

Křemičito-alkalická reakce kameniva v betonu – další možnosti řešení

Z práce na grantu MD v roce 2010

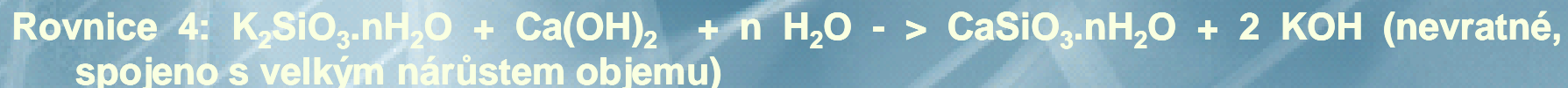
Příčiny vzniku AKR

AKR má několik fází

1. Rozpouštění alkalických síranů během hydratace
2. Při reakci cementu s vodou vznikají z hlavních slínkových minerálů, např. alitu, C-S-H fáze a portlandit, např. podle následující rovnice:



Současně přecházejí alkalické sulfáty do roztoku a reagují s vznikajícím portlanditem, vzniklé alkalické hydroxidy napadají zrna reaktivního kameniva



3. Celý sled chemických reakcí se může za vhodných podmínek opakovat a je nevratný, v zrnech kameniva a v cementové matici dochází tak ke vzniku tahových napětí, které vedou až k rozrušení struktury betonu



Cílem našich prací bylo vybrat a otestovat materiály, které mohou svými vlastnostmi bránit vzniku a průběhu AKR tím, že sníží alkalitu roztoku v pórech cementové matrice a samy vážou vápník do CSH-struktur dříve, než by v důsledku AKR došlo ke škodám na betonovém díle.

Pro tento účel byly vybrány látky přírodní, upravené i vznikající jako vedlejší produkty z metalurgických procesů a z energetiky

Jsou to:

- vysokopecní struska Třinec
- černouhelný popílek Dětmárovice
- hnědouhelný popílek Opatovice
- spongilit Zeměchy
- spongilit Nové Strašecí
- metakaolin MEFISTO L05 (ČLUZ)
- Mikrosilika Elkem msc 940 U-S (BASF)
- vysokoprocentní vápence (vlastní zdroje cementáren).



Testování vybraných materiálů pokračovalo dalšími zkouškami s cementy CEM I ze všech cementáren ČR na reaktivním kamenivu andesit Teplice a droba Chornice jednak už osvědčenou metodou podle TP 137 – zkouška podle upravené ASTM C1260-94, jednak podle ČSN 72 1179.

Výsledky zkoušek jsou v následujících tabulkách a grafech. V rámci prací na uvedeném grantu MD ČR byla sledována řada korelací mezi testovanými parametry. Významné korelace byly zjištěny pouze mezi pucolanitou cementu vyjádřenou jako alkalita roztoku nad cementem a výsledky dilatometrických zkoušek a také mezi alkalitou výluhu z tělísek ze ztvrdlé cementové pasty a výsledky dilatometrických zkoušek. Dle předpokladů nejvýznamnější korelace byla zjištěna mezi výsledky dilatometrických zkoušek podle ASTM C1260-94 a výsledky dilatometrických zkoušek podle ČSN 72 1179.



Tabulka č. 1: Zkoušky směsí na andezitu – dilatace, pucolanita, vyluhování alkálií

