

VLIV ODCHYLEK VLASTNOSTÍ CEMENTŮ ZPŮSOBENÝCH BĚŽNOU VARIABILITOU VÝROBY NA KVALITU BETONŮ

INFLUENCE OF CEMENT PROPERTIES VARIATION, CAUSED BY NORMAL PRODUCTION VARIATION, ON QUALITY OF CONCRETE

**RUDOLF HELA, PETR KOUKAL,
HANA KUČEROVÁ**

Parametry betonů, zejména modifikovaných přísadami, mohou být ovlivněny odchylkami ve složení cementů vzniklých běžnou variabilitou výroby. Odchylky složení cementu způsobují kolísání jeho chemického složení a fyzikálně-mechanických vlastností.

Parameters of concretes, particularly those modified by additives, may be affected by variations in composition of cements as a result of production variations. Variations in cement composition bring about fluctuations in its chemical composition and physical and mechanical properties.

Některé studie ukázaly, že odchylky ve složení cementů vzniklé běžnou variabilitou ve výrobě a z toho vyplývající kolísání jejich chemických, fyzikálních a mechanických vlastností ovlivňují výsledné parametry betonů ve větší míře, než se všeobecně předpokládalo. To platí především pro betony modifikované přísadami, avšak problémy se mohou vyskytnout i u normálních betonových směsí.

Mezi nejčastější problémy patří špatné zhutnění betonové směsi, příliš nízké počáteční pevnosti, což může např. u předpínaných dílců způsobit prokluz předpínací výztuže. Zatím málo diskutována je oblast provzdušněných betonů, kde vliv kolísání některých vlastností cementů v interakci s provzdušňovacími přísadami může značně ovlivnit míru provzdušnění v zatvrdlých betonech a tím jejich trvanlivost při cyklickém působení vlhkosti a mrazu. To vše může vést k nárůstu zmetkovitosti v produkci a značným ekonomickým ztrátám.

ODCHYLKY VLASTNOSTÍ CEMENTŮ ZPŮSOBENÉ BĚŽNOU VARIABILITOU VÝROBY

Odchylky ve složení a vlastnostech cementů se týkají následujících vlastností:

- chemického složení slínkových minerálů,
- mikrostruktury slínkových minerálů,

- množství a formy alkálií,
- křivky zrnitosti – stupně jemnosti mletí,
- tvaru zrna.

Obě posledně jmenované vlastnosti můžeme sjednotit do společného ukazatele míry „zhtutitelnosti zrn“ cementu. Uvedené odchylky cementů se u výrobců betonu a betonového zboží dají jen obtížně měřit a kontrolovat. Také informace, které lze okamžitě získat od výrobců cementu, nejsou dostatečně detailní, aby se z nich dalo usuzovat na chování cementu v betonové směsi. Poskytované informace výrobců se většinou týkají normou sledovaných vlastností, ke kterým podle ČSN EN 197-1 řadíme:

- počáteční (2 nebo 7denní) a 28denní pevnost v tlaku a tahu za ohybu,
 - počátek tuhnutí,
 - objemovou stálost,
 - ztrátu ziháním,
 - nerozpustný zbytek,
 - obsah síranů,
 - obsah chloridů,
 - pucolanitu (pro CEM IV).
- Výrobci dále obvykle odběratelům poskytují následující informace:
- měrný povrch podle Blaina,
 - množství vody pro normovou konzistenci,
 - kompletní chemickou analýzu,
 - Na₂O ekvivalent,
 - konec tuhnutí.

V technických parametrech cementů poskytovaných výrobcí chybí informace o chemických vlastnostech, které mohou ovlivňovat spolupůsobení cementu a přísad. Tyto informace nemusí být ani výrobcí známy. Dodnes jednou z nejméně sledovaných vlastností cementu, u které se předpokládá vliv na chování betonové směsi, je měrný povrch (jemnost mletí) stanovený metodou podle Blaina.

VLIV JEMNOSTI MLETÍ NA CHOVÁNÍ CEMENTU A BETONU

Mletí surovin pro výrobu slínku na jemnou moučku je nutné z důvodu, aby surovinová moučka rychleji slinovala a byl získán slínek rovnoměrného složení bez volného CaO, což se následně pro-

jevuje na rovnoměrném tvrdnutí slínku.

