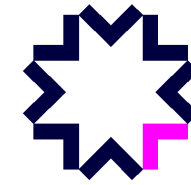




C centre for
E effective and
S sustainable
T transport
I infrastructure



**Centra
kompetence**

CESTI Workshop 2013

Trvanlivost železobetonových prvků - modelování karbonatace, chloridů a vlivu trhlin

Vít Šmilauer, Karel Pohl, Zdeněk Bittnar, Libor Jendele

ČVUT, WP7

*Příspěvek byl zpracován za podpory programu Centra kompetence
Technologické agentury České republiky (TAČR) v rámci projektu
Centrum pro efektivní a udržitelnou dopravní infrastrukturu (CESTI),
číslo projektu TE01020168*

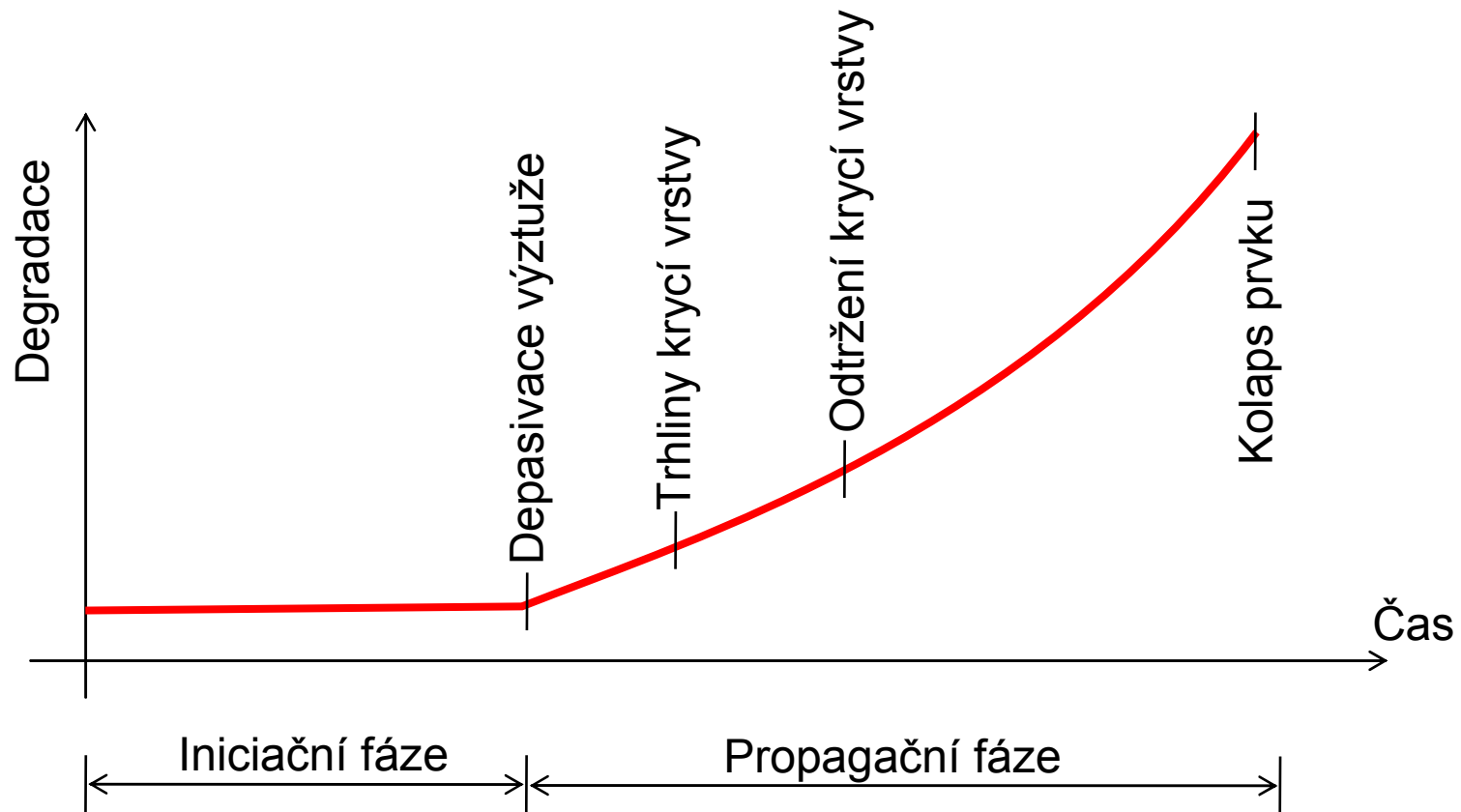


Motivace

- Cena údržby a oprav je 30-40% celkového rozpočtu stavebnictví ve vyspělých zemích
- Koroze ocelové výztuže je hlavní příčinou degradace železobetonových konstrukcí
- Koroze výztuže je způsobena zejména karbonatací a účinky chloridů
- Tloušťka krycí vrstvy významně ovlivňuje životnost
- Beton má širokou variabilitu složení a vlastností
- Přítomnost trhlin významně akceleruje difuzní procesy
- Nutné rozšíření krátkodobých experimentů na dlouhodobé chování pomocí modelování

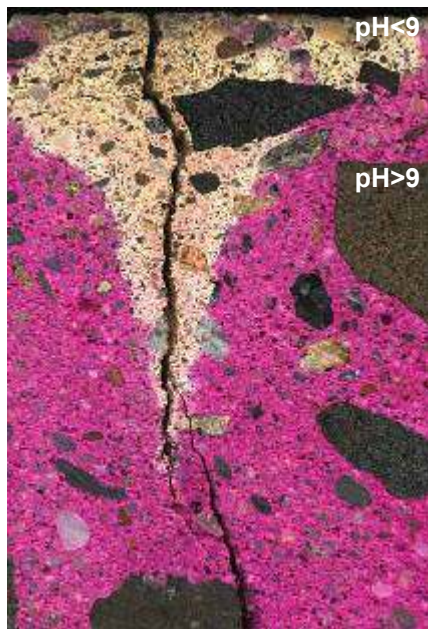
Životnost železobetonového prvku

- Rozhodujícím faktorem je délka iniciační fáze



Karbonatace betonu

- Difúzně řízený proces $\text{Ca(OH)}_2 + \text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{CaCO}_3 + 2\text{H}_2\text{O}$
- Nejrychlejší při relativní vlhkosti 50-70%
- Urychlení karbonatace v okolí trhlin



[www.cmc-concrete.com]



[http://en.wikipedia.org/wiki/Concrete_degradation]

Karbonatace betonu – hloubka karbonatace

- Makroskopicky nepotrhaný beton (Papadakis & Tsimas, 2002), C-OPC (kg/m³), P-SCM (kg/m³), k-vliv příměsí

$$x_c = \sqrt{\frac{2D_{e,CO_2}CO_2}{0.218(C + kP)}}\sqrt{t} = A_1\sqrt{t}$$

- Empirická efektivní difusivita (Papadakis & Tsimas, 2002)

$$D_{e,CO_2} = 6.1 \cdot 10^{-6} \left(\frac{[W - 0.267(C + kP)]/1000}{\frac{C+kP}{\rho_c} + \frac{W}{\rho_w}} \right)^3 \cdot (1 - RH)^{2.2}$$

