

BIODEGRADACE BETONU PŮDNÍMI BAKTERIEMI CONCRETE BIODEGRADATION BY SOIL BACTERIA

**RICHARD WASSERBAUER,
RADEK ZIGLER**

Beton je z biologického hlediska považován za velmi rezistentní materiál, jehož odolnost mohou ve specifických případech narušit pouze thionové bakterie. V poslední době se však ukazuje, že korozní působení těchto mikroorganismů se, s výjimkou kanalizačních kolektorů, přeceňovala, a že zvláště atmosférickou korozí urychluje řada běžných půdních mikroobů. Tyto mikroorganismy byly dosud považovány za členy specifického mikrobiálního společenství a jejich degradační aktivita vůči betonu nebyla brána v úvahu. Včasná a rychlá diagnostika jejich přítomnosti může proto zabránit větším škodám.

From the biological point of view concrete is regarded as a very resistant material whose resistance can be impaired by thione bacteria only under specific conditions. However, it became evident recently that the corrosive effect of these microorganisms, with the exception of canalization collectors, was overestimated and that the atmospheric corrosion, above all, is accelerated by a number of common soil microbes. Up to the present time, these microorganisms have been regarded as members of a specific microbial community and their degradation activity affecting the concrete has not been taken into consideration. Therefore, diagnosing their presence quickly and in time can prevent more serious damages.

Porušení betonové konstrukce, ke které dochází při její interakci s okolním prostředím, je vždy výslednicí působení řady fyzikálně-chemických, případně biologických korozních vlivů. Účinky těchto vlivů se vzájemně zesilují či zeslabují a jejich intenzita je závislá na délce trvání a podmínkách působení. Biologická koroze betonu je vlastně specifickým druhem chemické koroze, iniciované živými organismy [1].

Při degradaci a rozrušování betonových skruží kanalizačních kolektorů a betonu přehradních nádrží hrají významnou roli sirmé bakterie. Korozivně aktivní je zejména *Dithiobacillus thiooxidans*, který snižuje pH betonu až na 2 až 3. Úroveň pH ovšem nekoreluje vždy se stupněm

korozního znehodnocení, protože některé puřovací systémy betonu mohou pH udržovat na neutrální úrovni. Zdrojem S^{2-} a tedy i H_2S jsou pro thionové bakterie aminokyseliny obsahující síru (cystein a methionin), které se tvoří při mikrobiálním rozkladu bílkovin v kanalizační síti. Po pětileté expozici může dojít v kanalizační síti k rozrušení betonu až do hloubky 30 mm [2, 3].

V poslední době se však ukazuje, že korozní aktivita sirmých bakterií se u betonových konstrukcí (nikoliv u kanalizačních kolektorů) spíše přeceňovala. Korozní změny jsou zřejmě ovlivněny především přímou transformací oxidu siřičitého na H_2SO_4 a nikoliv výlučně korozní aktivitou sirmých bakterií. Thionové bakterie jsou však i nadále nacházeny na betonových objektech, ale ve společenstvu řady dalších mikroobů (bakterie desulfurikační, denitrifikační, nitrifikační a amonizační), ve kterém většinou nehrají dominantní roli [4].

Zároveň je zřejmé, že půdní mikroorganismy, zvláště *Bacillus mucilaginosus* mohou vrústat do pórů betonového kamene a měnit jejich strukturu [5], případně destruovat některé minerály. Mikroorganismy jsou schopny růstu v pórech betonu o průměru větším než 30 μm , a to i při pH 11,5 až 12,5 a vytvářet zde celou řadu minerálů obsahujících Ca^{2+} , což musí mít vliv na stabilitu betonového kamene.

Při analýzách mikroflóry betonových konstrukcí se stále častěji objevují zmínky o významné degradační aktivitě mikromycet (plísni). Dominantní postavení při biokorozi betonu hrají mikroskopické vláknité houby (mikromycety), a to především zástupci rodů *Cladosporium*, *Alternaria*, *Aspergillus*, *Penicillium* a *Trichoderma*. Jedná se tedy o běžné epifytní či půdní mikromycety, které jsou schopny růst na nepatrných částech prachu a špíny, rychle kolonizovat porézní povrch betonu a produkovat organické kyseliny. Ty jsou následně převáděny do Ca komplexů, což znamená, že volné kyseliny nejsou analyticky detekovány [6].

