

Přísady a příměsi v POPbetonu[®]

Rostislav Šulc¹, Pavel Svoboda²

Abstrakt

POPbeton jako nový typ bezcementového betonu využívá jako pojivo alkalicky aktivovaný úletový popílek z našich hnědouhelných a černouhelných elektráren. V silně alkalickém prostředí tento popílek vytváří kompaktní hmotu, kterou lze s úspěchem použít jako pojivo v betonu. Vzhledem k této technologii lze předpokládat odlišný vliv klasických přísad a příměsí do betonu.

Při výrobě POPbetonu bylo potřeba ověřit vliv základních příměsí vhodných do klasických cementových betonů. Dále bylo též potřeba ověřit vliv dalších odpadních materiálů (jako je struska, vápenec, popílek z fluidního spalování či metakaolin, další hnědo a černo uhelné popílků), které je mohou v kompozici POPbetonu fungovat jako aktivní složky. Zároveň bylo nutné ověřit vliv tradičních přísad do cementového betonu, zejména vliv plastifikátorů a provzdušňovadel.

Úvod

V roce 2003 byla navázána úzká spolupráce mezi Ústavem skla a silikátů VŠCHT a katedrou technologie staveb ČVUT FAST v Praze. Jednalo se o výzkum využití úletových popílků z velkých topenišť na základě geopolymerní reakce, který již několik let probíhal v Ústavu skla a silikátů. Cílem této spolupráce je aplikace získaných výsledků výzkumu do praktického užití ve stavební praxi. Pod stávajícím vžitým názvem popílkový beton se skrývá cementový beton s příměsí popílku jako jemné inertní složky doplňující plnivo.

Pracovníci obou fakult se zabývají aktivováním samotného popílku pomocí alkalické aktivace (geopolymerní reakce) jako samostatného pojiva, které ve spojení se složeným kamenivem tvoří po ztvrdnutí stavební hmotu, která s ohledem na popílkové pojivo byla nazvána POPbeton.

V průběhu řady zkoušek se ukázalo, že geopolymerní reakcí aktivovaný popílek je schopen vytvořit ve směsi přírodního, případně i umělého kameniva tedy vesměs inertního plniva s absencí hydratujících složek pojivo s dokonalou přilnavostí, jakou vykazuje běžně známý portlandský cement. Pro tento účel byl v první fázi celý program výzkumu zaměřen zejména na plnivo kterým bylo přírodní těžené i drcené kamenivo podobného složení, jaké se používá při výrobě cementového betonu.

Rovněž byla pro srovnání využita řada aktivních příměsí až do 20% z hmotnosti popílku, jako je mletý vápenec, mletá struska, portlandský cement, metakaolin, mikrosilika a pod.

Současně byly zkoušeny vlivy provzdušňovadel a zejména plastifikátorů běžných betonových směsí, za účelem lepší zpracovatelnosti POPbetonové směsi.

Uskutečněné zkoušky příměsí prokázaly ve všech případech určitý pozitivní vliv na chování čerstvého i tvrdého POPbetonu, při čemž postup výroby POPbetonu až do fáze zpracování je téměř identický s výrobou cementového betonu.

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

²SVOBODA Pavel, Doc. Ing., CSc., ČVUT v Praze, Fakulta stavební, K122 – Katedra technologie staveb, Thákurova 7, 166 29 Praha 6 – Dejvice, svobodap@fsv.cvut.cz

1.1 Přísady a příměsi v POPbetonu

Vliv různých přísad a příměsí byl ověřován jak na POPbetonu tak pouze na popílkových maltách. Úkolem bylo využít některé odpadní materiály jako je mletý úletový popílek, popílek z fluidního spalování, struska, mletý vápenec, metakaolin, sprašová hlína, a další přísady jako mikrosilika a cement. Cílem těchto zkoušek bylo ověřit vlastnosti popílkového pojiva vzhledem k ostatním materiálům, tak i ověřit možnost alkalické aktivace těchto materiálů.

