

# VÝVOJ SLOŽENÍ CEMENTOVÉ PASTY S NUTRIČNÍMI PŘÍSDADAMI A SUPERABSORPČNÍM POLYMEREM PRO SAMOHOJITELNÝ BETON NA BIOLOGICKÉ BÁZI ■ DEVELOPMENT OF CEMENT PASTE COMPOSITION WITH NUTRITIONAL ADDITIVES AND SUPERABSORBENT POLYMERS FOR BIO-BASED SELF-HEALING CONCRETE

Hana Schreiberová, Josef Fládr,  
Tomáš Trtík, Roman Chylík, Karel Šeps, Alena Kohoutková

V posledních desetiletích se samohojitelný beton stal populárním tématem. Tento příspěvek se zaměřuje na využití superabsorpčního polymeru (SAP) v biologickém samohojitelném betonu. V tomto materiálu by mohl samotný SAP nejen pozitivně ovlivňovat autogenní zacelování trhlin, ale zároveň by mohl sloužit i jako potřebná ochrana mikroorganismů, na kterých biologický samohojící proces závisí. Nejprve se tento příspěvek zabývá stanovením absorpční kapacity vybraného SAP v roztocích s různým složením, včetně dvou nutričních medií často aplikovaných v biologickém betonu. Výsledky ukazují, že podle předpokladů přítomnost iontů v roztoku výrazně ovlivňuje nasákavost SAP, a tak je v nutričních médiích hodnota absorpce v porovnání s hodnotami v destilované vodě zanedbatelná. Dále tento příspěvek stanovuje konzistenci cementových past s odlišným složením (různé druhy cementu, odlišné typy a množství záměsové vody, přítomnost nutričních přísad) a s přidavkem SAP v suchém nebo saturevaném stavu. Měření naznačilo velkou variabilitu konzistence v závislosti na složení cementové pasty a způsobu aplikace SAP, který může být pro zpracovatelnost klíčový. Následně byla z cementových past připravena zkušební tělesa, která byla podrobena mechanickým zkouškám ve stáří 7 a 28 dnů. Výsledky experimentu ukazují, že nižší koncentrace SAP (0,5 % hmotnosti cementu) je vhodnější z hlediska mechanických vlastností, avšak množství dodatečně záměsové vody, které kompenzuje absorpci polymeru, musí být v dalších experimentech dále optimalizováno. ■ In the recent decades, self-healing concrete has become a popular topic. This paper focuses on the use of superabsorbent polymer (SAP) in biological, self-healing concrete. In this material, SAP itself could positively influence the autogenous healing of cracks but also serve as necessary protection of microorganisms on which the biological self-healing process depends. This paper deals first with determination of the absorption capacity of selected SAP in solutions of different compositions, including two nutrient media often applied in biological concrete. The results show that the presence of ions in the solution is expected

to significantly affect the water absorption of SAP. As a result, in the nutrient media the absorption value is negligible compared to the values in distilled water. Furthermore, this paper establishes the consistency of cement pastes with different compositions (different types of cement, different types and amounts of mixing water, presence of nutritional additives) and with the addition of SAP in dry or saturated state. The consistency measurement indicated large variability in consistency depending on the composition of the cement paste and the method of SAP application, which may be crucial for workability. Subsequently, test specimens were prepared from cement pastes and subjected to mechanical tests at the age of 7 and 28 days. The results of the experiment show that a lower SAP concentration (0.5 % cement weight) is preferable in terms of mechanical properties, but the amount of additional mixing water that compensates for polymer absorption must be optimized in further experiments.

Trvanlivost betonových konstrukcí je výrazně ohrožena trhlinami v krycí vrstvě výztuže. Jelikož je jejich tvorba obecně nevyhnutelná, významné betonové konstrukce vyžadují pravidelné, finančně i časově náročné kontroly a případně i sanace. Tento negativní aspekt použití železobetonu podnítil v posledních desetiletích výzkum samohojitelného betonu – materiálu, který by byl schopen se autonomně opravovat, a tím zaručil trvanlivější výstavbu bez nutnosti manuálních zásahů v průběhu užívání.

Tento příspěvek se zabývá kombinací dvou již dříve navržených přístupů k samohojitelnému betonu – betonu s přidaným superabsorpčním polymerem (dále také SAP) a samohojitelného betonu na biologické bázi.

První z přístupů je založen na výrazné absorpční kapacitě superabsorpčních polymerů. SAP jsou trojrozměrné zesíťované hydrofilní polymery, které mohou zadržet až stonásobky své vlastní hmotnosti. K autonomnímu zacelování trhlin přispívá SAP integrovaný v betonové matici několika mechanismy [1], [2], [3]. Zaprvé, nabobtnalý polymer blokuje přístup agresivních látek z vnějšího

prostředí dovnitř materiálu a zároveň napomáhá udržet produkty autogenního hojení [4] uvnitř trhliny. Dále zachycuje vodu, která slouží k vnitřnímu ošetřování betonu, a tím znásobuje efektivitu vlastních autogenních zacelovacích procesů.

