

## VLIV ZPŮSOBŮ ZPRACOVÁNÍ A ÚPRAVY POPÍLKU NA VLASTNOSTI POPBETONU

**Rostislav Šulc<sup>1</sup>, Pavel Svoboda<sup>2</sup>**

*Od roku 2003, kdy byla navázána úzká spolupráce mezi Ústavem skla a keramiky VŠCHT a Katedrou technologie staveb ČVUT FSv v Praze probíhá výzkum alkalicky aktivovaných úletových popílků z velkých topenišť v ČR.*

*Na základě geopolymerní reakce je úletový popílek využíván jako pojivo pro reálné betonové směsi. Cílem tohoto výzkumu je aplikace získaných výsledků výzkumu do praktického užití ve stavební praxi. V betonových směsích tak aktivovaný popílek plně nahrazuje tradiční cementové pojivo. Jedním z problémů, které výrazně ztěžují využití aktivovaného popílku jako pojiva je nutnost dodávání energie ve formě tepla, které je nutné k samotné aktivaci. Možnost aktivace popílku bez nutnosti temperování byla již zpracována, avšak doby tvrdnutí těchto směsí je pro reálné využití příliš dlouhá.*

*V příspěvku jsou předloženy některé výsledky, kterých bylo dosaženo při výrobě POPbetonu bez nutnosti temperování. Úpravou technologických postupů byl zajištěn optimální proces výroby POPbetonu. Pomocí některých přísad a příměsí bylo dosaženo jak vhodné zpracovatelnosti, tak výrazného*

---

<sup>1</sup> ŠULC Rostislav, Ing., CTU in Prague, Faculty of Civil Engineering, K122 - Department of Construction Technology, CZ-199 29, Thákurova 7, Prague 6 - Dejvice, Czech Republic, [rostislav.sulc@fsv.cvut.cz](mailto:rostislav.sulc@fsv.cvut.cz)

<sup>2</sup>SVOBODA, Pavel, Doc. Ing., CSc, CTU in Prague, Faculty of Civil Engineering, K122 - Department of Construction Technology, CZ-199 29, Thákurova 7, Prague 6 - Dejvice, Czech Republic, [pavel.svoboda@fsv.cvut.cz](mailto:pavel.svoboda@fsv.cvut.cz)

*zkrácení doby tvrdnutí POPbetonu. Další zlepšení výsledných jak fyzikálně mechanických, tak výrobních vlastností bylo dosaženo díky předchozí úpravě úletového popílku.*

## 1. Úvod

Alkalicky aktivovaný popílek se ukázal jako vhodné pojivo pro použití v betonové směsi. Oproti klasickému cementovému betonu však vykazuje jisté odlišnosti a nedostatky. Největším problémem pro použití POPbetonu se ukázaly dlouhé doby při náběhu pevnosti. Bylo tedy nutné urychlit průběh alkalické aktivace za laboratorních teplot (20°C). Jako vhodná cesta se ukázaly některé příměsi, vhodná předchozí úprava popílku a optimální postup přípravy betonové směsi tak, aby byl objem vody ve směsi co nejmenší a nesnižoval koncentraci aktivátorů a přitom aby ve směsi bylo dostatečné množství vody tak, aby byla řádně zpracovatelná.

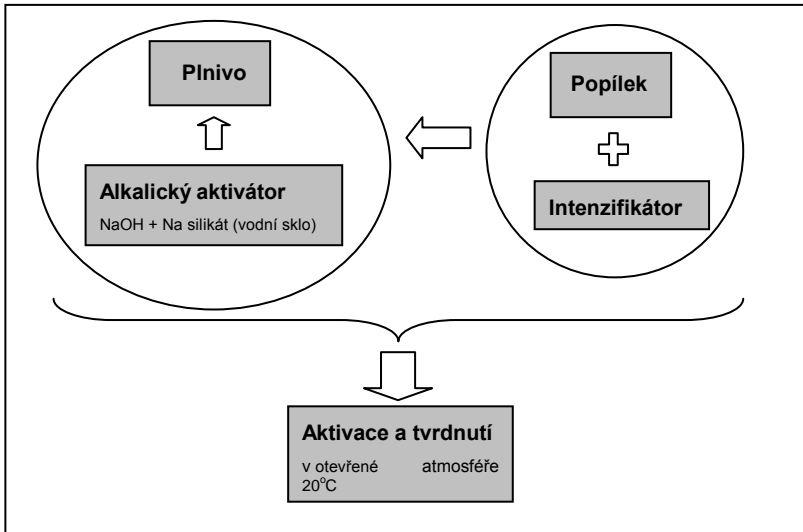
## 2. Technologické postupy při přípravě

