



VLASTNOSTI PORTLANDSKÝCH CEMENTŮ SMĚSNÝCH

PERFORMANCE OF PORTLAND - COMPOSITE CEMENTS



RESUMÉ

Výroba cementů s více hlavními složkami nabývá mimořádného významu především z důvodu snižování emisí CO_2 a jejich vlivu na životní prostředí. Ekologické hledisko však není jediným důvodem. Portlandské cementy směsné jsou dobrou alternativou běžného portlandského cementu i z technického hlediska.

Rozsáhlý výzkum Výzkumného ústavu cementářského průmyslu (Düsseldorf) byl zaměřen hlavně na porovnání vlastností betonů z portlandského cementu a betonů s cementy obsahujícími vápenec nebo vysokopecní strusku. Díky možnosti kombinovat několik hlavních složek umožňuje portlandský směsný cement CEM II-M využít výhody i nevýhody jednotlivých hlavních složek. Takto lze dospět k vytvoření stabilních materiálových systémů. Přitom je třeba komplexně přihlížet jak k možnostem výroby, tak i požadovaným vlastnostem cementu. Pokud jde o vlastnosti, jedná se zejména o vliv cementu na vlastnosti betonu, např. na zpracovatelnost, nárůst pevností a především na trvanlivost.

Z pohledu výrobce cementu hraje svou roli jak poměr nákladů na výrobu vůči tržní ceně cementu, tak i vliv výroby cementu na životní prostředí. Ve vztahu k vlivu hlavních složek na trvanlivost betonu se uplatňují hlavně cementy, ve kterých jsou přítomny následující kombinace hlavních složek: buď vápenec/vysokopecní struska nebo vápenec/popílek. Dále budou ukázány vlivy uvedených kombinací na hutnost, nepropustnost, karbonataci, na odolnost k průniku chloridů a na odolnosti betonu proti zmrazování a rozmrazování, též v prostředí rozmrazovacích solí.

Přepřacovaný text přednášky z Technické a vědecké cementářské konference 2005 pořádané 27. a 28. října 2005 v Norimberku Německou cementářskou asociací. Autor: Dr-Ing. Ch. Müller, Výzkumný ústav cementářského průmyslu, Düsseldorf.

Cementářský průmysl je jedním z energeticky nejnáročnějších průmyslových odvětví. Výrobní náklady cementu tvoří z větší části náklady na energii; z ekonomického hlediska se proto musí vždy usilovat o snížení nároků na palivo a elektřinu. Tyto nároky jsou od devadesátých let 20. století posíleny i požadavky na ochranu životního prostředí.

Německý cementářský průmysl se společně s dalšími energeticky náročnými průmysly zavázal, že přispěje ke zlepšení ochrany našeho klimatu. Pokud jde o optimalizaci výrobních procesů v oblasti výpalu a mletí je však potenciál snížení emisí CO₂ prakticky vyčerpán. **Kromě možnosti využití druhotných paliv má proto nyní důležitý význam zaměření na výrobu cementů s více hlavními složkami** – např. na portlandské cementy směsné. U nich se omezují měrné emise CO₂ na tunu cementu tím, že podíl energeticky náročného slinku se sníží využitím dalších hlavních složek.

Evropská cementářská norma EN 197-1 specifikuje **celou skupinu portlandských cementů směsných CEM II (Tab. 1)**. Ta obsahuje kromě portlandského slinku **jedinou další hlavní složku**. Jsou to např. portlandské struskové cementy CEM II/A-S s 6 až 20 % hm. a CEM II/B-S s 21 až 35 % hm. granulované vysokopecní strusky.

Uvedená kategorie, která bude dále označována jen označením CEM II, zahrnuje dále následující druhy cementu:

- portlandský cement s křemičitým úletem,
- portlandský pucolánový cement,
- portlandský popílkový cement,
- portlandský cement s kalcinovanou břidlicí,
- portlandský cement s vápencem,

kteří mají všechny vedle slinku ještě jednu další složku.

Označení CEM II-M Portlandský směsný cement je určeno pro cementy, ve kterých jsou **kombinace dále uvedených hlavních složek**:

- granulovaná vysokopecní struska,
- křemičitý úlet,
- přírodní pucolán, např. tras,
- křemičitý nebo vápenatý popílek a
- vápencec.

Tento článek pojednává především o vlastnostech cementů CEM II-M, které obsahují ve funkci hlavních složek kombinace slinku, granulované vysokopecní strusky a vápence.

2/ TRH S CEMENTEM A REGULACE JEHO VYUŽITÍ

Přehled cementů vyráběných v Německu je uveden na **obr. 1**. Srovnání se stavem v Evropě provedlo CEMBUREAU, údaje jsou uvedeny na **obr. 2**.

Podíl na celkovém domácím prodeji v Německu byly přibližně: portlandský 58 %, vysokopecní asi 11 % a další cementy zhruba 1 %; na cementy CEM II zůstalo méně než 30 %. **V Evropě** byly poměry obrácené: 32 % portlandského cementu proti 55 % cementů CEM II.

V pevnostní třídě 32,5 panovala v Německu mezi portlandskými cementy a portlandskými cementy směsnými rovnováha. V Evropě byl v této pevnostní třídě hmotnostní podíl portlandských cementů směsných 70 %, podíl portlandského cementu jen 9 %.

V Německu vyrobených cementech **CEM II** bylo okolo 44 % portlandských struskových cementů a okolo 54 % portlandských cementů s vápencem. O zbylá 2 % tamního domácího prodeje se podělily portlandský pucolánový a portlandský cement s naftonosnou břidlicí, od roku 2004 též portlandské směsné cementy CEM II-M. **V Evropě** bylo v roce 2003 dle CEMBUREAU vyrobeno 35 % portlandských směsných cementů CEM II-M. Tyto cementy, které odpovídají EN 197-1, nebývají bohužel v některých částech Evropy pro některé stupně vlivu prostředí používány. Důvodem je buď nedostatek zkušeností, nebo jejich vyloučení v národních dodatcích k betonářské normě EN 206-1 – viz **tab. 2**, která uka-

