

# SPOLEHLIVOST A ŽIVOTNOST BETONOVÉHO KANALIZAČNÍHO POTRUBÍ – MOŽNOSTI VÝPOČETNÍHO MODELOVÁNÍ ■

## RELIABILITY AND SERVICE LIFE OF CONCRETE SEWAGE PIPES – ANALYTICAL MODELLING

Břetislav Teplý, Richard Schejbal, Ladislav Řoutil,  
Tomáš Parkan, Markéta Rovnaníková

Kanalizační systémy jsou nezbytnou a nákladnou součástí infrastruktury a jejich návrhu, provádění, údržbě i provozování je potřeba věnovat náležitou pozornost. Jen pro ilustraci – podle neúplných údajů výrobců bylo jen v roce 2010 v ČR vyrobeno a převážně na místní stavby dodáno více než 400 km betonových trub. Velmi často se však správný přístup související se statickým řešením potrubí uloženého v zemi, jeho spolehlivostí a v čase proměnnými vlastnostmi zanedbává, což je způsobeno také tím, že související systém norem a předpisů tomu není dostatečně přizpůsoben (podrobné hodnocení této problematiky v příspěvku [1]). ■ *Sewage systems are fundamental and costly part of the infrastructure and it is necessary to give appropriate care to its design, construction, maintenance and operation. To illustrate – in the Czech Republic in 2010 only about 400 km of concrete pipes were delivered. However, the application of a correct approach to structural design of buried pipelines considering the reliability and time varying properties is omitted frequently. Also, a relevant system of codes is missing (see e.g. [1]).*

Systém potrubí–zemina (podloží, obsyp, zásyp), příp. konstrukce vozovky nad potrubím je mnohoparametrický prostorový systém s vlastnostmi v čase proměnnými a nelze jej komplexně pojednat v jednom textu. Předkládaný článek je zaměřen jen na užší problematiku únosnosti a životnosti: na statické a spolehlivostní řešení únosnosti v příčném řezu betonového kanalizačního potrubí většího průměru při spolupůsobení potrubí se zeminou (prstencové namáhání), s ohledem na materiálově nelineární chování, jeho postupnou degradaci biogenní síranovou korozi [2], i na nejistoty v hodnotách vstupních údajů.

Cílem je představení metodiky pro hodnocení spolehlivosti a životnosti potrubí, vzájemné porovnání některých řešení i poukaz na nekonzistenci či neúplnost relevantních předpisů/norem. Využívají se přitom moderní nástroje výpočetního modelování a simulací. Tyto nástroje a postupy mohou být přínosné nejenom při navrhování stokových sítí, ale rovněž pro efektivní rozhodování o opravách a rekonstrukcích stávajících kanalizačních potrubí, často provedených ještě ze starších, méně kvalitních betonů.

### SPOLEHLIVOST A ŽIVOTNOST – MEZNÍ STAVY

Při navrhování konstrukcí se má uvažovat hodnota životnosti specifikovaná investorem v součinnosti s dalšími zainteresovanými stranami. Při posuzování stávající konstrukce se pak hodnotí zbytková životnost, tzn. že případný návrh rekonstrukce má zabezpečit požadovanou (prodlouženou) životnost při zachování potřebné míry spolehlivosti. Současné normy obvykle nevedou k přímému řešení takových úloh; změnu přináší nová modelová norma *fib-Model Code* 2010 [3], resp. ISO [4], které tuto problematiku zohledňují.

Formálně se za ukončení životnosti považuje okamžik, kdy konstrukce již nespĺňuje požadavky na funkčnost nebo spolehlivost; odtud plyne vazba v posuzování životnosti na mezní stavy použitelnosti (MSP) či únosnosti (MSU) a na degradaci materiálů. Definice mezních stavů je obsažena v normě [5]; při verifikaci mezních stavů specificky vázaných na život-

nost se pochopitelně musí uvažovat faktor času – tyto mezní stavy jsou závislé na degradaci materiálů a mohou proto omezovat životnost konstrukce dříve, než by byla vyčerpána její únosnost, resp. použitelnost. U železobetonových konstrukcí jde např. o depasivaci výztuže, případně o takové důsledky koroze výztuže, které sice ještě nemají rozhodující vliv na únosnost či tuhost konstrukce, ale v budoucnu by vedly k příliš nákladným opravám nebo jsou např. limitující s ohledem na provozování konstrukce. Takové stavy jsou někdy označovány jako mezní stavy trvanlivosti (DLS), resp. iniciační mezní stavy.

V souvislosti s problematikou životnosti poznamenejme, že Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2014/24/EU uvádí kritérium ekonomicky nejvýhodnější nabídky a přitom zdůrazňuje hledisko nákladů životního cyklu. V současnosti probíhají práce na transpozici této směrnice EU do nového českého zákona o veřejných zakázkách, který má vstoupit v platnost od dubna 2016; údaj o životnosti, resp. její prognóza tak u veřejných zakázek nabývá na důležitosti.

Pro posouzení trvanlivosti se dle [3] uvažují čtyři možné formáty spolehlivosti:

- pravděpodobnostní formát,
- formát dílčího součinitele spolehlivosti,
- dodržení zásad životnosti (*deemed-to-satisfy*),
- vyloučení vlivů, které způsobují degradaci.

Z uvedených formátů pouze první varianta dává projektantovi možnost ověření míry spolehlivosti daného návrhu či řešení s ohledem na požadovanou životnost a je možno jej chápat jako základní formát. Hodnoty dílčích součinitelů spolehlivosti specificky pro posuzování či navrhování kanalizačních potrubí nejsou doposud jednoznačně přijaty.

Pro navrhování potrubí z hlediska statické spolehlivosti platí v současnosti v ČR dva základní standardy – ČSN EN 1295-1 [6] a TNV 750211 [7]. Ani jedna z těchto norem ovšem neřeší problém posouzení trvanlivosti, a to ani implicitně. Česká vodohospodářská norma sice uvádí metodu dílčích součinitelů spolehlivosti ve smyslu platných Eurokódů jako základní pro navrhování a posuzování potrubí uloženého v zemi stejně jako evropský standard, ale uvádí jen obecné principy. Obě normy přitom platí pro vodohospodářská potrubí všech možných materiálových i tlakových variant, pro reálný statický výpočet – včetně posouzení trvanlivosti – ale nenabízí žádné podrobné algoritmy nebo aplikační pravidla. I z těchto důvodů převládají v současné projekční praxi zjednodušené postupy s využitím různých tabulek a grafů, např. pro náhradu spolupůsobení konstrukce se zeminou kontaktním namáháním (u nás např. [20]). Norma [6] v odstavci 4.6 požaduje, aby takové zjednodušené návrhové metody odpovídaly „úplnému výpočtu, kdy zjednodušením nesmí být snížena úroveň spolehlivosti“; odst. 4.8 dále uvádí, že „při stanovení požadované úrovně spolehlivosti se musí zohlednit možné důsledky poškození potrubí.“ V odst. 5.3 jsou pak definovány mezní stavy únosnosti a použitelnosti, přímé posouzení trvanlivosti je pomínuto. V kap. 8 se poukazuje na nejistoty ve vlastnostech zemin i stavebních postupů a uvádí se, že v projektové fázi je na to třeba brát přiměřený ohled. Norma

[6] tak vlastně nepřímo vyžaduje, aby byl aplikován stochastický přístup včetně započítávání degradace materiálu, ale zahrnuto to v ní není.