Pro zjištění jemnosti mletí surovinové moučky se provádí pouze síťový rozběr, neboť zde záleží jen na tom, aby slinovací proces proběhl mezi zmy v patřičný čas a bylo dosaženo homogenního rozdělení slínkových fází. Hrubé částice přes 100 až 200 μm obsažené v surovinové moučce tvořené dvěma nebo více komponenty jsou většinou škodlivé, neboť je tvoří zpravidla zrna z čistého vápence nebo křemene, která jsou pak při výpalu nereaktivní. Surovinová moučka musí být tím jemněji semleta, o co více se jednotlivé komponenty ve složení a melivosti navzájem odlišují.

Naproti tomu nejsou ve slínku hrubší zrna škodlivá, představují pouze nehodnotná zrna cementu, protože v důsledku jejich malého měrného povrchu zcela nezhydratují a po dlouhou dobu se chovají jako plnivo. Proto je omezeno množství zrn větších než 0,2 mm. Na průběh tvrdnutí cementu mají největší vliv zrna o velikosti 0 až 30 μm. Zastoupení zrn frakce 0 až 30 μm v cementech o různém měrném povrchu ukazuje tabulka 1.

Měrný povrch [m ² /kg]	300	400	500
Podíl frakce			
0 - 30 μm [%]	50-70	65-85	80-100

Tab. 1 Zastoupení zrn 0 – 30 μm v závislosti na měrném povrchu cementu

Tab. 1 Dependence of 0 – 30 μm grains percentage on cement surface

U velmi jemně mletých cementů se pak následně objevují tyto problémy:

- Zvyšuje se spotřeba záměsové vody pro smáčení zrn cementu.
- Roste tendence agregace zrn při mletí (především u β-C₂S). C₃S je méně tvrdý a lehčeji melitelný než C₂S, takže jemné částice v cementu jsou tvořeny především C₃S a volným CaO a větší zrna pak C₂S.

- Je rychlejší vývin počátečních pevností a vyšší vývin hydratačního tepla.
- Zvyšuje se smrštění.

Jemnost mletí se projevuje na průběhu hydratace cementu. Jelikož hydratace cementu probíhá zpočátku jako povrchová reakce a následně prostřednictvím difuze za stále se měnících koncentračních podmínek postupuje dále do středu systému, tj. velikost měrného povrchu cementu, tj. jemnost mletí, významným katalyzátorem počátečního průběhu hydratace. Z dříve provedených studií vyplývá, že rozdíl v jemnosti mletí cementů se na nárůstu pevnosti betonu projevuje především v prvních dnech zrání betonu. U betonů starších než jeden rok je již vliv jemnosti mletí cementů zanedbatelný.

Podle Blaina rostoucí měrný povrch cementu způsobuje i větší objemové změny cementové malty v průběhu tuhnutí a tvrdnutí (zvýšením měrného povrchu z 200 m²/kg na 300 m²/kg o 30 %, z 200 m²/kg na 500 m²/kg o 50 %). Při srovnávacích zkouškách, které byly již v roce 1939 provedeny Grafem

a Walzem na 700 mm dlouhém betonovém tělese, se ukázalo, že objemové změny betonového tělesa představují jen 50% objemových změn malty a vliv druhu cementu (cementy s vyšším podílem C₃A mají větší náchylnost k objemovým změnám) je malý. Objemové změny rostou s vodním součinitelem.

V letech 1962 až 1966 prováděli Hansen a Mattock zkoušky na tělesech o průměru 100 až 600 mm a délky 300 až 1200 mm a zjistili, že konečná hodnota objemových změn se snižuje se zvyšujícím se poměrem objemu tělesa k jeho ploše.

V rámci této problematiky se v současné době nejvíce řeší vliv jemnosti mletí na spolupůsobení cementu a přísad do betonu. Vyšší měrný povrch cementu si žádá vyšší dávku přísady pro zachování stejných vlastností betonu, např. konzistence či obsahu vzduchových pórů, ve srovnání s betony z normálně mletých cementů. Je to proto, že větší měrný povrch vytváří větší reakční plochu a tím usnadňuje chemickou a případně fyzikálně-chemickou reakci. Naproti tomu však zrna cementu snadněji agregují. Samozřejmě že účinnost přísad v betonu není ovlivněna jen velikostí měrného povrchu cementu. Na účinnost přísad má také vliv mineralogické složení, zejména

obsah C₃A, CaSO₄ a minerálů strusky, popílku, pucolánů. Vyšší obsah CaSO₄ ovlivňuje rozpustnost slíkových minerálů a tvorbu trisulfátu v počátečním stadiu tuhnutí cementu. Do jaké míry se však budou uvedené vlivy projevovat na vlastnostech betonů, bude záviset na principu spolupůsobení daných přísad a cementů.

