

**STŘEDNÍ PRŮMYSLOVÁ ŠKOLA STAVEBNÍ JOSEFA GOČÁRA**

Družstevní ohoz 3/1659, 140 00 Praha 4



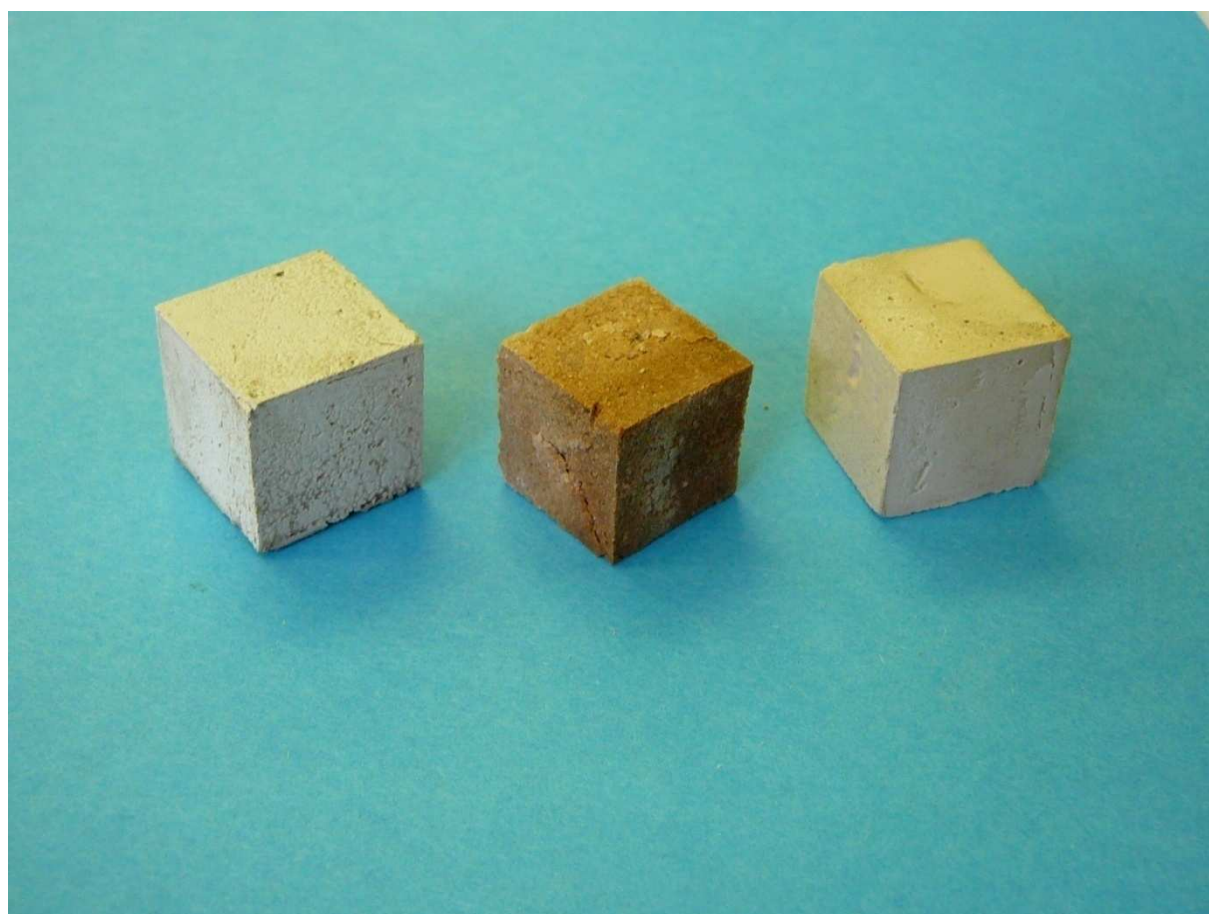
**OBOR:** 11. Stavebnictví, architektura a design interiérů

**AUTOR:** Michal Řepík

**KONZULTANT:** Ing. Jindřich Vorel

**ROČNÍK:** 2.

**NÁZEV PRÁCE:** PŘÍPRAVA GEOPOLYMERŮ



**Obsah**

CÍL VÝZKUMU.....	3
STROJNÍ ZAŘÍZENÍ POUŽITÁ PŘI VÝZKUMU GEOPOLYMERŮ.....	3
TEORETICKÁ ČÁST.....	5
PROBLEMATIKA GEOPOLYMERŮ.....	5
SUROVINY PRO VÝROBU GEOPOLYMERŮ.....	7
TECHNOLOGICKÉ POSTUPY MÍŠENÍ A OŠETŘOVÁNÍ GEOPOLYMERNÍ SMĚSI.....	10
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	11
GEOPOLYMERY Z METAKAOLINU SEDLEC.....	11
Geopolymery vytvořené z metakaolinu Sedlec o teplotě kalcinace 550 °C/ 4 hod .....	12
ZÁVISLOST PEVNOSTI GEOPOLYMERŮ NA RELATIVNÍM MNOŽSTVÍ VODNÍHO SKLA	13
CELKOVÉ ZRÁNÍ GEOPOLYMERNÍCH SMĚSÍ Z METAKAOLINU SEDLEC (550 °C/ 4 hod).....	14
RENTGENOVÝ ROZBOR GEOPOLYMERU SEDLEC (Vzorek č. 2).....	15
Geopolymery vytvořené z metakaolinu o teplotě kalcinace 750 °C/ 5 hod.....	16
ZÁVISLOST PEVNOSTI GEOPOLYMERŮ NA RELATIVNÍM MNOŽSTVÍ VODNÍHO SKLA	17
CELKOVÉ ZRÁNÍ GEOPOLYMERNÍCH SMĚSÍ Z METAKAOLINU SEDLEC (750 °C/ 5 hod).....	18
GEOPOLYMERY Z METAKAOLINU KADAŇ.....	18
ZÁVISLOST PEVNOSTI GEOPOLYMERŮ NA RELATIVNÍM MNOŽSTVÍ VODNÍHO SKLA	20
CELKOVÉ ZRÁNÍ GEOPOLYMERNÍCH SMĚSÍ Z METAKAOLINU KADAŇ.....	21
VYHODNOCENÍ.....	22
ZÁVĚR.....	24
SOUČASNÝ VÝZKUM V OBLASTI GEOPOLYMERŮ.....	24
POUŽITÁ LITERATURA.....	25
PODĚKOVÁNÍ.....	25

## CÍL VÝZKUMU

Definovat prioritní cíle při výzkumu geopolymérů bylo poměrně složité. V první řadě proto, že se jedná o zcela nové směsi, jež jsou známy jen ve světě, nebo v odvětvích vyšší chemie a hlavně proto, že tyto hmoty nikdy mezi zdi školní laboratoře nebyly připraveny. Ale i tak vůbec prvním cílem bylo onu geopolymerní hmotu vytvořit. S každým novým vzorkem jsem podstupoval veliký krok do neznáma a během výzkumu se dostavovalo mnohem více otázek než odpovědí. Nakonec po vytvoření několika různorodých geopolymerních směsí jsem dospěl k jednoznačnému cíli. Omezit množství surovin natolik, aby směs vykazovala nejlepších pevnostních charakteristik. Neboli **vytvořit ekonomicky i ekologicky optimální geopolymerní směs s vlastnostmi srovnatelnými s vlastnostmi betonu**. Co se týče oněch surovin, zaměřil jsem se pouze na omezení vodního skla, které na pevnost geopolyméru mělo, jak se při dalším čtení dozvíme, největší vliv.

## STROJNÍ ZAŘÍZENÍ POUŽITÁ PŘI VÝZKUMU GEOPOLYMERŮ

Při výzkumu v oblasti geopolymerních pojiv, jsem použil následující výčet strojních zařízení, která se nacházejí v laboratoři naší školy.

- Elektrická komorová pec o pracovním rozsahu teplot 0 – 1200 °C



- Vibrační stůl opatřen dvěma vibrátory EVK 550 s usměrněnou vibrací s nastavením na střední hodnotu výstředností



- Elektrická sušárna s pracovním rozsahem teplot 50 – 200 °C



- Hydraulický lis s maximálním výkonem 400 kN. Použitý rozsah pro zkoušení našich vzorků 0 – 40 kN.



## TEORETICKÁ ČÁST

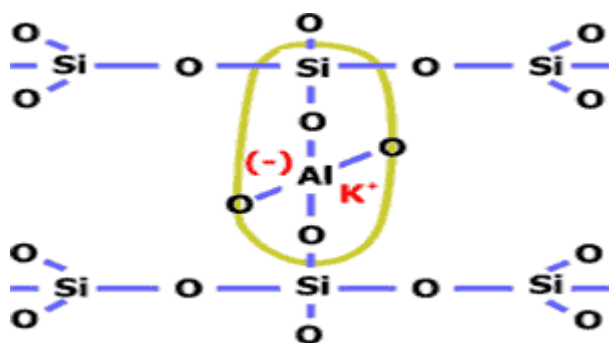
## PROBLEMATIKA GEOPOLYMERŮ

Na otázku co je to vlastně geopolymer není ve skutečnosti lehké odpovědět. Pokud bychom měli být co možná nejstručnější, doslovně by pak slovo „Geopolymer“ znamenalo umělý kámen, resp. uměle vytvořený kámen. Přesněji by pak geopolymery byly amorfni až semikrystalické nanokompozitní látky vznikající tzv. geosyntézou. V posledních letech byly zaznamenány význačné pokroky ve vývoji těchto nových materiálů. Na základě geopolymerační reakce je možno získat materiály (hydrokeramika), které konkurují tradiční keramice, a to bez nároků na vysokoteplotní procesy. Abychom se geopolymery mohli zabývat podrobněji, musíme se vrátit trochu zpět do klasické anorganické chemie. Základními stavebními kameny geopolymerní hmoty jsou totiž dva prvky, křemík (Si) a hliník (Al). Ve skutečnosti se ve směsi vyskytují i alkalické prvky jako jsou sodík (Na) nebo draslík (K), které mají vliv na celkovou stabilitu hmoty. K pochopení celé problematiky geopolimerů nám pomůže periodická soustava prvků.