Pro dosažení optimálních výsledků bylo nutné optimalizovat vhodný postup přípravy. Z dřívějších poznatků byly zřejmé dva možné postupy. První možnost je aktivovat samotný úletový popílek NaOH v pevném skupenství a vodním sklem v tekutém skupenství. Do aktivovaného popílku se přidává plnivo ve formě vysušeného kameniva a následně se přidává voda na úpravu konzistence.

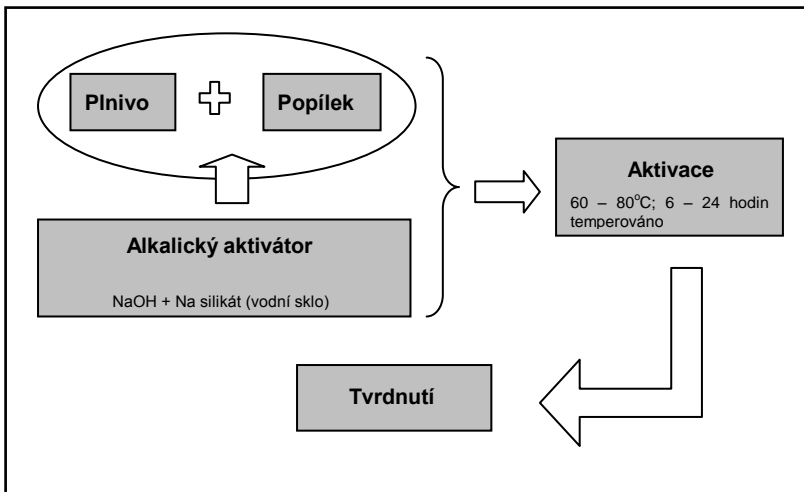
Druhá možnost je obrátit postup. Nejprve navlhčit kamenivo na min. 1,5% vlhkosti hmotnostní poté dávkovat suchý NaOH, přidat popílek a vodní sklo v kapalném skupenství a případně další vodu na konzistenci. Oba technologické postupy jsou zachyceny ve schématech na obr. 1 a obr. 2.

Z dřívějších zjištění bylo jasné, že z hlediska zpracovatelnosti je výhodnější nejprve navlhčit kamenivo, ke kterému se následně přidá popílek a alkalické aktivátory, které jsou v kapalném skupenství. Celá směs je neustále míchána. Zůstávala nezodpovězená otázka, zda doba aktivace, po kterou je popílek míchán s alkalickými aktivátory, je dostatečná (v tomto případě 4-10 min.). Pokud se postupuje podle schématu z obr. 2, je nejprve aktivován popílek s alkalickými aktivátory po různě dlouhou dobu (více než 10 min.) a následně přidáno suché plnivo. To ovšem nasákne značnou část vlhkosti a směs se stává okamžitě těžko zpracovatelnou. Následné přidání vody sice zlepší zpracovatelnost směsi, ale množství přidávané vody musí

být větší, než když je plnivo předem navlhčené. Větší množství přidávané vody má zase negativní vliv na zvýšení vodního součinitele a tím snížení koncentrace roztoků alkalických aktivátorů.