Současně je třeba konstatovat, že zřejmě chybí konsenzus na mezinárodní úrovni a ani pracovní verze (technical reports) dalších částí evropské normy [6], tj. [8] a [9] nepostupují dále v praktické použitelnosti. Dokument [8] jen rekapituluje národní metody některých členů CEN, ve zprávě [9] se pak jako materiál pro další diskusi odborníků při tvorbě jednotné koncepce uvádí popis dvou variant metody pro statický výpočet kanalizačních potrubí vyrobených z různých materiálů. Obě metody jsou také založeny na zjednodušeném řešení kontaktních tlaků potrubí–zemina a zjednodušeném statickém řešení příčného i podélného namáhání potrubí. První varianta vede k posouzení spolehlivosti prostřednictvím jakýchsi „globálních faktorů bezpečnosti“ (poměrů vypočtených napětí a hodnot referenčních napětí); druhá varianta používá dílčí součinitele spolehlivosti a zkoumá oba mezní stavy ve vztahu k výsledkům zatěžovacích zkoušek či předpisů výrobců potrubí. V obou variantách se očekává, že nebude překročena mezní hodnota pravděpodobnosti poruchy  $10^{-5}$  a jako smluvní délka životnosti se uvažuje 50 let, nelze to však přímo ověřit. Specifický problém trvanlivosti se tedy opět pomíjí, stejně jako přímé posouzení spolehlivosti.

Připomeňme zde, že pravděpodobnostní hodnocení mezních stavů (např. dle [5]) je obecně popsáno podmínkou ve tvaru

$$P_f(t) = P\{B(t) - A(t) \leq 0\} \leq P_d \quad (1)$$

kde  $A$  je akce vyvolaná působením zatížení či prostředí,  $B$  je bariéra, tj. únosnost nebo odpor konstrukce – mezní hodnota zadaná či stanovená ve vztahu k vyšetřovanému meznímu stavu. Pravděpodobnost  $P_f$  dosažení tohoto stavu (obvykle nazývanou pravděpodobností poruchy) porovnáváme s návrhovou/limitní pravděpodobností  $P_d$ . Z praktických důvodů je pravděpodobnost poruchy obvykle transformována na index spolehlivosti  $\beta$  s limitní hodnotou  $\beta_d$  [5]. Veličiny  $A$ ,  $B$  (a tedy i  $P_f$ ) jsou obecně funkcí času; v případech DLS se obvykle zajímáme o čas  $t = t_D$ , tj. čas popisující dosažení životnosti vzhledem k příslušnému meznímu stavu, resp. návrhovou životnost. Poznamenejme, že veličina  $B$  má v praxi nejčastěji

formu konstanty (např. mezní deformace, šířka trhliny, ohybový moment, rozměr průřezu apod.). Veličinu  $A$  a její statistické charakteristiky můžeme obvykle stanovit právě pomocí vhodného výpočetního modelu s využitím pravděpodobnostního přístupu.

Při posuzování degradace železobetonových konstrukcí se tedy používají modely – časově závislé matematické funkce, které popisují nárůst poškození v čase. Tyto modely jsou funkcí mnoha materiálových, geometrických a environmentálních parametrů a je vhodné, aby zohledňovaly i jejich náhodný charakter. Blíže – specificky pro kanalizační gravitační potrubí – v následující kapitole.

## DEGRADACE BETONU, MODELOVÁNÍ, PARAMETRICKÁ STUDIE

Snížení životnosti betonových kanalizačních potrubí s volnou hladinou způsobuje především degradace vlivem síranové koroze. Betonové stěny kanalizačních trubek jsou vystaveny nejen síranům z odpadní vody, ale i kyselině sírové vznikající během biogenní síranové koroze (BSK) činností bakterií [10, 11]. Uvedený proces vede k rozpínání a popraskání betonu a v konečné fázi až k jeho kompletnímu rozpadu [12]. Primární reakci síranových aniontů s hydroxidem vápenatým přítomným v cementovém tmelu vzniká především dihydrát síranu vápenatého (sádrovec) a objemný ettringit, jejichž tvorba je hlavní příčinou vzniku trhlin a rozpadu betonové konstrukce.

Průměrnou rychlost koroze  $c$  [mm/rok] způsobenou BSK lze popsat pomocí často citovaného modelu, který publikoval Pomeroy a Boon [13]. Tato rychlost reprezentuje celkovou ztrátu materiálu kanalizačního potrubí po celém jeho povrchu, kde koroze působí. V koruně kanalizačního potrubí však dochází k větší rychlosti koroze než u hladiny odpadní vody v kanalizaci. Také oblasti potrubí vystavené větším turbulencím podléhají rychlejší korozi. Modifikací původního modelu pomocí vztahů v [14, 15] získáme následující model sloužící k výpočtu maximální rychlosti koroze  $c_{\max}$  v koruně potrubí:

$$c_{\max} = k_{ccf} k_{tcf} 4,025 \cdot 10^{-3} k j A_s^{-1} [BOD] 1,07^{t-20} (P / (\pi D - P) \psi), \quad (2)$$

kde  $k_{ccf}$  je faktor pro korozi koruny potrubí [-] s hodnotou v rozmezí 1,5 až 2;  $k_{tcf}$  turbulentní korozní faktor [-] s hodnotou

## Ověřte Vaši konstrukci programem ATENA!

Připojte se ke špičkovým inženýrům, kteří používají počítačovou simulaci pro posouzení a navrhování bezpečných a spolehlivých staveb.



