



Program
celoživotního
učení



Degradační modely

Miroslav Sýkora
Kloknerův ústav ČVUT v Praze

1. Úvod
2. Degradace železobetonových konstrukcí
3. Degradace ocelových konstrukcí
4. Závěrečné poznámky

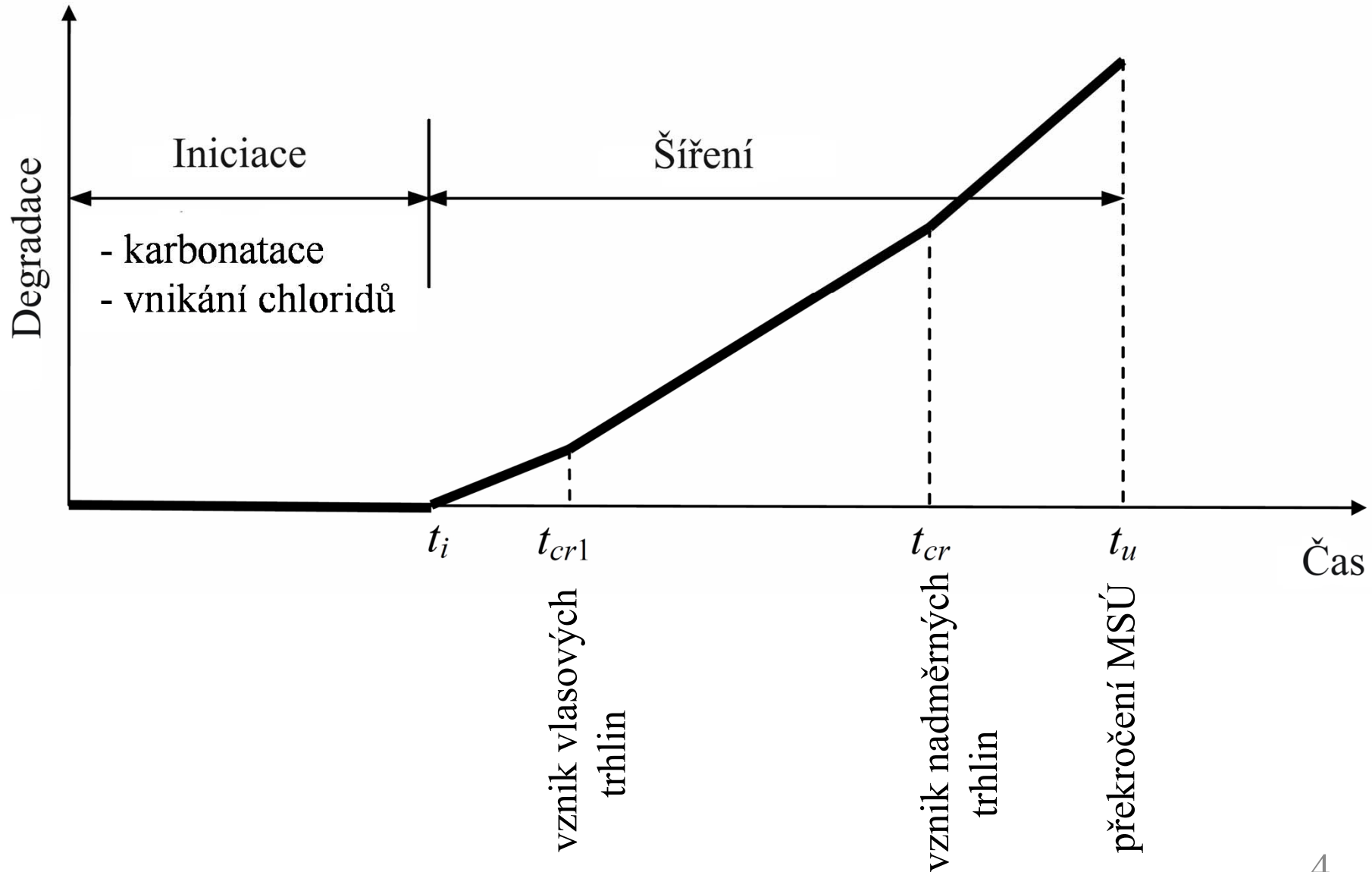
Motivace



Úvod

- obvykle pravděpodobnostní modelování degračních procesů
- železobetonové konstrukce: iniciace a rozvoj koroze vlivem karbonatace a pronikání chloridů (obecně přijaté modely)
- ocelové konstrukce: koroze v závislosti na agresivitě prostředí

