



STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

PŘÍPRAVA A CHARAKTERIZACE ČÁSTICOVÉHO KOMPOZITU SE ZVÝŠENOU ODOLNOSTÍ VŮČI AGRESIVNÍMU PROSTŘEDÍ

AUTOR Nicola Jacobiová
KONZULTANT Ing. Tomáš Kovářík, Ph.D.
GARANT Mgr. Vladimír Valach
ŠKOLA Gymnázium a Střední odborná škola Rokycany
KRAJ Plzeňský
OBOR 11. Stavebnictví, architektura a design interiérů

Rokycany 2017

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci SOČ vypracovala samostatně, a to na základě literatury a pramenů uvedených v seznamu zdrojů.

V Rokycanech, dne 3. března 2017

.....

Podpis

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala konzultantovi práce, panu Ing. Tomáši Kováříkovi Ph.D, za vstřícnost a vlídnou spolupráci. Bylo mi ctí, díky přátelskému klimatu a ochotné pomoci zaměstnanců studentům, spolupracovat s týmem Centra nových technologií a materiálů na ZČU v Plzni. Chci poděkovat také Ing. Drahomíře Rancové za poskytnutí námětu pro tuto práci a za její shovívavost při čtení tohoto dokumentu. V neposlední řadě jsem vděčná i svým přátelům, a to za pomoc a cenné rady při formátování obsahu této práce, a mojí mamince za psychickou podporu nejen při sepisování práce, ale i v průběhu celého studia.

Obsah

Úvod.....	6
Teoretická část	
1 Beton.....	7
1.1 Historie.....	7
1.2 Složení.....	9
1.2.1 Portlandský cement.....	9
1.2.2 Voda.....	11
1.2.3 Plnivo.....	12
1.3 Beton a jeho výhody.....	12
1.4 Beton a jeho nevýhody.....	14
2 Alternativní pojiva.....	17
2.1 Úvod a historie.....	17
2.2 Složení.....	17
2.2.1 Pucolán.....	17
2.2.2 Jílové minerály.....	18
2.2.3 Vodní sklo.....	18
2.3 Vlastnosti hlinitokřemičitých pojiv.....	19
3 Příprava zkušebních těles.....	21
3.1 Expozice vzorků v agresivním prostředí.....	22
3.2 Měření hmotnostních změn.....	23
3.3 Testování zkušebních těles.....	24
Praktická část	
4 Výsledky a diskuze.....	26
4.1 Změny hmotnosti.....	26
4.2 Mechanické vlastnosti.....	27
Závěr.....	32
Zdroje.....	33

Anotace

V teoretické části této práce SOČ je představena základní charakteristika betonu a hlinitokřemičitých pojiv, včetně fyzikálních vlastností těchto dvou kompozitů. V praktické části jsou v laboratorním měřítku připravena zkušební tělesa obou materiálů, která jsou po vyzrání vystavena zásaditému či kyselému roztoku za účelem stanovení jejich fyzikální odolnosti vůči agresivnímu prostředí. Na závěr jsou srovnány výsledky relativní nasákavosti a mechanické pevnosti obou kompozitů.

Klíčová slova

Beton, geopolymery, agresivní prostředí, odolnost

Abstract

This paper deals with physical properties of concrete and aluminosilicates composites. The theoretical part is a summary of the basic information about these binders and it is a description of the main properties of raw materials. In the second part is described the preparation of several series of experimental specimens and their exposition in aggressive alkaline and/or acidic environment. Finally, the relative absorbability and mechanical strength of exposed specimens were compared and evaluated.

Key words

Concrete, geopolymers, aggressive environment, resistance

Úvod

Ve své práci SOČ jsem se rozhodla věnovat se charakterizaci částicového kompozitu se zvýšenou odolností vůči agresivnímu prostředí a porovnat jeho vlastnosti s klasickým betonem. Toto téma mě zaujalo proto, že směřuji na vysokou školu stavebního zaměření, tudíž se s ním v budoucnu ještě setkám. Zajímá mě, jak probíhá vývoj technologií v praxi, a chci se seznámit s problematikou stavebních materiálů. Portlandský cement, složka betonu, je na výrobu velmi náročná surovina, tudíž existuje určitá vize nahradit jej alespoň částečně pojivy na bázi hlinitokřemičitanů. Faktem totiž zůstává, že stavební průmysl produkuje značné množství CO_2 a celkově je odvětvím náročným na spotřebu energie. Vystává nám tedy otázka, jak zamezit neustálé snižování kvality životního prostředí a drancování přírodních zdrojů v tomto ohledu.

Předmětem mého nahlédnutí do „Inženýrství speciálních materiálů“ bude chemická koroze betonu, které je tento kompozit vystaven při styku s agresivním prostředím. Agresivní prostředí v cementovém kameni způsobuje korozi rozpouštěním či vznikem rozpustných solí. Řešením může být použití alternativního anorganického pojiva, které vykazuje zvýšenou odolnost vůči agresivnímu prostředí. V laboratoři byly pod dohledem připraveny vzorky z betonu i geopolymerní směsi a po určitou dobu vystaveny agresivnímu prostředí (tzn. několikaprocentní H_2SO_4 a NaOH). Poté byly zjišťovány mechanické vlastnosti těchto těles (pevnost v tahu za ohybu, pevnost v tlaku).

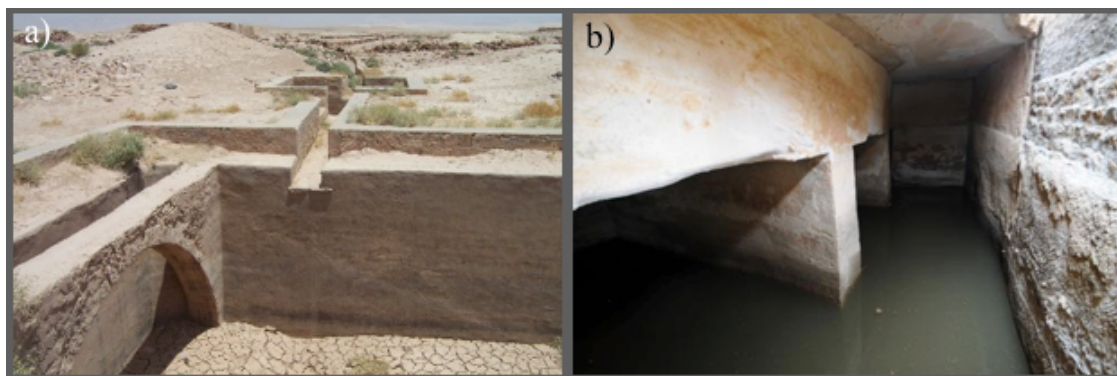
Na závěr byly porovnány výhody a nevýhody, které skýtá užití alternativního pojiva oproti povrchové úpravě betonu. Mým cílem byla tedy příprava zkušebních těles, expozice zkušebních těles, seznámení se s tematikou alternativních pojiv, vyhodnocení experimentálních dat a v neposlední řadě interpretace výsledků. Zdrojem informací pro moji práci budou skripta a odborné články poskytnuté mým konzultantem, Ing. Tomášem Kováříkem, Ph. D.

Teoretická část

1 Beton

1.1 Historie

Anglický název betonu, concrete, pochází z latinského „concretus“, což znamená kompaktní nebo zhuštěný. Produkty vhodné pro výrobu cementu se začaly tvořit přibližně před dvanácti milióny lety a asi 6500 let př.n.l. byly poprvé použity stavební materiály podobné betonu. Tyto stavební materiály používali například už nabatejští obchodníci anebo národ Beduínů. Ti objevili kolem roku 700 př.n.l. tekuté vápno se samostmelovacími vlastnostmi. Tyto národy byly schopny například aplikace betonových podlah, nebo stavby nepropustných jímek na vodu – ty byly také důvodem schopnosti těchto národů přežít v poušti. Zajímavostí i deklarací dlouhé životnosti betonu je fakt, že některé z těchto staveb se dochovaly dodnes (viz obrázek 1) [1].



Obrázek 1. Důkaz dlouhé životnosti pouštních vodních jímek postavených z primitivního betonu již starověkými civilizacemi.

Ve starověkém Egyptě byla znovu objevena voděvzdorná substance, která byla spojena sádrou a obsahovala sopečný popel. Naproti tomu staří Římané přidávali do betonu např. koňské žíně, což zvyšovalo jeho pevnost v tahu, nebo krev, která jej činila odolnějším vůči mrazu. Asyřané pojili beton jilem. Vápnitá pojiva byla v době 800 let př.n.l. používána ve Starém Řecku, na Krétě nebo Kypru. Staří Římané stavěli z betonu více než 700 let a během této dlouhé doby vyráběli tuto stavební látku například z oxidu vápenatého nebo do pojiva přidávali jemný písečný sopečný popel pucolán, který jejich betonu zajistil skvělé vlastnosti, či do betonu přidávali houbovitě sopečné sklo.

Důkazem kvality starověkořímského betonu jsou stavby jako je Colosseum, Forum Romanum, či v neposlední řadě Pont du Gard (viz obrázek 2) [2, 3,4].



Obrázek 2. Forum Romanum, nejstarší část Říma, pozůstatky starověkých staveb

Po pádu Římského impéria byla výstavba s páleným vápnem a tepelně aktivovanými jíly rapidně omezena, což mělo za následek úplné zapomenutí této techniky na několik století (asi od 5. do 14. století našeho letopočtu). Po této době útlumu se postupně vrátilo použití cementu jako pojiva betonu. Důkazem je několik evropských staveb z doby šestnáctého a sedmnáctého století, například francouzský Canal du Midi, nebo několik betonových staveb ve Finsku [1,5,7].