**Nová verze 5.3**  
s postupem  
výstavby tunelů, mostů,  
nové 3D nosníkové prvky  
pro rámové konstrukce

### Nabízíme:

- jedinečný software pro nelineární analýzu a hodnocení bezpečnosti
  - programy ATENA Engineering, ATENA Science, SARA
- uživatelskou podporu a údržbu
- poradenství v oblasti nelineárních výpočtů a spolehlivosti konstrukcí

### Použití pro:

- mosty, budovy, energetické, vodohospodářské a podzemní stavby
- prostý a vyztužený beton, drátkobeton, vláknobeton
- stanovení šířky trhlin, průhybů, optimalizaci výztuže
- ověření únosnosti, odolnosti, spolehlivosti, zesilování konstrukcí

Červenka Consulting s.r.o. • Na Hřebenkách 55 • 150 00 Praha 5  
Tel.: +420 220 610 018 • E-Mail: [cervenka@cervenka.cz](mailto:cervenka@cervenka.cz) • Web: [www.cervenka.cz](http://www.cervenka.cz)

**ČERVENKA**  
CONSULTING  
Concrete Engineering & Software Solutions

Tab. 1 Výsledné statistické parametry rychlosti biogenní síranové koroze pro různé hodnoty biochemické spotřeby kyslíku ■ Tab.1 Statistical parameters of biogenic sulfuric acid corrosion for different biochemical oxygen demand concentration

Biochemická spotřeba kyslíku [BOD] [mg/l]	Rychlost biogenní síranové koroze [mm/rok]			
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	COV [%]	PDF
150	0,8588	0,2477	28,84	Weibull max (3par)
200	1,1450	0,3302		
250	1,4313	0,4128		
300	1,7176	0,4954		
350	2,0038	0,5779		
400	2,2901	0,6605		

mezi 1 a 2 pro potrubí s vhodným spádem, popř. 5 až 10 pro potrubí s ostrým spádem či pro případ spojení dvou potrubí; faktor  $k$  reprezentuje podíl kyseliny, která zreaguje [-];  $j$  faktor vztahující se k podílu rozpuštěného  $H_2S$  při daném pH, na kterém je závislý [-];  $A_s$  kyselinová kapacita (zásaditost) materiálu stěny (g  $CaCO_3$ /g betonu) – je nepřímo úměrná rychlosti penetrace kyseliny sírové do stěny potrubí; [BOD] biochemická spotřeba kyslíku [mg/l];  $T$  teplota okolí [°C];  $P$  smáčená část obvodu stěny potrubí [m];  $D$  vnitřní průměr potrubí [m] a  $\psi$  faktor neurčitosti modelu [-].

Kvalita betonu je v uvedeném modelu zohledněna prostřednictvím kyselinové kapacity materiálu stěny  $A_s$ , která může být vypočtena z experimentálně stanoveného obsahu rozpustného CaO v betonu nebo v jeho složkách (cementu a kamenivu) pomocí vztahu v [10]. Odtud vyplývá, že vápencové kamenivo zvyšuje zásaditost betonu a prodlužuje životnost konstrukce vystavené sulfidům (srovnávací příklad je v [19]).

Během síranové koroze dochází k postupnému snižování pH pórového roztoku v povrchové vrstvě betonu vlivem působení kyseliny sírové. Z hodnoty pH na povrchu betonu lze vypočítat koncentraci kyseliny sírové a následně i rychlost koroze podle vztahů v fib Model Code [3], kap. 5. Složení betonu včetně vlivu vodního součinitele a typu a množství cementu, kameniva a příměsí je při výpočtu zohledněno zavedením konstanty  $k_c$ , jejíž hodnotu lze určit vhodnými experimenty [21] doporučenými v [3] nebo pomocí inženýrského posouzení a zkušeností. Tento model poskytuje na rozdíl od modelu dle vztahu (2) rychlost koroze proměnnou v čase a je též zařazen v softwarovém nástroji FReET-D.

Jako příklad a ukázkou možností stochastického modelování zařazujeme (bez vztahu k příkladům popsáním v následující kapitole) studii vlivu rychlosti biogenní síranové koroze na biochemické spotřebě kyslíku, která odráží znečištění odpadní vody organickými látkami. Pro studii byl využit model (2), na který byl aplikován pravděpodobnostní přístup s využitím softwarového nástroje FReET-D. Jedná se o přidružený modul pravděpodobnostního softwaru FReET pro statistickou, citlivostní a spolehlivostní analýzu inženýrských problémů, kdy jednotlivé modely byly upraveny tak, že všechny vstupní veličiny mohou být zadány jako náhodné veličiny (podrobněji [16, 17]). Pro účely tohoto ilustrativního příkladu bylo zvoleno kanalizační potrubí DN 1800 s tloušťkou stěny 220 mm a sklonem 1,5 ‰. Stěny potrubí jsou zhotoveny z betonu obsahujícího kamenivo odolné kyselinám, smáčená část obvodu profilu kanalizačního potrubí byla určena za předpokladu 20% zaplnění potrubí a biochemická spotřeba kyslíku se pohybuje v rozmezí od 150 až 400 mg/l. Ostatní hodnoty vstupních parametrů včetně rozdělení pravděpo-

Obr. 1 Experimentálně stanovené a vypočtené hodnoty vrcholového zatížení ■ Fig. 1 Load-bearing capacity of pipe cross section gained by testing and different types of analysis

Obr. 2 Vývoj únosnosti potrubí při uspořádání jako u zatěžovací zkoušky a při degradaci 0,5 mm/rok ■ Fig. 2 Dependence of load-bearing capacity of tested pipe DN 800 on age considering the degradation rate 0.5 mm/year in the crown of the pipe

Obr. 3 Schéma uložení potrubí v zemině ■ Fig. 3 Buried pipe scheme

Obr. 4 Výřez MKP modelu včetně sítě konečných prvků a izoploch napětí  $\sigma_{xx}$  ■ Fig. 4 Detail of FE mesh with isoplanes for stress  $\sigma_{xx}$

Obr. 5 Vztah pravděpodobnosti poruchy únosnosti a času pro různé rychlosti koroze betonu ■ Fig. 5 Probability of failure vs. age for different corrosion rates