1 H 1.0079																	18 He 4.0026
3 Li 6.941	4 Be 9.0122											5 B 10.811	6 C 12.011	7 N 14.007	8 O 15.999	9 F 18.998	10 Ne 20.180
11 Na 22.990	12 Mg 24.305											13 Al 26.982	14 Si 28.086	15 P 30.974	16 S 32.066	17 Cl 35.453	18 Ar 39.948
19 K 39.098	20 Ca 40.078	21 Sc 44.956	22 Ti 47.867	23 V 50.942	24 Cr 51.996	25 Mn 54.938	26 Fe 55.845	27 Co 58.933	28 Ni 58.693	29 Cu 63.546	30 Zn 65.39	31 Ga 69.723	32 Ge 72.61	33 As 74.921	34 Se 78.96	35 Br 79.904	36 Kr 83.80
37 Rb 85.468	38 Sr 87.62	39 Y 88.906	40 Zr 91.224	41 Nb 92.906	42 Mo 95.94	43 Tc (98)	44 Ru 101.07	45 Rh 102.91	46 Pd 106.42	47 Ag 107.87	48 Cd 112.41	49 In 114.82	50 Sn 118.71	51 Sb 121.76	52 Te 127.60	53 I 126.90	54 Xe 131.29
55 Cs 132.91	56 Ba 137.33	57-71 * #	72 Hf 178.49	73 Ta 180.95	74 W 183.84	75 Re 186.21	76 Os 190.23	77 Ir 192.22	78 Pt 195.08	79 Au 196.97	80 Hg 200.59	81 Tl 204.38	82 Pb 207.2	83 Bi 208.98	84 Po (209)	85 At (210)	86 Rn (222)
87 Fr (223)	88 Ra (226)	89-103 * #	104 Rf (261)	105 Db (262)	106 Sg (263)	107 Bh (264)	108 Hs (265)	109 Mt (266)	110 Uun (269)	111 Uuu (272)	112 Uub (269)		114 Uuq ‡		116 Uuh ‡		118 Uuo ‡
* Lanthanide series			57 La 138.91	58 Ce 140.12	59 Pr 140.91	60 Nd 144.24	61 Pm (145)	62 Sm 150.36	63 Eu 151.96	64 Gd 157.25	65 Tb 158.93	66 Dy 162.50	67 Ho 164.93	68 Er 167.26	69 Tm 168.93	70 Yb 173.04	71 Lu 174.97
# Actinide series			89 Ac (227)	90 Th 232.04	91 Pa 231.04	92 U 238.03	93 Np (237)	94 Pu (244)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (251)	99 Es (252)	100 Fm (257)	101 Md (258)	102 No (259)	103 Lr (262)

Při pohledu do tabulky vidíme jasné uspořádání prvků do sloupců, neboli skupin a do řádků, kterým říkáme periody. Důležitým poznatkem, který nás v současnosti bude nejvíce zajímat je vlastní povaha prvků, tvořících geopolymer. Jednoduše řečeno, prvky, které jeví podobné chemické vlastnosti, jsou v tabulce řazeny právě do oněch skupin. Tedy do sloupců pod sebou. Jen pro příklad, v VII. A (17) skupině nalezneme tzv. halové prvky, které tvoří podobné sloučeniny (halogenidy), nebo bezkyslíkaté i kyslíkaté kyseliny. Vzájemně se však od sebe liší elektronovou konfigurací a obecně celkovou velikostí jádra a obalu atomu.

Nicméně i tak mají velice podobné vlastnosti. O pár sloupců vlevo se nachází skupina IV. A (14), kde nalezneme nejdůležitější prvek v geopolymerech, křemík (Silicium). V celém sloupci se mimo jiné vyskytuje i uhlík a právě s ním má náš křemík nejvíce společného. Oba prvky totiž mají vlastnost vytvářet chemické řetězce. Uhlík se však používá, resp. vyskytuje v organické chemii, kde tvoří ve spolupráci s vodíkem organické sloučeniny. Křemík pak zase v přítomnosti aluminia (hliníku) vytváří jakési anorganické aluminosilikátové řetězce, ze kterých je geopolymery vytvořen. Nutno podotknout, že se jedná o prostorové (trojrozměrné) sítě tvořené pravidelnými čtyřstěny (tetraedry). Dostaneme se k nim při studiu surovin použitých pro výrobu. Dalším důležitým prvkem pro tvorbu aluminosilikátů je kyslík. Jelikož je známo, že obraz mluví za tisíce slov, podívejme se tedy na strukturu geopolymery [1].



Takže podobně jako uhlík tak i křemík dokáže vytvářet řetězce, aluminosilikátové řetězce se často nazývají jako řetězce sialátové a podle složitosti a periodičnosti jednotlivých atomů prvků v sialátové síti rozeznáváme řady: poly(sialate), poly(sialate-siloxo) a poly(sialate disiloxo). Tyto podrobnosti, ač nám jsou velmi dobře známé, nejsou předmětem této práce a proto se o nich zmiňujeme pouze letmo. Při výrobě našeho geopolymery pak máme na mysli aluminosilikátovou poly(sialátovou) síť. Sialátová síť obsahuje  $\text{SiO}_4^{4-}$  a tetraedry  $\text{AlO}_4^{5-}$  střídavě propojované kyslíkovými anionty. Pro vyrovnání náboje tetraedricky koordinovaného  $\text{Al}^{3+}$  jsou ve struktuře geopolymery obsaženy kationy  $\text{Na}^+$ , resp.  $\text{K}^+$ , které jsou do směsi přidávány v podobě alkalického média ( $\text{NaOH}$  a  $\text{KOH}$ ). Existuje teorie, že geopolymery byly používány již ve starověkém Egyptě jako materiál při budování pyramid. Touto hypotézou by pak následně odpadla problematika mechanického transportu kamenných dílců na stanoviště výstavby a jejich až neuvěřitelně přesné osazení do stavby. Realizace stavby by následně byla uskutečněna pomocí bednění, do kterého by se čerstvá geopolymerní směs lila a následně tuhla. Pevnost egyptských geopolymery se po dvou měsících tuhnutí a tvrdnutí odhaduje na 15 MPa.

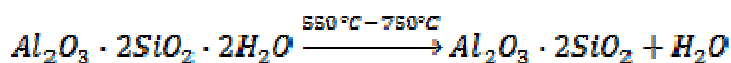
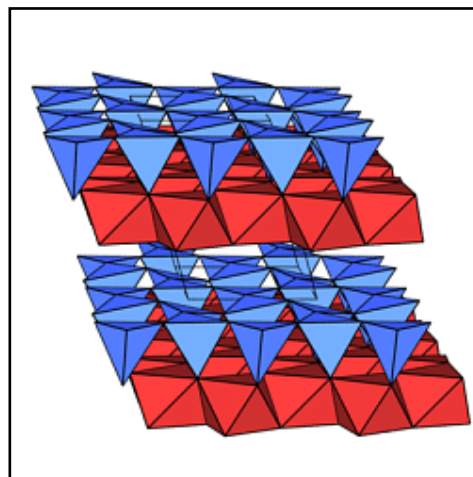
## SUROVINY PRO VÝROBU GEOPOLYMERŮ

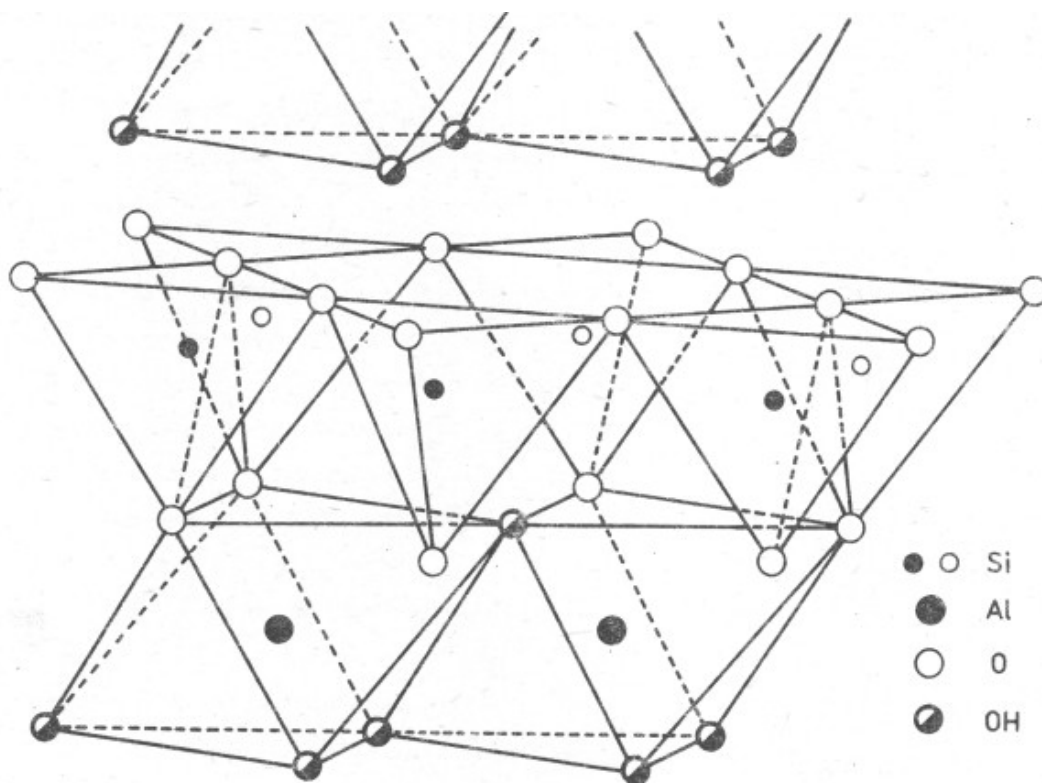
Pokud chceme vytvářet geopolymerní směsi, potřebujeme suroviny, které obsahují sloučeniny  $\text{SiO}_2$  a  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . V našich laboratorních podmínkách byly použity co možná nejekologičtější materiály, které svojí výrobou spotřebovávají co možná nejméně energie a ovzduší nezatěžují oxidem uhličitým (případ výroby portlandského cementu). Na výrobě geopolymery se podílely tyto suroviny:

- a) Kaolin (Metakaolinit)
- b) Vodní sklo
- c) Hydroxid sodný
- d) Voda

### *Metakaolinit ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ )*

Kaolin je plastická surovina, tvořená převážně jílovým minerálem kaolinitem. Teoretické složení kaolinitu je:  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (39,5 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 46,5 %  $\text{SiO}_2$ , 13,9 % ztráty žháním). Pro naše potřeby byl však použit kaolin tepelně upravený, odborně řečeno kalcinovaný a to z jediného důvodu. Narušit hlinitanové oktaedry tvořící jednu vrstvu tohoto jílového minerálu tak, aby vznikly hlinitanové tetraedry, které jsou aktivní a to zejména v silně alkalickém prostředí okolo pH 13. Schéma kaolinitu je patrné na obrázku vpravo. Jsou zde znázorněny modré čtyřstěny a červené osmistěny. Jedná se o modré tetraedry a červené oktaedry. Tyto částice tvoří vrstvu řádově o tloušťce 0,7 nm. Zastoupení většího množství tetraedrů znamená pro kaolinit větší aktivitu. Z tohoto důvodu se přepálením mění kaolin na metakaolin. Chemický proces kalcinace kaolinitu můžeme zapsat rovnicí.





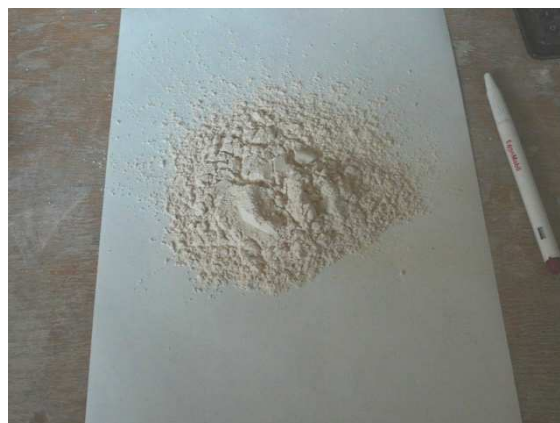
Na obrázku jsou jasně patrné atomy a vazby, které vytváří tetraedrickou a oktaedrickou síť [3]

Ovšem ani s kalcinací se to nesmí přehánět. O tom, jak se mění povaha kaolinitu v závislosti na teplotě, nás informují tzv. DTA křivky (DTA= diferenční termická analýza). Ukázalo se, že neoptimálnější teplota pro kalcinaci kaolinitu je 550 °C/ 4 hod. Při experimentech byly použity dva druhy kaolinitu, a to sice odrůdy **Kadaň** a **Sedlec I A**. Kaolin Sedlec se dá nazvat „čistým kaolinitem“. Obsahuje ho totiž skoro 90 %. Byl použit kalcinovaný při teplotě 550 °C/ 4 hod a 750 °C/ 5 hod. Naproti tomu Kadaň má potenciál přibližných 50 % čistého kaolinitu. Ten byl kalcinovaný za teploty 550 °C/ 4 hod. Oba druhy se od sebe vzájemně liší jak pohledovými vlastnostmi, tak i zpracovatelností. Pozdějšími experimenty jsem dospěl i k dalším markantnějším rozdílům. Pro představu uvádím fotografie obou kaolinových druhů.

**Kadaň**



**Sedlec I.A**





### Vodní sklo ( $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2 \cdot n \text{H}_2\text{O}$ )

Bylo po metakaolinu další velmi důležitou surovinou. Jelikož má vysoký obsah křemíku, který je pro vytváření geopolymerní směsi nejdůležitější, mohlo by se zdát, že čím více jej ve směsi bude obsaženo, tím lepších výsledků bude směs dosahovat. Experimentálně jsem však dokázal, že nadměrné množství vodního skla v geopolymerní směsi snižuje následnou pevnost materiálu v tlaku. Závislostmi pevnosti na množství vodního skla jsem se zabýval v experimentální části této publikace. Skutečnost je taková, že vodní sklo není ekonomicky příhodným materiálem a tak bylo prvořadě určit optimální množství této suroviny, resp. nejmenší množství v geopolymerní směsi, aby pevnosti v tlaku byly co největší.

### Hydroxid sodný (NaOH)

Jednoduše dostupný hydroxid sodný „louh“ byl použit jako alkalické médium k vodnímu sklu. Právě louhem dostaneme do směsi důležitý sodík, resp. sodíkové kationy  $\text{Na}^+$ . Bez přídatku hydroxidu sodného by se veškerý metakaolin vhodně nezaktivoval a roli by převzalo pouze vodní sklo a na objemovou jednotku velmi malé množství sodných kationů v něm obsažené. Pro výrobu geopolymerní směsi lze použít i hydroxidy s jinými alkalickými prvky, jako jsou kupříkladu hydroxid draselný (KOH) nebo hydroxid lithný (LiOH). Skutečnost je ovšem taková, že hydroxid sodný je ze všech výše uvedených sloučenin nejekonomičtější a nejlépe dostupný. Naproti tomu hydroxid draselný má menší plošný náboj a je i o poznání dražší. Hydroxid lithný je pak velmi aktivní a práce s ním je nebezpečnější.

### Voda $\text{H}_2\text{O}$

Primárně byla použita destilovaná voda. Nicméně rozdílné vlastnosti mezi destilovanou vodou a vodou z vodovodního řádu se v žádném případě neprojeví při následných zkouškách geopolymerních směsí. Z tohoto důvodu bylo opětně přihlédnuto k ekonomičtějšímu řešení a byla použita voda z vodovodního řádu o pokojové teplotě přibližných 20 °C.