- Akcelerace vlivem trhlin (Kwon & Na, 2011)

$$x_c(t) = (2.816\sqrt{w} + 1)A_1\sqrt{t}$$

- Inkrementální formulace rostoucí trhliny

$$\Delta x_c(t) = \frac{(2.816\sqrt{w_{i+1}} + 1)A_1}{2\sqrt{t_{i+0.5}}}\Delta t + \frac{2.816A_1\sqrt{t_{i+0.5}}}{2\sqrt{w_{i+0.5}}}\Delta w$$

Karbonatace betonu – příklad

- RH = 60%
- Krytí výztuže 30 mm

Šířka trhliny (mm)	Beton C=400 kg/m ³ P(fly ash)=50 kg/m ³ w/b=0.45	Beton C=200 kg/m ³ P=0 kg/m ³ w/b=0.45
0	246	157
0.1	69.7	44.5
0.2	49.2	31.4
0.3	39.1	24.9

Transport chloridů – formulace problému

- Koroze výztuže nastává při $Cl > \sim 0.6\%$ hmotnosti pojiva
- Prostředí XS, XD: slaná voda, příliv/odliv, postřik, atmosféra
- 1D transport iontů

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

- C_s je obsah Cl v povrchové vrstvě (kg/m^3)
- D_m je střední (mean) difúzní koeficient (m^2/s)
- Akcelerace v přítomnosti trhlin (Kwon, Na, Park, Jung, 2009)

$$f(w) = 31.61w^2 + 4.73w + 1$$

Transport chloridů – difúzní koeficient

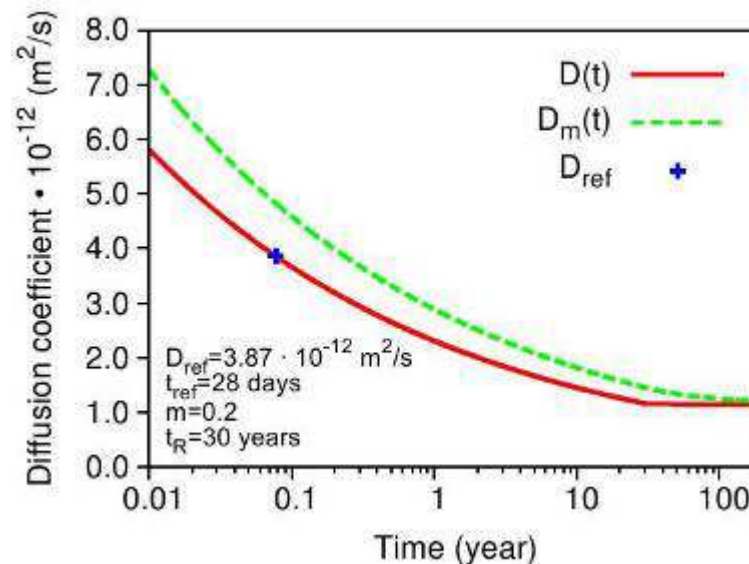
- Časově závislý

$$D(t) = D_{ref} \left(\frac{t_{ref}}{t} \right)^m$$

- Pro 1D analytické řešení nutno průměrovat

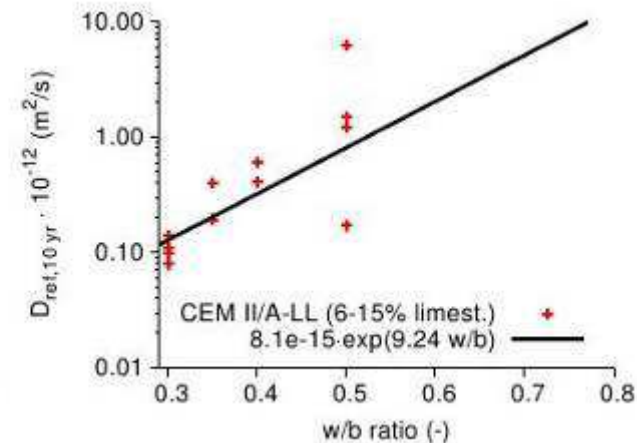
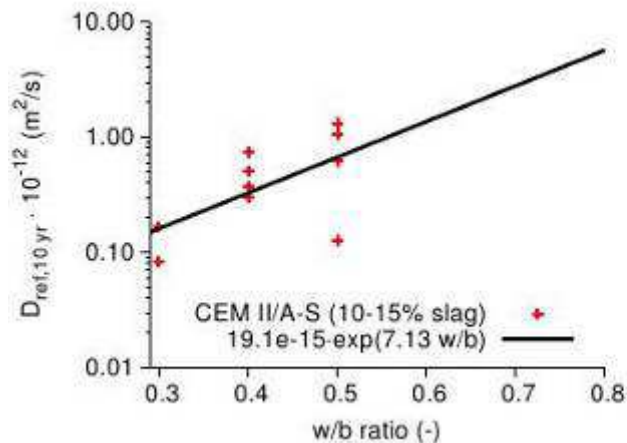
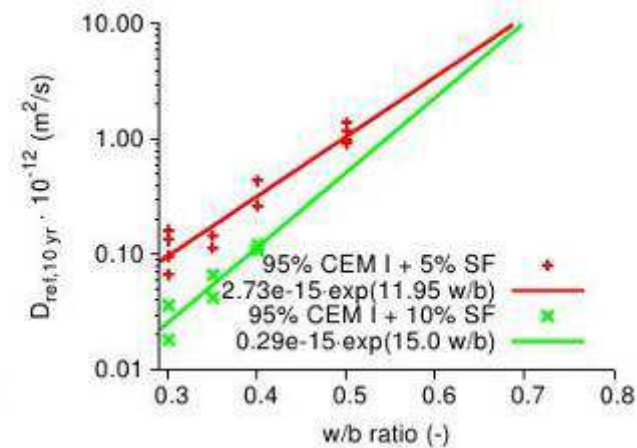
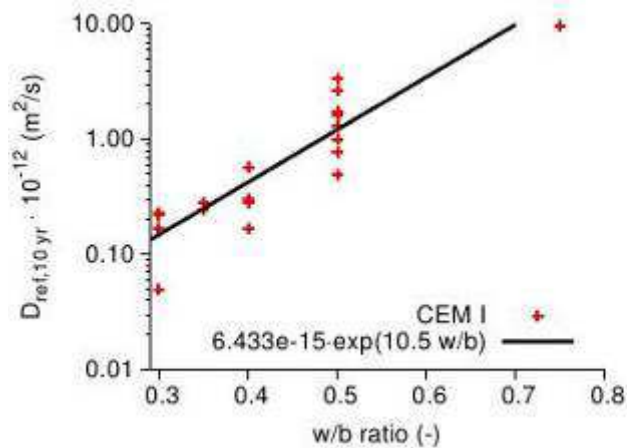
$$D_m(t) = \frac{1}{t} \int_0^t D_{ref} \left(\frac{t_{ref}}{\tau} \right)^m d\tau = \frac{D_{ref}}{1-m} \left(\frac{t_{ref}}{t} \right)^m, \quad t < t_R,$$

$$D_m(t) = D_{ref} \left[1 + \frac{t_R}{t} \left(\frac{m}{1-m} \right) \right] \left(\frac{t_{ref}}{t_R} \right)^m, \quad t \geq t_R,$$



