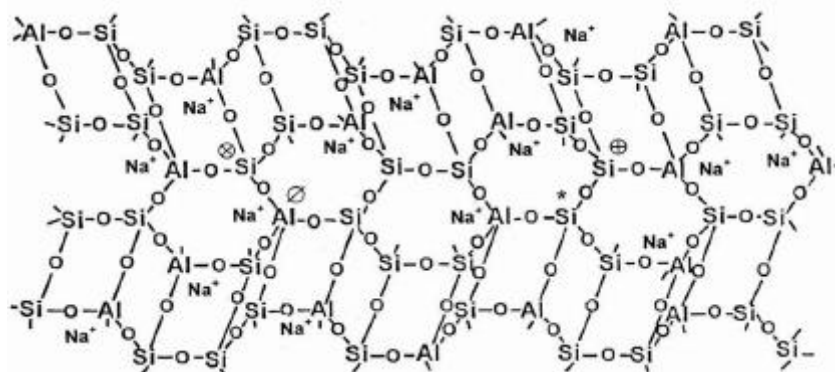
Ty vznikají v alkalických podmínkách kondenzací vhodných amorfních forem obsahujících  $\text{SiO}_2$  a  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Polysilikátové řetězce tvoří zesíťované 3D struktury, které se vyznačují vysokými pevnostmi v tlaku a tepelnou stabilitou [15]. Vzniká tak trojrozměrná aluminosilikátová síť empirického vzorce:  $\text{Na}, \text{K}_n\{-(\text{Si}-\text{O})_z-\text{Al}-\text{O}\}_n \cdot w\text{H}_2\text{O}$ , kde  $n$  je stupeň polykondenzace a  $z$  představuje 1, 2 nebo 3 [11].

Struktura výsledného geopolymery je tvořena poměrně náhodně poskládanou trojrozměrnou sítí v rozích pospojovaných tetraedrů  $\text{SiO}_4$  a  $\text{AlO}_4$  [2].



Obrázek 8. Tetraedr  $\text{SiO}_4$  a  $\text{AlO}_4$  [12]

Poměr Al/Si je v rozsahu 1:1 až 1:4. Záporné náboje vnesené prostřednictvím tetraedrů  $\text{AlO}_4$  jsou ve struktuře vyrovnány přítomností odpovídajícího počtu kladných nábojů vyskytujících se ve formě monovalentních a bivalentních kationtů. Kationty jsou umístěny v mezerách mezi tetraedry společně s vázanou vodou.



Obrázek 9. Teoretický strukturální model geopolymerních pojiv [12]

Na rozdíl od přírodních aluminosilikátů s výraznou krystalickou strukturou, konstituce geopolymérů obsahuje jak amorfni, tak krystalickou fázi. Geopolymery vzniklé za normální teploty disponují uspořádáním na krátký dosah, nepřekračují několik nanometrů, zatímco u jiných, vzniklých za vyšších teplot, se mohou vyskytovat krystalické regiony o rozměrech řádu mikrometrů [2].

### 3.3 Vlastnosti geopolymérů

Geopolymery jsou pevné, ve vodě nerozpustné polymerní sloučeniny vysoce odolné vůči teplotě, zředěným kyselinám a zásadám a s dobrými mechanickými vlastnostmi [2].

Existuje však několik faktorů, které tyto výsledné vlastnosti ovlivňují. Jedním z mnoha faktorů může například být charakter výchozí suroviny. Dále pak poměr  $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3:\text{CaO}$  v surovině, složení kameniva, nebo druh aktivátoru. Také velmi záleží na způsobu přípravy, kde závisí na teplotě, při které reakce proběhla, na způsobu zamíchání i vibrování.

Výběrem vhodných vstupních materiálů a obměnou podmínek zpracování a vytvrzování je možné dosáhnout široké škály vlastností vytvářených geopolymerních systémů a přizpůsobit je specifickým požadavkům [2].

Geopolymery mají oproti betonu na bázi portlandského cementu především značně větší teplotní stálost. Jsou odolné k teplotám kolem 1000 °C, na rozdíl od betonu, který se začíná rozpadat při teplotách nad 300 °C. Pevnost v prostém tlaku závisí na množství a druhu plniva, pohybuje se kolem 10 – 60 MPa. Mají také velmi nízkou tepelnou vodivost, takže se dá použít jako materiál pro konstrukce, u nichž vyžadujeme dobré tepelně-izolační vlastnosti [1, 2].

### **3.4 Fixace těžkých kovů**

Řada odpadů vznikajících ve výrobních odvětvích s sebou nese nebezpečné vlastnosti a problematika nakládání s odpady je aktuální tematikou napříč různými průmyslovými odvětvími, ať už se jedná o jejich využívání, nebo odstraňování. Na základě požadavků zakotvených v legislativě dochází k nakládání s těmito odpady tak, aby došlo k omezení interakce škodlivých složek s životním prostředím. Uplatněné způsoby nakládání s těmito materiály mají za cíl odstranění nebo omezení nebezpečných vlastností odpadů. Jedním ze způsobů, jak je možné splnit předchozí požadavek, je stabilizace, neboli solidifikace odpadu [16].

Princip solidifikace/stabilizace odpadů je založen na smíchání odpadů s vhodnými pojivy a plnivy tak, aby byly žádoucím způsobem upraveny jejich fyzikální a chemické vlastnosti. Cílem tohoto procesu je změnit vlastnosti odpadu tak, aby splnily požadavky pro uložení na skládky [17].

Geopolymery lze označit za materiály šetřící životní prostředí, neboť při jejich přípravě je vznik emisí CO<sub>2</sub> snížen o více než 50 %. Také vlastnosti geopolymerních matic při stabilizaci/solidifikaci nebezpečných a radioaktivních odpadů ukazují výhody oproti současným energeticky náročnějším způsobům stabilizace/solidifikace odpadů metodami vitrifikace nebo cementace [4].

Geopolymery se vyznačují schopností fixovat a imobilizovat ve své struktuře těžké kovy, radioaktivní prvky a jiný odpadní materiál. Schopnost matrice inhibovat jednotlivé látky se zjišťuje pomocí vyluhovatelných testů (zjišťuje se koncentrace odpadních látek ve vyluzích). Vyluhovací medium, doba vyluhování atd. se liší podle použité metody. Podle

výsledků dřívějších výzkumů se efektivita inhibice v geopolymerních maticích liší pro různé prvky a také je ovlivněna vlastnostmi matrice a podmínkami geopolymerizace [18].



*Obrázek 10. Stabilizace/solidifikace [19]*

Fyzikální inhibice spočívá v zapouzdření odpadních látek v geopolymerní matici. Míra imobilizace je ovlivněna pórovitostí tuhnoucí matrice, a tudíž souvisí s pevností matrice. Matrice s nejefektivnější inhibicí mají nejmenší póry a dosahují největších pevností.

V případě chemické vazby je více možností jak může být odpadní látka fixována v geopolymerní matici. Některé látky se mohou zabudovávat do nově vznikajících aluminosilikátových fází. Jsou to většinou látky, které jsou dobře rozpustné a díky tomu jsou rozptýlené v celé matici. Přesto toto rozptýlení není rovnoměrné a v matici se potom objevují místa více obohacená těmito látkami. Zdá se, že kovy, které jsou chemicky vázány v matici, neovlivňují základní Si a Al tetraedry, ale ovlivňují tvorbu nových aluminátosilikátových fází [18].

Další látky se inhibují díky tomu, že při geopolymerizaci mění svou formu (většinou díky vysokým pH při alkalické aktivaci). Vznikají tak sloučeniny, které jsou méně rozpustné než ty původní a díky tomu se snižuje možnost jejich vyluhování [20].

Na inhibici látek v geopolymerních maticích má vliv mnoho faktorů. K hlavním faktorům patří především chemické složení matrice, typ použitého aktivátoru, pH a další. Velký vliv má na inhibici právě pH alkalického aktivátoru. Se zvyšujícím pH se zároveň

zlepšuje imobilizace těžkých kovů (Pb, Cu) i přesto, že naopak s klesajícím pH vzrůstá nerozpustnost většiny kovových sloučenin. To je možné díky tomu, že vyluhovatelnost nezávisí pouze na rozpustnosti kovových sloučenin, ale také na propustnosti matrice. Při nižších pH obsahuje matrice větší množství pórů a stává se více propustnou pro vyluhovací kapalinu [18].



## 4 Materiály vhodné pro alkalickou aktivaci

Pro přípravu alkalicky aktivovaných materiálů se používají latentně hydraulické látky, nebo pucolány. Těmi mohou být různé přírodní práškové materiály, nebo také vedlejší průmyslové produkty bohaté na  $\text{SiO}_2$  a  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Ty lze aktivovat použitím vhodných alkalických aktivátorů, kde pak výsledkem reakce je hydraulický systém, který po smíchání s vhodným množstvím vody tuhne a tvrdne [2, 6].

Aby alkalická aktivace probíhala, musí alespoň základní frakce  $\text{SiO}_2$  a  $\text{Al}_2\text{O}_3$  použitých vstupních surovin být přítomny v nekrystalické, reaktivní formě. Vstupní materiál může obsahovat větší množství  $\text{CaO}$ , dále také může obsahovat další doprovodné oxidy. Mezi materiály s těmito charakteristikami patří například strusky, popílký, metakaolin nebo keramické odpady [2, 11].

### 4.1 Vedlejší průmyslové produkty

Nejvíce vhodnými materiály pro alkalickou aktivaci jsou právě mleté strusky a popílký.

#### 4.1.1 Mletá struska

Pro výrobu mohou být využity různé druhy strusek. Mohou to být například vysokopecní, granulované strusky, strusky z výroby fosforu, strusky z výrob  $\text{Pb}$ ,  $\text{Ni}$ ,  $\text{Cu}$ . Nejvíce vhodná je granulovaná vysokopecní struska s větším obsahem skelné fáze, která vznikla rychlým ochlazením taveniny. Latentně hydraulické vlastnosti strusky jsou ovlivněny jejím chemickým a fázovým složením. Pokud je struska pomalu chlazena, vzniká tak krystalická fáze a pak je struska málo reaktivní [11, 13].

Pevnost v tlaku tohoto materiálu po 28 dnech je kolem 30-100 MPa, kde záleží na použitém druhu aktivátoru. Velikou výhodou tohoto materiálu je vysoká odolnost vůči agresivnímu prostředí [11].

#### 4.1.2 Popílký

Popílký vznikají při spalování pevných, zpravidla jemně mletých paliv v uhelných elektrárnách. Zachycuje se z kouřových plynů v mechanických a elektrických odlučovačích.

Můžeme použít hnědo nebo černouhelný, kde se střední velikost zrn pohybuje kolem 10-30  $\mu\text{m}$ . Nevýhodou popílku je jeho velká variabilita chemického složení [21].

U výroby geopolymery z popílku mohou být použity popílky mleté nebo nemleté a to převážně třídy F, nebo i méně časté třídy C. Ukázalo se, že mletí je vhodný způsob úpravy popílku zejména v urychlení vývinu počátečních pevností a snížení porozity v popílkové hmotě [2, 11, 22].

Optimální příměs hydraulicky aktivní látky může být struska, nebo slínek, které jsou zdrojem Ca iontů. Pevnosti v tlaku vzniklé směsi po 28 dnech se pohybuje kolem 20-60 MPa a za přítomnosti látek obsahující Ca je to až 160 MPa [11].

## 4.2 Metakaolin

Méně vhodným materiálem pro alkalickou aktivaci je metakaolin a to z důvodu vysokého faktoru náročnosti výroby. Je to hlinitokřemičitý materiál, vyrobený výpalem kaolinů, kaolinitických jílů apod. v teplotním rozmezí 600-900  $^{\circ}\text{C}$ . Základní složkou kaolinu je kaolinit, který vzniká zvětráváním živců [11, 23].

Výsledné pevnosti materiálu se sice pohybují jen okolo 10-80 MPa, jsou ale značně odolné vůči působení vnějších vlivů jako jsou agresivní látky, vysoké teploty či mrazuvzdornost [11].

## 4.3 Bentonit

Bentonit je hornina vznikající zvětráváním matečné horniny z čediče. Je charakteristická vysokým obsahem jílových minerálů. Mezi významné vlastnosti patří velmi dobrá sorpce, vysoká schopnost výměny kationtů a při styku s vodou velmi bobtnává. Její chemické a minerální složení je různé, závisí na vzniku ložiska. Horninu tvoří z 60 až 80 procent montmorillonit. Světové zásoby bentonitu jsou velmi vysoké, jsou odhadovány na více než 1400 milionů tun [24].

## 4.4 Keramický odpad

Keramika na bázi přírodních surovin je jeden z nejdéle používaných materiálů v historii. Je to první záměrně vyrobený umělý materiál, který se vyznačuje vysokou stabilitou fyzikálních a mechanických vlastností. V některých obdobích historie jsou proto keramické výrobky často jediným hmotným dokladem o lidské činnosti a existenci [25].

Cihlářské výrobky jsou pórovité keramické materiály, které jsou charakteristicky zbarvené do červena, červenohněda nebo okrova. Toto zbarvení je způsobeno obsahem oxidu železitého v surovinách. Hlavními surovinami pro výrobu tohoto keramického materiálu jsou cihlářské jíly a hlíny, mezi příměsi patří písek a ostřiva jako je například popílek. Tepelně izolační vlastnosti a pórovitost lze zvýšit přidáním spalitelných látek, jako jsou dřevěné piliny a práškové uhlí. Cihlářské výrobky se tvarují lisováním ve šnekových lisech tažením nebo ražením, kde se v tunelových pecích následně suší a vypalují při teplotách 850 – 1050 °C [25, 26].

Z hlediska základních fyzikálně-mechanických vlastností se cihlářské výrobky vyznačují nasákavostí okolo 10 – 22 % a objemovou hmotností 1000 – 2000 kg/m<sup>3</sup>. Jejich pevnost v tlaku se pohybuje od 3 MPa až do 60 MPa, kde záleží na teplotě výpalu střepu. Mezi další významné vlastnosti keramického střepu patří mrazuvzdornost, tepelná vodivost, která se pohybuje od 0,5 do 1,0 W/m.K a teplotní roztažnost je přibližně 5.10<sup>-6</sup> K<sup>-1</sup> [25].

Keramické střepy vznikají jako vedlejší produkt při broušení pálených cihel. Lze je zařadit k materiálům s pucolánovou aktivitou. Pucolány mohou být přírodní, nebo průmyslové. Jsou to křemičité, nebo hlinito-křemičité látky, které po smíchání s vodou samy netvrdnou. V jemně mleté formě a při běžných teplotách za přítomnosti vlhkosti reagují díky obsahu amorfního nekystalického SiO<sub>2</sub>, reaktivní formy Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> s hydroxidem vápenatým za vzniku hydratovaných křemičitanů a hlinitanů vápenatých, které mají významné pojivové vlastnosti. Jsou to produkty, které jsou velice blízké produktům, které vznikají při hydrataci portlandského cementu, které tvoří pevnou strukturu ve vodě nerozpustných sloučenin. Vytváření pevné struktury závisí na druhu pucolánu, pucolánové aktivitě, velikosti zrn, teplotě atd [27, 28].

## 4.5 Vhodné aktivátory

Mezi nejčastěji používané alkalické aktivátory patří roztoky sloučenin sodíku a draslíku – hydroxidy, uhličitany a vodní skla, použité samostatně nebo ve směsi. Alkalický aktivátor je klíčovou složkou geopolymerní reakce, který zásadně ovlivňuje jak pevnost, tak vlastnosti vzniklého produktu. Podle již provedených výzkumů je nejefektivnější použití aktivátoru, který obsahuje samostatné vodní sklo, nebo směs vodního skla s roztokem hydroxidu. Tato kombinace pak dosahuje nejvyšších pevností. Aktivátory se do směsi přidávají většinou jako roztoky, mohou se ale také vyskytovat ve formě prášku [2].

Nejčastěji používanými aktivátory jsou sodné roztoky a to z důvodu jejich nižší ceny. Při použití sodných aktivátorů ale dochází k tvorbě výkvětů na rozdíl od aktivátorů draselných. Důvodem je větší iontový poloměr draselných kationtů ve srovnání s ionty sodnými. Proto se při aktivaci draselnými roztoky nevytváří výkvěty. Navíc má výsledný materiál při použití draselných roztoků vyšší odolnost proti vysokým teplotám.

Mezi nejúčinnější aktivátor patří vodní sklo, kde je důležitý silikátový modul, tedy molární poměr  $\text{SiO}_2/\text{Me}_2\text{O}$  (Me = Na, K) [2].

## 5 Výzkum v oblasti alkalicky aktivovaných materiálů

V oblasti alkalicky aktivovaných materiálů již bylo vynalezeno několik variant geopolymérů. Mezi nejvíce používané materiály pro výrobu geopolymérů jsou především metakaolin, vysokopeční strusky a popílků.

### 5.1 Geopolymery na bázi popílků

Jedním z nejvíce zkoumaným a prováděným geopolymérem jsou právě alkalicky aktivované popílků a lze na toto téma najít mnoho zdrojů.

#### 5.1.1 Alkalická aktivace popílků a biomasy

Například v článku od Christophera R. Shearera a kol. [29] jsou zkoumány směsi, kde byly použity různé druhy popílků. Jedná se o tři rozdílné směsi, kde v první je použit popílek z běžného spalování uhlí, v dalších dvou směsích je použit popílek, který je vyroben ze společného spalování uhlí a biomasy. Ve srovnání mají společně spalované popílků vyšší obsah uhlíku a pojiva z těchto popílků mají tak nižší reakční potenciál. V následující tabulce 1 je uvedeno složení jednotlivých směsí.

*Tabulka 1. Použité složení popílků ve směsi*

Označení	A	B	C
Typ biomasy	-	třísky borovice	tvrdé dřevo
% obsažené biomasy ve směsi	0	4	15

Byly použity dva druhy aktivátorů a to roztok draselný a roztok sodný. Ve všech směsích byl přidán stejný podíl písku. Příprava směsi probíhala smícháním popílků a písku s roztokem po dobu 12 minut a po odlití do formy a zvlhování na vibračním stole byly vzorky umístěny po dobu 7 dnů do vlhkého prostředí o teplotě 40 °C. Složení směsí a výsledné pevnosti v následující tabulce (obrázek 11).

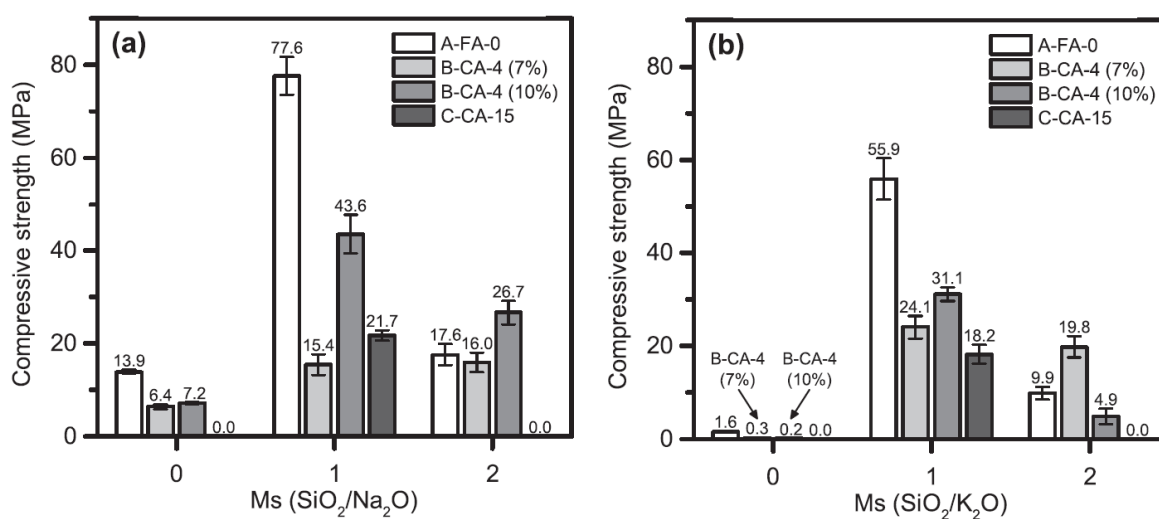
Mortar mix designs for strength testing.

Activator type	Fly Ash <sup>a</sup> (g)	Sand (g)	Hydroxide solution <sup>b</sup> (g)	Silicate solution <sup>b</sup> (g)	Added water for A-FA-0 (g)	Added water for B-CA-4 and C-CA-15 (g)
Na-0-7	600.0	1200.0	176.1	0.0	15.9	105.9
Na-1-7	600.0	1200.0	88.1	128.7	15.9	105.9
Na-2-7	600.0	1200.0	0.0	257.4	15.9	105.9
K-0-7	600.0	1200.0	197.8	0.0	15.9	105.9
K-1-7	600.0	1200.0	98.9	139.5	15.9	105.9
K-2-7	600.0	1200.0	0.0	279.1	15.9	105.9
Na-0-10	600.0	1200.0	251.6	0.0	–	48.4
Na-1-10	600.0	1200.0	125.8	183.9	–	48.4
Na-2-10	600.0	1200.0	0.0	367.7	–	48.4
K-0-10	600.0	1200.0	282.6	0.0	–	48.4
K-1-10	600.0	1200.0	141.3	199.4	–	48.4
K-2-10	600.0	1200.0	0.0	398.7	–	48.4

<sup>a</sup> A-FA-0, B-CA-4 or C-CA-15 fly ash (only B-CA-4 was mixed with 10% Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub> solutions).

<sup>b</sup> Na or K solutions as indicated by the activator type.

Obrázek 11. Složení směsí [29]

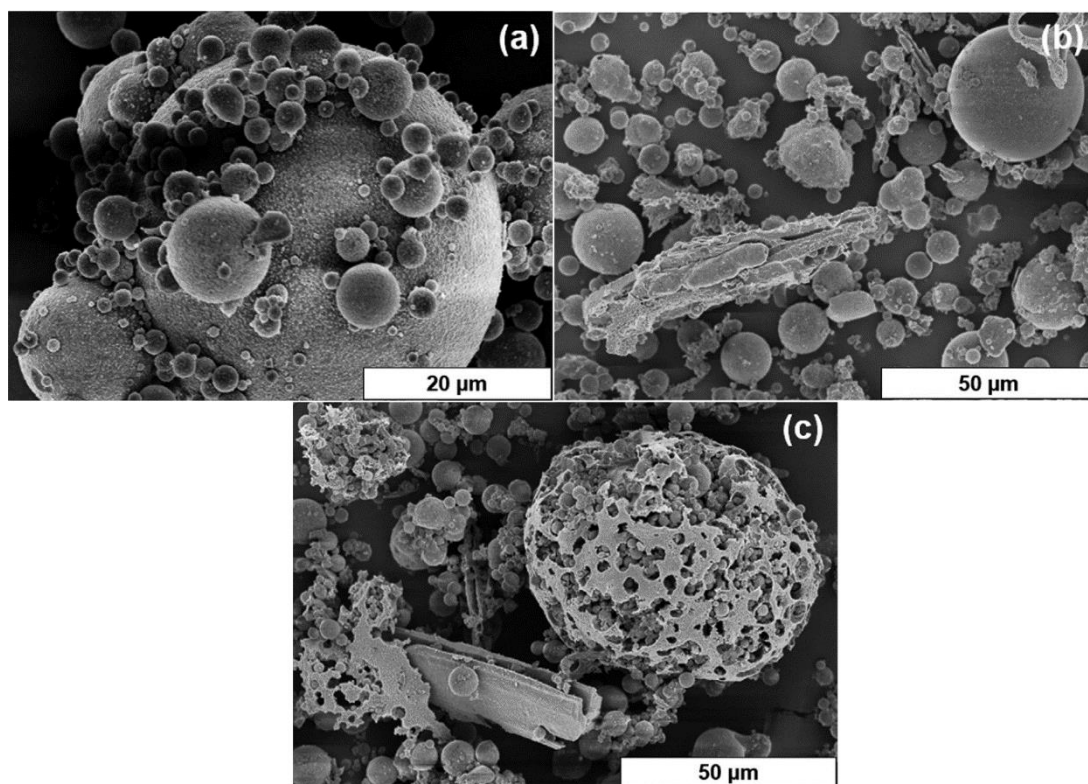


Obrázek 12. Pevnost v tlaku a) sodný aktivátor, b) draselný aktivátor [29]

Z grafů (obrázek 12) je patrné, že při silikátovém modulu Ms=1 vznikají nejvyšší pevnosti. U směsi, která obsahovala pouze popílek z běžného uhlí, dosahují pevnosti až 77,6 MPa při použití sodného aktivátoru.

