

Nelineární analýza a simulace jako nástroj pro navrhování a posuzování železobetonových mostů

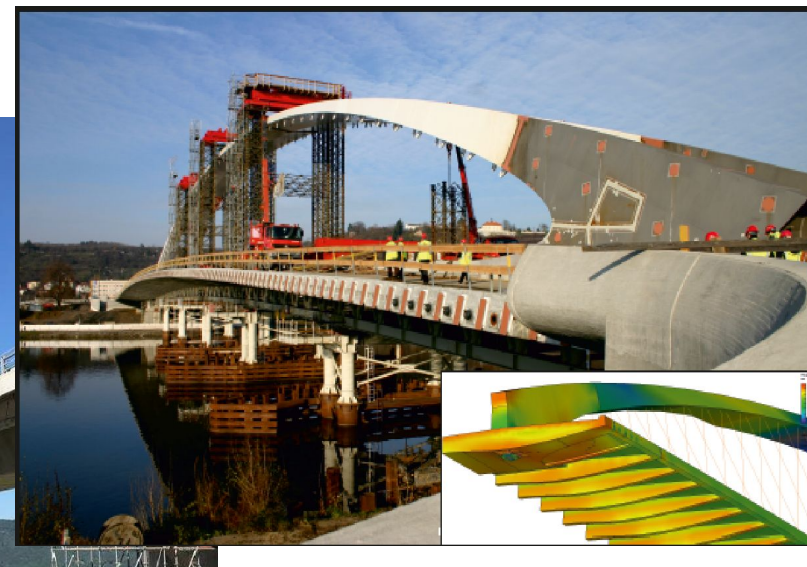
Jan Červenka, Jiří Rymeš,
Radomír Pukl
Červenka Consulting s.r.o.
Praha

