

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Využití elektrérenských popílků v oblasti alkalicky aktivovaných materiálů jako
alternativní stavební hmoty v dopravním stavitelství

Jan Novák

Bakalářská práce

2010

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan NOVÁK**
Osobní číslo: **D07265**
Studijní program: **B3709 Dopravní technologie a spoje**
Studijní obor: **Dopravní infrastruktura-Dopravní cesta**
Název tématu: **Využití elektrérenských popílků v oblasti alkalicky aktivovaných materiálů jako alternativní stavební hmoty v dopravním stavitelství**
Zadávací katedra: **Katedra dopravního stavitelství**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Volba (optimalizace) složení vybraných směsí.
2. Příprava laboratorních vzorků.
3. Laboratorní zkoušky takto připravených vzorků (hustota, nasákavost atd.)
4. Hodnocení vlivu jednotlivých příměsí na výslednou kvalitu vzorků.
5. Posouzení možností uplatnění v dopravním stavitelství, resp. porovnání s dosud používanou technologií - výrobní, ekonomické, ekologické aspekty.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

DAVIDOVITS, J. Geopolymer Chemistry and Applications. 2nd ed. Institut Géopolymere (Geopolymer Institute) : Saint-Quentin, France, 2008. ISBN 2-9514820-1-9.

Analýza využívání stavebních odpadů, odpadů z těžby a energetických odpadů, predikce poptávky po jejich využití. Studie Regionální rozvojové agentury Ústeckého kraje [online]. 2003 [cit. 2009-07-12].

Využití vedlejších produktů [online]. [Česká Republika] : ČEZ, c2009 [cit. 2009-08-06]. Dostupný z WWW: <http://www.cez.cz/cs/odpovedna-firma/zivotni-prostredi/programy-snizovani-zateze-zp/vyuziti-vedlejsich-produktu-uhelnych-elektraren.html>

URL ;<http://www.claypolymers.com/cz/clay-polymer/historie.html>;
Současný stav výzkumu v oblasti geopolymerů. 2005, ČRA o.p.s.

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Dr. Ing. Libor Beneš

Katedra mechaniky, materiálů a částí strojů

Datum zadání bakalářské práce: **30. listopadu 2009**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31. května 2010**

prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.

děkan

L.S.

doc. Ing. Vladimír Doležel, CSc.

vedoucí katedry

dne

Prohlášení autora

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 26.5.2010

Jan Novák

Poděkování

V tomto místě bych chtěl poděkovat všem, kteří mi byli nápomocni u vypracování a realizace mé bakalářské práce.

Jmenovitě to jsou:

Ing. Aleš Šmejda Ph. D.

doc. Dr. Ing. Libor Beneš

Ing. Luboš Minář

Dále bych chtěl poděkovat celému osazenstvu Katedry dopravního stavitelství, které mě podporovalo a poskytovalo poznatky po celou dobu studia.

Anotace

Tato práce se věnuje problematice vývoje a výroby geopolymérů. Zabývá se jejich základními fyzikálními vlastnostmi, které jsou důležité pro konstrukce, které by v budoucnu z toho materiálu mohly být vytvářeny. Věnuje se také optimalizaci a výrobě optimální směsi.

Klíčová slova

Geopolymer, pevnost v prostém tlaku, nasákavost, objemová hmotnost, tvrdost, optimalizace směsi, výroba směsi

Title

Application of alkaline activated materials based on power-station-ashes as an alternative building masses for civil engineering in transport constructions

Annotation

This thesis is engaged in the progression and the production of the geopolymers. It puts mind to the physical properties of these materials. Their properties are of consequence for the gunnery which could be constructed from geopolymer materials. It pursues of the optimization and the production of the ideal mixtures for these tasks.

Keywords

Geopolymer, unconfined compression strength, absorbability, density, hardness, mixture optimization, mixture production

Obsah

Seznam obrázků	3
Seznam tabulek	4
Seznam grafů.....	6
1. Úvod.....	7
1.1 Důvod vzniku geopolimerů	7
1.2 Historie geopolimerů.....	8
1.2.1 Mezopotámie	8
1.2.2 Egypt.....	9
1.2.3 Další historická fakta	10
2. Vypracování	12
2.1 Optimalizace složení vybraných směsí	12
2.1.1 Závislost pevnosti v tlaku na množství vody	12
2.1.2 Závislost pevnosti v tlaku na množství alkálií	14
2.1.3 Závislost pevnosti v tlaku na množství přidané vody	17
2.2 Příprava laboratorních vzorků.....	19
2.3 Laboratorní zkoušky připravených vzorků.....	26
2.3.1 Jednorázově provedené zkoušky	27
2.3.1.1 Zkouška tvrdosti pomocí Schmidtova kladívka	27
2.3.2 Vícenásobně provedené zkoušky	30
2.3.2.1 Zjištění objemové hmotnosti	30
2.3.2.2 Zkouška pevnosti v prostém tlaku	34
2.3.2.3 Zkouška nasákavosti	37
2.4 Posouzení možností uplatnění v dopravním stavitelství, resp. porovnání s dosud používanou technologií - výrobní, ekonomické, ekologické aspekty	42
2.4.1 Porovnání výrobních aspektů betonů a geopolimerů	42
2.4.1.1 Beton.....	42
2.4.1.2 Geopolymer	42
2.4.1.3 Zhodnocení	42
2.4.2 Porovnání ekonomických aspektů betonů a geopolimerů	43
2.4.2.1 Beton.....	43
2.4.2.2 Geopolymer	43
2.4.2.3 Zhodnocení	43

2.4.3 Porovnání ekologických aspektů betonů a geopolimerů	43
2.4.3.1 Beton.....	43
2.4.3.2 Geopolymer	44
2.4.3.3 Zhodnocení	45
2.4.4 Využití geopolimerů	45
3. Závěr.....	46
Použité zdroje.....	48

Seznam obrázků

Obr. 1 – Jedlá soda	11
Obr. 2 – Suroviny na přípravu.....	20
Obr. 3 – Míchání NaOH s vodním sklem.....	20
Obr. 4 – Odvažování roztoku	21
Obr. 5 – Míchání roztoku (NaOH, vodní sklo) s elektrárenským popílkem	22
Obr. 6 – Vibrování	23
Obr. 7 – Lití směsi do forem	24
Obr. 8 – Neseříznuté vzorky	25
Obr. 9 – Seříznuté vzorky	25
Obr. 10 – Seřezávání vzorků	26
Obr. 11 – Zkouška tvrdosti – Schmidtovo kladívko	28
Obr. 12 – Zkouška tvrdosti – Schmidtovo kladívko	28
Obr. 13 – Zkouška pevnosti v prostém tlaku – Usazení v lisu.....	35
Obr. 14 – Zkouška pevnosti v prostém tlaku – Rozdrcený vzorek	37
Obr. 15 – Zkouška nasákavosti	38

Seznam tabulek

Tab. 1 – Další historická fakta	10
Tab. 2 – Závislost pevnosti v tlaku na množství vody	13
Tab. 3 – Závislost pevnosti v tlaku na množství vody – Směrodatná odchylka	13
Tab. 4 – Závislost pevnosti v tlaku na množství vody – Medián.....	13
Tab. 5 – Závislost pevnosti v tlaku na množství vody – Odchylky v pevnosti.....	13
Tab. 6 – Závislost pevnosti v tlaku na množství alkálií	15
Tab. 7 – Závislost pevnosti v tlaku na množství alkálií – Směrodatná odchylka	15
Tab. 8 – Závislost pevnosti v tlaku na množství alkálií – Medián.....	15
Tab. 9 – Závislost pevnosti v tlaku na množství alkálií – Odchylky v pevnosti.....	15
Tab. 10 – Závislost pevnosti v tlaku na množství přidané vody	17
Tab. 11 – Závislost pevnosti v tlaku na množství přidané vody – Směrodatná odchylka	17
Tab. 12 – Závislost pevnosti v tlaku na množství přidané vody – Medián.....	17
Tab. 13 – Závislost pevnosti v tlaku na množství přidané vody – Odchylky v pevnosti.....	18
Tab. 14 – Zkouška tvrdosti – výsledky 1. skupiny.....	29
Tab. 15 – Zkouška tvrdosti – výsledky 2. skupiny.....	29
Tab. 16 – Zkouška tvrdosti – výsledky 3. skupiny.....	29
Tab. 17 – Zkouška tvrdosti – výsledky 4. skupiny.....	29
Tab. 18 – Zkouška tvrdosti – Průměrná tvrdost vzorků.....	29
Tab. 19 – Zjištění objemové hmotnosti – Parametry vzorků – Po dvou dnech	30
Tab. 20 – Zjištění objemové hmotnosti – Průměrné a další parametry vzorků – Po dvou dnech	30
Tab. 21 – Zjištění objemové hmotnosti – Objemová hmotnost, Průměrná objemová hmotnost – Po dvou dnech	31
Tab. 22 – Zjištění objemové hmotnosti – Parametry vzorků – Po sedmi dnech.....	31
Tab. 23 – Zjištění objemové hmotnosti – Průměrné a další parametry vzorků – Po sedmi dnech	31
Tab. 24 – Zjištění objemové hmotnosti – Objemová hmotnost, Průměrná objemová hmotnost – Po sedmi dnech.....	31
Tab. 25 – Zjištění objemové hmotnosti – Parametry vzorků – Po čtrnácti dnech	32
Tab. 26 – Zjištění objemové hmotnosti – Průměrné a další parametry vzorků – Po čtrnácti dnech	32
Tab. 27 – Zjištění objemové hmotnosti – Objemová hmotnost, Průměrná objemová hmotnost – Po čtrnácti dnech	32
Tab. 28 – Zkouška pevnosti v prostém tlaku – Po dvou dnech.....	35
Tab. 29 – Zkouška pevnosti v prostém tlaku – Po sedmi dnech	36
Tab. 30 – Zkouška pevnosti v prostém tlaku – Po čtrnácti dnech.....	36
Tab. 31 – Zkouška nasákavosti – Parametry seříznutých vzorků – Po sedmi dnech.....	39
Tab. 32 – Zkouška nasákavosti – Parametry neseříznutých vzorků – Po sedmi dnech	39
Tab. 33 – Zkouška nasákavosti – Průměrné parametry vzorků – Po sedmi dnech	39
Tab. 34 – Zkouška nasákavosti – Výsledky – Po sedmi dnech.....	39
Tab. 35 – Zkouška nasákavosti – Parametry seříznutých vzorků – Po dvaceti osmi dnech	39
Tab. 36 – Zkouška nasákavosti – Parametry neseříznutých vzorků – Po dvaceti osmi dnech	39

Tab. 37 – Zkouška nasákavosti – Průměrné parametry vzorků – Po dvaceti osmi dnech	40
Tab. 38 – Zkouška nasákavosti – Výsledky – Po dvaceti osmi dnech.....	40

Seznam grafů

Graf 1 – Závislost pevnosti v tlaku na množství vody – Četnosti hodnot	14
Graf 2 – Závislost pevnosti v tlaku na množství alkálií – Četnosti hodnot – 1. část	16
Graf 3 – Závislost pevnosti v tlaku na množství alkálií – Četnosti hodnot – 2. část	16
Graf 4 – Závislost pevnosti v tlaku na množství přidané vody – Četnosti hodnot	18
Graf 5 – Zjištění objemové hmotnosti – Časový vývoj objemové hmotnosti.....	33
Graf 6 – Zkouška pevnosti v prostém tlaku – Časový vývoj pevnosti v prostém tlaku.....	36
Graf 7 – Zkouška nasákavosti – Procentuelní vyjádření nasáklé vody po sedmi dnech.....	40
Graf 8 – Zkouška nasákavosti – Procentuelní vyjádření nasáklé vody po dvaceti osmi dnech	41

1. ÚVOD

1.1 Důvod vzniku geopolymérů

V dnešní době jsou základním stavebním materiálem betony. Beton je kompozitní materiál tvořený pojivem a plnivem, přičemž jeho nejpoužívanější formou je tzv. cementový beton, kde je jako pojivo použit cement a jako plnivo kamenivo. Dalším materiálem použitým pro tento druh betonu je voda. Kromě obyčejného cementového betonu jsou používány ještě další druhy betonu jako např. asfaltový beton, železobeton a předpjatý beton.

