

# Vysoce odolný beton s popílkem jako přísadou do betonu

Dirk Brandenburger, Herten, und Roland Hüttl, Berlin

V rámci výzkumného projektu „Zkoumání vlastností a působení jemných popílků“ bylo prokázáno, že použitím jemných popílků jako přísad do betonu je možné vyrobit beton hutnější a odolnější. Při zkoumání odolnosti proti chloridům a síranům i při stanovení odolnosti proti rozmrazovacím prostředkům byly u směsí s jemnými popílkami ve srovnání se směsí s mikrosilikou docíleny podobné, nebo i lepší výsledky, když byly obě přísady použity v povoleném dávkování. Obzvláště byla prokázána zřetelně vyšší odolnost proti rozmrazovacím prostředkům. Zároveň byla použitím jemných popílků zlepšena pevnost a obzvláště reologie, příp. zpracovatelnost příslušných betonových směsí. Návrh betonové směsi s jemnými popílkami je „robustnější“, mimo to je možné uspořít plastifikátory.

## 1. Úvod

Vysoce odolné betony se liší od běžných betonů zvýšenými pevnostmi, lepší zpracovatelností a/nebo zvýšenou odolností proti chemickým a fyzikálním vlivům. Vyznačují se obzvláště kompaktní betonovou konstrukcí, která vykazuje vysokou odolnost proti pronikání vody, soli a plynů. Kompaktní betonová konstrukce je většinou výsledkem kombinace nízké ekvivalentní hodnoty vodního součinitele a vysoké hustoty uspořádání kameniva a jemných částic. Vznikem hydratačních produktů přispívají pucolánové přísady, jako je černouhelný popílek a mikrosilika, ke kompaktnosti a pevnosti betonové konstrukce.

V [1] je podána informace o výrobě jemného popílku „Microsit“ jako přísady do betonu pro vysoce odolné betony, o jeho materiálových vlastnostech a vlivu na zpracovatelnost a pevnost. Zde bude představeno působení jemného popílku na odolnost betonu proti pronikání chloridů a síranů a také proti negativnímu působení rozmrazovacích solí. Podkladem pro tuto zprávu jsou výsledky srovnávacího experimentálního výzkumu na normalizované maltě a betonu.

## 2. Výzkumný program

Ve výzkumném programu byly zjišťovány vlastnosti betonů s popílkami jako přísadami do betonu a srovnávány s betony a maltami jiného složení. Betony příp. malty odlišného složení mají rozdílné vlastnosti čerstvé i ztvrdlé směsi i změněný proces zrání. K provedení zkoušky byly zvoleny tak, aby byly co nejvíce podobny použití v praxi (např. shodná hodnota vodního součinitele  $w/z$  a koeficient tepelné ztráty  $k$ ).

Pro zkoušky byly použity dva druhy jemného popílku různé zrnitosti (Microsit® M10 a Microsit® M20), které byly získány vytříděním certifikovaného černouhelného popílku podle DIN EN 450:

- M10: velikosti částic 95 % < 10  $\mu\text{m}$
- M20: velikosti částic 95 % < 20  $\mu\text{m}$

Betony/malty s jemnými popílkami jako přísadami do betonu byly srovnávány s betony/maltami bez přísad (CEM I-Beton) i s betony/maltami s černouhelnými popílkami a s mikrosilikou jako přísadami do betonu.

## 3. Výsledky zkoušek

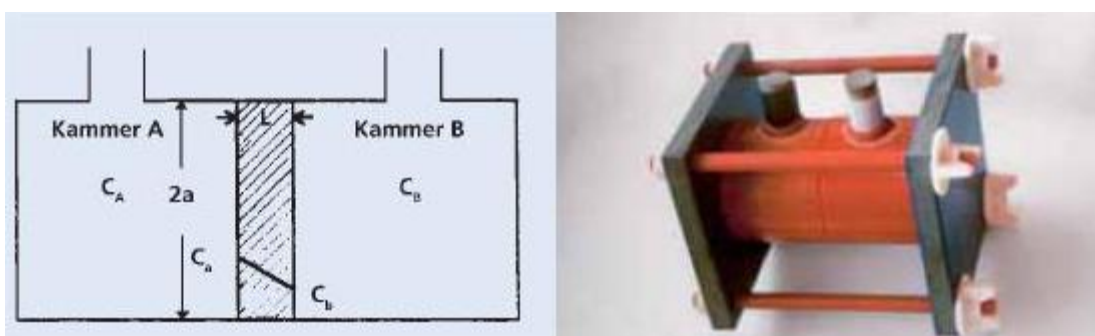
### 3.1. Odolnost proti působení chloridů