cement	další složka	označení	obsah složky ve směsi (% hm.)	dilatace (%) hodnota na konci zkoušky		ČSN EN 196-5 pucolanita směsi			obsah alkálií ve vzorku (% hm.) Na ₂ O _{ekv.}	pH vyluhu	alkalita vyluhu (mmol/l) OH ⁻	obsah alkálií ve vyluhu (mg/l) Na ₂ O _{ekv.}
				ČSN 72 1179	ASTM C 1260-94	OH ⁻ (mmol/l)	CaO (mmol/l)	pucolanita				
CEM I 42,5 R	-	R0	-	0,546	0,922	54,00	12,00	2	0,44	11,9	38,5	181,65
	vp. struska Třinec	R1	30	0,111	0,268	50,50	12,80	2	0,51	12,0	27,0	137,72
	popílek EDě	R2	30	-	-	45,50	8,30	1	0,94	12,0	27,0	137,18
	popílek EOp	R3	30	0,012	0,020	43,00	8,30	1	0,70	12,0	26,0	112,63
	spongilit Zeměchy	R4	30	-	-	36,50	9,30	1	0,56	11,9	16,0	54,95
	spongilit ČLUZ	R5	30	0,008	0,064	38,00	9,50	1	0,53	11,9	19,0	65,79
	metakaolin ČLUZ	R6	10	-	-	46,50	8,80	1	0,43	11,9	22,0	108,18
	mikrosilika Elkem	R7	10	-	-	42,50	8,30	1	0,46	11,9	19,0	80,34
vápěnc	R8	30	0,222	0,569	47,00	12,50	2	0,36	12,1	33,0	125,35	
CEM I 52,5 R	-	C0	-	0,581	1,310	74,00	8,50	2	0,66	12,2	36,0	314,26
	vp. struska Třinec	C1	30	0,113	0,438	63,00	9,80	2	0,67	11,8	29,0	225,16
	popílek EDě	C2	30	0,071	0,161	58,50	6,50	1	1,10	12,0	31,0	233,23
	popílek EOp	C3	30	0,009	0,070	55,50	6,80	1	0,86	11,9	33,0	215,14
	spongilit Zeměchy	C4	30	0,002	0,059	49,00	7,00	1	0,71	12,0	20,5	96,81
	spongilit ČLUZ	C5	30	0,003	0,077	48,50	7,00	1	0,68	11,8	22,5	107,52
	metakaolin ČLUZ	C6	10	0,111	0,425	62,00	5,80	1	0,63	11,7	21,0	180,66
	mikrosilika Elkem	C7	10	0,028	0,255	59,00	5,80	1	0,67	11,7	16,0	100,58
vápěnc	C8	30	0,337	0,777	59,50	10,30	2	0,50	12,0	34,5	230,09	
CEM I 42,5 R	-	H0	-	0,626	0,891	64,00	10,00	2	0,63	12,2	36,5	247,11
	vp. struska Třinec	H1	30	0,185	0,181	58,00	11,30	2	0,65	11,9	31,5	181,59
	popílek EDě	H2	30	-	-	55,00	8,50	1	1,08	11,9	29,0	164,49
	popílek EOp	H3	30	0,009	0,051	52,50	8,80	1	0,84	11,8	30,5	152,53
	spongilit Zeměchy	H4	30	-	-	47,50	10,00	1	0,69	11,9	24,5	92,91
	spongilit ČLUZ	H5	30	0,010	0,029	44,00	8,50	1	0,66	11,9	24,0	98,32
	metakaolin ČLUZ	H6	10	-	-	56,50	8,00	1	0,60	11,9	21,5	124,31
	mikrosilika Elkem	H7	10	-	-	54,00	7,50	1	0,64	11,5	14,5	73,44
vápěnc	H8	30	-	0,744	56,50	12,50	2	0,48	11,6	22,0	168,76	
CEM I 42,5 R	-	P0	-	0,394	1,154	64,80	9,10	2	0,89	11,8	31,5	260,67
	vp. struska Třinec	P1	30	0,020	0,230	56,50	8,50	2	0,83	11,7	27,5	172,04
	popílek EDě	P2	30	-	-	58,50	7,00	1	1,26	11,7	28,5	179,75
	popílek EOp	P3	30	0,006	0,031	54,50	7,80	1	1,02	11,7	29,0	148,65
	spongilit Zeměchy	P4	30	-	-	48,50	8,80	1	0,87	11,7	18,5	91,61
	spongilit ČLUZ	P5	30	0,026	0,039	44,00	6,50	1	0,84	11,7	22,5	104,40
	metakaolin ČLUZ	P6	10	-	-	62,00	5,30	1	0,84	11,7	23,5	171,62
	mikrosilika Elkem	P7	10	-	-	55,50	6,00	1	0,88	12,3	19,5	121,81
vápěnc	P8	30	-	0,425	57,00	9,30	2	0,65	12,4	31,0	218,85	
CEM I 42,5 R	-	M0	-	0,484	0,898	64,90	8,90	2	0,76	11,9	36,5	242,97
	vp. struska Třinec	M1	30	0,033	0,335	53,00	6,30	1	0,74	11,8	28,5	164,96
	popílek EDě	M2	30	-	-	54,00	6,30	1	1,17	11,8	31,0	183,60
	popílek EOp	M3	30	0,008	0,032	50,00	6,80	1	0,93	11,8	29,5	149,48
	spongilit Zeměchy	M4	30	-	-	41,50	9,00	1	0,78	11,8	24,0	98,77
	spongilit ČLUZ	M5	30	0,007	0,066	43,50	7,50	1	0,75	11,8	24,0	96,63
	metakaolin ČLUZ	M6	10	-	-	57,50	6,00	1	0,72	11,8	22,5	96,63
mikrosilika Elkem	M7	10	-	-	49,50	8,00	1	0,76	11,7	20,0	101,46	
H šarže 2	-	-	-	-	-	62,40	9,50	2	0,70			0,00
M šarže 2	-	-	-	-	-	65,20	9,25	2	0,72			0,00

