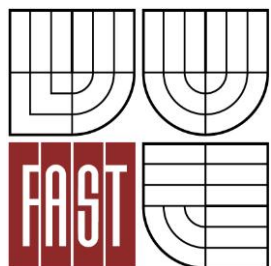




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV CHEMIE

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF CHEMISTRY

UMĚLÝ KÁMEN - METODY PŘÍPRAVY A VLASTNOSTI

ARTIFICIAL STONE- METHODS OF PREPARATION AND PROPERTIES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BARBORA PLUSKALOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. RNDr. PAVEL ROVNANÍK, Ph.D.

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607R020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav chemie

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Barbora Pluskalová
Název	Umělý kámen - metody přípravy a vlastnosti
Vedoucí bakalářské práce	doc. RNDr. Pavel Rovnaník, Ph.D.
Datum zadání bakalářské práce	30. 11. 2012
Datum odevzdání bakalářské práce	24. 5. 2013

V Brně dne 30. 11. 2012

.....
prof. RNDr. Pavla Rovnaníková, CSc.
Vedoucí ústavu

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

1. ŠKVÁRA, F. Alkalicky aktivované materiály – geopolymery. Informátor : Česká společnost pro výzkum a využití jílu. 2007, 37, s. 1 - 4. ISSN 1802-2499.
2. BURIAN, A., et al. Geopolymerní pojivový systém. Slévárenství 2006, 12, s. 468-469. Dostupný také z WWW: <http://www.sandteam.cz/publikace.html>.
3. DAVIDOVITS, J. Geopolymer chemistry and applications. 2nd ed. Saint-Quentin France: Institut Géopolymere, 2008. pp 276-279. ISBN 2-9514820-1-9.
4. KOTLÍK, P. Umělý kámen. Zpravodaj STOP 12(1), 2012.
5. PECCHIONI, E., et al. Artificial stones utilised in Florence historical palaces between the XIX and XX centuries. Journal of Cultural Heritage 2005, 6, s. 227–233.

Zásady pro vypracování

Proveďte literární rešerši metod a materiálů, jež jsou využívány při výrobě náhrad přírodního kamene. Při zpracování tématu se zaměřte především na mechanické vlastnosti a trvanlivost těchto materiálů.

Ověřte možnost přípravy umělého pískovce v využitím geopolymerního pojiva na bázi metakaolinu. Na základě mechanických a estetických vlastností zjistěte nejvhodnější poměr pojiva a plniva a zvolenou směs aplikujte při výrobě určeného dekorativního prvku.

Pro vypracování bakalářské práce použijte zadanou literaturu, doplňte ji o vlastní a u každé převzaté informace uveďte odkaz na použitou literaturu.

Rozsah práce 30 až 40 stran.

Předepsané přílohy

.....

doc. RNDr. Pavel Rovnaník, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá způsoby přípravy umělého kamene. Dokument prezentuje souhrn materiálů a metod vhodných pro přípravu a poukazuje na mechanické vlastnosti, včetně trvanlivosti tohoto materiálu, který má sloužit jako alternativa přírodního kamene.

Práce se dále zabývá studiem pojivových systémů na bázi geopolymérů pro přípravu umělého kamene. S tímto bodem zadání je spojena i experimentální část dokumentu, ve které si autor práce klade za cíl zvolit vhodný poměr mísení pojiva a plniva ve směsi umělého kamene s geopolymerním pojivem na bázi metakaolinu. Z výsledků mechanických zkoušek a dle estetického dojmu bylo vybráno nejvhodnější složení a následně vytvořen dekorativní prvek.

Klíčová slova

Umělý kámen, geopolymery, pískovec, mechanické vlastnosti, mikrostruktura

Abstract

The aim of the thesis “Artificial stone – Methods of preparation and it’s properties“ deals with the various methods and issues concerning the preparation of artificial stone. The thesis presents the summary of materials and various methods suitable for the preparation and points out mechanical properties, including durability of material, which serves as an alternative to natural stone.

Further on, the thesis deals with the studies of binding systems based on geopolymers, which are used for the artificial stone preparation. This part of the thesis is associated with the experimental part, which is aimed at choosing the suitable mixing ratio of binder to aggregate in the artificial stone based on metakaolin geopolymer. According to the results of mechanical tests and aesthetic impression the author chose the best composition and then created a decorative element.

Keywords

Artificial stone, geopolymer, sandstone, mechanical properties, microstructure

...

PLUSKALOVÁ, Barbora. *Umělý kámen - metody přípravy a vlastnosti*. Brno, 2013. 48 s.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav chemie. Vedoucí
práce doc. RNDr. Pavel Rovnaník, Ph.D.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 20. 5. 2013

.....

podpis autora

Barbora Pluskalová

Poděkování:

Ráda bych touto cestou vyjádřila poděkování doc. RNDr. Pavlu Rovnaníkovi, Ph.D. za jeho cenné rady, trpělivost při vedení mé bakalářské práce, za vstřícnost a pomoc při získávání potřebných informací a podkladů.

OBSAH

I. ÚVOD	10
II. TEORETICKÁ ČÁST.....	11
1. Umělý kámen.....	11
1.1. Základní suroviny.....	11
1.1.1. Plniva	11
1.1.2. Pojiva	14
1.1.2.1. Anorganická pojiva	14
1.1.2.2. Organická pojiva	16
1.1.3. Aditiva	18
1.2. Způsoby přípravy umělého kamene	20
1.2.1. Umělý kámen s epoxidovým pojivem	20
1.2.2. Umělý kámen na minerálním základě	22
1.2.3. Armování	22
1.3. Využití umělého kamene.....	22
1.3.1. Umělý kámen pro stavební účely.....	23
1.3.2. Výroba sanitárních zařízení	23
1.3.3. Kamenosochařská výroba a restaurátorství	24
2. Geopolymery	25
2.1. Historický vývoj geopolimerů.....	25
2.2. Struktura geopolimeru.....	26
2.3. Příprava geopolimerů	28
2.3.1. Alkalické aktivátory.....	28
2.3.2. Materiály vhodné pro alkalickou aktivaci	29
2.4. Vlastnosti a trvanlivost geopolymerních materiálů.....	29
2.4.1. Odolnost proti zvýšeným teplotám	30
2.4.2. Chemická odolnost	31

2.4.3. Mrazuvzdornost	31
2.5. Využití geopolymérů.....	31
3. Přírodní pískovec.....	32
3.1. Vybrané druhy pískovců používané v České republice	33
III. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	35
1. Použité suroviny	35
2. Složení směsí	35
3. Příprava zkušebních vzorků.....	35
4. Použité zkušební metody	36
4.1. Zkouška pevnosti v tahu za ohybu	36
4.2. Zkouška pevnosti v tlaku.....	37
IV. VÝSLEDKY A DISKUZE	38
1. Výsledné pevnosti připravených kompozitů	38
2. Analýza elektronovým mikroskopem.....	40
3. Snímkování optickým stereoskopem.....	41
4. Porozimetrická analýza.....	42
5. Tvorba sochařské faksimile	43
V. ZÁVĚR.....	45
VI. SEZNAM LITERÁRNÍCH ZDROJŮ	46

I. ÚVOD

Použití umělého kamene jak pro stavební, tak i kamenosochařské účely má dlouhodobou tradici a spektrum jeho využití je velmi široké. Dle teorie francouzského chemika, profesora Davidovitse, byl umělý kámen využíván již ve starověkém Egyptě pro stavbu pyramid a v průběhu historie se setkáváme s mnoha dalšími aplikacemi tohoto materiálu, který byl zcela běžným [1]. Příkladem mohou být sochy z období gotiky obsahující jako pojivo sádro popřípadě v baroku hojně využívaný umělý mramor, vhodný k obkládání prvků. Od poloviny 19. století se začíná umělý kámen uplatňovat i v restaurátorské praxi a neméně důležité je i jeho zastoupení v moderním stavebním průmyslu a architektuře, kde je kromě funkčnosti materiálu brán v potaz i jeho estetický dojem.

Designovým požadavkům umělý kámen plně vyhovuje a s nadsázkou lze říci, že se jedná o materiál na míru, jelikož jeho vzhled je plně závislý na použitých surovinách a způsobu přípravy. S výhodami lze umělý kámen použít všude, kde bychom běžně použili kamene přírodního. S moderními materiály a technologickými postupy je dokonce mnohdy možné dosáhnout lepších mechanicko-fyzikálních vlastností a příjemnější ceny oproti přírodním materiálům, nemluvě o snazších podmínkách během zpracování (absence procesu těžby a zpracování kamene).

Sortiment trhu je bohatý, ale ne ke všem výrobkům z umělého kamene lze přistupovat stejným způsobem. Je rozdíl, mluvíme-li o výrobcích pro klasický stavební průmysl, či kamenosochařských výrobcích nebo hmotách připravených pro účely opravy památek. Mnoho výrobků z umělého kamene lze klasifikovat jako výrobky z betonu, jelikož jsou připravovány obdobnou technologií. Od 2. poloviny 20. století se začal značně rozvíjet průmysl syntetických polymerů a s ním i využívání těchto hmot právě pro přípravu umělého kamene. V poslední době jsou velmi diskutovaným materiálem pojiva na bázi alkalicky aktivovaných látek. Tato pojiva jsou vhodnou surovinou pro řadu materiálů včetně umělého kamene. Zde si získávají oblibu zejména u restaurátorů a památkářů, vzhledem k mnoha možnostem modifikace vzhledu a vlastností [2, 3].

II. TEORETICKÁ ČÁST

1. Umělý kámen

V České republice je od roku 2005 platná norma ČSN EN 14 618 Umělý kámen – terminologie a klasifikace. Výrobky z umělého kamene definuje jako průmyslově vyráběné zejména z cementového pojiva, pryskyřic nebo jiných směsí, kamene a dalších přísad, vyráběných průmyslově v geometrických tvarech na stabilních zařízeních pomocí lisování [4].

Norma již nezahrnuje výrobky pro architektonické použití či sochařství, u kterých vedle mechanicko-fyzikálních vlastností je dbáno také na jejich estetickou stránku. Vedle této normy existuje ještě norma ČSN EN 14617 Umělý kámen – zkušební metody, popisující postupy jednotlivých zkoušek mechanicko-fyzikálních vlastností [2].

1.1. Základní suroviny

Umělý kámen, stejně tak jako řada dalších materiálů užívaných ve stavebnictví se řadí mezi materiály kompozitní. Mezi jeho základní složky patří plnivo částečně určující výsledný vzhled umělého kamene, dále pak pojivo, které umožňuje spojení jednotlivých zrn plniva a tím se podílí na výsledné pevnosti. Dalšími přídavnými složkami mohou být barviva či jiné látky, díky kterým získává umělý kámen žádaný vzhled, popřípadě látky upravující vlastnosti směsi. Sem řadíme například plastifikátory, které zlepšují zpracovatelnost [2, 3].

1.1.1. Plniva

Druh plniva závisí zejména na požadovaném vzhledu výsledného produktu. Tradičně se používají drcené, popřípadě mleté přírodní horniny. Dalším možným plnivem může být čistý křemičitý písek nebo průmyslově mletý vápenec. Dříve převažovalo používání přírodního materiálů, které si kameníci pro své potřeby upravovali sami. Vzhledem k mnoha problémům spojených s přípravou přírodních hornin, například drcení či mletí surovin, u kterých bylo nutné dosahovat vysokého stupně jemnosti, se v poslední době přechází spíše k surovinám, jako je přírodní praný sklářský písek, popřípadě průmyslově mletý vápenec. Při výběru plniva se přihlíží převážně k tomu, jak má vypadat výsledný produkt a jaké má mít vlastnosti [2, 3].

Nejnovějším trendem je využívání alternativních plniv vyráběných průmyslově. Ve výrobě umělých kamenů, zejména pro použití v restaurátorství, je výhodné míchání směsí s plnivem skládajícím se z dutých kuliček mikroskopických rozměrů. Jedná se duté sférické útvary ze skla, keramiky nebo polymerních látek. Praktické je použití tam, kde ze statického nebo estetického důvodu nelze použít běžných plniv. V českém jazyce se pro tyto tvary pomalu vžívá název „mikrokuličky“. Na trhu jsou tyto výrobky známy pod mnoha názvy, povětšinou chráněných ochrannou známkou. Název těchto výrobků pak přímo vystihuje jejich materiálové vlastnosti, příkladem mohou být: microballoons, extendospheres nebo spheriglass apod. Hlavním důvodem jejich použití je nízká objemová hmotnost pohybující se v rozmezí od 0,1 do 0,7 g/cm³ při velikosti částic 5 až 350 μm. První aplikací alternativního plniva na památkovém objektu v České republice byla rekonstrukce Kohlovy kašny na 2. nádvoří Pražského hradu a také aplikace na kopii sousoší Madony se sv. Dominikem a T. Akvinským na Karlově mostě (obr. 1). Směs byla použita v prvním případě pro plastickou retuš a v druhém pro vytvoření faksimile ruky [5].