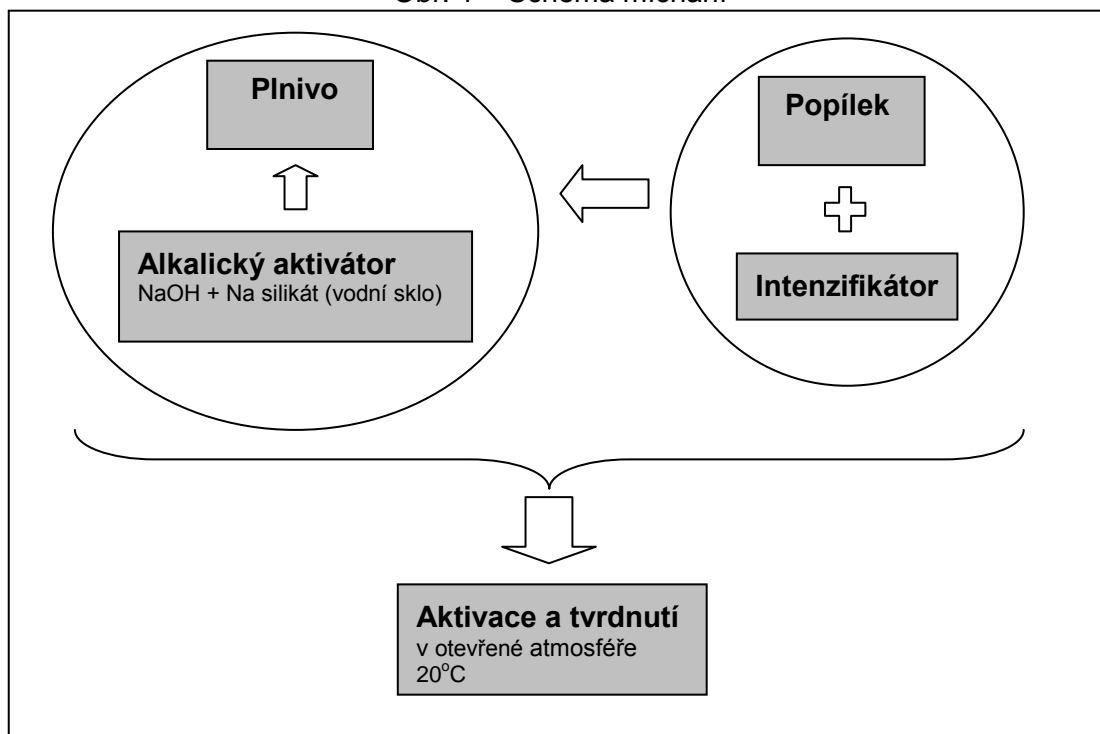
1.1.2 Příprava vzorků POPbetonu

Vstupními materiály pro POPbeton® aktivovaný bez temperování byly:

- těžené kamenivo 0-4 mm, lokalita Dobříň
- drcené kamenivo 4-8 mm, lokalita Zbraslav
- drcené kamenivo 8-16 mm, lokalita Zbraslav
- hnědouhelný nebo černouhelný popílek, lokalita Opatovice, Dětmarovice, Freiberg
- vodní sklo (Na silikát)
- hydroxid sodný Na(OH)
- regulátor tvrdnutí Al(OH)₃

Míchání probíhalo podle ověřeného technologického postupu, který se ukázal nejlepší pro přípravu POPbetonu „za studena“.

Obr. 1 – Schéma míchání



1.1.3. Vstupní materiály

Při výběru vhodných přísad a příměsí bylo zejména dbáno na jejich složení. Vzhledem k tomu, že všechny základní strukturální modely geopolymery předpokládají vazby mezi oxidy křemíku, oxidy hliníku a sodíkovými ionty, bylo potřeba se zaměřit zejména na tyto prvky obsažené v jednotlivých přísadách a příměsích.

Tabulka 1 – Složení popílků

Složení	SiO ₂	Na ₂ O	Al ₂ O ₃
Opatovice	52,85%	0,36%	31,84%
Dětmarovice	47,21%	0,53%	29,02%
EFA Fuller	46,74%	1,12%	29,17%
Otrokovice	52,07%	0,31%	32,99%
Kladno	42,25%	0,57%	32,79%

Tabulka 2 – Složení vodního skla

Složení	SiO ₂	Na ₂ O	H ₂ O
ze 4.7.2004	27,810%	7,920%	62,380%
podzim 2006	25,730%	8,640%	65,500%

Tabulka 3 – Složení NaOH

Složení	Na(OH)	H ₂ O
suchý	100,00%	0,00%
roztok	43,490%	56,510%

Tabulka 4 – Složení příměsí

Složení	SiO ₂	Na ₂ O	Al ₂ O ₃
Metakaolin Nové Strašecí	55,270%		42,490%
Vápenec Čertovy Schody	0,154%		0,072%
Struska Štramperk	37,870%	0,447%	7,990%
Opatovice	52,85%	0,36%	31,84%
Dětmarovice	47,21%	0,53%	29,02%
EFA Fuller	46,74%	1,12%	29,17%
Kladno	42,25%	0,57%	32,79%
Mikrosilika	99,90%		
CEM I 42,5	25,33%	0,54%	11,54%
Vápenec D5	0,15%		0,07%
Hlína Sedlec	50,43%	0,72%	12,88%

Podrobné složení jednotlivých sérií je v příloze 1.

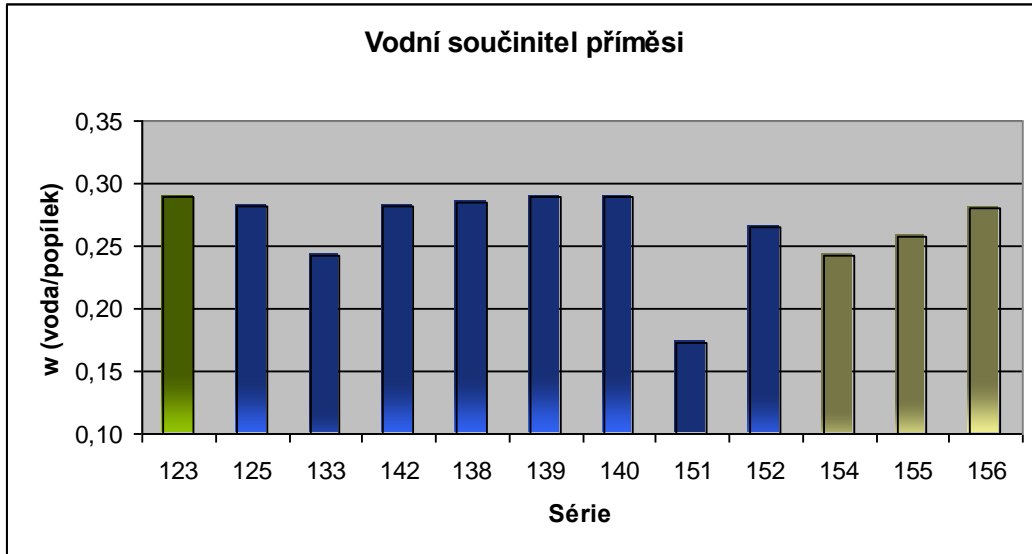
1.1.4 Podmínky zpracování

Úkolem bylo zachovat pokud možno ve všech sériích stejný vodní součinitel a stejný poměr aktivátorů vzhledem k množství popílku. Celkový poměr oxidů se tak velmi různí podle typu příměsí. Vodní součinitel bylo též potřeba přizpůsobit pro podmínky zpracovatelnosti. Velikost vodního součinitele ukazuje obrázek 1. Vzájemný poměr oxidů potom ukazují obrázky 2 (SiO₂/Na₂O) a 3 (Al₂O₃/Na₂O).

