

Univerzita Palackého v Olomouci

Přírodovědecká fakulta

Katedra geologie



Dekorační kameny na bázi geopolymérů

bakalářská práce

Tomáš Opletal

Vedoucí bakalářské práce: RNDr. Petr Sulovský, Ph.D.

Studijní program: Environmentální geologie

Olomouc, 2011

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci Dekorační kameny na bázi geopolymérů vypracoval samostatně, pod vedením RNDr. Petra Sulovského, Ph.D. a s užitím citovaných pramenů. Dávám tímto i souhlas k zapůjčování práce.

V Olomouci, dne

podpis autora

Poděkování:

Chci tímto poděkovat těm, kdož mě podpořili během tvorby této bakalářské práce. Děkuji zejména vedoucímu mé práce RNDr. Petru Sulovskému, Ph.D. za poskytnutí cenných rad a připomínek a za doporučení odborné literatury. Dále děkuji Výzkumnému ústavu stavebních hmot za poskytnutí surovin a provedení pevnostních zkoušek. Nakonec děkuji své rodině za celkovou podporu.

Bibliografická identifikace:

Jméno a příjmení autora: Tomáš Opletal

Název práce: Dekorační kameny na bázi geopolymérů

Typ práce: bakalářská práce

Pracoviště: Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, katedra geologie

Vedoucí práce: RNDr. Petr Sulovský, Ph.D.

Rok obhajoby práce: 2011

Abstrakt: Předmětem této bakalářské práce je pokus o experimentální vytvoření dekoračního kamene na bázi geopolymérů v laboratorních podmínkách. První část práce zahrnuje obecnou problematiku geopolymérů. Další část popisuje pracovní postupy aplikované během práce. V poslední části jsou již rozebírány konkrétní série zhotovených vzorků a vzorky jednotlivě, jejich mechanické vlastnosti, míra plnění funkce pro dekorativní účely a také jejich možné užití v praxi.

Klíčová slova: geopolymér, alkalická aktivace, dekorační kámen, výkvěty alkálií, metakaolín

Počet stran: 52

Počet příloh: 0

Jazyk: Český jazyk

Bibliographical identification:

Author's name and surname: Tomáš Opletal

Title: Decorative stones on geopolymer basis

Type of thesis: Bachelor

Department: Palacký University in Olomouc, Faculty of Science, Department of Geology

Supervisor: RNDr. Petr Sulovský, Ph.D.

The year of presentation: 2011

Abstract: The subject of this thesis is an experimental attempt to create a decorative stone on geopolymer basis in laboratory conditions. The first part covers general issues of geopolymers. The following section describes the working procedures applied during the work. The last part describes the individual samples and series of prepared samples and their mechanical properties, level of functionality for decorative purposes and also their potential use in practice.

Keywords: geopolymer, alkaline activation, decorative stone, alkali efflorescence, metakaolin

Number of pages: 52

Number of appendices: 0

Language: Czech

Obsah

1 Úvod.....	8
2 Pojem geopolymér	9
2.1 Proces alkalické aktivace	10
2.2 Struktura řetězce.....	13
2.3 Vlastnosti geopolymérů.....	15
2.4 Využití geopolymérů v praxi.....	16
3 Použité suroviny	19
3.1 Metakaolín.....	19
3.2 Alkalický aktivátor.....	20
3.3 Kameniva	20
3.3.1 Křemičitý písek	20
3.3.2 Granit.....	21
3.3.3 Mramor.....	21
3.3.4 Štěrk	21
3.3.5 Sklo	22
3.3.6 Cihlová drť	23
3.4 Barviva	23
4 Metodický postup práce	24
5 Popis vzorků.....	26
5.1 Série vzorků číslo 1	26
5.1.1 Vzorky 1 a 2	26
5.1.2 Vzorky 3 a 4	27
5.1.3 Vzorek 5	28
5.1.4 Vzorek 6	29
5.1.5 Vzorek 7	30
5.1.6 Vzorek 8	31

5.2 Série vzorků číslo 2	32
5.2.1 Vzorek 1	32
5.2.2 Vzorek 2	34
5.3 Série vzorků číslo 3	35
5.3.1 Vzorek 1	35
5.3.2 Vzorek 2	37
5.3.3 Vzorek 3	38
5.3.4 Vzorek 4	39
5.3.5 Vzorky 5, 6 a 7	40
5.4 Série vzorků číslo 4	41
5.5 Série vzorků číslo 5	42
5.5.1 Vzorek 1	43
5.5.2 Vzorek 2	44
6 Výsledky a diskuze	46
7 Závěr	48
8 Použité zdroje	50

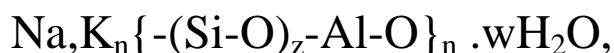
1 Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá výzkumem unikátních, uměle vytvořených hmot, jimiž jsou takzvané geopolymery. Tyto anorganické materiály vzniklé alkalickou aktivací by v budoucnu mohly být novodobým stavebním materiálem, jenž v mnoha ohledech předčí materiály na bázi cementu. Jednou z hlavních výhod geopolymery oproti materiálům na bázi cementu je jednak jejich šetrnost vůči životnímu prostředí, ve smyslu výrazného snížení emisí CO₂ a recyklace anorganických materiálů obsahujících Al a Si, což je spjato i s ekonomickou úsporou. Podnětem pro vypracování dané práce byla snaha o opětovné alternativní využití některých problematických odpadních materiálů, jako je např. obrazovkové CRT sklo. Konkrétním cílem mé práce bylo zjistit na základě nastudované literatury a především na základě experimentálního ověření, zda je možno vyrobit umělý dekorační kámen alkalickou aktivací. Při výrobě geopolymery jako umělých dekoračních kamenů byla vyzkoušena kombinace metakaolínu s přírodním kamenivem či odpadními materiály obsahujícími Si a alkálie. Pro dosažení funkce dekoračního kamene byly vyzkoušené různé druhy kameniva o různé zrnitostní frakci a také různé zbarvování geopolymery, který tvoří základní hmotu dekoračního kamene. Směs těchto složek byla následně aktivována příslušným aktivátorem (vodním sklem, louhem sodným, sodou), kde mým úkolem bylo nalezení vhodného poměru mezi jednotlivými komponentami tak, aby zhotovený geopolymer měl pevnostní charakteristiky, které by případně umožnily jeho následné užití při architektonické praxi. Ověření mechanických vlastností vzniklých materiálů bylo zajištěno ve spolupráci s Výzkumným ústavem stavebních hmot v Brně.

2 Pojem geopolymery

Termín geopolymery lze definovat několika způsoby. Podle jedné definice jsou geopolymery amorfní alkalicky aktivované aluminosilikátové látky, které mají prostorovou strukturu podobnou zeolitům [1]. Jedná se v podstatě o zcela nový druh anorganických polymerů, která vynikají svými vlastnostmi a jejichž výroba je výhodná jednak energeticky a také z hlediska šetrnosti k životnímu prostředí. Podrobněji lze geopolymery definovat jako anorganické polymerní látky připravované polykondenzační reakcí základních hlinito-křemičitanových materiálů v zásaditém prostředí za normální teploty a tlaku [1].

Podle Davidovitse (in [1]) je geopolymery takovou látkou, která vznikla anorganickou polykondenzací, takzvanou geopolymeryzací. Později, v roce 1999 byla Davidovitem formulována přísná definice, podle níž jako geopolymery může být označována pouze látka, jejíž NMR spektra mají pík ^{27}Al při 55 ppm a kde Al smí být ve struktuře této látky jen a pouze v koordinaci 4 [21]. Je-li tomu jinak, tak výsledný produkt nemá být označován jako geopolymery, nýbrž pouze jako alkalicky aktivovaná látka [11]. Je tedy zřejmé, že nebylo snadným úkolem nadefinovat materiály jako jsou geopolymery, avšak jedna podstatná skutečnost je všem alkalicky aktivovaným látkám společná, jedná se o přítomnost fáze



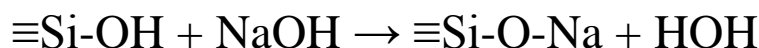
přičemž daná fáze charakterizuje vzniklou trojrozměrnou aluminosilikátovou síť, kde „n“ je stupeň polykondenzace a „z“ je 1,2,3 nebo více než 3. Tato fáze je dnes nazývána jako C-S-H fáze, může být však nazývána podle předchůdce Davidovitse Gluchovského jako „fáze zeolitu podobná“ [21].

2.1 Proces alkalické aktivace

Proces alkalické aktivace alumosilikátových látek je stále považován za poměrně složitý a nepřiliš objasněný děj. Během reakce alumosilikátové látky v silně alkalickém prostředí se rozrušují Si-O-Si vazby, kdy později dochází zřejmě mechanismem „přes roztok“ k tvorbě nové fáze [11].



(rozrušení vazeb Si-O-Si v silně alkalickém prostředí, pH >12)



(neutralizace silanolátové skupiny)

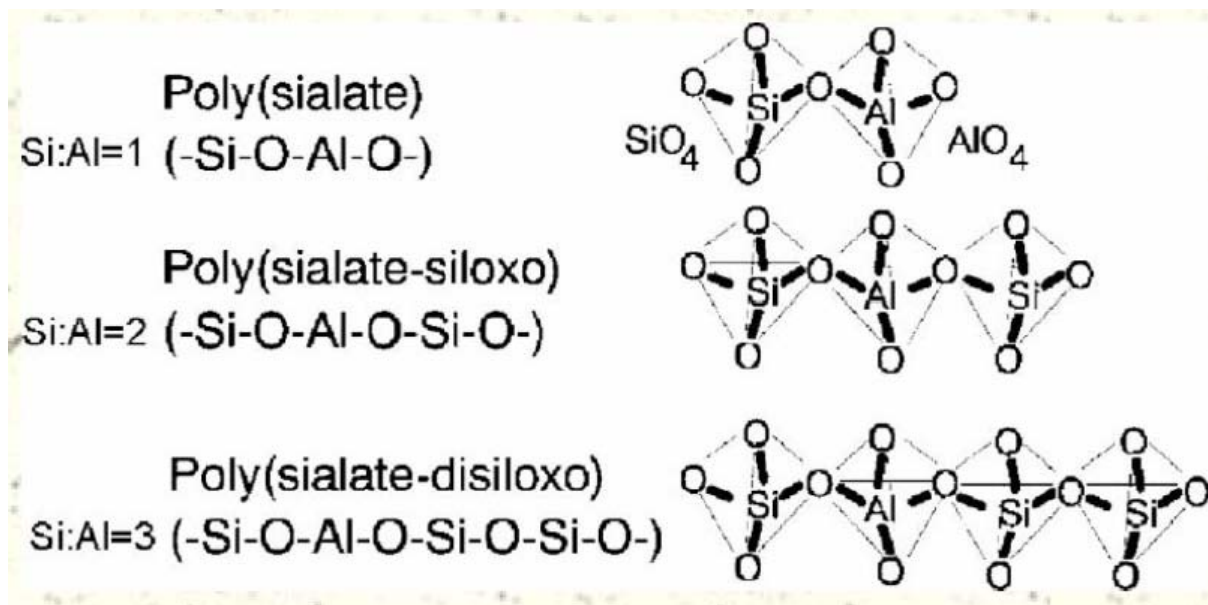
Během této reakce dojde k proniknutí atomů hliníku do předchozí Si-O-Si struktury, což můžeme označit jako hlavní podstatu dané reakce. Především dochází ke vzniku alumosilikátových gelů (zeolitické prekurzory), kde jejich složení vyjadřuje vzorec:



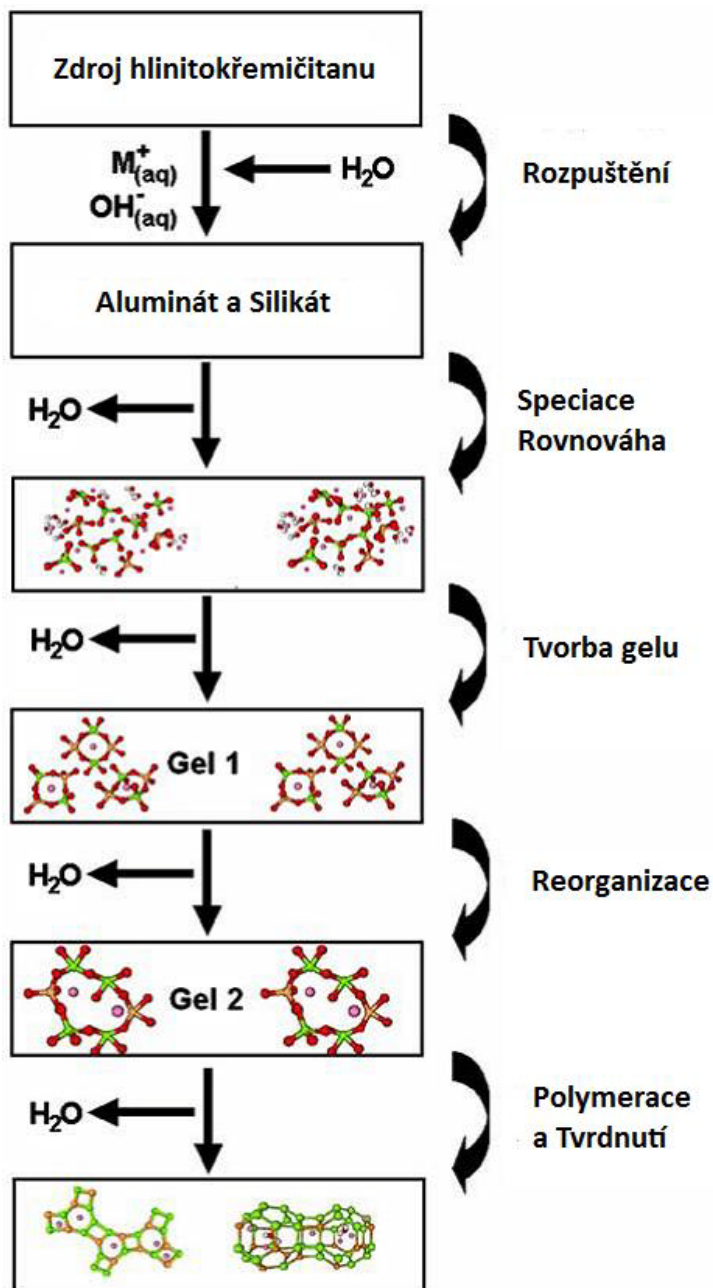
Mohou vznikat i C-S-H a C-A-H fáze, což je odvozeno od složení původních látek a podmínek reakce. Při dané polykondenzační reakci může dojít také ke vzniku sekundární vody [11]. Během polykondenzační chemické reakce dochází k navazování aniontů křemíku a hliníku přes kyslíkové můstky, díky tomuto faktu je zmiňována podobnost geopolymerních látek a zeolitů. Při anorganické polykondenzaci vlivem alkalické aktivace alumosilikátových látek je důležitým faktorem míra koncentrací pevných látek.

K syntéze umělých zeolitů, nebo přesněji řečeno ke vzniku krystalických látek podobných zeolitům (hydrosodalit, analcim, heulandit a další) dochází ve výrazně naředěných suspenzích, kde hmotnostní podíl w je větší než 1-10 [1]. Vznik nově utvořených amorfních látek nastává za značnějších koncentrací pevné fáze v suspenzi (w je menší než 1). Davidovits vymyslel pro dané amorfni alumosilikátové produkty příslušné názvosloví, které je odvozeno od vzájemného poměru křemíku a hliníku. Je-li poměr těchto dvou prvků (Si:Al) roven jedné, pak je výsledný produkt nazýván jako Poly(sialát). Pokud je poměr Si:Al roven dvěma, tak se

produkt nazývá Poly(sialát-siloxo) a v případě kdy je tento poměr roven třem, tak se jedná o tzv. Poly(sialát-disiloxo) [1], viz obrázek č. 1.



Obr. č. 1: Terminologie a vzorce amorfních alumosilikátových látek vzniklých alkalickou aktivací podle Davidovitse (in [1]).

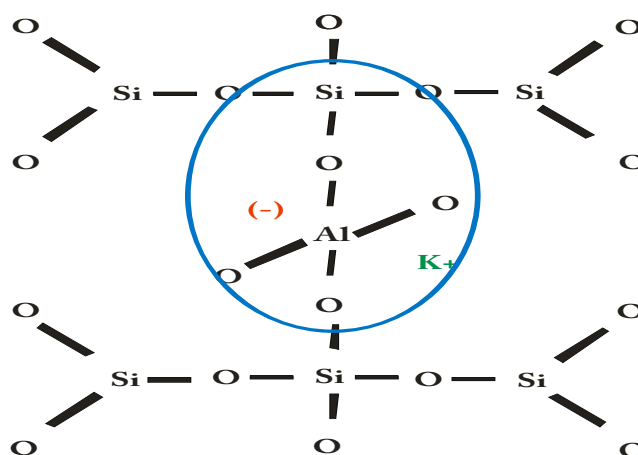


Obr. č. 2: Znáznornění procesu geopolymerizace podle Gluchovského [20].

Gluchovského model [21] rozděluje proces geopolymerizace do tří stádií: (a) destrukce – koagulace; (b) koagulace – kondenzace; (c) kondenzace – krystalizace. Nověji různí autoři dopracovali a rozšířili Gluchovského teorie a aplikovali existující poznatky o syntéze zeolitů na vysvětlení geopolymerizačního procesu jako celku [22, 23].

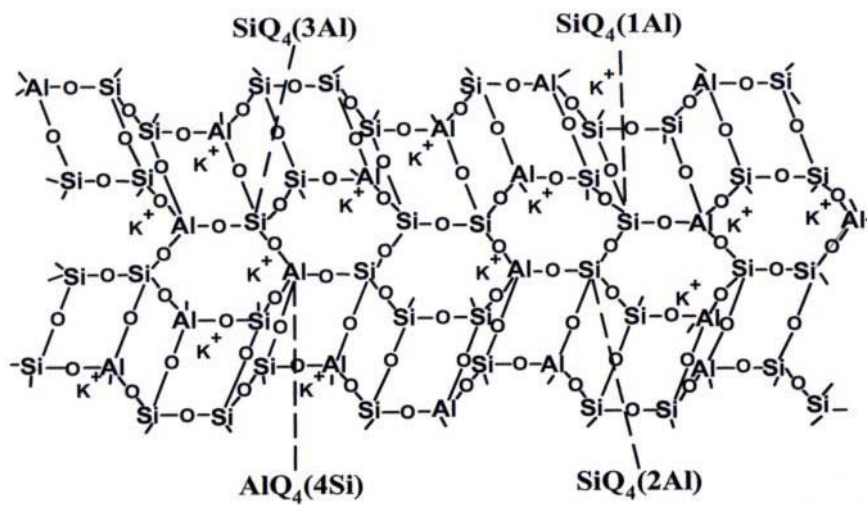
2.2 Struktura řetězce

Trojrozměrná alumosilikátová síť je společným základem struktury všech geopolyerních materiálu. Její empirický vzorec je vyjádřen jako $M_n\{-(\text{Si-O})_z-\text{Al-O}\}_n \cdot w\text{H}_2\text{O}$, přičemž M představuje atom Na, K nebo Ca, n znázorňuje stupeň polykondenzační chemické reakce a z je 1,2,3 nebo větší než 3 [1]. Prostorovou strukturu geopolymerů tvoří tetraedry SiO_4 a AlO_4 , které jsou propojené přes kyslíkové můstky. Takto se formují kruhy nebo řetězce, jež jsou spojené přes Si-O-Al můstky (viz obr. č. 2).



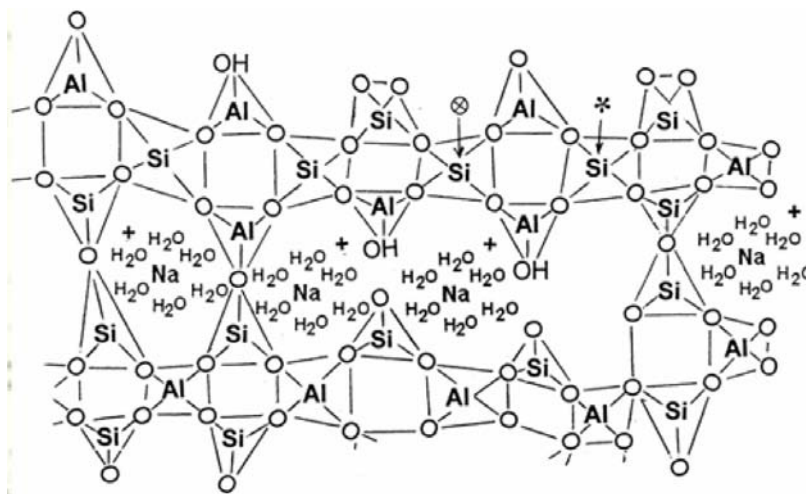
Obr. č. 3: Řetězec Si-O-Al.

Jelikož je ve struktuře řetězců geopolymerních materiálů přítomen Al aniont, jež se zde nachází v koordinaci 4, musíme jej doplnit kationty K^+ , Ca^+ a Na^+ [11]. Na problematiku struktury těchto řetězců existují dva názory, z nichž jeden definoval na základě svých poznatků Davidovits, který si představuje geopolymer jako monolitický neporézní materiál (viz obr. č. 3).



Obr. č. 4: Davidovitsův pohled na strukturu geopolymery (in [1]).

Na základě dnešních vědomostí o struktuře geopolymerních materiálů jsme si mohli vytvořit nový obrázek, který nám ukazuje, že ve struktuře těchto látek je uspořádání jejich komponent náhodné (viz obr. č. 4).



Obr. č. 5: Současný pohled na strukturu geopolymery [1].

Je tedy zřejmé, že geopolymery mají náhodné 3D uspořádání a nikoliv monolitickou polysialato-siloxo strukturu [1]. Daná struktura geopolymery je porézní v řádech nm až μm . Je zde obsažena i voda, která se nachází v pórech a zároveň i v gelu. Tato voda obsažená v pórech zastává pouze funkci nosiče alkalického aktivátoru, kdežto ve struktuře hydratovaného portlandského cementu se voda podílí na tvorbě hydrátů. Podstatnou odlišností ve struktuře hydratovaného portlandského cementu a geopolymery je i ten fakt, že geopolymery obsahují amorfni a krystalické hydráty jen pokud se na jejich složení podílí látka obsahující Ca či struska. Hydratovaný OPC obsahuje tyto krystalické i amorfni hydráty typu $\text{Ca}(\text{OH})_2$ běžně [1]. Geopolymery jsou podobné skelným materiálům, kdy spektra NMR aluminosilikátových skel a geopolymery jsou podobná. Oba materiály mají podobné trojrozměrné uspořádání. Ve struktuře skla není však přítomna voda a sklo je prakticky neporézní materiál [11]. Jak již bylo zmíněno výše, struktura geopolymerních materiálů se podobá struktuře zeolitů, v níž také dochází k propojování Si a Al atomů přes kyslíkové můstky. Zeolity mají značně porézní strukturu. V této struktuře bývají přítomny ionty K^+ a Na^+ , jež jsou obsaženy ve zmíněných pórech, mohou se zde vyskytovat i molekuly vody [1].

