

Fyzikálně-chemické vlastnosti geopolymérů

Bc. Pavel Sedlařík

Diplomová práce
2006



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav inženýrství ochrany živ. prostředí

akademický rok: 2005/2006

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Bc. Pavel SEDLAŘÍK

Studijní program: N 2808 Chemie a technologie materiálů

Studijní obor: Inženýrství ochrany životního prostředí

Téma práce: Fyzikálně-chemické vlastnosti geopolymérů

Zásady pro vypracování:

- 1. Provedte literární rešerši o testování fyzikálně-chemických, mechanických a environmentálních vlastností stavebních materiálů.**
- 2. U dodaných vzorků geopolymérů proveďte určené testy.**
- 3. Dosažené výsledky přehledně zpracujte a kriticky zhodnoťte.**

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Dle pokynů vedoucího diplomové práce

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Vratislav Bednařík, Ph.D.

Ústav inženýrství ochrany živ. prostředí

Datum zadání diplomové práce:

20. února 2006

Termín odevzdání diplomové práce:

26. května 2006

Ve Zlíně dne 20. února 2006


prof. Ing. Ignác Hoza, CSc.
děkan




doc. Ing. Jaromír Hoffmann, CSc.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá studiem fyzikálně-chemických vlastností geopolymérů. Byly provedeny testy pevnosti v jednoosém tlaku, mrazuvzdornosti, odolnosti proti tepelnému šoku a výluhové testy v destilované vodě. Testována byla tělesa s proměnlivým obsahem draselných, vápenatých a sodných iontů. Dále byly tyto testy provedeny u vybraných těles s konstantním množstvím draselných a sodných iontů a různými hmotnostními procenty plniva.

Klíčová slova: geopolymér, pevnost v tlaku, mrazuvzdornost, odolnost proti tepelnému šoku, výluhovací test

ABSTRACT

The master thesis deals with a study of physiochemical properties of geopolymers. Unconfined compressive strength, freeze-thaw resistance, thermal shock resistance and leachability in distilled water of prepared geopolymeric specimens were tested. These tests were carried out with specimens with varying contents of potassium, sodium and calcium ions. Furthermore, selected specimens with constant content of potassium or sodium ions and with different weight percentage of filler were also subjected to these tests.

Keywords: geopolymér, compressive strength, freeze-thaw resistance, thermal shock resistance, leaching test

Děkuji vedoucímu mé diplomové práce Ing. Vratislavu Bednaříkovi, PhD. za odborné vedení a cenné rady při realizaci mé diplomové práce. Dále děkuji za všestrannou pomoc svému konzultantovi Ing. Romanu Slavíkovi, a také všem pracovníkům analytické laboratoře za ochotu a pomoc při řešení experimentálních problémů a vytvoření dobré pracovní atmosféry.

Prohlašuji, že jsem na celé diplomové práci pracoval/a samostatně a použitou literaturu jsem citoval/a.

Ve Zlíně, 25. 05. 2006

jméno diplomanta

OBSAH

ÚVOD	7
1 TEORETICKÁ ČÁST	8
1.1 VLASTNOSTI STAVEBNÍCH POJIV.....	8
1.1.1 Cement	8
1.1.2 Bitumen	9
1.1.3 Sklo	10
1.2 GEOPOLYMERY A JEJICH VLASTNOSTI	11
1.2.1 Geopolymery	11
1.2.2 Fyzikálně-chemické vlastnosti geopolymerů.....	13
1.3 METODY MĚŘENÍ FYZIKÁLNĚ-CHEMICKÝCH VLASTNOSTÍ GEOPOLYMERŮ.....	16
2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	20
2.1 TESTOVANÉ VZORKY	20
2.2 POUŽITÉ PŘÍSTROJE	20
2.3 STANOVENÍ PEVNOSTI V TLAKU	21
2.4 STANOVENÍ VYLUHOVATELNOSTI	22
2.5 STANOVENÍ MRAZUVZDORNOSTI.....	22
2.6 STANOVENÍ ODOLNOSTI PROTI TEPELNÉMU ŠOKU	23
3 VÝSLEDKY A DISKUSE	24
3.1 PEVNOST V JEDNOOSÉM TLAKU.....	24
3.1.1 Tělesa s různým molárním množstvím draselných iontů.....	24
3.1.2 Tělesa s různým množstvím vápenatých iontů	25
3.1.3 Tělesa s různým molárním množstvím sodných iontů.....	26
3.1.4 Tělesa s konstantním molárním množstvím K^+ $0,7 \text{ mol.kg}^{-1}$ a různým obsahem plniva ve směsi.....	27
3.1.5 Tělesa s konstantním molárním množstvím K^+ $1,85 \text{ mol.kg}^{-1}$ a různým obsahem plniva ve směsi.....	27
3.1.6 Tělesa s konstantním molárním množstvím Na^+ $1,85 \text{ mol.kg}^{-1}$ a různým obsahem plniva	28
3.2 STANOVENÍ MRAZUVZDORNOSTI.....	29
3.3 STANOVENÍ ODOLNOSTI PROTI TEPELNÉMU ŠOKU	34
3.4 STANOVENÍ VYLUHOVATELNOSTI	39
3.5 SROVNÁNÍ GEOPOLYMERŇNÍCH VZORKŮ S KOMERČNĚ POUŽÍVANÝMI STAVEBNÍMI POJIVY.....	44
ZÁVĚR	48
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	49
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	53
SEZNAM OBRÁZKŮ	54
SEZNAM PŘÍLOH	56

ÚVOD

Lidstvo používá stavební materiály odedávna. První použití stavebních pojiv je známé již z Asýrie z 18. a 19. století př. n. l., kdy se jako pojivo používal jíl. V 8. a 9. století př. n. l. již byli k dispozici pálené cihly a pálené vápno. Staří Egypťané jako pojivo používali sádro a ve starověkém Římě se pro výrobu cementu používal sopečný popel nazývaný pucolán. Tento cement se již velmi podobá modernímu Portlandskému cementu, který poprvé použil britský inženýr John Smeaton v roce 1756 [1].

Od roku 1940 jsou známy alkalické cementy, na které se v posledních letech zaměřuje výzkum, především kvůli jejich šetrnosti k životnímu prostředí. Při jejich výrobě jsou produkovány menší emise CO₂, než u Portlandského cementu. Kromě primárního použití ve stavebnictví nacházejí v posledních letech nové uplatnění i v ochraně životního prostředí. Jsou schopny solidifikovat nebezpečné a dokonce i radioaktivní odpady a stabilizovat toxické polutanty ve své matici [2,3,4]. Tyto materiály vykazují dobrou pevnost a odolnost v agresivním prostředí. Dalším příkladem jejich využití je např. aplikace v technologii odpadních a zemědělských vod [5].

Pokud se z alkalických cementů připravují betony bez vápenaté složky, označují se jako geopolymery. Tento termín použil jako první ve své práci J. Davidovits [1]. Geopolymery vykazují podle dostupných informací mimořádně vysokou pevnost, chemickou odolnost a stabilitu blízkou přírodním horninám. V současné době jsou geopolymery, jejich příprava, vlastnosti a především využití intenzivně studovány na řadě pracovišť po celém světě. Očekává se, že by nové materiály na bázi geopolymerů mohly v blízké budoucnosti nahradit v řadě aplikací klasické stavební materiály na bázi portlandského cementu.

1 TEORETICKÁ ČÁST

1.1 Vlastnosti stavebních poživ

1.1.1 Cement

Beton patří mezi základní stavební materiály. Je to umělý slepenec, který je tvořen pojivem a plnivem. Nejčastějším typem betonu je cementový beton, kde je pojivem cement a plnivem kamenivo. Kromě těchto příměsí je zapotřebí voda, po jejímž přidání probíhají ve směsi fyzikální a chemické procesy, při kterých beton získává své specifické vlastnosti, mezi které patří mechanická pevnost a materiál se chemicky stabilizuje [6].

Podle způsobu přípravy, přidáváním různých plniv a aditiv můžeme ovlivňovat fyzikální a chemické vlastnosti nebo rychlosti tuhnutí.

Prostý beton je připravován pouze z pojiva, plniva a vody. Má vysokou odolnost proti namáhání tlakem, ale nesnese velké tahové zatížení [6].

Dalším druhem betonu je železobeton, při jehož výrobě se kromě pojiva, plniva a vody do směsi přidávají železné výztuže, které zlepšují vlastnosti při namáhání v tahu [6].

Pokud se ke směsi betonu přidávají kabely, které se napnou a vnášejí tlak do betonu, mluvíme pak o předpjatém betonu. Dalšími možnostmi při zlepšování vlastností betonu je přidávání vláken nebo drátků do směsi a potom tento materiál označujeme jako vláknobeton resp. drátkobeton [6].

Zvláštním případem betonu je tzv. pórobeton, který obsahuje malé bublinky [6]. U tohoto betonu se stejně jako u ostatních stavebních materiálů měří pórovitost, která nejvýznamnějším způsobem ovlivňuje fyzikální a chemické vlastnosti jako je pevnost, kyselino-vzdornost, mrazuvzdornost, nasákavost.

Na vlastnosti betonu jako je mrazuvzdornost, vodě odolnost, smršťování a pórozitu má také vliv podíl vody/cementu s rozdílným přídatkem písku. Trvanlivost struktury vyztuženého betonu byla snížena přidáním většího podílu písku, protože ten ostře zvýšil pórozitu betonu. Na trvanlivost betonu nemá vliv použití změkčovadel, nižší obsah vody a

cementu. Tento beton s vysokým podílem písku je možné použít pouze pro nízké zatížení [7].

Jednou z možností, jak ovlivnit vlastnosti připravovaného betonu, je použití popela z rostlinného odpadu jako příměsi do cementových materiálů v betonu. Rostlinný odpad musí být dostatečně pomlet a kontrolovaně spalován. Po této úpravě je možné tento materiál smíchat a použít s cementem k přípravě betonu. Tento postup zlepšuje vytvrzení a dlouhodobou odolnost proti mořské vodě (5 % roztok NaCl) připraveného betonu [8].

Dalším typem cementových výrobků je tzv. samozhutňující beton, do kterého se přidávají mikroplniva. Tato technologie přípravy betonu byla vyvinuta v USA. V ČR se tímto výzkumem zabývalo Centrum Dopravního Výzkumu a jako mikroplnivo do betonu používalo jemné křemičité úlety (mikrosilika), velmi jemně mletou strusku, jemně mletý vápenec, elektrárenský popílek a kamenné odprašky. U takto připravených vzorků bylo provedeno měření pevnosti v tlaku. Výsledky byly naměřeny po 28 denní vytvrzovací lhůtě, největší pevnost v tlaku byla asi 70 MPa a kolem této hodnoty měly vzorky s přídavkem strusky a s kombinovaným mikroplnivem připraveným z 1/3 kamenných odprašků a 2/3 mleté strusky [9].

Na fyzikální vlastnosti betonu připravovaného z portlandského cementu má vliv porosita cementových past. Kapilární porosita cementových past byla změřena gravimetrickou metodou, založenou na objemu volné vody. Tato studie dokázala, že čím menší je kapilární porosita cementových past, tím větší je pevnost v tlaku u vzorků Portlandského cementu [10].

Jedním z možných využití cementu v oblasti ochrany životního prostředí je cementace, což je solidifikační postup, při kterém se odpad mísí s cementem za normální teploty na dostupných zařízeních a má poměrně nízkou cenu. Výhodou cementace je, že cement není ovlivněn oxidačními činidly. Naproti tomu nevýhodou tohoto postupu je velký objem výsledného produktu [4].

1.1.2 Bitumen

Tímto termínem označujeme stavební pojiva na bázi asfaltu. Asfalty slouží jako stavební materiál pro stavbu vozovek, ale díky jejich dobrým vlastnostem jako je přilna-

vost k podkladu, hydrofobní vlastnosti a nízká cena si nacházejí své uplatnění ve stavebnictví jako izolace. Další jejich vlastností je elektroizolace a lazurový lesk používaný k přípravě lesklých černých laků, příměsí v gumárenských provozech a v neposlední řadě jako pojivo pro stabilizaci nebezpečných odpadů [11].

Asfalty jsou plastické až tuhé podíly z ropy, které obsahují asfaltény, ropné pryskyřice a nejtěžší ropné olejové podíly. Získávají se odpařením těkavých podílů z ropy a pokud se tak děje v přírodě, nazýváme tyto asfalty jako přírodní. Dalšími způsoby výroby asfaltů jsou vakuové destilační zbytky při zpracování ropy a nazýváme je destilační asfalty. Dalším typem asfaltů jsou asfalty z krakování, které označujeme jako krakovací asfalty nebo z extrakčních postupů např. asfalty propanové [11].

Vlastnosti asfaltů se upravují různými technologiemi jako je oxidace, modifikace polymery, emulgováním nebo rozpouštěním. Pro dosažení optimálních vlastností je také možné mísit několik asfaltových výrobků.

U asfaltů se sleduje jejich reologie, což je jejich deformační chování a také stejně jako u betonů pórovitost [11].

Jedním z možných využití asfaltu je proces solidifikace, který označujeme jako bitumenaci. Tímto postupem se rozumí mísení odpadů s asfaltovými pojivy za zvýšených teplot. Pro tento postup musí být zpracováváné odpady odvodněny, protože asfalt má hydrofobní vlastnosti. Nejčastějším použitím bitumenace je fixace kalů a kapalných koncentrátů [4].

Výhodou bitumenace je lepší zpracování odpadů z hlediska vyluhovatelnosti a menšího objemu výsledného produktu. Mezi nevýhody asfaltů patří jejich ekologický dopad a hořlavost II. třídy. Také může dojít k uvolnění nebezpečných látek z odpadů při vysoké teplotě bitumenace [4].

1.1.3 Sklo

Sklo je dalším materiálem, který je možno využívat ve stavebnictví, ale také pro stabilizaci odpadů. Pro tyto účely jsou nejčastěji používána borosilikátová skla, kvůli jejich pevnosti a teplotní odolnosti.

Borosilikátová skla, která jsou pro vitrifikaci nejvhodnější, se vyrábějí pod komerčními značkami jako je Simax, Jenatherm G nebo Pyrex. Od běžných skel se liší menším zásaditým výluhem a jejich hlavní výhodou je dobrá teplotní odolnost. Jejich teplota měknutí se pohybuje okolo 500 °C [12].

Borosilikátová skla většinou obsahují asi 80 % SiO_2 , 12 – 13 % B_2O_3 , 3,5 – 4,2 % Na_2O , malé množství Al_2O_3 , MgO , CaO a K_2O . Takto připravená skla, díky B_2O_3 , mají schopnost pohlcovat pomalé neutrony, mají velkou propustnost pro rentgenové záření např. destička o tloušťce 1 cm propouští až 75 % rentgenového záření o vlnové délce 0,01 nm. Další jejich výbornou vlastností je vysoká elektroizolační schopnost [12].

Borosilikátová skla se nejčastěji používají pro výrobu laboratorního skla, jako bezpečnostní a izolační skla ve stavebnictví a pro stabilizaci nebezpečných odpadů.

Vitrifikací se rozumí zeskelnatění tavením při vysokých teplotách a je používána pro solidifikaci toxických zbytků ze spaloven nebo toxických prachů obsahujících zejména sloučeniny Pb, Cd, Zn, Cu, As, Sb, P, F, Se. Dalšími využitími vitrifikace je zneškodňování radioaktivních odpadů s nízkou a střední aktivitou a kalů z brusíren skla. Při vitrifikaci se k odpadům, které neobsahují dostatek sklotvorných látek přidávají odpadní skelné střepy [4].

Vitrifikační produkty jsou odolné vůči působení vody, jsou inertní a mají malý objem, protože všechny sloučeniny jsou převedeny na oxidy. Speciálním způsobem vitrifikace je stabilizace popílku při teplotě 1200 °C, při níž lze získat kondenzací par měď, stříbro, zinek, kadmium a olovo, tento koncentrát se následně může dále zpracovávat [4].

1.2 Geopolymery a jejich vlastnosti

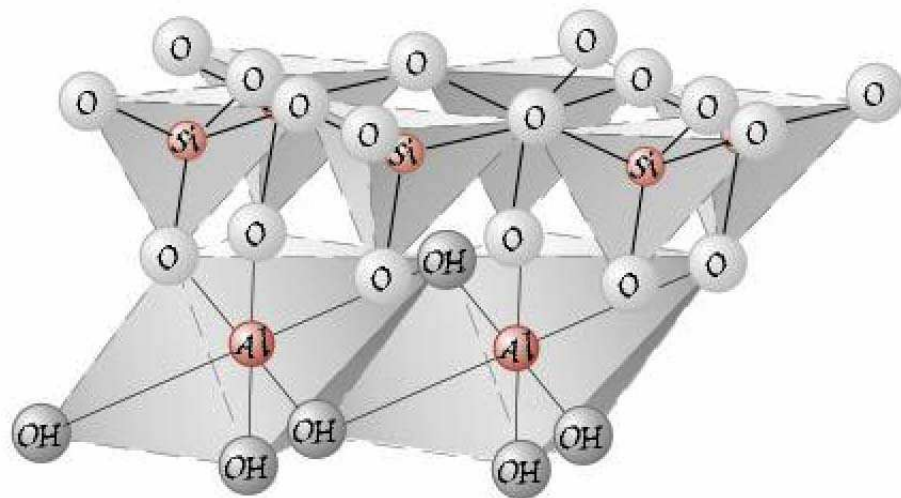
1.2.1 Geopolymery

Jako geopolymery označujeme materiály připravované z alkalických cementů bez vápenaté složky. Jsou to syntetické materiály na bázi hlinitokřemičitanů. Hlavními výho-

dami těchto materiálů je, že šetří nerostné suroviny a protože jsou připraveny bez vápenatých složek, uvolňují jen malé objemy emisí CO₂ do životního prostředí [13].

Struktura geopolymérů je podobná jako u přírodních zeolitů a díky tomu mohou tvořit amorfni až semikrystalické prostorové sítě [13].

Geopolymery jsou materiály na bázi hlinitokřemičitanů, které mohou být připravované především z tepelně aktivovaného kaolinitu. Kaolinit řadíme do skupiny minerálů s typickým vzorcem Al₂O₃·2SiO₂·2H₂O. Jak je patrné z následujícího obr. 1, tato skupina minerálů je tvořena jednou dioktaedrickou a jednou tetraedrickou sítí, které spolu tvoří vrstvu o tloušťce 0,7 nm [14].



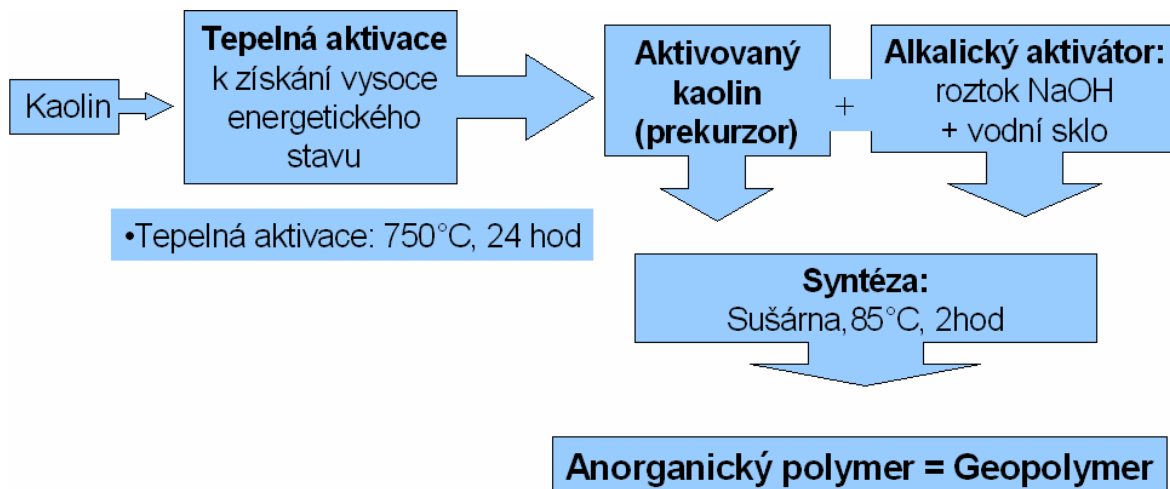
Obr. 1. Schématické znázornění vrstevnaté struktury kaolinitu [15].

Dioktaedrickou sítí tvoří dvě roviny nejtěsnějšího uspořádání atomů, vytvářející oktaedrické prostory, které jsou obsazeny trojmocnými kationy Al³⁺. Pro zachování elektro-neutrality sítě jsou potřeba dva kationy Al³⁺ na obsazení tří oktaedrických pozic [14].

Tetraedrická sítí je tvořena SiO₄ tetraedry, které jsou spojeny do sítě prostřednictvím tří atomů kyslíku a vytváří hexagonální uspořádání. Čtvrtý kyslík, který se nazývá vrcholový, tvoří spojení s oktaedrickou sítí, resp. v případě kaolinitu s dioktaedrickou sítí [14].

Samotná geopolymérace probíhá jako polykondenzační reakce hlinitokřemičitanových minerálů (kaolinit) aktivovaných při určité teplotě. Aktivovaný kaolinit reaguje

v silně alkalickém roztoku NaOH a vodního skla. Samotná tvorba geopolymery probíhá za vzniku vazeb Si – O – Al. Schématicky je proces přípravy geopolymery znázorněn na obr. 2.

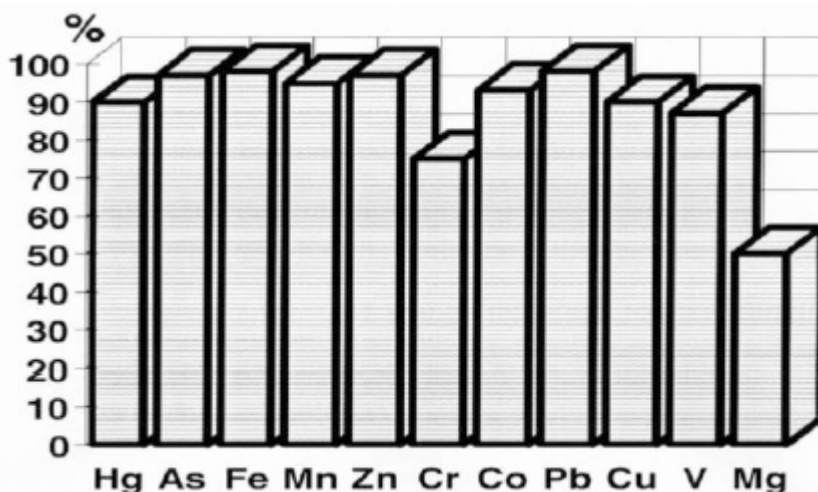


Obr. 2. Příklad syntézy alkalicky aktivovaných materiálů [16]

1.2.2 Fyzikálně-chemické vlastnosti geopolymery

Aluminosilikátová pojiva mají vysokou pevnost, hutnou mikrostrukturu, nízkou vy-luhovatelnost, odolnost v agresivním prostředí, nehořlavost, odolnost proti vysokým teplotám (až 1200 °C), přičemž alkalické ionty jsou pevně zabudovány v krystalické mřížce. Tyto vlastnosti umožňují použití geopolymerních materiálů v mnoha průmyslových oblastech, příkladem je použití geopolymery ve stavebnictví, strojírenství, galvanizovnách, protipožární technice, automobilovém a leteckém průmyslu [17, 18, 19].