PŮSOBENÍ PLASTIFIKAČNÍCH A PROVZDUŠŇOVACÍCH PŘÍSD

Provzdušňovací přísady jsou látky, které po přidání během míšení čerstvého betonu, vytváří ve velkém počtu uzavřené vzduchové póry jemně distribuované v betonu. Betony obsahující tyto jemně rozptýlené vzduchové póry pak lépe odolávají působení mrazu a agresivitě mořské vody.

Rovnoměrně rozložená soustava pórů účinně přerušuje souvislou síť kapilár, které jsou hlavními dopravními tepnami fluktuující části vody v betonu, zejména při jednosměrném transportu vlhkosti. To způsobuje, že hladová voda nebo voda obsahující škodliviny podstatně obtížněji proniká k jádru konstrukce. I když tedy účinkem roztoků dojde k nepříznivému chemickému působení na cementový tmel, uplatňuje se tento škodlivý vliv v relativně tenké povrchové vrstvě.

Tab. 2 Statistické vyhodnocení vlastností zkoušených cementů

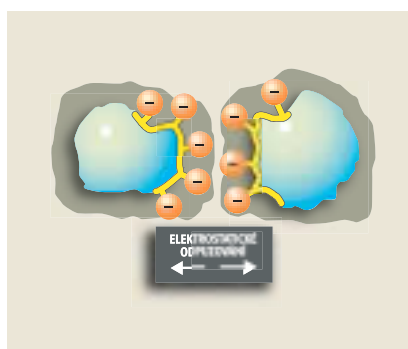
Tab. 2 Statistical evaluation of cement properties

Vlastnost	CEM I 42,5 R					CEM I 42,5 R-G					CEM I 42,5 R	CEM I 42,5 R-G	ČSN EN 197 -1	
	Průměr z 12 vzorků	Min.	Max.	Směrodatná odchylka	Variační koeficient	Průměr z 12 vzorků	Min.	Max.	Směrodatná odchylka	Variační koeficient	Roční průměr	Roční průměr		
Chemické složení v %	SiO ₂	21,95	21,56	22,77	0,37	1,68	21,56	21,05	22,97	0,60	2,79	21,88	21,57	
	Al ₂ O ₃	5,24	5,12	5,38	0,07	1,27	5,10	4,98	5,39	0,11	2,25	5,22	5,14	
	Fe ₂ O ₃	3,53	3,39	3,60	0,06	1,57	3,58	3,45	3,69	0,07	1,96	3,55	3,54	
	CaO	61,32	60,92	61,79	0,30	0,48	62,06	61,38	62,74	0,39	0,62	61,50	62,05	
	MgO	1,07	0,94	1,40	0,11	10,00	1,01	0,93	1,12	0,06	6,13	1,06	1,02	max 5 hm %
	K ₂ O	0,99	0,91	1,03	0,03	3,35	0,97	0,90	1,03	0,03	3,56	0,97	0,96	
	SO ₃	2,71	2,07	2,90	0,22	8,11	2,83	2,64	2,94	0,08	2,82	2,78	2,85	max 4 hm %
	MnO	0,08	0,07	0,09	0,01	8,77	0,08	0,07	0,09	0,01	8,60	0,08	0,08	
	Sádrovec	6,27	4,85	7,10	0,61	9,71	5,11	4,50	6,74	0,53	10,34	6,01	5,30	
	Cl											0,01	0,01	max 0,1 hm %
Fyzikálně-mechanické vlastnosti	Ztráta zřiháním										1,44	1,47	max 5 hm %	
	Ner rozpustný zbytek										3,83	3,37	max 5 hm %	
	Blain [m ² /kg]	333	321	348	9	3,4	385	361	404	13,0	3,4	328	384	
	Sito 0,032 [%]	19,20	12,20	22,60	3,20	8,30	5,40	11,40	1,90	23,40	19,51	7,69		
	Počátek tuhnutí [min]	160	140	185	14	8,6	160	140	180	14,0	8,5	169	163	min 60
	Doba tuhnutí [min]	205	190	225	10	4,9	206	185	230	13,0	6,3	216	210	
	Pevnost v tlaku po 2 dnech [N/mm ²]	27,3	25,0	30,0	1,5	5,6	32,1	29,0	33,7	1,3	4,0	27,30	31,90	min 20
	Pevnost v tlaku po 28 dnech [N/mm ²]	51,9	48,6	54,6	2,0	3,8	57,8	56,0	60,1	1,6	2,8	52,10	57,70	min 42,5 max 62,5
	Objemová stálost [mm]											1,00	1,00	max 10



