

# Využitie progresívnych cementobetónových zmesí na výstavbu a opravu vozoviek

Patrik Šváb\*

*Letecká fakulta, Technická univerzita v Košiciach*

*Katedra leteckého inžinierstva*

*Rampová 7, 040 01 Košice, Slovensko*

[patrik.svab@tuke.sk](mailto:patrik.svab@tuke.sk)

Peter Korba

*Letecká fakulta, Technická univerzita v Košiciach*

*Katedra leteckého inžinierstva*

*Rampová 7, 040 01 Košice, Slovensko*

[peter.korba@tuke.sk](mailto:peter.korba@tuke.sk)

Michal Hovanec

*Letecká fakulta, Technická univerzita v Košiciach*

*Katedra leteckého inžinierstva*

*Rampová 7, 040 01 Košice, Slovensko*

[michal.hovanec@tuke.sk](mailto:michal.hovanec@tuke.sk)

Samer Abdo Saleh Al-Rabeei

*Letecká fakulta, Technická univerzita v Košiciach*

*Katedra leteckého inžinierstva*

*Rampová 7, 040 01 Košice, Slovensko*

[samer.abdo.saleh.al-rabeei@tuke.sk](mailto:samer.abdo.saleh.al-rabeei@tuke.sk)

\* corresponding author

**Abstrakt:** Článok sa zaoberá predstavením a potencionálnym využitím progresívnych cementobetónových zmesí v oblasti stavebného inžinierstva, konkrétne v rámci výstavby dopravnej infraštruktúry. V úvode je predstavený súčasný stav danej oblasti spolu s postrehmi autorov, ktorí sa už touto témou zaoberali. V ďalších kapitolách článku sú predstavené typy zmesí s najväčším potencionálnom na ich využitie pri oprave a výstavbe dopravnej infraštruktúry. V závere článku prezentuje oblasti, ktorým je nutné venovať zvýšenú pozornosť a ďalej ich skúmať.

**Kľúčové slová:** progresívne zmesi, samoregeneračný betón, dopravné infraštruktúry, inžinierstvo

## 1. Úvod

Počas histórie ľudskej civilizácie získal betón ako konštrukčný materiál pozoruhodný úspech. Už počas éry Rímskeho impéria bol betón jedným z primárnych stavebných materiálov schopných zachovať sa aspoň čiastočne až do súčasnosti. Dlhodobá história cementových materiálov vyvrcholila v podobe moderného betónu, ktorý demonštruje výkon tohto materiálu vo forme vystuženého, vysokopevnostného alebo predpätého betónu. Tiež musíme spomenúť, že vďaka tejto histórii sa vyvinuli aj jemnozrnné cementové kompozity. Kompozity sú v podstate moderné materiály, ktoré sa skladajú minimálne z dvoch základných zložiek. Jednou zložkou je matrica, teda základ kompozitu a druhou zložkou je zložka spevňujúceho komponentu. Základná zložka, matrica, má funkciu spojiva. Zložka druhá, ako napovedá už jej názov má spevňujúcu funkciu. Kompozity sú skupinou materiálov, ktoré sa používajú hlavne v miestach vysokého namáhania. Hlavne vtedy, keď sa zároveň požaduje aj vysoká pružnosť. Tieto kompozity disponujú vysokými pevnostnými vlastnosťami a špecifickými fyzikálnymi vlastnosťami, ktoré zabezpečujú vysokú odolnosť proti vplyvom agresívnych prostredí. Rovnako ako napreduje vývoj v oblasti dopravných prostriedkov, tou istou rýchlosťou musí napredovať aj vývoj v oblasti výstavby a opravy dopravných infraštruktúr, ktoré tieto prostriedky využívajú. A to či už v prípade ekologického faktora, pevnostnej charakteristiky materiálu alebo množstva finančných prostriedkov vynaložených pri výstavbe alebo oprave týchto dopravných infraštruktúr predstavuje výzvu v súčasnom a budúcom vývoji danej oblasti. Bruegel vo svojej práci „Self-Healing materials concepts as solution for aging infrastructures“ pojednáva o skutočnosti, že len neustály vývoj v oblasti materiálov používaných pri výstavbe nielen dopravnej infraštruktúry predstavuje jediné možné riešenie trvalo udržateľného rozvoja v oblasti výstavby nových a opravy starších infraštruktúr [3]. Sangadji sa vo svojej práci „Can Self-healing Mechanism Helps Concrete Structures Sustainable?“ zaoberá myšlienkou, že pokiaľ by bolo možné do jednotlivých stavebných materiálov implementovať samoregeneračné mechanizmy, výrazne by to uľahčilo ich údržbu v akejkoľvek stavebnej sfére [5].

