

# MATEMATICKÉ MODELY ČASOVÉHO PRŮBĚHU KARBONATACE

Anna Horáková, \*

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

## ABSTRAKT

Článek se zabývá karbonací betonu, která je jedním z hlavních degradačních procesů ovlivňujících trvanlivost železobetonové konstrukce. Správný návrh konstrukce by měl zohledňovat mimo jiné i hledisko trvanlivosti, a proto je třeba najít takové výpočetní nástroje, pomocí kterých bude možné alespoň přibližně určit průběh degradace konstrukce v čase. Tato práce se věnuje především matematickým modelům časového průběhu karbonatace. Práce obsahuje shrnutí poznatků z odborných publikací o faktorech ovlivňujících rychlost karbonatace a popis vybraných matematických modelů časového průběhu karbonatace. V rámci této práce byla experimentálně stanovena hloubka karbonatace u vzorku betonu ze stávající mostní konstrukce. Tato experimentálně zjištěná hloubka karbonatace potom byla porovnána s hloubkou karbonatace spočtenou pomocí vybraných matematických modelů.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Beton • Karbonatace • Matematické modelování • Degradace • Trvanlivost

## ABSTRACT

The paper deals with carbonation of concrete which is one of the main degradation processes affecting the durability of reinforced concrete structures. The proper structure design should also take the durability aspect into account. Therefore it is necessary to find such calculation tools that could at least approximately estimate the structure degradation over time. This paper deals especially with mathematical models, which describe the progress of carbonation in time. The article includes a short summary of the literature search on factors affecting the carbonation velocity. An overview of mathematical models describing the carbonation is presented. In this work, the carbonation depth was experimentally determined for the sample obtained from an existing bridge structure. This experimentally determined carbonation depth was then compared with the carbonation depth calculated using selected mathematical models.

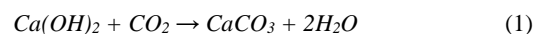
## KEYWORDS

Concrete • Carbonation • Mathematical modelling • Degradation • Durability

## 1. ÚVOD

Ve většině případů je rozhodujícím korozním vlivem pro beton karbonatace. Je to jev, ke kterému dochází v důsledku působení vzdušného oxidu uhličitého  $CO_2$  na hydroxid vápenatý a další produkty hydratace. Důsledkem je snížení pH vedoucí ke korozi ocelové výztuže a v posledním stádiu také poškození struktury samotného betonu.

V rámci karbonatace lze rozlišit několik fází. V první fázi dochází k reakci oxidu uhličitého s hydroxidem vápenatým dle dále uvedené chemické rovnice:



Uhličitán vápenatý v této fázi postupně zaplňuje póry v betonu a dochází k přechodnému zvýšení pevnosti v důsledku zhutnění materiálu. V druhé fázi potom nastává přeměna ostatních hydratačních produktů za vzniku modifikací uhličitánu vápenatého a také amorfního gelu kyseliny křemičité. V této fázi se mechanické vlastnosti betonu výrazně nemění. V následující fázi dochází k překrytí dřívějších produktů a ve struktuře se začínají vytvářet krystaly kalcitu a aragonitu. Tyto krystaly jsou objemné a jejich vznik v pórech způsobuje poškození materiálu a zhoršení mechanických vlastností. V poslední fázi je již struktura betonu značně potrhána velkými krystaly kalcitu a aragonitu, materiál ztrácí svoji pevnost a soudržnost a pH dosahuje hodnot okolo 8,3, což vede ke ztrátě ochrany ocelové výztuže před elektrochemickou korozi.

### 1.1. Faktory ovlivňující rychlost karbonatace

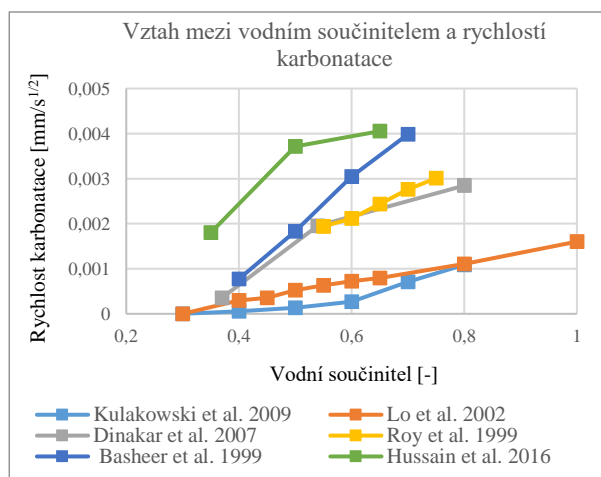
Dosud uveřejněné studie se nejčastěji zabývají vlivem složení betonu na jeho odolnost vůči karbonataci. Rychlost pronikání oxidu uhličitého do struktury betonu je zásadně ovlivněna pórovitostí betonu, na kterou má vliv především vodní součinitel, dále také druh pojiva nebo granulometrie kameniva. Studie velmi často porovnávají rychlost karbonatace betonových směsí s různým vodním součinitelem. S rostoucím vodním součinitelem se rychlost