Druhý z přístupů využívá schopnosti určitých mikroorganismů produkovat uhličitán vápenatý ( $\text{CaCO}_3$ ), pokud mají k dispozici dostatek živin a vlhkosti. Mikroorganismy (nejčastěji bakterie ve své neaktivní formě spor) jsou přidány do betonu již v procesu míchání. Bakterie přejdou do své aktivní fáze až při vzniku trhliny v zatvrdlém betonu, která umožní přístup vodě. Přítomností vody v trhlíně a živin, které musí být do betonu uloženy a rovnoměrně rozmísleny již během míchání, jsou splněny podmínky pro metabolizaci bakterií. Během metabolizace bakterie produkují uhličitán vápenatý, který trhlinu postupně zaceluje.

Již v počátcích výzkumu se ukázalo, že bakterie ani ve své rezistentní formě spor nejsou schopny přežít krystalické tlaky v tvrdnoucím betonu a počet životaschopných bakterií v čase dramaticky klesá [5]. Mnoho studií se tedy následně zabývalo vhodnými způsoby ochrany, které by zajistily přežití bakterií v náročném prostředí betonové matrice [6] až [9].

Spojení biologického přístupu k samohojícímu procesu a SAP by mohlo být výhodné z několika důvodů. Kromě vlastního samohojícího účinku by nabobtnalé částice polymeru (nebo dutiny, které po nich zůstaly) mohly poskytnout potřebný ochranný prostor pro bakterie a voda zadržaná polymerem by mohla zajistit potřebnou vlhkost pro metabolickou aktivitu bakterií, a tím příznivě ovlivnit míru a rychlost zacelení trhliny.

Standardní hydrogely již byly pro tento účel ve výzkumu samohojitelného biologického betonu v minulosti aplikovány [10], ale pouze velmi málo studií se zabývalo aplikací superpolymerů [11]. Prvním krokem je stanovení vhodné receptury pro výzkum spojení biologického betonu a SAP. Jak již bylo řečeno, SAP mají vysokou absorpční schopnost, a tudíž

v čerstvém betonu mají tendenci zachytit velké množství záměšové vody. Studie tedy stanovovaly různé „dodatečné“ vodní součinitele ( $v/c_e$ ), které by částečně nahradily záměšovou vodu absorbovanou polymerem a zároveň poskytl potřebnou vlhkost pro cílené účely (samohojení, vnitřní ošetřování atd.) [12], [13], [14]. Problémem stanovení vhodné receptury však zůstává různorodá absorpční a retenční kapacita SAP, která je velmi silně ovlivněna mnoha faktory (velikost částic, pH, teplota, světlo, tlak a iontové složení roztoku) [1], [2], [15]. Především díky výrazné citlivosti na přítomnost iontů lze očekávat, že látky sloužící jako živiny, které jsou přidávány do biologického betonu, velmi výrazně ovlivní absorpční chování SAP, a tudíž nelze vhodně přidávat záměšové vody převzít z předchozích experimentů, které se problematikou zabývaly.

Se záměrem určit vhodné složení cementové pasty pro výzkum kompatibility biologického samohojícího betonu a SAP byla v našem výzkumu nejprve stanovena absorpční kapacita zvoleného superabsorpčního polymeru v různých roztocích (destilovaná voda, pitná voda a živné roztoky). Následně byly připraveny série cementových past s odlišným složením, u kterých byla stanovena konzistence a pevnost v tlaku a v tahu za ohybu ve stáří 7 a 28 dnů.

## MATERIÁLY A METODY

### Vliv složení roztoku na absorpční kapacitu SAP

Přítomnost iontů má značný vliv na absorpční kapacitu SAP [16] a je tudíž nutné popsat jeho chování v roztocích s odlišným složením. V našem experimentu bylo známo množství zvoleného superabsorpčního polymeru (zesítěný kopolymer akrylamidové/akrylové kyseliny, draselná sůl, dodavatel Evonik Industries AG, Německo)

**Tab. 1** Detailní popis receptury první skupiny cementových past (aplikace portlandského cementu CEM I a pitné vody) ■ **Tab. 1** Detailed description of the first cement paste group compositions (application of portland cement CEM I and tap water)

Cementové pasty (první série)	CEM I 42,5 R	Pitná voda	Přidaná voda	Písek zrno 0,1-2 mm	SAP suchý stav	SAP plně saturovaný
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]
REFa	586	293	-	1 758	-	-
S1a	586	293	-	1 758	5,86	-
S2a	586	293	87,9	1 758	5,86	-
S3a	586	-	-	1 758	-	2,93 + 453

ponořeno do nádob s destilovanou vodou, pitnou vodou a živnými roztoky s různými koncentracemi látek (LKa: 80 g / 1 l laktátu vápenatého a 1 g / 1 l kvasničného extraktu v destilované vodě, LKb: 60 g / 1 l laktátu vápenatého a 17 g / 1 l kvasničného extraktu v destilované vodě). Koncentrace látek v roztocích simulovala nejčastější koncentrace [17], [18] živin přidávaných do biologického samohojitelného betonu.

Ponořený SAP v roztocích byl následně ponechán při pokojové teplotě (25 °C ± 2 °C) v uzavřených nádobách. Po uplynutí 24 h byl saturovaný SAP odfiltrován z roztoků za použití velmi jemného síta a byla změřena hmotnost saturovaného SAP a neabsorbovaných roztoků.