Dále byla v tomto článku zkoumána mikrostruktura všech tří typů směsí.

Z obrázku 13 lze konstatovat, že typ A má převážně kulovité částice, což charakterizuje morfologii skelné fáze popílku. Směs, která obsahuje popílek z borovice, tedy typ B má výrazně odlišnou morfologii ve srovnání s typem směsi A. Ta je převážně tvořena vláknitými částicemi. U typu C můžeme z obrázku vidět, že jsou v mikrostruktuře obsaženy jak podlouhlé, tak kulové částice, které jsou charakteristické pro popílek z běžného spalování uhlí.



Obrázek 13. obrázky SEM a) A-FA-0, b) B-CA-4 c) C-CA-15 [29]

### 5.1.2 Alkalická aktivace úletového popílku

Také A. Mobili a kol. [30] popisují ve své studii alkalickou aktivaci úletového popílku. Pro výrobu vzorků byl použit popílek vyrobený v uhelné elektrárně, která se nachází v severní Itálii. Specifický měrný povrch popílku má hodnotu  $5000 \text{ cm}^2/\text{g}$ . Jako alkalický roztok aktivátoru byla použita směs křemičitanu sodného s hydroxidem sodným. Chemické složení popílku je uvedeno v tabulce 2, dále pak složení směsi v tabulce 3.

Tabulka 2. Chemické složení popílku v %

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>
FA	44,0	29,1	6,0	5,5	1,5	1,1	0,4	0,9	1,1

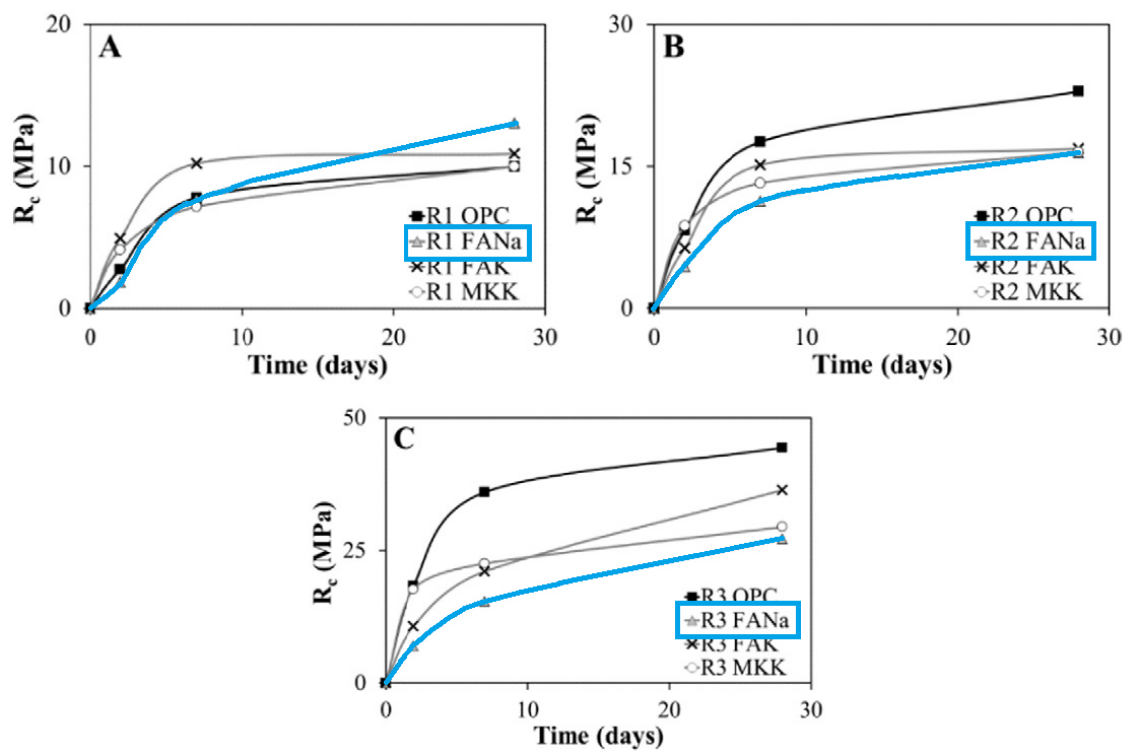
Tabulka 3. Složení směsi

Směs	Písek	Popílek	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	NaOH	Voda
	[g/l]	[g/l]	[g/l]	[g/l]	[g/l]
R1 FANa	1350	500	150	30	120
R2 FANa	1350	500	150	40	110
R3 FANa	1350	500	150	55	95



Obrázek 14. Vzorky [30]

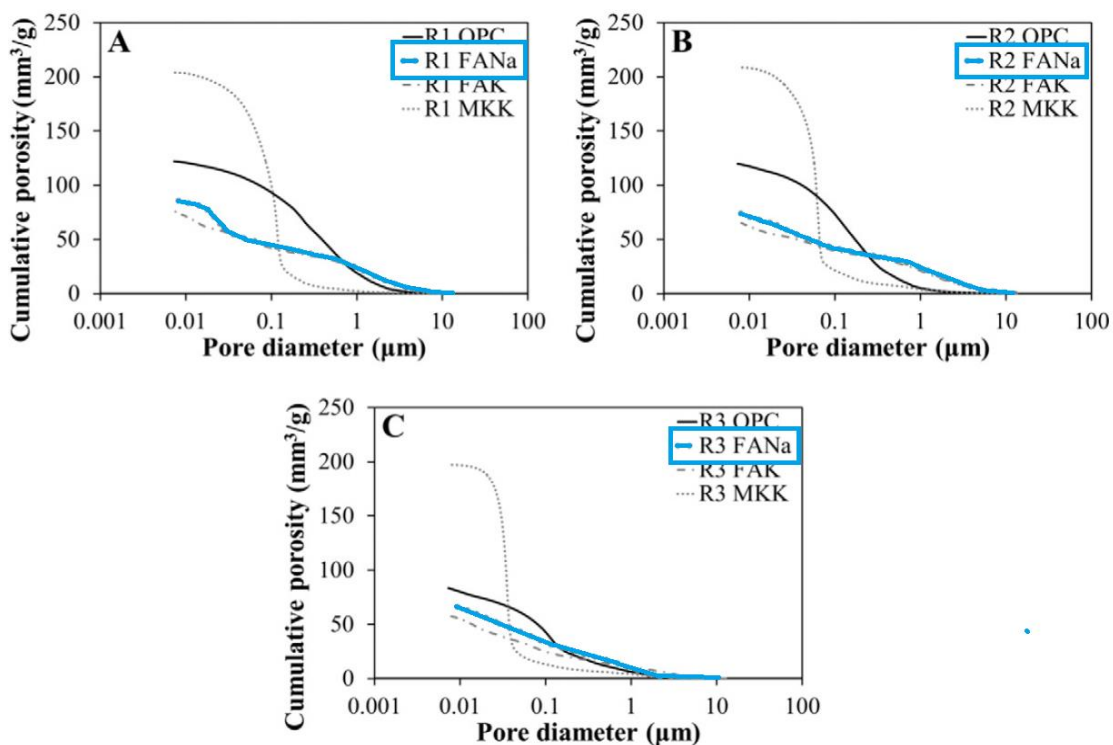
V grafech (obrázek 15) je uveden vývoj pevnosti v tlaku po dobu 28 dní. Z těchto grafů lze pozorovat, že pevnost v tlaku stoupá s vyšším obsahem NaOH a nižším obsahem vody. Tedy nejvyšších pevností nabývá vzorek R3 FANa.



Obrázek 15. Pevnost v tlaku [30]

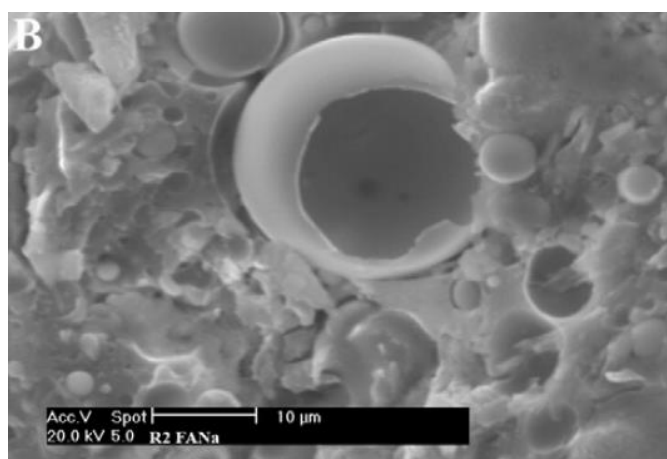


Další z testovaných vlastností byla pórovitost materiálu. Z obrázku 16 je vidět, že porozita materiálu se nijak výrazně neliší.



Obrázek 16. Grafy kumulativní křivka pórů

Na obrázku 17 je znázorněna mikrostruktura SEM směsi R2 FANa. Pro tento materiál jsou charakteristické malé kulovité částice, nezreagovaného popílku, obklopené hustou a kontinuální hlinitokřemičitou hmotou, obvykle známou jako N-A-S-H gel (sodný hydrát hlinitokřemičitého gelu). Je zřejmé, že tento proces není jednotný a v pastě tak může existovat několik morfologií, např: nezreagované částice, částečně zreagované částice, které mají kulovitý tvar, zreagované částice atd [30].



Obrázek 17. Mikrostruktura [30]

## 5.2 Geopolymery na bázi metakaolinu

Dalším často používaným materiálem na výrobu geopolymérů je metakaolin. V práci od A. M. Rashada a kol. [31] se zabývají alkalicky aktivovaným egyptským metakaolinem s příměsí křemenného prachu. V této práci byla zkoumána možnost použití křemenné moučky pro zlepšení zpracovatelnosti směsi a také pro zlepšení mechanických vlastností, jako je pevnost v tlaku a to za normální teploty i po vystavení působení zvýšených teplot. Křemenná moučka byla přidávána v poměru od 0 % do 30 %. Chemické složení metakaolinu, křemenné moučky a složení směsí jsou znázorněny v následujících tabulkách 4 a 5.

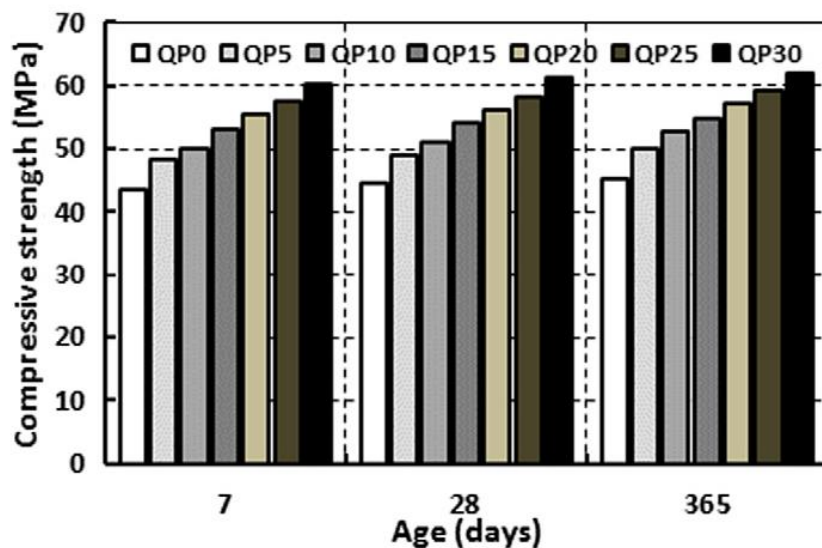
*Tabulka 4. Chemické složení metakaolinu a křemenné moučky*

Složení	Metakaolin [%]	Křemenná moučka [%]
SiO <sub>2</sub>	58,52	98,81
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	35,54	0,14
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,15	0,05
CaO	1,24	0,51
MgO	0,19	0,02
Na <sub>2</sub> O	0,25	0,04
K <sub>2</sub> O	0,05	0,03
SO <sub>3</sub>	0,06	0,03
TiO <sub>2</sub>	0	0,02
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0	0,32
MnO	0	0
L.O.I.	2,74	0,32

*Tabulka 5. Označení a složení směsí*

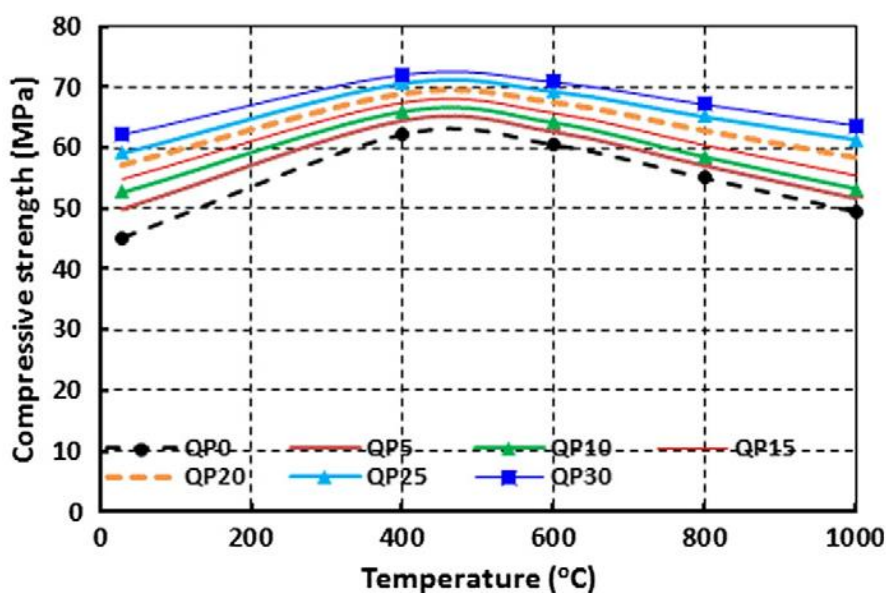
Směs	MK [%]	QP [%]
QP0	100	0
QP5	95	5
QP10	90	10
QP15	85	15
QP20	80	20
QP25	75	25
QP30	70	30

Na vzorcích vyrobených z těchto směsí (tabulka 5) byly změřeny pevnosti v tlaku po 7, 28 a 365 dnech (obrázek 18). Z grafů je patrné, že příbytek obsahu křemenné moučky zvýšil pevnost materiálu.

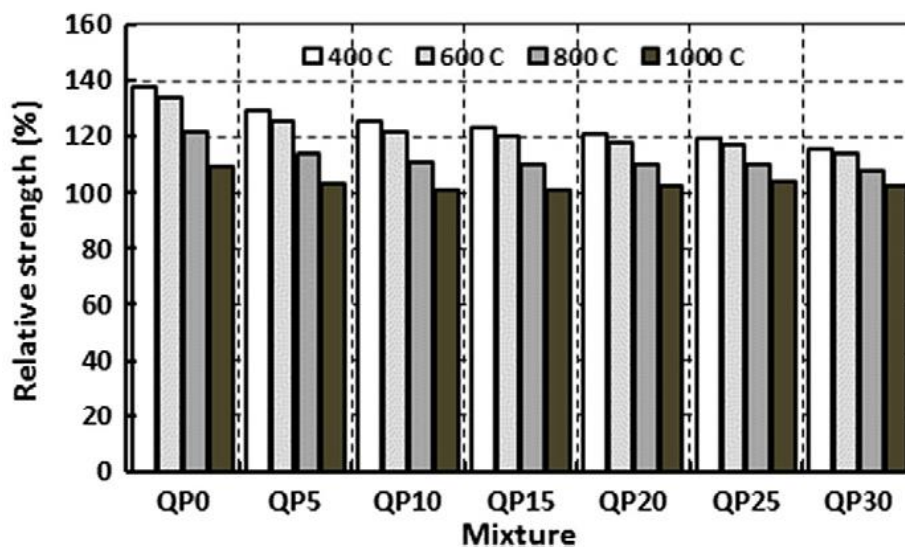


Obrázek 18. Pevnosti v tlaku [31]

Vzorky byly vystaveny od 400 °C do 1000 °C po intervalech 200 °C po dobu dvou hodin. V grafech (obrázek 19, obrázek 20) můžeme vidět, že nejvyšších pevností nabývá materiál po vystavení teploty 400 °C a 600 °C a dále pak s přibývajícím teplotou zase pevnost v tlaku klesá [31].

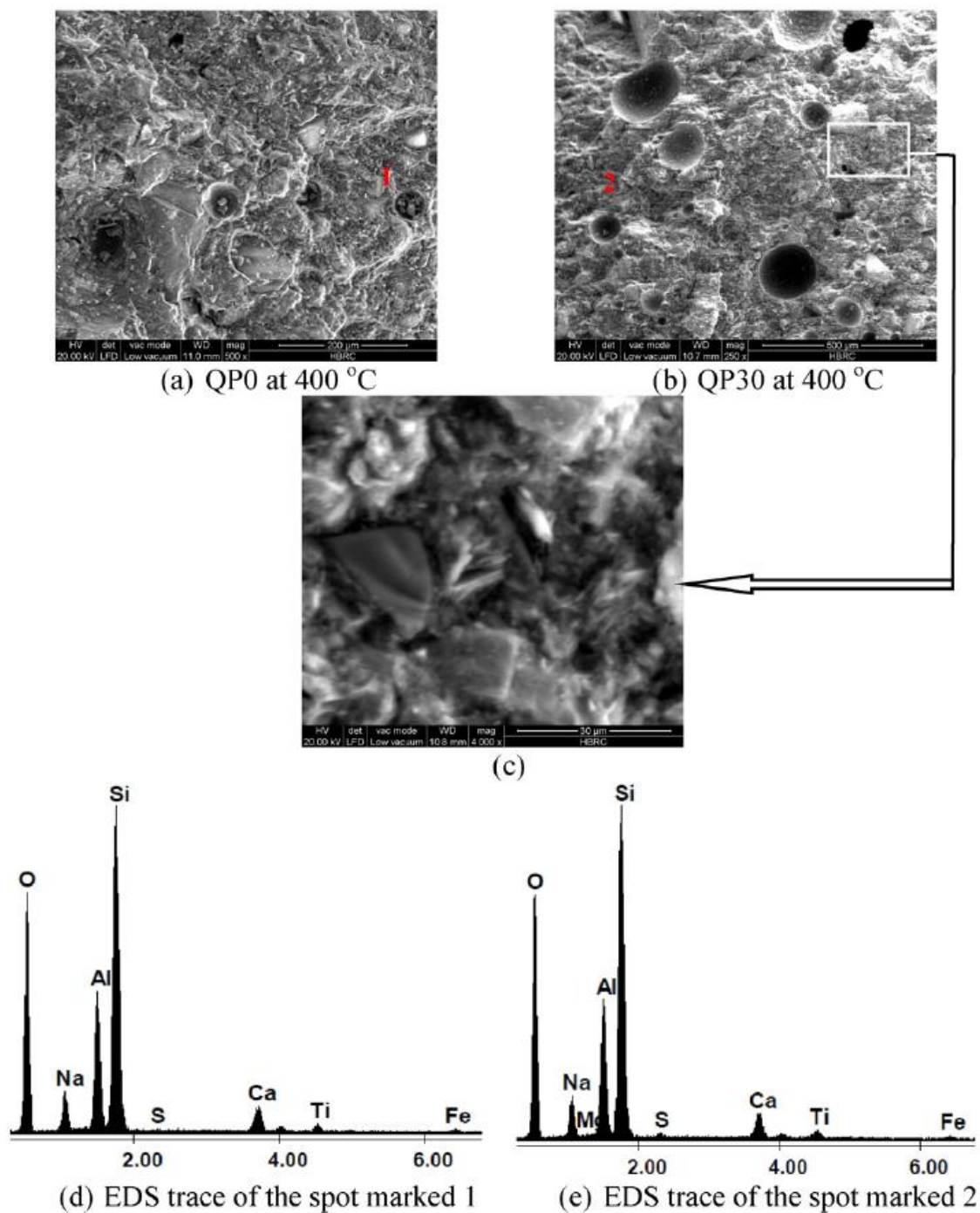


Obrázek 19. Pevnosti v tlaku – teploty [31]



Obrázek 20. Porovnání pevností v % [31]

Na obrázku 21 jsou znázorněny mikroskopické snímky SEM lomové plochy vzorků QP0 a QP30, které byly vystaveny teplotě 400 °C. Mikrostruktura obou vzorků je transformována do matrice a počet nezreagovaných, nebo částečně zreagovaných částic je výrazně nižší, než je tomu u původního materiálu, který nebyl vystaven teplotě. Obrázky (d) a (e) znázorňují EDS spektra, které odpovídají bodům 1 a 2 označeným na mikroskopických snímcích. I když je mikrostruktura vzorku QP30 masivní a více reaguje než vzorek QP0, ve struktuře jsou stále pozorována oddělená zrna (obrázek 21 c) [31].



Obrázek 21. SEM mikroskop a EDS analýza [31]

## 6 Experimentální metody měření

### 6.1 Základní fyzikální vlastnosti

#### 6.1.1 Gravimetrická metoda měření

Pro stanovení hustoty materiálu byla použita gravimetrická metoda měření. Při této metodě byly vzorky umístěny do sušárny, kde byly vystaveny teplotě 60 °C po dobu ustálení hmotnosti vzorku. Po naměření hmotnosti zcela vysušeného vzorku se následně vzorek ponořil do vody po dobu jednoho týdne a poté se znovu zvažila jeho hmotnost na laboratorní váze. Dále se hmotnost vzorku zvažila pod vodou. Z těchto naměřených hmotností a rozměrů vzorku se pak dle známých vztahů vypočítala hustota materiálu, objemová hmotnost a otevřená pórovitost [32, 33]. Nejprve byl stanoven objem  $V$  [m<sup>3</sup>] z naměřených hodnot hmotnosti vzorku při maximální saturaci  $m_w$  [g], hmotnosti vzorku určené Archimédovými vahami  $m_a$  [g] a hustoty vody  $\rho_w$  [kg/m<sup>3</sup>]. Objem  $V$  byl pak vypočítán dle následujícího vztahu

$$V = \frac{m_w - m_a}{\rho_w}$$

Dále se pak určil nasycený obsah vlhkosti  $w_{sat}$  [kg/m<sup>3</sup>], objemová hmotnost  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>], hustota matrice daného materiálu  $\rho_{mat}$  [kg/m<sup>3</sup>] a otevřená pórovitost  $\psi_0$  [-] s použitím následujících vztahů

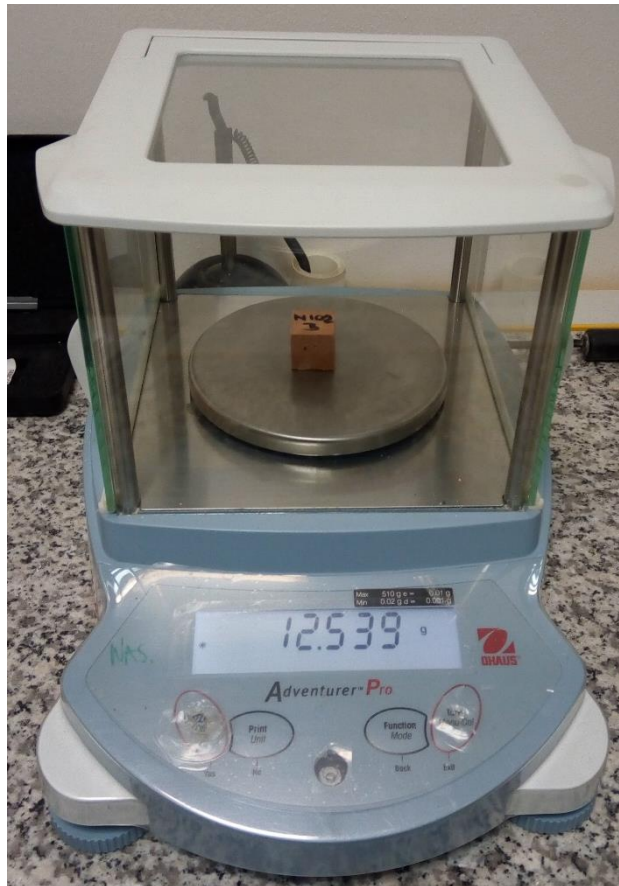
$$w_{sat} = \psi_0 \rho_w = \frac{m_w - m_d}{V}$$

$$\rho = \frac{m_d}{V}$$

$$\rho_{mat} = \frac{m_d}{V(1 - \psi_0)}$$

$$\psi_0 = \frac{m_w - m_d}{V \rho_w}$$

Kde  $m_d$  znázorňuje hmotnost vysušeného vzorku.