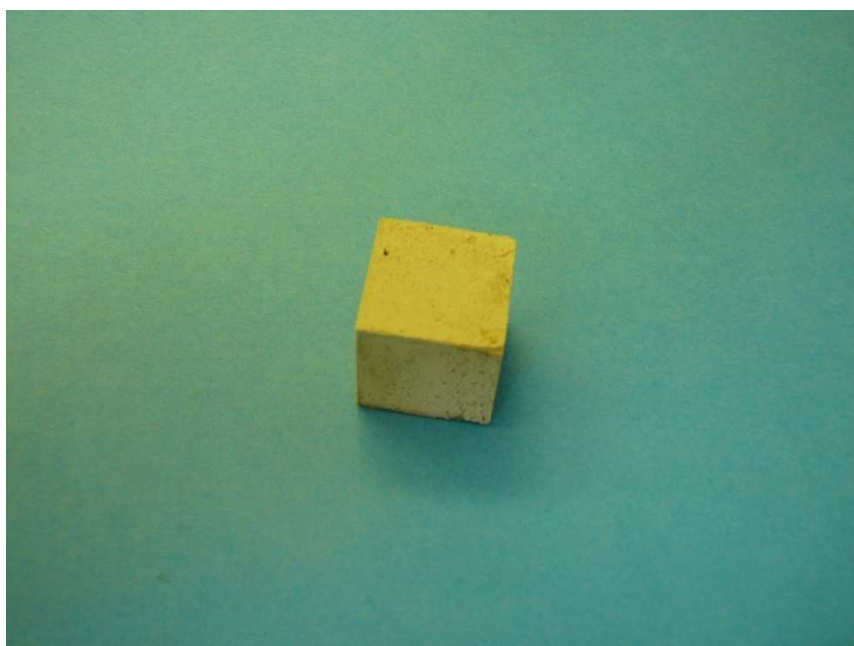
## TECHNOLOGICKÉ POSTUPY MÍŠENÍ A OŠETŘOVÁNÍ GEOPOLYMERNÍ SMĚSI

Obdobně jako výroba betonové směsi má i naše výroba té směsi geopolymerní jasná pravidla a zásady, které je třeba dodržovat. Tato kapitola pojednává o principu míšení, zpracování a následném ošetření geopolymerní směsi. Můžeme tedy říci, že zde čtenář nalezne jakousi kuchařku, podle které geopolymerní směs může vytvořit. Jedná se o Pracovní postup. Po navážení jednotlivých složek směsi se ve vodním skle nechal rozpustit hydroxid sodný NaOH. Rozpouštění louhu má za následek vyvolání silné exotermické reakce, takže se s chemikálií muselo pracovat velmi opatrně. Po dokonalém rozpouštění se za stálého míchání vsypal do roztoku metakaolin, nezávisle na tom, zda se jednalo o odrůdy Sedlec nebo Kadaň. Následně začal proces míšení. U geopolymerní směsi je potřeba dosáhnout co největší homogenizace zrn metakaolinu a proto se směs vytvořená z vodního skla, hydroxidu sodného a metakaolinu míchala za vibrace na vibračním stole. Celý proces homogenizace trval přibližně 10 minut. Čas ale při vytváření geopolymerní směsi nemá na konečnou podobu směsi žádný význam. Proto bylo možno provádět vibraci delší nebo kratší dobu až do chvíle neoptimálnější konzistence hmoty. Teď se dostáváme k otázce přítomnosti vody v geopolymerní směsi. Je experimentálně zjištěno, že s rostoucím podílem vody klesá pevnost v tlaku geopolymerní směsi. Z tohoto důvodu se do vody nepřidávalo předem navážené množství, ale pouze takové, aby se dospělo ke správné, tedy netekuté konzistenci. Správná konzistence geopolymerní hmoty se zjistila řezem, který se provedl lineárně v čerstvé směsi. Pokud docházelo k rychlému opětovnému slinutí, byla hmota již přesycena vodou. Naproti tomu, pokud se řez po okrajích roztřepil, byla směs ideální. Další sice rovněž nijak nenormovaná zkouška bylo jednoduché otočení nádoby dnem vzhůru. Směs pak nesměla vypadnout na zem. Tak se zjistilo neoptimálnější množství vody ve směsi. Hmota se pak uložila do forem ve tvaru krychle o hraně 20 mm a ztuhlila opět na vibračním stole. Při hutnění se do geopolymerní směsi opět děly drobné řezy, které zaručovaly správný odchod vzduchových bublin ze směsi ven, resp. podpovrchové vrstvy. Po ztuhnutí, které opět nebylo nijak časově omezeno, řádově několik sekund, se vzorkovnice vložily do elektrické sušárny, kde se po dobu 2 hodin vystavovaly teplotě 60 °C. Geopolymery ovšem byly v sušárně hermeticky uzavřeny ve vodní lázni, z důvodu rychlejšího náběhu geosyntézy ve hmotě (rychlejší náběh počátečních pevností). Pokud by se hmota do sušárny neumísťovala, k syntéze by došlo volnějším způsobem na vzduchu. Po vyjmutí vzorkovnic ze sušárny se po 24 hod. dalšího zrání směsi na vzduchu vzorky odformovaly. Následně se vzorky geopolymerní směsi vystavovaly pevnostním zkouškám v tlaku po 7, 14 a 28 dnech tuhnutí a tvrdnutí na vzduchu.

## EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

### GEPOLYMERY Z METAKAOLINU SEDLEC

Dle uvedeného postupu v kapitole „Technologické postupy míšení a ošetřování geopolymerních směsí“ byly vytvořeny geopolymerní hmoty, které měly za cíl co nejlépe a nejpresněji vystihnout závislosti pevností na relativním množství vodního skla. Při experimentech byl použit kalcinovaný kaolin Sedlec s teplotou kalcinace 550 °C/ 4 hod a Sedlec s kalcinační teplotou 750 °C/ 5 hod. Na následujícím obrázku vidíme již zatuhlou geopolymerní hmotu zrající po dobu 14 dní v laboratorních podmínkách (20 °C, sucho).



## Geopolymery vytvořené z metakaolinu Sedlec o teplotě kalcinace

### 550 °C/ 4 hod

První fází výzkumu bylo vytvoření geopolymerní směsi z metakaolinu Kadaň s teplotou kalcinace 550 °C/ 4 hod. Směsi byly připraveny s různým podílem vodního skla. Množství vodního skla i pevnosti, které vzorky vykazovaly, nalezneme v tabulce č. 1.

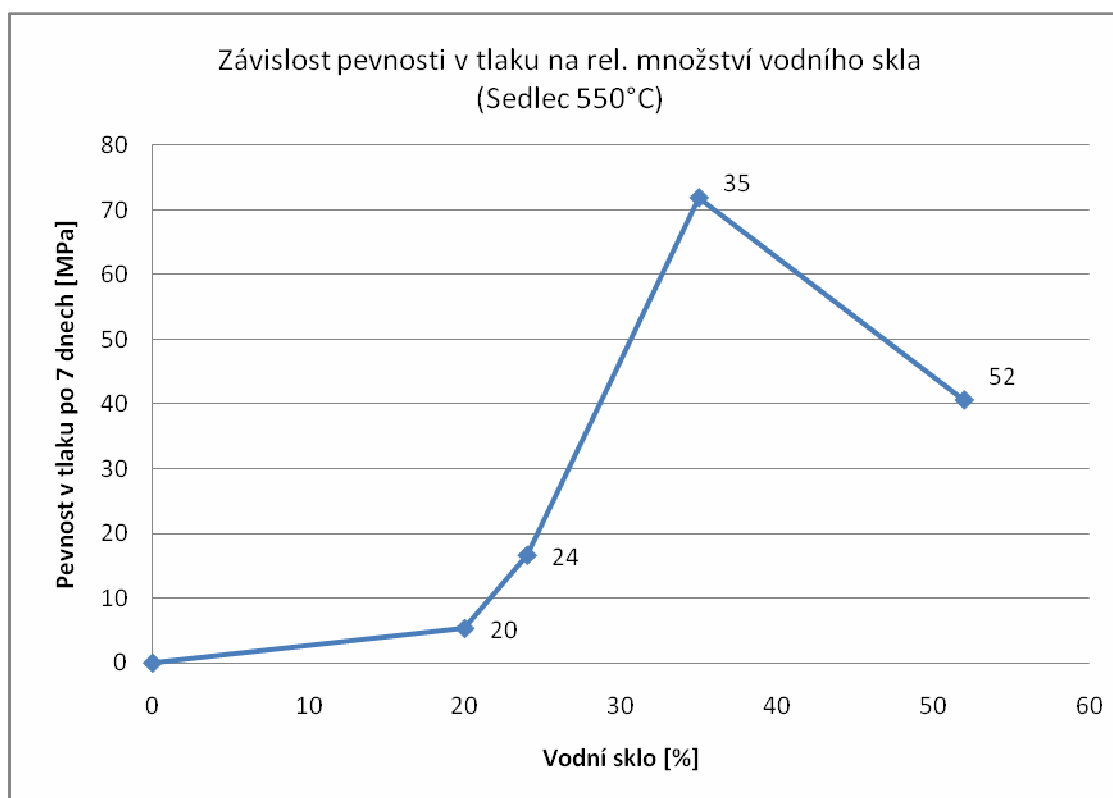
Tabulka č. 1

Číslo vzorku	Množství vodního skla [%]	Pevnost v tlaku [MPa] po dobu		
		7 dní	14 dní	28 dní
1	52	40,63	43,00	47,25
2	35	71,88	72,75	76,25
3	24	15,60	16,69	18,00
4	20	5,33	5,00	6,63
5	0	0	0	0

### ZÁVISLOST PEVNOSTI GEOPOLYMERŮ NA RELATIVNÍM MNOŽSTVÍ VODNÍHO SKLA

Z výše uvedených dat byla sestavena křivka (graf č. 1) závislosti pevnosti v tlaku, (nutno podotknout, že se jedná o pevnost po době 7 dní tuhnutí a tvrdnutí) na relativním, tzn. procentuálním zastoupením vodního skla v geopolymerní směsi.