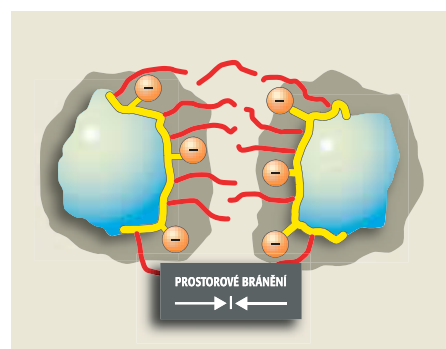
Obr. 1 Chování částic cementového tmele bez užití (super)plastifikační přísady

Fig. 1 Behavior cement paste particles without super plasticizer admixtures



Obr. 2 Princip působení přísad na sulfonátové bázi

Fig. 2 Work principle of admixtures on sulfonate basis



Obr. 3 Princip působení přísad na bázi polykarbonátů a polykarboxylátů

Fig. 3 Work principle of admixtures on basis of polycarbonates and polycarboxylates

Druhý nepříznivý vliv, který podstatně ovlivňuje trvanlivost konstrukce, je cyklická přeměna vody v led a opačně přímo ve struktuře betonu. Určitý objem vody po přeměně v led zaujímá asi o 9 % větší objem. Pokud tento proces nastává ve struktuře kapilár a pórů, dochází k vytvoření nepříznivé napjatosti, zejména je-li beton zcela saturován vodou. Příznivý účinek provzdušnění se projevuje v tom, že při procesu přeměny vody v led, který není okamžitý, dochází v celém objemu k vyrovnání hydrostatických tlaků právě expanzí soustavy voda-led do volných prostor kulových pórů.

Kritériem účinnosti provzdušňovací přísady na trvanlivost betonu je vzdálenost pórů od sebe navzájem, která má být menší než 250 μm , a vytvořené póry mají mít průměr 50 až 300 μm . Větší vzduchové póry nebo kapiláry snižují trvanlivost, podobně i větší vzdálenost mezi póry.

Objem kulových pórů, jejich velikost a distribuce ovlivňují tyto parametry:

- Druh a množství provzdušňovací přísady, která se dává jen ve velmi malém množství 0,05 až 0,2 % hmotnosti cementu. V čerstvém betonu se musí docílit provzdušnění v rozmezí 4,5 až 6,5 %.
- Vodní součinitel w ; při $w = 0,35$ je průměr pórů 10 až 100 μm , při $w = 0,75$ se póry zvětšují až na průměr 50 až 500 μm .
- Zmitost kameniva; zvýšením podílu písku 0,25 až 1 mm se zvyšuje obsah pórů i při stejné dávce přísady a stejné konzistenci.
- Potřebné množství pórů se snižuje se zvětšujícím se maximálním zrnem kameniva. Dle ČSN EN 206-1 se požaduje provzdušnění pro $D_{\text{max}} = 32$ mm 4 %, pro

16 mm 5 % a pro 8 mm již 6 %.

- Intenzivní vibrací se část pórů vytěsňují.
- Pevnost betonu v tlaku klesá se stupněm provzdušnění asi o 5 % na každé 1 % provzdušnění.
- Provzdušňovací přísada působí často plastifikačně, na 1 % pórů se snižuje množství vody asi o 2 % při stejné zpracovatelnosti.

Provzdušňovací přísady se podílí i na zlepšení zpracovatelnosti. V čerstvých betonech přísadou vnesený vzduch působí jako fiktivní kamenivo, srovnatelné s jemným pískem, které však nevyžaduje dodatečnou záměsovou vodu, ale naopak umožňuje objem vody snížit.