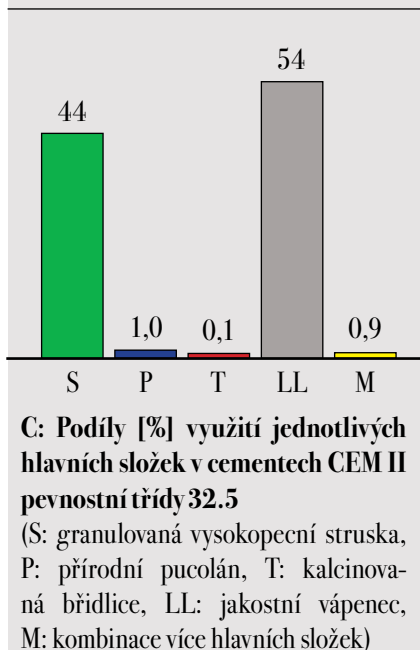
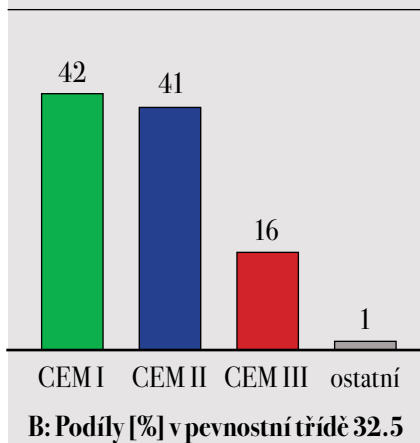
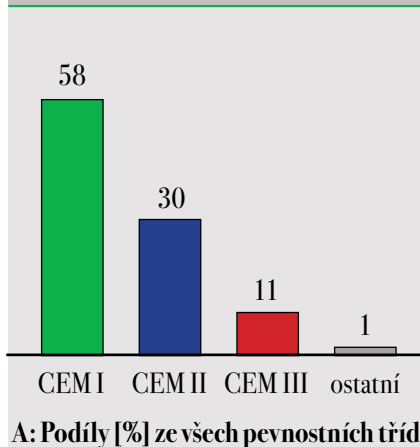
Tabulka 1: portlandské cementy směsné CEM II dle EN 197-1.

Druh CEM II	Označení	Obsah složek*) [% hm.]	Druhy složek: označení
■ Portlandský struskový cement	CEM II/A-S CEM II/B-S	6 až 20 21 až 35	granulovaná vysokopecní struska: S
■ Portlandský cement s křemičitým úletem	CEM II/A-D	6 až 20	křemičitý úlet: D
■ Portlandský pucolánový cement	CEM II/A-P/Q CEM II/B-P/Q	6 až 20 21 až 35	přírodní pucolán: P přírodní kalcinovaný pucolán: Q
■ Portlandský popílkový cement	CEM II/A-V/W CEM II/B-V/W	6 až 20 21 až 35	křemičitý popílek: V vápenatý popílek: W
■ Portlandský cement s kalcinovanou břidlicí	CEM II/A-T CEM II/B-T	6 až 20 21 až 35	kalcinovaná břidlice: T
■ Portlandský cement s vápencem	CEM II/A-L/LL CEM II/B-L/LL	6 až 20 21 až 35	vápencec s TOC ≤ 0,5: L vápencec s TOC ≥ 0,2: LL
■ Portlandský směsný cement	CEM II/A-M CEM II/B-M	6 až 20 21 až 35	S + D**) + P + Q + V + W + T + L + LL

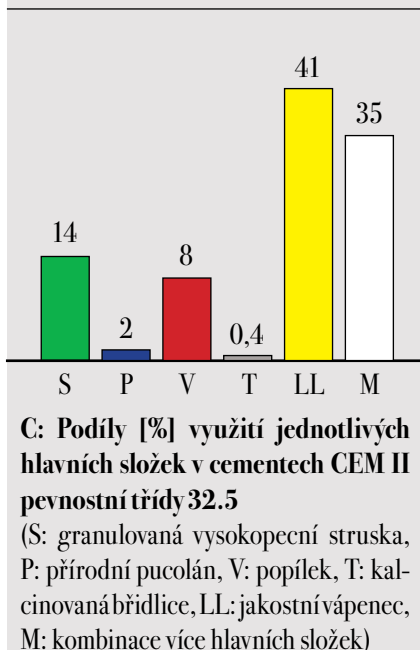
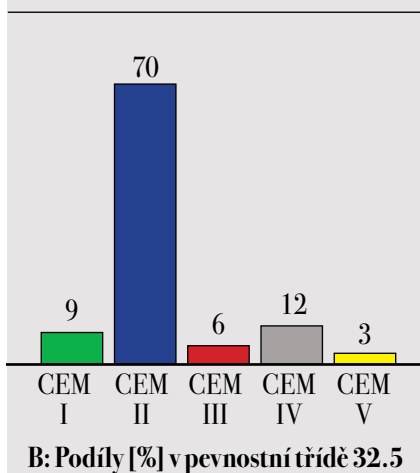
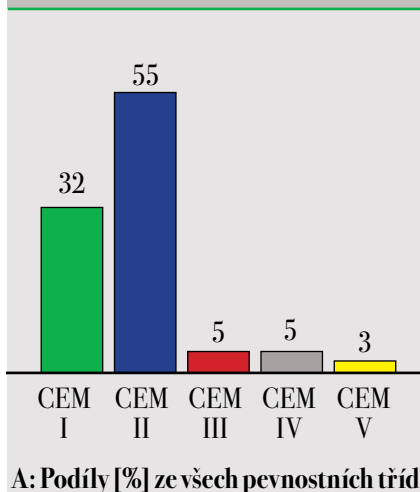
*) obsah jiných hlavních složek než portlandský slink

**) podíl 6 až 10 % hm.

Obrázek 1: Hmotnostní podíly [%] druhů cementů z prodeje na domácím trhu, období 2003/2004, podle Spolkové německé asociace cementářského průmyslu [1].



Obrázek 2: Prodej cementu [%] v zemích CEMBUREAU v roce 2003, zdroj: CEMBUREAU.



zuje přehled přípustného použití cementů v betonech pozemního stavitelství, které nejsou významně ohroženy působením chloridů.

Z hlediska přípustnosti použití jednotlivých druhů cementů jsou v některých národních normách, navazujících na EN 206-1, podstatné rozdíly. Důvodem jsou nejen tradiční rozdíly v oblasti trhu a stavební praxe, ale i různé filozofie tvorby předpisů. Například německá norma DIN 1045-2 zahrnuje všechny (27) základní druhy cementu a navíc množství portlandských směsných cementů CEM II-M. V jiných národních dodatcích k EN 206-1 se stanovují podmínky použití jen pro tradičně používané druhy cementu.

3/ PROČ CEMENTY CEM II-M?

Jaké jsou konkrétní argumenty ve prospěch portlandských směsných cementů CEM II-M? Z **technického hlediska** je třeba při vývoji nového cementu respektovat požadavky na vlastnosti vyráběného betonu, jako jsou dobrá zpracovatelnost, nárůst pevnosti a zvláště pak trvanlivost. Z **pohledu výrobce cementu** hrají přirozeně svou roli výrobní náklady a možné dopady na životní prostředí.