2022 INTERNATIONAL ACCELERATED BRIDGE CONSTRUCTION CONFERENCE:
Fully In-Person Conference
December 7-9, 2022, Miami FL



Opportunities To Exhibit and Sponsorships

SCAN ME



OBSAH

Nelineární analýza ŽB konstrukcí v praxi

Bezpečnostní formáty – fib Model Code 2010, Eurokódy

Modelové nejistoty

Ověření a soutěžní slepé předpovědi

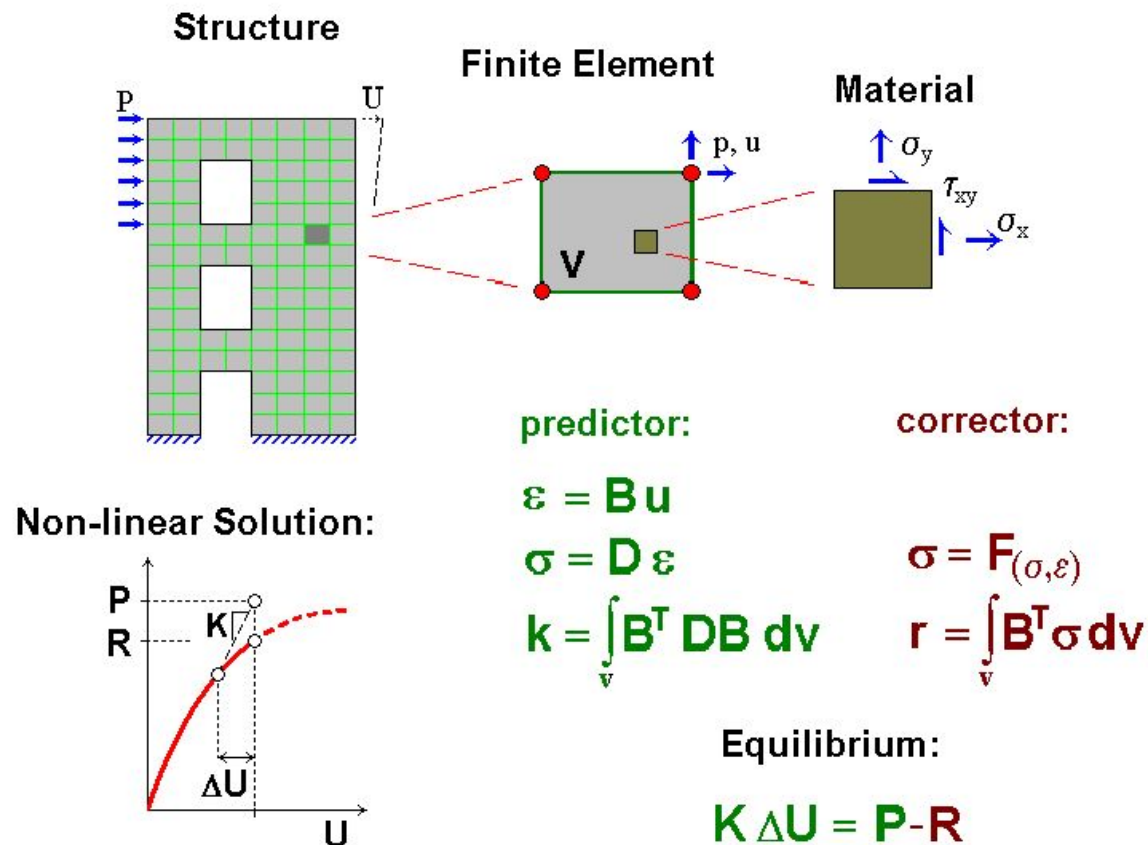
Příklady využití

Motivace:
Standartní modely pro posouzení konstrukcí jsou vyvinuty a založeny na jednoduchých experimentech a konstrukčních tvarech.

V praxi ale navrhujeme a posuzujeme často rozměrné konstrukce složitých tvarů:



Pro nelineární výpočty se nejčastěji používá MKP s tzv. „Smeared-crack“ formulací a modelem pásu trhlin (crack band model)



Ngo & Scordelis (1967)

Rashid (1968)

Červenka V. & Gerstle (1971)

Suidan & Schnobrich (1973)

Lin & Scordelis (1975)

De Borst (1986)

Rots & Blaauwendrad (1989)

Pramono & Willam (1989)

Etse (1992), Lee & Fenves (1998).

Bažant, Z.P. & Oh, B.H., 1983.

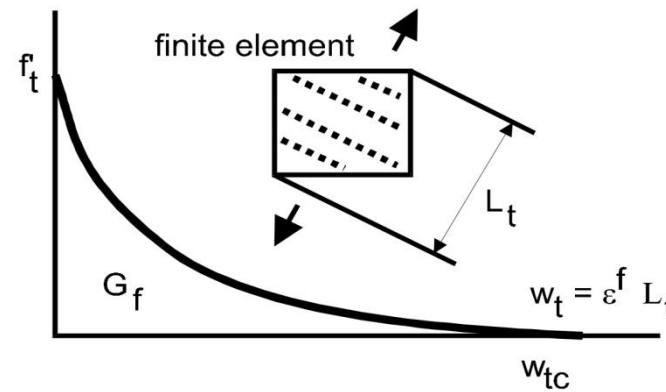
Crack band theory for fracture of concrete.

Materials and Structures, RILEM 16 (3), 155–177.

Lomově - plastický model: ortotropní Smeared-crack model, Cervenka et. al. 1998, 2008

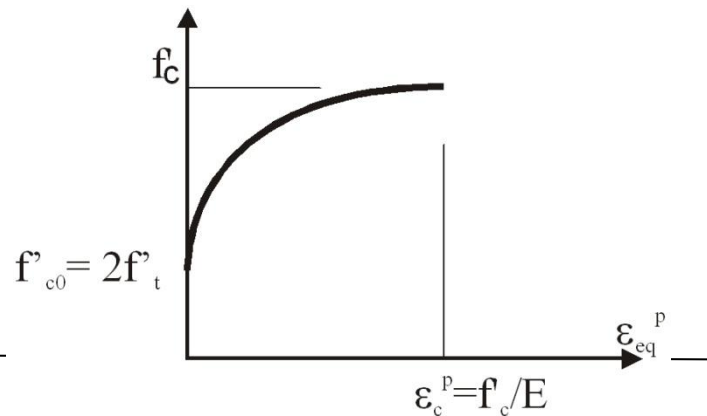
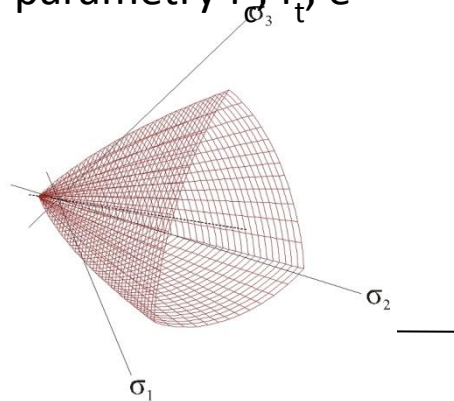
Dekompozice deformace: $\sigma_{ij} = D_{ijkl} \cdot (\dot{\epsilon}_{kl} - \dot{\epsilon}_{kl}^p - \dot{\epsilon}_{kl}^f)$