Aluminosilikátové materiály mají vysoký potenciál a určení jejich fyzikálně-chemických vlastností se provádí srovnáním s podobnými materiály, které mají nahromaděny zeolitické krystaly v amorfní gelové fázi. Stupeň krystalinity a složení se určuje z prachu rentgenovou difraktometrií, mikroskopicky, elektronovou difraktometrií, kalorimetricky [3].



Obr. 4. Množství nebezpečných prvků zachycených v geopolymerní matrici [19]

Vlastnosti aluminosilikátů můžeme upravovat, a to zejména nastavením vhodných reakčních podmínek a přidávkem vhodných kompozitů, které mohou být ve formě krátkých nebo dlouhých vláken nebo destiček. Těmito způsoby se zlepšují hlavně teplotní a mechanické vlastnosti. Studie [24] ukázala, že při výrobě kompozitů na bázi $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$, byla matrice geopolymérů stabilní do 500°C . Při teplotě zahřátí na 500°C byl změřen 35 % úbytku hmotnosti a lineární smrštění 1,2 %. Nebylo však pozorováno mikrostrukturální poškození. Při podrobnějším sledování mechanických vlastností hlinitokřemičitanů bylo zjištěno, že přidávaná vlákna do kompozitů zlepšují pevnost v tlaku a tuhost. Delší vlákna mají výraznější vliv na zlepšení těchto vlastností, u kratších vláken jsou mechanické vlastnosti zlepšeny méně výrazně, ale dosahuje se lepší odlévatelnosti [24].

Na vlastnosti geopolymérů má také vliv, jaké výchozí látky jsou zvoleny pro geopolymeraci. Byly studovány různé materiály např. kaolinit, albit nebo popílek. Výsledky ukázaly, že popílek má amorfní strukturu a je nejméně energeticky vázán, a proto je během geopolymerace nejreaktivnější ze všech uvedených látek. Stanovení struktury a složení výchozího materiálu bylo určeno rentgenovou difraktometrií, rentgenovou fluorescencí a NMR spektroskopií. Různými kombinacemi výchozích materiálů se dá dosáhnout požadovaného složení gelové fáze a konečného produktu [25].

Kationty alkalických kovů ovlivňují celý průběh geopolymerace a mají významný dopad na fyzikálně-chemické vlastnosti produktů. Reologická měření, vyluhovatelnost, tlakové zkoušky, testy povrchového napětí a IR spektroskopie dokázaly, že na fyzikálně-

chemické vlastnosti geopolymerního pojiva a popílku mají významný vliv ionty Na^+ a K^+ . Tyto kationty ovlivňují uspořádání iontů, rozpustnost, strukturu, orientace iontů během tvrzení a krystalické uspořádání [26].

Byly studovány korozní účinky kyselin na geopolymery [27]. Korozní účinky začínají vyluhování Na^+ a Ca^{2+} , které jsou v matici nahrazovány ionty H^+ . Následně může docházet k reakci kyselinových protonů s polymerní vazbou $\text{Si} - \text{O} - \text{Al}$. Tento druhý krok je závislý na koncentraci kyseliny, sodných a vápenatých iontů, dále na rychlosti difuze iontů v pevné matici. Sodné soli se dostávají do výluhu, ale vápenaté se ukládají do korozní vrstvy, která poskytuje ochranu a zpomaluje proces rozrušování [27].

1.3 Metody měření fyzikálně-chemických vlastností geopolimerů

U stavebních materiálů jsou prováděna různá měření pro popsání jejich fyzikálních a chemických vlastností. V současnosti nejsou k dispozici žádné legislativní předpisy nebo normy ČSN, které by ošetřovaly metodiku měření fyzikálně-chemických vlastností geopolimerů. Z tohoto důvodu pro popis fyzikálně-chemických vlastností byly zvoleny normy řady ČSN EN 14617, které popisují metodiku měření fyzikálně-chemických vlastností umělého kamene.

Mezi nejvýznamnější stanovení patří určení pórovitosti zkoušeného materiálu, která je definována podílem objemu dutin a pórů v objemové jednotce zkoušeného vzorku.

Celková porosita se skládá z kapilárního a volného vzduchu, které se označují jako aktivní a u volného vzduchu jako neaktivní porosita. Pro posouzení těchto porosit se používají testy na mechanické vlastnosti betonu při měnícím se stavu vlhkosti. Ukázalo se, že snižující se vlhkost má větší vliv na mechanické vlastnosti u aktivní porosity. U neaktivní porosity se neprojevují změny mechanických vlastností s měnícím se vlhkostí [28].

Pórovitost se nestanovuje přímo, ale výpočtem z hustoty a objemové hmotnosti:

$$n = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right) \cdot 100$$

n – porosita [%]

ρ_s – hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]

ρ – objemová hmotnost [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]

Bylo zjištěno, že struktura pórů se mění průběžně po celou dobu tuhnutí betonu, pomocí rtuťové porosimetrie. Nevýhodou rtuťové porosimetrie je použití vzorků o malé velikosti, která významně ovlivňuje stanovení hodnot porosity vedoucí k nesourodostem. Korekce výsledků měření se provádí matematickým výpočtem vzhledem k použitému betonu [29].

Pro určení rozdělení velikosti pórů s poloměrem 10^{-3} až 10^{-2} μm se používá nízkoteplotní adsorpce dusíku. Rozdělení velikosti se určuje podle této metody s adsorpční a desorpční izotermy [30].

Hustota je další významnou veličinou, která se stanovuje u stavebních materiálů. Je to hmotnost objemové jednotky tuhé fáze. Do hustoty se nepočítají póry a dutiny. Stanovuje se pyknometrickou metodou na Gay-Lussacově pyknometru a před samotným měřením musí být materiál rozmělněn. Vzorek vkládaný do pyknometru musí být vysušen při teplotě $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ [29].

$$\rho_s = \frac{(m_2 - m_1)\rho_w}{V \cdot \rho_w + (m_1 - m_3)}$$

ρ_s – hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]

m_1 – hmotnost prázdného pyknometru [kg]

m_2 – hmotnost pyknometru se vzorkem [kg]

m_3 – hmotnost pyknometru se vzorkem a vodou [kg]

V – objem pyknometru [m^3]

ρ_w – hustota vody při $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]

Objemová hmotnost je definována jako hmotnost tuhé, plynné a kapalně fáze v objemové jednotce vzorku a stanovuje se buď při vlhkosti kdy byl vzorek dodán do laboratoře, nebo při 100 % nasycení vodou [29]. Toto měření je dáno normou ČSN EN 14617-1 a vztahem:

$$\rho_s = \frac{m}{V}$$

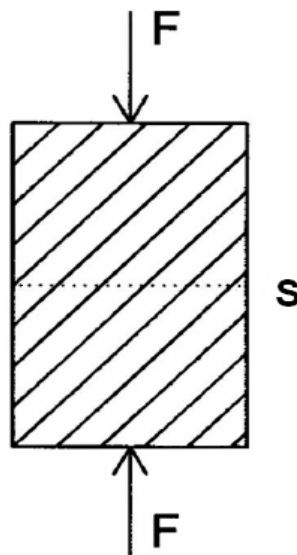
ρ – objemová hmotnost [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]

m – hmotnost [kg]

V – objem [m³]

Dalšími stanoveními, která se provádějí u stavebních materiálů je test vyluhovatelnosti. Toto měření je důležité zejména při solidifikaci odpadů a jejich následnému uložení. Testy vyluhovatelnosti se provádí podle vyhlášky pro odpady 383/2001 Sb. a zákona o odpadech a o změně některých dalších zákonů 185/2001 Sb. Podle těchto testů se solidifikované odpady zařazují do tříd vyluhovatelnosti a podle těchto tříd je s nimi dále manipulováno.

Stanovení pevnosti v tlaku se provádí podle normy ČSN EN 14617-15. Pevnost v tlaku se měří na hydraulickém lisu, jako největší síla, kterou zkušební těleso snese při namáhání jednoosým tlakem. Tato síla je vztažena na počáteční průřez zkoušeného tělesa. Pevnost se stanovuje na pravidelných tělesech, kde má značný význam poměr výšky zkušebního tělesa k jeho příčnému rozměru, tento poměr by měl být 2:3. Před samotným měřením je důležité zabrousit zátěžové plochy, dostředné zatížení vzorku a pomalé nanášení zatěžující síly.



Obr. 5. Schéma zkoušky pevnosti v tlaku

$$p = \frac{F}{S}$$

p – pevnost v jednoosém tlaku [MPa]

F – síla při porušení soudržnosti vzorku [kN]

S – plocha příčného průřezu [cm]

V této práci byla pro stanovení mrazuvzdornosti použita normou ČSN EN 14617-5 „Stanovení mrazuvzdornosti“ pro umělý kámen a toto stanovení úzce souvisí s měřením pevnosti v tlaku. Pro určení mrazuvzdornosti jsou tělesa nasycena vodou a následuje 50 cyklů zmražení a rozmražení. Teploty při zmrazování vzorků jsou $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a při rozmrazování $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Po provedení zmrazovacích a rozmrazovacích postupů se u testovaných vzorků změří pevnost v tlaku, která se srovná s kontrolními tělesy, které neprošly zmrazovacími a rozmrazovacími cykly.

Stanovení odolnosti proti tepelnému šoku upravené normou ČSN EN 14617-6. Vzorky jsou vysušeny při $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ a následně ponořeny do vody o teplotě $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, po provedení dvaceti opakování tohoto postupu se zkušební tělesa zváží a provede se stanovení pevnosti v tlaku.

Chemická odolnost vůči kyselinám se provádí u vysušeného vzorku v nadbytku $0,1\text{ M}$ kyseliny chlorovodíkové. Kromě kyseliny chlorovodíkové se používá ještě kyselina sírová. Následně se v přefiltrovaném výluhu změří pH, konduktivita a atomovou absorpční spektroskopií stanoví požadované kovy [29].

2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

2.1 Testované vzorky

Dodané vzorky pro pevnost v tlaku byly ve tvaru válcových těles připraveny v 6 sadách. U první sady se měnil obsah draselných iontů ve vzorku, který byl 0,5; 0,7; 0,9; 1,1; 1,3 a 1,85 mol.kg⁻¹ připravené reakční směsi. Druhou sadu tvořily vzorky s vápenatými ionty a to v množství 0; 0,076; 0,1 a 0,2 mol.kg⁻¹ ve směsi a třetí sada byla připravena s přísádky sodných iontů a to s 0,5; 0,7; 0,9; 1,1; 1,3 a 1,85 mol.kg⁻¹ ve směsi.

Další tři sady byly připraveny s konstantním množstvím draselných, resp. sodných iontů a měnil se obsah plniva. První vzorky z každé sady byly vždy bez plniva a další byly připraveny vždy s 25, 50, 75 a 80 % plniva. V prvním případě bylo množství draselných iontů 1,85 mol.kg⁻¹, ve druhé 0,7 mol.kg⁻¹ a ve třetím bylo použito 1,85 mol.kg⁻¹ sodných iontů.

Pro všechny prováděné zkoušky a stanovení byly předlohou normy řady ČSN EN 14617, což jsou normy pro testování umělého kamene. Tyto normy byly modifikovány pro geopolymery.

2.2 Použité přístroje

Předvážky

Scaltec SPB 52, Scaltec Instruments, Germany

Analytické váhy

Scaltec SBC 32, Scaltec Instruments, Germany

Lis hydraulický

H-52, Trystom s. r. o., Olomouc, Czech republic

pH-metr

CPH 52, Elteca, Turnov, Czech republic

Konduktometr

LF 3000, WTW, Germany

Trouba elektrická

Mora 524, Czech republic

Atomový absorpční spektrometr

GBC 933AA, Australia

Třepačka

RS 10 basic IKA, USA

2.3 Stanovení pevnosti v tlaku

Tato zkouška byla provedena podle normy ČSN EN 14617-15, která popisuje zkušební metody pro umělý kámen „Stanovení pevnosti v tlaku“. K provedení této zkoušky bylo použito hydraulického lisu, posuvného měřítka, smirkového papíru, počítače s kamerou.

Nejdříve byl u jednotlivých vzorků změřen posuvným měřítkem jejich průměr, aby bylo možno vypočítat plochu příčného průřezu vzorků, na kterou působí síla potřebná k rozdrcení vzorku. Poté byly smirkovým papírem odstraněny nerovnosti z horní strany jednotlivých vzorků, které vznikly při tuhnutí.

Takto připravené vzorky byly vkládány do hydraulického lisu a byla měřena síla potřebná k jejich rozdrčení. Stupnice hydraulického lisu byla snímána kamerou a ze získaných záznamů byla odečtena síla F potřebná k rozdrčení vzorku.

Z takto získaných hodnot je možno vypočítat pevnost vzorku v jednoosém tlaku, podle vzorce:

$$p = \frac{F}{S}$$

p – pevnost v jednoosém tlaku [MPa]

F – síla při porušení soudržnosti vzorku [kN]

S – plocha příčného průřezu [cm]

2.4 Stanovení vyluhovatelnosti

Stanovení vyluhovatelnosti se provádí podle aktuální vyhlášky pro odpady – 383/2001 Sb. a zákona o odpadech 185/2001 Sb.

Vysušený a rozdrčený vzorek byl zvážen a převeden do skleněné uzavíratelné lahve. Poté bylo do lahve přidáno takové množství destilované vody, které odpovídá desetinasobku hmotnosti vzorku. Láhev byla uzavřena a následně byla třepána 24 h.

Po uplynutí této doby bylo třepání zastaveno, výluh byl přefiltrován přes filtr ze skleněných mikrovláken typu Z 8. U takto připraveného filtrátu byla změřena konduktivita a pH.

Vzorek filtrátu byl převeden do 25 ml odměrné baňky s přidavkem pěti kapek koncentrované kyseliny dusičné pro stabilizaci. Takto připravené vzorky filtrátu byly uloženy v lednici a následně provedeny analýze kovů pomocí AAS.

2.5 Stanovení mrazuvzdornosti

Jako předloha pro stanovení mrazuvzdornosti u dodaných vzorků geopolymérů byla použita norma ČSN EN 14617-5 pro umělý kámen. Zkouška se skládala u z 25-ti opakujících se cyklů. Jeden cyklus je složen se zmrazovací částí, kdy se těleso nasáklé vodou vlo-

ží do mrazícího boxu na 2 h při teplotě -20 ± 5 °C. Po zmrazovací části následuje rozmrazovací krok, ve kterém se zkušební tělesa vloží na 2 h do vody o teplotě 20 ± 5 °C.

Zkouška byla ukončena vysušením těles a následným stanovením jejich pevnosti v tlaku. Získané hodnoty byly porovnány s referenčním tělesem, které nebylo vystaveno zmrazovacím a rozmrazovacím krokům.

2.6 Stanovení odolnosti proti tepelnému šoku

Stanovení odolnosti proti teplotnímu šoku pro vzorky geopolymérů bylo modifikací normy ČSN EN 14617-6 pro umělý kámen.

Testované tělesa byla zvážena na analytických vahách a vysušena při 105 ± 5 °C do konstantní hmotnosti. Stanovení odolnosti proti tepelnému šoku probíhalo podobně jako zkouška mrazuvzdornosti v cyklech. Jeden cyklus byl složen ze dvou kroků. Prvním krokem bylo sušení tělesa v sušárně po dobu 2 h při teplotě 105 ± 5 °C. V druhém kroku bylo těleso ponořeno do vody po dobu 2 h o teplotě 20 ± 5 °C. Hladina vody dosahovala výšky 6 cm nad horní stranou testovaných těles a navzájem se nedotýkala.

Stanovení bylo ukončeno po 20-ti cyklech. Tělesa byla vysušena do konstantní hmotnosti a následovalo stanovení pevnosti v tlaku. Získané hodnoty byly porovnány podobně jako v případě stanovení modifikované mrazuvzdornosti s referenčním tělesem.

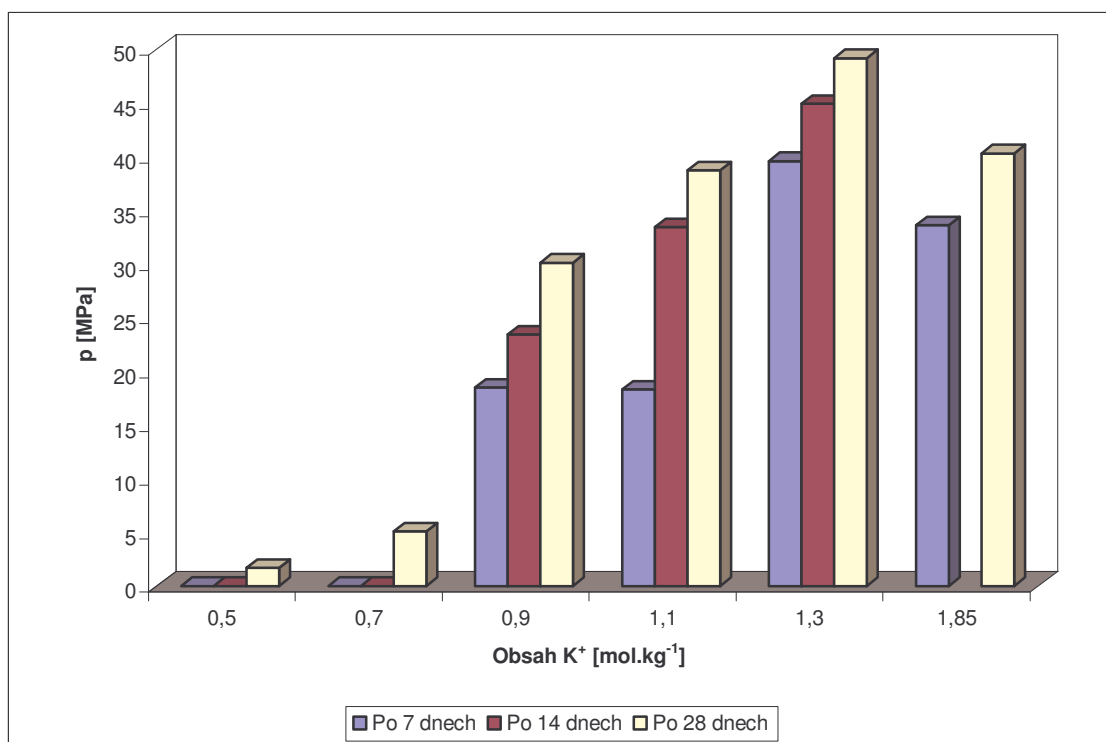
3 VÝSLEDKY A DISKUSE

3.1 Pevnost v jednoosém tlaku

Tato část práce sleduje, jaký vliv na pevnost vzorků má jejich složení a to zejména vliv různého obsahu draselných, vápenatých a sodných iontů. Potom byla pevnost změřena ještě u vybraných vzorků s konstantním obsahem těchto iontů a různým obsahem plniva. Testování každého vzorku bylo provedeno po 7, 14 a 28 dnech.

3.1.1 Tělesa s různým molárním množstvím draselných iontů

Prvním aspektem, který byl studován a má vliv na pevnost vzorků v tlaku je různý obsah K^+ ve zkušebních tělesech. Dodané vzorky vykazovaly různý obsah K^+ od 0,5 do 1,85 mol.kg⁻¹ směsy. Naměřená pevnost u této sady těles je uvedena v grafu na obr. 6.



Obr. 6. Pevnost v tlaku u těles s různým obsahem draselných iontů

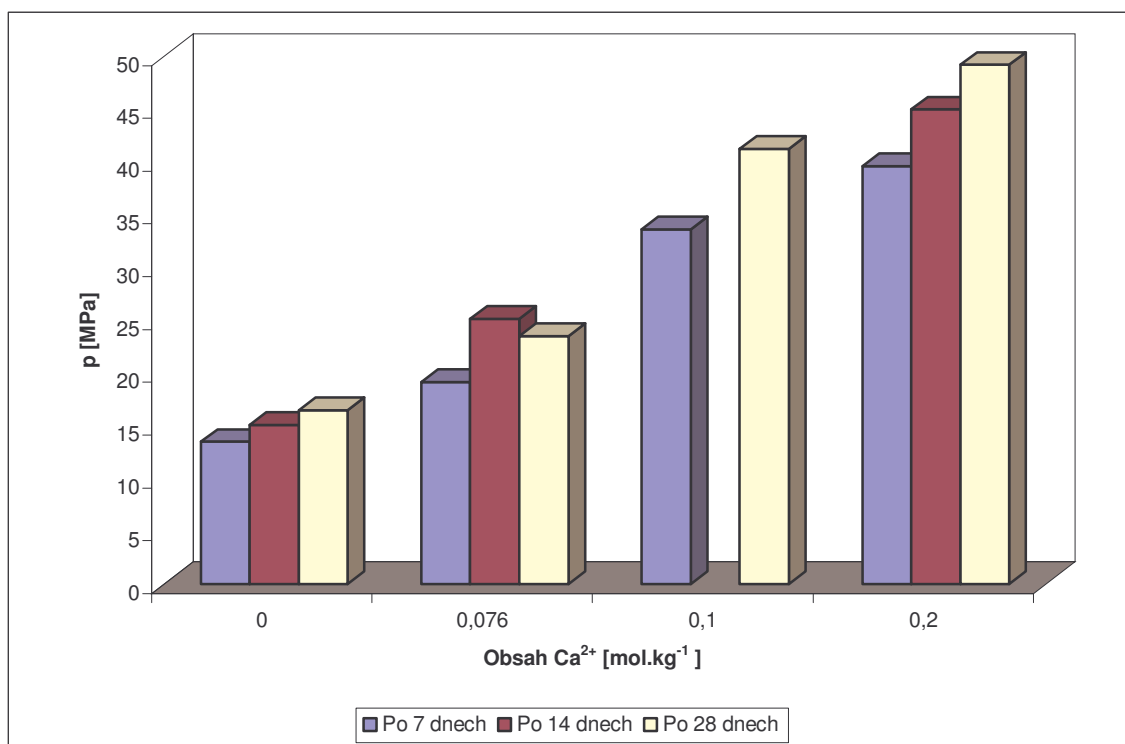
Z obr. 6. je zřejmé, že se zvyšujícím se molárním množstvím draslíku se u těles zvyšuje pevnost.

Maximální pevnosti bylo dosaženo u těles s obsahem draslíku 1,3 mol na kg připravené směsi. Již po 7 dnech byla u této sady těles pevnost nejvyšší a to i oproti ostatním tělesům, která takové pevnosti nedosahovala ani po 28 dnech. U této sady těles byla pevnost po 7 dnech 39,6 MPa a po 28 dnech byla naměřena hodnota 49,2 MPa. U těles připravených s obsahem draslíku 1,85 mol na kg směsi se pevnost začala opět snižovat.

Se vzrůstající dobou vytvrzování se zlepšuje pevnost těles při namáhání v jednoosém tlaku. U většiny těles se pevnost po 28 dnech od připravení zvýšila o 7 – 10 MPa oproti měřením, která byla provedena po 7 dnech (viz. příloha P 1).

3.1.2 Tělesa s různým množstvím vápenatých iontů

Tato sada těles obsahovala různé množství Ca^{2+} a to v rozmezí od 0 do $0,2 \text{ mol.kg}^{-1}$ směsy. Naměřené hodnoty pevnosti v tlaku u těles s různým obsahem Ca^{2+} jsou uvedeny v grafu na obr. 7.