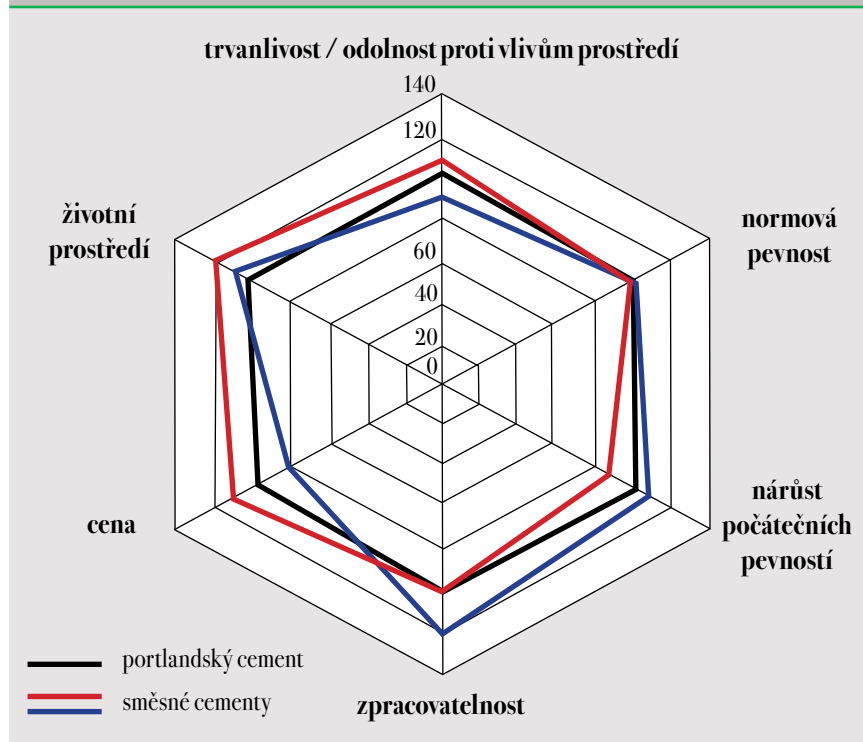
Z **technického hlediska** mívají cementy CEM I, CEM II a CEM III různé vlastnosti. Žádný cement, ani portlandský, není ideálním řešením pro všechny aplikace. Toto je schematicky znázorněno na **obr. 3** pro dva druhy cementu s několika hlavními složkami, včetně porovnání s referenčním portlandským cementem (černá čára). Cementy CEM II-M umožňují vyvážit výhody a nevýhody jednotlivých hlavních složek jejich správnou kombinací. Takto lze vytvořit mnohem stabilnější materiálové systémy. Kromě snížení emisí CO₂ a šetření přírodních zdrojů lze tak optimalizovat i vliv cementů na vlastnosti z nich vyráběných betonů.

4/ VLASTNOSTI PORTLANDSKÝCH SMĚSNÝCH CEMENTŮ

4.1 VŠEOBECNĚ

Ve Výzkumném ústavu cementářského průmyslu – v několika případech za spolupráce FEhS (Institutu stavebních

Obrázek 3: Schematické zobrazení vlivu typu cementu na rozličné parametry [5]; 100 % – parametr odpovídající betonu s portlandským cementem.



materiálů) – byly provedeny série výzkumů týkající se **trvanlivosti betonů vyrobených z CEM II-M cementů**. Cílem těchto výzkumů bylo poskytnout průkazné výsledky pro takovou úpravu německých normativních předpisů, která by spolu se získáváním praktických zkušeností umožnila omezit rozsah individuálních schvalovacích procesů.

4.2 PÓROVITOST A ROZLOŽENÍ VELIKOSTÍ PÓRŮ

Škodlivé látky pronikají do konstrukce pórovým systémem a trvanlivost všech stavebních materiálů na bázi cementu je tedy významně ovlivněna pórovitostí a rozložením velikostí pórů. Pro odolnost betonu proti vlivům prostředí má proto mimořádný význam i jeho **nepropustnost**.

Na **obr. 4** jsou uvedeny **relativní hodnoty** vztahující se k hodnotám charakterizujícím pórovitost cementového tmelu vyrobeného z portlandského cementu. Znázorňují jak celkovou pórovitost, tak i podíl pórů $< 0,01 \mu$ (tj. gelové póry) a podíl pórů $> 0,1 \mu$, které například ovlivňují průnik CO_2 . Uvedené hodnoty závisejí na vlastnostech cementu, tedy i na jeho hlavních složkách.

V provedeném výzkumu byla tvrdnou-

cí cementová kaše uložena po dobu 90 dní ve vodě. U cementu s vysokým obsahem vápence je mikrostruktura tvrdnoucí cementové kaše poněkud hrubší. Při řádném ošetřování lze zmenšit poloměr pórů použitím latentně hydraulických či pucolánových hlavních složek, např. použitím vysokopecní strusky nebo popílku. Nežádoucí vliv samotného vápence lze

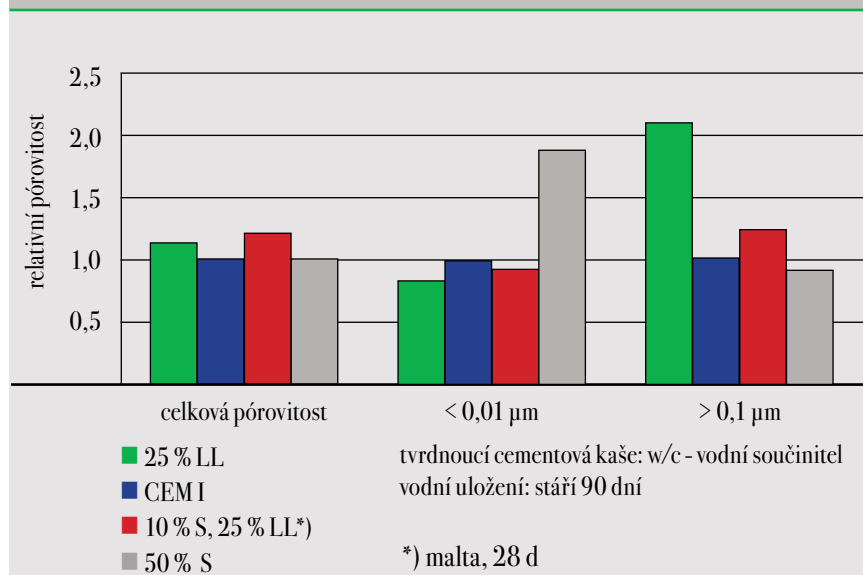
částečně vyrovnat jeho kombinací s granulovanou vysokopecní struskou. Na **obr. 4** je tento vliv ilustrován následujícími relativními hodnotami pórovitosti v oblasti $> 0,1 \mu$: hodnota pro cement CEM II/B-M (S-LL) obsahující 25 % hm. vápence a 10 % hm. granulované vysokopecní strusky (kolem 0,75) je značně menší než hodnota odpovídající cementu s 25 % hm. vápence (kolem 2,1). Ukazuje se výhodnost vyššího podílu strusky než podílu vápence. Uvedené změny pórové struktury mohou vyšší nebo nižší měrou ovlivnit trvanlivost betonu.

