

# AUTONOMNÍ ZACELENÍ TRHLIN V BETONU OBSAHUJÍCÍM BIO-AKTIVNÍ ČINIDLO A SUPERABSORPČNÍ POLYMER

Hana Schreiberová, \*

Katedra betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební,  
České vysoké učení technické v Praze, Thákurova 7/2077, 166 29 Praha 6, Česká republika.  
hana.schreiberova@fsv.cvut.cz

## ABSTRAKT

V poledních desetiletích se samohojitelný beton na biologické bázi stal populárním předmětem výzkumu v oblasti stavebních materiálů. Tento článek se zabývá dvěma hlavními problémy, které byly identifikovány v předchozím výzkumu - neschopností bakterií přežít krystalické tlaky v tvrdnoucím betonu a potřebu dostatečného zásobování vodou pro bakteriální metabolismus. Za účelem vyřešení těchto problémů se v současné studii aplikují superabsorpční polymery (SAP) do standardní cementové pasty, jednak jako prostředek pro ochranu bakterií, a současně jako potenciální rezervoár potřebné vody. K prokázání použitelnosti SAP v samohojitelném bio-betonu byly připraveny vzorky cementového kompozitu s přídavkem SAP, vzorky s SAP a biologickým samohojitelným činidlem a referenční vzorky. Následně bylo zaznamenáno zacelení uměle vytvořených trhlin ve vzorcích a byl stanoven vliv přidání SAP na samohojitelnou schopnost použitého materiálu.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Beton • Samohojitelný • Zacelení trhlin • SAP • Bakterie

## ABSTRACT

In the previous decade, bio-based self-healing concrete became a popular subject of research in the field of building materials. This article addresses two main issues that have been identified in previous research - the inability of bacteria to survive crystalline pressures in hardening concrete and the need for an adequate water supply for bacterial metabolism. In order to solve these problems, in the present study, superabsorbent polymers (SAP) are applied to a standard cement paste, both as a means of protection of the bacteria and, at the same time, as a potential reservoir of the required water. To demonstrate the applicability of SAP in self-healing bio-concrete, cement composite samples with SAP addition, samples with SAP and biological self-healing agent and reference samples were prepared. Subsequently, the healing of the artificial cracking in the samples was recorded and the effect of the addition of SAP on the self-healing ability of the material used was determined.

## KEYWORDS

Concrete • Self-healing • Crack-sealing • SAP • Bacteria

## 1. ÚVOD

Samohojení, ve smyslu autonomní detekce a samovolné opravy trhlin, přitahuje v současné době velkou pozornost v oblasti betonových konstrukcí. Trhliny na povrchu konstrukcí umožňují vodě a agresivním látkám proniknout do materiálu, což má za následek další degradaci materiálů, a tím snížení trvanlivosti celé konstrukce.

Pravidelné manuální kontroly a údržba betonových konstrukcí jsou vysoce pracná a ekonomicky náročná opatření. Navíc v mnoha případech může být sanace trhlin kvůli špatné dostupnosti určitých částí konstrukce komplikovaná, až téměř nemožná. Z těchto důvodů je vývoj cementového kompozitu se samohojitelnou schopností, který by zajistil prodloužení životnosti konstrukce ekonomicky důležitým tématem, které přitahuje i komerční pozornost.

V posledním desetiletí bylo publikováno značné množství studií zaměřujících se na beton se zvýšenou schopností samohojení na bázi metabolické aktivity určitých mikroorganismů. Samohojení, nebo konkrétně autonomní zacelování trhlin, se zakládá na takzvaném biokalcifikačním procesu, tj. schopnosti speciálních typů mikroorganismů (většinou bakterií) produkovat uhlíčitán vápenatý ( $\text{CaCO}_3$ ), pokud jsou aplikovány spolu s vhodnými nutričními sloučeninami (Castanier, Le Metayer-Levrel a Perthuisot, 1999). V tomto biologickém betonu jsou bakterie ve své rezistentní formě spor zabudovány přímo do betonové matrice během procesu míchání. Standardní betonová směs je dále obohacena o potřebné živiny, tj. o zdroj vápníku a určitého druhu metabolického aktivátoru. Zpracování směsi se jinak neliší od tradičních postupů. Proces biokalcifikace započne až ve chvíli, kdy dojde k vytvoření trhliny a voda pronikne dovnitř materiálu. Voda spolu s přítomnými živinami způsobí přeměnu bakteriálních spor zpět do své vegetativní fáze, ve které dochází k tvoření  $\text{CaCO}_3$ .