Obr. 1 – Schéma přípravy POPbetonu s předem aktivovaným popílkem



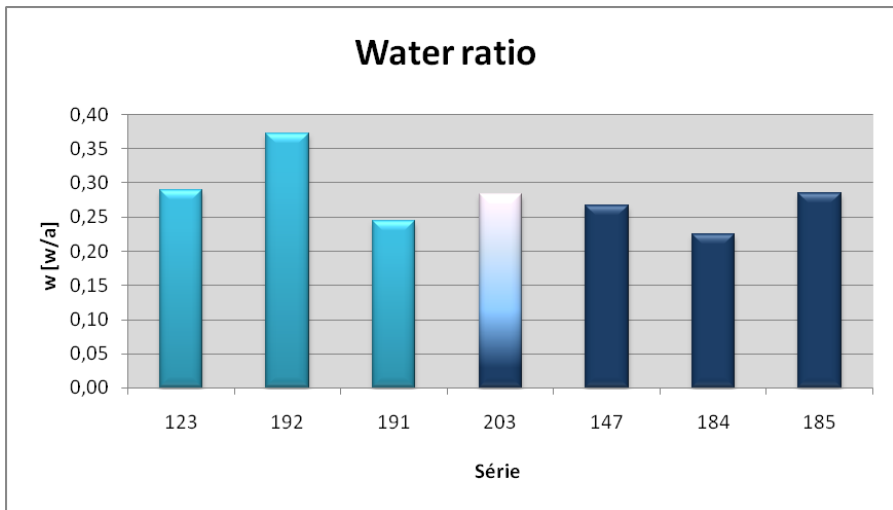
Obr. 2 – Schéma přípravy POPbetonu s předem navlhčeným kamenivem

Z těchto důvodů bylo vytvořeno několik sérií oběma technologickými postupy s různým množstvím vody ve směsi. V kontrolní sérii S 203 byly za podmínky dodržení stejného množství vody oběma technologickými postupy vytvořeny zkušební tělesa. Přičemž se potvrdila výrazně horší zpracovatelnost při dodržení postupu podle schématu na obr. 1. (S 203 A, zpracovatelnost VeBe 20). A naopak velice dobrá zpracovatelnost směsi 203 B (podle schématu na obr.2), VeBe 8.

**Tab.1 – způsob zpracování sérií**

123	192	191	203 B
předvlhčené kamenivo (podle obr. 2)			
203 A	147	184	185
nejprve aktivovaný popílek (podle obr. 1)			

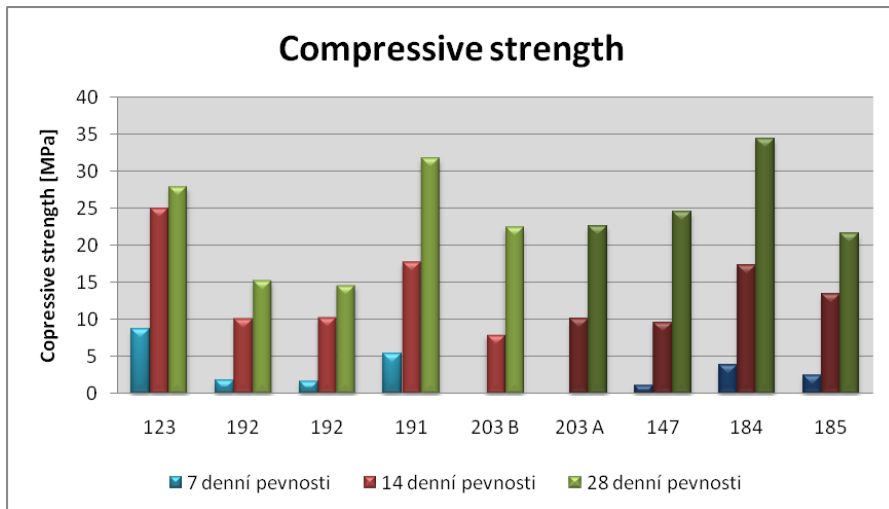
V sérii S 192 byl zvýšen vodní součinitel a vyzkoušeno zpracování vibrací a pracování litím do forem.