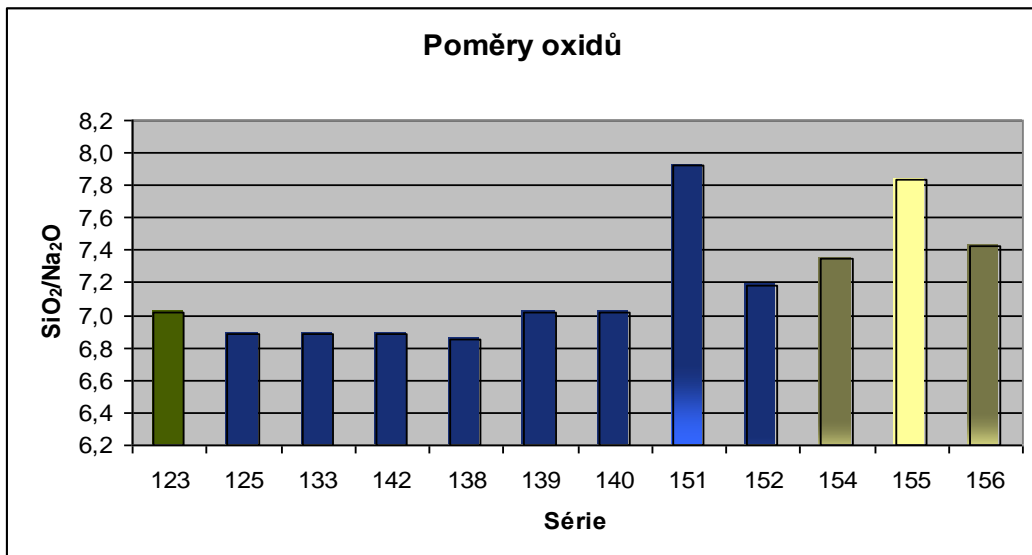
Všechny série byly porovnávány s referenční sérií 123 (v grafech označena zeleně), která byla vyrobeny bez přísad a příměsí. Série s neúplnými frakcemi plniva jsou v grafech označeny žlutě.

Byla vyrobena zkušební tělesa 100x100x100 mm, na kterých byla zkoumána pevnost v tlaku po 7, 14 a 28 dnech. Případně pevnosti dlouhodobé.

