

# Degradační modely

Miroslav Sýkora  
Kloknerův ústav ČVUT v Praze

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

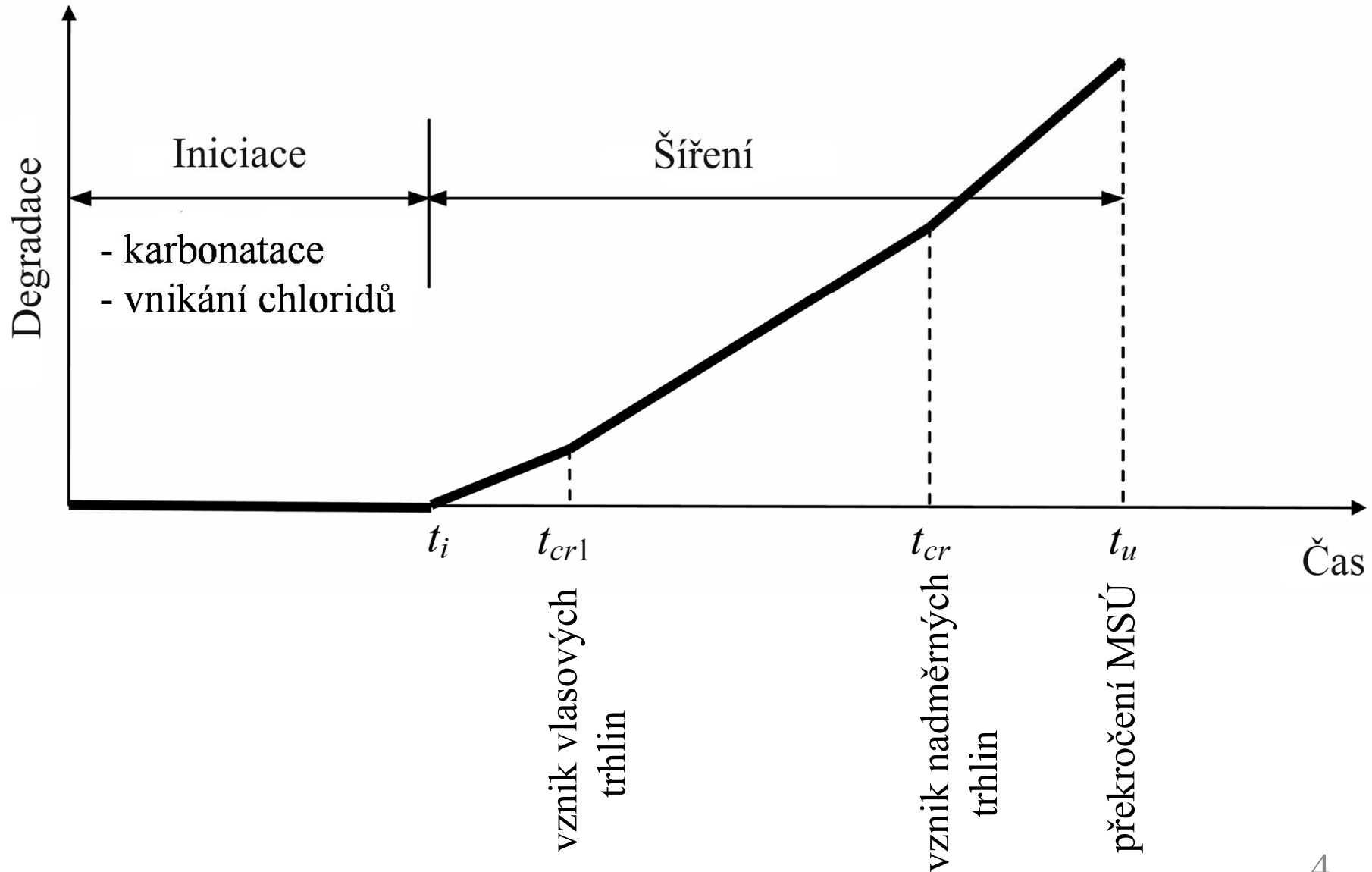
# Motivace



# 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  $\text{CO}_2$

$W(t)$  - lokální klimatické podmínky

*fib Bulletin 59 Condition control and assessment of reinforced concrete structures exposed to corrosive environments, 2011*