Rozvoj koroze v žb. konstrukcích



Iniciace způsobená karbonatací

- pravděpodobnost depasivace $P_{\text{corr}}(t) = P[c - d(t) < 0]$

$$d(t) = \sqrt{2k_e k_c R_{\text{NAC},0}^{-1} C_{\text{CO}_2,s}} \sqrt{t} \times W(t)$$

k_e - vlhkost prostředí

k_c - ošetřování betonu

$R_{\text{NAC},0}^{-1}$ - odolnost betonu vůči karbonataci

$C_{\text{CO}_2,s}$ - koncentrace CO_2

$W(t)$ - lokální klimatické podmínky

fib Model Code for Service Life Design, 2006

fib Bulletin 55, Model Code 2010 - First complete draft, Volume 1 (chapters 1-6), fib Bulletin 56, Model Code 2010 - First complete draft, Volume 2 (ch. 7-10)

JCSS Probabilistic Model Code - Environmental Attack. 4th Draft April 2010

Deterministické ověření – fib 2006

- ověření trvanlivosti: $c_d - d_d(t) < 0$
- $c_d = c_{\text{nom}} - 10 \text{ mm}$
- model hloubky karbonatace – charakteristické hodnoty odpovídají průměrným hodnotám
- $k_{e,d} = [(1 - (RH_{\text{skut}} / \gamma_{RH})^5) / (1 - RH_{\text{ref}}^5)]^{2,5}$
 - RH_{skut} (Praha 0,7), $\gamma_{RH} = 1,3$
 - $RH_{\text{ref}} = 0,65$
- $k_{c,d}$

Doba ošetřování ve dnech	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$k_{c,d}$	3,00	2,03	1,61	1,37	1,20	1,09	1,00	0,92	0,86	0,81	0,77	0,73	0,70	0,67

Deterministické ověření – fib 2006

- $R_{NAC,0}^{-1} - \text{testy}, \gamma_R = 1,5$

Druh cementu	Průměrné hodnoty $R_{NAC,0}^{-1}$ v (mm ² /rok) / (kg/m ³)					
	W/C _{eqv} ¹					
	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60
CEM I 42,5 R	- ²	1500	2400	3000	4200	5600
CEM I 42,5 R + FA (k = 0,5)	- ²	430	1100	1300	2900	3600
CEM I 42,5 R + SF (k = 2,0)	1700	2500	- ²	- ²	6800	- ²
CEM III/B 42,5	- ²	3600	7000	10800	17800	31800

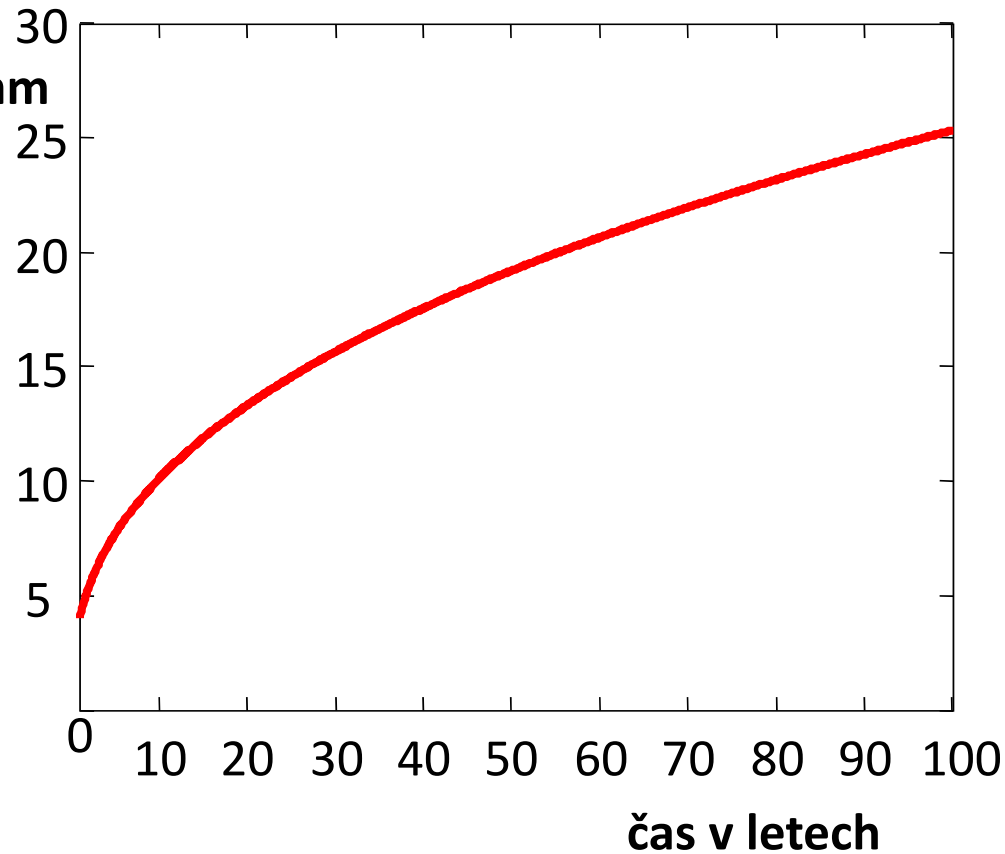
¹ Ekvivalentní vodní součinitel s uvážením vlivu popílku (FA) a křemičitého prachu součiniteli k . Uvažované objemy: FA – 22 % váhy cementu, SF – 5 % váhy cementu.
² data nejsou k dispozici.

