

MOKA – Modelování Karbonatace

Software umožňující uživatelsky přívětivé plně pravděpodobnostní modelování (LHS) karbonatace betonových konstrukcí (mezní stav trvanlivosti) dle doporučení MC2010 a IAEA ve formátu CDF(Computable Document Format)

MoKa - manuál

Jan Podroužek a Břetislav Teplý
Ústav stavební mechaniky, Fakulta stavební, VUT v Brně
e-mail: podrouzekj@gmail.com
teply.b(zavinac)fce.vutbr.cz

Základní informace

Program MoKa slouží pro pravděpodobnostní modelování procesu karbonatce betonu dle dvou modelů: *fib* [1] a IAEA [2], pomocí kterých lze provádět posouzení životnosti železobetonové konstrukce a související úrovně spolehlivosti ve smyslu tzv. iniciačního stádia (tj. času do dosažení depasivace výztuže, kdy již by mohlo docházet k její korozi). Je to obvykle rozhodující pro posouzení životnosti konstrukce – viz např. dokumenty [1, 3].

Program MoKa pracuje s modely, které kromě posuzování postupu karbonatační fronty betonem (od povrchu betonu vystavenému působení atmosférického CO₂ do hloubky x_c) započítávají také vliv současného působení mechanického zatížení (**Model fib**) nebo vliv ochranné vrstvy na povrchu betonu (**Model IAEA**). Uživatel rozhodne, který z těchto případů zvolí.

Program MoKa pak může sloužit:

- ke zjišťování statistických charakteristik postupu degradace, tzn. (i) tloušťky depasivované vrstvy betonu při posuzování vlivu působení atmosférického CO₂;
- ke zjišťování pravděpodobnosti dosažení jisté karbonatační hloubky, která se pak srovnává s mezní/kritickou hodnotou, tj. krytí výztuže, což umožní stanovit životnost definovanou iniciačním stádiem. Takto odhadnutá pravděpodobnost poruchy se v praxi transformuje na index spolehlivosti.

Postup při používání programu:

Uživatel zadá identifikační údaje, vybere typ modelu karbonatce a definuje vstupní náhodné veličiny (typ rozdělení a parametry μ a σ). Následně zvolením tlačítka U (viz obr. 1 a 2) potvrdí zadání a přepočítá výsledky, které lze najít na pravé straně okna.

Následuje podrobný popis modelů.

Model fib

Jedná se o model procesu karbonatace betonu, který je součástí *fib* Model Code 2010 [1] (a je podrobněji popsán v dokumentu [4]); pro započtení vlivu současného působení mechanického zatížení je tento model v programu MoKa doplněn ještě koeficientem k_σ dle [5]. Hloubka karbonatace se pak vypočítá podle vztahu

$$x_c(t) = k_\sigma A \sqrt{t} \quad (1)$$

kde t je doba působení CO_2 na beton. Vliv napětí na rychlost karbonatace byl jednoduše zohledněn pomocí korekčního součinitele k_σ dle vztahů (2) a (3) [5]; pro tahové napětí σ_t lze využít vztah (2), pro tlakové napětí σ_c vztah (3), které byly odvozeny na základě zkoušek nosníků namáhaných čtyřbodovým ohybem a současně karbonatací (zrychlená zkouška). Přitom $\sigma_{u,t}$ a $\sigma_{u,c}$ jsou mezní napětí betonu v tahu a tlaku.

$$k_\sigma(\sigma_t/\sigma_{u,t}) = 1 + 1.41(\sigma_t/\sigma_{u,t}) + 0.82(\sigma_t/\sigma_{u,t})^2 \quad \text{and} \quad (2)$$

$$k_\sigma(\sigma_c/\sigma_{u,c}) = 1 - 2.27(\sigma_c/\sigma_{u,c}) + 4.86(\sigma_c/\sigma_{u,c})^2 \quad (3)$$

