

VLIV ALKALICKÝCH AKTIVÁTORU NA GEOPOLYMERNÍ MALTY

EFFECT OF ALKALI ACTIVATOR ON GEOPOLYMERIC MORTAR

Rostislav Šulc¹, Pavel Svoboda²

Abstract

This paper describes the impact of different types and quantities of alkali activator on activation of fly ash from Opatovice location. There were made a lot of samples of geopolymeric mortar which the fly ash was activated in by different amount of soda hydroxide and potassium hydroxide. It was necessary to keep the same water ratio and the same workability. The effect of quantum of alkali activators on mortar beams was examined. Bending tension and compression strength were observed. The results were compared in three different time periods. Optimal rate of soda oxide and silicic oxide was set up.

Keywords

POPbeton[®]
Fly ash
Alkali activator
Geopolymeric mortar
Efflorescence

1 ÚVOD

Výzkum využití úletových popílků z velkých topenišť (zejména elektráren) probíhá ve spolupráci Katedry technologie staveb ČVUT FSv v Praze a Ústavem skla a silikátů VŠCHT od roku 2003. Navazuje na výzkum, který již několik let probíhal v Ústavu skla a silikátů. Cílem této spolupráce je aplikace získaných výsledků výzkumu do praktického užití ve stavební praxi. Na základě alkalické aktivace úletového popílku byl vytvořen nový materiál, ve kterém jako pojivo funguje aktivovaný úletový popílek. Tento materiál dostal příhodný název POPbeton[®].

Hlavní výhodou tohoto materiálu je snižování ekologické zátěže životního prostředí tím, že při jeho výrobě dochází k využívání odpadních materiálů. S tím souvisí i příznivá cena vstupních materiálů, která je výhodnější než u tradičních betonových pojiv (cement, asfalt). K urychlení procesu tvrdnutí vzorků je třeba technologicky náročné temperování. To bylo odstraněno díky použití tzv. regulátorů tvrdnutí.

V příspěvku jsou předloženy některé výsledky základního výzkumu POPbetonu[®]. Příspěvek je zaměřen na ověření vlivu různých alkalických aktivátorů, porovnání výkvětovitosti jednotlivých řešení a zejména na vliv množství alkalického aktivátoru (hydroxidu sodného) na mechanické vlastnosti POPbetonu[®]. Tento projekt měl za úkol ověřit spolupůsobení plniva a pojiva a ukázat na rozdílné vlastnosti mezi samotnou popílkovou kaší a kompozitním materiálem zastoupeným geopolymerní kaší.

2 PŘÍPRAVA VZORKŮ

Jako zkušební tělesa byly připraveny vzorky geopolymerních malt o rozměrech 40 x 40 x 160 mm. Z praktických důvodů byla vyrobena jak pomocí temperování, tak bez temperování. Byly připravené reálné směsi, takže jako plnivo bylo použito těžené kamenivo frakce 0-4 mm z lokality Dobříň. Byl použit jednotný technologický postup přípravy vzorků znázorněný na obr. 1.

Pro vyhledání optimálního poměru alkalického aktivátoru byly použity směsi jak reálné s monofrací 0-4 mm, tak normové písky PG1, PG2 a PG3. Aby bylo možné provádět relevantní vyhodnocení vzorků, bylo nutné použít některé příměsi k nastartování geopolymerní reakce. Tyto příměsi měly za úkol hlavně využít přebytečné záměsové vody. Ta měla být buď těmito příměsemi chemicky vázána nebo rychleji odpařena. Dalším faktorem byla alkalická aktivita samotných příměsí, které měly urychlit proces geopolymerní reakce zejména v počáteční fázi tvrdnutí.

V rámci ověřování vlastností různých alkalických aktivátorů byla sledována hlavně výkvětovitost na vzorcích a jejich mechanické vlastnosti. Pro referenční vzorek byly použity sodné alkalické aktivátory, které jsou jednak více zásadité než aktivátory draselné a pro budoucí možné stavební využití jistě hovoří i jejich nižší cena.

¹ Ing. Rostislav Šulc, rostislav.sulc@fsv.cvut.cz, ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra technologie staveb, Thákurova 7, 166 29, Praha 6

² Doc. Ing. Pavel Svoboda, CSc., svobodap@fsv.cvut.cz, ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra technologie staveb, Thákurova 7, 166 29, Praha 6

2.1 Složení vzorků

2.1.1 Ověření alkalických aktivátorů

Pro ověření různých vlastností různých alkalických aktivátorů bylo připraveno celkem šest různých variant vzorků. Ve všech případech byl použit popílek z elektrárny Opatovice, jehož složení udává tab. 1. Výrazným činitelem v celém procesu alkalické aktivace je též množství vody. To bylo závislé zejména na typu plniva a typu alkalického aktivátoru. Pro všechny vzorky byl vždy použit suchý hydroxid sodný nebo suchý hydroxid draselný. Sodné vodní sklo mělo složení podle tab. 2, draselné vodní sklo podle tab. 3.

Tab. 1 Složení popílku Opatovice

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	MgO	Σ
53,750%	32,900%	0,405%	2,270%	5,650%	1,500%	1,860%	0,853%	99,188%

Tab. 2 Složení sodného vodního skla

SiO ₂	Na ₂ O	H ₂ O	Σ
25,73%	8,64%	65,50%	99,87%

Tab. 3 Složení draselného vodního skla

SiO ₂	K ₂ O	H ₂ O	Σ
26,70%	8,19%	65,11%	100,00%

U dvou kontrolních vzorků byla jako příměs použita jílovitá hlína z lokality Sedlec. ta okázala absorbovat záměsovou vodu a urychlit tak proces tvrdnutí v otevřené atmosféře. Složení hlíny z lokality Sedlec je v tab. 4. Její některé složky byly počítány jako alkalicky aktivní, což znamená, že se aktivně zúčastnily geopolymerní reakce.

Tab. 4 Složení jílovité hlíny lokalita Sedlec

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	CO ₂	MgO	K ₂ O	Σ
50,43%	12,88%	10,34%	0,72%	4,15%	8,54%	4,38%	2,44%	93,88%

Složení vzorků tedy bylo následující:

- Kamenivo: frakce 0-4 mm, lokalita Dobříň (S 162, S 175, S 177, S 178, S 176, S 182)
- Úletový popílek, lokalita Opatovice (S 162, S 175, S 177, S 178, S 176, S 182)
- Sodné vodní sklo (S 162, S 177, S 176)
- Draselné vodní sklo (S 175, S 178, S 182)
- Hydroxid sodný – NaOH (S 162, S 178, S 176)
- Hydroxid draselný – KOH (S 175, S 177, S 182)
- Hydroxid hlinitý – (S 162, S 175, S 177, S 178, S 176, S 182)
- Jílovitá hlína, lokalita Sedlec (S 176, S 182)
- Voda na konzistenci

2.1.2 Ověření vlivu množství sodných alkalických aktivátorů

Byly připraveny celkem tři různé varianty geopolymerní malty. V prvním případě bylo jako plnivo použita směs normových písků PG1, PG2 a PG3. V dalších sériích se již používalo těžené kameniv frakce 0-4 mm z lokality Dobříň. Byl též ověřen vliv mletého popílku jako regulátoru tvrdnutí. Byl opět použit popílek z lokality Opatovice. Důležitý byl vzájemný poměr oxid křemičitýho a oxidu sodného v závislosti na druhu plniva a v závislosti na způsobu úpravy úletového popílku. Výrazným činitelem v celém procesu alkalické aktivace je též množství vody. To bylo závislé zejména na typu plniva. Bylo tedy nutné zachovat pro jednotlivé dvojice sérií stejný vodní součinitel, ale zároveň bylo nutné zajistit u všech vzorků stejnou zpracovatelnost malt.