## 2. Samoregeneračné zmesi

Väčšina samoregeneračných zmesí, tak ako väčšina modernej techniky sa inšpirovala v prírode. Ten je považovaný za významný pokrok v modernom bioinžinierstve. Faktom ostáva, že ak sa nevyhnutné trhliny, ktoré vznikli v dôsledku krehkosti betónu, dokážu samé opraviť, zaceliť alebo uzavrieť, tak potom bude mať betónová štruktúra určité dlhšiu životnosť. Stane sa totiž odolnejšou, a tým pádom aj udržateľnejšou. Je teda logické, že pri vývoji betónovej zmesi, so schopnosťou samostatnej regenerácie sa vedci a bioinžinieri snažia inšpirovať prírodou. Ak sa na to teda pozrieme z biologického hľadiska, samotná regenerácia mäkkých tkanív, sa spúšťa až potom, čo sa takéto tkanivo poškodí. Po tom čo sa tkanivo poškodí nasledujú tri hlavné kroky v procese regenerácie. Prvým krokom je zápalová reakcia. Počas tohto kroku sa tkanivo zapáli, čo je v podstate spôsob označenia a izolovania postihnutého miesta od okolitého prostredia a tkaniva. Tento krok je v podstate akýsi impulz pre tkanivo, aby začalo s požadovanými akciami, ktoré sú potrebné pre úspešnú regeneráciu.

Druhým krokom je bunková replikácia, v podstate sa jedná o bunkové množenie. V tomto procese sa zdravé, nepoškodené bunky snažia rozmnožiť, aby mohli nahradiť postihnuté tkanivo, zdravými odolnými replikami. Tento proces je z časového hľadiska pomerne náročnejší, a tiež sa musí zabrániť ďalšiemu poškodeniu tkaniva. Posledným krokom, v biologickom regeneračnom procese, je remodelácia tkanív. V čase spustenia posledného kroku už bunková replikácia dosiahla stabilnú hodnotu, kedy je možné tieto bunky v podstate prispôbiť, preprogramovať. Nastavia sa tak, aby odkopirovali vlastnosti a funkciu okolitého tkaniva. Syntetické, človekom vyrobené materiály so samoregeneračnou schopnosťou, teda napodobňujú svoje biologické protiklady. Sú navrhnuté tak, aby ovládali schopnosť vykonať samoopravu, obnovenie materiálu do pôvodného stavu a funkcie s využitím zabudovaných zdrojov, elementov alebo technológií. Takýto proces samoregenerácie syntetických materiálov nasledujú tri kroky. Tie sú podobné ako pri regenerácii biologického tkaniva.

Tento umelo vytvorený proces, sa spúšťa po tom čo sa materiál poškodí. Prvým krokom je uvedenie zabudovaného elementu, technológie alebo mechanizmu do činnosti. Druhým krokom je transport, teda premiestnenie sceľovacích, regeneračných agentov do postihnutej oblasti alebo miesta lomu. Tretím krokom je oprava. Obnova materiálu chemickou cestou, pomocou využitia regeneračných agentov. Celý tento regeneračný proces, je umelo zrýchlený pomocou rôznych katalyzátorov, aby trval čo najkratší možný čas. V oboch prípadoch, pri syntetickej aj biologickej regenerácii, je na naštartovanie mechanizmu hojenia, regenerácie nevyhnutne potrebné aby najprv došlo k jeho poškodeniu.