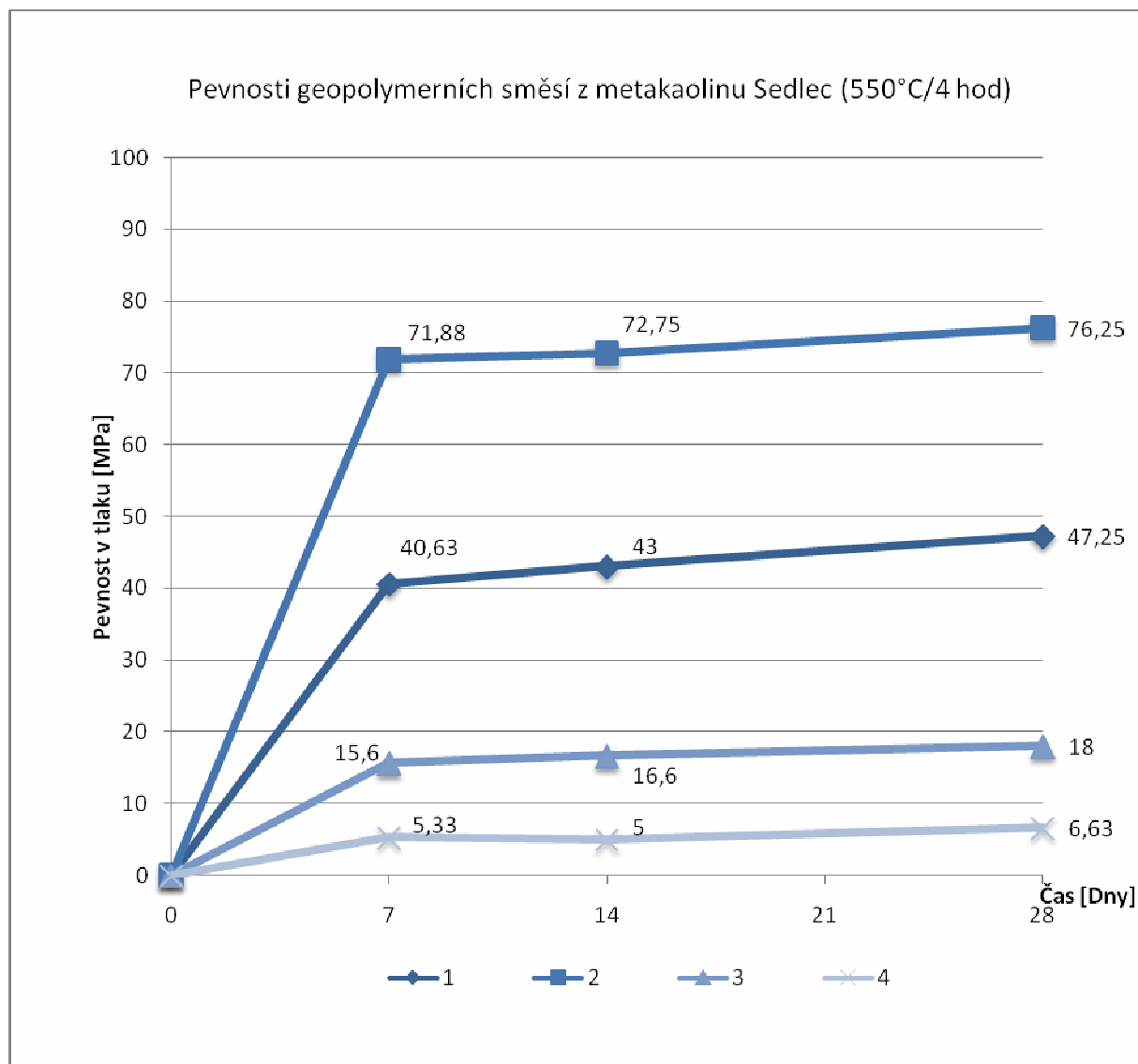
Graf č. 1



Zjistil jsem, že **množství vodního skla není přímo úměrné pevnosti geopolymerní směsi.** Podařilo se naleznout kulminační bod, kde je **nejoptimálnější množství vodního skla 35 %.**

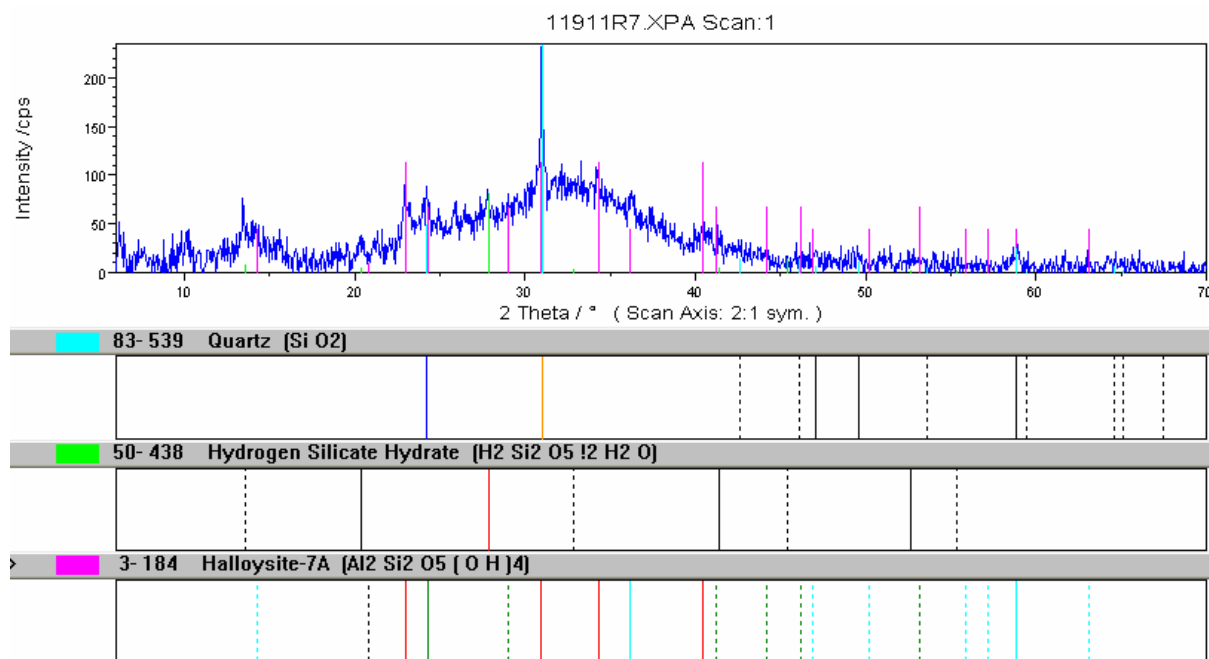
**CELKOVÉ ZRÁNÍ GEOPOLYMERNÍCH SMĚSÍ Z METAKAOLINU SEDLEC  
(550°C/ 4 hod)**

Z tabulky č.1 byl sestaven graf č. 2, který znázorňuje závislost pevnosti v tlaku na době zrání geopolymerních směsí při konstantní teplotě a vlhkosti.

**Graf č. 2**

**RENTGENOVÝ ROZBOR GEOPOLYMERU SEDLEC (Vzorek č. 2)**

Jak se v dalším textu přesvědčíme, geopolymery z metakaolinu Sedlec se zastoupením vodního skla 35 %, vykazoval při pevnostních zkouškách v tlaku nejlepší výsledky ze všech připravených směsí. Požádali jsme proto kolegy chemiky z Vysoké školy chemicko-technologické v Praze Dejvicích o rentgenový rozbor onoho vzorku. Odborně vyhodnocený snímek nalezneme na následujícím obrázku.



Obrázek je vygenerován ze softwaru pro vyhodnocování rentgenových rozborů. Na obrázku jsou patrné reziduální fáze, do kterých patří nezměněný  $\text{SiO}_2$  s charakteristickým píkem na linii  $31^\circ 2\theta$  s intenzitou odpovídající hodnotě Sedleckého kaolinu I.A a dále halloysitu ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ) jako jílový minerál, který je pravděpodobně doprovodnou součástí při rozpadu živců na jílové minerály. Jako jeden z produktů hydratace by mohl být hydrogen silikát hydrát ( $\text{H}_2\text{Si}_2\text{O}_5 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ ), který je ve formě semikrystalické, ale přítomné difrakční linie nejsou zcela jasné. Na rentgenovém záznamu je jasně vidět velké amorfni halo. Tato amorfni fáze je hlavním nositelem pevnosti mých vzorků, protože její izotropní povaha je rozhodující při zjišťování tlakových pevností.

## Geopolymery vytvořené z metakaolinu o teplotě kalcinace 750 °C/ 5 hod

Teoreticky vzato, pokud budeme vytvářet geopolimer z metakaolinu o teplotě kalcinace 750 °C/ 5 hod, měly by se dostavit mnohem příznivější výsledky, než u geopolimerů předchozích (550 °C/ 4 hod). Myslím tím naměřené pevnosti u zkušebních vzorků. Mělo by to být způsobeno tím, že čím je větší teplota kalcinace, tím se stává materiál více amorfním a proto reaktivnějším. Uvnitř kaolinu, resp. kaolinitu se totiž přemění větší množství oktaedrů na tetraedry, a čím je více tetraedrů, tím je i směs (teoreticky) aktivnější. Pokud jde o navážky suroviny, použil jsem prioritně ověřené poměry, které byly použity při výrobě geopolymerní směsi s pevností cca 70 MPa. Následně jsem zvětšoval a zmenšoval množství vodního skla pro nalezení neoptimálnějšího zastoupení této suroviny. Pevnosti jednotlivých směsí a jejich nárůst i procentuální zastoupení vodního skla naleznete v tabulce č. 2.

Tabulka č. 2

Číslo vzorku	Množství vodního skla [%]	Pevnost v tlaku [MPa] po dobu		
		7 dní	14 dní	28 dní
1	55,5	64,70	65,90	65,25
2	33,7	58,00	58,00	39,75
3	19,8	1,90	1,90	1,90
4	0	0	0	0