Obrázek 22. Měření na laboratorní váze [foto: Alblová Nikol]

### 6.1.2 Pyknometrická metoda měření

Pro druhou kontrolní metodu stanovení hustoty materiálu byl použit héliový pyknometr. Tato metoda využívá jako měřící tekutinu helium a vlastní pyknometr je vyroben z korozivzdorné oceli. Jelikož je velikost atomu hélia velmi malá, je schopné zaplnit i velmi malé póry. Postup měření je takový, že se rozdrcený a vysušený vzorek umístí do ocelové měřící komory. Objem měřící komory se stanoví pomocí kalibrace přístroje. Poté se přístroj několikrát propláchne čistým heliem z tlakové láhve a tak se odstraní vzduch ze systému. Po naplnění referenční komory se změří tlak a následně se určí látkové množství helia v referenční komoře. Následně se otevře ventil do měřící komory. Nyní můžeme určit objem měřeného vzorku. Proces je opakován až do dosažení malého rozdílu mezi výsledky po sobě jdoucích cyklů [32, 33].





Obrázek 23. Heliový pyknometr [34]

## 6.2 Charakteristika pórového systému

Stanovení porozity materiálu bylo provedeno pomocí rtuťové porozimetrie. Ta je založena na vysokém povrchovém napětí rtuti, která většinu porézních látek nesmáčí (tzn. úhel smáčení je vyšší než  $90^\circ$ ). Rtuť tak může vniknout do pórů pouze účinkem vnějšího tlaku. Čím jsou póry užší, tím je pro vtažení rtuti do pórů potřeba vyššího tlaku  $p$ . V následující Washburnově rovnici se porovnává síla způsobená povrchovým napětím rtuti (síla, která se snaží rtuť vypudit z pórů) s působícím tlakem.

$$\pi r^2 p = -2\pi r \gamma \cdot \cos \theta \quad r = \frac{-2\gamma \cos \theta}{p}$$

kde  $\gamma$  je povrchové napětí rtuti ( při  $20^\circ\text{C}$  je  $\gamma = 0,485 \text{ N/m}$ ),  $\theta$  značí úhel smáčení povrchu porézní látky rtuť (obvykle se uvažuje  $\theta = 130^\circ$ ),  $r$  je poloměr póru, do kterého rtuť vstupuje při tlaku  $p$ . Bude-li tlak vyjádřen v MPa a poloměr pórů v nm, pak bude mít tento vztah tvar

$$r = \frac{623,5}{p}$$

Z této rovnice vyplývá, že pokud bude tlak  $0,1 \text{ MPa}$ , rtuť zaplní pouze póry s poloměry většími než  $6235 \text{ nm}$ . Moderní rtuťové porozimetry pracují běžně do tlaku  $200 \text{ MPa}$ , což by znamenalo zaplnění pórů s poloměry od  $3,1 \text{ nm}$ , nebo do tlaku  $400 \text{ MPa}$ , tedy s nejmenším poloměrem  $1,6 \text{ nm}$  [35, 36, 37].





Obrázek 24. Rtuťový porozimetr [38]

## 6.3 Mechanické vlastnosti

### 6.3.1 Pevnost v tahu za ohybu

Pevnost v tahu za ohybu byla provedena dle normy ČSN EN 1015-11 [39]. Tato zkouška se provádí na zkušebním stroji, který je určen pro měření pevnosti v tahu za ohybu.

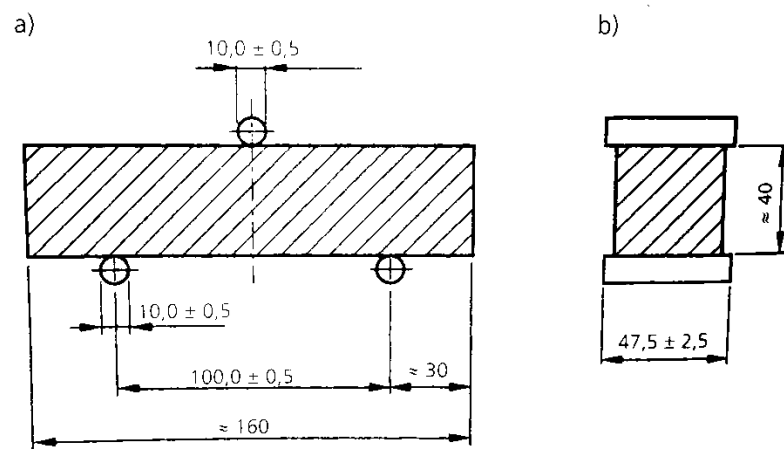


Obrázek 25. Příklad přístroje pro měření pevnosti v tahu za ohybu [40]

Zkušební těleso se umístí do zkušebního přístroje ve směru kolmém na směr hutnění. Je umístěno na válcové podpěry, které jsou od sebe vzdáleny 100 mm. Zatížení se přenáší na zkušební vzorek přes zatěžovací válec rovnoměrnou rychlostí  $50 \pm 10$  N/s do té doby, než se vzorek zlomí. Při dosažení mezního napětí je zaznamenána maximální dosažená síla na zatěžovacím stroji. Dále se pak pevnost v tahu za ohybu dopočítá podle následujícího vzorce.

$$R_f = \frac{3}{2} \frac{Fl}{bh^2}$$

kde  $R_f$  je pevnost v tahu za ohybu v MPa,  $F$  je zatížení vynaložené na střed trámečku v N,  $l$  je vzdálenost mezi podpěrami v mm a  $b$ ,  $h$  jsou rozměry průřezu trámečku v mm [32, 41].



Obrázek 26. Uspořádání zatížení pro stanovení pevnosti v tahu za ohybu a) čelní pohled, b) boční pohled [42]

### 6.3.2 Pevnost v tlaku

Zkoušky pevnosti v tlaku jsou zkoušeny podle normového postupu dle normy ČSN EN 1015-11 [39]. Pro stanovení pevnosti v tlaku se používají zlomky trámečků, které nám zůstaly po zkoušce v tahu za ohybu. Tyto zlomky se umístí bočními plochami (kolmo na směr hutnění) mezi tlačné ocelové destičky, jejichž půdorysné rozměry jsou 40 x 40 mm a vymezují tak velikost tlačné plochy. Tlačné destičky musí být osazeny přesně naproti sobě, z důvodu rovnoměrného roznášení napětí, aby výslednice zatížení procházela středem vzorku. Rovnoměrné zatěžování by mělo probíhat minimálně 30 s a trvá do chvíle, než dojde k porušení vzorku. Poté na zatěžovacím stroji zaznamenáme maximální dosaženou hodnotu a z ní pak dopočítáme mezní napětí, neboli tlakovou pevnost zkušebního vzorku. Výpočet pevnosti v tlaku je uvedeno v následujícím vzorci.

$$R_c = \frac{F}{A}$$

kde  $R_c$  je pevnost v tlaku v MPa,  $F$  je nejvyšší dosažené zatížení v N a  $A$  je plocha vymezená tlačnými destičkami v  $\text{mm}^2$ , tedy  $40 \times 40 = 1600 \text{ mm}^2$  [32, 41].



Obrázek 27. Přístroj pro měření pevnosti v tlaku [40]

## 6.4 Struktura studovaných materiálů

Skenovací elektronová mikroskopie je přesná, nedestruktivní metoda pro detailní analýzu materiálů (nanočástic) a jejich povrchů. Touto metodou lze vytvořit snímky objektů s rozlišením až 1,3 nm. Ze snímků lze posoudit velikost, tvar a strukturu povrchu pozorovaných objektů. Pomocí BSE detektoru lze od sebe odlišit různé materiály ve slitinách. Díky přídavnému zařízení EDS a WDS pro prvkovou analýzu lze určit prvkové složení zkoumaných vzorků [43].

Příprava vzorků pro elektronovou mikroskopii (EM) probíhala zalitím vzorků do epoxidové pryskyřice, do které byl přimíchán grafit. Dále byly vzorky broušeny a leštěny na voděodolných SiC smirkových papírech, kdy se začínalo na papírech s velikostí zrn 30  $\mu\text{m}$  (grit 500) a končilo se na papíru s velikostí zrn 5  $\mu\text{m}$  (grit 4000). Jako chladicí medium během leštění a broušení byla použita voda. Po každém kroku během leštění a broušení byly vzorky omyty v acetonu, aby bylo zabráněno dodatečné hydrataci.

Elektronová mikroskopie byla provedena na mikroskopu Zeiss Merlin. Vzorky byly pozorovány bez nanesení vodivé vrstvy. Podmínky měření byly následující: urychlovací napětí 4 kV, proud ve svazku 17 pA – 20 pA, pracovní vzdálenost 5,9 - 3,9 mm. Ačkoliv měření probíhalo ve velmi “mírných“ podmínkách přesto lze na hranách pozorovat lokální nabíjení. Tmavé oblasti v zvláště v okolí zrn mohou být interpretovány jako povrchová kontaminace vzorku. Tento závěr byl vyvozen na základě porovnání fotografií pořízených pomocí detektoru sekundárních elektronů umístěného uvnitř objektivové čočky s fotografiemi pořízenými detektorem sekundárních elektronů umístěným v komoře mikroskopu. Ve stejné oblasti zobrazené pomocí detektoru umístěného v komoře nebyly tmavé plochy. Detektor umístěný v objektivové čočce je mnohem citlivější na nízkoenergiové elektrony, jenž jsou generovány lehkými prvky. Kontaminantem je většinou  $\text{CO}_2$ .

## 6.5 Tepelná vodivost

Na krychelných vzorcích o rozměrech 70 x 70 x 70 mm bylo provedeno měření součinitele tepelné vodivosti dle normy ČSN EN 72 1105 pomocí přístroje ISOMET [44]. Toto měření je založeno na analýze průběhu časové závislosti teplotní odezvy na impulsy tepelného toku do analyzovaného materiálu. Tepelný tok se vytváří rozptýleným elektrickým výkonem v odporu sondy, která je tepelně vodivě spojená s analyzovaným materiálem. Teplota odporu se snímá polovodičovým snímačem. Průběh teploty jako funkce času se v diskrétních bodech vzorkuje a těmito vzorky se prokládají regresní polynomy metodou nejmenších čtverců. Koeficienty regresních polynomů slouží k výpočtu termofyzikálních parametrů pomocí analytických vztahů [45].



Obrázek 28. Přístroj ISOMET 2104

Součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  [W/m.K] je konstanta, která udává číselně množství tepla, které projde za jednotku času krychlí o jednotkové hraně mezi dvěma protilehlými stěnami [46].

Měrná tepelná kapacita  $c$  [J/kg.K] je tepelná kapacita hmotné jednotky (podíl tepelné kapacity objektu a jeho hmotnosti), přičemž měrná tepelná kapacita  $c$  značí množství tepla potřebné k ohřátí 1 kg látky o 1 °C [45].

Součinitel teplotní vodivosti  $a$  [m<sup>2</sup>/s] vyjadřuje schopnost látky vyrovnávat rozdílné teploty při neustálém šíření tepla vedením v homogenním prostředí, je rovna podílu tepelné konduktivity a součinu její objemové hmotnosti měrné tepelné kapacity při stálém tlaku [45].

## 7 Experimentální část

Experimentální část diplomové práce je zaměřena na studium alkalicky aktivovaného materiálu, ve kterém je využita odpadní surovina, kterou je zde cihelný prach. Pro aktivaci navržených optimalizovaných směsí bylo použito vodní sklo a hydroxid sodný. Receptury byly navrženy ve spolupráci s VUT v Brně, prof. Pavlou Rovnaníkovou. Na studovaných materiálech byly zkoumány a následně vyhodnocovány základní fyzikální vlastnosti, charakteristika pórového systému, mechanické vlastnosti (pevnost materiálu v tlaku a v tahu za ohybu), dále byla studována mikrostruktura těchto materiálů a tepelné vlastnosti. Tyto materiály byly pak jednotlivě mezi sebou porovnávány.

### 7.1 Charakteristika použitých surovin

#### 7.1.1 Cihelný prach

Pro výrobu alkalicky aktivovaného materiálu, byl v této práci jako odpadní materiál použit cihelný střep – Family Heluz Hevlín. Střep vznikl jako vedlejší produkt při broušení pálených cihel. Vzhledem k jeho zjištěným vlastnostem ho lze zařadit k materiálům s pucolánovou aktivitou. Pucolánová aktivita prosátého cihelného prachu frakce < 125  $\mu\text{m}$  podle modifikovaného Chappelle testu vyšla 840 mg  $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{g}$ . Hranice pucolanity se udává 650 mg  $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{g}$ . To odpovídá výsledkům testu podle normy ČSN EN 196-5 [47]. Mineralogické a chemické složení cihelného střepu viz následující tabulky 6 a 7.

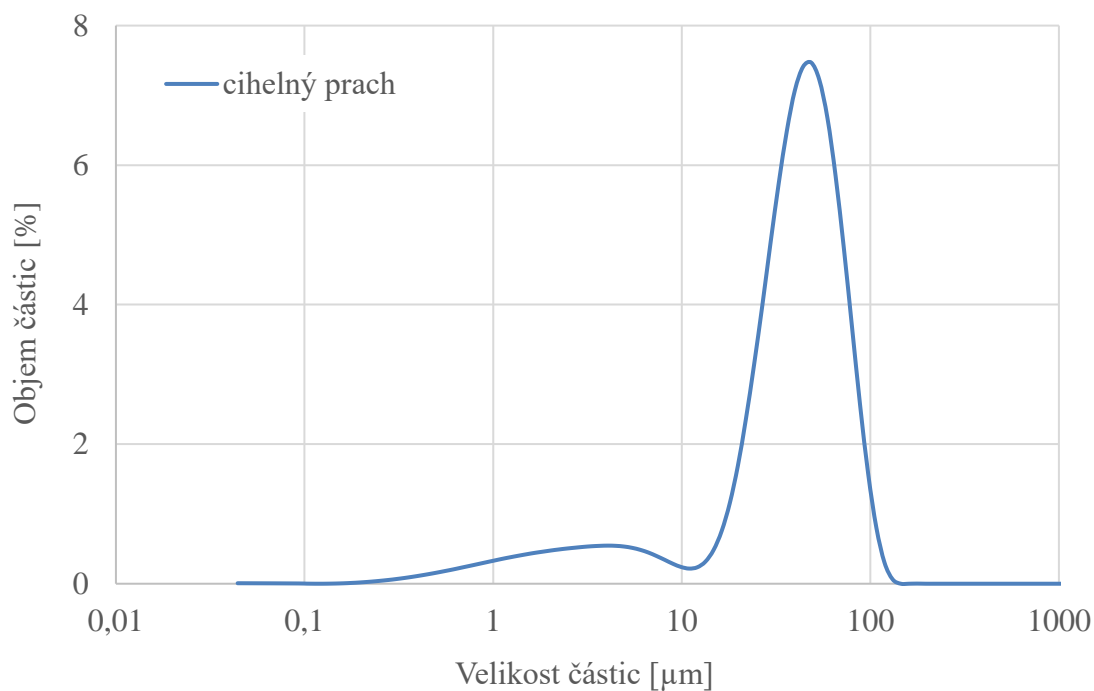
Tabulka 6. Mineralogické složení cihelného prachu

Cihelný prach [%]	
Amorfní fáze	46,7
křemen	23,6
biotit	0,9
muskovit	2,6
albit	6,5
mikroklin	7,2
ortoklas	2,8
akermanit	4,4
hematit	1,4
hedenbergit	3,8

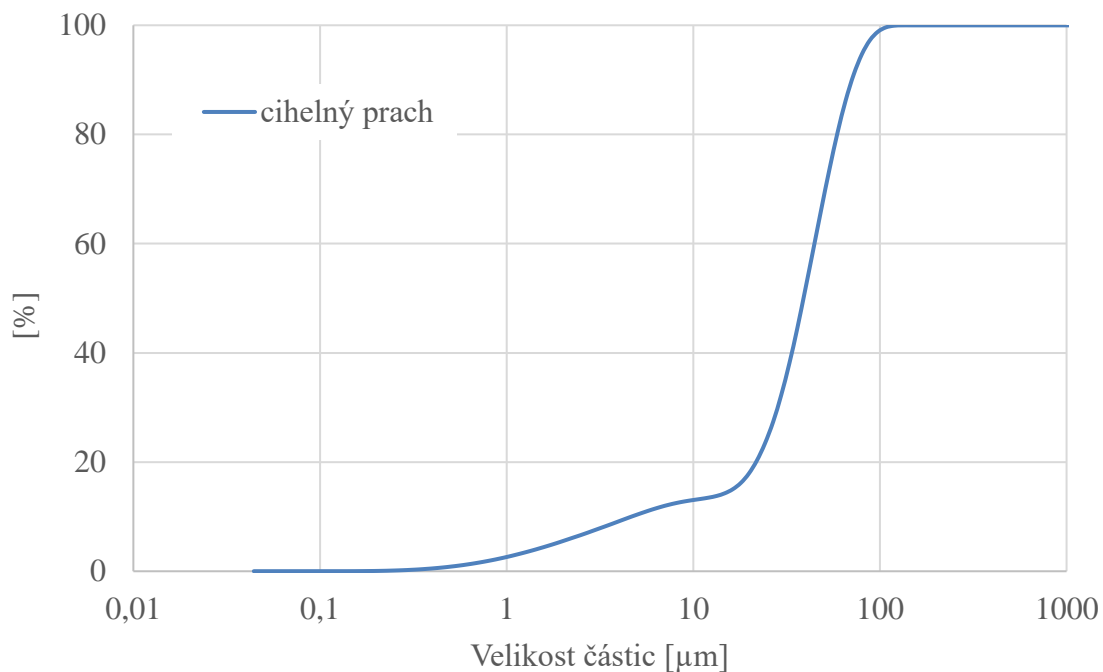
Tabulka 7. Chemické složení cihelného prachu

Cihelný prach [%]	
<b>SiO<sub>2</sub></b>	51,3
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	20
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	6
<b>CaO</b>	11,5
<b>MgO</b>	4,5
<b>K<sub>2</sub>O</b>	3,2
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	1,3
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0,8
<b>SO<sub>3</sub></b>	1

Specifický povrch cihelného střepu se rovná 3,379 m<sup>2</sup>/g. Granulometrie prosátého cihelného prachu frakce < 125 μm je uvedena v následujících grafech (obrázek 29 a 30)

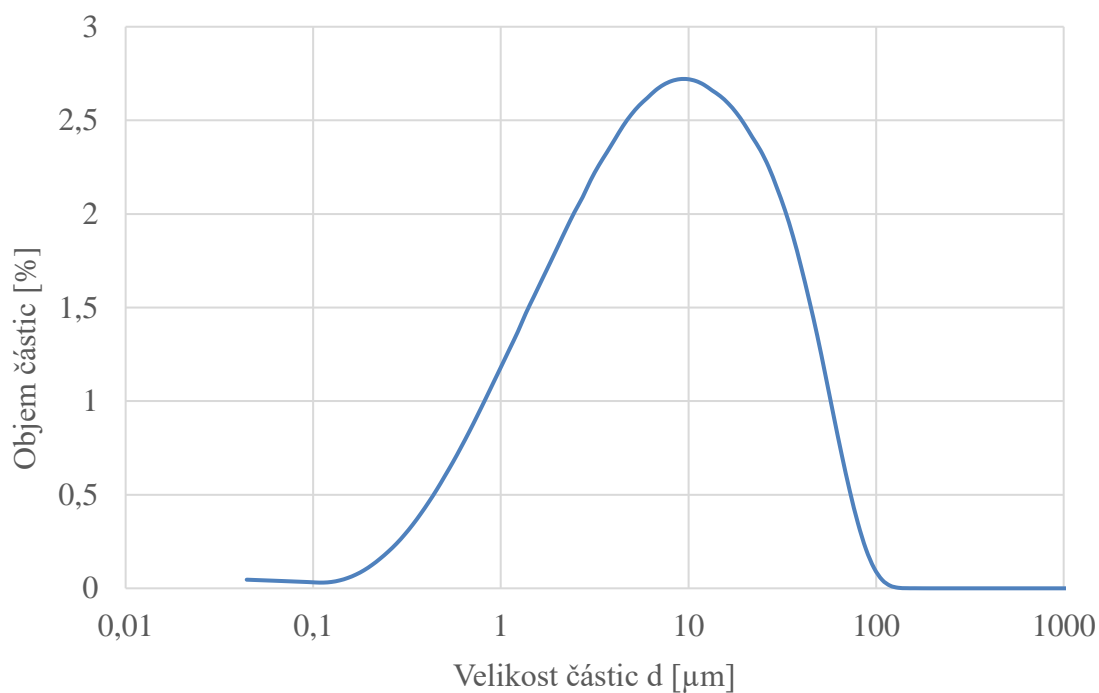


Obrázek 29. Graf granulometrie cihelného prosátého prachu K o velikosti zrn do 0,125 mm



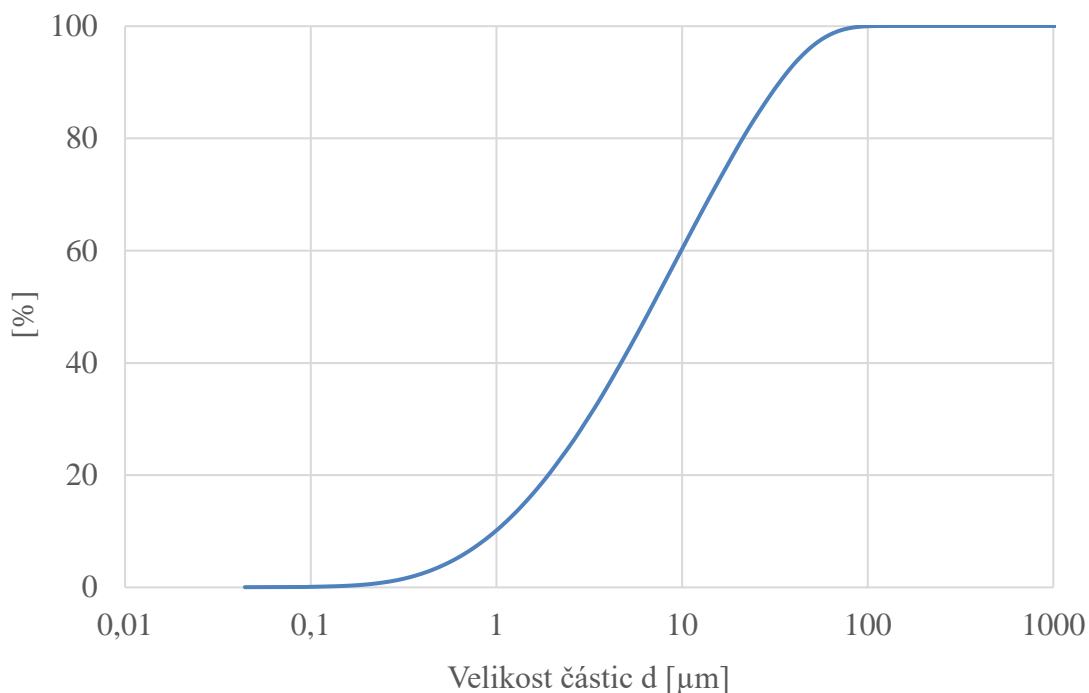
Obrázek 30. Graf granulometrie cihelného prosátého prachu K o velikosti zrn do 0,125 mm

Dále pak v následujícím grafu (obrázek 31 a 32) je znázorněna granulometrie cihelného prachu neprosátého N.



