

# OTÁZKY MODELOVÁNÍ PRŮNIKU CHLORIDŮ BETONEM ■

## ISSUES OF CHLORIDE INGRESS IN CONCRETE MODELLING

Břetislav Teplý, Dita Vořechovská,  
Petr Konečný, Martina Šomodíková

Jako nejčastější příčina degradace železobetonových konstrukcí je obvykle uváděna koroze ocelové výztuže. Tato problematika velmi úzce souvisí s posuzováním nebo plánováním životnosti konstrukcí, což nabývá na významu také v souvislosti s hodnocením nákladů životního cyklu staveb [1] i s problematikou kvality v stavebnictví [2]. Je to reflektováno také v nových mezinárodních předpisech – [ISO 16204:2012] a [3], kde je mj. zdůrazněn pravděpodobnostní přístup, tj. zohlednění přirozeného rozptýlení hodnot většiny souvisejících veličin a jeví při posuzování únosnosti, životnosti a spolehlivosti nosných konstrukcí. Příspěvek je zaměřen na některé dílčí problémy související s průnikem chloridů. Je provedeno hodnocení a srovnání difuzních modelů průniku chloridů, krátce jsou popsány vybrané metody pro laboratorní ověření odolnosti betonu vůči pronikání chloridů a je pojednáno také o modelování synergie degračních procesů i o vlivu vzájemné statistické korelace vstupních veličin.

■ The chloride-induced corrosion of steel in reinforced concrete structures is one of the major causes of their deterioration over time. The durability issues affecting concrete structures are significant when designing or assessing concrete structures, their life-cycle costs [1] and quality issues [2]. This is also reflected in the new international standards – [ISO 16204:2012] and [3], which deal with the probabilistic approaches and involvement of uncertainties related to assessment of load bearing ability, durability and reliability of reinforced concrete structures. The paper deals with some of the issues associated with chloride ingress. Evaluation and comparison of diffusion models of chloride ingress is carried out, selected methods for laboratory verification of resistance of concrete against the penetration of chlorides is briefly described and modeling of synergy of degradation processes and the impact of statistical correlations among input parameters are introduced.

Za běžných podmínek se v pórovém roztoku v betonu vytváří zásadité prostředí, v němž vzniká na povrchu výztuže tenká, dobře přilnavá vrstvička oxidů železa, která působí jako ochranná (pasivační) vrstva zabraňující přímému kontaktu kyslíku, vody i jiných agresivních látek s povrchem výztuže, a tím brání vzniku koroze. K

narušení této pasivační vrstvy, k tzv. depasivaci výztuže, dochází vlivem snížení hodnoty pH zejména vlivem karbonatice betonu nebo vlivem prostupu chloridových iontů; vznik a rychlost koroze výztuže jsou pak řízeny difuzí vody a kyslíku krycí vrstvou betonu.

### MODELOVÁNÍ PROSTUPU CHLORIDŮ BETONEM A PROGNÓZA ŽIVOTNOSTI

Přítomnost chloridů v betonové konstrukci je způsobena:

- chemickými rozmrazovacími látkami – údržba silnic, dálnic, parkovišť,
- mořskou vodou – přímé působení či aerosolové působení v pobřežních či přímořských lokalitách,
- přítomností chloridů v záměsové vodě při výrobě betonu (koncentrace je limitována ČSN EN 1008 Záměsová voda do betonu).

V našich podmínkách je běžný první případ, vyskytující se u mostů či jiných dopravních staveb, resp. u garáží a podobných objektů, kam se sůl může dostat na pneumatikách vozidel.

Dosáhne-li koncentrace chloridů v okolí výztuže kritické hodnoty  $C_{cr}$ , dochází k depasivaci ocelové výztuže. To je tzv. iniciační perioda, jejíž pravděpodobnostní hodnocení je popsáno podmínkou ve tvaru:

$$P_f(t) \equiv P\{C_{cr} - C(x,t) \leq 0\} \leq P_d, \quad (1)$$

kde  $P_f$  je pravděpodobnost poruchy ve smyslu dosažení kritické koncentrace chloridů  $C_{cr}$  v místě výztuže,  $C(x,t)$  koncentrace chloridů v hloubce  $x$ , která je nejčastěji reprezentována tloušťkou krycí vrstvy výztuže a dosaženou v čase  $t$ , v kterém je konstrukce vyšetřována (obvykle je to očekávaná nebo limitní životnost vzhledem k depasivaci výztuže). Hodnota  $C(a,t)$  může být stanovena laboratorně na odebraných vzorcích; jinou možností je využití vhodného výpočetního modelu pro prognózu průniku chloridů betonem.