Hnacím motorem k masovému užívání betonu jako stavebního materiálu v době industriální revoluce byl Smeatonův maják. Angličan Smeaton byl na této stavbě průkopníkem v používání hydraulického vápna (spolu s kamenivem vytvářející formu betonu tuhnoucího i pod vodou). Navrhl celosvětově známou stavbu Smeatonův maják (viz obrázek 3). Britský zedník Joseph Aspdin pak v roce 1824 získal patent na výrobu portlandského cementu, který se běžně používá při míšení betonových směsí dodnes. Aspdinova metoda obsahovala dvojitý výpal, tzn. po kalcinaci cementu se přidal jíl a následoval výpal konečný, jen pravděpodobně užil nižší teploty, jelikož se produkt spíše podobal rychle tuhnoucímu přírodnímu cementu [6].



Obrázek 3. Smeatonův maják

Vyztužený beton (železobeton) byl vynalezen roku 1849 Francouzem Josephem Monierem a v zápětí, roku 1889, byl postaven první most ze železobetonové konstrukce. Důkazem pevnosti vyztuženého betonu mohou být například gigantické přehrady (viz obrázek 4) konstruované ve třicátých letech 20. století, a to Hooverova přehrada (hranice Arizony s Nevadou, USA; stavba otevřena 1.5.1936 prezidentem Rooseveltem) a přehrada Grand Coulee (Washington, USA; dokončení stavby 1.6.1942) [1,5, 7].



Obrázek 4. Hooverova přehrada (a) a přehrada Grand Coulee (b)

1.2 Složení

1.2.1 Portlandský cement

Portlandský cement je nejvíce používaným druhem cementu při výrobě betonu a malty. Portlandský cement a materiály jemu podobné jsou vyráběny pálením vápence s jílem nebo pískem. Vápenec v substanci zastává zdroj vápníku, písek či jíl je pak zdrojem

křemíku. Pálením těchto dvou látek vzniká slínek, ke kterému je v průběhu procesu navíc dodán sádrovec jako regulátor tuhnutí.

Princip výroby cementu

- ***Výroba surovinové moučky:***

Suroviny pro výrobu portlandského cementu jsou směsí CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 a MgO (ve formě jemného prášku „suchý proces“ nebo „mokrý proces“). Suroviny se většinou těží přímo z místních kamenolomů, které mnohdy mají nejvhodnější složení všech oxidů, někde jsou vápence znečištěné příměsí silikátu a železité konkrce. Na základě přesných chemických analýz se upraví poměr jednotlivých složek surovinové směsi. Tato směs je následně mleta v oběhových kulových mlýnech a současně sušena. Mletím vzniká surovinová moučka, která se poté dopravuje do železobetonových zásobníků a homogenizačních sil.

- ***Výpal slínku:***

Výpal portlandského slínku je nejdůležitějším procesem výroby cementu. Surovinová moučka prochází výměníkem tepla, ve kterém se surovina předeheje na teplotu o velikosti $800\text{ }^\circ\text{C}$ (viz obrázek 5). Ve výměníku dochází k využití tepla kouřových plynů a k dokonalému zachycení oxidu siřičitého, který je přeměňován na síran vápenatý (sádra). Dále se směs pálí na teplotu přibližně $1450\text{ }^\circ\text{C}$, tzn. až na mez slinutí, kdy se tvoří takzvané slínkové materiály, které jsou prudce zchlazeny, a vzniká slínek.



Obrázek 5. Čtyřstupňový předeheřivač typu Humboldt; Českomoravský cement a.s., závod Mokrá

- **Mletí cementu:**

Ze slínekových sil se slínek odebírá pro mletí v mlýnech, kde se namele společně s regulátory tuhnutí (energósádovec) a případně s dalšími složkami (struska, popílek apod.) na hotový produkt – cement, který je buď uložen do cementových sil, nebo ihned expedován.

Typy portlandského cementu

Portlandský cement je klasifikován podle dvou hlavních norem, evropské a americké. Do každé z těchto kategorií spadá několik typů cementu, např. cement běžný (type I) či cement mírně odolný vůči síranům (type II) podle americké normy ASTM. Evropská klasifikace rozděluje cement do pěti skupin:

- 1) Portlandský cement (vedle čisté suroviny může obsahovat nejvýše 5% příměsí)
- 2) Portlandský složkový cement (nejvýše 35% příměsí)
- 3) Struskový cement – též vysokopeční; Je odolný vůči chemicky agresivnímu prostředí a dobře odolává žáru.
- 4) Pucolánový cement - Je odolný vůči vlhkosti, slané vodě a chemicky agresivnímu prostředí. Používá se zejména pro konstrukce ve vlhkém nebo mokřém prostředí.
- 5) Složkový cement (obsahuje strusku i pucolán či popílek). Má ze všech druhů cementu nejnižší pevnost. Používá se pro méně namáhané betonové konstrukce a zejména na podlahy, cementové stěrky nebo betonové dlažby.

1.2.2 Voda

Voda se do směsi přidává pro hydrataci cementu a to minimálně 1/3 množství vody na 3/3 hmotnosti cementu. Rozlišujeme ji na záměsovou (dávkováná při výrobě) a ošetřovací (dodávána po zatuhnutí materiálu). Pro výrobu betonu je vhodná voda pitná, užitková, přírodní podzemní a povrchová. Naopak voda splašková, odpadní nebo hladová (taková, která vyluhuje soli ze stavebního prostředí, podobná destilované) vhodná není. Voda použitá při výrobě betonové směsi se musí vždy přezkoušet.

1.2.3 Plnivo

Plnivo v betonu je kamenivo různých druhů. Převážně se jedná o přírodní kámen, ale používá se rovněž kámen umělý a některé druhotné suroviny - struska, pucolán. Plnivo má v betonové konstrukci funkci pevné kostry. Rozlišujeme jeho zrnitost (granulometrii) neboli poměrnou skladbu zrn kameniva jednotlivých velikostí. Každé kamenivo je pak označeno příslušnou frakcí (např. 4/16) [8, 9].

1.3 Beton a jeho výhody

Beton je považován za nejrozšířenější stavební materiál. Uvedu zde proto několik důvodů, proč je po celá staletí mezi staviteli nejpoužívanějším materiálem.

Velmi dobrá odolnost a strukturní stálost. Podle asociace portlandského cementu (Portland Cement Association and the Environmental Council of Concrete Organizations) je životnost betonových konstrukcí dvakrát až třikrát vyšší, než je tomu u ostatních stavebních materiálů. Beton nepodléhá klasické biologické degradaci, je nehořlavý a nekoroduje (neplatí pro ocelové výztuže).

Pevnost betonu. Je určena kvalitou a podílem cementového kamene a soudržností rozhraní vnitřního povrchu kameniva s betonem. Je žádané, aby objemový podíl kameniva v betonu byl maximální, a to jak z ekonomického hlediska, tak i díky jeho pevnosti (kamenivo svou pevností – 60 až 300 MPa - několikanásobně převyšuje pevnost betonu). Dále je třeba zmínit vliv stáří betonu na jeho pevnost. Ta se postupem času zvyšuje, pro příklad roční betonový vzorek je až o 100% pevnější než vzorek, jehož pevnost se měřila tři dny po odlití.

Tepelná izolace. Domy, které mají betonové základy, zdi a podlahy jsou energeticky hospodárné díky jejich vlastnosti pohltit a následně v sobě po nějakou dobu zadržet tepelnou energii z okolního prostředí. Ve stavebním průmyslu se tato vlastnost vhodně kombinuje s technologií zateplování základů a obvodových zdí.

Tvárnost. Přímou na stavbě můžeme vytvářet konstrukce libovolných tvarů dle statických požadavků, což je předností zejména u jednolitých konstrukcí.

Environmentální šetrnost. Využití betonu ke stavbě například plotů, střech výškových budov nebo komunikací může být výhodné z hlediska většího odrazu světla, tudíž menší

absorpci solární radiace, než jakou pozorujeme u tmavých materiálů, například asfaltu. Navíc má beton vysokou tepelnou akumulaci, tzn. dlouho udrží teplo či chlad a zajišťuje tak tepelnou stabilitu v objektu. Díky tomu, že se beton vyrábí z prakticky přírodních přísad, je nutné zmínit, že je tím pádem zdravotně nezávadný pro obyvatele budovy.

Vysoká vodotěsnost betonu. Ačkoliv chemické látky mohou vyvolat korozi betonu a železobetonu, ve srovnání se dřevem a ocelí vydrží beton ve vodě bez vážného poškození. Vzhledem k této vlastnosti je beton vhodný pro použití v podvodní či podzemní konstrukci, například pro stavbu potrubí, přehrad, kanálů apod. (viz obrázek 6). Čistá voda (tzn. bez sulfátů, chloridů, oxidu uhličitého a dalších) způsobuje jen minimální degradaci betonu.



Obrázek 6. Odvodňovací potrubí v Černovicích, stoka E06

Minimum odpadu. Ze samotných betonových konstrukcí, které již lidstvu dosloužily, vzniká velice málo odpadu, díky jejich další využitelnosti, a to např. k vyplnění nové betonové konstrukce betonovým recyklátem, nebo k podsypání chodníků a jiných komunikací.

Výsledné vlastnosti betonových konstrukcí.

- Možnost použití různého typu plniva, popřípadě vyztužení
- Jednoduchá zpracovatelnost
- Relativně rychlé technické vlastnosti

- Vysoká pevnost v ohybu: do 40 MPa (dle typu výztuže, technologie přípravy a způsobu aplikace), v tlaku: do 100 MPa (i více, dle typu plniva/výztuže, technologie přípravy a modifikačních přísad).

