

VÝROBA POPBETONU® - ROZDÍLY MEZI PŘÍPRAVOU POPBETONU® POMOCÍ TEMPEROVÁNÍ A VÝROBOU „ZA STUDENA“

POPBETON® PRODUCTION – DIFFERENCES BETWEEN TEMPERED AND „COLD“ PREPARATION OF POPBETON®

Rostislav Šulc¹, Pavel Svoboda²

Abstract

This paper describes the problem of quantity of fly-ash and water ratio to strength characteristics of POPbeton®. POPbeton® is a special sort of concrete without cement, in which is fly-ash used as a binder. There are two ways how prepare POPbeton®. First, most used way, is activation of fly-ash by heating and second is „cold“ activation of fly-ash. In these days many research teams all around the world activate fly-ash by heating. We used special adulterants to activate fly-ash without heating. This paper shows the influence of quantity of fly-ash, and the influence of water-fly ash ratio to a compressive strength. There are some comparisons with fly-ash which was activated by heating.

1 ÚVOD

Od roku 2003, kdy byla navázána úzká spolupráce mezi Ústavem skla a silikátů VŠCHT a katedrou technologie staveb ČVUT FSv v Praze probíhá výzkum využití úletových popílků z velkých topenišť na základě výzkumu alkalické aktivace, který již několik let probíhal v Ústavu skla a silikátů. Cílem této spolupráce je aplikace získaných výsledků výzkumu do praktického užití ve stavební praxi. V příspěvku jsou předloženy některé výsledky výzkumu POPbetonu připravovaném takzvanou studenou aktivací. Zejména je zaměřen na ověření vlivu množství popílku ve směsi a ověření vlivu vodního součinitele.

1.1 POPbeton®

POPbeton® je nový typ bezcementového betonu, kde je jako pojivu použit výhradně úletový popílek. Jelikož se pod stávajícím vžitým názvem popílkový beton skrývá cementový beton s příměsí popílku jako jemné inertní složky doplňující plnivo, byl tento nový typ betonu nazván právě POPbeton. POPbeton® má ambice stát se novým stavebním materiálem využívajícím některé další odpadní materiály jako je například struska, metakaolin, drobný skleněný opad nebo jako materiál sloužící k solidifikaci některých nebezpečných odpadních materiálů. Výzkum alkalicky aktivovaných popílků probíhá od roku 2003, kdy byla navázána úzká spolupráce mezi Ústavem skla a silikátů VŠCHT a katedrou technologie staveb ČVUT FSv v Praze. Program využití úletových popílků z velkých topenišť navazuje na program Ústavu skla a silikátů, který se zabývá již mnoho let výzkumem geopolymerní reakce. Cílem této spolupráce je aplikace získaných výsledků výzkumu do praktického užití ve stavební praxi. Celý program je zaměřen zejména na využití hnědouhelných popílků, kterých je v naší republice produkováno mnohonásobně více než popílků černouhelných. Jak prokázaly zkoušky, aktivovaný hnědouhelný popílek je méně reaktivní a výsledná směs má horší vlastnosti než směs, kde je použit výhradně černouhelný popílek. Proběhlé ověřovací zkoušky na černouhelných popílcích prokázaly vyšší reaktivitu popílku a tím i lepší výsledné vlastnosti POPbetonu, které byly srovnatelné nebo lepší než výsledky dosažené v zahraničí [1]. Vzhledem k množství produkováných typů popílků v Čechách však zůstává prioritou pro POPbeton® popílek hnědouhelný, případně směs obou popílků, která bude složením odpovídat poměru produkce obou druhů popílků.

¹ Rostislav Šulc, Ing., ČVUT v Praze, Fakulta stavební, K122 - Katedra technologie staveb, Thákurova 7, Praha 6 - Dejvice, PSČ: 166 29, rostislav.sulc@fsv.cvut.cz

² Pavel Svoboda, Doc. Ing., CSc., ČVUT v Praze, Fakulta stavební, K122 - Katedra technologie staveb, Thákurova 7, Praha 6 - Dejvice, PSČ: 166 29, pavel.svoboda@fsv.cvut.cz

Hlavní výhodou tohoto materiálu je tedy snižování ekologické zátěže životního prostředí tím, že dochází k využívání odpadních materiálů. S tím souvisí i příznivá cena vstupních materiálů, která je výhodnější než u tradičních betonových pojiv. Nevýhodou zůstává nutnost temperování popílku spolu s alkalickými aktivátory, tak aby došlo k samotné aktivaci popílku. Proto byl výzkum po ověření základních vlastností POPbetonu aktivovaného temperováním zaměřen na možnost aktivace popílku bez nutnosti následného temperování.