Je nutné si uvědomit, že koroze výztuže je spojena s procesy transportu vody, chloridových i dalších iontů, kyslíku a oxidu uhličitého betonem [4]. Přitom se uplatňuje několik procesů: difuze, kapilární sání, infiltrace (permeation); značný vliv mohou mít navíc cyklické změny externí vlhkosti, teplo-

ty a koncentrace chloridů a rovněž složení betonu (cement, vodní součinitele a příměsi). K zvýšení koncentrace chloridových iontů v pórovém roztoku může vést i odpařování vody z vnějších vrstev (cykly vysušování a zvlhčování). Celkové množství chloridových iontů  $C_t$  je složeno z iontů vázaných  $C_b$  a iontů volných  $C_f$  (rozpuštěných v pórovém roztoku). Pouze volné chloridy  $C_f$  se mohou pohybovat v pórovém systému betonu. Kritická koncentrace chloridů  $C_{cr}$  použitá v podmínce (1) by tedy měla být správně definována pro chloridy volné.

Průnik chloridů betonem je komplexní jev [4] a jeho přesný a výstižný popis je mnohdy založen na složitých matematických modelech, které vedou k řešení soustav parciálních diferenciálních rovnic; takové modely nejsou vhodné pro běžné použití v inženýrské praxi. Proto se v tomto příspěvku zaměříme na aplikaci vybraných analytických modelů vhodných i pro používání v praxi, a to i v pravděpodobnostním pojetí. Tyto modely vycházejí z nejfrekventovaněji používaného řešení Fickova difuzního zákona využívajícího chybovou funkci *erf* (dále stručně označováno jako ERF řešení), kde koncentrace chloridů  $C(x,t)$  [hm.-%/cement] (zkratka hm. znamená hmotnostní) v hloubce  $x$  [mm] a čase  $t$  [roky] je vyjádřena pro 1D případy vztahem:

$$C(x,t) = C_s \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{D_c t}} \right) \right], \quad (2)$$

kde  $C_s$  je koncentrace chloridů působící na povrchu betonu [hm.-%/cement] a  $D_c$  je difuzní součinitel průniku chloridů betonem [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]. Vztah (2) platí za předpokladu homogenního materiálu plně nasyceného vodou a pro  $C_s$  a  $D_c$  konstantní v čase. Přesto je toto řešení velmi frekventovaně používáno již po několik dekád díky své jednoduchosti a též díky tomu, že difuze je mnohdy dominantním jevem.

Připomeňme ještě, že při povrchu betonu vystavenému externímu působení chloridů obvykle vzniká vrstvička (tzv. konvekční zóna, [3]) o tloušťce  $\Delta x$ , kde difuze není hlavním procesem. Maximální koncentrace  $\text{Cl}^-$  není na vnějším povrchu, ale vzniká postupně v poloze  $x = \Delta x$ , přičemž tato tloušťka je udávána v rozmezí 6 až 11 mm.

O difuzním procesu se pak předpokládá, že jej lze aplikovat až od hloubky  $\Delta x$  a  $C_S$  se nahradí hodnotou  $C_{S,\Delta x}$ . Toto však není zahrnuto v srovnávací studii dále v textu.

Přes svou jednoduchost a snadnou praktickou využitelnost bylo řešení dle vztahu (2) postupně kritizováno. Důvodem je fakt, že nemůže poskytnout dostatečně věrné prognózy průniku chloridů v řadě reálných případů, kde výše uvedené předpoklady řešení (2) nejsou splněny. Hodnocení tohoto problému a matematicky korektnější řešení podávají práce [5] a [6], dalším vývojem se zabývají např. [7] a [8]. Hlavní důraz je přitom kladen na časovou závislost difuzního součinitele  $D_c$  a povrchové koncentrace chloridů  $C_S$  (resp.  $C_{S,\Delta x}$ ).

Díky hydrataci cementových složek hodnota  $D_c$  s časem klesá (dochází k změnám v pórové struktuře), což se modeluje např. dle [3] funkcí:

$$D_c(t) = D_{ref} \left( \frac{t_{ref}}{t} \right)^m, \quad (3)$$

kde  $D_{ref}$  [ $m^2/s$ ] je difuzní koeficient v referenčním čase  $t_{ref}$  [roky] a  $m$  [-] je faktor stárnutí betonu. Nutno podotknout, že stárnutím (zráním) betonu může docházet k nárůstu odolnosti vůči pronikání agresivních látek betonem.

