

ZACELENÍ TRHLIN V CEMENTOVÝCH KOMPOZITECH OBSAHUJÍCÍCH BAKTERIE A OCHRANNÉ POLYMERY PŘI RŮZNÝCH TEPLITÁCH

CRACK-SEALING IN CEMENTITIOUS COMPOSITES CONTAINING BACTERIA AND PROTECTIVE POLYMERS AT VARIOUS TEMPERATURES

Hana Schreiberová, Tomáš Trtík, Roman Chylik, Karel Šeps, Alena Kohoutková

Autonomní zacelování trhlin v betonu pomocí biokalcifikace se v posledních dvou desetiletích stalo terčem zájmu. Tento článek je zaměřen na dvě hlavní otázky tzv. samohojitelného biobetonu, tj. ochranu bakteriálních spor uložených v cementové matici a chování materiálu při nízkých teplotách. V předkládané studii se jako forma ochrany aplikuje superabsorpční polymer (SAP) a vodný roztok polyvinylalkoholu (PVA). Provedené mechanické testy ukázaly výrazný negativní dopad PVA roztoku na pevnost v tahu i v tlaku, zatímco SAP negativně ovlivnil pouze pevnost v tlaku. Samohojitelný účinek byl pozorován na trhlínách vytvořených na trácích z navržených cementových kompozitů při ideální (tj. pokojové) teplotě, nízké teplotě (10 °C) a po vystavení mrazovým cyklům (-5 až 0 °C).

Autonomous sealing of cracks in concrete through bacteria-induced calcification has become a topic of great concern in the last two decades. This paper is focused on two main issues of the so-called bio-based self-healing concrete, i.e. protection of the bacterial spores embedded in the cementitious matrix and behaviour of the material at low temperatures. In the current study, as a form of protection, superabsorbent polymers (SAP) powder polyvinyl alcohol (PVA) water solution are applied. The performed mechanical tests showed pronounced negative impact of the PVA addition on both tensile and compressive strength, while the SAP negatively affected only the compressive strength. The healing action was observed on cracked cementitious composites beams at ideal (i.e. room) temperature, low temperature (10 °C), and after exposure to freeze cycles (-5 to 0 °C).

Snížení trvanlivosti betonových konstrukcí úzce souvisí s přítomností trhlin v jejich krycí vrstvě. Trhliny urychlují transportní procesy porézní strukturou betonu, a tím zvyšují náchylnost materiálu k degradaci. Beton je však současně znám svojí schopností tzv. autogenního zacelování trhlin [1].

V 19. století byla objevena schopnost určitých mikroorganismů produkovat uhličitán vápenatý (tzv. proces biokalcifikace) [2]. Na tomto základě představil Jonkers v roce 2008 [3] samohojitelný beton s bakteriálním činidlem. V tomto materiálu jsou do cementové matrice přidány bakterie schopné biokalcifikace ve své neaktivní formě spor spolu s nutrič-

ními složkami. Po vzniku trhliny jsou spory v oblasti trhliny aktivovány pomocí pronikající vody a přítomných živin. Aktivní bakterie pak metabolizují, což vede k tvoření uhličitanu vápenatého (CaCO₃), kterým jsou trhliny postupně zacelovány.

Pilotní studie prokázaly slibný potenciál samohojitelného biologického betonu, následující výzkum však poukázal na několik problematických aspektů. Přestože jsou bakterie aplikovány v neaktivní a vysoce rezistentní formě spor, experimenty ukázaly, že počet životaschopných spor významně klesá po cca 7. dnu od betonáže [4], pravděpodobně kvůli destrukci krystalickými tlaky ve tvrdnoucím betonu.

Dalším problematickým faktorem samohojitelného betonu na biologické bázi je teplota. Většina studií proběhla za optimálních a stálých podmínek, tj. při pokojové teplotě (cca 22 °C) a s dostatečným přísunem vody. Průměrná měsíční teplota však ve středoevropském pásu přesahuje 15 °C pouze po tři měsíce v roce.

Ve studii popsané v tomto článku jsou řešeny obě výše zmíněné problémy – ochrana bakteriálních spor a funkčnost materiálu za nízkých teplot. Ve studii jsou jako ochranné prostředky aplikovány dva typy polymerů – superabsorpční polymer (SAP) a polyvinylalkohol (PVA) ve formě vodného roztoku.

SAP byl již zkoumán jako přísada do betonu, mimo jiné i pro zlepšení samohojících mechanismů [5], [6]. V našem případě by SAP měl sloužit jednak jako ochrana bakterií (buď samotné nabobtnalé částice, nebo kaverny zanechané po jejich odvodnění) a jednak pro zachycení vody potřebné pro metabolismus bakterií, a tím tak přispívat k autogennímu zacelení trhliny.