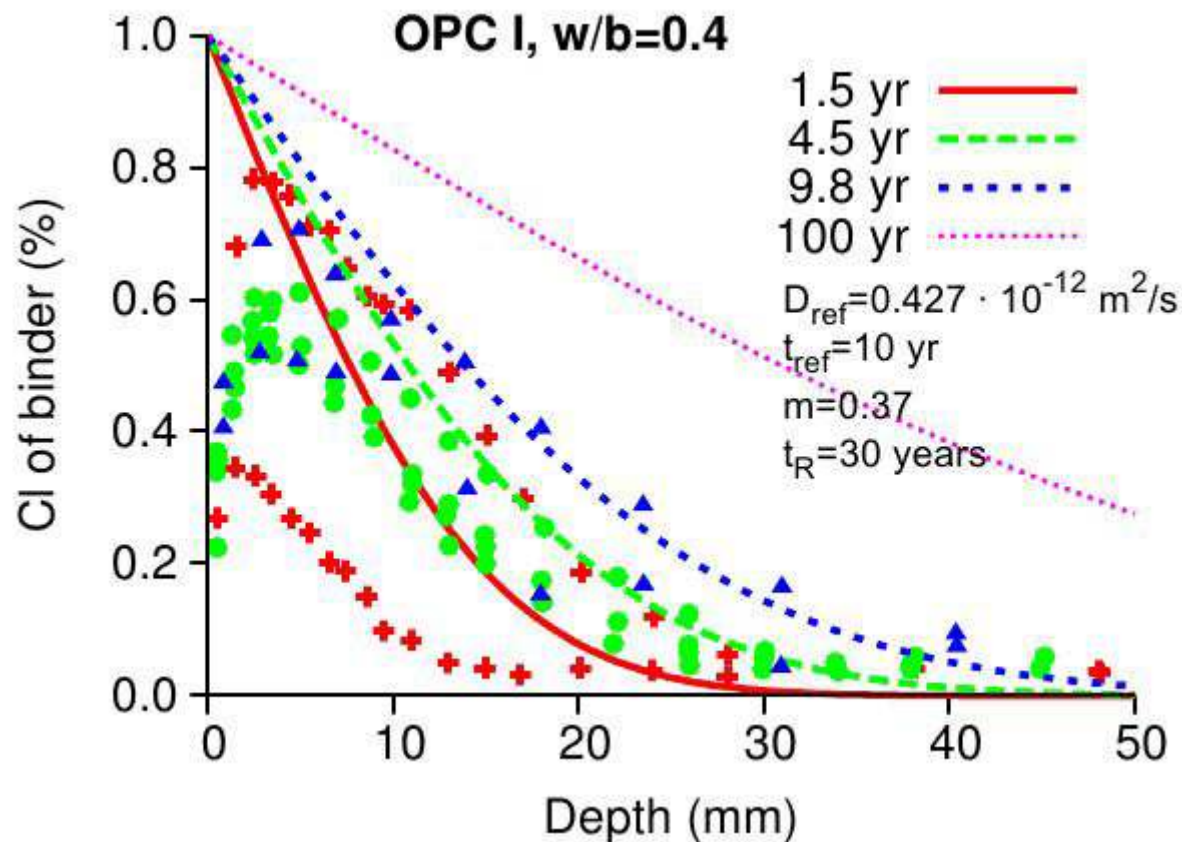
Transport chloridů – experimentální data

- Expozice 10 let ve slaném postřikovém prostředí dálnice (Luping & Utgenant, 2007)



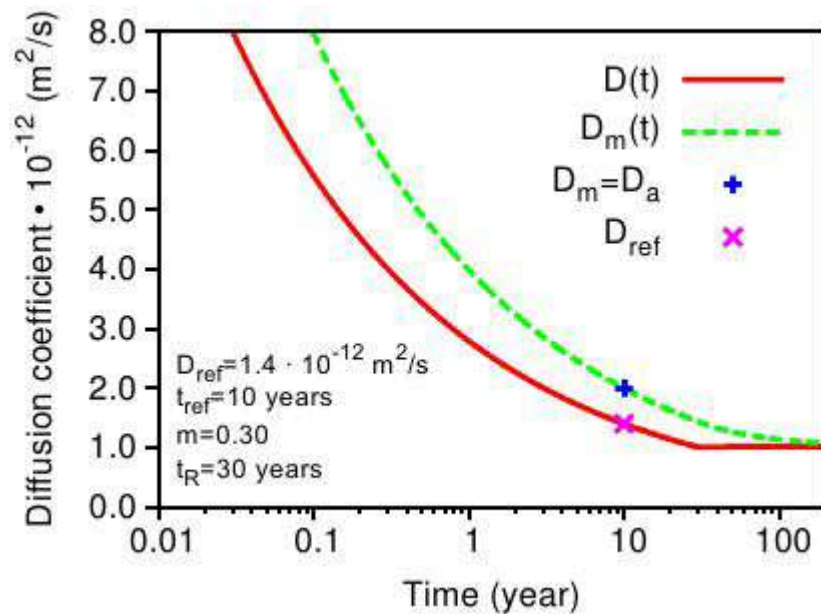
Transport chloridů – profily

- Expozice 10 let ve slaném postřikovém prostředí dálnice (Luping & Utgenant, 2007)