Termín ukončení zkoušky: ČSN 72 1179 ... 6 měsíců
 ASTM C 1260-94: ... 28 dnů



Tabulka č. 2: Zkoušky směsí řady C na drobě Chornice, koncová dilatace, vyluhování alkálií

cement	další složka	označení	obsah složky ve směsi (% hm.)	dilatace (%) hodnota na konci zkoušky		ČSN EN 196-5 pucolanita směsi			obsah alkálií ve vzorku (% hm.) Na ₂ O _{ekv.}	pH výluhu	alkalita výluhu (mmol/l) OH ⁻	obsah alkálií ve výluhu (mg/l) Na ₂ O _{ekv.}
				ČSN 72 1179	ASTM C 1260-94	OH ⁻ (mmol/l)	CaO (mmol/l)	pucolanita				
CEM I 52,5 R	-	C0	-	0,142	0,549	74,00	8,50	2	0,66	12,2	36,0	314,26
	vp. struska Třinec	C1	30	0,061	0,203	63,00	9,80	2	0,67	11,8	29,0	225,16
	popílek EDě	C2	30	0,027	0,051	58,50	6,50	1	1,10	12,0	31,0	233,23
	popílek EOp	C3	30	0,014	0,023	55,50	6,80	1	0,86	11,9	33,0	215,14
	spongilit Zeměchy	C4	30	0,015	0,019	49,00	7,00	1	0,71	12,0	20,5	96,81
	spongilit ČLUZ	C5	30	0,021	0,031	48,50	7,00	1	0,68	11,8	22,5	107,52
	metakaolinit ČLUZ	C6	10	0,042	0,173	62,00	5,80	1	0,63	11,7	21,0	180,66
	mikrosilika Elkem	C7	10	0,039	0,111	59,00	5,80	1	0,67	11,7	16,0	100,58
	Vápenec	C8	30	0,085	0,304	59,50	10,30	2	0,50	12,0	34,5	230,09

Termín ukončení zkoušky: ČSN 72 1179 ... 6 měsíců
 ASTM C 1260-94: ... 28 dnů



Tabulka č. 3: *Test podle ASTM C1260 – 94*

Hornina - plnivo: andezit

koncentrace NaOH: 40 g/l

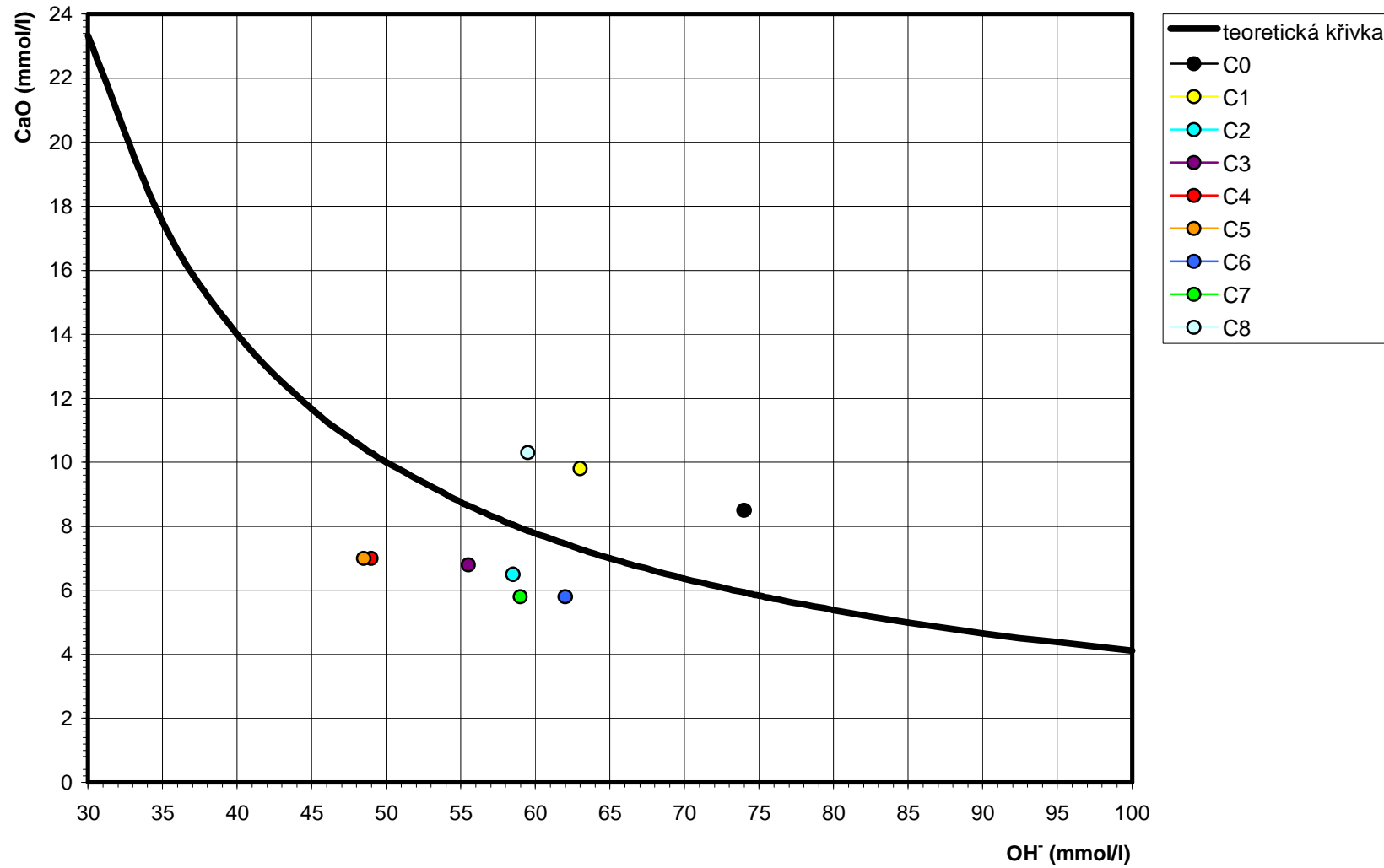
Zpracoval: Zkušebna kamene a kameniva
Hořice