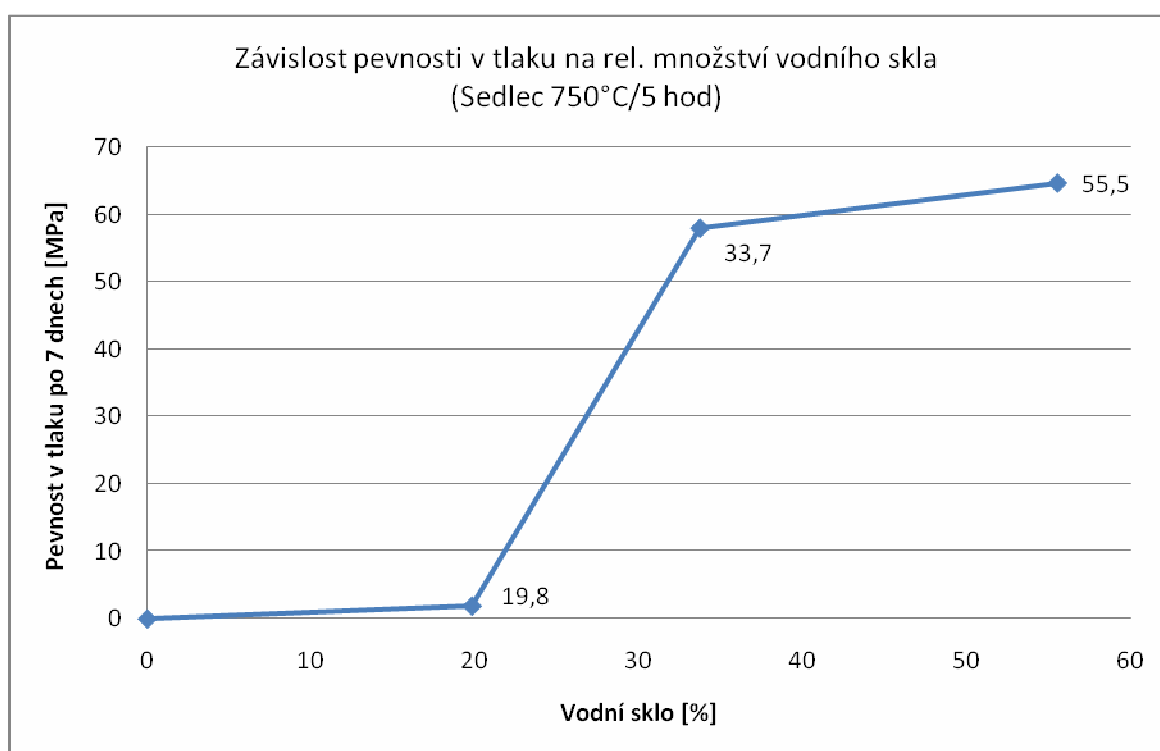
Jak je patrné z předchozí tabulky, počáteční růst pevností geopolimerů připravených z metakaolinu Sedlec o teplotě kalcinace 750 °C/ 5 hod není tak velký, jako u geopolimerů předchozích (s teplotou kalcinace 550 °C/ 4 hod). Hypotézu jsem však nemohl experimentálně potvrdit.



### ZÁVISLOST PEVNOSTI GEOPOLYMERŮ NA RELATIVNÍM MNOŽSTVÍ VODNÍHO SKLA

Během výzkumu se u geopolymerů z metakaolinu Sedlec (750 °C/ 5 hod) nepodařilo zjistit místo kulminace, resp. kulminační bod. Onu závislost nalezneme v grafu č. 3. Jak je jasně vidět, s rostoucím procentem zastoupení vodního skla v geopolymerní směsi se zvyšuje i pevnost v tlaku. Optimální množství vodního skla nebylo nalezeno.

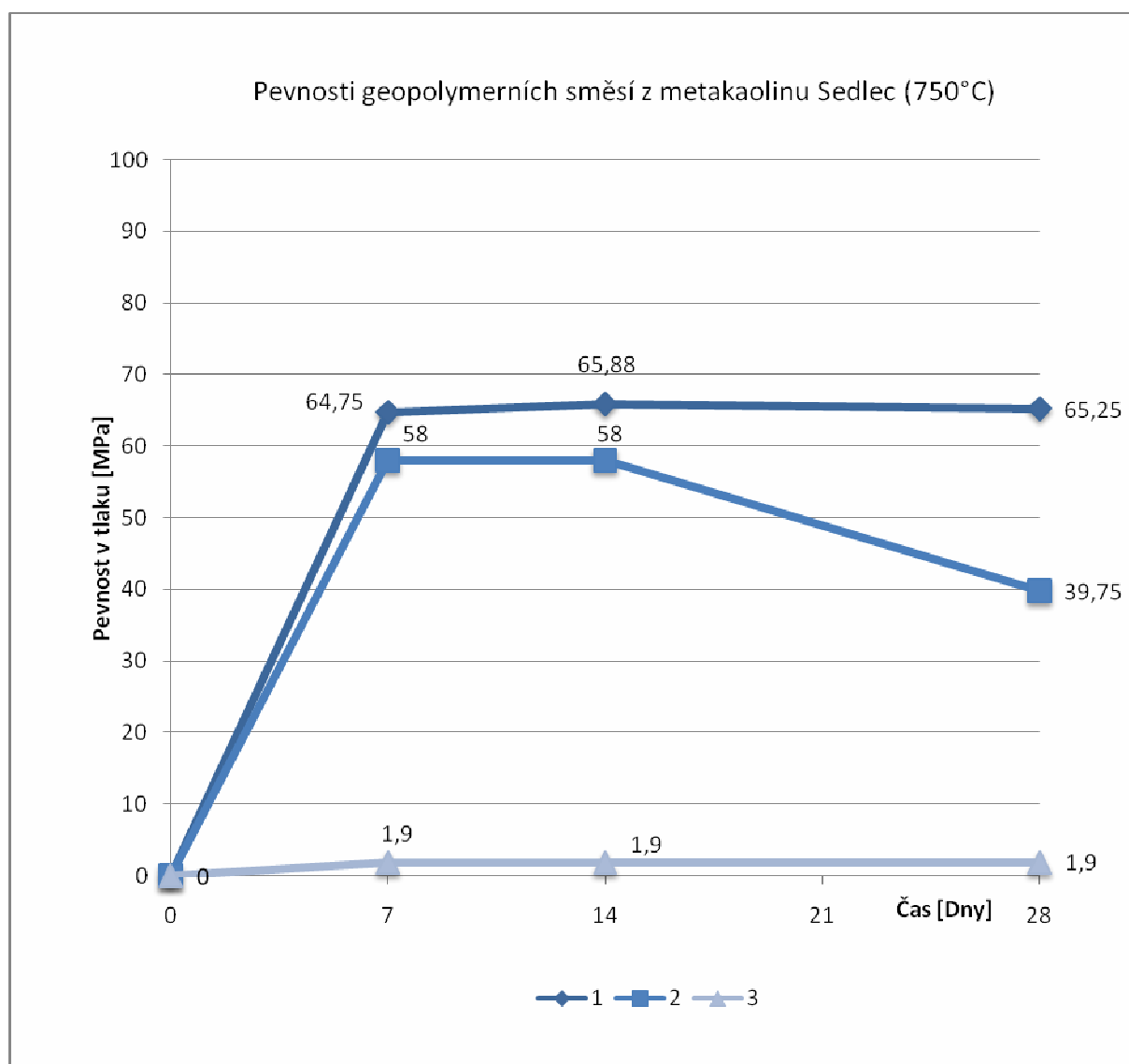
Graf č. 3



### CELKOVÉ ZRÁNÍ GEOPOLYMERNÍCH SMĚSÍ Z METAKAOLINU SEDLEC (750 °C/ 5 hod)

Z tabulky č. 2 byl sestaven graf č. 4, který znázorňuje závislost pevnosti v tlaku na době zrání geopolymerních směsí při konstantní teplotě a vlhkosti.

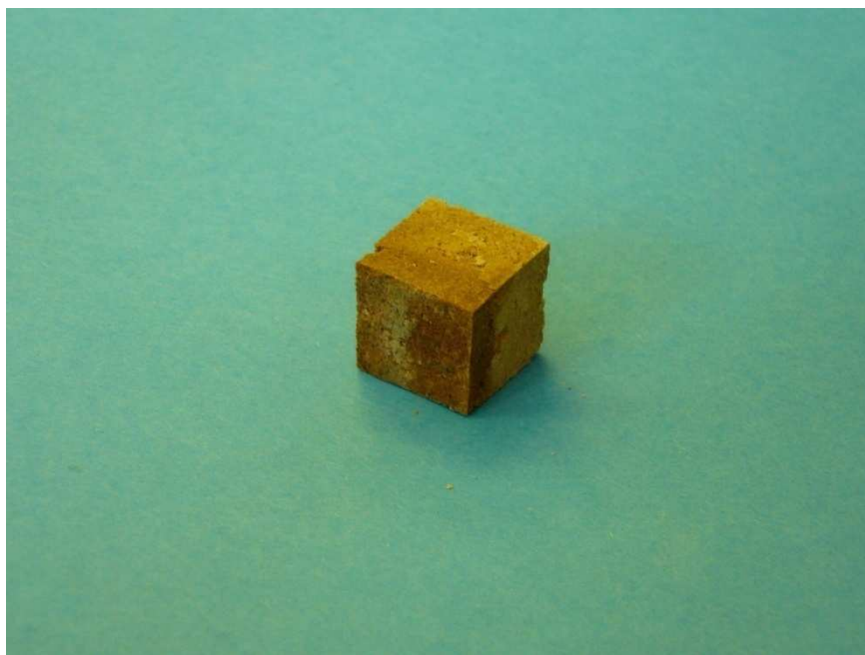
Graf č. 4



Z výše uvedeného grafu vyplývá, že při vyšších teplotách tepelné úpravy kaolinu dochází k větší destrukci hlinitanových oktaedrů, což vyplývá ze spotřeby vodního skla pro dosažení námi zjištěných pevností. Současně z uvedených grafů je patrná nestabilita těchto směsí v delším časovém horizontu. Toto je způsobeno alkalickým rozpínáním čerstvě vytvořených silikátových amorfních struktur – depolymerace (obdobný případ můžeme vidět při alkalické korozi betonu – cementu).