2 VLIV MNOŽSTVÍ POPÍLKU VE SMĚSINA PEVNOSTI

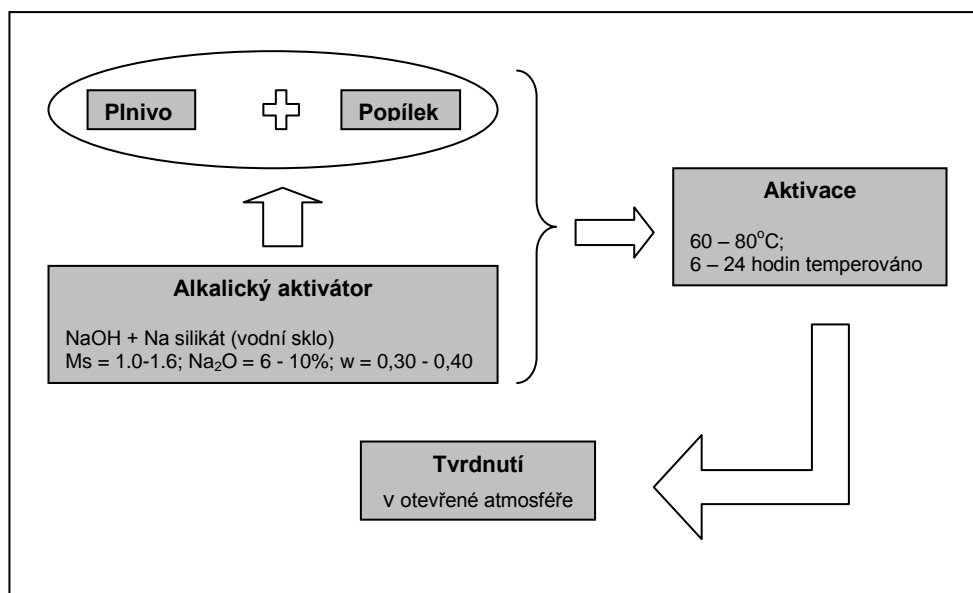
2.2 POPÍLEK AKTIVOVANÝ TEPLEM

V první fázi výzkumu bylo nutné ověřit použití alkalicky aktivovaného popílku jako pojiva v betonové směsi. Dále bylo nutné ověřit rozhodující faktory pro složení optimální směsi v tomto pořadí.

- Vyhledat optimální množství samotného popílku v betonové směsi.
- V souvislosti s množstvím popílku bylo potřeba vyhledat optimální složení křivky zrnitosti pro použité kamenivo.
- Dále musel být stanoven správný poměr alkalických aktivátorů v betonové směsi.
- Nalézt správné množství alkalických aktivátorů na množství popílkového pojiva v betonové směsi.

Další a možná vůbec nejdůležitější částí bylo sestavení technologického postupu míchání POPbetonu. Bylo nutné se soustředit zejména na omezení vlivu volné vody ve směsi, neboť jak se ukázalo vysoký vodní součinitel výrazně zhoršoval výsledné vlastnosti směsi. Nakonec byl postup míchání upraven tak, jak ukazuje schéma na obrázku 1.

Obr. 1 – Schéma míchání POPbetonu



Podle tohoto schématu bylo při temperované variantě dosaženo nejlepších hodnot pevností na zkušebních tělesech, což byly kostky 100x100x100 mm, které byly zkoušeny destruktivní tlakovou zkouškou.

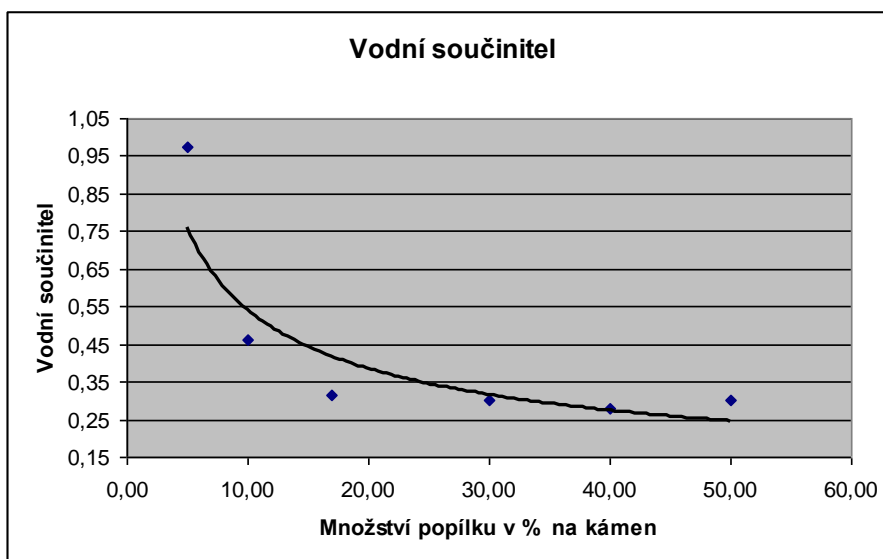
Z důvodů zachování stejných výchozích podmínek byly používány stále stejné vstupní suroviny (typ popílku – stejná lokalita, kamenivo – stejná lokalita, vodní sklo a hydroxid sodný od stejného výrobce a se stejnou koncentrací). Pro srovnávací série bylo tedy složení směsi následující:

- Kamenivo plavené 0-4 mm
- Kamenivo drcené 4-8 mm
- Kamenivo drcené 8-16 mm
- Hnědouhelný popílek
- Voda
- Vodní sklo (Na silikát)
- Hydroxid sodný (Na(OH))

V důsledku konzistence obou alkalických aktivátorů (vodní sklo i Na(OH) v roztoku) bylo též nutné dbát na dodržení příslušného vodního součinitele. Rozhodujícím faktem pro množství přidávané vody do směsi se tak stala zpracovatelnost. Směs byla v líci konzistenci a všechny vzorky stačilo vibrovat maximálně dvě minuty. Poměr alkalických aktivátorů k sobě navzájem byl u všech sérií stejný. Množství alkalických aktivátorů bylo zvyšováno úměrně k množství popílku tak, aby poměr aktivátorů k množství popílku zůstal stejný.

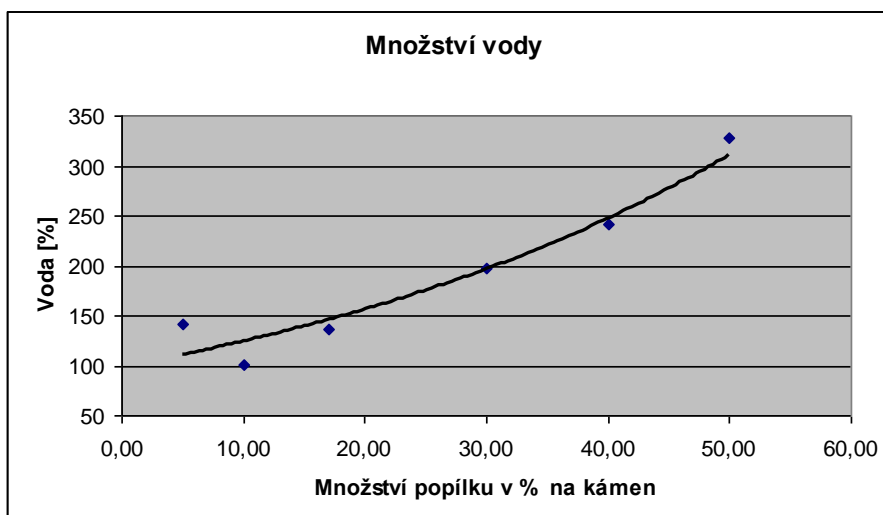
Po navržení složení kameniva jednotlivých frakcí - určení optimální křivky zrnitosti podle výpočtu dle Kennedy-Bolomeye [2] byl popílek zkoušen v různých dávkách vztažených poměrově na celkové množství kameniva v kompozici. Pro vyhledání trendu optimálního množství popílku byly zvoleny dávky 5%, 10%, 17%, 30%, 40% a 50%. Zhotovená tělesa byla zkoušena po 7, 14 a 28 dnech. Následující graf tedy ukazuje dosažené minimální vodní součinitele pro jednotlivé série, při kterých byla zachována stejná zpracovatelnost směsi.

Graf. 1 – Vodní součinitel pro různá množství popílku



Graf jasně ukazuje, že při malém množství popílku, klesajícím pod 10% se neúměrně zvyšuje množství vody. Pro dosažení dostatečné zpracovatelnosti bylo nutné přidávat velké množství vody. Naopak při množství 50% popílku na kamenivo se zvýšil obsah vody v důsledku množství vody obsažené v alkalických aktivátorech, které jsou byly oba dodávány ve formě roztoku.