Mikrobiální procesy probíhají na vlhkém a zestárlém betonovém kameni (pH pod 8) velice rychle. V našem příspěvku jsme se proto pokusili pomocí jednodu-

ché přístrojové techniky a bez přesného určení agresivní mikroflóry vyjádřit rychlé mikrobiální procesy, které vedou k povrchové korozi betonu a ve svých důsledcích mají během času hluboký dopad na stabilitu betonového kamene.

EXPERIMENTÁLNÍ VÝZKUM

Materiál a metody

Pro zkoušky byly použity vzorky betonu z Portlandského cementu třída pevnosti 25 MPa o rozměru 50 x 50 x 60 mm vyřezané z opravovaných mostních oblouků. Stámutí vzorků betonu (snížení pH vyluhu betonu na 8) bylo provedeno trojnásobnou expozicí vzorků betonu v autoklávu při teplotě 120 °C vždy po dobu 2 h.

Jako zkušební prostředí jsme použili bezuhlíkatou minerální půdu o následujícím složení: KH_2PO_4 0,1 g, K_2HPO_4 0,1 g, $MgSO_4$ 0,3 g, $(NH_4)_2SO_4$ 0,5 g, $FeSO_4$ stopy, destilovaná voda 1000 ml, pH 7,5 upraveno 0,1N KOH.

Půdní vyluh pro zaočkování zkušebního media byl připraven z lehké zahradní země (drnovka a listovka v poměru 1 : 1)

Obr. 1 *Koncentrace vápníku Ca^{2+} a vodivost [mS] kulturačního media se vzorky betonu první až devátý den kultivace*

Fig. 1. *The concentration of calcium Ca^{2+} and the conductivity [mS] of the cultivation medium with concrete samples within the first to ninth days of cultivation period*

Obr. 2 *Průběh transportu vody do kontrolních a exponovaných betonových vzorků v čase*

Fig. 2. *The development of reaction of both reference and exposed samples to the water transport in time*

Obr. 3 *Koncentrace půdních bakterií v mediu ($C ml^{-1}$) a průběh pH v mediu se vzorky betonu v závislosti na čase*

Fig. 3. *The concentration of soil bacteria in the medium ($C ml^{-1}$) and the pH behaviour in the medium with concrete samples being immersed therein in time dependence*

Obr. 4 *Tvorba pěny na povrchu minerálního media třetí den kultivace*

Fig. 4. *The foam formation on the mineral medium surface on the third day of cultivation*

obohacené kompostovou zemí v poměru 1 : 5, vlhkost půdy 40 %, pH půdního extraktu 5,8. 1 g upravené země byl přelit 100 ml destilované vody. Po rozmíchání a odsazení byla suspenze přefiltrována přes skleněný filtrační kelímek s fritou, velikost 2 až 3. Vždy 100 ml media bylo zaočkováno 1 ml půdního výluhu.

Zkušební a kontrolní vzorky o rozměru 50 x 50 x 60 mm byly umístěny do dvou litrových plastových nádob a zcela ponořeny do inokulovaného zkušební media. Současně bylo do media přidáno 0,02 % glukosu a 0,005 % peptonu jako startér růstu půdních mikroorganismů. Sterilita kontrolní sestavy byla udržována přidávkou Ajatinu. Každodenní přidavek glukosy imitoval snadno přístupný zdroj uhlíku. Kultivace proběhla v termostatu při teplotě 27 ± 2 °C během 10 dnů.

Koncentrace Ca^{2+} v kulturačním mediu byla stanovena na fotokolorimetru Spektroquant SQ 300 (Merck), reakcí na glyoxal-bis (2-hydroxyanil). Změny pH byly stanoveny pH metrem HI 9017 HANNA (USA). Vodivost media v čase byla sledována konduktometrem OK 102-1 Radelkis (Maďarsko), celkový počet mikroorganismů byl stanoven na fotokolorimetru Microelisa Reader (Dynatech Lab. INC), rychlost sorpce vody do exponova-