\* Školitel: prof. Ing. Alena Kohoutková, CSc., FEEng.

karbonatace zvyšuje (Kulakowski et al. 2009, Dinakar et al. 2007, Lo et al. 2002, Imamoto et al. 2009, Basheer et al. 1999, Hussain et al. 2016).

Dále má na rychlost karbonatace významný vliv druh pojiva, rychlost karbonatace se mění při použití hydraulických příměsí (SCM) jako částečné náhrady cementu, vliv má také druh použitého cementu. Rychlost karbonatace je totiž závislá na koncentraci  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  v pórovém roztoku betonu, s jeho rostoucí koncentrací se rychlost karbonatace snižuje, protože zreagování veškerého jeho množství v dané vrstvě betonu trvá déle. Betony obsahující hydraulické příměsí (popílek, strusku, mikrosilik) jsou proto vůči karbonataci obvykle méně odolné než betony obsahující jako pojivo pouze portlandský cement. Tuto skutečnost uvádějí jako výsledek svého experimentálního programu mnohé studie (Khunthongkeaw et al. 2006, Siddique et al. 2011, Ho et al. 1983, Younsi et al. 2011).

Některé studie zkoumají také vztah mezi tlakovou pevností betonu a jeho odolností vůči karbonataci. Beton o vyšší pevnosti má ve většině případů také větší odolnost vůči karbonataci (např. Atis 2003, Kulakowski et al. 2009, Dinakar et al. 2007, Lo et al. 2002, Imamoto et al. 2009). Korelaci mezi tlakovou pevností betonu a rychlostí karbonatace ilustruje obrázek 1. Obě tyto vlastnosti jsou ovlivněny velmi výrazně pórovitostí, která je dána například vodním součinitelem a vlastnostmi kameniva. Často je ale hloubka karbonatace různá pro betony o stejné pevnosti, ale odlišném složení. Rychlost karbonatace je ovlivněna velkým množstvím faktorů, takže matematické modely pro predikci karbonatace, vycházející pouze z hodnoty tlakové pevnosti, obvykle nebývají příliš přesné.



Obrázek 1: Vztah mezi tlakovou pevností betonu a rychlostí karbonatace

Podmínky prostředí mají pro rychlost karbonatace zásadní vliv, zejména vlhkost prostředí. Dle většiny studií je rychlost karbonatace nejvyšší při vlhkostním rozmezí 50 – 75 % (Papadakis et al. 1989, Papadakis et al. 1991, Roy et al. 1999, Silva et al. 2014). V suchém prostředí je karbonatace velmi pomalá až nulová, stejně tak ve vodou nasyceném betonu. Rychlost karbonatace je samozřejmě ovlivněna také koncentrací oxidu uhličitého v prostředí obklopujícím beton. Koncentrace oxidu uhličitého

v čistém vzduchu je cca 0,04 %, v blízkosti velkých průmyslových a zemědělských provozů, velkých měst a významných silničních tahů však může být větší. Proto je obvykle rychlost karbonatace v těchto lokalitách větší než v oblastech menších sídel a volné přírody (Papadakis 2000).