Byl použit úletový popílek z lokality Opatovice, složení je v tab.1. Dále byly použity sodné aktivátory, NaOH a sodné vodní sklo, složení viz. tab. 2.

Složení vzorků série 165 a 166 tedy bylo následující:

- Kamenivo: PG1, PG2 a PG3
- Úletový popílek, lokalita Opatovice
- Vodní sklo
- Hydroxid sodný - NaOH
- Hydroxid hlinitý
- Voda na konzistenci

Složení vzorků série 169 a 170 bylo následující:

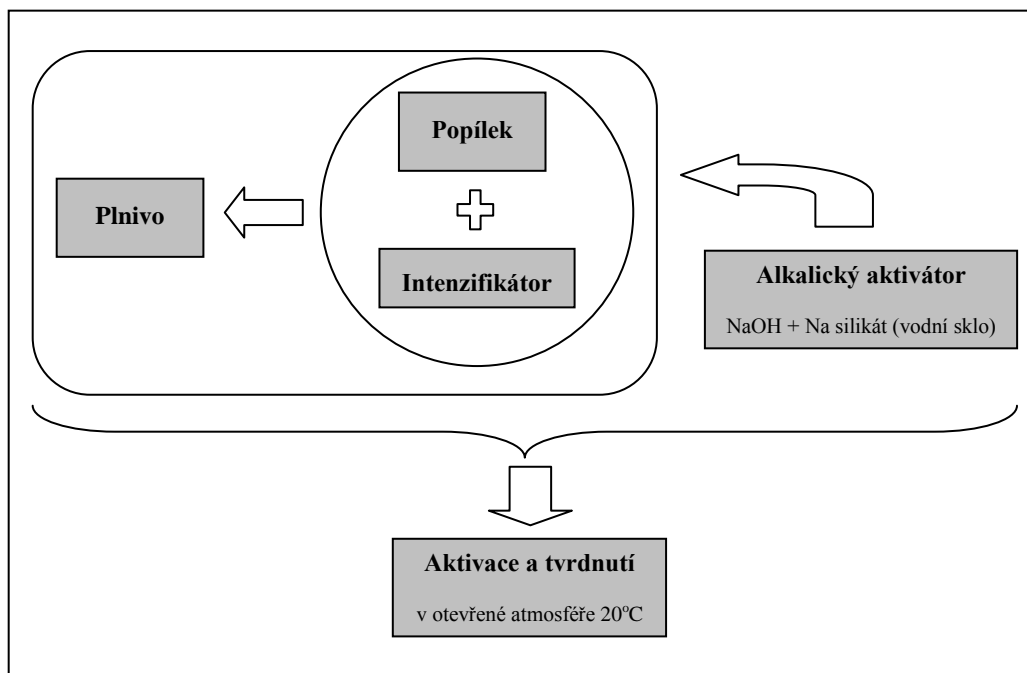
- Těžené kamenivo frakce 0-4 mm, lokalita Dobříň
- Úletový popílek, lokalita Opatovice
- Vodní sklo
- Hydroxid sodný - NaOH
- Hydroxid hlinitý – proměnná hodnota
- Voda na konzistenci

Složení vzorků série 172 a 173 bylo následující:

- Těžené kamenivo frakce 0-4 mm, lokalita Dobříň
- Úletový popílek, lokalita Opatovice, upravený mletím na mlýnu typu Los Angeles
- Vodní sklo
- Hydroxid sodný - NaOH
- Hydroxid hlinitý Voda na konzistenci

2.2 Zpracování vzorků

Celý experiment byl rozdělen na dvě části. V první části šlo o srovnání dvou různých aktivátorů s ohledem na výkvetotvorné vlastnosti geopolymerních malt. Zároveň se měl potvrdit předpoklad, podle kterého by vzorky aktivované slabší zásadou (draselné aktivátory) měly mít horší fyzikálně-mechanické vlastnosti. V druhé části byly specifikovány požadavky na množství sodných alkalických aktivátorů.

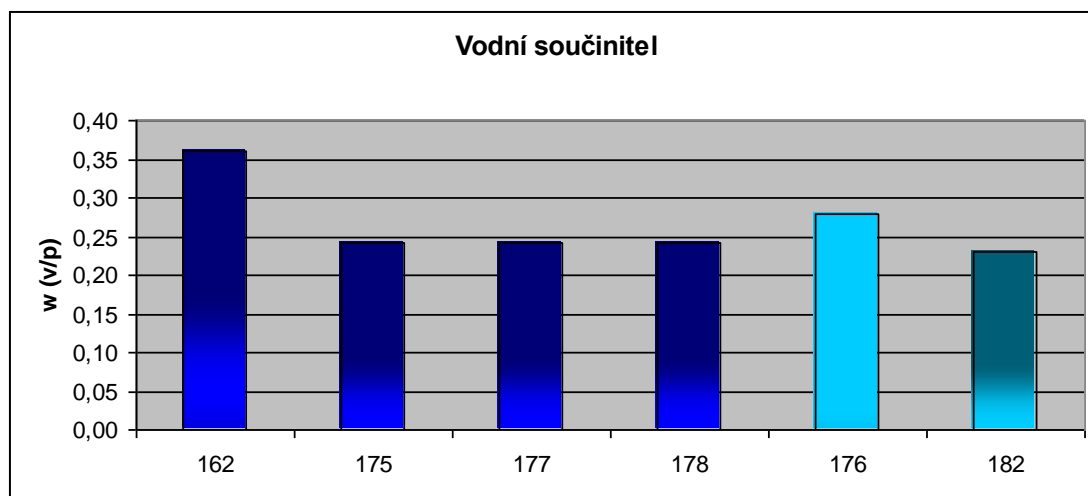


Obr. 1 Schéma přípravy geopolymerní malty

2.2.1 Příprava vzorků pro porovnání alkalických aktivátorů

V každé sérii bylo zhotoveno dohromady šest trámečků o rozměrech 40 x 40 x 160 mm. Série byly připraveny podle schématu na obr. 1. Všechny vzorky byly ve formách zpracovány vibrací a byly ponechány sedm dní k vytvrdnutí. Po sedmi dnech byly odformovány. Druhá (kontrolní) trojice trámečků byla připravena pomocí temperování. Postup byl stejný jako je na obr. 1 až po zpracování vibrací. Poté byly vzorky uloženy do sušárny při teplotě 80°C po dobu 24 hodin. Poté byly vzorky vyndány a ponechány dalších šest dní ve volném prostředí k vytvrdnutí. Po sedmi dnech od zhotovení byly opět odformovány.