počáteční délka trámečku: 250 mm

zkušební termín (den)	vzorek řada C - prodloužení trámečku v % délky								
	C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,160	0,013	0,007	0,004	0,002	0,003	0,007	0,004	0,081
4	0,320	0,022	0,012	0,008	0,003	0,006	0,013	0,008	0,176
6	0,481	0,030	0,018	0,008	0,006	0,008	0,019	0,008	0,301
8	0,614	0,065	0,021	0,013	0,007	0,011	0,058	0,020	0,399
10	0,722	0,108	0,022	0,015	0,007	0,013	0,097	0,025	0,497
12	0,830	0,171	0,030	0,016	0,013	0,017	0,136	0,030	0,556
14	0,912	0,196	0,040	0,023	0,014	0,022	0,174	0,061	0,607
16	0,995	0,233	0,053	0,024	0,017	0,023	0,209	0,088	0,643
18	1,079	0,271	0,070	0,025	0,020	0,024	0,245	0,115	0,679
20	1,116	0,310	0,087	0,033	0,024	0,035	0,282	0,148	0,707
22	1,172	0,335	0,107	0,040	0,031	0,044	0,320	0,175	0,726
24	1,220	0,371	0,126	0,049	0,038	0,054	0,356	0,203	0,746
26	1,269	0,408	0,144	0,057	0,046	0,063	0,391	0,230	0,761
28	1,310	0,438	0,161	0,070	0,059	0,077	0,425	0,255	0,777



pucolanita cementových směsí
řada C





Tabulka č. 4: *Test podle ČSN 72 1179*

Cement: CEM I 52,5 R

Hornina - plnivo: andezit

Zpracoval: Zkušebna kamene a kameniva
Hořice

počáteční délka trámečku: 160 mm

zkušební termín (měsíc)	vzorek řada C - prodloužení trámečku v % délky								
	C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,449	0,004	-0,002	-0,009	-0,013	-0,008	-0,008	-0,008	0,128
2	0,516	0,022	0,008	-0,008	-0,008	-0,005	0,012	0,001	0,226
3	0,538	0,042	0,020	-0,004	-0,008	-0,004	0,038	0,005	0,255
4	0,551	0,063	0,033	-0,003	-0,008	-0,004	0,067	0,010	0,280
5	0,567	0,092	0,053	0,002	-0,004	-0,002	0,089	0,020	0,313
6	0,581	0,113	0,071	0,009	0,002	0,003	0,111	0,028	0,337