Rankinovo kritérium
Hordijkův zákon tahového změkčování

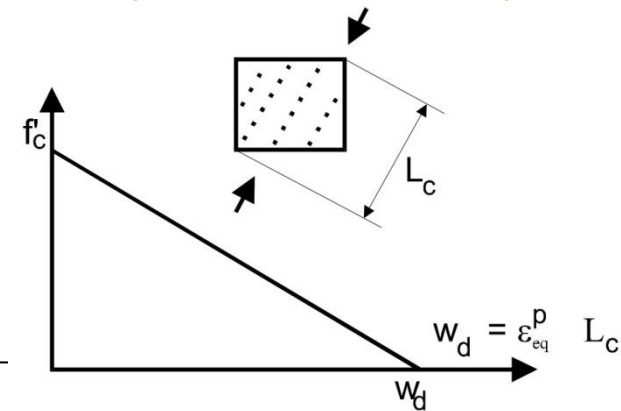


**Model pásu trhlin
(Crack band model)**

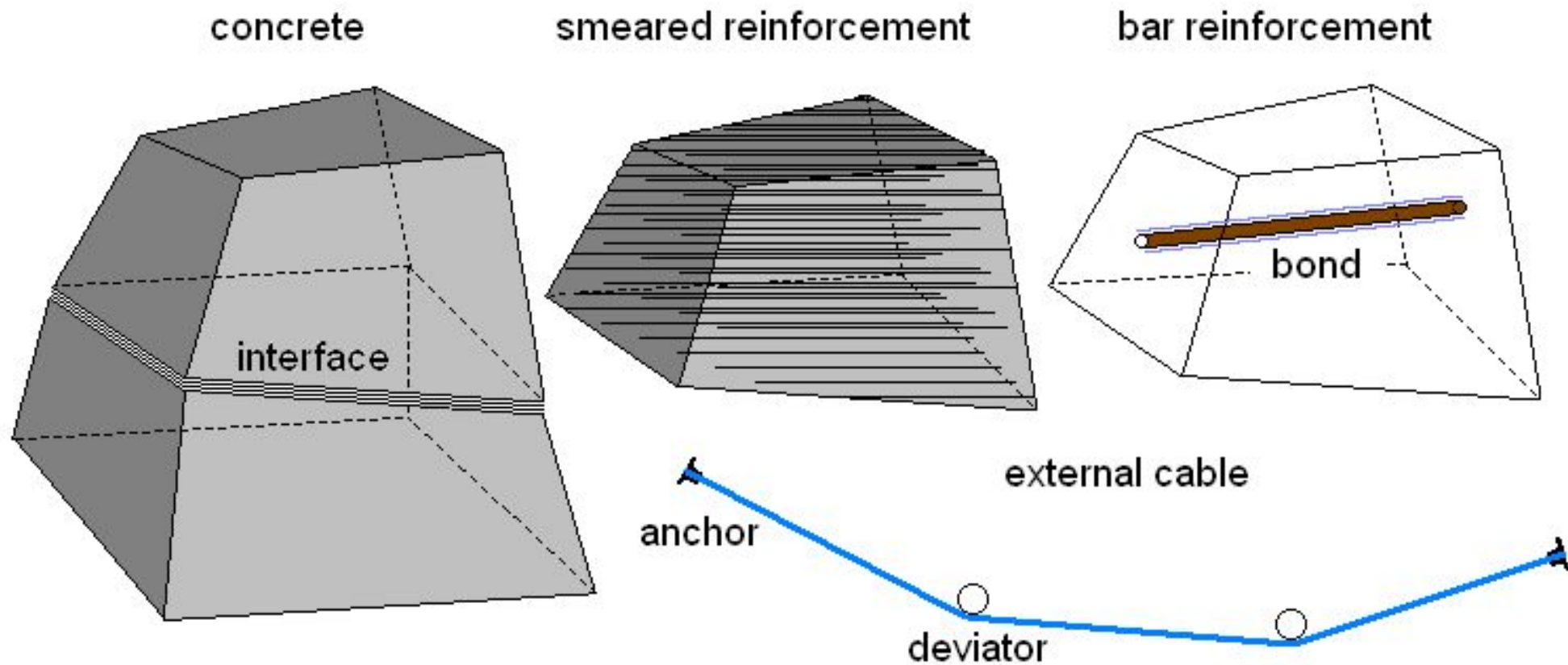
Chování v tlaku - plasticita
Willam & Menetrey kritérium porušení
3 parametry f_c, f_t, e