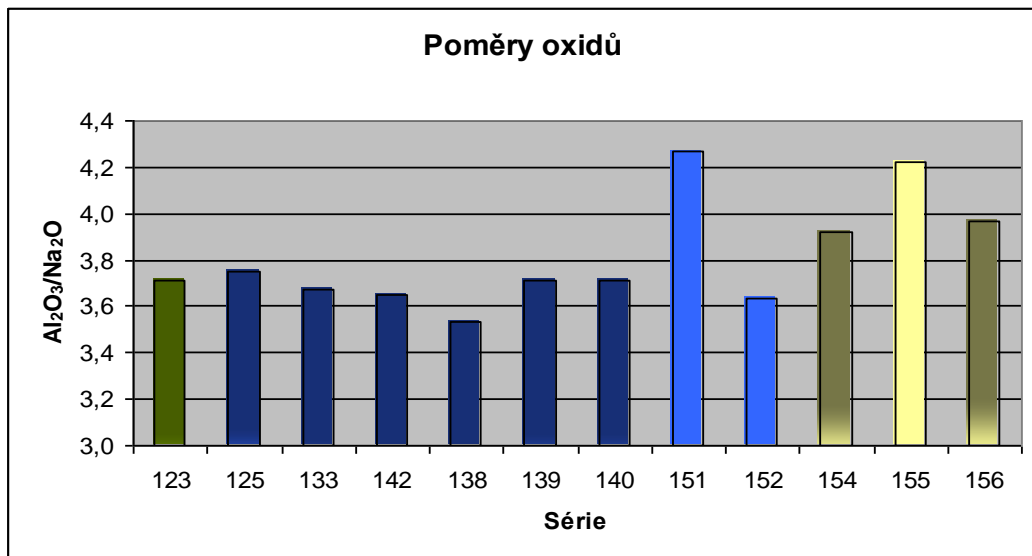
Obr. 1 – Vodní součinitel



Obr. 2 poměry oxidů



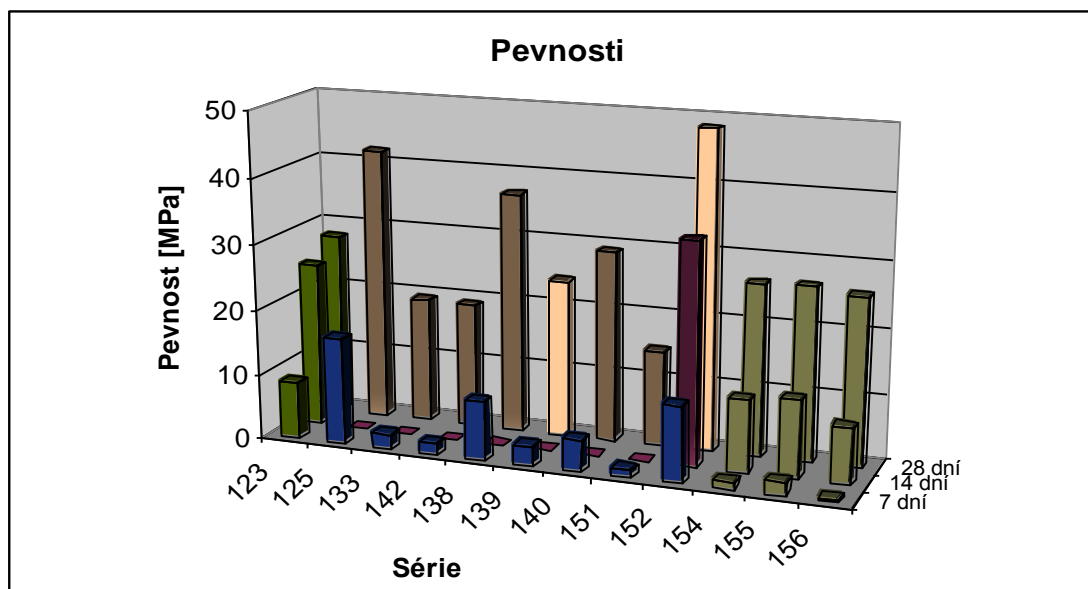
Obr. 3 poměry oxidů



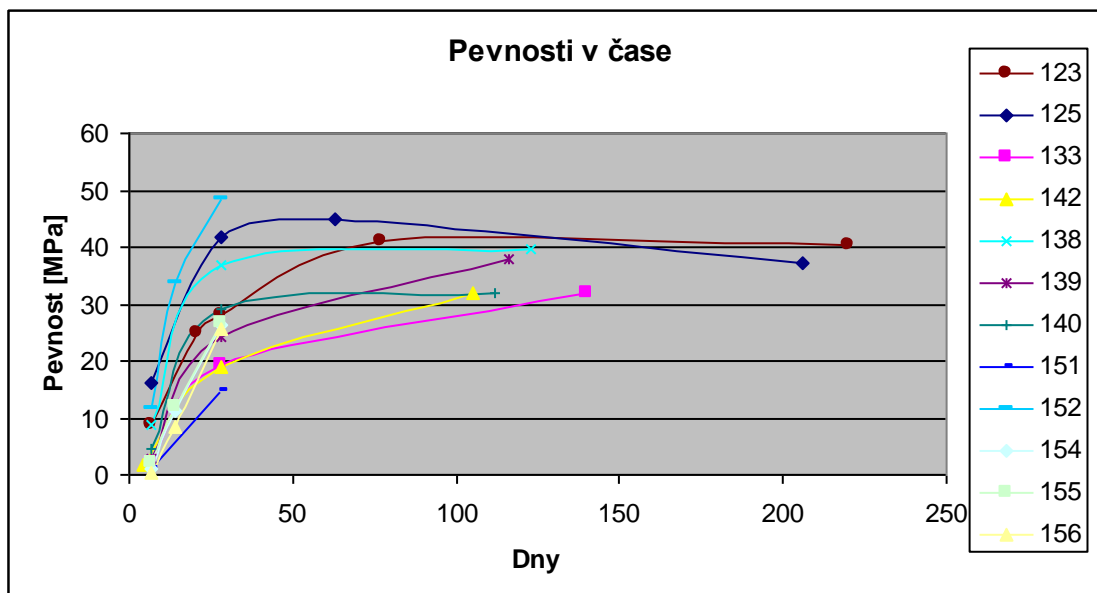
1.1.5 Výsledky

Výsledné pevnosti těles jsou znázorněny na obrázcích 4 a 5. Lze konstatovat, že při použití jemně mleté strusky – Kotouč Štramberk bylo dosaženo pozitivních výsledků z hlediska pevností a to zejména s rychlejším nárůstem pevnosti. Dále lze říct, že se pevnosti v čase nemění a nedochází tak k degradaci materiálu

