

TRHLINY V BETONOVÝCH KONSTRUKCÍCH

Jan Škarda, *

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

ABSTRAKT

Článek představuje zpracovanou vstupní rešerši pro disertační práci. Jak je patrné z názvu, zabývá se trhlinami v betonových konstrukcích. Cílem rešerše je vytvořit zpracovateli ucelený přehled o stavu věděni v této oblasti a posloužit jako výchozí bod pro zpracování disertační práce a budoucí vědeckou činnost.

KLÍČOVÁ SLOVA

Beton • Trhliny • Mezní stav použitelnosti • Stav věděni

ABSTRACT

The article represents an initial research for the. As can be seen from the title, it deals with cracks in concrete structures. The aim of the research is to create a comprehensive overview of the state of art in this area and serve as starting point for the dissertation and future scientific activity.

KEYWORDS

Concrete • Cracks • Serviceability limit state • State of the art

1. ÚVOD

Tento článek shrnuje výsledky rešerše zaměřené na trhliny v betonových konstrukcích, především mostech. Literatura v této oblasti je velmi rozsáhlá.

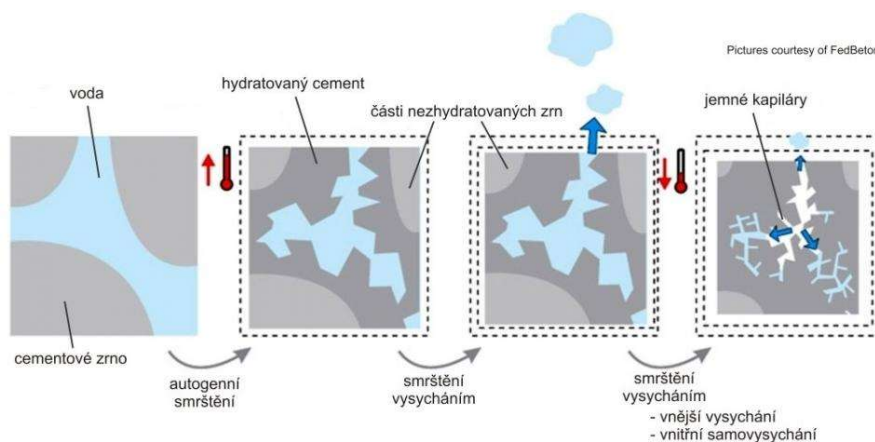
Cílem této rešerše je vytvořit zpracovateli ucelený přehled o stavu věděni v této oblasti a vybrat zaměření disertační práce a budoucího vědeckého působení a bádání. Práce bude zaměřena na podrobnou analýzu chování stávajících konstrukcí a případnou úpravou metodiky jejich měření, s přihlédnutím k jejich funkci bez nutnosti jejich náhrady novou konstrukcí.

2. TRHLINY V RANÉ FÁZI

Vznik a rozvoj trhlin v rané fázi v betonových konstrukcích do značné míry ovlivňuje nejen samotnou integritu konstrukce, ale má i významný vliv na trvanlivost a životnost konstrukce. Ke vzniku trhlin v rané fázi dochází v důsledku objemových změn v betonu, které jsou způsobeny smršťováním, jež je ovlivněno především teplotními a vlhkostními faktory okolí.

Vznikající napětí, které vyvolává vznik trhlin v raných stádiích, je zapříčiněno především těmito přetvořeními:

- autogenním smršťováním, které vzniká v důsledku absorpce vody během hydratace cementu
- smršťováním následkem vysychání, které je způsobeno vypařováním vody během zrání betonu,
- pokud k úniku vody dochází před začátkem tuhnutí (období krátce po betonáži), jedná se o plastické smršťování,
- poměrným přetvořením v důsledku teplotních změn.