2.3 Vlastnosti geopolymery

Geopolymery jsou amorfni látky s jen velmi malým obsahem látek krystalických. Tyto uměle vytvořené materiály jeví řadu dalších vlastností, z nichž některé jsou nežádoucí, avšak většina je pro jejich budoucí využití užitečná. Hlavní předností geopolymerních materiálů je jejich pevnost v tlaku. Porovnáme-li pevnosti geopolymery a betonů zhotovených z běžného portlandského cementu (OPC), tak zjistíme, že geopolymery disponuje oproti betonům z OPC až dvakrát vyšší pevností v tlaku. V souvislosti s pevností je zajímavá skutečnost, že geopolymery dosahují zhruba poloviny maxima svých pevností již po několika hodinách, zatímco standardní betony musí pro dosažení srovnatelné pevnosti zrát 28 dní. Jedním z dalších pozitiv je vysoká žáruvzdornost, geopolymery odolávají teplotám okolo $1000\text{ }^\circ\text{C}$, kdežto beton je nestabilní již při teplotách nad $300\text{ }^\circ\text{C}$.

Dále bylo u těchto anorganických pojiv prokázáno, že jsou odolné vůči kyselému prostředí. Nezanedbatelná je i odolnost geopolymery vůči mrazu, dochází u nich pouze k nepatrnému smrštění. Geopolymerní látky jsou nerozpustné ve vodě a disponují jen velmi nízkou tepelnou vodivostí. Významnou výhodou těchto materiálů oproti běžnému cementu

obsaženému v betonu, je minimální produkce CO₂ při jejich výrobě. Při výrobě jedné tuny cementu unikne do ovzduší stejné množství CO₂ – rovněž jedna tuna! V absolutním vyjádření tak výroba cementu v roce 2005 celosvětově vyprodukovala 1,8 miliardy tun CO₂ [4]. Na výrobě geopolymerních cementů můžeme ušetřit i tepelnou energii. Toto tvrzení se opírá o fakt, že při výrobě geopolymerních cementů je potřeba zhruba poloviny tepelné energie spotřebované při výrobě běžných cementů. Vyjádříme-li si to číselně, tak teplota při výrobě geopolymerního cementu činí okolo 750 °C, kdežto u běžných cementů je to 1500 °C [4]. Další pozitivní vlastností geopolymerních cementů je schopnost fixace anorganických odpadních látek, hlavně těžkých kovů, mohou však fixovat i radioaktivní odpady [1].

Mezi nežádoucí vlastnosti geopolymerních cementů lze zařadit především tvorbu výkvětů solí alkalických kovů. Příčina vzniku těchto výkvětů tkví patrně v nedokonalém proreagování geopolymerní matrice, resp. v nadbytku alkálií, které nejsou při geopolymerní reakci navázány na hliník a křemík; toto téma je zatím ve fázi výzkumu. Kvůli tvorbě výkvětů ve venkovním prostředí, jež esteticky poškozují geopolymerní výrobky, jsou geopolymery využívány převážně ve vnitřních prostorech, jedná se zejména o produkty, které mají zastávat funkci umělých dekorativních kamenů.

2.4 Využití geopolymerních cementů v praxi

Vrátíme-li se zpět do minulosti, tak zjistíme, že využívání materiálů na bázi geopolymerních cementů probíhalo již v antice. Davidovits [12] ve své knize píše o ději, který byl římskými inženýry nazván Opus Signium. Proces Opus Signium popsal římský architekt a autor Vitruvius (40 př.n.l.) ve své knize *Dieci libri di Architettura* (Deset knih o architektuře). Podstata tohoto děje je ve smíchání vápence a rozdrčeného, prosátého kaolinitického jílu v poměru 1:3. Na tehdejší dobu měly tyto materiály jedinečné vlastnosti a byly proto využívány především k pokrytí vnitřních ploch cisteren a akvaduktů, kde měly za úkol bránit prosakování vody.

Dle nejnovějších překladů Vitruviovy knihy tkví vysoká kvalita římského betonu v užití uměle vyráběné pucolánové malty a betonů. Byly vyráběny dva druhy pucolánů: vápenato-kaolinové jíly, zvané v latině *testa*, a vápenaté vulkanické kameny, zvané v latině *carbunculus* [4]. Francouzský profesor Joseph Davidovits před lety šokoval svou teorií, která praví, že materiály na bázi geopolymerních cementů byly použity i ve starověkém Egyptě na výstavbu

pyramid. Ke stavbě pyramid využívali stavebníci období záplav, kdy se Nil rozlil do daleka. Tehdy snášeli mokry písek z nejbližšího okolí, na místě ho pěchovali do forem, smísili s aktivními prostředky a pak nechali slunce, aby směs postupně vysušilo a proměnilo v litý kámen [4]. Tuto teorii dokládají následné laboratorní testy a podle Davidovitse dokonce i hieroglyfický záznam pocházející ze starého Egypta. Podle něj je nabitelní, že k postavení tak kolosálních staveb, jako jsou pyramidy, nemohlo dojít za podmínek, jež mnozí známe z nejrůznějších hypotéz. Už jen představa obrovského množství otroků tahajících několika tunové, přesně nařezané kvádry je poněkud scestná. Je velmi málo pravděpodobné, že by v tehdejší době byli schopni měděnými nástroji naformátovat tak přesné kamenné bloky, protože jak je známo, měď je velmi měkká [4]. Odlévání egyptských bloků do bednění bylo dokázáno několika způsoby, jedním ze zásadních je nález lidského vlasu v kamenném bloku. Další důkaz je opřen o laboratorní prozkoumání záhadných kamenů (pocházejících z pyramidy zasvěcené Cheopsovi), u kterých bylo zjištěno rovnoměrné rozptýlení vzduchových bublin, zatímco kámen z předpokládaných lomů je tuhý, má větší hustotu a je tedy i mnohem hmotnější. Rozdíly byly prokázány i ve složení kamenů. Blok z pyramidy obsahoval odlišné látky jako ku příkladu alumosilikáty [4]. Proti mnohdy účelovým interpretacím některých pramenů a skutečností se však zvedla vlna odporu nejen mezi egyptology, ale i mezi geology [24].

V dnešní době jsou geopolymery používány hlavně ve stavebním průmyslu. Je to zejména kvůli jejich výše zmiňovaným vynikajícím pevnostním charakteristikám. V současnosti mohou být ve stavebnictví aplikovány alespoň jako částečná náhražka klasických cementových betonů. Z geopolymerních betonů lze zhotovit například nejrůznější stavební tvárnice, obrubníky, lité průmyslové podlahy či dlaždice. Výhledově by se užití geopolymerních materiálů ve stavebnictví mohlo pohybovat ve značně jiných sférách. Konkrétně by šlo o protihlukové zdivo, které by bylo částečně tvořeno fixovanými odpadními látkami (ekologický potenciál) nebo by bylo možno geopolymery použít při stavbě komunikací a mostů.



Obr. č. 6: Vzorek zámkové dlažby zhotovený z geopolymerního betonu [4].

Ve stavebním průmyslu je možno uplatnit také žáruvzdorné vlastnosti geopolymérů. Jde o nátěry geopolymerních hmot nanesené na ocelové nosníky výškových budov či nátěry domů konstruovaných z dřevoštěpových profilů. Dalším uplatněním nehořlavých vlastností geopolymerních materiálů se zabývá firma CORDI-GEOPOLYMERE. Velmi praktické využití by mohlo být využito při náhradě hořlavých plastů geopolymerními vlákny [4]. Zmíněná vlákna by bylo možno uplatnit na výrobu interiérových komponent letadel (zevní stěny, sedadla atd.), jež jsou dosud vyráběny z hořlavých plastů [4]. Jelikož při hoření plastů dochází k uvolňování jedovatých a vznětlivých plynů, určitě by bylo užití nehořlavých geopolymerních vláken užitečné pro zvýšení bezpečnosti na palubě letadla. Jedním z dalších možných využití geopolymérů je výroba umělého kamene či umělého dekoračního kamene, což se vztahuje k této práci. Tyto synteticky vytvořené náhražky přírodního kamene se používají při opravách poškozených kamenných památek.

Přidáním správného barviva docílíme toho, že uměle vytvořený kámen jen těžko rozeznatelný od původního přírodního kamene. Uplatnění daných uměle vytvořených dekoračních kamenů můžeme nalézt ve smyslu výroby okrasných interiérových dlaždic anebo díky jejich pevnosti by mohli splňovat i funkci vnitřních okrasných nosných konstrukcí. Z těchto materiálů lze dokonce zhotovit repliky uměleckých sochařských či architektonických děl, což nese také svá rizika v podobě jejich zneužití [2].

3 Použité suroviny

V této práci jsou pro výrobu dekoračního kamene na bázi geopolymery zásadní tři základní složky. Jmenovitě se jedná o metakaolín, alkalický aktivátor a různě druhy kameniva. Jako doplňkové komponenty byla u některých vzorků použita barviva.

3.1 Metakaolín

Jako metakaolín označujeme hlinitokřemičitý materiál, který je vyrobený výpalem plaveného kaolínu, kaolinitických jíílů apod. Teplotní rozmezí výpalu je cca 600 až 900°C. Metakaolín lze použít jako částečnou náhradu cementu nebo jako aktivní příměs do betonu, která zvyšuje jeho povrchovou odolnost [5]. Pro účely této práce je především podstatné jeho užití jako suroviny pro výrobu geopolymery. Dva vzorky první série byly vyrobeny za pomoci metakaolínu typu Mefisto K05. Převážně je tento metakaolín využíván pro stavební účely jako přísada do betonových a maltových směsí, avšak je používán i pro výrobu geopolymerních hmot. Při výrobě stavebních materiálů, jako jsou malty, betony atd., může až z 15- 20 % nahrazovat cement. Metakaolín Mefisto K05 zajišťuje zmíněným materiálům zvýšenou pevnost, mrazuvzdornost a také snižuje nasákavost a potlačuje tvorbu výkvětů [6]. Při zhotovování dalších vzorků byl použit metakaolín typu Baucis. Tento typ metakaolínu je vypalován při teplotě 750°C a vyniká velmi rychlým tvrdnutím (40 až 50 % finální pevnosti nabývá za 1 den). Za běžných podmínek se chová stejně jako Portlandský cement [7]. Metakaolín Baucis bývá také využíván v souvislosti s výrobou dekoračních kamenů, což je pro danou práci podstatné. Oba typy použitých metakaolínů produkuje podnik České lupkové závody a.s. Nové Strašecí.

Tabulka č. 1: XRF analýza metakaolínu Mefisto K05.

obsah složky :	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
hmotnost. % :	56.80	0.50	37.84	0.69	0.07	0.005	0.40	0.69	0.17	0.71
ztr. žíh. :	SO ₃ celk.		SO ₃ síran.		Cl ⁻	CaO vol.		vlhkost		(hm.%)
1.88	0.02		<0,01		0.010	-		0.45		

3.2 Alkalický aktivátor

Další nedílnou složkou pro zhotovení geopolymerního materiálu je alkalický aktivátor, jenž v kombinaci s metakaolínem spustí chemickou reakci zvanou alkalická aktivace. Tento aktivátor je většinou kombinací vodního skla a NaOH či jiných hydroxidů. Složení vodního skla je dáno především molárním poměrem $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ v případě sodného skla nebo $\text{SiO}_2/\text{K}_2\text{O}$ v případě draselného skla. Draselné vodní sklo se používá ve stavebnictví při výrobě suchých nátěrových směsí, tmelů a nátěrových hmot. Sodné vodní sklo je užíváno jako pojivo při výrobě např. svařovacích drátů nebo je užíváno právě jako aktivátor při výrobě geopolymérů. Někdy se při speciálních aplikacích (protipožární materiály) používá lithné vodní sklo [9]. V této práci bylo použito jako alkalického aktivátoru směsi vodného roztoku křemičitanu sodného a NaOH, dále byl experimentálně použit Pentra-Sil na bázi lithia.