Velká dostupnost základních surovin. Beton se primárně skládá z cementu, vody a plniva, kdy doplňkovými složkami mohou být různé přísady a příměsi [10,11,12].

1.4 Beton a jeho nevýhody

Hmotnost. Závisí na použitém kamenivu. U prostého betonu se pohybuje mezi 2000 - 2400 kg.m⁻³, u železobetonu mezi hodnotami 2300 - 2600 kg.m⁻³. Vysoká hmotnost betonu je nevýhodou zvláště u průmyslově vyrobených stavebních dílců, pro které potřebujeme mohutné zvedací stroje a speciálních vozy na přepravu, což nepříjemně zvyšuje náklady stavby.

Zvuková vodivost. Závisí na hutnosti betonu. Šíření zvukových vln se dá omezit použitím zvukových izolací.

Objemové změny betonových konstrukcí. Vznikají při zrání betonu a při teplotních změnách v konstrukci.

Rekonstrukce. Každá úprava konstrukce je díky vysoké pevnosti a tvrdosti betonu finančně nákladná a pracná.

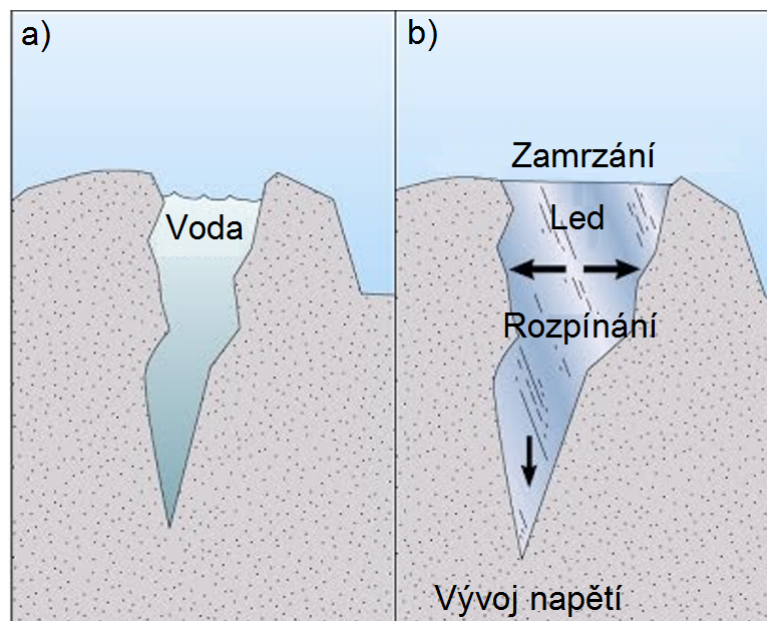
Snížená odolnost proti působení vlivů agresivního prostředí. Agresivní prostředí v cementovém kameni způsobuje korozi rozpouštěním nebo vznikem rozpustných solí (měkká voda, soli schopné výměny iontů, organické oleje a tuky). Korozi betonu lze přičíst fyzikálními vlastnostmi vody. Hlavním faktorem při degradaci betonu je proměnlivá vlhkost prostředí. Nízká vlhkost vzduchu spolu s vysokými teplotami vedou k (částečnému) vypaření vody obsažené v pórech kompozitu, a tudíž vzniká na hladině vody povrchové napětí kapaliny, které na stěny pórů působí tlakovou silou a tím je fyzicky namáhá. Běžným jevem je tvorba tzv. výkvětů, které vznikají střídavým smáčením a následně vyluhováním solí z betonu. Tyto soli reagují s CO₂ přítomným v ovzduší. Typicky se jedná o sírany a uhličitany sodné, draselné a vápenaté, kdy hlavní složku tvoří CaCO₃. Výkvěty nejsou problémem trvanlivosti, spíše estetickým nedostatkem betonových staveb (viz obrázek 7).



Obrázek 7. Výkvěty na betonovém ohrazení

Dalším typem poškození, které může u betonu nastat je opakující se proces zamrzání vody v puklině (pórech) betonu. Led nabývá o 9% více objemu, než byl původní objem vody. Nejprve zamrzá voda na povrchu a dále i uvnitř pukliny, což způsobuje tlak na okolní kompozit. Při opakovaném zamrzání vody uvnitř pukliny betonu je kompozitní struktura stále více namáhána (viz obrázek 8).

Běžným typem koroze betonu je degradace na základě ztráty (rozpuštění) hydroxidu vápenatého. Hydroxid vápenatý je v pevné podobě zastoupen v cementu (po 1 – 3 měsících hydratace) v množství 10 – 15 hmotnostních %. Voda obsažená v okolním prostředí, například dešťová voda či roztátý sníh, kondenzuje na povrchu betonu a na základě toho poměrně snadno rozpouští a vymývá Ca(OH)_2 , čímž ve struktuře kompozitu vznikají prázdné póry, které následně zapříčiňují úbytek pevnosti materiálu.



Obrázek 8. Degradace struktury kompozitu při opakovaném zamrzání vody v jeho trhlinách.

Síranová koroze. Zatímco suchý plyn v ovzduší nebývá pro kompozit hrozbou, ve spojení s vodou tvoří silnou kyselinu, nejčastěji H_2SO_4 nebo HNO_3 , které dokáží poměrně účinně degradovat strukturu betonu. Síranová koroze je jednou z nejčastějších korozí betonu. Síraný jsou přítomny zejména ve vodách blízko zdrojů průmyslového znečištění životního prostředí, ale i ve spodních vodách jílnatých zemin. Působením síranů vznikají těžce rozpustné produkty, které mají za následek falešné ztuhnutí betonu, čímž se při opakovaném procesu rozruší jeho struktura. Jelikož je cement zásaditého charakteru, korozi kompozitu zvyšuje fakt, že má voda v prostředí nízkou hodnotu pH (kyselá dešť). Při působení kyselého prostředí snadno degraduje jak beton samotný, tak i železobeton. Další problém, vyskytující se zejména v přímořských oblastech, je vliv sulfátů (síran amonný, síran hořečnatý) na cement. Sulfáty reagují s $Ca(OH)_2$ a produktem je síran vápenatý s hydroxidem hořečnatým [12, 13, 14].

2 Alternativní pojiva

2.1 Úvod a historie

Hlinitokřemičitá pojiva se řadí do skupiny alkalicky aktivovaných anorganických materiálů. Přípravují se z pevných hlinitokřemičitanů, obvykle ve formě prášku, rozpouštěných ve vysoce zásaditém aktivátoru (většinou se jedná o vodní sklo, příp. roztoky hydroxidu draselného/sodného).

Podle všech údajů byla hlinitokřemičitá pojiva poprvé využita pro stavební účely v době neolitu. Dále jsou zaznamenány i případy využití těchto pojiv ve středověku, a to konkrétně materiálů na bázi vápna, sopečného popela a křemičitého písku. Po patentování výroby portlandského cementu v 19. století se přešlo k masové výrobě páleného slínku a využívání hlinitokřemičitých pojiv výrazně zesláblo. V první polovině 20. století opět vzrostl zájem o alternativní pojiva, až v roce 1967 profesor V. D. Glukhovskij popsal nový typ pojiv a nazval je „půdními pojivy“. Jedná se o pojiva složená z jílových materiálů a alkalického roztoku, tím pádem se řadí mezi pojiva vápenná a hlinitokřemičitá. Další významným objevem - tekutými pojivy na bázi metakaolinu a rozpustného alkalického křemičitanu - přispěl francouzský vědec Joseph Davidovits. Davidovits nazývá tato pojiva geopolymery, a to díky jejich polymerní struktuře. Hlinitokřemičitá pojiva mohou být na bázi různorodých vstupních materiálů, a proto je systém jejich názvosloví dosud poměrně nejasný.

2.2 Složení

Primárně se geopolymery skládá z pevné hlinitokřemičité fáze a vodného roztoku alkalického křemičitanu. Co se týče pevné fáze hlinitokřemičitanu, jedná se o materiál obsahující dostatečné množství oxidů hliníku a křemíku. Může být jak přírodního, tak i syntetického původu. Přírodní hlinitokřemičitany zahrnují převážně jílové minerály, které mohou být za účelem zvýšení reaktivity tepelně zpracovány.

2.2.1 Pucolán

Pucolán (sopečný popel) je hlinitý nebo hlinitokřemičitý materiál, který je sám o sobě neschopný vazby. Za přítomnosti hydroxidu vápenatého a vody však tvoří na vzduchu i pod vodou tuhnoucí stálé sloučeniny. Oxid křemičitý, přítomný v pucolánu, reaguje s oxidem vápenatým za vzniku hydratovaného křemičitanu vápenatého (CSH gel)

2.2.2 Jílové minerály

Jílové minerály tvoří převážnou část půd, zemin a jílu. Můžeme je rozdělit do následujících skupin:

- **Kaolinit**

Vzniká při rozkladu hlinitokřemičitanů (živců, slíd a sopečného skla) ve vlhkém prostředí, je velice hojně rozšířen. Je charakteristický svojí kyselou povahou ($\text{pH} = 4$) a je zdrojem aktivního hliníku (využití v kosmetice, elektrotechnickém průmyslu apod.) Kaolinit se nachází v hornině zvané kaolin. Ve vlhkém stavu je tvárný, po vyschnutí je jeho konzistence sypká. Kaolinit je významný pro své široké využití – keramika a porcelán, nátěrové hmoty, příprava žáruvzdorných cihel a další.