Při výrobě referenčního vzorku na bázi sodných aktivátorů (série 162) bylo použito zvlhčené kamenivo na 4% hmotnostní vlhkosti, což odpovídá reálné vlhkosti kameniva na skládce. Takto vysoké množství vody v geopolymerní maltě, cca. o 50% vyšší vodní součinitel než u ostatních sérií, mělo za následek výrazné snížení pevnostních charakteristik této série. Podle dřívějších zjištění zejména na POPbetonu[®], se dá přepokládat snížení pevností až o 50% a to zejména u vzorků připravovaných za studena. U vzorků připravovaných pomocí temperování se dá hovořit o snížení výsledných pevností cca. o 30% při 50% zvýšení vodního součinitele. Dále bylo potřeba nepatrně zvýšit množství záměsové vody u série 176 s příměsí jílovité hlíny v důsledku zpracovatelnosti. Toto zvýšení záměsové vody se na výsledných vlastnostech geopolymerní malty příliš neprojevovalo. Souhrnný graf velikosti vodních součinitelů pro dané série je na obr. 2.



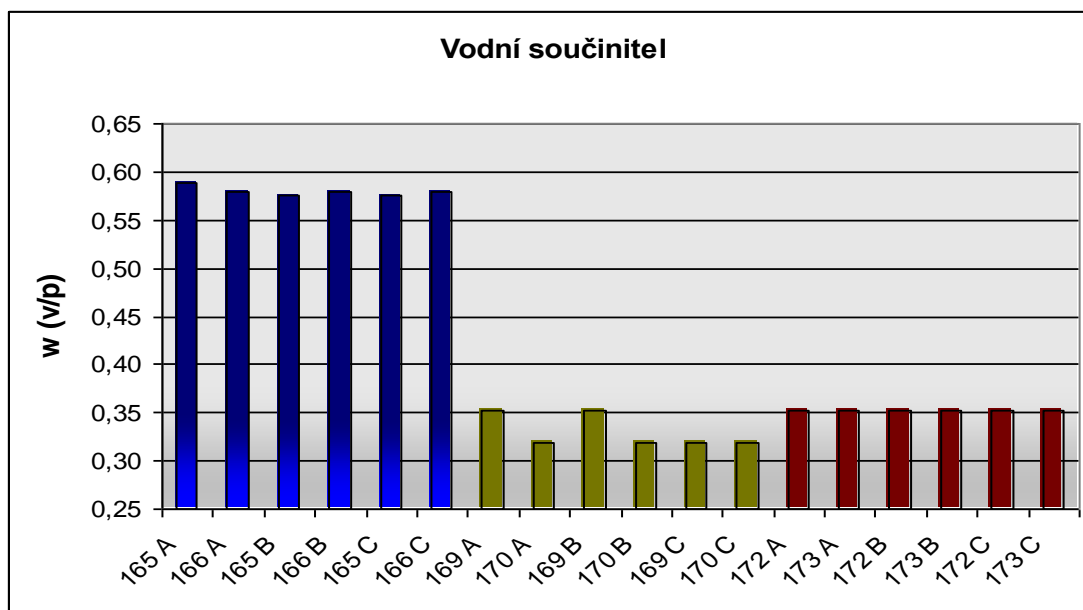
Obr. 2 Vodní součinitel sérií s různými aktivátory

2.2.2 Příprava vzorků pro optimalizaci sodných alkalických aktivátorů

V každé dvojici sérií bylo zhotoveno dohromady šest trámečků o rozměrech 40 x 40 x 160 mm. Všechny vzorky byly ve formách zpracovány vibrací a byly ponechány sedm dní k vytvrdnutí. Po sedmi dnech byly odformovány. Vzorky byly zpracovány podle schématu na obr. 1.

V sériích 165 a 166 bylo nutné abnormálně zvýšit vodní součinitel až na 0,58 a to zejména díky velmi jemnému normovému kamenivu. Tyto dvě série tvoří vlastní soubor, takže je možné velice dobře porovnat vliv množství vodního součinitele na geopolymerních maltách. V ostatních sériích bylo použito kamenivo těžené, které zejména díky menšímu měrnému povrchu dovoluje snížit množství záměsové vody. V sériích s těženým kamenivem, byl totiž vodní součinitel cca. poloviční. To se posléze odrazilo na výsledných pevnostech. Též v sérii 169 bylo při nízkých dávkách alkalického aktivátoru nutné zvýšit množství záměsové vody, kvůli následné zpracovatelnosti. To přináší jisté následné kolísání výsledků. Množství vodního součinitele pro jednotlivé série je na obr. 3.

K sériím 172 a 173, kde byl použit mletý popílek lze poznamenat tolik, že popílek se bohužel nepovedlo umlít natolik, aby se výrazně změnila křivka zmitosti popílku a nepodařilo se prokázat zvýšení reaktivity mletého popílku.



Obr. 3 Vodní součinitel sérií pro optimalizaci sodných aktivátorů

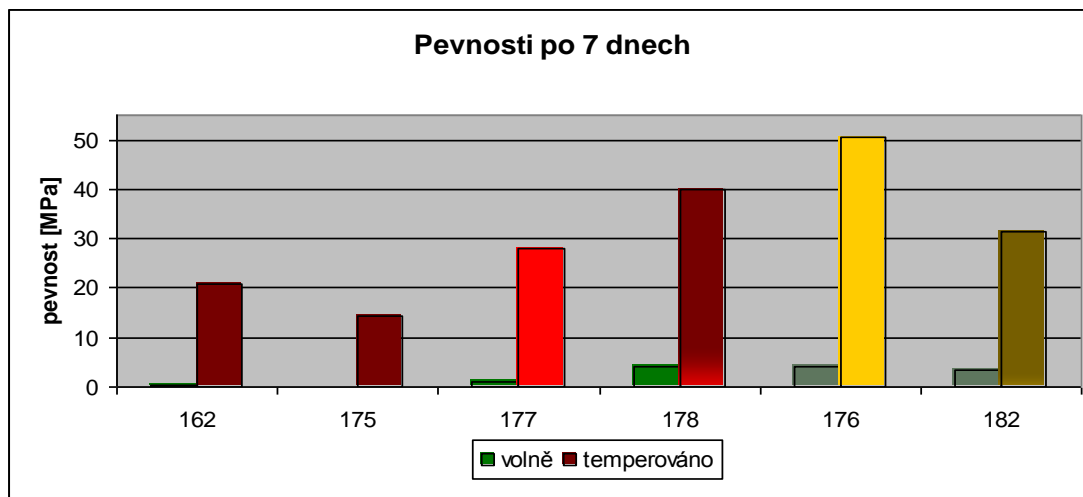
3 VÝSLEDKY

Tělesa byla zkoušena na tah za ohybu a prostý tlak po 7, 14 a 28 dnech. Změřené hodnoty byly porovnány jak absolutně mezi sebou, tak z hlediska poměrů oxidů ve směsích. K problému netemperovaného POPbetonu je potřeba poznamenat, že konečné pevnosti nabývá až zhruba po devadesáti dnech zrání.