Obrázek 31. Graf granulometrie cihelného střepu neprosátého N





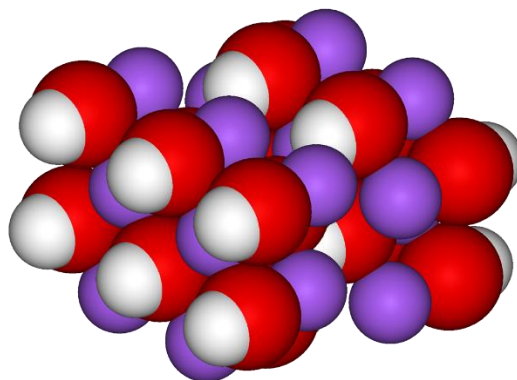
Obrázek 32. Graf granulometrie cihelného střepeu neprosátého N

### 7.1.2 Hydroxid sodný

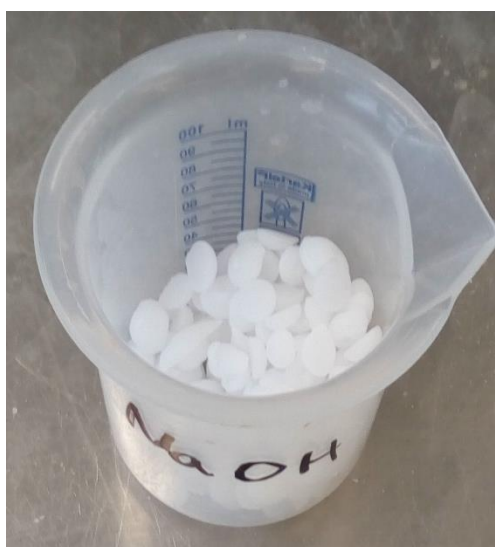
Hydroxid sodný (NaOH) je silně zásaditá anorganická sloučenina. V čistém stavu je to pevná bílá látka ve formě peciček, lístečků nebo granulí, silně hygroskopická a pohlcující oxid uhličitý, čímž vzniká uhličitan sodný. Právě z tohoto důvodu musí být uchovávána v hermeticky uzavřených obalech. Hydroxid sodný je nehořlavý a nevybušný, je to ale velmi silná žiravina a zdraví škodlivá látka [48].

Při rozpouštění hydroxidu sodného ve vodě se uvolňuje velké množství tepla. Ve vodě se štěpí na ionty:  $\text{NaOH} \rightarrow \text{Na}^+ + \text{OH}^-$ . Hydroxidové ionty  $\text{OH}^-$  způsobují zásaditou (alkalickou) reakci [49].

NaOH má velice široké použití v chemickém průmyslu (výroba mýdel a dalších povrchově aktivních látek, příprava dalších sloučenin sodíku, jako reakční složka při organických syntézách), v textilním průmyslu, v průmyslu celulózy a papíru, v hutnictví a hliníkárenství, ve vodárenství při úpravách pitné vody. V potravinářském průmyslu je využit při zpracování tuků a olejů, nebo je také využíván jako dezinfekční činidlo pro vymývání strojů. V domácnostech je často využíván jako čistič odpadních potrubí a při praní [50].



Obrázek 33. Krystalová mřížka hydroxidu sodného [48]



Obrázek 34. Hydroxid sodný [foto: Alblova Nikol]

### 7.1.3 Vodní sklo

Vodní sklo je vodný roztok křemičitanu sodného ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ). V současné době se vodní sklo vyrábí nejčastěji z křemičitanu sodného nebo draselného. Složení vodního skla bývá nejčastěji charakterizováno křemičitým modulem  $M_s$ . Hodnota křemičitého modulu běžně vyráběných typů vodního skla leží obvykle v rozmezí 1,6 – 4,1. Dále se vodní sklo charakterizuje pomocí jeho hustoty. Ta určuje koncentraci roztoku i složení výchozího skla, dále viskozitu a hodnotu pH. Viskozita vodního skla závisí na jeho koncentraci a na hodnotě křemičitého modulu výchozího skla. Při porovnání údajů o viskozitě je třeba vzít v úvahu, že vodní sklo se nechová jako newtonovská kapalina a hodnota viskozity tedy závisí na způsobu měření. Hodnota pH je rovněž funkcí chemického složení a koncentrace vodního

skla. Vodní skla, jakožto roztoky solí silné zásady a slabé kyseliny jsou značně alkalická [51, 52, 53].

#### **7.1.4 Voda**

Voda pro použití výroby geopolymérů by měla splňovat stejné požadavky, jako záměsová voda do betonu. Kritéria pro záměsovou vodu jsou stanovena v souladu s požadavky normy ČSN EN 1008 – Záměsová voda do betonu [54]. Pro výrobu byla použita voda pitná, která tyto požadavky splňuje a nemusí se provádět zkoušky. Pokud je ale použita voda jiná, například povrchová voda, podzemní, odpadní průmyslová voda atd., musí se provádět zkoušky vody podle kritérií normy ČSN EN 1008 [54]. Zkoušky se provádí především z hlediska obsahu chemicky nevhodných látek, olejů a tuků, humusovitých látek atd. Tyto látky by totiž mohly velice negativně ovlivnit vlastnosti výsledné směsi. Pro přípravu směsi by neměla být použita voda splašková [55, 56].

### **7.2 Použité směsi**

Ke studiu bylo vyrobeno sedm druhů směsí. U všech navrhovaných směsí byly použity stejné suroviny, rozdílný byl pouze jejich poměr. První čtyři směsi s označením K120, K121, K122, K123 (N120, N121, N122, N123) obsahovaly stejné množství cihelného prachu, vodního skla i vody, jen se měnil poměr hydroxidu sodného, tedy i silikátový modul Ms. U dalších tří směsí s označením K102, K105 a K108 (N102, N105, N108) se měnilo složení podle silikátového modulu, který byl konstantní a měl hodnotu 1,4.

Zkušební vzorky byly vyrobeny ve dvou různých variantách. V první variantě byly vzorky vyrobeny z prosátého cihelného prachu s označením K, který byl prosát pomocí vibračního prosévacího přístroje a byla použita zrna o frakci nižší než 0,125 mm. V druhé variantě byl použit cihelný prach neprosátý s označením N.

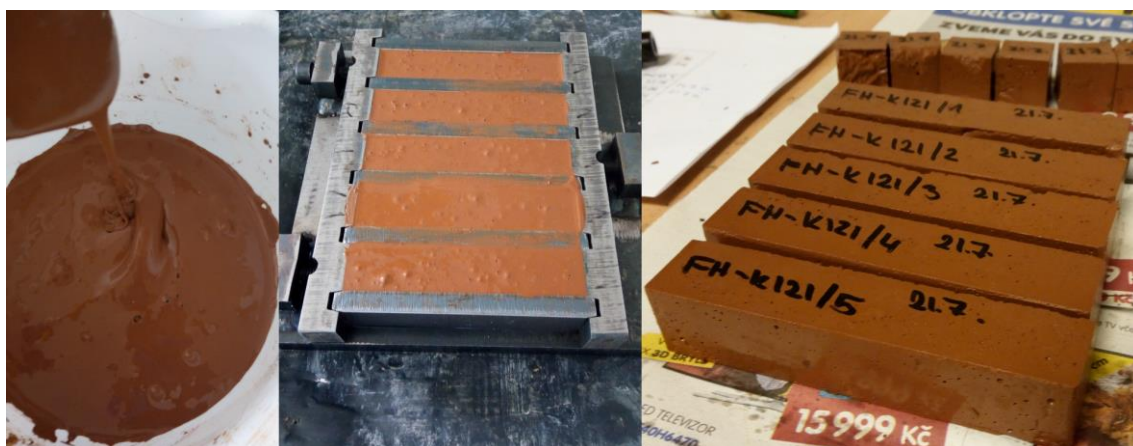
#### **7.2.1 SMĚSI A - směsi s rozdílným Ms**

Jak již bylo výše popsáno, směsi typu A obsahují stejný poměr surovin, pouze se mění množství hydroxidu sodného a tím i silikátový modul Ms. Poměr surovin je uveden v tabulce 8.

Tabulka 8. Složení směsí typu A

Směs	Cihelný prach	Vodní sklo 1,6	NaOH	Voda	Ms
	[g]	[g]	[g]	[ml]	
K120	200	70	15,57	50	0,8
K121	200	70	9,5	50	1
K122	200	70	5,5	50	1,2
K123	200	70	2,57	50	1,4

U varianty K120 byla konzistence směsi medová, dobře se lila do forem. Tato konzistence se ale u směsí se zvyšujícím se Ms zhušťovala.



Obrázek 35. Směs K121 [foto: Alblová Nikol]



Obrázek 36. Směs K123 [foto: Alblová Nikol]

## 7.2.2 SMĚSI B - směsi se stejným Ms

Směsi typu B se vyznačují konstantním Ms, který má hodnotu 1,4 a tomu odpovídající zastoupení jednotlivých vstupních surovin, aby bylo konstantního Ms dosaženo. Složení jednotlivých směsí je znázorněno v tabulce 9.

Tabulka 9. Složení směsí B

Směs	Cihelný prach	Vodní sklo 1,6	NaOH	Voda	Ms
	[g]	[g]	[g]	[ml]	
K102	200	70	2,57	41	1,4
K105	200	80	2,95	36	1,4
K108	200	90	3,33	31	1,4

Konzistence směsí (obrázek 37) byla tužší, formy se tak hůře naplňovaly. Odformování zejména směsi K108, bylo velice obtížné a vzorky tak ve většině případů nezůstaly v celku. I po důkladném promazání formy šel vzorek špatně od formy oddělit, viz obrázek 38.



Obrázek 37. Směs K102 a její konzistence po umíchání v laboratorní míchačce [foto:

*Alblová Nikol]*





Obrázek 38. K108 Odbednění [foto: Alblová Nikol]

### 7.3 Pracovní postup

Po navázení správného množství surovin se za stálého míchání rozpustil hydroxid sodný ve vodě. Po rozpuštění hydroxidu se směs dále smíchala s naváženým množstvím vodního skla. Poté se roztok ihned postupně vmíchal do odváženého množství cihelného prachu. Následně se směs pečlivě promíchala v laboratorní míchačce. Hotová směs se umístila do předem vymazaných kalibrovaných forem, kde se po naplnění formy přikryly folií. Vzorky byly po dobu tuhnutí a tvrdnutí umístěny do klimatizační komory o teplotě 20 °C a RH 50 %. Odformování zkušebních vzorků probíhalo obvykle po 7 dnech a následně byly opět umístěny do klimatizační komory.



Obrázek 39. Rozpuštění NaOH v H<sub>2</sub>O [foto: Alblová Nikol]



*Obrázek 40. Naplněné formy přikryté folií*

## 8 Experimentální výsledky měření

### 8.1 Směsi typu A – prosátý cihelný prach – frakce do 0,125 mm

#### 8.1.1 Základní fyzikální vlastnosti

V následující tabulkách 10 a 11 jsou uvedeny hodnoty, které byly stanoveny jak z gravimetrického měření, tak z pyknometrického měření. Toto měření bylo provedeno na vzorcích z prosátého cihelného prachu o velikosti zrna do 0,125 mm po 28 dnech. Hodnoty z gravimetrického měření jsou zde pouze orientační, jelikož materiál obsahoval mnoho trhlin a výsledky tedy nejsou vypovídající. Nicméně z výsledků obou měření je patrné, že nejvyšších hodnot otevřené pórovitosti dosahuje vzorek K123, tedy směs s nejvyšším Ms. Naopak nejnižší hodnotu otevřené pórovitosti má materiál K120, tedy vzorek s nejnižším Ms. Tyto dvě hodnoty se mezi sebou liší zhruba o 50 %. Z výsledků lze také pozorovat, že hodnoty hustoty pevné matrice mají vzestupný charakter. Se zvyšujícím se Ms se zvyšují i hodnoty hustoty pevné matrice materiálu.

Tabulka 10. Gravimetrické měření

Gravimetrické měření			
Materiál	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_{\text{mat}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\Psi_0$ [%]
K120	1778	2091	15,0
K121	1870	2362	20,8
K122	1932	2527	23,5
K123	1823	2468	26,2

Tabulka 11. Pyknometrické měření prosátého cihelného prachu

Pyknometr - po 28 dnech			
Materiál	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_{\text{mat}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\Psi_0$ [%]
K120	1849	2291	19,3
K121	1803	2402	24,9
K122	1601	2630	39,1
K123	1610	2639	39,0

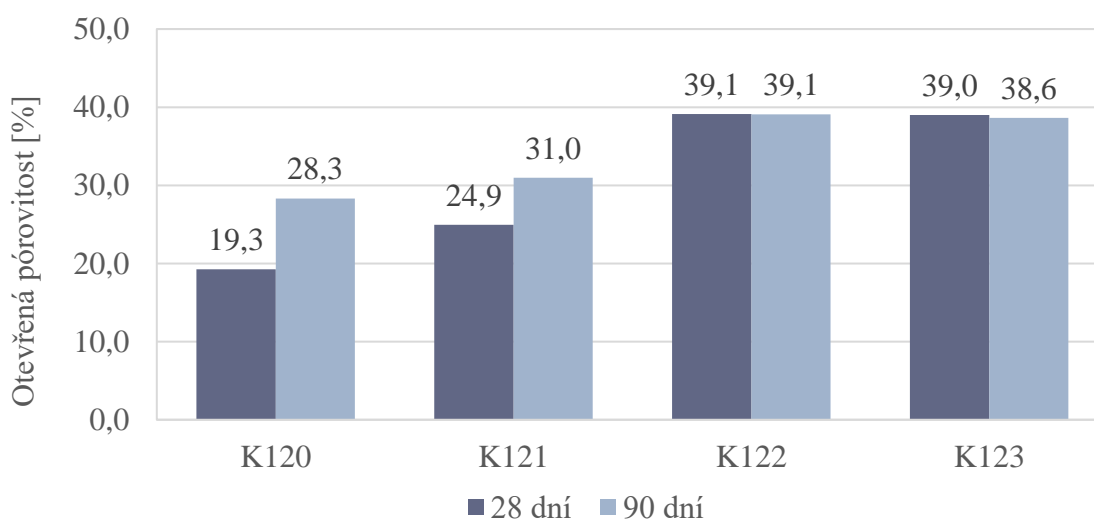
Po 90 dnech měly dosažené výsledky stejný trend jako po 28 dnech. Na následujícím grafu (obrázek 41) je uvedeno srovnání hodnot po 28 dnech a po 90 dnech. Z tohoto grafu



lze pozorovat, že pórovitost u materiálů K120 a K121 vzrostla, což je nejspíše dáno přibývajícimi trhlinami v delším časovém horizontu v materiálu. U materiálů K122 a K123 naopak pórovitost nepatrně klesá.

Tabulka 12. Pyknometrické měření po 90 dnech

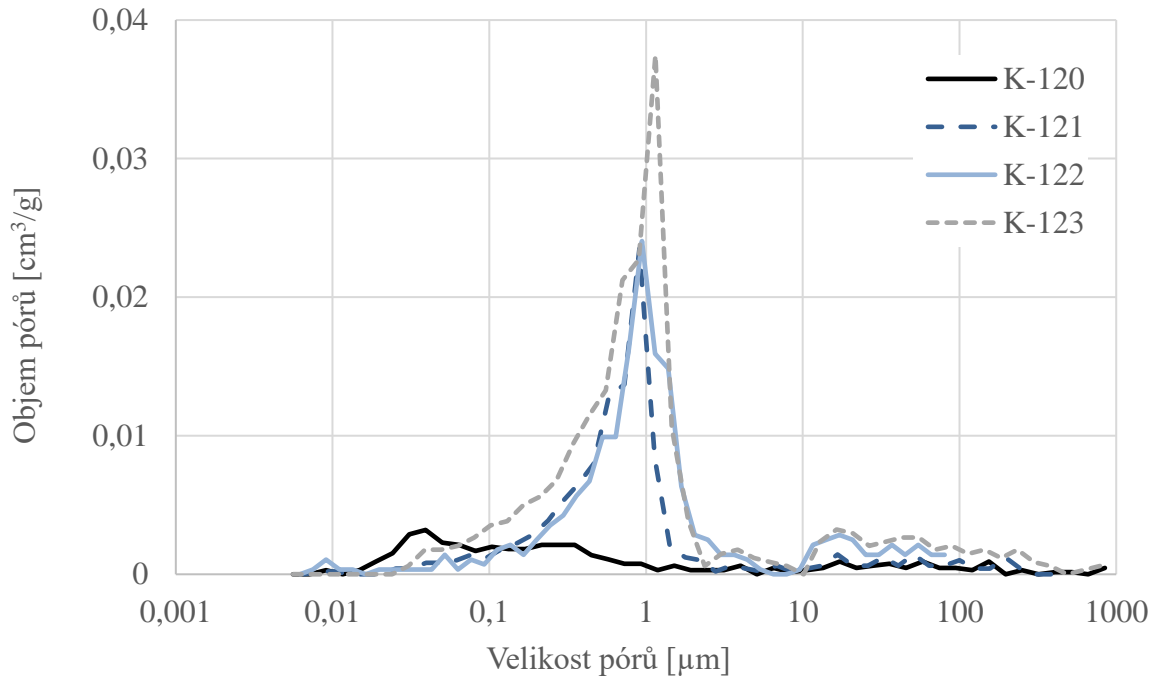
Pyknometr - po 90 dnech			
Materiál	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_{\text{mat}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\Psi_0$ [%]
K9-120	1849	2580	28,3
K9-121	1803	2613	31,0
K9-122	1601	2628	39,1
K9-123	1610	2625	38,6



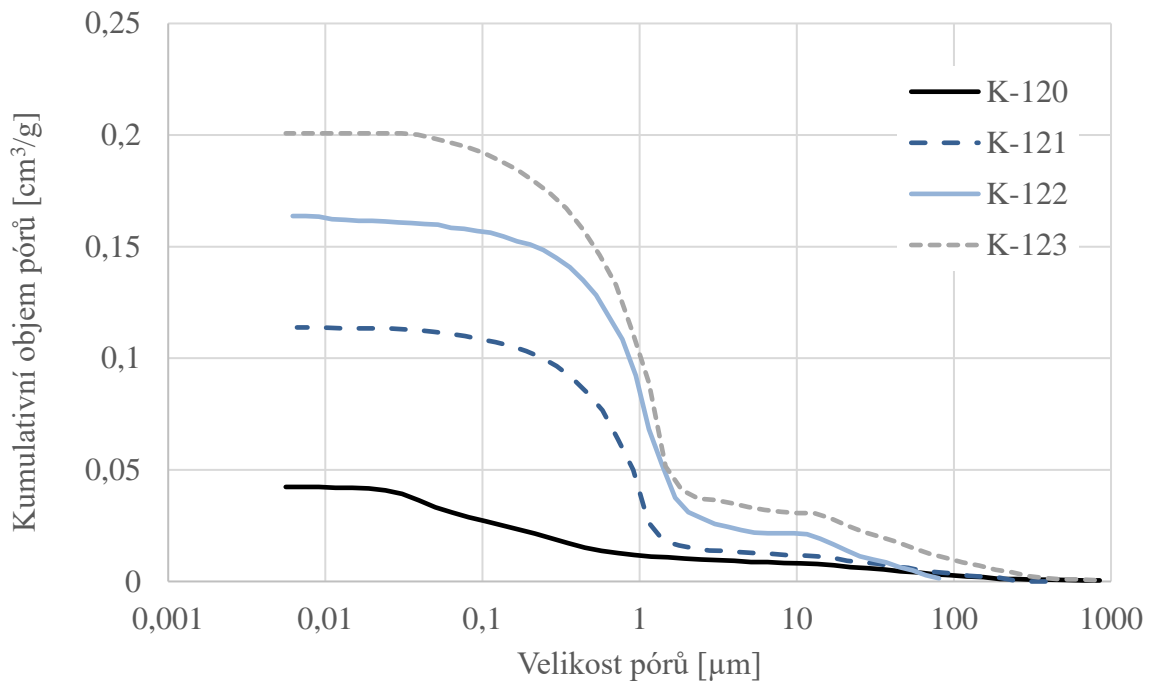
Obrázek 41. Graf pyknometr 28 a 90 dní

### 8.1.2 Charakteristika pórového systému

Uspořádání pórového systému je charakterizováno pomocí distribučních a kumulativních křivek, které jsou znázorněny v následujících grafech (obrázek 42 a 43).



Obrázek 42. Graf distribuční křivka pórů



Obrázek 43. Graf Kumulativní křivka pórů

Z grafů je patrné, že výrazný pokles velikosti pórů nastal v oblasti kolem 1 μm u všech druhů směsí, kromě směsi K120, kde je celkový obsah póru celkově nižší. Průběhy křivek také ukazují, že se zvyšujícím se Ms roste objem pórů.

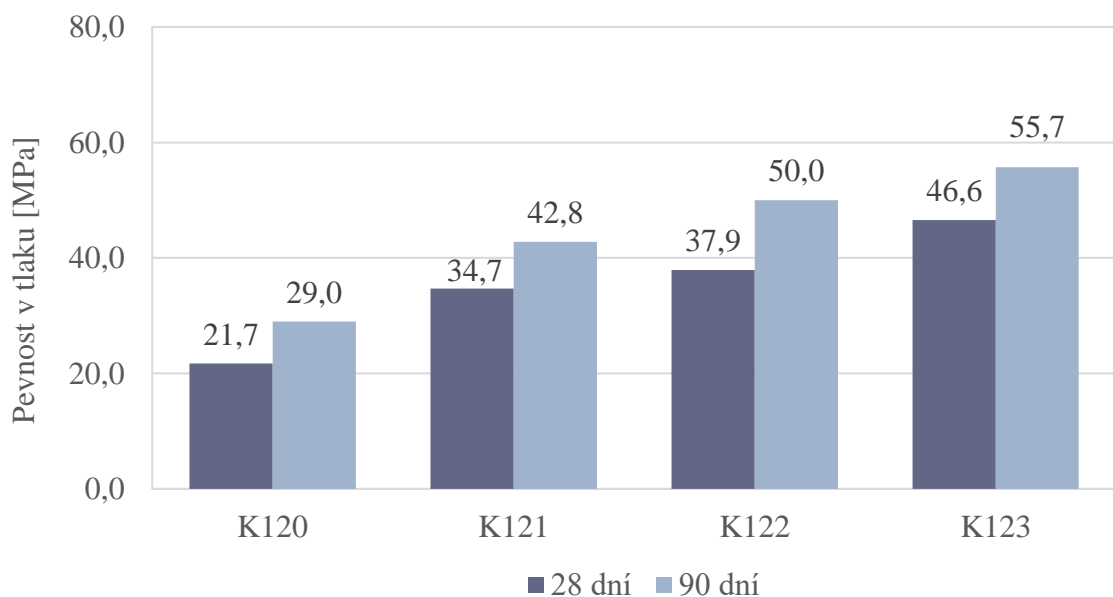
### 8.1.3 Mechanické vlastnosti

Naměřené pevnosti v tlaku po 28 dnech, po 90 dnech a pevnosti v tahu za ohybu po 28 dnech jsou uvedeny v následující tabulce 13. Z výsledků je patrné, že materiály mají vyšší pevnosti v tlaku s rostoucím Ms. Nejvyšších pevností nabývá materiál K123 a liší se od materiálu K120, který má nejnižší hodnotu, zhruba o 50 %. Hodnoty pevnosti v tahu za ohybu mají podobný charakter jako pevnosti v tlaku, tedy se zvyšujícím Ms se zvyšuje pevnost v tahu za ohybu.