Obrázek 1: Smršťování betonu (www.eBeton.cz 2021)

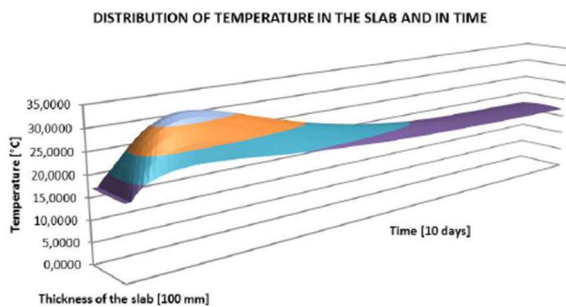
* Školitel: doc. Ing. Roman Šafář, Ph.D.

Míra výskytu varianty smršťování závisí na typu konstrukce a použitém betonu. U vysokopevnostních betonů s nízkým vodním součinitelem se ve větší míře vyskytuje autogenní smršťování, oproti tomu normální betony s vyšším vodním součinitelem vykazují ve vyšší míře smršťování následkem vysychání.

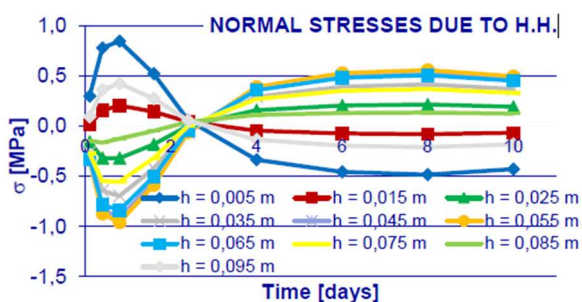
Oba výše uvedené druhy smršťování mají podobné účinky vzhledem k tomu, že oba představují zmenšení objemu po snížení množství vody během tvrdnutí betonu.

Smršťování v důsledku teplotních změn se oproti předešlým dvěma typům liší tím, že není spojené s pohybem vody v betonu, ale s výkyvy vnitřních a vnějších teplot. Toto zahrnuje jak změny teplot v okolí konstrukce, tak teplo vznikající v konstrukci v důsledku hydratace. K rozptýlu tohoto tepla dochází u masivních konstrukcí pomalu. Jádro konstrukce v důsledku vysokého rozvoje hydratačního tepla rychle nabývá na pevnosti. Konstrukce tak v jádru tvrdne v roztaženém stavu. Při následném chladnutí dojde k jejímu smrštění a v důsledku toho často dochází ke vzniku trhlin. (Mihashi, Leite 2005)

Měřením a analýzou rozvoje hydratačního tepla a ději v konstrukci se zabýval experiment provedený na naší fakultě. V důsledku rodilů teplot uvnitř konstrukce a na jejím povrchu, kde je konstrukce ochlazována vlivem kontaktu s okolním prostředím, dochází ke vzniku tahových napětí na povrchu konstrukce a uvnitř betonu vzniká malý tlak. Po dosažení maximální teploty dochází k celkovému ochlazení prvku, přičemž ochlazení probíhá rychleji uvnitř prvku, kde byla doposud vyšší teplota. V důsledku tohoto dochází k „obrácení“ napětí v prvku a na povrchu vzniká malý tlak zatímco uvnitř průřezu dochází k vzniku tahových napětí.



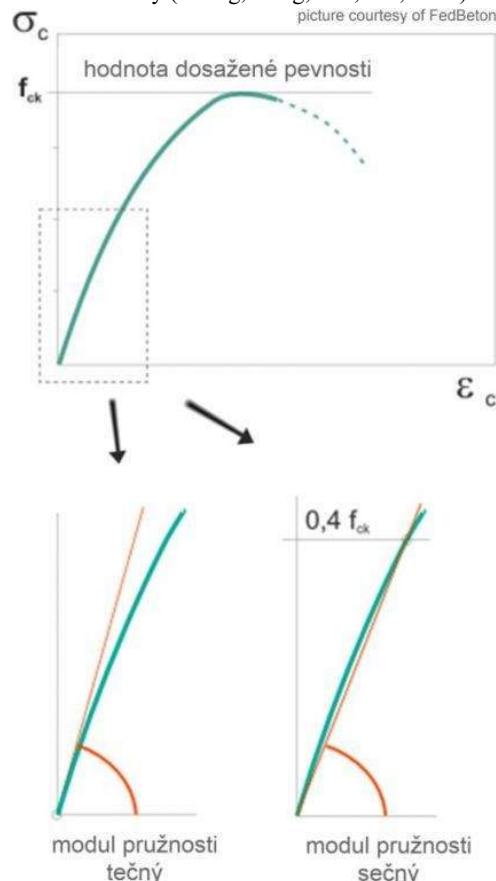
Obrázek 2: Rozdělení teploty v čase (Šafář, Kohoutková, Jursík, Bouška, Vokáč, Litoš 2012)