*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**
- $k_{e,d} = [(1 - (RH_{\text{skut}} / \gamma_{RH})^5) / (1 - RH_{\text{ref}}^5)]^{2,5}$ 
  - $RH_{\text{skut}}$  (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	<b>1,61</b>	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

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

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

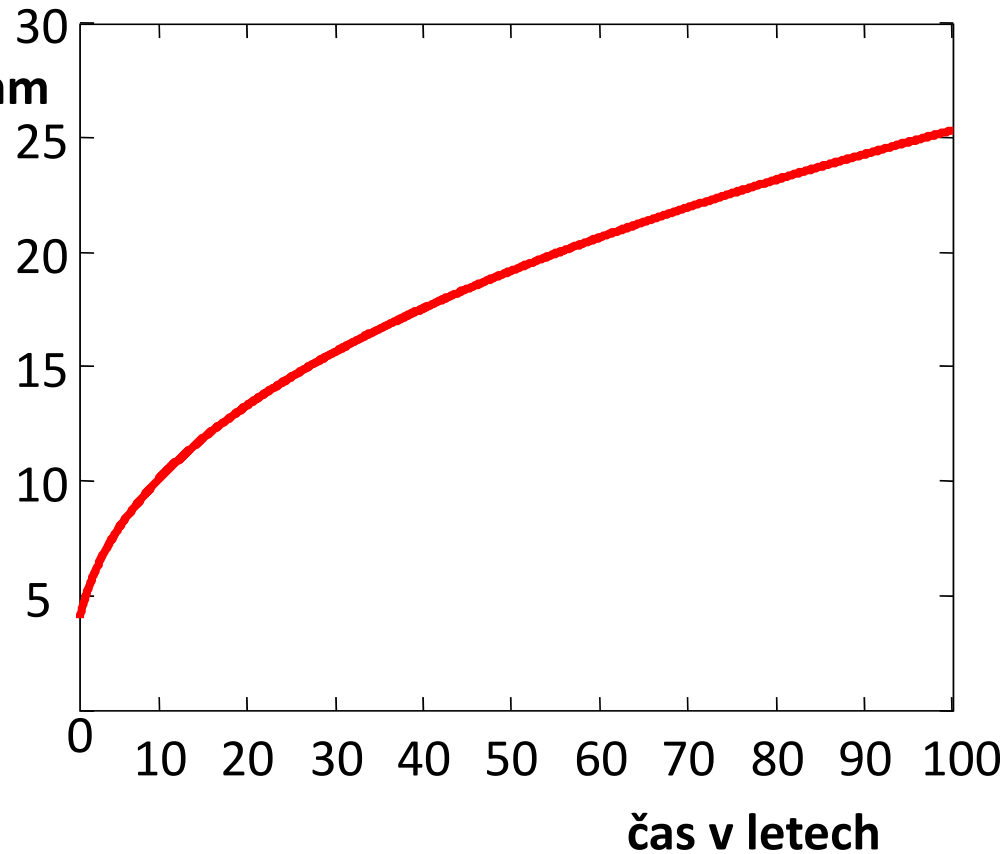
<sup>1</sup> Ekvivalentní vodní součinitel s uvážením vlivu popílku (FA) a křemičitého prachu součiniteli  $k$ . Uvažované objemy: FA – 22 % váhy cementu, SF – 5 % váhy cementu.  
<sup>2</sup> data nejsou k dispozici.