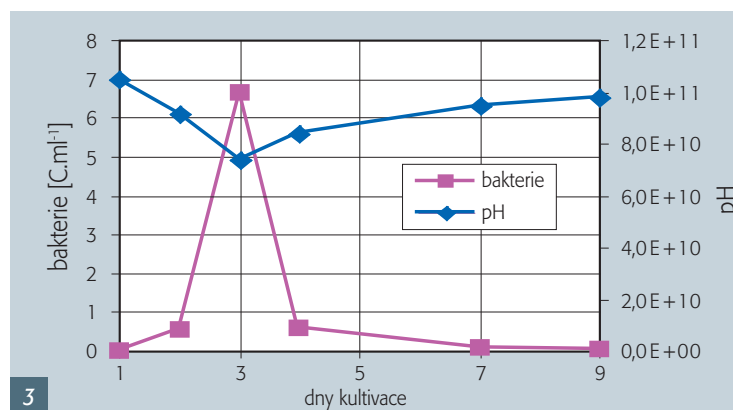
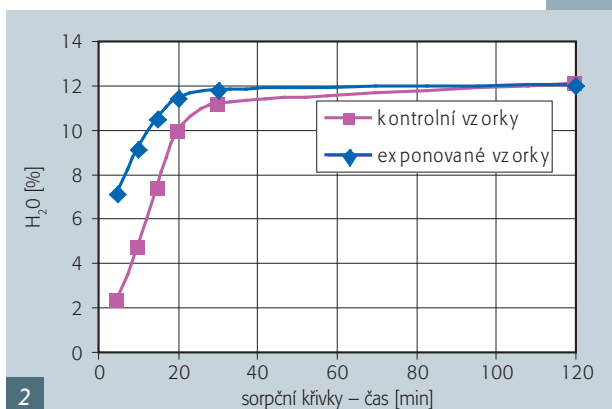
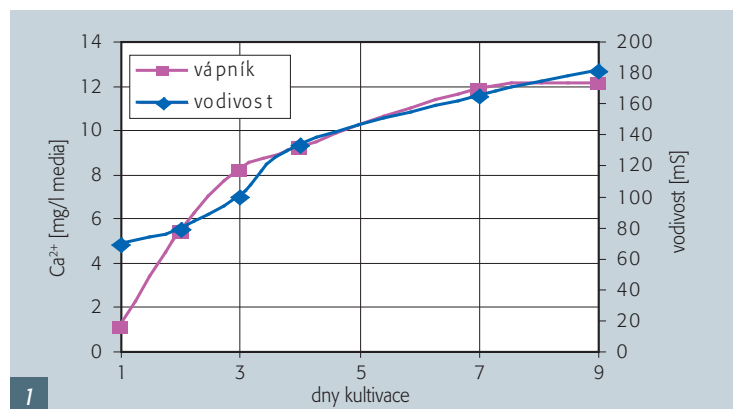
ných vzorků betonu byla stanovena vážkově na vahách PCN 128/00 Schoeller Instruments. Orientační analýza mikrobiálních metabolitů proběhla za pomoci tenkovrstvé chromatografie na silikagelu, soustava butanol, kyselina octová voda 9 : 1 : 1 (aminokyseliny), 4 : 1 : 5 (organické kyseliny), detekce aminokyselin 0,25% ninhydrinem v acetonu, detekce organických kyselin 0,075% bromkresolovou zelení a 0,025% bromkresolovou modří v ethanolu.

Diskuse výsledků

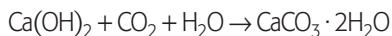
Na povrchu betonu zkorodovaného v základových konstrukcích či v atmosférických podmínkách se vždy nachází velké množství heterotrofních bakterií a plísní, které vytváří typické společenstvo [4]. Doménou chemoorganotrofních půdních bakterií je kyselinová koroze, známá jak v chemických provozech, tak i v zemědělství. Ve vlhkých betonových konstrukcích se setkáváme především s kyselinou octovou, mravenčí, propionovou, citronovou, glukonovou, šťavelovou a řadou dalších kyselin trikarbonového cyklu, které mikroorganismy vytváří během svého života. Protože kyseliny reagují především s $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a posléze i s hydrosilikáty a hydroalumináty Ca za vzniku vápenných solí, je zřej-

mé, že rychlost koroze betonu bude záviset zejména na rozpustnosti těchto Ca solí a na chování vrstvy vzniklých korozních produktů. Koroze postupuje tím rychleji, čím jsou vznikající reakční produkty rozpustnější a čím rychleji jsou při kondenzaci vodní páry nebo deštěm vymývány z hmoty betonu.