Asfaltový beton je používán zejména pro konstrukci vozovek. Je to v podstatě kombinace betonu a asfaltu.

Železobeton je používán převážně pro stavební konstrukce (např. mosty). Jako takový se skládá z betonu a železné výztuže (armatury). Jako výztuže se obvykle používají ocelové pruty.

Protože běžný beton, při svojí relativně vysoké pevnosti v tlaku, má nízkou pevnost v tahu, byl vyvinut materiál nazývaný jako předpjatý beton. Ten se skládá opět z klasického betonu, do něhož jsou zpravidla při výrobě nebo až dodatečně po vytvrnutí vkládána napínaná ocelová lana. Tento druh betonu je využíván např. pro konstrukci mostů s velkým rozpětím.

Při dnešních trendech je neustále nutné zvyšovat pevnosti betonu, což u cementového betonu nejde donekonečna, a proto jsou vyvíjeny nové druhy betonů jako drátkobeton, polymerbeton aj.

Beton jako takový má spoustu výhod i nevýhod. Mezi výhody lze počítat pevnost, trvanlivost, tvárnost a odolnost proti mechanickému poškození. Mezi nevýhody patří jeho hmotnost, tepelná a zvuková vodivost, objemové změny při jeho tunutí a tvrdnutí a hlavně to, že při výrobě cementu, který se do betonu přidává jako pojivo, je produkováno velké množství zplodin, především CO_2 . Při výrobě jedné tuny portlandského cementu vznikne přibližně jedna tona oxidu uhličitého, který je velice škodlivý pro atmosféru, protože díky němu vzniká tzv. skleníkový efekt.

Jelikož se stále modernizuje a staví, dnešní spotřeba a výroba cementu je obrovská. Zvláště na Dálném východě státy jako je např. Čína jsou velikány ve výrobě i spotřebě. Důvodem je rychle se rozvíjející infrastruktura.

Roční celková spotřeba cementu přesahuje číslo 2 000 miliónů tun, přičemž samotná Čína spotřebovává cca 44 % z této hodnoty. Cementářský průmysl vyprodukuje cca 5% celkové produkce CO₂ ročně, přičemž objem těchto zplodin tvoří cca 60 % vyprodukovaného CO₂ v průmyslu celkově. Třemi největšími výrobci cementu jsou Čína (704 mil. tun/rok), Indie (100 mil. tun/rok) a USA (94 mil. tun/rok).

Jako alternativa pro betony, by bylo možné používat geopolymery, kterým je především věnována moje práce. Geopolymer je materiál pro jehož výrobu není potřeba využívat cement a tedy odpadá i vznik CO₂. Místo něj se do geopolymérů přidávají materiály bohaté na křemík a hliník jako je například vysokopecní struska nebo elektrárenský popílek. Ty jsou odpadem při výrobě elektřiny nebo železa. Tyto materiály se musí aktivovat, aby začaly vznikat chemické vazby a materiál se změnil ze sypkého na vazký. Jako aktivátory do těchto materiálů se používají kombinace křemičitanu sodného nebo draselného a hydroxidu sodného nebo draselného.

1.2 Historie geopolymérů

Geopolymer sám o sobě je v podstatě anorganický polymer hlinitokřemičitanu získaný syntézou křemičitých a hlinitých materiálů. Geopolymer poprvé představil v roce 1979 profesor Josef Davidovits, i když existují podklady o tom, že podobný materiál byl vyvíjen již v roce 1950 v bývalém Sovětském svazu pod názvem grutocementy.

Podle teorie profesora Davidovitse však byly využívány materiály na bázi geopolymérů již ve starověku. A to například egyptskou, mezopotamskou, inkskou a dokonce římskou civilizací.

1.2.1 Mezopotámie

Tato civilizace se utvářela mezi řekami Eufrat a Tigris již kolem třetího tisíciletí před našim letopočtem. Typickými znaky této civilizace byly především velice rozvinutý urbanismus měst v podobě pravoúhle uspořádaných ulic a jejich monumentální stavby. Mezi tyto stavby patří především zikkuraty, které byly postaveny především z cihel, protože

v těchto oblastech je nedostatek kamene a také dřeva. Vznik cihly je proto připisován Sumerům.

Například zikkurat v Uru je starý přibližně pět tisíc let, přičemž životnost tehdejších cihel vzhledem k dnešním keramickým cihlám je obdivuhodná. Všechny tehdejší cihly nesou znaky dnešního keramického střepu, ale teplota vypalování (cca. 1000°C) je nepředstavitelná z hlediska nedostatku topného dřeva. Jsou jisté prameny naznačující, že tehdejší Sumerové používali na povrch vyvěrající ropu. Ovšem tehdejší cihly nevykazují ve vnitřní struktuře známky, že byly vypalovány za pomoci spalování dřeva či ropy nebo asfaltu.

Z těchto důvodů se vybízí teorie, že tehdejší cihly byly vyráběny geopolymerizací. Existují i důkazy, že tehdejší Sumerové dokázali vcelku přesně popsat chemické procesy.

1.2.2 Egypt

I egyptská civilizace podle mnoha důkazů znala technologii polymerů. Prvních z nich je fakt, že Egypťané v době stavby pyramid neznali ani kolo ani kladku, a proto vyvstává otázka, jak mohli bloky, některé v případě Cheopsovy pyramidy vážící až sedmdesát tun, dostat až 40 metrů vysoko. Pro vyzvednutí takového bloku do této výšky bez pomoci kladky by bylo třeba přibližně 2 000 otroků, přičemž dle doby výstavby (20 let), by každý den muselo být uloženo 400 kvádrů.

Dalším předpokladem, proč se nabízí použití geopolymerů při stavbě pyramid je fakt, že tehdejší Egypťané disponovali pouze měděnými nástroji neschopnými dělit vápenec. Dále je tu skutečnost, že vápenec často praská, přičemž při výrobě pěti milionů kvádrů, se žádné takové úlomky nenašly.

Teorii geopolymerů „nahrává“ také fakt, že při rentgenové analýze provedené na Cheopsově pyramidě se zjistilo, že struktura vápence neodpovídá žádné struktuře v dolech v tehdejší Egyptské říši.

1.2.3 Další historická fakta

Stavba	Místo	Průměr kopule (m)	Doba vzniku (n. l.)	Čas trvání stavby (let)	Použitý materiál
Pantheon v Římě	Řím	43,3	118 - 125	7	Geopolymer
Hagia Sofia	Istanbul	32,6	532 - 567	5	Geopolymer
Chrám sv. Petra	Řím	42,0	1400 – 1564	64	Kámen
Florentský dóm	Florencie	42,2	1420 – 1434	14	Kámen
Katedrála sv. Pavla	Londýn	38,8	1675 - 1710	35	Kámen
Panteon v Římě	Paříž	21,0	1755 - 1792	37	Kámen

Tab. 1 – Další historická fakta

Tato práce bude věnována geopolymérům vytvářených na bázi hydroxidu sodného (NaOH), elektrárenského popílku a vodního skla. Tyto geopolymery, vytvářené na bázi kalcinovaných materiálů (metakaolín, vysokopevní struska, elektrárenský popílek), dosahují vyšších pevností v tlaku než geopolymery vytvářené na bázi nekalcinovaných materiálů (kaolinitický jíl).

Geopolymery jako takové mají oproti běžně používaným materiálům i spoustu jiných nesporných výhod. Jsou to například:

- vysoká pevnost a odolnost
- vodotěsnost
- mrazuvzdornost (300 – 1300 zmrazovacích cyklů)
- vysoká chemická odolnost
- žáruvzdornost

Mají však i nevýhody, mezi které se řadí především:

- tvorba výkvětu na povrchu
- poměrně dlouhá doba tvrdnutí přirozenou cestou

Jako zajímavost bych uvedl fakt, že na povrchu vzorků se během jejich stárnutí, řádově po několika dnech, začne vytvářet hydrogenuhličitan sodný (NaHCO_3), tedy jedlá soda.



Obr. 1 – Jedlá soda

2. VYPRACOVÁNÍ

Při fázi plánování experimentů bylo zvoleno několik bodů, které budou během práce rozvedeny. Jsou to tyto body:

- optimalizace složení vybraných směsí
- příprava laboratorních vzorků
- laboratorní zkoušky připravených vzorků
- posouzení možností uplatnění v dopravním stavitelství, resp. porovnání s dosud používanou technologií - výrobní, ekonomické, ekologické aspekty

2.1 Optimalizace složení vybraných směsí

Geopolymer, na kterém byla práce provedena, je složen z elektrárenského popílku, vodního skla a hydroxidu sodného. V tomto kroku byl zvažován a zkoumán vliv každé z těchto složek na výslednou směs, která byla následně testována na pevnost v prostém tlaku. Zkoumány byly rozdíly v pevnosti v těchto případech:

- závislost pevnosti v tlaku na množství vody
- závislost pevnosti v tlaku na množství alkálií
- závislost pevnosti v tlaku na množství přidané vody

2.1.1 Závislost pevnosti v tlaku na množství vody

V tomto případě bylo experimentováno se zaměněním malého množství vodního skla za vodu. To znamená, že z ideálního množství vodního skla byla odebrána určitá část a místo ní byla přidána voda. Zkoumány byly celkově čtyři možné závislosti, proto jsou zkoušené vzorky rozděleny do čtyř skupin.

Teplota v laboratoři byla 22°C a vlhkost vzduchu 56 %.

vzorek č.	N1		N2		N3		N4	
	F [N]	p [MPa]	F [N]	p [MPa]	F [N]	p [MPa]	F [N]	p [MPa]
1	47034	23,024	55827	27,328	59 456	29,105	56 734	27,772
2	54292	26,577	62596	30,642	58 828	28,797	53 245	26,064
3	59246	29,002	40475	19,813	53 733	26,304	59 735	29,241
4	57003	27,943	62945	30,813	62 736	30,710	54 920	26,884
5	48151	23,571	64829	31,735	42 219	20,667	60 084	29,412
6	54850	26,850	61200	29,959	48 919	23,946	57 083	27,943
7	58060	28,422	57572	28,182	61 479	30,095	60 782	29,754
8	51710	25,313	59944	29,344	60 572	29,651	50 942	24,937
9	52826	25,859	57920	28,353	58 618	28,695	62 177	30,437
10	62317	30,505	59246	29,002	62 666	30,676	54 501	26,679
11	56804	27,807	67202	32,897	59 735	29,244	61 200	29,959

Tab. 2 – Závislost pevnosti v tlaku na množství vody

	Směrodatná odchylka			
	N1	N2	N3	N4
Síla (N)	4410,431	6687,391	6115,567	3508,719
Pevnost (MPa)	2,161	3,274	2,994	1,718

