

# SAMOPOPRAVLJIVI BETONI

Petra Štukovnik<sup>1</sup>, Violeta Bokan Bosiljkov<sup>1</sup>, Marjan Marinšek<sup>2</sup>

STROKOVNI ČLANEK

<sup>1</sup>Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, 1000 Ljubljana

<sup>2</sup>Univerza v Ljubljani, Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo, Jamova 2, 1000 Ljubljana

## POVZETEK

V prispevku je opisan beton kot gradbeni material ter možnosti za pripravo t. i. samopopravljivega betona. V samopopravljivih betonih so opisani mehanizmi samoceljenja razpok. Predstavljeni so naravni, kemijski in biološki načini samopopravljivosti betona ter opisane glavne značilnosti posameznih mehanizmov. Nadalje so v prispevku predstavljene glavne prednosti samopopravljivih betonov v primerjavi s konvencionalnimi betoni ter tudi nekatere pomanjkljivosti. Posebej je izpostavljena izboljšana trdnost, nižja prepustnost za kapljevino ter podaljšana življenjska doba samopopravljivih betonov. Kot glavna slabost samopopravljivih betonov pa je predstavljena njihova cena, ki je v primerjavi s konvencionalnimi betoni precej višja.

**Ključne besede:** beton, samopopravljivost betona, načini samopopravljivosti betona, funkcionalne lastnosti samopopravljivih betonov

## Self-healing concrete

### ABSTRACT

The manuscript describes concrete as a construction material and possibilities of preparing the so-called self-healing concrete. The self-healing mechanisms in concrete systems are described by means of autogenous natural processes, by a chemical manner or as a biological healing processes. Additionally, the manuscript enlightens the main advantages as well as hindrances of self-healing concretes over conventional concrete systems. The emphasis is given on improved strength, lower permeability for liquids and prolonged durability of self-healing concretes. On the other hand, the main hindrance of self-healing concrete systems is their price, which is considerably higher when compared to conventional concrete systems.

**Keywords:** concrete, self-healing concrete, self-healing effect in concrete, functional properties of self-healing concrete systems

## 1 UVOD

Beton je za vodo druga najpogosteje uporabljena snov na Zemlji. Je nenadomestljiv material pri infrastrukturnih objektih. S stališča razpoložljivih naravnih virov, ki so prisotni praktično povsod po svetu, ekonomičnosti proizvodnje in ekologije, beton kot takšen nima konkurence. Beton je sestavljen iz zmesi kamnitih zrn in vode ter cementa, ki deluje kot hidravlično vezivo. Ko sveži beton preide v trdno agregatno stanje, po določenem času doseže visoko trdnost in trdoto, kar mu daje tako uporabne lastnosti v gradbeništvu. Slabšo natezno trdnost betona v gradbeništvu rešujemo z dodatkom jeklene armature, ki prevzame natezne napetosti. Na takšen način pripravljamo armirani beton. Po svojih funkcionalnih lastnostih mora biti beton odporen proti delovanju različnih mehanskih sil in okoljskih vplivov, trajen, ekonomičen in estetski. Danes se od betona zahteva še robustnost, možnost minimalnega vzdrževanja in

recikliranja ter sposobnost vgradnje odpadnih snovi in nenazadnje prijaznost okolju. Betona se porabi skoraj trikrat več kot vseh drugih gradbenih materialov skupaj [1].

Beton je gradbeni material, ki se je stalno razvijal skozi vso svojo zgodovino. Prvi so gradbeni material, ki je imel lastnosti, podobne današnjemu betonu, iznašli Rimljani in iz njega na primer zgradili Panteon. Rimski beton je bil izdelan iz vode, zmesi kamnitih zrn, apna, pucolana in zdrobljene opeke. Z razvojem gradbeništva so prišli do tehnologije ulivanja enovite mase v leseni opaž in dosegli mnoge lastnosti, ki ustrezajo današnjim normativom. Rimski tehnologija izdelave in uporabe betona se nadaljuje leta 1414, ko so v švicarskem samostanu rimsko recepturo začeli izboljševati in razvijati. V začetku 19. stoletja je bil patentiran Portlandski cement, glavno hidravlično vezivo modernega betona, ki je omogočilo doseganje ponovljivih lastnosti betona. V drugi polovici 19. stoletja se je nato začel razvijati armirani beton in začela se je njegova široka uporaba pri gradnji industrijskih objektov in visokih stavb. Danes je beton osrednje gradivo, ki se uporablja pri gradnji vseh vrst objektov, od nizkih do visokih zgradb, za najrazličnejše namene uporabe.