Obr. 4 - Pevnosti



Obr. 5 – Dlouhodobé pevnosti

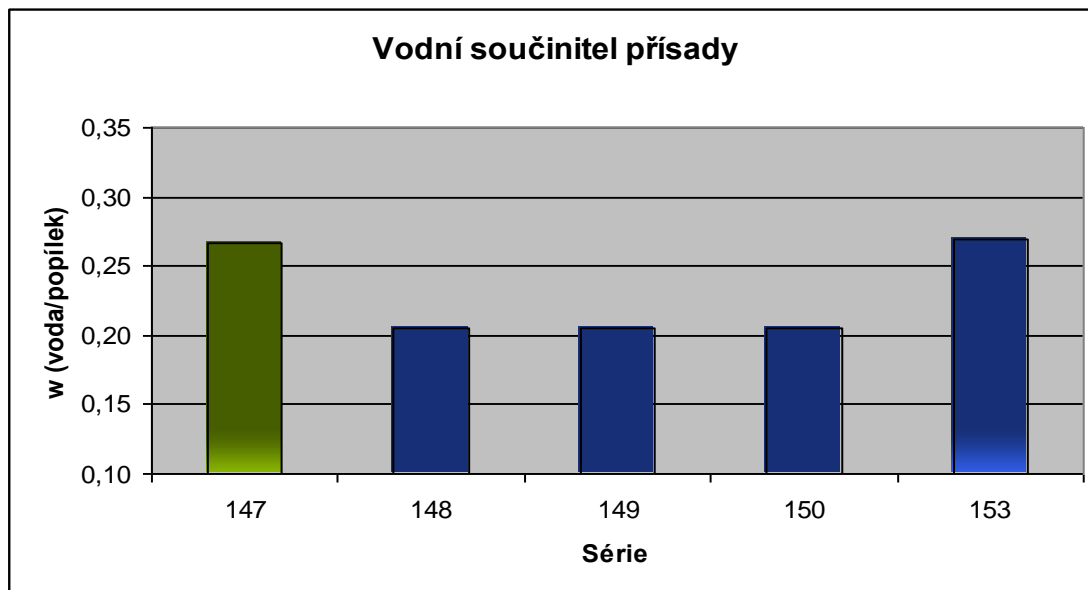


1.1.6 Přísady

Byly též odzkoušeny některé přísady z důvodů snížení vodního součinitele, neboť přebytečná voda se v POPbetonu ukazuje jako nevhodná a brání rychlému zatvrdnutí směsi. Byly zkoušeny dva typy plastifikátorů, z nichž se ALMIPAL SL osvědčil spíše jako provzdušňovadlo a pouze RHEOBILD 2040 se ve větší koncentraci osvědčil pozitivně. Dále bylo zkoušeno provzdušňovadlo LP 70. Srovnávací série tentokrát 147 je opět vyznačena

zeleně. Vliv přísad na vodní součinitel je na obrázku 6. Složení jednotlivých směsí je opět detailně v příloze 1.

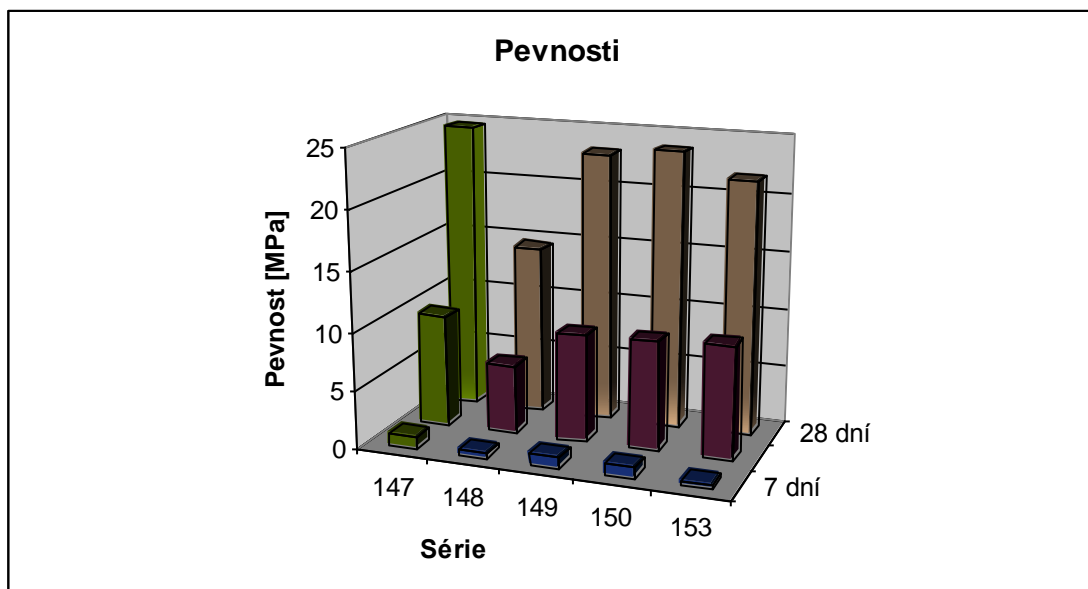
Obr. 6 – Vodní součinitel



Na obrázku 7 jsou porovnány pevnosti po 7, 14 a 28 dnech. Bohužel ani přes značné snížení vodního součinitele se nepovedlo dosáhnout vyšších pevností po 7 dnech. Výsledné pevnosti po 14 a 28 dnech jsou v podstatě totožné jako u srovnávací série.

V obou případech použití provzdušňovadel je vidět snížení výsledných pevností, což jsme v celku očekávali. Dá se konstatovat, že použití přísad mělo pozitivní vliv na zpracovatelnost směsi, avšak výsledný efekt zvýšení počátečních pevností se nepotvrdil.

Obr. 7 – Pevnosti



1.2 POPmalty

Další ověřovací průzkum proběhl na maltách. Bylo nutné ověřit některé další alkalicky aktivní příměsi. Pro porovnání bylo nutné vytvořit zkušební i s ostatními již odzkoušenými příměsemi, tak aby bylo možné vyslovit korektní závěr. Zkušební tělesa byly tentokrát trámečky 40x40x160 mm. Na trámečcích byl zkoušen jak tah za ohybu, tak prostý tlak a to na obou úlomcích.

1.2.1 Příprava vzorků POPmalty

Vstupními materiály pro POPmalto aktivovanou bez temperování byly:

- těžené kamenivo 0-4 mm, lokalita Dobříň
- hnědouhelný nebo černouhelný popílek, lokalita Opatovice, Dětmárovice, Freiberg
- vodní sklo (Na silikát)
- hydroxid sodný Na(OH)
- regulátor tvrdnutí Al(OH)₃

Míchání probíhalo podle ověřeného technologického postupu, který se ukázal nejlepší pro přípravu POPbetonu „za studena“ a který je na obrázku 1.

1.2.2. Vstupní materiály

Viz. tabulky 1 až 4. podrobný tabulka složení jednotlivých směsí je v příloze 2.