Ačkoli řada výzkumů uvádí značný samohojitelný potenciál bioaktivních cementových kompozitů (Bang, Galinat a Ramakrishnan, 2001; Jonkers et al., 2010; Wang, De Belie a Verstraete, 2012; Erşan et al., 2015; Erşan, 2016; Luo a Qian, 2016; Tziviloglou et al., 2016; Al-Salloum et al., 2017; Alazhari et al., 2018; Wang, 2018), několik překážek zůstává nevyřešeno. Experimenty ukázaly, že metabolická aktivita inkorporovaných bakterií významně klesá po cca 7 dnech (Jonkers et al., 2010) od

\* Školitel: prof. Ing. Alena Kohoutková, CSc.

betonáže. Tento pokles bývá přičítán mechanické destrukci bakterií krystalizačními tlaky ve stárnoucím betonu, a tím poukazuje na důležitost ochrany bakteriálních spor uvnitř materiálu (Wang, De Belie a Verstraete, 2012; Wang et al., 2014; Chen, Qian a Huang, 2016; Tziviloglou et al., 2016; Ersan, Boon and De Belie, 2018). Navíc, zejména v případě vodorovných konstrukcí, může být problematické zajistit dostatečný přísun vody, který je pro proces biokalcifikace zásadní. Obě tyto nevýhody biologického přístupu k samohojitelnému betonu jsou v tomto článku řešeny aplikací superabsorpčních polymerů.

Superabsorpční polymer (SAP) je označení pro polymer s absorpční kapacitou až stonásobnou ku své vlastní hmotnosti. V nedávných studiích byl SAP zkoumán jako přírůstek do betonu, který by mohl pozitivně ovlivnit autogenní smršťování (Jensen a Hansen, 2001), mrazuvzdornost (Reinhardt, Assmann a Mönnig, 2008), vodotěsnost (Mechtcherine, 2016) a vylepšení přirozené samohojitelné schopnosti betonu (Snoeck et al., 2012). Na základě slibných výsledků byla v několika studiích navržena a zkoumána kombinace SAP a biologických samohojitelných principů. Teoreticky by mohl polymer nejen chránit bakterie před destruktivními tlaky ve stárnoucím betonu, ale také poskytnout potřebnou vlhkost díky svým značným absorpčním schopnostem.

V článku (Giriselvam et al., 2018) byly vyrobeny a zkoumány vzorky z cementového kompozitu obsahující bakterie, živiny a SAP v různých koncentracích. V této studii mělo přidání SAP za následek lepší hojení potrhovaných vzorků ve srovnání s čistě bakteriálními vzorky. Uvádí se zde však, že spotřeba vody aplikovaného SAP byla pouze 86 g/g SAP, což není v souladu s běžnými hodnotami. Z tohoto důvodu nemusí být výsledky obecně použitelné. Dále nebyly vyrobeny žádné vzorky SAP bez bakterií, takže ochranný účinek samotného SAP není jasně detekovatelný.

Ve studii (Wei et al., 2019) byl SAP primárně použit ke zlepšení samotného autogenního zacetování trhlin. Ochrana bakterií byla v tomto experimentu zajištěna jejich imobilizací v biocharu (biouhlí). V tomto článku bylo zaznamenáno uzavření trhlin o šířce větší než 0,6 mm v případě aplikace SAP, biocharem imobilizovaných bakteriálních spor a polyvinylalkoholových vláken.

Přestože již byl proveden určitý výzkum aplikace SAP v samohojitelném betonu na biologické bázi, je zapotřebí dalšího vývoje, jelikož výsledky se mohou dramaticky lišit v závislosti na konkrétním typu použitých materiálů. Současný experiment prezentovaný v tomto článku se zabývá aplikací bakteriálních spor *Bacillus pseudofirmus*, SAP a dvou nutričních sloučenin (laktát vápenatý a kvasničný extrakt). Samohojitelný potenciál materiálu je zde stanoven na několika sériích trámků z cementového kompozitu, které byly porušeny tříbodovým ohybem, a dále ponořeny ve vodě za účelem sledování zacetování vytvořených trhlin.

## 2. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

### 2.1. Materiály

Za účelem stanovení použitelnosti SAP v samohojitelném betonu na biologické bázi byla připravena cementová malta obsahující běžný portlandský cement, destilovanou vodu s / bez bakteriálních spor, písek, SAP a nutriční přísady.