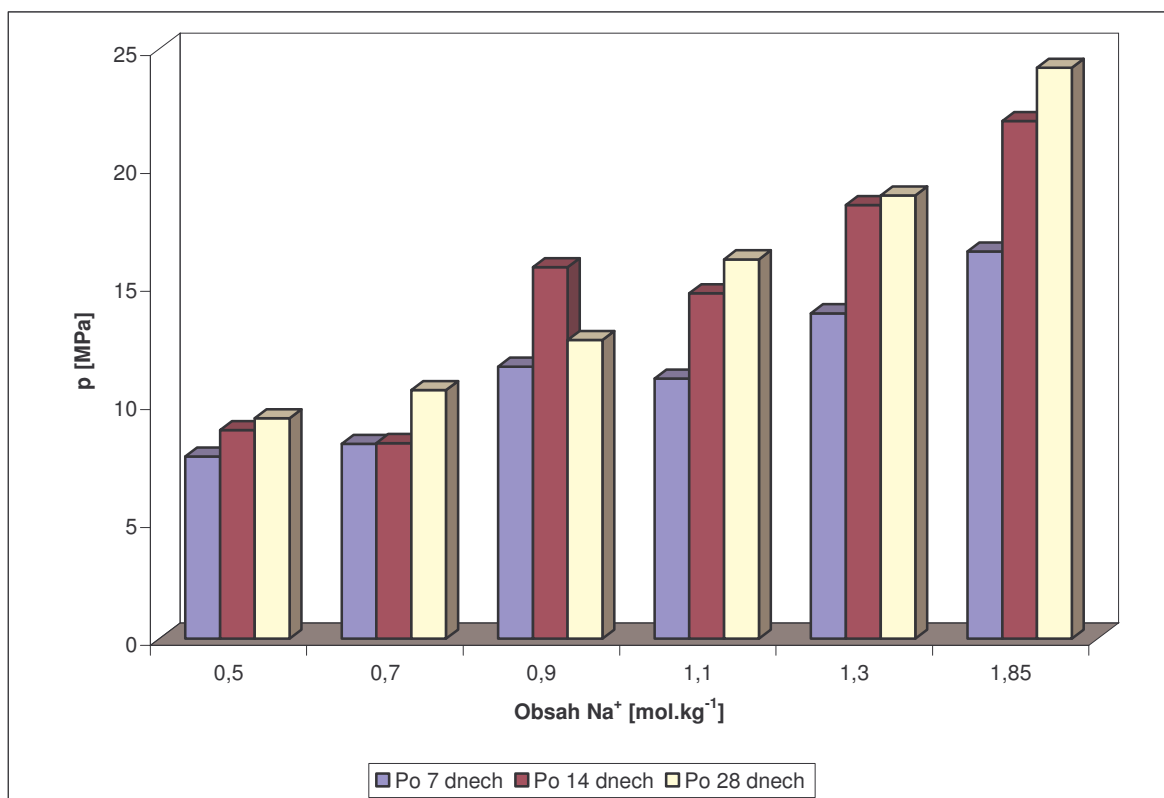
Obr. 7. Pevnost v tlaku u těles s různým obsahem vápenatých iontů

Z takto připravených těles bylo nejvyšší pevnosti dosaženo u těles z obsahem Ca^{2+} $0,2 \text{ mol.kg}^{-1}$. Pevnost v tlaku u těchto těles po 7 dnech byla 39,6 MPa, po 14 dnech 44,93 MPa a po 28 dnech bylo dosaženo maximální pevnosti 49,2 MPa.

Stejně jako u těles s různým obsahem K^+ se i u této sady těles pevnost postupně s delší dobou tuhnutí zvyšovala a to v rozmezí od 3 MPa u prvních dvou těles, až po 10 MPa u těles připravených s $0,1$ resp. $0,2 \text{ mol.kg}^{-1} \text{ Ca}^{2+}$ (viz. příloha P 2).

3.1.3 Tělesa s různým molárním množstvím sodných iontů

Třetí sada těles byla připravena s různým množstvím Na^+ v rozmezí od $0,5 \text{ mol.kg}^{-1}$ do $1,85 \text{ mol.kg}^{-1} \text{ Na}^+$ na množství připravené směsi. Hodnoty získané při měření jsou uvedeny v grafu na obr. 8.



Obr. 8. Pevnost v tlaku u těles s různým obsahem sodných iontů

Jak je zřejmé z obr. 8., se zvyšujícím se množstvím Na^+ ve vzorcích se zvyšuje i pevnost, podobně jako tomu bylo u těles připravených s ionty K^+ nebo Ca^{2+} . Maximální pevnosti bylo dosaženo u tělesa připraveného s obsahem Na^+ $1,85 \text{ mol/kg}$. Naměřené hod-

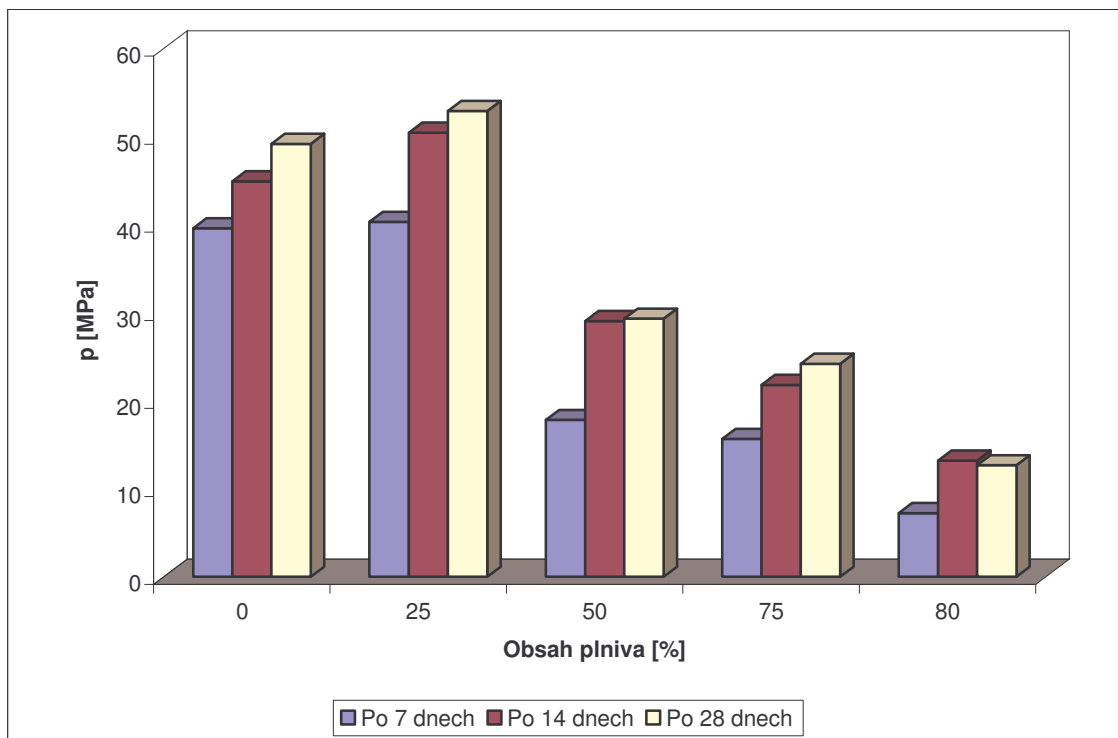
noty dosahují u tohoto tělesa po 7 dnech pevnosti 16,4 MPa a po 28 dnech se pevnost zvýšila o 7,8 MPa, na hodnotu 24,2 MPa. Přestože jsou vzorky s obsahem $1,85 \text{ mol.kg}^{-1}$ sodíku připravené směsi z této sady nejpevnější, nedosahují takové pevnosti jako nejpevnější tělesa z předešlých dvou sad. Oproti těmto tělesům je hodnota pevnosti v tlaku asi poloviční (viz. příloha P 3).

3.1.4 Tělesa s konstantním molárním množstvím K^+ $0,7 \text{ mol.kg}^{-1}$ a různým obsahem plniva ve směsi

Tyto sady těles byly připraveny s množstvím K^+ $0,7 \text{ mol.kg}^{-1}$ a různým obsahem plniva. Téměř všechna tělesa takto připravené vykazovala sílu potřebnou k rozdrcení vzorku pod mezí stanovitelnosti, což je 1 kN. Jediného reprodukovatelného výsledku bylo dosaženo u těles bez přídavku plniva po 28 dnech, tato hodnota činila 5,1 MPa.

3.1.5 Tělesa s konstantním molárním množstvím K^+ $1,85 \text{ mol.kg}^{-1}$ a různým obsahem plniva ve směsi

U této sady těles bylo zvoleno konstantní množství K^+ $1,85 \text{ mol.kg}^{-1}$ připravené směsi. Pevnost byla porovnávána podle množství plniva, které bylo vzrůstající od těles připravených bez plniva, až po tělesa s přídavkem 80 % plniva na celkovou hmotnost směsi. Jako plnivo byl použit jemný písek. Výsledky těchto zkoušek pevnosti jsou uvedeny v grafu na obr. 9.



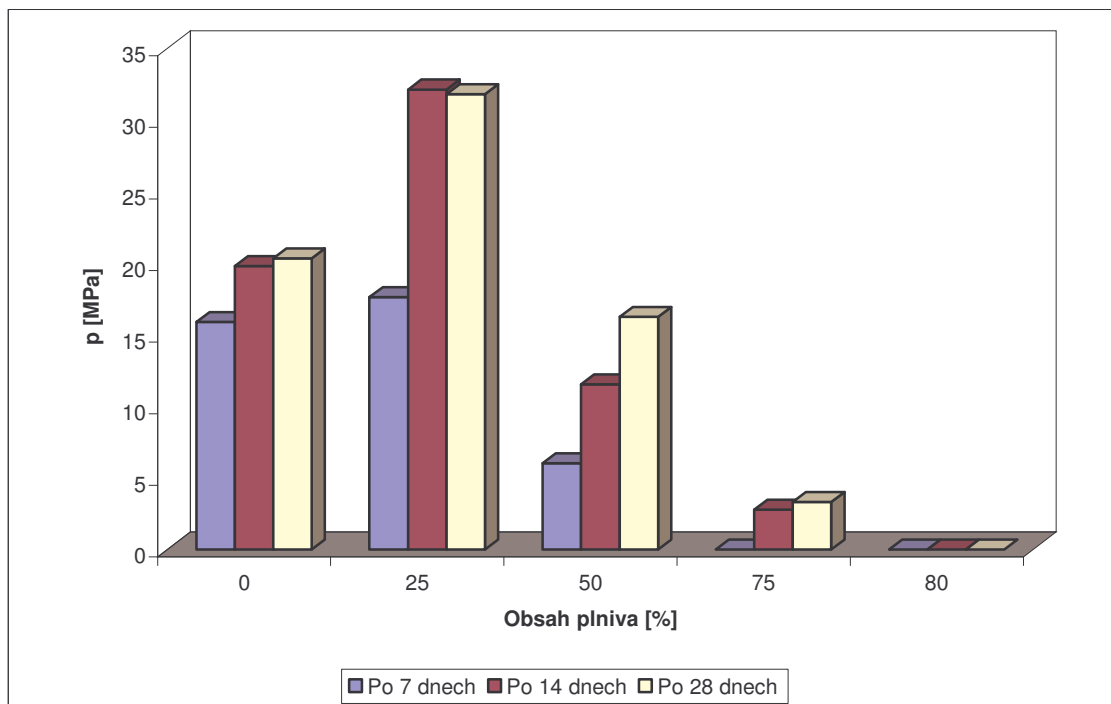
Obr. 9. Pevnost v tlaku u těles s konstantním množstvím K^+ $1,85 \text{ mol.kg}^{-1}$ a různým obsahem plniva

Největší pevnosti v tlaku z této sady těles bylo dosaženo u tělesa s obsahem plniva 25 % a to po 28 dnech 49,2 MPa. Po 7 dnech byla u tohoto tělesa pevnost v tlaku téměř shodná s pevností jako u tělesa bez přídavku plniva asi 40 MPa. Během 28 dní došlo u těles připravených s 25 % plniva k lepšímu ztuhnutí, než u těles bez plniva.

U dalších vzorků se pevnost těles se zvyšujícím se obsahem plniva snižovala a nejnižších hodnot bylo dosaženo u těles připravených s 80 % plniva po 7 dnech 7,2 MPa. Po delší době tuhnutí se i u těchto těles pevnost zvýšila, a to asi o 5 MPa (viz. příloha P 4).

3.1.6 Tělesa s konstantním molárním množstvím Na^+ $1,85 \text{ mol.kg}^{-1}$ a různým obsahem plniva

Tato tělesa byla připravena s molárním množstvím Na^+ $1,85 \text{ mol.kg}^{-1}$ geopolymerního pojiva a pevnost byla porovnávána v závislosti na přídavku plniva od 0 do 80 % na hmotnost připravované směsi. Jak již bylo uvedeno výše, se vzrůstajícím obsahem plniva v tělesech se snižuje jejich pevnost v tlaku. To je zřejmé i z obr. 10.



Obr. 10. Pevnost v tlaku u těles s konstantním množstvím Na^+ $1,85 \text{ mol.kg}^{-1}$ a různým obsahem plniva

Tato sada vykazuje nejvyšší pevnost u těles připravených s 25 % plniva, podobně jako tomu bylo u těles s $1,85 \text{ mol.kg}^{-1}$ K. Ovšem u těles s Na^+ je výsledná pevnost po 28 dnech o 20 MPa nižší (viz. příloha P 5).

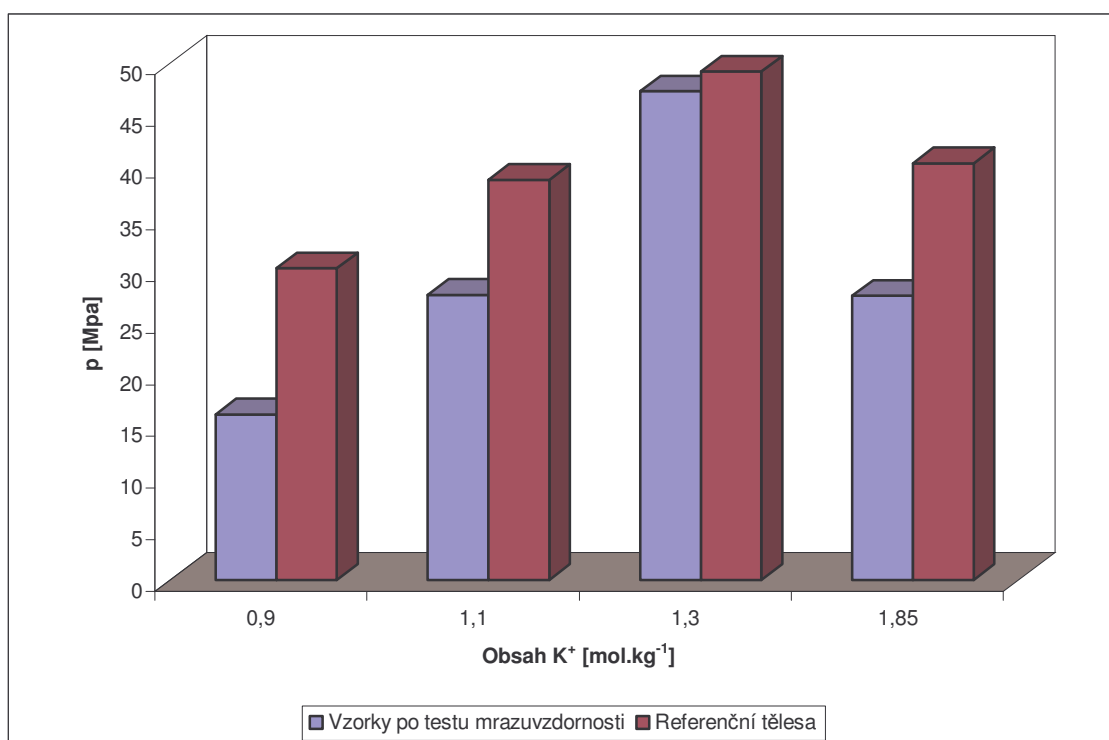
U této sady těles bylo zjištěno, že k dosažení maximální pevnosti dochází již po 14 dnech, protože hodnoty jsou podobné výsledkům získaným po 28 dnech. Jako nevyhovující se ukázaly vzorky připravené s 80 % plniva, které i po 28 dnech vykazovaly hodnotu pevnosti v tlaku menší jak 1 MPa. Testy s touto sadou těles ukázaly, že geopolymery s obsahem sodných iontů mají výrazně horší vlastnosti než obdobné geopolymery obsahující ionty draselné.

3.2 Stanovení mrazuvzdornosti

Jak bylo uvedeno výše, pro testy mrazuvzdornosti byla použita norma ČSN EN 14617-5. Tyto zkoušky byly provedeny se zkušebními tělesy po 28 dnech tuhnutí a tvrdnutí, s různým obsahem K^+ , Ca^+ , Na^+ a u vybraných vzorků s $1,85 \text{ mol.kg}^{-1}$ K^+ , resp. Na^+ a různými

ným obsahem plniva. Jako referenční tělesa byla použita vždy tělesa připravená z identických geopolymerních směsí, která nebyla podrobena zmrazování a rozmrazování.

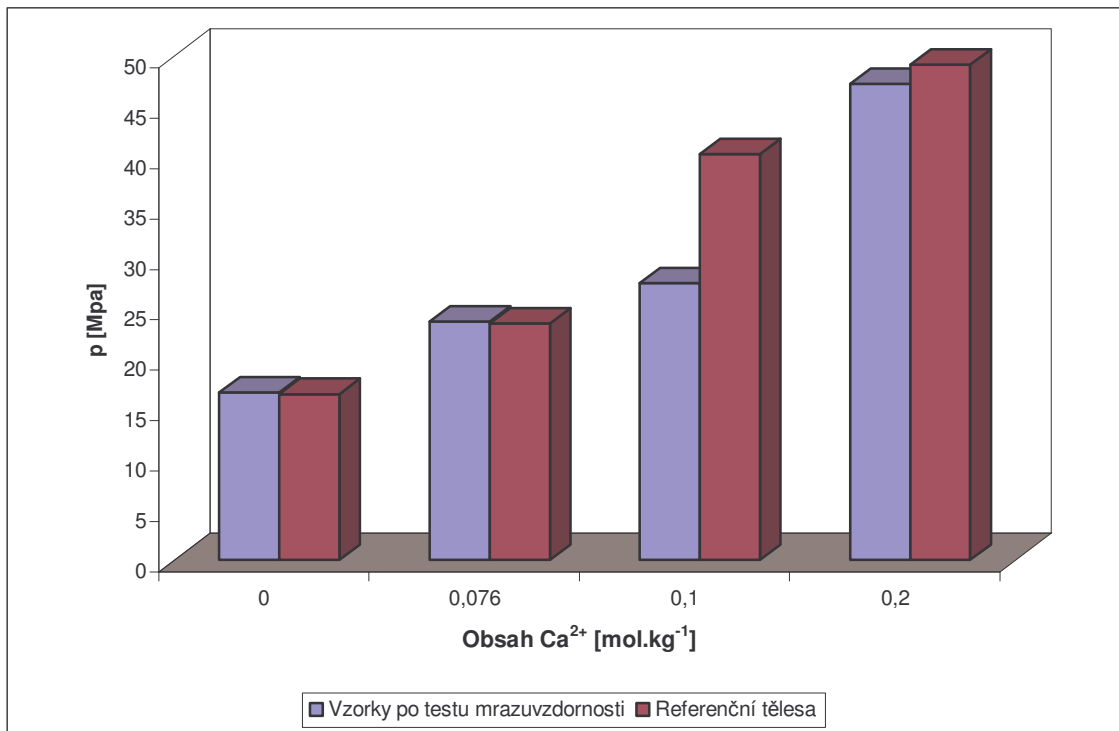
Dodané vzorky s různým obsahem K^+ 0,5; 0,7; 0,9; 1,1; 1,3 a 1,85 mol.kg⁻¹ pojiva byly podrobeny 25 cyklům zmražení a rozmražení. Vzorky s 0,5 a 0,7 mol.kg⁻¹ K^+ se rozpadly po 11, resp. po 6 cyklech. Ostatní vzorky v této sadě se ukázaly jako odolné proti působení mrazu a bylo u nich provedeno všech 25 cyklů. Jejich konečné hodnoty pevnosti v tlaku byly srovnány s referenčními tělesy a jsou uvedeny na obr. 11.



Obr. 11. Stanovení mrazuvzdornosti u těles s různým obsahem K^+

Z obrázku je zřejmé, že působení mrazu má na pevnost těles negativní vliv. Pevnost v tlaku u těles této sady se po 25 cyklech snížila o 10 – 15 MPa. Jako nejodolnější po testech mrazuvzdornosti bylo dosaženo u těles s obsahem K^+ 1,3 mol.kg⁻¹ pojiva, kde se rozdíl od ostatních těles snížila pevnost pouze o 2 MPa (viz. příloha P 6).

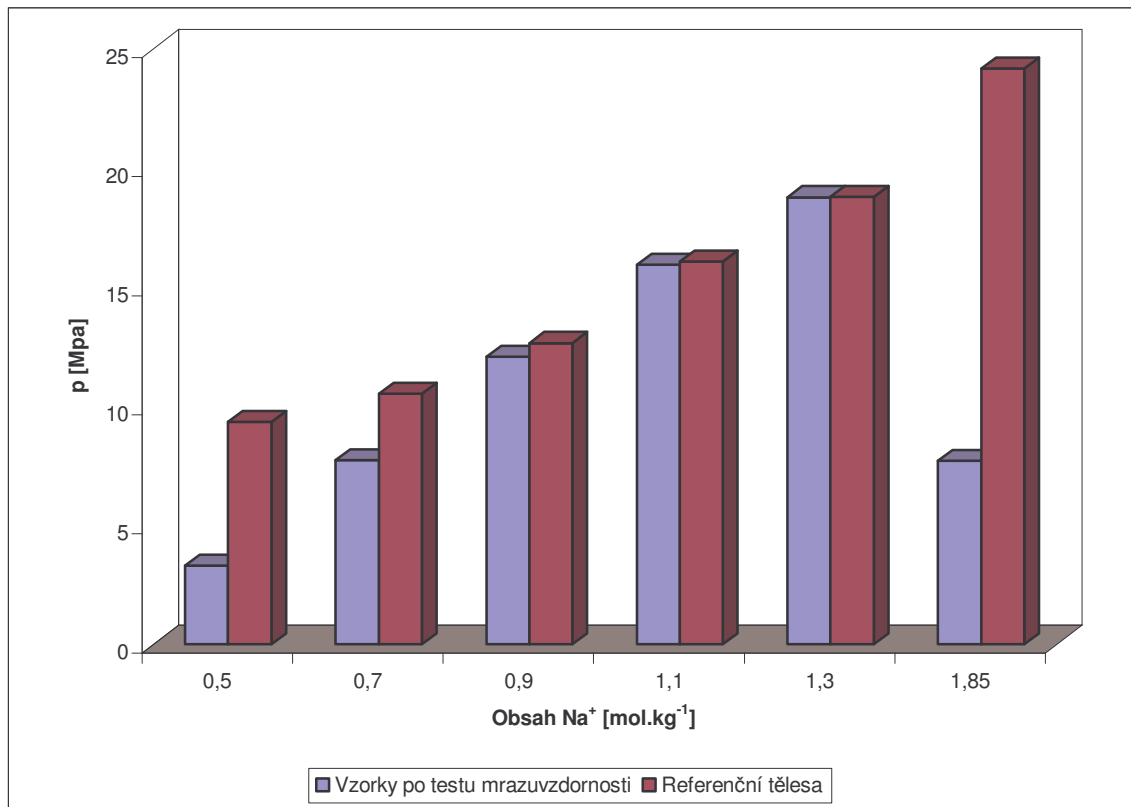
Další dodaná tělesa obsahovala různá množství Ca^+ . U těchto těles byla mrazuvzdornost lepší, než u předešlé sady s různým obsahem K^+ .