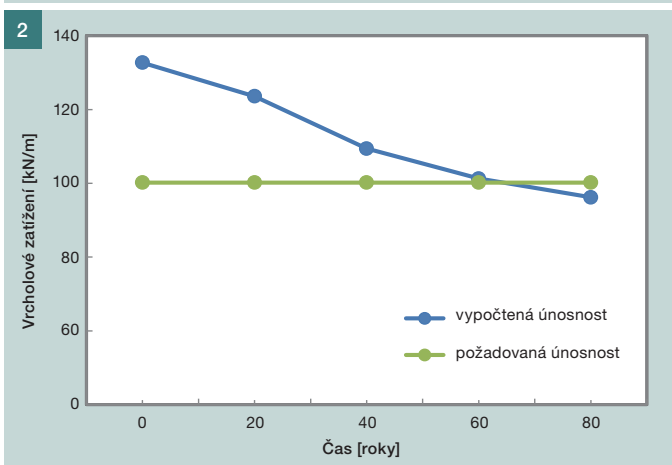
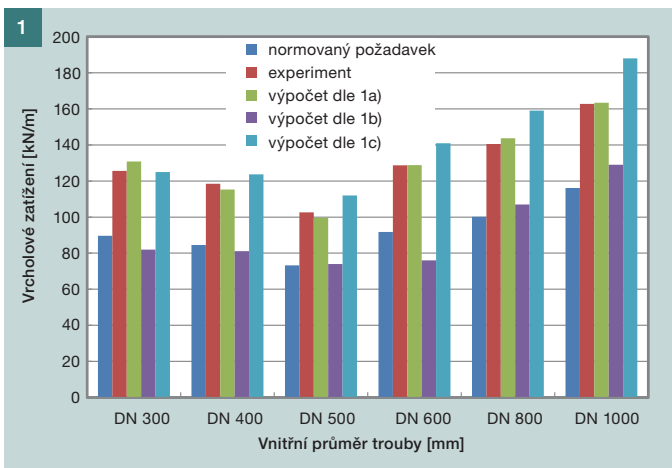
Obr. 6 Průběh: a) kontaktních napětí, b) ohybových momentů i osových sil pro výpočet 3b ■ Fig. 6 a) Contact stresses, b) bending moments and axial forces for analysis 3b, no degradation (i.e. age  $t = 0$ )

dobnosti jsou v souladu s [19]. Výsledky závislosti rychlosti biogenní síranové koroze na biochemické spotřebě kyslíku jsou shrnuty v tab. 1.

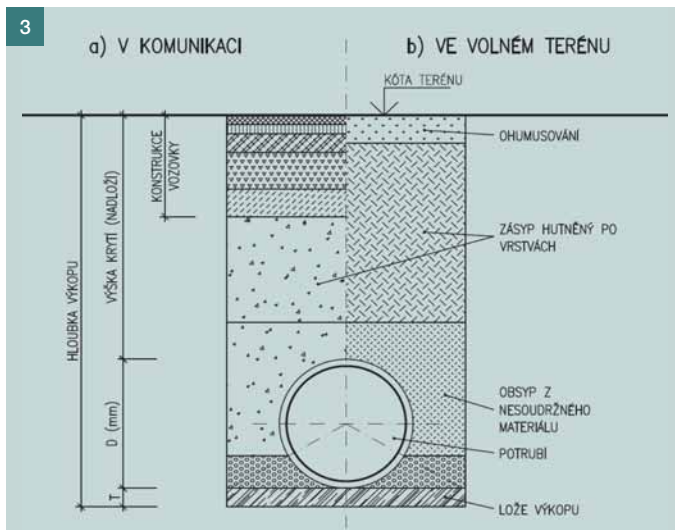
Podobně by bylo možno studovat vlivy dalších parametrů na rychlost degradace betonu v koruně potrubí.

Připomeňme, že v odborné literatuře se uvádějí hodnoty rychlosti koroze betonu způsobené BSK 0,5 až 10 mm/rok; za extrémních podmínek byla zaznamenána hodnota až 20 mm/rok, což se vztahuje zřejmě k případům míst s vysokou turbulencí a starších potrubí z betonů nižší kvality. Pravidelné prohlídky a čištění kanalizace ovšem může mít podstatný vliv na zpomalení koroze.

Na degradaci vlastního betonu se mimo BSK podílí řada dalších faktorů, např. karbonátace, abraze aj., které rovněž







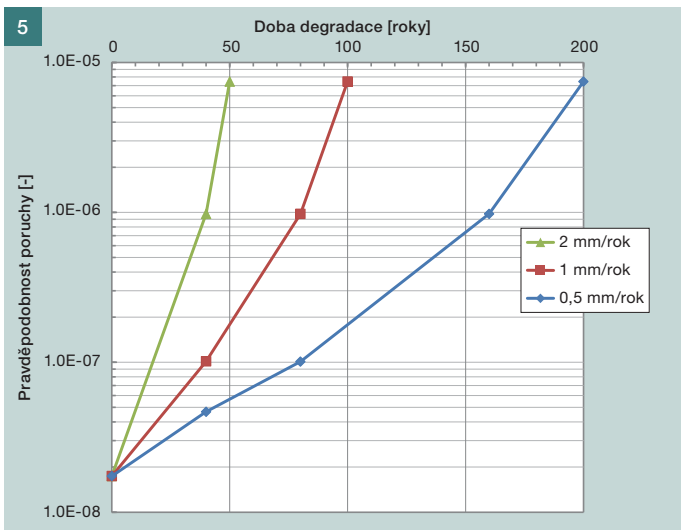
mohou výrazně ovlivnit úbytek tloušťky, a tím spolehlivost a životnost potrubí.

Dalším důsledkem působení kanalizačního prostředí je také postupné snižování hladiny pH (např. [14] a [23]) z původní hodnoty 12,5 pro čerstvý beton; při podkročení hodnoty 8,3 dochází k tzv. depasivaci výztuže, kdy za obvyklých podmínek může ocelová výztuž již korodovat. To je samozřejmě proces, který u železobetonových konstrukcí vede ke snížení životnosti i spolehlivosti. Pomocí výše zmíněného nástroje FReET-D lze příslušné jevy modelovat, tj. vznik trhlin v betonu v důsledku koroze výztuže i zmenšování její efektivní průřezové plochy [16]. Předkládaný příspěvek však o korozi výztuže nepojednává, není zaměřen na železobetonové potrubí.