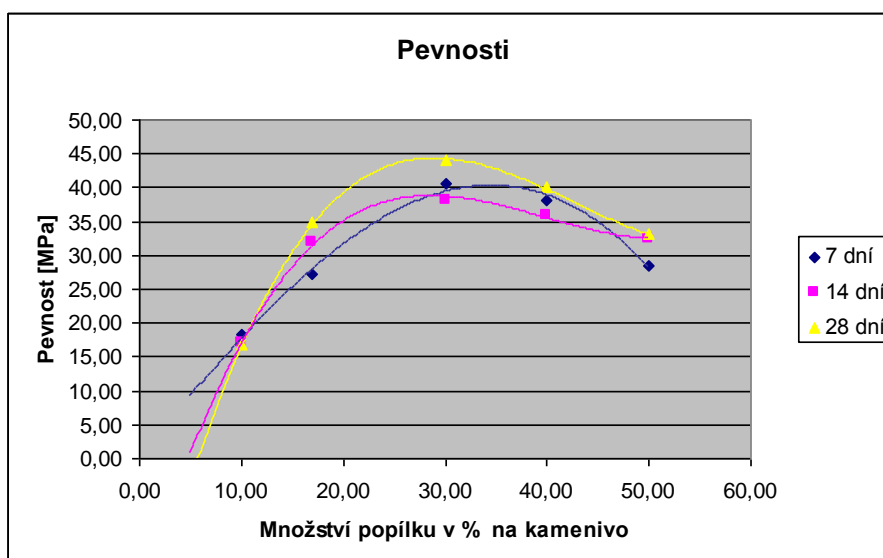
Graf. 2 – Celková voda v kompozici



Další graf dokladuje absolutní poměrné množství vody ve směsi. Za hodnotu 100% byla vzata nižší absolutní množství vody v kompozici. Z grafu je opět velmi dobře vidět zachovaný trend množství vody v kompozici. Vystupuje zde opět série s 5% popílku a série s 50 % popílku.

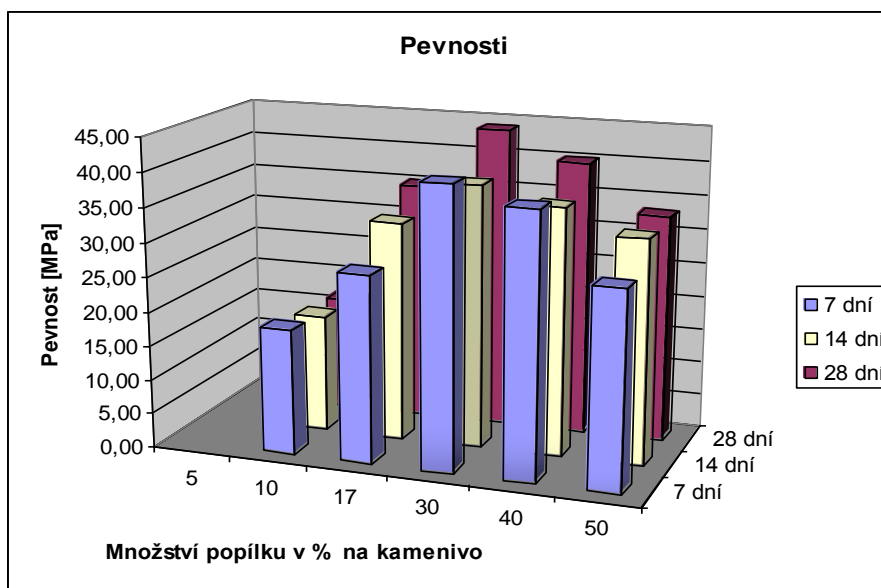
Výsledná tělesa byla zkoušena po 7, 14 a 28 dnech na pevnost v tlaku. Rozhodující grafy jsou uvedeny v následujícím obrázku.

Graf. 3 – Pevnosti v závislosti na množství popílku



Kromě série s 5% popílku na kamenivo bylo možné všechny série po odformování bez problému podrobit tlakové zkoušce. Série s 5% popílku se po odformování lehce rozpadla v důsledku nedostatku pojiva. Z výsledků vynesných v grafu je patrné, že optimální množství popílku vzhledem k kamenivu je někde kolem 30%. Tato ověřovací zkouška v podstatě prokázala správnost výpočtu při návržení množství popílku podle metod obvyklých pro návrh cementových betonů [2].