### Příprava cementové pasty s přidávkou SAP

Dalším krokem bylo popsání chování polymeru v cementových pastách s odlišným složením. V rámci našeho experimentu byly připraveny dvě hlavní skupiny vzorků, které se lišily použitými materiály.

Detailní složení **první skupiny cementových past** je popsáno v tab. 1. Ve všech případech byl použit portlandský cement CEM I 42,5 R,

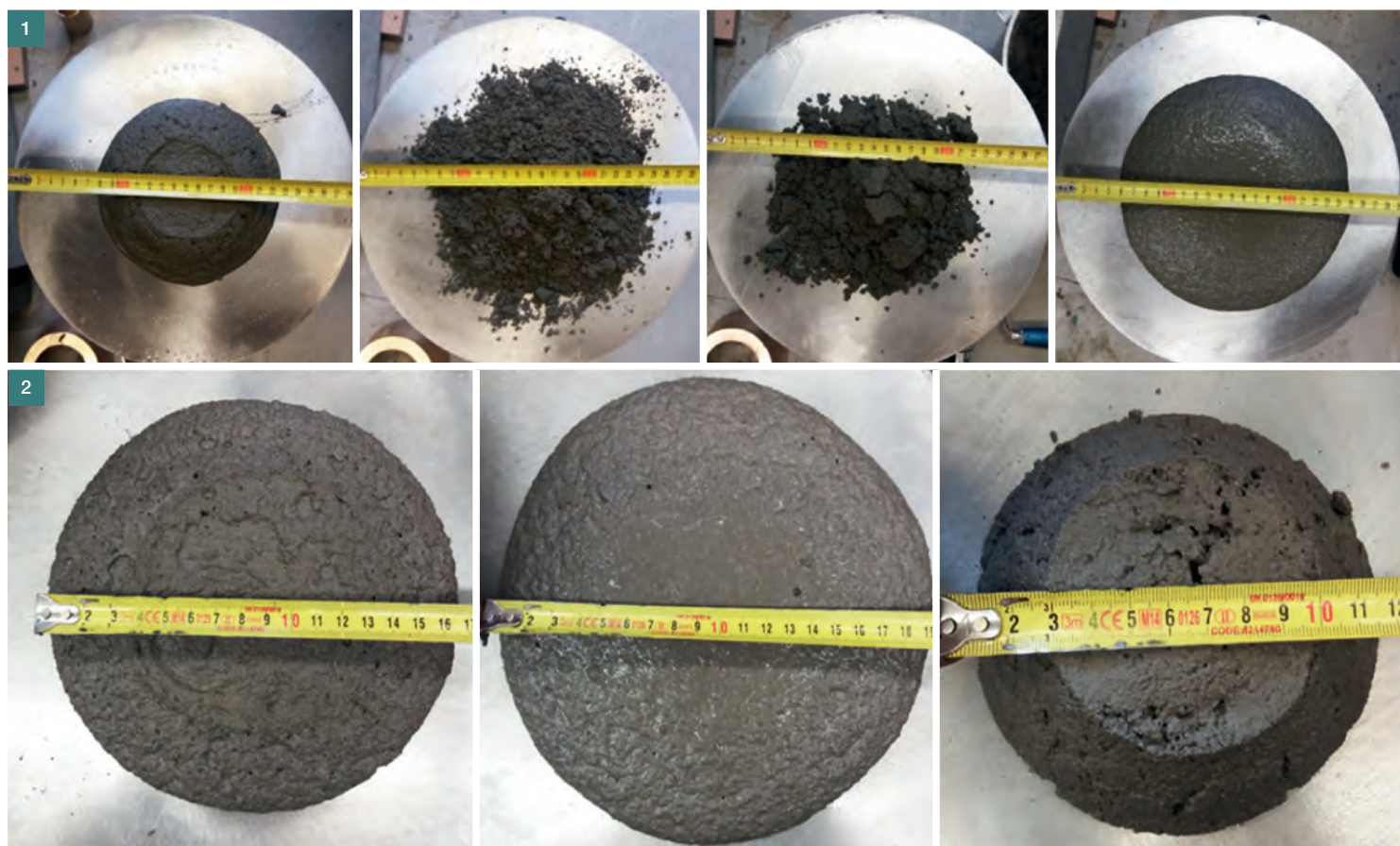
zaměšová pitná voda ( $v/c = 0,5$ ) a písek se zrny frakce 0,1-2 mm:

- cementová pasta S1a dále obsahovala suchý SAP v koncentraci 1% ku hmotnosti cementu (tj. 5,86 kg/m<sup>3</sup>). Aplikovaná koncentrace SAP byla vybrána na základě dříve provedených experimentů [2], [13], [19],
- cementová pasta S2a obsahovala shodné množství suchého polymeru jako S1a, navíc však bylo přidáno 87,9 kg/m<sup>3</sup> záměšové pitné vody (tj. 15 g vody na 1 g SAP),
- ve skupině S3a byla veškerá záměšová voda nahrazena saturovaným polymerem. Pro jeho přípravu byl použitý SAP na 24 h ponechán v uzavřené nádobě s pitnou vodou a následně odfiltrován. Koncentrace saturovaného SAP v cementové pastě S3a byla 0,5% ku hmotnosti cementu (tzn. S3a obsahovala přibližně 2,93 kg/m<sup>3</sup> SAP, který byl nasycen 453 kg/m<sup>3</sup> pitné vody). Výsledný obsah zachycené vody v polymeru byl tedy přibližně jedenapůlnásobkem záměšové vody v referenční pastě.