V dostupné literatuře nejsou zmínky o aplikaci vodného roztoku PVA v samohojitelném betonu na biologické bázi, přestože se již několik studií zabývalo jeho vlivem na mechanické vlastnosti, snížení absorpce vody nebo zvýšení odolnosti vůči kyselinám u cementového kompozitu. V této studii se očekává, že by polymer mohl vytvořit ochrannou vrstvu kolem spor, zatímco zvýšená pórovitost by (dle předchozích výzkumů) poskytla další potřebný prostor pro bakteriální spory.

S cílem rozšířit současný stav výzkumu samohojitelného betonu na biologické bázi je v této studii cementový kompozit s bakteriálním činidlem a SAP/PVA dále zkoumán i za jiných než optimálních podmínek. Zacelování trhliny je zde pozorováno i při nízkých teplotách a po expozici mrazovým cykly.

Materiály

Na přípravu všech sérií byl použit obyčejný portlandský cement CEM I 42,5 R (Mokrá) a kamenivo s maximální velikostí zrna 2 mm od společnosti Provodínské písky.

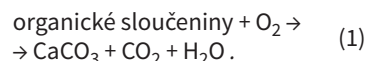
Aby byla zajištěna reprodukova-

telnost experimentu, byla použita destilovaná voda. Zejména v případě aplikace SAP může iontové složení použité záměsové vody významně ovlivnit výsledky. Jak prokázal předběžný výzkum [7], absorpční kapacita aplikovaného SAP může dosahovat až 1,6× vyšších hodnot v destilované vodě než v běžné vodě z vodovodu dostupné v místě laboratoře (Praha-Dejvice).

Bakteriální samohojící činidlo

V této studii byly použity alkalofilní a alkalitolerantní sporulující aerobní bakterie *Bacillus pseudofirmus*.

V případě aplikované bakterie dochází ke vzniku uhličitanu vápenatého degradací organických sloučenin dle následující reakce [4]:



Organické sloučeniny (zdroj vápníku a metabolický aktivátor) je nutné dodat do materiálu externě, protože nejsou obsaženy v samotné betonové směsi. Na základě existující literatury a vlastních předběžných experimentů [8] byl jako metabolický aktivátor použit kvasničný extrakt a jako zdroj vápníku laktát vápenatý, ($\text{C}_6\text{H}_{10}\text{CaO}_6 \times 5 \text{H}_2\text{O}$, čistota $\geq 98\%$).

Ochranné přísady

Pro ochranu bakterií byl aplikován práškový SAP (zesítěný kopolymer akrylamidové/akrylové kyseliny, draselná sůl) a 16% vodný roztok PVA (složený z 13% polyvinylalkoholu a 4% polyvinylacetátu).

Receptura, výroba vzorků, ošetřování

V tab. 1 jsou uvedeny použité receptury. Na základě literatury [9] a vlastních experimentů [8] byl laktát vápenatý aplikován v dávce 3 % hmotnosti cementu a kvasničný extrakt v dávce 0,45 % hmotnosti cementu.

Vodní součinitel byl ve většině případů roven 0,5 (v souladu s normou ČSN EN 196-1 Metody zkoušení cementu – Část 1: Stanovení pevnosti), pouze v sériích obsahujících SAP byla hodnota zvýšena (přidáno 15 g destilované vody na 1 g SAP), aby se vykompenzovala absorpce polymeru a zpracovatelnost směsi zůstala zachována. Ve směsích obsahujících PVA bylo množství záměsové vody sníženo o množství přítomné v jeho vodném roztoku.

Pro vyrovnání účinku vysokého vodního součinitele na mechanické vlastnosti byla v rámci studie aplikována dávka cementu 586 kg/m^3 , aby bylo dosaženo pevností srovnatelných s běžně používanými konstrukčními betony. Tento přístup je shodný s již existujícími studiemi [10], [11], [12].

SAP byl aplikován v dávce 0,5 % váhy cementu, 16% vodný roztok PVA v dávce, která odpovídala 1 % PVA hmotnosti cementu. Bakterie byly aplikovány ve formě spor (příprava je popsána v [13]), které byly důkladně rozptýleny v odpovídajícím množství záměsové vody (v případě sérií BAK a BAK_SAP) nebo v PVA vodném roztoku (v případě BAK_PVA). Konečná koncentrace jednotek tvořících kolonie (CFU) na 1 ml záměsové vody (včetně vody obsažené ve vodném roztoku PVA) byla přibližně 8×10^6 .

Postup míchání sérií byl identický. Kvasničný extrakt byl nejprve homogenizován s cementem. Laktát vápenatý byl rozpuštěn v záměsové vodě (obsahující rozptýlené bakteriální spory, pokud byly použity). V případě řady SAP a PVA byly oba polymery aplikovány společně s cementem před přidáním kameniva a vody.