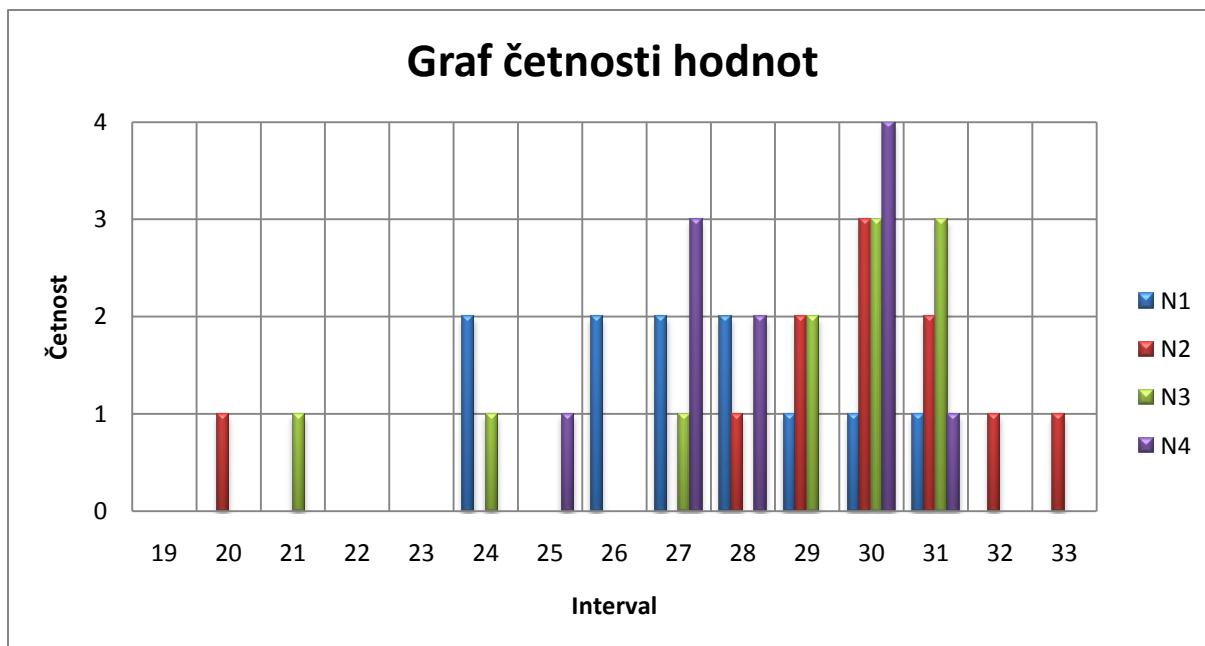
Tab. 3 – Závislost pevnosti v tlaku na množství vody – Směrodatná odchylka

	Medián			
	N1	N2	N3	N4
Síla (N)	54850	59944	59 456	57 083
Pevnost (MPa)	26,850	29,344	29,105	27,943

Tab. 4 – Závislost pevnosti v tlaku na množství vody – Medián

	N1	N2	N3	N4
směrodatná odchylka	2,161	3,274	2,994	1,718
průměrná pevnost (MPa)	26,816	29,484	28,501	28,190

Tab. 5 – Závislost pevnosti v tlaku na množství vody – Odchylky v pevnosti



Graf 1 – Závislost pevnosti v tlaku na množství vody – Četnosti hodnot

Vyhodnocena jako nejlepší byla směs N3, protože vykazuje nejstálější pevnost v tlaku, a to okolo pevnosti 30 MPa. Proto lze tuto směs považovat za optimální.

2.1.2 Závislost pevnosti v tlaku na množství alkálií

Při této zkoušce byl měněn obsah alkálií, v tomto případě NaOH, které byly přidávány do směsi. Vzorky byly opět testovány na výslednou pevnost v tlaku. Směs pro výrobu roztoku tedy zůstala stejná a měnila se hmotnost NaOH.

Vzorky byly opět rozděleny do čtyř skupin, které byly určeny obsahem NaOH ve směsi.

Teplota v laboratoři byla 23°C a vlhkost 54 %.

vzorek č.	A1		A2		A3		A4	
	F [N]	p [MPa]	F [N]	p [MPa]	F [N]	p [MPa]	F [N]	p [MPa]
1	15940	7,800	34832	17,050	48 081	23,530	72 645	35,560
2	13130	6,420	35596	17,425	51 151	25,040	72 296	35,390
3	14151	6,900	32796	16,054	45 359	22,204	69 644	34,092
4	15008	7,300	36035	17,640	47 174	23,092	74 250	36,347
5	14239	6,970	37417	18,316	49 267	24,127	60 293	29,515
6	14144	6,900	33246	16,275	48 290	23,640	70 970	34,741
7	15643	7,600	32330	15,826	45 499	22,273	79 135	38,738
8			33448	16,373	49 197	24,080	75 855	37,132
9			36032	17,638	48 918	23,950	70 551	34,536
10			40390	19,772			76 553	37,474
11			33455	16,370			70 551	34,536

Tab. 6 – Závislost pevnosti v tlaku na množství alkálií

	Směrodatná odchylka			
	A1	A2	A3	A4
Síla (N)	906,346	2281,191	1754,838	4669,823
Pevnost (MPa)	0,437	1,117	0,860	2,286

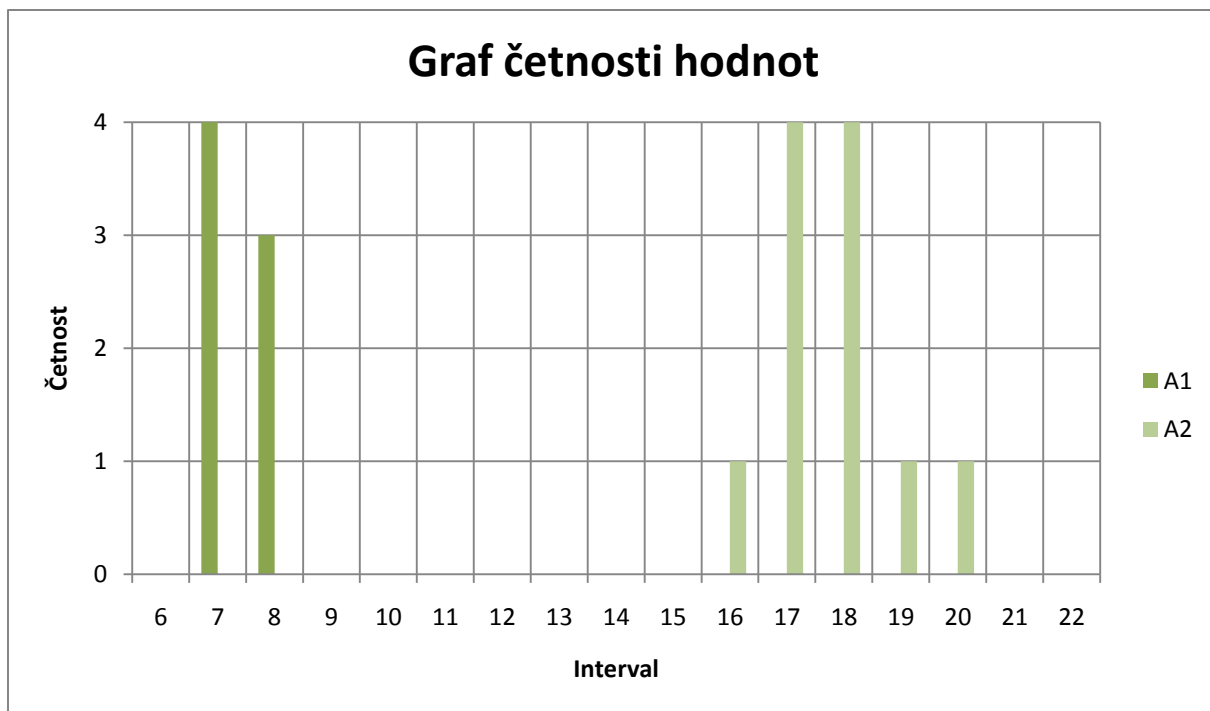
Tab. 7 – Závislost pevnosti v tlaku na množství alkálií – Směrodatná odchylka

	Medián			
	A1	A2	A3	A4
Síla (N)	14239	34832	48 290	72 296
Pevnost (MPa)	6,970	17,050	23,640	35,390

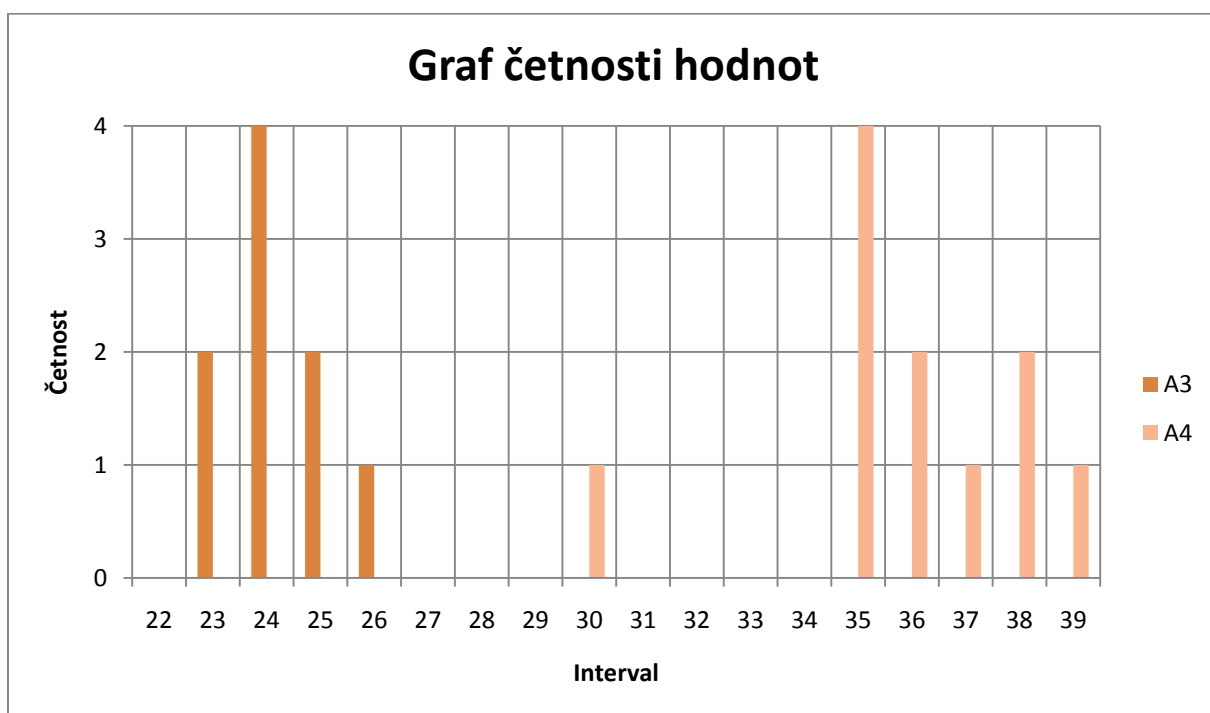
Tab. 8 – Závislost pevnosti v tlaku na množství alkálií – Medián

	A1	A2	A3	A4
směrodatná odchylka	0,437	1,117	0,860	2,286
průměrná pevnost (MPa)	7,13	17,016	23,527	35,534

Tab. 9 – Závislost pevnosti v tlaku na množství alkálií – Odchylky v pevnosti



Graf 2 – Závislost pevnosti v tlaku na množství alkálií – Četnosti hodnot – 1. část



Graf 3 – Závislost pevnosti v tlaku na množství alkálií – Četnosti hodnot – 2. část

Jelikož je v této zkoušce příliš velký rozptyl hodnot, byl graf kvůli přehlednosti rozdělen do dvou částí. V prvním grafu jsou uvedeny intervaly od 6 do 22 MPa, kam spadají vzorky ze skupiny A1 a A2. V druhém grafu jsou uvedeny intervaly od 22 do 39 MPa, kam spadají vzorky ze skupiny A3 a A4.

Jako nejlepší byla vyhodnocena směs A4, protože vykazuje největší pevnosti v tlaku, a to pevnosti mezi 35 a 39 MPa. Jeden vzorek z této skupiny vykázal pevnost 30 MPa, ale tento výsledek je možno zanedbat z důvodu možné vady ve výrobě nebo testování vzorku.

2.1.3 Závislost pevnosti v tlaku na množství přidané vody

Při této zkoušce bylo k optimální směsi přidáno malé množství vody. V tomto případě byly vzorky opět testovány na výslednou pevnost v tlaku.