**Model pásu drčení
(Crush band model)**

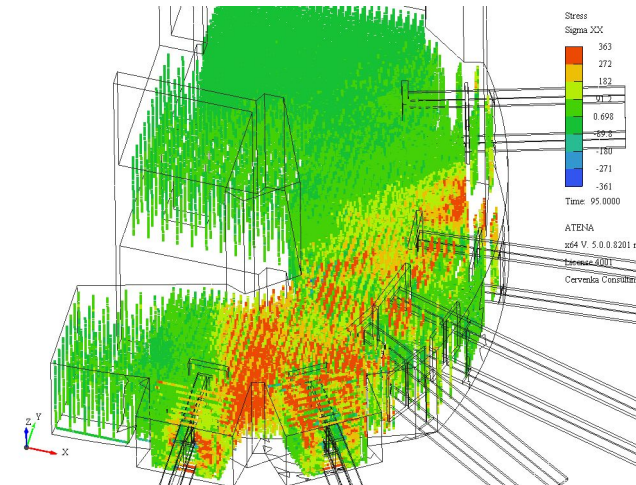
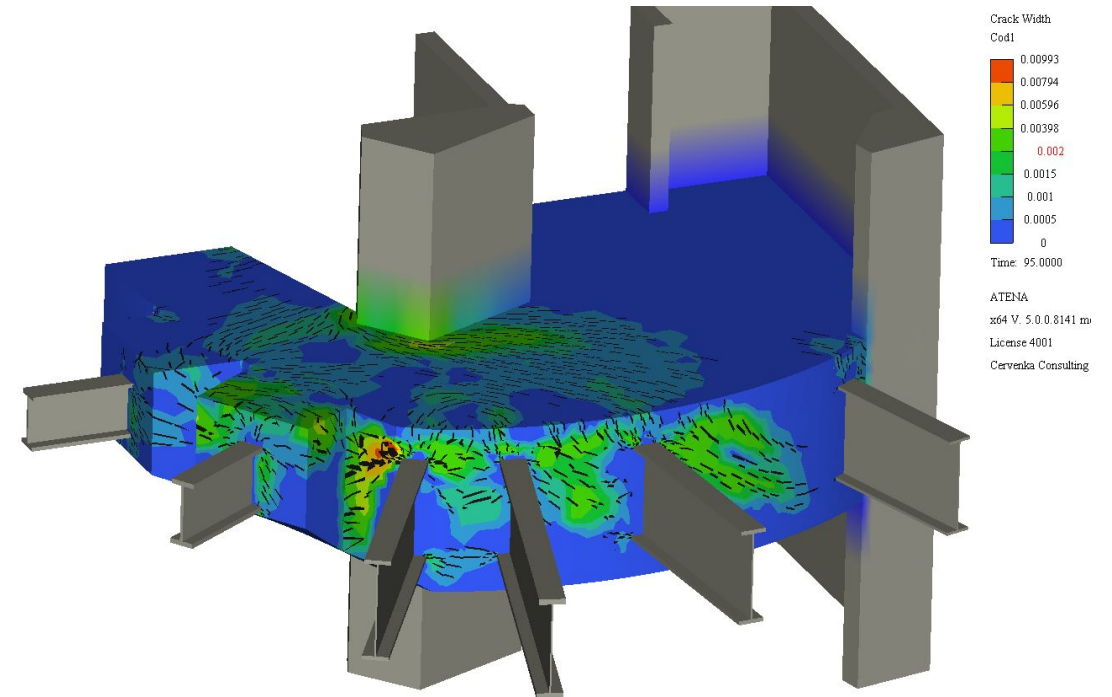
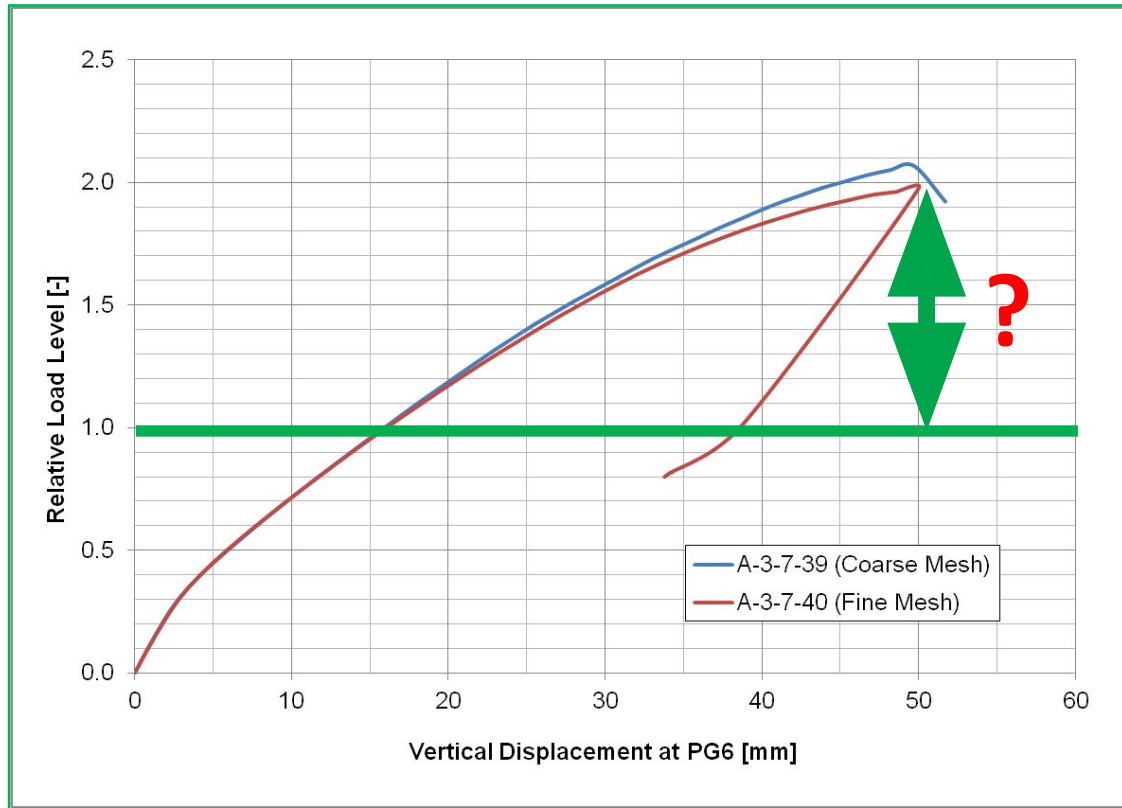