Tabulka 13. Pevnosti v tlaku po 28 a 90 dnech, pevnosti v tahu za ohybu po 28 dnech

Materiál	Pevnost v tlaku		Pevnost v tahu za ohybu
	[MPa]		[MPa]
	28 dní	90 dní	28 dní
K120	21,71	29,0	1,05
K121	34,68	42,8	1,39
K122	37,93	50,0	11,93
K123	46,57	55,7	14,05

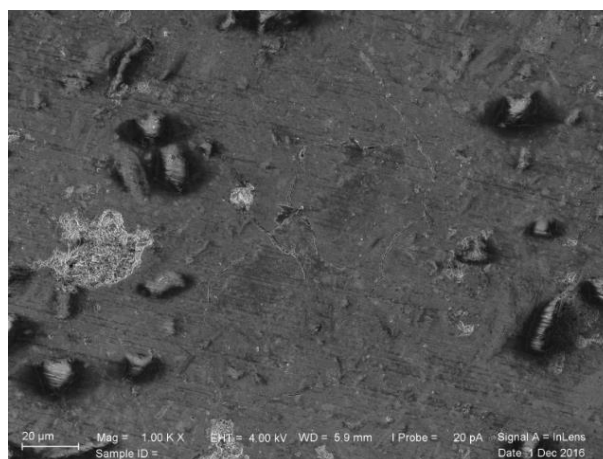
Z grafu (obrázek 44) také můžeme vidět, že pevnosti narůstají s časem. Pevnost materiálu se zvýšila zhruba o 10 %. Největších pevností tedy jak po 28 dnech, tak po 90 dnech dosahuje vzorek s označením K123, tedy materiál s nejvyšším Ms.



Obrázek 44. Graf pevnosti v tlaku po 28 dnech a 90 dnech

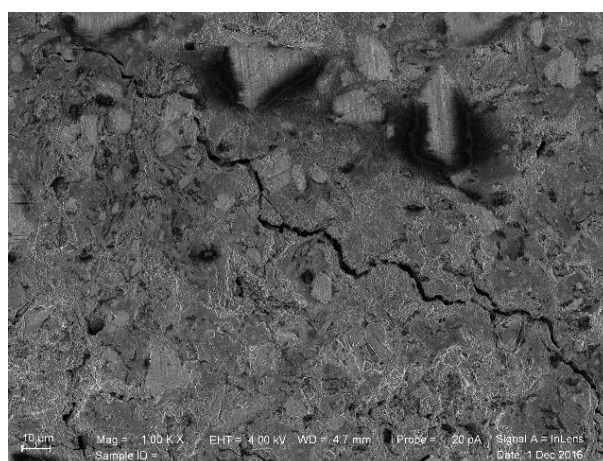
### 8.1.4 Struktura materiálu

V kompozitu materiálů K120 – K122 jsou viditelná zrna plniva (křemíku, hlinitokřemičitanů-jílových částic). Vzorek K120 (obrázek 45) má zcela odlišnou kompozici, než vzorky K121 a K122. Podíl zrn, která by byla větší než 10  $\mu\text{m}$ , je mnohem menší než u vzorků K121 a K122. Zrna menší než 10  $\mu\text{m}$  byla pravděpodobně rozpuštěna. Matrice je velmi homogenní což poukazuje na velký obsah křemičitano-hlinitanového gelu.



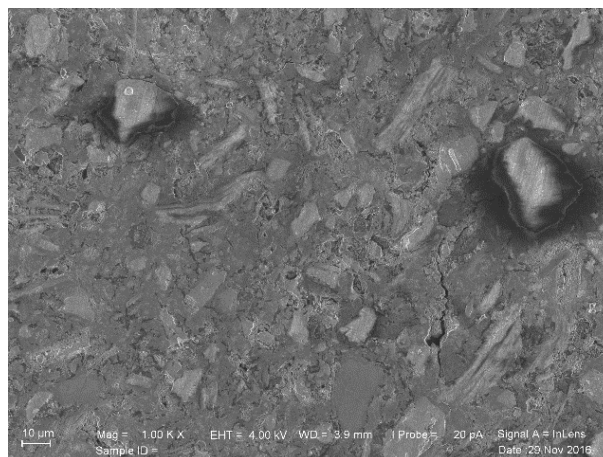
Obrázek 45. Mikrostruktura K120

Na obrázku 46 je znázorněn vzorek K121. Jsou zde viditelné trhliny, které se šíří po hranici zrn. Tento fakt může být interpretován jako slabá adheze hydratačních produktů k plnivu.



Obrázek 46. Mikrostruktura K121

Naopak u vzorku K122 (obrázek 47) jsou viditelné trhliny, které vedou přes zrna plniva, což je znakem dobré adheze hydratačních produktů k povrchu plniva. Adhezní síla je vyšší než pevnost plniva.



Obrázek 47. Mikrostruktura K122

## 8.2 Směsi typu B – prosátý cihelný prach - frakce do 0,125 mm

### 8.2.1 Základní fyzikální vlastnosti

V následující tabulkách 14 a 15 jsou uvedeny hodnoty, které byly stanoveny jak z gravimetrického měření, tak z pyknometrického měření. Toto měření bylo provedeno na vzorcích z prosátého cihelného prachu K o granulometrii do 0,125 mm po 28 dnech a také po 90 dnech. Hodnoty z gravimetrického měření jsou zde opět pouze orientační, jelikož materiál obsahoval mnoho trhlin a výsledky tedy nejsou zcela vypovídající. Z výsledků pyknometrického i gravimetrického měření vyplývá, že nejvyšší hodnotu otevřené pórovitosti má materiál K102, tedy materiál s nejvyšším obsahem vody a s nejnižším obsahem NaOH. Nejnižší hodnotu má naopak materiál K108. Rozdíl mezi těmito materiály je zhruba 5 %. Hodnoty hustot pevné matrice materiálů se od sebe liší jen nepatrně v rozsahu do 2 %.

Tabulka 14. Gravimetrické měření

Gravimetrická metoda			
Materiál	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_{\text{mat}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\Psi_0$ [%]
K102	1842	2434	24,5
K105	1882	2409	21,8
K108	1913	2387	19,6

Tabulka 15. Pyknometrické měření prosátého cihelného prachu

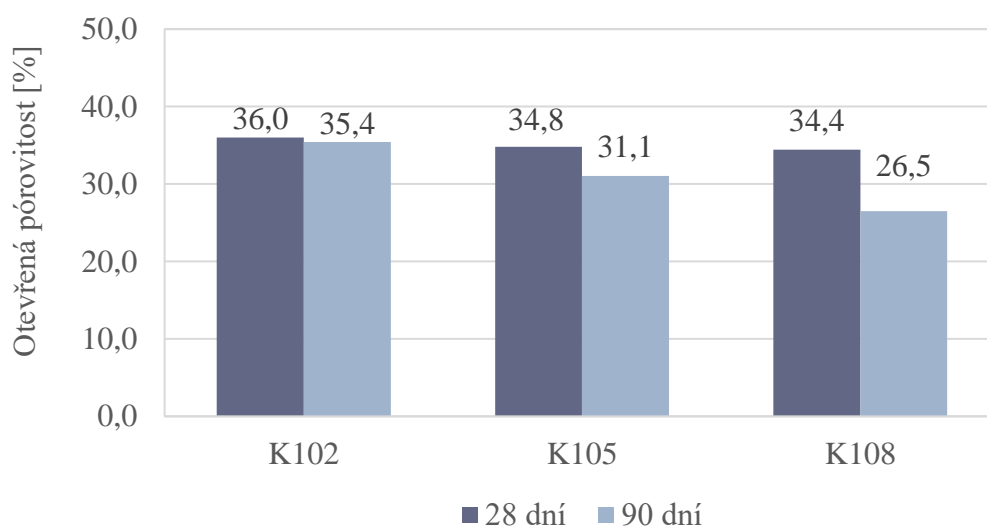
Pyknometr - po 28 dnech			
Materiál	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_{\text{mat}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\Psi_0$ [%]
K102	1687	2637	36,0
K105	1711	2626	34,8
K108	1719	2622	34,4

V následující tabulce 16 jsou uvedeny výsledky z pyknometrického měření po 90 dnech. Tyto výsledky mají stejný trend jako po 28 dnech, tedy nejvyšších hodnot otevřené pórovitosti nabývá materiál s označením K102. Hodnoty hustot pevné matrice materiálů se opět od sebe liší velice nepatrně.

Tabulka 16. Pyknometrické měření po 90 dnech - směsi B

Pyknometr - po 90 dnech			
Materiál	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_{\text{mat}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\Psi_0$ [%]
K9-102	1687	2614	35,4
K9-105	1801	2612	31,1
K9-108	1907	2594	26,5

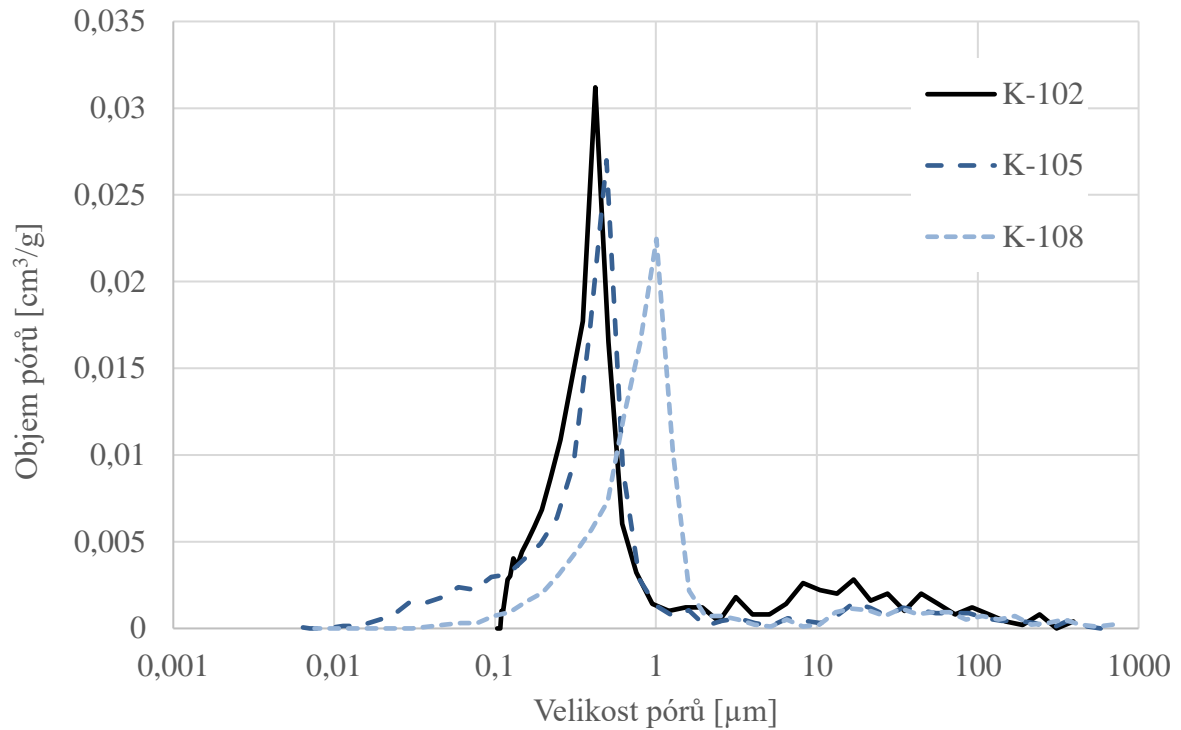
Dále pak porovnání pyknometrického měření po 28 dnech a po 90 dnech v následujícím grafu (obrázek 48), kde můžeme vidět, že pórovitost materiálu se po čase nepatrně snižuje.



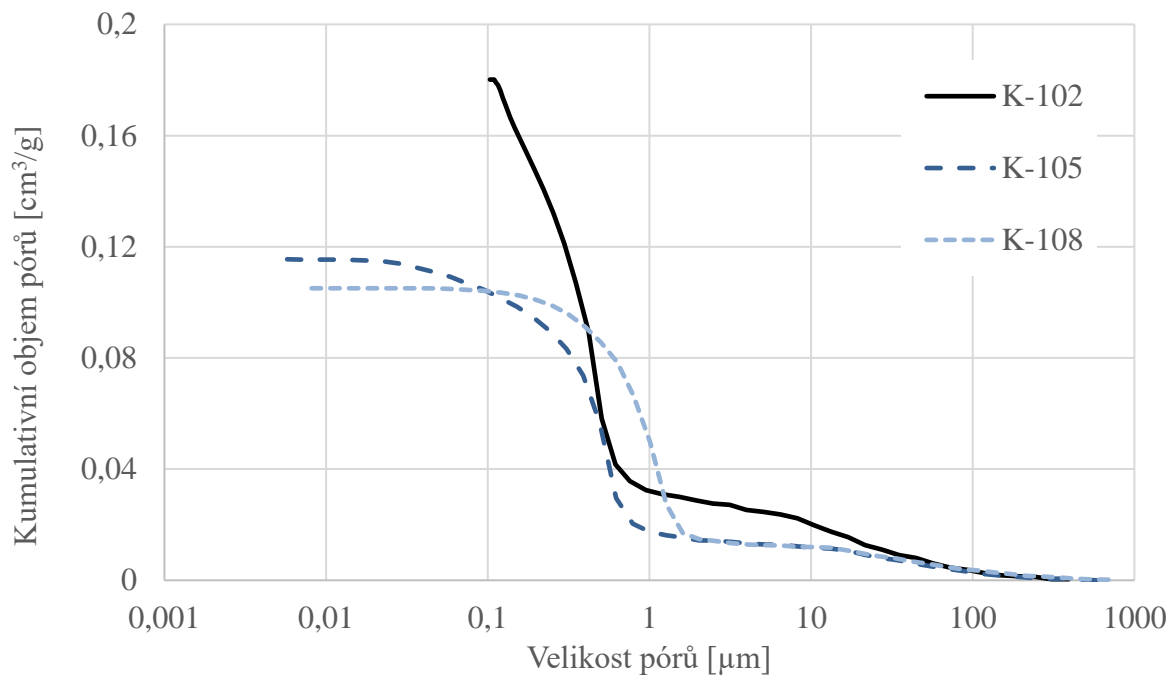
Obrázek 48. Graf Objem otevřených pórů – pyknometr

## 8.2.2 Charakteristika pórového systému

Uspořádání pórového systému je charakterizováno pomocí distribučních a kumulačních křivek, které jsou znázorněny v následujících grafech (obrázek 49 a 50).



Obrázek 49. Graf distribuční křivka pórů



Obrázek 50. Graf kumulační křivka pórů

Z grafů je patrné, že výrazný pokles velikosti pórů nastal v oblasti kolem 1  $\mu\text{m}$  u všech typů směsí. Průběhy křivek znázorňují, že s přibývajícím množstvím vodního skla a NaOH ve směsi se obsah pórů snižuje.

### 8.2.3 Mechanické vlastnosti

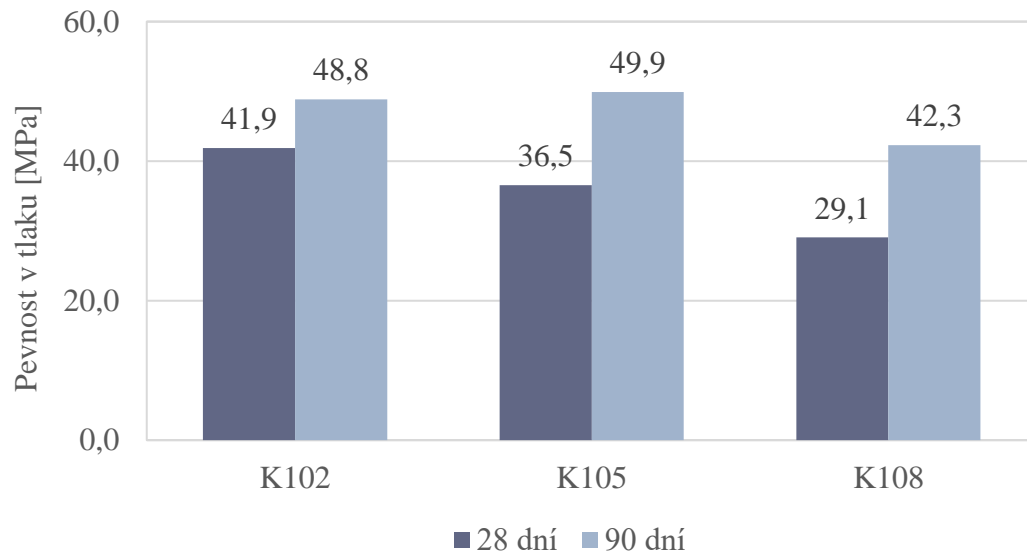
Naměřené pevnosti v tlaku po 28 dnech a po 90 dnech jsou uvedeny v následující tabulce 17, stejně tak jako pevnosti v tahu za ohybu. Z výsledků lze pozorovat, že se pevnosti materiálu snižují se zvyšujícím se množstvím vodního skla a NaOH. Nejvyšších pevností dosahuje materiál K102 a nejnižších materiál K108. Hodnoty pevnosti v tlaku těchto dvou materiálů se liší zhruba o 30 %. Hodnoty pevnosti v tahu za ohybu mají podobný charakter jako u pevnosti v tlaku, tedy se zvyšujícím se obsahem vodního skla a NaOH se snižuje pevnost.

Tabulka 17. Pevnosti v tlaku po 28 dnech a po 90 dnech

Materiál	Pevnost v tlaku		Pevnost v tahu za ohybu
	po 28 dnech	po 90 dnech	po 28 dnech
	[MPa]	[MPa]	[MPa]
K102	41,87	48,8	11,86
K105	36,53	49,9	8,66
K108	29,05	42,3	3,39

Z grafu (obrázek 51) můžeme vidět, že se opět zvyšuje pevnost v čase a to zhruba o 10 % při porovnání pevností po 28 dnech a po 90 dnech.

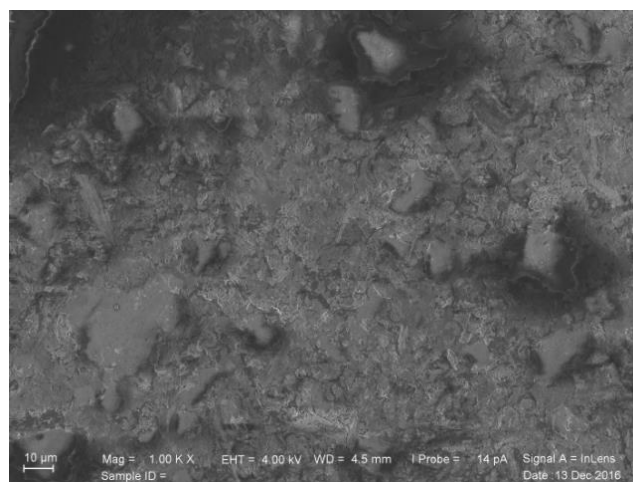




Obrázek 51. Graf pevnosti v tlaku po 28 dnech a 90 dnech

#### 8.2.4 Struktura materiálu

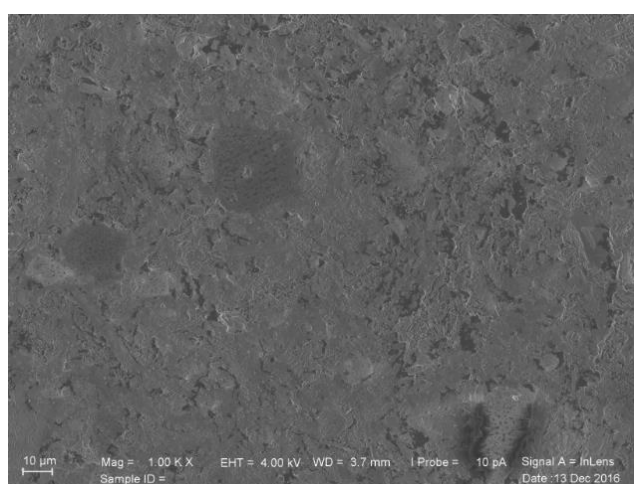
Vzorky směsi typu B vykazují vzestupnou tendenci obsahu křemičitano-hlinitanového gelu (obrázek 52, 53 a 54). Na fotografii vzorku K105 (obrázek 53) jsou patrné trhliny. Zajímavé je, že trhliny vedou po hraních křemenných zrn, ale na druhou stranu vedou také skrz jílové (keramické) zrno. Z toho poznatku by mohl být přibližně určen interval adhezní síly porovnáním pevnosti v tahu křemene s pevností v tahu jílovým zrnem.



Obrázek 52. Mikrostruktura K102



Obrázek 53. Mikrostruktura K105



Obrázek 54. Mikrostruktura K108

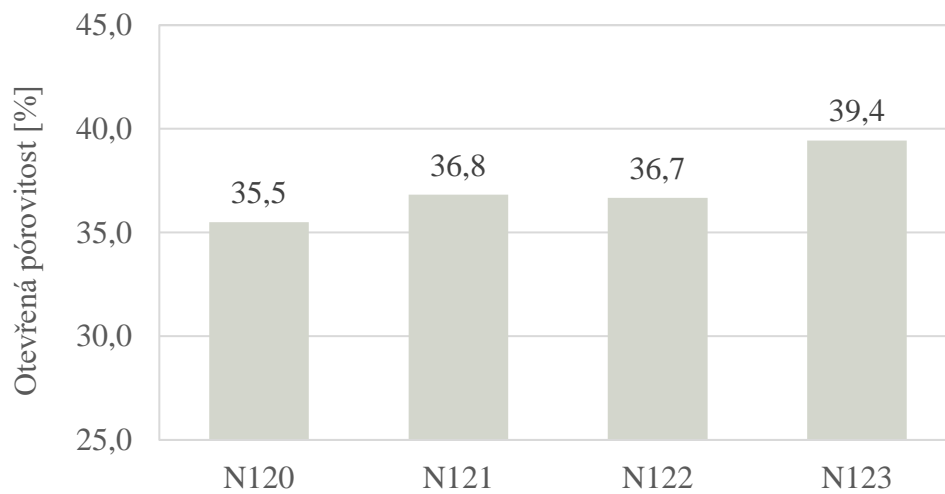
## 8.3 Směsi typu A – neprosátý cihelný prach

### 8.3.1 Základní fyzikální vlastnosti

V následující tabulce 18 jsou uvedeny hodnoty, které byly stanoveny z pyknometrického měření. Toto měření bylo provedeno na vzorcích z neprosátého cihelného prachu po 28 dnech. Z výsledků měření lze pozorovat, že nejvyšších hodnot otevřené pórovitosti dosahuje vzorek vyrobený ze směsi N123, tedy materiál s nejvyšším Ms. Nejnižší hodnotu pak má materiál N120. Rozdíl mezi těmito hodnotami je zhruba 10 %. Hodnoty hustoty pevné matrice jsou si velmi podobné, liší se od sebe do 2 %, stejně tak jako hodnoty objemové hmotnosti materiálu.