Transport chloridů – příklad

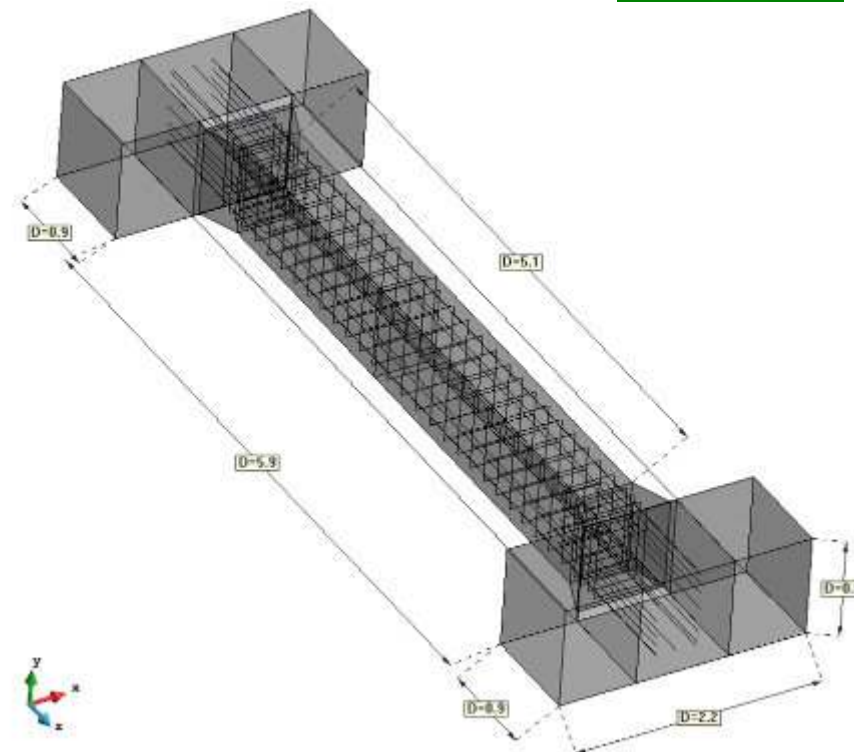
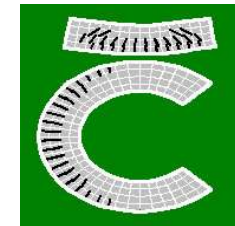
- Indukční čas pro beton ve slané vodě
- Krytí výztuže 100 mm
- $D_{ref}=1.4e-12$ m²/s, $C_s=10.3\%$, $C_{crit}=1.85\%$



Šířka trhliny (mm)	Beton w/b=0.55
0	74.58
0.1	36.02
0.2	15.70
0.3	7.76

Víceúrovňová simulace testu RG8

- Sdružená hydro-termo-mechanická analýza
- Výpočet v prostředí ATENA
- Omezené smršťování

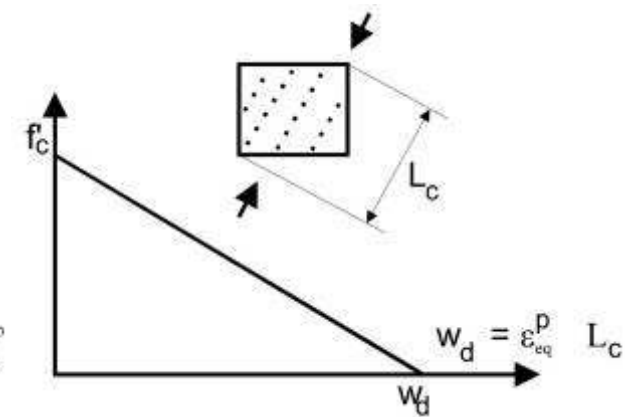
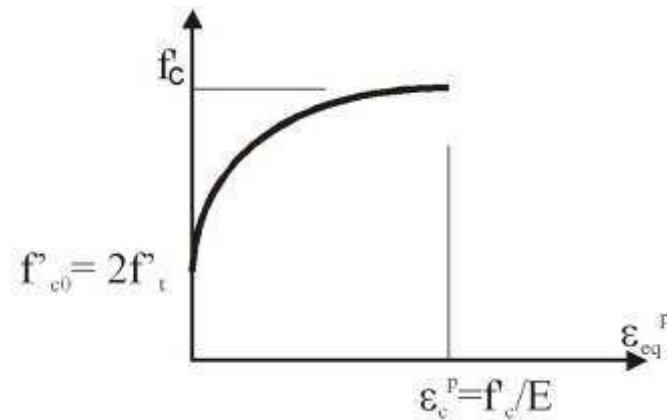
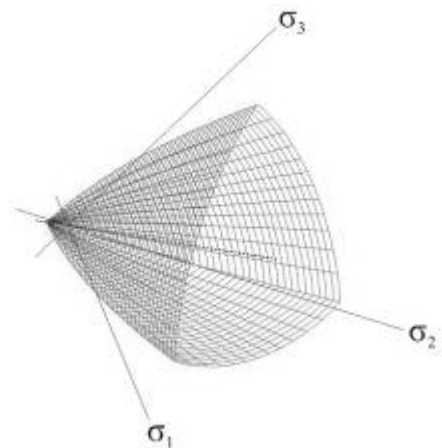
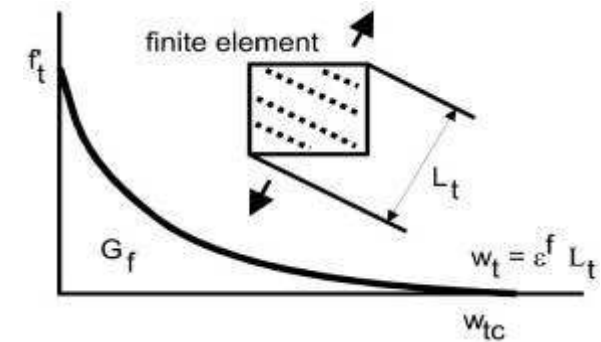