Kljub številnim dobrim lastnostim betona, pa ima kot gradbeni material tudi nekaj pomanjkljivosti. Njegova šibka točka je, da izredno rad poka, kar lahko močno vpliva na trdnost in življenjsko dobo betona. Skozi razpoke lahko v beton prodre vlaga, kloridi, ogljikov dioksid in nekatera druga agresivna sredstva. Večinoma nastale razpoke brez ustreznega in takojšnjega popravila počasi napredujejo, kar lahko povzroči znatno poslabšanje in oslabitev trdnosti betona. Posledično navadno beton popravljajo z materiali, kot so malta in epoksi smole, vendar to niso trajnostne rešitve. Zato se v današnjem času razmišlja o možnosti priprave t. i. samopopravljivega betona (SPB). Samopopravljivost je lastnost materiala, ki vključuje obnovitev in izboljšanje funkcionalnih lastnosti po predhodni spremembi, ki je zmanjšala učinkovitost materiala. Torej je samopopravljivi beton opredeljen kot beton, ki ima zmožnost samopopravljivosti majhnih razpok in s tem obnove osnovnih mehanskih lastnosti [2, 3].

Ideja za samopopravljivi beton se je porodila ob opazovanju naravnih pojavov v organizmih, saj se poškodovana povrhnjica dreves in živali lahko do

določene mere popravi sama. Za trajnost betonskih konstrukcij je zato samopopravljivost ključnega pomena. Samopopravljivi beton je zmes, ki ima enake sestavine kot običajen beton, tej zmesi pa je dodan reagent, ki omogoča samopopravljivost. Naloga reagenta za samopopravljivost je, da ostane med mešanjem in vgrajevanjem nedotaknjen, aktivira pa se kot posledica sekundarnih kemijskih reakcij ali ko pride beton v stik z vodo ob razpoki. V samopopravljivem betonu se obnova mehanskih lastnosti zgodi na način, da se formirane razpoke kot posledica kemijskega, fizikalnega ali biološkega procesa navadno zapolnijo s  $\text{CaCO}_3$ . Z zapolnjevanjem razpok potencialno najšibkejša mesta materiala postopoma izginjajo, beton pa pridobiva na trdnosti.

Obstajajo seveda tudi drugačni mehanizmi postopnega zapolnjevanja, kjer precipitira in polni razpoke neka druga trdna faza, vendar se je do sedaj kot najprimernejši in najbolj ekonomičen način samopopravljivosti betona izkazal prav način polnjenja razpok s  $\text{CaCO}_3$ . Tudi mehanizmov, ki privedejo do precipitacije  $\text{CaCO}_3$  ali neke druge trdne faze v razpokah betona je več. Med slednjimi pa se v zadnjem času še posebna pozornost posveča t. i. biološkim procesom samopopravljivosti betona, kjer je precipitacija  $\text{CaCO}_3$  posledica metabolnega delovanja nekaterih bakterij, ki so namenoma dodane v betonsko mešanico. Beton z dodatkom bakterij se imenuje biobeton.

## 2 PROCESI SAMOPOPRAVLJIVOSTI V BETONU

Poznamo več procesov samopopravljivosti betona; to so naravni, biološki in kemijski proces popravljivosti betona (slika 1) [4].

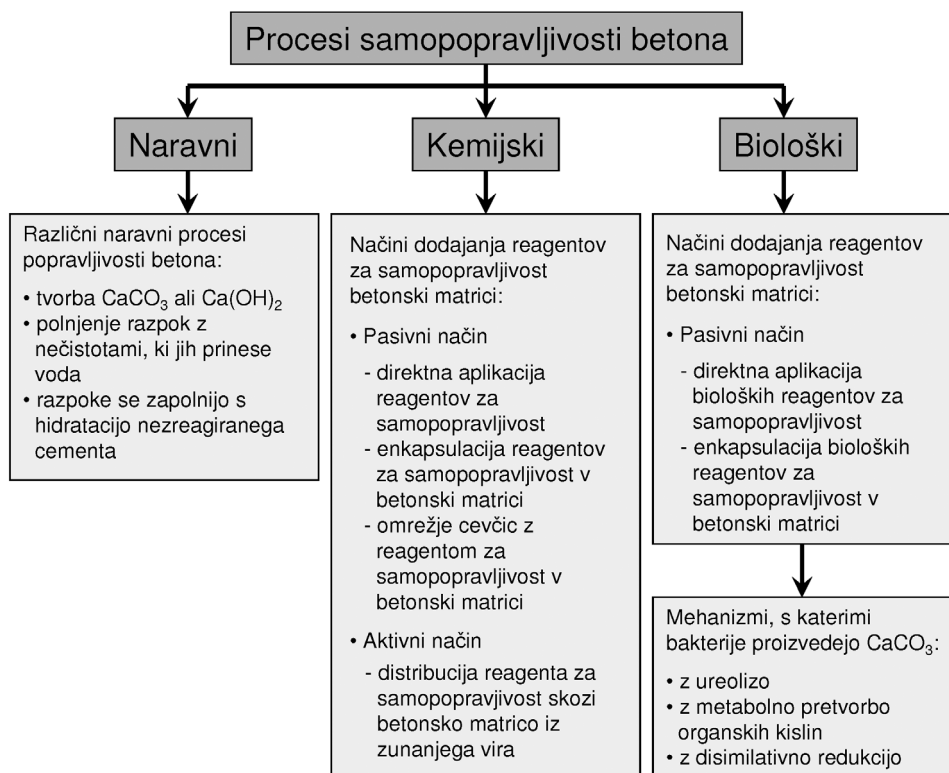
### 2.1 Naravni procesi samopopravljivosti betona