### GEOPOLYMERY Z METAKAOLINU KADAŇ

Jak již bylo naznačeno v teoretické části, pro výrobu geopolymérů bylo použito dvou odrůd kaolinu a to sice Sedlec a Kadaň. V tuto chvíli nás bude zajímat právě kaolin Kadaň, resp. jeho metakaolin. Směs vytvořená z čistého kaolinu Kadaň totiž vůbec neztuhla, byla neaktivní. K aktivaci je potřebná tepelná úprava. Teplotu kalcinace u kaolinu Kadaň jsem zvolil standardních 550 °C/ 4 hod, podle DTA křivek pro obecný kaolinit. A když už jsem u kaolinitu, tedy nerostu, který je v kaolinu zastoupen, tak Kadaň jej obsahuje pouhých 50 %, přesněji 55 %. Není se pak čemu divit, když výsledné pevnosti v tlaku nejsou srovnatelné s pevnostmi u předešlých geopolymérů. Tento jev bych vysvětlil opět existencí počtu oktaedrů a tetraedrů, jelikož jich je méně, než u geopolyméru z metakaolinu Sedlec, neprobíhají uvnitř geopolymerní reakce „naplno“ a část hmoty pak zůstane nezaktivována. Nakonec pak proces tuhnutí a tvrdnutím nezaktivované části přebírá vodní sklo. A co je velice důležitý poznatek u vodního skla? Jeho hlavní vlastností je to, že na vzduchu tuhne a tvrdne. Pokud se pokusíme o experiment, kde smísíme pouze vodní sklo s plnivem, řekněme pískem, stane se to, že po dokonalé homogenizaci zrn písku začne vodní sklo na povrchu tvrdnout. Takže máme kostku, kde navenek se jeví jako pevná a celistvá masa, nicméně uvnitř je materiál neztuhlý. Nedostane se dovnitř vzduch a vodní sklo pak nemůže tvrdnout. To byla jen malá odbočka, vraťme se tedy opět ke geopolyméru Kadaň. Na následujícím obrázku vidíme pro představu zkušební krychli geopolyméru z metakaolinu Kadaň. Je vidět jasná barevná rozlišnost, dále i větší pórovitost hmoty oproti geopolymérům z metakaolinu Sedlec.



O množství vodního skla a o celkovém zrání geopolymerních směsí nás informuje tabulka č. 3.

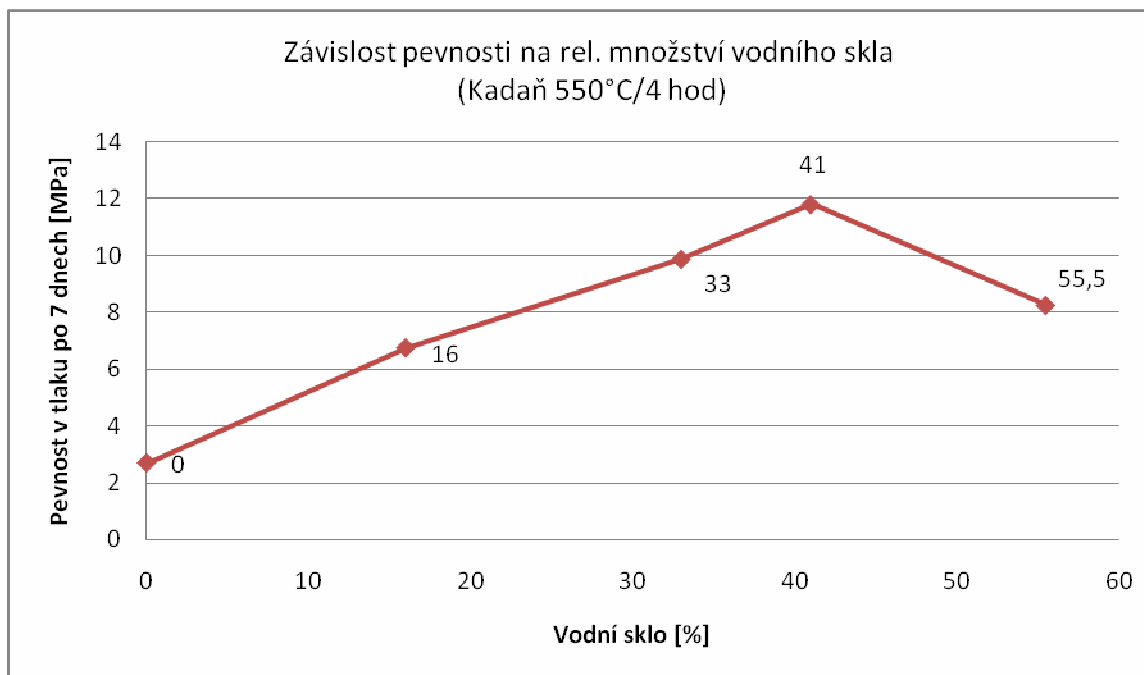
Tabulka č. 3

Číslo vzorku	Množství vodního skla [%]	Pevnost v tlaku [MPa] po dobu		
		7 dní	14 dní	28 dní
1	55,5	8,25	9,87	9,75
2	41	11,81	11,25	14,50
3	33	9,88	11,00	13,00
4	16	6,75	5,63	7,00
5	0	2,69	4,75	6,25

### ZÁVISLOST PEVNOSTI GEOPOLYMERŮ NA RELATIVNÍM MNOŽSTVÍ VODNÍHO SKLA

Obdobně jako u předchozích vzorků se i nyní pokusíme nalézt neoptimálnější množství vodního skla. Během výzkumu se křivky jednotlivě formovaly. Každou směsí se do křivky přidal další bod, který nám o povaze geopolymerní hmoty říkal víc. A když se tyto křivky postupně vytvářely, prokládal jsem jejich body matematické funkční závislosti. U geopolymery z metakaolinu Kadaň se mezi body nejlépe vyjímal polynom druhého stupně, tedy kvadratická závislost.

Graf č. 5

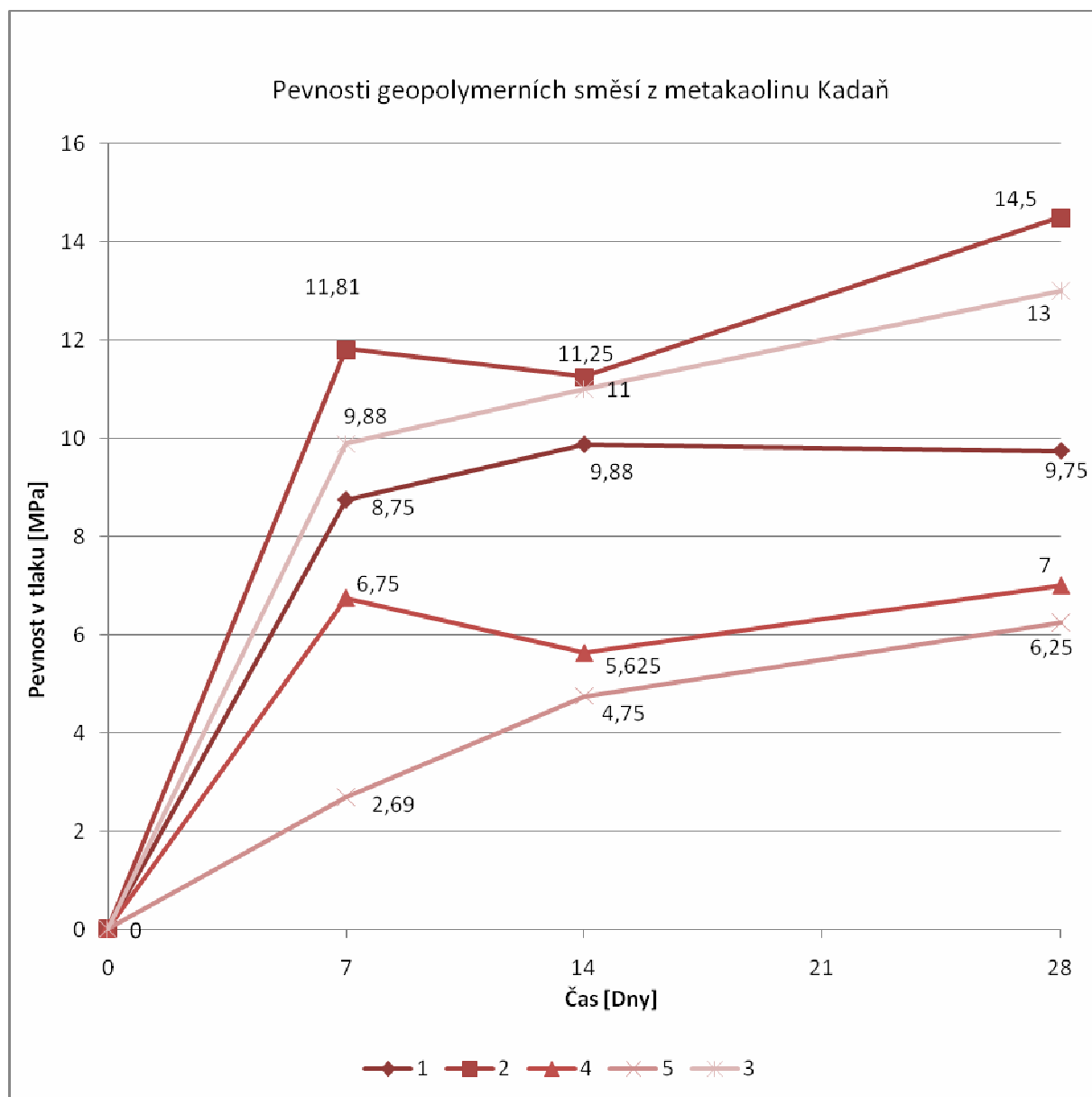


U geopolymérů připravených z metakaolinu Kadaň jsem našel **nejoptimálnější množství vodního skla**. Opět neplatí přímá úměrnost a tak se logicky musíme dopídit ke kulminačnímu bodu. Nalezneme jej při **41 %** množství vodního skla.

### CELKOVÉ ZRÁNÍ GEOPOLYMERNÍCH SMĚSÍ Z METAKAOLINU KADAŇ

Z tabulky č. 3 byl sestaven graf č. 6, který znázorňuje závislost pevnosti v tlaku na době zrání geopolymerních směsí při konstantní teplotě a vlhkosti.