Cílem této první skupiny vzorků bylo získat obecnou představu o chování cementové pasty obsahující SAP

**Tab. 2** Detailní popis receptury druhé skupiny cementových past (aplikace portlandského směsného cementu CEM II, destilované vody a nutričních přísad) ■ **Tab. 2** Detailed description of the second cement paste group compositions (application of portland-fly ash cement CEM II, distilled water and nutrients)

Cementové pasty (druhá série)	CEM II/B-V 32,5 N	Vysokopecní struska	Destilovaná voda	Přidaná voda	Písek zrno 0,1-2 mm	Kvasničný extrakt	Laktát vápenatý	SAP suchý stav	SAP částečně saturovaný
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]
REFb	293	293	293	-	1 758	4,98	17,58	-	-
S1b	293	293	293	73,3	1 758	4,98	17,58	2,93	-
S2b	293	293	-	-	1 758	4,98	17,58	-	2,93 + 293
S3a	586	-	-	1 758	-	2,93 + 453			



1 Zkouška konzistence první skupiny cementových past 2 Zkouška konzistence druhé skupiny cementových past ■ 1 Consistency test of the first cement paste group 2 Consistency test of the first cement paste group

pro podrobnější definici dalších experimentů.

**Druhá skupina cementových past** obsahovala kromě jiného typu cementu a záměsové vody i látky sloužící jako živiny pro bakteriální aktivitu. V našem experimentu byly použity jedny z nejčastěji aplikovaných nutričních přísad ve výzkumu samohojitelného biologického betonu [18], [20]. K cementu před přidáním záměsové vody bylo tedy přimícháno 0,85 % hmotnosti cementu kvasničného extraktu a 3 % hmotnosti cementu laktátu vápenatého.

Ve druhé skupině byl použit portlandský směsný popílkový cement CEM II/B-V 32,5 N, struska, destilovaná voda, písek se zrnou frakce 0,1-2 mm, zmíněné nutriční sloučeniny a SAP v koncentraci 0,5 % hmotnosti cementu ve všech připravených sériích. Detailní popis receptury je uveden v tab. 2. Cílem druhé skupiny vzorků bylo pro dávku SAP stanovenou na základě první skupiny vzorků určit chování směsi obsahující potřebné živiny a rozdíly mezi jednotlivými způsoby aplikace SAP. Volba méně obvyklého druhu cementu byla učiněna s ohledem

na předpokládaný další výzkum, kdy nižší obsah slínek bude výhodný pro odlišení samovolné a bakteriální kalcifikace.

Stejně jako v první skupině byl SAP i ve druhém typu cementových past aplikován ve dvou stavech – v suchém stavu (S1b) a v částečně nasyceném stavu (S2b). Koncentrace SAP byla shodná pro obě pasty, tj. 0,5 % hmotnosti cementu. V případě SAP v suchém stavu bylo k záměsové vodě přidáno 73,3 kg/m<sup>3</sup> destilované vody (tzn. přibližně 25 g tekutiny na 1 g SAP).

Pro přidání SAP v nabobtnalém stavu (S2b) bylo aplikované množství polymeru (2,93 kg/m<sup>3</sup>) ponořeno do destilované vody v množství přesně odpovídajícím dávce záměsové vody v referenční pastě (293 kg/m<sup>3</sup>) a bylo ponecháno v uzavřené nádobě po dobu 24 h. Do pasty S2b nebyla dále přidána žádná záměsová voda, tzn. že částečně nasycený SAP sloužil jako její plná náhrada.

#### Konzistence

Předchozí studie ukázaly, že přidáním SAP do cementové pasty se výrazně mění její konzistence, jelikož polymer zachytí velkou část záměsové vody. Pro

optimalizaci receptury cementové pasty obsahující SAP v naší studii byly připravené vzorky podrobeny zkoušce konzistence dle ČSN EN 1015-3. Po ukončení míchání se z každého ze vzorků cementové pasty odebrala část pro stanovení konzistence. Vlastní zkouška probíhala tak, že se kovový kužel naplnil do 1/2 cementovou pastou a tato část se ztuhlila deseti lehkými údery dusadla. Následně pokračovalo plnění kovového kuželu druhou vrstvou a opět hutnění deseti lehkými údery dusadla, pak následovalo zahlazení horního povrchu a nadzvednutí kovového kuželu z povrchu Haegermannova setřásacího stolku. Rozliv cementové pasty probíhal pomocí 15 rázů setřásacího stolku s frekvencí jeden ráz za sekundu. Po ukončení setřásání se změnil průměr „koláče“ ve dvou na sebe kolmých směrech. Výsledná hodnota rozlivu je aritmetický průměr z těchto dvou měření.