Byly připraveny vzorky pro mechanické zkoušky a vzorky pro sledování zacelení trhlin (trámky $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$, tři pro každou sérii a typ zkoušky). V případě vzorků

Tab. 1 Receptury směsí

Tab. 1 Composition of the mixtures

	CTRL [kg/m ³]	CTRL_SAP [kg/m ³]	CTRL_PVA [kg/m ³]	BAK [kg/m ³]	BAK_SAP [kg/m ³]	BAK_PVA [kg/m ³]
portlandský cement	586	586	586	586	586	586
destilovaná voda	293	337	262	293	337	262
kamenivo 1–2 mm	440	440	440	440	440	440
kamenivo 0,1–1 mm	1 319	1 319	1 319	1 319	1 319	1 319
SAP	ne	2,93	ne	ne	2,93	ne
16 % PVA	ne	ne	36,63	ne	ne	36,63
laktát vápenatý	17,58	17,58	17,58	17,58	17,58	17,58
kvasničný extrakt	2,64	2,64	2,64	2,64	2,64	2,64
bakterie	ne	ne	ne	8×10^6 CFU/ml	8×10^6 CFU/ml	8×10^6 CFU/ml

určených pro tvorbu trhlin bylo do středu rozpětí cca 10 mm od horní části formy umístěno přibližně 20 profilovaných ocelových drátů (obr. 1).

Formy se po betonáži nechaly při pokojové teplotě přikryté plastovou fólií po dobu 24 h. Poté byly všechny vzorky odbedněny a umístěny do klimatické komory s teplotou 24 °C a relativní vlhkostí až 95 % po dobu 28 dnů.

Tvorba řízených trhlin

Pro stanovení účinnosti samohojícího procesu ve zkoumaných sériích byly na vyzrálých vyztužených vzorcích vytvořeny tříbodovým ohybem trhliny šířky cca 0,4 mm.

Metodologie zkoumání samohojitelného procesu

Zkoumání samohojícího procesu v podmínkách, ve kterých se betonové konstrukce skutečně nacházejí, se obecně ve studiích zabývajících se samohojitelným biobetonem opomíjí. Proto v této studii byly vzorky vystaveny třem různým prostředím: optimální teplotě, nízké teplotě a mrazovým cyklům.

Optimální prostředí (25 ± 2 °C) sloužilo jako referenční. Pro sledování zacelení trhlin byly příslušné vzorky umístěny do plastových nádob naplněných pitnou vodou v místnosti se stálou teplotou po dobu 28 dnů. V optimálním prostředí byly sledovány všechny připravené série, aby bylo možné porovnat a zhodnotit jak vliv samotných bakterií, tak ochranných přísad na zacelení trhlin.

1



1 Výroba vzorků pro tvorbu řízených trhlin

1 Preparation of the samples for the controlled crack creation

Pro stanovení samohojitelného potenciálu navržených směsí za nízkých teplot byla zvolena teplota 10 °C. Nádoby se vzorky ve vodní lázni byly umístěny do klimatické komory s konstantní teplotou 10 °C po dobu 28 dnů. V tomto případě byly použity pouze vzorky s ochrannými polymery (tj. BAK_SAP a BAK_PVA) a kontrolní série (CTRL).

Jedinečným rozšířením současného stavu poznání samohojící schopnosti materiálu je zkoumání vlivu teplot pod bodem mrazu. Pro simulaci teplot pod bodem mrazu byly vzorky před ponořením do vody umístěny do komory určené pro mrazové cykly. Proudem vzduchu byla teplota přesně a postupně měněna od 0 do -5 °C. Doba jednoho cyklu byla 24 h, vzorky byly ponechány v komoře po dobu 14 dnů (tj. 14 cyklů). Po mrazových cyklech byly vzorky z komory vyjmuty, umístěny do vodou naplněných nádob a ponechány po dobu 28 dní v optimálním prostředí (shodně s postupem popsaným výše). Stejně jako v předchozím případě byly testovány pouze vzorky s ochrannými polymery i bakteriemi a kontrolní série.

Metody zkoušek

Konzistence čerstvých směsí a mechanické vlastnosti zatvrdlých cementových kompozitů

Vždy před betonáží byla část směsi odebrána a podrobena zkoušce kon-

zistence pomocí Haegermannova pokleповého stolku.

Mechanické zkoušky určující tlakové a tahové vlastnosti materiálu byly provedeny po skončení doby tvrdnutí, tj. 28 dnů od betonáže. Nevyztužené trávky byly podrobeny tříbodové ohybové zkoušce a na zbytcích byly provedeny tlakové zkoušky.

Zkoušky konzistence i mechanických vlastností byly hodnoceny pouze u nebakteriálních sérií, jelikož se nepředpokládal znatelný vliv samotných bakterií.