- **Metakaolin**

Jedná se o pucolánový materiál vytvořený tepelnou aktivací kaolínu. Za teploty v rozmezí 500 až 800°C se z kaolinitu odstraní voda, čímž vzniká amorfni hlinitokřemičitan, metakaolin. Dehydratace kaolinitu je energeticky velmi náročný proces. Na reaktivitu metakaolinu má vliv jak teplota výpalu, tak i krystalová struktura a velikost zrn původního kaolinitu. Výhodou metakaolinu je ekologická nezávadnost a dobrá tepelná i chemická odolnost. Proto při výrobě betonových směsí často nahrazuje 8 až 20% portlandského cementu. Takový beton vykazuje hned několik technologicky příznivých vlastností. Mezi ně patří například snížení propustnosti betonu, nebo zvýšená odolnost vůči vlivům agresivního prostředí.

2.2.3 Vodní sklo

Jeho vynález se datuje do 19. století, kdy chemik Johann Nepomuk von Fuchs analyzoval čistou látku, kterou pojmenoval „vodní sklo“. Další výzkum vedl k průmyslové výrobě této látky. Vodní sklo vzniká reakcí oxidů křemíku (křemičitý písek zreaguje s alkalickými uhličitany nebo hydroxidy) a oxidů alkalických kovů, kde výsledná směs je rozpuštěna ve vodě, čímž vzniká alkalický roztok. Pro výrobu vodného roztoku křemičitanu se uplatňují zejména dva postupy:

- **Příprava vodního skla tavením.**

Jde v podstatě o tradiční přípravu sklářské suroviny pro výrobu skleněných předmětů, jedná se tedy o jednu z nejstarších metod přípravy. Princip spočívá v zahřátí vstupních surovin na teplotu tavení a následné prudkém zchlazení skloviny. V důsledku toho rozpraská na jemnou drť, která je následně za zvýšené teploty a tlaku rozpouštěna ve vodě či vodní páře. Tavidlem jsou alkalické oxidy (například soda), které se získávají tepelnou degradací hydroxidů nebo uhličitanů. Reakce ve sklářské peci probíhá už při teplotě kolem 700°C, ačkoliv pro dostatečnou rychlost reakce je nutná teplota asi dvakrát větší, tedy kolem 1400°C.

- **Příprava vodního skla hydrotermálním procesem.**

Vstupní suroviny jsou přímo rozpouštěny ve vodě, a to za zvýšené teploty (~120°C) a tlaku (~2MPa). V uzavřené tlakové nádobě se v alkalickém prostředí rozpouští zdroj SiO₂. Během tohoto procesu můžeme do tlakové nádoby přidat různá organická i anorganická aditiva, která upraví (vylepší) vlastnosti vodního skla.

Vodní sklo má poměrně široké spektrum využití v různých odvětvích průmyslu. Je možné ho použít pro ochranu umělého kamene (restaurování soch), jako plnivo do mýdel a přísadu do čisticích prostředků, jako odstraňovač těžkých kovů při čištění odpadních vod, jako příměs urychlující tuhnutí cementových směsí, nebo pro ochranu dřevěných konstrukcí proti požáru. Zvláště široké využití má vodní sklo díky svým skvělým hydroizolačním vlastnostem při tvorbě injektážních směsí (sanace budov). Z této vlastnosti vyplývá i využití při impregnaci a ochraně materiálů a povrchů. V případě našeho experimentu bylo vodní sklo využito jako zdroj rozpustných křemičitanů sodných, rozpouštědlo metakaolinu a jako zdroj záměsové vody [14, 15, 16].

2.3 Vlastnosti hlinitokřemičitých pojiv

Hlinitokřemičitá pojiva si v průběhu několika desetiletí získala pozornost vědeckých týmů i aplikační sféry. Tento zájem je motivován velmi dobrými fyzikálními a chemickými vlastnostmi této skupiny materiálů. Hlinitokřemičitá pojiva vykazují užité mechanické pevnosti v krátkém časovém intervalu (několik dní), jsou odolné vůči vysokým teplotám (do 1000°C), snadno odolávají otěru (závisí na typu plniva) [17].

Chemické vlastnosti hlinitokřemičitých pojiv jsou výrazně závislé na chemickém a strukturním složení vstupních surovin. Využití vhodně upravených jílových minerálů (s nízkým podílem příměsových oxidů Fe_2O_3 , MgO , TiO_2) vede k tvorbě strukturní sítě řetězců tvořených tetraedry SiO_4 and MAlO_4 , kde M mohou být monovalentní kationty Na^+ a/nebo K^+ (kompenzují elektrický náboj strukturního rozhraní). Pevný materiál je po vytvrzení tvořen definovaným podílem krystalické a amorfnní fáze (amorfní fáze převládá). Vzniká tak kompaktní struktura, s různě vázanou vodou ve své struktuře a s makroskopicky uzavřeným povrchem.

Takto připravené materiály vykazují zvýšenou odolnost proti rozpouštění struktury příp. karbonaci (krystalizace nových fází v pórech struktury). Také odolnost proti síranové (sulfátové) korozi je značně vysoká a to zejména z důvodu přítomnosti síranu sodného Na_2SO_4 , který strukturu hlinitokřemičité sítě zpevňuje, protože v systémech s vysokým obsahem Ca^{2+} působí jako alkalické rozpouštědlo a může se podílet na tvorbě strukturní sítě s nezreagovanými složkami [18].

Praktická část

3 Příprava zkušebních těles

Praktickou částí této práce byla příprava zkušebních těles z betonu a geopolymery. Prvním krokem byla příprava betonové směsi (viz tabulka číslo 1) a geopolymerní hmoty (viz tabulka č. 2) dle receptury.

	Hmotnost (g)	Hmot.%
Baumit Beton B 30, průmyslově vyráběná suchá směs pro přípravu betonu třídy C25/30, zrnitost 4 mm. Třída pevnosti je dle EN 206-1.	1000	88,5
Voda kohoutková	130	11,5

Tabulka č. 1

	Hmotnost (g)	Hmot.%
Prášková směs jemně mletého metakaolinu a vysokopecní strusky	250	100
Vodný roztok křemičitanu sodného	200	80

Míchání matrice - 6 minut

Plnivo: kalcinovaný lupek, drcený (frakce 0-0,5 mm)	562,5	225
--	-------	-----

Postupné přidávání plniva, míchání - 6 minut

Tabulka č. 2

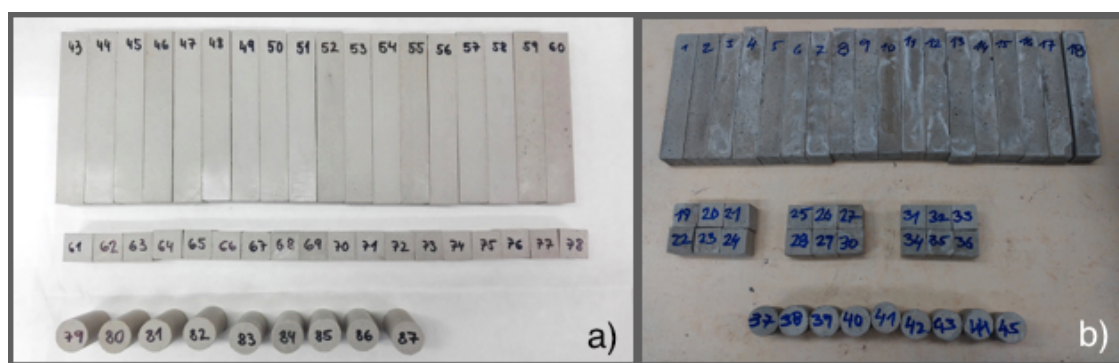
Druhým krokem bylo dokonalé vyplnění forem. Použity byly dva druhy forem:

- Krychle o rozměrech 20×20×20 mm – pro zkoušku pevnosti v tlaku.
- Kvádr o rozměrech 20×20×160 mm – pro zkoušku pevnosti v tahu za ohybu.

Vyplněné zkušební formy byly uzavřeny do neprodyšné PE folie, z důvodu zamezení rychlého vyschnutí zkušebních těles na jejich povrchu. Druhý den, po vytvrzení hmot, byly vzorky vyňaty z forem a znovu uzavřeny do neprodyšného obalu.

3.1 Expozice vzorků v agresivním prostředí

Připravená zkušební tělesa zrála za standardních laboratorních podmínek (22°C, vlhkost 30%) dvacet osm dní. Z betonové směsi bylo pro expozici v agresivním prostředí (roztok NaOH, H₂SO₄) připraveno 87 zkušebních těles. Ukázka části série zkušebních těles z betonové směsi (viz obrázek 9b).