Podobný prístup, ako pri výrobe samoregeneračných materiálov bol uplatnený aj pri vývoji samoregeneračného betónu. Znova je potrebné poškodenie. Teda napríklad trhlinka. Tá v betónovej štruktúre spustí proces regenerácie. Tento proces môže byť buď závislý na zložení vnútorných elementov, alebo celkom autonómny. Nasleduje zacelenie trhliny, v čase mnohonásobne kratšom, ako u biologického protikladu. Napriek tomu, že sa regenerácia uskutoční v krátkom časovom úseku, čas potrebný na kompletnú regeneráciu sa predlžuje úmerne s rozsahom poškodenia. Vývoju samoregeneračného betónu sa venovali mnohé celosvetovo uznávané inštitúcie. K tejto téme vyšli mnohé vedecké štúdié, no úspech si nakoniec pripísal Japonský inštitút betónových zmesí (JCI) [4]. Po tomto úspechu, kedy sa v inštitúte podarili prvé pokusy o vytvorenie samoregeneračnej cementobetónovej zmesi, sa v tomto inštitúte zriadilo špeciálne pracovisko. Tu sa do tohto projektu zapojili poprední predstavitelia inštitútu. Treba však poznamenať, že tento úspešný pokus, sa podaril v laboratórnych podmienkach. Teda bez účasti akýchkoľvek rušivých vplyvov. Po hĺbkovej systematickej analýze, sa prišlo na to, že na účinnosť jednotlivých regeneračných agentov a mechanizmom vplyva ako hustota, tak aj zloženie jednotlivých testovaných cementobetónových zmesí. V konečnom dôsledku, boli najslubnejšie metódy vývoja samoregeneračného betónu rozdelené do niekoľkých typových kategórií.

### 2.1. Základné typové kategórie samoregeneračného betónu

**Prvá kategória** sa zaoberá nezávislou samo regeneráciou. Je všeobecne známe, že betón ako taký ma už isté vrodene samo regeneračné kapacity. K zisteniu tohto faktu viedla dlhá história skúmania a pozorovania betónu. Tiež skúmanie jeho správania v prípade rôznych porúch. Na základe týchto výskumov, sa vrodená schopnosť opravy betónu rozdeľuje na tri mechanizmy. Prvý mechanizmus, je založený na fyzikálnej príčine. Spočíva v takzvanom potení cementovej matrice v blízkosti trhliny. To je spôsobené absorbovanou vodou v hydratovanej cementovej paste. Druhý mechanizmus, je založený na chemickej príčine. Jedná sa o postupnú hydratáciu častíc cementu, ktoré nestihli zreagovať pri hydratačnom procese. Tieto častice po dostatočnej hydratácii zreagujú s vodou, a čiastočne tak vyplnia vzniknutú trhlinku. Zistenie tohto poznatku, bolo jedným z najdôležitejších zistení pri klasifikácii mechanizmov vrodenej samoregenerácie. Tento mechanizmus hydratácie, sa vyskytuje najmä pri čerstvom betóne. Tretí mechanizmus je založený na mechanických príčinách. Jedná sa o upchatie trhliny malými časticami, odlomenými z okraja trhliny alebo nanesených do trhliny okolitou vodou.

Účinnosť nezávisle, samoregeneračnej kapacity betónu, je značne ovplyvnená environmentálnymi akciami. A to napríklad prítomnosť vody, teplotou, zložením betónovej zmesi, a takisto vyšší podiel cementu, posilňuje mechanizmus kontinuálnej hydratácie. Podiel cementu však závisí aj od naplnenia kritéria udržateľnosti. Na druhej strane, nezávislá samoregenerácia, môže fungovať ako istý spôsob ochrany pred vniknutím chloridu, skrze povrch betónu. Tým sa zamedzí korózii ocelevej výstuže.

**Druhá kategória**, sa zaoberá vytvorením samoregeneračného betónu pomocou rôznych minerálnych prímiesí, uložených v kapsulách alebo iných vaskulárnych systémoch. Aby sa prekonal pochybná samoregeneračná kapacita, a získala sa lepšia kontrola nad jej mechanizmom, vyvinula sa táto metóda. Metóda, kedy sa minerálne prímiesi vložia do kapsúl alebo do hadičky. Následne sa zakomponujú do betónovej štruktúry. Znova sa tu vedci inšpirovali prírodou, a to konkrétne cievnym systémom živočíchov. Takýto cievný systém, sa snaží táto metóda napodobniť v betónovej štruktúre. Takto rozšírený systém kapsúl, hadičiek v betónovej štruktúre, by sa aktivoval v prípade, že by vznik trhliny alebo samotná trhlinka narušila obal, a tým by došlo k uvoľneniu ich obsahu. Následne by obsah kapsuly, v tomto prípade regeneračná látka zreagovala s okolitou atmosférou alebo s katalyzátorom. Tým by mohli byť tieto kapsuly obklopené. Na Obr. 1 môžeme vidieť schému vaskulárneho systému v betónovej štruktúre.