Optické stanovení účinnosti samohojícího procesu

Jako základní indikátor samohojitelného potenciálu byla zvolena maximální šířka zacelené trhliny. Průměrná maximální šířka zahojené trhliny (Δw_{\max}) byla stanovena jako průměr maximálních zacelených šířek na vzorcích dané série.

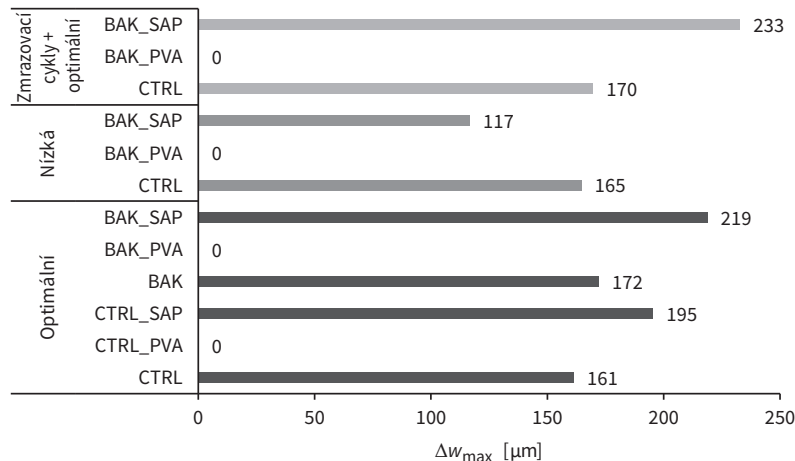
Za účelem zdokumentování vývoje zacelování byly všechny vzorky s trhlínami zachyceny pomocí fotoaparátu s vysokým rozlišením na počátku doby hojení a pak po 28 dnech v příslušném prostředí.

Výsledky a diskuze

Konzistence čerstvých směsí

Výsledky (tab. 2) ukázaly, že aplikované množství extra záměsové vody (15 g destilované vody na 1 g SAP) v případě přidání SAP (CTRL_SAP)

2



2 Přehled všech stanovených hodnot Δw_{\max}

2 Overview of all determined Δw_{\max} values

vede k pastě s konzistencí velmi podobnou referenční směsi (CTRL).

Přidání vodného roztoku PVA vedlo v našem experimentu k pastě se znatelně vyšší tekutostí v porovnání s referenčním vzorkem. Tento výsledek je v rozporu s předešlými studiemi, kdy přidání vodného roztoku PVA vedlo sice k vyšší viskozitě, ale celkově k sušší směsi [14]. Tento rozpor by mohl být způsobený odlišným vodním součinitelem směsi (v předchozích studiích byl pouze 0,3 [15], [16]).

Tahová a tlaková pevnost

Průměry naměřených hodnoty z tlakových a tahových zkoušek jsou uvedeny v tab. 3. Výsledky ukázaly, že aplikované množství živin je vhodné, jelikož jak tahová, tak tlaková pevnost materiálu dosahovala relativně vysokých hodnot (6,4 a 39,4 MPa). Mechanické vlastnosti vzorků z cementové pasty připravené dle receptury shodné se současnou studií pouze bez přídavku nutričních přísad byly již stanoveny v rámci experimentu popsaného v [8], [17]. Srovnání současné a předchozí studie ukazuje, že přidáním živných přísad v daném množství dojde k poklesu sledovaných veličin pouze v řádu jednotek procent (průměrná hodnota tlakové pevnosti u referenční směsi dosáhla 45,3 MPa, průměrná hodnota pevnosti v tahu za ohybu u referenční směsi byla 6,5 MPa).

Směs CTRL_SAP dosahovala velmi dobrých tahových pevností (průměrná hodnota byla dokonce o 7 % vyšší než u kontrolní směsi). Na druhou stranu, její tlakové pevnosti byly znatelně nižší (o 30 % horší hodnoty v porovnání s kontrolní směsí).

Přidání vodného roztoku PVA do směsi cementového kompozitu mělo za následek drastický propad obou sledovaných veličin. Tahová pevnost dosáhla pouze 44 % hodnoty kontrolní směsi, tlaková pevnost dokonce pouhých 21 %.

Optické stanovení účinnosti samohojícího procesu

Cílem této studie bylo stanovení použitelnosti navržených směsí biobetonu za jiných než optimálních

Tab. 2 Výsledky měření konzistence

Tab. 2 Results of the flowability test

Směs	Počáteční průměr [mm]	Průměr po rázech [mm]
CTRL	80	160
CTRL_SAP	80	159
CTRL_PVA	125	183

podmínek, a tím rozšíření současného poznání tématu.

Po 28 dnech v příslušném prostředí (ideální teplota, nízká teplota, vystavení mrazovým cyklům) byl povrch trhlin opticky zaznamenán a vyhodnocen pomocí průměrné maximální šířky zahojené trhliny (Δw_{\max} , je na obr. 2).