Obrázek 3: Normálová napětí vlivem hydratačního tepla (Šafář, Kohoutková, Jursík, Bouška, Vokáč, Litoš 2012)

Na vznik trhlin v rané fázi a jejich analýzu mají vliv materiálové vlastnosti, které se v raných stádiích tvrdnutí rychle mění. Mezi klíčové materiálové vlastnosti patří modul pružnosti a pevnost betonu v tahu. Tyto vlastnosti značně závisí na postupu hydratace cementu.

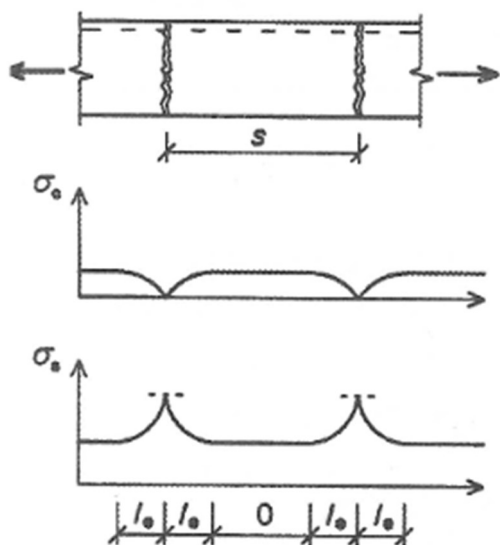
Trhlinami v raném stádiu se zabýval výzkum provedený na Southeast University (Chang, Yang, Sun, Liu, 2019)



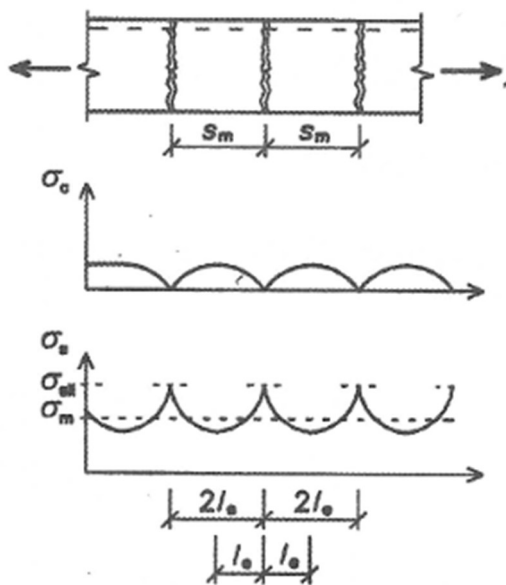
Obrázek 4: Modul pružnosti (eBeton 2021)