### STATICKÉ ŘEŠENÍ

Pro ověření předkládaného řešení trvanlivosti a spolehlivosti betonového potrubí byly provedeny následující výpočty a srovnání:

- 1) Statické řešení příčného profilu betonové trouby zatížené a podepřené v souladu se zatěžovacími zkouškami výrobce (určení tzv. vrcholového zatížení), tj. potrubí neuložené v zemině, nedegradované:
  - a) Řešení s užitím softwaru ATENA 2D [18], tj. výpočet materiálově nelineární MKP, jako úloha rovinné deformace s lomově-plastickým konstitutivním modelem pro beton, založeným na ortotropní formulaci rozetřené trhliny a modelu pásu trhlin. Při výpočtu vrcholového zatížení se uplatnily příslušné charakteristiky betonu odvozené z experimentálně stanovené průměrné hodnoty krychel-

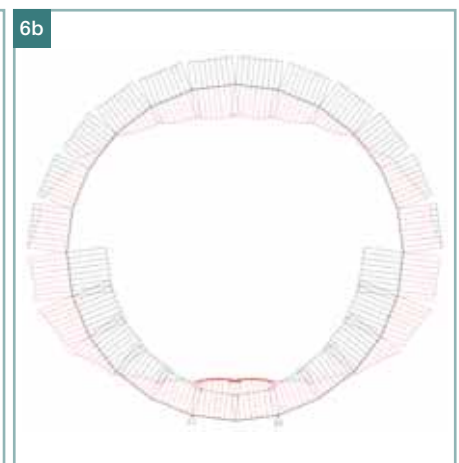
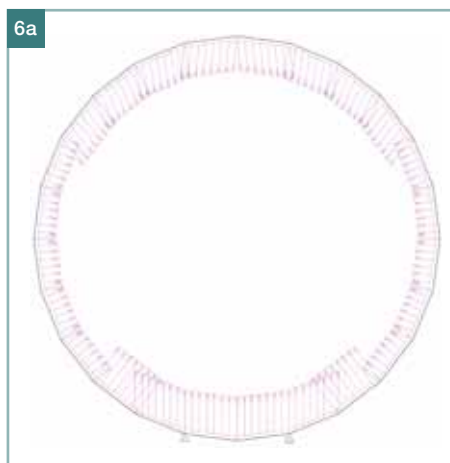
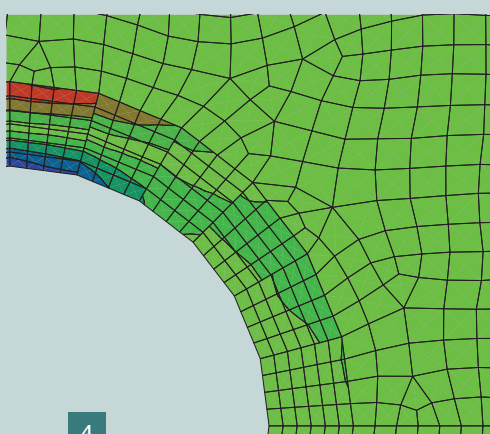


né pevnosti 71,8 MPa poskytnuté výrobcem. Tato hodnota je značně vysoká vzhledem k třídě C40/50, jde ale o náhodně vybraný časový úsek výroby (měsíc); hodnoty z různých měsíců/roků bývají rozdílné.

- b) Výpočet kruhové prutové soustavy pomocí programu FIN 2D z programového balíku FIN EC v.2, s posouzením napjatosti v nejvíce namáhaném průřezu podle zásad ČSN EN 1992 a se zavedením charakteristické hodnoty pevnosti betonu dané třídy (C40/50) v tahu, tj. 95% kvantilu  $f_{ctk;0,95}$ .
- c) Dtto, ale se zavedením střední pevnosti v tahu za ohybu (dle odst. 3.1.8 [25]).

Výpočty dokumentuje obr. 1, kde je zobrazeno srovnání výsledků výpočtů 1a, b, c testů výrobce a požadavku předpisů (v současnosti již neplatné ČSN 729149) pro několik profilů betonového potrubí. Vyplyvá odtud dobrá shoda výpočtů s testy a také skutečnost, že nedegradované potrubí má požadovanou vrcholovou únosnost s jistou rezervou.

- 2) Při stejném uspořádání zatížení, podepření a způsobu výpočtu jako v 1a), ale s uvažováním postupné degradace biogenní síranovou korozi v koruně s rychlostí koroze betonu 0,5 mm/rok (udáváno často jako typická hodnota, i když dosti nízká – sr. údaje na konci předcházející kapitoly), je pak na časové ose na obr. 2 ukázána životnost cca 62 let (omezena normovým požadavkem na únosnost) pro potrubí DN 800; např. pro DN 600 podobně vychází 50 let. Je ovšem nutno zdůraznit, že se jedná jen o jakousi hypotetickou životnost, stanovenou pro vrcholové zatížení potrubí bez spolupůsobení se zeminou a bez uvažování rozptylů



jednotlivých veličin, tj. bez možnosti ověřit úroveň spolehlivosti. Kromě toho rychlost BSK závisí na mnoha faktorech a může být výrazně odlišná od té, která je zvolena v tomto případě. Současně nemusí platit předpoklad konstantní rychlosti koroze v čase a je tedy zřejmé, že by bylo vhodné každý případ posuzovat individuálně s využitím nástrojů uvedených v předcházející kapitole.

3) Výpočet pro systém potrubí–zemina pro potrubí DN800: modely řešení pro potrubí v zemině vychází z reálného uložení dle obr. 3.

a) Řešení MKP v softwaru ATENA 2D (obr. 4 znázorňuje pouze výřez sítě prvků u kvadrantu potrubí; celkový počet prvků je 6644), opět jako materiálově nelineární úloha rovinné deformace; pro zeminu se využívá Drucker-Pragerovo kritérium porušení. Vlastnosti betonu zde byly odvozeny pro třídu C40/50, vlastnosti zeminy byly definovány v souladu s hodnotami v bodě 3b.

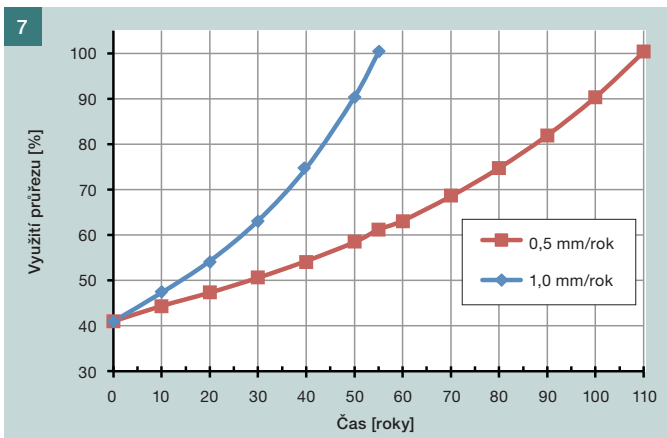
Realizován byl výpočet s uvažováním postupné degradace betonu, s využitím pravděpodobnostní simulace, s cílem stanovit životnost i spolehlivost (pravděpodobnost poruchy, resp. index spolehlivosti). Byl použit řídicí software SARA, který kombinuje pravděpodobnostní nástroj FReET ([www.freet.cz](http://www.freet.cz)) s MKP nástrojem ATENA [24]; započtení degradace, tj. zde rychlosti koroze betonu  $c_{\max}$  v koruně potrubí může zprostředkovat FReET-D. V řešeném příkladu, který není vázán na konkrétní kanalizační systém, byla rychlost koroze zvolena pro názornost ve třech hodnotách 0,5; 1 a 2 mm/rok. Obr. 5 ukazuje závislost pravděpodobnosti  $P_f$  poruchy únosnosti na čase. Je zřejmé, že mezní (návrhová) hodnota  $P_d = 1.0E-5$  uvažovaná v dokumentu [9] by zde vedla k relativně vysokým prognózám životnosti – asi 50 let pro  $c_{\max} = 2$  mm/rok a ještě pak k výrazně vyšším životnostem pro menší rychlosti degradace. Pro srovnání:  $P_d = 1.0E-5$  transformováno na index spolehlivosti dává hodnotu  $\beta = 4,25$ .