## 1.2. Matematické modely časového průběhu karbonatace

Modelů popisujících časový průběh karbonatace existuje velké množství, protože tento degradační jev je považován v rámci železobetonových konstrukcí za nejvýznamnější. Pro trvanlivost konstrukce je zásadní doba, za kterou dojde vlivem karbonatace k depasivaci ocelové výztuže – tedy doba, za kterou zkarbonatovaná vrstva dosáhne úrovně výztužných vložek. Tato doba je v literatuře označována jako iniciační čas  $t_i$ . Modely potom popisují závislost tloušťky zkarbonatované vrstvy na čase. Fyzikální podstatou těchto modelů je difuze, vycházející tedy z II. Fickova zákona, který je popsán diferenciální rovnicí:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (2)$$

kde  $c$  je koncentrace,  $t$  čas a  $x$  vzdálenost, v tomto případě vzdálenost od povrchu. Tloušťku zkarbonatované vrstvy lze tedy určit ze vztahu:

$$x_c = A \cdot \sqrt{t} \quad (3)$$

kde  $x_c$  je tloušťka zkarbonatované vrstvy [mm],  $t$  je uplynulý čas [roky] a  $A$  je parametr spočtený dle použitého modelu. Právě parametrem  $A$  se jednotlivé modely liší. Všechny modely obsahují parametr, který zohledňuje druh použitého betonu. Nejčastěji se jedná o hodnotu vodního součinitele nebo pevnost v tlaku. Některé modely pracují s hodnotami hmotností jednotlivých složek betonu a s jejich objemovými hmotnostmi. Někdy bývá také zohledněn druh použitého cementu. Často jsou potom zohledněny také vlivy prostředí, zejména vlhkost a obsah oxidu uhličitého ve vzduchu. Model, který je v současnosti považován za nejkomplexnější, zahrnuje podrobnější údaje o složení betonu a hodnotu koncentrace oxidu uhličitého. Jedná se o model podle Papadakise a kol. z roku 1989 (Papadakis et al. 1989).

$$A = \frac{\sqrt{2[CO_2] \cdot D_{e,CO_2}}}{\sqrt{[CH] + 3[CSH]}} \quad (4)$$

kde  $D_{CO_2}$  je efektivní difuzní koeficient  $\text{CO}_2$  v betonu [ $\text{m}^2/\text{s}$ ],  $[CO_2]$  je koncentrace  $\text{CO}_2$  v okolním prostředí [ $\text{mol}/\text{m}^3$ ],  $[CH]$  je molární koncentrace  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  a  $[CSH]$  je molární koncentrace hydrosilikátů vápenatých [ $\text{mol}/\text{m}^3$ ]. Tento model vychází z diferenciálních rovnic pro objemové bilance  $\text{CO}_2$ ,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  a  $\text{CSH}$  (Papadakis et al. 1991). Výpočet difuzního koeficientu je poměrně náročný a vyžaduje podrobnější informace o použitém materiálu. Existuje vztah pro přibližné určení difuzního koeficientu, který uvádí studie (Papadakis et al. 1991):

$$D_{CO_2} = 1,64 \cdot 10^{-6} \cdot \varepsilon^{1,8} \cdot (1 - RH/100)^{2,2} \quad (5)$$

kde  $\varepsilon$  je celková pórovitost [%] a  $RH$  je relativní vlhkost uvnitř pórů [%]. Při teoretických výpočtech je však poměrně obtížné predikovat pórovitost betonu. Pro tyto účely lze použít i zjednodušenou verzi modelu (rovnice 6), která je založena na obsahu jednotlivých složek v betonové směsi a na okolní vlhkosti (Šmerda 1999):

$$A = 350 \cdot \frac{\rho_c \cdot (w - 0,3)}{\rho_v \cdot (1 + w \cdot \frac{\rho_c}{\rho_v})} \cdot f_{RH} \cdot \sqrt{\left(1 + \frac{\rho_c}{\rho_v} \cdot w + \frac{\rho_c}{\rho_a} \cdot \frac{m_a}{m_c}\right)} \cdot c_{CO_2} \quad (6)$$

kde  $\rho_c$ ,  $\rho_a$  a  $\rho_v$  jsou objemové hmotnosti cementu, kameniva a vody [kg/m<sup>3</sup>],  $m_a$  a  $m_c$  jsou hmotnosti kameniva a vody [kg],  $w$  je vodní součinitel [-],  $c_{CO_2}$  je koncentrace oxidu uhličitého v okolním vzduchu [mol/m<sup>3</sup>]. Hodnota  $f_{RH}$  je závislá na relativní vlhkosti vzduchu a určí se dle tabulky 1.