Plastifikační přísada je přísada, která při nezměněné konzistenci umožňuje snížení obsahu záměsové vody v čerstvém betonu, anebo při nezměněném obsahu záměsové vody zlepšuje konzistenci čerstvého betonu, popř. má oba tyto účinky současně.

V následujícím textu je stručně popsáno chování částic cementového tmele bez a při působení plastifikačních a superplastifikačních přísad.

Cementový tmel bez přidavku plastifikačních přísad

V nemletých slínkových minerálech jsou elektricky nabitě částice, jako například pozitivní vápenaté ionty a negativní křemičité ionty, uspořádány tak, že se jejich náboj vyrovnává.

Mletím se získávají nové povrchové plochy, na nichž se pak vyskytují nevykompenzované náboje. Proto mají cementové částice snahu se navzájem přitahovat působením elektrostatických sil a vytvářet aglomeráty. Voda do těchto aglomerátů

jen těžko proniká, takže cement není plně využit a k obalení zrn kameniva je tudíž k dispozici méně cementového tmele (Obr. 1).

Plastifikátory a superplastifikátory na bázi ligninosulfonátů, melaminsulfonátů a naftalensulfonátů

Tyto látky mají řetězec molekul s negativním nábojem. Části tohoto řetězce se váží na cementové částice s pozitivním nábojem. Zbýlý náboj je pak orientován směrem od zrna cementu, a tím způsobuje, že se zrna cementu nemohou k sobě přiblížit (elektrostatické odpuzování). V průběhu hydratace cementu jsou molekuly plastifikátorů a superplastifikátorů vznikajícími hydratačními produkty stále více obkloповány, až je účinek přísad zcela potlačen (Obr. 2).

Plastifikátory a superplastifikátory na bázi polyakrylátů či polykarboxylátů

Tyto molekuly jsou tvořeny hlavním řetězcem, který nese negativní náboj, jenž se váže na zrna cementu, a elektricky negativním postranním řetězcem, který je orientován do prostoru. Tyto řetězce jsou pohyblivé a rotují, takže vyplňují určitý prostor. Dvě přísadou takto obalená zrna se k sobě nemohou přiblížit. Jedná se o tzv. prostorové bránění (Obr. 3).

Jelikož dosah těchto postranních řetězců je větší než elektrostatický náboj předcházejících látek na bázi sulfonátů, trvá delší dobu, než jsou tyto řetězce vznikajícími hydratačními produkty obkloповeny, a proto plastifikační účinek působí delší dobu. Kromě toho se mohou postranní

řetězce v alkalickém prostředí betonu odštěpit a navázat se na hydratační produkty, čímž se účinnost přísady taktéž prodlouží.

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V naší práci jsme prokazovali, jak se vliv odchylek vlastností cementů způsobený běžnou variabilitou výroby cementu projevuje na vlastnostech betonu, ke kterému byla při míchání přidána plastifikační a provzdušňovací přísada (Tab. 2).

Předmětem našich zkoušek byl beton vyrobený podle předepsané receptury z cementů CEM I 42,5 R a CEM I 42,5 R-G z cementárny Mokrá, přičemž CEM I 42,5 R-G je jemněji mletý. Podstatou zkoušení bylo striktní dodržení jak navržené receptury betonu, tak i výrobního a zkušební postupu.

Na čerstvém betonu byly provedeny tyto zkoušky:

- Stanovení konzistence – zkouškou rozlití dle ČSN ISO 9812. Zkouška byla provedena v čase 0 minut, 30 minut a 45 minut po zamíchání.
 - Stanovení objemové hmotnosti dle ČSN ISO 6376: 1982.
 - Stanovení obsahu vzduchu v čerstvém betonu – tlaková metoda dle ČSN ISO 4848.
- Ztvrdlý beton byl podroben těmto zkouškám:
- Stanovení objemové hmotnosti dle ČSN ISO 6275: 1982.
 - Stanovení pevnosti v tlaku zkušebních těles dle ČSN ISO 4012.
 - Stanovení mrazuvzdornosti betonu dle ČSN 73 1322 po 50 a 100 zmrazovacích cyklech.

POSTUP PŘI VÝROBĚ A ZKOUŠENÍ BETONU

Betonová směs byla navržena tak, aby měla rozlití (450 ± 10) mm v čase ihned po zamíchání a obsah vzduchu činil (5 ± 0,5) % (Tab. 3).