<http://cheops.necs.fr/>

Víceúrovňová simulace testu RG8

Krátkodobý mechanický model

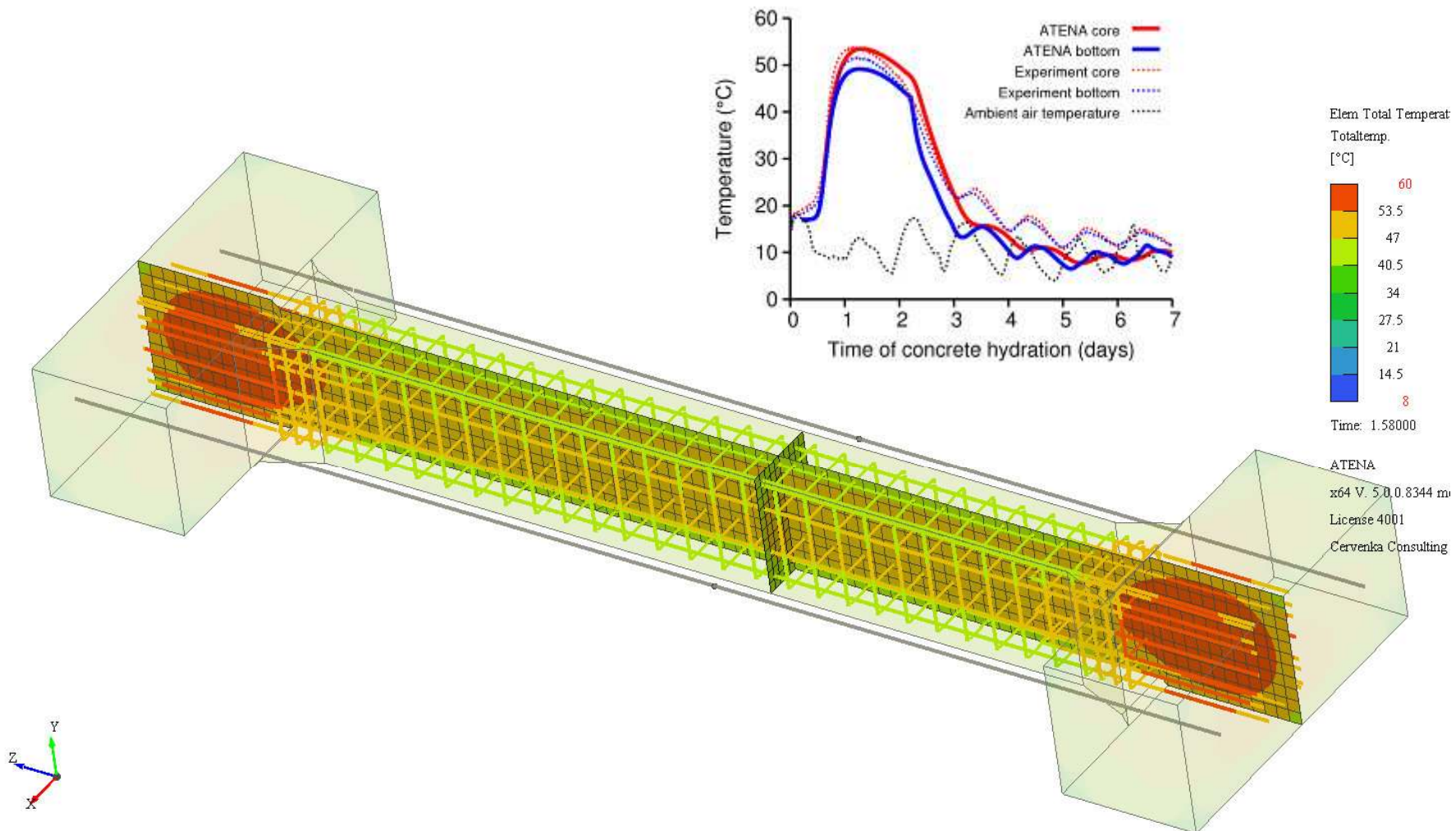
- Ortotropní elasto-plastický model s poškozením
- Dekompozice deformace $\dot{\sigma}_{ij} = D_{ijkl} \cdot (\dot{\epsilon}_{kl} - \dot{\epsilon}_{kl}^p - \dot{\epsilon}_{kl}^f)$
- Rankinovo kritérium, Hordijkův zákon
- Plasticita – Willam a Menetrey



Víceúrovňová simulace testu RG8

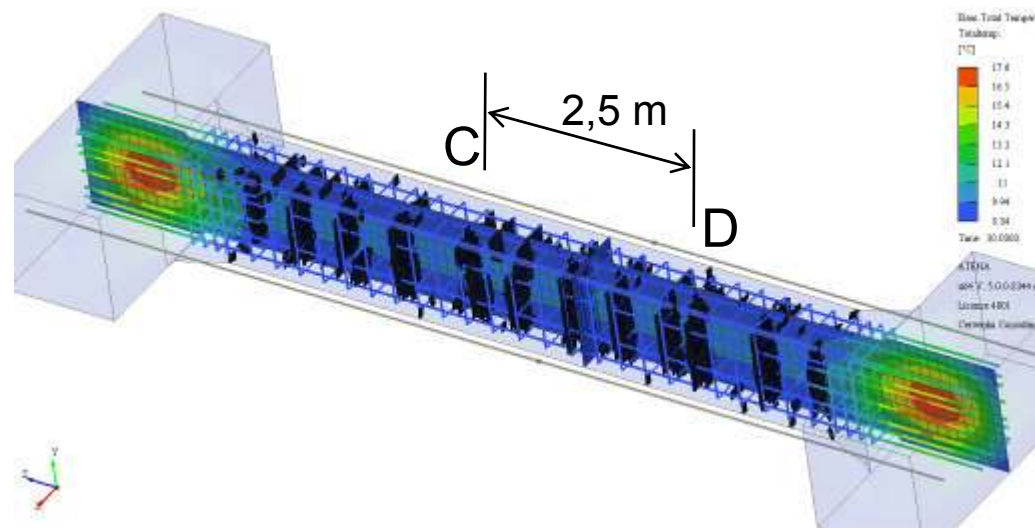
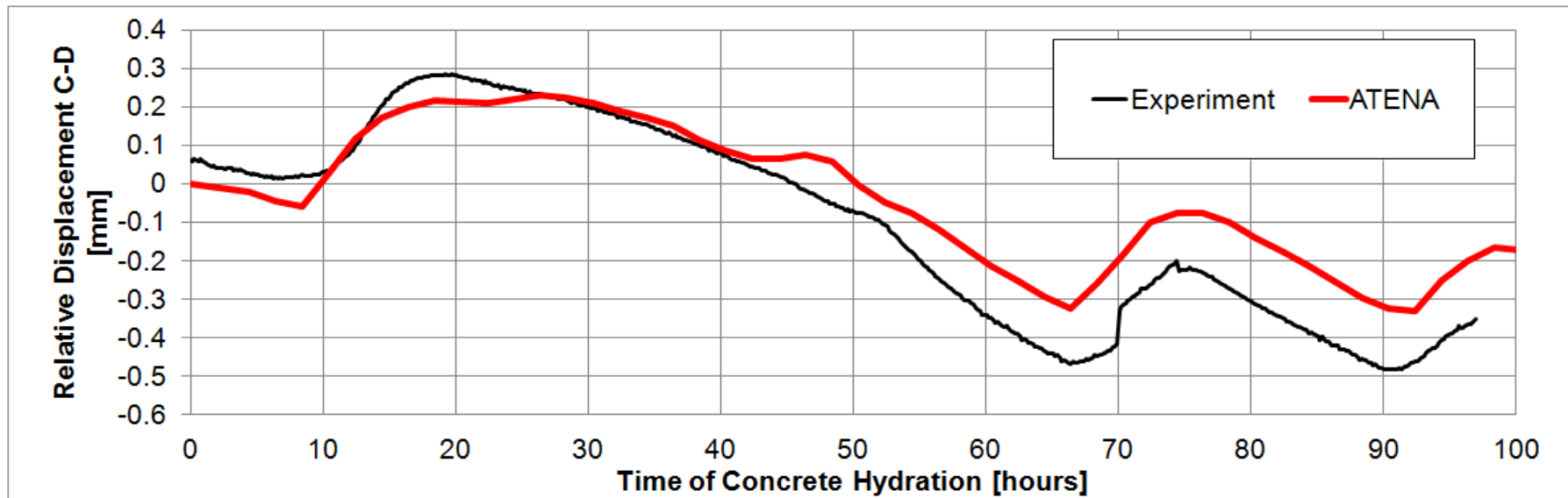
Teplotní pole během hydratace