Byla navržena též jiná funkce – [5] a [6] –, kde místo  $D_c$  je použito  $D_a(t)$  ve tvaru:

$$D_a(t) = \frac{D_{ref}}{1-m} \left[ \left( 1 + \frac{t_{ex}}{t} \right)^{1-m} - \left( \frac{t_{ex}}{t} \right)^{1-m} \right] \left( \frac{t_{ref}}{t} \right)^m, \quad (4)$$

kde  $t_{ex}$  je stáří betonu v počátku expozice působení chloridových iontů [roky].

Jak již bylo zmíněno dříve, koncentrace chloridů na povrchu betonu  $C_S$  (resp.  $C_{S,\Delta x}$ ) je ovlivněna:

- charakterem externího zdroje (chemické rozmrazovací látky aplikované při údržbě vozovek, nebo mořská voda v jejím přímém či aerosolovém působení, přičemž obojí může být proměnné v čase),
- složením betonu, množstvím a druhem cementu a dalšími faktory, jejichž vzájemná působení jsou obvykle též časově závislé procesy [3].

To je zohledněno ve variantě ERF řešení dle [9], kde se bere v úvahu i časová závislost koncentrace chloridů na povrchu betonu:

$$C_S(t) = C_0 + k\sqrt{t}. \quad (5)$$

kde  $C_0$  je počáteční hodnota koncentrace chloridů a  $k$  [-] je konstanta udávající rychlost změny povrchové koncentrace v čase. Vlastní řešení je pak ve tvaru:

$$C(x,t) = C_0 \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{D_a t}} \right) \right] + k\sqrt{t} \left[ e^{-\frac{x^2}{4D_a t}} - \left( \frac{x\sqrt{\pi}}{2\sqrt{D_a t}} \right) \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{D_a t}} \right) \right]. \quad (6)$$

Funkce (5) není vhodná pro popis působení posypových solí, které je vázáno na střídání ročních období, působení deště (vyplachování solí z povrchu betonu) a příp. dalších klimatických či jiných vlivů. Vliv sezónní aplikace rozmrazovacích solí byl pro 2D případy řešen technikou celulárních automat v [10]; zmíněné okolnosti budou předmětem dalšího zkoumání.

### METODY PRO STANOVENÍ DIFUZNÍHO SOUČINITELE

Tradiční možností stanovení difuzního součinitele je analýza chloridového profilu při dlouhodobém působení vodného roztoku NaCl na povrch vzorku ([AASHTO T259-02] či modifikace [NT BUILD 443]). Tyto penetrační testy vyžadují vystavení vzorků roztoku chloridu sodného a následnou expozici v řádu týdnů až měsíců závislé na kvalitě betonu a způsobu měření chloridového profilu. Koncentraci chloridů závislou na hloubce a času expozice získáme chemickou analýzou betonového prášku odebraného během postupného odvrtávání nebo broušení z jednotlivých vrstviček betonového vzorku. Množství chloridů v betonovém prášku, které slouží jako vstup pro výpočet difuzního součinitele pomocí aproximace vztahu (2) metodou nejmenších čtverců, je možné určit po-

tenciometrickou titrací (viz např. ČSN EN 14629). Ve vztahu (2) je kromě difuzního součinitele  $D_c$  hledaným parametrem i koncentrace chloridů na povrchu  $C_S$ . Ta může být zjištěna proložení hodnot naměřených z chloridového profilu vhodnou křivkou. Obdobně se tento postup používá pro chloridový profil získaný z odebraných vzorků u stávající konstrukce.

Inovované možnosti výpočtu difuzního součinitele spočívají ve využití efektivnějších testů zrychlené penetrace chloridů [AASHTO T277] a elektrické resistivity betonu [AASHTO TP-95] a [11]. Elektrochemické metody jsou výrazně rychlejší, i když takto získaný difuzní součinitel není plně zaměnitelný s veličinou odvozenou na základě chloridového profilu. Volba metody závisí na zohlednění stáří betonu, požadavku na přesnost, dostupném laboratorním vybavení a času, který může být této operaci věnován. Roli hraje také to, zda se jedná o úlohu prognózy chování stávající konstrukce, nebo zda jde o projektování konstrukce nové, a tedy volbu složení směsi pro výrobu betonu. Metody založené na průchodu elektrického proudu umožňují navíc získat okamžitou hodnotu difuzního součinitele. Je tak možné podchytit parametr stárnutí betonu  $m$ , popisující změnu difuzního součinitele v čase – [3] a vztahy (3), (4).