Pre zavedenie takéhoto systému do materiálov s cementovým zložením, boli prezentovaných niekoľko spôsobov. Úspešne boli vytvorené mikrokapsule, ktoré obsahovali s olejovým základom a schránky zo silicového gélu. Vo vnútri sa nachádzala komerčne dostupná organická zlúčenina, metylmethakrylát (MMA). Ten zastával funkciu regeneračného prvku. Túto zlúčeninu ešte obklopoval katalyzátor. Uzavretie mikrotrhlin touto metódou bolo v 66 percentách prípadov úspešné. Používali sa tiež kapsuly, ktorých schránku tvorilo sklo alebo boli tvorené keramikou. V prípade vaskulárnych systémov, boli duté vlákna tvorené keramikou. Tie obsahovali termoplasty v tekutom stave. Tieto vlákna boli neustále udržiavané v ideálnej teplote, aby termoplasty nestuhli. V prípade vytvorenia trhliny a narušenia takéhoto vlákna, unikne obsah do okolitej štruktúry. Tam termoplasty vyplnia trhlinku, a bez toho aby boli naďalej udržiavané v ideálnej teplote stuhnú. Napriek sľubným výsledkom tejto metódy ju sprevádzali aj mnohé problémy. Medzi najzávažnejšie problémy patrí napríklad množstvo a spôsob rozmiestnenia kapsúl, v dostatočnom rozmedzí, aby pri náhodnej tvorbe trhlín bola kapsula zasiahnutá a splnila svoju úlohu. Ďalším problémom bola prílišná krehkosť kapsúl, kedy mohlo dôjsť k ich poškodeniu už pri ich vmiešavaní do zmesi. Problémy týkajúce sa

vaskulárneho systému, kedy bol do betónovej štruktúry inštalovaný systém túb alebo dutých vlákien, boli v podstate rovnaké.

#### Obrázok 1. Vaskulárny systém v betónovej štruktúre

Boli príliš krehké, a ich správne rozmiestnenie v betóne bolo veľmi namáhavé. Preto, aby sa zabezpečila vyššia schopnosť prežitia transportného média, sa začalo s vývojom špeciálneho duhu betónu. V angličtine jeho názov znie Porous Network Concrete skrátené PNC, čo môžeme preložiť ako pórovitý betón alebo betón so sieťou pórov. Jedná sa o hybridný systém, ktorý je znova inšpirovaný prírodou. V tomto prípade sa vedci inšpirovali ľudskými kosťami, a tiež spôsobom ako sa taká kosť zrastá v prípade zlomeniny. Jedná sa o spôsob, kedy sa takéto pórovitý betón použije ako výplň bežného betónu, a teda sa zavedie do jeho internej časti.

V prípade vzniknutia trhliny a narušenia vopred stanovenej hĺbky, kedy trhlina dosiahne pórovitú časť, sa do pórovitej časti pomocou vloženého mechanizmu vstriečne regeneračný prvok. Následne tento regeneračný prvok vyplní celú pórovitú časť, a následne vyplní aj trhlinu, ktorá do tejto časti prenikla. To môžeme vidieť na Obr. 2, hore, kde zelená látka je regeneračné médium. Je možné vidieť vyplnenie viacerých trhlín. Trhlinu vyplní kompletne, nielen v pórovitej časti. Je to teda mechanizmus zložený z troch krokov. V prvom kroku sa vyskytne „zlomenina“, teda trhlina. Následne sa vstriečne regeneračný prvok, a uskutoční sa presun prvku pórovitou štruktúrou na miesto poškodenia, kde nastáva remodelácia matrice a zacelenie trhliny. Tento druh betónu je v súčasnosti v štádiu testovania vo vonkajších podmienkach, keďže v laboratórnych sa osvedčil.