Tabulka 18. Pyknometrické měření neprosátého cihelného prachu

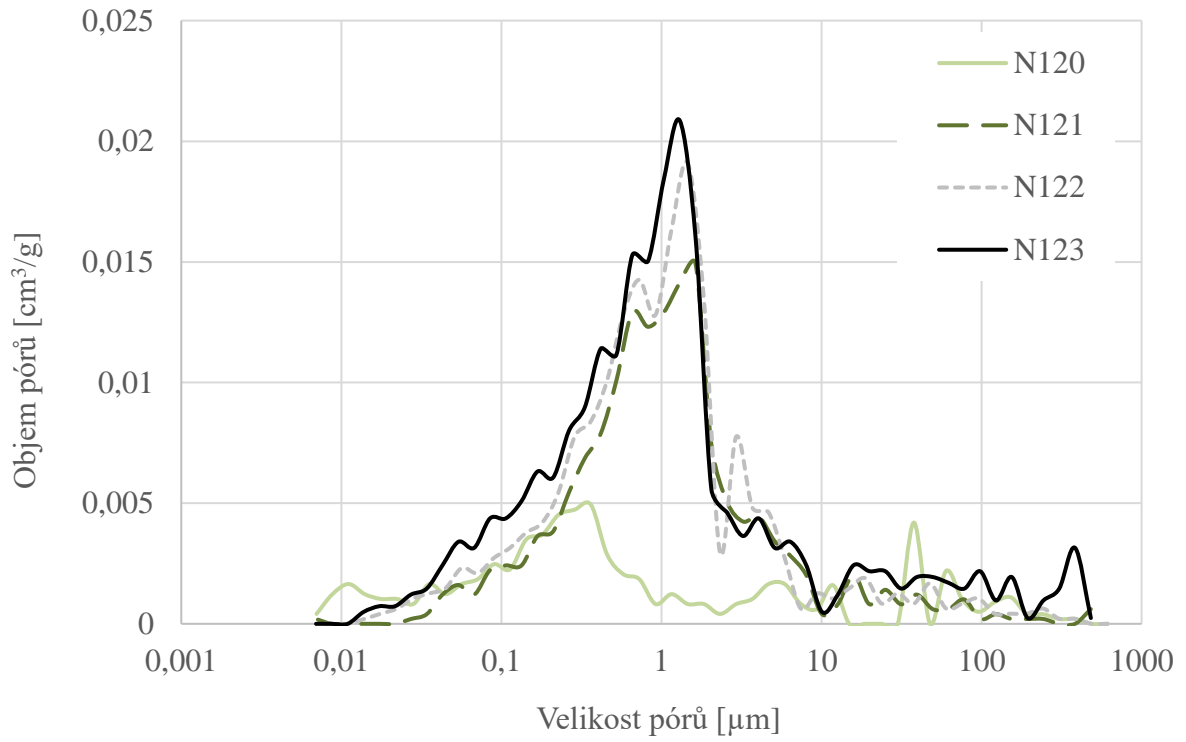
Pyknometr - po 28 dnech			
Materiál	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_{\text{mat}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\Psi_0$ [%]
N120	1669	2588	35,5
N121	1668	2640	36,8
N122	1667	2633	36,7
N123	1599	2640	39,4



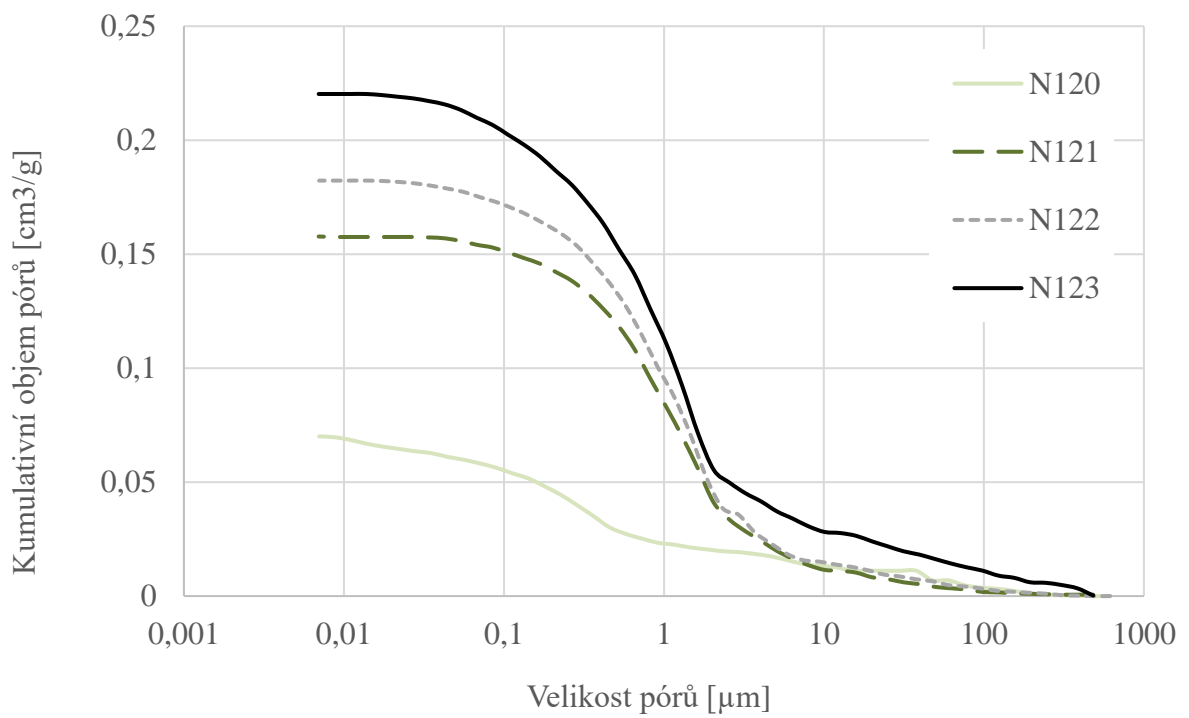
Obrázek 55. Graf Objem otevřených pórů – pyknometr

### 8.3.2 Charakteristika pórového systému

Uspořádání pórového systému je charakterizováno pomocí distribučních a kumulativních křivek viz následující grafy (obrázek 56 a 57).



Obrázek 56. Graf distribuční křivka pórů



Obrázek 57. Graf kumulační křivka pórů

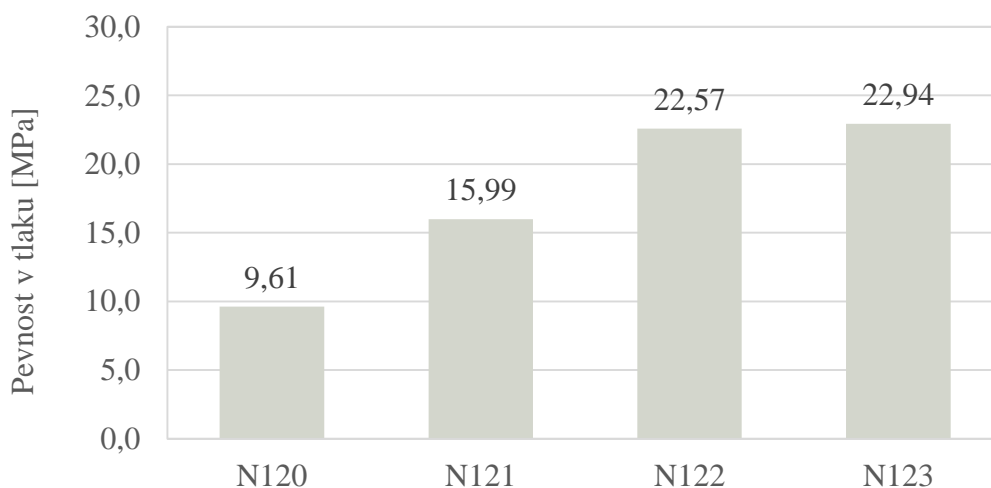
Z grafů můžeme vidět, že výrazný pokles velikosti pórů nastal v oblasti 0,1 do 5  $\mu\text{m}$  u všech druhů směsí, kromě směsi N120, kde je celkový obsah póru celkově nižší. Z průběhů křivek můžeme vidět, že se zvyšujícím se  $M_s$  roste objem pórů.

### 8.3.3 Mechanické vlastnosti

Naměřené pevnosti v tlaku a pevnosti v tahu za ohybu po 28 dnech u vzorků s použitím neprosátého prachu N jsou uvedeny v následující tabulce 19. Z výsledků je zřejmé, že materiály mají vyšší pevnosti se zvyšujícím se  $M_s$ . Největších pevností v tlaku po 28 dnech dosahuje materiál s označením N123, tedy materiál s nejvyšším silikátovým modulem. Nižší hodnota pevnosti v tahu za ohybu materiálu N123 je způsobena trhlinami materiálu. Naopak nejnižší hodnotu pevnosti v tlaku vykazuje materiál N120, který se liší od N123 zhruba o 60 %.

Tabulka 19. Pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu po 28 dnech

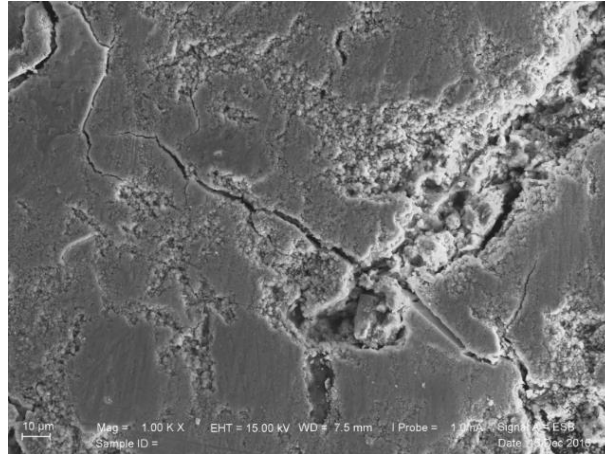
Materiál	Pevnost v tlaku	Pevnost v tahu za ohybu
	[MPa]	[MPa]
N120	9,61	1,94
N121	15,99	3,41
N122	22,57	8,01
N123	22,94	6,83



Obrázek 58. Graf pevnosti v tlaku po 28 dnech

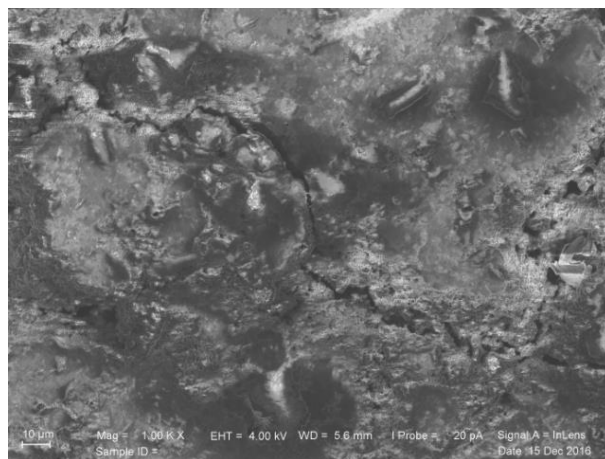
### 8.3.4 Struktura materiálu

Vývoj kompozice vzorků N120 - N122 (obrázek 59, 60 a 61) je podobný jako u vzorků K120 - K122. Rozdíl je ve velikosti trhlin mezi vzorky N120 (obrázek 59) a K120 (obrázek 45). Zatímco ve vzorku K120 nejsou téměř pozorovatelné žádné trhliny, ve vzorku N120 jsou trhliny o šířce v řádu jednotek mikrometrů.



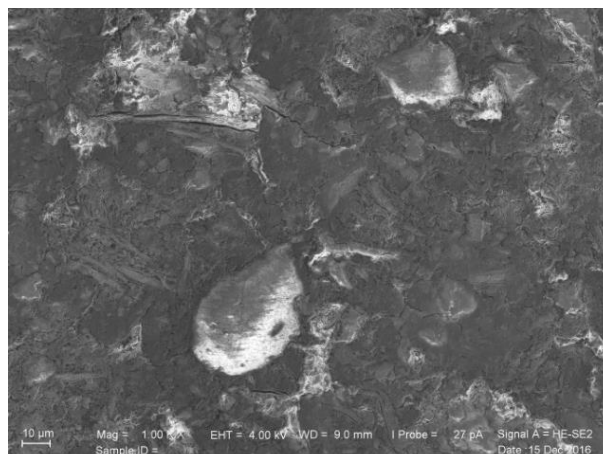
*Obrázek 59. Mikrostruktura N120*

Vzorek N121 (obrázek 60) je naprosto srovnatelný co se týče kompozice mikrostruktury se vzorkem K121 (obrázek 46).



*Obrázek 60. Mikrostruktura N121*

Oproti vzorku K122 (obrázek 47) ve vzorku N122 (obrázek 61) jsou viditelné trhliny na rozhraní zrno – matrice. Dochází i k delaminaci zrn plniva s vrstevnatou strukturou.



Obrázek 61. Mikrostruktura N122

### 8.3.5 Tepelné vlastnosti

Při měření tepelných vlastností materiálu se na vzorek umístila plošná měřící sonda, která je zapojena do vlastního přístroje a byl spuštěn měřící proces. Dle výsledků (tabulka 20) má nejvyšší hodnotu součinitele tepelné vodivosti materiál N120. Lze konstatovat, že se zvyšujícím se  $M_s$  tato hodnota klesá. Materiál s nejnižší hodnotou pórovitosti dosahuje nejvyšší hodnoty součinitele tepelné vodivosti, což je předpokládaný jev.

Tabulka 20. Tepelné vlastnosti směsi typu A

Vzorek	Součinitel tepelné vodivosti $\lambda$	Objemová tepelná kapacita $c_p$	Součinitel teplotní vodivosti $a$
	[W/m·K]	[J/m <sup>3</sup> ·K]:[*10 <sup>6</sup> ]	[m <sup>2</sup> /s]:[*10 <sup>-6</sup> ]
N120	0,838	1,500	0,559
N121	0,746	1,477	0,505
N122	0,655	1,330	0,492
N123	0,619	1,495	0,414

## 8.4 Směsi typu B – neprosátý cihelný prach

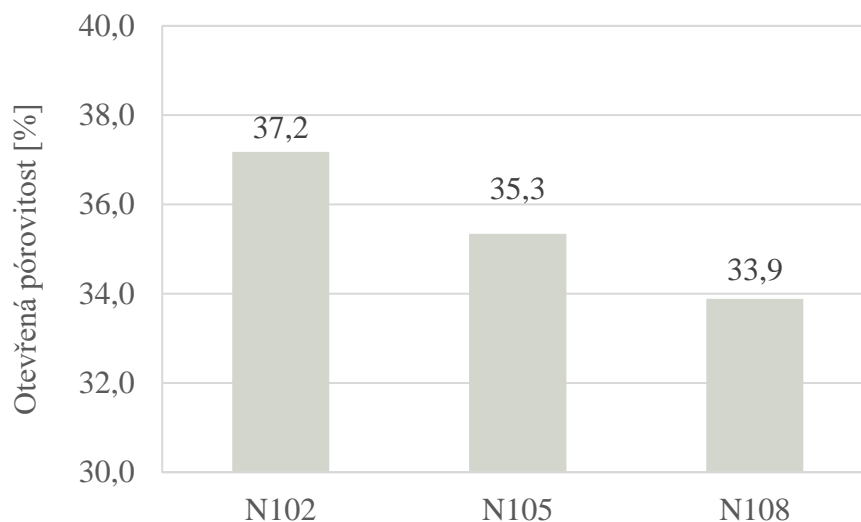
### 8.4.1 Základní fyzikální vlastnosti

V následující tabulce 21 jsou uvedeny hodnoty, které byly naměřeny pyknometrickou metodou. Toto měření bylo provedeno na vzorcích z neprosátého cihelného prachu po 28 dnech. Z následujícího grafu (obrázek 62) je patrné, že nejvyšších hodnot otevřených pórů dosahuje vzorek vyrobený ze směsi N102, který obsahuje nejméně vodního skla a NaOH.

Nejmenší hodnotu otevřených pórů má materiál N108. Tyto hodnoty se mezi sebou liší zhruba o 10 %. Nejvyšší hodnoty objemové hmotnosti dosahuje materiál N108, nejnižší materiál N102. Jejich rozdíl se pohybuje kolem 5 %. Rozdíly hodnoty hustot pevné matrice materiálů jsou jen nepatrné a pohybují se do 1 %.

Tabulka 21. Pyknometrické měření neprosátého cihelného prachu

Pyknometr - po 28 dnech			
Materiál	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_{\text{mat}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\Psi_0$ [%]
N102	1654	2633	37,2
N105	1700	2629	35,3
N108	1755	2655	33,9

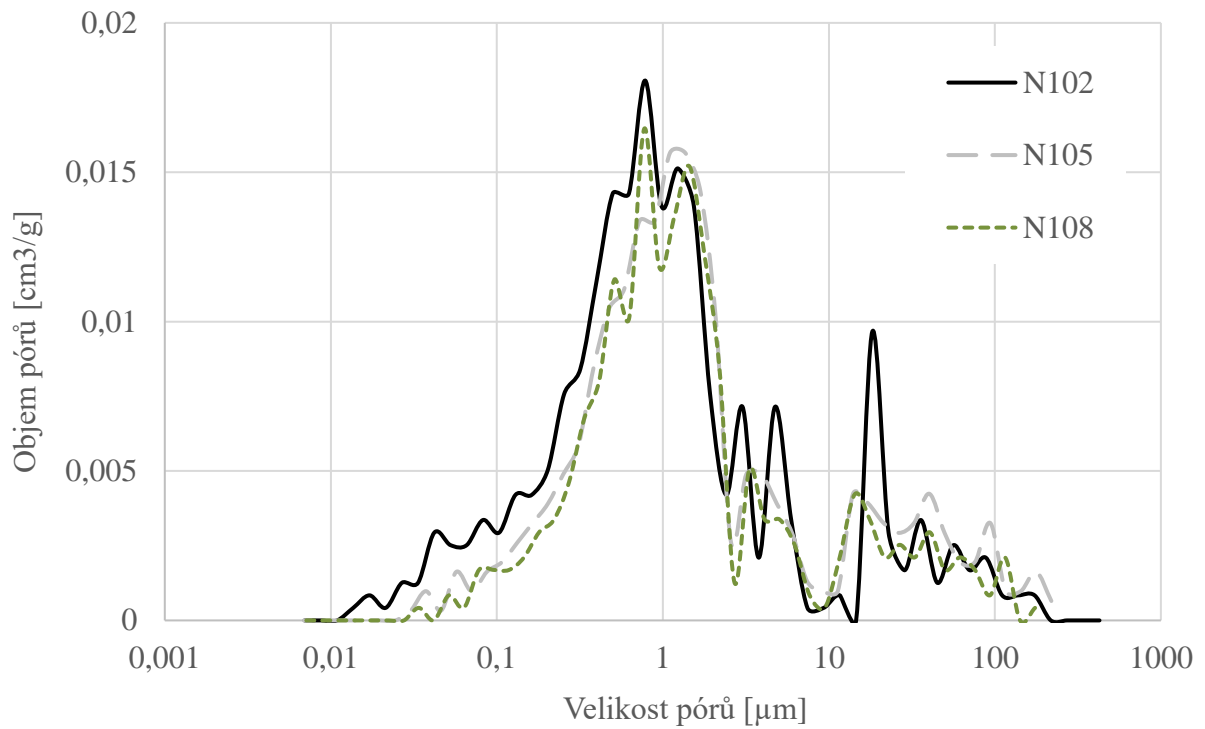


Obrázek 62 Graf objem otevřených pórů – pyknometr

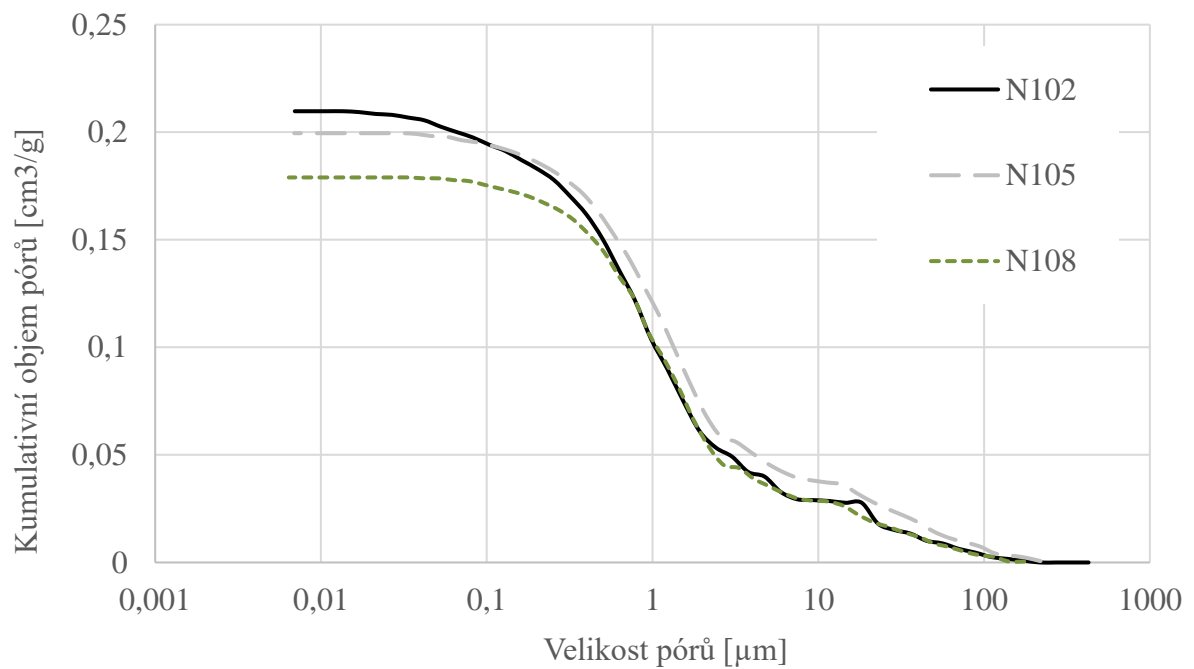
#### 8.4.2 Charakteristika pórového systému

Uspořádání pórového systému je charakterizováno pomocí distribučních a kumulativních křivek viz následující grafy (obrázek 63 a 64).





Obrázek 63. Graf distribuční křivka pórů



Obrázek 64. Graf kumulační křivka pórů

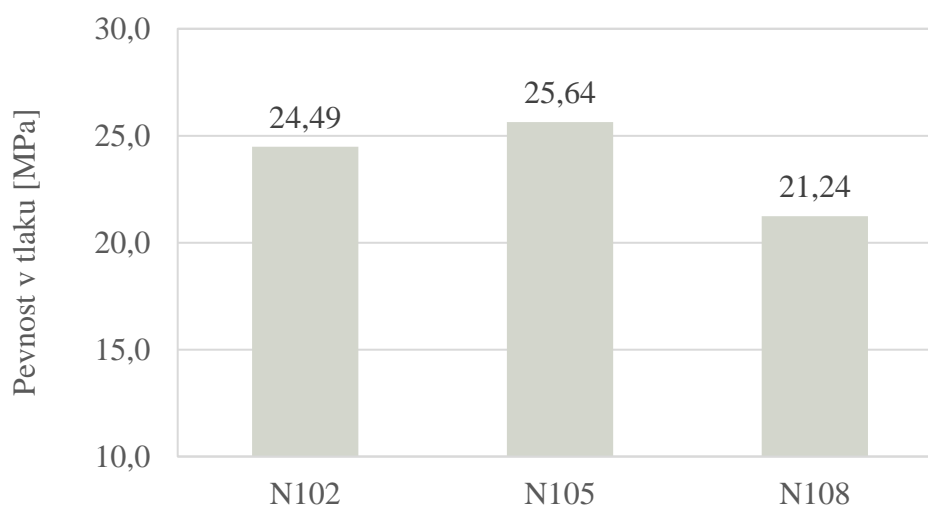
Z grafů je patrné, že výrazný pokles velikosti pórů nastal v oblasti od 0,1 do 5  $\mu\text{m}$  u všech druhů směsí. Průběhy křivek znázorňují, že s přibývajícím množstvím vodního skla a NaOH ve směsi se obsah pórů velice nepatrně snižuje.

### 8.4.3 Mechanické vlastnosti

Naměřené pevnosti v tlaku po 28 dnech u vzorků s použitím neprosátého prachu jsou uvedeny v následující tabulce 22. Z výsledků lze konstatovat, že materiál s označením N105 má nejvyšší hodnoty jak pevnosti v tlaku, tak pevnosti v tahu za ohybu. Stejně tak je tomu u pevnosti v tahu za ohybu. Naopak nejnižší hodnotu má materiál N108.