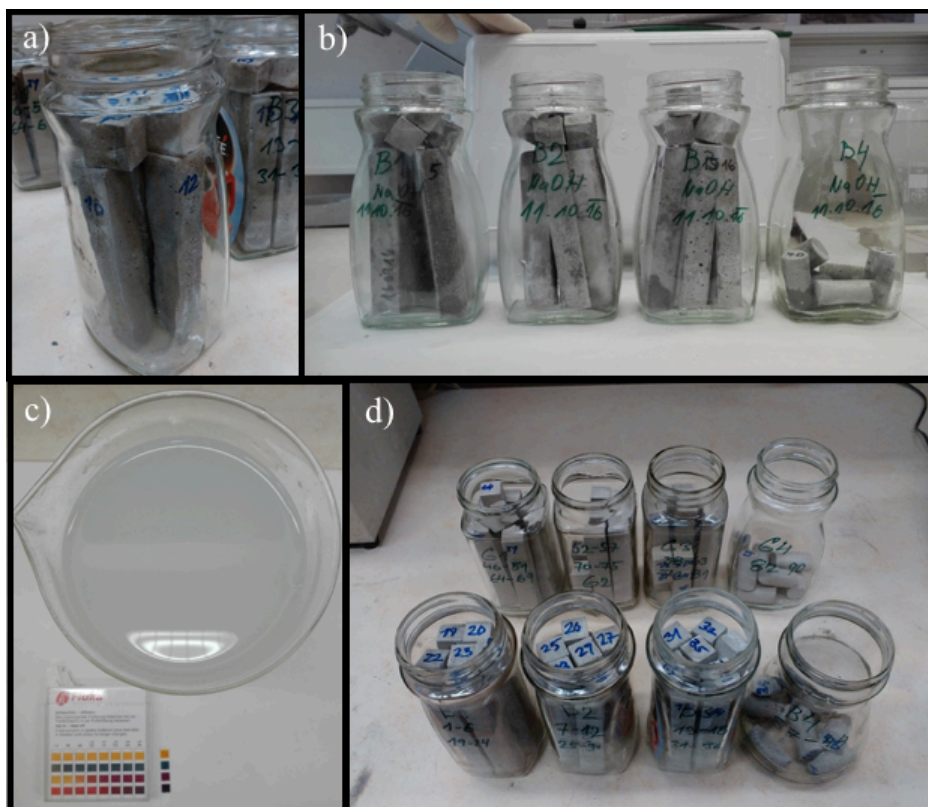


Obrázek 9. Vzorky betonu připravené k maceraci v kyselině sírové

Zkušební tělesa z alternativní geopolymerní hmoty byla připravena v celkovém počtu 90 kusů. Ukázka části série zkušebních těles z geopolymerní směsi (viz obrázek 9a).

Čtyřicet dva zkušebních těles z betonové směsi bylo ponořeno do roztoku 8% NaOH a 45 zkušebních těles do roztoku 2% H₂SO₄. Zkušební tělesa z GP hmoty byla v počtu 45 ks ponořena do 8% NaOH, a v počtu 45 ks do 2% roztoku H₂SO₄. Dodatečně bylo připraveno 20 ks zkušebních těles od každé série (beton – tlak, ohyb; GP – tlak, ohyb) jako referenční zkušební tělesa pro srovnání výsledků s výchozím stavem.

Vzorky byly vystaveny zásaditému a kyselému prostředí po dobu 60 dní, a to uzavřené v neprodyšných skleněných nádobách (viz obrázek 10). Po této době byly z nádob vyndány a dále testovány.



Obrázek 10. Příprava zkušebních těles před expozicí

- a) Zkušební tělesa ve skleněné nádobě
- b) Boční pohled na vyplněné nádoby
- c) Hodnota pH roztoku louhu znázorněná na lakmusovém papírku
- d) Horní pohled na vyplněné nádoby

3.2 Měření hmotnostních změn

Před expozicí v agresivním prostředí byla všechna zkušební tělesa vysušena do konstantní hmotnosti, a to v laboratorní sušárně při 105°C (viz obrázek 11). Poté byly vzorky zváženy s přesností na desetiny gramu.



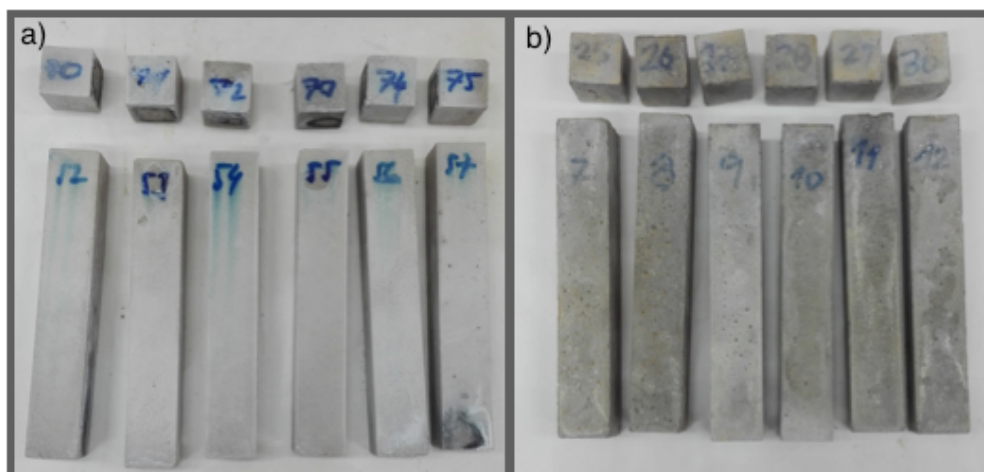
Obrázek 11. Vzorky betonu a geopolymery v laboratorní sušárně.

Po expozici těles v louhu nebo kyselině sírové byla série zkušebních těles osušena od zbytku roztoku a tělesa byla zvážena pro zjištění průměrného přírůstku hmotnosti. Takto byla stanovena relativní nasákavost vzorků v agresivním prostředí.

Další série zkušebních těles byla vážena po sušení při 105°C do konstantní hmotnosti. Záměrem experimentu bylo studium hmotnostních změn vzorků ve výchozím stavu a po expozici vzorků ve vlhkém a suchém stavu.

3.3 Testování zkušebních těles

Po uplynutí expoziční doby vzorků v agresivním prostředí se tělesa vyndala ze skleněných nádob a osušila se od přebytečné vlhkosti. Tato tělesa byla testována ihned po vyndání z agresivního prostředí, značena jako zavlhčená, tj. osušena pouze od povrchové vlhkosti (viz obrázek 12).



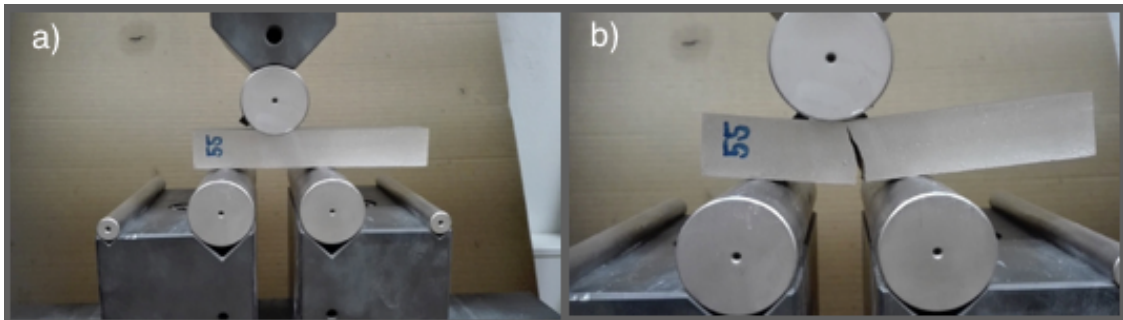
Obrázek 12. Vzorky geopolymery (a) a betonu (b) pro stanovení pevnosti v tlaku a ohybu po expozici – zavlhčena

Suchými vzorky jsou myšlena zkušební tělesa, která byla sušena v laboratorní sušárně při teplotě 105°C do konstantní hmotnosti. Po zaznamenání hmotnostního rozdílu byla tělesa připravena pro stejné zkoušky, které proběhly u vzorků zavlhčených.

Jako první byla zkoušena pevnost obou materiálů v ohybu, čili byly využity vzorky ve tvaru podlouhlého kvádru (viz obrázek 13). Dále byly testovány vzorky určené pro stanovení pevnosti v tlaku a to na stejném přístroji, avšak s odlišným příslušenstvím, tj. s dvěma podstavami na sebe kolmými válci (viz obrázek 14).

Pro stanovení mechanických vlastností byl využit Universální trhací stroj LabTest 6.1 (LABORTECH, CZ).

Výsledky měření jsou vykázány jako průměrná hodnota měření deseti zkušebních těles pro každou sérii a stav po expozici.



Obrázek 13. Geopolymerní vzorek před (a) a po (b) zkoušce pevnosti v ohybu.



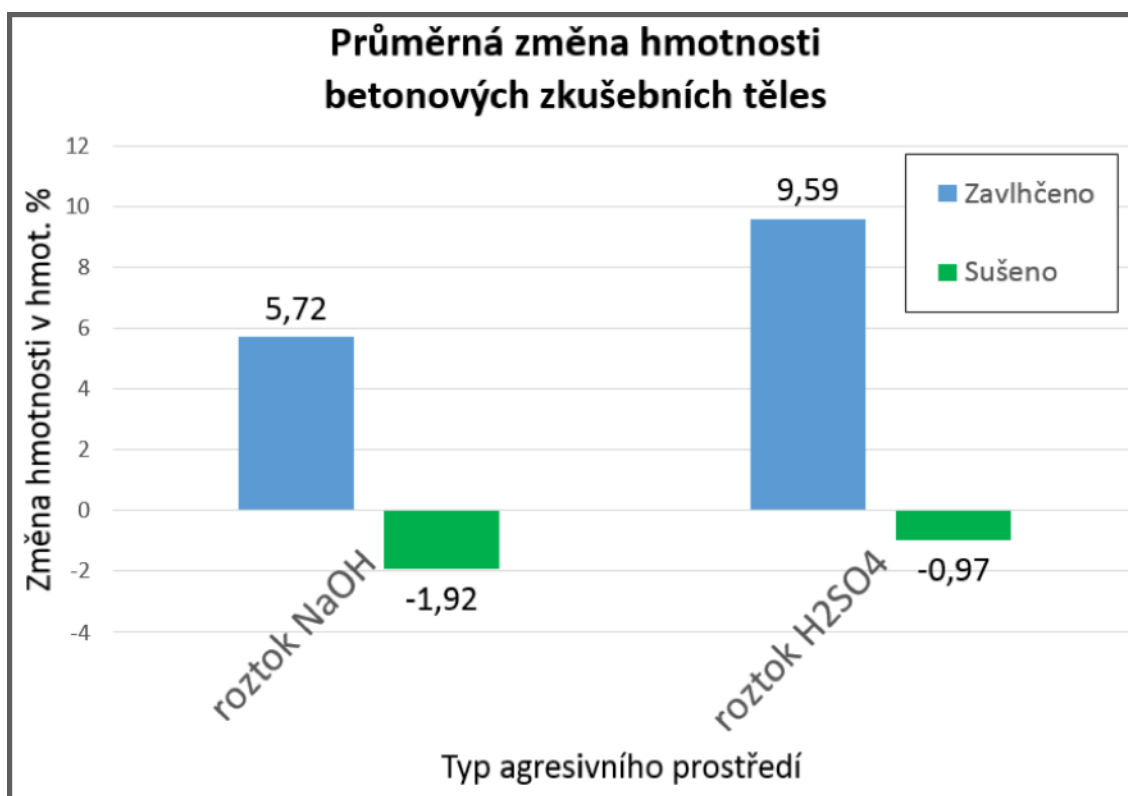
Obrázek 14. Geopolymerní vzorek před (a), v průběhu (b) a po (c) zkoušce pevnosti v tlaku.