Tabulka 1: Hodnoty  $f_{RH}$  pro různé relativní vlhkosti

Relativní vlhkost RH [%]	0	7	50	93	100
Hodnota funkce $f_{RH}$ [-]	0	0	0,425	0,5	0

Dalším komplexním modelem je model dle Bakkeru (Sanjuán et al. 2003):

$$x = \sqrt{\frac{2D_c}{a} \cdot (c_1 - c_2) \left[ t_{d1} + t_{d2} - \left(\frac{x_1}{b}\right)^2 + t_{d3} - \left(\frac{x_2}{b}\right)^2 \dots + t_{dn} - \left(\frac{x_n-1}{b}\right)^2 \right]} \quad (7)$$

kde  $D_c$  je difuzní koeficient CO<sub>2</sub> v betonu [m<sup>2</sup>/s],  $(c_1 - c_2)$  je rozdíl koncentrace CO<sub>2</sub> v betonu a v okolním prostředí [mol/kg],  $t_d$  je čas v letech,  $a$  je koncentrace CaO v betonu [mol/kg] a  $b$  je množství vody vypařené z betonu, přičemž:

$$a = Ca \cdot HD \cdot c \cdot 44/66 \quad (8)$$

$$b = \sqrt{(2D_v/a) \cdot (c_3 - c_4)} \quad (9)$$

kde  $Ca$  je koncentrace CaO v pojivu [kmol/m<sup>3</sup>],  $HD$  je stupeň hydratace [-],  $c$  je množství cementu na m<sup>3</sup> betonu [kg/m<sup>3</sup>],  $D_v$  je difuzní koeficient vodní páry v betonu [m<sup>2</sup>/s] a  $(c_3 - c_4)$  je rozdíl vlhkosti v betonu a v okolním prostředí [mol/kg].

Modely jsou velmi často založeny na hodnotě vodního součinitele. Tato hodnota má totiž, jak již bylo uvedeno v předchozí kapitole, přímý vliv na pórovitost, a tedy i na propustnost pro oxid uhličitý. V těchto modelech však nejsou vždy zohledněny další faktory ovlivňující rychlost karbonatace. Výhodou je nenáročnost na výpočet a vstupní údaje. Příkladem je model dle De Sittera (De Sitter 1984):

$$A = \sqrt{\frac{46w - 17,6}{2,7}} \cdot R \cdot k \quad (10)$$

kde  $w$  je vodní součinitel,  $R$  je součinitel závislý na druhu cementu a  $k$  je součinitel zohledňující vlhkost okolního prostředí. Podobný je model dle Kishitanioho (Kishitani et al. 2005):

$$\text{Pro } w < 0,6: a = R_1 \cdot \sqrt{0,639 w - 0,244} \quad (11)$$

$$\text{Pro } w \geq 0,6: a = R_2 \cdot \sqrt{\frac{(w - 0,25)^2}{0,345 + w}} \quad (12)$$

kde  $w$  je vodní součinitel a  $R_1$  a  $R_2$  jsou koeficienty zohledňující vliv cementu. Pro modely pracující s hodnotou vodního součinitele lze pro zpřesnění výpočtu použít hodnotu efektivního vodního součinitele  $w_{eff}$  (Chromá et al. 2014). Jedná se o upravenou hodnotu vodního součinitele zohledňující vliv příměsí na chování materiálu.

$$w_{eff} = m_v / (m_c + k \cdot SCM) \quad (13)$$

kde  $m_v$  a  $m_c$  jsou hmotnosti vody a cementu,  $k$  je hodnota závislá na druhu příměsí a  $SCM$  je celkové množství hydraulicky reagujících příměsí.

Mnoho modelů používá pro vyjádření vlastností betonu hodnotu tlakové pevnosti. Například model dle Boba z roku 1990 (Bob et al. 1993):

$$A = \frac{150 \cdot C \cdot k \cdot d}{f_c} \quad (14)$$

kde  $f_c$  je tlaková pevnost betonu [MPa],  $C$  je součinitel závislý na druhu cementu,  $k$  je součinitel zohledňující vlhkostní podmínky prostředí a  $d$  je součinitel zohledňující obsah CO<sub>2</sub> v okolním prostředí. Na hodnotě tlakové pevnosti je založen také model dle Duvala (Duval 1992):

$$A = \sqrt{365} \cdot \left(\frac{1}{2,1 \cdot \sqrt{f_c}} - 0,06\right) \quad (15)$$

kde  $f_c$  je tlaková pevnost betonu po 28 dnech [MPa]. Tento model je velmi jednoduchý, nezohledňuje však nijak vliv prostředí.