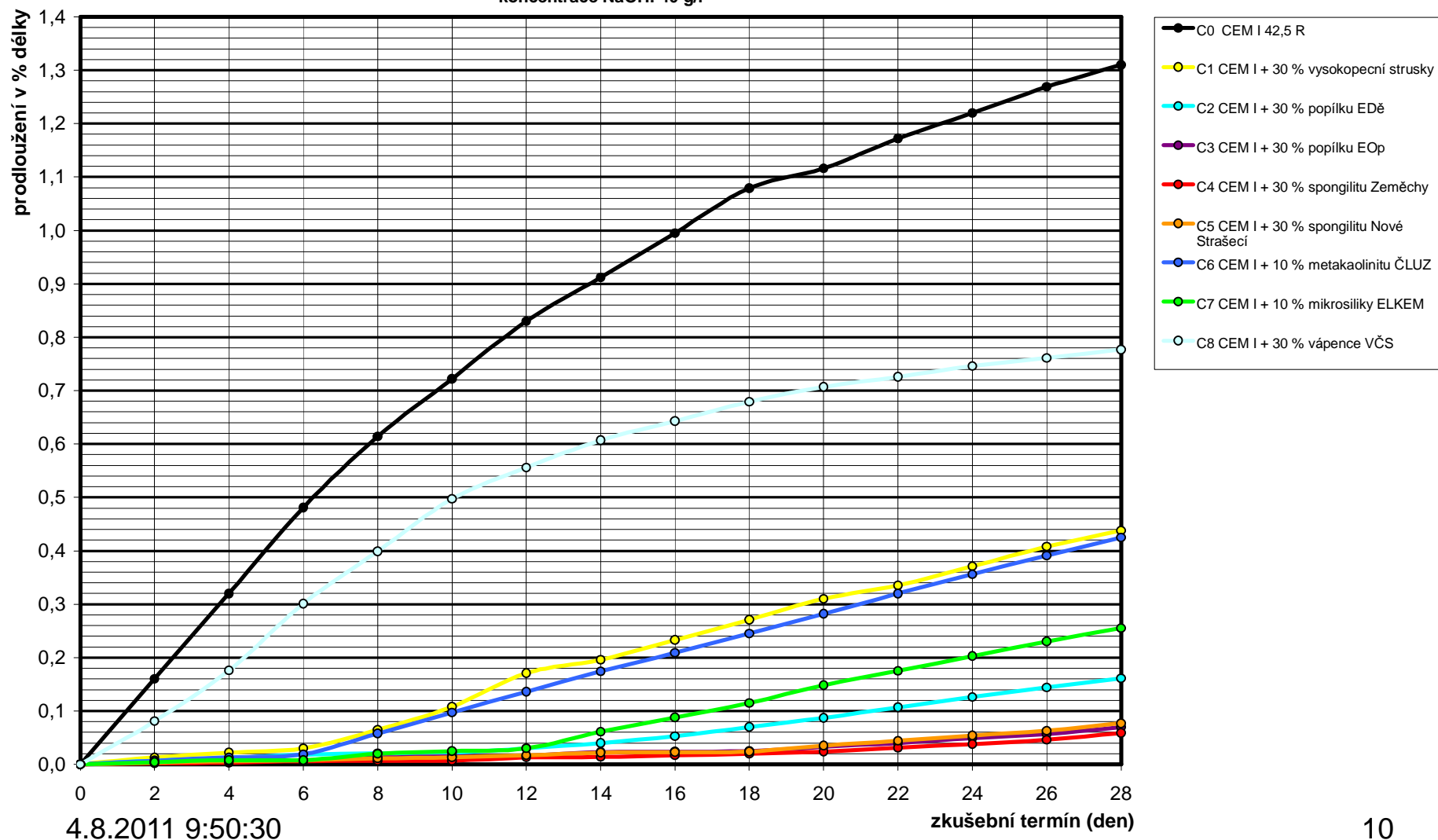
Alkalická rozpínavost kameniva

dilatometrická zkouška rozpínání cementové malty podle ASTM C 1260 - 94

cement: CEM I 52,5 R Čížkovice

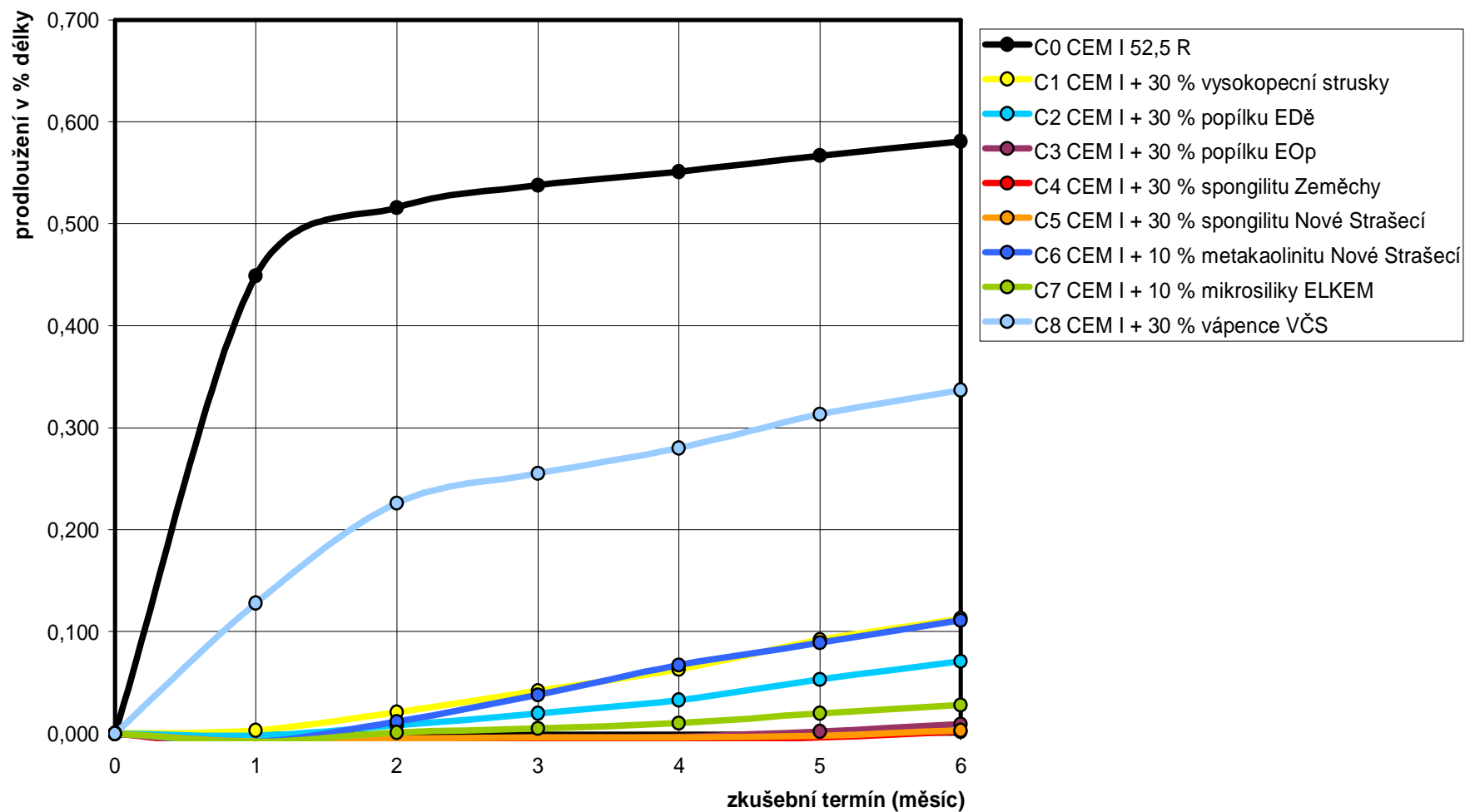
kamenivo: andezit Tepličky 0 - 4 mm

koncentrace NaOH: 40 g/l





Alkalická rozpínavost kameniva
dilatometrická zkouška rozpínání cementové malty podle ČSN 72 1179
cement: CEM I 52,5 R Čížkovice
kamenivo: andesit Tepličky





Tabulka č. 5: Test podle ASTM C1260 – 94

cement: CEM I 52,5 R řada C

hornina - plnivo: droba

koncentrace NaOH: 40 g/l

zpracoval: Zkušebna kamene a kameniva
Hořice

počáteční délka trámečku: 250 mm

zkušební termín (den)	vzorek - prodloužení trámečku v % délky								
	C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,010	0,016	0,008	0,002	0,002	0,004	0,015	0,008	0,048
4	0,020	0,031	0,013	0,004	0,003	0,007	0,029	0,016	0,096
6	0,042	0,046	0,017	0,006	0,009	0,010	0,041	0,027	0,145
8	0,104	0,079	0,022	0,008	0,010	0,013	0,053	0,037	0,179
10	0,165	0,094	0,026	0,010	0,012	0,014	0,086	0,048	0,206
12	0,231	0,113	0,030	0,012	0,014	0,015	0,105	0,058	0,230
14	0,301	0,133	0,033	0,014	0,015	0,016	0,111	0,064	0,241
16	0,354	0,145	0,035	0,016	0,016	0,019	0,116	0,060	0,252
18	0,406	0,156	0,040	0,017	0,017	0,021	0,121	0,065	0,264
20	0,447	0,173	0,044	0,019	0,017	0,023	0,130	0,074	0,276
22	0,481	0,178	0,046	0,021	0,018	0,024	0,140	0,084	0,280
24	0,515	0,188	0,047	0,022	0,018	0,025	0,156	0,093	0,291
26	0,530	0,198	0,047	0,022	0,019	0,026	0,173	0,101	0,301
28	0,549	0,203	0,051	0,023	0,019	0,031	0,173	0,111	0,304