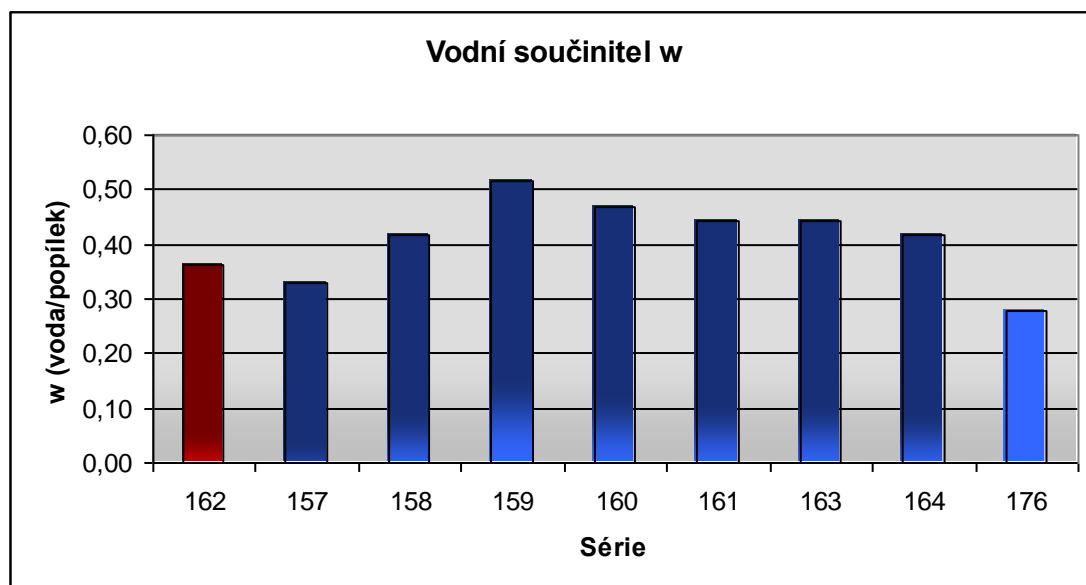
1.2.3 Podmínky zpracování

opět bylo úkolem zachovat pokud možno ve všech sériích stejný vodní součinitel a stejný poměr aktivátorů vzhledem k množství popílku. Celkový poměr oxidů se tak velmi různí podle typu příměsi. Vodní součinitel bylo též potřeba přizpůsobit pro podmínky zpracovatelnosti. Velikost vodního součinitele ukazuje obrázek 8. Vzájemný poměr oxidů potom ukazují obrázky 9 (SiO₂/Na₂O) a 10 (Al₂O₃/Na₂O).

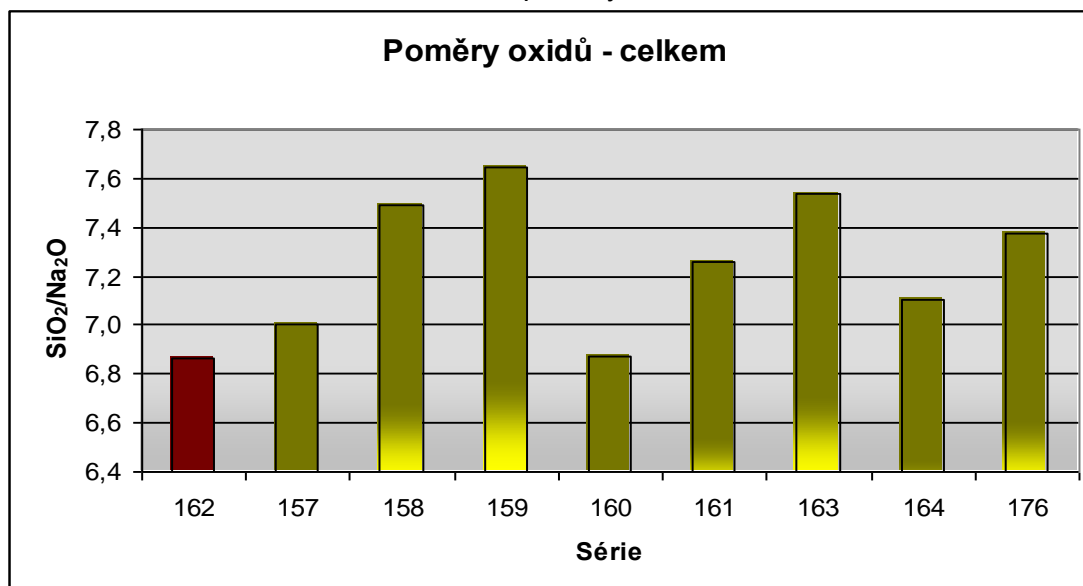
Všechny série byly porovnávány s referenční sérií 162 (v grafech označena červeně), která byla vyrobena bez přísad a příměsí.

Byla vyrobena zkušební tělesa 40x40x160 mm, na kterých byla zkoumána pevnost v tlaku po 7, 14 a 28 dnech. Případně pevnosti dlouhodobé.