Graf. 4 – Pevnosti v závislosti na množství popílku



Vzhledem k později prokázaným skutečnostem týkajících se vztahu pevností s množstvím vody v kompozici lze říci, že bylo dosaženo optimálního složení kompozice z hlediska pevnosti a zpracovatelnosti. Shrnuté výsledky ukazuje graf 4. Tento způsob výroby POPbetonu však není možné uplatnit pro výrobu bez nutnosti aktivace temperováním. POPbeton vyráběný za pomoci temperování má svoje omezení z hlediska použití a výroby. Právě nutnost dodávání tepla předurčuje tento materiál k výrobě prefabrikátů a spíše menších výrobků typu zámkové dlažby atd. Bylo tedy nutné hledat cestu, jak nastartovat alkalickou aktivaci bez nutnosti dodání energie ve formě tepla.

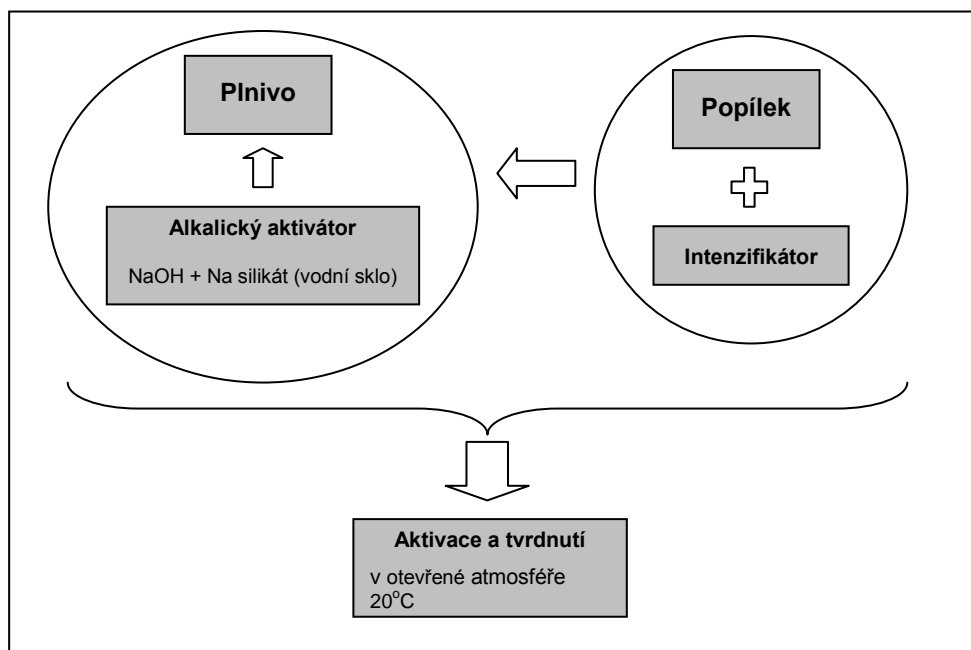
2.2 POPÍLEK AKTIVOVANÝ „ZA STUDENA“

Základním úkolem bylo nalézt takový způsob přípravy POPbetonu, aby bylo možné vynechat proces aktivace temperováním. Odpadl by tak nejvíce limitující faktor možného budoucího využití této nové stavební hmoty. Nakonec se povedlo najít vhodnou látku, která ve formě příměsi byla schopná nastartovat alkalickou aktivaci za běžných laboratorních podmínek. Tyto látky byly souhrnně označeny jako intenzifikátory. Kvůli zvýšenému počtu látek vstupujících do reakce bylo opět potřeba pozměnit následující.

- Nalézt správné množství intenzifikátoru ve vztahu k popílku a ve vztahu k množství alkalických aktivátorů.
- Upravit množství alkalických aktivátorů na množství popílkového pojiva v betonové směsi.
- Vyhledat optimální množství samotného popílku v betonové směsi.
- Upravit zavedený postup míchání směsi vzhledem k nutnosti dodání intenzifikátoru.

Upravený postup míchání je schématicky naznačen na obrázku 2.

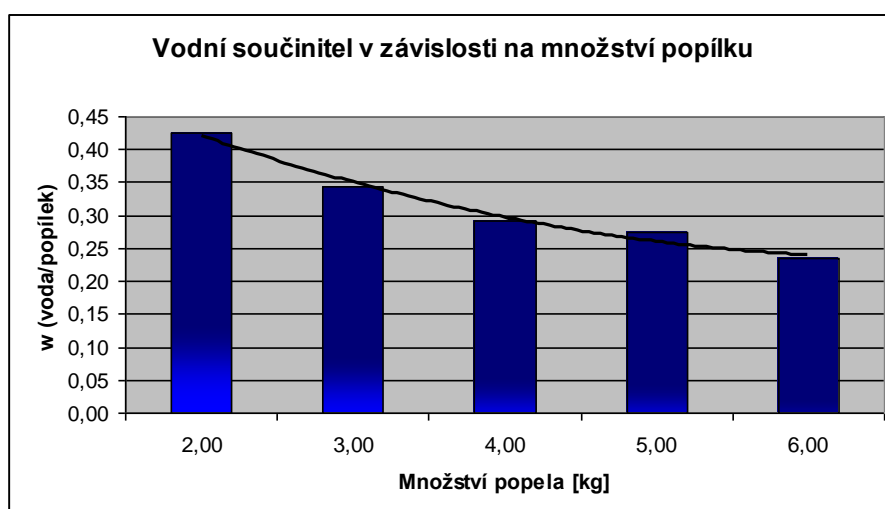
Obr. 2 – Schéma míchání POPbetonu ve „studené“ variantě