3.1 Porovnání alkalických aktivátorů

3.1.1 Fyzikálně mechanické vlastnosti

Vzorky připravené temperováním byly stejně jako vzorky připravené v otevřené atmosféře zkoušeny po 7, 14 a 28 dnech. Výsledky byly zaznamenány a porovnány i z hlediska poměrů oxidů.



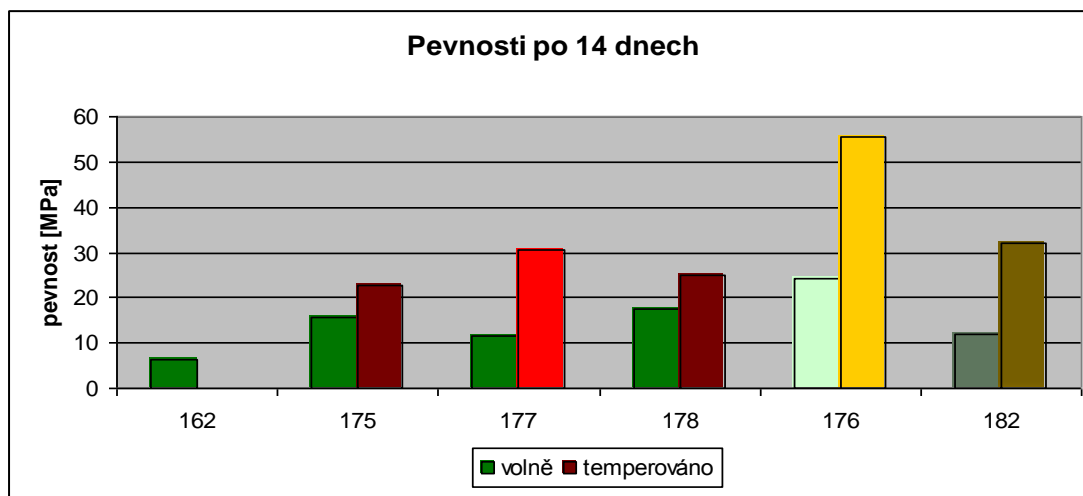
Obr. 4 Pevnosti po sedmi dnech volně/temperováno

Z výsledků po sedmi dnech je patrné, že netemperované vzorky mají nepatrnou pevnost, která dosahuje ke 3 MPa. Z tohoto hlediska se nejvýhodněji jeví použití příměsí jílovité hlíny (S 176 a S 182), která dokázala účinně vázat záměsovou vodu. Jisté výraznější výsledky v tomto směru potvrzuje i S 178, kde bylo použito draselné vodní sklo a hydroxid sodný. Použití pouze draselných aktivátorů (S 175 a S 182) se oproti sodným aktivátorům (S 162 a S 176) ukázalo jako méně vhodné.

Z hlediska kontrolních temperovaných vzorků, lze konstatovat, že z hlediska sedmidenních pevností se jako možné řešení jeví použití jak použití kombinací obou alkalických aktivátorů, tak použití pouze sodných aktivátorů. Jako méně

vhodné se jeví použití pouze draselných aktivátorů. V Případě S 182 se jedná o snížení pevností cca. 30%. V Případě S 175 by byl dosažený rozdíl ještě vyšší.

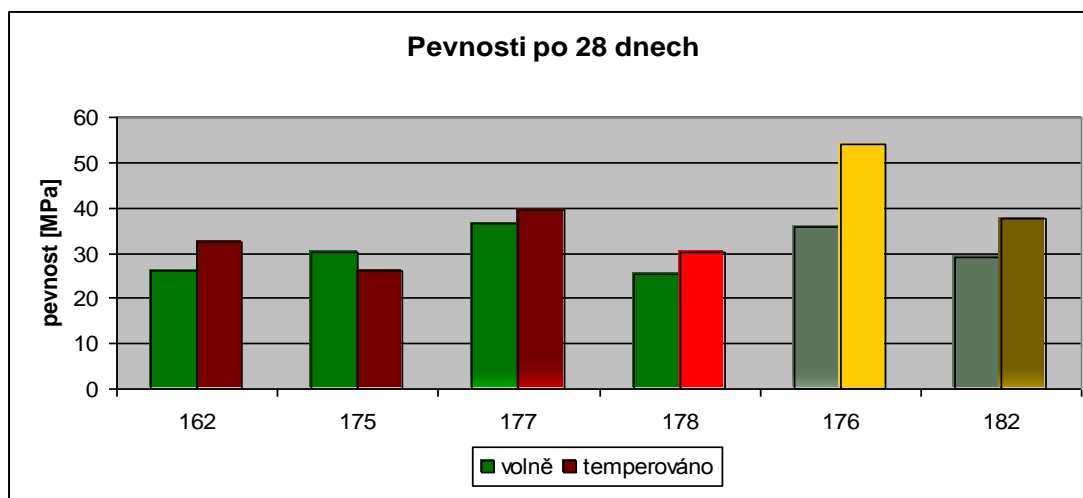
Nelze na tomto místě opomenout vliv vodního součinitele na S 162. Lze předpokládat, že při nižším vodním součiniteli by výsledné pevnosti byly o 30-50% vyšší.



Obr. 5 Pevnosti po čtrnácti dnech volně/temperováno

Na obr. 5 jsou znázorněny pevnosti po 14 dnech. Dochází zde k výraznému nárůstu u S 175 a S 178. Tedy zejména tam, kde bylo použito draselné vodní sklo. Z hlediska sérií s příměsí hlíny (S 176 a S 182) je zřetelný lepší výsledek sodných aktivátorů a to bezmála o 50% a to jak pro studenou tak temperovanou verzi vzorku.

S 162 nebyla měřena v této časové periodě v temperované variantě. přesto se i zde radikálně projevuje zvýšení vodního součinitele.