Některé modely jsou založeny na statistickém principu, příkladem je model, který uvádí studie (Silva et al. 2014):

$$y = B_0 + B_1 \cdot x_1 + B_2 \cdot x_2 \dots B_k \cdot x_k + \varepsilon \quad (16)$$

kde  $y$  je závislá proměnná (tj. koeficient  $A$ ),  $x_i$  jsou nezávislé proměnné,  $B_i$  jsou regresní koeficienty a  $\varepsilon$  je náhodná chyba modelu. Mezi nezávislé veličiny patří faktory, které ovlivňují rychlost karbonatace. Jsou to vlastnosti betonu, jako je vodní součinitel, množství a druh pojiva, typ cementu, množství a typy přísad, pevnost betonu a jeho konzistence. Dále v modelu vystupují podmínky ukládání a ošetřování betonu (teplota a relativní vlhkost prostředí při tuhnutí a tvrdnutí, typ hutnění) a podmínky prostředí, ve kterém se beton nachází v průběhu své životnosti (relativní vlhkost a teplota prostředí, koncentrace CO<sub>2</sub>, stupeň vlivu prostředí, ochrana proti dešti a působení solí). Většina faktorů je popsána číselně, některé jsou ale kritériální (ano/ne), například podmínka ochrany proti dešti (pokud je zajištěna, dosadí se hodnota -1, pokud ne, dosadí se hodnota 1). Tento model byl potom aplikován na výsledky mnoha studií, které se zabývaly různými betonovými směsmi v různých podmínkách okolního prostředí.

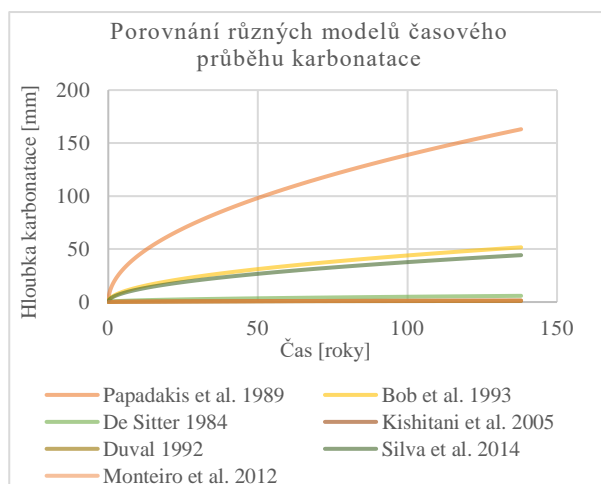
Problémem byly často chybějící hodnoty, které mohou zkreslovat statistické modelování.

Ze statistické analýzy vychází také model, který uvádí studie (Monteiro et al. 2012):

$$x = \sqrt{\frac{2 \cdot c \cdot t}{R_{c65}}} \cdot [\sqrt{k_0 \cdot k_1 \cdot k_2} \cdot \left(\frac{1}{t}\right)^n] \quad (17)$$

kde  $c$  je koncentrace  $\text{CO}_2$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],  $t$  je čas [roky],  $R_{c65}$  je koeficient odolnosti betonu vůči karbonataci [ $\text{kg} \cdot \text{roky}/\text{m}^5$ ],  $k_0$  je faktor pro podmínky měření,  $k_1$  je koeficient zohledňující stupeň vlivu prostředí,  $k_2$  je koeficient zohledňující prostředí, ve kterém beton tuhne a tvrdne a  $n$  je koeficient zohledňující namáčení a sušení. Odolnost betonu vůči karbonataci byla stanovena na základě zrychlených karbonatačních experimentů.

Vhodnější jsou vždy modely, zohledňující více faktorů, jako je složení betonu a prostředí, ve kterém se beton nachází. Modely pracující pouze s hodnotou tlakové pevnosti nebo vodního součinitele jsou obvykle málo přesné a v případě vysokopevnostních betonů, jejichž vodní součinitel je obvykle velmi malý, dávají často nesmyslné výsledky. Velké množství modelů, které jsou v současné době k dispozici, pochází z doby, kdy byly vlastnosti betonu mnohem lépe predikovatelné na základě poměru jeho základních složek (kamenivo, cement, voda) a používání přísad a příměsí ještě nebylo příliš časté. Pro vysokohodnotný beton, obsahující velké množství přísad a příměsí, jsou proto často nepoužitelné. Dalším problémem těchto modelů je, že nezohledňují přítomnost trhlin v betonu. V případě běžných železobetonových konstrukcí jsou trhliny určité šířky v betonu vždy přítomny a urychlují transport oxidu uhličitého do struktury betonu. Několik různých matematických modelů porovnává graf na obrázku 2. Je zde zřejmý velký rozptyl ve výsledcích, které jednotlivé modely poskytují.