Biologická samohojitelná složka, bakterie *Bacillus pseudofirmus* (LMG 17944), byla vybrána na základě experimentů popsaných v dostupné literatuře (Jonkers a Schlangen, 2008; Jonkers et al., 2010; Chiu, Chen a Ting, 2018; Paine et al., 2018). Kultivace a sporulace byly provedeny na základě doporučení dodavatele (Belgian Coordinated Collections of Microorganisms).

Jako ochranu bakteriálních spor byl použit komerčně dostupný SAP (zesítěný kopolymer akrylamid/kyselina akrylová, draselná sůl získaná od Evonik Industries). Naše předchozí výzkumy materiálových charakteristik ukázaly, že jeho absorpční kapacita při pokojové teplotě v destilované vodě dosahuje až 245 g roztoku/g SAP, avšak se zvyšující se přítomností iontů absorpce drasticky klesá. V živném roztoku (60 g/l laktátu vápenatého a 17 g/l kvasničného extraktu) byla absorpce pouze 15 g roztoku/g SAP (Schreiberová, Fládr, et al., 2019). Lze tedy očekávat, že absorpce kapaliny v čerstvé cementové pastě s nutričními sloučeninami bude významně omezena.

Živné sloučeniny a jejich dávkování bylo stanoveno na základě předchozích studií prezentovaných v dostupné literatuře a vlastního předběžného výzkumu (Schreiberová, Bílý, et al., 2019). Mléčnan vápenatý ( $C_6H_{10}CaO_6 \cdot 5H_2O$ , čistota > 98%, získané z Carl Roth GmbH + Co. KG, Německo) jako zdroj vápníku a kvasničný extrakt (získaný od firmy Carl Roth GmbH + Co. KG, Německo) jako metabolický aktivátor byly úspěšně použity v mnoha studiích (Jonkers et al., 2010; Wang et al., 2014; Luo a Qian, 2016; Chen a Al., 2018) a bylo prokázáno, že jsou vhodnými sloučeninami pro vývoj bioaktivního samohojitelného betonu.

### 2.2. Receptura použité směsi

V Tabulce 1 jsou uvedeny receptury použitých směsí cementových kompozitů. Byly připraveny celkem čtyři série. Jako kontrolní sloužila směs REF, která neobsahovala ani bakteriální spory, ani SAP. Směs obsahující přímo přidané spory bez SAP (BAK) poskytovala zhodnocení příspěvku SAP k ochraně spor. Směs REF+SAP (přidaný SAP) sloužila jako kontrolní směs pro stanovení příspěvku polymeru k samoléčbě. Nakonec byla připravena směs SAP+BAK za účelem vyhodnocení samohojitelného potenciálu kombinace SAP-bakterie.

Dávka cementu a písku, byla stanovena na 586 kg/m<sup>3</sup> a 1759 kg/m<sup>3</sup>. V případě směsí obsahujících SAP (REF+SAP a SAP+BAK) bylo aplikováno větší množství záměsové vody, aby se doplnil objem kapaliny absorbované polymerem. Vodní součinitel (w/c) v těchto směsích byl 0,6, zatímco ve zbývajících sériích pouze 0,5. Množství doplňkové záměsové vody (21 g vody/g SAP) bylo aplikováno na základě našich předchozích

---

\* Školitel: prof. Ing. Alena Kohoutková, CSc.

výzkumů zabývajících se zpracovatelností SAP-cementové malty (Schreiberová, Fládr, et al., 2019). Dále všechny směsi, včetně kontrolní (REF), obsahovaly laktát vápenatý (3,0% hmot. cementu) a kvasničný extrakt (0,85% hmot. cementu).

SAP byl aplikován do směsi v suchém stavu v dávce 0,5% hmot. cementu. Tato hodnota byla vybrána na základě našich předchozích výzkumů, které byly zaměřeny na stanovení vlivu SAP na mechanické vlastnosti (Schreiberová, Fládr, et al., 2019). Bakteriální spory byly přidány do určených směsí jejich pečlivým rozptýlením v záměsové vodě. Konečná koncentrace spor v roztoku byla cca  $10^6$  CFU/ml.

Tabulka 1. Receptury použitých směsí cementového kompozitu.