Pri naravnih procesih samopopravljivosti betona poznamo tri načine za polnjenje razpok, ki nastanejo pri različnih poškodbah betona ali zgolj zaradi samega staranja betona. Ti načini so naslednji (slika 2):

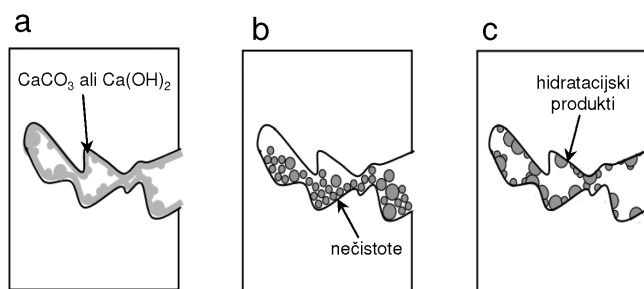
- nastajanje kalcijevega karbonata ali kalcijevega hidroksida
- polnjenje razpok z nečistotami, ki jih prinese voda
- polnjenje razpok s hidratacijo nezreaganega cementa

V večini primerov hkrati poteče več procesov, vendar se izkaže, da z nobenim procesom ni mogoče povsem zapolniti relativno velikih razpok. Lahko rečemo, da naravni procesi samopopravljivosti betona preprečujejo razvoj nastanka razpok oziroma preprečujejo globoko prodiranje škodljivih kemikalij v beton [5].

Kot najučinkovitejši naravni proces za samopopravljivost betona se je izkazala tvorba kalcijevega karbonata in kalcijevega hidroksida. Pri naravnem procesu samopopravljivosti betona pride do hidratacije nehidratiranih cementnih delcev ali karbonatizacije



Slika 1: Shematski prikaz procesov samopopravljivosti, načinov dodajanja reagenta za samopopravljivost betona in mehanizmov, s katerimi bakterije proizvedejo kalcijev karbonat [4].

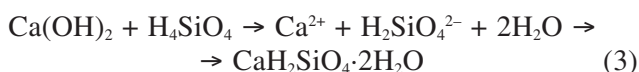


Slika 2: Naravni procesi samopopravljivosti betona [5]

raztopljenega kalcijevega hidroksida. Hidratacija kalcijevega oksida tvori kalcijev hidroksid, ki lahko reagira z ogljikovim dioksidom iz atmosfere. Osnovni mehanizmi za tvorbo kalcijevega karbonata in kalcijevega hidroksida so prikazani v enačbah (1) in (2) [6].

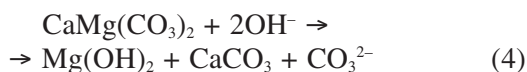


Poleg osnovnih mehanizmov naravnih procesov za samopopravljivost betona pa velja omeniti še dva: i) pucolansko reakcijo, ki spada v razdelek (c) naravnih procesov samopopravljivosti betona in ii) alkalno-karbonatno reakcijo (ACR), ki jo lahko uvrstimo v razdelek (a). Med pucolansko reakcijo reagirata pucolan (vulkanski pepel) in  $\text{Ca(OH)}_2$ , ki sta prisotna v cementnem vezivu v betonu. Pucolan je silikatna in aluminatna snov, ki v prisotnosti vode tvori silicijevo (IV) kislino in lahko reagira s  $\text{Ca(OH)}_2$ ; enačba (3). Nastali produkt ima pri sobni temperaturi lastnosti cementa in se lahko strjuje tudi pod vodo. Pucolanska reakcija je tudi tista, ki je v veliki meri odgovorna, da nekatere zgradbe iz časa Rimljanov še vedno stojijo (kot npr. že prej omenjeni Panteon).



Po drugi strani je ACR pravzaprav reakcijski sistem, ki vključuje t. i. dedolomitizacijo (propadanje dolomitnega agregata v betonu) ter posledično tvorbo nekaterih novih faz vključujoč tudi  $\text{CaCO}_3$ ; enačbe (4–8) [7].