Zacelování trhlin při ideálních podmínkách

Nejširší škála připravených cementových směsí byla zkoumána v ideálních podmínkách. Detekovatelné zacelení trhliny proběhlo ve všech připravených sériích kromě směsí obsahujících vodný roztok PVA (obr. 2). Na obr. 3 a 4 je výběr výsledků z provedeného snímkování s vysokým rozlišením.

V referenční sérii (CTRL) dosáhla hodnota Δw_{\max} 161 μm . Vzhledem k tomu, že do směsi CTRL nebylo aplikováno žádné samohojící činidlo, lze v našem experimentu tuto hodnotu považovat za dosažitelnou šířku zacelení díky přirozené schopnosti autogenního samohojení v cementových materiálech.

Mírně vyšší hodnota (172 μm) byla zaznamenána, když byly do cementového kompozitu přidány bakteriální spory bez jakékoli ochrany (BAK). To by naznačovalo, že v této studii by mohl být přirozený autogenní potenciál zacelování trhlin zvýšen nově vytvořeným CaCO_3 pomocí bakterií asi o 7 %.

V ideálních podmínkách byly v případě přidání SAP zaceleny trhliny s největší šířkou. Ve směsi se samotným SAP (CTRL_SAP) se Δw_{\max} zvýšil na 195 μm . Když byla použita kombinace SAP a bakteriálních spor (BAK_SAP), tak Δw_{\max} dosáhl až 219 μm . Tyto výsledky by naznačovaly celkový pozitivní dopad

Tab. 3 Průměrné pevnosti

Tab. 3 Average strengths

Směs	Tlaková pevnost [MPa]	Tahová pevnost [MPa]
CTRL	39,4	6,4
CTRL_PVA	27,8	6,9
CTRL_SAP	8,2	2,8

přidání SAP na přirozené samohojitelné mechanismy, což souhlasí s dostupnými studiemi [5], [6].

Rozdíl mezi směsí pouze se SAP a s kombinací SAP–bakterie byl vyšší (cca 12 %) ve srovnání s rozdílem mezi referenční směsí (CTRL) a směsí obsahující nechráněné bakterie (BAK). Tento výsledek by mohl naznačovat, že SAP má ochranný potenciál, jelikož se zdá, že proces biokalcifikace byl po jeho přidání výraznější.

Přídavek PVA do samohojitelného betonu se ukázal být zcela nevhodný. V žádné sérii s vodným roztokem PVA (CTRL_PVA a BAK_PVA) nebylo detekováno dostatečné zacelení trhlin. Tento výsledek je poněkud překvapivý, jelikož se zdá, že PVA nejen blokuje biokalcifikaci, ale zároveň i zabraňuje přirozenému autogennímu zacelování.

Zacelování trhlin za nízké teploty

Obr. 5 poskytuje výběr z fotografií zachycujících zacelování při nízké teplotě.

V prostředí 10 °C se autogenní zacelení trhlin v případě CTRL výrazně nelišilo od hodnot dosažených za ideálních podmínek ($\Delta w_{\max} = 165 \mu\text{m}$). Zajímavé je, že v sérii BAK_SAP poklesla hodnota Δw_{\max} na 117 μm . Zdá se tedy, že nejenže byl omezen proces biokalcifikace, ale i samotný pozitivní účinek SAP na zacelení je při nízké teplotě limitován. Tento výsledek by mohl současně odhalit, že při nízkých teplotách samotná přítomnost SAP dokonce snižuje efektivitu přirozeného autogenního zacelování, jelikož hodnota Δw_{\max} u BAK_SAP byla o 30 % nižší než u srovnávací CTRL směsi.