Vzorky byly tentokrát rozděleny do třech skupin, podle množství vody přidané do optimální směsi.

Teplota v laboratoři byla 20°C a vlhkost 59 %.

vzorek č.	H1		H2		H3	
	F [N]	p [MPa]	F [N]	p [MPa]	F [N]	p [MPa]
1	43126	21,110	38381	18,790	41591	20,360
2	43615	21,350	38822	18,820	46895	22,960
3	47174	23,092	43126	21,110	46964	22,990
4	44662	21,863	36916	18,080	44522	21,790
5	44033	21,565	33426	16,360	40475	19,810
6	45569	22,317	31821	15,580	43894	21,490
7	41591	20,360	32100	15,710	41661	20,390
8	38311	18,754	44313	21,690	44592	21,830
9	37753	18,481	36706	17,970	42488	20,770
10	37613	18,412	36916	18,070		
11	42491	20,800	41661	20,390		

Tab. 10 – Závislost pevnosti v tlaku na množství přidané vody

	Směrodatná odchylka		
	H1	H2	H3
Síla (N)	3082,113	4010,992	2181,752
Pevnost (MPa)	1,509	1,959	1,071

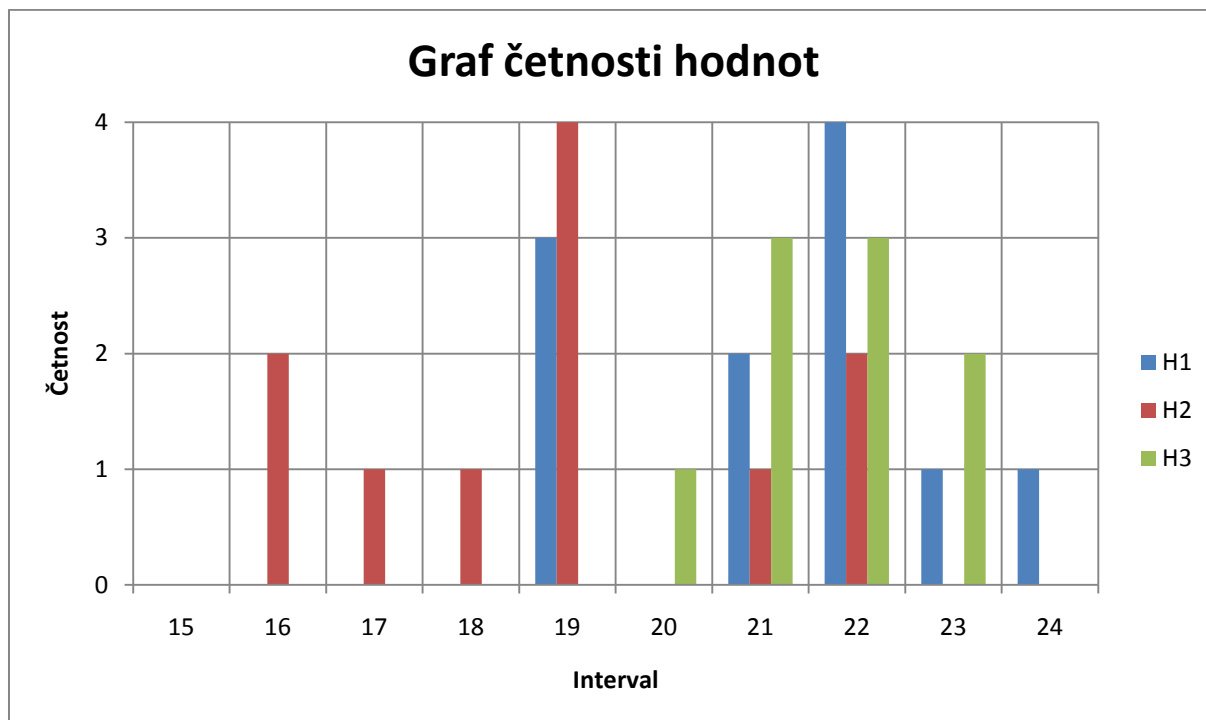
Tab. 11 – Závislost pevnosti v tlaku na množství přidané vody – Směrodatná odchylka

	Medián		
	H1	H2	H3
Síla (N)	43126	36916	43 894
Pevnost (MPa)	21,110	18,080	21,490

Tab. 12 – Závislost pevnosti v tlaku na množství přidané vody – Medián

	H1	H2	H3
směrodatná odchylka	1,509	1,959	1,071
průměrná pevnost (MPa)	20,731	18,367	21,370

Tab. 13 – Závislost pevnosti v tlaku na množství přidané vody – Odchylky v pevnosti



Graf 4 – Závislost pevnosti v tlaku na množství přidané vody – Četnosti hodnot

Jako nejlepší by se mohla jevit skupina H1, protože je v ní obsažena nejvyšší hodnota. My jsme ale jako nejlepší vyhodnotili skupinu H3, protože má nejstálější pevnost v tlaku v intervalu od 20 do 24 MPa a nevykazuje žádné zvláště velké výchylky od tohoto intervalu.

2.2 Příprava laboratorních vzorků

Tato podkapitola bude věnována přípravě laboratorních vzorků.

Seznam použitých pomůcek:

- větší nádoba na míchání výsledné směsi
- kádinky
- laboratorní váhy s přesností 0,01 g
- vrtačka s hřídelovou vrtulí
- umělohmotná lopatka nebo naběračka pro přelévání směsi do forem
- vysokofrekvenční stolek BRIO VSB 15
- sada forem na odlévání vzorků (ze silikonu Lukopren N1522)
- sušárna KBC G 100/250
- suroviny na přípravu (hydroxid sodný (dále NaOH), vodní sklo, elektrárenský popílek z elektrárny Opatovice nad Labem)
- ochranné pomůcky (brýle, rukavice)
- stolní kotoučová pila s upínacím svěrákem

Postup:

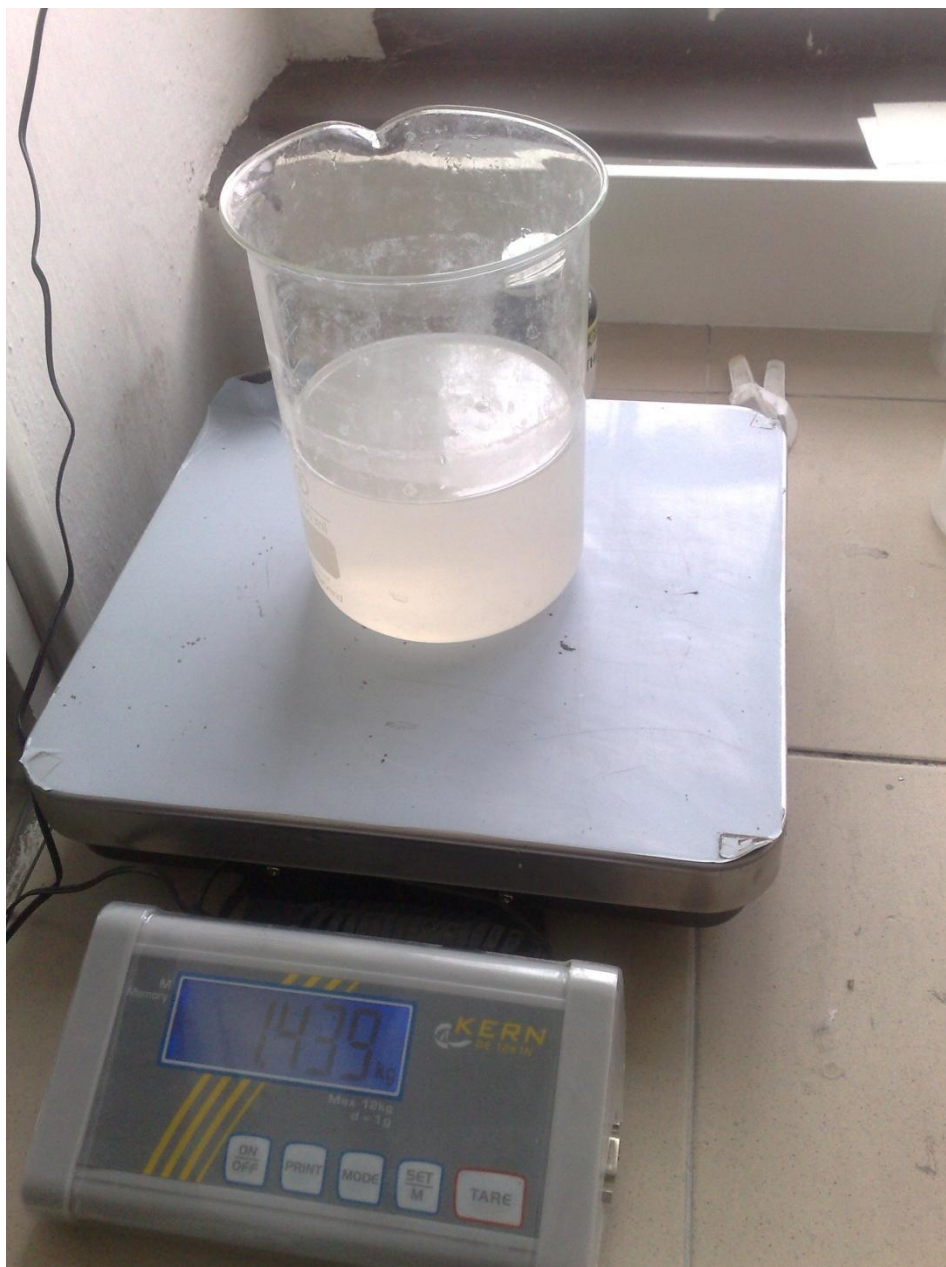
Jako první musí být kádinky zváženy s přesností na 0,01 g. Do jedné z nich bylo odváženo potřebné množství NaOH a do další vodní sklo, oboje s přesností na 0,01 g. Dále se velice opatrně přesype NaOH z kádinky do nádoby s vodním sklem. Potom musí být roztok míchán kvůli řádnému rozpuštění NaOH a jeho rovnoměrného rozptýlení do celého roztoku. Následně se roztok musí dát vychladnout, protože má díky silným termochemickým reakcím teplotu mezi 60-70°C. Roztok se musí vytvářet a míchat s ochrannými brýlemi, protože kromě vysoké teploty je vysoce zásaditý. Na stupni zásaditosti má hodnotu pH 14.



Obr. 2 – Suroviny na přípravu



Obr. 3 – Míchání NaOH s vodním sklem



Obr. 4 – Odvažování roztoku

Po dobu chladnutí roztoku se naváží potřebné množství elektrárenského popílku, a to opět s přesností na 0,01 g.

Po vychladnutí roztoku na teplotu okolního prostředí (s odchylkou $+5^{\circ}\text{C}$) se může roztok přimíchat do větší nádoby s elektrárenským popílkem, která byla během chladnutí připravena. Roztok musí být přelíván za použití ochranných pomůcek (brýle). Musí se přelívat pomalu a se směsí je nutné při přelévání vytrvale míchat. Když byl všechn roztok přelit do popílku, musí následovat řádné promíchání celé směsi tak, aby v ní nezůstaly shluky suchého popílku.

Po ručním zamíchání se použije vrtačka s hřídelovou vrtulí a směs musí být cca 3-5 minut míchána, aby dostala komplexní konzistenci a složení a aby se všechny suroviny řádně promísily a spojily. Tímto procesem se však dostane do směsi značný objem vzduchu. Po tomto kroku je již dosaženo vazké směsi, přičemž její vazkost závisí na obsahu NaOH. Když se přidá NaOH nadmíra, potom už je směs takřka nezamíchatelná, protože velmi rychle tuhne.