- $C_{s,d} = 0,00082 \text{ kg/m}^3$ (vyšší hodnoty – znečištěné prostředí, tunely)
- $W(t) = (t_0 / t)^{[(p_{SR} ToW / 365)^{b_w} / 2]}$
 t_0 - referenční doba 0,0767 roku, $p_{SR} - 0,1$ (svislé prvky), $ToW - 100$ dní, $b_{w,d} = 0,446$

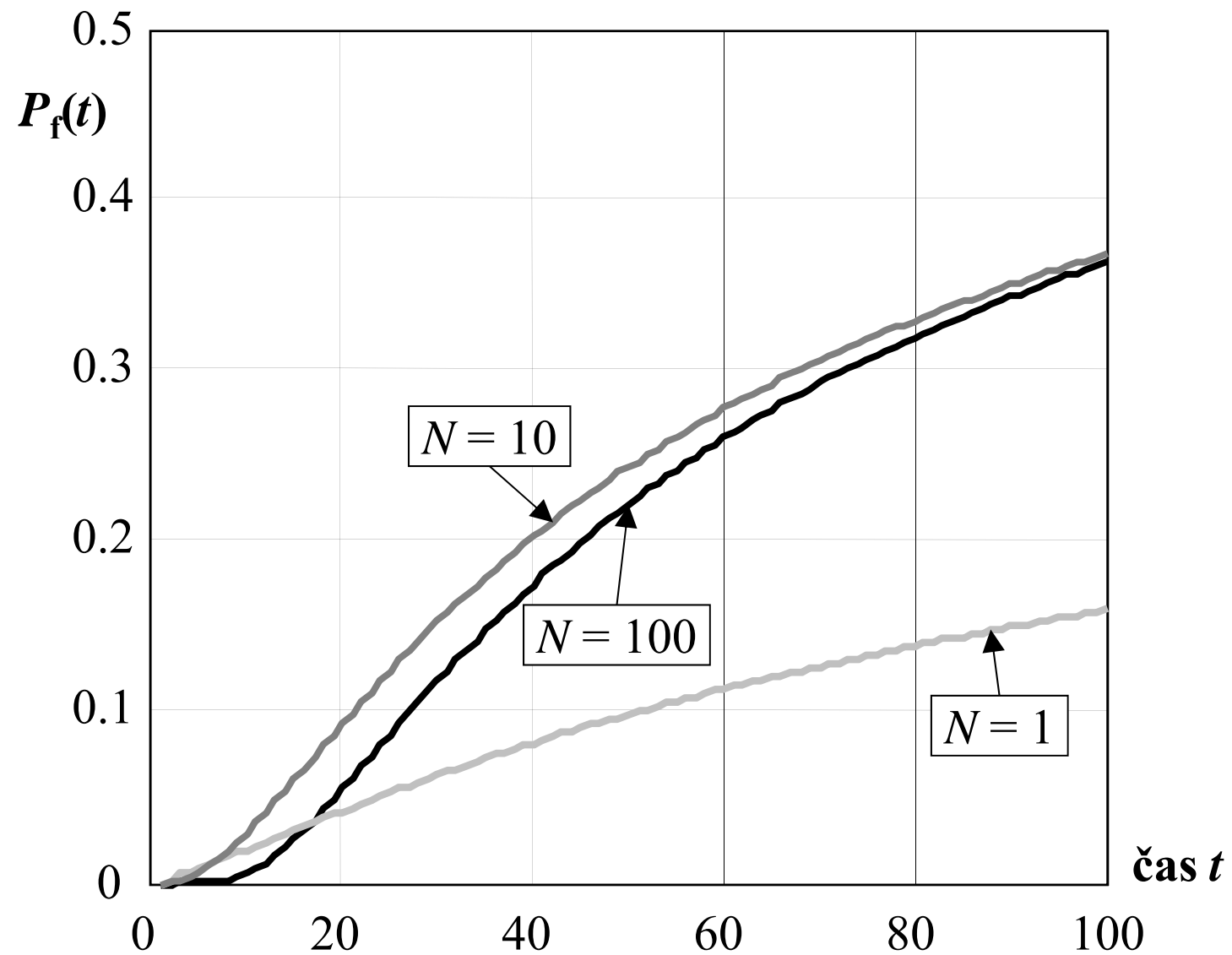
Návrhová hodnota hloubky karbonatace