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

# Návrhová hodnota hloubky karbonatace

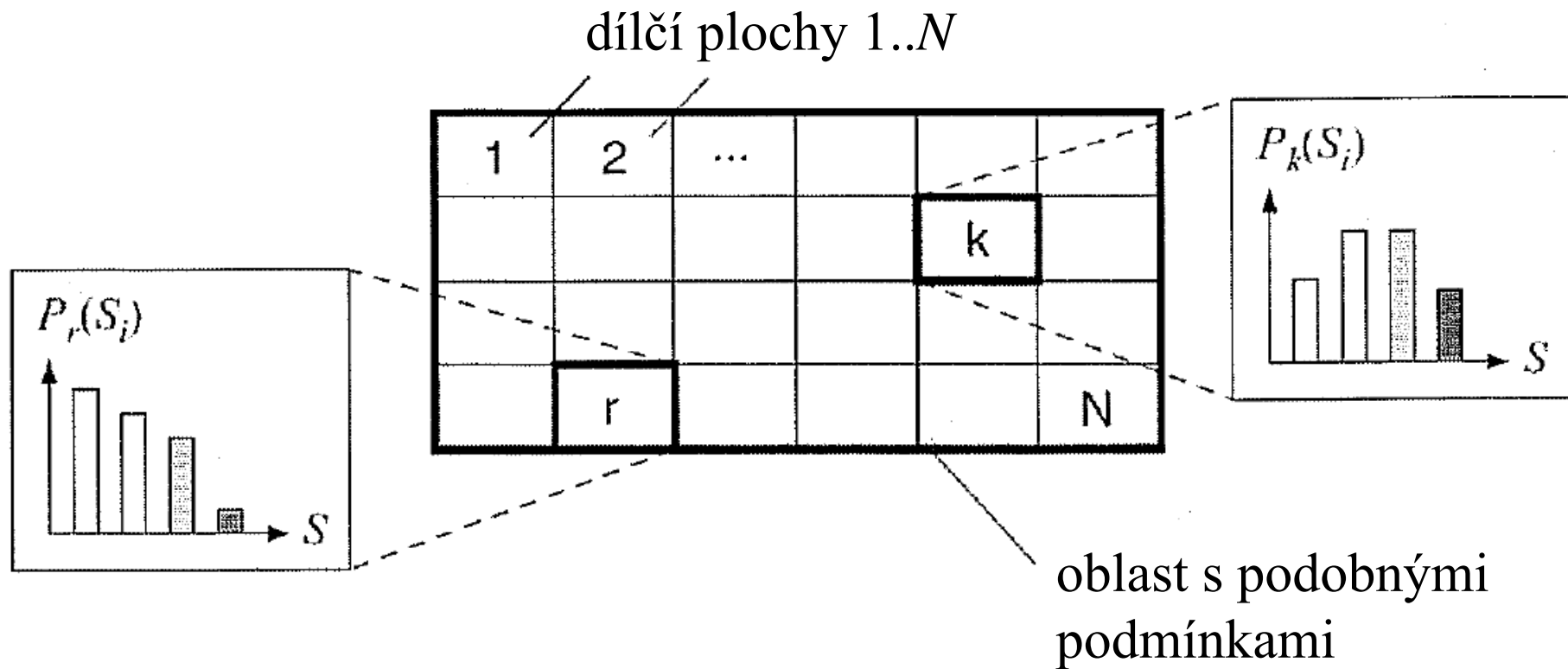
$$d_d(t) = \sqrt{\left[ 2 \left( \frac{1 - \left( \frac{0,7}{1,3} \right)^5}{1 - 0,65^5} \right)^{2,5} \cdot 1,61 \times (1,5 \times 5600) \times 0,00082 \right] \sqrt{t} \times \left( \frac{0,0767}{t} \right)^{\frac{(0,1 \times 0,27)^{0,446}}{2}}}$$