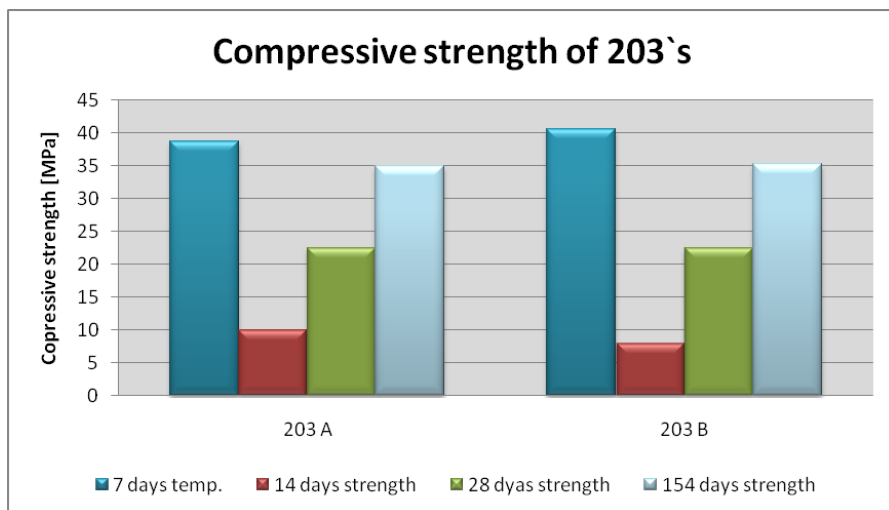
**Obr.3 – množství vody v sériích**

Byla zhotovena zkušební tělesa o rozměrech 100/100/100 mm, na kterých byla sledována pevnost a objemová hmotnost v čase. Tělesa byla zpracována vibrací po různě dlouhou dobu a ponechána 7 dní k tvrdnutí ve formách. Poté byla odformována a zkoušena. Jako pojivo byl vybrán úletový popílek z teplárny Opatovice (hnědé uhlí). Z obrázků 3 a 4 je vidět, že při dodržení obdobného množství vody ve směsi, jsou dosažené výsledky

obdobné. Přičemž série s předem navlhčeným kamenivem jsou lépe zpracovatelné.



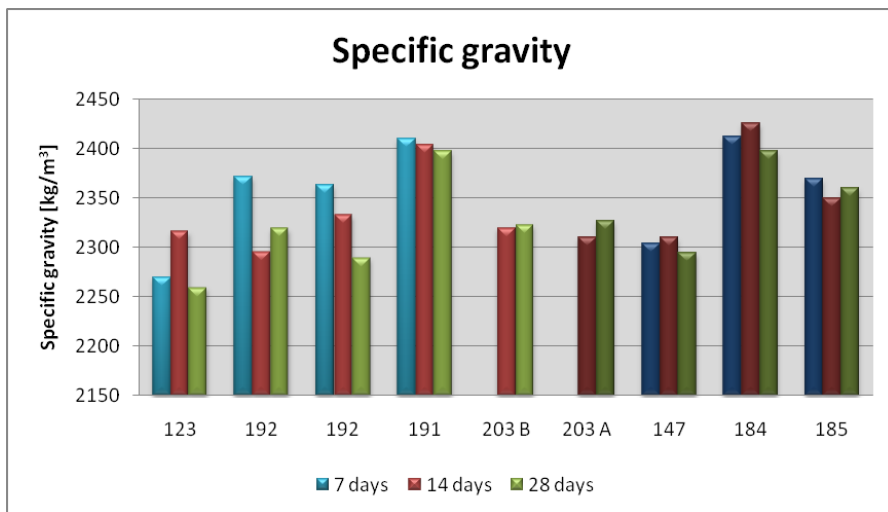
Obr.4 – pevnosti v tlaku jednotlivých sérií



Obr.5 – pevnosti v tlaku S 203

Srovnatelnými hodnotami pevností se ukazuje, že i krátké zamíchání aktivátorů s popílkiem stačí pro jeho aktivaci. Podobné objemové hmotnosti

zase ukazují na to, že i výrazně hůře zpracovatelné směsi s nejprve aktivovaným popílkem, se dají řádně zpracovat za podmínky prodloužené doby vibrace.