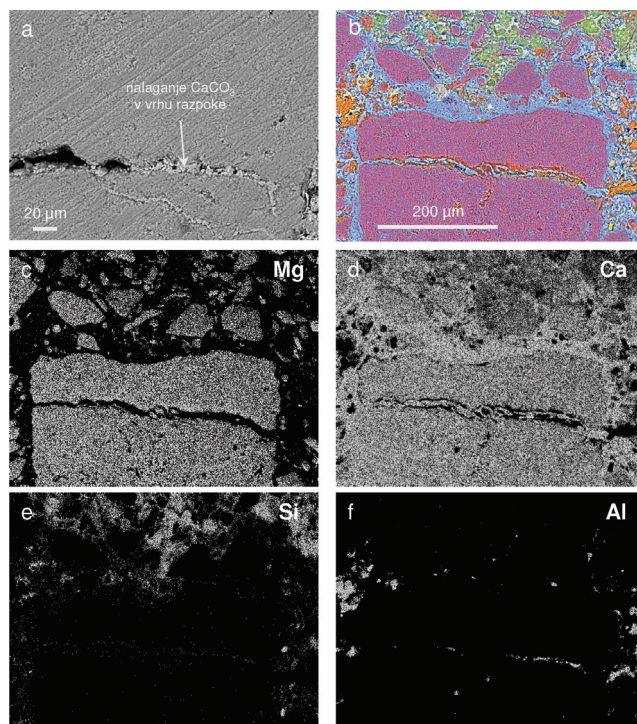
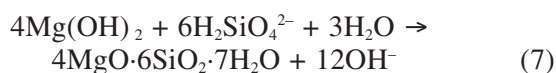
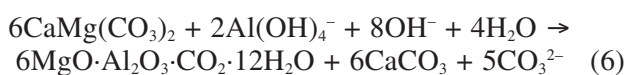
Dedolomitizacija:



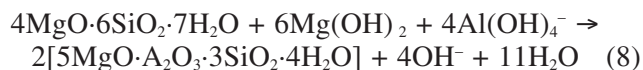
Tvorba sekundarnega  $\text{CaCO}_3$ :



Tvorba nekaterih novih faz Mg-Al-Si:



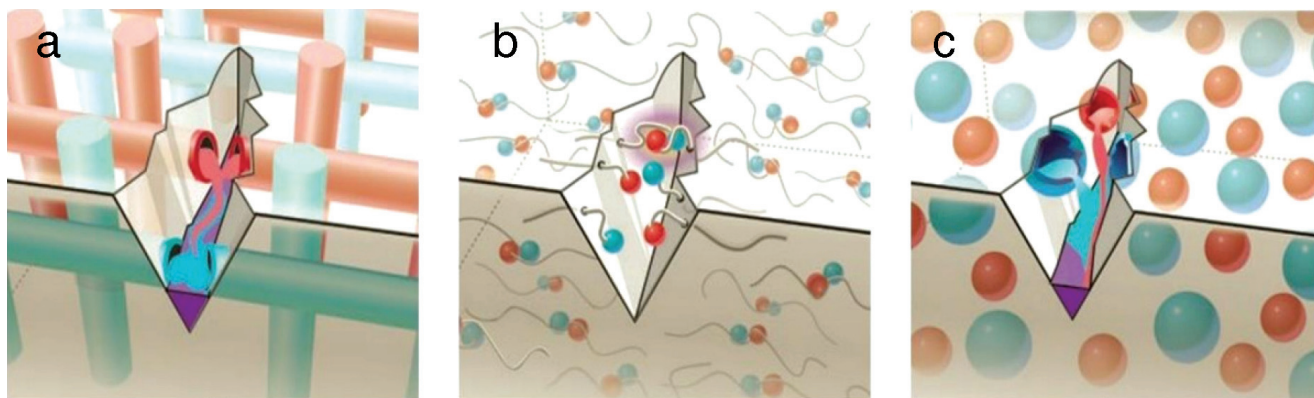
Slika 3: Slike vrstičnega elektronskega mikroskopa vzorca, ki je bil podvržen sistemu alkalno-karbonatne reakcije: nalaganje  $\text{CaCO}_3$  v vrhu razpoka (a) in razpoka v betonu je popolnoma zapolnjena s produkti ACR (b). Mape posameznih elementov: Mg (c), Ca (d), Si (e) in Al (f).