Odolnost betonů proti pronikání chloridů má významný vliv na trvanlivost železobetonových stavebních dílů. Stanovení odolnosti proti pronikání chloridů probíhalo nejprve na směsích malty podle tabulky 1. Vzhledem k použití 4 mm tenkých zkušebních desek byla zrnitost popílku 1 mm. Hodnota vodního součinitele  $w/z$  činila u všech směsí 0,5, přičemž u černouhelného popílku a jemného popílku byl započítán koeficient tepelné ztráty  $k = 0,4$  a u mikrosiliky  $k = 1$ . Odlišný stupeň zrání a odlišná zpracovatelnost nebyly s ohledem na ekvivalentnost brány v potaz.

Tabulka 1 Složení směsi malty

Použitá přísada	Vstupní množství látek v g			
	Přísada	CEM I 42,5 R	Voda	Písek
–	–	450	225	1350
M10	113	338	191	1350
M20	113	338	191	1350
SFA (černouhelný popílek)	113	338	191	1350
Mikrosilika	45	405	225	1350

Zkouška hutnosti maltových směsí proti pronikání chloridů probíhala v tzv. difúzních celách. V difúzní cele je deska z malty vložena mezi obě poloviny cely. Obě poloviny cely jsou naplněny jedna umělým pórovým roztokem (NaOH/KOH se stejným molárním poměrem, pH = 13,0), druhá umělým pórovým roztokem a chloridem (35,5 g/l NaCl) (obrázek 1).