Podrobnější informace a příklad výpočtu difuzního součinitele pro analýzu chloridového profilu a elektrické resistivity lze nalézt v publikaci [12].

### DŮSLEDKY PRO ÚROVEŇ SPOLEHLIVOSTI – NUMERICKÁ STUDIE

Modely průniku chloridových iontů popsané vztahy (2) až (6) se liší tím, zda a jak uvažují časovou závislost difuzního koeficientu  $a$ /nebo koncentrace chloridů na povrchu betonu. Pokud je autorům známo, vliv jednotlivých modelů na úroveň spolehlivosti při prognóze životnosti betonové konstrukce (tj.

Tab. 1 Definice vstupních parametrů ■ Tab. 1 Definition of input parameters

Vstupní parametr		Průměr	COV [-]	PDF
hloubka/krycí vrstva $x$	[mm]	30, 60, 80	0,25	LN (2par.)
koncentrace chloridů na povrchu betonu $C_0$ nebo $C_S$	[hm.-%/c]	0,4	0,3	N
difuzní koeficient $D_c$ nebo $D_{ref}$	[ $m^2/s$ ]	$7,7 \times 10^{-12}$	0,15	N
faktor stárnutí betonu $m$	[-]	0,19	0,16	N
stáří betonu v počátku expozice $t_{ex}$	[roky]	0	-	Det.
stáří betonu $t_{ref}$ odpovídající $D_{ref}$	[roky]	0,07671	-	Det.
konstanta $k$	[-]	0,074	-	Det.
kritická koncentrace chloridů $C_{cr}$	[hm.-%/c]	0,5	0,2	N

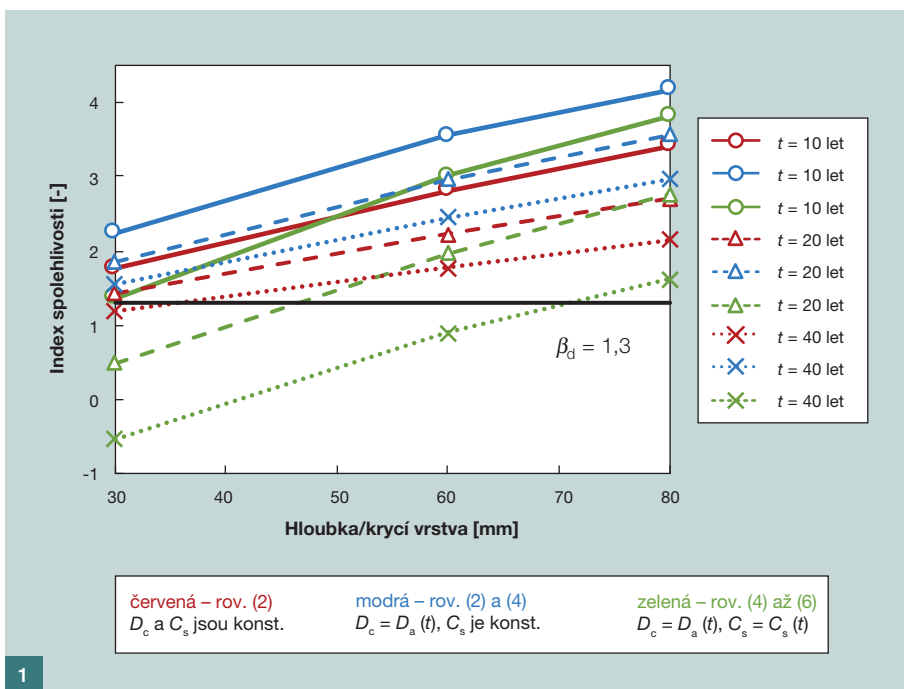
Pozn.: Det. = deterministická hodnota; LN = lognormální; N = normální rozdělení pravděpodobnosti

iniciačního a propagačního času) nebyl doposud zpracován. V prezentovaném příspěvku je předložen dílčí pohled na tuto problematiku – studie indexu spolehlivosti vztáženému k pravděpodobnostní podmínce (1) při postupném využití jednotlivých ERF řešení.

Pravděpodobnostní studie byla provedena pomocí softwarového nástroje FReET-D [13], který obsahuje mimo jiné všechny výše uvedené modely. Srovnávací studie byla zpracována pro různé hloubky/krycí vrstvy betonu (30, 60 a 80 mm) a expoziční časy (10, 20 a 40 let). Vstupní parametry byly převzaty z dlouhodobých experimentálních měření na betonových konstrukcích vystavených působení mořského klimatu [14] a jsou shrnuty v tab. 1, kde COV značí variační koeficient a PDF je funkce pravděpodobnostního rozdělení.