Speciální elementy pro analýzu železobetonu

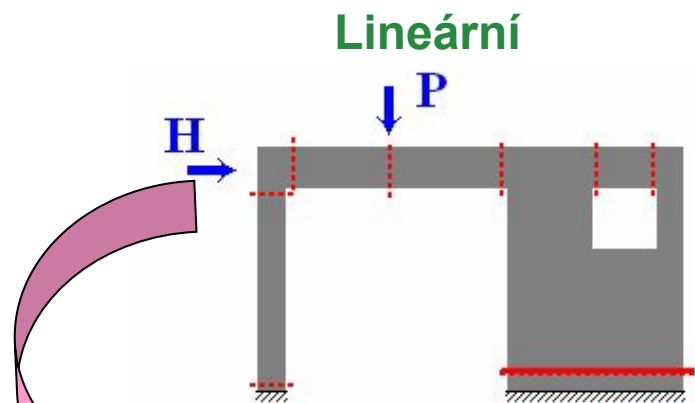


Formáty spolehlivosti pro nelineární analýzu

Shrnutí bezpečných formátů pro Nelineární Analýzu fib model 2010, návrh Eurokód – Annex F (N0217)

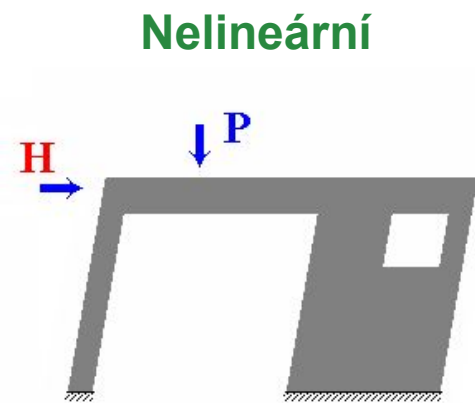


OVEŘENÍ MEZNÍCH STAVŮ ÚNOSNOSTI (MSÚ) GLOBÁLNÍM PŘÍSTUPEM



OVĚŘENÍ
LOKÁLNÍCH ŘEZŮ

$$E_d < R_d$$



OVEŘENÍ
GLOBÁLNÍ ODEZVY KONSTRUKCE

$$E_{Gd} < R_{Gd}$$

NELINEÁRNÍ ANALÝZA ODOLNOSTI → FIB MC2010, EC2 - 2022

$$E_d < R_d \quad R_d^{fib} = \frac{R_m (X_m; a_{nom})}{\gamma_{Rm} \gamma_{Rd}}$$

Průměrné materiálové parametry

X_m

Materiálový součinitel

γ_{Rm}

Metody posuzování:

PFM

GFM-ECOV

Plně pravděpodobnostní (Full Probabilistic)

Součinitel modelových nejistot

γ_{Rd}

Návrh dle Eurokódu

PSF
Metoda dílčích součinitelů

$$R_d = \frac{R_d(f_{cd}, f_{yd})}{\gamma_{Rd}}$$

1
analýza

EN 1992-2

$$R_d = \frac{R_m(f_{cm}^*, f_{ym})}{\gamma_{Rm} \gamma_{Rd}}$$

$f_{cm}^* = 0.85 f_{ck}$
 $f_{sm} = 1.1 f_{sk}$
 $\gamma_{Rm} \gamma_{Rd} = 1.2 \times 1.06 = 1.27$