4 Výsledky a diskuze

4.1 Změny hmotnosti

Z grafu (viz graf č. 15) je patrné, že vzorky betonu exponované v kyselině sírové nabyly přibližně o 4 % více hmotnosti než vzorky exponované v louhu. Tento výsledek potvrzuje skutečnost, že síranové roztoky mají dobrou smáčecí schopnost, a proto vnikají hluboko do struktury betonu. Roztok kyseliny sírové se tak výrazněji dostává do pórů a kapilár zkušebních těles.

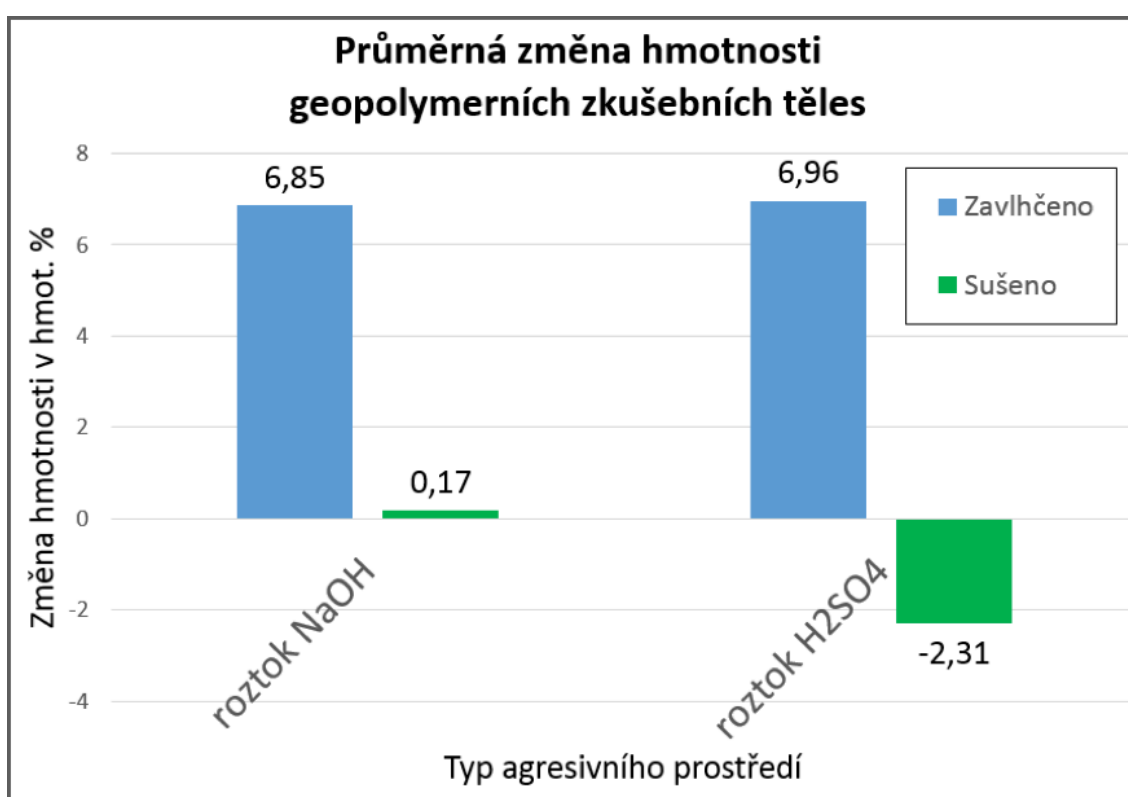
Z výsledků úbytku pevné složky, tj. po sušení těles do konstantní hmotnosti, je patrný menší rozptyl hodnot. Výsledný úbytek lze přičíst částečnému rozpuštění a výluhu cementového tmele na povrchu zkušebních těles. Rozdíl průměrných hodnot lze považovat v rámci statistické chyby za velmi podobný.



Graf 15. Průměrná změna hmotnosti betonových zkušebních těles

Změna hmotnosti geopolymerních těles vážených v zavlhčeném stavu vykazuje shodný nárůst, a to přibližně o 7 hmot. % (viz graf č. 16). Tento trend naznačuje stejnou strukturní stálost geopolymerních hmot v povrchové (příp. kapilární) oblasti absorpce vody, bez rozdílu pH nebo chemické povahy roztoku.

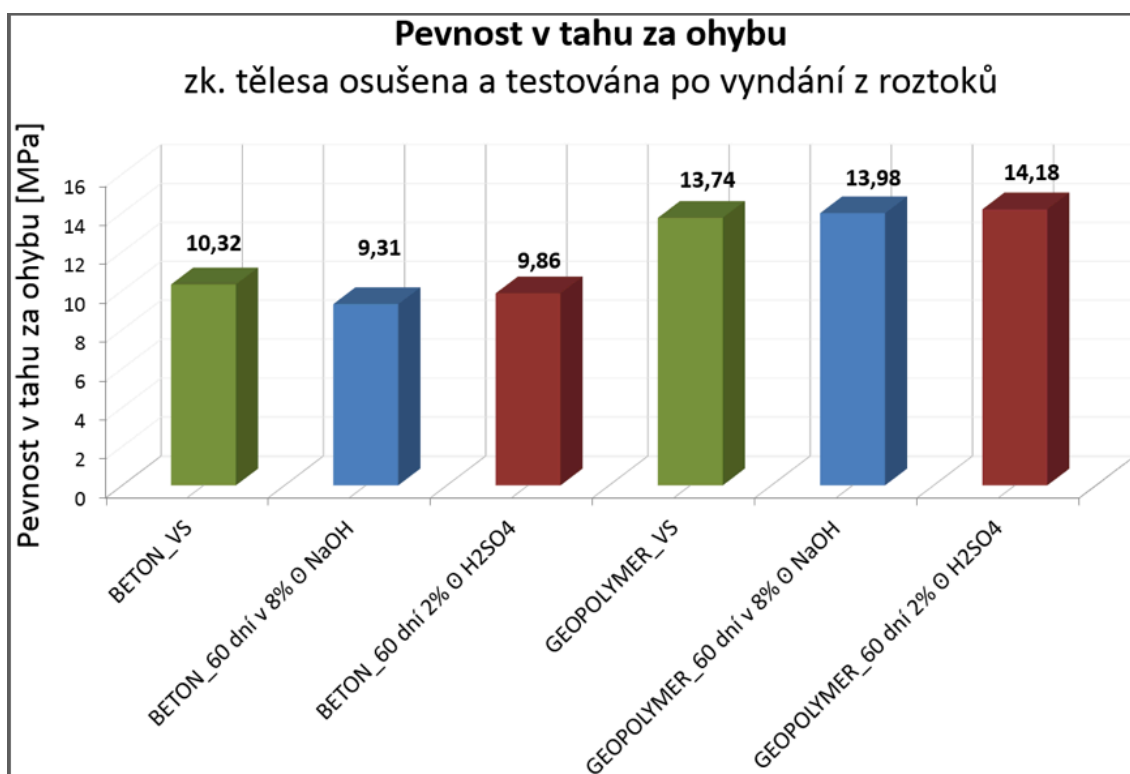
Velmi malý hmotnostní nárůst u sušených geopolymerních vzorků po expozici v roztoku NaOH potvrzuje předpoklad „dozrání“ některých nezreagovaných strukturních komponentů v alkalickém prostředí. Tento trend se nepotvrdil u roztoku H₂SO₄, kde dochází k částečnému vyloužení pevné složky a k více jak 2% hmotnostnímu úbytku.



Graf 16. Průměrná změna hmotnosti zkušebních těles z hlinitokřemičitanu – geopolymery

4.2 Mechanické vlastnosti

Z výsledků mechanických zkoušek vzorků z betonu i geopolymery nejsou patrné významné změny v pevnosti v ohybu (viz graf č. 17). Pevnosti betonu po expozici v zásaditém a kyselém prostředí po dobu 60 dní nepatrně klesají, avšak výsledky odpovídají intervalu standardní odchylky, která u pevnosti v ohybu činila max. 9 % výsledné průměrné hodnoty.