Celjenje razpok v betonu po naravnem procesu samopopravljivosti je odvisno od prisotnosti vode ali vlage v okolici, količine nehidratiziranega cementa in sestave betonske matrice. Zgoraj opisane reakcije so relativno počasne in skozi (navadno) večletno obdobje počasi vplivajo na mehanske lastnosti betona. Kljub temu, da se na tak način lahko zacelijo le razpoke širine do  $\approx 0,3$  mm, naravni procesi samopopravljivosti betona igrajo pomembno vlogo pri trajnosti betonskih izdelkov. Kako v praksi izgleda celjenje razpok po naravnem načinu samopopravljivosti, prikazuje **slika 3**.

## 2.2 Kemijski procesi samopopravljivosti betona

Kemijski procesi popravljivosti betona so lahko aktivna ali pasivna obdelava razpok v betonu. Pasivni načini so direktna aplikacija reagenta za samopopravljivost betonski matrici, enkapsulacija reagenta za samopopravljivost v betonski matrici in omrežje s steklenimi cevčicami, napolnjenimi z reagentom za samopopravljivost v betonski matrici (**slika 4**). Aktivni način pa je distribucija reagenta za samopopravljivost po omrežju iz steklenih cevi v betonski matrici s povezavo z zunanjim virom reagenta za samo-



**Slika 4:** Trije glavni načini pasivne vgradnje reagenta za samopopravljivost v betonsko matrico: a) preko omrežja cevčic, b) direktna aplikacija in c) enkapsulacija [8]

popravljivost. Glavna ideja kemijskega procesa samopopravljivosti betona je dodajanje reagentov za samopopravljivost v betonsko matrico, npr. vodnega stekla, hidrogelov, ki ob stiku z vlago nabrekajo, ali raznih polimernih materialov, kot so metilmetakrilat, akrilne in epoksidne smole. Ti reagenti po nastanku razpoke lahko le-to zapolnijo.

Z nastankom razpoke se torej bodisi na mestu razpoke iz cevčic ali kapsul sprosti reagent za samopopravljivost, ki v prisotnosti vlage ali zaradi drugega vpliva reagira in zapolni razpoko, bodisi je reagent za samopopravljivost primešan hidravličnemu vezivu betona in ob nastanku razpoke ravno tako reagira ter zapolni razpoko. Vendar pa se v praksi pogosto izkaže, da mnogi reagenti za samopopravljivost z betonsko sestavo niso združljivi v širokem razponu različnih pogojev, zato lahko v nekaterih skrajnih primerih celo povzročajo dodatno širjenje obstoječih razpok [8].

### 2.3 Biološki procesi samopopravljivosti betona

V zadnjem desetletju je uporaba bakterij v gradbeništvu postala tema raziskav po vsem svetu. Znano je, da lahko mikroorganizmi, zlasti bakterije, obarjajo različne vrste mineralov, kot so karbonati, sulfidi, silikati in fosfati. Zaradi svoje združljivosti z betonsko sestavo je najbolj primeren za zapolnitev razpok v betonu kalcijev karbonat. Slednje so v gradbeništvu preučevali predvsem za uporabo na področju površinske zaščite naravnega kamna, sanacije razpok v betonu in izboljšanja tal [9].

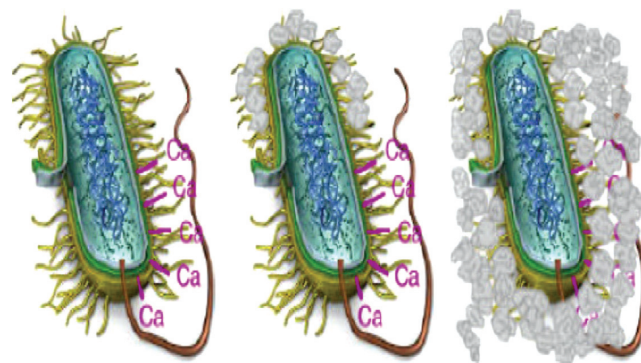
Kalcijev karbonat se lahko tvori v procesu biološko inducirane mineralizacije v prisotnosti zunanjega vira kalcija. Vir kalcijevih ionov  $\text{Ca}^{2+}$  je v vlažnem okolju lahko beton sam ali pa ione  $\text{Ca}^{2+}$  dodajamo preko dodatkov kemikalij (npr. ioni  $\text{Ca}^{2+}$  so del hranila za mikroorganizme). Mikrobiološka precipitacija kalcita pomeni tvorbo kalcijevega karbonata iz prenasičene raztopine zaradi biokemijskih reakcij ob prisotnosti mikroorganizma. Organizmi lahko s presnovo hranila