Parametr A je v tomto modelu vyjádřen vztahem:

$$A = \sqrt{631 \cdot 10^{11} k_e \cdot k_c \cdot (k_t \cdot R_{ACC,0}^{-1} + \varepsilon_t) c_{CO_2} \cdot 10^{-6} \cdot W} \quad (3)$$

kde k_e je funkce vlivu okolního prostředí zahrnující především vliv relativní vlhkosti u povrchu betonu na inverzní efektivní odolnost proti karbonataci (-), k_c je funkce vyjadřující vliv ošetřování betonu (především doby ošetřování betonu t_c) na inverzní efektivní odolnost proti karbonataci (-), $R_{ACC,0}^{-1}$ je inverzní efektivní odolnost proti karbonataci pro suchý beton včetně vazebné kapacity betonu pro CO_2 , určená v čase t_0 za zrychlených karbonatačních podmínek (ACC – Accelerated Carbonation Conditions) [(m²/s)/(kg CO_2 /m³)], k_t je regresní parametr vyjadřující vliv ACC testovací metody (-), ε_t je korekční člen zahrnující nepřesnosti vzniklé použitím ACC testovací metody [(m²/s)/(kg CO_2 /m³)], c_{CO_2} je obsah CO_2 v okolním prostředí (mg/m³) a W je funkce vlivu počasí zahrnující vliv mezo-klimatických podmínek (např. orientace a odpovídající pravděpodobnost směru deště, pravděpodobnost srážek apod.). V následujícím textu budou vstupní parametry podrobněji popsány:

Inverzní efektivní odolnost proti karbonataci $R_{ACC,0}^{-1}$

Uvedený model je založen na skutečnosti, že inverzní efektivní odolnost proti karbonataci je určena pomocí zrychleného karbonatačního testu (ACC testu), ve kterém jsou suché betonové vzorky testovány za definovaných podmínek po referenční dobu t_0 . Inverzní odolnost proti karbonataci $R_{NAC,0}^{-1}$ určená za přírodních karbonatačních podmínek (NAC – Natural Carbonation Conditions) bude větší o průměrný faktor $A = 1,25$. To lze vysvětlit tím, že ve zrychleném testu dosahuje vysušení do větší hloubky než za přírodních podmínek (ačkoliv se testování provádí za stejných klimatických podmínek, tj. 20 °C a RH = 65 %). Tento jev vede k mírnému zpomalení karbonatačního procesu v případě ACC testu. Pro velmi suchý beton tedy teoreticky platí hodnota $R_{ACC,0}^{-1} = 0$.

Pro měření odolnosti proti karbonataci lze využít přímé (měření hloubky karbonatace např. ACC testem) a nepřímé testovací metody (měření plynové permeability). Výhody ACC testu jsou následující:

- vazebná kapacita betonu nemusí být dodatečně uvažována
- dobrá reprodukovatelnost výsledků testu
- krátká délka trvání

Z těchto důvodů byl ACC test s následujícím provedením vybrán ve fib Model Code 2010 jako referenční testovací metoda:

1. Výroba betonových vzorků s rozměry: výška/šířka/délka = 100/100/500 mm.
2. Po odformování jsou vzorky uloženy na 7 dní (referenční doba ošetřování) ve vodní lázni.
3. Po vyjmutí z vody jsou vzorky uskladněny dalších 21 dní za standardizovaných laboratorních podmínek ($T_{ref} = 20 \text{ °C}$, $RH_{ref} = 65 \%$).
4. Po uplynutí 28 dní (t_{ref}) jsou vzorky umístěny do karbonatační komory se standardizovanými laboratorními podmínkami ($T_{ref} = 20 \text{ °C}$, $RH_{ref} = 65 \%$). V komoře jsou vzorky vystaveny CO_2 o koncentraci 2,0 obj. % po dobu 28 dní, která je označena jako referenční doba t_0 .
5. Poté jsou vzorky rozříznuty a na zlomcích je stanovena hloubka karbonatace x_c (m) pomocí roztoku fenolftaleinu o koncentraci 1g/l.
6. Inverzní efektivní odolnost proti karbonataci $R_{ACC,o}^{-1}$ [(m²/s)/(kg CO₂/m³)] má pak normální rozložení se střední hodnotou, kterou lze vypočítat z naměřené hodnoty x_c dle následujícího vztahu:

$$R_{ACC,o}^{-1} = \left(\frac{x_c}{420} \right)^2 \quad (4)$$

a standardní odchylkou s danou následujícím vztahem:

$$s = 0,69 \cdot \left(\frac{R_{ACC,o}^{-1}}{10^{-11}} \right)^{0,78} 10^{-11} \quad (5)$$

Pokud nejsou pro $R_{ACC,o}^{-1}$ dostupná naměřená data z testu, může být pro orientační účely využito literárních údajů uvedených v tabulce 1.