$$d_d(t) = \sqrt{\left[2 \left(\frac{1 - \left(\frac{0,7}{1,3} \right)^5}{1 - 0,65^5} \right)^{2,5} \cdot 1,61 \times (1,5 \times 5600) \times 0,00082 \right] \sqrt{t} \times \left(\frac{0,0767}{t} \right)^{\frac{(0,1 \times 0,27)^{0,446}}{2}}}$$

hloubka
karbonatace v mm



Závislost P_f na t pro různě rozsáhlé plochy

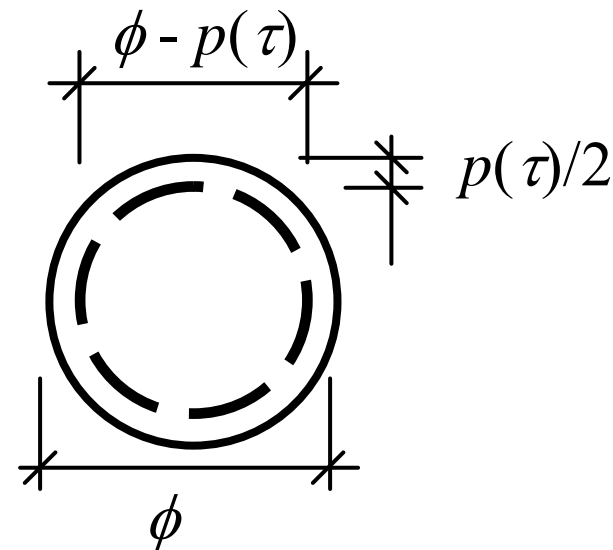
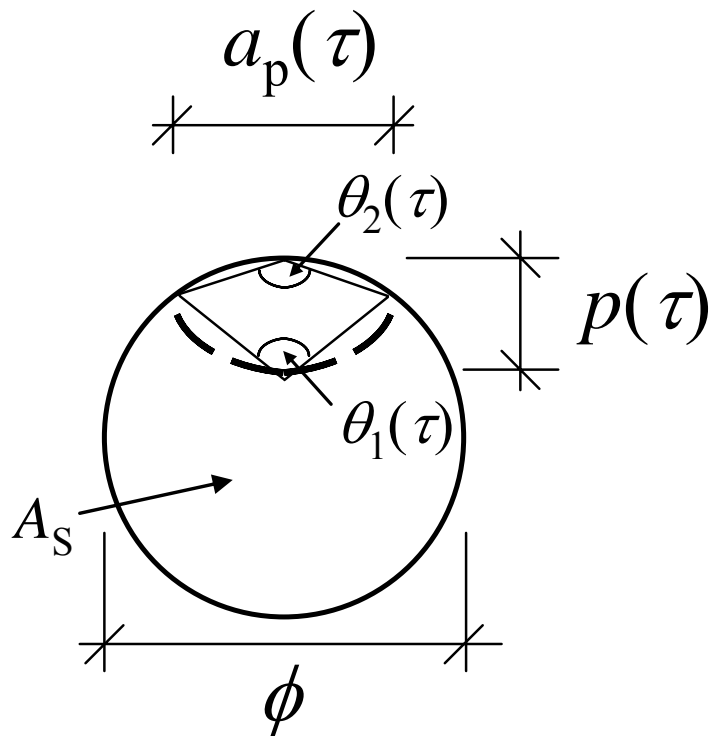