Výsledné hodnoty indexu spolehlivosti  $\beta$  na obr. 1 lze porovnat s návrhovou hodnotou pro mezní stav použitelnosti, tj.  $\beta_d = 1,3$  [3]. Z grafu lze vyčíst, při jaké hloubce krycí vrstvy dojde k překročení limitní hodnoty indexu spolehlivosti, tj. k dosažení iniciačního času předpokládaného vzniku koroze pro sledovaná stáří konstrukce. Z výsledků je patrné, že jak proměnlivost difuzního koeficientu v čase, tak i časová závislost koncentrace chloridů významně ovlivňují výsledné odchady indexu spolehlivosti, který je přímým ukazatelem predikované životnosti konstrukce. V této studii není sledován vliv složení betonu (tj. v poslední době velmi časté použití příměsí); důležitost vlivu příměsí je proto dokumentována alespoň pomocí výsledků jedné studie v USA provedené pomocí softwaru Life-365 [15]: pro příklad betonu vytvořeného pouze portlandským cementem byla při působení chloridů predikována životnost 17 let; za stejných podmínek, ale pro beton s vhodně navrženou příměsí (mikrosilikka) byla teoretická predikce již 70 let!

Uvedené výsledky nelze zobecnit; nicméně, na základě podobných numerických studií a pomocí vhodného SW nástroje lze ověřovat, kdy je vhodné uvažovat vliv časové závislosti difuzního koeficientu a/nebo povrchové koncentrace chloridů a kdy je naopak možné počítat zjednodušeně, tedy s konstantními hodnotami bez časové závislosti. To bude zřejmě účelné zejména při používání/navrhování betonů s různými druhy a množstvím či kombinacemi příměsí.



### DALŠÍ SOUVISLOSTI MEZI PŮSOBENÍM CHLORIDŮ A MODELOVÁNÍM DEGRADACE BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ

V následujícím textu jsou alespoň stručně zmíněny některé aspekty spojené s nedávnými výzkumy v zahraničí i u nás, týkající se modelování degradace betonových konstrukcí, a to zejména při působení chloridů.

#### Statistická závislost vstupních veličin

Mezi důležité aspekty stochastického modelování degradačních jevů může patřit např. statistická závislost (korelace) vstupních veličin, kdy jsou mezi sebou korelovány některé z parametrů vystupujících při výpočtech koncentrace chloridů v dané hloubce a čase. Důvodem je jejich závislost na složení betonu, na umístění konstrukce a na podmínkách prostředí. Vzájemná korelace jednotlivých veličin se liší zejména v závislosti na pórové struktuře a dalších vlastnostech betonu; bohužel tento jev nebyl dosud řádně vyšetřován. Přitom oba vstupní parametry ERF řešení,  $D_c$  i  $C_s$ , vykazují vysokou citlivost při stanovení koncentrace  $C(x, t)$ , a je tedy vhodné, aby vliv jejich závislosti byl začleněn i do stochastické analýzy. Např. při aplikaci techniky LHS (Latin Hypercube Sampling), kdy se generuje množství numerických realizací vstupních veličin, je jejich vzájemná korelace zavedena metodou simulovaného žihání. Tímto postupem jsou v softwarovém nástroji FReET-D brány v úvahu vzájemné vztahy mezi jednotlivými ve-

Obr. 1 Vliv časové proměnlivosti difuzního koeficientu a koncentrace chloridů na index spolehlivosti pro různé krycí vrstvy a stáří konstrukce | Fig. 1 Effect of time-dependency of diffusion coefficient and surface chloride concentration on the reliability index for different covers and exposure times

ličinami i přidružené nejistoty, a lze tak přispět k racionálnímu ohodnocení životnosti konstrukce.

Kromě vlivu korelace proměnných  $D_c$  a  $C_s$ , které mohou ovlivnit hodnoty modelované koncentrace chloridů na úrovni výztuže, hraje rozhodující roli při posuzování mezní podmínky (1) také kritická koncentrace chloridů  $C_{cr}$  a její provázanost s ostatními proměnnými může značně ovlivnit výsledky modelování, např. [16]. Podrobnější informace o vlivu korelace náhodných veličin při modelování průniku chloridů betonem lze nalézt v [17]. Důležitým krokem při použití matematického modelu a stochastického přístupu je také výběr vhodných funkcí rozdělení pravděpodobnosti (PDF) [16].