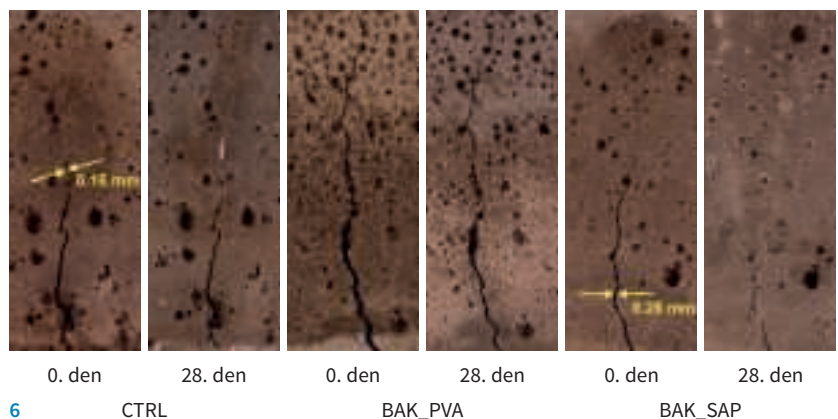
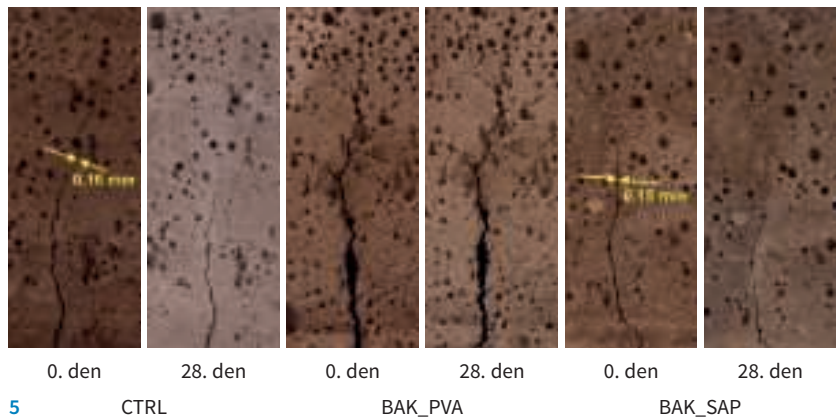
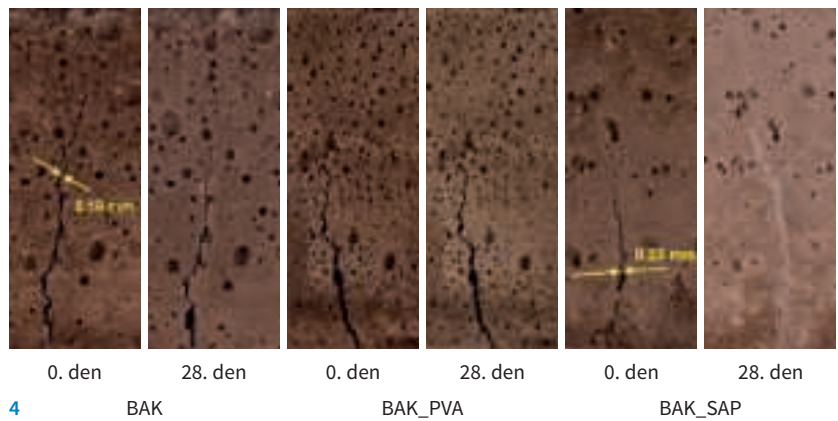
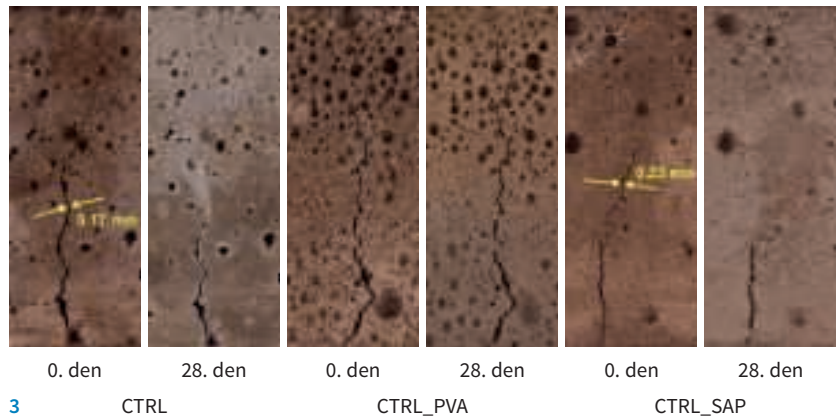
Stejně jako v ideálním prostředí nebylo ani při nízké teplotě zaznamenáno dostatečné výrazné zacelení trhlin v případě směsi obsahující PVA (BAK_PVA).

Zacelování trhlin po mrazových cyklech

V ČR jsou v zimním období teploty pod nulou běžné. Z toho vyplývá, že obnovení metabolické aktivity bakterií v cementové matrici po období s teplotami pod bodem mrazu je zásadním faktorem ovlivňujícím použitelnost samohojitelného biobetonu.

Z obr. 2 je patrné, že hodnota Δw_{max} dosáhla v případě CTRL a BAK_SAP dokonce mírně vyšších hodnot ve srovnání se sériemi bez vystavení mrazu (170, resp. 233 μm). Rozdíl mezi oběma zmíněnými sériemi však zůstal téměř identický jako v případě ideální teploty, tj. přibližně 35% nárůst Δw_{max} v případě BAK_SAP. Výsledky tedy ukázaly, že životaschopnost bakterií nebyla mrazovými cykly negativně ovlivněna, možná právě díky přítomnosti SAP, který posloužil jako jejich dostatečná ochrana.

V souladu s předchozími výsledky nebylo možné ani po vystavení mrazu pozorovat žádné zacelení trhlin v sérii obsahující vodný roztok PVA, jak je patrné z obr. 2 a 6.