#### Vliv SAP na pevnost cementové pasty

Ačkoliv je aplikace SAP v cementových kompozitech prospěšná z mnoha důvodů [21] (omezení autogenního smršťování, zlepšení mrazuvzdornosti,

**Tab. 3** Průměrná absorpce aplikovaného SAP v různých typech roztoku ■**Tab. 3** Average absorption of the applied SAP in various solutions

[g roztoku / g SAP]			
pitná voda	destilovaná voda	LKa	LKb
157	246	15	16

**Tab. 4** Pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku (aritmetický průměr  $\bar{x}$  a směrodatná odchylka  $s$ ) cementových vzorků první série ve stáří 7 dnů ■ **Tab. 4** Tensile and compressive strength values (arithmetic mean  $\bar{x}$  and standard deviation  $s$ ) measured on the cement specimens from the first group at 7 days

Cementové pasty (první série)	Pevnost v tahu za ohybu		Pevnost v tlaku	
	$\bar{x}$	$s$	$\bar{x}$	$s$
	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
REFa	4,9	0,2	40,6	7,0
S1a	2,2	0,1	11,1	2,1
S2a	3,3	0,2	16,3	2,8
S3a	3,4	0,3	29,7	0,6

hydroizolační vlastnosti atd.), výsledky předchozích studií ukázaly, že její vliv na pevnost může být problematický [13], [14], [19]. Pro budoucí vývoj samohojitelného biobetonu s SAP je tedy klíčové i určení vhodné koncentrace polymeru z hlediska mechanických vlastností.

V rámci experimentu byla z každé připravené cementové pasty odlita zkušební tělesa o velikosti 40 × 40 × 160 mm. Míchání cementové pasty probíhalo podle normy ČSN EN 196-1. Po 24 h od výroby byly vzorky odbedněny a uloženy v prostředí laboratoře, kde zrály po dobu 7 nebo 28 dní při běžné teplotě a vlhkosti.

Pro stanovení pevností v tlaku a v tahu za ohybu byla připravená zkušební tělesa podrobena tříbodové ohybové zkoušce a zbytky z ohybu se využily pro tlakovou zkoušku. Pilotní série past (REFa, S1a, S2a a S3a) byla zkoušena ve stáří 7 dnů, druhá série (REFb, S1b a S2b) po 7 a 28 dnech od betonáže. Zkoušky byly provedeny pomocí kalibrovaného elektrického lisu a výsledky byly zaznamenávány a analyzovány pomocí kontrolního softwaru od firmy Moravské přístroje, s. r. o.

## VÝSLEDKY

### Vliv složení roztoku na absorpční kapacitu SAP

Jak bylo již řečeno výše, iontové složení roztoku má velmi výrazný vliv na absorpční kapacitu SAP. V našem experimentu jsme proto měřili absorpční kapacitu vybraného SAP ve čtyřech odlišných roztocích – v destilované vodě, pitné vodě a v destilované vodě s různou koncentrací nutričních přísad (dále také LKa a LKb).

Z tab. 3 je dobře patrné, že se výsledky experimentu dobře shodují s naším předpokladem. SAP ponořený v destilované vodě (tj. v roztoku s minimálním obsahem iontů) byl schopen nasáknout kapalinu v množství až 246 g / 1 g. V pitné vodě se vlivem přítomných iontů tato hodnota snížila na 157 g / 1 g. V nutričních roztocích se schopnost absorpce snížila až na pouhých 6 % absorpční kapacity SAP v destilované vodě. V roztoku LKa polymer nasákl 15 g / 1 g a obdobně v roztoku LKb pouhých 16 g / 1 g.

### Konzistence

Výsledky zkoušky konzistence první série vzorků pomocí Haegermannova setřásačního stolku lze vidět na obr. 1, z něhož je patrné, že přídavek SAP (1 % hmotnosti cementu) bez navýšení obsahu záměsové vody (S1a) vedl k výrazně sušší směsi ve srovnání s referenčním vzorkem (REFa). V případě navýšení obsahu záměsové vody (15 g / 1 g SAP) výsledná konzistence pasty (S2a) opět nebyla srovnatelná s referenčním vzorkem. Aplikace plně saturovaného SAP pitnou vodou (S3a) vedla na druhou stranu k lehce tekutější směsi oproti referenčnímu vzorku (průměr rozlité REFa byl 147 mm, oproti tomu průměr rozlité S3a kolem 187,5 mm).

Jak naznačily výsledky nasákavosti SAP v odlišných roztocích, použití destilované vody a nutričních přísad v cementové pastě obsahující SAP by mohlo mít značný vliv na její konzistenci. V případě pasty S1b, ve které bylo aplikováno 0,5 % SAP hmotnosti cementu a přidaná záměsová voda (25 g / g SAP), byla konzistence pasty lehce tekutější oproti referenčnímu vzorku (rozlité S1b kolem 190 mm). Aplikace částečně nasyceného polymeru