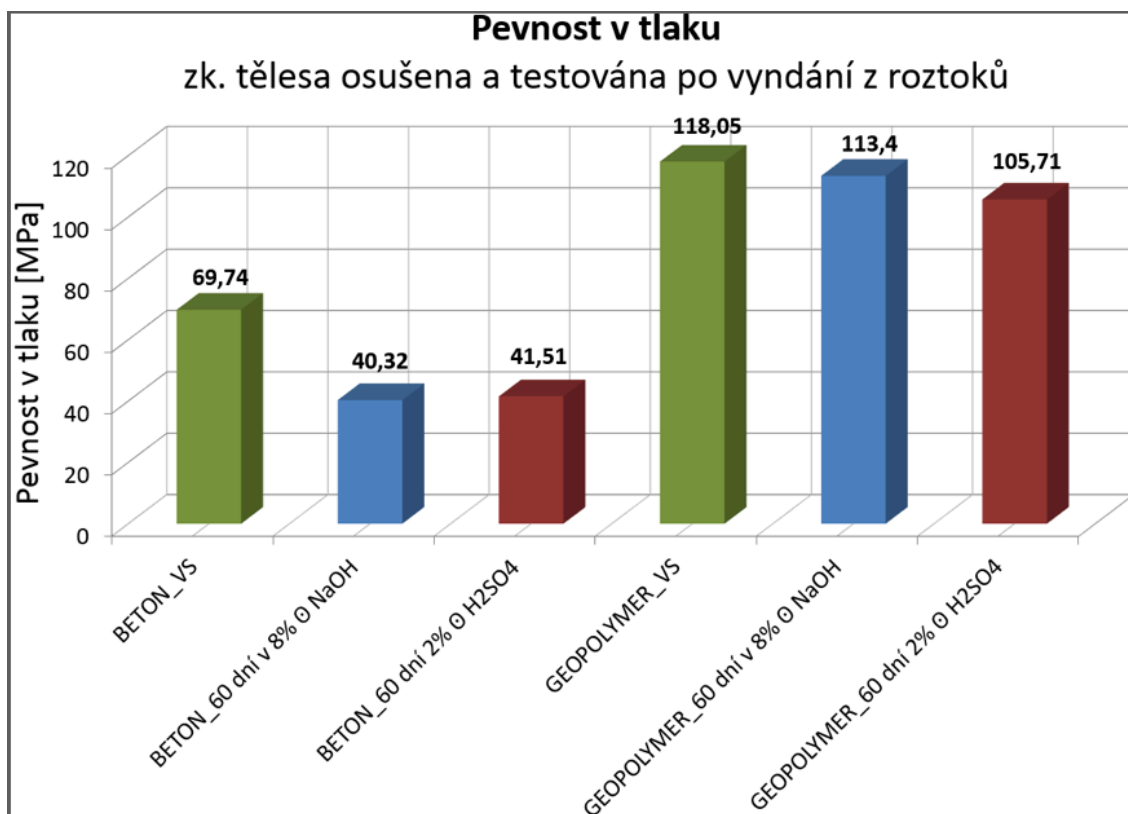


Graf 17. Průměrné hodnoty pevnosti v tahu za ohybu u zkušebních těles beton a geopolymer ve výchozím stavu (VS) a po expozici v agresivním prostředí

Z grafu (viz graf č. 18) je patrné, že beton bezprostředně po dvouměsíční expozici v agresivním prostředí vykazuje výrazně nižší pevnost v tlaku, než je tomu u vzorků z hlinitokřemičité hmoty.

V obou případech u zkušebních těles z betonu dochází po expozici k poklesu pevnosti v tlaku o cca 40 %. Tento trend je dán vlivem agresivního prostředí na strukturu kompozitu. Proces koroze, který způsobuje tvorbu nových krystalů, vede k nárůstu objemu a ke vzniku napětí uvnitř kompozitů.

Geopolymerní kompozit vykazuje ve výchozím stavu vyšší pevnost v tlaku o cca. 60 % oproti betonu. Vliv agresivního prostředí na výsledné pevnosti u geopolymerních těles je minimální. Rozdíl hodnot je možné zahrnout do intervalu standardní odchylky výsledků.

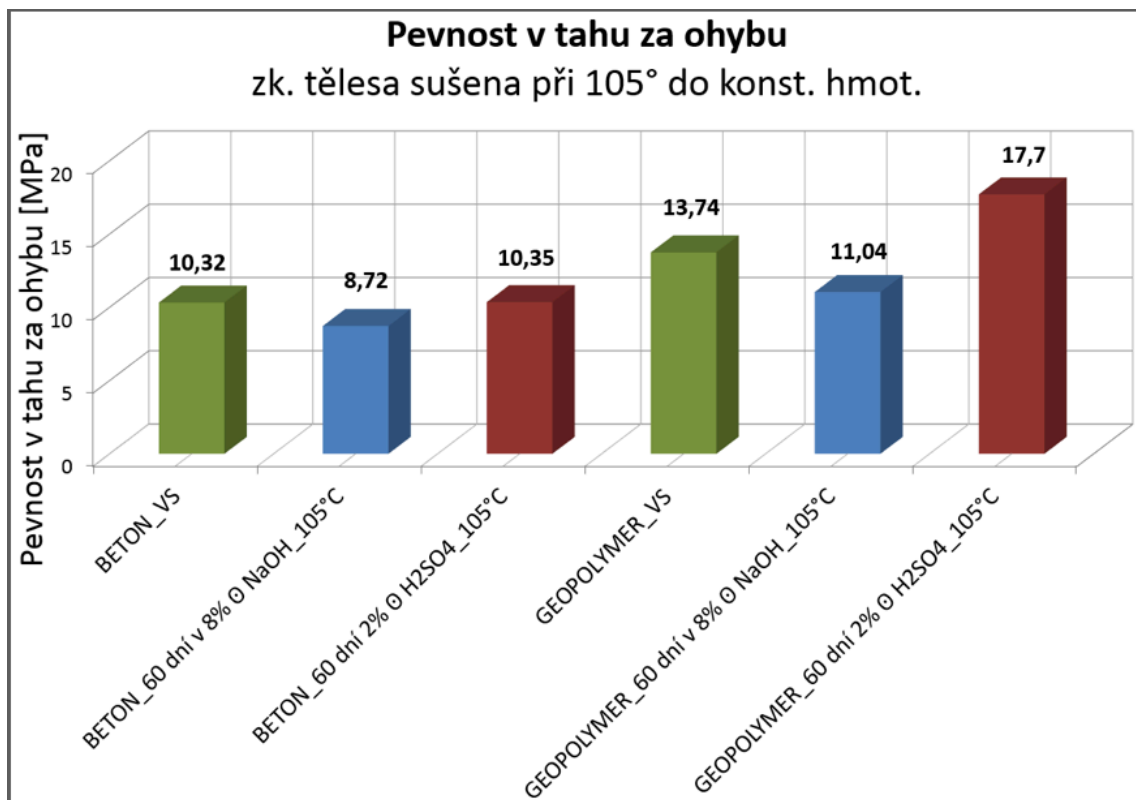


Graf 18. Průměrné hodnoty pevnosti v tlaku u zkušebních těles beton a geopolymery ve výchozím stavu (VS) a po expozici v agresivním prostředí

V porovnání s výsledky pevnosti v tahu za ohybu u zvlhčených zkušebních těles (viz graf č. 17) je patrné, že výsledky pevnosti u sušených zkušebních těles se příliš nemění. Pevnosti v ohybu u betonových zkušebních těles po vysušení mírně klesají vlivem degradace struktury a dehydratace pórů a kapilár na povrchu vzorku.

Vysušené vzorky z geopolymerního kompozitu vystavené kyselému prostředí vykazují o cca 26 % vyšší pevnost v ohybu oproti vzorkům testovaným za vlhka.

Tento trend lze pravděpodobně přičíst vzniku nových krystalických struktur v pórech kompozitu. Vzniklé krystalické fáze zaplňují póry a dochází tak ke zvýšení mechanické odolnosti.

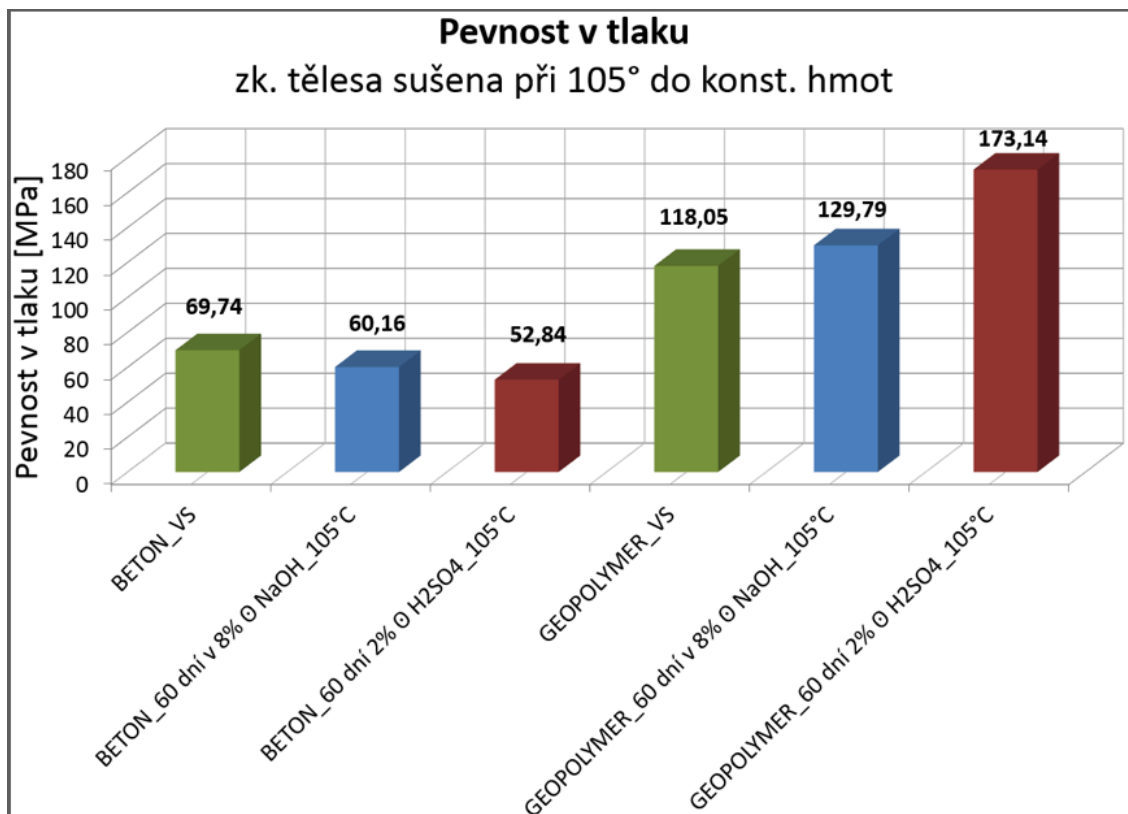


Graf 19. Průměrné hodnoty pevnosti v tahu za ohybu u zkušebních těles beton a geopolymer ve výchozím stavu (VS) a po expozici v agresivním prostředí – zkušební tělesa sušena do konstantní hmotnosti při 105°C

Výsledky pevnosti v tlaku u vysušených zkušebních těles z betonu potvrzuje klesající trend mechanické pevnosti.