4.3 KARBONATACE

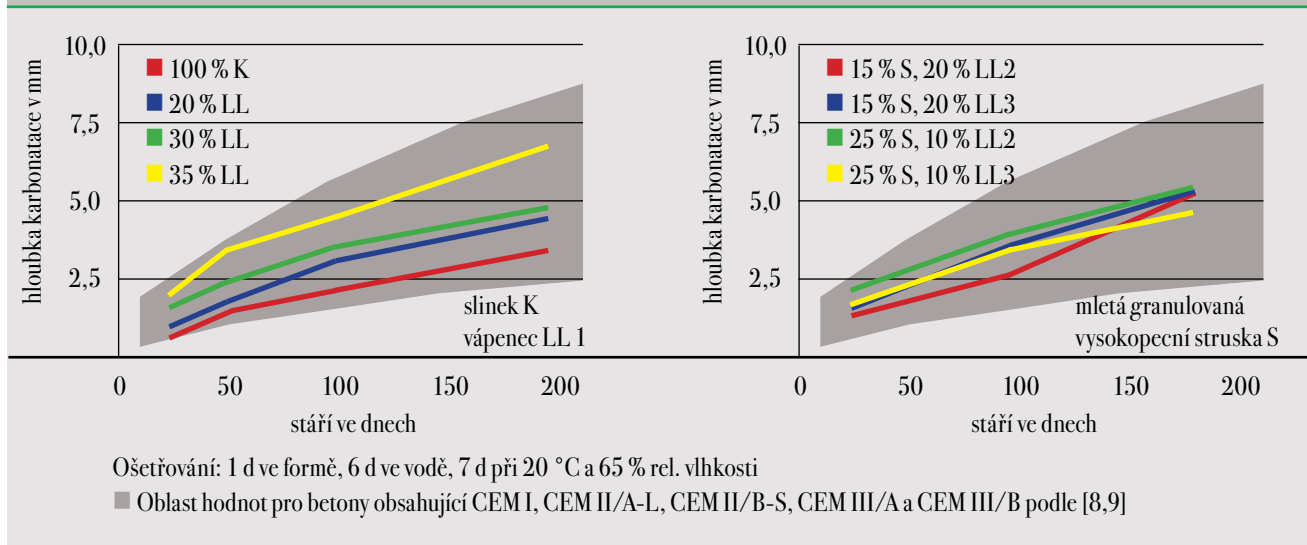
Rychlost a hloubka karbonatace závisí nejen na vodním součiniteli (hlavní vliv), ale i **na obsahu slinku**. Při laboratorních zkouškách při teplotě 20°C a při relativní vzdušné vlhkosti 65% je proto hloubka karbonatace betonu vyrobeného z **cementů s vysokopecní struskou** poněkud větší než u betonu vyrobeného z portlandského cementu. Toto dokumentuje **obr. 5**, na kterém horní mez vyznačené oblasti odpovídá betonu vyrobenému z vysokopecního cementu.

Výsledek laboratorních zkoušek však nelze přeceňovat. V soulasu s praxí je při všech vlivech prostředí XC (viz **tab. 2**) v naprosté většině zemí dokonce povoleno i použití vysokopecního cementu CEM III/B, který obsahuje až 80 % hm. gra-

Obrázek 4: Relativní pórovitost [1] a rozložení velikostí pórů tvrdnoucí cementové kaše vyrobené z různých cementů obsahujících vápence (LL) a granulovanou vysokopecní strusku (S) ve srovnání s tvrdnoucí cementovou kaší vyrobenou z portlandského cementu CEM I. Data: [6, 7].



Obrázek 5: Časový průběh hloubky karbonatace v betonech s vodním součinitelem 0,65 a s obsahem cementu 260 kg/m³ vyrobených z portlandského cementu a portlandských cementů s vápencem (nalevo) a různých portlandských směsných cementů (napravo).



nulované vysokopecní strusky. U venkovních stavebních prvků, u kterých je vyšší nebezpečí koroze výztuže, je totiž vlivem větší vlhkosti betonu hloubka karbonatace proti výše uvedeným laboratorním zkouškám menší. U vnitřních stavebních prvků je sice vlivem menší vlhkosti betonu hloubka karbonatace větší, pro malou vlhkost betonu se však současně snižuje riziko koroze výztuže. Vše uvedené platí v soulasu s EN 206-1 pro předpokládanou životnost konstrukce 50 let.

Ve srovnání s betonem z portlandského cementu se hloubka karbonatace zvětšuje i s rostoucím obsahem vápence.

Hodnoty pro 35 % hm. vápence však zůstávají v rozmezí těch cementů, které jsou povoleny pro neomezené použití při vlivech prostředí XC, tedy tam, kde je riziko koroze výztuže v důsledku karbonatace betonu. Při kombinaci vápence (10 až 20 %) a granulované vysokopecní strusky (15 až 25 %) vykazují betony s jednotným obsahem slinku (65 %) určité zvýšení hloubky karbonatace. Podobně jako u cementů s vysokopecní struskou je z hlediska použití v praxi toto zvětšení málo významné.

Podobné závěry platí pro portlandské směsné cementy, např. pro CEM II/B-M (S-V) a CEM II/B-M (V-LL).

4.4 ODOLNOST VŮČI PŮSOBENÍ CHLORIDŮ

V praxi se betony často dostanou do styku se zemínou nebo s vodou obsahují-

cí chloridy. Příkladem jsou silniční mosty, podlahy mnohopodlažních parkovišť a námořní konstrukce. Rozdílnost vlivu jednotlivých cementů na odolnost proti působení chloridů se projevuje jak v praxi, tak i při laboratorních testech a to včetně vlivu ošetřování. Ke značnému nárůstu odolnosti vůči chloridům, tedy ke snížení koeficientu difúze chloridových iontů přispívá někdy díky zjemnění pórového systému použití cementů s obsahem granulované vysokopecní strusky [10]. **Tento kladný vliv** se zcela zřetelně objevuje při použití cementů **CEM III/A s obsahem alespoň 40 % hm. granulované vysokopecní strusky**. V souladu s německými směrnici [11] lze proto při použití cementů CEM III/A a CEM III/B v masivních betonových konstrukcích a při stupních vlivu prostředí XD3 a XS3 zvýšit maximální povolené hodnoty vodního součinitele z 0,45 na 0,50.