Obrázek 1 Kohlova kašna a sousoší Madony se sv. Dominikem a T. Akvinským [6]

Kromě výběru druhu použitého kameniva je třeba věnovat velkou pozornost i jeho zrnitosti a tvaru zrn. Granulometrie ovlivňuje nejen výsledný vzhled umělého kamene, ale také množství potřebného pojiva. Od množství pojiva se odvíjí fyzikálně-mechanické vlastnosti výsledného produktu i jeho finanční nákladnost, jelikož pojivo bývá zpravidla nejdražší

složkou směsi. Pokud je použito příliš jemné kamenivo, je třeba velké množství pojiva na obalení a spojení jednotlivých zrn, kvůli jejich velkému měrnému povrchu. Naopak při užití pouze jedné frakce větších zrn, je třeba velké množství pojiva na vyplnění dutin mezi zrny plniva. Ideální je použití plniva se širší distribucí zrn, menší zrna vyplní prostor mezi většími, což snižuje nutné množství pojiva a také příznivě ovlivňuje mechanické vlastnosti výsledného umělého kamene. Se snížením množství pojiva je příznivě ovlivněna pórovitost, nasákavost, propustnost pro plyny a v neposlední řadě také cena výsledného produktu.

Studium problematiky ideálního zaplnění prostoru zrny kameniva je úzce spojeno s vývojem technologie betonu, která se začala rozvíjet na počátku 20. století. Stejně tak, jako v technologii betonu, je i ve vytváření umělého kamene s výhodou využíváno ideálních křivek zrnitosti. Nejznámějším řešením je Fullerova křivka zrnitosti, kdy aplikací jednoduché rovnice lze vypočítat hmotnostní poměr jednotlivých frakcí plniva a přiblížit se tak ideálnímu modelu, kdy je prostor zcela vyplněn zrny kameniva. Tento proces vede k ekonomičtějšímu využití pojiva [7, 8].

Fullerova rovnice:

$$y = \left(d/D\right)^n \times 100 \%,$$

kde y (% hm.) je podíl frakce o průměru d , D je průměr největšího zrna a n je exponentem, dle Fullera $n = 0,5$ [8].

Jestliže granulometrii skládáme dle ideálních křivek zrnitosti, může nastat situace, že výsledný vzhled umělého kamene nebude působit přirozeně. V restaurátorské praxi je problémem také to, že mechanické vlastnosti takto vytvořeného kamene nebudou odpovídat materiálu, který je doplňován, a tedy že v průběhu stárnutí objektu bude patrný rozdíl mezi původním a doplněným materiálem. Sortiment materiálu sloužícího jako plnivo nám také ne vždy dovolí tyto ideální křivky zrnitosti využít [7, 8].

1.1.2. Pojiva

V zásadě můžeme umělý kámen rozdělit do dvou skupin z hlediska použitého pojiva. Tedy na umělé kameny pojené pomocí anorganických minerálních pojiv a na umělé kameny s organickým pojivem, kam řadíme různé typy pryskyřic [2, 3].

1.1.2.1. Anorganická pojiva

Mezi anorganická pojiva pro výrobu umělého kamene patří hydraulická pojiva jako je cement či hydraulické vápno, pro použití v interiéru se často využívá i sádra.

Podmínkou použití anorganických pojiv je rozmíchání těchto materiálů s vodou. Voda je v systému nutná pro hydrataci těchto pojiv a pro zpracovatelnost tvárné směsi. Mísení s vodou může být u anorganických pojiv považováno za výhodu (oproti pojivům organickým), jelikož se takto snáze dosahuje požadované konzistence. Výhodou oproti organickým pojivům může být také relativně dobrá zpracovatelnost i při teplotách blízcích se 0 °C. Nezanedbatelným faktorem je i levnější cena těchto pojiv. Ve srovnání s organickými pojivy lze za určitých podmínek snáze dosahovat vzhledu blízcího se přírodnímu kameni.

Naopak nevýhodou anorganických pojiv je jejich horší přídržnost neboli adheze pojeného materiálu k podkladu. Tato nevýhoda je citelná hlavně v restaurátorské praxi, kde je nutno brát tento faktor v potaz. Další nevýhodou je nutnost ošetřování umělého kamene na cementové bázi, během tuhnutí a následného tvrdnutí hmoty. U hydraulických pojiv je třeba zajistit dostatečný přísun vlhkosti k tvrdnoucí hmotě, jelikož hrozí její předčasné vyschnutí. Vyschnutí směsi by pak mohlo mít za následek nedokonalou hydrataci pojiva, která by mohla vést k poklesu výsledných pevností, také by mohlo docházet k nežádoucím hydratačním objemovým změnám vedoucím až k vytvoření trhlinek. Jako další nevýhodu oproti organickým pojivům je nutno zmínit delší dobu potřebnou pro náběh požadovaných pevností, tato doba se udává až v rámci několika týdnů. Neméně důležitou vlastností je také menší odolnost těchto pojiv proti kyselému či jinak chemicky agresivnímu prostředí [2, 3, 8].

Nejčastěji používaným anorganickým pojivem pro umělý kámen je bílý cement. Vyznačuje se nízkým podílem barvicích oxidů jako je $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 0,15 \%$ a $\text{MnO} < 0,15 \%$. Pro výrobu bílého portlandského cementu se vybírají pouze čistě bílé vápence s minimálním obsahem sloučenin železa, obvyklý podíl těchto sloučenin se pohybuje v rozmezí 0,2-0,5 %, maximum je 1,0 %.

Hydrauličnost těchto cementů se zajišťuje jemně rozptýleným oxidem křemičitým nebo přídavkem kaolinu. Výsledný cement téměř postrádá kalciumferoalumináty ($< 1,4 \%$). Pro udržení bílé barvy cementu se z výrobního procesu zcela vylučují kovové součásti, výpal surovinové moučky probíhá za vyšších teplot než je tomu u běžného cementu ($1600\text{ }^{\circ}\text{C}$), popřípadě s přídavkem intenzifikátoru (CaF_2). Chlazení bílého cementu probíhá v redukční atmosféře. Barva bílého cementu se může ještě dále zušlechťovat pomocí vápencové moučky, popřípadě přídavkem jiné bělicí přísady. Takto se získávají směsné bílé cementy. Nevýhodou může být větší obsah minerálu trikalciumaluminátu, díky čemuž se bílé cementy vyznačují velkým vývinem hydratačního tepla a menší odolností proti agresivnímu prostředí. Na bílé portlandské cementy jsou kladeny stejné požadavky jako na běžné portlandské cementy příslušných tříd [8].

Také sádro lze zařadit mezi anorganická pojiva pro přípravu umělého kamene. Jedná se o vzdušné pojivo vyráběné dehydratací sádrovce, které je vhodné zejména pro vnitřní aplikace vzhledem k její vysoké rozpustnosti při styku s vlhkostí. Umělý kámen pojený sádrou je také velmi náchylný k mechanickému poškození [2, 8].

Sádrové pojivo je spjato zejména s výrobou umělého mramoru, který je v architektuře znám pod pojmem „stucco lustro“. V podstatě se jedná o sádrovou omítku, která má imitovat přírodní těžný mramor. Oproti přírodnímu mramoru má výhodu v lepší zpracovatelnosti, je možné vytvářet povrchy beze spár a ve velké barevné škále, neposlední výhodou je také cena tohoto materiálu. Hmotu pro vytváření se míchá ze sádry, pigmentů a klišové vody, která má zaručit delší zpracovatelnost směsi (12 až 24 hodin). Tato hmota, jinak nazývaná těsto, se zpracovává na válech, prokládá se a sjednocuje řidší sádrovou kaší. Z takto připravené hmoty se následně řezou pásy, kterými je obkládán základní materiál. Po zatvrdnutí se několikrát po sobě tmelí a brousí a následně leští. Největšího rozkvětu tato technika dostala v období baroka, avšak používá se i v dnešní době. Po vyschnutí se umělý mramor napouští lněným olejem ředěným terpentýnem a následně vyleští včelím voskem [8, 9]. Možnosti použití jsou znázorněny na obrázku 2.

Pod pojmem umělý mramor je však dnes znám spíše mramor litý, který s původní sádrovou technikou nemá žádné společné technologické postupy a je využíván pro vytváření hygienických zařízení.



Obrázek 2 *Stucco Lusto – rekonstrukce České spořitelny v Liberci [10]*

Další významným pojivem pro vytváření umělého kamene je vzdušné vápno. Použití vzdušného vápna je limitováno potřebou pronikání oxidu uhličitého do struktury hmoty umělého kamene. Při nedostatečné difúzi tohoto plynu bude docházet ke karbonaci hydroxidu vápenatého pouze velmi pozvolně. Tento jev má poté za následek pomalé tvrdnutí materiálu, zvláště při větších objemech.

Z historického hlediska je velmi významným pojivem vápno hydraulické, v dnešní době částečně opomíjené. Jedná se o vápno obsahující hydraulické oxidy (SiO_2 , Al_2O_3 a Fe_2O_3), které se po smíchání s vodou do jisté míry chová jako portlandský cement. Během tuhnutí a tvrdnutí se nejprve uplatňuje proces hydratace, takto se vytvoří zatvrdlá struktura, ve které při nadbytku $\text{Ca}(\text{OH})_2$ může probíhat proces karbonace [2, 3, 8].

1.1.2.2. Organická pojiva

V dnešní době je nejvíce používaným organickým pojivem pro umělý kámen epoxidová pryskyřice. První masivnější používání těchto pojiv je spojeno s rozvojem syntetických polymerů v 60. letech 20. století. V tehdejší době byla organická pojiva používána pro zaplňování trhlin v památkové péči či v architektonické praxi, a kromě toho byly

využívány i pro lepení nejrůznějších materiálů včetně kovů nebo keramiky. Ve stavebním průmyslu se organická pojiva používala k injektážím nebo k zaplňování trhlin. Přibližně ve stejné době se u nás i v zahraničí začaly objevovat první faksimile kamenosochařských děl, kde bylo jakožto pojiva použito právě epoxidové pryskyřice. Výdusky zhotovené ze směsi pryskyřice a drceného kamene či písku byly často vystavovány v exteriéru namísto originálních sochařských děl, která byla uschována do lapidárií nebo galerií.

S postupným rozvojem organických pojiv a také díky nadšení z moderních syntetických materiálů, začaly tyto hmoty vytlačovat věkem odzkoušená anorganická pojiva a byly hojně využívány v kamenosochařském průmyslu i v restaurátorství jako pojiva celého systému. Těchto pojiv se využívalo i ze zcela objektivních důvodů. Některé typy hornin totiž nebylo možno kvalitně imitovat za použití tehdy standardních anorganických pojiv, docházelo u nich ke krystalizaci solí na povrchu kamene a tudíž ke změně jeho barevnosti, zvláště u světlejších odstínů. Současným trendem ve výrobě umělého kamene je opětovný návrat k anorganickým pojivům [7].

Výhodou epoxidových pryskyřic je jejich vysoká odolnost vůči kyselému prostředí a také krátká doba nutná pro jejich zpevnění. Konečných pevností dosahují tato pojiva během 24 hodin. Neméně důležitou vlastností především v restaurátorství je pak velice dobrá přidržnost k podkladovému materiálu.

K nevýhodám organických pojiv patří jejich horší zpracovatelnost a pomalejší vytvrzovací pochody při teplotách pohybujících se pod 15 °C. Ke zpomalení nebo úplnému zatavení tvrdnutí dochází také při styku s vlhkostí. V praxi tato vlastnost znamená používání uměle vysoušeného plniva a při restaurování soch nebo architektonických objektů také dokonalé vysušení podkladního lůžka. V případě, že jsou povrchy z takto pojeného umělého kamene vystaveny UV záření, existuje možnost jejich zabarvení (zažloutnutí).

Kromě epoxidové pryskyřice se jako organické pojivo používají i polyesterové pryskyřice, které však hlavně díky horší zpracovatelnosti a nepříjemnému zápachu nalézají uplatnění hlavně v průmyslové výrobě, kde se například zpracovává odpadní dřev na tzv. konglomerovanou směs pro výrobu dlažebních nebo obkladových desek [2, 3, 8].