### Reference:

- [1] MIGNON, A., GRAULUS, G. J., SNOECK, D., MARTINS, J., DE BELIE, N., DUBRUEL, P., et al. pH-sensitive superabsorbent polymers: a potential candidate material for self-healing concrete. *Journal of Materials Science*. 2014, Vol. 50, Issue 2, pp. 970–979.
- [2] SNOECK, D., VAN VLIERBERGHE, S., 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, No. 1, pp. 13–24.
- [3] SNOECK, D. Superabsorbent polymers to seal and heal cracks in cementitious materials. *RILEM Technical Letters*. 2018, pp. 32–38.
- [4] EDVARDSEN, C. Water Permeability and Autogenous Healing of Cracks in Concrete. *American Materials Journal*. 1999, Vol. 96, Issue 4, pp. 448–454.
- [5] JONKERS, H. M., THIJSSSEN, A., MUYZER, G., COPUROGLU, O., SCHLANGEN, E. Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete. *Ecological Engineering*. 2010, Vol. 36, Issue 2, pp. 230–235.
- [6] TZIVIOGLOU, 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. 118–125.
- [7] VAN VLIERBERGHE, S., DE BELIE, N., WIKTOR, V., WANG, J., BOON, N., MIGNON, A., et al. Application of modified-alginate encapsulated carbonate producing bacteria in concrete: a promising strategy for crack self-healing. *Frontiers in Microbiology*. October 2015, Vol. 6, pp. 1–14.
- [8] ERSAN, Y. C., BOON, N., DE BELIE, N. 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, 2018, pp. 475–484.
- [9] CHIU, CH., CHEN, C. C., TING, W. T. Using lightweight aggregated as a carrier for bacterial spores in self-healing concrete. In: *The Proceedings of the Final Conference of RILEM TC 253-MCI*. Toulouse, 2018.
- [10] WANG, J., MIGNON, A., TRENSON, G., VAN VLIERBERGHE, S., BOON, N., DE BELIE, N. Screening of pH-responsive Hydrogels for Encapsulation of Bacteria for Concrete Crack Self-sealing. In: *Proceedings of final conference of RILEM TC 253-MCI*. Toulouse, 2018, pp. 405–412.
- [11] GIRISELVAM, M. G., POORNIMA, V., VENKATASUBRAMANI, R., SREEVIDYA, V. Enhancement of crack healing efficiency and performance of SAP in biocrete. *IOP Conference Series: Materials Science Engineering*. 2018, Vol. 310, conference 1.
- [12] MECHTCHERINE, V., GORGES, M., SCHROEFL, C., ASSMANN, A., BRAMESHUBER, W., RIBEIRO, A. B., et al. Effect of internal curing by using superabsorbent polymers (SAP)

on autogenous shrinkage and other properties of a high-performance fine-grained concrete: results of a RILEM round-robin test. *Materials and Structures*. 2014, Vol. 47, Issue 3, pp. 541–562.

- [13] JANG, S., PARK, W., KIM, S. Properties of strain-hardening cement composites with superabsorbent polymer particles. *Magazine of Concrete Research*. 2019, Vol. 71, Issue 8, pp. 437–448.
- [14] SUN, B., WU, H., SONG, W., LI, Z., YU, J. Design methodology and mechanical properties of Superabsorbent Polymer (SAP) cement-based materials. *Construction and Building Materials*. 2019, Vol. 204, pp. 440–449.
- [15] MECHTCHERINE, V., HANS-WOLF, R. *Application of Superabsorbent Polymers (SAP) in Concrete Construction*. 2012. 167 p.
- [16] KANG, S., HONG, S. MOON, J. Importance of monovalent ions on water retention capacity of superabsorbent polymer in cement-based solutions. *Cement and Concrete Composites*. 2018, Vol. 88, pp. 64–72.
- [17] WIKTOR, V., JONKERS, H. M. Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2011, Vol. 33, Issue 7, pp. 763–770.
- [18] 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. 659–663.
- [19] PELTO, J., LEIVO, M., GRUYAERT, E., DEBBAUT, B. Application of encapsulated superabsorbent polymers in cementitious materials for stimulated autogenous healing. *Smart Materials and Structures*. 2017, Vol. 26, Issue 10, pp. 1–14.
- [20] WANG, J. Y., SNOECK, D., VAN VLIERBERGHE, S., VERSTRAETE, W., DE BELIE, N. Application of hydrogel encapsulated carbonate precipitating bacteria for approaching a realistic self-healing in concrete. *Construction and Building Materials*. 2014, Vol. 68, pp. 110–9.
- [21] MECHTCHERINE, V. Use of superabsorbent polymers (SAP) as concrete additive. *RILEM Technical Letters*. 2016, Vol. 1, pp. 81–87.
- [22] JENSEN, O. M., HANSEN, P. F. Water-entrained cement-based materials: II. Experimental observations. *Cement and Concrete Research*. 2002, Vol. 32, Issue 6, pp. 973–978.
- [23] AZIZ, F., ABU BAKAR, N., ELHIBIR, M., SAFIEE, N. Compressive Strength and Water Absorption Behavior of Self-Curing Fiber Reinforced Concrete. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2018, Vol. 431, Issue 4.
- [24] LAUSTSEN, S., HASHOLT, M. T., JENSEN, O. M. A new technology for air-entrainment of concrete. In: *Proceeding 1st International Conference on Microstructure Related Durability of Cementitious Composites*. 13–15 October 2008, Nanjing, China. 2008, pp. 1223–1230.
- [25] BRÜDERN, A.-E., MECHTCHERINE, V. Multifunctional Use of Sap in Strain-Hardening Cement-Based Composites. In: *International RILEM Conference on Use of Superabsorbent Polymers and Other New Additives in Concrete*. August 2010, pp. 11–22.