3 Fotografie před (0 dní) a po zacelovacím období (28 dní) v ideálních podmínkách na nebakteriálních vzorcích (na vzorcích na obr. 3 až 6 jsou vyznačena nejširší místa trhliny, která byla zacelena) **4** Fotografie před (0 dní) a po zacelovacím období (28 dní) v ideálních podmínkách na bakteriálních vzorcích **5** Fotografie před (0 dní) a po zacelovacím období (28 dní) při 10 °C na nebakteriálních (CTRL) a bakteriálních vzorcích (BAK_PVA a BAK_SAP) **6** Fotografie před (0 dní) a po zacelovacím období (28 dní) v ideálním prostředí na nebakteriálních (CTRL) a bakteriálních vzorcích (BAK_PVA a BAK_SAP), které byly z počátku vystaveny mrazovým cyklům

3 High-resolution photography before (0 days) and after the healing period (28 days) in ideal conditions of the non-bacterial samples (on the picture from 3 to 6 the maximum healed crack width on the individual samples is marked) **4** High-resolution photography before (0 days) and after the healing period (28 days) at low temperature of the bacterial samples **5** High-resolution photography before (0 days) and after the healing period (28 days) at low temperature of the non-bacterial (CTRL) samples and bacterial (BAC_PVA and BAC_SAP) samples **6** High-resolution photography before (0 days) and after the freeze cycles and healing period (28 days) in ideal conditions of the non-bacterial (CTRL) samples and bacterial (BAC_PVA and BAC_SAP) samples

Závěry

V této studii byla použita kombinace bakterií *Bacillus pseudofirmus*, nutričních sloučenin a SAP nebo PVA v cementovém kompozitu, aby bylo možné vyhodnotit jeho samohojící potenciál za různých podmínek.

Na základě provedeného experimentálního výzkumu lze vyvodit následující závěry:

- SAP má s největší pravděpodobností pozitivní dopad na přirozené autogenní zacelování trhlin,
- zdá se, že přidání SAP zlepšuje proces biokalcifikace, a tím zajišťuje zacelení trhlin pomocí bakteriálního metabolismu,
- vliv SAP na samohojení se zdá být omezen při nižších teplotách, je však zapotřebí dalšího výzkumu tohoto mechanismu,
- mrazové cykly v naší studii neovlivnily účinnost navrhovaného samohojitelného cementového

kompozitu obsahujícího kombinaci SAP a bakteriálního samohojícího činidla,

- ukázalo se, že aplikace vodného roztoku PVA je nevhodná jak z hlediska materiálových charakteristik, tak z hlediska účinnosti zacelování trhlin.

Při hodnocení výsledků prezentované studie je nutné mít na paměti, že vývoj bakteriálního samohojícího betonu je stále ve fázi základního výzkumu. Snažíme se tedy zkoumaný jev (tj. autonomní zacelování trhlin vlivem bakteriální aktivity) sledovat za co možná nejrealističtějších podmínek, avšak k optimalizaci směsi pro komerční použití, např. právě z pohledu již zmíněných mechanických vlastností, vede ještě dlouhá cesta. Současným cílem je samotné zjištění možných kladů a záporů nově vyvíjeného materiálu a vlivu jednotlivých faktorů (přítomnost bakterií, druh ochranného

polymeru, druh živin, teplota prostředí aj.) na jeho vlastnosti. Proto je publikace všech, úspěšných i neúspěšných, aplikací klíčová pro další vývoj.

Základní výzkum poskytne informace o principu zkoumaného biologického samohojitelného betonu, příp. nastíní možné přínosy a úskalí jeho aplikace, avšak není ze své podstaty zaměřen na jeho okamžité uplatnění v praxi. Pokud dojde k jeho praktickému uplatnění, je už teď zřejmé, že se nebude jednat o materiál pro běžná použití, ale bude sloužit jako možná alternativa pro specifické konstrukce, kde je zachování těsnosti a trvanlivosti klíčové. Jako jeden z příkladů lze uvést současně aktuální problematiku mostních konstrukcí. Ty jsou díky nákladné a komplikované údržbě často v nevyhovujícím stavu, který může vyústit až v tragické události. Nově vyvíjený biologický samohojitelný materiál by tak mohl najít uplatnění právě v těžko přístupných místech těchto konstrukcí vystavených povětrnostním vlivům, kde by se vyšší počáteční investice vyvážila budoucími přínosy.