1
analýza

Návrh dle Eurokódu

ECOV
(Cervenka V. 2008)

$$R_d = \frac{R_m}{\gamma_{Rm} \gamma_{Rd}}$$

$$V_R = \frac{1}{1.65} \ln\left(\frac{R_m}{R_k}\right)$$

$$\gamma_{Rm} = \exp(\alpha_R \beta V_R)$$

$$\alpha_R \beta = 3.04$$

2
analýza

Plně
pravděpodobnostní
(Full probabilistic)

$$R_d = \frac{1}{\gamma_{Rd}} R(\alpha_R \beta)$$

α_R – součinitel odolnosti (0.8)
 β – index spolehlivosti (3.8)
 30-100
analýza

Modelové Nejistoty

- Specifické pro daný projekt – předpoklady modelování , velikost sítě, okrajové podmínky, citlivost na různé vstupní parametry lze řešit návody a školením
- Vliv metody/modelu – náhodná proměnná, lze statisticky popsat

MODELOVÉ NEJISTOTY jako náhodná proměnná Metody hodnocení založené na experimentálním ověření

$$\theta = \frac{R_{\text{test}}}{R_{\text{simulation}}}$$

Vstupní data , i – č. vzorku θ_i

Bezpečnostní součinitel modelových nejistot

$$\gamma_{Rd} = \frac{\exp(\alpha_R \beta \times V)}{\mu_\theta}$$

Rozsáhlý soubor dat – log-normal PDF

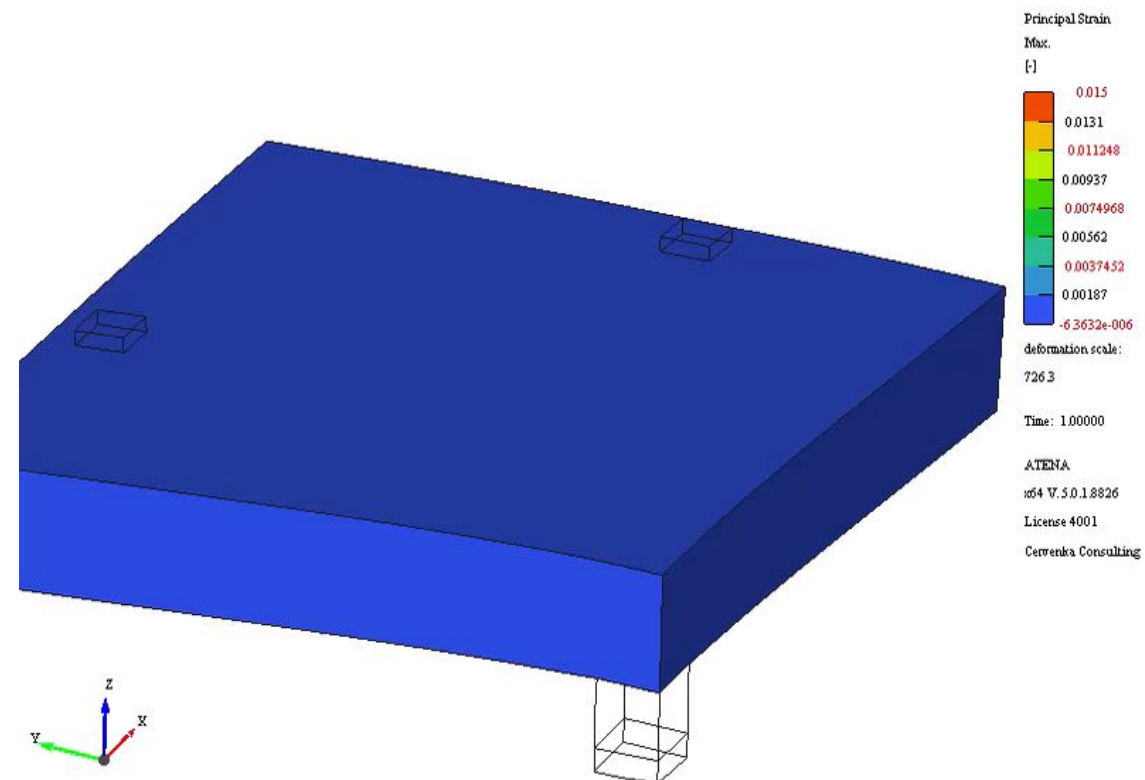