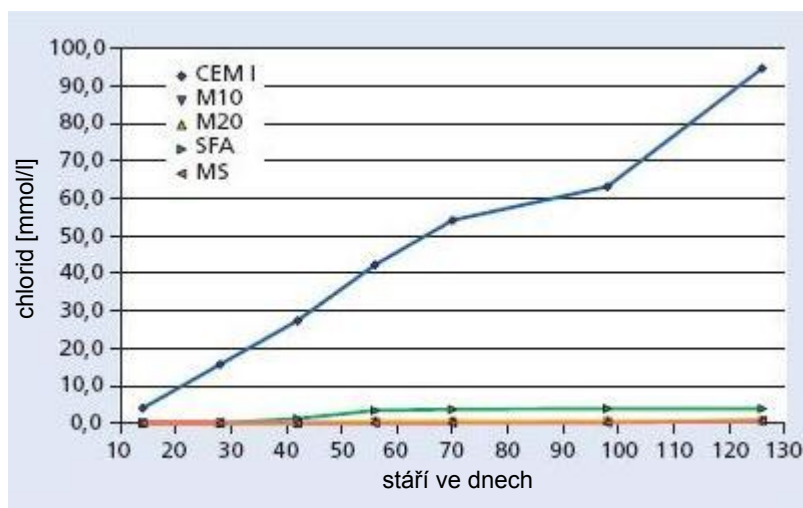


**Legenda**

Kammer komora

Obrázek 1 – Schématický náčrt a fotografie difúzní cely

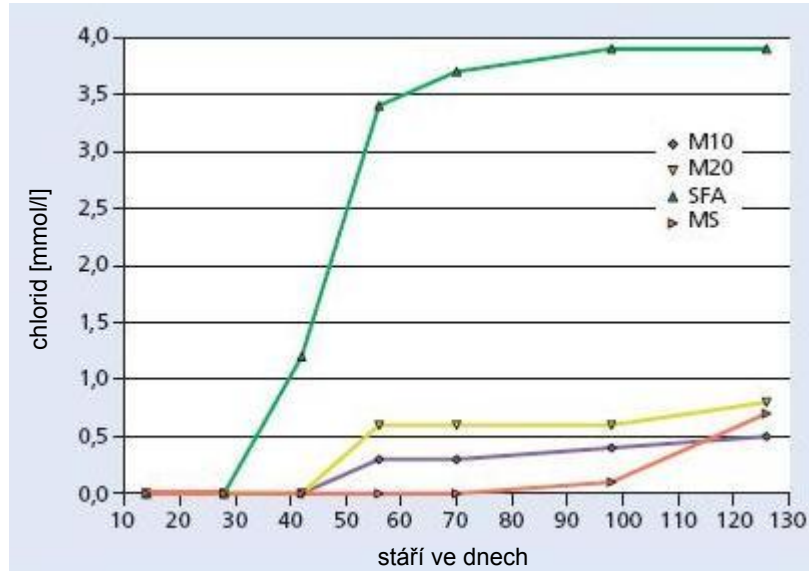
Před zkouškou jsou zkušební desky uloženy na jeden den do umělého pórového roztoku. Měří se nárůst obsahu chloridů bez přídavku chloridů v závislosti na době pomocí iontové chromatografie. Na obrázku 2 jsou znázorněny koncentrace chloridů prosáklé skrze maltové desky v závislosti na době od stáří 14 dnů.



Obrázek 2 – Časový průběh chloridové difúze

Nejvyšší propustnost chloridů byla naměřena na cementových deskách ze 100 M.-% Portlandského cementu. Při použití přísad bylo zjištěno výrazné zvýšení odolnosti maltové směsi proti pronikání chloridů.

Pro názornější rozlišení účinnosti jednotlivých přísad ukazuje obrázek 3 koncentrace chloridů měřené u směsí s přísadami bez zohlednění čisté cementové směsi.



**Obrázek 3 – Časový průběh chloridové difúze u malty s přísadami**

Směsi s jemnými popílky a mikrosilikou vykazovaly velmi podobnou hodnotu propustnosti. Oproti směsi výlučně s cementem bylo u směsi s jemným popílkem Microsit® M10 naměřeno snížení propustnosti chloridu přibližně 190násobné. Ve srovnání se směsí s černouhelným popílkem bylo zjištěno u směsi s jemným popílkem M10 snížení propustnosti chloridu přibližně 8násobné.

V následných měření bylo zkoumáno, jaký vliv má množství použitého jemného popílku na odolnost vůči chloridu, aby bylo možné stanovit optimální podíl jemného popílku s ohledem na odolnost vůči chloridům. Tyto výzkumy byly prováděny s návrhy betonu s rozdílným obsahem jemného popílku (5 % hmotnosti, 15 % hmotnosti, 25 % hmotnosti) (16 mm velikost zrn, vždy 390 kg celkový obsah cementu a přísad, vodní součinitel  $w/z$  příp.  $(w/z)_{eq} = 0,42$ , koeficient tepelné ztráty  $k = 1$ ). Zkouška probíhala pomocí zkoušky chloridové migrace (Chloridmigrationsverfahrens), tak, jak ji popisují Tang [2] a Schießl [3].

Výsledky ukazují, že propustnost chloridu do betonových směsí s narůstajícím množstvím jemných popílku místo portlandského cementu téměř lineárně klesá.

U návrhů betonových směsí s 25 % hmotnosti jemného popílku M10 (% hmotnosti vztahované na celkový obsah cementu a přísad) byl naměřen koeficient difúze chloridů  $1,5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ . Nejnižší koeficient difúze chloridů, který byl dosažen u vysoce odolných betonů, byl přibližně  $0,5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Naměřený koeficient difúze chloridů u návrhu směsi s 25 % hmotnosti jemného popílku (ve vztahu k cementu a přísadám) byl naměřen u návrhu betonové směsi se střední hodnotou součinitele vlhkosti  $w/z$  příp.  $(w/z)_{eq} = 0,42$ . Navíc bylo počítáno u jemných popílků s koeficientem tepelné ztráty  $k = 1$ , a ne jak je běžné u popílků  $k = 0,4$ .