Tabulka č. 2: XRF analýza alkalického aktivátoru.

	hmotnostní %	přepočít na 1 atom Si	
SiO_2	26,81	Si	1
Na_2O	10,96	Na	0.7926
K_2O	2,31	K	0.1099
vlhkost	57,55	H	14.3186
sušina	42,45	\sum kationtů	16.2211
	silikátový modul :	\sum oxidů	9.6106
	1.107997316	Na + K	0.9025

3.3 Kameniva

Pro účely této práce byly použity jako kamenivo různé horninové fragmenty, jež jsou jednotlivě popsány níže v textu. Dále bylo s ohledem na šetrnost k životnímu prostředí experimentálně užito také skelných recyklátů a cihlové drti.

3.3.1 Křemičitý písek

Daný písek pochází z lokality Bratčice. Jednotlivá zrna jsou zaoblená, průměrná zrnitostní frakce tohoto písku je 1 až 2 mm. Jak je známo, tyto psamitické sedimenty obsahují převážně zrnka křemene a v menší míře jsou zde zastoupeny i živce.

3.3.2 Granit

Granit použitý při této práci pochází z lokality Mrákotín (frakce drti: 5 až 12 mm). Tento dvojslídny typ granitu je drobně až středně zrnitý. Barva je světle šedá až bělavá, směrem k povrchu přechází do žlutobílých odstínů. Jedná se o všesměrně zrnitou horninu, jejíž základní hmota má hypidiomorfně zrnitou strukturu. Hlavní minerály jsou zde zastoupeny křemenem, mikroklinem a plagioklasem ($An_{14,8-31}$). Také je zde poměrně vzácně zastoupen zonární plagioklas, kde vnější zóna je tvořena albitem o bazicitě $An_{3,2-7,9}$. Celkové zastoupení muskovitu a biotitu v těchto horninách dosahuje maximálně 10-ti %. Z akcesorických minerálů se v tomto granitu vyskytuje zirkon, apatit, ilmenit, monazit a magnetit. Dále se zde vyskytuje v poměrně hojném množství andalusit, který je zřídka doplňován sillimanitem nebo cordieritem (Al-silikát) [15].

3.3.3 Mramor

Mramor zvolený pro účely dané práce pochází z lokality Supíkovice (frakce drti: 7 až 14 mm). Tento druh mramoru je středně až hrubě zrnitý a je samozřejmě tvořen převážně karbonáty. Jeho barva je šedá, šedobílá až bílá, s šedě (grafit) nebo hnědě (flogopit) zbarvenými neostrými šmouhami či pruhy.

Někdy se v tomto mramoru vyskytují cizorodé, nepravidelné uzavřeniny, zřejmě se jedná o kontaktní pegmatit. Přítomnost těchto uzavřenin jednak ruší vzhled mramoru a také zhoršují jeho opracovatelnost. Jinak má supíkovický mramor běžně zajímavou kresbu a je dobře leštitelný a poměrně vysoce pevný [14].

3.3.4 Štěrka

Použitý štěrka pochází z pískovny Krčmaň, která je nedaleko Olomouce. Petrografické složení tohoto štěrku je poměrně pestré, obsahuje valouny různých hornin a křemene o průměrné zrnitostní frakci 3 až 10 mm (u štěrku užitého pro tuto práci). Z metamorfovaných hornin jsou hojné fylity, různé ruly, amfibolity, migmatity a zelené břidlice. Vyvřelé horniny jsou zde zastoupeny pegmatity, aplity, granitoidními horninami atd. Jsou zde běžné i horniny sedimentární, jež jsou zastoupeny především drobnými, pískovci, slepenci, jílovými břidlicemi, prachovci, silicity (radiolary, rohovce atd.), dále to jsou vápence a jiné sedimenty [16].

3.3.5 Sklo

*Tabulka č. 3: XRF analýza obrazkového CRT skla - Pozn.:
Tučně vyznačené hodnoty překračují limity stanovené
vyhláškou č. 294/2005 Sb.*

	koncentrace (ppm)
K	44999
Ca	9768
Cr	413
Mn	142
Fe	2432
Ni	289
Cu	114
Zn	1570
As	1341
Sr	72024
Zr	9196
Sb	3680
Pb	19025
Bi	389

Pro zhotovování vzorků byly použity dva druhy skla, prvním z nich bylo drcené lahvové sklo (tzv. obalové sklo) a druhým bylo sklo z drcených obrazovek (CRT sklo). V případě obalového skla se jedná o běžná $\text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{Na}_2\text{O}$ skla, která jsou často zabarvovaná hnědě (Fe_2O_3) nebo zeleně (Cr_2O_3) [8]. Recyklace barevného skla je poněkud problematická, což je dáno třídícím systémem, jenž nerozlišuje, zda se jedná o sklo zelené či hnědé, tedy nebere se v potaz různé chemické složení barevných skel. To znamená, že jej nelze zpětně využít při produkci skelných výrobků v tak velké míře jako sklo čiré [10]. V této práci byla použita konkrétně drť tvořená směsí čírého, zeleného a hnědého skla (frakce: >2 až 18 mm a 0,5 až 2 mm). Druhým použitým druhem je obrazkové sklo. Při recyklaci obrazkového skla nastává problém, totiž při výrobě nových produktů jej nelze vzhledem k jeho chemickému složení tak široce uplatnit. Je zde především potíž se složením stínítkového CRT skla, které má zvýšené obsahy olova (ve formě PbO) a alkálií (Na_2O a K_2O) [10]. Zrnitostní frakce drceného obrazkového skla použitého pro účely této práce jsou >2 až 10 mm, 0,5 až 2 mm a 0,063 až 0,5 mm.

3.3.6 Cihlová drť

Tabulka č. 4: XRF analýza
cihlové drti HELUZ
Supertherm - Pozn.: Tučně
vyznačené hodnoty překračují
limity stanovené vyhláškou č.
294/2005 Sb.

	hmotnostní %	toxické prvky	koncentrace (ppm)
SiO ₂	23,65	As	12
TiO ₂	0,68	Cd	1
Al ₂ O ₃	5,39	Cr	93
Fe ₂ O ₃	6,15	Cu	40
P ₂ O ₅	0,92	Hg	4
MnO	0,16	Pb	46
MgO	1,94	Sb	2
CaO	12,84	Sn	10
K ₂ O	7,49	Zn	116
Σ :	57,29		

Tato cihlová drť byla získána rozemletím cihlové tvárnice HELUZ Supertherm. Tyto pálené cihlové tvárnice se vyrábí ze sprašových hlín (Cihelna Dolní Bukovsko) nebo z mořských sedimentů (Cihelna Hevlín a Cihelna Libochovice). Cihlové tvárnice zhotovené ze sprašových hlín mají díky většímu obsahu oxidů železa červenější barvu, kdežto tvárnice zhotovené z mořských sedimentů jsou světlejší, což nikterak neovlivňuje technické vlastnosti produktů [3]. Daná cihlová drť byla v této práci užitá o frakcích >2 až 15 mm a 0,5 až 2 mm.

3.4 Barviva

Byly použity dva typy barviva. Jako první bylo použito akrylové barvivo DEKA Color Crystalic Acryl (170 °C) tmač zelené barvy, které se používá k obarvení skla a keramiky. Druhým typem použitého barviva je červený křídový prášek od výrobce JIANGSU, který je podle XRF analýzy složený převážně z vápníku a železa.

4 Metodický postup práce

Bylo zhotoveno celkem 22 vzorků rozdělených do 5-ti sérií, kde tyto série jsou děleny dle užití odlišných komponent, zejména se jednalo o různé druhy kameniva, avšak u jedné ze sérií došlo pouze k experimentu, který spočíval v užití odlišného alkalického aktivátoru. Ze všeho nejdříve bylo pro každý vzorek, na základě úvah o potřebných parametrech, vybráno vhodné kamenivo. To znamená, že byla volena taková kameniva, aby co nejlépe zreagovala s geopolymerní maticí a aby plnila funkci dekoračního efektu. Byly vybrány horninové fragmenty a průmyslem produkované materiály obsahující Al a Si o různých frakcích. Z hornin, jak již bylo uvedeno, byly užity klasty granitu, zrnka křemičitého písku, mramor a šterk tvořený směsicí různých hornin. Jako dalších materiálů bylo užito drceného lahvého skla o frakcích 0,5 až 2 mm a >2 až 18 mm, dále bylo jako kameniva užito drceného skla z obrazovek, a to o frakcích 0,063 až 0,5 mm, 0,5 až 2 mm a >2 až 10 mm. Nakonec byla přiřazena funkce kameniva i drcené cihlové tvárnici HELUZ Supertherm o frakcích 0,5 až 2 mm, >2 až 15 mm. Dané frakce těchto tří kameniv byly získány jejich přesetím přes soustavu normalizovaných sít. Frakce jednotlivých kameniv (nyní v případě horninových fragmentů) jsou zmíněny níže v textu popisujícím sérii vzorků číslo 1.

Horninové drti bylo nutno před užitím proprat ve vodě, aby u jednotlivých vzorků nedošlo k zamíchání nežádoucích nečistot do směsi metakaolínu a alkalického aktivátoru. Tyto proprané horninové drti byly po té sušeny v digestoři po dobu 15-ti minut při teplotě 100 °C. Jelikož ostatní typy kameniva (skelné a cihlové drti) byly skladovány v čistotě, nebyla potřeba je před použitím takto čistit. Následně bylo při přípravě každého vzorku odváženo potřebné množství dílčích komponent. Ve většině případů byly vzorky namíchány s ideálním poměrem metakaolínu a alkalického aktivátoru 5:4. Po navážení potřebných surovin (metakaolín, alkalický aktivátor, kamenivo) následovalo jejich vzájemné promíchání, které již vedlo ke vzniku samotného dekoračního kamene na bázi geopolymery. Nejprve byl vždy smíchán metakaolín s alkalickým aktivátorem, a to tím způsobem, že metakaolín byl přidáván do alkalického aktivátoru, kde tato směs byla promíchávána v hnětači po dobu 10-ti minut. U dvou vzorků bylo užito křídové barvivo, v tomto případě se nejprve smíchal dohromady metakaolín s barvivem a až posléze byly tyto dvě komponenty přidány k alkalickému aktivátoru. Bylo použito také akrylové barvivo, které se přidalo k již zamíchané směsi metakaolínu a aktivátoru a opět se vše promíchalo. Až k takto připraveným směsím se přidávala různá kameniva. Po promíchání všech komponent bylo nutno vzorek protřást,

abychom se zbavili nežádoucích vzduchových bublin, po kterých se ve vzorku tvoří drobné dutinky. Každý ze vzorků se nechal utuhnout po dobu 28 dní. Vzorky byly následně řezány na kotoučové diamantové pile. Poté byly broušeny s využitím brusiv o rozdílných frakcích (od nejhrubší po nejjemnější). Broušení vzorků bylo prováděno ze dvou důvodů, jednak abychom získali reprezentativní plochu vzorku, jež má plnit dekorační efekt a také kvůli následnému měření pevností, kde je potřeba rovných a paralelních ploch vzorků, aby nedošlo ke zkreslení naměřených hodnot. Po broušení byly vzorky připraveny již k měření pevnosti v tlaku. Tři vzorky byly namíchány do normalizovaných forem (trámečky 1x1x10 cm), aby u nich mohla být změřena i pevnost v ohybu. Pevnosti vzorků byly měřeny na lisu Seidner Form + Test s digitální jednotkou (zajistil Výzkumný ústav stavebních hmot, Brno). Jako doklad o zastoupení jednotlivých prvků (v ppm), které jsou obsaženy v užitých surovinách, byla u některých komponent použita XRF analýza.