Obrázek 2: Porovnání různých matematických modelů

## 2. POSTUP PRÁCE

V rámci této studie byly porovnávána hloubka karbonatace v betonové konstrukci zjištěná pomocí experimentu a vypočtená užitím matematických modelů.

### 2.1. Experimentální zjištění hloubky karbonatace

Vzorek pro experimentální zjištění hloubky karbonatace byl získán z mostní konstrukce, která byla určena k demolici. Jednalo se o mostní konstrukci v obci Kladno, která byla postavena roku 1974. Vzorek byl odebrán z mostního pilíře (obrázek 3) v roce 2019 pomocí jádrové vrtačky. Dle dostupné dokumentace jsou pilíře mostu z betonu třídy C 35/45. Pevnost betonu byla ověřována tvrdoměrem, dle naměřených hodnot byla průměrná pevnost betonu v okolí vrtu 33 MPa.

Hloubka karbonatace byla zjištěna aplikací fenolfaleinu na povrch odebraného vzorku. Pokud dosahuje pH betonu vyšší hodnoty než cca 9,5, dojde k fialovému zbarvení. Pro nižší hodnotu pH k zbarvení nedochází a tuto část konstrukce je možno považovat za zkarbonatovanou. Dle provedené zkoušky dosahovala hloubka karbonatace cca 37 mm. Výsledek experimentu znázorňuje obrázek 4.



Obrázek 3: Mostní konstrukce, ze které byly odebrány vzorky



Obrázek 4: Výsledek experimentálního stanovení hloubky karbonatace

### 2.2. Výpočet hloubky karbonatace pomocí matematického modelu

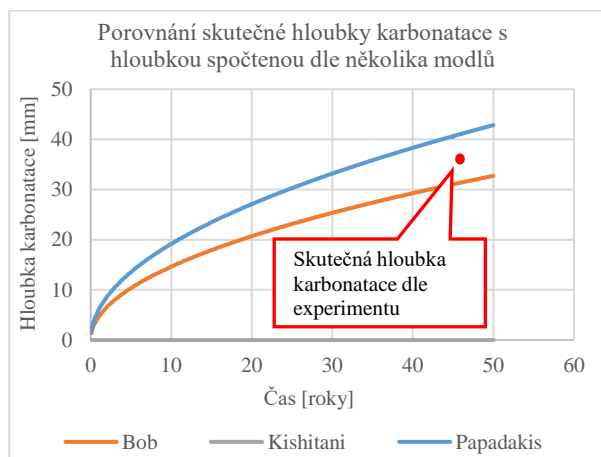
Pro výpočet hloubky karbonatace byl použit model dle Papadakis z roku 1992. Tento model dává výsledky, které se blíží rychlostem karbonatace uváděným v literatuře. Pro porovnání byla hloubka karbonatace spočtena také pomocí modelu dle Boba a modelu dle Kishitaniho. Složení betonu bylo odhadnuto dle jeho pevnosti. Je uvedeno v tabulce 2. Vodní součinitel této betonové směsi je 0,37. Vlhkost okolního prostředí byla pro jednotlivé měsíce roku uvažována dle dostupných meteorologických údajů jako průměrná vlhkost mezi lety 1981 a 2010.

Tabulka 2: Předpokládané složení betonu mostní konstrukce.

Složení betonové směsi		
Kamenivo hrubé	1070	kg/m <sup>3</sup>
Kamenivo jemné	750	kg/m <sup>3</sup>
Cement	350	kg/m <sup>3</sup>
Voda	130	kg/m <sup>3</sup>

### 3. VÝSLEDKY

Při porovnání provedeného experimentu s výpočty bylo dosaženo poměrně dobré shody v případě matematických modelů dle Papadakise a dle Boba. Naproti tomu model dle Kishitaniho se v tomto případě zcela odklání od reality. Graf na obrázku 5 znázorňuje časový průběh karbonatace spočtený dle těchto tří matematických modelů s vyznačeným výsledkem experimentu.