Material	REF	BAK	REF +SAP	SAP +BAK
CEM I R 42.5 [kg/m <sup>3</sup> ]	586	586	586	586
Destilovaná voda [kg/m <sup>3</sup> ]	293	293	355	355
Písek [kg/m <sup>3</sup> ]	1759	1759	1759	1759
SAP [hm.% cementu]	-	-	0.50	0.50
Mléčnan vápenatý [hm.% cementu]	3,00	3,00	3,00	3,00
Kvasničný extrakt [hm.% cementu]	0,85	0,85	0,85	0,85
<i>Bacillus pseudofirmus</i> [CFU/ml]	-	$1 \times 10^6$	-	$1 \times 10^6$

### 2.3. Příprava vzorků

Nutriční sloučeniny a SAP, pokud byly použity, byly přidány k cementu a spolu míchány po dobu 1 minuty, aby se dosáhlo co nejjednodušší distribuce ve směsi. Záměsová voda s/bez dispergovaných bakteriálních spor byla přidána dle příslušné normy na přípravu cementových past.

Před betonáží byla konzistence REF a REF+SAP stanovena pomocí testu rozlitím dle příslušné normy, aby se určil dopad přidání SAP a extra dávky záměsové vody na zpracovatelnost pasty.

Následně byly všechny směsi uloženy do forem 40x40x160 mm. Vzorky byly vyztuženy ocelovými vlákny, které byly umístěny cca 10 mm pod okraj formy doprostřed rozpětí. Tato výztuž měla usnadnit následné kontrolované vytváření trhlin tříbodovým ohybem. Formy s vloženými ocelovými vlákny pak byly ponechány zakryté při pokojové teplotě a vlhkosti. Po 24 hodinách byly vzorky odbedněny a ošetřovány po dobu 28 dní při 25 ° C a cca 90% RH.

### 2.4. Kontrolované trhliny a jejich zacelování

Za účelem stanovení samohojitelného potenciálu betonu s bakteriemi a SAP byly po konci 28-denní ošetřovací doby na vzorcích vytvořeny kontrolované trhliny pomocí tříbodového

ohybu. Umístění a šířky trhlin byly pečlivě zaznamenány pomocí fotografií s vysokým rozlišením. Dále byl také povrch trhlin zaznamenán pomocí skenovacího 3D optického mikroskopu. Po pečlivém zaznamenání stavu trhlin byly vzorky podrobeny procesu hojení.

V zacelovacím období byly popraskané vzorky umístěny do otevřených plastových nádob naplněných standardní vodou z vodovodu a ponechány otevřené při pokojové teplotě po dobu 28 dní. Po uplynutí doby hojení byly vzorky vyjmuty z nádob a stav trhlin byl znovu zaznamenán pomocí fotografie s vysokým rozlišením a 3D skenovací optickou mikroskopií.

## 3. VÝSLEDKY

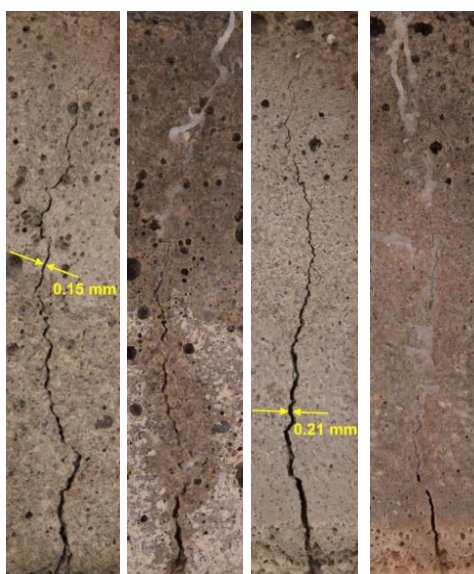
### 3.1. Zkoušky konzistence

Zkouška rozlitím ukázala, že přidání 0,5% SAP k hmotnosti cementu spolu s navýšením záměsové vody o 20% vede (REF+SAP) k pastě s obdobnou konzistencí jako referenční (REF). Průměr rozlití kontrolní série bez SAP a extra záměsové vody (REF) dosáhl 18,6 mm a, ne příliš odlišně, průměr rozlití u pasty REF+SAP dosáhl hodnoty 18,2 mm.