**Tab. 5** Pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku (aritmetický průměr  $\bar{x}$  a směrodatná odchylka s) cementových vzorků druhé série ve stáří 7 a 28 dnů ■ **Tab. 5** Flexural tensile strength and compressive strength values (arithmetic mean  $\bar{x}$  and standard deviation s) measured on the cement specimens from the second group at 7 and 28 days

Cementové pasty (druhá série)	Pevnost v tahu za ohybu				Pevnost v tlaku			
	7 dní		28 dní		7 dní		28 dní	
	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s
	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
REFb	1,2	0,1	2,2	0,1	4,0	0,1	7,2	0,5
S1b	1,1	0,1	1,7	0,3	3,1	0,2	5,7	0,5
S2b	2,0	0,2	3,0	0,2	6,9	0,4	11,4	1,0

(S2b), který sloužil jako plná náhrada za záměsovou vodu, vedla v našem experimentu k výrazně méně tekuté směsi (poloměr rozlití S2b kolem 100 mm) v porovnání s referenčním vzorkem.

### Vliv SAP na pevnost cementové pasty

Jak ukázaly předchozí studie, aplikace SAP v cementových materiálech může zapříčinit poměrně výrazný pokles tlakové i tahové pevnosti. Je tedy zřejmé, že složení materiálu, především optimální koncentrace polymeru, musí být zkoumáno i s ohledem na výsledné mechanické vlastnosti.

V první části experimentu jsme podrobili první sérii cementových vzorků ohybovým a tlakovým zkouškám ve stáří 7 dnů. Jak lze vidět v tab. 4, výsledky mechanických zkoušek se do velké míry shodují s výsledky měření konzistence. Použití velmi suché směsi S1a (1 % SAP a žádná přidaná záměsová voda) vedlo k drastickému propadu obou sledovaných veličin. Pevnost v tahu vzorků S1 dosahovala kolem 45 % pevnosti referenční pasty a tlaková pevnost pohybů 27 %. Přidání dodatečné záměsové vody v případě směsi S2a částečně limitovalo tento negativní dopad polymeru na pevnosti. Vzorky z pasty S2a dosáhly v průměru kolem 60 % tahové pevnosti referenčního vzorku a 40 % tlakové pevnosti. Nejlépe ze všech směsí obsahujících SAP dopadla série se saturovaným SAP (S3a). Tyto vzorky obsahovaly pouze poloviční množství SAP, které bylo napuštěno přibližně jedenapůlnásobkem záměsové vody v referenčních vzorcích. Série vzorků S3a dosáhla v průměru 69 % tahové pevnosti referenčních vzorků a až 73 % tlakové pevnosti.

Výsledky mechanických zkoušek ve stáří 7 a 28 dnů druhé série cementových vzorků, které lze vidět v tab. 5, ukazují, že i v druhé sérii vzorků dosáhla nejlepších výsledků ve všech sledovaných

časech receptura s částečně saturovaným SAP (S2b). Zachycení záměsové vody v polymeru mělo za následek méně zvodnělou konzistenci a dosažení vyšších pevností oproti referenčním vzorkům. Na druhou stranu aplikace polymeru a dodatečné záměsové vody (25 g / 1 g SAP) vyvolala pokles jak tahové, tak tlakové pevnosti materiálu. Konkrétně ve 28 dnech dosahovaly vzorky S1b kolem 78 % tahové pevnosti referenčních vzorků a 79 % jejich tlakové pevnosti.

### DISKUZE A ZÁVĚRY

Výsledky popisující vliv složení roztoku na absorpční kapacitu aplikovaného SAP v našem experimentu potvrzují předpoklad, že iontové složení roztoku bude mít velmi výrazný vliv na chování polymeru. Zajímavým poznatkem je, že nasákavost SAP v nutričních roztocích je velmi malá, dokonce až šestnáctkrát menší než nasákavost v destilované vodě. Tento efekt by mohl omezit pozitivní vliv SAP na biologický samohojitelný beton, jelikož kvůli malé nasákavosti v přítomnosti živin by nemohl fungovat ani jako ochranný obal pro bakterie, ani jako retenční prostředek pro vodu potřebnou pro jejich metabolismus.

Stanovení konzistence cementové pasty obsahující SAP potvrdilo předpoklad, že polymer v čerstvé pastě zachytí většinu záměsové vody a výsledná směs bude tedy pouze zavlhá a syká (S1a). Přidání 15 g záměsové vody na 1 g SAP (S2a) v našem experimentu nevedlo k výraznějšímu zlepšení konzistence. V druhé sérii vzorků byla tato hodnota dodatečné záměsové vody zvýšena na 25 g / 1 g SAP (S1b) a výsledná konzistence se přibližovala referenční pastě. Je však potřeba mít na paměti, že odlišné iontové složení druhé várky vzorků (především přítomnost živin) pravděpodobně ovlivnilo chování polymeru a ve standardní směsi by výsledná konzistence mohla být odlišná. Obě námi zkoušená množství dodatečné záměsové vody se však

značně liší od nejčastěji aplikované hodnoty 12 až 13 g / 1 g SAP [22] až [25]. Jelikož však většina předchozích experimentů přistupovala k úpravě konzistence pomocí superplastifikátorů, nelze získané hodnoty jednoduše srovnávat.