izločijo več presnovnih produktov (npr. med drugim  $\text{CO}_2$ , ki v alkalnem okolju betona nato tvori  $\text{CO}_3^{2-}$ ), le-ti pa ob celični steni reagirajo z ioni  $\text{Ca}^{2+}$ , kar povzroči precipitacijo  $\text{CaCO}_3$  (slika 5). V tem procesu mikroorganizmi zunajcelično proizvedejo kalcijev karbonat po dveh možnih metabolnih poteh: avtotrofni (vir ogljika je zunanji  $\text{CO}_2$ ) in heterotrofni (vir ogljika je organska spojina), oziroma  $\text{CaCO}_3$  lahko nastane v dveh različnih ciklih: dušikovem ali žveplozem [10]. Kalcijev karbonat se tako preko biološkega procesa obarja na stenah bakterij. Bakterijska celična površina ima namreč negativno nabite skupine, ki vežejo dvovalentne katione (npr.  $\text{Ca}^{2+}$ ), kar ustvarja idealna nukelacijska mesta za izločanje kalcita [10].

V gradbeništvu se je za samoceljenje betona kot najbolj ugodna metabolna pot za precipitacijo kalcijevega karbonata izkazala heterotrofna presnova kalcijevega laktata (9).



Slednja metabolna pot ne le rešuje nekatere neželene učinke nekaterih drugih metabolnih poti (nastanek neželenih stranskih produktov ali pretirana sprememba pH znotraj betona), ampak hkrati porablja

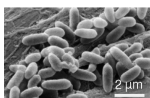
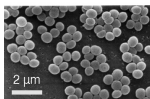
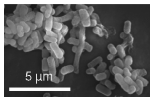


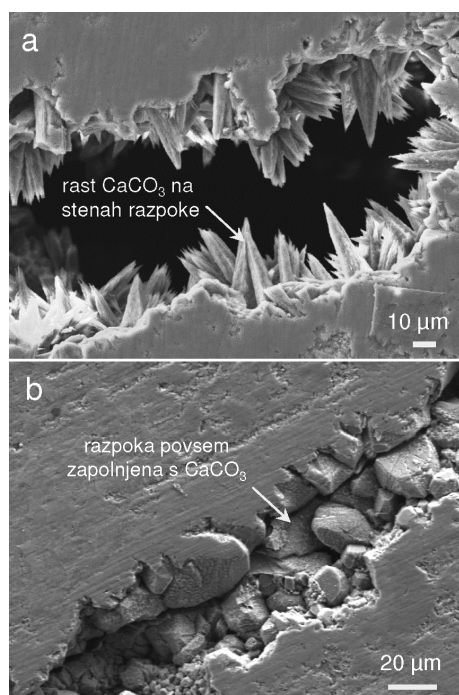
**Slika 5:** Precipitacija kalcijevega karbonata na steni bakterije [10]

kisik. Slednje pa ne pomaga le pri bakterijski pretvorbi kalcijevega laktata v kalcijev karbonat, temveč se zaradi zmanjšane količina kisika v betonu inhibirajo pogoji za korozijo armature, s čimer se podaljša obstojnost betonske infrastrukture.

Mikroorganizmi (bakterije) in hranilo (npr. kalcijev laktat), ki skupaj tvorita reagent za samoceljenje, se v betonsko matrico navadno dodajo na pasivni način. To pomeni, da se direktno vmešajo v sveži beton ali pa enkapsulirajo in nato primešajo sveži betonski mešanici. V **tabeli 1** so predstavljene nekatere vrste bakterij in organskih hranil, ki so jih različni avtorji uporabili za precipitacijo kalcijevega karbonata in s tem celjenje razpok v betonu ter način vnosa reagenta za samoceljenje v betonsko matrico.

**Tabela 1:** Vrste bakterij in organskih hranil ter način vnosa reagenta za samoceljenje v betonsko matrico [2].

bakterije	organsko hranilo za bakterije	način vnašanja reagenta za samopopravljivost v beton
<i>Bacillus pseudofirmus</i>		kalcijev laktat, direktn vnos kalcijev glutamat, ekstrakt kvasa, pepton ali enkapsulacija
<i>Bacillus cohnii</i>		kalcijev laktat, direktn vnos kalcijev glutamat, ekstrakt kvasa, pepton ali enkapsulacija
<i>Bacillus alkalinitrilicus</i>		kalcijev laktat, enkapsulacija ekstrakt kvasa



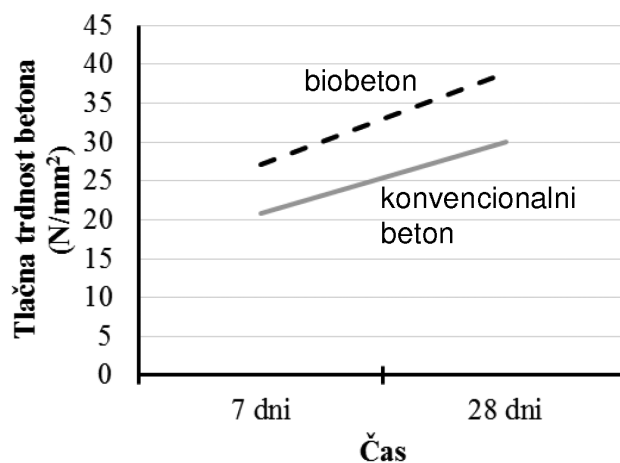
**Slika 6:** Začetek rasti  $\text{CaCO}_3$  v razpoki biobetona kot posledica delovanja bakterij (a); sčasoma se razpoka popolnoma zapolni s precipitiranim  $\text{CaCO}_3$  (b).