Této analýze byly podrobeny metakaolíny Baucis i Mefisto K05, alkalický aktivátor (typu NaOH), drcené CRT sklo z obrazovek, cihlová tvárnice HELUZ Supertherm a křídové barvivo. Kde z výsledků dané analýzy jsou pro tuto práci podstatné zejména alkálie (Na, Ca, K atd.), hliník a křemík. Z hlediska životního prostředí jsou důležité také prvky jako jsou arsen, kadmium, chrom, rtuť, nikl, olovo a vanad. Tyto prvky mají podle vyhlášky 294/2005 Sb. své limity pro obsah v sušině (v ppm).

5 Popis vzorků

5.1 Série vzorků číslo 1

U této série byly použity jako kamenivo písek, štěrk a horninové fragmenty. Konkrétně se tedy jedná o již zmíněný křemitý písek, který sloužil jako kamenivo u 4 vzorků. U jednoho vzoru této série byl použit granit, další dva vzorky obsahují jako kamenivo mramor a u posledního vzorku plní funkci kameniva štěrk. Pro přípravu geopolymerní matrice bylo užito alkalického aktivátoru, který je složen z hydroxidu sodného a vodního skla. Z metakaolínů byly použity oba typy, Mefisto a Baucis. Z tabulky č. 5 lze u každého vzorku vyčíst druh užitého kameniva, jeho zrnění, hmotnostní poměr metakaolínu a kameniva, typ použitého metakaolínu a pevnost v tlaku (v MPa).

	kamenivo	frakce (cca)	hm. poměr m/k	metakaolín	pevnost v tlaku
vzorek 1	kř. písek	1 - 2 mm	1 : 3	Mefisto	75,1 MPa
vzorek 2	kř. písek	1 - 2 mm	1 : 4	Mefisto	50,31 MPa
vzorek 3	kř. písek	1 - 2 mm	1 : 3	Baucis	90,07 MPa
vzorek 4	kř. písek	1 - 2 mm	1 : 4	Baucis	66,07 MPa
vzorek 5	granit	5 - 12 mm	1 : 3	Baucis	81,2 MPa
vzorek 6	mramor	7 - 14 mm	1 : 3	Baucis	30,44 MPa
vzorek 7	mramor	7 - 14 mm	1 : 3	Baucis	58,98 MPa
vzorek 8	štěrk	3 - 10 mm	1 : 3	Baucis	111,48 MPa

Tabulka č. 5: m = metakaolín, k = kamenivo.

5.1.1 Vzorky 1 a 2

Vzorky 1 a 2 jsou popisovány současně, jelikož u nich není příliš patrný rozdíl, co se týče vizuální stránky a samotného dekoračního efektu. U obou vzorků bylo použito stejné množství alkalického aktivátoru (80 g) a stejné množství metakaolínu Mefisto (100 g). Vzorky se od sebe liší množstvím užitého kameniva, jímž je křemitý písek o frakci 1-2 mm. Do vzorku 1 bylo přidáno 300 g křemitého písku, kdežto do vzorku 2 bylo přidáno 400 g. Výsledky pevnostních testů podtrhují rozdíly v poměrech metakaolínu a kameniva, což napovídá, že obecně bude mít vzorek vyšší pevnost v tlaku při nižším poměru metakaolínu a

kameniva. Povrch obou vzorků je velmi hladký a celistvý, díky užití metakaolínu Mefisto nejsou pozorovány nežádoucí výkvěty alkálií. Barva je světle šedá, což je dáno barvou metakaolínu. Na řezu je možno spatřit dutinky po vzduchových bublinách, jejichž průměrná velikost je 2 mm. Díky přítomnosti křemitého písku jsou oba vzorky relativně hůře brousitelné.



Obr. č. 7: Vzorek č. 1 první série – velikost snímku = 8 cm.

5.1.2 Vzorky 3 a 4

Tyto dva vzorky jsou popisovány společně ze stejného důvodu jako dva vzorky předchozí (identický vzhled). Vzorky 3 a 4 byly připraveny ze stejného množství alkalického aktivátoru (80 g) a metakaolínu (100 g), kde tentokrát byl použit metakaolín Baucis. Avšak poměr kameniva a metakaolínu se opět u vzorků liší. Obdobně jako u vzorků 1 a 2 bylo do vzorku č. 3 přidáno 300 g křemitého písku a do vzorku č. 4 bylo přidáno 400 g. Z tabulky č. 5 je zřejmé, že vzorky 3 a 4 dosahují oproti předešlým vzorkům vyšších pevností, což je dáno užitím metakaolínu typu Baucis, kde došlo i k výrazně rychlejšímu utužení vzorků.



Obr. č. 8: Vzorek č. 3 první série – průměr vzorku = 12 cm.

Opět je zde u obou vzorků velmi hladký a konzistentní povrch, avšak se zde objevily na povrchu horní plochy obou vzorků poměrně rozsáhlé výkvěty alkálií (viz obr. č. 8). Na povrchu jsou těmito výkvěty lemována i jednotlivá zrnka křemitého písku. Barva obou těchto vzorků je světle šedá, a na řezu jsou patrné dutinky po vzduchových bublinách (průměrná velikost – 2 mm).

5.1.3 Vzorek 5

Tento vzorek byl opět připraven se stejným optimálním poměrem alkalického aktivátoru a metakaolínu (4:5), kde konkrétně bylo použito 80 g aktivátoru a 100 g metakaolínu (Baucis). Jako kamenivo bylo do tohoto vzorku přidáno 300 g drceného granitu o frakci 5 – 12 mm. Daný vzorek dosahuje uspokojivých pevností v tlaku (72,2 MPa), jimiž předčí cca dvakrát pevnosti běžných betonů na bázi portlandského cementu. Vzorek má světle šedou barvu, je hladký a má kompaktní strukturu. Na okrajích je mírně rozpraskaný, což je dáno nepříliš dobrou soudržností geopolymerní matrice a granitového kameniva v krajních partiích vzorku, kde základní hmota neobklopuje jednotlivé fragmenty granitu tak silnou vrstvou.



Obr. č. 9: Vzorek č. 5 první série – šířka vzorku = 4,5 cm.

Povrch vzorku je z části (1/5) pokryt bílými šmouhami, které jsou tvořeny výkvěty alkálií. Na řezu jsou patrné drobné dutinky po vzduchových bublinách, jejichž průměrná velikost je cca 0,5 – 1 mm.

5.1.4 Vzorek 6

Vzorek byl připraven z 80-ti g alkalického aktivátoru, 100 g metakaolínu Baucisu a 300 g drceného mramoru o frakci 7 – 14 mm.



Obr. č. 10: Vzorek č. 6 první série – šířka vzorku = 7cm.

U tohoto vzorku nebyly naměřeny vysoké pevnosti v tlaku (30,44 MPa), avšak jsou srovnatelné s pevnostmi betonů zhotovených z OPC. Nižší pevnost v tlaku tohoto vzorku oproti předešlému lze usuzovat na základě faktu, že mramory obecně obsahují oproti granitům nižší množství minerálů obsahujících Al a Si, jež jsou základem pro průběh alkalické aktivace. Dále lze nižší pevnost přisoudit velikosti klastů kameniva (7 – 14 mm). Je zde slabá vrstva geopolymerní hmoty obklopující jednotlivé klasty mramoru, což se opět projevuje prasklinami na okrajích vzorku. Vyjímaje občasné praskliny je povrch vzorku hladký a celistvý. Barva je šedá, vzorek je bez pórů a s minimálním množstvím výkvětů na povrchu, které zde tvoří lokálně shloučené šmouhy.

5.1.5 Vzorek 7

Pro přípravu tohoto vzorku bylo použito 100 g metakaolínu (Baucis), 100 g alkalického aktivátoru. Toto větší množství aktivátoru bylo přidáno kvůli užití 20-ti g červeného křídového barviva, aby bylo možno směs kvalitně promíchat. Jako kamenivo zde byl použit opět mramor o frakci 7 – 14 mm. Pevnost v tlaku u tohoto vzorku dosahuje téměř dvojnásobku pevnosti vzorku č. 6 této série (58,98 MPa). Pravděpodobně je to způsobeno celkovým nárůstem objemu základní hmoty vzorku. Celkově tento nárůst činí v porovnání s předchozím vzorkem 40 g základní hmoty navíc. Vyšší pevnost u tohoto vzorku zajišťuje také přítomnost alkálií a Si navíc, které jsou obsaženy v křídovém barvivu.



Obr. č. 11: Vzorek č. 7 první série – šířka vzorku = 7cm.

Povrch tohoto vzorku umělého dekoračního kamene je matný a velmi hladký. Vzorek je celistvý bez prasklin. Znovu můžeme na povrchu pozorovat drobné lokální shluky šmouh bílé barvy (výkvěty). Na řezu jsou viditelné, nepříliš hojné póry, jejichž velikost nepřesahuje 1 mm. Červená barva základní hmoty je za pokojové teploty stálá a pod vodou se nevymývá.

5.1.6 Vzorek 8

Základní hmota tohoto vzorku byla připravena z 60-ti g metakaolínu a 50-ti g alkalického aktivátoru. Funkci kameniva v tomto případě zastal štěrk o frakci 3 – 10 mm. Výsledná hodnota pevnosti v tlaku tohoto vzorku činí 111,48 MPa, což je možno považovat za velmi uspokojivý výsledek. Dané pevnosti bylo dosaženo vhodným zvolením hmotnostního poměru metakaolínu a kameniva (1:3). Lze předpokládat, že podíl na výsledné pevnosti vzorku nese složení kameniva. Užitý štěrk, jak již bylo zmíněno, se skládá z horninových a minerálních fragmentů, které obsahují potřebný hliník a jsou zde v podstatném množství zastoupeny i skupiny SiO a alkálie, které také doprovázejí průběh alkalické aktivace. Značnou mírou se na pevnosti daného vzorku podílí optimální frakce kameniva (3 – 10 mm), kde můžeme pozorovat převahu klastů s pravidelnými oválnými tvary, čímž je podmíněno jejich relativně rovnoměrné uspořádání v základní geopolymerní hmotě.



Obr. č. 12: Vzorek č. 8 první série – šířka vzorku = 7 cm.

Vzorek má spíše tmavší odstín šedé barvy, jeho povrch je hladký, kompaktní a zcela bez prasklin. Pouze na horní ploše povrchu vzorku se vyskytly stopy po unikání vzduchu ze vzorku, které mají podobu drobných pórů, které ční do hloubky 1 mm a mají průměr 1 – 3 mm. Na povrchu dále pozorujeme ojedinělé výkvěty tvořící bílé čmouhy, které nevyčnívají z povrchu vzorku. Klasty hornin a minerálu tvořící kamenivo, jsou díky svým oblým tvarům lépe obklopeny základní hmotou, což se projevilo i při řezání vzorku, kdy nedošlo k jejich odštípnutí. Na řezu pozorujeme zřídka se vyskytující dutinky po vzduchových bublinách, jejichž velikost činí 0,5 – 1 mm. Dále jsou na řezu tohoto vzorku viditelné výkvěty alkálií, které tvoří okolo klastů tenký lem (desetiny milimetru).

5.2 Série vzorků číslo 2

K této sérii náleží dva vzorky, u nichž bylo užito jako kamenivo drcené, barevné lahvové sklo. Tentokrát byl použit pouze metakaolín typu Baucis, jelikož se projevil jako velmi vhodný (co se týče pevností) pro výrobu umělého dekoračního kamene na bázi geopolymeru. Jako alkalický aktivátor byla použita opět kombinace NaOH a vodního skla. Z tabulky č. 2 níže je možno vyčíst u obou vzorků druh použitého kameniva, frakce kameniva, hmotnostní poměr metakaolíu a kameniva, typ použitého metakaolínu a pevnost v tlaku (v MPa).