Tabulka 22. Pevnosti v tlaku po 28 dnech

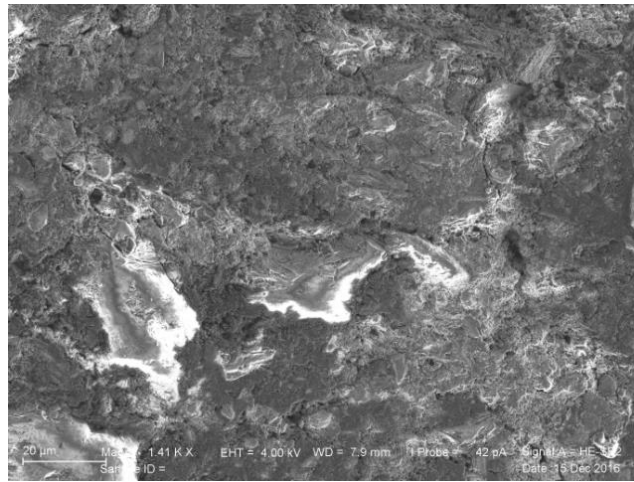
Materiál	Pevnost v tlaku	Pevnost v tahu za ohybu
	po 28 dnech	po 28 dnech
	[MPa]	[MPa]
N102	24,49	5,87
N105	26,82	6,05
N108	21,24	3,02



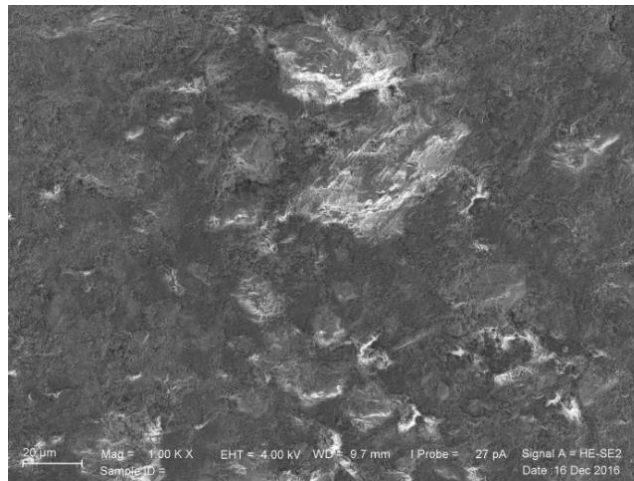
Obrázek 65. Graf pevnosti v tlaku po 28 dnech

### 8.4.4 Struktura materiálu

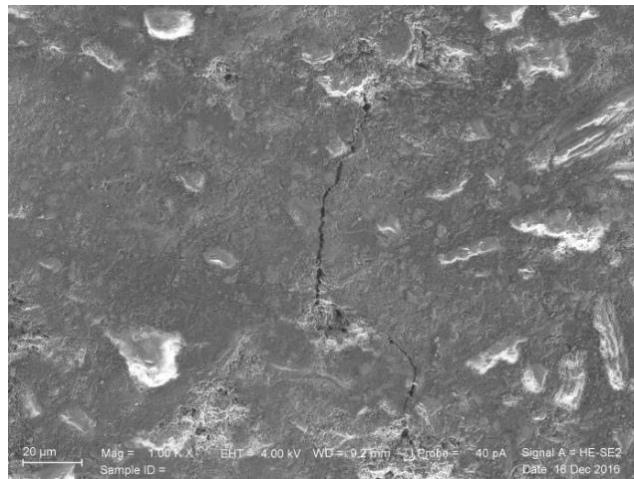
U vzorků N102 - N108 (obrázek 66, 67 a 68) je totožný vývoj kompozice struktury jako u vzorků K102 - K108. Vzorky vykazují vzestupnou tendenci obsahu křemičitanohlinitanového gelu.



*Obrázek 66. Mikrostruktura N102*



*Obrázek 67. Mikrostruktura N105*



*Obrázek 68. Mikrostruktura N108*

### 8.4.5 Tepelné vlastnosti

Výsledky tepelných vlastností směsí typu B jsou uvedeny v tabulce 23. Dle výsledků má nejvyšší hodnotu součinitele tepelné vodivosti materiál N105. Dosažené hodnoty součinitele tepelné vodivosti se od sebe liší jen nepatrně v rozsahu do 5 %, což je v mezích chyby měření uváděné pro tuto metodu.

Tabulka 23. Tepelné vlastnosti směsí typu B

Vzorek	Součinitel tepelné vodivosti $\lambda$	Objemová tepelná kapacita $c_p$	Součinitel teplotní vodivosti $a$
	[W/m·K]	[J/m <sup>3</sup> ·K]·[·10 <sup>6</sup> ]	[m <sup>2</sup> /s]·[·10 <sup>-6</sup> ]
N102	0,6314	1,4669	0,4305
N105	0,6634	1,3865	0,4785
N108	0,6244	1,4501	0,4306

## 8.5 Směsi typu A - srovnání jednotlivých vlastností směsí typu K a N

### 8.5.1 Základní fyzikální vlastnosti

Měření pomocí heliového pyknometru bylo prováděno na vzorcích po 28 dnech a po 90 dnech. Výsledky měření materiálu z prosátého cihelného prachu jsou znázorněny v tabulce 24, výsledky materiálu z neprosátého cihelného prachu jsou v tabulce 25. Hodnoty hustoty pevné matrice materiálu s obsahem prosátého prachu se jen nepatrně liší od hodnot materiálu s cihelným prachem neprosátým. Objemová hmotnost materiálu, jak bylo očekáváno, je u materiálu s neprosátým prachem nižší.

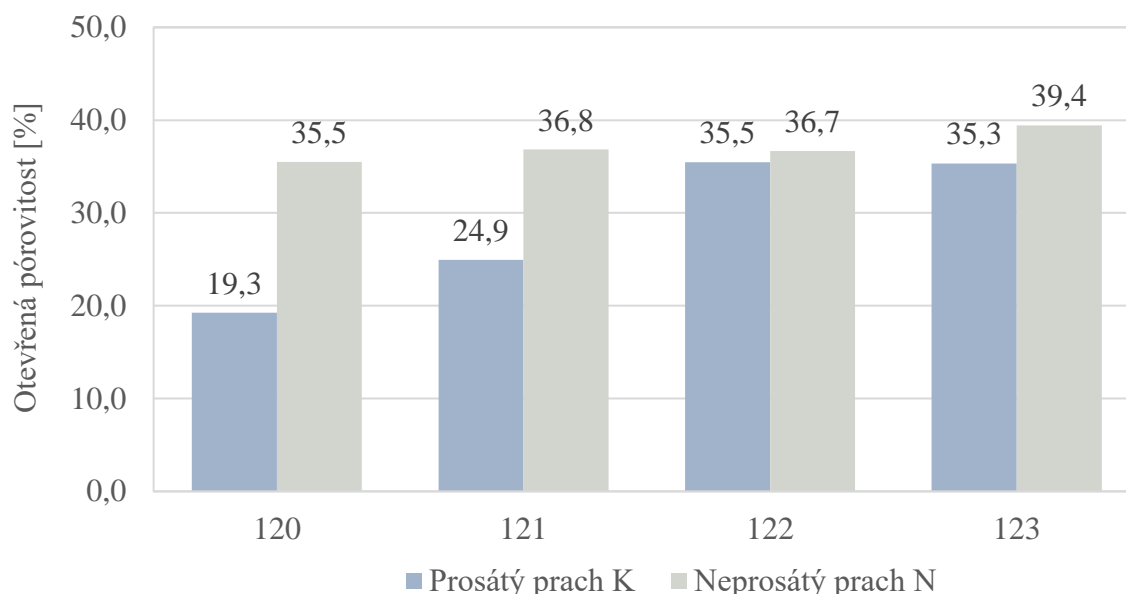
Tabulka 24. Pyknometrické měření prosátého cihelného prachu – směsi A

Pyknometr - po 28 dnech			
Materiál	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_{\text{mat}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\Psi_0$ [%]
K120	1849	2291	19,3
K121	1803	2402	24,9
K122	1697	2630	35,5
K123	1707	2639	35,3

Tabulka 25. Pyknometrické měření neprosátého cihelného prachu – směsi A

Pyknometr - po 28 dnech			
Materiál	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_{\text{mat}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\Psi_0$ [%]
N120	1669	2588	35,5
N121	1668	2640	36,8
N122	1667	2633	36,7
N123	1599	2640	39,4

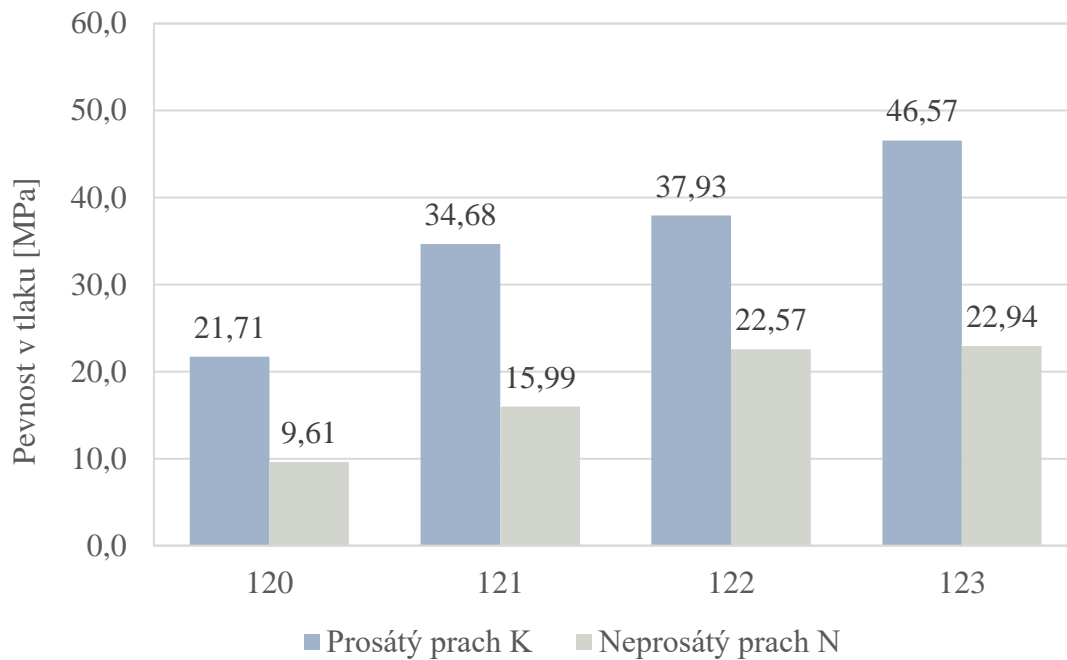
V následujícím grafu (obrázek 69) jsou porovnány hodnoty otevřené pórovitosti, které byly naměřeny na materiálu z prosátého cihelného prachu K o frakci do 0,125 mm a hodnoty naměřené na materiálu z neprosátého cihelného prachu N. Z grafu lze pozorovat, že hodnoty materiálu z neprosátého cihelného prachu mají vyšší hodnoty otevřené pórovitosti.



Obrázek 69. Graf Objem otevřených pórů - pyknometr

### 8.5.2 Mechanické vlastnosti

Naměřené pevnosti v tlaku jsou uvedeny v následujícím grafu (obrázek 70), kde jsou porovnány hodnoty materiálu z prosátého cihelného prachu K a hodnoty materiálu z cihelného prachu neprosátého N. Byly zde použity stejné poměry surovin jak u typu K, tak u typu N. Můžeme zde vidět, že pevnosti v tlaku jsou výrazně nižší u materiálu s použitím cihelného prachu neprosátého.

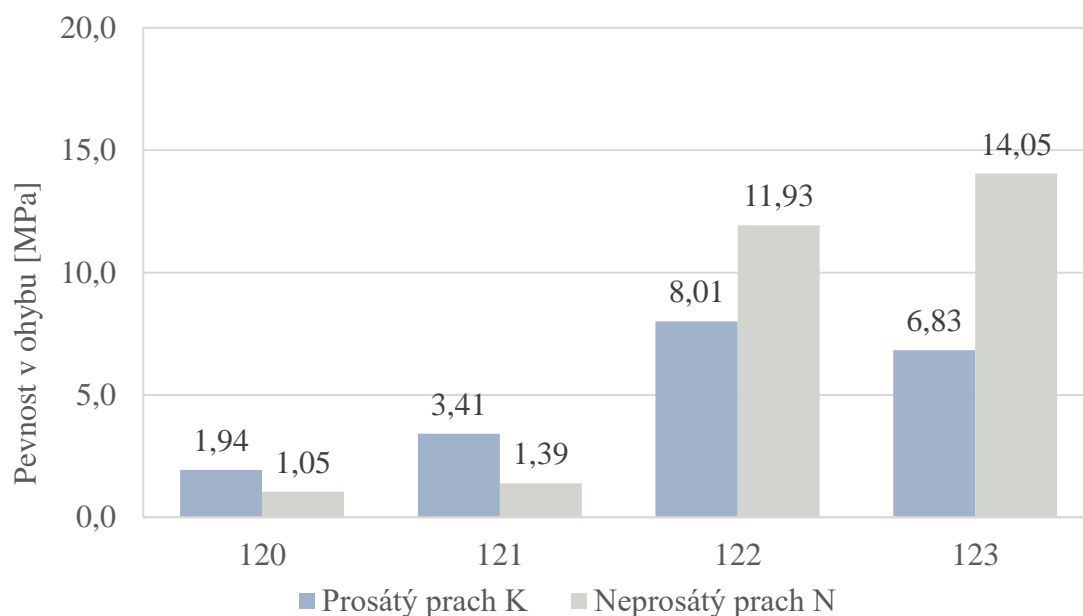


Obrázek 70. Graf porovnání pevností v tlaku po 28 dnech, prosátý x neprosátý cihelný prach

Pevnosti se liší až o 50 %. Nižší pevnost v tlaku při použití neprosátého cihelného prachu je pravděpodobně způsobena tím, že zrna větších velikostí reagují pouze na povrchu, nikoli uvnitř. Při alkalické aktivaci totiž zrna materiálu reagují jen do určité velikosti. Čím je menší velikost zrna, tím rychleji reakce probíhá.

Z grafu (obrázek 58) je také patrné, že při použití prosátého cihelného prachu se pevnosti pohybují cca od 20 do 50 MPa. Dále také můžeme vidět, že z hlediska pevnosti v tlaku po 28 dnech je nejvhodnější směs K123. Silikátový modul této směsi má hodnotu 1,4.

V následujícím grafu (obrázek 71) jsou zobrazeny výsledky pevností v tahu za ohybu směsí z prosátého cihelného prachu K do velikosti zrna 0,125 mm a směsí z neprosátého cihelného prachu N.



Obrázek 71. Graf porovnání pevností v tahu za ohybu po 28 dnech, prosátý x neprosátý cihelný prach

Z těchto výsledků je patrné, že pevnosti v tahu za ohybu jsou stejně tak jako u pevností v tlaku značně vyšší u směsí, ve kterých je použit prosátý cihelný prach. Výjimkou jsou materiály s označením 120 a 121, kde má vyšší pevnost materiál z prosátého cihelného prachu, z důvodu vzniku trhlin vzorků z neprosátého cihelného prachu.

## 8.6 Směsi typu B - srovnání jednotlivých vlastností směsí typu K a N

### 8.6.1 Základní fyzikální vlastnosti

Měření pomocí heliového pyknometru bylo opět prováděno na vzorcích po 28 dnech a po 90 dnech. Výsledky měření obou typů materiálu jsou uvedeny v tabulce 26 a 27. Objemová hmotnost materiálu z prosátého cihelného prachu má vyšší hodnoty než materiál z cihelného prachu neprosátého. Tyto hodnoty se mezi sebou liší zhruba o 5 %.

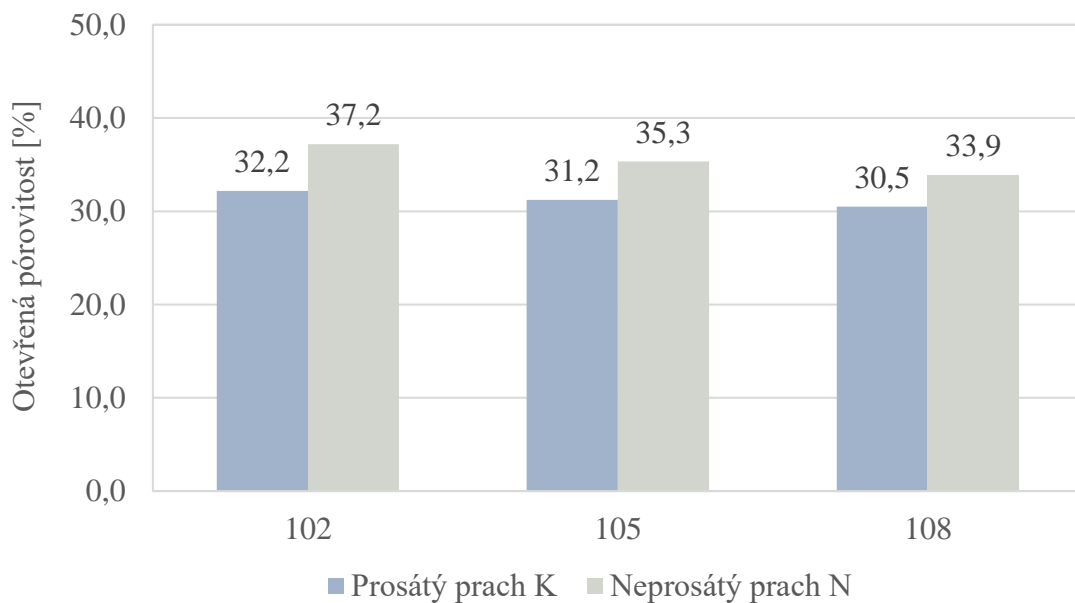
Tabulka 26. Pyknometrické měření prosátého cihelného prachu

Pyknometr - po 28 dnech			
Materiál	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_{\text{mat}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\Psi_0$ [%]
K102	1788	2637	32,2
K105	1806	2626	31,2
K108	1822	2622	30,5

Tabulka 27. Pyknometrické měření neprosátého cihelného prachu

Pyknometr - po 28 dnech			
Materiál	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_{\text{mat}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\Psi_0$ [%]
N102	1654	2633	37,2
N105	1700	2629	35,3
N108	1755	2655	33,9

V následujícím grafu (obrázek 72) jsou porovnány hodnoty otevřené pórovitosti, které byly naměřeny na materiálu z prosátého cihelného prachu K o frakci do 0,125 mm a hodnoty naměřené na materiálu z neprosátého cihelného prachu N. Rozdíl hodnot mezi těmito materiály je kolem 10 %, přičemž hodnoty neprosátého cihelného prachu mají vyšší hodnotu otevřené pórovitosti.

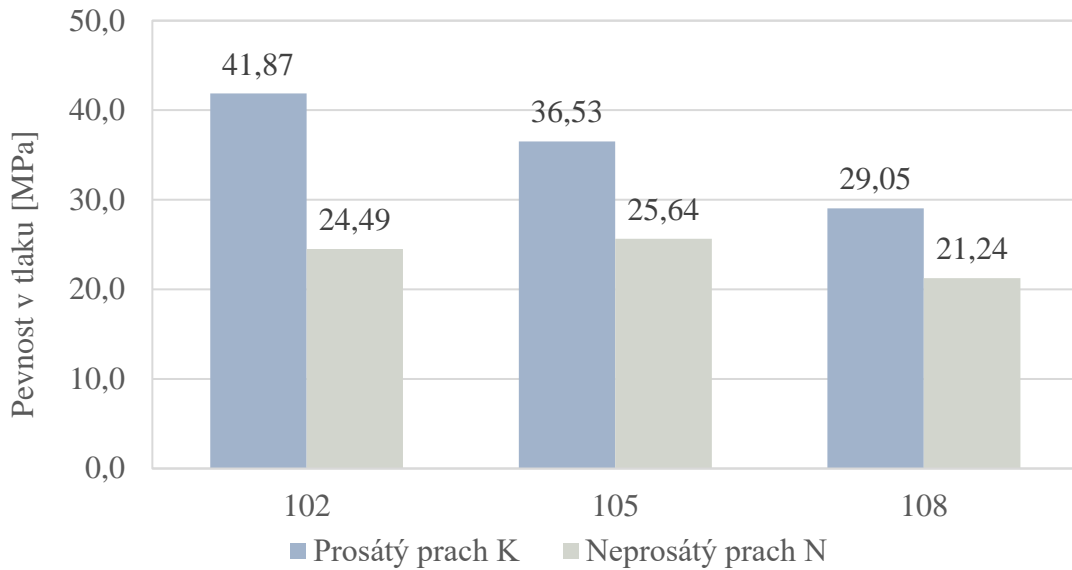


Obrázek 72. Graf Objem otevřených pórů - pyknometr

### 8.6.2 Mechanické vlastnosti

Naměřené pevnosti v tlaku jsou uvedeny v následujícím grafu (obrázek 73), kde je porovnáván materiál z prosátého cihelného prachu K a materiál z cihelného prachu neprosátého. Byly zde použity stejné poměry surovin jak u typu N, tak u typu K. Z grafu je zřejmé, že pevnosti v tlaku jsou opět výrazně nižší u materiálu z cihelného prachu neprosátého. Pevnosti materiálů se mezi sebou liší až o 40 %.

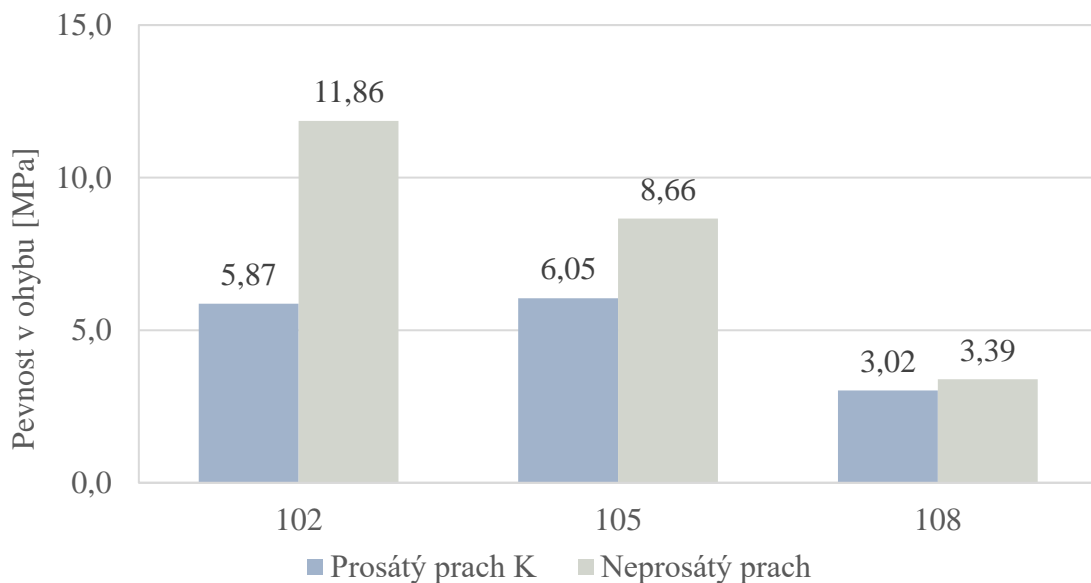




Obrázek 73. Graf porovnání pevností v tlaku po 28 dnech, prosátý x neprosátý cihelný prach

Z předchozího grafu (obrázek 73) lze konstatovat, že z hlediska pevnosti v tlaku po 28 dnech je nejvhodnější směs K102 s pevností 42 MPa.

V následujícím grafu (obrázek 74) jsou zobrazeny výsledky pevností v tahu za ohybu směsí z prosátého cihelného prachu K do velikosti zrna 0,125 mm a směsí z neprosátého cihelného prachu N.



Obrázek 74. Graf porovnání pevností v tahu za ohybu po 28 dnech, prosátý x neprosátý cihelný prach

Z těchto výsledků je patrné, že pevnosti v tahu za ohybu jsou stejně tak jako u pevností v tlaku značně vyšší u směsí, ve kterých je použit prosátý cihelný prach.

## 9 Závěr

V poslední době je kladen větší důraz na ekologii a ochranu životního prostředí, což souvisí se zpřísnujícími se ekologickými kritérii. S touto problematikou také úzce souvisí výroba cementu, která významně ovlivňuje negativním způsobem životní prostředí. Je prokázáno, že se do ovzduší vypustí jedna tuna oxidu uhličitého při produkci jedné tuny cementu [1].