### 3.2. Účinnost samohojícího procesu

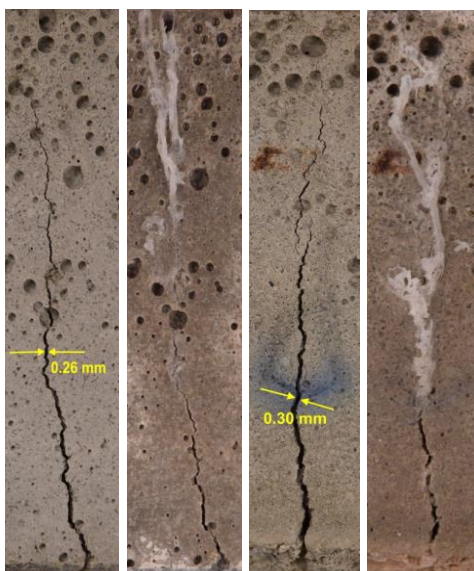
Účinnost samohojícího procesu, tedy zacelení trhlin, byla v tomto článku hodnocena vizuálními kontrolami prostřednictvím skenovací optické 3D mikroskopie a fotografií s vysokým rozlišením. Fotografické snímky, které porovnávají stav před 28 denním ponořením do vody a po období hojení, lze vidět na Obrázku 1.

\* Školitel: prof. Ing. Alena Kohoutková, CSc.



REF

BAK



REF+SAP

SAP+BAK

0 dní

28 dní

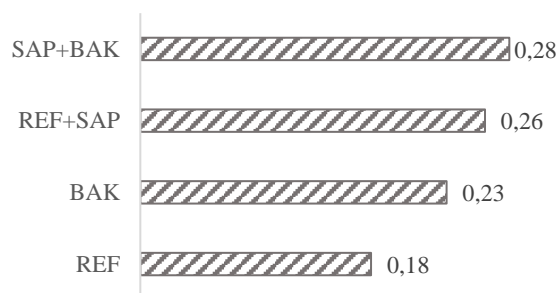
0 dní

28 dní

Obrázek 1. Porovnání trhlin v cementových vzorcích před a po procesu hojení - na obrázcích je vyznačena maximální počáteční šířka praskliny, která byla zahojena.

Z výsledků je zřejmé, že ve všech zkoumaných sériích došlo k jistému zacelení trhlin. Jak je možné pozorovat, ve všech vzorcích byly detekovány nově vytvořené bílé krystalické sraženiny. Následující vyhodnocení výsledků odhalilo, že maximální počáteční šířky trhliny, kde se sraženiny vytvořily, se lišily v závislosti na složení směsi (Obrázek 2). Vzorky od každé směsi byly připraveny ve třech opakováních. Na základě fotografického představení tak byly změřeny maximální počáteční šířky trhlin, které byly zahojeny, a následně byla stanovena jejich průměrná hodnota pro každou směs.

V kontrolních vzorcích (REF) byla průměrná maximální počáteční šířka trhlin 0,18 mm. V bakteriálních vzorcích BAK se zacelená šířka zvýšila na 0,23 mm. Ve vzorcích, kde byl přidán pouze SAP (REF+SAP), dosáhla průměrná počáteční šířka trhlin 0,26 mm. A konečně, ve vzorcích SAP+BAK obsahujících bakterie i SAP bylo možné pozorovat sraženiny v trhlinách s průměrnou počáteční šířkou až 0,28 mm.



Obrázek 2. Průměrná hodnota maximální počáteční šířky trhliny.

#### 4. DISKUZE

V souladu s předpoklady bylo z důvodu vlastní autogenní samohojitelné schopnosti cementových kompozitů pozorováno zacelení trhliny ve všech sériích včetně kontrolní (REF). Pozitivní vliv přídavku SAP, a to zejména v případě šířky trhlin pod 0,5 mm, na autogenní hojení bylo již popsáno jinde (Wei et al., 2019). Srovnatelně s těmito výsledky byla v tomto článku maximální šířka zahojené trhliny u REF+SAP o 49% větší ve srovnání s kontrolní sérií. Je však třeba vzít v potaz, že samotný přídavek záměsové vody mohl mít značný pozitivní vliv na autogenní zacelení trhliny.

Přidání bakterií (BAK) zvýšilo průměrnou šířku zahojené trhliny o 33% ve srovnání s kontrolní směsí (REF). Nejvyšší hodnota maximální šířky trhliny zahojené po 28 denním ponoření do vody byla pozorována ve vzorcích obsahujících kombinaci bakterie s SAP (SAP+BAK). Hodnota byla o 60% vyšší ve srovnání s kontrolní směsí.