Dalšími typy organických pojiv mohou být další typy polymerů, například kapalně kaučuky nebo akrylátový kopolymer. Z historických pojiv je možno uvést směs tvarohu a hydroxidu vápenatého, tvořící dohromady tzv. kaseinát vápenatý. Tato hmota byla používána hlavně na

vytváření malých doplňků nebo k lepení. Z dřívějších poživ se můžeme ještě setkat s umělým kamenem vytvořeným z přírodní pryskyřice získané z jehličnatých stromů [2, 3].

1.1.3. Aditiva

Aditiva jsou takové látky, které jsou záměrně přidávány během přípravy výrobku pro zlepšení nebo ovlivnění některých vlastností jak tvárné směsi, tak i konečného výrobku. U výrobku z umělého kamene se nejčastěji přidávají látky ovlivňující zpracovatelnost směsi nebo látky ovlivňující výsledný vzhled či mechanické vlastnosti výrobku [2].

Pigmenty jsou do směsi umělého kamene přidávány pro úpravu barevnosti připravované směsi. Vzhledem k alkalickému prostředí anorganických i organických poživ, je třeba vybírat barviva schopná zachovat si v takovémto prostředí svoji stálou barevnost.

Z přírodních barviv se osvědčili zejména okry, získávané úpravou barevných hlín zcela bez přídavku syntetických látek. Obecně, ale platí, že pro svoji stálost jsou výhodnější uměle vyráběné anorganické pigmenty na bázi oxidů kovů. Pro dosažení žlutých, červených nebo hnědých odstínů se do směsi přimíchávají oxidy železa. Pro získání zelené barvy je používán oxid chromitý. Pomocí dalších barvicích oxidů je možné dosáhnout mnoha barevných odstínů. Podmínkou je pouze jejich barevná stálost, zdravotní nezávadnost, minimální vliv na výsledné mechanické vlastnosti a jejich dobrá mísitelnost.

Barevné pigmenty je možné do směsi přimíchávat dvojím způsobem. V případě, že přidáváme pigment přímo do suché směsi, je ve výsledku dosaženo homogenní barevnosti celého výrobku. Druhou možností je přidání barevného pigmentu rozmíseného v roztok až při míchání tvárné směsi. Takto je dosaženo barevné nehomogenity, která může v některých případech působit přirozeněji [2, 3].

Dávka barevných pigmentů ve směsi se pohybuje do 0,5 % celkové hmotnosti směsi, jelikož z laboratorních testů bylo prokázáno, že při dokonalém rozptýlení se vyšší dávky nijak neprojeví na sytosti výsledného barevného odstínu [11].

Problémem u probarvovaného umělého kamene může být změna jeho barevnosti v čase. Zvláště u výrobků na bázi hydraulického pojiva je toto často přičítáno nestálosti barevného pigmentu v alkalickém prostředí. Pravým důvodem však může být vznik výkvětotočivných solí na povrchu výrobku, které díky svojí světlé barvě ovlivní barevnost celého výrobku.

U kamenosochařských výrobků může nastat ještě situace, kdy je povrch výrobku dodatečně upravován, tzv. přesekáván. Při použití bílého křemičitého písku jsou tato zrna porušena a jejich světlá barva opět ovlivní celkový barevný vzhled výrobku [3].

Výroba ze směsí na bázi organických pojiv bývá někdy doprovázena problémy s malou plasticitou, tedy že si tyto směsi nedokážou podržet svůj tvar – mají nízkou viskozitu. Z tohoto důvodu je do směsi přidáván plastifikátor, avšak opačného působení než u pojiv na cementové bázi, kde se plastifikační přísada přidává právě pro snížení viskozity. Pro zvýšení plasticity jsou do směsi záměrně přidávány jemné podíly jako například částice oxidu křemičitého či mastku a podobně. Množství takovýchto plastifikačních přísad se pohybuje v rozmezí do 3 % hmotnosti směsi. Kromě ovlivnění plasticity směsi tyto látky také částečně ovlivňují výsledný vzhled umělého kamene, jelikož působí, jako tzv. matovadla. Díky této funkci snižují riziko vzniku nepřírodných lesklých ploch na povrchu větších oblých zrn plniva [2, 8].

Jak už bylo zmíněno, do směsí pojených anorganickými pojivy, tím se rozumí zejména cementem, je přidáván plastifikátor pro lepší tvárnost směsi při nižším vodním součiniteli. Tímto je možno ovlivnit jednak zpracovatelnost čerstvé směsi a také výsledné fyzikálně-mechanické vlastnosti výsledného produktu. Zpravidla však není použití plastifikátorů u těchto směsí nutností [12].

Výsledný vzhled umělého kamene, tak aby se co nejvíce přiblížil vzhledem kameni přírodnímu, je možno upravovat dalšími pomocnými aditivy. Mezi tyto materiály patří například drcená slída, drcené skořápky živočichů a jiné [2].

Důležitým aditivem používaným hlavně v posledních letech jsou polymerní disperze nebo redispergovatelné polymerní prášky, jinak označované jako suché disperze. Používá se jich hlavně u směsí pojených hydraulickými pojivy, jelikož přidavek těchto látek zvyšuje adhezi k původnímu materiálu. Tato vlastnost je důležitá zejména při použití umělého kamene v kamenosochařství, a také při jeho použití jako obkladového materiálu. Tyto látky rovněž příznivě ovlivňují mechanické vlastnosti produktu a podporují správné tvrdnutí díky retenci vody. Tím zamezí nadměrnému odpařování, a tak podporují dokonalejší hydrataci a zabraňují výraznějšímu vzniku smršťovacích trhlin.

Jako aditiva označujeme i tzv. spojovací látky zvyšující adhezi epoxidové pryskyřice k anorganickému plnivu. Příkladem, jak tyto látky fungují, může být 3-aminopropyl-

triethoxysilan, který se jednou částí molekuly váže na povrch křemenných zrn a druhou částí do polymerní sítě epoxidové pryskyřice. Jestliže je v takovéto látce smáčen povrch zrn plniva, dojde ke zvýšení konečné pevnosti v tlaku. Uvádí se, že pevnost může oproti referenční směsi vzrůst až o 50 %. Množství těchto aditiv se uvádí v hmotnostním množství vztaženém k obsahu pryskyřice, optimální dávka se pohybuje okolo 3 % [2,3].

1.2. Způsoby přípravy umělého kamene

Způsob přípravy umělého se volí v závislosti na výsledném produktu a také s ohledem na vlastnosti pojivových materiálů. Samozřejmě jsou také odlišné postupy výroby prvků pro použití ve stavebnictví, v kamenosochařské výrobě nebo v restaurátorství [2].

1.2.1. Umělý kámen s epoxidovým pojivem

Při přípravě umělého kamene pojeného epoxidovou pryskyřicí je prvním krokem připravení suché směsi, tedy správné určení granulometrického složení v závislosti na požadovaném produktu. Dále se do směsi v případě potřeby, přidává plastifikátor, tedy jemné podíly například oxidu křemičitého pro zvýšení plasticity směsi. V případě, že umělý kámen probarvujeme, přidávají se do směsi také sytké pigmenty. V tomto kroku je nutno brát v potaz, že barevnost se v průběhu mísení a zrání směsi může měnit. V restaurátorské praxi se tento problém řeší konečnou barevnou úpravou po dokonalém vytvrzení směsi.

Příprava tvárné směsi spočívá ve smíchání suché směsi společně s odměřeným množstvím epoxidové pryskyřice a tvrdidla a tato směs se následně homogenizuje. Zpracovatelnost takto připravené směsi se pohybuje od 0,5 do 2 hodin v závislosti na okolní teplotě.

Tvárná směs se v několika vrstvách dusá do forem. Formy mohou být zhotoveny ze sádry, kovu, dřeva nebo kaučuku. Před naplněním se formy opatřují vhodným separačním prostředkem. Takto připravený umělý kámen je možné vyztužovat pomocí armatur, jako jsou ocelové dráty nebo pletivo. Tyto materiály je nutno před uložením do formy opatřit nátěrem z epoxidové pryskyřice, aby dobře přilnuly k pojivovému systému [13].

V případě potřeby je možné takto připravený umělý kámen dodatečně zpevňovat koncentrovanějším roztokem epoxidové pryskyřice. Výrobek je taktéž možno dodatečně barvit pomocí pigmentů rozptýlených v etanolu [7].

Výsledné mechanické vlastnosti umělého kamene pojeného epoxidovou pryskyřicí jsou závislé zejména na poměru pojiva a plniva, obvyklý poměr se pohybuje okolo 1:10. V případě dobrého zhutnění je možné tento poměr zvýšit na 1:12 až 1:15. Pokud směs nelze například kvůli tvaru formy dostatečně zhutnit (udusat), je naopak nutné množství pojiva zvýšit na 12 %, někdy až 15 % hmotnosti suché směsi [3].

Na kvalitě výsledného produktu se podílí i vlhkost plniva přidávaného do směsi. Nízké rovnovážné vlhkosti je možné zanedbávat, avšak obecně se doporučuje plnivo před mísením s organickými pojivy vysoušet [13].

Jedním z mnoha sochařských děl, u nichž byla vytvořena kopie z umělého kamene pojeného epoxidovou pryskyřicí, je i socha poustevníka od Matyáše Bernarda Brauna (obr. 3). Originál vznikl v roce 1726 a je součástí komplexu soch a reliéfů, dnes nazývaného Betlém, nedaleko Kuksu ve východních Čechách. V průběhu své existence prošla socha řadou restaurátorských zákroků a před přibližně 25 lety byla vytvořena i kopie této sochy. Ze sochy byla nejprve sejmuta klínová sádrová forma, částečně doplněna díly ze silikonového kaučuku. Nejprve byla vytvořena kopie z betonu a následně ve stejné formě vznikl i výdusek ze směsi písku a epoxidové pryskyřice [14].



Obrázek 3 *Kopie Braunovy sochy poustevníka [14]*

1.2.2. Umělý kámen na minerálním základě

Příprava umělého kamene na bázi minerální směsi je obdobná jako příprava umělého kamene s epoxidovou pryskyřicí. Rozdílem je míchání suché směsi společně s pojivovým materiálem a následné smíchání s vodou a případnými aditivami. Tvarování těchto směsí probíhá v závislosti na konzistenci. Nejčastěji je tato směs nalévána do forem a následně hutněna. Zpracovatelnost takovýchto směsí je závislá především na zvoleném pojivu a tato doba se dá prodloužit nebo zkrátit pomocí aditiv (retardéry nebo urychlovače tuhnutí a tvrdnutí) [15].

Optimální poměr mísení cementového pojiva s pískem se pohybuje okolo 1:4 (pojivo:plnivo), jelikož za těchto podmínek je dosahováno optimálních vlastností a vzhledu. U anorganických pojiv je třeba brát zřetel i na množství záměsové vody, které se také významně podílí na výsledných vlastnostech. Ideální množství se pohybuje do 10 % hmotnosti [12].

1.2.3. Armování

Armování se provádí zejména v kamenosochařském průmyslu popřípadě při restaurování sochařských děl, při přípravě větších objemů nebo naopak tenkých profilů. Požadavkem na armovací materiál je odolnost proti alkalickému prostředí a také teplotní roztažnost blízká teplotní roztažnosti tmelu. Samozřejmostí je také dostatečná pevnost.

Obecně nejvíce používaným materiálem je ocel, ale nevýhodou je její sklon ke korozi, zvláště pak v kyselém prostředí. Dalším vhodným materiálem jsou barevné kovy jakožto mosaz nebo měď, avšak i u těchto materiálů dochází ke korozi. Produkty koroze mědi mohou být navíc vyplavovány na povrch umělého kamene, kde mohou vytvářet nežádoucí skvrny [3].

1.3. Využití umělého kamene

Spektrum využití umělého kamene je velice široké. Obecně se dá říci, že je možné jej využít všude, kde se běžně používá kámen přírodního. Své využití si našel jak v kamenosochařském průmyslu a v restaurátorství, tak i ve stavebnictví, kde se využívá pro řadu aplikací v exteriéru i interiéru. Jeho výhodou je bezesporu nižší cena výrobků, výhodnější zpracovatelské podmínky a v dnešní době také vysoce ceněná vlastnost – design „na míru“.