Tab. 1 – Literární hodnoty $R_{ACC,o}^{-1}$ [10^{-11} (m²/s)/(kg CO₂/m³)].

cement type	w_{eff}^1					
	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60
CEM I 42,5 R	n.d. ²	3,1	5,2	6,8	9,8	13,4
CEM I 42,5 R + FA ($k = 0,5$)	n.d. ²	0,3	1,9	2,4	6,5	8,3
CEM I 42,5 R + SF ($k = 2,0$)	3,5	5,5	n.d. ²	n.d. ²	16,5	n.d. ²
CEM III/B 42,5	n.d. ²	8,3	16,9	26,6	44,3	80,0

¹efektivní vodní součinitel w_{eff} zohledňující FA (popílek) a SF (křemičité úlety) s využitím k -hodnot dle ČSN 206-1

²n.d. – pro tyto betony nebyla hodnota $R_{ACC,o}^{-1}$ stanovena

Faktory vztahující se k ACC testu k_t , ε_t

Tyto faktory byly zavedeny za účelem převést výsledky získané ACC testem $R_{ACC,o}^{-1}$ [(m²/s)/(kg CO₂/m³)] na inverzní odolnost proti karbonataci $R_{NAC,o}^{-1}$ získanou za přírodních podmínek (NAC) [(m²/s)/(kg CO₂/m³)]:

$$R_{NAC,o}^{-1} = k_t \cdot R_{ACC,o}^{-1} + \varepsilon_t \quad (6)$$

kde k_t je regresní parametr, který uvažuje vliv ACC testovací metody (-) a ε_t je korekční člen zahrnující nepřesnosti vzniklé použitím ACC testovací metody [(m²/s)/(kg CO₂/m³)].

Tyto faktory jsou pro ACC test kvantifikovány následovně: k_t (-): normální rozložení se střední hodnotou 1,25 a směrodatnou odchylkou 0,35 a ε_t [(m²/s)/(kg CO₂/m³)]: normální rozložení se střední hodnotou $1 \cdot 10^{-11}$ a směrodatnou odchylkou $0,15 \cdot 10^{-11}$.

Funkce vlivu okolního prostředí k_e

Tato funkce uvažuje vliv vlhkosti na difúzní koeficient, a tím i na odolnost betonu proti karbonataci. Funkce vlivu prostředí k_e (-) může být popsána následujícím vztahem:

$$k_e = \frac{\left(1 - \left(\frac{RH_{real}}{100}\right)^5\right)^{2,5}}{\left(1 - \left(\frac{RH_{ref}}{100}\right)^5\right)^{2,5}}, \quad (7)$$

kde RH_{ref} (%) je referenční relativní vlhkost okolního vzduchu ($RH_{ref} = 65$ % v souladu s ACC testem) a RH_{real} je relativní vlhkost zkarbonatované vrstvy (%).

Jako vstupní data pro RH_{real} mohou být využita data z nejbližší meteorologické stanice, a to konkrétně střední denní hodnoty RH. Vzhledem k tomu, že relativní vlhkost se mění od 0 do 100, mělo by být pro popis této veličiny vybráno ohraničené pravděpodobnostní rozložení s horním limitem. Dolní limit se v závislosti na oblasti může výrazně lišit od 0. Pro popis RH_{real} jsou tedy vhodná následující rozdělení pravděpodobnosti: beta rozdělení a Weibull(max) rozložení.

Funkce vlivu počasí W

Funkce vlivu počasí W zahrnuje mezo-klimatické podmínky ovlivňující povrch betonu:

$$W = \left(\frac{t_0}{t}\right)^{\frac{(p_{SR} \cdot ToW)^{b_w}}{2}} = \left(\frac{t_0}{t}\right)^w, \quad (8)$$

kde t_0 je referenční čas (rok) ($t_0 = 0,0767$ let v souladu s ACC testem), w je exponent zahrnující vliv počasí (-), p_{SR} je pravděpodobnost deště (-), jedná se o konstantní parametr vyjadřující průměrné rozložení směru větru během deště, založené na datech z nejbližší meteorologické stanice, b_w je regresní exponent (-) s doporučeným normálním rozložením se střední hodnotou 0,446 a směrodatnou odchylkou 0,163 a ToW (-) je dán následujícím vztahem:

$$ToW = \frac{t_w}{365}, \quad (9)$$

kde t_w je průměrný počet deštivých dnů za rok, přičemž za deštivý den je považován den s minimálním množstvím srážek $h_{ND} = 2,5$ mm/den. Data pro určení ToW mohou být obdržena z nejbližší meteorologické stanice.