Nadávkové pevné složky byly promíchány v míchačce po dobu 60 sec. Poté byla přidána voda, v níž byly předem rozmíchány použité přísady. Doba míchání pevných složek s vodou trvala 90 sec. Od okamžiku nadávkování vody do míchačky byl zaznamenán čas 0 minut. Poté byl obsah míchačky vyprázdněn a ihned byla vždy dvakrát provedena zkouška rozlitím pro stanovení konzistence v souladu s ČSN ISO 9812 v čase ihned po zamíchání (ozn. jako 0 min). Dále bylo prove-

Vlastnost	Beton z CEM I 42,5 R (ozn. R)					Beton z CEM I 42,5 R-G (ozn. G)				
	Průměr z 12 vzorků	Min.	Max.	Směrodatná odchylka	Variační koeficient	Průměr z 12 vzorků	Min.	Max.	Směrodatná odchylka	Variační koeficient
Rozlití 0 min. [mm]	409	355	480	34	8,20	401	345	453	29	7,20
Rozlití 30 min. [mm]	348	320	385	20	5,80	331	295	370	20	6,00
Rozlití 45 min. [mm]	330	310	375	19	5,70	319	280	340	16	5,00
Obsah vzduchu [%]	4,55	4,05	5,30	0,33	7,30	4,18	3,70	4,70	0,25	5,98
Přepočtená pevnost v tlaku po 7 dnech [MPa]	25,0	20,7	27,6	1,6	6,40	28,00	25,2	28,2	1,1	4,10
Přepočtená pevnost v tlaku po 28 dnech [MPa]	30,7	28,9	32,7	1,1	3,70	31,20	26,9	35,5	2,1	6,70
Objemová hmotnost čerstvého betonu [kg/m ³]	2400	2360	2420	18	0,70	2410	2380	2430	15	0,60
Objemová hmotnost betonu po 28 dnech [kg/m ³]	2440	2390	2480	27	1,10	2430	2340	2470	33	1,40
Součinitel mrazuvzdornosti po 50 cyklech [%]	97,5	90,7	111,6	6,6	6,80	101,0	91,2	109,2	6,2	6,10
Součinitel mrazuvzdornosti po 100 cyklech [%]	91,9	83,2	101,5	4,9	5,30	97,4	88,7	106,9	5,6	5,80

Tab. 4 Shrnutí výsledků zkoušek na betonech

Tab. 4 Conclusion of tests results

deno stanovení obsahu vzduchu v čerstvém betonu podle ČSN ISO 4848.

V čase 30 a 45 minut byla opět provedena zkouška pro stanovení konzistence čerstvého betonu metodou rozlití.

Betonová směs byla poté zhutněna ve formách o hraně 150 mm. Zhutnění bylo provedeno na vibračním stole v délce 30 sekund. Následující den byla zkušební tělesa odformována a do doby zkoušek uložena v klimatizovaném prostředí při teplotě 20 °C ± 2 °C a relativní vlhkosti 92 ± 5 %. Po 7 a 28 dnech od výroby zkušebních těles byla provedena zkouška stanovení pevnosti v tlaku podle ČSN ISO 4012 a objemové hmotnosti podle ČSN ISO 6376. Po 28 dnech byla na dalších sadách zkušebních těles provedena zkouška mrazuvzdornosti po 50 a 100 rozmrazovacích cyklech podle ČSN 73 1322.

VYHODNOCENÍ ZKOUŠEK

Výsledky zkoušek pro beton z CEM I 42,5 R, resp. CEM I 42,5 R-G, představují statistické soubory s označením R, resp. G, tab. 4. Tyto soubory byly vyhodnoceny jak jednotlivě, tak v případě pevnostní zkoušky i souhrnně, tj. hodnoty 28denních pevností betonů s ozn. R a s ozn. G byly sloučeny do společného statistického souboru. Zde byly jednotli-

vé pevnosti přepočteny podle střední objemové hmotnosti ztvrdlého betonu.