Za razliko od celjenja razpok v betonu po naravnem procesu je samopopravljivost v biobetonu bistveno hitrejši proces. Bakterije lahko v betonski mešanici »spijo« tudi desetletja. Ob nastanku razpoke in vdoru vode v razpoko pa se zbudijo in v relativno kratkem času (lahko v nekaj dneh) razpoko zapolnijo s precipitiranim kalcitom. Z delovanjem bakterij v biobetonu lahko zacelimo razpoke širine do  $\approx 1$  mm. Nastajanje  $\text{CaCO}_3$  kot posledica delovanja bakterij v biobetonu prikazuje **slika 6**.

### 3 PRIMERJAVA SAMOPOPRAVLJIVEGA IN KONVENCIONALNEGA BETONA

Najpomembnejša funkcionalna lastnost betona je njegova trdnost. Zaradi zelo visoke tlačne trdnosti betona, se ta lahko uporablja v aplikacijah, kjer so tlačne obremenitve ogromne (npr. gradnja). Na trdnost betona vpliva mnogo parametrov, od katerih igra še posebej pomembno vlogo prisotnost razpok v materialu. Delno napokanje betona je praktično nemogoče preprečiti. Mikrorazpoke se v betonu formirajo že med strjevanjem in sušenjem. Večje razpoke pa so mnogokrat posledica mehanskih obremenitev materiala. Ker je potencialno najšibkejšo mesto materiala ravno vrh razpoke, je povsem razumljivo, zakaj so razpoke v betonu neželene.

Čeprav obstaja mnogo receptur priprave konvencionalnega betona ali biobetona, je na **sliki 7** zgovorna grafična primerjava odvisnosti tlačne trdnosti biobetona in konvencionalnega betona od starosti betona, in sicer po sedmih in po osemindvajsetih dneh. Iz slike je razvidno, da je tlačna trdnost biobetona višja od konvencionalnega betona. Seveda pa je tista prava prednost samopopravljivega betona v njegovi sposobnosti samoceljenja razpok, ki so bile vnesene v betonsko matrico.



**Slika 7:** Odvisnost tlačne trdnosti biobetona in konvencionalnega betona od starosti betona [11]

Poleg višje trdnosti ima biobeton (in v principu vsak samopopravljivi beton) tudi nižjo prepustnost (permeabilnost) za kapljevino kot konvencionalni beton. Voda in mnoge vodne raztopine lahko namreč sčasoma iz betona izlužijo kalcijev hidroksid ter nekatere druge delno topne komponente. Na ta način se v betonu zvišuje poroznost, oziroma lahko v beton prodrejo kemikalije (npr. kloridi), ki v betonu povzročajo neželene sekundarne reakcije. Ker samopopravljivi beton deluje na principu zapiranja razpok po naravnem, kemijskem ali biološkem principu, hkrati tudi zmanjšuje njegovo prepustnost ter s tem podaljšuje trajnost betonske konstrukcije [12].

Zgodba postane nekoliko drugačna, če primerjamo ceno samopopravljivega betona (npr. biobetona) in konvencionalnega betona. Cena biobetona je približno dvakrat višja od cene konvencionalnega betona, ki znaša približno 80 €/m<sup>3</sup> za konvencionalni beton in 160 €/m<sup>3</sup> za biobeton. Vzroka za relativno visoko ceno biobetona sta visoka cena kalcijevega laktata in postopek priprave reagenta za samopopravljivost (bakterij in hranil). Biobeton je zato smiselno uporabiti le za določene gradbene objekte, kjer je višji strošek betona smiseln zaradi podaljšane trajnosti konstrukcije, npr. za tunelske obloge, kjer je varnost pomemben faktor, in pa za infrastrukturo, kjer je dostop omejen, kar otežuje popravilo in vzdrževanje [13, 14]. Glede cene betona za pripravo betonske konstrukcije je zanimiv tudi naslednji aspekt. Če se življenjska doba betona zaradi uporabe samopopravljivega betona podaljša za ≈30 %, bo dvakrat višja začetna cena samopopravljivega betona v primerjavi s konvencionalnim betonom pomenila skoraj enake končne stroške v celotnem življenjskem obdobju betonske konstrukcije zaradi nižjih stroškov vzdrževanja betonskega objekta.