Funkce vyjadřující vliv ošetřování betonu k_c

Funkce vyjadřující vliv ošetřování betonu k_c (-) bere v úvahu vliv ošetřování betonu na efektivní odolnost proti karbonataci a je určena následujícím vztahem:

$$k_c = \left(\frac{t_c}{7}\right)^{b_c}, \quad (10)$$

kde b_c je regresní exponent s doporučeným normálním rozložením se střední hodnotou $-0,567$ a střední odchylkou 0,024 a t_c je doba ošetřování (dny).

Obsah CO₂ v okolním prostředí C_{CO_2}

Současnou koncentraci CO₂ je ovlivňují dva hlavní faktory:

- a) spalování fosilních paliv
- b) kácení lesních porostů

V roce 2003 bylo množství CO₂ mezi (687 – 746) ± 20 mg/m³, které v čase vzrůstá. Současné množství CO₂ (mg/m³) může být kvantifikováno následovně: normální rozložení se střední hodnotou 820 a směrodatnou odchylkou 100.

Model IAEA

Model dle [2] byl pro účely programu MoKa upraven pro pravděpodobnostní analýzu; vztah pro hloubku karbonatace je ve tvaru

$$x_c(t) = 9.47 R t^{0.5} (4.6w/c - 1.76) \quad (11)$$

kde:

t je stáří konstrukce [roky];

w/c je vodní součinitel betonu [-]; v případě betonu s příměsí je vhodné nahradit efektivním součinitelem s k -hodnotou dle ČSN 206-1;

R je konstanta vypočtená jako $R = \alpha\beta$.

R se mění v závislosti na druhu povrchové úpravy (β) a zda jde o případ expozice ve vnitřním či venkovním prostředí (α). Přitom $\alpha = 1.0$ pro venkovní prostředí a 1.7 pro vnitřní; $\beta = 1.0$ pro konstrukci bez povrchové úpravy. Hodnoty β pro různé druhy úprav jsou v tabulce 2g.

Tab. 2 Hodnoty β

Povrchová úprava	Vnitřní prostředí	Venkovní prostředí
Omítka	0,29	0,28
Omítka + nátěr	0,15	
Nátěr	0,57	0,80
Obklad	0,21	0,07

Tyto hodnoty jsou informativní, uživatel je může upřesnit či doplnit dle dalších poznatků/zkušeností.

Poděkování

Program MoKa byl vyvinut za podpory projektu č. TA04030713 Technologické agentury České republiky.

Reference

- [1] *fib* Model Code 2010 – final draft (2012). *fib* Bulletins No.65 and 66. Lausanne, Switzerland.

- [2] IAEA. Guidebook on non-destructive testing of concrete structures, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2002.
- [3] JSCE, (2007). "*Standard Specification for Concrete Structures - Design*". Japan Society of Civ. Engrs.
- [4] fib (2006), "*fib Bulletin No. 34 - Service Life Design*", Lausanne, Switzerland.
- [5] Wittmann F.H., Jiang F., Zhao T., Wan X. and Zhang P. (2012), "Durability of Concrete and Service Life of Reinforced Concrete Structures under Combined Mechanical and Environmental Actions", *7th Annual Concrete Conference (JST meeting)*, Qingdao, 20-25.

MoKa 1.0

Modelování Karbonatce

Hloubka krytí

PDF N LN Det

a μ [mm]

a σ

Čas

t [roky]

Režim mechanického působení

Napětí Tah Tlak

$\sigma_{1c}/\sigma_{(u,1c)}$

Výběr modelu pro stanovení hloubky karbonatce

MC2010 IAEA

Specifikace parametrů modelu dle MC2010 (vnější prostředí)

ψ PDF N LN Det

ψ μ [-]

ψ σ

t_c PDF N LN Det

t_c μ [dny]

t_c σ

b_c PDF N LN Det

b_c μ [-]

b_c σ

RH PDF N LN Det

RH μ [%]

RH σ

p_{SR} PDF N LN Det

p_{SR} μ [-]

p_{SR} σ

t_w PDF N LN Det

t_w μ [dny]

t_w σ

b_w PDF N LN Det

b_w μ [-]

b_w σ

Specifikace parametrů modelu dle IAEA (vnější prostředí)