3. TRHLINY OD ZATÍŽENÍ

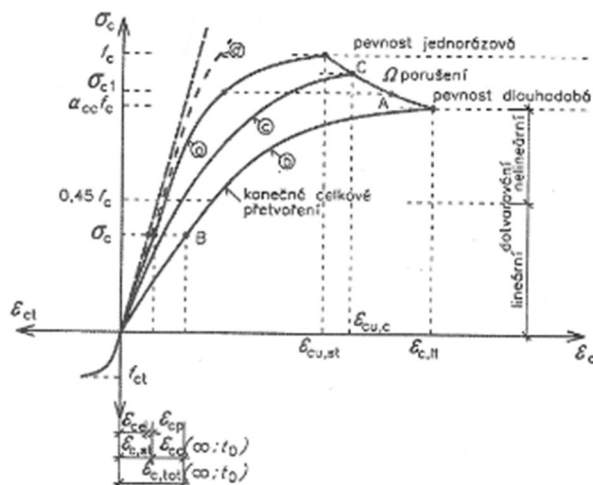
Z hlediska působení průřezu rozeznáváme tři stádia působení průřezu. V prvním stádiu se průřez chová pružně, dosažená napětí a přetvoření v průřezu jsou malá a na přenosu zatížení se podílí celý průřez. Druhé stadium začíná na mezi vzniku trhlin. K němu dochází v momentě, kdy napětí betonu v tahu dosáhne právě pevnosti betonu v tahu. Od tohoto momentu začínají v průřezu vznikat primární trhliny. Postupným dalším zatěžováním dochází k rozvoji sekundárních trhlin mezi primárními trhlinami. V posledním stádiu dochází ke zplastizování tlačného betonu (při dostatečném vyztužení průřezu).



Obrázek 5: Stav po vzniku primárních trhlin (Procházka, Štěpánek, Krátký, Kohoutková, Vašková 2006)



Obrázek 6: Stav po vzniku sekundárních trhlin (Procházka, Štěpánek, Krátký, Kohoutková, Vašková 2006)



Obrázek 7: Pracovní diagram betonu (Procházka, Štěpánek, Krátký, Kohoutková, Vašková 2006)

Během vzniku trhlin dochází v konstrukci k jevu zvanému tahové zpevnění, kdy v místech mezi trhlinami, beton a výztuž spolupůsobí. Míru zpevnění vyjadřuje součinitel tahového zpevnění, který se stanoví z následujícího vztahu:

$$\zeta = 1 - \beta * \left(\frac{M_{cr}}{M_{i,k}} \right)^2 \quad (1)$$

kde β je součinitel závislý na typu působení – krátkodobé či dlouhodobé, M_{cr} je moment na mezi vzniku trhlin, $M_{i,k}$ je moment od příslušné kombinace zatížení.

Oproti tahovému zpevnění existuje také tahové změkčení, které zohledňuje zmenšení tuhosti prvku v důsledku vzniku trhlin v něm.

Trhliny vzniklé v konstrukci můžeme rozdělit podle toho, od jakého typu zatížení vznikají tedy, zda jsou tahové, ohybové, smykové, jak je patrné z obrázku níže. (Šmejkal, Procházka 2014)

Druh trhliny	Schéma	Popis
Povrchové trhliny, trhliny u povrchu	Trhliny podélné s výztuží	Obvykle nad horními výztužnými prvky Sedání betonové směsi, rané smrštění, chybné uložení výztuže
	Trhliny v soudržnosti	Probíhají rovnoběžně s výztuží, dosahují až lince výztuže
	Povrchové trhliny	Na horním lici plošných prvků, kopírují výztuž, případně nezávislý průběh, hloubka trhlín je obvykle malá
Hluboké trhliny	Tahové trhliny	Procházejí celým průřezem, vznikají při dostředném tahu nebo tahovém namáhání s malou excentricitou
	Ohybové trhliny	Procházejí obvykle kolmo k tažené výztuži, začínají na taženém lici a jsou až do oblasti neutrální osy
	Smykové trhliny	Trhliny jsou skloněné vůči ose prvku, vyvíjejí se z ohybových trhlín
	S-primární trhliny Z-sekundární trhliny	Jen některé trhliny dosahují neutrální osy. Jsou časté u silně vyztužených okrajů nebo u velkých průřezů vlivem centrických tahových namáhání Mezi primárními trhlínami vznikají sekundární trhliny, které jsou jen v oblasti výztuže.