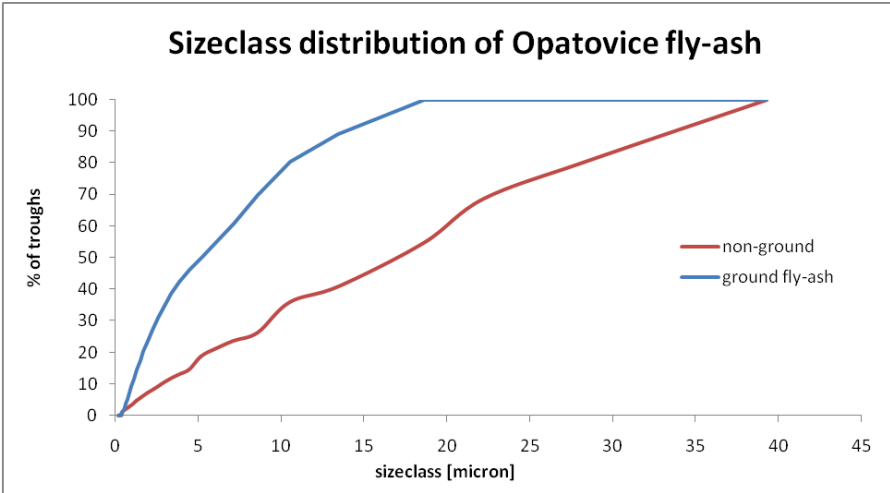
Obr.6 – objemové hmotnosti

### 3. Úprava popílku

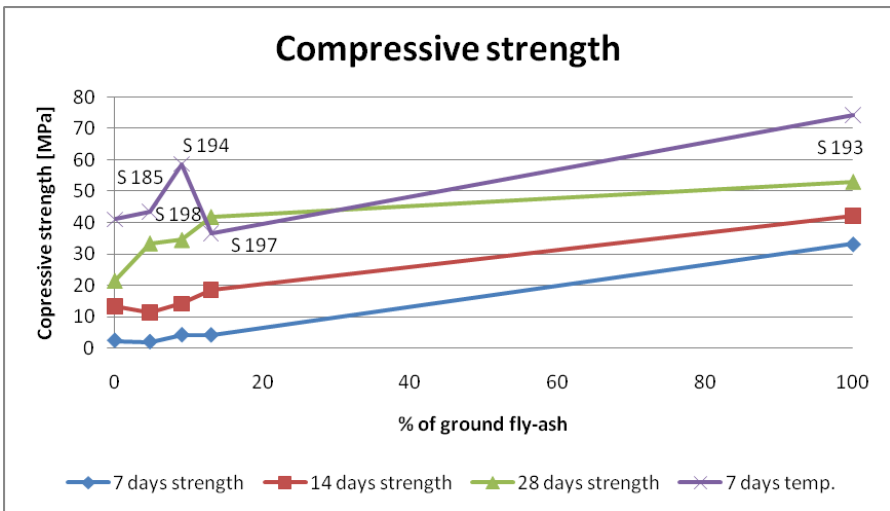
Hlavní nevýhodou betonu s aktivovaným popílkem jako pojivem je dlouhý náběh pevností v důsledku rychlosti reakce, při které je popílek aktivován. Proto bylo hlavní prioritou programu vytvořit směs s co nejrychlejším průběhem aktivace.

Z dřívějších poznatků bylo jasné, že popílek je tvořen jakýmsi dutými sférami, které podobné složení jako sklo. Rozlámání struktury těchto sfér a zmenšení jednotlivých částecek popílku by mohlo mít pozitivní vliv na průběh aktivace. Vrchní skořápka popílku by byla narušena a vnitřní část sfér by tak byla snáze aktivovatelná.

Úletový popílek z Opatovické teplárny byl umlet na kulovém mlýnu typu Los Angeles. Velikost středního zrna umletého popílku  $d_{50}=5,17$  mikronů. Střední velikost zrna nemletého popílku je  $d_{50}=42,0$  mikronů. Rozdělení velikosti částic je patrné z obr. 7. Pro dané mlecí zařízení byla dosažena maximální jemnost mletí daného materiálu.



Obr.7 – rozdělení velikosti částic popílku Opatovice



Obr.8 – rozdělení velikosti částic popílku Opatovice

Byly vytvořeny čtyři ověřovací série, kde byl dávkován popílek v různém množství. Množství mletého popílku v sériích bylo 5%, 9%, 13% a 100%. Všechny série byly připraveny podle schématu na obr. 2. Byla vytvořena zkušební tělesa o rozměrech 100/100/100 mm na kterých byly provedeny zkoušky pevnosti v tlaku. Výsledky jsou patrné z obr. 8.

Z uvedených grafů vyplývá, že mletý popílek je jednoznačně více reaktivní. Dochází k značnému nárůstu pevností betonové směsi. A to nejen v prvních dnech reakce.

Naopak jako příměs k nemletému popílku je potřeba dávkovat min 30-40% procent popílku takto umletého, tak aby po 7 dnech byla dosažena dostatečná manipulační pevnost kolem 10 MPa.