Iniciace způsobená vnikáním chloridů

- vnikání chloridů – difuze iontů a proudění
- závislost na:
 - vlastnostech betonu (složení, pórovitost, mikrostruktura)
 - saturaci pórů
 - okolním prostředím (koncentrace Cl^- , teplota, vlhkost)
- druhý Fickův difusní zákon:
$$C(x,t) = C_0 \{1 - \text{erf}[x / (2\sqrt{t\theta_D D})]\}$$
- pravděpodobnost překročení mezní koncentrace
$$P_{\text{corr}}(x,t) = P[C_r - C(x,t) < 0]$$

Koroze výztuže

- korozní rychlost $i_{\text{corr}}(\tau) = \theta_{i_{\text{corr}}} 0,85 i_{\text{corr}0} \tau^{-0,29}$
- důlková a plošná koroze



Degradace ocelových konstrukcí

- stupně korozní agresivity podle ČSN EN 12500

Korozní agresivita	Typická prostředí (příklady)	
	Vnitřní	Vnější
C1 - velmi nízká	vytápěné prostory s nízkou vlhkostí a zanedbatelným znečištěním (kanceláře, školy)	-
C2 - nízká	nízká četnost výskytu kondenzace a nízké znečištění (sklady, sportovní haly)	Mírné klima, nízké znečištění $\text{SO}_2 < 12 \text{ mg/m}^3$ (venkovské oblasti, malá města)
C3 - střední	střední četnost výskytu kondenzace a střední znečištění z výrobních procesů (výrobní potravin, prádelny, pivovary)	Mírné klima se středním znečištěním (SO_2 : 12 až 40 mg/m^3) nebo malým vlivem chloridů (městské oblasti)
C4 - vysoká	Vysoká četnost výskytu kondenzací a vysoké znečištění z výrobních procesů (průmyslové provozy, bazény)	Mírné klima, oblast s vysokým znečištěním (SO_2 : 40 až 80 mg/m^3) nebo značným vlivem chloridů (znečištěné městské oblasti, průmyslové oblasti, silný vliv solí rozmrazovacích prostředků)
C5 - velmi vysoká	trvalá kondenzace, vysoké znečištění (důlní, podzemní výrobní prostory)	Mírné klima s velmi vysokým znečištěním (SO_2 : 80 až 250 mg/m^3), silný vliv chloridů (průmyslové oblasti, zóny s postřikem slanou vodou)

Hodnoty korozních rychlostí ČSN ISO 9223 a ČSN ISO 9224

Korozní rychlost r_{corr} v $\mu\text{m}/\text{rok}$ pro první rok expozice				
C1	C2	C3	C4	C5
$r_{\text{corr}} \leq 1,3$	$1,3 < r_{\text{corr}} \leq 25$	$25 < r_{\text{corr}} \leq 50$	$50 < r_{\text{corr}} \leq 80$	$80 < r_{\text{corr}} \leq 200$
Průměrná korozní rychlost r_{av} v mm/rok pro prvních 10 let expozice				
C1	C2	C3	C4	C5
$r_{\text{av}} \leq 0,5$	$0,5 < r_{\text{av}} \leq 5$	$5 < r_{\text{av}} \leq 12$	$12 < r_{\text{av}} \leq 30$	$30 < r_{\text{av}} \leq 100$
Ustálená korozní rychlost r_{lin} v mm/rok				
C1	C2	C3	C4	C5
$r_{\text{lin}} \leq 0,1$	$0,1 < r_{\text{lin}} \leq 1,5$	$1,5 < r_{\text{lin}} \leq 6$	$6 < r_{\text{lin}} \leq 20$	$20 < r_{\text{lin}} \leq 90$

Závěrečné poznámky

- Degradace železobetonových konstrukcí:
 - karbonatace a pronikání chloridů
 - důlková a rovnoměrná koroze výztuže
- Ocelové konstrukce – klasifikace podle agresivity prostředí
- Konvenční modely pro pravděpodobnostní rozbor (průměr, variační koeficient, typ rozdělení)
- Postup podle metody dílčích součinitelů zatím většinou chybí

fib Model Code for Service Life Design, 2006

Děkuji za pozornost

Miroslav Sýkora (miroslav.sykora@klok.cvut.cz)