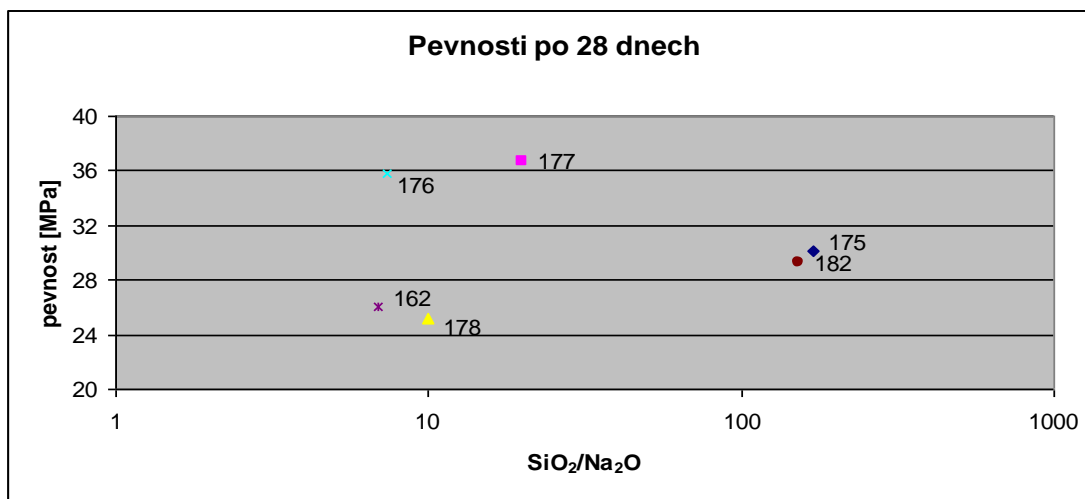


Obr. 6 Pevnosti po čtrnácti dnech volně/temperováno

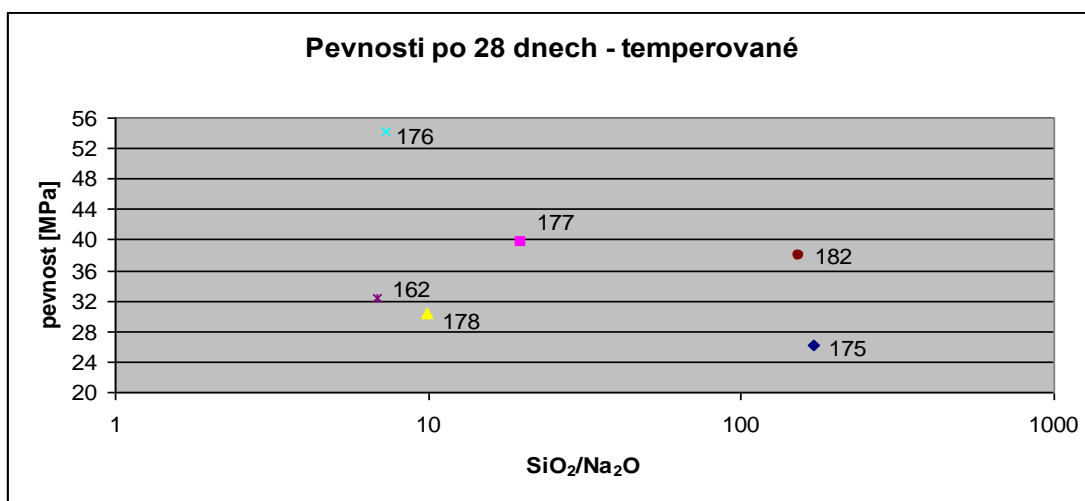
Výsledné pevnosti na obr. 6 odpovídají u netemperovaných vzorků asi 75% konečných pevností (u geopolymerních malt). U temperovaných vzorků je to cca. 95% koncových pevností. Rozdíl v netemperovaných verzích je po 28 dnech již nepatrný. Největší nárůst zaznamenala série se sodným vodním sklem a hydroxidem draselným. I série s pouze draselnými aktivátory ukázaly nárůst. Konečné pevnosti se tedy dají očekávat u sodných i draselných aktivátorů podobně. Nepatrně lépe tak vycházejí série, kde bylo použito sodné vodní sklo.

Rozdílnější výsledky a z hlediska konečných pevností i větší vypovídací hodnotu, mají série temperované. Zde se jako jednoznačně lepší jeví použití sodných aktivátorů, zejména sodného vodního skla.

V dalších grafech je znázorněna závislost pevností na poměru oxidů v kompozicích aktivovaného popílku. Základní strukturu geopolymery podle různých modelů tvoří ionty křemíku, hliníku a sodíku (draslíku). V těchto ověřovacích vzorcích bylo zachováno stejné množství Al_2O_3 (z popílku a regulátoru tvrdnutí). Proměnná byla tak pouze množství SiO_2 (vodní sklo) a množství Na_2O a K_2O (vodní sklo, KOH a NaOH). proto je na následujících obrázcích znázorněna závislost pevností na poměrných hodnotách SiO_2/Na_2O a SiO_2/K_2O .



Obr. 7 Pevnosti v závislosti na Na₂O



Obr. 8 Pevnosti v závislosti na Na₂O pro temperované varianty

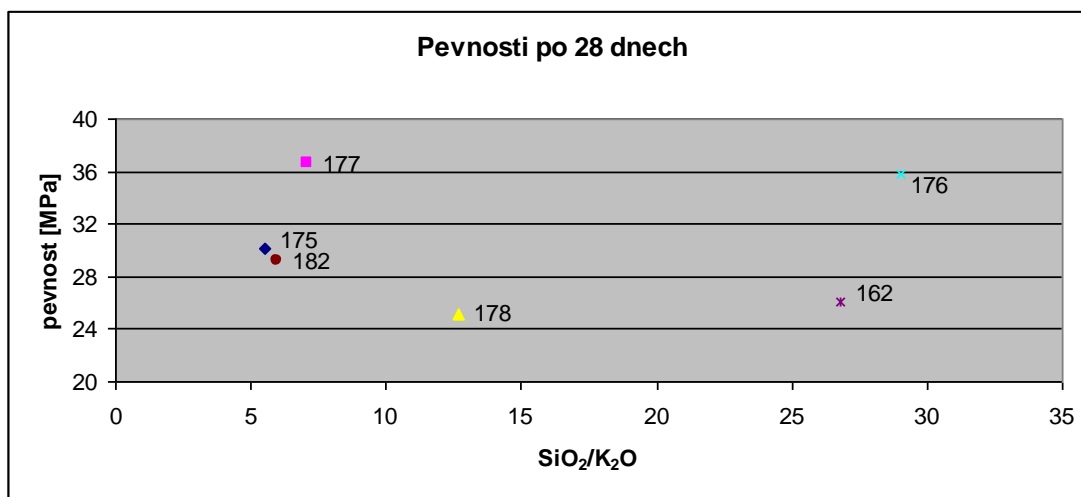
Výsledky z těchto dvou grafů jsou hůře interpretovatelné, ale dá se jasně prohlásit, že série bez přítomnosti Na₂O (pouze malá část z popílku), mají výrazně horší pevnostní charakteristiky než série, kde byl zastoupen sodný aktivátor.

V případě sodného aktivátoru jsou je ještě nutné rozlišit dva případy. V případě použití sodného vodního skla (S 177) je celkové množství Na₂O ve směsi poměrně malé. (Grafy jsou v logaritmickém měřítku!!!) Přesto je výsledek uspokojivý a to jak pro netemperované, tak pro temperované varianty. V případě použití draselného skla (S 178, S 182 a S 175) jsou naopak pevnostní charakteristiky velmi nízké u studené i temperované varianty.