Postup míchání musel být změněn též z důvodu zachování co nejnižšího vodního součinitele, který se ukázal pro dosažení výsledných pevností jako klíčový. Pro vyhledání optimálního množství popílku pro aktivaci za studena bylo vyrobeno pět ověřovacích sérií s různým množstvím popílku na 1 m^3 směsi. Tentokrát byly již zkoušky omezeny a soustředily se na kratší úsek množství pojiva ve směsi (zhruba 11,5% až 35% popílku na množství kameniva). Vycházelo se z osvědčené a vypočítané hodnoty pro temperovanou verzi a to 400 kg popílku na 1 m^3 směsi. Tuto hodnotu později potvrdily i zahraniční studie [1]. Dále byly zhotoveny série s množstvím 200, 300, 500 a 600 kg na m^3 směsi. Celkové množství směsi bylo redukováno na 10 litrů. Voda dodávaná do směsi byla přidávána jako volná na zvlhčení kameniva, dále v roztoku s alkalickými aktivátory a případně další v průběhu míchání, tak aby byla zaručena zpracovatelnost výsledné směsi. Poměr alkalických aktivátorů k sobě navzájem byl u všech sérií stejný. Množství alkalických aktivátorů bylo zvyšováno úměrně k množství popílku tak, aby poměr aktivátorů k množství popílku zůstal stejný. Množství intenzifikátoru se též zvyšovalo úměrně k množství aktivátorů. Zaměřili jsme se především na dosažení jisté manipulační pevnosti po 7 dnech a dále na pevnosti po 28 dnech, které jsou rozhodující u cementového betonu. Průběžně jsou sledovány i dlouhodobé pevnosti.

Následující graf ukazuje minimální (z hlediska zpracovatelnosti) dosažené vodní součinitele pro různá množství popílku.

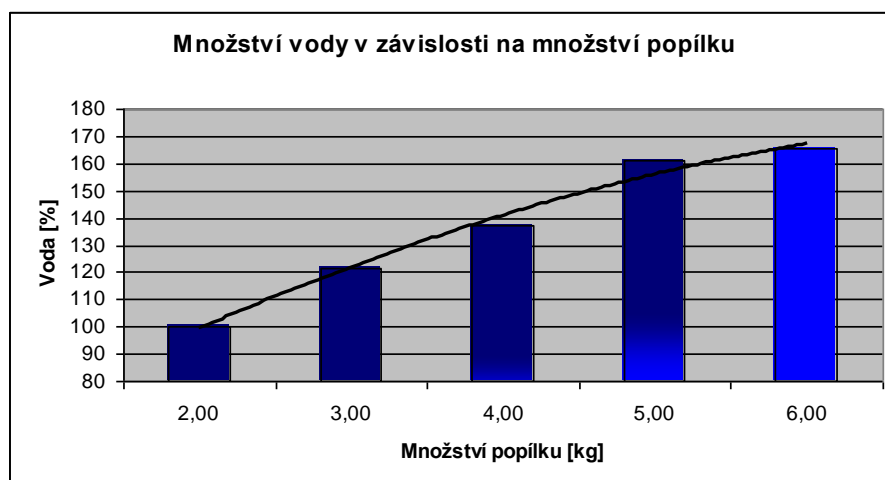
Graf. 5 – Vodní součinitel



Vzhledem k tomu, že v POPbetonu zajišťuje voda pouze transport alkalických aktivátorů k zrnům popílku, je její větší množství nežádoucí neboť díky jejímu delšímu odparu nedochází k nárůstu počátečních pevností. Je vidět, že v sérii s 5 kg na 10 litrů směsi nebyl přesně dodržen minimální nutný vodní součinitel v důsledku přílišného zvlhčení kameniva. To znemožnilo měřit toto sérii na tlakovou pevnost po 7 dnech, neboť zkušební tělesa byla stále ještě značně plastická. Opět byla zhotovena tělesa 100x100x100 mm a byla zkoušena v tlakové zkušence.