Graf č. 6



## VYHODNOCENÍ

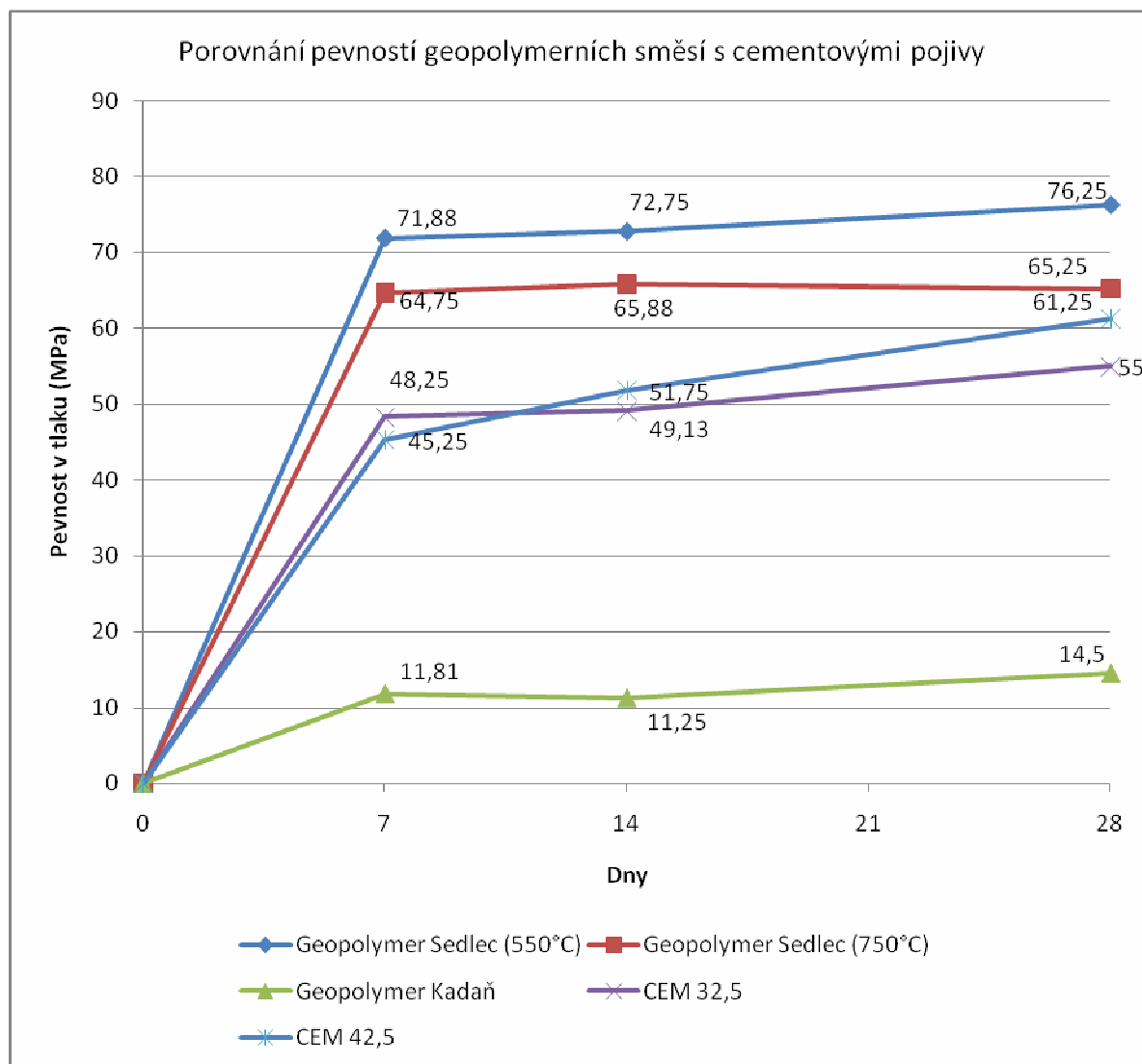
V této závěrečné kapitole bych rád vyhodnotil nejlepší dosažené výsledky geopolymerních směsí. Při výzkumu jsem dospěl k jednoznačnému závěru, kde **nejlepší optimální geopolymerní směs je směs připravená z metakaolinu Sedlec o teplotě kalcinace 550 °C/ 4 hod, s 35 % vodního skla**. Pevnost této směsi má rychlý pevnostní náběh na přibližných 72 MPa a následně povolna limituje k hodnotě 80 MPa. Jako výsledek této práce byla sestavena tabulka č. 4 se zástupci jednotlivých připravených směsí, které ve své skupině byly nejlepšími. Pro srovnání jsem do tabulky přidal i dvě pevnostní třídy portlandského cementu 32,5 a 42,5 a jejich pevnostní náběh. Pro upřesnění dodávám, že pojivové směsi portlandského cementu jsou vytvořeny pouze smícháním vody s pojivem k nejlepším konzistencím. Vzorky pak byly stejně jako geopolymerní směsi vystaveny teplotě 60 °C po dobu 2 hodin ve vodní lázni. Dále je v tabulce uvedeno relativní množství vodního skla.

Tabulka č. 4

vzorek	Množství vodního skla [%]	Pevnost v tlaku [MPa]		
		7 dní	14 dní	28 dní
Sedlec 550 °C/ 4 hod	35	71,88	72,75	76,25
Sedlec 750 °C/ 5 hod	55,5	64,75	65,88	65,25
Kadaň 550 °C/ 4 hod	41	11,81	11,25	14,50
CEM 32,5	-	48,25	49,13	55,00
CEM 42,5	-	45,25	51,75	61,25

Jako poslední graf č. 7 uvádím porovnání jednotlivých (nejlepších) vzorků, resp. jejich závislostí pevnosti na době zrání.

Graf č. 7



## ZÁVĚR

Nakonec bych chtěl zhodnotit výsledek mého takřka půl roku trvajících výzkumného počínání. Z kapitoly „Vyhodnocení“ jasně plyne, že geopolymerní směsi jsou mnohem lepší v pevnostních vlastnostech, resp. v pevnosti v tlaku. Proto se přikláním k variantě, že by geopolymerní pojiva mohla být alternativní možností v budoucnu, neboť při jejich výrobě se do ovzduší nedostává ani desetina procenta oxidu uhličitého, který má velký význam na globální oteplování naší planety. Tím by mohla tato geopolymerní pojiva konkurovat tradičním pojivům, jako je cement.

*Práce ve školních laboratořích mi přinesla mnoho pozitiv. Naučil jsem se správně míchat zkušební směsi, zacházet se surovinami, pomáhat při obsluze lisovacího zařízení apod. Je to bezesporu velká zkušenost, která se mi bude hodit v mém dalším odborném růstu.*

## SOUČASNÝ STAV VÝZKUMU V OBLASTI GEPOLYMERŮ

V této kapitole vám zkusím naznačit aktuální vývoj prací, které v současnosti při výzkumu probíhají. V první řadě se jedná o ošetřování geopolymerních směsí. Veškeré vzorky, které jsou v této práci publikovány, byly podle kapitoly „Technologické postupy míšení a ošetřování geopolymerní směsi“ podrobeny zahřívání v sušárně ve vodní lázni. Připomínám, že o teplotě 60 °C / 2 hod. Namíchal jsem nejlepší geopolymerní směs z metakaolinu Sedlec 750 °C / 5 hod, a nevystavoval ji žádnému ošetřování. I přes to, že se směs do sušárny neumístila, následné pevnostní zkoušky odhalily, že **pevnost v tlaku je u neošetřovaných směsí stejná, jako u ošetřovaných**. Z toho vyplývá, že není potřeba další energie a že výroba geopolymerních směsí je velice ekologická. Pevnostní křivky do této práce nekládám z důvodů malého množství zjištěných dat možných publikovat. Dále zkusíme vytvářet geopolymerní směsi s novými surovinami, jako je kupříkladu cihlářský jííl Jirčany, který je opět kalcinován 550 °C / 4 hod. Geopolymery však nejsou stabilní a nechtějí tuhnout. Předmětem výzkumu bude dále omezení vstupních surovin na minimum a nalezení kulminačního bodu u kaolinu Sedlec 750 °C / 5 hod. To nebylo z materiálových nedostatků možné. Dále vytvářet nové směsi a pokusit se pokrýt větší část křivky a zřehlednit tak neoptimálnější množství vodního skla ve hmotě. Další možností je navrhnout takovou geosyntetickou reakci, ve které by se jako vedlejší produkt vytvořilo vodní sklo. Pokud by se to povedlo, znamenalo by to, že by se vodní sklo do směsi nemuselo dávat vůbec.



## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] [www.claypolymers.com](http://www.claypolymers.com)
- [2] [www.webmineral.com](http://www.webmineral.com)
- [3] [www.sci.muni.cz/mineralogie](http://www.sci.muni.cz/mineralogie)
- [4] Návod pro laboratorní cvičení z přípravy a charakterizace pevných látek
- [5] Doc. RNDr. B. Kratochvíl, CSc. : Základy fyziky a chemie pevných látek

## PODĚKOVÁNÍ

Na konec bych chtěl velmi poděkovat vedení školy za možnost realizace tohoto výzkumu ve školních laboratořích. Jmenovitě bych pak rád poděkoval panu Ing. Jindřichu Vorlovi za trpělivost, důvěru, cenné rady a hlavně za to, že mě k této, ač zatím velmi netradiční části mého oboru, vůbec přivedl. Všem tedy ještě jednou patří veliké díky.