Obrázok 2. Štruktúra pórovitého betónu

**Tretia kategória**, sa zaoberá vytvorením progresívnej, samoregeneračnej cementobetónovej zmesi pomocou využitia mikrobiológie. Jedná sa o snahu vytvorenia zmesi s bakteriálnym zložením, kde by funkciu regeneračného prvku plnili rôzne mikroorganizmy. Mnoho vedcov, sa už v minulosti snažilo presadiť myšlienku regenerácie za pomoci mikrobiologických poznatkov. Bohužiaľ však nedisponovali technológiami alebo poznatkami, potrebnými na to, aby sa touto metódou zaoberali popredné vedecké inštitúcie. V súčasnosti však už potrebné technológie a poznatky k dispozícii sú. Preto sa mnoho súčasných vedeckých pracovníkov rozhodlo zamerať svoju pozornosť na vývoj a testovanie tejto metódy. Vo všeobecnosti je idea vylepšenia odolnosti betónovej štruktúry, ako aj uzatvárania, opravovania betónového poškodenia, za pomoci bakteriálnych kultúr veľmi nádejná. Hlavnou myšlienkou je mikrobiologicky indukovať, stimulovať zrážanie uhličitanu vápenatého, z ktorého je možné vytvoriť tri odlišné polymorfy: kalcit, aragonit a vaterit. Polymorf je konkrétna kryštalická štruktúra látky. V tomto je prípade je táto látka vyššie spomínaný uhličitan vápenatý. Polymorfy majú špecifickú vlastnosť, a to že sa dokážu navzájom premieňať pri určitých teplotách a chemických reakciách. Majú rozdielne fyzikálne, ale aj chemické vlastnosti. Napríklad teplotu tavenia. Tvorba polymorfov sa však ťažko predpovedá, a závisí aj na použitých metódach kryštalizácie.

### 3. Cementobetónová zmes s implementovanými solárnymi prvkami

Je všeobecne známym faktom, že čierny povrch má vysokú tendenciu absorbovať slnečnú radiáciu a jeho lúče. Táto absorpcia sa prejavuje zahrievaním čierneho povrchu. V letnom období môžeme pozorovať a pociťovo zaznamenať, ako z prehriateho betónu sálajú vlny tepla. Preto nie je divu, že tu boli isté snahy o zužitkovanie alebo využitie tohto tepla, nahradeného v betónovej vrstve. Prvotné snahy pojednávajú o výstavbe vozoviek zo solárnych panelov, keďže vozovky a dopravná infraštruktúra zaberá veľkú plochu, a priamom využití žiarenia týmito panelmi. Problém však nastal s únosnosťou a odolnosťou týchto panelov. Panely neboli schopné udržať váhu ťažkých strojov, a už vôbec by neboli schopné uniesť váhu mnohotonových lietadiel. Tým sa vylúčilo použitie solárnych panelov v letiskovom ale aj cestnom stavebníctve, pretože problém nevyriešilo ani použitie hrubších solárnych panelov. Preto sa snahy využiť tepelnú energiu nahradenú v betóne čiastočne pozastavili, avšak táto alternatíva využitia obnoviteľného zdroja energie nebola zabudnutá.

Radikálnu zmenu v tomto odvetví priniesol projekt ICAX. ICAX je akronym, ktorý znamená medzi sezónne hromadenie a výmena (Interseasonal Collection and Exchange). Tento projekt sa zameriaval, a stále sa zameriava, na využitie obnoviteľných zdrojov energie. Ide teda o environmentálny projekt, ktorý sa zaoberá práve využitím tepelnej energie z betónu. ICAX sa neskôr pripojil k celosvetovej organizácii E-Hub, ktorá má totožné zameranie ako ICAX, teda využitie obnoviteľných zdrojov energie, avšak v globálnom merítku. Ide o skombinovanie a využitie, vylepšenie vozoviek, dopravných infraštruktúr tak, aby okrem primárnej úlohy poskytovali aj možnosť využiť ich plochu na kolekciu energie z obnoviteľných zdrojov pomocou integrácie technológií. Tieto technológie, nazvime ich teplozbernými, boli vyvinuté v rámci tohto projektu. Špeciálne na účel zberu a hromadenia energie. Koncept využitia infraštruktúr na zber solárnej energie, sa nazýva Solárny cestný systém (solar road system) [2]. V zahraničných krajinách, je tento systém už naplno využívaný na niektorých miestach, ako napríklad parkoviskách od roku 2014. Vtedy bol schválený po testovaní v externých podmienkach a po tom, čo splnil všetky podmienky a testy uvedené v

technických normách krajín. Technológia používaná na kolekciu a zber solárnej energie sa nazýva medzisezónny tepelný transformačný systém.