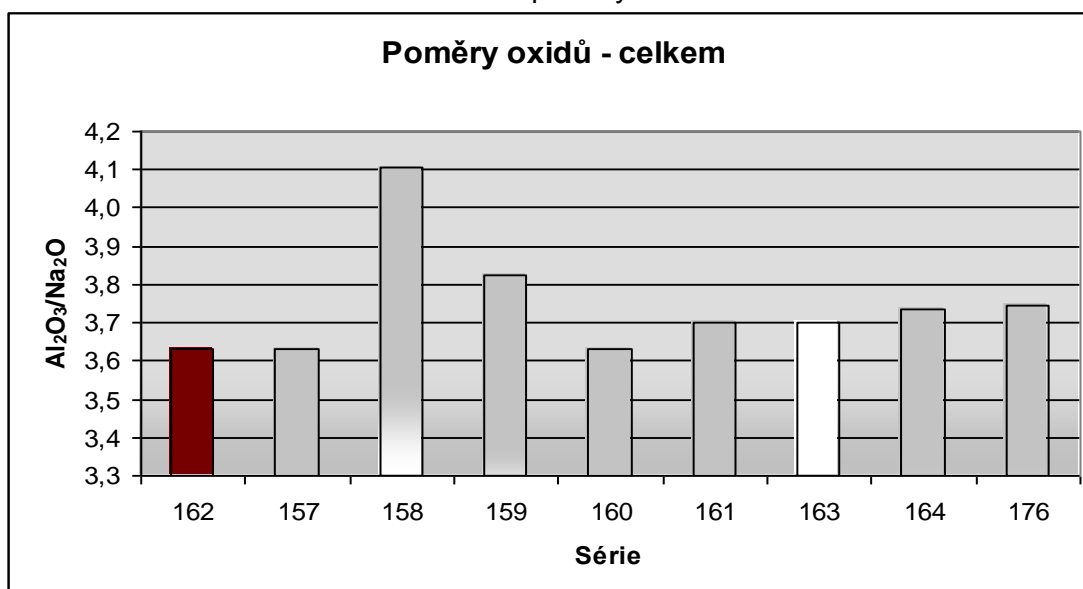
Obr. 8 – vodní součinitel



Obr. 9 – poměry oxidů



Obr. 10 – poměry oxidů



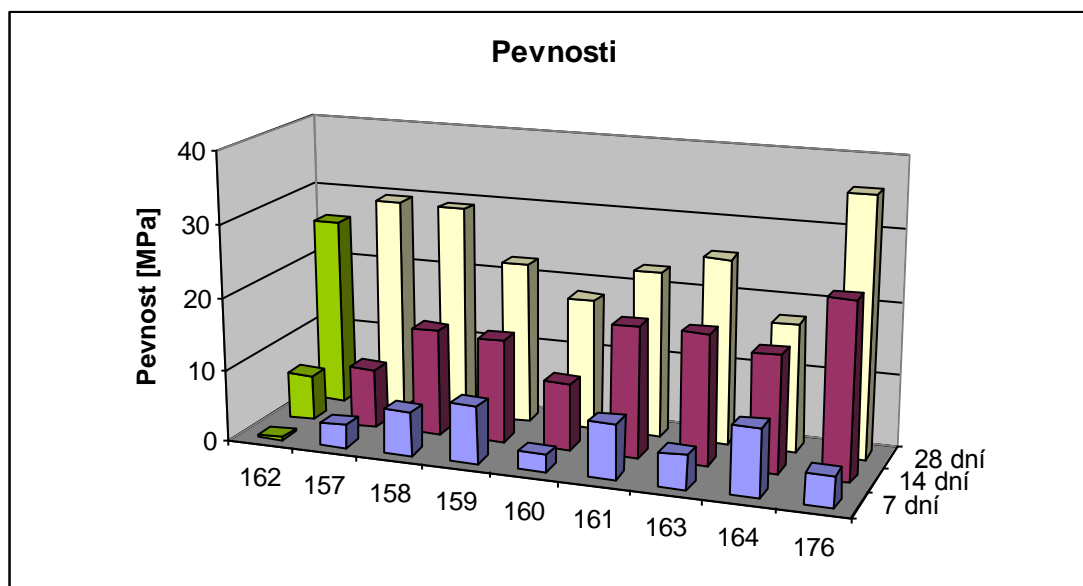
1.2.4 Výsledky

Výsledné pevnosti těles jsou znázorněny na obrázcích 11 a 12. Na obrázku 11 jsou výsledky absolutních pevností po 7, 14 a 28 dnech. Na obrázku 12 jsou naproti tomu procentuální zlepšení stavu oproti referenční sérii (její absolutní hodnota je 100%).

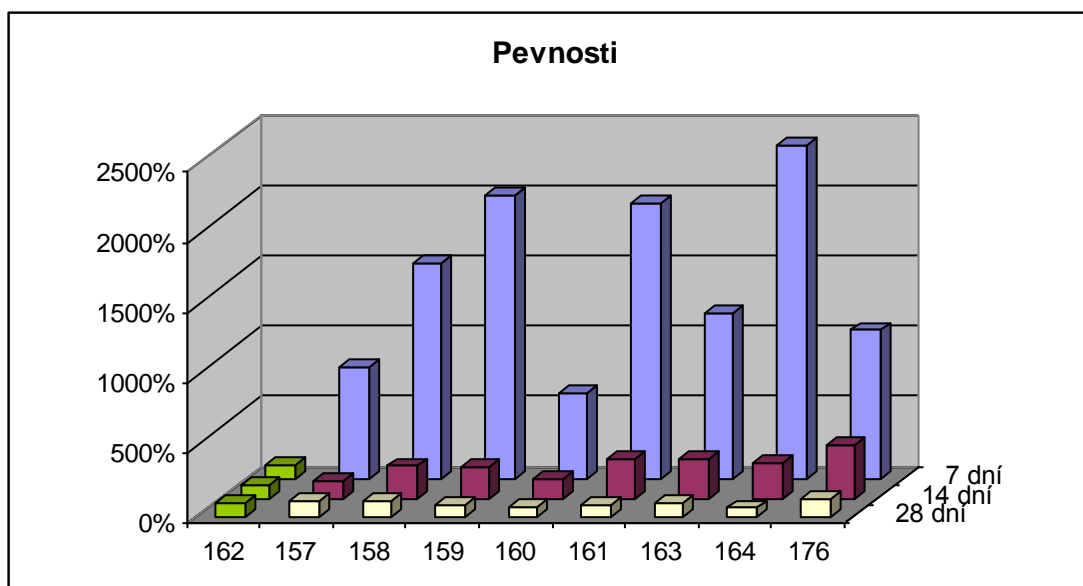
Dá se říct, že všechny směsi dokázaly zlepšit počáteční pevnosti, ale přesto zůstávají po 7 dnech do 10 MPa. Pevnosti po 28 dnech nabývají na maltu solidních 25-30 MPa. Přihlédneme-li k tomu, že popílkové pojivo nabývá pevnost do cca. stého dne stárí, pak je to slušný výsledek. Zejména struska, metakaolin a cement se jeví jako vhodné přísady pro navození počátečních pevností. Z hlediska konečných pevností se nám osvědčila naopak mikrosilika, metakaolin a dokonce i jemná sprašová hlína.