Obrázek 5: Počteně stanovený časový průběh karbonatace a výsledek experimentu

Tabulka 3 uvádí hloubky karbonatace v roce 2019 (tedy ve stáří konstrukce 45 let) spočtené dle uvedených modelů a hloubku karbonatace zjištěnou experimentem.

Tabulka 3: Hloubka karbonatace ve stáří konstrukce 45 let (porovnání výpočtů a experimentu)

	Hloubka karbonatace [mm]	Odchylka od experimentu [%]
Papadakis	40.45	9.32
Bob	31.05	16.08
Kishitani	0.78	97.89
Experiment	37	-

Dle provedené studie vystihuje hloubku karbonatace nejlépe model dle Papadakise, jehož odchylka od skutečnosti je cca 9 %. Přijatelný výsledek (vzhledem k velkému počtu

neznámých při výpočtu hloubky karbonatace) dává také model dle Boba (odchylka cca 16 %).

### 4. DISKUZE

V rámci provedené studie byla získána nejlepší shoda s experimentem pro matematický model dle Papadakise a přijatelná shoda pro model dle Boba. Oba tyto modely zohledňují vlastnosti betonu i okolního prostředí. Model dle Papadakise zohledňuje poměr jednotlivých složek betonu a jejich objemovou hmotnost, vlhkost okolního prostředí a koncentraci oxidu uhličitého v okolním ovzduší. Model dle Boba pracuje s pevností betonu jako hlavním parametrem, který je dále modifikovaný dle typu cementu, koncentrace oxidu uhličitého v okolním prostředí a jeho vlhkosti. Dle dříve provedené studie (Horáková et al. 2017) však tento model dával nereálné výsledky při aplikaci na vysokopevnostní betony, právě kvůli své výrazné závislosti na pevnosti betonu. Tato studie sice nebyla podložena experimentálním programem, ale i tak lze předpokládat, že je tento model pravděpodobně použitelný pouze pro betony běžných pevností. Při porovnání je nutné si uvědomit, že složení betonu bylo pouze odhadnuto na základě jeho pevnosti, a výsledky jsou tedy do určité míry nepřesné. Při mírné změně poměru jednotlivých složek se však výsledky nemění nijak dramaticky, odchylka jednotlivých modelů od experimentu se mění v řádu procent. Lze tedy předpokládat, že model dle Papadakise i model dle Boba umožňují poměrně dobrý odhad hloubky karbonatace pro betony běžné pevnosti.

### 5. ZÁVĚR

Z výsledků vyplývá, že pro beton běžné pevnosti jsou poměrně dobře použitelné modely dle Papadakise a dle Boba. Nejlepší shoda s experimentálně stanovenou hloubkou karbonatace byla dosažena při použití modelu dle Papadakise, který pracuje s celkovým složením betonu a objemovou hmotností jednotlivých složek. Model dle Boba do velké míry závisí na pevnosti betonu. Výsledek, který tento model dává, se však také příliš nevzdaluje od skutečnosti. Je však třeba poznamenat, že pro stanovení jednoznačného závěru by bylo třeba provést rozsáhlejší experimentální studii na vzorcích pocházejících z různých konstrukcí, z betonu různých pevností a nacházejících se v odlišném prostředí.

### PODĚKOVÁNÍ

Příspěvek byl vytvořen za finanční podpory interní studentské grantové soutěže ČVUT v Praze v rámci projektu SGS19/149/OHK1/3T/11 - Trvanlivost betonové konstrukce a hodnocení jejího životního cyklu.

### Reference

Kulakowski, M. P., Pereira, F. M., Dal Molin, D. C. C. (2009), Carbonation-induced reinforcement corrosion in silica fume concrete, in 'Construction and Building Materials', Vol. 23, pp. 1189-1195.