Mletí se ukázalo jako velmi účinný způsob přípravy, nicméně finanční náročnost celého procesu je taková, že tento způsob přípravy značně omezuje.

#### 4. Příměsi

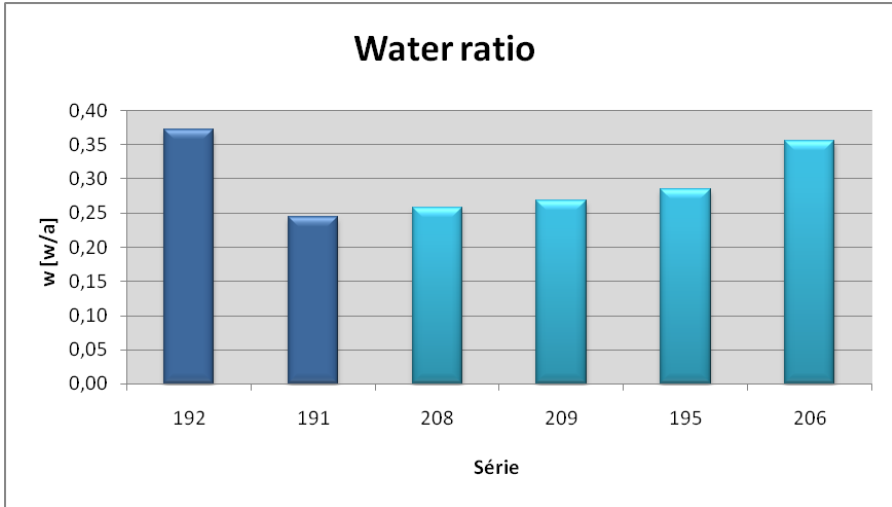
Jako další možnost urychlení celé aktivační reakce je možnost přidání některých příměsí. Jako vhodné příměsi se jeví zejména příměsi s vyšším obsahem CaO, jako jsou např. vysokopecní struska, různé druhy jíílů a hlín, popílek z fluidního spalování, vápno či cement. Byla tedy připravena zkušební tělesa, kde bylo použito nehašené vápno CL 90-G. V různém množství. Zkušební tělesa byla krychle o rozměrech 100/100/100 mm a byla připravena podle schématu na obr. 2. Množství vápna jako příměsi je uvedeno v tab. 2.

**Tab.2 – množství CaO jako příměsi**

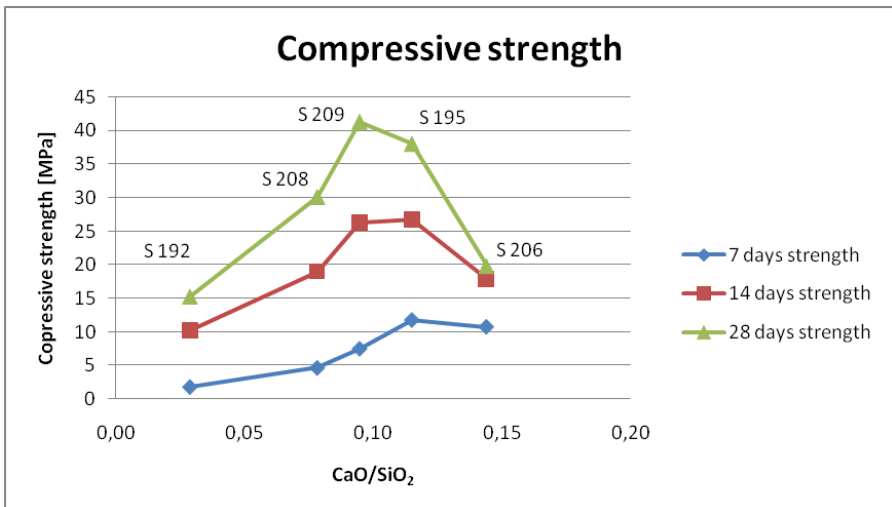
	192	191	208	209	195	206
vápno CL 90-G	0%	0%	3%	4%	5%	7%

Množství CaO ve směsi odpovídá také zvyšující se potřeba záměsové vody. Množství záměsové vody je shrnuto na obr. 9. Tomuto byly uzpůsobeny dvě srovnávací série (S 191 a S 192), které měly uzpůsobené množství vody sériím s příměsí nehašeného vápna. Přesto se vyšší obsah vápna negativně projevil na zpracovatelnosti sérií S 195 a S 206. Směs byla po přidání vody v průběhu míchání lehce pohyblivá a zpracovatelná, ale během několika minut ztuhla a stala se nezpracovatelnou. Špatná zpracovatelnost způsobila horší výsledky sérií s vyšším obsahem nehašeného vápna. To je pravděpodobně důvodem pro špatné pevnosti těchto sérií.