Obr. 5 – Míchání roztoku (NaOH, vodní sklo) s elektrérenským popílkem

Směs se pak dále, stále ještě v nádobě ve které byla míchána, dá na vibrační stůl, kde se směs třikrát po pěti minutách vibruje. Tento proces spočívá v tom, že vibrování trvá pět minut, pak se nechá směs nějaký čas odstát a tento postup se opakuje, jak je již výše zmíněno, celkem třikrát.



Obr. 6 – Vibrování

Když je směs řádně promíchána a ztuhne, může se přelít do forem. Tyto formy by měly mít tvar, který budou mít budoucí vzorky. Geopolymer je k materiálu forem vysoce adhezní, a proto byly vyrobeny speciální formy ze silikonu, ke kterému tento materiál nepřilne. Do každé formy by se mělo nalít trochu víc směsi, protože na závěr se přebývající množství seřízne nožem kvůli zarovnání vrchní plochy.



Obr. 7 – Lití směsi do forem

Vzorky jsou následně vloženy do sušárny, kde proběhne alkalická aktivace a rychlý nárůst pevnosti. Vzorky jsou v sušárně cca 20 hodin za teploty 70°C ($\pm 5^{\circ}\text{C}$)

Po vytvrzení se vzorky vyndají z forem a musí se u nich upravit spodní a vrchní plochy, aby k sobě byly navzájem rovnoběžné a byly obě dvě v rámci možností rovné. Zkouška pevnosti v tlaku totiž vyžaduje dvě na sobě navzájem kolmé plochy. Rovnání ploch je prováděno na stolní kotoučové pile.

Vzorek, u kterého mají být plochy upravovány, se upne do svěráku v kotoučové pile, zavře se kryt pily a seřízne se jedna strana. Pak se kryt otevře, vzorek se otočí a to samé se provede na druhé straně. Takto se upraví všechny vzorky.



Obr. 8 – Neseříznuté vzorky



Obr. 9 – Seříznuté vzorky



Obr. 10 – Seřezávání vzorků

2.3 Laboratorní zkoušky připravených vzorků

Pro otestování připravených vzorků bylo vybráno několik zkoušek. Jedna byla provedena jednorázově a další tři byly provedeny v určitých časových intervalech, aby byl vidět vývoj (zrání) vzorků v závislosti na čase. Teplota v laboratoři po čas zkoušek byla 22°C a vlhkost vzduchu 53 %.

Jednorázově provedené zkoušky:

- zkouška tvrdosti pomocí Schmidtova kladívka

Vícenásobně provedené zkoušky:

- zjištění objemové hmotnosti
- zkouška pevnosti v prostém tlaku
- zkouška nasákavosti

2.3.1 Jednorázově provedené zkoušky

2.3.1.1 Zkouška tvrdosti pomocí Schmidtova kladívka

Pro tuto zkoušku bylo celkově použito devět vzorků o různém složení a různém stáří. Stáří vzorků je dobře čitelné z onačení vzorků. U všech těchto vzorků byly seříznuty obě dvě plochy. Vzorky byly rozděleny do čtyř skupin podle data výroby.

Pomůcky:

- sada vzorků
- Schmidtovo kladívko

Postup:

Každý vzorek byl posuzován trojitým úderem jak na vrchní tak i spodní plochu. První úder byl vždy na střed vzorku a další dva více do krajů.

První vzorek byl položen na pevnou podložku, jelikož pro tyto zkoušky je nutný pevný podklad. Kladívko bylo umístěno do místa, kde měla být tvrdost zkoušena. Kladívko musí být nasměrováno ve směru kolmém k podlaze, protože při naklonění kladívka mimo úhel 90° (vzhledem k podlaze) by byla zkouška méně vypovídající. Následně bylo na kladívko potlačeno dolů, než zazněl úder. Příkladně se následně zaaretuje a ze stupnice se odečte naměřená hodnota.

Předchozí postup se opakuje pro každý vzorek.



Obr. 11 – Zkouška tvrdosti – Schmidtovo kladívko



Obr. 12 – Zkouška tvrdosti – Schmidtovo kladívko

Výsledky:

NÁZEV VZORKU	ZKOUŠENÁ STRANA	TVRDOSTI	PRŮMĚRNÁ TVRDOST
22.3. B	vrchní	při prvním úderu praskl	

Tab. 14 – Zkouška tvrdosti – výsledky 1. skupiny

NÁZEV VZORKU	ZKOUŠENÁ STRANA	TVRDOSTI	PRŮMĚRNÁ TVRDOST
13.4. S1 4	vrchní	13 40 36	25,8
	spodní	29 25 11	
13.4. S1 9	vrchní	18 40 43	34,8
	spodní	32 24 45	

Tab. 15 – Zkouška tvrdosti – výsledky 2. skupiny

NÁZEV VZORKU	ZKOUŠENÁ STRANA	TVRDOSTI	PRŮMĚRNÁ TVRDOST
19.4. S2 H1	vrchní	20 30 28	29,0
	spodní	30 28 34	
19.4. S2 H2	vrchní	38 36 40	39,3
	spodní	35 46 43	
19.4. S2 H3	vrchní	30 28 36	35,0
	spodní	37 45 37	

Tab. 16 – Zkouška tvrdosti – výsledky 3. skupiny

NÁZEV VZORKU	ZKOUŠENÁ STRANA	TVRDOSTI	PRŮMĚRNÁ TVRDOST
20.4. S3 13g	vrchní	40 42 37	38,5
	spodní	33 39 38	
20.4. S3 13g	vrchní	43 42 38	39,5
	spodní	35 22 44	

Tab. 17 – Zkouška tvrdosti – výsledky 4. skupiny

Červeně jsou označeny vzorky, které se při úderu kladívka odlouply. Z tohoto důvodu pro výpočet průměrné hodnoty byla zanedbána nejnižší a nejvyšší hodnota v souboru, aby údaj byl více vypovídající.

Vyhodnocení:

Mezi stářími vzorků a jejich tvrdostmi nebyla nalezena žádná vypovídající souvislost. Díky širokému spektru vzorků byla vypočítána průměrná tvrdost materiálu.

Průměrná tvrdost vzorků
37,7

Tab. 18 – Zkouška tvrdosti – Průměrná tvrdost vzorků

2.3.2 Vícenásobně provedené zkoušky

2.3.2.1 Zjištění objemové hmotnosti

Pro tuto zkoušku bylo použito 5 vzorků. Na objemovou hmotnost byly testovány po dvou, sedmi, čtrnácti a dvaceti osmi dnech. Vzorky nebyly seříznuty ani z jedné strany.

Pomůcky:

- Posuvné měřítko s přesností 0,1 mm
- Laboratorní váhy s přesností 0,01 g

Postup:

U každého vzorku byla třikrát změřena výška i průměr, a to na různých místech s přesností 0,1 mm a výsledky byly následně zprůměrovány.

V dalším kroku byla zjištěna hmotnost všech vzorků.

Výsledky:

Výsledky po dvou dnech:

	průměr			výška		
ρ_{v1}	51,0	51,9	51,7	81,6	81,9	81,9
ρ_{v2}	52,0	51,7	51,8	81,6	81,7	82,1
ρ_{v3}	51,1	52,3	52,1	83,0	83,1	82,9
ρ_{v4}	51,4	52,0	51,0	80,5	80,5	80,5
ρ_{v5}	51,6	52,2	50,5	80,6	80,7	81,0

Tab. 19 – Zjištění objemové hmotnosti – Parametry vzorků – Po dvou dnech

	průměrná výška (mm)	průměrný poloměr (mm)	objem (m ³)
ρ_{v1}	81,80	25,77	0,000170529
ρ_{v2}	81,80	25,92	0,000172521
ρ_{v3}	83,00	25,92	0,000175052
ρ_{v4}	80,50	25,73	0,000167385
ρ_{v5}	80,77	25,72	0,000167722

Tab. 20 – Zjištění objemové hmotnosti – Průměrné a další parametry vzorků – Po dvou dnech

	hmotnost (kg)	objemová hmotnost (kg/m³)
ρ_{v1}	0,261	1 531,700
ρ_{v2}	0,263	1 524,455
ρ_{v3}	0,269	1 537,832
ρ_{v4}	0,255	1 521,638
ρ_{v5}	0,262	1 563,893
		Průměrná objemová hmotnost (kg/m³)
		1 535,904

Tab. 21 – Zjištění objemové hmotnosti – Objemová hmotnost, Průměrná objemová hmotnost – Po dvou dnech

Výsledky po sedmi dnech:

	průměr			výška		
ρ_{v1}	50,8	52,0	51,8	82,1	81,8	81,7
ρ_{v2}	50,6	52,4	52,1	81,8	81,9	81,4
ρ_{v3}	50,9	52,1	52,0	83,1	83,0	83,1
ρ_{v4}	51,3	51,4	51,3	80,5	80,5	80,1
ρ_{v5}	51,4	51,2	50,4	82,1	81,8	81,7

Tab. 22 – Zjištění objemové hmotnosti – Parametry vzorků – Po sedmi dnech

	průměrná výška (mm)	průměrný poloměr (mm)	objem (m³)
ρ_{v1}	81,87	25,77	0,000170668
ρ_{v2}	81,70	25,85	0,000171424
ρ_{v3}	83,07	25,83	0,000174067
ρ_{v4}	80,37	25,67	0,000166243
ρ_{v5}	81,87	25,50	0,000167154

Tab. 23 – Zjištění objemové hmotnosti – Průměrné a další parametry vzorků – Po sedmi dnech

	hmotnost (kg)	objemová hmotnost (kg/m³)
ρ_{v1}	0,253	1 481,000
ρ_{v2}	0,254	1 480,827
ρ_{v3}	0,259	1 488,447
ρ_{v4}	0,246	1 481,382
ρ_{v5}	0,253	1 515,069
		Průměrná objemová hmotnost (kg/m³)
		1 489,345

Tab. 24 – Zjištění objemové hmotnosti – Objemová hmotnost, Průměrná objemová hmotnost – Po sedmi dnech

Výsledky po čtrnácti dnech:

	průměr			výška		
ρ_{v1}	51,0	52,0	51,5	81,9	81,9	81,9
ρ_{v2}	51,5	52,5	51,6	81,6	81,5	81,3
ρ_{v3}	51,8	52,3	52,1	83,0	83,0	83,1
ρ_{v4}	51,8	51,7	51,9	70,9	71,0	71,1
ρ_{v5}	51,0	52,1	51,9	80,2	80,4	80,7

Tab. 25 – Zjištění objemové hmotnosti – Parametry vzorků – Po čtrnácti dnech

Žlutě označen je vzorek použitý pro zkoušku nasákavosti. Tento vzorek byl oboustranně seříznutý.