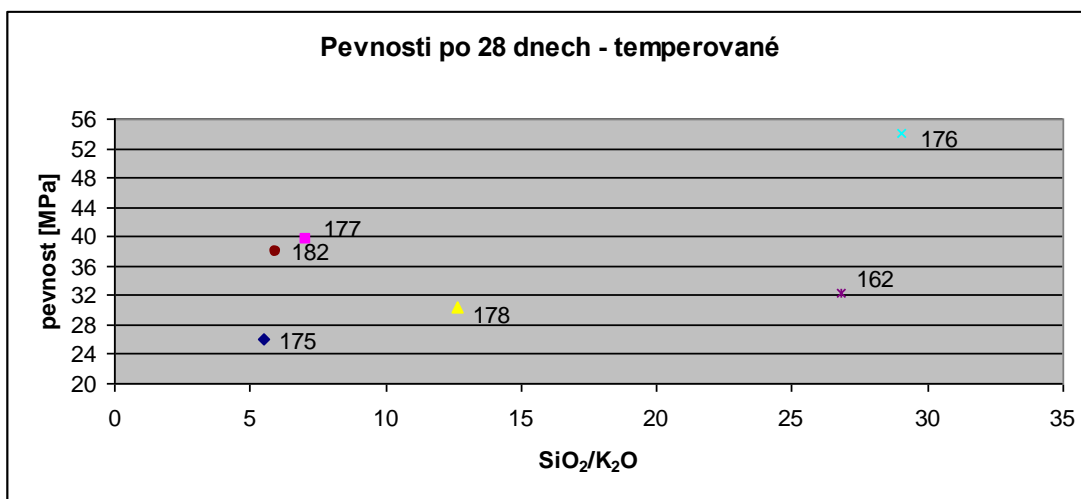
V případě série S 162 musíme opět vzít v potaz, zvýšený vodní součinitel a tím i výrazně sníženou výslednou pevnost vzorku (cca o 50% u varianty bez temperování).

Na obrázcích 9 a 10 jsou znázorněny závislosti na množství K₂O ve směsi. Výsledek opět není jednoznačný. S určitostí lze opět prohlásit, že dobrých výsledků dosahují vzorky aktivované sodnými aktivátory (S 176). A lze potvrdit hypotézu, že výsledné pevnostní charakteristiky ovlivňuje zejména sodné vodní sklo (S 176, S 177). Příspěvek hydroxidů ať sodného tak draselného nebyl z těchto vyhodnocení patrný (S 177 a S 178). Dá se tedy předpokládat, že geopolymerní hmoty jsou aktivovatelné spíše křemičitanem sodným než křemičitanem draselným. To dokazují série S 176, S 177 a i S 162, pokud bychom respektovali odhadnutou opravu pevnostních charakteristik s nižším vodním součinitelem,

S 162 ani v tomto přehledu nereprezentuje porovnatelné výsledky. Z těchto důvodů bude třeba znovu prověřit aktivaci popílku pouze sodnými aktivátory za dostatečně nízkého vodního součinitele.



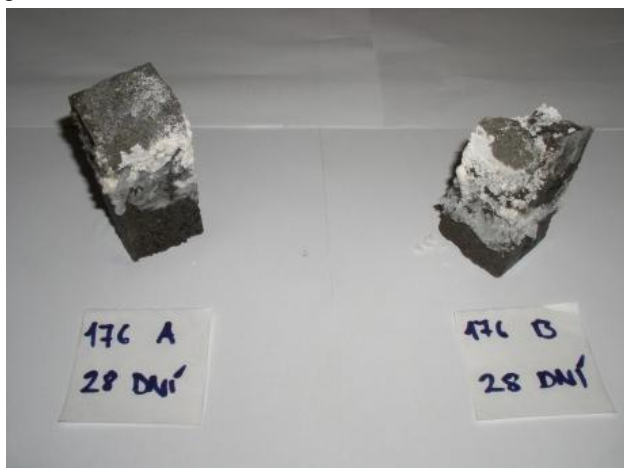
Obr. 9 Pevnosti v závislosti na K₂O



Obr. 10 Pevnosti v závislosti na K₂O pro temperované varianty

3.1.2 Porovnání výkvětovnosti

Druhou významnou částí experimentu bylo ověřit vliv různých druhů alkalických aktivátorů na tvorbu výkvětů. Tento fenomén je zejména dobře pozorovatelný při použití sodných aktivátorů. Pro urychlení tvorby výkvětů byl použit systém částečného smočení vzorků ve vodě. Vzorky po 28 dnech stáří byly po destruktivní zkoušce na tah za ohybu pomoheny do vodní lázně a ponechány 14 dní v laboratorním prostředí. Po 14 dnech byly zdokumentovány výkvěty na povrchu vzorků.



Obr. 11 S 176 – NaOH, sodné vodní sklo



Obr. 12 S 178 – NaOH, draselné vodní sklo



Obr. 13 S 177 – KOH, sodné vodní sklo



Obr. 14 S 177 – KOH, sodné vodní sklo



Obr. 15 S 175 – KOH, draselné vodní sklo



Obr. 16 S 175 – KOH, draselné vodní sklo

Vzorky označené jako A jsou vzorky, které byly ponechány na vytvrdnutí ve volné atmosféře při teplotě cca. 20°C. vzorky označené jako B byly připraveny temperováním.

Ukazují se jasné rozdíly při použití NaOH a KOH. Na sériích S 176 a S 178 (obr. 11 a obr. 12), byl použit NaOH. Množství výkvětů je značné a jasně ukazuje na původce tohoto jevu. Naopak menší vliv má použití vodního skla. Ani na S 178 (obr. 12), kde bylo použito draselné vodní sklo nedošlo k výraznějšímu úbytku výkvětů. Naopak při použití sodného vodního skla na S 177 (obr. 13) nebylo patrné výrazné zvýšení množství výkvětů. Vyluhované zbytky v nádobách při použití NaOH nevykazovaly ve vodě žádné viditelné zbytkové produkty.

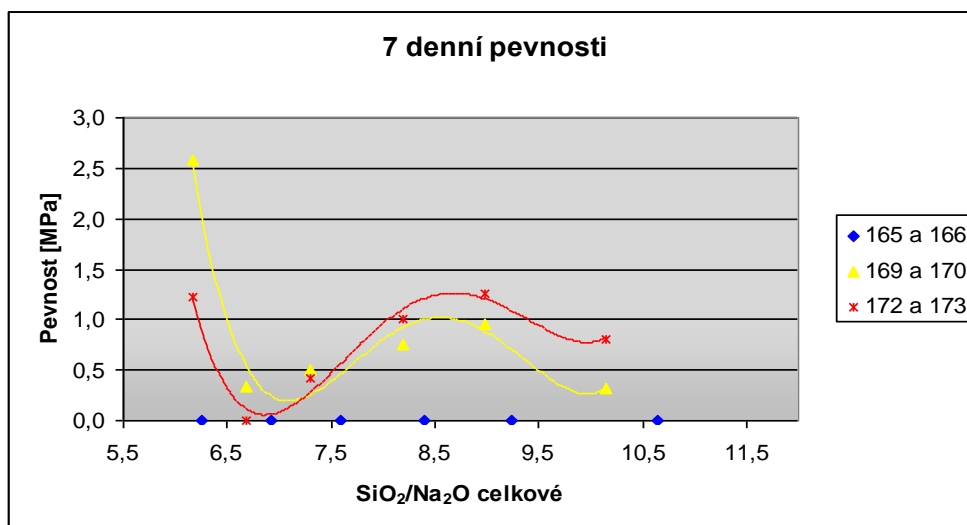
Při použití draselných aktivátorů došlo proti předpokladům a zprávám zahraničních autorů [1] k tvorbě výkvětů. Množství výkvětů bylo výrazně nižší než při použití sodných aktivátorů. Lze se tedy pouze domnívat, zda šlo o výkvěty sodných solí, ze sodíku obsaženého v nepatrném množství v popílku, či zda se na viditelných výkvětech podílel i draslík., což by podle množství viditelných výkvětů odpovídalo více.