V zadnjem času so raziskave na področju priprave biobetona zelo napredovale. Pričakuje se, da se bodo z razvojem pojavile izboljšane in cenejše različice biobetona, ki bodo povzročile padec cene biobetona. Nenazadnje pa velja omeniti še naslednje dejstvo. Priprava cementa kot hidravličnega veziva v betonu je energetsko zelo potratna in prispeva kar ≈5 % globalnih emisij CO<sub>2</sub>. S tem lahko vsako izboljšanje betona kot gradbenega materiala ali podaljšanje življenjske dobe betona z uporabo samopopravljivega betona precej zniža celotno potrebo po energiji za pripravo betonskih izdelkov, kar lahko znatno prispeva k trajnostni uporabi naravnih virov. Ker se v procesu priprave hidravličnih veziv potrebe po energiji zagotavljajo predvsem iz surovin, bogatih z ogljikom (primarni energijski vir je zemeljski plin, sekundarni energijski vir pa so energijsko bogati odpadki), vsaka

izboljšava v proizvodnji hidravličnega veziva lahko precej zniža ogljični odtis proizvodnje same.

#### 4 SKLEP

V pričujočem delu avtorji predstavljamo možne koncepte samopopravljivosti betona. Glavna prednost samopopravljivega betona je možnost celjenja razpok, kar doprinese k izboljšanim mehanskim lastnostim betona ter bistveno podaljšuje življenjsko dobo betonske konstrukcije.

Načine samopopravljivosti betona razdelimo na naravne, biološke in kemijske procese. Naravni načini samopopravljivosti so posledica nekaterih kemijskih reakcij, ki potekajo med komponentami v betonski matrici in povzročijo precipitacijo nove trdne faze (največkrat CaCO<sub>3</sub>). V primeru kemijskega procesa samopopravljivosti betona se razpoke v betonu zapolnijo zaradi dodajanja reagentov, ki v razpoki polimerizirajo ali pa ob stiku z vlago nabrekajo. Biološki način samopopravljivosti betona vključuje delovanje bakterij, ki skozi metabolno pot precipitirajo novo trdno fazo, ta pa postopoma zapolni razpoke.

Samopopravljivi betoni predstavljajo novo družino betonskih materialov, ki imajo veliko potencialno uporabno vrednost pri pripravi trajnejših betonskih konstrukcij.

#### VIRI

- [1] F. Kavčič, Z. Cotič, D. Prebil, A. Ipavec, V. Jereb, V. Bokan Bosiljkov, A. Šajna, »*Priročnik za beton: načrtovanje in proizvodnja betona*«, Ljubljana: ZBS, Združenje za beton Slovenije (2018), 92–93
- [2] M. Seifan, A. K. Samani, A. Berenjian, »*Bioconcrete: next generation of self healing concrete*«, SpringerLink (2016) 6, 1–15
- [3] H. Huang, G. Ye, C. Qian, E. Schlangen, *Materials & Design*, 92 (2015), 499–509
- [4] A. Talaiekhosani, A. Keyvanfar, A. Shafaghath, R. Andalib, *Journal of Environmental Treatment Techniques*, 2 (2014) 1, 11
- [5] A. Talaiekhosani, A. Keyvanfar, A. Shafaghath, R. Andalib, M. Z. Abd Majid, M. Fulazzaky, R. Zin, C. T. Lee, M. W. Hussin, N. Hamzah, N. F. Marwar, H. I. Haidar, *Journal of Environmental Treatment Techniques*, 2 (2014), 1–11
- [6] K. Van Tittelboom, N. De Belie, *Materials*, 6 (2013), 2182–2217
- [7] T. Katayama, *Cement and Concrete Research*, 40 (2010) 4, 643–675
- [8] V. C. Li, E. Herbert, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 10 (2012), 207–218
- [9] N. De Belie, *RILEM Technical Letters*, 1 (2016), 56–61
- [10] R. Siddique, N. K. Chahal, *Construction and building materials*, 25 (2011) 10, 3792–3798
- [11] J. Bashir, I. Kathwari, A. Tiwary, K. Singh, *Indian Journal of Science and Technology*, 9 (2016), 2–5
- [12] W. Min, J. Björn, G. Mette, *Construction and Building Materials*, 28 (2012), 571–583
- [13] B. Kumar, »*Bacteria induced self-healing concrete – a review*«, Jalandhar, National Institute of Technology, 2018, 1–6
- [14] S. B. A. Vahab, »*Self healing bacterial concrete*«, Seminar report, University of Kerala, 2014