Obrázek 8: Nejběžnější trhliny v železobetonových konstrukcích (Šmejkal, Procházka 2014)

Pro stanovení šířky trhliny je popsán postup v ČSN EN 1992-1-1, kde se ve výpočtu zohledňuje maximální vzdálenost trhlín v prvku a rozdíl poměrných přetvoření betonu a výztuže v okolí trhliny, jak uvádí rovnice níže.

$$w_k = s_{r,max} * (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \quad (2)$$

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t * \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} * (1 + \alpha_e * \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0,6 * \frac{\sigma_s}{E_s} \quad (3)$$

kde σ_s je tahové napětí ve výztuži v průřezu porušeném trhlínou; k_t je součinitel závislý na době trvání zatížení; $f_{ct,eff}$ je pevnost betonu v tahu v okamžiku prvního očekávaného vzniku trhlin; $\rho_{p,eff}$ je účinný stupeň vyztužení; α_e je poměr modulů pružnosti výztuže a betonu. (Procházka, 2019)

Výše uvedeným vztahem je tedy možno stanovit předpokládanou šířku trhliny v konstrukci, která je poté porovnána s mezní šířkou trhliny v závislosti na třídě prostředí, ve kterém se ta která konstrukce nachází.

Je tedy patrné, že stanovení šířky trhliny je zaměřeno spíše na celkovou spolehlivost a trvanlivost konstrukce. Výsledek tedy nelze považovat za plně jistý ve smyslu zcela konkrétní šířky trhliny, která byla stanovena pomocí výše uvedeného výpočtu tak, jak uvádí ČSN EN 1992-1-1,

a skutečně dosaženou šířkou trhliny na konstrukci při daném zatížení.

4. SAMOHOJITELNÉ BETONY

V posledních desetiletích se téma samohojitelného betonu stalo vcelku populárním tématem. Na toto téma se dá najít značné množství publikací a výzkumů. Důvodem pro tuto oblast výzkumu je snaha o zvýšení trvanlivosti betonu a tím snížení nákladů na nutné opravy betonových konstrukcí a tím přispět k udržitelnosti. Je nutno zmínit, že jisté „samoutěšňovací schopnosti“ mívá beton i přirozeně. Dle Structural concrete bylo pozorováno samoutěšnění trhliny do šířky cca 0,3 mm.

V současné době je k dispozici několik metod samohojení betonu, například použití krystalických příměsí, polymerních a bakteriálních, slitiny s tvarovou pamětí, minerální přísady, superabsorbční polymery a materiál na bázi oxidu křemičitého. Mnoho vědců věnovalo své úsilí vývoji samohojitelných technik využívajících různé metabolické bakteriální aktivity, jako jsou bakterie redukující sulfáty, bakterie redukující dušičnany, oxidace organických kyselin a hydrolyza močoviny (Algaifi, 2021).

Využití krystalizačních přísad bylo využito například v roce 2017 v rámci opravy mostu z UHPFRC v Leskovicích (Šafář).

Využití superabsorbčních polymerů (SAP) je založeno na výrazné absorpční kapacitě těchto polymerů. SAP jsou trojrozměrné zesíťované hydrofilní polymery, které mohou zadržet až stonásobky své vlastní hmotnosti. K autonomnímu zacelování trhlín přispívá SAP integrovaný v betonové matici několika mechanismy. Zaprvé, nabobtnalý polymer blokuje přístup agresivních látek z vnějšího prostředí dovnitř materiálu a zároveň napomáhá udržet produkty autogenního hojení uvnitř trhliny. Dále zachycuje vodu, která slouží k vnitřnímu ošetřování betonu, a tím znásobuje efektivitu vlastních autogenních zacelovacích procesů (Schreiberová, Fládr, Trtík, Chylík, Šeps, Kohoutková, 2019).