Zdroje:

- [1] HEARN, N. Self-sealing, autogenous healing and continued hydration: What is the difference? *Materials and Structures*. 1998, Vol. 31, No. 8, pp. 563–7.
- [2] EHRLICH, H. L., NEWMAN, D. K., KAPPLER, A. *Ehrlich's Geomicrobiology*. CRC Press, 2015. 635 p.
- [3] JONKERS, H., SCHLANGEN, E. Development of a bacteria-based self healing concrete. *Taylor Made Concrete Structures*. December 2008, pp. 425–430.
- [4] JONKERS, H. M., THIJSSSEN, A., MUIJZER, G., COPUROGLU, O., SCHLANGEN, E. Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete. *Ecological Engineering*. 2010, Vol. 36, No. 2, pp. 230–5.
- [5] SNOECK, D., TITTELBOOM, V. K., STEUPERAERT, S., DUBRUEL, P., DE BELIE, N. Self-healing cementitious materials by the combination of microfibres and superabsorbent polymers. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2012, Vol. 25, Issue 1, pp. 13–24.
- [6] SNOECK, D. Superabsorbent polymers to seal and heal cracks in cementitious materials. *RILEM Technical Letters*. November 2018, pp. 32–8.
- [7] SCHREIBEROVÁ, H., FLÁDR, J., TRTÍK, T., CHYLÍK, R., BÍLÝ, P. An investigation of the compatibility of different approaches to self-healing concrete: The superabsorbent polymers and microbially induced calcite precipitation. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Prague: IOP Publishing Ltd, 2019.
- [8] SCHREIBEROVÁ, H., BÍLÝ, P., FLÁDR, J., ŠEPS, K., CHYLÍK, R., TRTÍK, T. Impact of the self-healing agent composition on material characteristics of bio-based self-healing concrete. *Case Studies in Construction Materials*. December 2019, Vol. 11.
- [9] LUO, M., QIAN, C. Influences of bacteria-based self-healing agents on cementitious materials hydration kinetics and compressive strength. *Construction and Building Materials*. 2016, Vol. 121, pp. 659–63.
- [10] XU, J., YAO, W. Multiscale mechanical quantification of self-healing concrete incorporating non-ureolytic bacteria-based healing agent. *Cement and Concrete Research*. 2014, Vol. 64, pp. 1–10.
- [11] SIERRA-BELTRAN, M. G., JONKERS, H. M., SCHLANGEN, E. Characterization of sustainable bio-based mortar for concrete repair. *Construction and Building Materials*. 2014, Vol. 67, Part C, pp. 344–52.
- [12] TZIVILOGLOU, E., WIKTOR, V., JONKERS, H. M., SCHLANGEN, E. Bacteria-based self-healing concrete to increase liquid tightness of cracks. *Construction and Building Materials*. 2016, Vol. 122, pp. 118–25.
- [13] SCHREIBEROVA, H., BILY, P., RYPAROVA, P. Applicability of Bio-Based Self-Healing Concrete in Central European Conditions: A Preliminary Study. In: *Proceedings pro123-2: Final Conference of RILEM TC 253-MCI: Microorganisms-Cementitious Materials Interactions*. Toulouse, 2018.
- [14] KNAPEN, E., VAN GEMERT, D. A. Cement hydration and microstructure formation in the presence of water-soluble polymers. *Cement and Concrete Research*. 2009, Vol. 39, No. 1, pp. 6–13.
- [15] VISWANATH, P., THACHIL, E. T. Properties of polyvinyl alcohol cement pastes. *Materials and Structures*. 2008, Vol. 41, No. 1, pp. 123–30.
- [16] SINGH, N., RAI, S. Effect of polyvinyl alcohol on the hydration of cement with rice husk ash. *Cement and Concrete Research*. 2001, Vol. 31, No. 2, pp. 239–43.
- [17] SCHREIBEROVÁ, H., FLÁDR, J., TRTÍK, T., CHYLÍK, R., ŠEPS, K., KOHOUTKOVÁ, A. *Vývoj složení cementové pasty s nutričními přísadami a superabsorbčním polymerem pro samohojitelný beton na biologické bázi*. *Beton TKS*. 2019, roč. 19, č. 6, s. 46–51.

Tento příspěvek byl připraven díky podpoře Grantové agentury České republiky (GAČR), v rámci projektu Samohojení cementových kompozitů v důsledku bakteriální kalcifikace (č. 18-15697s) a projektu Trvanlivost betonové konstrukce a posouzení jejího životního cyklu (SGS19/149/OHK1/37/11).



Ing. Hana Schreiberová
hana.schreiberova@fsv.cvut.cz



Ing. Tomáš Trtík
tomas.trtik@fsv.cvut.cz



Ing. Roman Chylík
roman.chylik@fsv.cvut.cz



Ing. Karel Šeps, Ph.D.
karel.seps@fsv.cvut.cz



prof. Ing. Alena Kohoutková, CSc., FEng.
akohout@fsv.cvut.cz

všichni: *Fakulta stavební ČVUT v Praze
Katedra betonových a zděných konstrukcí*

Článek byl posouzen odborným lektorem.
The article was reviewed.