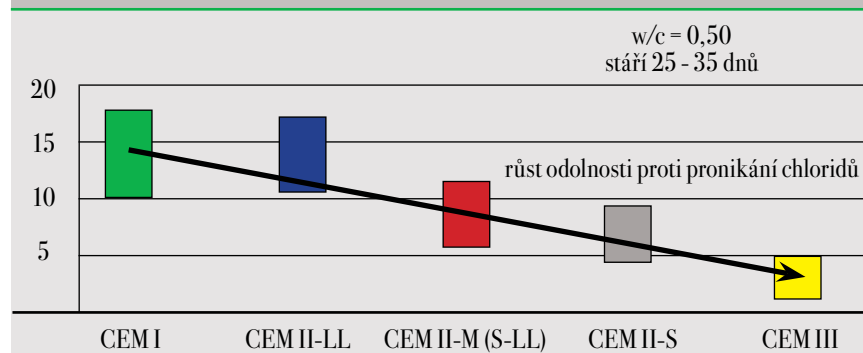
Zrychleným testem získané koeficienty migrace chloridů zobrazuje **obr. 6**. Při zvoleném složení betonu a u betonu z portlandského cementu je rozsah hodnot mezi 10 až 18 x 10⁻¹² m²/s. Při použití vysoce síranovzdorných portlandských cementů mohou být hodnoty poněkud vyšší.

U **portlandských cementů s vápencem** je, podobně jako u portlandského cementu, rozsah hodnot závislý na podílu vápence. U **portlandských směsných cementů** obsahujících vápence a granulovanou vysokopecní strusku jsou sledované hodnoty na dolní hranici portlandských cementů a portlandských struskových cementů.

4.5 ODOLNOST PROTI ZMRAZOVÁNÍ A ROZMRAZOVÁNÍ

Portlandské cementy lze použít ve všech klimatických podmínkách uvažovaných evropskou betonářskou normou

Obrázek 6: Součinitel migrace chloridů $D_{CL,M}$ v betonech s vodním součinitelem 0,50 a s obsahem cementu 320 kg/m³ - ošetřování ve vodě.



**Tabulka 2: Použitelnost cementů dle EN 197-1 v betonech pro stupně vlivu prostředí dle DIN EN 206-1.
Porovnání s některými národními přílohami.
Příklad pro venkovní stavební prvky a nevýznamné působení chloridů. [2, 3, 4] ¹⁾**

Země	Stupně vlivu prostředí	min f_c	max $(w/c)_{eq}$	min c kg/m ³	
■ Rakousko	XC1+XF1	--	0,55	300	
■ Belgie	EE3	C30/37	0,5	320	
	(XC4+XF1)	C30/37	0,5	320	
■ Česko	XC1 až XC4 nebo XF1	C30/37	0,50 nebo 0,55	300	
■ Dánsko	(XC2, XC3, XC4, XF1, XA1)	C25/30	0,55	150 ³⁾	
■ Finsko	XC3 nebo XC4, XF1	C25/30	0,6	250 ⁵⁾	
■ Německo	XC4 + XF1	C25/30	0,6	280	
■ Irsko	XC2 nebo XC4 + XF1	C30/37 pro XC4 + XF1	0,55	320	
■ Itálie	XC1	C25/30	0,6	300	
	XC2 + XF1	C32/40	0,5	320	
■ Lucembursko	XC4 + XF1	C25/30	0,6	280	
■ Nizozemí	XC3	--	0,55	280	
	XC4 + XF1	--	0,5	300	
■ Norsko	XC4 + XF1	--	0,6	250	
■ Portugalsko	XC4 + XF1 ¹⁾	C30/37	0,6	280	
	XC4 + XF1 ¹⁾	C30/37	0,55	300	
■ Slovinsko	XC4 + XF1	n	n	n	
■ Švédsko	XC4, XF1	--	0,55	300	
■ Švýcarsko	XC4 + XF1	--	0,5	300	
■ Spoj. království	XC3/4 + XF1	C28/35	0,6	280	

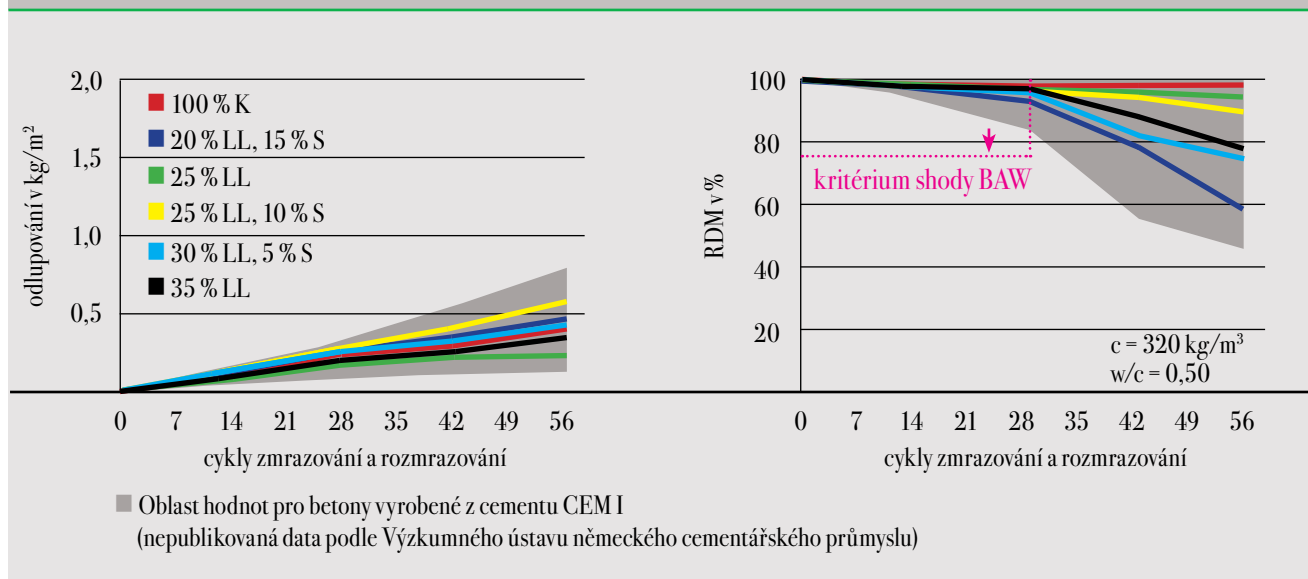
Vysvětlivky k tabulce 2:

x	povoleno
(x)	povoleno s omezením
	neuvedeno
•	není povoleno
n	nejsou informace
1)	Pro složitosti národní přílohy bez záruky na úplnost a na správnou interpretaci všech specifikací
2)	Cementy je třeba otestovat
3)	Min. obsah filerů: 375 kg/m ³
4)	Minimální pevnostní třída 42,5
5)	Pro XC4 minimální obsah cementu 270 kg/m ³
6)	Pro XC4 cement nepovoleno
7)	Pouze cementy CEM II/A-M (S-D; S-T; S-LL; D-T; D-LL; T-LL; S-P; S-V; D-P; D-V; P-V; P-T; P-LL; V-T; V-LL) a cementy CEM II/B-M (S-D; S-T; D-T; S-P; D-P; P-T; S-V; D-V; P-V; V-T)
8)	Pouze CEM IV/B (P), hlavní složkou smí být jen tras vyhovující DIN 51043 při maximálním obsahu až 40% (m/m)
9)	Pouze CEM V/A (S-P) a CEM V/B (S-P) a platné jen pro tras odpovídající DIN 51043 a jeho podíl do 40 % hm.
10)	Pouze CEM II/A-M (S-D; S-T; S-LL; S-V)
11)	Domněnka
12)	Podíl slinku alespoň 50 % hm.
13)	Pouze CEM II A-M (D-LL)

	CEM I	CEM II																CEM III			CEM IV		CEM V		
		S		D	P/Q		V		W		T		LL		L		M								
		A	B	A	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	C	A	B	A	B
	x	x	x	x			x	x	(x) ²⁾						x	(x) ²⁾		(x) ²⁾	x	(x) ²⁾					
	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				
	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				
	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				
	(x) ⁴⁾						(x) ⁴⁾	(x) ⁴⁾					(x) ⁴⁾			(x) ⁴⁾									
	x	x	(x) ⁶⁾	x			x	(x) ⁶⁾					x ⁶⁾				x	(x) ⁶⁾							
	x	x	x	x	x	x	x	x	•	•	x	x	x	x	•	•	(x) ⁷⁾	(x) ⁷⁾	x	x	•	•	(x) ⁸⁾	(x) ⁹⁾	(x) ⁹⁾
	x									x															
	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	x	x	x	x		x					x		x				(x) ¹⁰⁾		x	x					
	x	x	x				x	x			x	x							x	x					
	x	x	x				x	x			x	x							x	x					
	x	x		x			x						x		x										
	x	x		x	x		x		x	x	x		x		x		x								
	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	(x) ¹²⁾			(x) ¹²⁾	(x) ¹²⁾	(x) ¹²⁾	
	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	x ⁴⁾	x ⁴⁾		x ⁴⁾			x ⁴⁾						x ⁴⁾				(x) ⁴⁾		x ³⁾	x ³⁾					
	x	x		x									x				(x) ^{4,13)}								
	x	x	x	x		x	x						x	x	x	x			x	x					



Obrázek 7: Odpady odlupováním dle testu CIF (vlevo) a relativní dynamický modul pružnosti RDM (vpravo) betonů vyrobených z portlandského cementu, portlandských cementů s vápencem a portlandských směsných cementů.



EN 206-1. Totéž platí podle DIN 1045-2 pro portlandské struskové cementy a pro vysokopecní cementy CEM III/A a CEM III/B (v případě stupně vlivu prostředí XF4 je u tohoto cementu mez obsahu strusky snížena z 80 % na 50 %). Použití těchto cementů je schváleno pro všechny prvky vystavené mrazu bez ohledu na obsah strusky či nasycení betonu vodou.

Výsledky zkoušek betonů s různými druhy cementu jsou znázorněny na **obr. 7** a to v závislosti na počtu zmrazovacích cyklů. Levý obrázek ilustruje výsledky odolnosti betonu proti zmrazování a rozmrazování testem **CF**, tedy hodnoty odpadu odloupeného betonu [kg/m²]. Podle tohoto testu vyhověly vedle portlandského cementu i cementy CEM II obsahující alespoň 65 % portlandského

slínku, vždy spolu s vápencem (až 35 %), případně s vysokopecní granulovanou struskou (až 15 %). Právý obrázek ilustruje vliv zmrazování a rozmrazování na porušení vnitřní struktury zjištěný testem **CIF**. Hodnocen je relativní dynamický modul pružnosti.

Podle směrnice BAW (Spolkového ústavu pro vodní stavby) [12] se po 28 zmrazovacích cyklech povoluje pro stupeň vlivu prostředí XF3 pokles dynamického modulu pružnosti nejvýše o 25 %, povolují se tedy hodnoty relativního modulu pružnosti alespoň 75 %. Nejvyšší odolnost prokázal beton s portlandským cementem. Výše uvedenému kritériu vyhověly i ostatní zkoušené cementy. Tím byly potvrzeny dřívější mnohadesetileté praktické zkušenosti se struskoport-

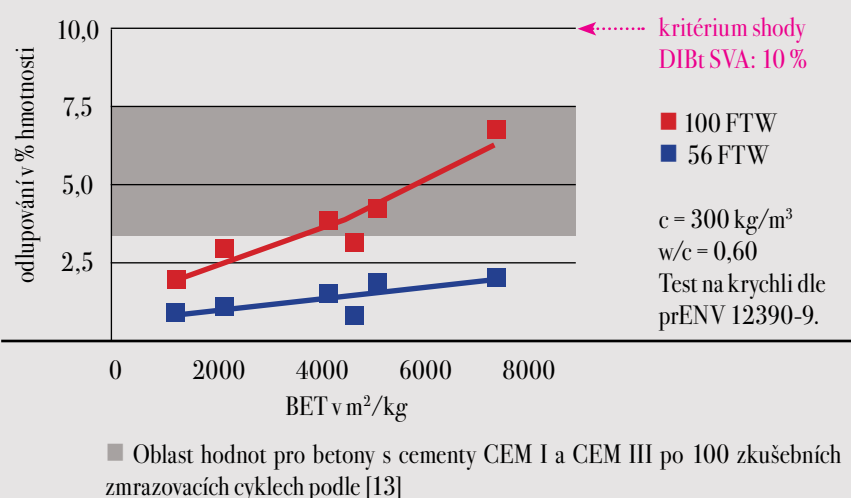
landskými a vysokopecními cementy. U cementů s vyšším obsahem vápence by bylo třeba uvedenými laboratorními testy zjistit vliv vlastností vápence.