1.3.1. Umělý kámen pro stavební účely

Ve stavebnictví je možné použít umělý kámen všude tam, kde se běžně užívá kamene přírodního. Je možné vytvářet obklady vhodné pro venkovní i vnitřní použití či dlažbu. Vyráběny jsou i tvarovky pro samotnou výstavbu (obr. 4). U těchto výrobků převažuje využívání anorganických pojiv, zvláště pak cementu, proto je značná část těchto výrobků klasifikována jako výrobek z betonu. Směs plniva, pojiva a aditiv, jako jsou pigmenty a jiné, se nalije do měkkých forem, které vytváří autentický povrch kamene. Po vytvrzení vzniká prvek, který se v případě potřeby dále barevně ladí. Dobře zvládnutá technologie výroby v dnešní době téměř znemožňuje rozeznat umělý kámen od jeho přírodního protějšku a každá výrobní společnost si úzkostlivě chrání své znalosti ve vytváření [2, 16].



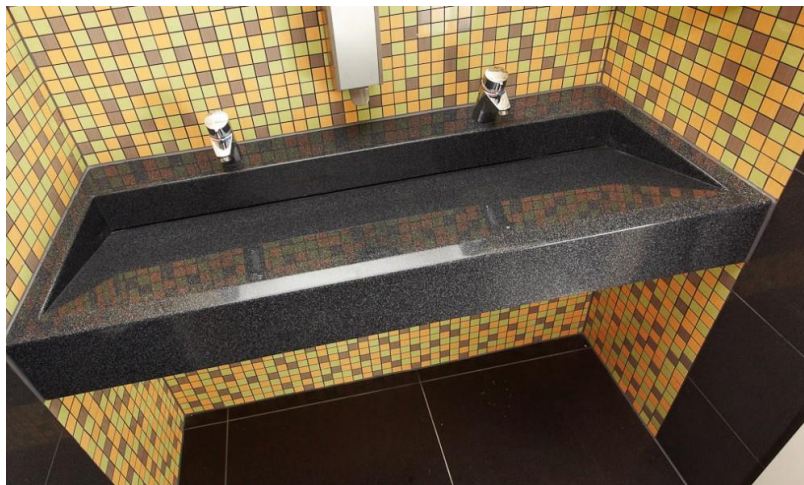
Obrázek 4 Ukázka venkovních obkladů vytvořených z umělého kamene – břidlice [17]

1.3.2. Výroba sanitárních zařízení

Výroba moderního sanitárního zařízení z umělého kamene je spojena s technikou tzv. litého mramoru. Jedná se o směs minerálních plniv (mikromleté vápence, sklářské písky) a polyesterové pryskyřice jakožto pojiva a pigmentů. Připravená směs se odlévá do kovových popřípadě laminátových forem. V porovnání s keramickým materiálem, lze vyrobít i mnohem složitější tvary s dokonalejším povrchem. Povrchy výrobků z litého mramoru se dále opatřují ochrannou vrstvou z polyesterových pryskyřic, která zabraňuje jejich poškození.

V porovnání s přírodním těženým mramorem je umělý mramor odolnější proti mechanickému a chemickému poškození, dobře odolává většině kyselin a látek zásadité povahy i při větších koncentracích. Materiál vyniká i svými tepelně izolačními vlastnostmi. Tato vlastnost je

výhodná například při výrobě van nebo sprchových koutů, kdy voda v takových výrobcích chladne značně pomaleji [18, 19]. Jedna z možných podob litého mramoru je zachycena na obrázku 5.



Obrázek 5 Umyvadlo z litého mramoru [20]

1.3.3. Kamenosochařská výroba a restaurátorství

Přibližně od poloviny 19. století se rozvíjí tendence požívat umělý kámen k restaurátorským účelům. V dnešní době při restaurování sochařského díla plní umělý kámen jednak funkci estetickou a výtvarnou, kdy doplňuje jednotlivé části, ale v některých případech plní také funkci ochranou. Ochranná funkce umělého kamene při použití v restaurátorství spočívá v zatmelení určitých partií sochařské památky, u které by jinak bez takového opatření docházelo k další postupné degradaci.

V případě, že je umělého kamene použito pro doplnění sochařského díla, je nutné dodržovat zásady minimálního zásahu do původního díla. Další podmínkou je, že umělý kámen by měl být použit pouze na doplnění hmoty a neměl by původní materiál nijak překrývat. Povrch i barevnost nově vytvářené části by měl odpovídat autentickému kamennému materiálu.

Aby byly správně určeny vlastnosti vytvářeného kamene umělého, je nutností znát vlastnosti kamene původního. Zejména důležitá je pevnost, teplotní roztažnost, nasákavost, propustnost a materiálové složení původního kamene. Další důležitou vlastností umělého kamene, kterou je nutno sledovat, je také jeho přilnavost k původnímu kameni. Vhodně zvolené vlastnosti umělého kamene zaručují, že nově vytvořený prvek nebude poškozovat původní

materiál, například kvůli jiné teplotní roztažnosti. Původní a nový materiál by se měl dobře snášet také po chemické stránce [21].

2. Geopolymery

V poslední době se stále častěji poukazuje na klimatické změny vznikající vlivem emisí CO₂, částečně i z tohoto důvodu je tendencí nejen ve stavebnictví, ale i v mnoha dalších oborech hledat modernější materiály, které by svojí výrobou méně zatěžovali životní prostředí a bylo pro jejich výrobu možné používat i druhotné či odpadní materiály. Těmto aspektům plně vyhovují materiály na bázi geopolimerů [22].

Geopolymery patří mezi alkalicky aktivované látky. Jsou to anorganické polymerní materiály, pohybující se na rozhraní mezi hydraulickými pojivy, skelnými a keramickými materiály. Poprvé byl pojem geopolimer použit v roce 1979, kdy profesor Davidovits popsal tento materiál jako látku vznikající anorganickou polykondenzací tzv.geopolymerací (vlivem alkalické aktivace aluminosilikátových látek) [22, 23].

Obecněji lze geopolymery označit jako druh aluminosilikátových látek amorfni až semikrystalické trojrozměrné struktury. Jejich struktura se skládá z Si-O-Al kostry a je podobná přírodním zeolitům, avšak s nepravidelným uspořádáním [24].

2.1. Historický vývoj geopolimerů

První použití alkalických sloučenin, jakožto komponent do cementových materiálů, se datuje do roku 1930, kdy Kühl poprvé zkoumal chování směsi jemně mleté strusky s hydroxidem draselným. Na jeho výzkum navázal v roce 1937 Chassevent, jenž měřil reaktivitu strusky za použití hydroxidu draselného a roztoku sody. Na výzkum Kühla dále navázal také Purdon v roce 1940, který se zabýval studiem cementů bez obsahu slínekových minerálů, sestávajících se ze strusky a hydroxidu sodného či strusky a alkalických roztoků připravených na základě reakce alkalické soli se silnou zásadou [25].

V 50. letech se výzkum geopolimerů dostává na území bývalého SSSR, kde Gluchovsky poprvé objevil možnosti přípravy pojiv na bázi aluminosilikátů s nízkým podílem vápníku (popřípadě bez vápníku – jíly) aktivovaných alkalickým aktivátorem. Materiál označil

pojmem grutocementy (gruntosilikáty) a svoji práci shrnul ve stejnojmenné publikaci. Jeho výzkum, vedl až k praktickému využití těchto materiálů (obr. 6) [23, 25].



Obrázek 6 Stavba z gruntosilikátových bloků [23]

Významný podíl na výzkumu geopolymérů má francouzský chemik Davidovits, který se této práci začal věnovat v 70. letech. Zajímal se zejména o výzkum pojiv získaných alkalickou aktivací, především metakaolinu. Tento vzniklý pojivový systém nazval „geopolymery“ vzhledem k jejich polymerní struktuře [25]. Kromě jiného je Davidovits autorem teorie výstavby egyptských pyramid z umělého kamene. Dle jeho názoru byly jednotlivé bloky pyramid vytvářeny z vápencového písku pojeného směsí hydroxidu vápenatého, uhličitanu sodného a vody, přičemž tato směs byla dusána do forem [23].

V poslední době probíhá intenzivní výzkum těchto materiálů téměř po celém světě. Jedním z největších výzkumných projektů v České republice na toto téma byl Projekt České rozvojové agentury, o. p. s. na zřízení Inovačního centra využívání technologie geopolymérů při Ústavu struktury a mechaniky hornin AV ČR, probíhající v letech 2006 – 2007. Kromě využívání druhotných a odpadních surovin se výzkum zabýval také možnostmi uplatnění geopolymérů v restaurátorské praxi [26].

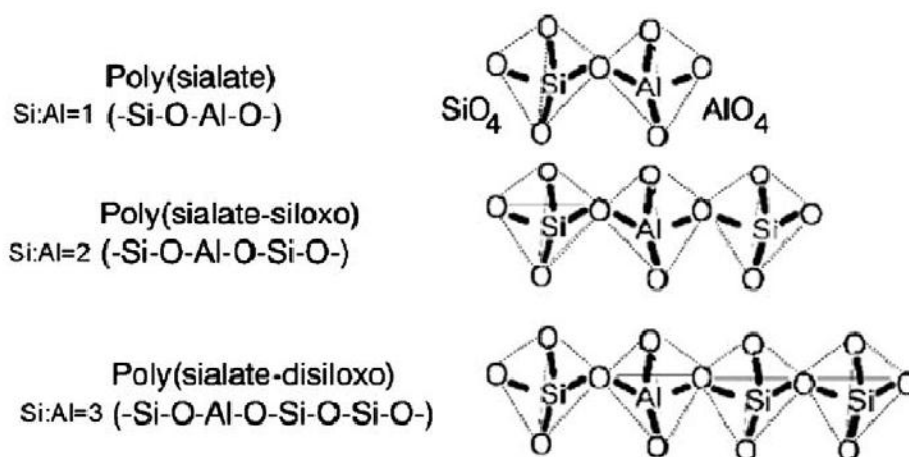
2.2. Struktura geopolyméru

Profesorem Davidovitsem byl pro geopolymery zvolen chemický název polysialáty, kde sialát označuje aluminosilikátovou skupinu (silicon-oxo-aluminate). Řetězce geopolymérů se

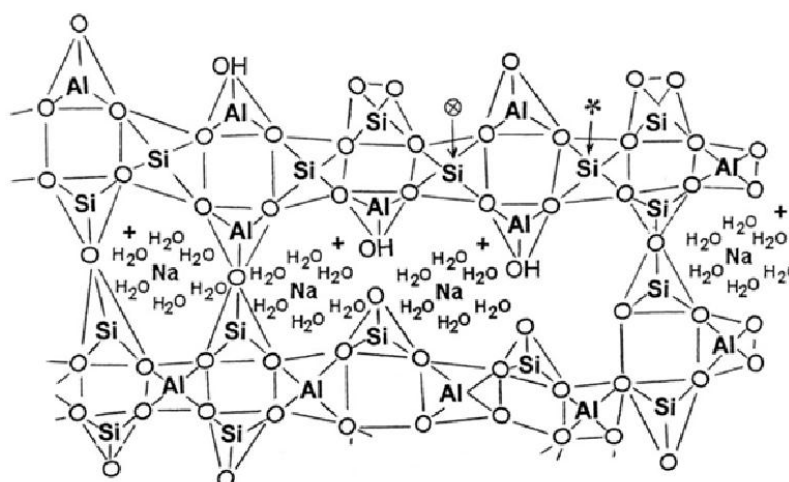
sestávají z SiO_4 a AlO_4 tetraedrů, které jsou spojeny kyslíkovými můstky. Kationty (Na^+ , K^+ , Ca^{2+}) přítomné ve struktuře geopolymery vyrovnávají negativní náboj na Al a terminálních atomech kyslíku. Empirický vzorec geopolymery lze zapsat následovně $(\text{M}_n\{-(\text{Si-O})_z\text{-Al-O}\}_n \cdot w\text{H}_2\text{O})$, kde n znamená stupeň polykondenzace a z , počet tetraedrických jednotek ($z = 1, 2, 3$ nebo více než 3), M je označení alkalického kationtu [27].

Geopolymery jsou tvořeny následujícími molekulovými jednotkami:

- $-\text{Si-O-Si-O}-$ poly(sialát)
- $-\text{Si-O-Al-O-Si-O}-$ poly(sialát-siloxo)
- $-\text{Si-O-Al-O-Si-O-Si-O}-$ poly(sialát-disiloxo) [23]



Obrázek 7 Produkty vznikající při polykondenzaci [28]



Obrázek 8 Struktura geopolymery [29]

2.3. Příprava geopolymérů

Příprava geopolymérů spočívá v alkalické aktivaci aluminosilikátového materiálu (v případě ryzích polymerů je použit metakaolin) silným alkalickým činidlem (NaOH, KOH, vodní sklo), za normální teploty.