Modře byl označen vzorek použitý pro zkoušku nasákavosti. Tento vzorek nebyl seřezán ani na jedné straně.

	průměrná výška (mm)	průměrný poloměr (mm)	objem (m ³)
ρ_{v1}	81,90	25,75	0,000170517
ρ_{v2}	81,47	25,93	0,000172039
ρ_{v3}	83,03	26,03	0,000176702
ρ_{v4}	71,00	25,90	0,000149550
ρ_{v5}	80,43	25,83	0,000168549

Tab. 26 – Zjištění objemové hmotnosti – Průměrné a další parametry vzorků – Po čtrnácti dnech

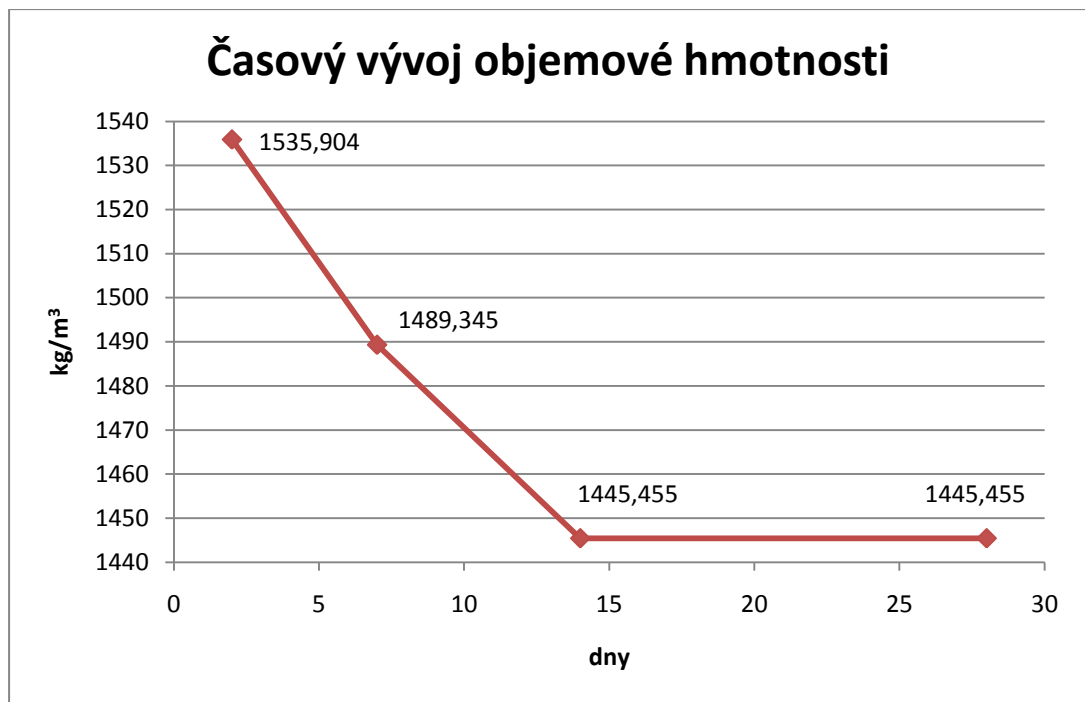
	hmotnost (kg)	objemová hmotnost (kg/m ³)
ρ_{v1}	0,247	1 447,362
ρ_{v2}	0,249	1 447,930
ρ_{v3}	0,254	1 434,618
ρ_{v4}	0,214	1 428,950
ρ_{v5}	0,248	1 468,414
		Průměrná objemová hmotnost (kg/m³)
		1 445,455

Tab. 27 – Zjištění objemové hmotnosti – Objemová hmotnost, Průměrná objemová hmotnost – Po čtrnácti dnech

Výsledky po dvaceti osmi dnech:

Rozměry ani hmotnost se po dvaceti osmi dnech nezměnily vůči výsledkům z měření po čtrnácti dnech. Proto výsledky nejsou uvedeny a shodují se s předchozím souborem výsledků.

Vyhodnocení:



Graf 5 – Zjištění objemové hmotnosti – Časový vývoj objemové hmotnosti

Z tohoto grafu vyplývá, že u materiálu probíhá vysychání a smršťování do čtrnácti dnů od jejich vyrobení. Tento jev ustává po čtrnácti dnech a materiál je nadále objemově stálý.

2.3.2.2 Zkouška pevnosti v prostém tlaku

Tato zkouška byla opět prováděna v určitých časových cyklech a to po dvou, sedmi a čtrnácti dnech. Vzorky měly být otestovány i po dvaceti osmi dnech, ale bohužel byly znehodnoceny tím, že popraskaly a nebylo tedy možné je pro zkoušku pevnosti v tlaku použít. V současné době se v experimentu pokračuje a je zjišťován vliv prostředí a teploty při zrání, aby se předešlo dalšímu znehodnocování vzorků

Každý týden bylo použito pět vzorků, které byly seříznuty z obou stran. Hydraulický lis totiž vyžaduje alespoň relativní kolmost obou dotykových ploch.

Pro tuto zkoušku byla použita směs optimalizovaná na největší pevnost tlaku. O této optimalizaci se pojednávalo v předchozí kapitole.

Pomůcky:

- Lis
- Vzorky
- Posuvné měřítko s přesností na 0,1 mm
- Nádobka na odpad, košťátko

Postup:

První akcí, která by se měla provést při přípravě na tuto zkoušku, je nastavení lisu. Vzorky musí být třikrát změřeny na různých místech, a to jak výška, tak i průměr každého vzorku. Z hodnot se následně udělá jejich průměr a tento musí být použit pro výpočet dotykové plochy.

Hodnota dotykové plochy musí být zadána do programu lisu a nastavuje se i rychlost zatěžování na 0,4 MPa/s ($\text{N/mm}^2/\text{s}$).

Dalším krokem je usazení zkoušeného vzorku. Zaprvé se musí dotykové plochy lisu očistit od všech nečistot, které tam mohly zůstat od předchozích zkoušek (zbytky písku, kameniva, zeminy atd.). Mezi plochy lisu se nesmí vkládat žádné další podložky, vyjma přídatných desek nebo středící desky lisu (když se osazují přídatné desky, musí se umístit na spodní i horní část lisu). Vzorek je nutné umístit na střed spodní tlačné desky s přesností 1% zvolené velikosti vzorku.

Následně se spustí zatěžování a čeká se na rozdrcení vzorku. Po jeho rozdrcení se zaznamenají hodnoty, vyčistí dotykové plochy, umístí nový vzorek a opět se spustí zatěžování. Tyto akce se opakují až do rozdrcení všech vzorků.



Obr. 13 – Zkouška pevnosti v prostém tlaku – Usazení v lisu

Výsledky:

Výsledky po dvou dnech:

vzorek č.	síla (N)	pevnost (MPa)
1	52 820	25,85
2	50 272	24,63
3	49 015	23,99
4	56 725	27,76
5	47 681	23,33
PRŮMĚR	51 303	25,11

Tab. 28 – Zkouška pevnosti v prostém tlaku – Po dvou dnech

Výsledky po sedmi dnech:

vzorek č.	síla (N)	pevnost (MPa)
1	59 386	29,07
2	46 964	22,99
3	53 664	26,27
4	59 665	29,21
5	53 315	26,10
PRŮMĚR	54 599	26,73

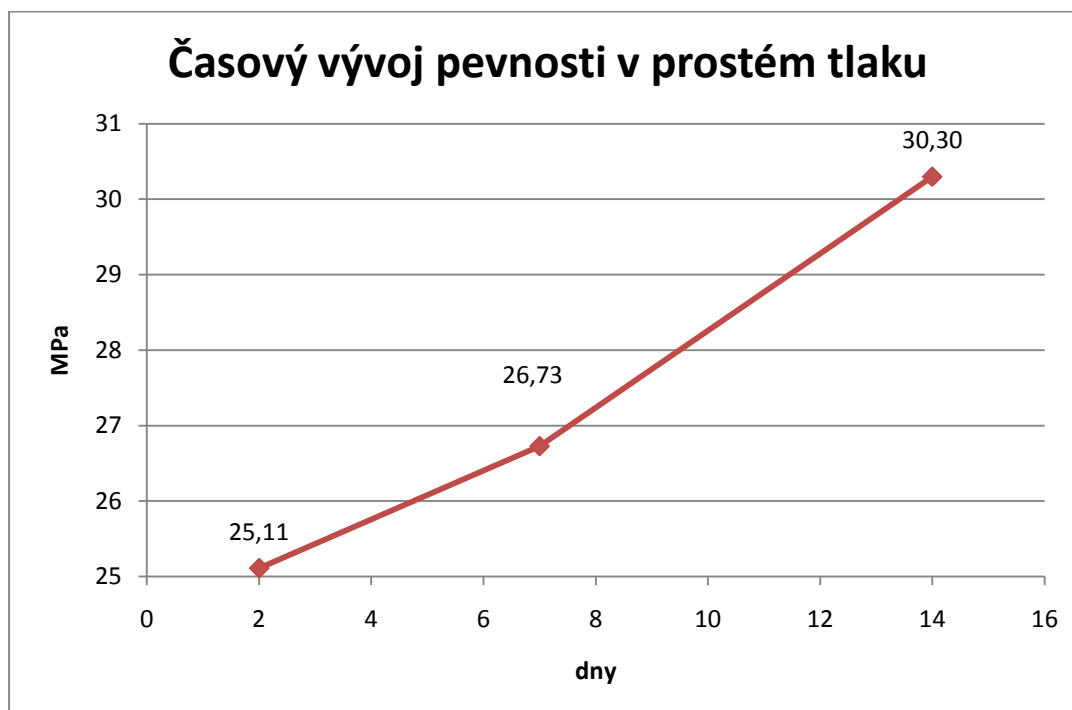
Tab. 29 – Zkouška pevnosti v prostém tlaku – Po sedmi dnech

Výsledky po čtrnácti dnech:

vzorek č.	síla (N)	pevnost (MPa)
1	65 625	32,13
2	56 622	27,72
3	67 363	32,98
4	52 084	25,50
5	67 772	33,18
PRŮMĚR	61 893	30,30

Tab. 30 – Zkouška pevnosti v prostém tlaku – Po čtrnácti dnech

Vyhodnocení:



Graf 6 – Zkouška pevnosti v prostém tlaku – Časový vývoj pevnosti v prostém tlaku

Z výše uvedených výsledků a grafu lze jasně usuzovat to, že působením času (zrání), se výsledná pevnost v prostém tlaku u ideální směsi zvyšuje. Bohužel, jak už je výše zmíněno, vzorky které měly být použity po dvaceti osmi dnech, byly znehodnoceny popraskáním.



Obr. 14 – Zkouška pevnosti v prostém tlaku – Rozdrcený vzorek

2.3.2.3 Zkouška nasákavosti

Pro tuto zkoušku byly použity čtyři druhy vzorků. Dva vzorky byly staršího data výroby a dva vzorky byly mladšího data. Vždy u jednoho vzorku od každého data byly seříznuty obě dotykové plochy a jeden vzorek od každého data zůstal neseříznutý.

Pomůcky:

- sada laboratorních vzorků
- nádoba s vodou
- stopky
- laboratorní váhy s přesností 0,01 g
- hadr na osušení vzorku

Postup:

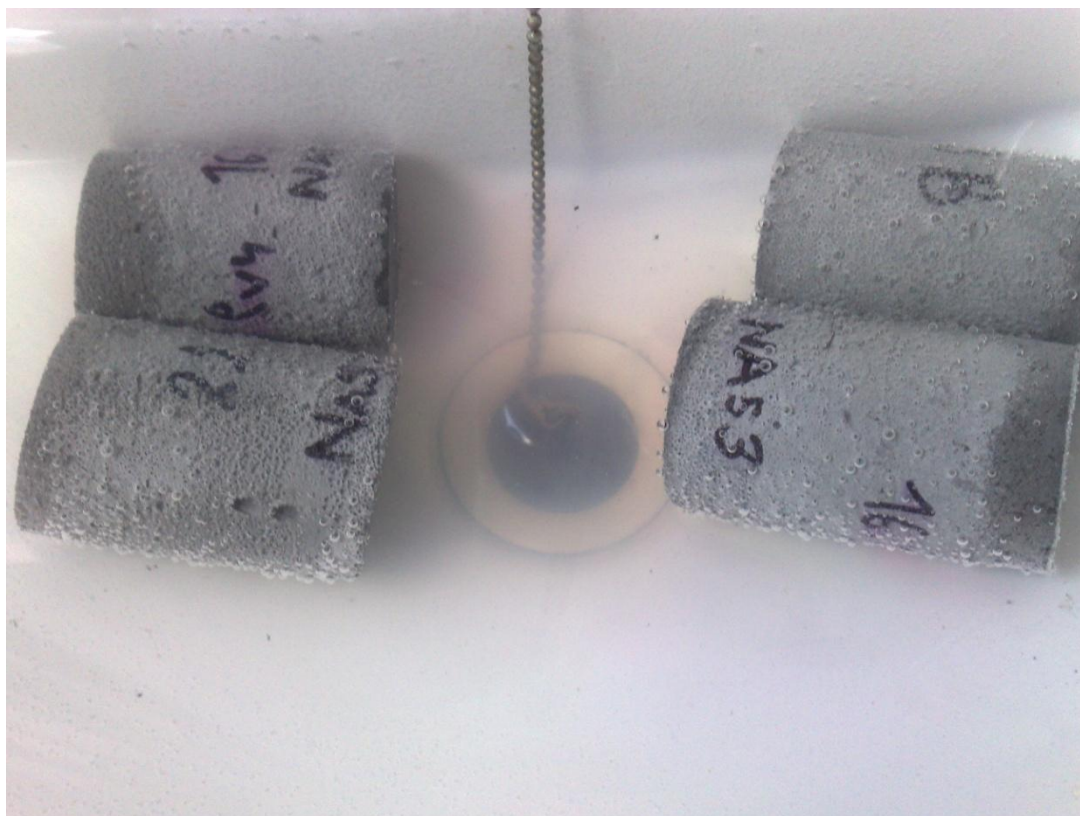
Jako první byly změřeny všechny vzorky, seříznuté i neseříznuté. Třikrát na různých místech byla změřena výška a následně i průměr, a to s přesností na 0,1 mm. Z těchto hodnot byl vyhotoven průměr. Jako další krok byly všechny vzorky zváženy s přesností na 0,01 g a z těchto hodnot byl opět vypočítán průměr.