Omezený soubor dat – Student's PDF

$$\gamma_{Rd} = \frac{1}{\mu_\theta \exp(t_{p=0.112}(n-1) \times V_\theta)}$$

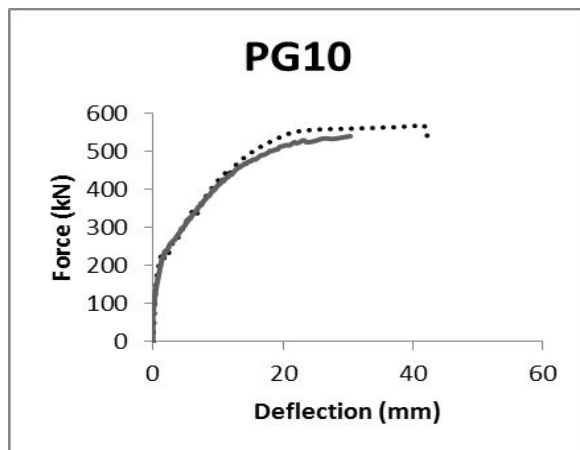
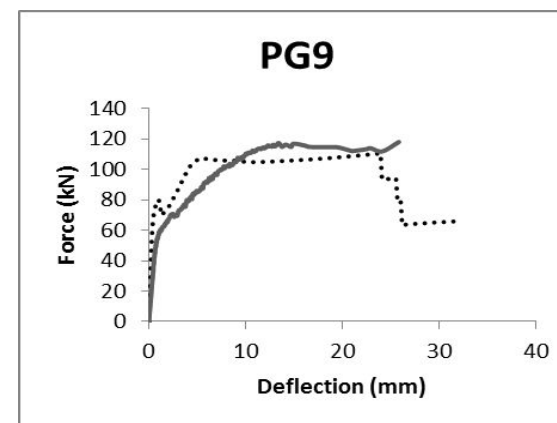
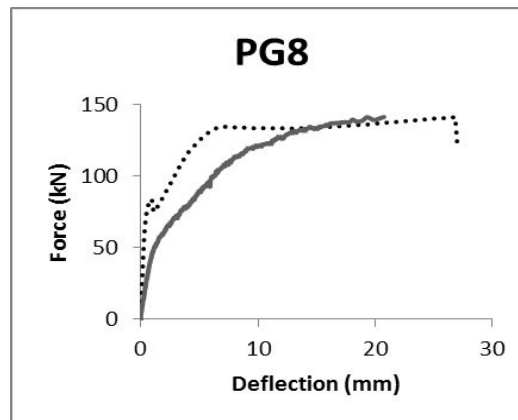
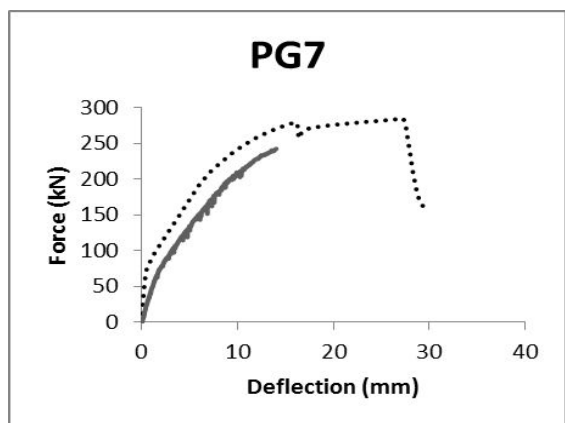
Případové studie MSÚ	33 případů	Rozsah parametrů:
Smykové zkoušky protlačení Guandalini S., Muttoni A., EPFL, Lausanne Hallgren M., KTH Stockholm	15	Způsoby selhání: křehkost (beton), duktilita (ocel)
Smykové zkoušky velkých nosníků 7 Collins M.P., et al., Toronto		S nebo bez smykové výztuže
		Beton: NSC, HSC
Ohybové zkoušky nosníků	11	Rozsah velikostí:
Debernardi P.G., Torino		0.1 do 4 m měřítko 1:40

Červenka V, Červenka J, Kadlec L. 2018. Model uncertainties in numerical simulations of reinforced concrete structures. *Structural Concrete*; 19(6): 2004–16 <https://doi.org/10.1002/suco.201700287>

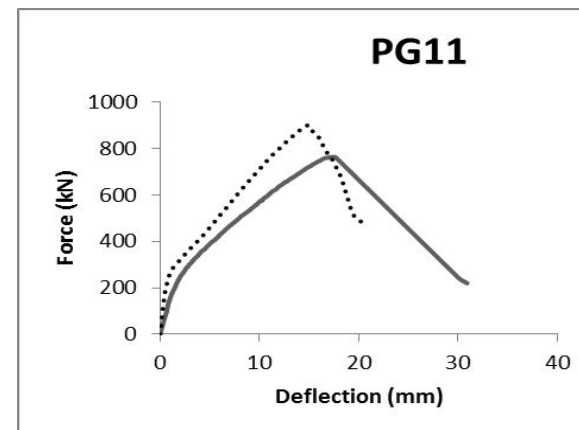
Smyková zkouška protlačení, Guandalini, S. And Muttoni, A., EPFL, Lausanne, Hallgren, M., KTH, Sweden