Další přístup založený na biologické bázi využívá schopnosti určitých mikroorganismů produkovat uhličitán vápenatý (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 rozmíšeny již během míchání, jsou splněny podmínky pro metabolizaci bakterií. Během metabolizace bakterie produkují uhličitán vápenatý, který trhlínu postupně zaceluje (Schreiberová, Fládr, Trtík, Chylík, Šeps, Kohoutková, 2019).

* Školitel: doc. Ing. Roman Šafář, Ph.D.

5. DETEKCE TRHLIN V BETONU

V posledních letech se objevují výzkumy či studie, které se zabývají možností automatické detekce trhlin v betonových konstrukcích. Vzhledem k tomu, že vyhodnocení pomocí prohlídek nemusí být vždy zcela stejně interpretováno různými technikami, kteří prohlídku provádějí. To ostatně dokazují i případy, kdy jsou v systému hospodaření s mosty (BMS) mosty uváděny v různých stupních v závislosti na tom, který technik prohlídku provedl, bez zásahů do konstrukce. Automatizované systémy detekce trhlin by tak mohly přispět ke konzistentnímu vyhodnocování trhlin a tím i přesnějšímu stanovení trvanlivosti konstrukce.

Je ovšem potřeba zmínit, že nejen trhliny a jejich šířka mají vliv na životnost konstrukce. Srovnatelný vliv na životnost má i kvalita betonu krycí vrstvy.

Na universitě v Lisabonu se objevuje výzkum zabývající se detekcí trhlin na betonových površích. V této metodě je využito hyperspektrálních obrazů, k jejichž analýze je využito shlukových algoritmů a vyhodnocení je provedeno na základě binárního klasifikačního modelu. Výsledky jsou vždy porovnány s realitou. Metoda byla kalibrována a validována v rozsahu vlnových délek 425 až 950 nm. Tyto postupy vykazují dobré výsledky, jak na čistých betonových površích, tak na površích s biologickými skvrnami (Santos, Valenca, Júlio 2019).

V roce 2020 se objevuje studie provedená na Chang'an University v Číně, která se zabývá hodnocením trhlin pomocí umělé inteligence. Konstrukce je nafocena a obraz je následně zpracován pomocí algoritmů zpracování obrazu. Mezi ně patří například binarizace obrazu, detekce hran a matematická morfologie. Pomocí binarizace obrazu jsou pixely převedeny ze stupňů šedi na černé či bílé, které lze použít pro detekci trhlin. K učení se využívá neurální síť, kdy jsou trhliny označeny a umělá inteligence se tak učí trhliny v konstrukci rozpoznávat (Li, Ren, Qiao, Li 2020).

6. ZÁVĚR

Zpracovaná rešerše měla vytvořit ucelený přehled o aktuálních výzkumech prováděných v oblastech trhlin. Lze konstatovat, že problematika trhlin v betonových konstrukcích je stále oblastí, ve které se dá dosáhnout nových poznatků a postupů pro hodnocení. Jsou vyvíjeny samohojitelné betony, které mají zacelit trhliny vznikající v betonu a tím přispět k jejich delší životnosti a minimalizovat možnost vstupu vlhkosti k výztuži a tím snížit riziko koroze výztuže.

Aktuálně je snaha o využití umělé inteligence a automatizovaných mechanismů pro detekci trhlin v konstrukcích, které vycházejí z nasnímaní konstrukce a následného zpracování obrazu pomocí algoritmů. Tyto metody vykazují dobré výsledky.

Jak již bylo řečeno, oblast trhlin v betonových konstrukcích je stále zájmem mnoha výzkumů a stále se dají najít možnosti k dalšímu bádání a lepšímu porozumění konstrukcím a dějům v nich. Hodnotím tedy tuto oblast jako

vhodnou pro budoucí výzkum, který by měl být zaměřen na přesnější výpočetní metody ve smyslu konkrétní vypočtené šířky trhliny a do jisté míry stejné šířky změřené na konstrukci od daného zatížení. Ve výzkumu by měl být dále zahrnut vztah mezi trhlinami – jejich šířkou, rozložením v konstrukci a tím, jaké vzniká ohrožení konstrukce degradací v důsledku těchto trhlin.