Obr. 12. Stanovení mrazuvzdornosti u těles s různým obsahem Ca⁺

Většina těles s různým obsahem vápenatých iontů se ukázala jako odolná proti působení mrazu, protože se téměř nezměnila jejich pevnost oproti referenčním tělesům. Jediným případem, kde se působení mrazu projevilo výrazným zhoršením pevnosti, jsou tělesa s obsahem Ca²⁺ 0,1 mol.kg⁻¹ (viz. příloha P 7).

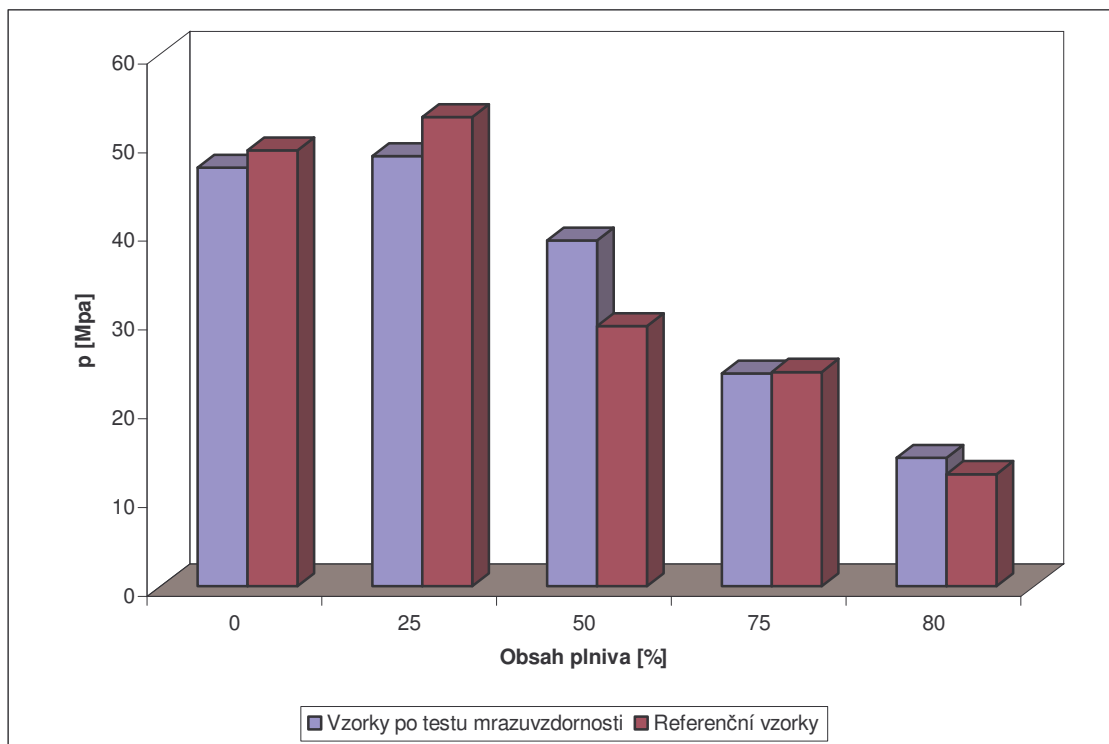
Třetí sada těles, která byla testována na mrazuvzdornost, obsahovala různá množství Na⁺. Výsledky testů u této sady těles jsou uvedeny na obr. 13.



Obr. 13. Stanovení mrazuvzdornosti u vzorků s různým obsahem Na⁺

Tělesa dodaná s různým obsahem Na⁺ se ukázala jako mrazu odolná od 0,9 do 1,3 mol.kg⁻¹ Na⁺. Nejméně odolná byla tělesa s obsahem Na⁺ 0,5 a 1,85 mol.kg⁻¹, u kterých se pevnosti snížily o 6 MPa a u těles s obsahem 1,85 mol.kg⁻¹ Na⁺ dokonce o 16,5 Mpa (viz. příloha P 8).

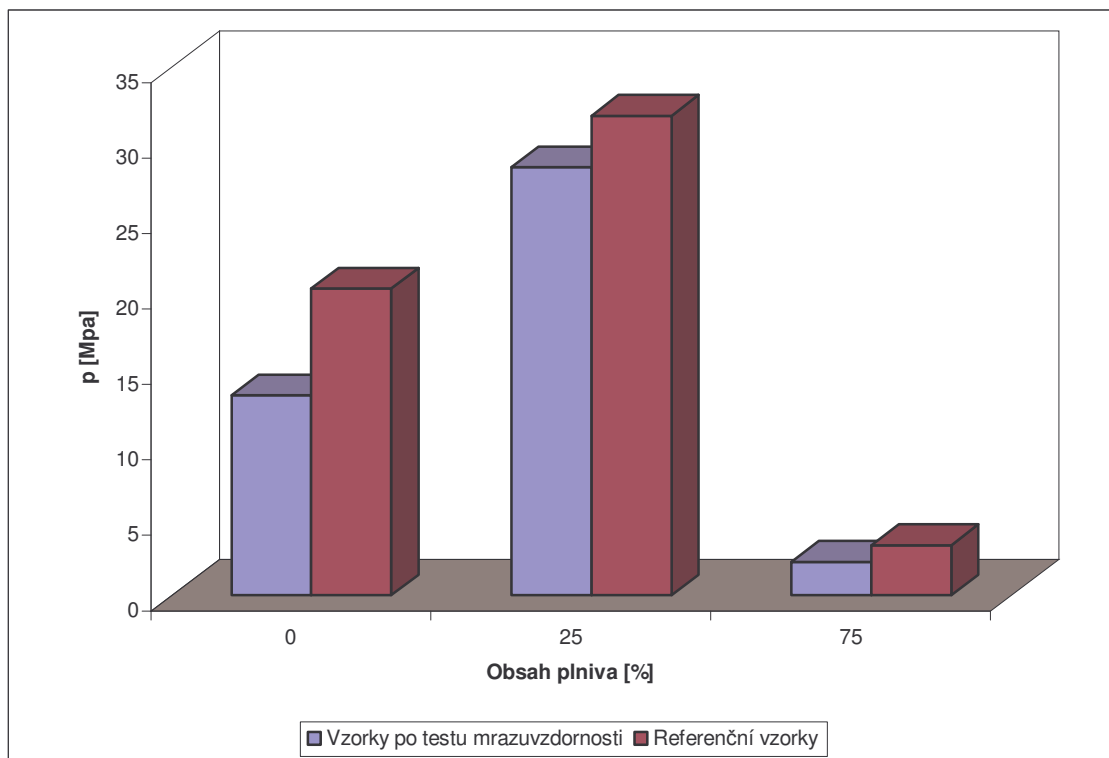
Další dvě sady dodaných těles byly připraveny s konstantním obsahem K⁺ a Na⁺. U první sady byl zvolený obsah K⁺ 1,85 mol.kg⁻¹ pojiva a měnilo se hmotnostní procento plniva, které bylo použito k přípravě. Všechna tato tělesa prošla 25 cykly zmražení a rozmražení a naměřené hodnoty jsou uvedeny na obr. 14.



Obr. 14. Stanovení mrazuvzdornosti u těles s obsahem K^+ $1,85 \text{ mol.kg}^{-1}$ a různým obsahem plniva

U těles s 0, 25, 75 a 80 % se působení teplot $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ neprojevalo a naměřené hodnoty jsou téměř shodné s referenčními tělesy. U těles s obsahem plniva 50 % se pevnost v tlaku dokonce zvýšila oproti referenčnímu tělesu a to o 10 MPa (viz. příloha P 9).

Poslední sada těles, která byla testována na mrazuvzdornost obsahovala konstantní množství Na^+ $1,85 \text{ mol.kg}^{-1}$ geopolymeračního pojiva a stejně jako v předchozím případě se jednotlivé vzorky lišily obsahem plniva v hmotnostních procentech vzhledem k množství směsi. Tato sada vzorků se ukázala jako nejméně odolná proti působení mrazu, jak ukazuje obr. 15. Referenční tělesa s obsahem 80 % plniva nedosahovala po 28 dnech tuhnutí měřitelných hodnot pevnosti v tlaku a při testech mrazuvzdornosti se v průměru po 3 cyklech rozpadla. Vzorky s 50 % plniva nebyly dodány a proto u nich nebyly provedeny zkoušky pevnosti v tlaku ani mrazuvzdornosti.



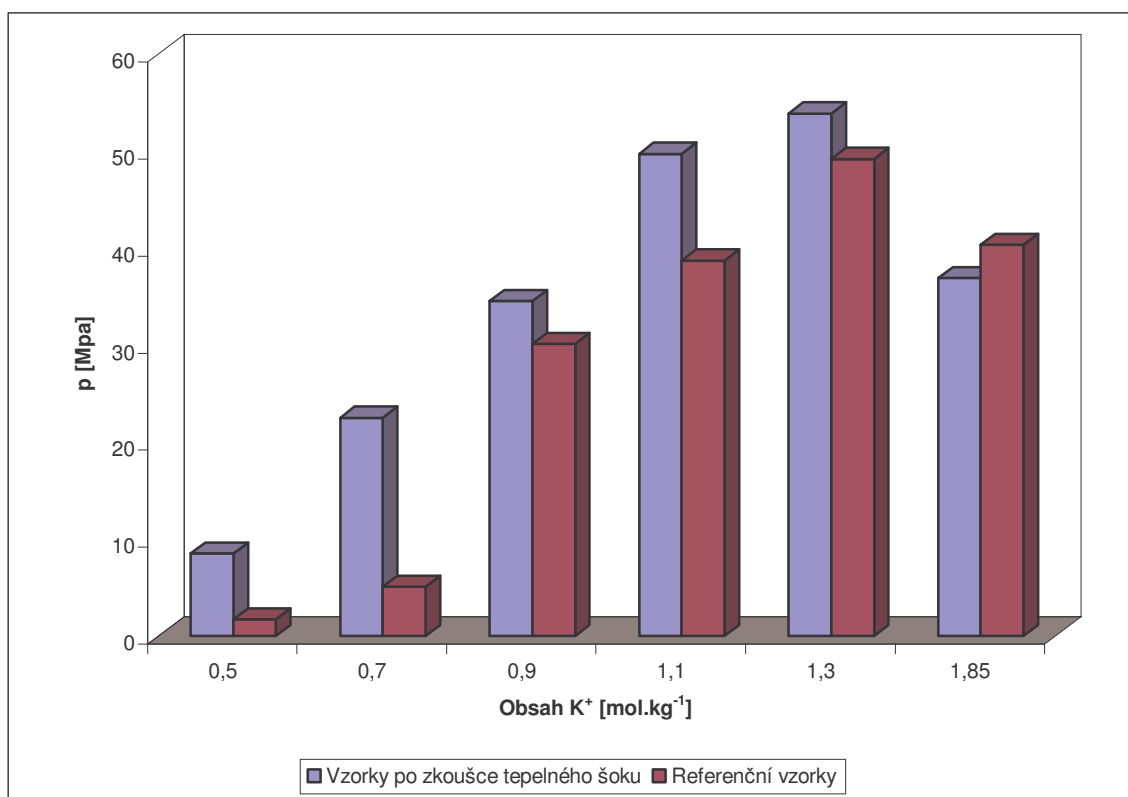
Obr. 15. Stanovení mrazuvzdornosti u těles s obsahem Na^+ $1,85 \text{ mol.kg}^{-1}$ a různým obsahem plniva

Tato tělesa dosahovala nejnižších hodnot pevnosti v tlaku a po zkouškách mrazuvzdornosti se ještě jejich mechanické vlastnosti zhoršily. U nejpevnějšího tělesa z této sady se pevnost snížila o 4 MPa. Z těles, která vydržela všech 25 cyklů se nejvíce pevnost snížila u těles bez plniva, u nichž se pevnost snížila o 7 MPa (viz. příloha P 10).

3.3 Stanovení odolnosti proti tepelnému šoku

Pro stanovení odolnosti proti tepelnému šoku byla jako předloha použita norma ČSN EN 14617-6, která byla upravena pro testování geopolymerních vzorků. Testování bylo provedeno ve 20 cyklech, kdy byla tělesa vysušena při $105 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ a následně ponořena do vody o teplotě $15 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$. Testované sady těles byly dodány jako v předešlém případě s různým obsahem K^+ , Ca^{2+} a Na^+ . Dále byla ještě testována tělesa s konstantním obsahem K^+ a Na^+ , která měla stejné složení jako u testu mrazuvzdornosti.

Tělesa se zvyšujícím se obsahem K^+ byla podrobena 20 cyklům a následně provedena zkouška na pevnost v tlaku. Hodnoty pevnosti jsou uvedeny na obr. 16.

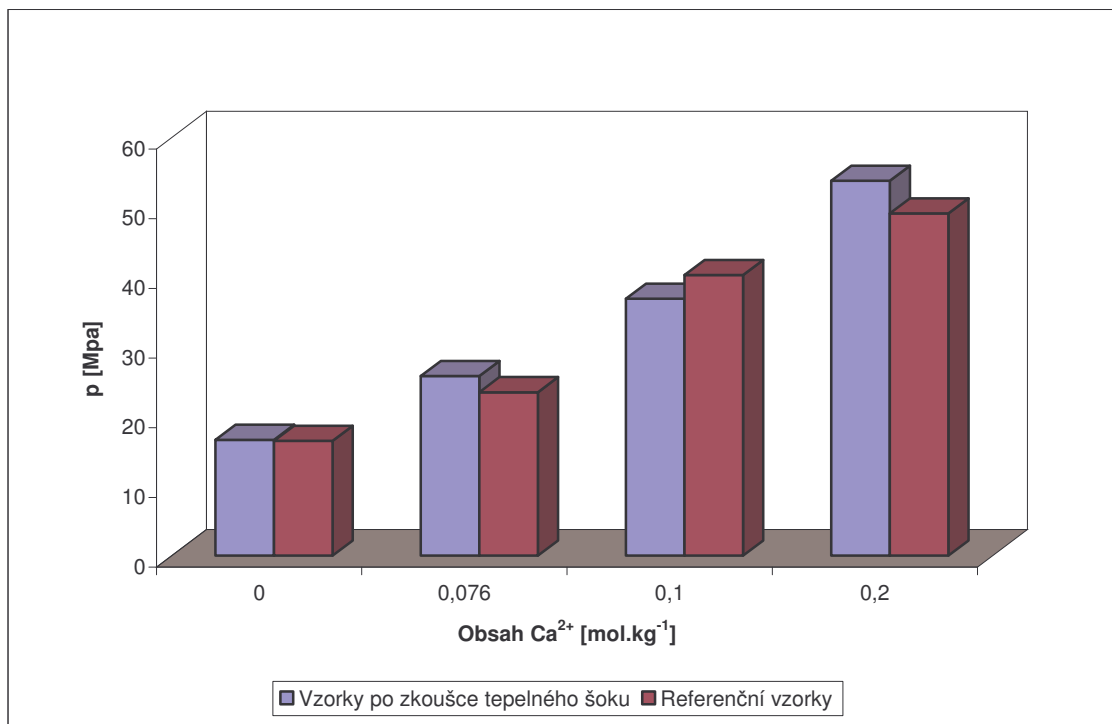


Obr.16. Stanovení odolnosti proti tepelnému šoku u těles s různým obsahem K^+

Z obr. 16. je zřejmé, že téměř u všech vzorků byla pevnost po zkouškách odolnosti proti tepelnému šoku vyšší, než u referenčních těles, a to v rozmezí od 7 MPa do 17 MPa (viz. příloha P 11). To by mohlo být zapříčiněno sušením vzorku v sušárně při 105 °C, čímž mohlo být urychleno tuhnutí vzorků.

U vzorků s obsahem K^+ 1,85 mol.kg^{-1} pojiva byla pevnost po těchto zkouškách nižší a to o 3,4 MPa.

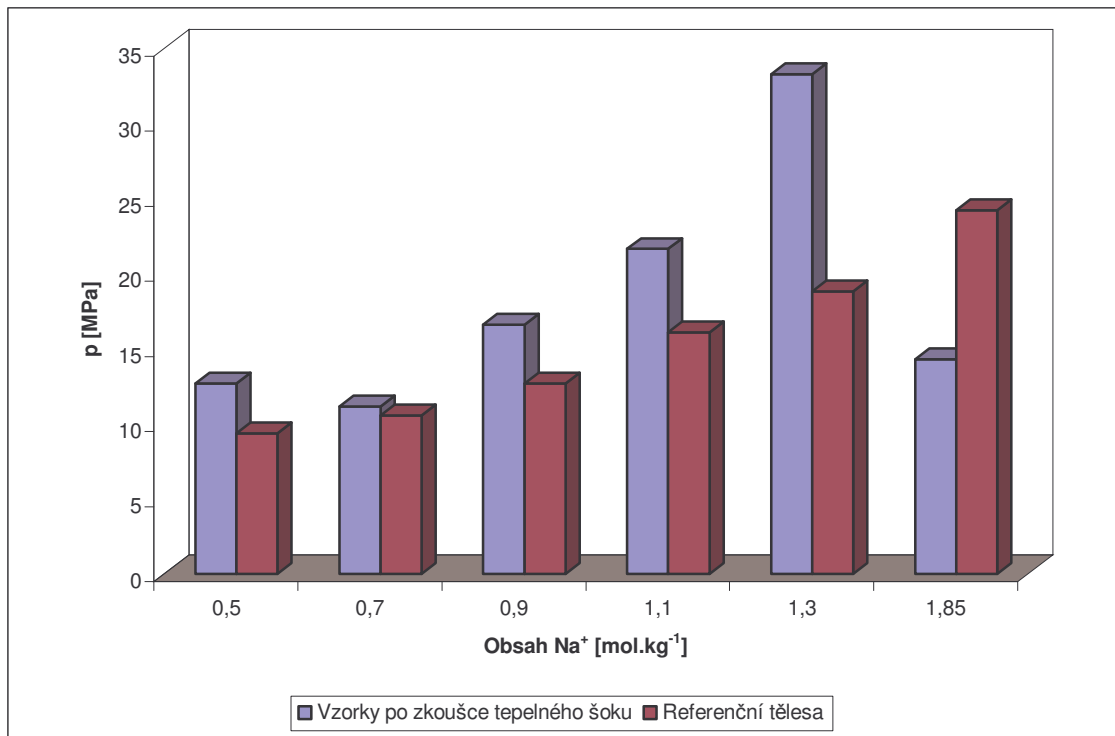
Další sada dodaných vzorků, která byla testována, obsahovala různá množství Ca^{2+} . U těchto vzorků jsou hodnoty pevnosti po zkoušce odolnosti proti tepelnému šoku srovnatelné s referenčními tělesy, jak je uvedeno na obr. 17.



Obr. 17. Stanovení odolnosti proti tepelnému šoku u těles s různým obsahem Ca²⁺

Jak již bylo zjištěno zkouškami pevnosti v tlaku, nejlepšího výsledku bylo dosaženo u těles s obsahem Ca²⁺ 0,2 mol.kg⁻¹. Po zkoušce odolnosti proti tepelnému šoku se pevnost ještě zvýšila oproti referenčnímu vzorku o 5 MPa (viz. příloha P 12).

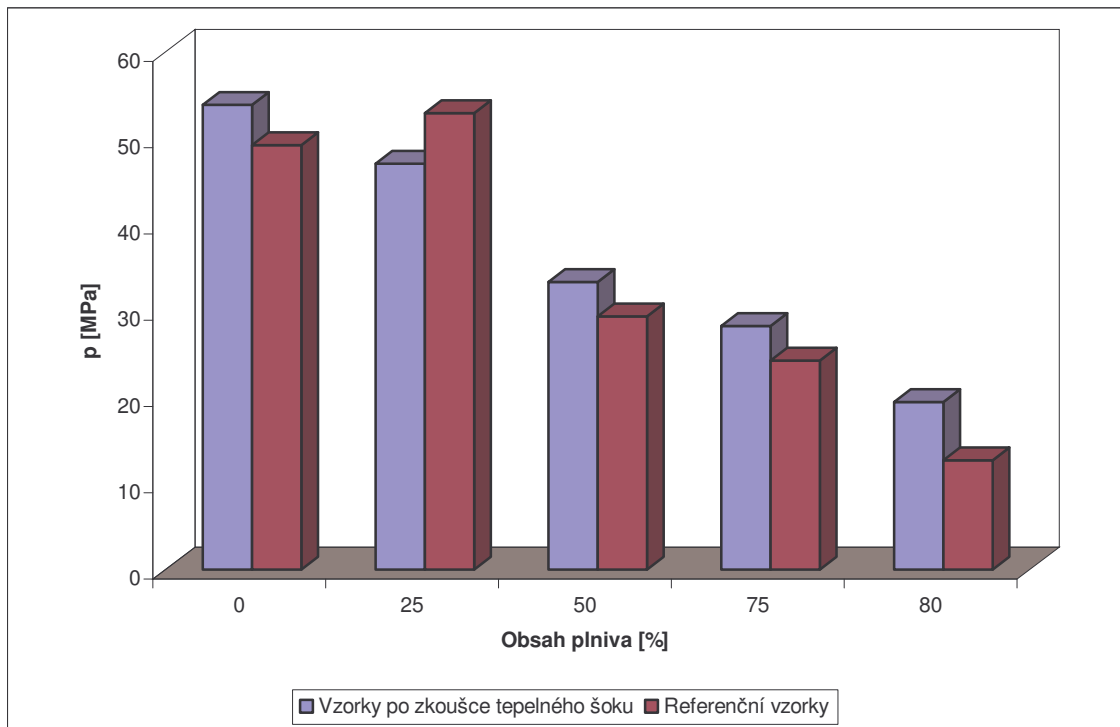
Další sada těles měla zvyšující se obsah Na⁺ od 0,5 do 1,85 mol.kg⁻¹ pojiva. Také u této sady těles všechna tělesa vydržela 20 cyklů sušení a ponoření do vody. Jak je vidět z obr. 18. i u této sady se po provedení zkoušky odolnosti proti tepelnému šoku pevnost těles zvýšila, a to nejvíce u tělesa s obsahem Na⁺ 1,3 mol.kg⁻¹. Jediné těleso, u kterého se pevnost pro provedení této zkoušky snížila, bylo těleso s obsahem Na⁺ 1,85 mol.kg⁻¹ směsi, a to o 10 MPa.



Obr. 18. Stanovení odolnosti proti tepelnému šoku u těles s různým obsahem Na⁺

Jak již bylo uvedeno výše, nejlepší pevnosti dosáhly vzorky připravené s obsahem Na⁺ 1,3 mol.kg⁻¹ pojiva, která se z původní hodnoty 18,8 MPa zvýšila po 20 cyklech na 33,3 MPa (viz. příloha P 13).