- Dinakar, P., Babu, K. G., Santhanam, M. (2007), Corrosion behaviour of blended cements in low and medium strength concretes, in 'Cement & Concrete Composites', Vol. 29, pp. 136-145.
- Lo, Y., Lee, H. M. (2002), Curing effects on carbonation of concrete using a phenolphthalein indicator and Fourier-transform infrared spectroscopy, in 'Building and Environment', Vol. 37, pp. 507-514.
- Imamoto, K., Shimozawa, K., Nagayama, N., Yamasaki, J., Nimura, S. (2009), Air permeability of concrete cover and its relationship with carbonation progress under long-term exposure test in Japan, in 'Concrete in aggressive aqueous environments - Performance, Testing, and Modeling', pp. 508-514.
- Basheer, P. A. M., Russell, D. P., Rankin, G. I. B. (1999), Design of concrete to resist carbonation, in 'Durability of Building Materials and Components', Vol. 8, pp. 423-435.
- Hussain, S., Bhunia, D., Singh, S. B. (2016), Assessment of carbonation depth under natural and accelerated carbonation conditions, in 'The Indian Concrete Journal', Vol. 11, pp. 57-64.
- Khunthongkeaw, K., Tangtermsirikul, S., Leelawat, T. (2006). A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete, in 'Construction and Building Materials', Vol. 20, pp. 744-753.
- Siddique, R. (2011), Properties of self-compacting concrete containing class F fly ash, in 'Materials & Design', Vol. 32, pp. 1501-1507.
- Ho, D., Lewis, R. (1983), Carbonation of concrete incorporating fly ash or a chemical admixture, in 'First international conference on the use of fly ash, silica fume, slag and other mineral by-products in concrete', Montebello, Canada.
- Younsi, A., Turcry, P., Rozière, E., Aït-Mokhtar, A., Loukili, A. (2011), Performance-based design and carbonation of concrete with high fly ash content, in 'Cement and Concrete Composites', Vol. 33, pp. 993-1000.
- Atis, C. D. (2003) Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash, in 'Construction and Building Materials', Vol.17, pp. 147-152.
- Papadakis, V. G., Vayenas, C. G., Fardis, M. N. (1989), A Reaction Problem of Engineering Approach to the Concrete Carbonation, in 'AIChE Journal', Vol. 35, pp. 1639-1650.
- Papadakis, V. G., Vayenas, C. G., Fardis, M. N. (1991), Experimental investigation and mathematical modeling of the concrete carbonation problem, in 'Chemical Engineering Science', Vol. 46, pp. 1333-1338.
- Roy, S. K., Poh, K. B., Northwood, D. O. (1999), Durability of concrete - accelerated carbonation and weathering studies, in 'Building and Environment', Vol. 34, pp. 597-606.
- Silva, A., Neves, R., de Brito, J. (2014), Statistical modelling of carbonation in reinforced concrete, in 'Cement & Concrete Composites', Vol. 50, pp. 73-81.
- Papadakis V. G. (2000), Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress, in 'Cement and Concrete Research', Vol. 30, pp. 291-299.
- Papadakis, V. G., Vayenas, C. G., Fardis, M. N. (1991), Physical and chemical characteristics affecting the durability of concrete, in 'ACI Material Journal', Vol 9, pp. 186-196.
- Šmerda, Z. (1999), *Životnost betonových staveb*, Praha: Český svaz stavebních inženýrů, ISBN 80-902697-8-8.
- Sanjuán, M., Andrade, C., Cheyrez, M. (2003). Concrete carbonation test in natural and accelerated conditions, in 'Advances in Cement Research', Vol. 15, pp. 171-180.
- Kishitani, Y., Hokoi, S., Harada, K., Takada, S. (2005), Prediction model for carbonation of concrete structure considering heat and moisture transfer, in 'Journal of Structural and Construction Engineering', Vol. 595, pp. 17-23.
- Chromá, M., Rovnaníková, P., Teplý, B., Strauss, A. (2014), Effective water-cement ratio of concrete and its effect on the durability of concrete structures, in 'Proceedings pro089: Performance-based Specification and Control of Concrete Durability', pp. 57-65.
- Bob, C., Afana, E. (1993), On-site assessment of concrete carbonation, in 'Proceedings of the international conference Failure of concrete structures', pp. 84-87.
- Duval, R. (1992), *La durabilité des bétons*, Paris, France: Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, ISBN: 2-85978-184-6
- Monteiro, I., Branco, F. A., de Brito, J., Neves, R. (2012) Statistical analysis of the carbonation coefficient in open air concrete structures, in 'Construction and Building Materials', Vol. 29, pp. 263-269.
- De Sitter, W.R. (1984). Costs for service life optimization: The law of fives. Workshop Report on Durability of Concrete Structures; Copenhagen, 18-20 May 1984. Ed. Steen Rostman, Copenhagen, pp. 131-134
- Horáková, A., Broukalová, I., Kohoutková, A., Vašková, J. (2017), Sustainability and durability analysis of reinforced concrete structures, in 'IOP Conference Series: Materials Science and Engineering', Vol. 246, pp. 012038.