V dalším grafu je opět zachyceno poměrné množství vody ve směsi. Za hodnotu 100% byla opět vzata hodnota nejnižšího absolutního množství vody v kompozici.

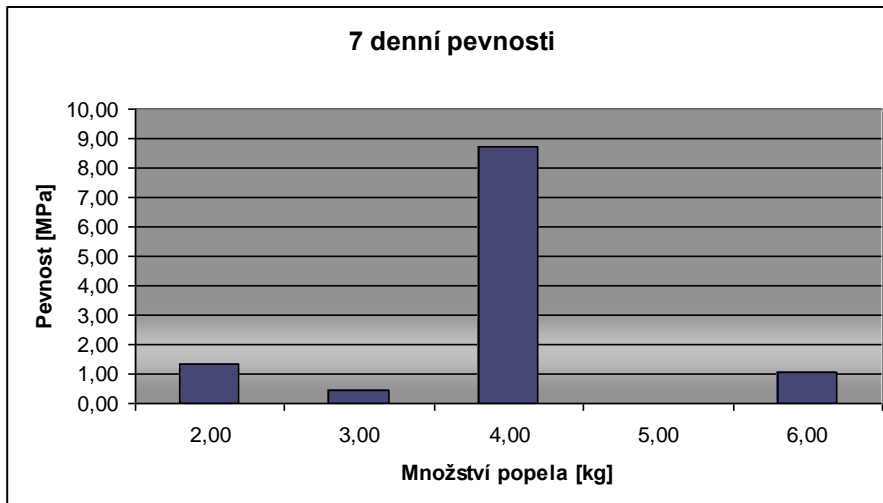
Graf. 6 – Množství vody



Opět se ukazuje mírné překročení množství vody u série s 500 kg popílku na m³ směsi.

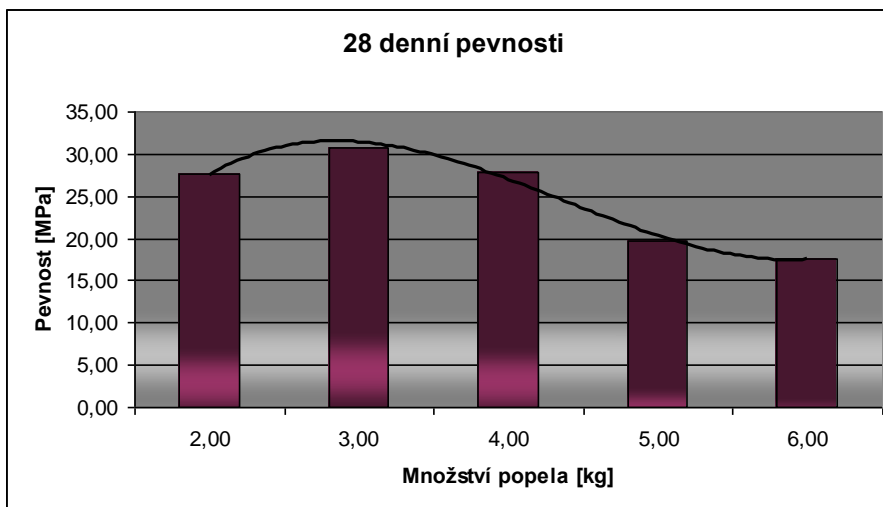
Manipulační tlakové pevnosti měřené na tělesech 100x100x100 mm při stáří 7 dní jsou v grafu 7.

Graf. 7 – Pevnosti po 7 dnech



Zřetelně se ukázalo, že jedinou vyhovující variantou je použití 400 kg popílku na m^3 směsi. Je třeba poznamenat, že u sérií s 2 a 3 kg popílku musela být dodávána další voda tak, aby směs byla zpracovatelná. Na druhou stranu u série s 6 kg popílku muselo být sníženo množství vody na zvlhčení kameniva neboť se do směsi dostávalo již příliš vody v podobě roztoku s alkalickými aktivátory. Větší vypovídající hodnotu má tak měření pevností po 28 dnech jak je zaznamenáno v grafu 8.