#### Současné působení více degradačních procesů

Betonové konstrukce jsou v realitě běžně vystaveny současnému působení více druhů degradačních procesů, např. karbonataci, průniku chloridů, následné korozi výztuže, mrazovým cyklům, teplotě, a u nosných konstrukcí nepochybně též mechanického zatížení



(tj. stálých i nahodilých složek zatížení). V současné praxi je působení mechanického zatížení vyšetřováno odděleně. V nedávné době bylo v některých zahraničních pracích konstatováno, že by příslušné betonářské normy měly být v tomto smyslu pozměněny; uvažování synergie mechanického a environmentálního zatížení při modelování životnosti a spolehlivosti betonových konstrukcí by bylo potřebné v zájmu dosažení výsledků více odpovídajících realitě.

Bez podrobností a bez přímých odkazů na zahraniční prameny zde stručně uvádíme jen některé poznatky, např.:

- Karbonatace betonu znamená postupné snižování hodnoty pH, jež ale také ovlivňuje hodnotu kritické koncentrace chloridů  $C_{cr}$ , která klesá s klesající hodnotou pH. Je nutné si také uvědomit, že rychlost postupu karbonatační fronty je nižší než rychlost difuze chloridových iontů; kromě toho u obou těchto jevů má vliv stupně nasycení betonu vodou opačný charakter.
- Hodnota pH má též vliv na rychlost koroze výztuže; ta se zvyšuje při poklesu pH a při zvýšené koncentraci chloridů.
- Je-li beton poškozen mrazovými cykly (vnější i vnitřní trhlinky), pak se rychlost karbonatace i průnik chloridů zvyšuje.
- Při současném působení více degračních procesů je nutno také zohlednit náhodný charakter zúčastněných veličin. Pravděpodobnostní přístup a simulační techniky jsou nepochybně užitečné.

Řada prací upozorňuje na skutečnost, že působením mechanického zatížení dochází k změnám pórové struktury betonu a k vzniku či změnám systému trhlinek, což následně ovlivňuje v čase probíhající průnik škodlivých látek (např.  $\text{CO}_2$  nebo chloridových iontů), tj. dochází k synergii degračních procesů, a postup a míra degradace betonu tak může být výrazně ovlivněna. Případy současného působení mechanického zatížení a karbonatace betonu či průniku chloridových iontů se zabýval příspěvek [18], kde jsou ukázány možnosti pravděpodobnostní analýzy i reálné příklady řešení. V příspěvku [19] je to uvedeno s dalšími podrobnostmi, vč. 2D řešení s využitím techniky celulárních automat. Studium a popisem prostupu agresivních látek k výztuži trhlinou v betonu se s využitím 2D modelu zabývá