Bude tedy ještě potřeba dalších pokusů k ověření dalších alkalicky aktivních materiálů či odpadních materiálů vhodných pro alkalickou aktivaci či jejich využití jako druhotných stavebních materiálů.

Obr. 11 - Pevnosti



Obr. 12 – Pevnosti relativně



1.3 Závěr

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

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

Příloha 1

Složení sérií s příměsemi

Série	popílek	kamenivo	kamenivo	kamenivo	vodní sklo	HaOH		Al(OH)3	voda	Příměs I	
	[kg]	0-4 mm [kg]	4-8 mm [kg]	8-16 mm [kg]	sušiny na popílek [l]	na popílek [kg]	na popílek [l]	na sušinu vodního skla [kg]	[l]	název	[kg] - [l]
123	4,00	5,67	4,09	7,65	1,25	0,29		0,021	0,340		
125	4,00	5,67	4,09	7,65	1,37	0,32		0,047	0,340	popílek Kladno	0,4
133	4,00	5,67	4,09	7,65	1,37	0,32		0,035	0,170	popílek EFA	0,4
142	4,00	5,67	4,09	7,65	1,37	0,32		0,023	0,340	popílek EFA	0,4
138	4,00	5,67	4,09	7,65	1,31	0,31		0,022	0,340	mletá struska	0,2
139	4,00	5,67	4,09	7,65	1,25	0,29		0,021	0,340	mikromletý písek Střeleč	0,4
140	4,00	5,67	4,09	7,65	1,25	0,29		0,021	0,340	mletý vápenec Čertovy schody	0,4
151	1,60	2,27	1,64	3,06	0,50	0,12		0,008		popílek Opatovice	0,3
152	2,40	3,40	2,45	4,59	0,79	0,18		0,01	0,120	mletá struska	0,24
154	2,40	5,22		5,22	0,75	0,18		0,01	0,150	popílek Dětmárovice	0,24
155	2,40	5,22		5,22	0,75	0,18		0,01	0,250	popílek Dětmárovice	0,48
156	2,40	5,22		5,22	0,75	0,18		0,01	0,250	mletý popílek Opatovice	0,24

Složení sérií s přísadami

Série	popílek	kamenivo	kamenivo	kamenivo	vodní sklo	HaOH		Al(OH)3	voda	Příměs I	
	[kg]	0-4 mm [kg]	4-8 mm [kg]	8-16 mm [kg]	sušiny na popílek [l]	na popílek [kg]	na popílek [l]	na sušinu vodního skla [kg]	[l]	název	[kg] - [l]
147	4,00	5,67	4,09	7,65	1,25	0,29		0,021	0,250		
148	4,00	5,67	4,09	7,65	1,25	0,29		0,021		plastifikátor ALMIPAL SL	0,16
149	4,00	5,67	4,09	7,65	1,25	0,29		0,021		plastifikátor RHEOBILD 2040	0,16
150	4,00	5,67	4,09	7,65	1,25	0,29		0,021		plastifikátor RHEOBILD 2041	0,24
151	1,60	2,27	1,64	3,06	0,50	0,12		0,008		popílek Opatovice	0,3
153	2,40	3,40	2,45	4,59	0,79	0,18		0,01	0,130	provzdušňovadlo LP 70	0,04

Příloha 2

Složení sérií POPmalty

Série	popílek	kamenivo	vodní sklo	HaOH	Al(OH)3	voda	Příměs I		Příměs II	
	[kg]	0-4 mm [kg]	sušiny na popílek [l]	na popílek [kg]	na sušinu vodního skla [kg]	[l]	název	[kg] - [l]	název	[kg] - [l]
157	0,8	3,31	0,25	0,06	0,0043	0,100	mikrosilika	0,01		
158	0,8	3,31	0,25	0,06	0,0043	0,170	metakaolin	0,08		
159	0,8	3,31	0,25	0,06	0,01	0,250	struska	0,16		
160	0,8	3,31	0,25	0,06	0,0043	0,210	mletý vápenec	0,16		
161	0,8	3,31	0,25	0,06	0,0043	0,190	mletý vápenec	0,08	struska	0,08
162	0,8	3,31	0,25	0,06	0,0043	0,125				
163	0,8	3,31	0,25	0,06	0,0043	0,190	struska	0,08	mikrosilika	0,02
164	0,8	3,31	0,25	0,06	0,0043	0,170	CEM I 42,5	0,08		
176	0,8	3,31	0,25	0,06	0,0043	0,060	hlína jemná	0,08		