Vysušené vzorky z geopolymerního kompozitu vystavené kyselému prostředí vykazují o cca 70 % vyšší pevnost v tlaku oproti vzorkům testovaných za vlhka.

Tento výsledek potvrzuje předchozí měření, které lze vysvětlit pozitivním vlivem krystalických fází vznikajících v pórech geopolymery.



Graf 20. Průměrné hodnoty pevnosti v tlaku u zkušebních těles beton a geopolymer ve výchozím stavu (VS) a po expozici v agresivním prostředí – zkušební tělesa sušena do konstantní hmotnosti při 105°C

Závěr

Z realizace experimentu a ze získaných dat je možné vyvodit několik závěrů:

Síranové roztoky mají dobrou smáčecí schopnost, a proto vnikají hluboko do struktury betonu. Roztok kyseliny sírové se tak výrazněji dostává do pórů a kapilár betonových zkušebních těles.

Změna hmotnosti geopolymerních těles naznačuje stejnou strukturní stálost geopolymerních hmot v oblasti povrchové (příp. kapilární) absorpce vody, bez rozdílu pH nebo chemické povahy roztoku.

Ze srovnání pevnosti v tahu za ohybu je patrné, že výkyvy hodnot u obou typů exponovaných těles testovaných za vlhka jsou minimální.

Geopolymerní kompozit vykazuje ve výchozím stavu vyšší pevnost v tlaku o cca 60 % oproti betonu. Vliv agresivního prostředí na výsledné pevnosti u geopolymerních těles je minimální.

Pevnosti v ohybu u betonových zkušebních těles po vysušení mírně klesají vlivem degradace struktury a dehydratace pórů a kapilár na povrchu vzorku.

Vysušené vzorky z geopolymerního kompozitu vystavené kyselému prostředí vykazují o cca 70 % vyšší pevnost v tlaku oproti vzorkům testovaných za vlhka. Tento výsledek potvrzuje předchozí měření, které lze vysvětlit pozitivním vlivem krystalických fází vznikajících v pórech geopolymerního kompozitu.

Zdroje

Citace obrázků

Obrázek 1.a) Neuvedeno. In: Nabatea.net [online]. [cit. 2017-02-23].
Dostupné z: <http://nabataea.net/Photos/Humeima%20011.jpg>

Obrázek 1.b) Nabatean Cistern. In: Ancient Origins [online]. [cit. 2017-02-23].
Dostupné z: <http://www.ancient-origins.net/sites/default/files/cistern-nabataean-petra.jpg>

Obrázek 2. Forum Romanum. In: Historiasztuki [online]. [cit. 2017-02-23].
Dostupné z: http://www.historiasztuki.com.pl/KANON/KANON_STAR/forum-romanum-1.jpg

Obrázek 3. Smeatons Tower. In: Worldwide Lighthouses [online]. [cit. 2017-02-23].
Dostupné z: [http://www.worldwidelighthouses.com/resources/images/main-page-pictures/Eddystone-4-\(Smeatons-Tower\)-Main-Picture.png](http://www.worldwidelighthouses.com/resources/images/main-page-pictures/Eddystone-4-(Smeatons-Tower)-Main-Picture.png)

Obrázek 4.a) Hoover Dam. In: History [online]. [cit. 2017-02-23].
Dostupné z: http://www.history.com/s3static/video-thumbnails/AETN_History_VMS/21/154/History_Kaiser_Builds_Hoover_Dam_and_Warships_45407_SF_HD_still_624x352.jpg

Obrázek 4.b) Grand Coulee. In: Neuveden [online]. [cit. 2017-02-23].
Dostupné z: https://c5.staticflickr.com/8/7099/6925628836_a7fa6b35df_b.jpg

Obrázek 5. Předehříváč typu Humboldt. In: Neuveden [online]. [cit. 2017-02-23].
Dostupné z: <http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/pojiva/15.jpg>

Obrázek 6. Odvodňovací potrubí v Černovicích, stoka E06. In: Druhé Brno [online]. [cit. 2017-02-23].
Dostupné z: http://druhebrno.smerem.cz/Temata/Odvodnovaci_potrubi_v_cernovicich_stoka_e06/odvodnovaci_potrubi_v_cernovicich_stoka_e06_8.jpg

Obrázek 7. Výkvěty na ohrazení. In: Tzbinfo [online]. [cit. 2017-02-23].
Dostupné z: <http://forum.tzb-info.cz/docu/diskuze/1248/124805/0001003.jpg>

Obrázek 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 - Vlastní fotografie

Graf 15, 16, 17, 18, 19, 20 – Vlastní tvorba

Použitá literatura

[1] The History of Concrete. InterNACHI [online]. [cit. 2017-02-24]

Dostupné z: <https://www.nachi.org/history-of-concrete.htm>

[2] A.C. Sparavigna (2011) *Ancient concrete works*. In: ARCHAEOGATE n. 27-10-2011. – ISSN 1973-2953

[3] MCLAREN, Douglas C. a Mary Anne WHITE. Cement: It's Chemistry and Properties. *Journal of Chemical Education*. 2003, ročník 80. (6), 623-624.

[4] MIHULKA, Stanislav. *V čem spočívalo tajemství betonu Římanů?* [online]. [cit. 23.1.2017].

Dostupné z: <http://www.osel.cz/6951-v-cem-spocivalo-tajemstvi-betonu-imanu.html>

[5] Timeline of Concrete. Auburn University [online]. [cit. 2017-02-24].

Dostupné z:

<http://www.auburn.edu/academic/architecture/bsc/classes/bsc314/timeline/timeline.htm>

[6] Eddystonský maják. *Wikipedia: the free encyclopedia*. [online]. 2001- [cit. 2017-01-23].

Dostupné z:

https://cs.wikipedia.org/wiki/Eddystonský_maják#Smeaton.C5.AFv_maj.C3.A1k

[7] The History of Concrete: Textual. Materials Science and Technology [online]. [cit. 2017-02-24].

Dostupné z: <http://matse1.matse.illinois.edu/concrete/hist.html>

[8] ŠIMŮNEK. Úvod do betonových konstrukcí [online]. [cit. 23.1.2017].

Dostupné z:

http://www.fce.vutbr.cz/BZK/simunek.p/AL01/uvod_do_betonovych_kci.pdf

[9] PYTLÍK, Petr. Technologie betonu. 2. vyd. Brno: VUTIUM, 2000. Učebnice (VUTIUM). ISBN 80-214-1647-5.

[10] BALOGH, Anne. WHAT MAKES CONCRETE A SUSTAINABLE BUILDING MATERIAL? In: Concretenetwork.com [online]. [cit. 2017-01-23].

Dostupné z:

https://www.concretenetwork.com/concrete/greenbuildinginformation/what_makes.html

[11] 10 Advantages of Concrete as Construction Material. In: CivilDigital.com [online]. [cit. 2017-02-20].

Dostupné z: <http://civildigital.com/10-advantages-concrete-construction-material-concrete>

[12] Výhody a nevýhody betonu. In: Stavební komunita [online]. [cit. 2017-02-20].

Dostupné z: <http://stavebnikomunita.cz/profiles/blogs/vyhody-a-nevyhody-betonu>

<http://www.ebeton.cz/encyklopedie/zakladni-vlastnosti-betonu>

[13] ŠKVÁRA, František. Technologie anorganických pojiv II: užití maltovin : koroze cementu. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 1995. ISBN 80-7080-225-1.

[14] SHI, Caijun, A. Fernández JIMÉNEZ a Angel PALOMO. ELSEVIER. Cement and Concrete Research: New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement. 2011. ISSN 0008-8846.

[15] PODMANICKÁ, Stanislava. Syntéza a charakterizace Epoxy – Geo hybridních kompozitních systémů. Strany 5 – 10. Plzeň, 2014. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. Tomáš Kovářik, Ph.D.

[16] DAVIDOVITS, J. Chemistry of geopolymeric systems, terminology. In *Géopolymère '99*. Saint Quentin, France, 1999.

[17] S.A. [ernal, J.L. Provis, Durability of alkali-activated materials: progress and perspectives, J. Am. Ceram. Soc., 97 (2014), pp. 997–1008

[18] John L. Provis, Angel Palomo, Caijun Shi, Advances in understanding alkali-activated materials, Cement and Concrete Research, Volume 78, Part A, December 2015, Pages 110-125