Tabulka č. 6: *m* = metakaolín, *k* = kamenivo.

	kamenivo	frakce (cca)	hm. poměr m/k	metakaolín	pevnost v tlaku
vzorek 1	sklo (láhve)	0,5 - 2 mm	1 : 3	Baucis	94,25 MPa
vzorek 2	sklo (láhve)	> 2 - 20 mm	1 : 2	Baucis	47,83 MPa

5.2.1 Vzorek 1

Základní hmota vzorku byla připravena z 40-ti g alkalického aktivátoru a 50-ti g metakaolínu. Jako kamenivo bylo do této základní hmoty zamícháno 150 g drceného lahvového skla o frakci 0,5 – 2 mm. Zajímavostí je u tohoto vzorku fakt, že při měření pevnosti v tlaku nebyl lis schopen vzorek rozdrtit.

Vzhledem k tomu, že vyvinutou silou lisu byla porušena struktura vzorku, brala se při přepočtu na tlak v úvahu nejvyšší naměřená hodnota vyvinuté síly 200 kN. Po přepočtu jsme tedy získali výslednou hodnotu pevnosti v tlaku, jež činí 94,25 MPa. Danou hodnotu lze tedy oproti předešlým vzorkům považovat za minimální pevnost v tlaku. Barva základní hmoty vzorku je šedá, povrch je hladký a celistvý bez prasklin, ojediněle se zde vyskytují drobné póry (max. 2 mm) po vzduchu unikajícím z geopolymerní matrice.



Obr. č. 13: Vzorek č. 1 druhé série – průměr vzorku = 5,2 cm.

Na řezu vzorku pozorujeme drobné, barevné střípky skla, převažuje u nich tvar sloupečků a především drobných jehliček. Co se týče výkvětů, tak ty byly pozorovány pouze na povrchu vzorku jako tenké nevystupující lemy střípků pokrytých základní hmotou. Dále lze na řezu velmi zřídka pozorovat drobné póry, jejichž velikost nepřesahuje 1 mm.

5.2.2 Vzorek 2

Na přípravu tohoto vzorku byla potřeba 120 g alkalického aktivátoru a 150 g Baucisu. Funkci kameniva zde zastává jako u předchozího vzorku drcené lahvové sklo (300 g), avšak tentokrát byla frakce skla $>2 - 20$ mm. Pevnost v tlaku tohoto vzorku není nikterak vysoká (47,83 MPa), ale dokáže konkurovat pevnostem naměřeným u klasických betonů připravených z portlandského cementu. Výsledná pevnost daného vzorku je dána pravděpodobně větší zrnitostí frakcí skleněných střepek, které zde byly použity jako kamenivo. Zamíchání tohoto kameniva do geopolymerní matrice bylo vzhledem k velikosti jednotlivých střepek poměrně obtížné. Proto byl také zvolen ekonomicky nepříliš výhodný hmotnostní poměr metakaolínu a kameniva (1:2). Velikost střepek se také podepisuje na jejich relativně chaotickém a nerovnoměrném uspořádání v základní hmotě, což může mít u daného vzorku vliv na onu výslednou hodnotu pevnosti v tlaku. Barva základní hmoty tohoto vzorku je středně až světle šedá, povrch je opět hladký, kompaktní, pouze lokálně porušený prasklinami na okrajích. Zmíněné praskliny jsou také jedním z projevů větší velikosti střepek a jejich nepravidelného uspořádání. Při okrajích vzorku nejsou jednotlivé střepy obklopeny dostatečně silnou vrstvou geopolymerní matrice, proto došlo při tuhnutí k tvorbě prasklin. Na povrchu nepozorujeme žádné okem viditelné výkvěty. Co se týče dekoračního efektu, je řez vzorku poměrně zajímavý. Na řezu nejsou viditelné žádné póry.



*Obr. č. 14: Vzorek č. 2 druhé série –
šířka vzorku = 7 cm.*

5.3 Série vzorků číslo 3

U všech vzorků této série bylo použito jako kamenivo drcené CRT sklo z obrazovek o dvou zrnitostních frakcích, 0,5 až 2 mm a >2 až 10 mm. Z metakaolínů byl použit opět pouze Baucis. Alkalický aktivátor byl u této série užit stejný jako u dvou předchozích sérií, opět kombinace NaOH a vodního skla. U prvních dvou vzorků této série bylo použito také zelené akrylové barvivo a u posledního vzorku bylo užit červené křídové barvivo. Tabulka č. 3 nám sděluje u jednotlivých vzorků druh užitého kameniva, frakce kameniva, hmotnostní poměr metakaolíu a kameniva, typ použitého metakaolíu a pevnost v tlaku vyjádřenou v MPa.

Tabulka č. 7: m = metakaolín, k = kamenivo.

	kamenivo	frakce (cca)	hm. poměr m/k	metakaolín	pevnost v tlaku
vzorek 1	CRT sklo	0,5 - 2 mm	1 : 4	Baucis	35,76 MPa
vzorek 2	CRT sklo	> 2 - 10 mm	1 : 3	Baucis	48,84 MPa
vzorek 3	CRT sklo	> 2 - 10 mm	1 : 4	Baucis	36,8 MPa
vzorek 4	CRT sklo	> 2 - 10 mm	1 : 4	Baucis	70,75 MPa
vzorek 5	CRT sklo	0,5 - 2 mm	1 : 4	Baucis	11,63 MPa
vzorek 6	CRT sklo	0,5 - 2 mm	1 : 4	Baucis	17,73 MPa
vzorek 7	CRT sklo	0,5 - 2 mm	1 : 3	Baucis	19,9 MPa

5.3.1 Vzorek 1

U tohoto vzorku byla základní hmota namíchána z 8-mi g alkalického aktivátoru a z 10-ti g Baucisu. K této směsi byly přidány také 2 g zeleného akrylového barviva. Funkci kameniva, které bylo zamícháno do geopolymerní základní hmoty, v tomto případě zastává drcené sklo z obrazovek o zrnitostní frakci 0,5 – 2 mm. Pevnost v tlaku daného vzorku, která činí 35,76 MPa, je obdobná jako pevnost běžných betonů. Vezmeme-li v potaz tržní cenu metakaolíu a suroviny potřebné na přípravu použitého alkalického aktivátoru, pak s touto pevností vzorek nemůže nijak konkurovat klasickým betonům.

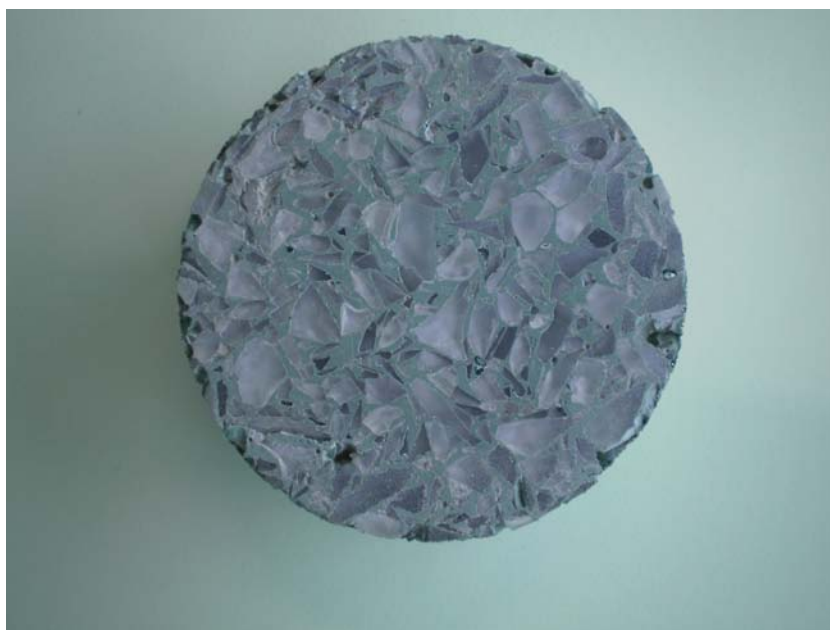


Obr. č. 15: Vzorek č. 1 třetí série – průměr vzorku = 3,4 cm.

Relativně nízká pevnost tohoto vzorku lze přisoudit jeho rozpraskání po obvodu, což je způsobeno pravděpodobně nevhodně zvoleným hmotnostním poměrem metakaolínu a drceného skla z obrazovek (1:4). Nižší pevnost vzorku může být způsobena také přidáním akrylového barviva, které celkově naředilo geopolymerní matici a tudíž zde zřejmě neproběhla alkalická aktivace v dostatečné míře. Vzorek má tmavší odstín zelenošedé barvy, což je dáno kombinací barev metakaolínu a akrylového barviva. Na povrchu není tak hladký jako předchozí vzorky, naopak je poměrně drsný a rozpraskaný. V malé míře lze na povrchu horní plochy vzorku pozorovat výkvěty alkálií, které zde tvoří nevystupující mapky. Na řezu jsou viditelné v porovnání s předešlými vzorky poměrně hojné dutinky po vzduchových bublinách, z nichž největší mají velikost 0,5 mm.

5.3.2 Vzorek 2

Tento vzorek je zhotoven z 80-ti g alkalického aktivátoru, 100 g metakaolínu, 20-ti g zeleného akrylového barviva a 300 g drceného skla z obrazovek o frakci $>2 - 10$ mm. Pevnost v tlaku naměřená u daného vzorku (48,84 MPa) je celkem uspokojivá. Výsledná pevnost může být ovlivněna akrylovým barvivem, jak je tomu i u předchozího vzorku. V daném případě je pevnost tohoto vzorku ovlivněna také jeho výrazným rozpraskáním po obvodu, což je dáno nedokonalým vyplněním prostoru geopolymerní maticí mezi jednotlivými střepy v okrajových partiích vzorku. Stejně jako předchozí vzorek má i tento zelenošedou barvu. Povrch vzorku je na horní i spodní ploše hladký a celistvý. Avšak po obvodu je vzorek značně nekompaktní, rozpraskaný a poměrně drsný. Na povrchu horní plochy vzorku jsou značné výkvěty, které splývají s povrchem, jsou bílošedé barvy a tvoří zde shluky šmouhovitých útvarů. Na řezu lze zřídka pozorovat póry, které dosahují velikosti až 2 mm.



Obr. č. 16: Vzorek č. 2 třetí série – průměr vzorku = 7,1 cm.

5.3.3 Vzorek 3

Daný vzorek byl vyroben ze 100 g metakaolínu, 110-ti g alkalického aktivátoru a 400 g drceného skla z obrazovek, jehož frakce je >2 až 10 mm. Hodnota naměřené pevnosti v tlaku tohoto vzorku činí 36,8 MPa, což je výsledkem použití vyššího poměru metakaolínu a kameniva (1:4). Z těchto důvodů bylo použito i větší množství aktivátoru pro dosažení řidší konzistence geopolymerní matrice, aby se snáze smísila s kamenivem. Obdobně jako u předchozího vzorku je výsledná pevnost v tlaku u tohoto vzorku ovlivněna jeho rozpraskáním po okrajích. Barva tohoto vzorku je šedá tmavšího odstínu. Na povrchu je vzorek hladký s poměrně četnými prasklinami na svrchní ploše. V ploše jsou tyto praskliny pouze povrchové, kdežto na okrajích praskliny zasahují poměrně hluboko do vzorku (až do 1/4 celkové mocnosti vzorku). Dále jsou na povrchu zřetelné výkvěty alkálií, které tvoří bílé mapky. Na řezu nejsou makroskopicky zřetelné žádné dutiny po vzduchových bublinách.



Obr. č. 17: Vzorek č. 3 třetí série – šířka vzorku = 7 cm.