b) Deterministický výpočet pomocí 2D prutového modelu s užitím modulu FIN 2D z programového balíku FIN EC v.2, zatíženého soustavou kontaktních namáhání určených v souladu s teorií rozpracovanou v [20]. Kritický průřez byl posouzen pomocí interakčního diagramu a využití průřezu pomocí modulu Beton 2D. Obr. 6 ukazuje průběh kontaktních napětí a vnitřních sil pro případ bez degradace (tj. pro čas  $t = 0$ ). Výpočet byl ale veden dále také s uvažováním konstantní korozní degradace betonu 0,5 mm/rok po celém obvodu průřezu, rovněž s cílem určit životnost. Pro názornost důsledků rychlosti koroze betonu jsou na obr. 7 znázorněny výsledky výpočtu pro další časové okamžiky znázorňující míru využití průřezu s ohledem na únosnost v čase.

Blíže k těmto výpočtům:

V případech 3a) a 3b) byly výpočty provedeny se snahou o shodné vstupní parametry pro návrhovou situaci nedegradovaného betonu. Základními vstupy byly:

- geometrie příčného řezu trouby z prostého betonu, DN 800 s tloušťkou stěny 130 mm;
- materiálové charakteristiky betonu (pevnost, modul pružnosti) – beton C 40/50;
- geometrické údaje o uložení (hloubka nivelety / výška krytí, tvar rýhy / zářezu pro potrubí) – uložení v široké rýze – zářezu – v komunikaci, s běžnou hloubkou uložení, resp. s výškou krytí nad vrcholem trouby 1,5 m; úhel uložení se uvažuje 90°;



Obr. 7 Využití únosnosti průřezu v čase pro dvě hodnoty konstantní rychlosti degradace ■ Fig. 7 Exploitation of load bearing capacity vs. age for two values of constant degradation rate

- vlastnosti zemin lože, obsypu a zásypu (objemová tíha, smykové parametry – úhel vnitřního tření, soudržnost) – obsyp a zásyp nesoudržnou zeminou s hodnotami  $\gamma = 18$  kN/m<sup>3</sup>,  $\phi = 27,5^\circ$  a s rychlou konsolidací; výpočty vycházejí z předpokladu kvalitního provádění zemních prací při ukládání potrubí;
- zatížení na povrchu terénu – v posuzovaném případě kolový tlak návrhového vozidla 120 kN na normativní zatěžovací ploše;
- pro odhady pravděpodobnosti poruchy byl jako mezní stav únosnosti v případě 3a) použit vztah (1), kde v úloze akce zatížení  $A$  vystupovala hodnota napětí v tahu a bariéru  $B$  pak představovala tahová pevnost betonu; jinými slovy – mezní situací bylo tahové porušení betonu, které takto znamenalo dosažení mezního momentu únosnosti nevytluženého průřezu, obvykle ve vrcholovém průřezu vyšetřované konstrukce (rovinné přetvoření, MKP, 2D prvky);
- modely 3a) a 3b) se částečně liší v zavedení úbytku tloušťky vlivem degradace. Pro výpočty MKP v ATENĚ 2D bylo uvažováno extrémní oslabení ve vrcholu trubky, vždy v hodnotě násobku času a průměrného úbytku, od vrcholu postupně ubývajících. Při výpočtu prutovým modelem byl zaveden zjednodušený předpoklad konstantního úbytku po celém obvodu.

Rozhodující vlastností 2D prutového modelu (případ 3b) je rozložení kontaktních namáhání na povrchu trouby (obr. 6), které simulují její skutečné spolupůsobení s obklopující zeminou a případným zatížením na povrchu. Hodnoty a průběh kontaktních namáhání vychází z teorie zemních tlaků Ing. Kysely – např. v [20]. Podstatou řešení je stanovení statického zatížení trub v období konsolidace obsypu, tedy krátce po provedení zemních prací, kdy je zemina porušena soustavou kluzných ploch a dochází k přemísťování částic zeminy posunem i pootočením. Kontaktní napětí na bocích trub pak dosahuje hodnot mezi aktivním a klidovým tlakem. Výpočet zatěžovacích napětí přitom zohledňuje jak způsob provádění (např. velikostí úhlu uložení, změnou vlastností zemin v závislosti na stupni hutnění), tak v čase proměnné vlastnosti zemin (zejména rychlost konsolidace). Symetrická soustava kontaktních zatěžovacích napětí je pak aplikována na uzavřený kruhový rám dě-

lený na 24 prutových elementů. Rám je z formálních důvodů v místě lože doplněn o dvojici kloubových podpor, v důsledku rovnováhy složek kontaktních napětí jsou reakce v nich prakticky nulové. Výpočet průběhu vnitřních sil a deformací kruhového prstence je proveden metodou konečných prvků modulem FIN 2D. Výsledné průběhy jednoznačně určují extrémy jak ohybových momentů, tak normálových sil – s tahem na vnitřním líci v průřezech ve vrcholu a v patě (niveletě) potrubí, na vnějším líci pak na bocích. V dalším kroku výpočtu jsou pak tyto extrémy standardně posouzeny modulem Beton 2D, který vychází ze zásad a vztahů Eurokódu [25] – u trub z prostého betonu s vyloučením trhlin, u železobetonu kromě posouzení MSÚ i s posouzením šířky trhlin jako rozhodujícího kritéria MSP. Jedná se o postup spadající mezi zjednodušená řešení, ovšem pro praktické používání vhodný a frekventovaně využívaný.

Při tvorbě a řešení pravděpodobnostního modelu (případ 3a) byla využita metoda LHS (řízeno prostřednictvím prostředí SARA – viz výše) a zohledněna korelace mezi materiálovými parametry betonu (tj. mezi pevností v tlaku, tahu a modulem pružnosti). Podrobnosti o vstupních parametrech a jejich statistických veličinách zde pro stručnost neuvádíme.