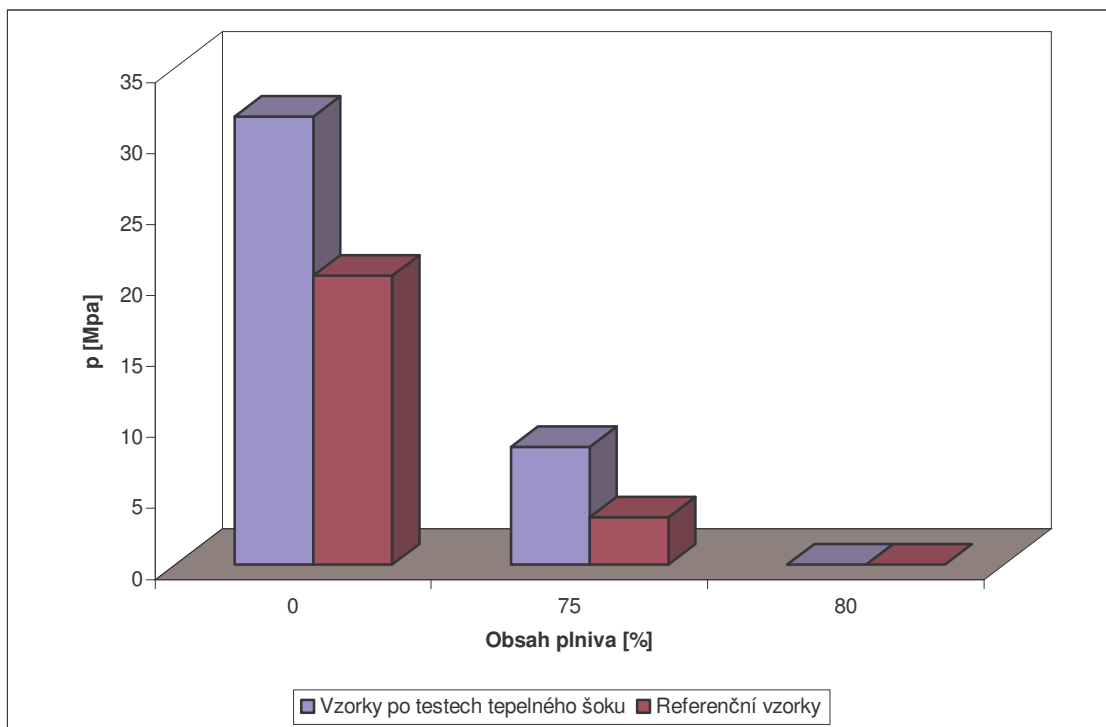
Další 2 sady těles, u kterých byla provedena zkouška odolnosti proti tepelnému šoku, byla tělesa s konstantním množstvím K⁺, resp. Na⁺ a různými množstvími plniva v hmotnostních procentech od 0 až po 80 % plniva na kg směsi. U většiny těles této sady se také projevilo zlepšení pevnosti v tlaku po provedení této zkoušky. Jediné těleso, u kterého se pevnost oproti referenčnímu tělesu zhoršila, bylo těleso s 25 % plniva, jak je uvedeno na obr. 19.



Obr. 19. Stanovení odolnosti proti teplotnímu šoku u těles s konstantním množstvím K^+ $1,85 \text{ mol.kg}^{-1}$ a různým množstvím plniva

U těchto těles dosahovala nejvyšších hodnot referenční tělesa s obsahem plniva 25 %. Po provedení zkoušky na odolnost proti tepelnému šoku došlo k lepšímu ztuhnutí u těles bez plniva a pevnost byla o 1 MPa vyšší, než u referenčních těles s 25 % plniva. U vzorku s 25 % se navíc pevnost po provedení této zkoušky snížila o 6 MPa (viz. příloha P 14).

Poslední sada těles, u které byla provedena zkouška odolnosti proti tepelnému šoku byla s množstvím Na^+ $1,85 \text{ mol.kg}^{-1}$ pojiva a měnilo se množství plniva, které bylo přidáváno do směsi. Srovnání s referenčními tělesy je uvedeno na obr. 21.



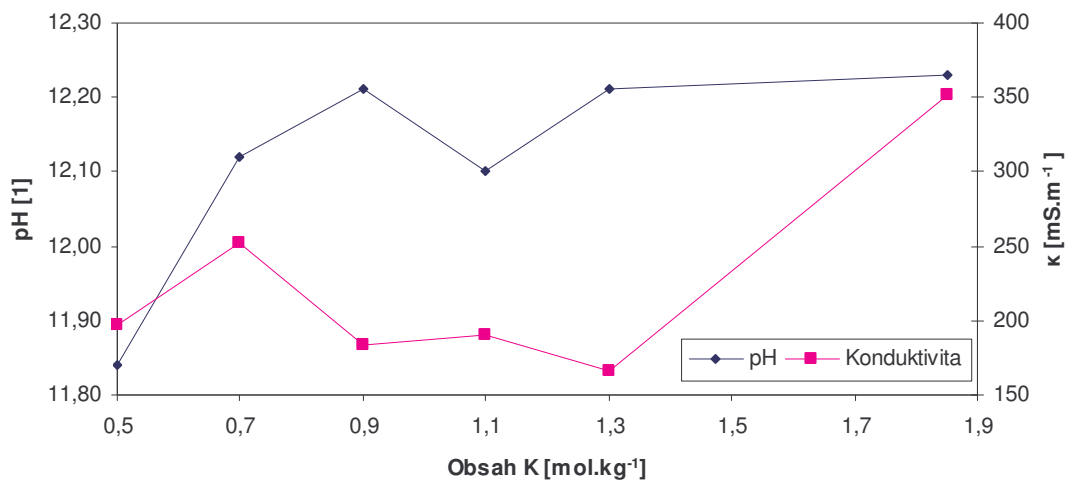
Obr. 20. Stanovení odolnosti proti tepelnému šoku u těles s konstantním množstvím Na^+ $1,85 \text{ mol.kg}^{-1}$ a různým obsahem plniva

Z těles této sady, která byla k dispozici, měla největší pevnost tělesa bez plniva. Tělesa s 25 %, u kterých se dala předpokládat největší pevnost, vzhledem k tomu, že referenční tělesa s 25 % plniva byla z této sady nejpevnější, nebyla dodána. U těles bez plniva se po provedení zkoušky odolnosti proti tepelnému šoku pevnost ještě zvýšila na hodnotu 11 MPa (viz. příloha P 15). U těles s 80 % plniva nebyly naměřeny reprodukovatelné výsledky, protože jak u zkoušených těles, tak u referenčních těles byla síla potřebná k rozdrcení vzorku menší jak 1 kN.

3.4 Stanovení vyluhovatelnosti

Tato část diplomové práce se zabývá závislosti pH a konduktivity vodných výluhů zkušebních těles na složení vzorků a jejich modifikací s K^+ , Ca^{2+} a Na^+ . Pro přípravu vodných výluhů byly použity vzorky s předešlých testů na pevnost v tlaku po době tuhnutí 28 dní.

Jako první byl porovnáván vliv různých množství draselných iontů ve vzorku na pH a konduktivitu. Výsledky jsou uvedeny na obr. 21.

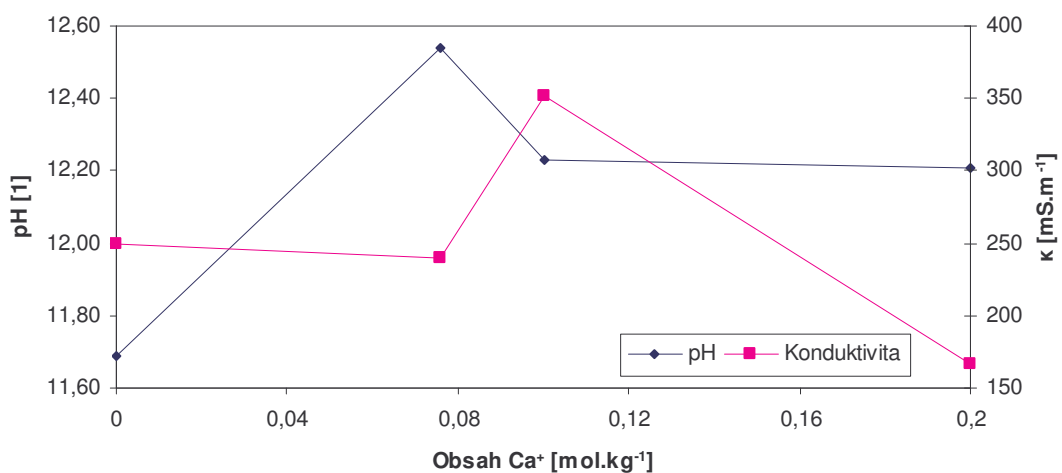
Obr. 21. Závislost pH a konduktivity na obsahu K⁺

Jak je uvedené na obr. 21 pH u vzorků s rostoucím obsahem K⁺ má stoupající trend. Nejnižší je hodnota u těles s obsahem K⁺ 0,5 mol.kg⁻¹ tato hodnota je 11,84.

Konduktivita má klesající trend, pouze u těles s obsahem K⁺ 1,85 mol.kg⁻¹ konduktivita roste a to na hodnotu 351 mS.m⁻¹.

Obecně lze říci, že delší doba tuhnutí těles snižuje jak hodnoty pH a to o 0,3 – 0,7, tak hodnoty konduktivity o 110 – 300 mS.m⁻¹ (viz příloha P 16).

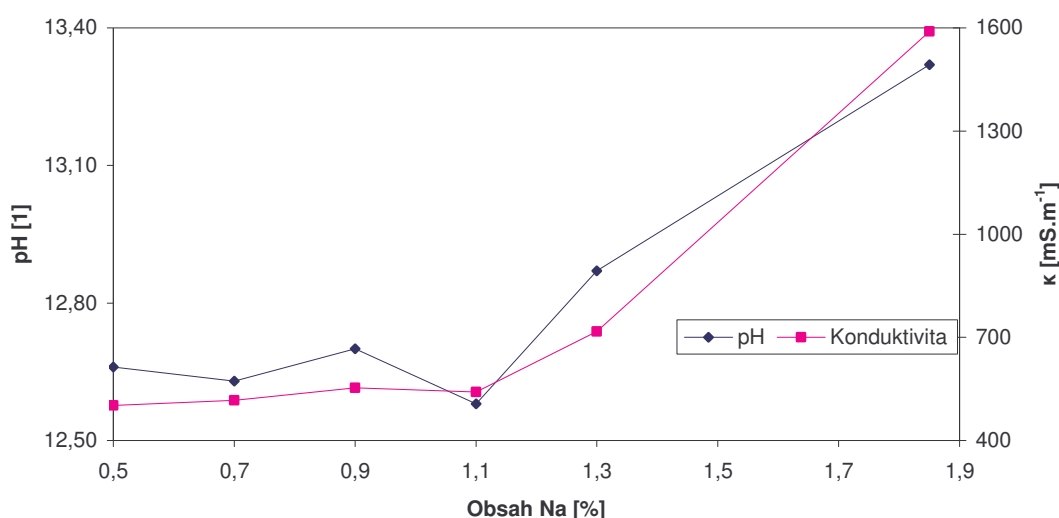
Vzorky připravené s různým obsahem Ca²⁺ a jejich hodnoty pH a konduktivity jsou uvedeny na obr. 22.

Obr. 22 Závislost pH a konduktivity na obsahu Ca²⁺ v tělesech

Stejně jako u těles s různým obsahem K^+ je i u těles s Ca^{2+} vývoj pH rostoucí od nejnižších množství vápníku po $0,2 \text{ mol.kg}^{-1}$ a i konduktivita se při vyšších koncentracích vápníků snižuje.

Také zde se projeví delší doba vytvrzení snížením jednotlivých hodnot pH o 0,3 – 1,1 a konduktivita se snižuje o 50 – 250 mS.m^{-1} (viz. příloha P 16)

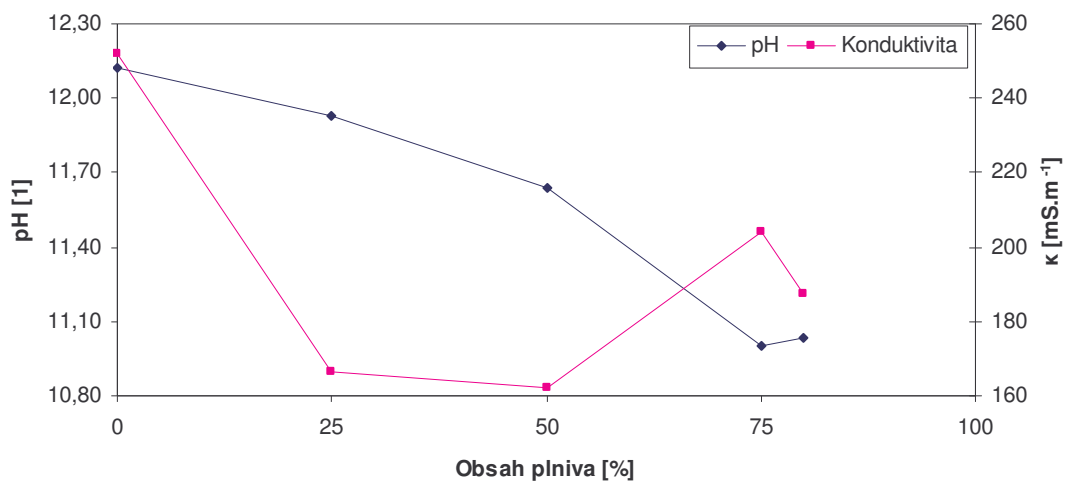
V případě měněního se obsahu Na^+ v tělesech je vývoj pH také stoupající jako u předešlých vzorků, ale nárůst pH je více znatelný než u vzorků s K^+ , resp. Ca^{2+} , to je zřejmé z obr. 23.



Obr. 23. Závislost pH a konduktivity na obsahu Na^+

V tomto případě, na rozdíl od předešlých dvou sad těles, konduktivita s větším množstvím Na^+ v tělesech roste, a to od hodnot 500 mS.m^{-1} u těles s $0,5 \text{ mol.kg}^{-1}$ do 1600 mS.m^{-1} při obsahu Na^+ $1,85 \text{ mol.kg}^{-1}$ (viz. příloha P 17). Také zde se delší doba tuhnutí projeví snížením hodnot pH a konduktivity.

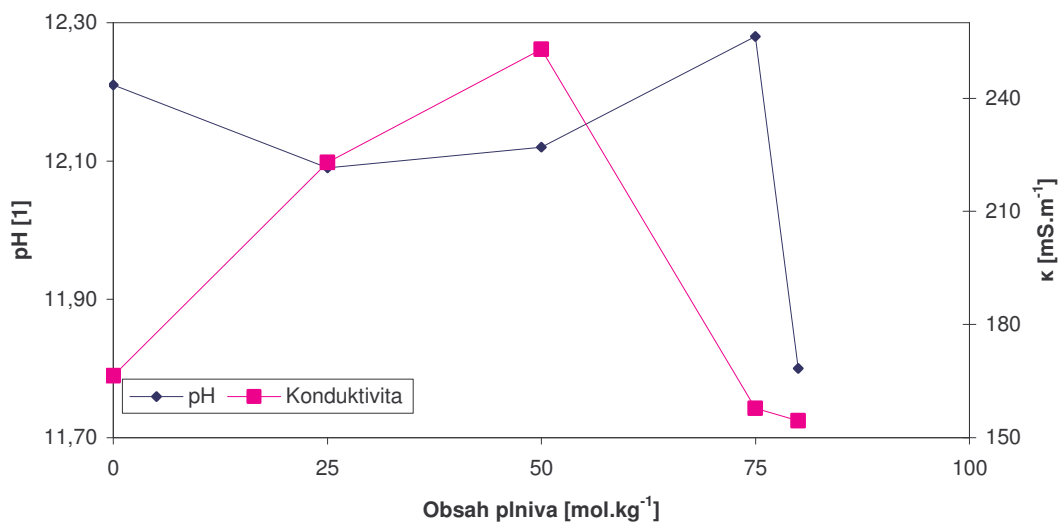
Další tři sady vzorků byly připraveny vždy s konstantním množstvím K^+ , popř. Na^+ v geopolymerním pojivu a různým přidavkem plniva. U první sady dodaných těles bylo množství K^+ $0,7 \text{ mol.kg}^{-1}$ pojiva a různý obsah plniva. Hodnoty pH a konduktivity jsou uvedeny v grafu na obr. 24.



Obr. 24. Závislost pH a konduktivity na obsahu plniva u těles s $0,7 \text{ mol.kg}^{-1} \text{ K}^+$

U této sady vzorků jako u jediné mělo pH klesající trend, a to od 12,12 u těles bez plniva až po hodnoty okolo pH 11 u vzorků s 75 % a 80 % plniva (viz. příloha P 17). Vývoj konduktivity je zpočátku klesající až po tělesa s 50 % plniva, poté začínají hodnoty konduktivity opět narůstat.

Druhá testovaná sada obsahovala tělesa s konstantním množstvím K^+ $1,85 \text{ mol.kg}^{-1}$ a různým procentem plniva. Výsledky vyluhovacích testů jsou v grafu na obr. 25.

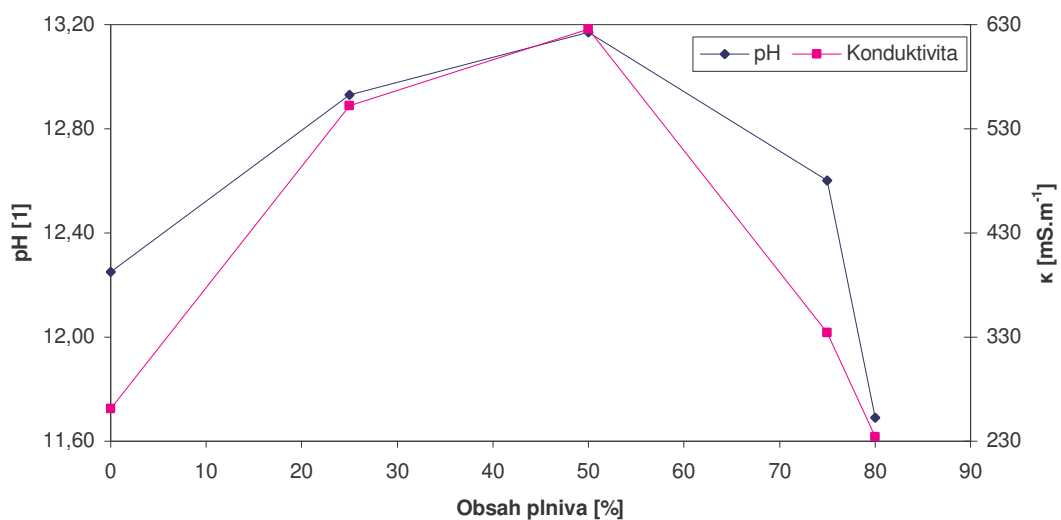


Obr. 25. Závislost pH a konduktivity na obsahu plniva u těles s $1,85 \text{ mol.kg}^{-1} \text{ K}^+$

U této sady je vývoj pH i konduktivity opačný, než u sady těles s $0,7 \text{ mol.kg}^{-1} \text{ K}^+$. Hodnota pH má rostoucí tendenci od těles bez plniva až po tělesa připravená s 75 % plniva. U těles s 80 % je patrné ostré snížení hodnot pH až na hodnotu 11,8.

Konduktivita u těchto těles roste s počáteční hodnoty 160 mS.m^{-1} , až po hodnotu 250 mS.m^{-1} , která byla naměřena u těles s 50 % plniva. U ostatních těles této sady se konduktivita snižuje až k hodnotám okolo 150 mS.m^{-1} , které byly změřeny u těles se 75 a 80 % plniva. Stejně jako v předešlých případech jsou zde hodnoty pH a konduktivity nižší po 28 dnech od přípravy těles, než hodnoty naměřené 7 dní po přípravě (viz. příloha P 18).

Poslední sada těles s různým obsahem plniva byla dodána s konstantním množstvím Na^+ , které činilo $1,85 \text{ mol.kg}^{-1}$ geopolymeračního pojiva. U této sady těles je vývoj konduktivity podobný jako u těles s $1,85 \text{ mol.kg}^{-1} \text{ K}^+$, jak je patrné z obr. 26.

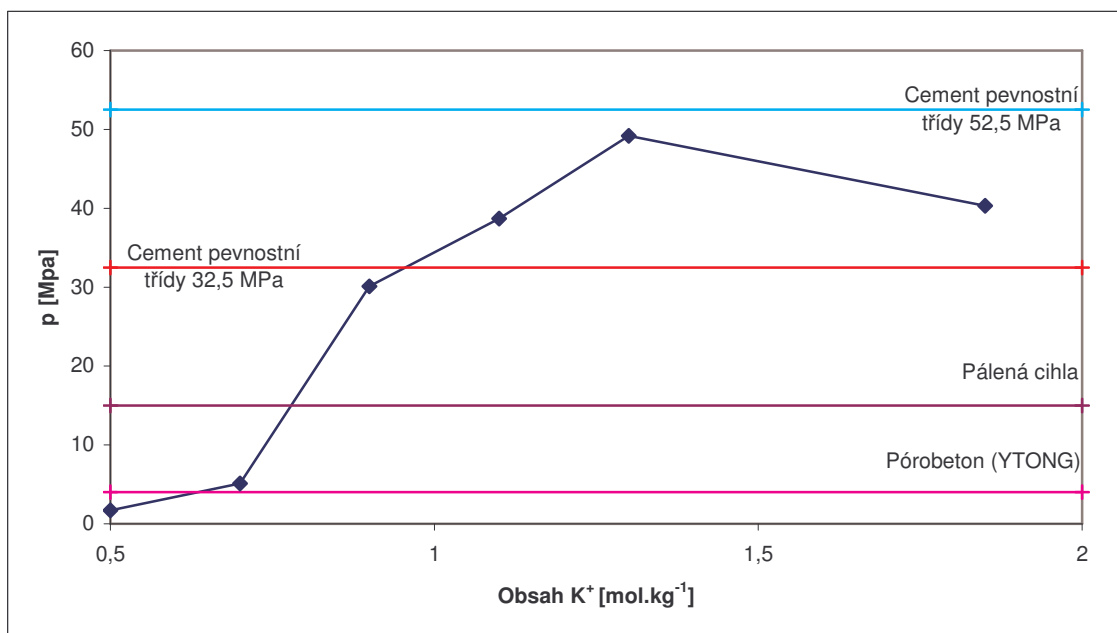


Obr. 26. Závislost pH a konduktivity na obsahu plniva u těles s $1,85 \text{ mol.kg}^{-1} \text{ Na}^+$

V tomto případě pH roste od 12,2 až do 13,2, což je hodnota naměřená u těles s 50 % plniva. U dalších těles této sady pH klesá až na hodnotu 11,7, která byla naměřena u těles s 80 % plniva. Vývoj konduktivity u této sady těles má podobnou tendenci jako vývoj hodnot pH. Výluh u těles bez plniva měl konduktivitu 260 mS.m^{-1} a s většími obsahy plniva je konduktivita rostoucí až po tělesa s 50 % plniva, u kterých byla konduktivita 626 mS.m^{-1} . Poté konduktivita opět klesala a u těles s 80 % plniva byla naměřena 230 mS.m^{-1} (viz. příloha P 18).