Následně bylo do nádoby, v tomto případě umyvadla, natočeno dostatečné množství vody, aby se všechny vzorky po ponoření potopily a byly kompletně pod hladinou.

Posléze byly vzorky vloženy do nádoby s vodou a časomíra s odpočítáváním byla nastavena na sedmdesát minut. Tato časová hodnota nebyla nijak pevně určena, protože na tento druh materiálu neexistuje norma pro zkoušku nasákavosti.

Po uplynutí sedmdesáti minut byly vzorky z vody vyjmuty, povrchově osušeny a opět zváženy s přesností na 0,01 g.

Z těchto výsledků byla nakonec stanovena hmotnost nasáknuté vody, dále pak i procento vody, které navýšilo váhu vzorku.



Obr. 15 – Zkouška nasákavosti

Výsledky:

Výsledky po sedmi dnech:

2 seříznuté vzorky:

	stáří	průměr (mm)			výška (mm)			hmotnost (g)
NAS1	starší	51,3	51,4	51,3	71,0	70,9	70,9	217,8
NAS2	mladší	50,5	51,2	51,7	72,1	72,1	72,0	236,3

Tab. 31 – Zkouška nasákavosti – Parametry seříznutých vzorků – Po sedmi dnech

2 neseříznuté vzorky:

	stáří	průměr (mm)			výška (mm)			hmotnost (g)
NAS3	starší	51,4	51,2	50,4	82,1	81,8	81,7	252,4
NAS4	mladší	50,5	51,4	51,7	80,7	81,1	81,0	271,7

Tab. 32 – Zkouška nasákavosti – Parametry neseříznutých vzorků – Po sedmi dnech

	průměrný průměr (mm)	průměrná výška (mm)
NAS1	51,3	70,9
NAS2	51,1	72,1
NAS3	51,0	81,9
NAS4	51,2	80,9

Tab. 33 – Zkouška nasákavosti – Průměrné parametry vzorků – Po sedmi dnech

	hmotnost po namočení (g)	hmotnost vsáknuté vody (g)	procent vody
NAS1	223,3	5,5	2,46%
NAS2	239,0	2,7	1,13%
NAS3	257,7	5,3	2,06%
NAS4	274,5	2,8	1,02%

Tab. 34 – Zkouška nasákavosti – Výsledky – Po sedmi dnech

Výsledky po dvaceti osmi dnech:

2 seříznuté vzorky:

	stáří	průměr (mm)			výška (mm)			hmotnost (g)
NAS1	starší	51,3	51,4	51,3	71,0	70,9	70,9	209,9
NAS2	mladší	50,5	51,2	51,7	72,1	72,1	72,0	218,7

Tab. 35 – Zkouška nasákavosti – Parametry seříznutých vzorků – Po dvaceti osmi dnech

2 neseříznuté vzorky:

	stáří	průměr (mm)			výška (mm)			hmotnost (g)
NAS3	starší	51,4	51,2	50,4	82,1	81,8	81,7	243,9
NAS4	mladší	50,5	51,4	51,7	80,7	81,1	81,0	252,4

Tab. 36 – Zkouška nasákavosti – Parametry neseříznutých vzorků – Po dvaceti osmi dnech

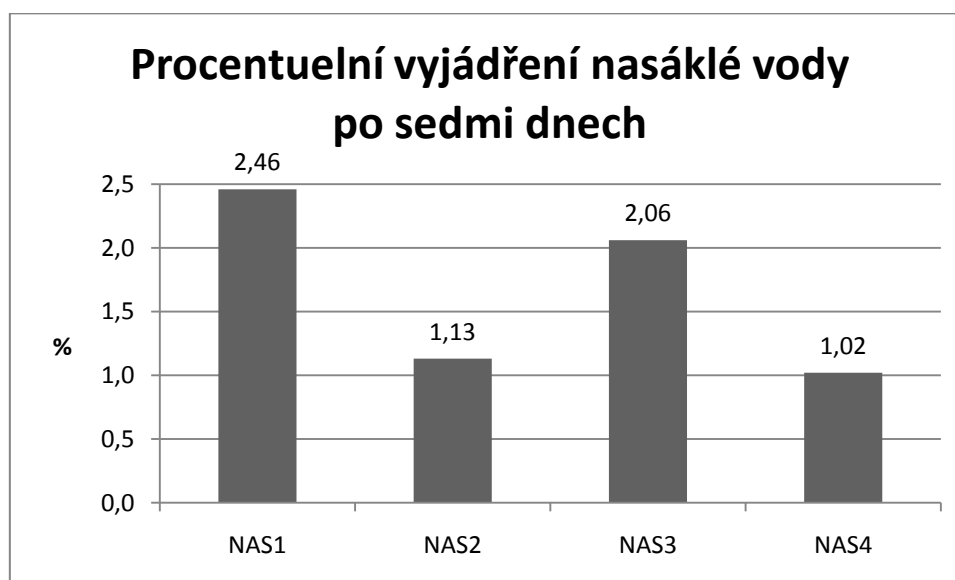
	průměrný průměr (mm)	průměrná výška (mm)
NAS1	51,3	70,9
NAS2	51,1	72,1
NAS3	51,0	81,9
NAS4	51,2	80,9

Tab. 37 – Zkouška nasákavosti – Průměrné parametry vzorků – Po dvaceti osmi dnech

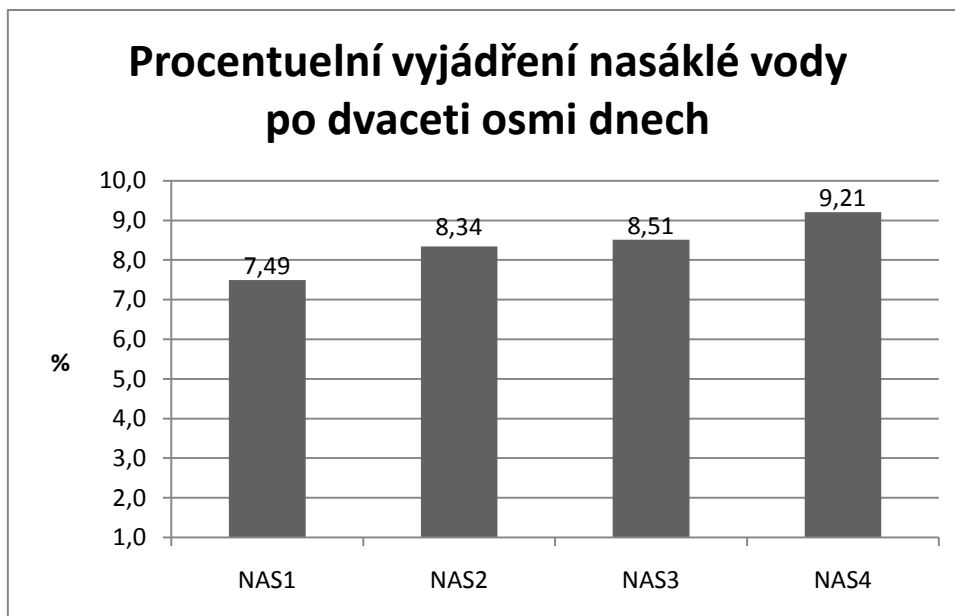
	hmotnost po namočení (g)	hmotnost vsáknuté vody (g)	procent vody
NAS1	226,9	17,0	7,49%
NAS2	238,6	19,9	8,34%
NAS3	266,6	22,7	8,51%
NAS4	278,0	25,6	9,21%

Tab. 38 – Zkouška nasákavosti – Výsledky – Po dvaceti osmi dnech

Vyhodnocení:



Graf 7 – Zkouška nasákavosti – Procentuelní vyjádření nasáklé vody po sedmi dnech



Graf 8 – Zkouška nasákavosti – Procentuelní vyjádření nasáklé vody po dvaceti osmi dnech

Z výsledků po sedmi dnech vyplývá, že starší vzorky mají větší nasákavost než vzorky mladší. Bude to nejspíše z důvodu, že vzorky jsou více vyschlé. Z těch samých výsledků vyplývá, že u seřiznutých vzorků je nasákavost také vyšší.

Z výsledků po čtrnácti dnech vyplývá, že vzorky už byly kompletně vyschlé, a proto se smazaly rozdíly v nasákavosti mezi staršími a mladšími vzorky.

2.4 Posouzení možností uplatnění v dopravním stavitelství, resp. porovnání s dosud používanou technologií - výrobní, ekonomické, ekologické aspekty

V této kapitole se budu zabývat porovnáním výrobních, ekonomických a ekologických aspektů u betonů a geopolimerů.

2.4.1 Porovnání výrobních aspektů betonů a geopolimerů

V této kapitole se bude pojednávat o výrobních výhodách a úskalích výroby betonů a geopolimerů.

2.4.1.1 Beton

Co se týče výroby betonu, je tento velice jednoduchý a zvládnutelný postup i v neprofesionálních podmínkách.

Při výrobě v malých domácích spádových míchačkách se jako první do míchačky dá jeden díl vody, následně se do ní přidají dva díly cementu a celá směs se nechá řádně promíchat. Když se vytvoří cementová kaše, začne se pomalu přidávat 6 dílů kameniva, které se musí řádně celé obalit v cementové kaši.

Při výrobě v betonárnách se příprava betonu děje obdobně, pouze v mnohem větších množstvích. Betonárky mají svoje vlastní navržené směsi, podle toho jaký má mít výsledný beton vlastnosti (např. vodotěsnost).

2.4.1.2 Geopolymer

Naproti tomu výroba geopolimeru je mnohem více technologicky náročná. Jedním z hlavních úskalí výroby geopolimeru je to, že se pracuje s vysoce zásaditými látkami. Příprava směsi už byla popsána v předchozích kapitolách, ale tato je vyzkoušena pouze v malých množstvích (cca do váhy jedné dávky 4,5 kg). Pro větší množství bohužel nejsou známy žádné výsledky. Ty by musely být předmětem dalšího experimentování.

2.4.1.3 Zhodnocení

Z hlediska výrobních aspektů betonů a geopolimerů, vychází z tohoto srovnání mnohem lépe beton. Jednak je to pro jeho jednoduchou výrobu a jednak proto, že při jeho přípravě nejsou použity žádné agresivní látky, jako v případě geopolimerů.

2.4.2 Porovnání ekonomických aspektů betonů a geopolimerů

V této kapitole se bude pojednávat o ekonomických aspektech betonů a geopolimerů.