- Maximální teplota ve 38 hodinách



Víceúrovňová simulace testu RG8

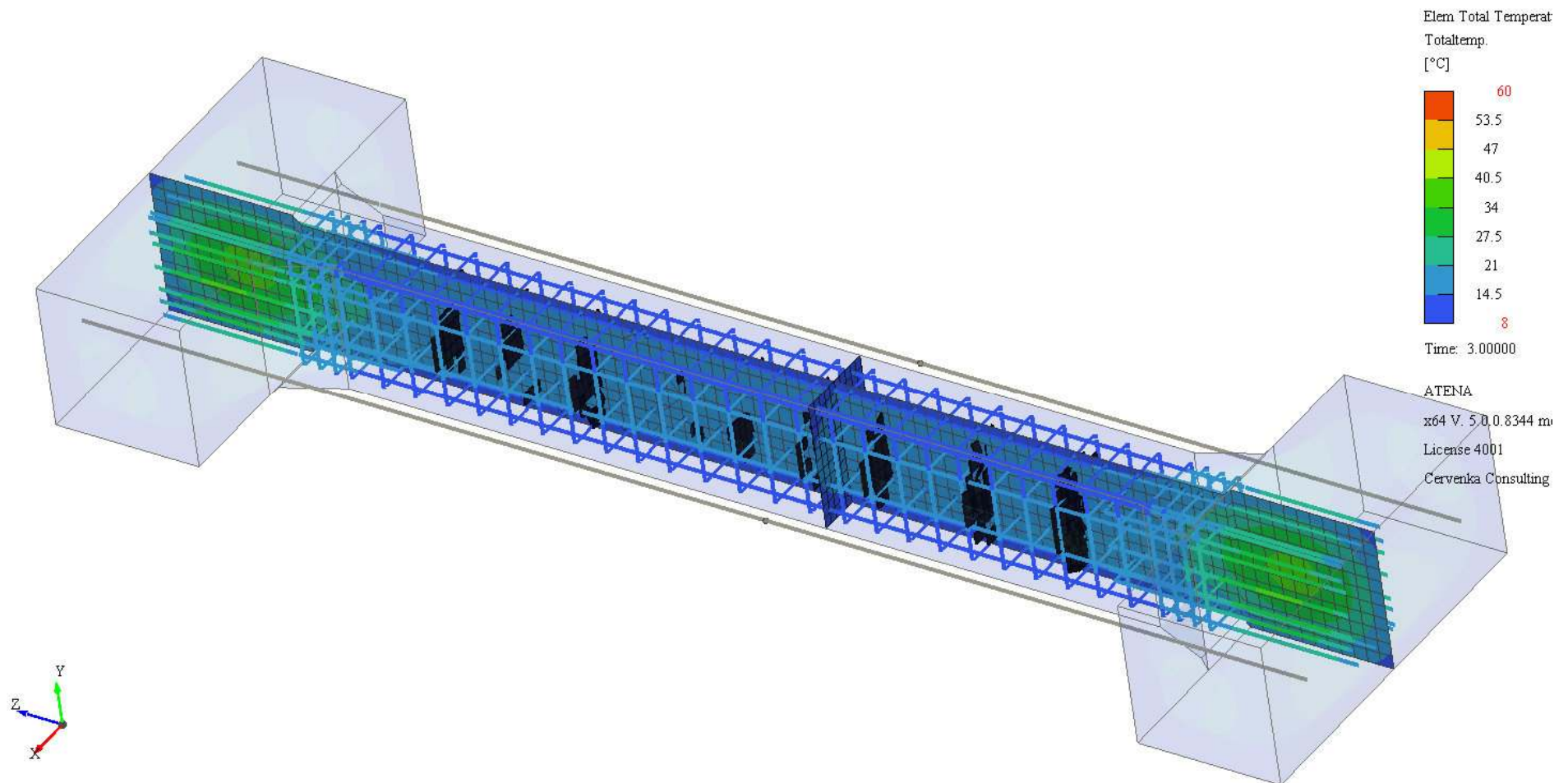
Výsledky měření posunu C-D



Víceúrovňová simulace testu RG8

Trhliny

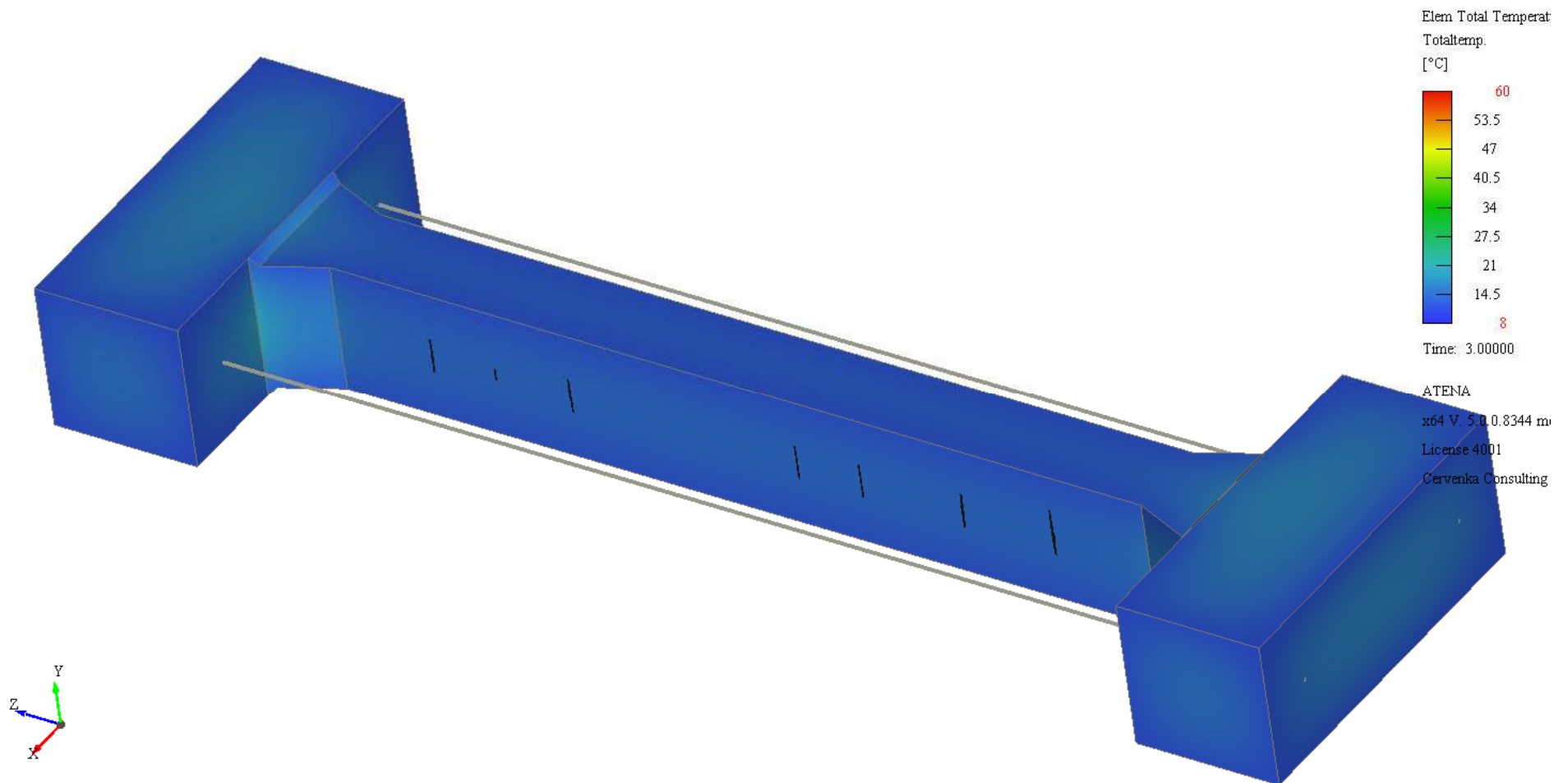
- Stav trhlin ve 72 hodinách



Víceúrovňová simulace testu RG8

Trhliny

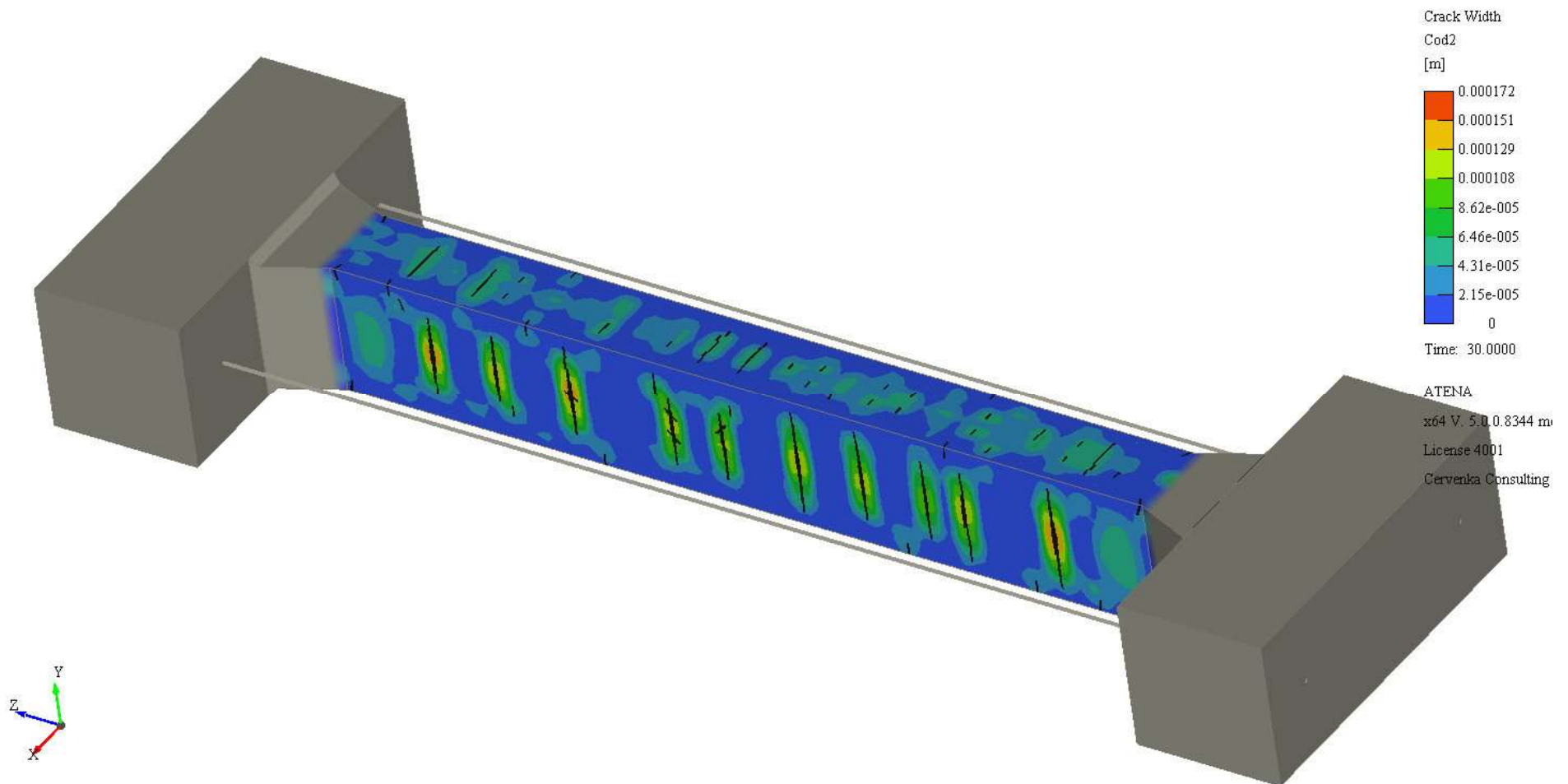
- Stav trhlin ve 72 hodinách