Samotný proces geopolymeryzace je zahájen rozpuštěním vazeb v aluminosilikátových materiálech vlivem zvyšujícího se pH alkalického roztoku. Rozrušení původních vazeb vede ke vzniku aluminosilikátového gelu o složení $M_x(\text{AlO}_2)_y(\text{SiO}_2)_z \cdot n\text{MOH} \cdot m\text{H}_2\text{O}$, který po určité časové prodlevě začne tuhnout na výsledný produkt reakce, tedy geopolymér [23, 27].

Výsledný produkt alkalické aktivace je závislý na podmínkách alkalické aktivace a také surovinách vstupujících do reakčního procesu. Kromě fáze typu $(M_n\{-(\text{Si-O})_z\text{-Al-O}\}_n \cdot w\text{H}_2\text{O})$ může vznikat také fáze C-S-H nebo C-A-H, popřípadě může vznikat i voda v důsledku polykondenzace [30].

Koncentrace pevné látky ve směsi hraje v procesu alkalické aktivace důležitou roli a během alkalické aktivace určuje výsledný produkt této reakce. V případě, že je vodní součinitel větší jak 1, jedná se o zředěnou suspenzi a produktem takovéto reakce jsou krystalické zeolity (analcim, sodalit, heulandit). Jestliže je vodní součinitel menší jak 1, potom se jedná o hustou suspenzi kašovitě konzistence a výsledným produktem vznikajícím za těchto podmínek je amorfni fáze [23].

2.3.1. Alkalické aktivátory

Nejvíce využívanými alkalickými aktivátory jsou roztoky sodných a draselných neboli hydroxidů, sodné či draselné vodní sklo a méně často jsou používány roztoky alkalických uhličitů [30].

Hydroxid sodný (NaOH) a draselný (KOH) jsou zásadité anorganické sloučeniny, dostupné ve formě bílých peciček nebo šupin. Hydroxidy jsou silně hygroskopické látky, dobře rozpustné ve vodě. Průmyslově se vyrábí elektrolytickým rozkladem roztoků chloridů.

Vodní sklo je koloidní roztok alkalického křemičitanu (sodného či draselného), vznikající rozpuštěním příslušného alkalicko-křemičitého skla ve vodě. Složení vodního skla bývá nejčastěji charakterizováno křemičitým modulem M , jedná se o molární poměr $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$

pro sklo sodné nebo $\text{SiO}_2/\text{K}_2\text{O}$ pro sklo draselné. Hodnota křemičitého modulu se nejčastěji pohybuje v rozmezí 1,6–3,7 pro běžně vyráběná vodní skla [8].

2.3.2. Materiály vhodné pro alkalickou aktivaci

Pro alkalickou aktivaci látek je nutná přítomnost oxidů křemíku a hliníku. Při dosud provedených výzkumech byly použity:

- Kaolinitické hlíny
- Metakaoliny
- Popílký – vysokoteplotní a z fluidního spalování
- Struska
- Směsi těchto materiálů [23]

2.4. Vlastnosti a trvanlivost geopolymerních materiálů

Na vlastnosti geopolymerních materiálů má největší vliv charakter výchozí suroviny a dále způsob a podmínky, za jakých jsou tyto látky připravovány (teplota, hydrotermální podmínky). Kritéria, která nejvíce ovlivňují výsledný geopolymer jsou:

- složení aluminosilikátového prekurzoru
- jemnost mletí a míra amorfního charakteru aluminosilikátů
- použitý druh alkalického aktivátoru, jeho dávka a koncentrace
- teplota a způsob ošetřování čerstvého geopolymery [31]

Geopolymery patří mezi hydraulická pojiva, jsou ve vodě nerozpustné a jsou nehořlavé, dobře odolávají i teplotám okolo 900 °C. Jedná se o materiály složené převážně z amorfních látek, s minimálním obsahem látek krystalických, v případě vystavení vyšším teplotám přechází jejich amorfní struktura v mikrokrytalickou [32]. Mezi jejich výhodné vlastnosti patří i odolnost proti zředěným kyselinám a zásadám. Výhodou je také jejich dobrá mísitelnost s plnivý a ostatními druhotnými látkami, této vlastnosti se využívá zejména při solidifikaci odpadů. Poměr plniva a pojiva také významně ovlivňuje mechanické vlastnosti, jako je pevnost nebo pórovitost materiálu [27].

Složení aluminosilikátového prekurzoru charakterizuje poměr Si:Al. Se vzrůstajícím poměrem se navyšují pevnosti v tlaku, ale prodlužuje se doba tuhnutí materiálu. Při určitém zvýšeném poměru Si:Al, začínají pevnosti geopolymery opět klesat, hodnota tohoto poměru se pohybuje mezi 1,7–2,0. Nárůst pevností a výsledné pevnosti jsou ovlivněny také jemností mletí výchozího aluminosilikátu [31].

Vlastnosti výsledného geopolymery jsou značně ovlivněny i použitým druhem alkalického aktivátoru (složení a koncentrace). Aktivátor ovlivňuje kinetiku geopolymery, jeho pH udává rychlost a míru rozpouštění aluminosilikátového prekurzoru.

Pevnosti v tlaku u geopolymerních materiálů se mohou vyvíjet dlouhodobě, i v rozmezí 350 až 520 dnů. Počátečních pevností nabývají geopolymerní materiály oproti běžným hydraulickým pojivům mnohem rychleji a vyskytuje se u nich jiný poměr mezi tlakovou a tahovou pevností a důležité je zmínit i menší náchylnost k objemovým změnám během zrání [23].

2.4.1. Odolnost proti zvýšeným teplotám

Reakce na zvýšené teploty byly zkoušeny například u geopolymery na bázi úletového popílku. Tento materiál se zvyšující se teplotou výrazně ztrácí své pevnosti již při teplotách okolo 250 °C (o 40 % z původní hodnoty). K poklesu pevností na minimum došlo v rozmezí 600 °C až 700 °C. Nicméně zbytková pevnost po tepelném zpracování je u takového materiálu relativně vyšší než u materiálů na bázi portlandského cementu.

V případě geopolymery na bázi metakaolinu, lze očekávat mnohem příznivější vlastnosti při vystavení zvýšeným teplotám. Geopolymerní povlaky na bázi metakaolinu lze použít jako tepelné bariéry, které mohou být využity například pro ochranu betonu při vysokých teplotách. Tento materiál vykazuje lepší tepelnou stabilitu až do 1000 °C oproti běžnému betonu [30].

V případě alkalicky aktivovaných strusek dochází při ohřátí na 800 °C téměř k 70% poklesu pevnosti, související s dehydratací C-S-H fáze, která je součástí tohoto materiálu. V případě, že by teplota dále narůstala, dojde ke krystalizaci akermanitu a opětovnému nárůstu pevností [33].

2.4.2. Chemická odolnost

V případě styku geopolymerních materiálů s kyselým prostředím dochází k depolymeraci aluminosilikátových polymerů a uvolnění kyseliny křemičité. Dále dochází k výměně Na^+ a K^+ iontů vodíkovými nebo oxoniovými ionty a štěpení aluminosilikátové struktury.

Geopolymerní materiály se vyznačují velmi dobrou chemickou odolností proti působení síranů a chloridů. Během zkoušení materiálů na bázi alkalicky aktivované strusky nebyly pozorovány žádné korozní produkty ani nově vznikající krystalické fáze při ponoření do roztoku NaCl nebo Na_2SO_4 [30].

2.4.3. Mrazuvzdornost

Během zkoušek provedených na geopolymerních materiálech na bázi popílku nebyly zaznamenány žádné výrazné degradační procesy způsobené střídavým působením mrazu (nebyl pozorován žádný rozpad). Po 150 zmrazovacích cyklech nebyly na zkoušených vzorcích pozorovány žádné deformace, pevnost v tlaku poklesla o 30 % oproti referenčním vzorkům. Z těchto výsledků lze předpokládat velmi dobrou odolnost geopolymerních materiálů proti působení mrazu [30].

2.5. Využití geopolimerů

Geopolymerní pojiva lze díky jejich vlastnostem, jako je nehořlavost, vysoké pevnosti nebo snadné zpracování za nízkých teplot, uplatnit v celé řadě oborů. Pravděpodobně největší možnosti pro využití se naskýtají ve stavebnictví, kde lze geopolymerními pojivy částečně nahrazovat klasické portlandské cementy. Ve stavebnictví je využití těchto pojiv spojeno s redukcí emisí CO_2 , který vzniká při výrobě portlandského slínku [30].

Další možnost využití se naskýtá při restaurování sochařských a stavebních památek z kamene, keramiky nebo umělého kamene. Výhodou geopolymerních pojiv je velká možnost modifikací vzhledu, v závislosti na použitém plnivu či přídatku barviv [30, 32].

V neposlední řadě lze geopolymery využít i v automobilovém nebo leteckém průmyslu pro výrobu součástí. Často je zmiňována i možnost stabilizace a solidifikace odpadů za použití

geopolymerů, vzhledem k jejich dlouhé životnosti, vysoké odolnosti a schopnosti vázat velké množství plniva [30].

3. Přírodní pískovec

Pískovce patří mezi klastické (úlomkové) zpevněné sedimenty o velikosti jednotlivých zrn 0,063–2 mm. Rozdělit je můžeme podle velikosti zrn na jemnozrnné, střednězrnné a hrubozrnné.

Jednotlivá zrna obsažená v pískovci mohou být tvořena křemenem a v menší míře také kalcitem. Tvar, velikost a zabarvení zrn se částečně podílí na tom, jaký má pískovec vzhled.

Soudržnost pískovce je zajištěna pojivovým tmelem, který může vyplňovat celý prostor mezi zrny nebo jednotlivá zrna pouze obaluje. Takto můžeme tmel rozdělit do čtyř skupin:

- **Dotykový** tmel pouze spojuje jednotlivá zrna a prostor mezi zrny zůstává volný.
- **Povlakový** tmel neboli krustifikační obaluje zrno po celém jeho povrchu, prostor mezi zrny zůstává nadále volný.
- **Pórový** tmel, který působí jako základní materiál, v jehož struktuře jsou obsažena zrna pískovce.
- **Výplňový** tmel působící dojmem dodatečného zpevnění zrn.

Tmel je tvořen strukturně odlišnou jemnozrnnou složkou sedimentární horniny a dle mineralogického složení pojiva můžeme takto rozdělit pískovce s křemitým, vápenatým, jílovým, železitým či jiným tmelem. Stejně tak, jako u umělých kamenů, tak i u přírodního pískovce má rozhodující vliv na vlastnosti kamene množství a kvalita tmele. S jeho množstvím se výrazně mění pórovitost a mechanické vlastnosti horniny. Díky složení tmele dostává pískovec své charakteristické zabarvení, například v případě pískovců pojených železitým tmelem je barva červenohnědá, u nás běžnější šedobílá až šedá barva je výsledkem zpevnění vápenatým tmelem. Barevnost přírodních pískovců je opět analogická s umělými kameny, kde jejich výsledný barevný odstín udává krom samotných zrn plniva právě pojivový tmel. Během vytváření pískovce mohlo dojít k usazování tmele společně s usazovanými klastickými úlomky nebo mohlo ke zpevnění dojít až dodatečně [8].

3.1. Vybrané druhy pískovců používané v České republice

Hořický pískovec je třetihorní jemnozrnný křemenný pískovec, nacházející se v severní oblasti české křídý. Jednotlivá zrna tohoto pískovce jsou spojena kaoliniticko-křemenným tmelem, šedobílé až žluté barvy, místy nazelenalé nebo červenohnědé. Technologické vlastnosti tohoto pískovce jsou značně proměnlivé v závislosti na jednotlivých vrstvách, ale i na poloze v dané vrstvě. Pevnosti těchto pískovců se dle posledního geologického průzkumu pohybují v rozmezí 20–41 MPa.

V České republice je hořický pískovec oblíbeným materiálem pro staticky nenamáhané stavební a architektonické aplikace, využívá se také v kamenosochařské výrobě pro tvorbu nových i kopie starých děl. Těží se v lomu společnosti Kámen Ostroměř s.r.o. v Podhorním Újezdu [34, 35].



Obrázek 9 *Hořický pískovec* [36]

Dalším u nás využívaným kamenem je **Mšenský pískovec**, pocházející z vltavsko-berounské oblasti české křídý. Jedná se jemnozrnný pískovec, bělošedý, žlutý až červenohnědý, často žíhaný nebo se skvrnami. Pevnost v tlaku tohoto materiálu se pohybuje okolo 28 MPa. Využíván je jak ve stavebnictví, tak i v kamenosochařství. Jedním z příkladů využití tohoto pískovce v restaurátorství je reliéf tympanonů vchodu hlavního průčelí chrámu svatého Víta v Praze [34, 37].