Při porovnávání výpočtů 1a, b, c se v souladu s očekáváním potvrdilo, že výpočet pomocí materiálově nelineární MKP se nejvíce blíží hodnotám zjištěným výrobcí při zkouškách únosnosti trub; výpočtová únosnost přitom výrazně překračuje hodnoty požadované normativně. Výpočty pomocí prutového 2D modelu s posouzením s užitím postupů podle [25] rovněž překračují požadavky norem, i když ne tak výrazně; výsledná únosnost je logicky nižší vzhledem k předpokladu „pružného“ chování materiálu až do porušení, tedy překročení pevnosti betonu v tahu. O výsledku významně rozhoduje „volba“ mezní hodnoty pevnosti.

Výpočty 3a) a 3b) modelového příkladu shodně prokázaly dostatečnou statickou spolehlivost trouby z prostého betonu v daných podmínkách včetně životnosti potrubí uloženého v zemině.

Je ovšem nutno připomenout, že výsledky značně závisí jednak na podmínkách uložení (zde se uvažují podmínky běžné, s relativně nízkým zatížením), jednak na rychlosti degradace. Jak již bylo uvedeno, hodnotu 0,5 mm/rok

lze považovat za „optimisticky typickou“ hodnotu; přitom tato rychlost koroze betonu závisí na řadě parametrů (složení betonu, „kvalitě“ splaškových vod, spádu potrubí a dalších vlivech). Každé zvýšení této rychlosti má zásadní vliv na snížení životnosti, stejně jako i vyšší hladina primárního zatížení.

#### VYUŽITÍ V PRAXI, ZÁVĚRY

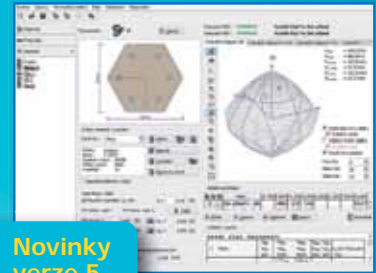
Jak bylo možné očekávat, průběžné výsledky provedených výpočtů prokázaly, že deterministický postup výpočtu s jednodušším 2D prutovým modelem dává výsledky více na straně spolehlivosti než přístup stochastický při užití nelineární MKP. Oba přístupy přitom zahrnují velkou řadu údajů, jejichž přesnost je přinejmenším diskutabilní. Jedním z nejzávažnějších je vyjádření interakce potrubí a okolní zeminy proměnná v čase. Je známou a nepopíranou skutečností, že rozhodující návrhová situace s extrémním průběhem zatížení potrubí nastává krátce po uložení v zemi, zemní tlaky působící na trubní prstenec se v čase v důsledku konsolidace zeminy mění a mají příznivější průběh. V průběhu mnoha desítek let trvajících životnosti potrubí ale dochází, především v intravilánech, k opakovaným zemním pracím v blízkosti trub v souvislosti s rekonstrukcí sousedních sítí nebo samotné vozovky – zemina se tak může v libovolné okamžiku v důsledku těchto vlivů dostat opět do obdobného stavu jako před konsolidací.

Řadu proměnných ve výpočtech pak mnohem více než u jiných typů konstrukcí ovlivňuje způsob a kvalita provedení; zahrnutí vlivu nejistot do výpočtů může být zásadní – požadavky [6], [8] a [9] – to ovšem umožňují jen stochastické přístupy.

I deterministické postupy posuzování spolehlivosti a životnosti vyžadují nejen příslušné SW vybavení, ale rovněž odborný vhled do problematiky. Náročnost stochastického přístupu je ve všech směrech ještě vyšší. Nelze tedy očekávat, že by se posuzování spolehlivosti a životnosti potrubí s užitím stochastických metod stalo běžnou disciplínou. Současná situace je ovšem vychýlená do opačného extrému – problémy statického působení, spolehlivosti a životnosti potrubí spolupůsobícího se zeminou jsou vesměs přehlíženy nebo se řeší jen hrubě přibližnými metodami či odhady. Pro běžné potřeby navrhování potrubí nebo pro plánování oprav by bylo třeba mít k dispozici výstižnou a přitom jednoduchou me-

# FINEC

Statika a dimenzace  
stavebních konstrukcí



Novinky  
verze 5

- Fin 2D a Fin 3D - vkládání obrázků do textových výstupů
- Ocelové spoje - detail uložení nosníku na nosník či sloup pomocí bříty
- Beton - 3D interakční diagram
- Protlak - posouzení protlačení sloupů s hlavicemi
- Betonový výsek - jednostránkový grafický výstup

Nové cenově výhodné balíčky

Parametrická teplotní křivka  
a Přestup tepla zdarma!

# GEO5

Geotechnické programy



Edice 2016  
od listopadu 2015

- Nový program Stabilizační pilota - návrh pilotových stěn zpevňujících svah a zabraňujících sesuvu
- Vylepšený vzhled a ovládání, možnost zobrazení konstrukce ve 2D nebo 3D
- Posouzení obecného ocelového průřezu
- Čtvercové piloty v programu Pažení posudek
- Automatický výpočet koeficientu redukce tlaků pro záporová pažení
- Podpora polních zkoušek (PMT, DMT, CPT)