V našich výsledcích byl zřejmý prudký vzestup Ca^{2+} v mediu, zvláště během prvních tří dnů kultivace, provázený postupným zvyšováním konduktivity (obr. 1). Současně se také zvyšovala produkce CO_2 , což se mj. projevilo postupným poklesem pH (až na 4,9) a intenzivní tvorbou pěny na povrchu kulturačního media (obr. 4). Masivní vznik CO_2 lze snadno odvodit z metabolických drah pro aerobní bakterie. Pokud použijeme globální schéma pro bakteriální buňku, vidíme, že z bílkovin, polysacharidů a lipidů (základních organických složek biologického znečištění) vznikají aminokyseliny, cukry (hexózy a pentózy) a mastné kyseliny. Ty jsou přes Krebsův cyklus trikarbonových kyselin metabolisovány na NH_3 , H_2O a CO_2 . Produkci CO_2 lze také odvodit z metabolické dráhy pro aerobní respiraci, která je obecná pro bakterie, rostliny i živočichy. Vzniklý CO_2 napadá hydratační produkty cementu a neutralizuje $\text{Ca}(\text{OH})_2$ v povr-



chové vrstvičky betonu za vzniku uhličitanu vápenatého [8].



Takto vznikající CaCO_3 krystalizuje v nestabilních modifikacích lateritu (aragonitu), které se přeměňují na stabilní kalcit, při čemž dochází ke značným objemovým změnám a k částečnému zaplnění povrchových pórů betonu. To dobře souhlasí s názorem [9], který uvádí jako nejvýznamnější mikrobiální metabolity HCO_3^- , H_2CO_3 , CO_3^{2-} . Také my jsme mikroskopicky pozorovali na povrchu pokusných vzorků místy jemné krystalické novotvary CaCO_3 spolu s amorfním gelem kyseliny křemičité. Zaplnění pórů betonu CaCO_3 mělo za následek zpomalení transportu vody do betonu (obr. 2) a v pozdější fázi kultivace i růst větších krystalů kalcitu a aragonitu.

V další fázi kultivace došlo k výrazným změnám (obr. 3). Produkce CO_2 téměř ustala, na povrchu kultivačního media se začaly objevovat mikromycety (plísňe). Došlo k pozvolnému poklesu koncentrace bakterií (fáze odumírání), pH media se zotavilo na hodnotu 6,5. Pozorovaný průběh je typický pro mikrobiální půdní populaci, která zpočátku začíná růstem bakterií a fáze mikromycet se v mediu plně objevuje až po šesti až deseti dnech.

Úloha plísní při biokorozi betonu není stále zřejmá. Podle [4], plísně žijí na beto-

nu v kooperaci s bakteriemi (komensalizmus, kometabolismus?) a do biokoroze betonu nezasahují, naopak podle [6] jsou hyfy plísní schopny pronikat do betonu a zvětšovat jeho porozitu. Tenkovrstvou chromatografií jsme detekovali v růstové fázi plísní mravenčan a octan vápenatý, v mediu byly slabě přítomny také aminokyseliny valin, lysin, metionin a kyselina asparagová, které podle grafu na obr. 1 nadále uvolňovaly Ca^{2+} . Další kyseliny trikarboxylového cyklu nebyly detekovány. Zřejmě byly převedeny do Ca komplexů. To svědčí pro pokračující korozní proces betonu řízený plísněmi.

Jak potvrdily uvedené pokusy, rychlost úniku Ca^{2+} z přípovrchových vrstev betonu stimulovaná půdními bakteriemi je značná. Záleží ovšem na vlhkostních a teplotních podmínkách určitého objektu. K tomu je nutné připočítat mechanické poškození betonu (agresivní chemikálie, tepelné trhliny, procesy vápenatého a hořečnatého rozpínání, ale také znečištění betonu minerálními tuky a oleji, které jsou živinami pro bakterie), které často zahajuje biodegradaci [8]. V optimálních podmínkách proběhne úvodní fáze biokoroze půdními bakteriemi během osmi až deseti dnů, za přítomnosti kondenzátu, nebo při dešťových srážkách se může během let mnohokrát opakovat.