Přestože výsledky prezentované v tomto článku naznačují pozitivní dopad přidání SAP a bakterií na samohojící schopnost cementového kompozitu, maximální šířka zacelené trhliny v tomto experimentu byla pouze 0,32 mm. Tato hodnota neodpovídá dřívějším studiím, kde trhliny široké až 0,70 mm byly zcela zahojeny (Gupta, Kua a Pang, 2018). Tento rozpor může být důsledkem nedostatečné distribuce hojivého činidla (bakterií a výživných látek) v maltě. Dále sice může SAP úspěšně fungovat jako rezervoár vlhkosti a zvyšovat přirozené autogenní zacelení trhlin, ale nemusí poskytovat dostatečnou ochranu bakteriálních spor před krystalizačními tlaky.

#### 5. ZÁVĚRY

V současné studii byla použita kombinace bakterií *Bacillus pseudofirmus*, nutričních sloučenin a SAP v cementovém kompozitu za účelem vyhodnocení samohojitelného potenciálu tohoto materiálu. Vzorky s uměle vytvořenými trhlinami byly podrobeny 28dennímu zacelovacímu období a následně byl stav trhlín vyhodnocen. Na základě současného experimentálního výzkumu lze vyvodit následující závěry:

- Přidáním SAP a přídatné záměsové vody se zvyšuje autogenní zacelení trhlín v cementovém kompozitu.
- Bakteriální samohojitelné činidlo (*Bacillus pseudofirmus*, laktát vápenatý a kvasničný extrakt) poměrně významně zlepšuje zacelení trhlín ve srovnání s referenční směsí bez činidla.
- Ochrana bakteriálních spor pomocí SAP nemusí být dostatečná a je třeba zvážit další dodatečné způsoby ochrany.

### PODĚKOVÁNÍ

Tento příspěvek byl připraven díky podpoře Grantové agentury České republiky (GAČR), projektu „Samohojení cementových kompozitů v důsledku bakteriální kalcifikace“ (č. 18-15697s) a projektu „Trvanlivost betonové konstrukce a posouzení jejího životního cyklu“ (SGS19/149/OHK1/3T/11).