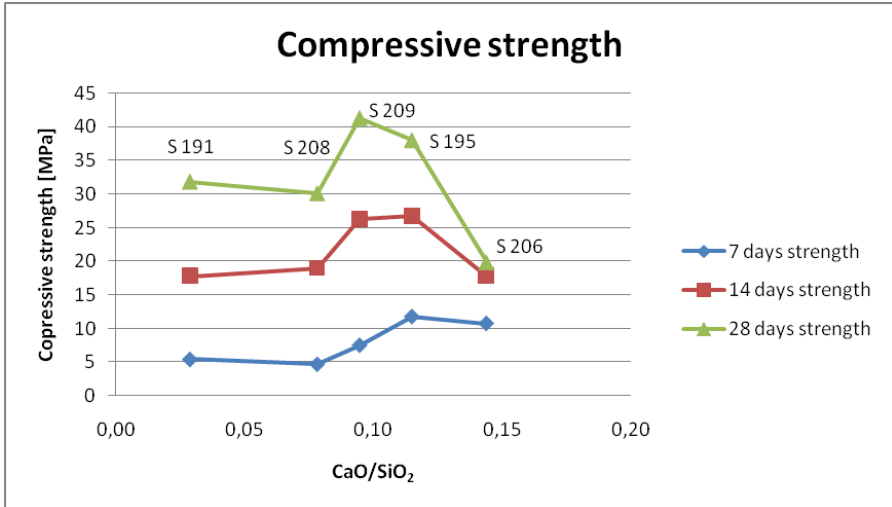


Obr.9 – vodní součinitel pro série s příměsí CaO



Obr.10 – pevnosti v tlaku v závislosti na množství CaO

Snížení množství záměsové vody v sériích bez CaO, při zachování stejné zpracovatelnosti, naopak ukazuje, že je možné dosáhnout srovnatelných pevností. Optimálním množstvím nehašeného vápna při požadavku na zpracovatelnost vibrací tak vychází na 4-5% z množství popílku.



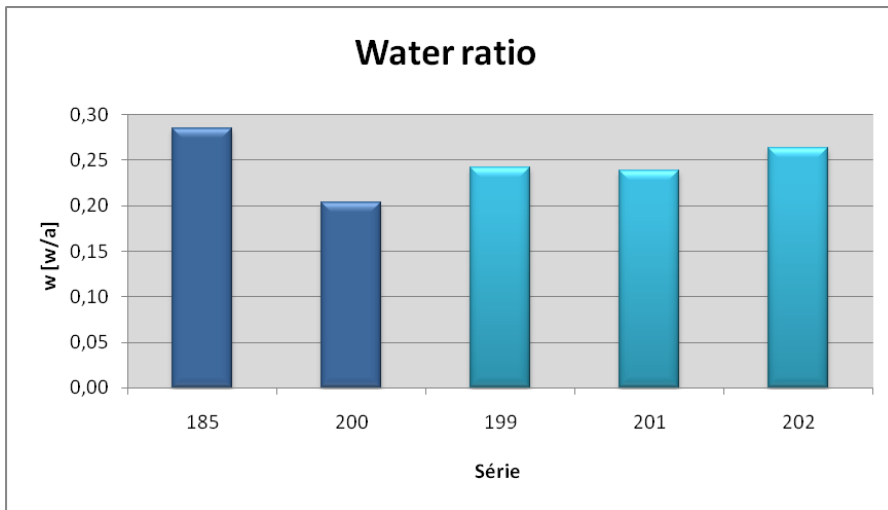
**Obr.11 – pevnosti v tlaku v závislosti na množství CaO**

V důsledku těchto problémů byl vliv CaO dále ověřován s jinými příměsí, a sice s vysokopecní mletou struskou a vápenným hydrátem. Množství příměsí na množství popílku uvádí tab. 3.