Cílem této práce bylo najít vhodnou alkalicky aktivovanou směs s použitím cihelného prachu, který vznikl jako odpadní materiál při výrobě broušených cihelných bloků. Vzniklý materiál by se případně mohl stát vhodnou částečnou náhradou cementu (betonu). Alkalicky aktivované materiály vyprodukují o více než 50 % méně CO<sub>2</sub>. Navíc je zde využit odpadní materiál, který by jinak byl zátěží.

V této práci bylo studováno sedm druhů směsí. První čtyři směsi (směsi typu A) obsahovaly stejné množství cihelného prachu, vodního skla i vody, jen se měnilo množství hydroxidu sodného, tedy i silikátový modul, který se zde pohyboval od 0,8 do 1,4. Další tři směsi (směsi typu B) měly konstantní silikátový modul, který měl hodnotu 1,4 a tomu odpovídající zastoupení jednotlivých vstupních surovin, aby bylo konstantního Ms dosaženo. Vzorky byly vyrobeny ve dvou variantách, přičemž v první variantě byl použit cihelný prach prosátý K o frakci do 0,125 mm a v druhé variantě byl použit cihelný prach neprosátý N, přímo z výroby.

- **Směsi typu A – prosátý cihelný prach - frakce do 0,125 mm**

Hodnoty hustoty pevné matrice měly vzestupný charakter. Největší hodnotu vykazoval materiál K123 a nejnižší hodnotu vykazoval materiál K120. Nejvyšších hodnot objemu otevřených pórů dosahoval materiál K123, materiál s nejvyšším Ms = 1,4. Objem otevřených pórů tohoto materiálu se lišil zhruba o 50 % od materiálu K120 s nejnižším Ms = 0,8, který měl hodnotu otevřených pórů nejnižší. Z hlediska charakteristiky pórového systému bylo zjištěno, že výrazný pokles velikosti pórů nastal v oblasti 1 μm u všech typů směsí, kromě směsi s nejnižším Ms, kde byl obsah pórů celkově nižší. Mechanické vlastnosti materiálů (pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku jak po 28, tak po 90 dnech) měly vzrůstající trend. Tedy materiál s nejnižším Ms dosahoval nejnižších pevností, naopak materiál s nejvyšší hodnotou Ms dosahoval pevností nejvyšších. Dále se také lišily hodnoty

---

pevností v tlaku po 28 dnech a 90 dnech. Pevnosti materiálu se po 90 dnech zvýšily zhruba o 10 %.

- **Směsi typu B – prosátý cihelný prach - frakce do 0,125 mm**

U směsí typu B se hodnoty hustot pevné matrice materiálů od sebe lišily jen nepatrně v rozsahu do 2 %, stejně tak jako hodnoty objemové hmotnosti. Nejvyšší otevřená pórovitost dosahoval materiál K102 s nejvyšším obsahem vody a nejnižším obsahem NaOH. Tato hodnota klesala s ubývajícím množstvím vody a zároveň přibývajícím množstvím NaOH. Charakteristika pórového systému zde byla podobná jako u směsí typu A, tedy výrazný pokles velikosti pórů nastal v oblasti 1  $\mu\text{m}$ . Nejvyšších hodnot pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku po 28 a 90 dnech dosahoval materiál K102 s nejvyšším obsahem vody a nejnižším obsahem NaOH.

- **Směsi typu A – neprosátý cihelný prach**

Základní fyzikální vlastnosti materiálu z neprosátého prachu měly podobný trend jako u prachu prosátého. Nejvyšších hodnot otevřená pórovitost dosahoval materiál N123 s nejvyšším Ms, naopak nejnižší hodnoty vykazoval materiál N120 s nejnižším Ms. Také hodnoty mechanických vlastností opět s přibývajícím Ms vzrůstaly. Nejvyšších hodnot nabýval materiál N123 s nejvyšším Ms. Nejvyšší hodnoty součinitele tepelné vodivosti byly naměřeny na materiálu N120 s nejnižším Ms. Lze pozorovat rostoucí charakter součinitele tepelné vodivosti s klesajícím Ms. Vzhledem k obsahu pórů v materiálech se tento jev dal předpokládat.

- **Směsi typu B – neprosátý cihelný prach**

Materiály typu B vyrobené z neprosátého cihelného prachu vykazovaly podobný charakter jako hodnoty materiálu vyrobeného z cihelného prachu prosátého. Hodnoty hustoty pevné matrice si byly velmi podobné, lišily se od sebe pouze do 2 %, stejně tak jako hodnoty objemové hmotnosti materiálu. Otevřená pórovitost u těchto typů materiálů vykazovala nejvyšší hodnotu u materiálu N102 s nejvyšším obsahem vody a nejnižším obsahem NaOH. Tato hodnota klesala s přibývajícím obsahem NaOH. Tepelné vlastnosti opět odpovídaly obsahu otevřených pórů v materiálu. Hodnota součinitele tepelné vodivosti rostla s ubývajícím množstvím pórů a nejvyšší hodnotu vykazoval materiál N105.

- **Srovnání prosátého K a neprosátého N cihelného prachu**

Po srovnání jednotlivých vlastností směsí z prosátého cihelného prachu K a neprosátého cihelného prachu N vyplynulo, že materiály z neprosátého cihelného prachu vykazovaly vyšší hodnoty otevřené pórovitosti. Rozdíl těchto hodnot se pohyboval kolem 10 %. Také mechanické vlastnosti byly rozdílné. Naměřené pevnosti v tlaku se lišily zhruba o 50 %, přičemž pevnosti materiálu z prosátého cihelného prachu byly vyšší než pevnosti materiálu z cihelného prachu neprosátého.

Hodnoty mechanických vlastností u všech materiálů nevyšly v souladu s hodnotami pórovitosti, což je pravděpodobně způsobeno tím, že dochází k významným strukturním změnám v alkalicky aktivovaném materiálu. Řešení těchto strukturních změn by mohlo být předmětem dalšího výzkumu.

Závěrem by se dalo říci, že tento materiál lze doporučit pro použití k alkalické aktivaci a lze předpokládat, že by mohl být při určitých aplikacích perspektivním materiálem v oblasti náhrady běžně používaných cementů (betonů). Další směřování výzkumu by mohlo vést k hlubšímu pochopení vztahů mezi strukturou a fyzikálními vlastnostmi materiálu. V této oblasti lze využít moderních metod, jako je například NMR, které umožní podrobnější analýzu struktury materiálu (například analýzu amorfni fáze a vazeb vznikajících v materiálech). Dále by se materiál mohl zkoumat z hlediska podmínek uložení, tedy zkoumání materiálu při tuhnutí a tvrdnutí za vyšších teplot.

## Seznam obrázků

Obrázek 1. Průřez pyramidové tvárnice [1].....	4
Obrázek 2. Žáruodolné dřevoštěpkové panely [7].....	4
Obrázek 3. Struktura zeolitu [9] .....	6
Obrázek 4. Struktura geopolymery [10] .....	6
Obrázek 5. Al a Si NMR spektra podle Davidovitse [12] .....	7
Obrázek 6. Geopolymerization process [14] .....	9
Obrázek 7. Si-O-Al-O řetězce [1].....	9
Obrázek 8. Tetraedr SiO <sub>4</sub> a AlO <sub>4</sub> [12].....	10
Obrázek 9. Teoretický strukturní model geopolymerních pojiv [12] .....	10
Obrázek 10. Stabilizace/solidifikace [19].....	12
Obrázek 11. Složení směsí [29] .....	19
Obrázek 12. Pevnost v tlaku a) sodný aktivátor, b) draselný aktivátor [29].....	19
Obrázek 13. obrázky SEM a) A-FA-0, b) B-CA-4 c) C-CA-15 [29] .....	20
Obrázek 14. Vzorky [30] .....	21
Obrázek 15. Pevnost v tlaku [30].....	21
Obrázek 16. Grafy kumulativní křivka pórů.....	22
Obrázek 17. Mikrostruktura [30] .....	22
Obrázek 18. Pevnosti v tlaku [31] .....	24
Obrázek 19. Pevnosti v tlaku – teploty [31] .....	24
Obrázek 20. Porovnání pevností v % [31].....	25
Obrázek 21. SEM mikroskop a EDS analýza [31] .....	26
Obrázek 22. Měření na laboratorní váze [foto: Alblová Nikol] .....	28
Obrázek 23. Heliový pyknometr [34] .....	29
Obrázek 24. Rtuťový porozimetr [38] .....	30
Obrázek 25. Přístroj pro měření pevnosti v tahu za ohybu [40] .....	30
Obrázek 26. Uspořádání zatížení pro stanovení pevnosti v tahu za ohybu a)čelní pohled, b) boční pohled [42].....	31
Obrázek 27. Přístroj pro měření pevnosti v tlaku [40] .....	32
Obrázek 28. Přístroj ISOMET 2104 .....	34
Obrázek 29. Graf granulometrie cihelného prosátého prachu K o velikosti zrn do 0,125 mm .....	36

---

Obrázek 30. Graf granulometrie cihelného prosátého prachu K o velikosti zrn do 0,125 mm .....	37
Obrázek 31. Graf granulometrie cihelného střepu neprosátého N.....	37
Obrázek 32. Graf granulometrie cihelného střepu neprosátého N.....	38
Obrázek 33. Krystalová mřížka hydroxidu sodného [48].....	39
Obrázek 34. Hydroxid sodný [foto: Alblová Nikol].....	39
Obrázek 35. Směs K121 [foto: Alblová Nikol] .....	41
Obrázek 36. Směs K123 [foto: Alblová Nikol] .....	41
Obrázek 37. Směs K102 a její konzistence po umíchání v laboratorní míchačce [foto: Alblová Nikol] .....	42
Obrázek 38. K108 Odbednění [foto: Alblová Nikol] .....	43
Obrázek 39. Rozpuštění NaOH v H <sub>2</sub> O [foto: Alblová Nikol] .....	43
Obrázek 40. Naplněné formy přikryté folií .....	44
Obrázek 41. Graf pyknometr 28 a 90 dní .....	46
Obrázek 42. Graf distribuční křivka pórů .....	47
Obrázek 43. Graf Kumulativní křivka pórů.....	47
Obrázek 44. Graf pevnosti v tlaku po 28 dnech a 90 dnech .....	48
Obrázek 45. Mikrostruktura K120 .....	49
Obrázek 46. Mikrostruktura K121 .....	49
Obrázek 47. Mikrostruktura K122 .....	50
Obrázek 48. Graf Objem otevřených pórů – pyknometr .....	51
Obrázek 49. Graf distribuční křivka pórů.....	52
Obrázek 50. Graf kumulační křivka pórů .....	52
Obrázek 51. Graf pevnosti v tlaku po 28 dnech a 90 dnech .....	54
Obrázek 52. Mikrostruktura K102 .....	54
Obrázek 53. Mikrostruktura K105 .....	55
Obrázek 54. Mikrostruktura K108 .....	55
Obrázek 55. Graf Objem otevřených pórů – pyknometr .....	56
Obrázek 56. Graf distribuční křivka pórů.....	57
Obrázek 57. Graf kumulační křivka pórů .....	57
Obrázek 58. Graf pevnosti v tlaku po 28 dnech .....	58
Obrázek 59. Mikrostruktura N120 .....	59
Obrázek 60. Mikrostruktura N121 .....	59

---

---

Obrázek 61. Mikrostruktura N122 .....	60
Obrázek 62 Graf objem otevřených pórů – pyknometr .....	61
Obrázek 63. Graf distribuční křivka pórů .....	62
Obrázek 64. Graf kumulační křivka pórů .....	62
Obrázek 65. Graf pevnosti v tlaku po 28 dnech .....	63
Obrázek 66. Mikrostruktura N102 .....	64
Obrázek 67. Mikrostruktura N105 .....	64
Obrázek 68. Mikrostruktura N108 .....	64
Obrázek 69. Graf Objem otevřených pórů - pyknometr .....	66
Obrázek 70. Graf porovnání pevností v tlaku po 28 dnech, prosátý x neprosátý cihelný prach.....	67
Obrázek 71. Graf porovnání pevností v tahu za ohybu po 28 dnech, prosátý x neprosátý cihelný prach.....	68
Obrázek 72. Graf Objem otevřených pórů - pyknometr .....	69
Obrázek 73. Graf porovnání pevností v tlaku po 28 dnech, prosátý x neprosátý cihelný prach.....	70
Obrázek 74. Graf porovnání pevností v tahu za ohybu po 28 dnech, prosátý x neprosátý cihelný prach.....	70



## Seznam tabulek

Tabulka 1. Použité složení popílků ve směsi .....	18
Tabulka 2. Chemické složení popílku v % .....	20
Tabulka 3. Složení směsi .....	20
Tabulka 4. Chemické složení metakaolinu a křemenné moučky.....	23
Tabulka 5. Označení a složení směsí .....	23
Tabulka 6. Mineralogické složení cihelného prachu .....	35
Tabulka 7. Chemické složení cihelného prachu .....	36
Tabulka 8. Složení směsí typu A .....	41
Tabulka 9. Složení směsí B.....	42
Tabulka 10. Gravimetrické měření .....	45
Tabulka 11. Pyknometrické měření prosátého cihelného prachu .....	45
Tabulka 12. Pyknometrické měření po 90 dnech .....	46
Tabulka 13. Pevnosti v tlaku po 28 a 90 dnech, pevnosti v tahu za ohybu po 28 dnech	48
Tabulka 14. Gravimetrické měření .....	50
Tabulka 15. Pyknometrické měření prosátého cihelného prachu .....	51
Tabulka 16. Pyknometrické měření po 90 dnech - směsi B .....	51
Tabulka 17. Pevnosti v tlaku po 28 dnech a po 90 dnech.....	53
Tabulka 18. Pyknometrické měření neprosátého cihelného prachu .....	56
Tabulka 19. Pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu po 28 dnech.....	58
Tabulka 20. Tepelné vlastnosti směsí typu A .....	60
Tabulka 21. Pyknometrické měření neprosátého cihelného prachu .....	61
Tabulka 22. Pevnosti v tlaku po 28 dnech .....	63
Tabulka 23. Tepelné vlastnosti směsí typu B .....	65
Tabulka 24. Pyknometrické měření prosátého cihelného prachu – směsi A .....	65
Tabulka 25. Pyknometrické měření neprosátého cihelného prachu – směsi A .....	66
Tabulka 26. Pyknometrické měření prosátého cihelného prachu .....	68
Tabulka 27. Pyknometrické měření neprosátého cihelného prachu .....	69

---

## Literatura

- [1] V. Straňák, „Geopolymery,“ 2016. [Online]. Available: [http://www.matrix-2012.cz/index.php?option=com\\_content&view=article&id=1149:geopolymery](http://www.matrix-2012.cz/index.php?option=com_content&view=article&id=1149:geopolymery). [Přístup získán 2016].
- [2] M. Topinková, „Anorganická pojiva,“ Ostrava, 2013.
- [3] p. Ing. Bohuslav Řezník a C. RNDr. Pavla Rovnaniková, „Alkalická aktivace mletého keramického střepu,“ Brno, 2014.
- [4] I. R. Slavík, „Geopolymery a jejich použití pro nakládání s odpady,“ [Online].
- [5] P. Lattenberg, „Barevné možnosti umělých pískovců na geopolymerní bázi,“ Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, Brno, 2011.
- [6] J. Boháčová, S. Staněk a M. Vavro, „Možnosti aplikace alkalicky aktivovaných systémů ve stavebnictví,“ Ostrava, 2012.
- [7] J. Davidovits, „SlideShare,“ 2002. [Online]. Available: <http://www.slideshare.net/tranhuynhnam/30-years-in-geopolymer-applications>. [Přístup získán 2016].
- [8] M. P. Lattenberg, „Barevné možnosti umělých pískovců na geopolymerní bázi,“ Brno, 2011.
- [9] „Computational catalysis and materials group,“ School of chemical engineering, [Online]. Available: <https://engineering.purdue.edu/~thomsonk/projects.html>. [Přístup získán 2016].
- [10] „Geopolymer institute,“ 2012. [Online]. Available: <https://www.geopolymer.org/science/examples-geopolymer-frameworks/>. [Přístup získán 2016].
- [11] D. D. F. Škvára, „Alkalicky aktivované materiály geopolymery,“ Praha, 2007.
- [12] J. Davidovits, GEOPOLYMER Chemistry and Applications, France: Institut Geopolymere, 2015, 2011.
- [13] P. Niederle, „Náhrada metakaolinu jako suroviny pro výrobu geopolymers,“ Olomouc, 2014.

- [14] K. Banh, „SlideShare,“ [Online]. Available: <http://www.slideshare.net/KingstenBanh/kingsten-honors-thesis-defense>. [Přístup získán 2016].
- [15] D. Koloušek, B. Doušová a R. Slavík, „Syntéza zeolitů v geopolymerech využitelných v ekologii,“ Praha.
- [16] J. Hendrych, J. Kroužek, M. Kubal a P. Špaček, „Využití inovativních postupů při solidifikaci odpadů,“ Praha.
- [17] „Solidifikace, stabilizace odpadů,“ Marius Pedersen, 2016. [Online].
- [18] I. J. Koplík, „Inhibice nebezpečných látek v alumináto-silikátových systémech,“ Brno, 2012.
- [19] M. Březina, „SlidePlayer,“ [Online]. Available: <http://slideplayer.cz/slide/2337393/>. [Přístup získán 2016].
- [20] J. Zhang, J. L. Provis a D. Feng, „Geopolymers for immobilization,“ 2008.
- [21] „Slovník pojmů - popílek,“ [Online]. Available: <http://www.ebeton.cz/pojmy/popilek>. [Přístup získán listopad 2016].
- [22] R. Šulc a P. Svoboda, „Alkalická aktivace mletého úletového popílku,“ Praha, 2009.
- [23] „Metakaolin,“ Božičany.
- [24] „Bentonit,“ Únor 2016. [Online]. Available: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Bentonit>. [Přístup získán Listopad 2016].
- [25] J. Jirásek a M. Vavro, „Nerostné suroviny a jejich využití,“ Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy ČR & Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2008. [Online]. Available: <http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/keramika.html#ložiskacs>. [Přístup získán Prosinec 2016].
- [26] L. Míchal, „cscm - CIHLÁŘSKÝ SVAZ ČECH A MORAVY,“ 2016. [Online]. Available: <http://www.cscm.cz/napsali/historie-cihlarske-vyroby.pdf>. [Přístup získán Prosinec 2016].
- [27] I. Rejnuš, „Prisma consult,“ 2013. [Online]. Available: [http://www.prismaconsult.cz/fotky1136/\\_ps\\_24Suevitsky-tras-trasvap--malty-a-omitky.pdf](http://www.prismaconsult.cz/fotky1136/_ps_24Suevitsky-tras-trasvap--malty-a-omitky.pdf). [Přístup získán Prosinec 2016].

- 
- [28] „Stavební komunita,“ 2000. [Online]. Available: <http://stavebnikomunita.cz/profiles/blogs/slozky-cementu>. [Přístup získán Prosinec 2016].
- [29] C. R. Shearer, J. L. Provis, S. A. Bernal a K. E. Kurtis, „Alkali-activation potential of biomass-coal co-fired fly ash,“ *Cement and Concrete Composites*, 2016.
- [30] A. Mobili, A. Belli, C. Giosue, T. Bellezze a F. Tittarelli, „Metakaolin and fly ash alkali-activated mortars compared with cementitious mortars at the same strength class,“ *Cement and Concrete Research*, p. Web of science, 2016.
- [31] A. M. Rashad, A. A. Hassan a S. R. Zeedan, „An investigation on alkali-activated Egyptian metakaolin pastes blended with quartz powder subjected to elevated temperatures,“ *Applied Clay Science*, p. Web of science, 2016.
- [32] D. prof. Ing. Robert Černý, Počítačové a experimentální metody pro stanovení vlivu proměnlivého prostředí na degradaci historického zdiva, Praha: České Vysoké Učení Technické v Praze, 2013.
- [33] „123MAIN – základní materiálové parametry,“ KATEDRA MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ A CHEMIE, Praha.
- [34] „interphex,“ 2016. [Online]. Available: [https://www.interphex.com/\\_\\_novaimages/717823?q=100&v=635610982663170000&h=232&type=1&w=348](https://www.interphex.com/__novaimages/717823?q=100&v=635610982663170000&h=232&type=1&w=348).
- [35] „Rtuťová porozimetrie,“ Ústav anorganické technologie.
- [36] M. Dudák a M. Václavík, „VSCHT,“ [Online]. Available: <https://fchi.vscht.cz/files/uzel/0010367/RP.pdf>. [Přístup získán 2016].
- [37] P. Schneider, „Uchp.icpf.cas.cz,“ 2007. [Online]. Available: <http://uchp.icpf.cas.cz/transtex/textbooks/Skripta-textura%202007.pdf>. [Přístup získán 2016].
- [38] „pragolab,“ 2016. [Online]. Available: <http://www.pragolab.cz/analyza-povrchu/porozimetrie/pascal-series>.
- [39] „Zkušební metody malt pro zdivo - část 11: Stanovení pevnosti zatvrdlých malt v tahu za ohybu a v tlaku,“ v *ČSN EN 1015-11 (722400)*.
- [40] „Agilent Technologies - Authorized distributor,“ 2016. [Online]. Available: <http://www.strojeprozkusebnictvi.cz/zkouseni-cementu-a-vapna/>.
-

- [41] L. Svoboda, *Stavební hmoty*, Bratislava: JAGA GROUP, s.r.o., 2007.
- [42] L. Svoboda, *Stavební hmoty*, Praha: Jaga, 2009.
- [43] „rcptm.com,“ [Online]. Available: [http://www.rcptm.com/wp-content/uploads/2015/12/vp2\\_Katalog\\_RCPTM\\_sem\\_cs.pdf](http://www.rcptm.com/wp-content/uploads/2015/12/vp2_Katalog_RCPTM_sem_cs.pdf). [Přístup získán Prosinec 2016].
- [44] „Stanovení koeficientu tepelné vodivosti metodou nestacionárního tepelného toku,“ v *ČSN EN 1105 (721105)*, 1991.
- [45] „ceg.fsv.cvut.cz,“ CENTRUM EXPERIMENTÁLNÍ GEOTECHNIKY, 2006. [Online]. Available: <http://ceg.fsv.cvut.cz/ceg-old/CZ/ceg-vyzkum/tepelne.htm>.
- [46] „Měření tepelné vodivosti staveb,“ [Online]. Available: <http://www.tepelnavodivost.xf.cz/teorie.php>. [Přístup získán 2016].
- [47] „Metody zkoušení cementu - Část 5: Zkoušení pucolanity pucolánových cementů,“ v *ČSN EN 196-5 (722100)*, 2011.
- [48] „Hydroxid sodný,“ Wikipedia, 2016. [Online]. Available: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Hydroxid\\_sodný](https://cs.wikipedia.org/wiki/Hydroxid_sodný). [Přístup získán listopad 2016].
- [49] „Hydroxid sodný,“ [Online]. Available: <http://www.zschemie.euweb.cz/kyseliny/kyseliny24.html>. [Přístup získán listopad 2016].
- [50] „Hydroxid sodný,“ [Online]. Available: <http://www.chemap.cz/hydroxid-sodny/>. [Přístup získán listopad 2016].
- [51] „Vodní sklo,“ Duben 2016. [Online]. Available: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Vodní\\_sklo](https://cs.wikipedia.org/wiki/Vodní_sklo). [Přístup získán Listopad 2016].
- [52] „Základní informace o vodním skle,“ 21 Březen 2014. [Online]. Available: <http://www.vodnisklo.cz/cz/clanky/zakladni-informace-o-vodnim-skle>. [Přístup získán listopad 2016].
- [53] P. Kotlík, *„Stavební materiály historických objektů,“* Praha, 1999.

- [54] „Záměsová voda do betonu - Specifikace pro odběr vzorků, zkoušení a posouzení vhodnosti vody, včetně vody získané při recyklaci v betonárně, jako záměsové vody do betonu,“ v *ČSN EN 1008 (732028)*, 2003.
- [55] „Záměsová voda do betonu,“ v *ČSN EN 1008*, 2003.
- [56] „MujBeton.cz,“ [Online]. Available: <http://www.mujbeton.cz/zamesova-voda-do-betonu>. [Přístup získán Prosinec 2016].