Tabulka č. 6: *Test podle ČSN 72 1179*

cement: CEM I 52,5 R řada C

hornina - plnivo: droba

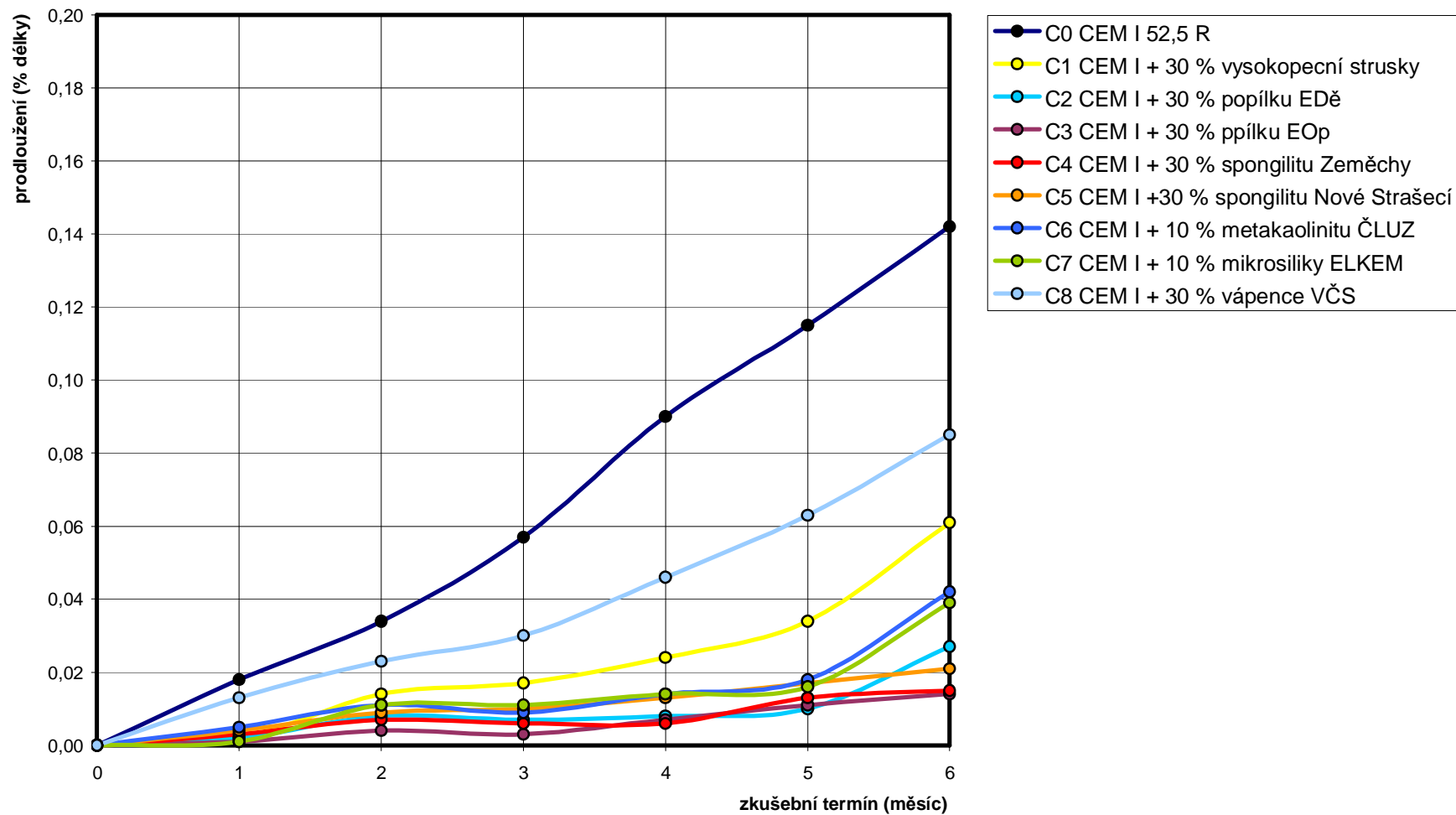
zpracoval: Zkušebna kamene a kameniva
Hořice

počáteční délka trámečku: 160 mm

zkušební termín (měsíc)	vzorek - prodloužení trámečku v % délky								
	C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,018	0,002	0,002	0,001	0,003	0,004	0,005	0,001	0,013
2	0,034	0,014	0,008	0,004	0,007	0,009	0,011	0,011	0,023
3	0,057	0,017	0,007	0,003	0,006	0,010	0,009	0,011	0,030
4	0,090	0,024	0,008	0,007	0,006	0,013	0,014	0,014	0,046
5	0,115	0,034	0,010	0,011	0,013	0,017	0,018	0,016	0,063
6	0,142	0,061	0,027	0,014	0,015	0,021	0,042	0,039	0,085



Alkalická rozpínavost kameniva
dilatometrická zkouška podle ČSN 72 1179
cement: řada cementů Čížkovice
kamenivo: droba Chornice, 0 - 4 mm





Tabulka č. 7: *Korelace mezi pucolanitou jako alkalitou roztoku při zkoušce podle ČSN EN 196-5 a výsledkem testu reaktivity podle ASTM C 1260-94 po 28 dnech*
cementy řady C kamenivo: andezit