... a mnoho dalších vylepšení

**fine**

tel.: +420 233 324 889  
fax: +420 233 321 754  
E-mail: hotline@fine.cz

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



## Literatura:

- [1] SCHEJBAL, R. Navrhování a spolehlivost potrubí s ohledem na požadavky norem. In: *Voda 2013*, s. 135–146.
- [2] CHROMÁ, M., VYŠVAŘIL, M., TEPLÝ, B. Degradace betonového kanalizačního potrubí biogenní síranovou korozi: modelování. *Vodohospodářství*. 2013, č. 6, s. 226–229.
- [3] *fib Draft Model Code 2010. fib Bulletins No. 65 and 66.* International Federation for Structural Concrete, Lausanne, Switzerland, 2012.
- [4] ISO 16204: 2012 Durability – Service life design of concrete structures.
- [5] ČSN EN 1990: 2003 Zásady navrhování. ČNI.
- [6] ČSN EN 1295-1: 1999 Statický návrh potrubí uloženého v zemi pro různé zatěžovací podmínky – Část 1: Všeobecné požadavky. ČNI.
- [7] TNV 750211:2002 Navrhování vodovodního a kanalizačního potrubí uloženého v zemi – Statický výpočet. ČNI.
- [8] Technical report CEN/TR 1295-2: 2005 Structural design of buried pipelines under various conditions of loading – Part 2: Summary of nationally established methods of design. CEN.
- [9] Technical report CEN/TR 1295-3: 2007 Structural design of buried pipelines under various conditions of loading – Part 3: Common method. CEN.
- [10] BELIE DE, N. ET AL. Experimental research and prediction of the effect of chemical and biogenic sulfuric acid on different types of commercially produced concrete sewer pipes. *Cement and Concrete Research*. 2004, vol. 34, p. 2223–2236.
- [11] NEVILLE, A. The confused world of sulfate attack on concrete. *Cement and Concrete Research*. 2004, vol. 24, p. 1275–1296.
- [12] SKALNY, J., MARCHAND, J., ODLER, I. *Sulfate attack on concrete*. 1<sup>st</sup> edition, London: Spon Press, 2002. ISBN 0-419-24550-2
- [13] POMEROY, R. D., BOON, A. G. *The problem of hydrogen sulphide in sewers*. Clay Pipe Development Association Ltd., 1976.
- [14] ASCE Manuals and Reports of Engineering Practice, *Gravity Sewers*, American Society of Civil Engineers. 2007, No. 60, New York, USA.
- [15] TEE, K. F., LI, CH. Q., MAHMOODIAN, M. Prediction of time-variant probability of failure for concrete sewer pipes. In: *Proc. of XII DBMC*, Porto, Portugal: 2011, vol. I, p. 447–454.
- [16] TEPLÝ, B., NOVÁK, D. Predikce degradace betonových konstrukcí výpočetním modelováním. *Beton TKŠ*. 2014, č. 2, s. 56–57.
- [17] NOVÁK D., VOŘECHOVSKÝ M., RUSINA M. (2013) FREET version 1.6 – program documentation, User's and Theory Guides, Brno/Červenka Consulting, Prague. Dostupné z: <http://www.freet.cz>
- [18] ČERVENKA ET AL. ATENA Program Documentation, Part 1 – Theory, Červenka Consulting, s. r. o., Praha, 2014.
- [19] ŘOUTIL, L., ROVNANÍKOVÁ, M., TEPLÝ, B. Modelling time dependent synergy effects of mechanical load, biogenic sulphuric acid corrosion and rheological effects on concrete sewage pipes. In: *CONCREEP-10 Mechanics and Physics of Creep, Shrinkage, and Durability of Concrete and Concrete Structures*, (sborník v tisku). Vídeň, Rakousko: září 2015.
- [20] KYSELA, Z. *Statika tuhých a částečně poddajných potrubí zasypaných v zemi*. Zpráva ÚTAM. Praha: ČSAV, 1986.
- [21] BEDDOE, R. E., SCHMIDT, K. Acid attack on concrete – effect of concrete composition. Part 1. *Cement International*. 2009, 7(3), s. 88–94.
- [22] BEDDOE, R. E., SCHMIDT, K. Acid attack on concrete – effect of concrete composition. Part 2. *Cement International*. 2009, 7(4), s. 86–93.
- [23] MALANÍK, S. Stoková síť poškozená síranovou korozi betonu. *NO DIG*. 2005, roč. 11, č. 2, s. 14–25.
- [24] PUKL, R., NOVÁK, D. Kompletní modelování betonových konstrukcí. In: *18. konference Betonářské dny*. 2011.
- [25] ČSN EN 1992-1-1: 2006 Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby.

tohu zahrnující i v tomto textu popisované jevy a zákonitosti; alespoň pro nejběžnější, typické situace by ale měla být kalibrována plně pravděpodobnostními (stochastickými) postupy spolu s modelováním degradace betonu (resp. výztuže). Pravděpodobnostní modely poškození materiálů působením vlivů prostředí [12] lze využívat pro posuzování průběhu degradace a pro hodnocení spolehlivosti dle mezních stavů, tj. také pro posouzení životnosti navrhované konstrukce, resp. prognózy zbytkové životnosti stávající konstrukce. V případě projednávání v tomto příspěvku, tj. betonového kanalizačního potrubí ovlivněného degradací v důsledku biogenní síranové koroze, lze v tomto smyslu výše popsání nástroje využít např. takto:

- při ověřování či kalibraci zjednodušených postupů či při řešení komplikovaných, atypických zadání;
- pomocí modelu degradace vypracovat studie (příklad ve třetí kapitole) závislosti postupu degradace na různých parametrech (materiál, způsob provozování ad.) jako podpůrné nebo orientační informace pro rozhodování o návrhu potrubí či o způsobu a době rekonstrukce;
- pomocí modelu degradace pro daný čas, materiál a způsob provozování potrubí stanovit míru degradace (oslabení průřezu) a statickým řešením potrubí s takto oslabeným průřezem v daných podmínkách posoudit spolehlivost (mezní šířka trhlinek nebo únosnost);
- recipročně k předcházející variantě nejprve statickým řešením potrubí v zemině určit potřebné minimální materiálové a průřezové charakteristiky (s ohledem na mezní šířku trhlinek nebo na únosnost); pak následně pomocí modelu degradace prognózovat životnost.

Autoři doufají, že tímto příspěvkem alespoň částečně přispívají k diskusi o tvorbě jednotné koncepce výpočtů při navrhování betonových kanalizačních potrubí [9].

Autoři z VUT Brno byli podporováni částečně z projektů č. GA ČR 14-10930S a GA ČR 13-22899P, současně děkují též Bc. M. Bejčkovi za pomoc při vyhotovování některých výpočtů a zástupcům společnosti PREFA Brno za poskytnutí experimentálních dat.

prof. Ing. Břetislav Teplý, CSc, FEng  
Fakulta stavební VUT v Brně  
e-mail: [teply.b@fce.vutbr.cz](mailto:teply.b@fce.vutbr.cz)



Ing. Richard Schejbal  
Sweco Hydroprojekt, a. s.  
e-mail: [richard.schejbal@sweco.cz](mailto:richard.schejbal@sweco.cz)



Ing. Ladislav Řoutil, Ph.D.  
Fakulta stavební VUT v Brně  
e-mail: [routil.l@fce.vutbr.cz](mailto:routil.l@fce.vutbr.cz)



Ing. Tomáš Parkan  
Sweco Hydroprojekt, a. s.  
e-mail: [tomas.parkan@sweco.cz](mailto:tomas.parkan@sweco.cz)



RNDr. Markéta Rovnaníková, Ph.D.  
Stavební fakulta VUT v Brně  
e-mail: [chroma.m@fce.vutbr.cz](mailto:chroma.m@fce.vutbr.cz)