Zajímavé poznatky přinesla aplikace plně a částečně saturovaného SAP jako plné náhrady záměsové vody. V případě plně saturovaného polymeru (S3a) zkouška konzistence naznačila, že více než 65 % tekutiny bylo při procesu míchání ze SAP uvolněno, jelikož poloměr rozlití S3a byl větší než REFa. Je tím pádem pravděpodobné, že v S3a bylo k dispozici více uvolněné záměsové vody než v referenčním vzorku.

Dále je zajímavé srovnání konzistence vzorků S2a a S3a. Přestože pasta S2a obsahovala pouze o 16 % méně záměsové vody, než bylo její množství v plně saturovaném S3a, výsledná konzistence obou vzorků se výrazně lišila. Ukazovalo by to tedy na velmi odlišnou kinetiku nasákavosti/retence plně saturovaného SAP a suchého SAP při aplikaci do cementové pasty.

Podobné chování bylo pozorováno také u pouze částečně saturovaného polymeru ve druhé sérii (S2b). V tomto případě byl poloměr rozlití referenční pasty menší než v případě S2b, avšak na rozdíl od první série obsahoval polymer shodné množství záměsové vody jako v referenční pastě. Výsledek tedy naznačuje, že podstatná část tekutiny zůstala zachycena v polymeru i přes důkladný proces míchání.

Při porovnání mechanických zkoušek první a druhé série je zřejmé, že z hlediska pevnosti je vhodnější nižší koncentrace SAP (0,5 % hmotnosti cementu) v materiálu. Výsledky našeho experimentu dále naznačují, že z hlediska mechanických vlastností je aplikace saturovaného polymeru výhodnější než aplikace suchého polymeru.

V navazujících studiích však bude potřeba stanovit a provnat ochranný potenciál obou stavů, tzn. určit životaschopnost vybraných bakterií v cementové pastě, ve které SAP bude zajišťovat jejich ochranu proti krystalizačním tlakům. Pro vývoj biologického samohojitelného betonu by dalším vhodným krokem bylo sledování samohojícího potenciálu samotného SAP a určení faktorů, které ovlivňují jeho míru a rychlost (způsob aplikace a ošetřování, množství dodatečné záměsové vody apod.).

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 hodnocení jejího životního cyklu“ (SGS19/149/OHK1/3T/11).

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



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



Ing. Josef Fládr, Ph.D.  
josef.fladr@fsv.cvut.cz



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



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



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



všichni:

Fakulta stavební ČVUT v Praze  
Katedra betonových a zděných konstrukcí

Článek byl posouzen odborným lektorem.  
The article was reviewed.

# INZERCE PRO VÁS!

## EDIČNÍ PLÁN BETON TKS NA ROK 2020

Číslo	Téma čísla	Termín objednání inzerce	Termín dodání podkladů pro inzerci	Číslo vyjde
1/2020	Pozemní stavby	17. 1.	30. 1.	14. 2.
2/2020	Technologie	17. 3.	30. 3.	14. 4.
3/2020	Sanace a rekonstrukce	18. 5.	29. 5.	15. 6.
4/2020	Mosty	17. 7.	30. 7.	14. 8.
5/2020	Beton a architektura	17. 9.	30. 9.	14. 10.
6/2020	Inženýrské stavby	18. 11.	30. 11.	14. 12.

## CENÍK

Formát	Umístění	Cena
A4	4. strana obálky	80 000,-
A4	3. strana obálky	50 000,-
A4	vnitřní strana	35 000,-
1/2 A4	vnitřní polovina strany	20 000,-
1/3 A4	vnitřní třetina strany	15 000,-
1/4 A4	vnitřní čtvrtstrana	12 000,-
1/6 A4	inzerát nebo tisková zpráva	8 000,-
1/8 A4	inzerát nebo tisková zpráva	6 000,-
	propagační článek – za každou celou stranu	30 000,-
	vkład vlastních propagačních materiálů	8 000,-

Ceny jsou bez DPH

Způsob placení: inzercie a PR články jsou placeny na základě faktury vystavené po jejich vytištění v časopise. Klient obdrží současně s fakturou dva výtisky časopisu, v případě zájmu lze přiblížit větší množství

### SLEVY:

při opakování inzerátu v rámci ročníku .....-10 %  
pro členy SVC ČR, SVB ČR, ČBS ČSSI a SSBK .....-15 %  
při objednání inzerce do konce ledna .....-10 %  
při objednání celoroční inzerce (6ks) ..... -5 %  
jiné možnosti či kombinace po dohodě s redakcí.

### PŘÍRÁŽKY:

přesné umístění .....+10 %  
grafické zpracování .....+10 %

## PŘÍJEM INZERCE

Beton TKS, s. r. o.  
Na Zámecké 9, 140 00 Praha 4  
tel.: 602 839 429, e-mail: redakce@betontks.cz

[www.betontks.cz](http://www.betontks.cz)