3.5 Srovnání geopolymerních vzorků s komerčně používanými stavebními pojivy

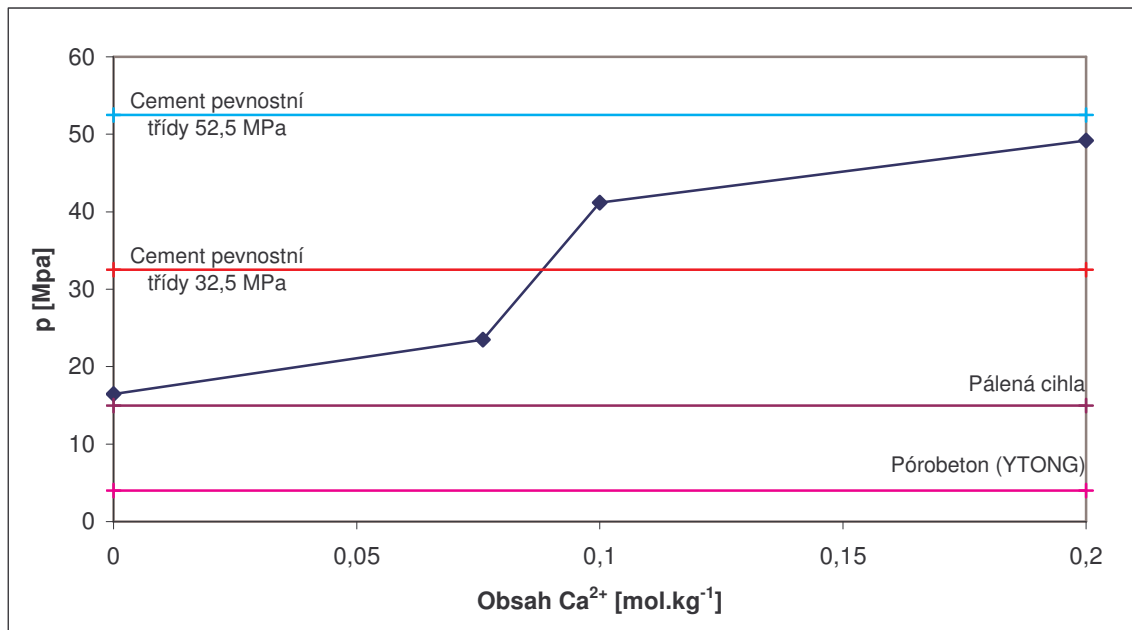
Tato část diplomové práce se zabývá srovnáním pevnosti v tlaku dodaných geopolymerních vzorků s garantovanými hodnotami používaných stavebních materiálů [31,32,33]. Geopolymerní vzorky byly dodány s různým obsahem K^+ , Ca^{2+} , Na^+ a stejně jako u předchozích testů vzorky s konstantním množstvím K^+ a Na^+ s různými přídávky plniva v hmotnostních procentech. Pevnost těchto vzorků byla srovnána s deklarovanými hodnotami pevnosti přesných tvárnic s pórobetonu značky YTONG [31], s pálenou cihlou [32] a s cementy pevnostní třídy 32,5 MPa a 52,5 MPa [33]. Geopolymerní vzorky se zvyšujícím se obsahem draselných iontů srovnané s těmito stavebními materiály jsou uvedeny na obr. 27.



Obr. 27. Srovnání geopolymerních vzorků s K^+ se stavebními materiály

Pevnost u vzorků s nižšími koncentracemi K^+ se pohybují na úrovni přesných tvárnic z pórobetonu [31]. Od množství K^+ 1,1 mol.kg⁻¹ již vzorky dosahují pevnosti jako cementy s nejnižší pevnostní třídy [33]. Vzorky s obsahem K^+ 1,3 mol.kg⁻¹ dosahovaly pevnosti okolo 50 MPa, což je hodnota, která náleží do druhé pevnostní třídy cementu, která je podle normy ČSN EN 197-1 minimálně 42,5 MPa [33].

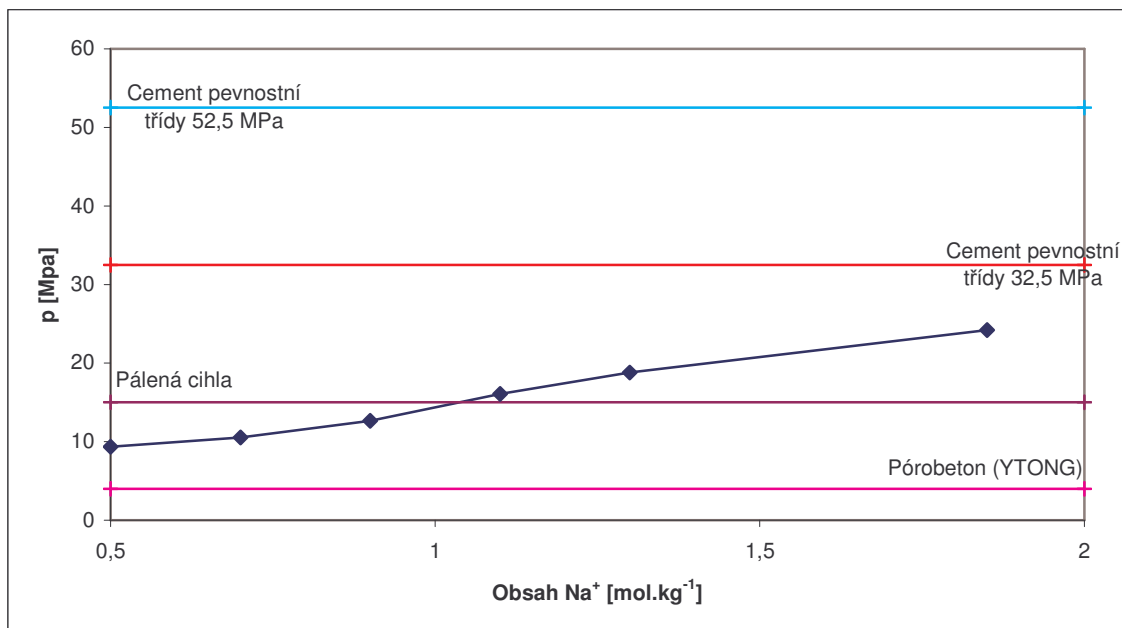
Vzorky s různým obsahem Ca^{2+} byly také srovnány s těmito komerčně vyráběnými stavebními materiály [31,32,33].



Obr. 28. Srovnání geopolymerních vzorků s Ca^{2+} se stavebními materiály

U této sady jsou vzorky s nejnižší pevností bez Ca^{2+} a jsou srovnatelné s pevností pálených cihel [32]. Vzorky s Ca^{2+} 0,1 a 0,2 mol.kg⁻¹ již dosahovaly pevnosti cementů. Nejpevnější vzorek s obsahem 0,2 mol.kg⁻¹ již dosahoval pevnosti jako cementy z druhé pevnostní třídy, která je od hodnot 42,5 MPa [33].

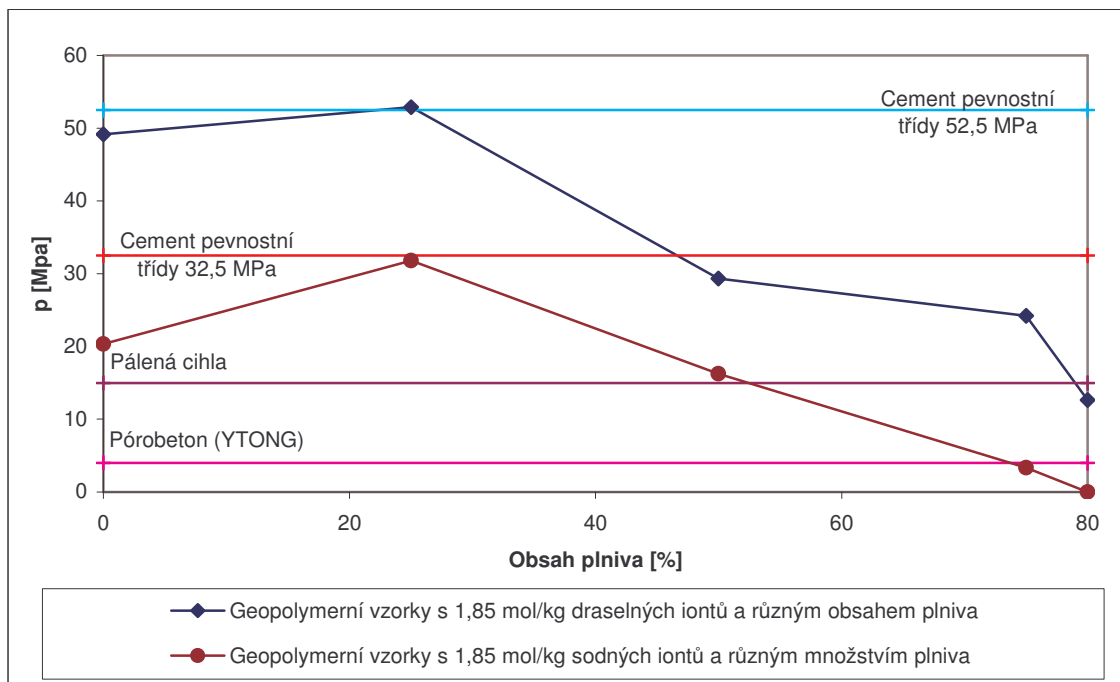
Další sada vzorků, která byla srovnávána s běžnými stavebními materiály, byla dodána se zvyšujícím se množstvím Na^+ . U této sady se pevnost zvyšovala od vzorků 0,5 mol.kg⁻¹, kdy byla 9,34 MPa, až po 25 MPa, které dosahovaly vzorky s 1,85 mol.kg⁻¹ Na^+ . Tato sada dosahovala nejnižší pevnosti ze všech. Pevnosti těchto vzorků jsou uvedeny na obr. 29.



Obr. 29. Srovnání geopolymerních vzorků s Na⁺ se stavebními materiály

Z Obr. 29. je patrné, že vzorky s 1,1 a 1,3 mol.kg⁻¹ mají podobnou pevnost jako pálené cihly. U této jediné sady nejpevnější vzorky nedosahovaly ani takové pevnosti jako u nejnižší pevnostní třídy [33]. Pevnost u vzorků s 1,85 mol.kg⁻¹ Na⁺ byla o 8 MPa nižší.

Poslední dvě sady těles, které byly srovnávány s komerčně používanými stavebními materiály [31,32,33], byly vzorky s konstantními obsahy K⁺, resp. Na⁺ a různými hmotnostními procenty plniva. Na obr. 30. jsou uvedeny vzorky s konstantním množstvím K⁺ 1,85 mol.kg⁻¹ a s množstvím Na⁺ 1,85 mol.kg⁻¹ geopolymerního pojiva. Obsah plniva byl u prvních vzorků této sady 0 % plniva a zvyšoval se až do 80 % plniva. Naměřené hodnoty pevnosti a jejich srovnání se stavebními materiály je na obr. 30.



Obr. 30. Srovnání geopolymerních vzorků s K^+ 1,85 a s Na^+ 1,85 mol.kg⁻¹ a různým obsahem plniva se stavebními materiály

Z obr. 30. je vidět, že obě sady vzorků mají se zvyšujícím se obsahem plniva podobný vývoj. Vzorky s 1,85 mol.kg⁻¹ a různým obsahem plniva jsou pevnější, než vzorky s Na^+ . Nejpevnější vzorky s obou těchto sad byly připraveny s obsahem plniva 25 %. U sady s konstantním obsahem K^+ byla u vzorků s 25 % plniva naměřena hodnota, která odpovídá cementu s pevnostní třídy 52,5 MPa [33].

U sady s konstantním obsahem Na^+ taky vykazovaly největší pevnost vzorky s obsahem plniva 25 %. Pevnost u těchto vzorků byla o 20 MPa nižší, než u vzorků s konstantním obsahem K^+ . Nejpevnější vzorky této sady se blížily pevnostní třídě cementu 32,5 MPa [33].

ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo studium fyzikálních a chemických vlastností u dodaných geopolymerních vzorků. Byly prováděny testy pevnosti v jednoosém tlaku, mrazuvzdornosti, odolnosti proti tepelnému šoku a výluhové testy v destilované vodě. Jednotlivé sady dodaných těles byly připravovány s různým obsahem draselných, vápenatých a sodných iontů. Byly naměřeny jejich pevnosti a zjištěno při jakém obsahu jednotlivých iontů ve vzorcích je dosahováno nejvyšších pevností. Další dvě sady vzorků byly dodány s konstantním obsahem draselných a sodných iontů a k nim byla přidávána různá množství plniva. Také u těchto vzorků byly provedeny testy pevnosti v tlaku, mrazuvzdornosti, odolnosti proti tepelnému šoku.

Tyto testy ukázaly, že u sady těles s různým obsahem draselných iontů byly nejpevnější a na provedené testy nejodolnější vzorky s obsahem $1,3 \text{ mol.kg}^{-1}$. U sady s různým obsahem vápenatých iontů ve vzorku byly nejkvalitnější vzorky s obsahem $0,2 \text{ mol.kg}^{-1} \text{ Ca}^{2+}$. U třetí sady byly nejpevnější vzorky s obsahem sodných iontů $1,85 \text{ mol.kg}^{-1}$, ale po provedení testu mrazuvzdornosti se ukázalo, že jejich pevnost velmi klesla. Proto z této sady těles se jako nejkvalitnější ukazuje těleso s obsahem $1,3 \text{ mol.kg}^{-1}$, u kterého pevnost po provedení testu mrazuvzdornosti nezměnila a po provedení zkoušky odolnosti proti tepelnému šoku se pevnost ještě zvýšila o 15 MPa.

Sady vzorků připravené z $1,85 \text{ mol.kg}^{-1} \text{ K}^+$ a Na^+ a různým obsahem plniva vykazovaly nejlepší hodnoty po provedení testů pevnosti a mrazuvzdornosti v obou případech vzorky s obsahem plniva 25 %. U vzorků s množstvím K^+ $1,85 \text{ mol.kg}^{-1}$ a 25 % plniva se pevnost po provedení zkoušky odolnosti proti tepelnému šoku snížila o 5 MPa a u těles s $1,85 \text{ mol.kg}^{-1} \text{ Na}^+$ nebylo možno tuto zkoušku provést, protože nebyla dodána zkušební tělesa. Tento test ukázal, že geopolymery s K^+ mají výrazně lepší vlastnosti než geopolymery s Na^+ .

V poslední části této diplomové práce byly tyto dodané vzorky srovnávány s komerčně používanými stavebními materiály. Nejpevnější vzorky ze všech sad dosahovaly pevnosti obdobné jako cementy pevnostní třídy 42,5 MPa. Téměř všechny dodané vzorky dosahovaly aspoň takové pevnosti jako běžně používané tvárnice z pórobetonu.

Provedené testy naznačují, že geopolymery mohou představovat reálnou alternativu k současným běžně používaným stavebním materiálům.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BRANDŠTETR, J. Zeolity ve starověkých maltách a betonech. *Informátor* [online]. 2000, číslo 20. [cit. 2004-07-03].
URL: <<http://www.clays.cz/informator/inf20.html>>
- [2] PROVIS, J. L. – LUKEY, G. C. Do geopolymers actually contain nanocrystalline zeolites? A reexamination of existing results. *Chemistry of materials*. 2005, vol. 17, pp. 3075-3085. [cit. 2006-01-17].
URL <<http://pubs.acs.org/journals/cmatex/index.html>>
- [3] SIEMER, D. Performance of hydroceramic concretes on radwaste leach tests. *Ceramic transaction*. 2002, vol. 132, pp. 369-379. ISSN: 1042-1122 [cit. 2006-01-18].
- [4] WULTERIN, J. Využití a zneškodňování odpadů. Praha: UK PedF, 2003. [cit. 2006-01-23].
- [5] GEBAUER, J. Experience with a new cement for special application. *Non-Traditional Cement & Concrete II*. Brno: University of Technology & ŽPSV, 2005. [cit. 2006-01-24].
- [6] Beton, příručka technologa – suroviny, výroba, vlastnosti. 2.vydání. Beroun: 2005
URL: <<http://www.cmsterk.cz>>
- [7] HENTRICH, J. Concrete durability with increasing sand proportion. *TIZ international pulver & schuettgut, verfahrenstechnik*. 1993, vol. 117, No.5, s. 235-243. ISSN: 0863-0720 [cit. 2006-01-25].
- [8] ANWAR, M. Using rice husk ash as a cement replacement material in concrete, *Waste management series* [online]. 2001, vol. 1, pp. 671-684. [cit. 2006-01-23].
- [9] KRATOCHVÍL, A. Optimalizace vlastností samozhutitelného betonu kombinací mikroplniv *Centrum Dopravního výzkumu* [online]. 2004. [cit. 2006-01-24].
URL: <<http://www.cdv.cz/text/oblasti/infra/publikace/29.pdf>>
- [10] MESQUITA, C. C. Effect of the capillary porosity of cement pastes on the compressive strength of concretes. *Informativo do INT*. 1988, vol. 20, No. 42, pp. 36-39. ISSN: 0019-0233 [cit. 2006-01-25].

- [11] Asfalt a asfaltové výrobky [online]
URL: <http://www.crc.cz/cz/asfalty_asfaltove_vyrobky.aspx>
- [12] ŠAŠEK, L. Chemická technologie speciálních silikátových výrobků. 1. vydání. Praha: VŠCHT, 1988. [cit. 2006-01-17].
- [13] DAVIDOVITS, J. Chemistry of geopolymeric systems, terminology.
In *Géopolymère '99*. Saint Quentin, France, 1999.
- [14] KUBÁTOVÁ, D. Studium povrchového náboje vysokodisperzních soustav na bázi silikátů. 2004. Brno [cit. 2006-01-17].
URL <<http://www.fch.vutbr.cz/minimovky/kubatova.pdf>>
- [15] SLAVÍK, R. Studium reakčních podmínek geopolymerace. Zlín: UTB, 2005 [cit. 2005-11-15]
- [16] PERNÁ, I. Syntéza a vlastnosti geopolymerních hydratovaných anorganických materiálů. [online]. Praha: VŠCHT, 2004
URL <http://www.vscht.cz/sil/sil_cz/seminar/2004/brozura.pdf>
- [17] BANKOWSKI, P. Using inorganic polymer to reduce leach rates of metals from brown coal fly ash, *Minerals engineering* [online]. 2004, vol. 17, No. 2, pp. 159-166. [cit. 2006-01-19].
URL <<http://www.sciencedirect.com/science/journal/08926875>>
- [18] KRIVENKO, P. Immobilizing properties of alkaline cementitious systems. *Non-Traditional Cement & Concrete II*. Brno: University of Technology & ŽPSV, 2005. [cit. 2006-01-24].
- [19] DAVIDOVITS, J. Environmentally driven geopolymer cement application. *Geopolymer institute* [online]. 2002, Saint-Quentin, France. [cit. 2006-01-29].
URL <<http://www.geopolymer.org>>
- [20] DAVIDOVITS, J. Recent progresses in concretes for nuclear waste and uranium waste containment. *Concrete international* [online]. 1994, vol. 16 (12), pp. 53-58
URL <<http://www.geopolymer.org>>

- [21] PROVIS, J. L. – van DEVENTER, J. S. J. A mathematical model for geopolymerisation. *Advances in Science and Technology*. 2004, vol. 43, pp. 95-102. Techna [cit. 2006-01-18].
- [22] COMRIE, D. C. Applications of geopolymer technology to waste stabilization. *Industrial & engineering chemistry research*. 1999, vol. 161, No. 5, ISSN: 0092-8054 [cit. 2006-01-21].
- [23] SIEMER, D. – OLANREWAJU, J. Development of hydroceramic waste forms for INEEL calcined waste. *Ceramic transaction*. 2001, vol. 119, pp. 391-398. ISSN 1042-1122. [cit. 2006-01-18].
- [24] FORSTER, S. C. Thermal and mechanical properties of alkaline-activated aluminosilicate based, high-performance composites, *Advances in science and technology*. 1995, vol. 7, pp. 117-124. [cit. 2006-01-19].
URL <<http://www.sciencedirect.com/science>>
- [25] XU, HUA Effect of source materials on geopolymerization, *Colloids and surface* [online]. 2003, vol. 42, No. 8, pp. 1698-1706. [cit. 2006-01-20].
URL <<http://www.sciencedirect.com/science/journal/09277757>>
- [26] XU, HUA The Effect of alkali metals on the formation of geopolymeric gels from alkali-fieldspars, *Colloids and surface* [online]. 2003, vol. 216, pp. 27-44. [cit. 2006-01-21].
URL <<http://www.sciencedirect.com/science/journal/09277757>>
- [27] ALLAHVERDI, A. Acid corrosion of geopolymeric cements, *American concrete institut* [online]. 2001, vol. 2, pp. 561-579. ISSN 0193-2527 [cit. 2006-01-21].
- [28] YAMAN, I. O. Active and non-active porosity in concrete Part I: Experimental evidence, *Materials and structures* [online]. 2002, vol. 35, No. 246, pp.102-109. Rilem publications [cit. 2006-01-22].
- [29] ŠAŠEK, L. *Laboratorní metody v oboru silikátů*. 1. vydání. Praha: SNTL, 1981.
- [30] SHNEIDER, U. Characteristic parameters of the porosity of concrete, *TIZ International* [online]. 1989, vol. 113, No. 4, pp. 311-321. [cit. 2006-01-24].
- [31] Produktový katalog – Přesné tvárnice [online]. [cit. 2006-05-23].

URL <http://www.ytong.cz/downloads/czk/product/presne_tvarnice.pdg>

[32] Cihly, bloky, příčkovky – pálené materiály [online]. 1994, vol. 3.210 [cit. 2006-05-23].

URL <<http://www.estav.cz/katalog/listy/K321094.pdf>>

[33] PYTLÍK, P. Technologie betonu. 1. vydání. Brno: VUT, 1997. [cit. 2006-05-23].