Obrázek 10 *Mšenský pískovec* [37]

Božanovský pískovec, pocházející z oblasti Broumovského výběžku, je středně až hrubě zrnitý, převážně béžový, šedobílý nebo naopak rezavě hnědý se skvrnami nebo žíháním. Vzhledem k hrubší zrnitosti je možné rozeznat zrna křemene, plagioklasu a draselných živců. Z technologického hlediska patří mezi naše nejkvalitnější pískovce, pevnost v tlaku se pohybuje mezi 65–72 MPa. Božanovský pískovec má široké uplatnění jak ve stavebnictví, tak i v kamenosochařské výrobě, zde je však jeho použití omezeno jeho hrubší zrnitostí. V současné době probíhá těžba na katastrálním území obce Božanov [34, 38].



Obrázek 11 *Božanovský pískovec – struktura* [39]

III. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část dokumentu se zabývá výrobou směsí umělého kamene s využitím geopolymerního pojiva na bázi metakaolinu a následným zkoušením mechanických a fyzikálních vlastností tohoto materiálu.

1. Použité suroviny

- Metakaolin Mefisto K05

Jedná se o vysoce aktivní pucolán, vyráběný společností České lupkové závody, a. s. Mefisto je využíván zejména ke stavebním účelům, z 5– 15 % nahrazuje cement při výrobě stavebních hmot, nahrazuje mikrosiliku ve vybraných aplikacích a je určen pro výrobu geopolymérů. Výrazně ovlivňuje vlastnosti, jako je pevnost v tlaku a ohybu, mrazuvzdornost, snižuje nasákavost, omezuje vznik výkvětů a potlačuje alkalicko-křemičitou reakci [40].

- Křemený písek PG1 a PG2 v poměru 1:1 (Filtrací písků, s.r.o.)
- Draselné vodní sklo – silikátový modul $M_s = 1,5$ (Vodní sklo, a.s.)

2. Složení směsí

Tabulka 1: Složení směsí umělého pískovce s geopolymerním pojivem

Poměr	Metakaolin/plnivo	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9
Hmotnost [g]	Mefisto K05	360	300	260	225	200	180
	Písek PG1 + PG2	1440	1500	1560	1575	1600	1620
	Vodní sklo	360	300	260	225	200	180
	Voda	65	60	52	40	38	27

3. Příprava zkušebních vzorků

Zkušebními vzorky byly trámečky o rozměrech 40 × 40 × 160 mm. Při přípravě jednotlivých směsí se vždy nejprve smíchal metakaolin s vodním sklem a následně po homogenizaci těchto dvou složek se přimíchal písek v příslušném množství. Po smíchání všech složek se směs ručně plnila do předem vymazaných forem a pomocí malého tlouku se udusávala tak, aby byla dostatečně hutná a forma zcela naplněná.

Po zhutnění byly jednotlivé vzorky označeny a ve formách uloženy do PE fólie, aby nedošlo k úniku vlhkosti. Vzorky byly uloženy v laboratorních podmínkách a po přibližně 72 hodinách došlo k jejich odformování a opětovnému uložení do PE fólie.



Obrázek 12 Sada zkušebních trámeček velikosti $40 \times 40 \times 160$ mm

4. Použité zkušební metody

Vzorky byly po 7 dnech normálního zrání podrobeny zkouškám pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku. U jednotlivých směsí byla stanovena také objemová hmotnost. Část vzorku každé směsi byla podrobena analýze pod elektronovým rastrovacím mikroskopem, stereoskopem a pomocí vysokotlaké rtuťové porozimetrie.

4.1. Zkouška pevnosti v tahu za ohybu

Zkouška se prováděla na lisu, za pomoci lisovacího přípravku sestávajícího se ze dvou válcových podpor o průměru 10 mm, vzdálených od sebe $(100 \pm 0,5)$ mm. Na tyto podpory se umístilo zkoušené těleso. Další válec o průměru 10 mm se nachází v horní části přípravku a funguje jako válec tlačný, umístěný uprostřed mezi spodními podporami, při horním okraji tělesa.

Pro výpočet pevnosti v tahu za ohybu použijeme vzorec:

$$R_f = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot a \cdot b^2}$$

kde:

R_f – pevnost v tahu za ohybu [MPa]

F – vynaložené zatížení v okamžiku porušení tělesa [kN]

a, b – rozměry tělesa - šířka a a výška b [mm]

l – vzdálenost mezi podporami [mm]

4.2. Zkouška pevnosti v tlaku

Zkouška pevnosti v tlaku se prováděla na stejném lisovacím zařízení jako zkouška pevnosti v tahu, ale s použitím lisovacího přípravku pro zkoušení pevností v tlaku se zatěžovací plochou 1600 mm².

Zlomky těles z tahové zkoušky se vkládali do lisovacího přípravku kolmo na směr hutnění a opět se postupně zatěžovali až do porušení. Příslušnou pevnost v tlaku jsme vypočítali ze vzorce:

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

kde:

R_c – pevnost v tlaku [MPa]

F_c – příslušná zatěžovací síla v okamžiku porušení [kN]

A – zatěžovací plocha 1600 mm²

IV. VÝSLEDKY A DISKUZE

V této kapitole jsou zpracovány a vyhodnoceny výsledky zkoušek provedených na umělém kameni vytvořeném pomocí pojiva na geopolymerní bázi. Pro tento účel byly vytvořeny vzorky ze šesti směsí s různým poměrem metakaolinu a plniva. Cílem práce bylo na základě výsledků mechanických zkoušek navrhnout vhodné složení směsi, pro vytvoření sochařské faksimile.

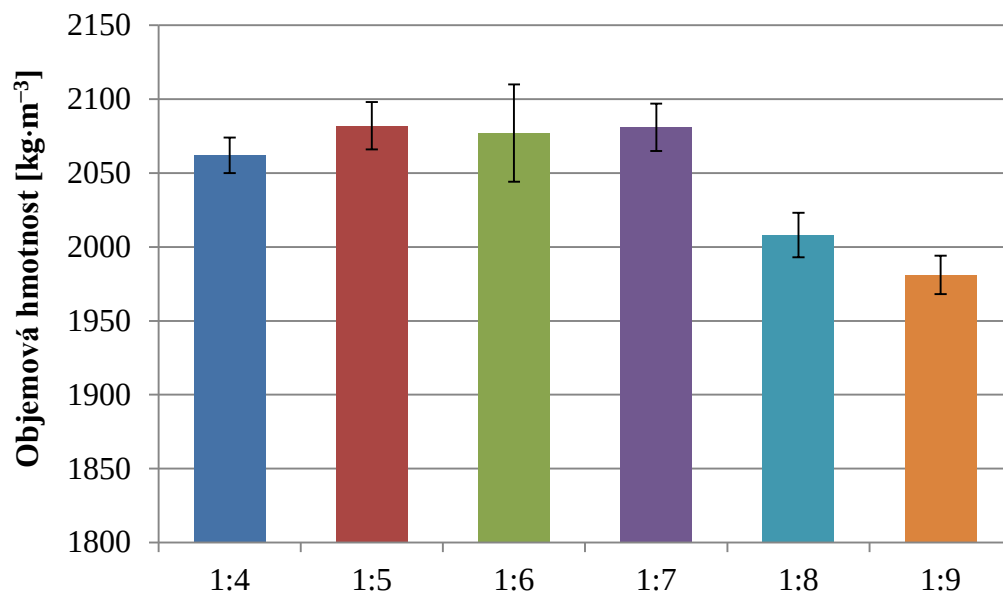
1. Výsledné pevnosti připravených kompozitů

Z provedených zkoušek byly vyhodnoceny mechanické vlastnosti jednotlivých směsí: pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku. Kromě mechanických vlastností byla u jednotlivých směsí stanovena také objemová hmotnost. Zkoušky byly provedeny po 7 dnech zrání na trámečcích o rozměru 40×40×160 mm. Veškeré výsledky zkoušek jsou uvedeny v tabulce 2 a graficky znázorněny na obrázcích 13,14,15.

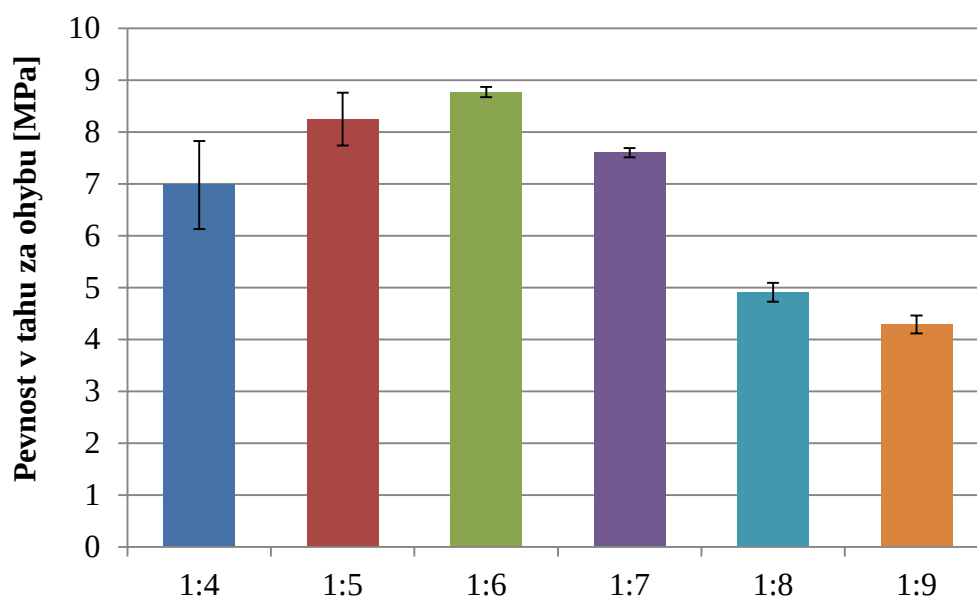
Tabulka 2: Vyhodnocení provedených zkoušek: objemová hmotnost, pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku

Směs	Dílec	D	Ø D	σ	R _f	Ø R _f	σ	R _c		Ø R _c	σ
		[kg.m ⁻³]			[MPa]			[MPa]			
1:4	A	2050	2062	12	7,42	6,98	0,85	38,5	41,1	40,3	1,8
	B	2057			7,72			42,3	–		
	C	2078			5,79			37,9	41,6		
1:5	A	2072	2082	16	7,57	8,25	0,51	38,1	40,7	40,6	1,3
	B	2104			8,80			41,6	41,1		
	C	2070			8,38			41,3	–		
1:6	A	2073	2077	33	8,75	8,77	0,10	42,7	41,1	42,8	1,5
	B	2038			8,90			41,5	–		
	C	2119			8,67			43,1	45,5		
1:7	A	2059	2081	16	7,48	7,60	0,09	40,2	39,3	40,3	1,1
	B	2093			7,70			42,3	39,3		
	C	2091			7,63			40,5	–		
1:8	A	2021	2008	15	4,79	4,91	0,18	31,1	32,9	32,6	1,2
	B	1988			4,78			34,4	31,6		
	C	2016			5,16			32,9	–		
1:9	A	2000	1981	13	4,48	4,29	0,17	28,9	31,9	28,9	1,6
	B	1972			4,33			27,2	28,3		
	C	1972			4,07			28,1	–		

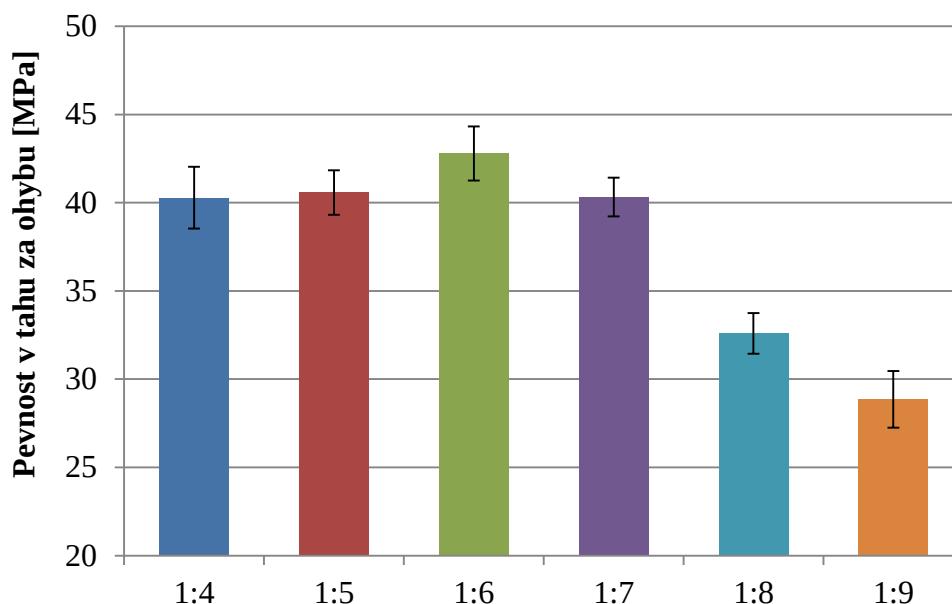
D – objemová hmotnost v kg.m⁻³



Obrázek 13 *Objemová hmotnost směsí umělého kamene na geopolymerní bázi*



Obrázek 14 *Stanovená pevnost v tahu za ohybu u směsí s různým poměrem pojiva a plniva*