Při použití draselného vodního skla došlo u netemperovaných verzí k vyplavení odpadních produktů a tvorbě pevných kusů „zbytků“ draselného vodního skla. A to jak u S 175. tak u S 177. To potvrzuje předchozí zjištění ohledně mechanických vlastností vzorků aktivovaných draselným vodním sklem. Zjevně křemičitan draselný špatně vstupuje do geopolymerní reakce, případně se jí neúčastní. Tento jev byl patrný zejména u vzorků připravených bez temperování. U temperovaných vzorků byl „odpad“ výrazně nižší. To také může souviset s rychlostí probíhající geopolymerní reakce. Rozhodně pro draselné aktivátory ve formě křemičitanu draselného není 28 dní dostatečná doba vyžrání tělesa.

V tomto případě bude nutné dále sledovat zbytkové produkty po draselných aktivátorech, které tvoří viditelné výkvěty a zejména sledovat vyluhovatelnost samotného sodíku a draslíku.

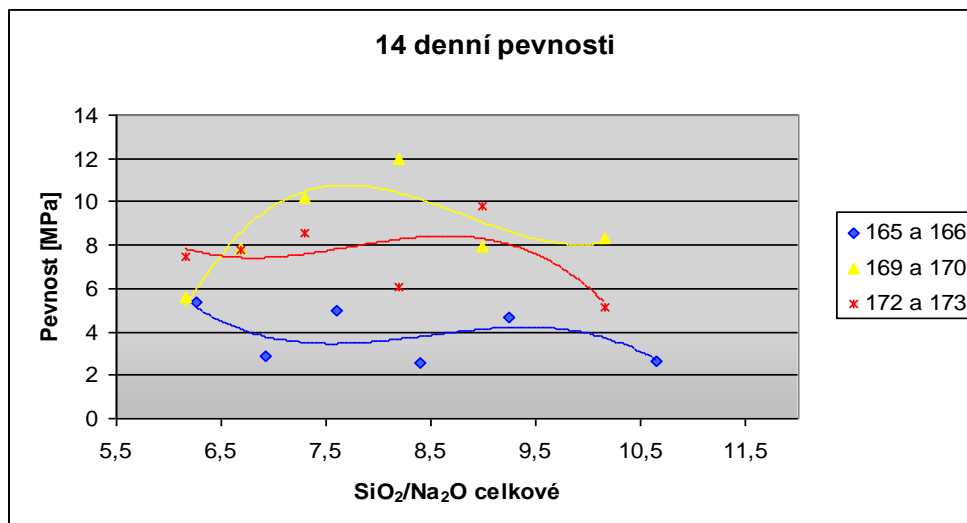
3.2 Vyhledání optimálního množství sodných aktivátorů

Vzorky byly zhotoveny vždy ve dvou sériích se stejnými výchozími podmínkami a proměnnou hodnotou NaOH. Takto zhotovených devět sérií dává dobrou možnost udělat si představu o chování reálných směsí s různými vstupními parametry jako je množství vody a jemného kameniva (S 165 a S 166) a reálného kameniva s nižším množstvím záměsové vody (S 169 a S 170).



Obr. 17 Pevnosti v závislosti na Na₂O

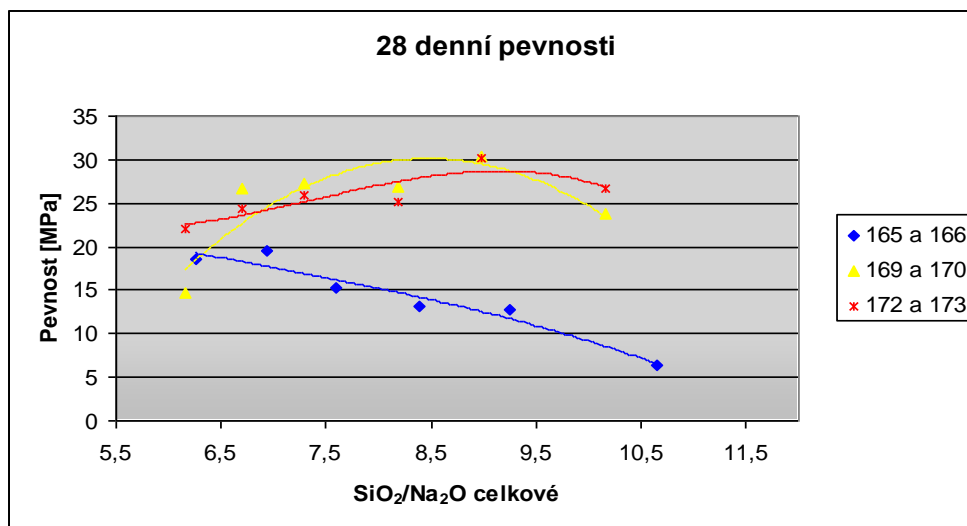
Série S 165 a S 166 nebylo možné po sedmi dnech zrání měřit pro nedostatečnou pevnost. Množství vody se tedy ukazuje jako rozhodující fenomén pro počáteční pevnosti. Mletý popílek v S 172 a S 173 bohužel nesplnil očekávání a jeho reaktivita nebyla dostatečná k zrychlení geopolymerní reakce. Potvrdil se předpoklad známý z výzkumu samotného aktivovaného popílku, kde jsou počáteční pevnosti nejvyšší při nízkém nebo žádném obsahu NaOH ve směsi.



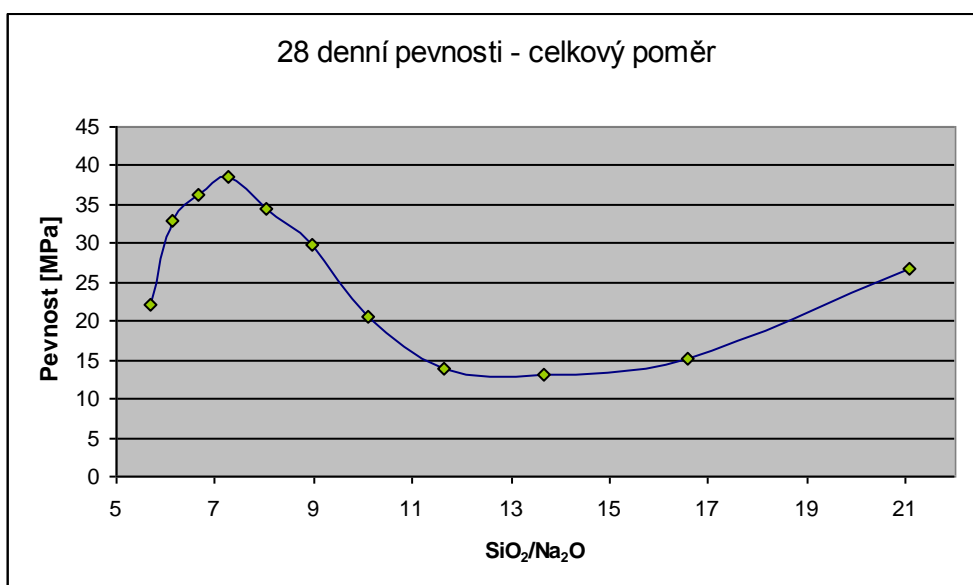
Obr. 18 Pevnosti v závislosti na Na₂O

Pevnosti po 14 dnech ukazují již postupný náběh geopolymerní reakce. U směsí těžným kamenivem (S 169, S 170, S 172 a S 173) se již projevuje nárůst pevností nejvíce v intervalu SiO₂/Na₂O v rozmezí od 8,5-9,5. Naopak u směsí s normovým kamenivem (S 165 a S 166) jsou výkyvy a nízké pevnosti způsobené velkým množstvím záměsové vody a s tím související obtížnou zpracovatelností.