**hloubka  
karbonatace v mm**



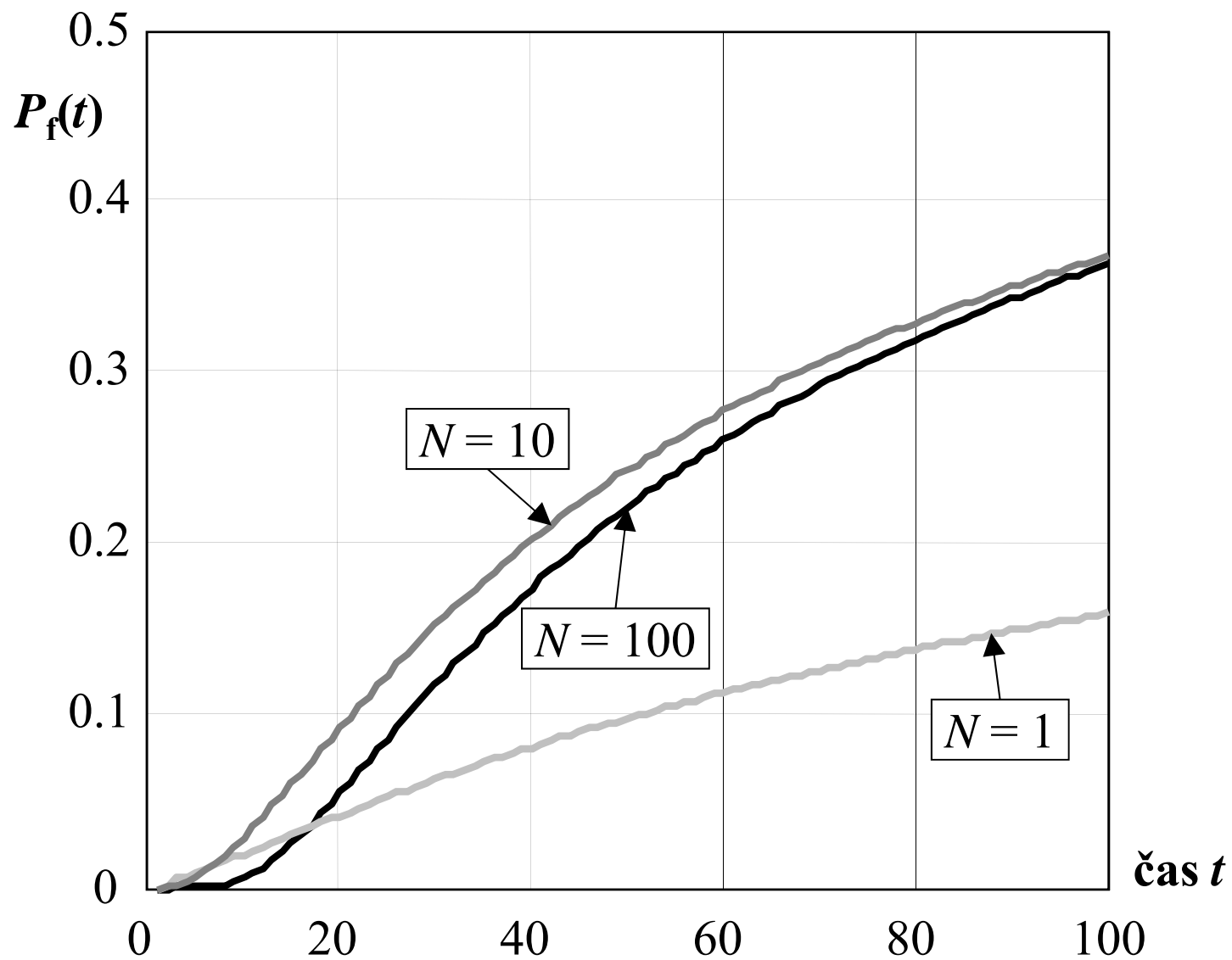


# Modelování rozsáhlých ploch



*fib Bulletin 59 Condition control and assessment of reinforced concrete structures exposed to corrosive environments, 2011*