5.3.4 Vzorek 4

Vzorek byl připraven ze 100 g metakaolínu typu Baucis, 120-ti g alkalického aktivátoru, 20-ti g červeného křídového barviva a 400 g drceného skla z obrazovek o frakci >2 až 10 mm. Pevnost v tlaku daného vzorku je 70,75 MPa, což lze považovat za uspokojivý výsledek. U tohoto vzorku je ve srovnání s předešlým vzorkem větší množství základní hmoty obklopující jednotlivé střepy. To má za následek podstatně nižší míru rozpraskání oproti předchozímu vzorku, což se podepisuje i na výsledné pevnosti tohoto vzorku. Barva základní hmoty vzorku je na povrchu sytě starorůžová. Povrch je hladký a celistvý, můžeme na něm pozorovat bílé povlaky tvořené výkvěty alkálií, jež se shlukují do mapovitých útvarů umístěných při okrajích vzorku. Dále zde nacházíme občasné praskliny povrchového charakteru. Na řezu tohoto vzorku je viditelný zřetelný přechod sytě starorůžové barvy do barvy světle růžové, která kopíruje jednotlivé střepy ve vzorku. Opět zde nepozorujeme žádné makroskopicky zřetelné póry.



Obr. č. 18: Vzorek č. 4 třetí série – šířka vzorku = 7 cm.

5.3.5 Vzorky 5, 6 a 7

Tyto vzorky byly zhotoveny na základě úvahy o možném využití geopolymérů připravených s drceným obrazovkovým sklem pro výrobu zdiva stínícího RTG záření. Z tohoto důvodu byly dané vzorky vyrobeny ve formě normalizovaných trámečků o rozměrech 10 x 1 x 1 cm a byla u nich provedena i pevnostní zkouška v ohybu. Množství surovin použitých pro výrobu jednotlivých vzorků lze vyčíst z tabulky č. 8. Výsledné hodnoty pevností v tlaku i v ohybu jsou u všech tří vzorků neuspokojivé. V případě vzorku č. 5 je tomu tak kvůli nedostatečnému obalení střepek geopolymerní maticí. U vzorku č. 6 bylo použito oproti předchozímu vzorku dvojnásobného množství alkalického aktivátoru, aby byla geopolymerní hmota dostatečně tekutá a snadno pronikla mezi jednotlivé střepek. Avšak z tohoto důvodu došlo k usazení střepek při dně formy, tudíž byly v celém objemu vzorku nerovnoměrně rozmístěny.

Tabulka č. 8: Množství užitých surovin a hodnoty pevností u vzorků 5, 6 a 7 třetí série.

	metakaolín	aktivátor	CRT sklo	pevnost v tlaku	pevnost v ohybu
vzorek 5	50 g	40 g	200 g	11,63 MPa	2,96 MPa
vzorek 6	50 g	80 g	200 g	17,73 MPa	1,58 MPa
vzorek 7	50 g	40 g	150 g	19,9 MPa	3,43 MPa



Obr. č. 19 a 20: Vzorky č. 5 a 6 třetí série – šířka jednotlivých snímků = 3 cm.

Relativně nízké pevnosti vzorku č. 7 jsou pravděpodobně zapříčiněny hojným výskytem pórů. Všechny tři vzorky jsou necelistvé, kde nejhůře je na tom z tohoto hlediska vzorek č. 5, jež je lehce drolivý. Povrch těchto vzorků je poměrně drsný. Vzorky č. 5 a 7 nemají na svém povrchu žádné výkvěty, kdežto povrch vzorku č. 6 je z velké části pokryt povlakem tvořeným

právě výkvěty alkálií. Barva tohoto povlaku je světle šedá a viditelně kontrastuje s tmavě šedou barvou vzorku.



Obr. č. 21: Vzorek č. 7 třetí série – šířka snímku = 3 cm.

5.4 Série vzorků číslo 4

K této sérii náleží celkem 3 vzorky, u kterých bylo použito stejné kamenivo jako u předchozí série, tedy drcené sklo z obrazovek. Dané kamenivo bylo přidáno do jednotlivých vzorků o různých zrnitostních frakcích. U prvního vzorku byla užitá frakce >2 až 10 mm, u druhého 0,5 až 2 mm a u třetího vzorku 0,063 až 0,5 mm. Z metakaolínu byl u této série použit Baucis.

Zásadní rozdílnou komponentou je zde tentokrát alkalický aktivátor, kterým je v tomto případě Pentra-Sil (je na bázi lithia). Tento typ alkalického aktivátoru byl zvolen kvůli pokusu, jehož cílem bylo potlačení tvorby výkvětů. U všech vzorků je stejný hmotnostní poměr metakaolínu a kameniva (1:3) a stejný poměr alkalického aktivátoru a metakaolínu (4:5). Celá tato série vzorků je nezdařilá, poněvadž zde nedošlo k ideálnímu průběhu alkalické aktivace, což je přisuzováno užitému aktivátoru. Barva všech tří vzorků je světle šedá. Vzorky

jsou drolivé a měkké, ojediněle obsahují póry o velikosti do 1 mm, na povrchu jsou poměrně drsné a bez výkvětů. Kvůli drolivosti daných vzorků u nich nedošlo k měření pevností.



Obr. č. 22: Vzorek č. 2 čtvrté série – průměr vzorku = 3,5 cm.

5.5 Série vzorků číslo 5

Jako kamenivo byla u této série použita drcená cihlová tvárnice HELUZ Supertherm. Dané kamenivo bylo zvoleno z obdobných důvodů jako předešlá nehorninová kameniva, tedy jako uplatnitelný recyklovatelný materiál.

Konkrétně byly vyrobeny dva vzorky s tímto druhem kameniva, kde první z nich obsahuje dané pojivo o zrnitostní frakci >2 až 15 mm a druhý ze vzorků 0,5 až 2 mm. Opět byl použit metakaolín typu Baucis a alkalický aktivátor složený z NaOH a vodního skla. Pro rychlejší orientaci můžeme z tabulky č. 3 níže vyčíst u obou vzorků podstatné údaje jako druh použitého kameniva, frakce kameniva, hmotnostní poměr metakaolíu a kameniva, typ použitého metakaolíu a pevnost v tlaku (v MPa).

Tabulka č. 9: $m = \text{metakaolín}$, $k = \text{kamenivo}$.

	kamenivo	frakce (cca)	hm. poměr m/k	metakaolín	pevnost v tlaku
vzorek 1	tvárnice (heluz)	>2 - 15 mm	1 : 1	Baucis	92,9 MPa
vzorek 2	tvárnice (heluz)	0,5 - 2 mm	1 : 1	Baucis	67,7 MPa

5.5.1 Vzorek 1

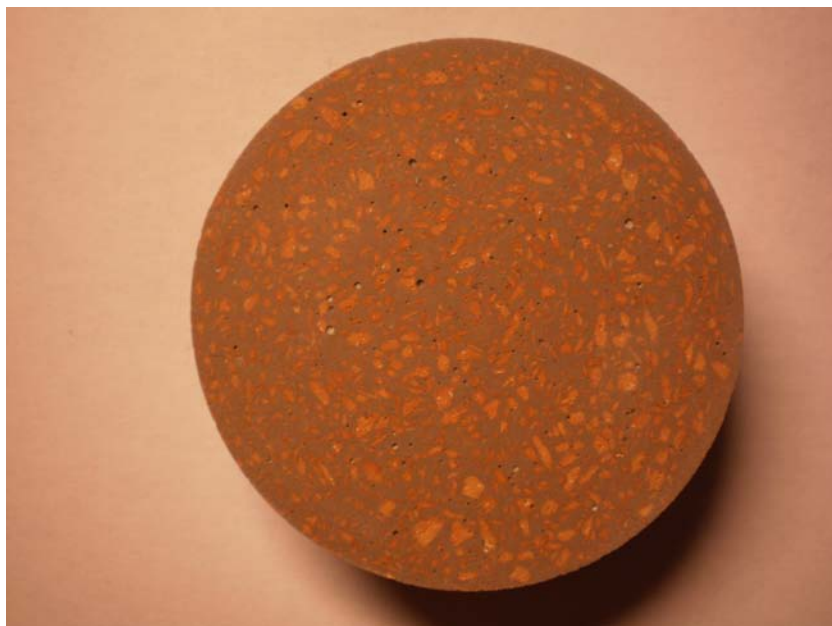
Základní geopolymerní hmota tohoto vzorku byla připravena ze 100 g metakaolínu a 110-ti g alkalického aktivátoru. Muselo být použito větší množství aktivátoru, aby bylo možné snadno promíchat geopolymerní hmotu s kamenivem, které má poměrně dosti drsný povrch na který se zmíněná základní hmota snadno přichytává. Funkci onoho kameniva zde zastává 100 g drcené cihlové tvárnice HELUZ Supertherm o frakci >2 až 15 mm. Ačkoli by se mohl zdát hmotnostní poměr metakaolínu a kameniva (1:1) jako nedostatečný, tak se tento poměr neprojevuje přílišnou újmou na objemu vzorku, protože hmotnost užitého kameniva je oproti předešlým kamenivům nižší. Pevnost toho vzorku (92,9 MPa) je i přes četný výskyt pórů velmi uspokojivá. Na dosažení takto vysoké pevnosti se podepisuje nižší poměr metakaolínu a kameniva, což má za následek lepší vyplnění prostoru základní hmotou mezi jednotlivými fragmenty. Barva základní hmoty vzorku je tmavě šedá. Svrchní povrchová plocha vzorku je hladká, lokálně poškozená póry a byl zde zaznamenán výskyt výkvětů v podobě bílých šmouh splývajících s povrchem. Na řezu vzorku pozorujeme hojné póry o průměrné velikosti 2 mm.



Obr. č. 23: Vzorek č. 1 páté série – šířka vzorku = 7 cm.

5.5.2 Vzorek 2

Tento vzorek byl připraven ve stejných poměrech surovin jako vzorek předchozí, pouze v menším množství, podíl metakaolínu tedy činil 25 g, podíl aktivátoru 27,5 g a podíl kameniva (Heluz Supertherm) 25 g, kde zrnitostní frakce kameniva u tohoto vzorku je 0,5 až 2 mm. Pevnost v tlaku daného vzorku (67,7 MPa) je oproti vzorku předchozímu o cca 25 MPa nižší, což je ale stále dostačující. Nižší pevnost tohoto vzorku je způsobena pravděpodobně tvarem i velikostí zrn kameniva. Převažuje zde jehličkovitý a sloupkovitý tvar zrn, jenž byl získán přeseťm kameniva. Kamenivo použité u tohoto vzorku je už samo o sobě křehké a málo tvrdé, tudíž po přeseťm kameniva jsem získal ostroúhlá a snadno se lámající zrnka. Barva základní hmoty vzorku je opět tmavě šedá.



Obr. č. 24: Vzorek č. 2 páté série – průměr vzorku = 5 cm.

6 Výsledky a diskuze

Během laboratorní etapy této práce bylo zjištěno, že pro výrobu dekoračních kamenů na bázi geopolymérů je vhodnější metakaolín typu Baucis, který oproti metakaolínu Mefisto K05 zajišťuje vzorkům lepší mechanické vlastnosti. Vzorky zhotovené z Baucisu mají konzistentní hladký povrch a celkově lepší vzhled. Jako alkalický aktivátor se při výrobě vzorků dobře osvědčila kombinace vodního skla (vodný roztok křemičitanu sodného) a NaOH. Naopak za zcela nevhodný alkalický aktivátor pro přípravu geopolymérů můžeme označit Pentra-Sil (je na bázi lithia), který byl použit u série vzorků č. 4. Na doporučení vedoucího bakalářské práce (RNDr. Petr Sulovský, Ph. D.) byl u většiny vzorků použit poměr metakaolínu a alkalického aktivátoru 5:4, jenž se jeví jako nejvhodnější. Jako velmi vhodné a cenově dostupné (oproti akrylovému barvivo) se jeví i užití křídové barvivo od výrobce JIANGSU, které podle XRF analýzy obsahuje především vápník a železo (směs křídý a minerálů Fe^{3+}).