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

- n - Pórovitost
- ρ - Objemová hmotnost
- ρ_s - Hustota
- p - Pevnost v tlaku
- F - Síla při porušení soudržnosti vzorku
- S - Plocha příčného průřezu vzorku
- NMR - Nukleární magnetická rezonance
- IR - Infračervená spektroskopie

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Strukturní vzorec kaolinitu [15]	12
Obr. 2. Příklad syntézy alkalicky aktivovaných materiálů [16]	13
Obr. 3. Srovnání pevnosti v tlaku u geopolymery a portlandského cementu [21]	14
Obr. 4. Množství nebezpečných prvků zachycených v geopolymerní matici [19]	15
Obr. 5. Schéma zkoušky pevnosti v tlaku.....	18
Obr. 6. Pevnost v tlaku u těles s různým obsahem draselných iontů.....	24
Obr. 7. Pevnost v tlaku u těles s různým obsahem vápenatých iontů.....	25
Obr. 8. Pevnost v tlaku u těles s různým obsahem sodných iontů.....	26
Obr. 9. Pevnost v tlaku u těles s konstantním množstvím K^+ $1,85 \text{ mol.kg}^{-1}$ a různým obsahem plniva	28
Obr. 10. Pevnost v tlaku u těles s konstantním množstvím Na^+ $1,85 \text{ mol.kg}^{-1}$ a různým obsahem plniva	29
Obr. 11. Stanovení mrazuvzdornosti u těles s různým obsahem K^+	30
Obr. 12. Stanovení mrazuvzdornosti u těles s různým obsahem Ca^+	31
Obr. 13. Stanovení mrazuvzdornosti u vzorků s různým obsahem Na^+	32
Obr. 14. Stanovení mrazuvzdornosti u těles s obsahem K^+ $1,85 \text{ mol.kg}^{-1}$ a různým obsahem plniva	33
Obr. 15. Stanovení mrazuvzdornosti u těles s obsahem Na^+ $1,85 \text{ mol.kg}^{-1}$ a různým obsahem plniva	34
Obr.16. Stanovení odolnosti proti tepelnému šoku u těles s různým obsahem K^+	35
Obr. 17. Stanovení odolnosti proti tepelnému šoku u těles s různým obsahem Ca^{2+}	36
Obr. 18. Stanovení odolnosti proti tepelnému šoku u těles s různým obsahem Na^+	37
Obr. 19. Stanovení odolnosti proti teplotnímu šoku u těles s konstantním množstvím K^+ $1,85 \text{ mol.kg}^{-1}$ a různým množstvím plniva	38
Obr. 20. Stanovení odolnosti proti tepelnému šoku u těles s konstantním množstvím Na^+ $1,85 \text{ mol.kg}^{-1}$ a různým obsahem plniva.....	39

Obr. 21. Závislost pH a konduktivity na obsahu K^+	40
Obr. 22 Závislost pH a konduktivity na obsahu Ca^{2+} v tělesech	40
Obr. 23 Závislost pH a konduktivity na obsahu sodíku.....	41
Obr. 24. Závislost pH a konduktivity na obsahu plniva u těles s $0,7 \text{ mol.kg}^{-1} K^+$	42
Obr. 25. Závislost pH a konduktivity na obsahu plniva u těles s $1,85 \text{ mol.kg}^{-1} K^+$	42
Obr. 26. Závislost pH a konduktivity na obsahu plniva u těles s $1,85 \text{ mol.kg}^{-1} Na^+$	43
Obr. 27. Srovnání geopolymerních vzorků s K^+ se stavebními materiály.....	44
Obr. 28. Srovnání geopolymerních vzorků s Ca^{2+} se stavebními materiály.....	45
Obr. 29. Srovnání geopolymerních vzorků s Na^+ se stavebními materiály	46
Obr. 30. Srovnání geopolymerních vzorků s K^+ $1,85$ a s Na^+ $1,85 \text{ mol.kg}^{-1}$ a různým obsahem plniva se stavebními materiály	47

SEZNAM PŘÍLOH

- P 1: Pevnost U vzorků s různým obsahem K^+
- P 2: Pevnost u vzorků s různým obsahem Ca^{2+}
- P 3: Pevnost u vzorků s různým obsahem Na^+
- P 4: Pevnost u vzorků s 1,85 mol/kg K^+ a různým obsahem plniva
- P 5: Pevnost u vzorků s 1,85 mol/kg Na^+ a různým obsahem plniva
- P 6: Testy mrazuvzdornosti u vzorků s různým obsahem K^+
- P 7: Testy mrazuvzdornosti u vzorků s různým obsahem Ca^{2+}
- P 8: Testy mrazuvzdornosti u vzorků s různým obsahem Na^+
- P 9: Testy mrazuvzdornosti s 1,85 mol/kg K^+ a různým obsahem plniva
- P 10: Testy mrazuvzdornosti s 1,85 mol/kg Na^+ a různým obsahem plniva
- P 11: Testy odolnosti proti tepelnému šoku u vzorků s různým obsahem K^+
- P 12: Testy odolnosti proti tepelnému šoku u vzorků s různým obsahem Ca^{2+}
- P 13: Testy odolnosti proti tepelnému šoku u vzorků s různým obsahem Na^+
- P 14: Testy odolnosti proti tepelnému šoku s 1,85 mol/kg K^+ a různým obsahem plniva
- P 15: Testy odolnosti proti tepelnému šoku s 1,85 mol/kg Na^+ a různým obsahem plniva
- P 16: Hodnoty pH a konduktivity u vzorků s různým obsahem K^+ a vzorky s různým obsahem Ca^{2+}
- P 17: Hodnoty pH a konduktivity u vzorků s různým obsahem Na^+ a vzorky s 0,7 mol/kg K^+ a různým obsahem plniva v hmotnostních procentech
- P 18: Hodnoty pH a konduktivity u vzorků s 1,85 mol/kg K^+ a různým obsahem plniva a vzorky s 1,85 mol/kg Na^+ a různým obsahem plniva v hmotnostních procentech

PŘÍLOHA P 1: PEVNOST U VZORKŮ S RŮZNÝM OBSAHEM K⁺

Pevnost u vzorků s různým obsahem K ⁺ naměřená po 7 dnech	Obsah K ⁺ [mol.kg ⁻¹]	d [cm]	Smrštění (objemový zlomek)	Průměrné smrštění [%]	F [kN]	Pevnost [MPa]	Průměrná pevnost [MPa]
	Pevnost u vzorků s různým obsahem K ⁺ naměřená po 14 dnech	0,50	2,705	0,020	1,3	0,0	0,0
2,730			0,011	0,0		0,0	
2,735			0,009	0,0		0,0	
0,70		2,760	0,000	-0,2	0,0	0,0	0,0
		2,770	-0,004		0,0	0,0	
		2,770	-0,004		0,0	0,0	
0,90		2,745	0,005	0,3	11,0	18,6	18,5
		2,750	0,004		11,0	18,5	
		2,760	0,000		11,0	18,4	
1,10		2,770	-0,004	-0,4	11,0	18,3	18,3
1,30		2,770	-0,004	-0,7	22,0	36,5	39,6
		2,775	-0,005		25,0	41,3	
		2,790	-0,011		25,0	40,9	
1,85		2,770	-0,004	-0,6	20,5	34,0	33,6
		2,780	-0,007		20,5	33,8	
	2,780	-0,007	20,0		32,9		
0,50	2,700	0,022	1,4	0,0	0,0	0,0	
	2,740	0,007		0,0	0,0		
0,70	2,765	-0,002	-0,3	0,0	0,0	0,0	
	2,780	-0,007		0,0	0,0		
	2,760	0,000		0,0	0,0		
0,90	2,760	0,000	0	14,0	23,4	23,4	
	2,760	0,000		14,0	23,4		
	2,760	0,000		14,0	23,4		
1,10	2,760	0,000	0	20,0	33,4	33,4	
1,30	2,780	-0,007	-0,8	31,0	51,1	44,9	
	2,785	-0,009		25,0	41,0		
	2,785	-0,009		26,0	42,7		

Pevnost u vzorků s různým obsahem K ⁺ naměřená po 28 dnech	Obsah K ⁺ [mol.kg ⁻¹]	d [cm]	Smrštění (objemový zlomek)	Průměrné smrštění [%]	F [kN]	Pevnost [MPa]	Průměrná pevnost [MPa]
	0,50	2,740	0,007	0,7	1,0	1,7	1,7
	0,70	2,740	0,007	0,7	3,0	5,1	5,1
		2,740	0,007		3,0	5,1	
		2,740	0,007		3,0	5,1	
	0,90	2,755	0,002	0,1	17,0	28,5	30,1
		2,760	0,000		18,0	30,1	
		2,760	0,000		19,0	31,8	
	1,10	2,750	0,004	0,4	23,0	38,7	38,7
	1,30	2,765	-0,002	-0,4	30,0	50,0	49,2
2,770		-0,004	29,0		48,1		
2,780		-0,007	30,0		49,4		
1,85	2,755	0,002	0,2	24,0	40,3	40,3	

PŘÍLOHA P 2: PEVNOST U VZORKŮ S RŮZNÝM OBSAHEM Ca^{2+}

Pevnost vzorků s různým obsahem Ca^{2+} naměřená po 7 dnech	Obsah Ca^{2+} [mol.kg]	D [cm]	Smrštění (objemový zlomek)	Průměrné smrštění [%]	F [kN]	Pevnost [MPa]	Průměrná pevnost [MPa]	
	0,000	2,790	2,790	-0,011	-1,1	5,0	8,2	13,5
2,790			-0,011	10,0		16,4		
2,795			-0,013	9,8		15,9		
0,076		2,785	2,785	-0,009	-1	11,5	18,9	19,1
			2,790	-0,011		10,5	17,2	
			2,785	-0,009		13,0	21,3	
0,100		2,770	2,770	-0,004	-0,6	20,5	34,0	33,6
			2,780	-0,007		20,5	33,8	
			2,780	-0,007		20,0	32,9	
0,200	2,770	2,770	-0,004	-0,7	22,0	36,5	39,6	
		2,775	-0,005		25,0	41,3		
		2,790	-0,011		25,0	40,9		
Pevnost vzorků s různým obsahem Ca^{2+} naměřená po 14 dnech	Obsah Ca^{2+} [mol.kg]	D [cm]	Smrštění (objemový zlomek)	Průměrné smrštění [%]	F [kN]	Pevnost [MPa]	Průměrná pevnost [MPa]	
	0,000	2,780	2,780	-0,007	-0,8	10,0	16,5	15,1
2,780			-0,007	9,5		15,7		
2,785			-0,009	8,0		13,1		
0,076	2,765	2,765	-0,002	0,1	14,0	23,3	25,1	
		2,765	-0,002		18,0	30,0		
		2,740	0,007		13,0	22,0		
0,200	2,780	2,780	-0,007	-0,8	31,0	51,1	44,9	
		2,785	-0,009		25,0	41,0		
		2,785	-0,009		26,0	42,7		
Pevnost vzorků s různým obsahem Ca^{2+} naměřená po dnech	Obsah Ca^{2+} [mol.kg]	D [cm]	Smrštění (objemový zlomek)	Průměrné smrštění [%]	F [kN]	Pevnost [MPa]	Průměrná pevnost [MPa]	
	0,000	2,780	2,780	-0,007	-0,7	10,0	16,5	16,5
2,780			-0,007	10,0		16,5		
2,780			-0,007	10,0		16,5		
0,076	2,990	2,990	0,016	1,6	14,0	19,9	23,5	
		2,940	0,033		15,0	22,1		
		2,760	0,000		17,0	28,4		
0,100	2,780	-0,007	-0,7	25,0	41,2	41,2		
0,200	2,765	2,765	-0,002	-0,4	30,0	50,0	49,2	
		2,770	-0,004		29,0	48,1		
		2,780	-0,007		30,0	49,4		

PŘÍLOHA P 3: PEVNOST U VZORKŮ S RŮZNÝM OBSAHEM Na⁺

Pevnost u vzorků s různým obsahem Na ⁺ naměřená po 7 dnech	Obsah Na ⁺ [mol.kg ⁻¹]	d [cm]	Smrštění (objemový zlomek)	Průměrné smrštění [%]	F [kN]	Pevnost [MPa]	Průměrná pevnost [MPa]
	0,50		2,775	-0,005	-0,5	5,0	8,3
2,775			-0,005	5,0		8,3	
2,775			-0,005	4,0		6,6	
0,70		2,775	-0,005	-0,5	5,0	8,3	8,3
		2,775	-0,005		6,0	9,9	
		2,775	-0,005		4,0	6,6	
0,90		2,780	-0,007	-0,7	6,0	9,9	11,5
		2,780	-0,007		7,0	11,5	
		2,780	-0,007		8,0	13,2	
1,10		2,770	-0,004	-0,5	7,0	11,6	11,0
		2,775	-0,005		7,0	11,6	
		2,780	-0,007		6,0	9,9	
1,30		2,780	-0,007	-0,005	8,0	13,2	13,8
		2,780	-0,007		9,0	14,8	
		2,760	0,000		8,0	13,4	
1,85		2,780	-0,007	-0,9	10,0	16,5	16,4
		2,785	-0,009		10,0	16,4	
		2,790	-0,011		10,0	16,4	
Pevnost u vzorků s různým obsahem Na ⁺ naměřená po 14 dnech	Obsah Na ⁺ [mol.kg ⁻¹]	d [cm]	Smrštění	Průměrné smrštění [%]	F [kN]	Pevnost [MPa]	Průměrná pevnost [MPa]
	0,50		2,770	-0,004	-0,4	5,0	8,3
2,770			-0,004	5,0		8,3	
2,770			-0,004	6,0		10,0	
0,70		2,770	-0,004	-0,4	4,0	6,6	8,3
		2,770	-0,004		5,0	8,3	
		2,770	-0,004		6,0	10,0	
0,90		2,770	-0,004	-0,4	9,5	15,8	15,7
		2,775	-0,005		10,0	16,5	
		2,770	-0,004		9,0	14,9	
1,10		2,770	-0,004	-0,4	9,0	14,9	14,6
		2,775	-0,005		9,5	15,7	
		2,770	-0,004		8,0	13,3	
1,30		2,780	-0,007	-0,8	11,0	18,1	18,4
		2,780	-0,007		12,0	19,8	
		2,785	-0,009		10,5	17,2	
1,85		2,780	-0,007	-0,8	13,0	21,4	21,9
		2,780	-0,007		14,0	23,1	
		2,785	-0,009		13,0	21,3	

Pevnost u vzorků s různým obsahem Na ⁺ naměřená po 7 dnech	Obsah Na ⁺ [mol.kg ⁻¹]	d [cm]	Smrštění (objemový zlomek)	Průměrné smrštění [%]	F [kN]	Pevnost [MPa]	Průměrná pevnost [MPa]
	0,50	2,775	-0,005	-0,7	5,0	8,3	9,3
		2,780	-0,007		6,0	9,9	
		2,780	-0,007		6,0	9,9	
	0,70	2,765	-0,002	-0,2	6,0	10,0	10,5
		2,765	-0,002		6,0	10,0	
		2,770	-0,004		7,0	11,6	
	0,90	2,775	-0,005	-0,6	6,0	9,9	12,7
		2,775	-0,005		9,0	14,9	
		2,780	-0,007		8,0	13,2	
1,10	2,765	-0,002	-0,2	9,0	15,0	16,1	
	2,765	-0,002		11,0	18,3		
	2,770	-0,004		9,0	14,9		
1,30	2,775	-0,005	-0,4	10,0	16,5	18,8	
	2,780	-0,007		12,0	19,8		
	2,760	0,000		12,0	20,1		
1,85	2,775	-0,005	-0,7	14,0	23,1	24,2	
	2,780	-0,007		14,0	23,1		
	2,780	-0,007		16,0	26,4		

PŘÍLOHA P 4: PEVNOST U VZORKŮ S 1,85 mol/kg K⁺ A RŮZNÝM OBSAHEM PLNIVA

Pevnost u vzorků s 1,85 mol/kg K ⁺ a různým obsahem plniva naměřena po 7 dnech	Obsah plniva [%]	d [cm]	Smrštění (objemový zlomek)	Průměrné smrštění [%]	F [kN]	p [MPa]	Průměrná pevnost [Mpa]
	0	2,77	2,77	-0,004	-0,007	22	36,5
2,775		2,775	-0,005	25		41,3	
2,79		2,79	-0,011	25		40,9	
25	2,765	2,765	-0,002	-0,001	20	33,3	40,3
	2,76	2,76	0		25	41,8	
	2,765	2,765	-0,002		27,5	45,8	
50	2,785	2,785	-0,009	-0,008	12	19,7	17,8
	2,78	2,78	-0,007		10	16,5	
	2,78	2,78	-0,007		10,5	17,3	
75	2,78	2,78	-0,007	-0,007	9	14,8	15,7
	2,78	2,78	-0,007		10	16,5	
	2,78	2,78	-0,007		9,5	15,7	
80	2,765	2,765	-0,002	-0,001	4,5	7,5	7,2
	2,735	2,735	0,009		4	6,8	
	2,785	2,785	-0,009		4,5	7,4	
Pevnost u vzorků s 1,85 mol/kg K ⁺ a různým obsahem plniva naměřena po 14 dnech	Obsah plniva [%]	d [cm]	Smrštění (objemový zlomek)	Průměrné smrštění [%]	F [kN]	p [MPa]	Průměrná pevnost [Mpa]
	0	2,78	2,78	-0,007	-0,008	31	51,1
2,785		2,785	-0,009	25		41	
2,785		2,785	-0,009	26		42,7	
25	2,78	2,78	-0,007	-0,005	30	49,4	50,4
	2,775	2,775	-0,005		30,5	50,4	
	2,77	2,77	-0,004		31	51,4	
50	2,76	2,76	0	0,002	19	31,8	29,1
	2,765	2,765	-0,002		18	30	
	2,74	2,74	0,007		15	25,4	
75	2,77	2,77	-0,004	-0,005	13	21,6	21,8
	2,77	2,77	-0,004		16	26,6	
	2,78	2,78	-0,007		10,5	17,3	
80	2,78	2,78	-0,007	-0,007	8	13,2	13,2
	2,78	2,78	-0,007		8	13,2	
	2,78	2,78	-0,007		8	13,2	

Pevnost u vzorků s 1,85 mol/kg K ⁺ a různým obsahem plniva naměřena po 28 dnech	Obsah plniva [%]	d [cm]	Smrštění (objemový zlomek)	Průměrné smrštění [%]	F [kN]	p [MPa]	Průměrná pevnost [Mpa]
	0	2,765	-0,002	-0,004	30	50	49,2
		2,77	-0,004		29	48,1	
		2,78	-0,007		30	49,4	
	25	2,765	-0,002	0,003	34	56,6	52,9
		2,74	0,007		29	49,2	
	50	2,73	0,011	0,007	17	29	29,3
		2,76	0		20	33,4	
		2,735	0,009		15	25,5	
	75	2,78	-0,007	-0,007	15	24,7	24,2
2,78		-0,007	14		23,1		
2,775		-0,005	15		24,8		
80	2,78	-0,007	0,012	7	11,5	12,7	
	2,75	0,004		9	15,2		
	2,6	0,041		6	11,3		

PŘÍLOHA P 5: PEVNOST U VZORKŮ S 1,85 mol/kg Na⁺ A RŮZNÝM OBSAHEM PLNIVA

Pevnost u vzorků s 1,85 mol/kg Na ⁺ a různým obsahem plniva naměřená po 7 dnech	Obsah plniva [%]	d [cm]	Smrštění (objemový zlomek)	Průměrné smrštění [%]	F [kN]	Pevnost [MPa]	Průměrná pevnost [Mpa]
	0	2,71	2,71	0,018	1,8	9	15,6
2,71		2,71	0,018	9,5		16,5	
2,71		2,71	0,018	9		15,6	
25	2,78	2,78	-0,007	-0,6	10	16,5	17,6
	2,775	2,775	-0,005		11	18,2	
	2,775	2,775	-0,005		11	18,2	
50	2,79	2,79	-0,011	-0,8	5	8,2	6,0
	2,78	2,78	-0,007		4	6,6	
	2,78	2,78	-0,007		2	3,3	
75	2,77	2,77	-0,004	-0,5	0	0	0,0
	2,77	2,77	-0,004		0	0	
	2,78	2,78	-0,007		0	0	
80	2,73	2,73	0,011	1,1	0	0	0,0
	2,73	2,73	0,011		0	0	
	2,725	2,725	0,013		0	0	
Pevnost u vzorků s 1,85 mol/kg Na ⁺ a různým obsahem plniva naměřená po 14 dnech	Obsah plniva [%]	d [cm]	Smrštění (objemový zlomek)	Průměrné smrštění [%]	F [kN]	p [MPa]	Průměrná pevnost [Mpa]
	0	2,7	2,7	0,022	-2,2	11	19,2
2,7		2,7	0,022	11		19,2	
2,7		2,7	0,022	12		21	
25	2,765	2,765	-0,002	-0,3	19	31,6	32,1
	2,77	2,77	-0,004		19	31,5	
	2,77	2,77	-0,004		20	33,2	
50	2,78	2,78	-0,007	-0,7	7	11,5	11,5
	2,78	2,78	-0,007		7	11,5	
75	2,76	2,76	0	-0,1	1	1,7	2,8
	2,76	2,76	0		2	3,3	
	2,77	2,77	-0,004		2	3,3	
80	2,72	2,72	0,014	1,2	0	0	0,0
	2,73	2,73	0,011		0	0	
	2,73	2,73	0,011		0	0	

Pevnost u vzorků s 1,85 mol/kg Na ⁺ a různým obsahem plniva naměřená po 28 dnech	Obsah plniva [%]	d [cm]	Smrštění (objemový zlomek)	Průměrné smrštění [%]	F [kN]	p [MPa]	Průměrná pevnost [Mpa]
	0	2,7	0,022	2,1	12	21	20,3
		2,7	0,022		12	21	
		2,71	0,018		11	19,1	
	25	2,76	0	0	19	31,8	31,8
	50	2,775	-0,005	-0,6	10	16,5	16,2
		2,775	-0,005		9,5	15,7	
		2,78	-0,007		10	16,5	
	75	2,765	-0,002	-0,3	3	5	3,3
		2,77	-0,004		1	1,7	
2,77		-0,004	2		3,3		
80	2,73	0,011	1,2	0	0	0,0	
	2,73	0,011		0	0		
	2,72	0,014		0	0		

**PŘÍLOHA P 6: TESTY MRAZUVZDORNOSTI U VZORKŮ
S RŮZNÝM OBSAHEM K⁺**

Tělesa po testu mrazuvzdornosti s různým obsahem K ⁺					
Obsah K ⁺ [mol/kg]	Průměr horní strany [cm]	Smršťění (objemový zlomek)	F [kN]	Pevnost [Mpa]	Průměrná pevnost [Mpa]
0,90	2,760	0,000	16,0	26,7	16,0
1,10	2,760	0,000	18,0	30,1	27,6
	2,760	0,000	15,0	25,1	
1,30	2,760	0,000	32,0	53,5	47,3
	2,765	-0,002	25,0	41,6	
	2,765	-0,002	28,0	46,6	
1,85	2,765	-0,002	19,0	31,6	27,5
	2,765	-0,002	14,0	23,3	
Referenční tělesa					
Obsah K ⁺ [mol/kg]	Průměr horní strany [cm]	Smršťění (objemový zlomek)	F [kN]	Pevnost [Mpa]	Průměrná pevnost [Mpa]
0,90	2,755	0,002	17,0	28,5	30,1
	2,760	0,000	18,0	30,1	
	2,760	0,000	19,0	31,8	
1,10	2,750	0,004	23,0	38,7	38,7
1,30	2,765	-0,002	30,0	50,0	49,2
	2,770	-0,004	29,0	48,1	
	2,780	-0,007	30,0	49,4	
1,85	2,755	0,002	24,0	40,3	40,3

**PŘÍLOHA P 7: TESTY MRAZUVZDORNOSTI U VZORKŮ
S RŮZNÝM OBSAHEM Ca^{2+}**

Tělesa po testu mrazuvzdornosti s různým obsahem Ca^{2+}					
Obsah Ca^{+} [mol/kg]	Průměr horní strany [cm]	Smrštění (objemový zlomek)	F [kN]	Pevnost [Mpa]	Průměrná pevnost [Mpa]
0,000	2,760	0,000	11,0	18,4	16,6
	2,770	-0,004	9,0	14,9	
	2,770	-0,004	10,0	16,6	
0,076	2,740	0,007	15,0	25,4	23,7
	2,750	0,004	13,0	21,9	
0,100	2,765	-0,002	19,0	31,6	27,5
	2,765	-0,002	14,0	23,3	
0,200	2,760	0,000	32,0	53,5	47,3
	2,765	-0,002	25,0	41,6	
	2,765	-0,002	28,0	46,6	
Referenční tělesa					
Obsah Ca^{+} [mol/kg]	Průměr horní strany [cm]	Smrštění (objemový zlomek)	F [kN]	Pevnost [Mpa]	Průměrná pevnost [Mpa]
0,000	2,780	-0,007	10,0	16,5	16,5
	2,780	-0,007	10,0	16,5	
	2,780	-0,007	10,0	16,5	
0,076	2,990	0,016	14,0	19,9	23,5
	2,940	0,033	15,0	22,1	
	2,760	0,000	17,0	28,4	
0,100	2,755	0,002	24,0	40,3	40,3
0,200	2,765	-0,002	30,0	50,0	49,2
	2,770	-0,004	29,0	48,1	
	2,780	-0,007	30,0	49,4	