Alkalita (mmol OH ⁻ /l)	prodloužení (%)
48,50	0,077
49,00	0,059
55,50	0,070
58,50	0,161
59,00	0,255
59,50	0,777
62,00	0,425
63,00	0,438
74,00	1,310

korelační koeficient 0,866841995



Tabulka č. 8:

Korelace mezi alkalitou výluhu a výsledkem testu reaktivity podle ASTM C 1260-94 po 28 dnech

všechny cementy

alkalita (mmol OH ⁻ /l)	prodloužení (%)
38,50	0,922
27,00	0,268
26,00	0,020
19,00	0,064
33,00	0,569
36,00	1,310
29,00	0,438
31,00	0,161
33,00	0,070
20,50	0,059
22,50	0,077
21,00	0,425
16,00	0,255
34,50	0,777
36,50	0,891
31,50	0,181
30,50	0,051
24,00	0,029
31,50	1,154
27,50	0,230
29,00	0,031
22,50	0,039
31,00	0,425
36,50	0,898
28,50	0,335
29,50	0,032
24,00	0,066

korelační koeficient

0,643525554



Tabulka č. 9:

**Korelace mezi výsledky dilatační zkoušky podle ASTM a ČSN při ukončení zkoušky
řada C** **kamenivo: andezit Tepličky**

ASTM C 1260-94 (% délky)	ČSN 72 1179 (% délky)	korelační koeficient
1,310	0,581	0,984758569
0,438	0,113	
0,161	0,071	
0,070	0,009	
0,059	0,002	
0,077	0,003	
0,425	0,111	
0,255	0,028	
0,777	0,337	



Tabulka č. 10:

**Korelace mezi výsledky dilatační zkoušky podle ASTM a ČSN při ukončení zkoušky
všechny cementy** **kamenivo: andezit Tepličky**

ASTM C 1260-94 (% délky)	ČSN 72 1179 (% délky)	korelační koeficient
0,922	0,546	0,931849891
0,268	0,111	
0,020	0,012	
0,064	0,008	
0,569	0,222	
1,310	0,581	
0,438	0,113	
0,161	0,071	
0,070	0,009	
0,059	0,002	
0,077	0,003	
0,425	0,111	
0,255	0,028	
0,777	0,337	
0,891	0,626	
0,181	0,185	
0,051	0,009	
0,029	0,010	
1,154	0,394	
0,230	0,020	
0,031	0,006	
0,039	0,026	
0,898	0,484	
0,335	0,033	
0,032	0,008	
0,066	0,007	

Jiné významné korelace nebyly zjištěny, tedy ani mezi obsahem alkálií v cementech a výsledky dilatometrických zkoušek.. Zdálo by se, že výsledek tohoto šetření je v rozporu s příčinou a průběhem AKR. Tento rozpor je pouze zdánlivý. Dilatometrické zkoušky byly navrženy a jsou primárně určeny k testování reaktivity kameniva. Při zkoušce jsou alkálie do reakčního systému dodávány zvenčí v přebytku, takže alkálie obsažené v cementu nemohou výsledek nijak významně ovlivnit. O to více se při dilatometrických zkouškách projevuje vliv přísad na celkovou alkalitu kapaliny v pórech cementové matrice a na start a průběh AKR.

Dilatometrické zkoušky byly prováděny na všech řadách cementů, jejich výsledky byly shodné s výsledky dosaženými na řadě C. S ohledem na omezený rozsah přednášky je zde proto neuvádíme.

Platí zde i nadále již dříve vyslovené hodnocení jednotlivých přísad: Nejlepších výsledků bylo dosaženo s oběma spongility a s hnědouhelným popílkem z elektrárny Opatovice. To ale vůbec neznamena, že by ostatní zkoušené přísady nebyly použitelné.

V současné době jsou trendy používat k potlačení AKR lithné soli. Nejčastěji se jedná o dusičnan lithný. V ČR se ale žádné lithné soli jako surovina ani jako odpad v dostatečné míře nevyskytují. Bylo by nutno je poměrně draho dovážet. Kromě toho nejsou zatím dostatečné zkušenosti s případným vyluhováním lithia do spodních a povrchových vod.

Závěrem

K potlačení nastartování AKR v betonech je nejsnazším a v našich podmínkách i nejlevnějším postupem využití přísad do cementu, vyznačujících se vysokým obsahem reaktivního SiO_2 .

Význačnou vlastností těchto materiálů je jejich pucolánová aktivita

Má-li reaktivní kamenivo být použito k výrobě betonu v aplikacích, kde hrozí nastartování AKR, musí použitý cement vykazovat význačnou pucolanitu. Proto v takových případech by měla tato zkouška být vždy prováděna



DĚKUJI ZA POZORNOST