Obrázek 15 Stanovená pevnost v tlaku u směsí s různým poměrem pojiva a plniva

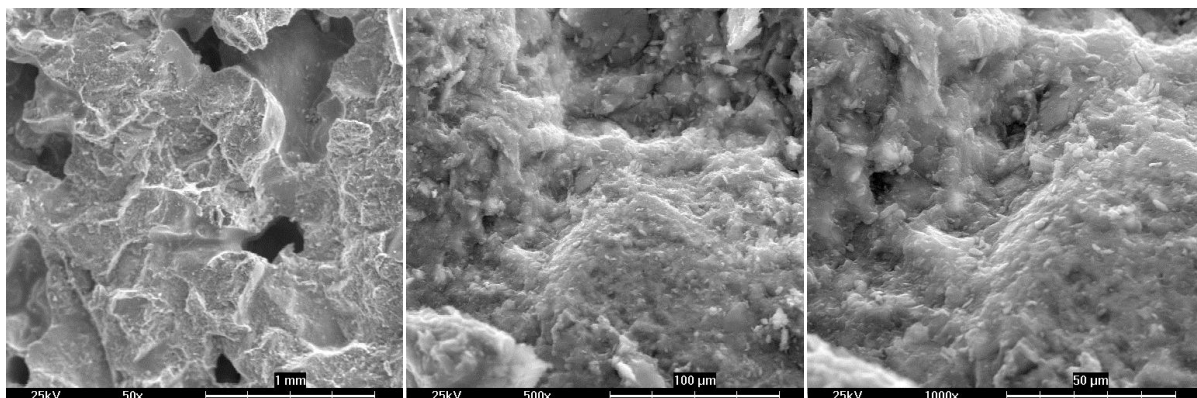
Z vyhodnocení mechanických zkoušek se dá usoudit, že umělý kámen na bázi geopolymerního pojiva, připravený pro účel této práce, dosahuje poměrně značných pevností jak v tlaku, tak i v tahu za ohybu.

Dle grafického výstupu je nejprve patrný mírný nárůst pevností se zvyšujícím se poměrem pojiva a plniva, po dosažení maximálních hodnot, při poměru 1:6, poté dochází k poklesu. Přibližně stejný vývoj se dá sledovat i změn objemové hmotnosti, kde je opět patrný mírný nárůst a opětovný pokles se zvyšujícím se poměrem pojiva a plniva. Pokles objemové hmotnosti i pevností je způsoben patrně větším obsahem vzduchových pórů ve hmotě připravených těles, související se sníženým množstvím pojiva.

2. Analýza elektronovým mikroskopem

Lomové plochy jednotlivých vzorků byly dále podrobeny analýze pod rastrovacím elektronovým mikroskopem (SEM – Scanning Electron Microscope). Na obrázku 16 jsou zobrazeny snímky zatvrdlé geopolymerní směsi s poměrem metekaolinu k písku 1:8. Z obrázku je patrné, že geopolymerní pojivo má zcela amorfní charakter a je dobře spojeno se zrny kameniva. Na přehledovém snímku je rovněž patrné množství velkých pórů, které jsou způsobeny nízkým obsahem pojiva, jež není schopno zcela vyplnit prostor mezi jednotlivými

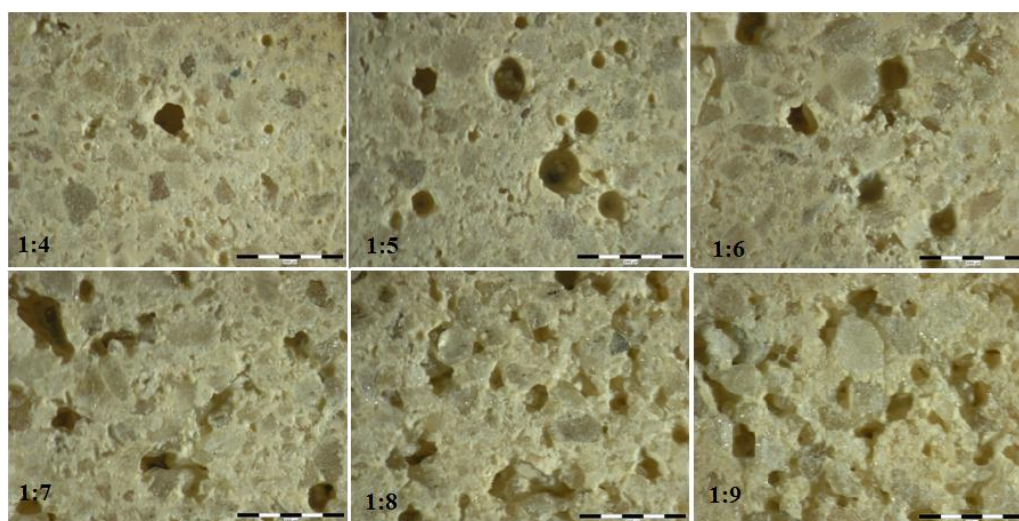
zrny kameniva. Tato struktura svým charakterem napodobuje přírodní pískovec s dotykovým tmelem.



Obrázek 16 SEM – umělý kámen na geopolymerní bázi, poměr mísení metakaolin/plnivo 1:8

3. Snímkování optickým stereoskopem

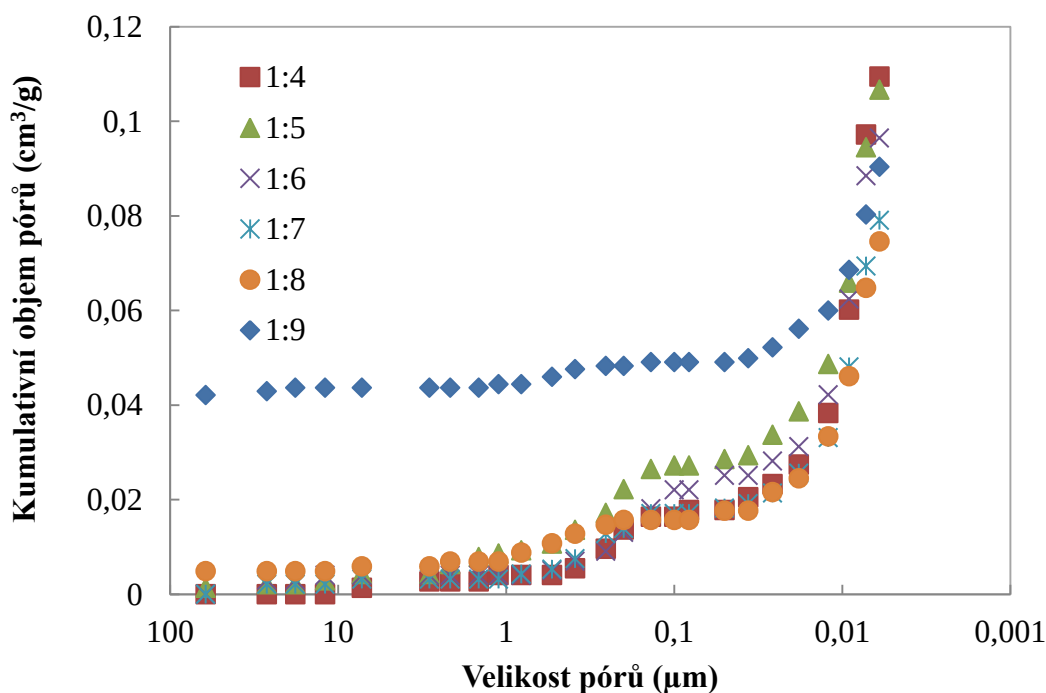
Na obrázku 17 jsou zobrazeny snímky řezů jednotlivými vzorky připraveného umělého pískovce pořízené optickým stereoskopem. Z obrázků vyplývá, že u vzorků s nižším obsahem kameniva vyplňuje pojivo prakticky celý prostor mezi zrny. Díky značné viskozitě geopolymerního pojiva je ve hmotě uzavřeno značné množství kulových vzduchových pórů, které zvoleným způsobem zhutňování není možné odstranit. Při poměru metakaolinu a písku vyšším než 1:7 již není dostatek pojiva na vyplnění veškerého prostoru mezi zrny a materiál získává charakter blížící se struktuře přírodního pískovce. Při poměru 1:9 již tvoří pojivo pouze lokalizovanou styčnou fázi mezi jednotlivými zrny písku.



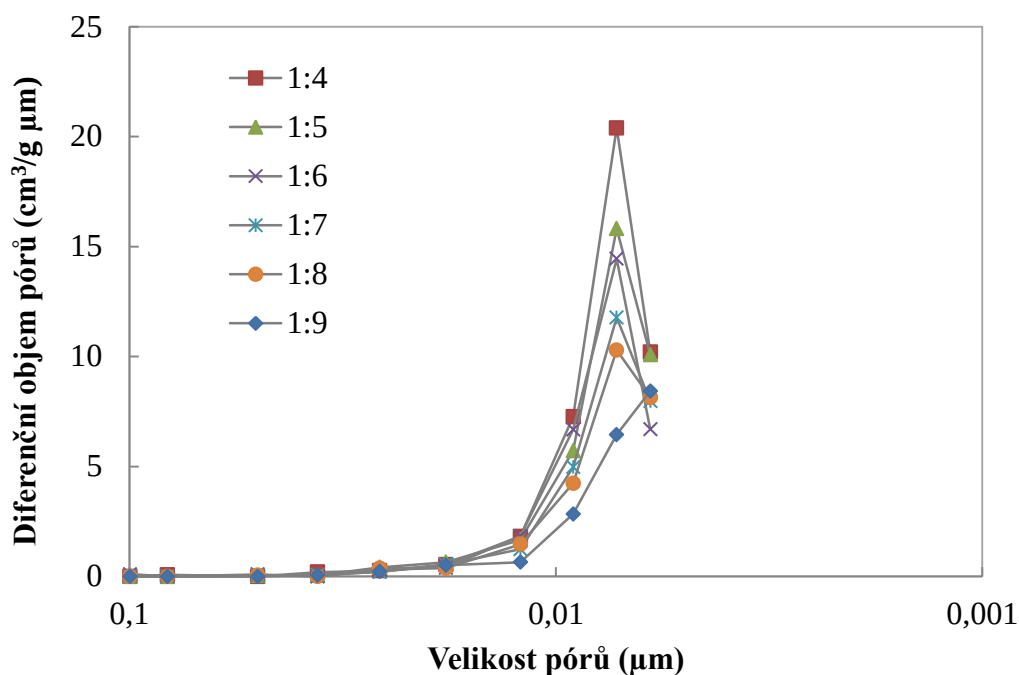
Obrázek 17 Snímky z optického stereoskopu jednotlivých směsí

4. Porozimetrická analýza

Porozimetrická měření ukazují především na charakter pojiva, protože křemenný písek jakožto krystalická látka v měřeném rozsahu prakticky porozitu nevykazuje. Graf kumulativního objemu pórů v závislosti na velikosti pórů ukazuje, že geopolymerní pojivo má největší objem pórů v oblasti malých kapilárních až gelových pórů o velikosti 6–20 nm (obr. 18). Při snižování obsahu pojiva dochází k celkovému poklesu kumulativního poměru pórů, a to především v oblasti gelových pórů, jak také vyplývá z grafu diferenčního objemu pórů (obr. 19). Jak již bylo diskutováno výše u vzorku s poměrem 1:9 tvoří pojivo pouze lokalizovanou styčnou fázi mezi zrny kameniva, a proto můžeme pozorovat značný nárůst objemu v oblasti velkých pórů.