# Závislost $P_f$ na $t$ pro různě rozsáhlé plochy

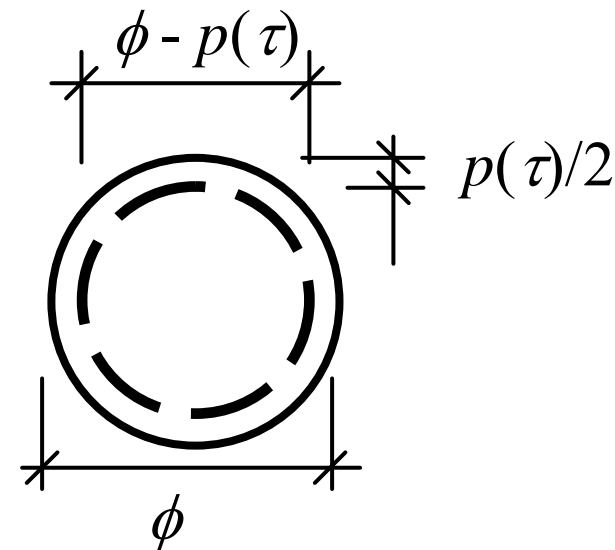
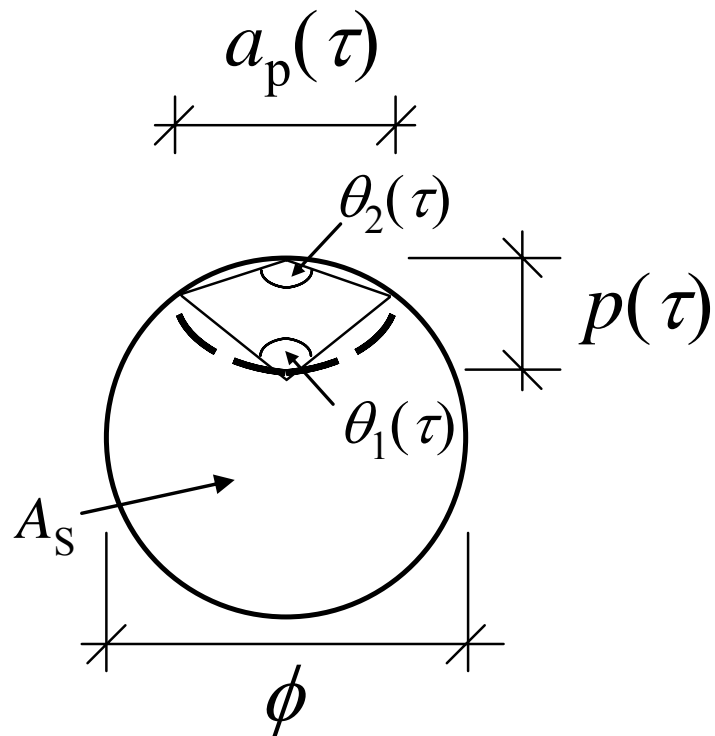


# Iniciace způsobená vnikáním chloridů

- vnikání chloridů – **difuze** iontů a **proudění**
- závislost na:
  - **vlastnostech** betonu (složení, pórovitost, mikrostruktura)
  - **saturaci** pórů
  - okolním **prostředí** (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 ( $\text{SO}_2$ : 12 až $40 \text{ mg/m}^3$ ) 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 ( $\text{SO}_2$ : 40 až $80 \text{ mg/m}^3$ ) 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 ( $\text{SO}_2$ : 80 až $250 \text{ mg/m}^3$ ), silný vliv chloridů (průmyslové oblasti, zóny s postřikem slanou vodou)