Solárny cestný systém má množstvo využití, má však dve hlavné funkcie. Tieto funkcie možno zhrnúť ako funkciu vyhrievaciu a chladiacu. Funkcia na chladenie sa používa v lete, kedy je betón prehriaty, a nemá už kapacitu prijať ďalšiu solárnu energiu. Vtedy sa využije táto funkcia, ktorá betón neschladí v priamom zmysle pomocou chladnej vody alebo vzduchu, ale pomôže betónu sa ochladiť tak, že nakumulované teplo prenesie pomocou rúr do termobanky, kde sa teplo, tepelná energia uskladní kým nenadídú zimné mesiace. V podstate teda betón ochladí odobratím tepla, a betón tak znova získava kapacitu na uskladnenie tepelnej energie, následne sa tento kolobek zopakuje, až kým sa termobanky nenaplnia. V prípade druhej funkcie, vyhrievacej, už z názvu vyplýva, že sa používa v zimných mesiacoch. Používa sa teplo uložené v termobankách, aby sa s jeho pomocou vyhriala vozovka [1]. Takýto ohrev počas zimných mesiacoch, v prípade prítomnosti snehovej vrstvy na vozovke, dokáže túto vrstvu spoľahlivo rozpustiť, a zabezpečiť aby bola bezpečná bez použitia posypových solí alebo iných techník. Integrácia takéhoto systému do dopravných infraštruktúr bola inšpirovaná podlahovým kúrením v obytných budovách. Tento systém má sľubnú budúcnosť, no v súčasnosti sa nachádza vo fáze neustáleho vývoja. Testuje sa jeho použitie v dopravnej infraštruktúre po celom svete.

#### 4. Záver

V oblasti cestného a letiskového stavebníctva je potrebný neustály vývoj, aby sa dokázali uspokojiť špecifické požiadavky kladené na vozovky. Ako sme zistili, neustále sa objavujú nové skutočnosti vo vývoji cementobetónových zmesí, ktoré by pomohli v tom či onom smere zvládnuť komplikované situácie každodennej prevádzky letiska. Keďže viac ako polovica stavieb, ktoré sú v súčasnej dobe v prevádzke po celom svete je postavená z rôznych typov betónu, je nutné hlbšie preskúmať vývoj tohto stavebného materiálu. Tento najbežnejšie používaný stavebný element sa neustále obohacuje o nové prímеси, ktoré v zdanlivo nepatrných množstvách dokážu úplne zmeniť chovanie jednotlivých zmesí. V tomto článku bol načrtnutý nie len súčasný stav v oblasti letiskového stavebného inžinierstva, ale aj najviac rozvinuté zmesi. Tieto zmesi majú potenciál zmeniť zaužívané spôsoby výstavby a opráv vozoviek, ktoré sa praktizujú na letiskách po celom svete. Analyzované sú aj silné a slabé stránky týchto zmesí a spomenuté sú aj možnosti ich využitia v súčasnom stave ich vývoja. Predstavené bolo ich možné využitie, ale aj silné a slabé stránky. Jedno je však isté. Napriek tomu, že tieto zmesi znamenajú vo svete výstavby a modernizácie dopravných infraštruktúr obrovský pokrok, stále existuje mnoho aspektov, ktoré si žiadajú našu pozornosť. Na tieto aspekty jednotlivých progresívnych zmesí, sa treba v budúcom výskume zamerať, pretože iba neustálym pokrokom a vylepšovaním vlastností, môžeme dosiahnuť stanovený cieľ zefektívnenia výstavby a opráv dopravných infraštruktúr, či už z časového alebo finančného hľadiska. A tým je zvýšenie bezpečnosti, ako aj uľahčenie údržby vozoviek a jednotlivých letiskových plôch.

#### Zoznam bibliografických odkazov

- [1] D. Geysen et al.: *A framework for simulation and control of hybrid energy networks*. [Online], EnergyCon, Dubrovnik, Chorvátsko, 2014
- [2] Informácie dostupné na stránke: <<http://www.e-hub.org/road-solar-collector.html>>
- [3] K. van Bruegel.: Self-Healing materials concepts as solution for aging infrastructures, In: *37th conference on our world in concrete and structures*, Singapur, 2012
- [4] K. van Tittelboom: *Self-Healing concrete through incorporation of encapsulated bacteria or polymer-based healing agents*, dizertačná práca, Ghent, Univerzita v Ghente, Belgicko, s. 208, 2012
- [5] S. Sangadjii.: Can Self-healing Mechanism Helps Concrete Structures Sustainable?, In: *Procedia Engineering*, Volume 171, 2017, ISBN 978-15-10837-01-0, s. 238-249