Obrázek 18 Graf kumulativního objemu pórů jednotlivých směsí



Obrázek 19 Graf diferenčního objemu pórů jednotlivých směsí

5. Tvorba sochařské faksimile

Výstupem experimentální části této práce bylo vytvoření dekorativního prvku z umělého kamene za použití geopolymerního pojiva na bázi metakaolinu. Ze závěrů pevnostních zkoušek a z poznatků získaných během přípravy (konzistence směsi, zpracovatelnost, estetický dojem apod.) bylo možné stanovit vhodný poměr pojiva a plniva pro tento účel. Vzhledem k dostatečným pevnostem byla zvolena směs s největším poměrným obsahem plniva, tedy 1:9.

Během přípravy směsi byl použit stejný postup jako v případě přípravy zkušebních trámeček. Po dostatečné homogenizaci byla směs naplněna v několika vrstvách do silikonové formy, přičemž každá vrstva byla dostatečně zhutněna udusáním. Výdusky byly společně s formami uloženy do PE folie proti ztrátě vlhkosti a po 7 dnech odformovány.

Tabulka 4: Složení směsi umělého kamene na geopolymerní bázi

Celková navážka	3960 g
Metakaolin	360 g
Písek	3240 g
Vodní sklo	360 g
Voda	54 g



Obrázek 20 *Dekoratívni prvek ve tvaru chodidla*



Obrázek 21 *Dekoratívni prvek ve tvaru hlavy anděla*

V. ZÁVĚR

Cílem této práce bylo ověřit možnost přípravy umělého pískovce s využitím geopolymerního pojiva na bázi metakaolinu. Pro tento účel bylo navrženo několik směsí s rozdílným poměrem metakaolinu a plniva. Na základě mechanických a estetických vlastností byl vybrán nejvhodnější poměr mísení a z této směsi byl vytvořen dekorativní prvek.

Během práce bylo zjištěno, že směs umělého pískovce s geopolymerním pojivem dosahuje velmi vysokých pevností, jak v tlaku, tak i v tahu za ohybu, i při vysokém poměru mísení. Tlakové pevnosti se pohybovaly v rozmezí od 28,9 MPa do 42,8 MPa, s tendencí počátečního nárůstu se sníženým množstvím pojiva a následným poklesem. Totožný průběh nárůstu a poklesu hodnot lze sledovat i u pevností v tahu za ohybu, kde se hodnoty pohybovaly v rozmezí 4,29 MPa až 8,77 MPa. Objemové hmotnosti směsí se příliš nelišily a pohybovaly se okolo $2000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, objemová hmotnost mírně klesala s rostoucím poměrem mísení.

Pro vytvoření dekorativního prvku byla po pečlivé úvaze vybrána směs s poměrem mísení 1:9. Pevnosti u této směsi byly pro účel práce plně dostačující a vytvořené zkušební vzorky se vzhledově nejvíce blížily přírodnímu pískovci. U směsí s menším poměrem mísení bylo mezi zrnny patrné přebytké množství pojiva, které ve výsledku působilo velmi nepřírozně. Kromě estetického dojmu byla posuzována také soudržnost jednotlivých zrn ve směsi, která byla u všech zkušebních vzorků plně dostačující. Během přípravy dekorativního prvku však došlo ke zhoršení této vlastnosti a vytvořený výdusek se po odformování mírně drolil na svém povrchu. Tento jev mohl být způsoben nedokonalou homogenizací směsi, ke které došlo pravděpodobně z důvodů velkého množství míseného materiálu.

Přípravu dekorativního prvku, lze považovat za úspěšnou, jelikož se podařilo připravit umělý pískovec s vyhovujícími mechanickými vlastnostmi, který se svým vzhledem přibližuje přírodnímu kameni. Vzhledem k lepší imitaci přírodního materiálu, by bylo pravděpodobně vhodnější zvolit jiný poměr mísení jednotlivých frakcí písku a mírně upravit poměr mísení metakaolinu s plnivem, z důvodu lepší pojivosti materiálu. Jak již bylo zmíněno výše, nedostatečná pojivost materiálu mohla být způsobena přílišným množstvím míseného materiálu, který nebylo možné zvoleným způsobem dostatečně homogenizovat.

VI. SEZNAM LITERÁRNÍCH ZDROJŮ

1. Are Pyramids Made Out of Concrete?. *Geopolymer* [online]. [vid. 2013-05-5]. Dostupné z: <http://www.geopolymer.org/archaeology/pyramids/are-pyramids-made-out-of-concrete-1>
2. KOTLÍK, P. Umělý kámen – materiál pro tmely, doplňky a kopie, *Zpravodaj STOP – svazek 12*, Společnost pro technologie ochrany památek, Praha, 2010, 4 – 10
3. KOTLÍK, P. Technologie přípravy umělého kamene, *Umělý kámen pro památkovou péči, seminář STOP*, Lapidárium Národního muzea, Praha, 1998, 9 – 18
4. ČSN EN 14 618 *Umělý kámen – terminologie a klasifikace*, Český normalizační institut, Praha, 2005
5. JUSTA, P. Alternativní plniva v umělém kameni, *Umělý kámen pro památkovou péči, seminář STOP*, Lapidárium Národního muzea, Praha, 1998, 25 – 26
6. Pražské kašny a fontány. *Pražské kašny a fontány* [online]. [vid. 2013-04-19]. Dostupné z: <http://www.pfak.unas.cz/projekt.html>
7. HUCKOVÁ, M.; KOLÍK, P. Umělý kámen s epoxidovým pojivem, *Zprávy památkové péče – 69/6*, Národní památkový ústav, Praha, 2009, 458 – 464
8. KOTLÍK, P. *Stavební materiály historických objektů*. Praha: VŠCHT v Praze, 1999. ISBN 80-7080-347-9. Dostupné z: http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_isbn-80-7080-347-9/pages-img/anotace.html
9. Umělý mramor- teoretická část. *VŠCHT* [online]. [cit. 2013-03-22]. Dostupné z: http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/res_umely_mramor/teorie.htm
10. Rekonstrukce a restaurování historických omítek, fasád a interiérů. *Štukmramor, s.r.o.* [online]. 1999 [vid. 2013-3-30]. Dostupné z: <http://www.stukmramor.cz/index.php?ln=cz&pg=z&kt=um&zk=liberec&st=1>
11. KOTLÍK, P. Studium barevnosti umělého pískovce. In: *Sborník VŠCHT*. Praha: VŠCHT, 1993, s. 39.
12. KOTLÍK, P.; SONNEK H.; ZELINGER J. Umělý pískovec pojený bílým cementem. In: *Sborník VŠCHT*. Praha: VŠCHT, 1988, s. 137.
13. RATHOUSKÝ, J. Zkušenosti s umělým kamenem s epoxidovým pojivem. In: *Umělý kámen pro památkovou péči, seminář STOP*. Praha: Lapidárium Národního muzea, 1998, s. 19-21
14. KOTLÍK, P. Matyáš Bernard Braun - socha poustevníka. In: *Umělý kámen pro památkovou péči, seminář STOP*. Praha: Lapidárium Národního muzea, 1998, s. 4.

15. NOVOTNÝ, J. Zkušenosti a umělým kamenem: Umělý pískovec na minerálním základě. In: *Umělý kámen pro památkovou péči, seminář STOP*. Praha: Lapidárium Národního muzea, 1998, s. 22-24
16. KUCHAR, J. Umělý kámen k nerozeznání od přírodního. In: *Stavebnictví a interiér* [online]. 2007 [cit. 2013-03-21]. Dostupné z: <http://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/umely-kamen-k-nerozeznani-od-prirodnihho/>
17. Série TVD – štípána břidlice. *Magricrete.cz* [online]. 2000 [vid. 2013-04-16]. Dostupné z: <http://www.magicrete.cz/produkty/umely-kamen/1188.html>
18. *Litý mramor* [online]. [cit. 2013-03-30]. Dostupné z: <http://www.litymramor.cz/>
19. Umělý mramor: Nezničitelný materiál pro každou koupelnu. In: *IDNES* [online]. 2006 [vid. 2013-02-27]. Dostupné z: http://bydleni.idnes.cz/umely-mramor-neznicitelnymaterial-pro-kazdou-koupelnupkk//koupelna.aspx?c=A060707_121819_koupelna_pet
20. Litý mramor. *Aretti: Zakázkové interiéry* [online]. 2012 [vid. 2013-4-22]. Dostupné z: <http://www.zakazkoveinteriery.cz/produkty/lity-mramor>
21. NEJEDLÝ, V. Umělý kámen v restaurování výtvarných děl: pohled památkáře. In: *Umělý kámen pro památkovou péči, seminář STOP*. Praha: Lapidárium Národního muzea, 1998, s. 5-6.
22. SLÁVIK, R.; BEDNAŘÍK V.; VONDRUŠKA, M. Geopolymery a jejich použití pro nakládání s odpady. *Odpady*[online]. 2006 [cit. 2013-03-6]. Dostupné z: <http://odpady.ihned.cz/c1-18251200-geopolymery-a-jejich-pouziti-pro-nakladani-s-odpady>
23. ŠKVÁRA, F. Alkalicky aktivované materiály – geopolymery. *Informátor: Česká společnost pro výzkum a využití jílu*. 2007, 37, s. 1 - 4. ISSN 1802-2499
24. ZHANG, Y.; XING, J.; YU, L.; LI, J. Preparation and characterization of functional geopolymer. In *Advanced material research*, 2008, vol. 47, s. 977–979
25. CAIUN, S.; KRIVENKO P.V.; ROY D. *Alkali-Activated Cements and Concretes*. Abingdon: Taylor & Francis, 2006. ISBN 978-0-415-70004-7. s. 1–2
26. ČERVINKA, J. *Geopolymery - využití při restaurování kamene a souvisejících materiálů*. Pardubice, 2008. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice.
27. PACHEO-TOGAL, F.; CASTRO-GOMAS, J.; JALALI, S. Alkali activated binders, Part 2. About materials and binders manufacture, In: *Construction and Building Materials*, 2007, s. 3-6

28. DAVIDOVITS, J. Properties of geopolymer cements. In *1st International Conference on Alkaline Cements and Concretes*, Kiev: Kiev State Technical University, Kiev, Ukraine, 1994, 131-149.
29. BARBOSA, V. F. F., MACKENZIE, K. J. D., THAUMATURGO, C. Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers. *International Journal of Inorganic Materials*, 2000, 2, 309-317.
30. ŠOUKAL, F.; OPRAVIL, T.; PTÁČEK, P.; FOLLER, B.; BRANDŠTETR, J. Geopolymers – amorphous ceramics via solution. In *Some thermodynamic, structural and behavioral aspects of materials accentuating non-crystalline states*. Plzeň: 2009. s. 14–18
31. ROVNANÍK, P. Úvod do problematiky geopolymérů. In: *Geopolymer v památkové péči*. Praha: Kloknerův ústav ČVUT, 2012, s. 4-11
32. OPRAVIL, T.; BRANDŠTETR J.; HAVLICA, J.; FRANK, V. Geopolymery na bázi metakaolinu aktivovaného sodnými a draselnými sloučeninami. In: *Metakaolin 2008 Sborník příspěvků semináře*. Brno: VUT v Brně, 2008, s. 80-86
33. ROVNANÍK, P.; BAYER; ROVNANÍKOVÁ, P. Microstructural aspect of high temperature treatment of alkali activated slag, *Conference non-traditional cement and concrete*, VUT v Brně, 2011, 122 – 129
34. RYBAŘÍK, V. Pískovcové lomy na Hořicku na počátku 40. let 19. století. In: *Kámen*, vol. 13, 1. Praha: Svaz kameníků a kamenosochařů, 2007, s. 15-20.
35. RYBAŘÍK, V. Hořický pískovec z Podhorního Újezdu. *Revue Kámen* [online]. 2001 [vid. 2013-04-22]. Dostupné z: <http://www.revuekamen.cz/horicky-piskovec.htm>
36. *Pískovce* [online]. [vid. 2013-05-2]. Dostupné z: <http://www.piskovce.cz/galerie.html>
37. *Mšenské pískovce* [online]. [vid. 2013-05-4]. Dostupné z: http://msenskepiskovce.cz/index.php?option=com_content&task=view&id=15&Itemid=3
38. RYBAŘÍK, V. Božanovský pískovec. *Revue Kámen* [online]. 2001 [vid. 2013-04-22]. Dostupné z: <http://www.revuekamen.cz/bozanovsky-piskovec.htm>
39. *Pískovec Božanov* [online]. [vid. 2013-05-6]. Dostupné z: <http://www.kamen-hala.cz/vzorek.php?id=piskovecbozanov1>
40. Metakaolin. *České lupkové závody a. s.* [online]. [vid. 2013-05-4]. Dostupné z: <http://www.cluz.cz/?page=cz,metakaolin>