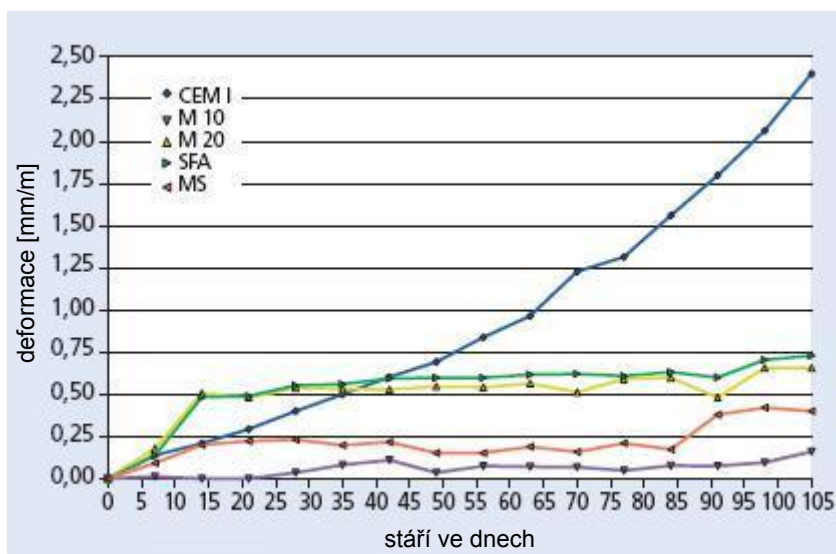
Při zohlednění této skutečnosti ukazují zkoušky, že s jemným popílkem je možné vyrábět návrhy směsí, které mají stejně jako betony s mikrosilikou velmi vysokou odolnost proti pronikání chloridů.

### 3.2. Odolnost proti působení síranů

Ke stanovení odolnosti proti pronikání síranů byly směsi malty s jemným popílkem zkoušeny podle zkušební metody SVA (zkušební metody expertního výboru) a srovnávány se směsmi pouze s portlandským cementem, s černouhelným popílkem a mikrosilikou jako přísadami do betonu (složení směsí podle tabulky 1).

U zkušební metody SVA se stanovuje podélné přetvoření plochých hranolů malty (160 mm x 40 mm x 10 mm) rozpínáním při působení síranů (30 g SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/l). Ze vzniklého podélného přetvoření je substrahováno „přirozené“ podélné přetvoření, které je měřeno paralelně na referenčním zkušebním hranolu stejného složení v nasyceném roztoku hydroxidu vápenatého. Hraniční hodnota, která vzniká z podélného přetvoření pro matici odolnou vůči síranům, je pro ploché hranoly z malty po 91 dnech 0,5 mm/m.

Na obrázku 4 jsou znázorněna vypočítaná podélná přetvoření příslušných zkušebních těles v závislosti na čase. Výsledky ukazují, že hraniční hodnota pro směs odolnou vůči síranům i pro směs s mikrosilikou a také směs s M10 byla podstatně překročena, přičemž podélné přetvoření směsi s jemným popílkem M10 bylo opět asi pětkrát menší než podélné přetvoření směsi s mikrosilikou.