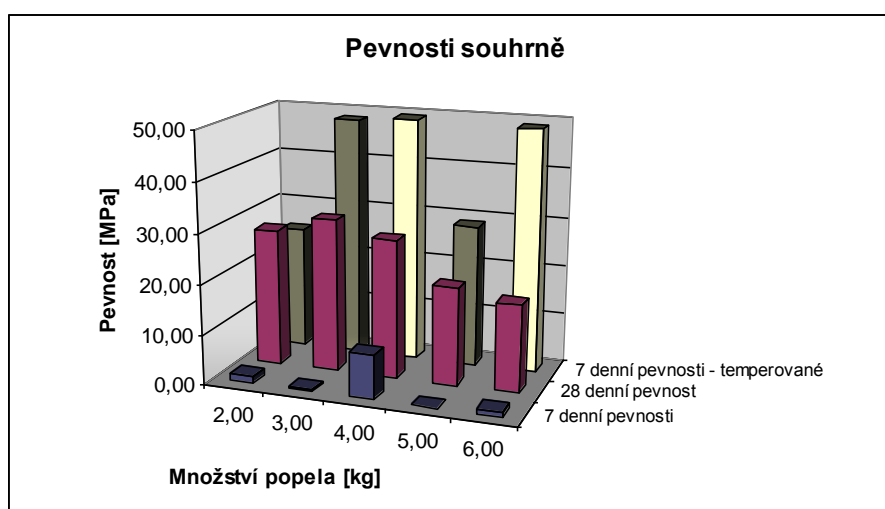
Graf. 8 – Pevnosti po 28 dnech



Ukazuje se, že optimální množství popílku bude ležet někde v okolí 300 až 400 kg popílku na $1 m^3$ směsi. Z hlediska sledování dlouhodobých pevností se ukazuje, že i po uplynutí 28 dnů dochází k dalšímu výraznému přírůstku pevnosti, kde se celková pevnost blíží pevnosti POPbetonu připravovaném temperováním. Pro porovnání byla zhotovena i tělesa aktivovaná temperováním. Porovnání ukazuje graf 9.

Je vidět, že množství popílku ve směsi se více projevuje na studené přípravě než na přípravě temperováním. Dále je dobře viditelný trend pozvolnějšího nabývání pevností u POPbetonu aktivovaném „za studena“. Z dlouhodobého hlediska se však pevnosti na obou typech vzorků velmi sblíží (cca. po 90 dnech dosahuje za studena aktivovaný beton asi 90% pevnosti POPbetonu temperovaného).

Graf. 9 – Pevnosti souhrně



Potvrdily se tak předpoklady, které se ukázaly již v temperované verzi. Zároveň se ukázalo, že příprava POPbetonu „za studena“ je v mnoha ohledech náročnější. Zejména v dodržení přesného dávkování vody. Též nárůst pevností je razantnější ale z hlediska konečné pevnosti o mnoho delší.

3 ZÁVĚR

Ověřili jsme tak vliv množství úletového popílku ve směsi POPbetonu. Zároveň se však objevili další otázky, zejména související s velikostí vodního součinitele ve směsi. Voda tak plní na jednu stranu nezastupitelnou funkci jako dopravní medium pro alkalické aktivátory, na druhou stranu její množství výrazně ovlivňuje výsledné vlastnosti POPbetonu a to jak z hlediska pevností, tak i dalších vlastností (smrštění atd.). Bude tedy potřeba ověřit vliv množství vody ve směsi na samotný průběh alkalické aktivace. Dále je nutné sledovat zejména dlouhodobé pevnosti materiálu a průběžně vyhodnocovat a ověřit tak, zda vliv zvýšeného vodního součinitele nebo zda se množství popílku ve směsi projevuje i dlouhodobě, či zda po nějaké době dochází k vyrovnání konečných pevností POPbetonu.

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 Doležal², Kamil Dvořáček³, Martin Lucuk², Lenka Myšková⁴, Simona Pawlasová³, Tomáš Strnad², Jaroslav Jeništa², Gabriela Tlapáková², Pavel Houser² Lubomír Kopecký²

Literatura

- [1] HARDJITO, D.- REGAN, B. V. *Development and Properties of Low-Calcium Fly-Ash Based Geopolymer Concrete.*, Research report GC1, Australia, Perth: Curtin University of Technology, 2005 103 s.
- [2] SVOBOBA, P.- DOLEŽAL, J.- ŠKVÁRA, F.- DVOŘÁČEK, K.- LUCUK, M.- ŽAMBERSKÝ, M. *Popílkový beton*, IX. Konference – Ekologie a nové stavební hmoty a výrobky, Telč: VUSTAH, 2006 78 s.

³ České vysoké učení technické, fakulta stavební, katedra technologie staveb, Thákurova 7, 199 29 Praha 6, Česká republika kontakt pavel.svoboda@fsv.cvut.cz

⁴ Vysoká škola chemicko technologická, ústav skla a keramiky, Technická 5, 166 28 Praha 6, Česká republika kontakt , Frantisek.Skvara@vscht.cz