**PŘÍLOHA P 8: TESTY MRAZUVZDORNOSTI U VZORKŮ
S RŮZNÝM OBSAHEM Na⁺**

Tělesa po testu mrazuvzdornosti s různým obsahem Na ⁺					
Obsah Na ⁺ [mol/kg]	Průměr horní strany [cm]	Smrštění (objemový zlomek)	F [kN]	Pevnost [Mpa]	Průměrná pevnost [Mpa]
0,50	2,775	-0,005	1,0	1,6	3,3
	2,775	-0,005	4,0	6,6	
	2,775	-0,005	1,0	1,7	
0,70	2,770	-0,004	7,0	11,6	7,7
	2,770	-0,004	4,0	6,6	
	2,775	-0,005	3,0	5,0	
0,90	2,780	-0,007	6,0	9,9	12,1
	2,780	-0,007	8,0	13,2	
	2,780	-0,007	8,0	13,2	
1,10	2,775	-0,005	10,0	16,5	15,9
	2,780	-0,007	10,0	16,5	
	2,780	-0,007	9,0	14,8	
1,30	2,770	-0,004	12,0	19,9	18,8
	2,775	-0,005	11,0	18,3	
	2,780	-0,007	11,0	18,2	
1,85	2,775	-0,005	8,0	13,2	7,7
	2,780	-0,007	3,0	4,9	
	2,780	-0,007	3,0	4,9	
Referenční tělesa					
Obsah Na ⁺ [mol/kg]	Průměr horní strany [cm]	Smrštění (objemový zlomek)	F [kN]	Pevnost [Mpa]	Průměrná pevnost [Mpa]
0,50	2,775	-0,005	5,0	8,3	9,3
	2,780	-0,007	6,0	9,9	
	2,780	-0,007	6,0	9,9	
0,70	2,765	-0,002	6,0	10,0	10,5
	2,765	-0,002	6,0	10,0	
	2,770	-0,004	7,0	11,6	
0,90	2,775	-0,005	6,0	9,9	12,7
	2,775	-0,005	9,0	14,9	
	2,780	-0,007	8,0	13,2	
1,10	2,765	-0,002	9,0	15,0	16,1
	2,765	-0,002	11,0	18,3	
	2,770	-0,004	9,0	14,9	
1,30	2,775	-0,005	10,0	16,5	18,8
	2,780	-0,007	12,0	19,8	
	2,760	0,000	12,0	20,1	
1,85	2,775	-0,005	14,0	23,1	24,2
	2,780	-0,007	14,0	23,1	
	2,780	-0,007	16,0	26,4	

**PŘÍLOHA P 9: TESTY MRAZUVZDORNOSTI S 1,85 mol/kg K⁺ A
RŮZNÝM OBSAHEM PLNIVA**

Tělesa po testu mrazuvzdornosti s konstantním obsahem K ⁺ 1,85 mol/kg a různým obsahem plniva					
Obsah plniva [%]	Průměr horní strany [cm]	Smrštění (objemový zlomek)	F [kN]	pevnost [Mpa]	Průměrná pevnost [Mpa]
0	2,760	0,000	32,0	53,5	47,3
	2,765	-0,002	25,0	41,6	
	2,765	-0,002	28,0	46,6	
25	2,760	0,000	29,0	48,5	48,5
50	2,720	0,014	22,0	37,9	39,0
	2,730	0,011	19,0	32,5	
	2,765	-0,002	28,0	46,6	
75	2,775	-0,005	12,0	19,8	24,0
	2,770	-0,004	17,0	28,2	
80	2,770	-0,004	7,0	11,6	14,5
	2,770	-0,004	10,0	16,6	
	2,740	0,007	9,0	15,3	
Referenční tělesa					
Obsah plniva [%]	Průměr horní strany [cm]	Smrštění (objemový zlomek)	F [kN]	pevnost [Mpa]	Průměrná pevnost [Mpa]
0	2,765	-0,002	30,0	50,0	49,2
	2,770	-0,004	29,0	48,1	
	2,780	-0,007	30,0	49,4	
25	2,765	-0,002	34,0	56,6	52,9
	2,740	0,007	29,0	49,2	
50	2,730	0,011	17,0	29,0	29,3
	2,760	0,000	20,0	33,4	
	2,735	0,009	15,0	25,5	
75	2,780	-0,007	15,0	24,7	24,2
	2,780	-0,007	14,0	23,1	
	2,775	-0,005	15,0	24,8	
80	2,780	-0,007	7,0	11,5	12,7
	2,750	0,004	9,0	15,2	
	2,600	0,041	6,0	11,3	

**PŘÍLOHA P 10: TESTY MRAZUVZDORNOSTI S 1,85 mol/kg Na⁺ A
RŮZNÝM OBSAHEM PLNIVA**

Tělesa po testu mrazuvzdornosti s konstantním obsahem Na ⁺ 1,85 mol/kg a různým obsahem plniva					
Obsah plniva [%]	Průměr horní strany [cm]	Smrštění (objemový zlomek)	F [kN]	pevnost [Mpa]	Průměrná pevnost [Mpa]
0	2,710	0,018	9,0	15,5	13,3
	2,700	0,022	10,0	17,3	
	2,700	0,022	4,0	7,0	
25	2,760	0,000	17,0	28,4	28,4
75	2,770	-0,004	0,0	0,0	2,2
	2,760	0,000	4,0	6,7	
	2,290	0,170	0,0	0,0	
Referenční tělesa					
Obsah plniva [%]	Průměr horní strany [cm]	Smrštění (objemový zlomek)	F [kN]	pevnost [Mpa]	Průměrná pevnost [Mpa]
0	2,700	0,022	12,0	21,0	20,3
	2,700	0,022	12,0	21,0	
	2,710	0,018	11,0	19,1	
25	2,760	0,000	19,0	31,8	31,8
75	2,765	-0,002	3,0	5,0	3,3
	2,770	-0,004	1,0	1,7	
	2,770	-0,004	2,0	3,3	

**PŘÍLOHA P 11: TESTY ODOLNOSTI PROTI TEPELNÉMU ŠOKU U
VZORKŮ S RŮZNÝM OBSAHEM K⁺**

Tělesa po testu odolnosti proti tepelnému šoku s různým obsahem K ⁺					
Obsah K ⁺ [mol/kg]	Průměr horní strany [cm]	Smrštění (objemový zlomek)	F [kN]	pevnost [Mpa]	Průměrná pevnost [Mpa]
0,50	2,740	0,007	4,0	6,8	8,5
	2,740	0,007	6,0	10,2	
0,70	2,740	0,007	6,0	10,2	22,5
	2,745	0,005	8,0	13,5	
	2,750	0,004	26,0	43,8	
0,90	2,750	0,004	21,0	35,4	34,5
	2,750	0,004	20,0	33,7	
1,10	2,750	0,004	29,5	49,7	49,7
1,30	2,765	-0,002	33,0	55,0	53,8
	2,765	-0,002	28,0	46,6	
	2,765	-0,002	36,0	60,0	
1,85	2,755	0,002	22,0	36,9	36,9
Referenční tělesa					
Obsah K ⁺ [mol/kg]	Průměr horní strany [cm]	Smrštění (objemový zlomek)	F [kN]	pevnost [Mpa]	Průměrná pevnost [Mpa]
0,50	2,740	0,007	1,0	1,7	1,7
0,70	2,740	0,007	3,0	5,1	5,1
	2,740	0,007	3,0	5,1	
	2,740	0,007	3,0	5,1	
0,90	2,755	0,002	17,0	28,5	30,1
	2,760	0,000	18,0	30,1	
	2,760	0,000	19,0	31,8	
1,10	2,750	0,004	23,0	38,7	38,7
1,30	2,765	-0,002	30,0	50,0	49,2
	2,770	-0,004	29,0	48,1	
	2,780	-0,007	30,0	49,4	
1,85	2,755	0,002	24,0	40,3	40,3

**PŘÍLOHA P 12: TESTY ODOLNOSTI PROTI TEPELNÉMU ŠOKU U
VZORKŮ S RŮZNÝM OBSAHEM Ca^{2+}**

Tělesa po testu odolnosti proti tepelnému šoku s různým obsahem Ca^{2+}					
Obsah Ca^{2+} [mol/kg]	Průměr horní strany [cm]	Smrštění (objemový zlomek)	F [kN]	pevnost [Mpa]	Průměrná pevnost [Mpa]
0,000	2,760	0,000	11,0	18,4	16,6
	2,770	-0,004	9,0	14,9	
	2,770	-0,004	10,0	16,6	
0,076	2,740	0,007	15,0	25,4	25,8
	2,750	0,004	13,0	21,9	
	2,760	0,000	18,0	30,1	
0,100	2,755	0,002	22,0	36,9	36,9
0,200	2,765	-0,002	33,0	55,0	53,8
	2,765	-0,002	28,0	46,6	
	2,765	-0,002	36,0	60,0	
Referenční tělesa					
Obsah Ca^{2+} [mol/kg]	Průměr horní strany [cm]	Smrštění (objemový zlomek)	F [kN]	pevnost [Mpa]	Průměrná pevnost [Mpa]
0,000	2,780	-0,007	10,0	16,5	16,5
	2,780	-0,007	10,0	16,5	
	2,780	-0,007	10,0	16,5	
0,076	2,990	0,016	14,0	19,9	23,5
	2,940	0,033	15,0	22,1	
	2,760	0,000	17,0	28,4	
0,100	2,755	0,002	24,0	40,3	40,3
0,200	2,765	-0,002	30,0	50,0	49,2
	2,770	-0,004	29,0	48,1	
	2,780	-0,007	30,0	49,4	

PŘÍLOHA P 13: TESTY ODOLNOSTI PROTI TEPELNÉMU ŠOKU U VZORKŮ S RŮZNÝM OBSAHEM Na⁺

Tělesa po testu odolnosti proti tepelnému šoku s různým obsahem Na ⁺					
Obsah Na ⁺ [mol/kg]	Průměr horní strany [cm]	Smrštění (objemový zlomek)	F [kN]	pevnost [Mpa]	Průměrná pevnost [Mpa]
0,50	2,775	-0,005	9,0	14,9	12,7
	2,780	-0,007	7,0	11,5	
	2,775	-0,005	7,0	11,6	
0,70	2,760	0,000	7,0	11,7	11,1
	2,765	-0,002	6,0	10,0	
	2,760	0,000	7,0	11,7	
0,90	2,765	-0,002	10,0	16,7	16,6
	2,770	-0,004	10,0	16,6	
	2,780	-0,007	10,0	16,5	
1,10	2,765	-0,002	15,0	25,0	21,6
	2,770	-0,004	12,0	19,9	
	2,765	-0,002	12,0	20,0	
1,30	2,765	-0,002	20,0	33,3	33,3
	2,770	-0,004	20,0	33,2	
	2,765	-0,002	20,0	33,3	
1,85	2,720	0,014	10,0	17,2	14,3
	2,730	0,011	7,0	12,0	
	2,730	0,011	8,0	13,7	
Referenční tělesa					
Obsah Na ⁺ [mol/kg]	Průměr horní strany [cm]	Smrštění (objemový zlomek)	F [kN]	pevnost [Mpa]	Průměrná pevnost [Mpa]
0,50	2,775	-0,005	5,0	8,3	9,3
	2,780	-0,007	6,0	9,9	
	2,780	-0,007	6,0	9,9	
0,70	2,765	-0,002	6,0	10,0	10,5
	2,765	-0,002	6,0	10,0	
	2,770	-0,004	7,0	11,6	
0,90	2,775	-0,005	6,0	9,9	12,7
	2,775	-0,005	9,0	14,9	
	2,780	-0,007	8,0	13,2	
1,10	2,765	-0,002	9,0	15,0	16,1
	2,765	-0,002	11,0	18,3	
	2,770	-0,004	9,0	14,9	
1,30	2,775	-0,005	10,0	16,5	18,8
	2,780	-0,007	12,0	19,8	
	2,760	0,000	12,0	20,1	
1,85	2,775	-0,005	14,0	23,1	24,2
	2,780	-0,007	14,0	23,1	
	2,780	-0,007	16,0	26,4	

**PŘÍLOHA P 14: TESTY ODOLNOSTI PROTI TEPELNÉMU ŠOKU S
1,85 mol/kg K⁺ A RŮZNÝM OBSAHEM PLNIVA**

Tělesa po testu odolnosti proti tepelnému šoku s obsah K ⁺ 1,85 mol/kg a různým obsahem plniva					
Obsah plniva [%]	Průměr horní strany [cm]	Smrštění (objemový zlomek)	F [kN]	pevnost [Mpa]	Průměrná pevnost [Mpa]
0	2,765	-0,002	33,0	55,0	53,8
	2,765	-0,002	28,0	46,6	
	2,765	-0,002	36,0	60,0	
25	2,760	0,000	27,0	45,1	47,0
	2,740	0,007	26,0	44,1	
	2,760	0,000	31,0	51,8	
50	2,720	0,014	20,0	34,4	33,3
	2,740	0,007	19,0	32,2	
75	2,770	-0,004	16,0	26,6	28,2
	2,770	-0,004	17,0	28,2	
	2,770	-0,004	18,0	29,9	
80	2,780	-0,007	12,0	19,8	19,4
	2,740	0,007	11,0	18,7	
	2,780	-0,007	12,0	19,8	
Referenční tělesa					
Obsah plniva [%]	Průměr horní strany [cm]	Smrštění (objemový zlomek)	F [kN]	pevnost [Mpa]	Průměrná pevnost [Mpa]
0	2,765	-0,002	30,0	50,0	49,2
	2,770	-0,004	29,0	48,1	
	2,780	-0,007	30,0	49,4	
25	2,765	-0,002	34,0	56,6	52,9
	2,740	0,007	29,0	49,2	
50	2,730	0,011	17,0	29,0	29,3
	2,760	0,000	20,0	33,4	
	2,735	0,009	15,0	25,5	
75	2,780	-0,007	15,0	24,7	24,2
	2,780	-0,007	14,0	23,1	
	2,775	-0,005	15,0	24,8	
80	2,780	-0,007	7,0	11,5	12,7
	2,750	0,004	9,0	15,2	
	2,600	0,041	6,0	11,3	

PŘÍLOHA P 15: TESTY ODOLNOSTI PROTI TEPELNÉMU ŠOKU

S 1,85 mol/kg Na⁺ A RŮZNÝM OBSAHEM PLNIVA

Tělesa po testu odolnosti proti tepelnému šoku s obsah Na ⁺ 1,85 mol/kg a různým obsahem plniva					
Obsah plniva [%]	Průměr horní strany [cm]	Smrštění (objemový zlomek)	F [kN]	pevnost [Mpa]	Průměrná pevnost [Mpa]
0	2,700	0,022	13,0	22,7	31,5
	2,690	0,025	22,0	38,7	
	2,700	0,022	19,0	33,2	
75	2,780	-0,007	6,0	9,9	8,3
	2,770	-0,004	4,0	6,6	
80	2,740	0,007	0,0	0,0	0,0
	2,720	0,014	0,0	0,0	
Referenční tělesa					
Obsah plniva [%]	Průměr horní strany [cm]	Smrštění (objemový zlomek)	F [kN]	pevnost [Mpa]	Průměrná pevnost [Mpa]
0	2,700	0,022	12,0	21,0	20,3
	2,700	0,022	12,0	21,0	
	2,710	0,018	11,0	19,1	
75	2,765	-0,002	3,0	5,0	3,3
	2,770	-0,004	1,0	1,7	
	2,770	-0,004	2,0	3,3	
80	2,730	0,011	0,0	0,0	0,0
	2,730	0,011	0,0	0,0	
	2,720	0,014	0,0	0,0	

**PŘÍLOHA P 16: HODNOTY pH A KONDUKTIVITY U VZORKŮ
S RŮZNÝM OBSAHEM K⁺ A VZORKY S RŮZNÝM OBSAHEM Ca²⁺**

Obsah K ⁺ [mol/kg]	Změřeno po dnech od přípravy	pH	konduktivita [mS/m]	Koncentrace Fe ²⁺ , Fe ³⁺ [μg/ml]	Slepý pokus		
					pH	konduktivita [μS/cm]	Koncentrace Fe ²⁺ , Fe ³⁺ [μg/ml]
0,5	7	12,30	333,0	0,023	6,30	7,4	0,010
	14	12,02	241,0	0,002	5,72	10,4	-0,006
	28	11,84	197,0	-0,010	6,45	10,3	-0,004
0,7	7	12,43	436,0		7,02	7,5	
	14	12,33	282,0	-0,036	3,88	20,8	-0,037
	28	12,12	252,0	-0,014	6,61	9,0	-0,014
0,9	7	12,36	404,0	0,043	7,02	7,5	0,032
	14	12,25	291,0	-0,029	7,09	25,6	-0,038
	28	12,21	183,0	-0,013	6,91	10,9	-0,016
1,1	7	12,07	304,0	0,029	5,13	7,6	0,015
	28	12,10	191,0	0,000	6,71	10,6	-0,002
1,3	7	12,91	415,0	0,001	6,20	9,2	0,016
	14	12,11	285,0	0,027	5,13	7,6	0,015
	28	12,21	166,0	-0,011	6,71	10,6	-0,002
1,85	7	13,02	504,0	-0,010	6,23	12,5	-0,005
	28	12,23	351,0	0,048	7,08	6,9	0,101

Obsah Ca ²⁺ [mol/kg]	Změřeno po dnech od přípravy	pH	konduktivita [mS/m]	Koncentrace Fe ²⁺ , Fe ³⁺ [μg/ml]	Slepý pokus		
					pH	konduktivita [μS/cm]	Koncentrace Fe ²⁺ , Fe ³⁺ [μg/ml]
0	7	12,80	303,0	0,016	6,22	10,8	-0,014
	14	12,44	248,0	0,002	5,81	8,2	-0,020
	28	11,69	249,0	0,066	5,13	7,6	0,015
0,076	7	12,88	299,0	-0,003	8,24	23,6	-0,006
	14	12,47	241,0	-0,021	6,26	8,0	-0,012
	28	12,54	240,0	0,007	5,72	10,4	-0,006
0,1	7	13,02	504,0	-0,010	6,23	12,5	-0,005
	28	12,23	351,0	0,048	7,08	6,9	0,101
0,2	7	12,91	415,0	0,001	6,20	9,2	0,016
	14	12,11	285,0	0,027	5,13	7,6	0,015
	28	12,21	166,0	-0,011	6,71	10,6	-0,002

**PŘÍLOHA P 17: HODNOTY pH A KONDUKTIVITY U VZORKŮ
S RŮZNÝM OBSAHEM Na⁺ A VZORKY S 0,7 mol/kg K⁺ A RŮZNÝM
OBSAHEM PLNIVA V HMOTNOSTNÍCH PROCENTECH**

Obsah Na ⁺ [mol/kg]	Změřeno po dnech od přípravy	pH	konduktivita [mS/m]	Koncentrace Fe ²⁺ , Fe ³⁺ [µg/ml]	Slepý pokus		
					pH	konduktivita [µS/cm]	Koncentrace Fe ²⁺ , Fe ³⁺ [µg/ml]
0,5	7	12,56	615,0	0,014	6,73	11,1	0,025
	28	12,66	502,0	0,026	5,08	3,2	0,003
0,7	7	12,60	601,0	0,016	6,73	11,1	0,025
	28	12,63	517,0	0,053	5,08	3,2	0,003
0,9	7	12,62	631,0	0,016	6,73	11,1	0,025
	28	12,70	553,0	0,008	5,08	3,2	0,003
1,1	7	12,73	697,0	0,013	6,54	9,2	-0,002
	28	12,58	541,0	0,026	6,71	8,9	0,023
1,3	7	13,04	993,0	0,008	6,54	9,2	-0,002
	28	12,87	717,0	0,026	6,71	8,9	0,023
1,85	7	13,28	166,3	0,003	6,54	9,2	-0,002
	28	13,32	159,0	0,025	6,71	8,9	0,023

Obsah plniva [%]	Změřeno po dnech od přípravy	pH	konduktivita [mS/m]	Koncentrace Fe ²⁺ , Fe ³⁺ [µg/ml]	Slepý pokus		
					pH	konduktivita [µS/cm]	Koncentrace Fe ²⁺ , Fe ³⁺ [µg/ml]
0	7	12,43	436,0		7,02	7,5	
	14	12,33	282,0	-0,036	3,88	20,8	-0,037
	28	12,12	252,0	-0,014	6,61	9,0	-0,014
25	7	11,98	294,0	0,022	7,40	7,5	0,020
	14	11,98	231,0	0,058	7,08	6,9	0,101
	28	11,93	166,0	0,004	6,77	13,2	-0,001
50	7	11,84	254,0	0,023	7,40	7,5	0,020
	14	11,84	207,0	0,063	7,08	6,9	0,101
	28	11,64	162,0	0,002	6,77	13,2	-0,001
75	7	10,88	172,0	0,081	7,40	7,5	0,020
	14	10,74	181,0	0,087	7,08	6,9	0,101
	28	11,00	204,0	0,230	6,77	13,2	-0,001
80	14	12,08	209,0	-0,023	7,09	25,6	-0,038
	28	11,03	188,0	-0,002	6,91	10,9	-0,016

PŘÍLOHA P 18: HODNOTY pH A KONDUKTIVITY U VZORKŮ S 1,85 mol/kg K⁺ A RŮZNÝM OBSAHEM PLNIVA A VZORKY S 1,85 mol/kg Na⁺ A RŮZNÝM OBSAHEM PLNIVA V HMOTNOSTNÍCH PROCENTECH

Obsah plniva [%]	Změřeno po dnech od přípravy	pH	konduktivita [mS/m]	Koncentrace Fe ²⁺ , Fe ³⁺ [µg/ml]	Slepý pokus		
					pH	konduktivita [µS/cm]	Koncentrace Fe ²⁺ , Fe ³⁺ [µg/ml]
0	7	12,91	415,0	0,001	6,20	9,2	0,016
	14	12,11	285,0	0,027	5,13	7,6	0,015
	28	12,21	166,0	-0,011	6,71	10,6	-0,002
25	7	12,75	320,0	-0,005	6,13	7,5	-0,017
	28	12,09	223,0	-0,032	7,09	25,6	-0,038
50	7	12,92	398,0	-0,003	5,84	8,8	-0,007
	14	12,59	270,0	-0,024	6,17	5,7	-0,021
	28	12,12	253,0	-0,019	7,09	25,6	-0,038
75	7	12,18	277,0	0,049	7,02	7,5	0,032
	14	10,89	174,0	0,025	7,09	25,6	-0,038
	28	12,28	158,0	-0,002	6,91	10,9	-0,016
80	7	12,65	265,0	0,001	5,84	8,8	-0,007
	14	12,38	200,0	-0,024	6,17	5,7	-0,021
	28	11,80	155,0	-0,019	7,09	25,6	-0,038

Obsah plniva [mol/kg]	Změřeno po dnech od přípravy	pH	konduktivita [mS/m]	Koncentrace Fe ²⁺ , Fe ³⁺ [µg/ml]	Slepý pokus		
					pH	konduktivita [µS/cm]	Koncentrace Fe ²⁺ , Fe ³⁺ [µg/ml]
0	7	12,72	389,0	0,004	6,71	22,2	0,010
	28	12,25	261,0	0,009	6,67	9,5	0,002
25	7	12,60	715,0	0,091	7,08	6,9	0,101
	14	12,66	584,0	-0,044	7,60	11,3	0,000
	28	12,93	552,0	0,010	6,77	13,2	-0,001
50	7	13,35	949,0	-0,045	6,38	10,1	0,000
	14	13,03	800,0	-0,006	6,45	10,3	-0,004
	28	13,17	626,0	0,000	6,17	10,3	-0,011
75	7	12,30	422,0	0,087	7,08	6,9	0,101
	14	12,34	366,0	-0,032	7,60	11,3	0,000
	28	12,60	334,0	0,026	6,77	13,2	-0,001
80	7	12,18	242,0	0,034	6,71	22,2	0,010
	28	11,69	234,0	0,037	6,67	9,5	0,002