Obrázek 4 – Podélné přetvoření zkušebních těles po působení síranů

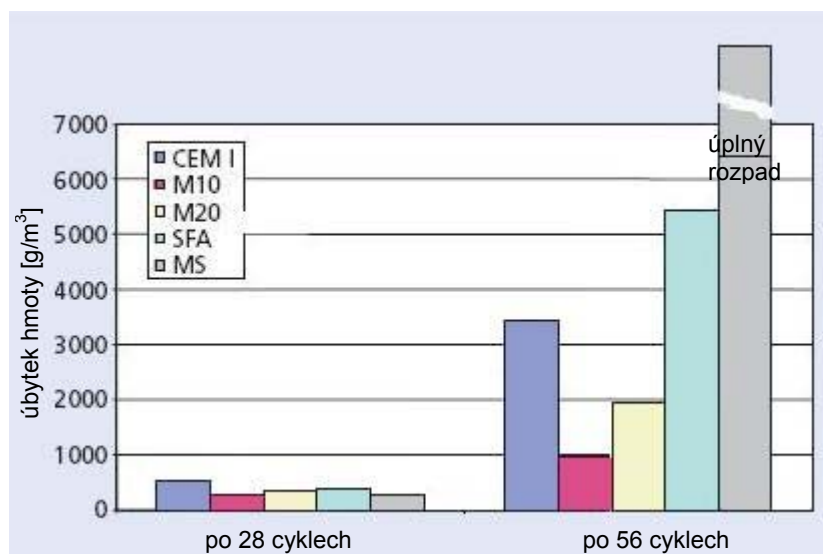
Souhrnně ukazují výsledky zkoušky, že s jemnými popílkem (v tomto případě Microsit® M10) je možné vyrobit maltové a s jistotou také betonové směsi, které vykazují velmi vysokou odolnost proti síranům. V současné době probíhají další výzkumy, které mají přinést důkaz, že použitím jemných popílků je možné vyrobit maltové a betonové směsi, které mají stejně vysokou odolnost proti rozpouštění kyselinami.

### 3.3. Odolnost proti rozmrazovacím prostředkům

Výzkum odolnosti proti rozmrazovacím prostředkům pomocí zkoušky CDF (roztokem chloridu sodného) [5] (56 rozmrazovacích cyklů) na betonových směsích výlučně s portlandským cementem příp. cementem a každou ze čtyř přísad: jemný popílek M10 a M20, černouhelný popílek a mikrosilika. V tabulce 2 jsou uvedena složení použitých betonů. Na obrázku 5 je vidět zjištěné odlupování betonu po 28 a 56 rozmrazovacích cyklech.

**Tabulka 2 – Složení a vlastnosti čerstvého betonu (vodní součinitel  $w/z = 0,5$ ; pro SFA  $k = 0,4$ ; pro mikrosilikou  $k = 1$ )**

Použitá přísada	Složení cementu				Vlastnosti čerstvé směsi	
	Přísada	CEM I 42,5 R	Voda	Kamenivo	Obsah vzduchu %	Objemová hmotnost
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	hmotnosti	[kg/dm <sup>3</sup> ]
–	–	390	195	1753	0,90	2,42
M10	98	293	166	1805	1,15	2,41
M20	98	293	166	1805	1,60	2,40
SFA	98	293	166	1805	1,25	2,41
Mikrosilika	39	351	195	1736	2,1	2,35



**Obrázek 5 – Střední hodnoty odlupování po zkoušce roztokem chloridu sodného**

Po 28 rozmrazovacích cyklech se ukázalo, že směs bez přísady vykazuje největší množství odlupování. Následovaly směsi s černouhelným popílkem a jemným popílkem M20 se srovnatelným odlupováním ve střední hodnotě. Směsi s jemným popílkem M10 i směsi s mikrosilikou vykázaly nejnižší množství odlupování. Po zatěžovací fázi 29 až 56 cyklů se zřetelně zvyšuje odlupování v průběhu doby, než u prvních 28 cyklů. Opotřeбенí se urychluje pro všechny směsi. Nejmenší odlupování má směs s jemným popílkem M10; činí pouze cca jednu třetinu referenční směsi bez přísady. Nejpозорuhodnější je úplný rozpad zkušebního tělesa s mikrosilikou po 56 cyklech, ačkoliv směs s mikrosilikou po 28 dnech spolu se směsí s jemným popílkem M10 vykazovala nejlepší výsledky.

Zkoušení odolnosti proti rozmrazovacím prostředkům betonových směsí ukazuje, že při použití jemných popílků (v tomto případě M10) je možné vyrobit betony s velmi vysokou odolností proti působení rozmrazovacích prostředků. Zde zkoušené betony nebyly co se týče odolnosti proti rozmrazovacím prostředkům optimalizovány. Další výzkumy na vhodně optimalizovaných betonech to mezitím potvrdily. Návrhy betonových směsí s jemnými popílků (v tomto případě Microsit M10) prokázaly právě se zřetelem na dlouhodobé působení vyšší odolnost proti působení rozmrazovacích prostředků než směsi s čistým cementem, příp. směsi s cementem a černouhelným popílkem, příp. s mikrosilikou, jako přísadami do betonu.