Tabulka 3 ukazuje typické hodnoty **sedmi vápencových mouček** s obsahem CaCO_3 mezi 83 a 98 % hm. Všechny vápence beze zbytku splnily požadavky cementářské normy DIN EN 197-1. Navíc byl zkoušen měrný povrch BET; zjištěno rozmezí 12 000 až 74 000 cm^2/g . Uvedený ukazatel může být užít jako míra kontaminace vápence vedlejšími složkami, a proto vhodně doplňuje ostatní standardní charakteristiky, zejména obsah CaCO_3 , obsah organického uhlíku TOC a obsah jílovitého podílu stanovený zkouškou methylenovou modří. Vztah mezi obsahem jílovitého minerálu a plochy povrchu

Tabulka 3: Vlastnosti vápencových mouček a portlandských cementů s vápencem CEM II/B-LL.

Vlastnosti vápence		Vápence LL						
		1	2	3	4	5	6	7
■ CaCO_3	% hm.	98,6	91,6	96,6	93,2	83,1	83,7	87,7
■ TOC	% hm.	0,013	0,074	0,013	0,081	0,081	0,067	0,093
■ Hodnota methylenové modře	g/100 g	0,03	0,40	0,13	0,27	0,33	0,23	0,33
■ Měrný povrch dle Blaina	cm^2/g	7000	10000	7000	5400	5450	5150	4400
■ Hodnota BET	cm^2/g	11880	50590	24360	65780	42410	47510	73810
CEM II/B s obsahem 35 % LL, měrný povrch slínku a síranu vápenatého: 5200 cm^2/g								
■ Vodonáročnost	% hm.	30,5	33,5	30,5	31,0	31,0	32,0	32,5
■ Pevnost v tlaku	2 d	32,5	35,5	33,4	31,8	32,0	32,8	31,7
	28 d	47,0	52,5	46,6	46,9	46,5	48,0	46,5

Obrázek 8: Závislost odpadů odloupením na měrném povrchu BET.
Zkoušky metodou „na krychli“ betonů z portlandských cementů s vápencem obsahujících 35 % hm. vápence.



BET je znám z předchozích studií [13, 14]. Vápencová moučka byla použita k výrobě portlandských cementů s vápencem třídy 32,5 R s obsahem vápence 35 % hm. Hlavní vlastnosti jsou uvedeny v tab. 3.

Na obr. 8 jsou uvedeny výsledky zkoušek odlupování na krychli dle prENV 12390-9:2002 při použití cementu CEM II/B-LL 32,5 R s obsahem 35 % hm. vápence. Měrné hodnoty odpadu [% hm.] betonu s vodním součinitelem 0,60 jsou zde vyneseny jako funkce měrného povrchu BET [% hm.] vápencové moučky. Zkouška na krychli je závažná pro její využívání Německým ústavem stavební techniky DIBt. Při složení betonu

podle požadavků DIN 1045-3 existuje dobrý obecný vztah mezi pevností betonu v tlaku a uvedenou zkouškou stanovené hodnoty odloupeného materiálu (viz např. [6]).

Cementy, které vyhověly uvedeným zkouškám a kritériím, se osvědčily i v praxi. Při obsahu vápence do cca 25 % hm. přitom, pokud je známo, nezáleží na druhu vápence [13]. Při vyšších podílech vápence však k ovlivnění odolnosti betonu kontaminací dochází, viz výše uvedená závislost na měrném povrchu BET, který slouží jako ukazatel kontaminace vápence vedlejšími složkami. Pro účely kontroly shody obsahuje obr. 8 i oblasti přípustných hodnot

odpadů betonu po 100 cyklech zmrazování a rozmrazování. Kromě horní meze 10 % stanovené DIBt jsou zde i meze oblasti určené Výzkumným ústavem pro betony z portlandského a vysokopecního cementu. U vápence s větší kontaminací vedlejšími složkami jsou sice odpady betonu větší, zůstávají však pod horní mezí uvedené oblasti. Použití cementů s vysokým podílem vápence pro betony vystavené mrazu vyžaduje však ověření. Při kladném výsledku ověření měl by být stanoven požadavek na jakost vápence.

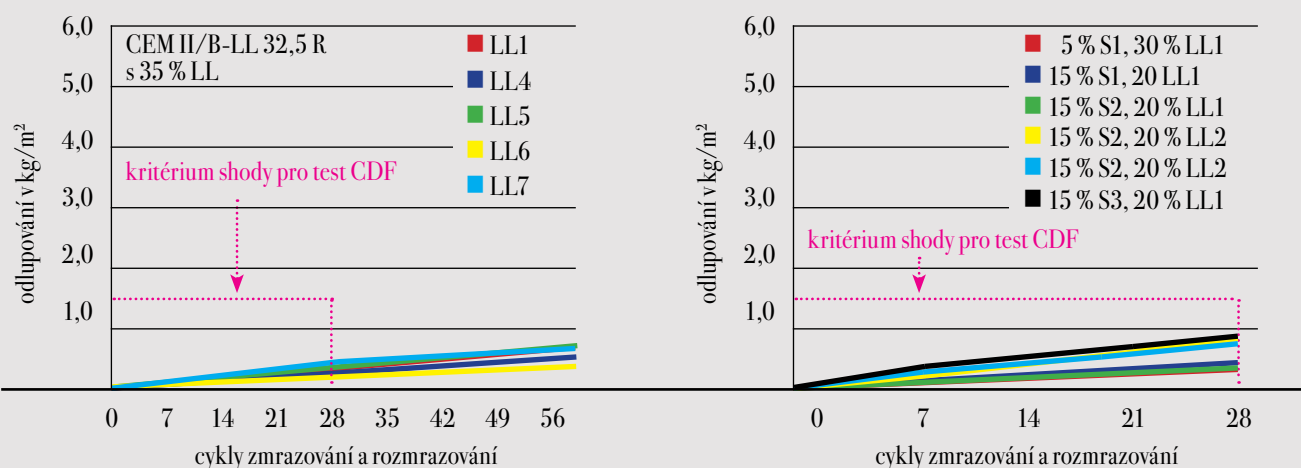
4.6 ODOLNOST PROTI ZMRAZOVÁNÍ A ROZMRAZOVÁNÍ V PROSTŘEDÍ ROZMRAZOVACÍ SOLI

Betony s portlandskými směsnými cementy s granulovanou vysokopecní struskou a s vápencem, které obsahují alespoň 65 % hm. slinku, mohou mít vysokou mrazuvzdornost i v prostředí rozmrazovací soli. U betonů vyrobených z portlandských směsných cementů byla tato mrazuvzdornost zkoušena testem CDF (obr. 9). Při požadavku na vysokou odolnost mají být po 28 cyklech zmrazování a rozmrazování odpady odloupeného materiálu nejvýše 1500 g/m^2 . Na levém grafu obr. 9 jsou uvedeny výsledky zkoušek provzdušněného betonu vyrobeného z cementu CEM II/B-LL 32,5 R s obsahem 35 % hm. vápence; odpady jsou velmi nízké. Hluboko pod hodnotou výše uvedeného kritéria jsou i odpady po 56 cyklech zmrazování a rozmrazování.