Literatura

- MIHASHI, Hirozo, LEITE, Joao, Paulo, De B., 2005. Přehled stavu poznání o tvorbě trhlin v betonu v raných stádiích a možnostech jejího ovlivnění. *Beton TKS*. Praha: Beton TKS, s.r.o., 64, 34-38. ISSN 1213-3116
- ŠAFÁŘ, Roman, KOHOUTKOVÁ, Alena, JURSIK, Pavel, BOUŠKA, Petr, VOKÁČ, Miroslav, LITOŠ, Jiří, 2012. Non-linear Behaviour of Composite Structures. In: *IABSE Cairo Spring Conference 2012 Global Thinking in Structural Engineering: Recent Achievements*. Cairo, Egypt.
- CHANG, Shan, YANG, Ming, SUN, Yun, LIU, Kui, 2019. Calculation method of early-age crack width in reinforced concrete bridge through a nonlinear FEA model. *KSCE Journal of Civil Engineering* [online]. 3088-3096. Dostupné pomocí Springer Link. DOI 10.1007/s12205-019-2129-0
- Svaz výrobců betonu ČR, 2020. *eBeton* [online]. [Cit. 30.3.2021]. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz>
- PROCHÁZKA, Jaroslav, ŠTĚPÁNEK, Petr, KRÁTKÝ, Jiří, KOHOUTKOVÁ Alena, VAŠKOVÁ, Jitka, 2006. *Navrhování betonových konstrukcí 1 Prvky z prostého a železového betonu*. Druhé, upravené vydání. Praha: ČBS Servis, s. r. o.. 315 s. ISBN 80-903807-1-9.
- ŠMEJKAL, Jiří, PROCHÁZKA, Jaroslav, 2014. Výpočet šířky trhlin. *Beton TKS*. Praha: Beton TKS, s.r.o., 80, 68-76. ISSN 1213-3116
- ČSN EN 1992-1-1. *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí. Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha: Český normalizační ústav, 2005.
- ALGAIFI, Hassan, Amer, BAKAR, Suhaimi, Abu, ALYOUSEF, Rayed, SAM, Abdul, Rahman, Mohd, IBRAHIM, M. H. Wan, SHAHIDAN, Shahiron, IBRAHIM, Mohammed, SALAMI, Babatunde, Abiodun, 2021. Bio-inspired self-healing of concrete cracks using new *B. pseudomyces* species. *Journal of materials research and technology 2021* [online]. 967-981. Dostupné pomocí ScienceDirect. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.03.037
- ŠAFÁŘ, Roman, 2017. *Oprava železničního mostu v Leskovicích*. Praha: projektová dokumentace.
- SCHREIBEROVÁ, Hana, FLÁDR, Josef, TRTÍK, Tomáš, CHYLÍK, Roman, ŠEPS, Karel, KOHOUTKOVÁ, Alena, 2019. Vývoj složení cementové pasty s nutričními přísadami a superabsorpčním polymerem pro

* Školitel: doc. Ing. Roman Šafář, Ph.D.

samohojitelný beton na biologické bázi. *Beton TKS*. Praha: Beton TKS, s.r.o., 64, 46-. ISSN 1213-3116

SANTOS, Bruno, Oliveira, VALENCA, Jonatas, JÚLIO Eduardo, 2019. Automatic mapping of cracking patterns on concrete surfaces with biological stains using hyperspectral images processing.. *Structural control health monitoring 2019* [online]. 1-15. Dostupné pomocí Wiley online library. DOI: 10.1002/stc.2320

LI, Gang, REN, Xueli, QIAO, Wenting, MA, Biao, LI, Ying, 2020. Automatic bridge crack identification from concrete surface using ResNeXt with postprocessing. *Structural control health monitoring 2020* [online]. 1-20. Dostupné pomocí Wiley online library. DOI: 10.1002/stc.2620