ψ PDF N LN Det

ψ μ [-]

ψ σ

w/c PDF N LN Det

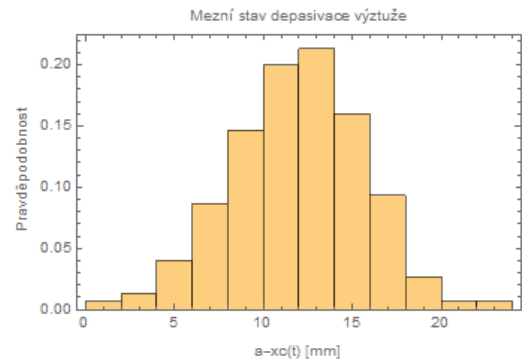
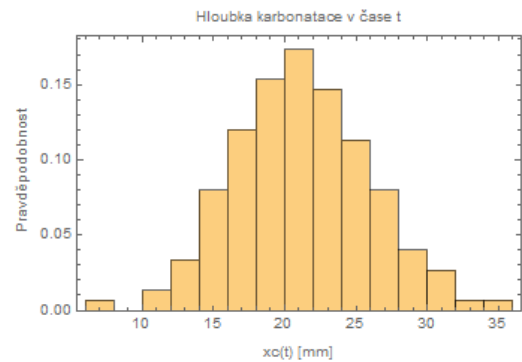
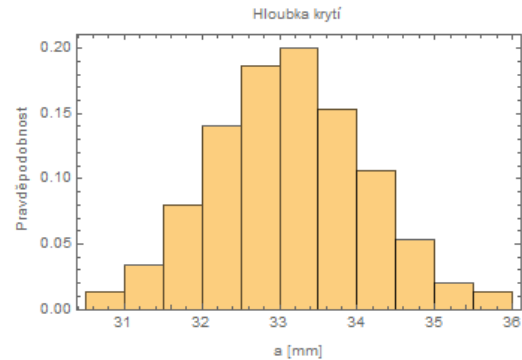
w/c μ [-]

w/c σ

Povrchová úprava [-]

Pro aktualizaci výpočtu zvolte tlačítko U(Update) v pravém horním rohu okna aplikace

Správce a vlastník licence: Dr. Ing. Jan Podroužek, VUT v Brně 3/2017



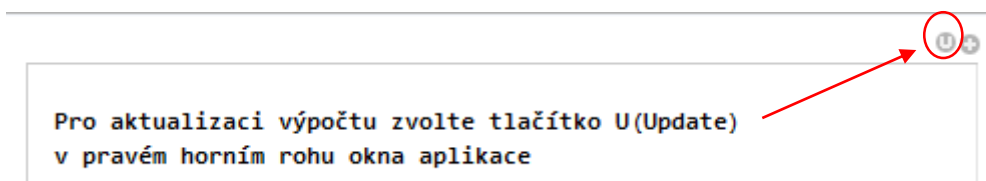
Střední hodnota mezního stavu depasivace [mm]: 11.9066

Směrodatná odchylka mezního stavu depasivace [mm]: 3.7369

Bezpečnostní součinitel β mezního stavu depasivace [-]: 3.18621

Pozn. LN: lognormální rozdělení odvozené od normálního rozdělení N s parametry μ a σ
Det: Deterministická hodnota, zadejte pouze parametr μ

Obr. 1. Základní okno programu



Obr. 2. Tlačítko aktualizovat je nutné stisknout při každém požadavku na přepočítání výsledků.

Pro spuštění programu je nutné nainstalovat CDF player, který je dostupný na adrese <https://www.wolfram.com/cdf-player/>

WOLFRAM CDF PLAYER™

Download Wolfram CDF Player



Windows 10/8/7
Other platform?

Which of the following best describes you?

Faculty/teacher

Your school or institution's name:

Email address (required):

Version:

Latest version 11.0.1 (1018 MB)

By downloading and installing this application, you agree to the

[Wolfram CDF Player license agreement.](#)

Start Download



With CDF Player installed, you're able to...

- ✓ Interact with applications from the Wolfram Demonstrations Project
- ✓ View Wolfram Language examples, reports and files



The **Computable Document Format (CDF)** is powering the next generation of interactive documents, blogs, reports, presentations, articles, books, courseware and more. [Browse uses & examples »](#)