Obrázek 9: Odpady odlupování při zkoušce CDF na provzdušněných betonech s vodním součinitelem 0,50 a s obsahem cementu 320 kg/m^3 . Použité cementy:

Levý graf: použit portlandský cement s vápencem obsahující 35 % vápence LL.

Pravý graf: použity různé portlandské směsné cementy CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R.



Pravý graf **obr. 9** ukazuje hodnoty odpadů z betonů vyrobených z portlandských směsných cementů. Kromě portlandského slinku (65 % hm.) obsahovaly tyto cementy tři druhy vysokopecní granulované strusky a dva druhy vápenců. Z kapacitních důvodů bylo provedeno jen 28 zmrazovacích cyklů. Odpady odloupenutého betonu byly opět značně nižší než 1500 g/m². Uvedené betony proto mohou být použity i při stupni vlivu prostředí XF4.

5/ ZÁVĚRY A VÝHLED

Cementy s více hlavními složkami a s omezeným obsahem slinku významně přispívají k ochraně životního prostředí, a to jak pro hospodárnost jejich výroby, tak i pro efektivnost jejich použití. Tyto cementy jsou vhodnou alternativou portlandských cementů i z technického hlediska. Při vhodné kombinaci hlavních složek mohou portlandské směsné cementy CEM II-M přispět i ke zvýšení materiálové stability. Nejefektivnější je kombinace vápence a granulované vysokopecní strusky. Jako důkaz posloužily příklady využitelnosti uvedených cementů v různých prostředích (při působení karbonátace, chloridů, mrazových cyklů).

V Německu by se měly průmyslově uplatnit hlavně portlandské směsné cementy CEM II-M (S-LL), jejichž hlavními složkami jsou portlandský slínek, granulovaná vysokopecní struska a vápenc. Podobné výsledky lze očekávat, když ve funkci hlavních složek bude použita kombinace vápence a popílku odpovídajícího normě EN 450.

Výzkumný ústav cementářského průmyslu se v budoucnu zaměří i na doposud v Německu převážně nepoužívané cementy CEM IV a CEM V. Cílem výzkumů bude zjistit dosažitelnou pevnost a trvanlivost z nich vyrobených betonů.

**Tento odborný materiál
byl dán k dispozici
Německou cementářskou asociací,
které tímto děkujeme.**

**Odborný překlad a úprava
Ing. Alain Štěrba.**

6/ LITERATURA:

- [1] Zahlen und Daten 2004-2005. Bundesverband der Deutschen Zementindustrie.
- [2] Survey of national provisions. Final draftrev2 (Document CEN/TC 104 N0687). 13 October 2005 – not published.
- [3] DIN 1045-2: Concrete, reinforced and prestressed concrete structures. Part 2: Concrete – Specification, properties, production and conformity – Application rules for DIN EN 206-1.
- [4] European Construction in Service of Society (ECOServe) Cluster 2: Production and application of blended cements (www.eco-serve.net/publish/cat_index_16.shtml).
- [5] Kühn, A.; Lang, E.; Müller, C.; Schnedl, G.: Cements with several main constituents – A durable solution. Presentation given at VDZ Seminar „Cement chemistry“, Düsseldorf, April 2005.
- [6] Müller, C.; Lang, E.: Durability of concrete made with Portlandlimestone and Portland-composite cements CEM II-M (S-LL). beton 55 (2005), No. 3, pp. 131–138; No. 4, pp. 197–202; No. 5, pp. 266–269 (in German).
- [7] Schießl, P.; Meng, B.: Neuer Ansatz zur Charakterisierung der Porenstruktur zementgebundener Baustoffe im Hinblick auf die Interpretation von Transportvorgängen. Aachen: Institut für Bauforschung, 1998. – Forschungsbericht Nr. F 526.
- [8] Manns, W.; Thielen, G.; Laskowski, C.: Bewertung der Ergebnisse von Prüfungen zur bauaufsichtlichen Zulassung von Portlandkalksteinzementen. beton 48 (1998), No. 12, pp. 779–784.
- [9] Stark, J.; Wicht, B.: Dauerhaftigkeit von Beton. – Weimar: Hochschule für Architektur u. Bauwesen Weimar, 1995. – (Hochschule für Architektur u. Bauwesen Weimar, Schriften 100). – ISBN 3-86068-041-2.
- [10] Brodersen, H. A.: Transportvorgänge verschiedener Ionen im Beton. Beton-Informationen 23 (1983), H. 3, pp. 36–38.
- [11] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton; DAfStb: Richtlinie Massige Bauteile aus Beton, Ausgabe März 2005.
- [12] Bundesanstalt für Wasserbau (BAW): Merkblatt „Frostprüfung von Beton“ – Ausgabe Dezember 2004
- [13] Siebel, E.; Sprung, S.: Einfluss des Kalksteins im Portlandkalksteinzement auf die Dauerhaftigkeit von Beton. In: Beton 41 (1991), Nr. 3, S. 113–117; Nr. 4, S. 185–188
- [14] Sprung, S.; Siebel, E.: Assessment of the suitability of limestone for producing portland limestone cement (PKZ). In: Zement-Kalk-Gips 44 (1991), Nr. 1, S. 1–11
- [15] (Norm-Entwurf) DIN EN 12390-9, Ausgabe:2002-05. Prüfung von Festbeton – Teil 9: Frost- und Frost-Tausalzswiderstand; Abwitterung; Deutsche Fassung prEN 12390-9:2002.

7/ POZNÁMKY

MATERIÁL PŘIPRAVILY



Výzkumný ústav maltovin
Praha, spol. s r.o.

SVAZ **VÝROBCŮ
CEMENTU** ČR

VLASTNOSTI PORTLANDSKÝCH CEMENTŮ SMĚSNÝCH