Víceúrovňová simulace testu RG8

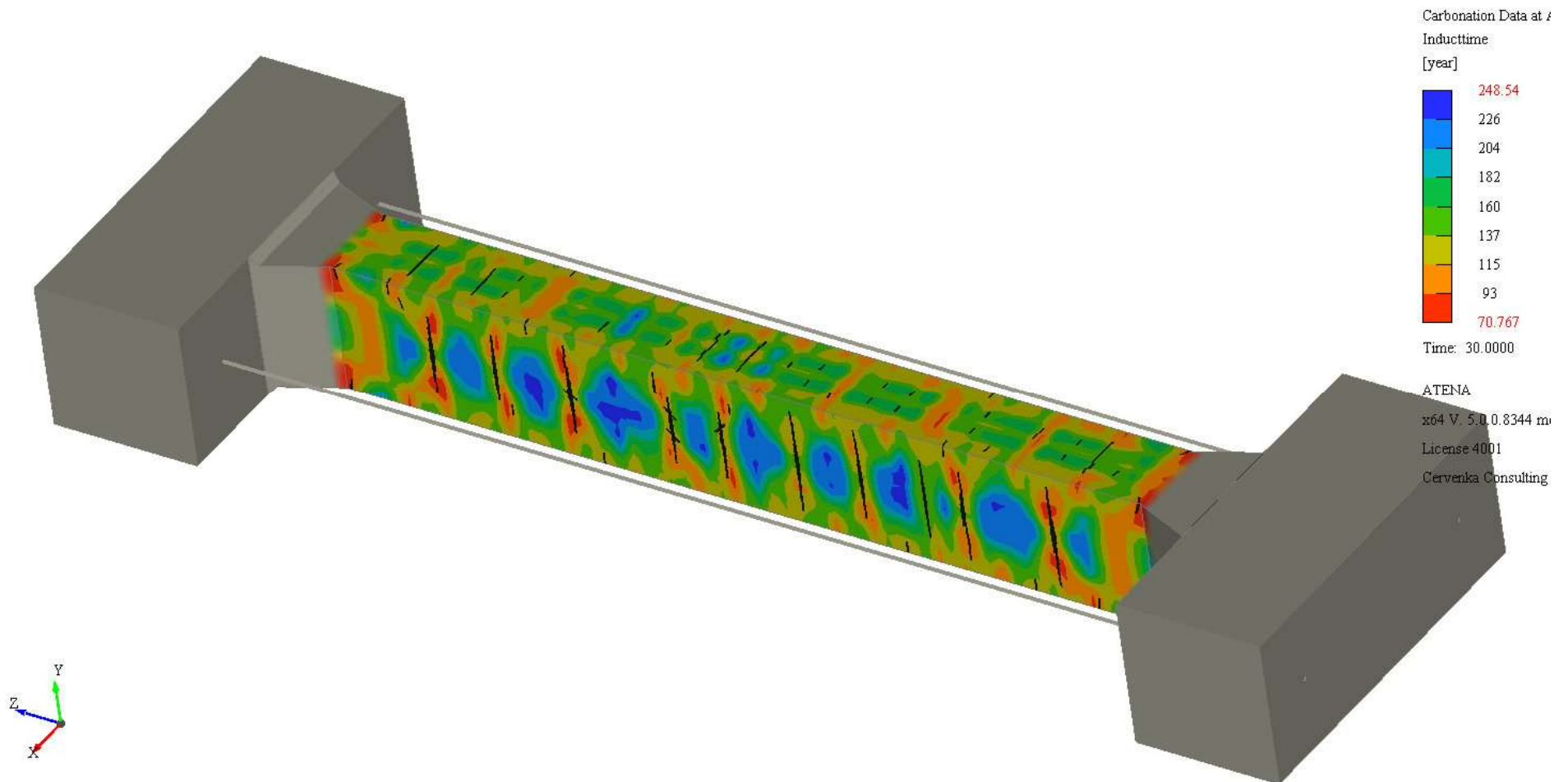
Trhliny

- Stav trhlin ve 30 dnech



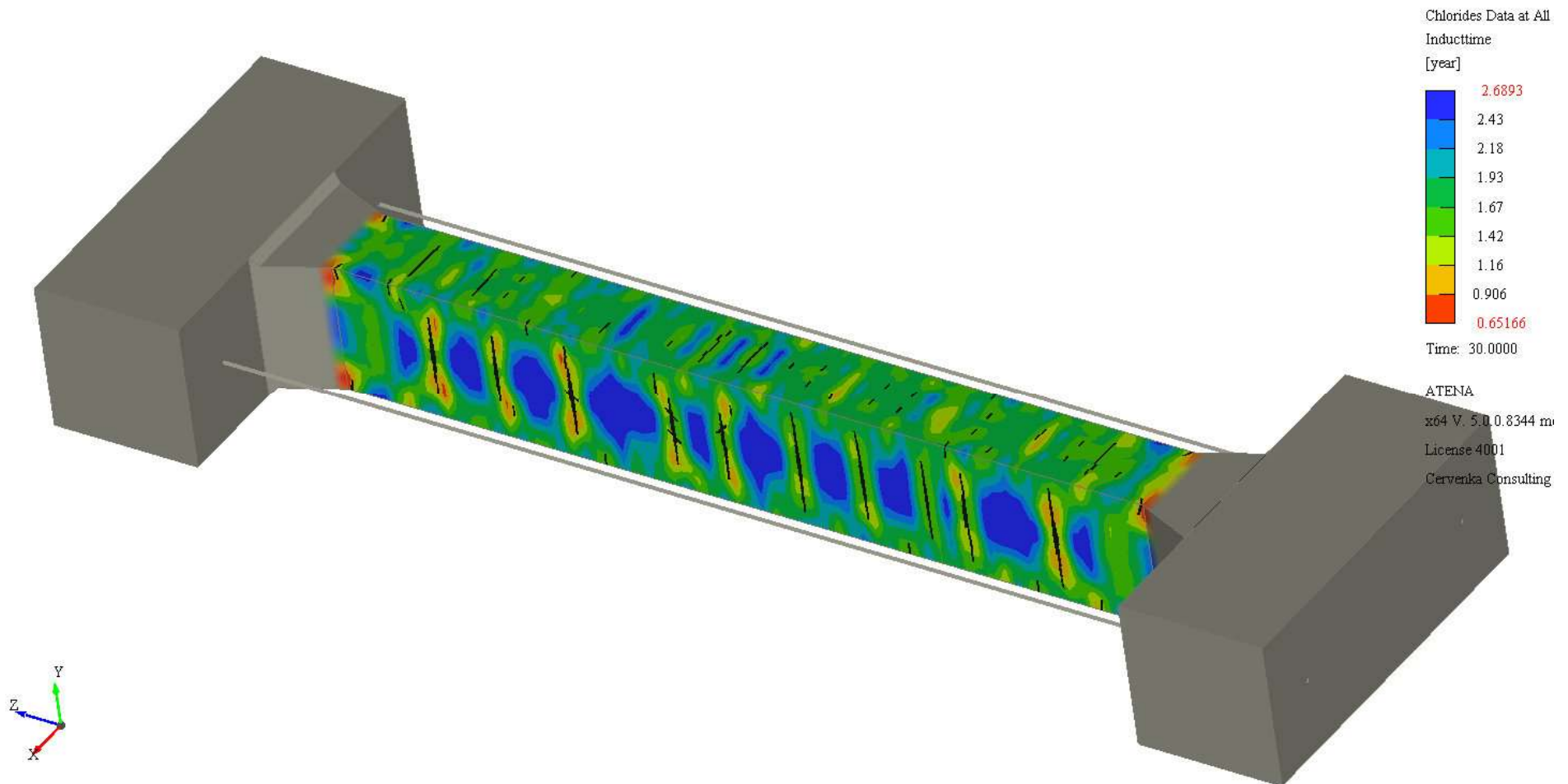
Víceúrovňová simulace testu RG8

- Karbonatace, 70% RH, krytí 30 mm, indukční čas



Víceúrovňová simulace testu RG8

- Chloridy, slaná voda, krytí 30 mm, indukční čas



Závěr

- Trhliny 0,3 mm zkracují indukční čas přibližně 6x pro karbonataci a chloridy
 - Omezení makrotrhlin je základní požadavek trvanlivého betonu
- Difúzní koeficient vykazuje velký rozptyl
 - Dlouhodobá měření jsou věrohodnější než krátkodobá data
- Nižší vodní součinitel prodlužuje indukční čas
 - Zároveň zvětšuje autogenní smršťování betonu, které vytváří makrotrhliny
- Uvedené modely neuvažují propagační fázi, která prodlužuje celkovou životnost konstrukce