Vzorek č. 8 první série má ze všech vzorků nejvyšší pevnost v tlaku (111,48 MPa) a to zásluhou dobře zvoleného poměru komponent a díky zaoblenému tvaru jednotlivých zrn kameniva, samozřejmě se na výsledné hodnotě pevnosti podepisuje i složení šterkového kameniva. Naopak nejnižší hodnotu pevnosti v tlaku (11,63 MPa) má vzorek č. 5 třetí série, byl zde totiž zvolen nevhodný poměr metakaolínu a kameniva (1:4), což mělo za následek nedostatečné obalení jednotlivých stěpů geopolymerní maticí. Ze vzorků u kterých bylo jako kameniva užito recyklátu je na tom co se týče pevností v tlaku nejlépe vzorek č. 1 druhé série (94,25 MPa), pak vzorek č. 1 páté série (92,9 MPa) a vzorek č. 4 třetí série (70,75 MPa). Porovnáme-li tyto poslední dva vzorky, pak vidíme, že vzorek č. 4 třetí série má na řezu celistvější strukturu a díky kombinaci červeného barviva a čirého skla má celkově lepší vzhled. Také by byl tento vzorek při výrobě ve větším množství patrně ekonomicky výhodnější, vezmeme-li v úvahu cenu metakaolínu a složek alkalického aktivátoru. U většiny vzorků byl zaznamenán výskyt pórů, což je důsledkem nedokonalého (ručního) protřepání vzorku. Bylo by třeba jiného technologického postupu jako např. použití elektrického vibračního zařízení či ostnatého válce, který zajišťuje odstranění vzduchových bublin.

Všechny vzorky (vyjímaje vzorky 5 až 7 třetí série a celou čtvrtou sérii vzorků) by bylo možno uplatnit jako náhradu běžných keramických či betonových dlaždic, kde toto tvrzení platí s ohledem na tvorbu výkvětů pouze pro interiérové prostory. Tyto dekorační kameny na bázi geopolymérů by eventuálně mohly být použity také jako lité podlahy.

V případě vzorků připravených s obrazovkovým CRT sklem (vysoký obsah olova) lze uvažovat o jejich možném uplatnění jako zdiva stínícího RTG záření díky vysokému obsahu Pb a Ba; navíc by toto využití představovalo i možnost likvidace nebezpečného odpadu, který byl donedávna za úplatu vyvážen do Číny, ale tato možnost v nedávné době padla a je třeba hledat ekonomicky výhodné náhradní řešení.

7 Závěr

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo nalezení vhodného kameniva pro účely výroby umělých dekoračních kamenů na bázi geopolymérů. K tomu bylo vztaženo i nalezení vhodného hmotnostního poměru jednotlivých surovin. Práce se zaměřuje na použití kameniv typu horninových fragmentů (granit, mramor a štěrk), křemičitého písku a různých recyklátů v podobě drceného obalového (lahvového) skla, obrazkového CRT skla a drcené cihlové tvárnice HELUZ Supertherm. Tato kameniva byla volena kvůli předpokladu obsahu Si, Al a alkálií. Vzorky byly připravovány s využitím metakaolínu typu Baucis a Mefisto K05, který byl užit pouze v případě dvou vzorků. Jako alkalický aktivátor byla použita kombinace vodního skla a NaOH a také byl experimentálně ozkoušen Pentra-Sil, jenž se pro účel výroby geopolymerních materiálů neosvědčil. Jednotlivé horninové drti musely být před použitím proprány ve vodě a následně sušeny v digestoři, aby byly zbaveny nežádoucích nečistot. Cihlová drť a obě skelné drti byly přesety přes soustavu normalizovaných sít na různé zrnitostní frakce. Cihlová drť se přesela na frakce >2 až 15 mm a 0,5 až 2 mm. U vzorků namíchaných s CRT sklem byly použity frakce >2 až 10 mm, 0,5 až 2 mm a 0,063 až 0,5 mm a drcené lahvové sklo bylo rozděleno na frakce >2 až 20 mm a 0,5 až 2 mm. Horninové drti byly použity o zrnitostní frakci pševitické a pouze v případě křemičitého písku psamitické. Vzorky se po namíchání nechaly utuhnout po dobu 28 dní a posléze byly podrobeny pevnostní zkoušce v tlaku na lisu Seidner Form + Test. Z horninových drtí se pro výrobu dekoračních kamenů na bázi geopolymérů nejlépe jeví štěrk (pískovna Krčmaň), v daném případě při hmotnostním poměru metakaolínu a kameniva 1:3 a poměru metakaolínu a aktivátoru 5:4. Z alternativních materiálů použitých jako kamenivo se nejlépe jeví drcené lahvové sklo o frakci 0,5 až 2 mm, kde měřený vzorek byl namíchán o hmotnostním poměru metakaolínu a kameniva 1:3 a poměr metakaolínu a aktivátoru byl opět 5:4. Výhodou tohoto materiálu je jeho dostupnost, avšak při jeho zpracovávání může nastat problém s odstraněním nežádoucích etiket a lepidel. Vzorky zhotovené z obrazkového CRT skla měly být jedním z možných řešení, jak využít tento problematický materiál.

Výsledkem snahy o připravení takového dekoračního kamene na bázi geopolyméru, u kterého se zužitkuje CRT sklo, je vzorek č. 4 třetí série, který dosahuje pevnosti v tlaku uspokojivých 70,75 MPa, což je cca dvojnásobek pevnosti běžných betonů vyrobených z portlandského cementu. Z laboratorní etapy této práce tedy vyplývá, že hmotnostní poměr metakaolínu a kameniva 1:3 lze považovat za optimální při ideálním hmotnostním poměru

metakaolínu a aktivátoru 5:4. Což souhrnně platí pro frakce >2 mm a 0,5 až 2 mm. Dobře se jeví i hmotnostní poměr metakaolínu a kameniva 1:4, při hmotnostním poměru metakaolínu a aktivátoru 10:12, čehož bylo využito u vzorku č. 4 třetí série, kde musíme vzít v potaz užití křídového barviva, které přispělo k celkovému nárůstu objemu základní hmoty vzorku a ovlivnilo tedy jeho mechanické vlastnosti. Hmotnostní poměr metakaolínu a barviva byl v tomto případě 5:1. Až na čtvrtou sérii vzorků a vzorky č. 5 až 7 třetí série, mohou všechny ostatní vzorky, co se týče pevností v tlaku, konkurovat klasickým betonům vyrobeným z portlandského cementu, jejichž pevnosti v tlaku se běžně pohybují okolo 30-ti a 35-ti MPa.

8 Použité zdroje

- [1] Škvára F. (2007): Alkalicky aktivované materiály geopolymery - prezentace. Ústav skla a keramiky, Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha. [online; 14. 4. 2011]. Dostupné z: http://www.vscht.cz/sil/pojiva/geo_2007.pdf
- [2] Kotlík P. (2010): Umělý kámen – užití a vlastnosti. [online; 10. 4. 2011]. Dostupné z: <http://www.imaterialy.cz/Materialy/Umely-kamen-uziti-anbspvlastnosti.html>
- [3] Technická příručka, Heluz. [online; 9. 4. 2011].
Dostupné z: <http://www.heluz.cz/pdf/prirucka/info.pdf>
- [4] [online; 15. 4. 2011].
http://www.matrix-2012.cz/index.php?option=com_content&view=article&id=1149:geopolymery&catid=64:rzne&Itemid=88
- [5] [online; 12. 4. 2011]
<http://www.sedlecky-kaolin.cz/cz/ke-stazeni/download/technick%E9%20listy/metakaolin.pdf>
- [6] [online; 26. 4. 2011]. <http://www.cluz.cz/?page=cz,metakaolin>
- [7] [online; 26. 4. 2011]. <http://www.cluz.cz/?page=cz,geopolymery>
- [8] Richtera L. (2010): Struktura materiálů, IV. lekce – Sklo – prezentace. Fakulta chemická, Vysoké učení technické v Brně, Brno. [online; 24. 4. 2011]. Dostupné z: <http://www.fch.vutbr.cz/~richtera/download/strukmat/04.pdf>
- [9] [online; 24. 4. 2011]. <http://www.vodnisklo.cz/view.php?cisloaktuality=2009120702>
- [10] Melichar T., Khestl F. (2008): Uplatnění alternativních surovin při modifikaci vsázky sklosilikátových obkladových prvků a jejich vliv na vybrané fyzikálně-mechanické vlastnosti výsledných produktů. Juniorstav, 4.2 Nové stavební hmoty. [online; 26. 4. 2011]. Dostupné z : http://www.fce.vutbr.cz/veda/juniorstav2008_sekce/pdf/4_2/Melichar_Tomas_CL.pdf

- [11] Škvára F. (2007): Alkalicky aktivované materiály – geopolymery. Informátor České společnosti pro výzkum a využití jílu č. 37, 1-4.
- [12] Davidovits J. (2008): Geopolymer Chemistry and Applications. St. Quentin, Geopolymer Institute, 2. vyd., 592 stran.
- [13] Davidovits Joseph. 30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Application. Marked Trends and Potencial Breakthroughs, In *30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Application. Market Trends and Potencial Breakthroughs*. Melbourne, Australia : [s.n.], 2002 [online; 26. 4. 2011]. Dostupné z: http://www.geopolymer.org/fichiers_pdf/30YearsGEOP.pdf
- [14] Slivka V., Horná R. (2002): Srovnání kvality tuzemských a zahraničních mramorů, dovážených do České republiky. Uhlí-Rudy-Geologický průzkum, 9, 6, 19-23. Praha.
- [15] René M. (2001): Vývoj dvojslídnych granitů v oblasti mezi Mrákotínem a Řásnou. Geol. výzk. Mor. Slez. v r. 2000, 82-84, Brno.
- [16] Dolníček Z., Zapletal J. Lehotský T. Zimák J. (2008): *Geologické exkurze po Olomoucku*. - Skripta PřF UP, 9, Olomouc.
- [17] Vyhláška MŽP č. 294/2005 Sb. o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu a změně vyhlášky č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady. Sbírka zákonů 2005, částka 105 (2005).
- [18] Davidovits J. (1989): Geopolymers and geopolymeric materials. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 35(2), 429-441.
- [19] Davidovits J. (1988) In: Davidovits J, Orlinski J (eds) *Proceedings of geopolymer '88-First European conference on soft mineralogy*. Universite De Technologie De Compeigne, Compeigne, France, 149 – 166.

- [20] Duxson P., A. Fernández-Jiménez A., Provis J. L., Lukey G. C., Palomo A., van Deventer J. S. J. (2007): Geopolymer technology: the current state of the art. *J Mater Sci* (2007) 42:2917–2933.
- [21] Gluchovsky V.D. (1959): *Gruntovyje silikaty*. Gosstrojizdat, Kiev, 154 stran.
- [22] Fernández-Jiménez A., Palomo A., Criado M. (2005): Microstructure development of alkali-activated fly ash cement: a descriptive model. *Cem. Conc. Res.*, 35, 1204-1209.
- [23] Provis J.L., Duxson P., Van Deventer J.S.J., Lukey G.C. (2005): The role of mathematical modelling and gel chemistry in advancing geopolymer technology. *Chem. Eng. Res. Des.*, 83(7), 853-860.
- [24] *The Pyramid Controversy: an Annotated Bibliography*. PCA Library Bibliography Series no. 30 (LB30), Portland Cement Association, 2007.