### Reference

- Al-Salloum, Y. *et al.* (2017) ‘Bio-induction and bioremediation of cementitious composites using microbial mineral precipitation – A review’, *Construction and Building Materials*. Elsevier, 154, pp. 857–876. doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.07.203.
- Alazhari, M. *et al.* (2018) ‘Application of expanded perlite encapsulated BAKteria and growth media for self-healing concrete’, *Construction and Building Materials*. Elsevier, 160, pp. 610–619. doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.11.086.
- Bang, S. S., Galinat, J. K. and Ramakrishnan, V. (2001) ‘Calcite precipitation induced by polyurethane-immobilized *Bacillus pasteurii*’, *Enzyme and Microbial Technology*. Elsevier, 28(4–5), pp. 404–409. doi: 10.1016/S0141-0229(00)00348-3.
- Castanier, S., Le Metayer-Levrel, G. and Perthuisot, J.-P. (1999) ‘Ca-carbonates precipitation and limestone genesis — the microbiogeologist point of view’, *Sedimentary Geology*, 126, pp. 9–23.
- Ersan, Y. C. (2016) *Microbial nitrate reduction induced autonomous self-healing in concrete*. UGent.
- Erşan, Y. Ç. *et al.* (2015) ‘Self-protected nitrate reducing culture for intrinsic repair of concrete cracks.’, *Frontiers in microbiology*. Frontiers Media SA, 6, p. 1228. doi: 10.3389/fmicb.2015.01228.
- Ersan, Y. C., Boon, N. and De Belie, N. (2018) ‘Granules with activated compact denitrifying core ( ACDC ) for self-healing concrete with corrosion protection functionality’, in *Conference: PRO 123: Final Conference of RILEM TC 253-MCI: Microorganisms-Cementitious Materials Interactions*. Toulouse, pp. 475–484.
- Giriselvam, M. G. *et al.* (2018) ‘Enhancement of crack healing efficiency and performance of SAP in biocrete’, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 310(1). doi: 10.1088/1757-899X/310/1/012061.
- Gupta, S., Kua, H. W. and Pang, S. D. (2018) ‘Healing cement mortar by immobilization of BAKteria in biochar: An integrated approach of self-healing and carbon sequestration’, *Cement and Concrete Composites*. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2017.11.015.
- Chen, C.-C. and Al., E. (2018) ‘Evaluation of effect of nutrients, calcium precursors, and BAKteria on mechanical properties of mortar specimens’, in *Final Conference of RILEM TC 253-MCI*. Toulouse.
- Chen, H., Qian, C. and Huang, H. (2016) ‘Self-healing cementitious materials based on BAKteria and nutrients immobilized respectively’, *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 126, pp. 297–303. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.023.
- Chiu, C. H., Chen, C. C. and Ting, W. T. (2018) ‘Using lightweight aggregated as a carrier for BAKterial spores in self-healing concrete’, in *The Proceedings of the Final Conference of RILEM TC 253-MCI*. Toulouse.
- Jensen, O. M. and Hansen, P. F. (2001) ‘Water-entrained cement-based materials: I. Principles and theoretical BAKkground’, *Cement and Concrete Research*. Pergamon, 31(4), pp. 647–654. doi: 10.1016/S0008-8846(01)00463-X.
- Jonkers, H. M. *et al.* (2010) ‘Application of BAKteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete’, *Ecological Engineering*, 36(2), pp. 230–235. doi: 10.1016/j.ecoleng.2008.12.036.
- Jonkers, H. and Schlangen, E. (2008) ‘Development of a BAKteria-based self healing concrete’, *Tailor Made Concrete Structures*, (December), pp. 109–109. doi: 10.1201/9781439828410.ch72.
- Luo, M. and Qian, C. (2016) ‘Influences of BAKteria-based self-healing agents on cementitious materials hydration kinetics and compressive strength’, *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 121, pp. 659–663. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.075.
- Mechtcherine, V. (2016) ‘Use of superabsorbent polymers (SAP) as concrete additive.pdf’, *RILEM Technical Letters*, (1), pp. 81–87.
- Paine, K. *et al.* (2018) ‘Application and performance of BAKteria-based self-healing concrete’, pp. 387–394. Available at: <https://researchportal.bath.ac.uk/en/publications/application-and-performance-of-BAKteria-based-self-healing-concrete> (Accessed: 22 November 2018).
- Reinhardt, H. W., Assmann, A. and Mönnig, S. (2008) ‘Superabsorbent Polymers (SAPS) - An Admixture to Increase the Durability of Concrete’, *1st International*

\* Školitel: prof. Ing. Alena Kohoutková, CSc.

*Conference on Microstructure Related Durability of Cementitious Composites*, (October), pp. 313–322. Available at: <http://demo.webdefy.com/rilem-new/wp-content/uploads/2016/10/pro061-034.pdf>.

- Schreiberová, H., Fládr, J., *et al.* (2019) ‘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.
- Schreiberová, H., Bílý, P., *et al.* (2019) ‘Impact of the self-healing agent composition on material characteristics of bio-based self-healing concrete’, *Case Studies in Construction Materials*. doi: 10.1016/j.cscm.2019.e00250.
- Snoeck, D. *et al.* (2012) ‘Self-healing cementitious materials by the combination of microfibres and superabsorbent polymers’, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 25(1), pp. 13–24.
- Tziviloglou, E. *et al.* (2016) ‘BAKteria-based self-healing concrete to increase liquid tightness of cracks’, *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 122, pp. 118–125. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.080.
- Wang, J. (2018) ‘Screening of pH-responsive hydrogels for encapsulation of BAKteria for concrete crack self-healing’, in *The Proceedings of the Conference: RILEM Technical Committee 253 Microorganisms-Cementitious Materials Interactions*. Toulouse.
- Wang, J. Y. *et al.* (2014) ‘Self-healing concrete by use of microencapsulated BAKterial spores’, *Cement and Concrete Research*. Elsevier Ltd, 56, pp. 139–152. doi: 10.1016/j.cemconres.2013.11.009.
- Wang, J. Y., De Belie, N. and Verstraete, W. (2012) ‘Diatomaceous earth as a protective vehicle for BAKteria applied for self-healing concrete’, *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 39(4), pp. 567–577. doi: 10.1007/s10295-011-1037-1.
- Wei, H. *et al.* (2019) ‘Biochar-immobilized BAKteria and superabsorbent polymers enable self-healing of fiber-reinforced concrete after multiple damage cycles’, *Cement and Concrete Composites*. Elsevier, 100(February), pp. 35–52. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2019.03.017.