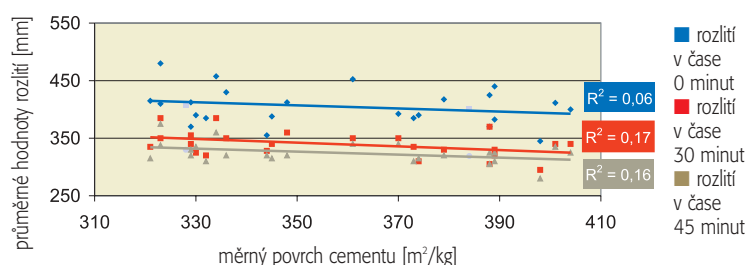
Sloučením jsme získali rozměrnější statistický soubor, který měl větší vypovídající hodnotu. Ke sloučení mohlo dojít proto, jelikož z pohledu normy EN 197-1 se jedná v obou případech o CEM I 42,5 R. Přepočtem pevností podle střední objemové hmotnosti ztvrdlého betonu jsme zohlednili vliv množství vneseného vzduchu na pevnost betonu.

Při vyhodnocování zkoušek jsme postupovali tak, že pomocí metody nejmenších čtverců jsme u porovnatelných datových řad vybrali nejvhodnější regresní křivku a její regresní koeficient. Překročila-li hodnota regresního koeficientu R² hodnotu 0,85, považovali jsme dané datové řady za vzájemně závislé. Extrémní hodnoty vyskytující se ve výsledcích zkoušek betonů jsme porovnávali s extrémními hod-

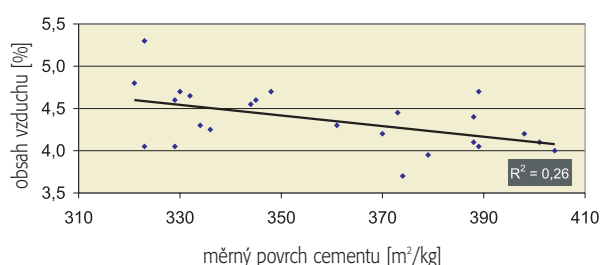
Tab. 3 Receptura betonu C30/35 na 1m³

Tab. 3 Concrete mix design C30/35 for 1m³

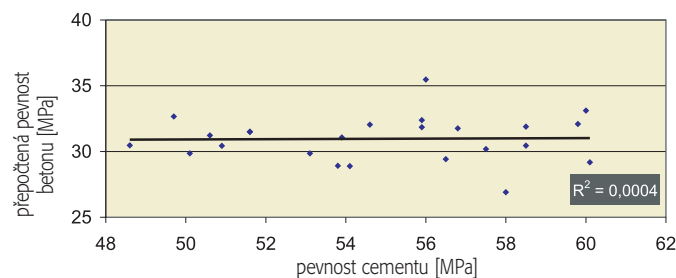
CEM I 42,5 R Mokrá	
CEM I 42,5 R-G Mokrá	400 kg
Voda	200 kg
Kamenivo:	
46 % 0-4 písek Bračice	805 kg
54 % 8-16 drť Želešice	1075 kg
Přísady:	
Chryso Air 0,16 %	0,64 kg
Chryso Fluid 122 1 %	4 kg



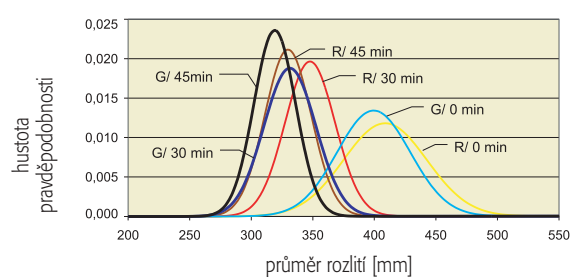
Graf 1 Závislost průměrných hodnot rozliti na měrném povrchu cementu
Graph 1 Dependence of average flow test value on cement surface



Graf 2 Závislost obsahu vzduchu na měrném povrchu cementu
Graph 2 Dependence of air volume on cement surface



Graf 3 Závislost pevnosti betonu na pevnosti cementu po 28 dnech normového zrání
Graph 3 Dependence of concrete strength on cement strength tests after 28 days of standard curing



Graf 4 Statistické vyhodnocení zkoušky rozliti
Graph 4 Statistical evaluation of flow tests

notami v chemickém složení cementů, neprojevuje-li se zde nějaká závislost. Abychom mohli uvažované statistické soubory mezi sebou porovnávat, bylo nutné vypočítat velikost variačního koeficientu. Překročil-li průměr velikosti variačního koeficientu velikost rozdílu průměrných hodnot jednotlivých statistických souborů, byl daný rozdíl považován za statisticky významný.

SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ ZKOUŠEK

Nebyla prokázána závislost mezi průměrnými hodnotami rozliti a kolísáním měrného povrchu cementu způsobených běžnou variabilitou výroby cementu.

Rozptyl hodnot rozliti se postupně v průběhu času snižuje (Graf 1). Zároveň roste koeficient regrese R^2 . S přihlédnutím k velikosti variačního koeficientu vykazují betony R i G v čase 45 minut stejné rozliti. Extrémní hodnoty výsledků zkoušky rozliti byly porovnávány s extrémními hodnotami v chemickém složení a ve fyzikálně-mechanických vlastnostech cementů – maximální hodnoty rozliti pro CEM I 42,5 R a minimální hodnoty rozliti pro CEM I 42,5 R-G byly u vzorků číslo 1, které jediné byly vyrobeny za použití sádrovce z Kobeřic. Žádné další závislosti nebyly nalezeny (Grafy 1 a 4).

Nebyla prokázána závislost mezi obsahem vzduchu v čerstvé betonové směsi a odchylkami měrného povrchu cementu způsobených běžnou variabilitou výroby.

Betony vyrobené z CEM I 42,5 R-G vykazují v průměru o 7 % nižší obsah vzduchu než betony z CEM I 42,5 R. Zjištěný rozdíl si vysvětlujeme tím, že jemněji mleté cementy potřebují díky svému většímu měrnému povrchu i větší dávku přísady, mají-li být zachovány ty samé vlastnosti, jaké jsou dosahovány u cementů „normálně“ jemně mletých. V chemickém složení ani ve fyzikálně-mechanických vlastnostech cementů CEM I 42,5 R však obdobná časová závislost nalezena nebyla a stejně tak u betonu z CEM I 42,5 R – G (Graf 2).

V úzkém rozmezí naměřených hodnot nebyla prokázána závislost pevnosti betonu na obsahu vzduchu.

Nebyla prokázána závislost mezi pevností betonu a rozptylem kolísání normových vaznostní cementů v tlaku po 28 dnech (Graf 3).

Průměrná pevnost betonů R i G se po 7 i 28 dnech normového zrání jen minimálně odlišuje a činí po 7 dnech 26 N/mm² a po 28 dnech 30 N/mm². Betony z CEM I 42,5 R-G vykazují vyšší rozptyl pevností než betony z CEM I 42,5 R.

Betony vyhověly zkoušce mrazuvzdornosti po 100 zmrazovacích cyklech.

Rozdíl průměrů součinitelů mrazuvzdornosti stanovených po 50 a 100 cyklech $T_{50} - T_{100}$ činí u betonu R 6 %, u betonu G je 4 %. Betony z CEM I 42,5 R-G vykazují nepatrně vyšší hodnoty součinitele mrazuvzdornosti po 100 zmrazovacích cyklech.

Podle výsledků provedených zkoušek můžeme prohlásit, že kolísání vlastností cementů CEM I 42,5 R a CEM I 42,5 R-G způsobené běžnou variabilitou výroby nemá významný vliv na vlastnosti betonů z nich vyrobených.

Je však třeba poukázat na to, že bylo odzkoušeno pouze 12 vzorků od každého z cementů, proto pro zevšeobecnění tohoto závěru je třeba vyhodnotit mohutnější statistický soubor. Také je třeba se na beton dívat jako na dvoukomponentní systém skládající se z kameniva a cementové matrice. To pak dovoluje posuzovat působení přísad na cementovou matici, jejíž vlastnosti mohou (ale nemusí) být ovlivněny odchylkami ve složení cementů. Zároveň se může sledovat spolupůsobení cementové matrice (modifikované užitými přísadami) a kameniva. Je zřejmé, že tento způsob ověřování požadovaných vlastností povede k přesnějším závěrům.

Příspěvek vznikl v rámci řešení grantu GAČR č. 103-01-1144 a GAČR č. 103-01-0814.

Ing. Rudolf Hela, CSc.
FAST VUT v Brně
e-mail: hela.r@fce.vutbr.cz
Petr Koukal
Českomoravský cement, a. s.
závod cementárna Mokrá
petr.koukal@cmcem.cz
Hana Kučerová
FAST VUT v Brně