Praktické důsledky provedených experi-

mentů jsou zřejmé. Zabránit, nebo alespoň zmenšit mikrobiální aktivitu je možné jedině tak, že se co nejvíce zamezí přístup vody do betonových konstrukcí. To je možné například snížením množství trvale vlhkých kapes, a to již ve fázi projektu. U zemních konstrukcí se doporučuje vložit pod základy a na stěny výkopu nepropustnou hydroizolační folii proti vzliňující vlhkosti a po ztuhnutí betonu těsně vyplnit prostor výkopu zhutnělou suchou zeminou s bentonitem, čistým křemítem pískem a hmotou odpuzujícím vodu [8]. U betonových pilířů umístěných ve vodě použít těsnící injektáže proti vodě, případně opláštění pilířů, včetně těsnících vložek proti tlakové vodě. U objektů, kde je v určitých místech poškozený beton a podezření na biologickou korozi, měřit v průběhu času koncentraci Ca^{2+} a pH betonu. Pokud se oba uvedené parametry rychle mění, doporučuje se odstranit poškozený beton až na nezkorodované jádro a nahradit jej materiálem odolným vůči biokorozi. To je možné dosáhnout volbou hornin vhodného minerálního složení, volbou cementu a aditiv, která rezistenci proti bakteriím zvyšují.

ZÁVĚR

Bylo experimentálně prokázáno, že biokoroze betonu běžnými půdními bakteriemi probíhá za příznivých vlhkostních podmínek v krátkém časovém období velmi intenzivně a je schopna výrazně ovlivnit fyzikální vlastnosti betonu obdobně jako sirmé bakterie. Zabránit, nebo alespoň zmenšit mikrobiální aktivitu je možné jedině tak, že se co nejvíce zamezí přístup vody do betonových konstrukcí. Pro posouzení rychlosti probíhající biokoroze je vhodné stanovit na podezřelých místech úbytek Ca^{2+} a posoudit změny pH.

Článek byl zpracován za podpory grantového projektu GAČR 103/06/1801 Analýza spolehlivosti vlastností stavebních materiálů a konstrukcí s přihlédnutím k jejich změnám v čase a časově proměnným vlivům.

Prof. Ing. Richard Wasserbauer, DrSc.
e-mail: wasserba@fsv.cvut.cz
Ing. Radek Zigler, Ph.D.
e-mail: zigler@fsv.cvut.cz

oba: Fakulta stavební ČVUT v Praze
Katedra konstrukcí pozemních staveb
Thákurova 7, 166 29 Praha 6
Text článku byl posouzen odborným lektorem.

Literatura:

- [1] Vavřín F., Retzl K.: Ochrana stavebního díla proti korozi, SNTL Praha 1987
- [2] Monteny J., Vincke E., Beeldens A., De Belie N., Taerwe L., Gemert Van D., Verstraete W.: Chemical, microbiological, and in situ test methods for biogenic sulfuric acid corrosion of concrete, Cement and Concrete Research, 30, 620–634, 2000
- [3] Jones M. S., Wakefield R. D., Forsyth G.: A study of biologically decayed sandstone with respect to Ca and its distribution, Proceedings of the 9th Inter. Congres in Deterioration and Conservation of Stone, 473–481, 2000
- [4] Nica D., Davis J. L., Kirby L., Zuo G., Roberts D. J.: Isolation and characterization of microorganisms involved in the biodeterioration of concrete in sewers, International Biodeterioration & Biodegradation 46, 63–68, 2000
- [5] Durčeva V. N.: Mikrobiologičeskoje isledovanije betona, In: Izvěstija VNII gidrotechniki, 232, 2, 404–412, 1997
- [6] Dong Gu Ji., Tim. E. Ford, Neal S. Berke, Mitchel R.: Biodeterioration of concrete by the fungus Fusarium, International Biodeterioration & Biodegradation 41, 101–109, 1998
- [7] Mc Namara C. J., Perry T. D., Bearce K., Hernandez-Duque G., Mitchell R.: Measurement of limestone biodegradation using the Ca^{2+} binding fluorochrome Rhod-5N, Journal of Microbiological Methods, 61, 2, 245–250, 2005
- [8] Ďurdová L., Leber P.: Biokoroze betonu a možnosti optimální sanace, Beton TKS, 62–67, 2, 2008
- [9] Tazawa E. I., Morinaga T., Kakai K.: The deterioration of concrete in sewerage works caused by metabolites of aerobic microorganisms, and preventive measures, Proc. of 3rd CAN-MET/ACI Inter. Conf. on Durability of Concrete SP 145–159, 1087–1097, 1994