## Literatura:

- [1] JEŘÁBEK, Z., TEPLÝ, B. Veřejné zakázky – nové směrnice EU – úloha inženýra. *Beton TKS*. 2015, roč. 15, č. 1, s. 3–6.
- [2] TEPLÝ, B., JEŘÁBEK, Z., DROCHYTKA, R. Kvalita ve stavebnictví v souvislosti s novým zákonem o zadávání veřejných zakázek. *Stavebnictví*. 2017, roč. 2017, č. 1–2.
- [3] *fib* bulletin No. 65 and 66, *fib* Draft Model Code 2010. International Federation for Structural Concrete (*fib*), Lausanne, Switzerland, 2012.
- [4] ČERNÝ, R., ROVNANÍKOVÁ, P. *Transport Processes in Concrete*, London: Spon Press, 2002, 547 s.
- [5] LUPING, T., GULLIKERS, J. On the mathematics of time-dependent apparent chloride diffusion coefficient in concrete. *Cement and Concrete Research*. 2007, Vol. 37, s. 589–595.
- [6] NILSSON, L.-O., CARCASSES, M. *Models for chloride ingress into concrete – A critical analysis*. Report of Task 4.1 in EU-Project G6RD-CT-2002-00855, ChlorTest, 2004.
- [7] HOSSEINI, S. A., SABAKHTY, N., MAHINI, S. S. Correlation between chloride-induced corrosion initiation and time to cover cracking in RC structures. *Structural Engineering and Mechanics*. 2015, Vol. 56, No. 2, s. 257–273.
- [8] WANG, H., DAI, J., SUN, X., ZHANG, X. Time-Dependent and Stress-Dependent Chloride Diffusivity of Concrete Subjected to Sustained Compressive Loading. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2016, Vol. 28, No. 2, s. 04016059.
- [9] PETCHERDCHOO, A. Time dependent models of apparent diffusion coefficient and surface chloride for chloride transport in fly ash concrete. *Construction and Building Materials*. 2013, Vol. 38, s. 497–507.
- [10] VOŘECHOVSKÁ, D., CHROMÁ, M., PODROUŽEK, J., ROVNANÍKOVÁ, P., TEPLÝ, B. Modelling of Chloride Concentration Effect on Reinforcement Corrosion. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2009, Vol. 24, s. 446–458.
- [11] HOOTON, R. D., THOMAS, M. D. A., STANDISH, K. *Testing the Chloride Penetration Resistance of Concrete: A Literature Review: FHWA Contract DTFH61-97-R-00022 Prediction of Chloride Penetration in Concrete*. Washington, D.C. (USA): Federal Highway Administration, 2001, 405 s.
- [12] KONEČNÝ, P., LEHNER, P., TURICOVÁ, M. Difuzní součinitel pro pronikání chloridů v betonu – vyhodnocení a využití. In: *Sborník příspěvků z konference Modelování v mechanice 2015*. Ostrava, 2015.
- [13] TEPLÝ, B., NOVÁK, D. Predikce degradace betonových konstrukcí výpočetním modelováním. *Beton TKS*. 2014, Roč. 14, č. 2, s. 56–57.
- [14] MARKESET, G., SKJØLSVOLD, O. Time dependent chloride diffusion coefficient – field studies of concrete exposed to marine environment in Norway. In: *2<sup>nd</sup> International Symposium on Service Life Design for Infrastructures*. RILEM Publications SARL, 2010, s. 83–90. ISBN: 978-2-35158-096-7.
- [15] BENTZ, D. P., GUTHRIE, W. S., JONES, S. Z., MARTYS, N. S. Predicting service life of steel-reinforced concrete exposed to Chlorides. *Concrete International*. September 2014. s. 55–64.
- [16] LOLLINI, F., CARSANA, M., GASTALDI, M., REDAELLI, E., BERTOLINI, L. The challenge of the performance-based approach for the design of reinforced concrete structures in chloride bearing environment. *Construction and Building Materials*. 2015, Vol. 79, s. 245–254.
- [17] ŠOMODÍKOVÁ, M., VOŘECHOVSKÁ, D., TEPLÝ, B. Input value correlation in chloride ion ingress modelling and concrete structure reliability. In: *6<sup>th</sup> International Symposium Non-Traditional Cement and Concrete, Brno, Czech Republic*. 2017 (submitted).
- [18] TEPLÝ, B., VOŘECHOVSKÁ, D., ŠOMODÍKOVÁ, M., LEHKÝ, D. Modelování životnosti a spolehlivosti betonových konstrukcí při synergii mechanického a environmentálního zatížení. *Beton TKS*. 2016, roč. 16, č. 2, s. 26–28.
- [19] VOŘECHOVSKÁ, D., ŠOMODÍKOVÁ, M., PODROUŽEK, J., LEHKÝ, B., TEPLÝ, B. Concrete structures under combined mechanical and environmental actions: Modelling of durability and reliability. *Computers and Structures*. 2017 (under review).
- [20] KONEČNÝ, P., LEHNER, P. Effect of Cracking and Randomness of Inputs on Corrosion Initiation of Reinforced Concrete Bridge Decks Exposed to Chlorides. *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2017, Vol. 39, s. 29–37.

Další zdroje, které byly částečně využity při tvorbě tohoto příspěvku, jsou uvedeny v publikacích [12, 17–20].

práce [20], kde je také ukázána pravděpodobnostní analýza trvanlivosti ŽB mostovky.

### SOFTWAREVÉ NÁSTROJE

Existuje řada softwarových nástrojů pro řešení výše uvedené tematiky, např.:

- Life-365: volně přístupný produkt pro predikci životnosti konstrukcí vystavených působení chloridů (USA); <http://www.life-365.org>.
- EUCON: komerční produkt pro deterministické řešení karbonatce či působení chloridů, v souladu s EN 197 a EN 206; <http://www.eucon.gr>.
- FReET-D: komplexní komerční pravděpodobnostní nástroj pro statistickou, citlivostní a pravděpodobnostní analýzu, obsahující celkem 35 modelů či jejich kombinací pro modelování degradace betonových konstrukcí (např. karbonatce, působení chloridů, koroze výztuže, biogenní koroze kanalizačního potrubí aj.); [http://www.freet.cz/freet\\_d.html](http://www.freet.cz/freet_d.html), resp. [13].