2.4.2.1 Beton

Jako beton pro porovnání ekonomických aspektů byl zvolen beton C30/37. Tedy beton s pevností válečků (150x300 mm) po dvaceti osmi dnech 30 MPa. Jeden metr krychlový této směsi v tekutém stavu stojí 2447kč. Tato cena byla vypočítána jako průměrná z třech různých cen ve třech betonárnách.

2.4.2.2 Geopolymer

Z průměrné objemové hmotnosti ideální směsi byly spočítány jednotlivé hmotnosti komponent, z kterých byla směs připravena. Při ceně 8kč/kg vodního skla a 13kč/kg NaOH vychází přibližná cena jednoho metru krychlového geopolimeru na 4540kč (cena vody byla zanedbána).

2.4.2.3 Zhodnocení

Co se týče ekonomických aspektů, byl jako výhodnější vyhodnocen beton, protože jeho cena za jeden metr krychlový je o 2093kč nižší. Tyto ceny jsou však pouze orientační.

V případě betonárek se jedná o velkovýrobu, kteroužto jsou sraženy ceny na minimum. V případě velkovýroby geopolimerů by jejich cena za metr krychlový jistě také klesla o značnou částku.

2.4.3 Porovnání ekologických aspektů betonů a geopolimerů

V této kapitole se bude pojednávat o jednotlivých složkách pro výrobu betonů a geopolimerů a jejich dopadu na ekologii.

2.4.3.1 Beton

Pro výrobu betonu je to použito několik složek. Jmenovitě to jsou:

- hrubé a jemné kamenivo
- cement
- voda
- příměsi a přísady

Jemné a hrubé kamenivo je těžená nerostná surovina, tedy jeden z neobnovitelných zdrojů, který tvoří zhruba tři čtvrtiny hmotnosti betonu. V betonu zastává funkci plniva. Pro výrobu betonu se nedá použít pouštní písek, protože je slaný, a proto se do budoucna s jeho použitím do betonu, bez předchozí úpravy, nedá počítat.

Cement je hlavní a nezaměnitelná složka betonu. Co se týče ekologických aspektů, je cement stěžejní nevýhodou betonu. Ve fázi jeho výroby a přípravy na použití do betonových směsí se rovná váha výsledné formy cementu váze vyprodukovaného oxidu uhličitého pro jeho přípravu. To znamená, že na každou tunu vyrobeného oxidu uhličitého připadá jedna tuna CO₂.

Voda je v betonu důležitá pro plastifikaci a spojení všech jeho složek (záměsová voda) a následně je důležitá pro ošetřování betonových ploch těsně po vylití (ošetřovací voda). Záměsové vody nesmí být ani moc ani málo. Kdyby jí bylo málo, nehydratoval by všechn cement, kdyby jí naopak bylo moc, vytvořily by se v betonu kapilární póry. Voda sama o sobě nemá takřka žádné ekologické dopady na životní prostředí.

2.4.3.2 Geopolymer

Pro výrobu geopolymery je použito několik složek. Jmenovitě to jsou:

- Elektrárenský popílek
- Hydroxid sodný (NaOH)
- Vodní sklo

Elektrárenský popílek je pro geopolymery stěžejní surovina. Vzniká jako druhotná odpadní surovina při spalování černouhelného prachu. Ve formě kouře prochází přes elektrostatické odlučovače, které ho zachycují, a popílek následně padá do výsypky. Množství takto zachyceného popílku je cca. 25-30 tun/blok/hodina. Například v elektrárně Opatovice nad Labem činí objem vyrobeného popílku 260 000 tun/rok. Dokud tedy budou v provozu černouhelné elektrárny, je tato surovina takřka nevyčerpatelná. Elektrárenského popílku lze využívat i při likvidaci důlních požárů nebo jako jednu ze složek při výrobě cihel. S produkcí 260 000 tun/rok, ale zásoby, které jsou nyní a ještě porostou, budou moci sloužit ještě dlouho poté, co bude výroba elektřiny z černého uhlí ukončena.

Hydroxid sodný (NaOH) je silně zásaditá anorganická sloučenina, která je v geopolymerech použita jako aktivátor chemických reakcí. NaOH se může vyrábět buď

průmyslově, jako primární surovina anebo vzniká při výrobě chloru jako surovina druhotná. Dnes se většinou pro výrobu chloru a tedy i hydroxidu sodného používá elektrolytický rozklad chloridu sodného (solanka), při němž vznikají obě látky. V čistém stavu je NaOH bílá pevná látka, většinou ve formě peciček, lístečků nebo granulí.

Vodní sklo se vyrábí ze sklářského písku tavením ve sklářské vanové peci při teplotě 1400-1600°C za pomoci alkalických tavidel (oxid sodný, oxid draselný), které tavení napomáhají. Roztavená sklovina se zchladí, aby popraskala a tím se zjednodušilo rozpouštění. Takto připravený materiál se rozpouští v hydroxidu sodném nebo draselném v autoklávu a tím vzniká vodní sklo.

2.4.3.3 Zhodnocení

Z ekologického hlediska vychází jako lepší materiál geopolymery. Pro jeho výrobu jsou použity dvě suroviny, které vznikají nebo mohou vznikat jako odpadní materiál při výrobě jiných látek. Zatímco pro beton se musí dvě suroviny přímo vyrábět nebo těžit.

2.4.4 Využití geopolymery

Geopolymer se vyznačuje mnoha vlastnostmi, díky kterým by geopolymery mohl nalézt uplatnění. Jsou to například:

- **Přilnavost a schopnost „prorůst“ do základního materiálu** (sanace, nové kompozitní materiály, spojovací prvek, anorganické lepidlo)
- **Příznivá pevnost** (konstrukční prvky přenášející zatížení)
- **Tepelná odolnost, nehořlavost** (protipožární prvky, prvky vystavené zvýšeným teplotám, zvýšená bezpečnost)
- **Odolnost vůči agresivnímu prostředí** (prvky vystavené chemicky agresivním činidlům)
- **Trvanlivost** (zvýšení životnosti prvků)

3. ZÁVĚR

Závěrem bych chtěl podotknout, že experimenty s geopolymery jsou teprve v počáteční fázi. Zkoušky, které zde byly zmiňovány, jsou doslova prvopočátkem těchto budoucích experimentů, které budou muset být provedeny, než se bude moci geopolymery začít používat jako jeden z vcelku běžných stavebních materiálů.

Při vypracování této práce šlo o pokus vytvořit ideální směs pro přípravu geopolymery. Při této optimalizaci bylo zjištěno, že když se část vodního skla zamění s vodou, má to nepříznivý účinek na výslednou pevnost v tlaku, což vyplývá i z toho, že při experimentování s množstvím alkálií, vykazoval geopolymery, při nejvyšší hodnotě alkálií větší pevnost v tlaku než při jakékoli záměně vodního skla za vodu. Byl také zjištěn poznatek, že množství alkálií má vliv na výslednou pevnost v tlaku, ale jen do určité meze, kdy se při dalším zvětšování objemu alkálií stává směs takřka nezmíchatelnou a velice rychle tuhne. Posledním poznatkem z optimalizace bylo, že když se do roztoku přidá voda navíc, má to také vliv na výslednou pevnost v tlaku. Výsledný vzorek má opět menší pevnost, než když se voda navíc nepřidá.

V dalším kroku byly provedeny laboratorní zkoušky. A to jmenovitě zkouška nasákavosti, zkouška pro zjištění objemové hmotnosti, zkouška pevnosti v prostém tlaku a zkouška tvrdosti pomocí Schmidtova kladívka. Všechny zkoušky kromě poslední byly provedeny cyklicky po určitých časových intervalech.

Zkouška pro zjištění objemové hmotnosti nám prozradila, že tato se s postupujícím časem vyvíjí, a to tak, že se po určité době (v našem případě čtrnáct dní) snižuje a následně se ustálí na hodnotě $1445,455 \text{ kg/m}^3$.

Zkouška nasákavosti po sedmi dnech prozradila, že množství nasáknuté vody záleží na stáří vzorků a na tom, zda byly nebo nebyly seříznuty.

Zkouška pevnosti v prostém tlaku ukázala na fakt, že výsledná pevnost se během času vyvíjí, a to tak, že roste. Tento proces rozhodně nebude pokračovat donekonečna, a proto cílem dalšího experimentování by mělo být to, po jaké době a na jaké pevnosti se tento růst zastaví.

Zkouška tvrdosti pomocí Schmidtova kladívka byla provedena na vzorcích různého stáří. Z této vyplývá, že povrchová tvrdost není závislá na stáří vzorků. Jelikož byl použit široký soubor vzorků, byla zjištěna průměrná tvrdost materiálu **37,7**.

V další fázi experimentů bude muset být otestován vliv času na stárnutí geopolymery a také na jeho vlastnosti. Vyřešit se bude muset i povrchové ošetřování, kterým by se předešlo popraskání vzorků po delším čase.

Použité zdroje

Betonárka Český Brod [online]. 2006 [cit. 2010-05-25]. Ceník betonových směsí. Dostupné z WWW: <<http://www.betonarkaceskybrod.cz/sekce.php?sekceid=1>>

Beton, Betonárka Zlín, čerpání a doprava betonu, anhydrid, cement, transportbeton [online]. 2009 [cit. 2010-05-25]. Nabídka betonových směsí a čerpání betonu. Dostupné z WWW: <<http://beton-zlin.tas-stappa.cz/index.php?id=nabidka-beton>>

Betonárka Mukařov s.r.o. [online]. 2010 [cit. 2010-05-25]. Ceník 04/2010. Dostupné z WWW: <<http://www.betonmuk.cz/cenik042010.pdf>>

Clay Polymers [online]. 2008 [cit. 2010-05-25]. Historie. Dostupné z WWW: <<http://www.claypolymers.com/cz/clay-polymer/historie.html>>

KYNČLOVÁ, Magdaléna . *GEOPOLYMERNÍ BETONY : MATERIÁLY ŠETRNÉ K ŽIVOTNÍMU PROSTŘEDÍ* [online]. FAST VUT v Brně, 2008. 4 s. Oborová práce. FAST VUT v Brně . Dostupné z WWW: <http://www.fce.vutbr.cz/veda/juniorstav2008_sekce/pdf/4_2/Kynclova_Magdalena_CL.pdf>

Elektrárny Opatovice, a.s. [online]. 2009 [cit. 2010-05-25]. Popílek. Dostupné z WWW: <http://www.eop.cz/produktyaslužby/vdl_popilek.php>

Vodní sklo a.s. [online]. 2008 [cit. 2010-05-25]. Schéma výroby vodního skla. Dostupné z WWW: <<http://www.vodnisklo.cz/view.php?cisloaktuality=2009120901>>

Třetí ruka - Více času na podstatné! [online]. 06.04.2010 07:30 [cit. 2010-05-25]. Vedlejší energetické produkty ve výrobě stavební keramiky . Dostupné z WWW: <[http://www.tretiruka.cz/news/vedlejsi-energeticke-produkty-ve-vyrobe-stavebni-keramiky-/
>](http://www.tretiruka.cz/news/vedlejsi-energeticke-produkty-ve-vyrobe-stavebni-keramiky-/)

BETON : Suroviny - Výroba - Vlastnosti [online]. 2005. ARTIS, 2005 [cit. 2010-05-25]. PŘEDMLUVA, s. . Dostupné z WWW: <<http://www.heidelbergcement.cz/RMC/data/upload/43006dbb35ba7.3..pdf>>

Louhy pro výrobu nápojů a bionafty : Něco z chemie louhů. *EXPRES09 : Noviny zaměstnanců společností Spolchemie, Setuza a Oleofin* [online]. Září 2008, 61, 9, [cit. 2010-05-25]. Dostupný z WWW: <http://www.setuza.cz/download/ostatni/expres_0809.pdf>

Beton Server [online]. 2006 [cit. 2010-05-25]. Beton Server. Dostupné z WWW:
<<http://www.betonserver.cz/>>