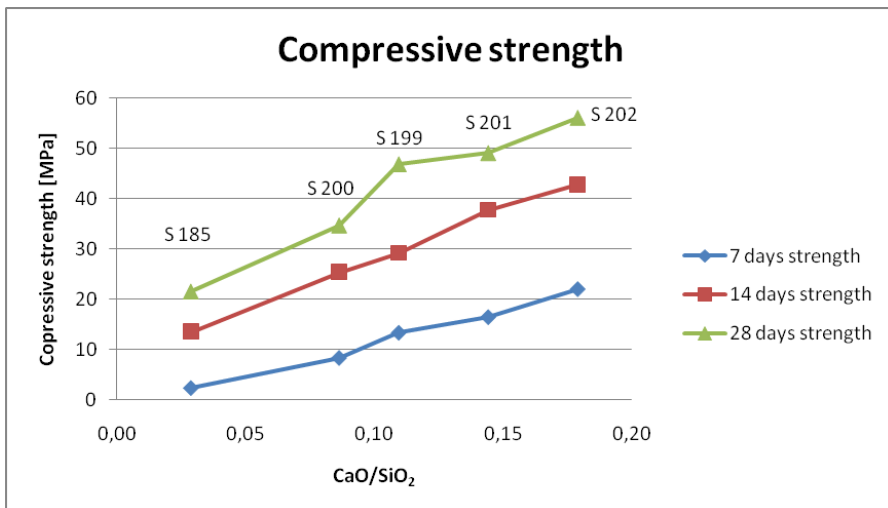
**Tab.3 – množství příměsí s CaO**

	185	200	199	201	202
mletá struska	0%	10%	10%	10%	10%
vápno CL 90-G	0%	0%	2%	5%	8%

Množství strusky bylo vždy 10% na množství popílku. Množství vápenného hydrátu bylo možné zvyšovat až na 8% z množství popílku. Neprojevíly se žádné výrazné změny ani problémy při zpracování směsi. Množství vody ve směsích je na obr. 12.



Obr.12 – vodní součinitel pro série s vápenným hydrátem



Obr.13 – pevnosti v tlaku pro série s vápenným hydrátem

Použití mleté vysokopeční strusky a vápenného hydrátu se ukázalo jako vhodná kombinace pro dosažení optimálních pevnostních charakteristik. Vyhašené vápno nevyžaduje významné požadavky na množství záměsové vody a zároveň umožňuje dobrou zpracovatelnost až do množství 8% Ca(OH)<sub>2</sub> na množství popílku.

## 5. Závěr

Na základě dosažených výsledků lze konstatovat, že vlastnosti POPbetonu jako reálné směsi, kde je jako pojivo využit alkalicky aktivovaný úletový popílek, lze snadno upravovat jak vhodnými technologickými postupy při přípravě směsi, tak úpravou vlastností samotného popílku, která spočívá v jeho mletí. K dosažení požadovaných vlastností lze také s výhodou využívat některé příměsi. Technologicky méně náročná je příprava s příměsí páleného vápna, jeho použití je však omezeno na menší množství, kvůli zpracovatelnosti směsi. Naopak příměs vápenného hydrátu se jeví jako vhodná i při vyšších dávkách. Vyžaduje však předpřípravu vápenného hydrátu, která by znesnadňovala využití této směsi v průmyslové výrobě.

## Poděkování

Tento příspěvek vznikl v rámci grantu GAČR 103/08/1639 „Mikrostruktura anorganických alumosilikátových polymerů“.

Na řešení tohoto úkolu v dalších fázích spolupracují:

František Škvára, Lenka Myšková, Lucie Alberovská, VŠCHT v Praze, Ústav skla a keramiky. Josef Doležal, Tomáš Strnad, Jaroslav Jeništa, Pavel Houser, ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra technologie staveb. Zdeněk Bittnar, Vít Šmilauer, Jiří Němeček, Lubomír Kopecký, Tomáš Koudelka, ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra mechaniky. Miroslav Vokáč, ČVUT Praha Kloknerův ústav.