#### 4. Souhrn

V rámci výzkumného projektu „Zkoumání vlastností a působení jemných popílků“ bylo prokázáno, že při použití jemných popílků jako přísad do betonu je možné vyrábět kompaktní a odolné betony.

Při zkoumání odolnosti vůči chloridům a síranům i při stanovení odolnosti vůči rozmrazovacím prostředkům dosáhly směsi s jemnými popílků ve srovnání se směsmi s mikrosilikou podobných nebo i lepších výsledků, když byly obě přísady použity v povoleném dávkování (jemný popílek 25 % hmotnosti, Mikrosilika 10 % hmotnosti). Zejména byla prokázána zřetelně vyšší odolnost proti rozmrazovacím prostředkům.

Zároveň byly použitím jemných popílků zlepšeny pevnosti, zvláště reologie, příp. zpracovatelnost příslušných betonových směsí [1].

Plný rozsah efektivnosti jemných popílků při výrobě vysoce odolného betonu musí ukázat pouze praxe.

Jemné popílků Microsit® M10 a M20 mají certifikát podle DIN EN 450 a mohou být používány v betonu podle DIN 1045-2 jako běžné certifikované černouhelné popílků.

## Bibliografie

- [1] Maibaum, Ch.; Hüttl, R.: Neuer Zusatzstoff für Hochleistungsbetone. beton 54 (2004) H. 3, S. 132–133  
*Nová přísada pro vysoce odolné betony. beton 54 (2004) č. 3, str. 132 – 133*
- [2] Tang, L.; Nilsson, L.-O.: Chloride Binding Capacity, Penetration and Pore Structures of Blended Cement Pastes with Slag and Fly Ash. London: Elsevier Applied Science, 1991. International Conference on Blended Cements in Construction, held at the University of Sheffield, 9–12 September 1991; Ed.: Swamy, R. N.  
*Vaznost chloridů, penetrace a struktura pórů směsné cementové kaše se struskou a popílkem. Londýn: Aplikovaná věda společnosti Elsevier, 1991. Mezinárodní konference o směsných cementech ve stavebnictví, konaná na Univerzitě Sheffield, 9. – 12. září 1991. Ed.: Swamy, R. N.*
- [3] Schießl, P.; Wiens, U.: Neue Erkenntnisse zum Einfluss von Steinkohlenflugasche auf die chlorinduzierte Korrosion von Stahl in Beton. ibausil Tagungsbericht – Band 1; Hrsg.: F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde  
*Nové poznatky k vlivu černouhelných popílků na chlorem indukovanou korozi oceli v betonu. Zpráva pro zasedání ibausil – svazek 1; vyd.: F. A. Finger – Institut pro nauku o stavebních látkách*
- [4] Deutsches Institut für Bautechnik: Prüfplan für die Zulassungsprüfung eines von DIN 1045 abweichenden Betons mit hohem Sulfatwiderstand, DIBt, Berlin Februar 1998  
*Německý institut pro stavební techniku: Plán zkoušek pro přípouštěcí zkoušku betonu s vysokou odolností proti síranům, který se odchyluje od DIN 1045, DIBt, Berlín, únor 1998*
- [5] RILEM Draft Recommendation: 117-FDC Freeze- Thaw and Deicing Resistance of Concrete: Draft Recommendation for test method for the freeze-thaw resistance of concrete; Test with water (CF) or with sodium chloride solution (CDF)  
*Návrh doporučení RILEM (Mezinárodní unie laboratoří pro zkoušení a výzkum materiálů a struktur): 117-FDC Odolnost betonu proti zmrazování a rozmrazování: Návrh doporučení pro zkušební metody odolnosti betonu proti rozmrazovacím solím; zkouška s vodou (CF) nebo s roztokem chloridu sodného (CDF)*