### ZÁVĚR

Cílem tohoto příspěvku bylo seznámit čtenáře s difuzními modely průniku chloridů betonem, s jejich hodnocením a s důsledky při posuzování životnosti i spolehlivosti železobetonových konstrukcí, a to s využitím pravděpodobnostního softwarového nástroje. Pozornost byla věnována také metodám pro laboratorní ověření odolnosti betonu a synergii degradačních procesů, včetně působení mechanického zatížení u nosných konstrukcí.

Pravděpodobnostní modelování degradačních procesů se uplatní zejména při tzv. Performance-Based navrhování konstrukcí (PBD) na specifickou životnost a požadovanou úroveň spolehlivosti, což současné normy neumožňují, opírajíce se jen o předepsané hodnoty některých veličin (např. krytí výztuže a poměr  $w/c$ ). PBD je současný trend zpracováváný mezinárodními odbornými komisemi, které připravují mj. aktualizaci EN 206 a EN 1992.

Příspěvek byl realizován v rámci řešení projektu č. LO1408 „AdMaS UP – Pokročilé stavební materiály, konstrukce a technologie“ podporovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy ČR a také za podpory koncepčního rozvoje vědy, výzkumu a inovací pro rok 2017 přidělených VŠB-TU Ostrava stejným ministerstvem.

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



Ing. Dita Vořechovská, Ph.D.  
Fakulta stavební VUT v Brně  
e-mail: [vorechovska.d@fce.vutbr.cz](mailto:vorechovska.d@fce.vutbr.cz)



doc. Ing. Petr Konečný, Ph.D.  
Fakulta stavební VŠB-TU Ostrava  
e-mail: [petr.konecny@vsb.cz](mailto:petr.konecny@vsb.cz)



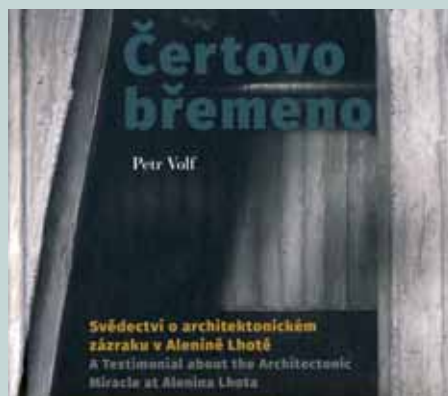
Ing. Martina Šomodíková, Ph.D.  
Fakulta stavební VUT v Brně  
e-mail: [somodikova.m@fce.vutbr.cz](mailto:somodikova.m@fce.vutbr.cz)



Text byl posouzen odborným lektorem.  
The text was reviewed.

## ČERTOVO BŘEMENO: SVĚDECTVÍ O ARCHITEKTONICKÉM ZÁZRÁKU V ALENINĚ LHOTĚ

Petr Volf



Vydavatel: KANT  
Rok vydání/počet stran: 2016/132  
Jazyk: čeština/angličtina  
ISBN: 9788074372063

Budeme-li v Česku hledat místo s nejvyšší koncentrací kvalitní současné architektury na jednoho obyvatele, prvenství si překvapivě odnese Alenina Lhota na Táborsku. V této jihočeské osadě je vedeno osm adres a trvale na nich pobývá pouhých deset obyvatel. V závěru 20. a v průběhu 21. století však v Alenině Lhotě vzniklo několik progresivních staveb, které dokonale přispěly k proměně její identity. Došlo k tomu nikoliv náhodou. Všechny byly financovány rodinami Jiřího a Petra Němcových, bez jakýchkoliv dotací. Díky jejich vytrvalosti a velkorysosti vznikl golfový areál Čertovo břemeno, jehož stavby, navržené architektem Stanislavem Fialou, svým výrazným se-  
pětím s přírodou přesahují nejenom úze-

mí regionu, ale i hranice České republiky. Kniha renomovaného novináře a spisovatele Petra Volfa představuje krok za krokem – od prvotního hledání místa pro víkendový odpočinek až po otevření osmnáctijamkového hřiště s nádhernou klubovnou organicky vyrůstající z okolní krajiny – cestu k tomuto architektonickému zázraku. Může sloužit coby návod svého druhu jak posílit genia loci a probudit opomíjené, zdánlivě ztracené místo opět k životu...

Článek o golfkлубu Čertovo břemeno jsme uveřejnili v pátém čísle Beton TKS v roce 2011 (fotografie: Milan Senko).