# Koncentrace SO<sub>2</sub>

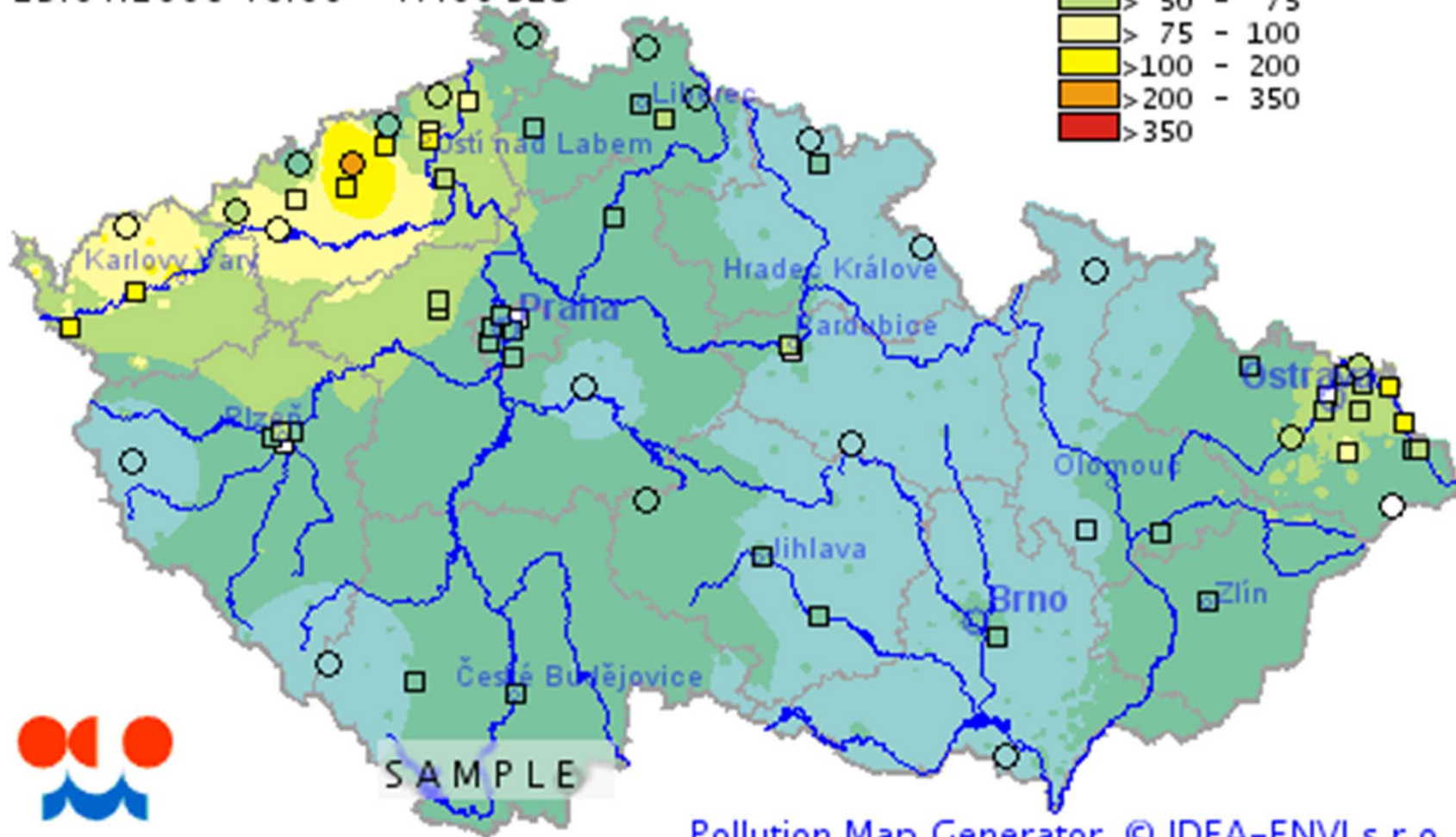
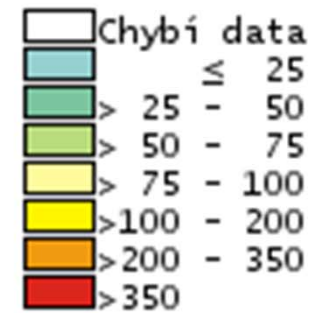
SO<sub>2</sub> – oxid siřičitý

Hodinový průměr

29.01.2006 15:00 – 16:00 UTC

29.01.2006 16:00 – 17:00 SEČ

Koncentrace v µg/m<sup>3</sup>



Pollution Map Generator, © IDEA-ENVI s.r.o.

# Hodnoty korozních rychlostí ČSN ISO 9223 a ČSN ISO 9224

Korozní rychlost $r_{\text{corr}}$ 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 $r_{\text{av}}$ v $\text{mm}/\text{rok}$ 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 $r_{\text{lin}}$ v $\text{mm}/\text{rok}$				
C1	C2	C3	C4	C5
$r_{\text{lin}} \leq 0,1$	$0,1 < r_{\text{lin}} \leq 1,5$	$1,5 < r_{\text{lin}} \leq 6$	$6 < r_{\text{lin}} \leq 20$	$20 < r_{\text{lin}} \leq 90$

**+ životnost ochranných vrstev**

# 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](mailto:miroslav.sykora@klok.cvut.cz))