Samotný aktivovaný popílek ve stejném období vykazuje počáteční pevnosti podobné geopolymerním maltám. Nutno poznamenat, že samotný aktivovaný popílek není po 7 dnech možné měřit, neboť nemá dostatečnou pevnost k odformování. U samotného aktivovaného popílku je v prvotních fázích výhodné udržovat poměr SiO₂/Na₂O v rozmezí 6,5-7,5, viz [3].



Obr. 19 Pevnosti v závislosti na Na₂O



Obr. 20 Pevnosti samotného aktivovaného popílku v závislosti na Na₂O podle [3]

Na obrázcích 19 a 20 je jasně vidět rozdíl mezi reálnou maltovou směsí a samotným aktivovaným popílkem. Zatímco u reálných směrů na obr. 19 je optimální poměr SiO₂/Na₂O okolo 9,0 u aktivovaného popílku je v rozmezí 7,0-7,5. **Vzhledem k tomu, že daný poměr je v čase stálý a v podstatě neměnný se lze domnívat, že i křemičité kamenivo a zejména jeho nejjemnější část se pravděpodobně zapojují do alkalické aktivace! Při stejném poměru sodných alkalických aktivátorů nelze tuto změnu vysvětlit jinak, než zvýšením samotného SiO₂, který vstupuje do reakce.**

Série S 165 a S 166 jsou hrubě poznamenány množstvím záměsové vody a následným zpracováním, kdy došlo k výrazné segregaci drobných částic k povrchu vzorků. Jednotlivé vzorky pak mají spíše opačnou tendenci, kdy se zvyšujícím se množstvím SiO₂ klesá pevnost.

Nutno poznamenat, že geopolymerní malty mají po 28 dnech cca. 75% své konečné pevnosti. Naopak samotný aktivovaný popílek má po 28 dnech asi 50% konečné pevnosti, přičemž optimální poměr SiO₂/Na₂O zůstává prakticky neměnný.

4 ZÁVĚR

Bylo prokázáno, že z hlediska pevnostních charakteristik se jako rozhodující fenomén ukazuje křemičitan sodný jako sodné vodní sklo. Tento jev je potřeba dále prokázat na širší škále zkoušených vzorků, kde bude jako aktivátor sloužit směs sodného a draselného vodního skla v různých vzájemných poměrech. Dále bylo prokázáno, že hydroxid draselný ani hydroxid sodný neovlivňuje výsledné pevnostní charakteristiky a jejich záměna je možná. I toto zjištění by

však bylo potřeba porovnat na širší škále vzorků. Jako méně vhodné řešení z hlediska pevnostních charakteristik se jeví použití pouze draselných aktivátorů.

Z hlediska výkvětovitosti se jako jednoznačně výhodnější ukázalo použití pouze draselných aktivátorů. Značný byl zejména vliv NaOH a to ve všech vzorcích, kde byl obsažen. Bude dále potřeba ověřit množství vyluhovatelného jak sodíku tak draslíku. Lze zcela jednoznačně pozorovat, že výkvětovitost při použití draselných aktivátorů je nižší, avšak vyluhovatelnost draslíku nižší být nemusí, jak ukazují zbytky po provedených pokusech. Dále bude potřeba dostatečně zjemnit strukturu geopolymerních malt a betonů natolik, aby nedocházelo k migraci nebo byla co nejvíce ztížena migrace sodných a draselných iontů, které zjevně nejsou ve struktuře geopolymery dostatečně vázány.

Provedené pokusy směřující k optimalizaci množství NaOH ve směsi ukazují na výrazné kolísání optimálního poměru aktivátorů vzhledem k množství popílku v závislosti na plnivu. Celý tento jen problém se zvyrazňuje v závislosti na stáří vzorku. U geopolymerních malt je po 28 dnech pevnost zhruba na hodnotě 75% pevnosti konečné. U samotného popílku s po 28 dnech pevnosti pohybují na 50% konečných pevností. Výrazně se projevuje i množství vody v kompozici, které je v každém případě určujícím činitelem. Vliv mletého popílku se z tohoto hlediska příliš neprojevil. Popílek mletý na mlýnu Los Angeles ale neměl dostatečně narušenou strukturu základních popílkových částic, proto je vliv v podstatě minimální. Zajímavým zjištěním je posun optimálního poměru $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$, který ukazuje na to, že reálné směsi vykazují značné odlišnosti.

5 PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval všem díky kterým se podařilo tento tento problém alespoň částečně objasnit. Celý tento výzkum je realizován v rámci grantu GAČR 103/05/2314 „Mechanické a inženýrské vlastnosti geopolymerních materiálů na bázi alkalicky aktivovaných popílků“ a výzkumného záměru MŠM 6046137302 „Příprava a výzkum funkčních materiálů a materiálových technologií s využitím mikro a nanoskopických metod“.

Na řešení tohoto úkolu v jednotlivých dalších fázích spolupracují: Josef Doležal, Tomáš Strnad, Jaroslav Jeništa, Gabriela Tlapáková, Pavel Houser, František Škvára, Lenka Myšková

Literatura

- [1] Hardjito, D.- Regan, B. V. *Development and Properties of Low-Calcium Fly-Ash Based Geopolymer Concrete., Research report GCI, Australia*, Perth: Curtin University of Technology, 2005, 103 s.
- [2] Svoboda, P.- Šulc, R.- Doležal, J.- Škvára, F.- Dvořáček, K.- Lucuk, M. *Beton bez cementu s názvem POPbeton*, X. Konference – Ekologie a nové stavební hmoty a výrobky, Telč: VUSTAH, 2006, 121 s.
- [3] Šulc, R. – Svoboda, P. *Vliv množství alkalických aktivátorů na pevnost POPbetonu®*, TECHSTA 2007 - Technology for Sustainable Development in Building Industry . Praha: ČVUT, Fakulta stavební, Katedra technologie staveb, 2007, s. 56-65. ISBN 978-80-01-03880-2., 19.-20.9.2007

Recenzoval

Josef Doležal, ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra technologie staveb, Thákurova 7, 166 29, Praha 6, betonconsult@volny.cz