Simulace smykového děrování, (Kadlec, L., Fsv ČVUT Praha, PhD disertace 2015)



— Experiment
 Simulace



Součinitel modelové nejistoty pro nelineární výpočet

Shrnutí výsledků z literatury

Způsoby porušení	μ_{θ}	V_{θ}	γ_{Rd}
Protlačení	0.971	0.076	1.16
Smyk	0.984	0.067	1.13
Ohyb	1.072	0.052	1.01
Všechny způsoby porušení	0.979	0.081	1.16

Table BG-F.1: Characterization of model uncertainty random variable from different literature references with the related model uncertainty partial safety factor γ_{Rd} .

Reference	Type of NLA	Type of RC members	Failure mode	Model uncertainty ϑ			Partial safety factor γ_{Rd}^*
				Probabilistic distribution	Mean value μ_{ϑ}	Coefficient of variation V_{ϑ}	
Castaldo et al. 2018 [12]	2D finite elements (plane stress); incremental monotonic loading	Deep beams, walls, shear panels	Different failure modes due to both concrete crushing and reinforcement yielding	Lognormal	1.01	0.12	1.15
Castaldo et al. 2020 [13]	2D finite elements (plane stress); cyclic loading	Shear walls	Different failure modes due to both concrete crushing and reinforcement yielding	Lognormal	0.88	0.13	1.35
Cervenka et al. 2018 [15]	3D finite elements (brick); incremental monotonic loading	Slabs	Punching	Lognormal	0.97	0.08	1.16
		Beams	Shear		0.98	0.07	1.13
		Beams	Bending		1.07	0.05	1.01
		Slabs, Beams	All		0.98	0.08	1.16
Engen et al. 2017 [15]	3D finite elements (brick); incremental monotonic loading	Beams, deep beams, walls, frames	Mainly ductile (failure characterized extensive reinforcements yielding)	Lognormal	1.04	0.05	1.02
			Mainly brittle (failure characterized by concrete crushing without or with limited amount of reinforcements yielding)		1.14	0.12	1.02
			All		1.10	0.11	1.04
Gino et al. 2021 [14]	1D finite elements (beam, fiber-beam); incremental monotonic loading	RC slender columns	Buckling (failure characterized by concrete crushing without yielding of reinforcements or both concrete and reinforcements still in elastic field)	Lognormal	1.04	0.15 – 0.18 ^{**}	1.15 – 1.19 ^{**}

*1 the values of γ_{Rd} are derived considering 50 years reference life reliability index $\beta_{ref}=3.8$ and $\alpha_{ref}=0.32$.

**2 the range bounds the influence of sources of significant/limited level of experimental uncertainty within the tests sets considered for investigation of model uncertainty [14].

Červenka V, Červenka J, Kadlec L. Model uncertainties in numerical simulations of reinforced concrete structures. Structural Concrete; 2018: 2004–2016.

Mosty 2023

Source CEN-TC250_SC2-WG1-TG6_N0273_Background_info_Annex F
Diego Gino, Pol. Torino

Validace, Výsledky mezinárodních soutěží

ATENA

Predikce

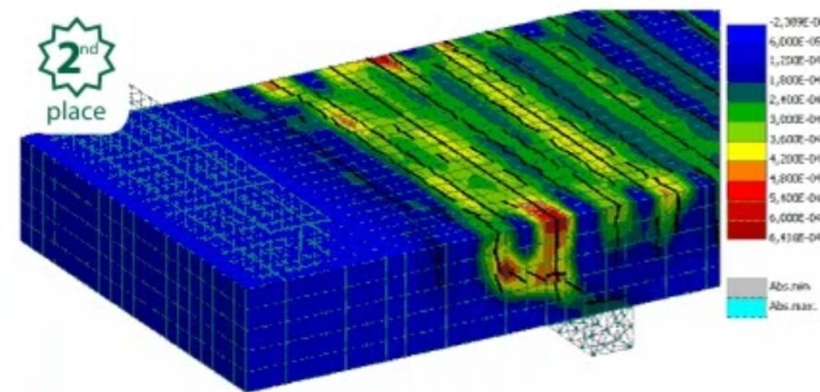
Mezinárodní
soutěže v
předpovědi
chování žlb. kcí.

Univ. Toronto, Prof. Collins 1982 – shear panels

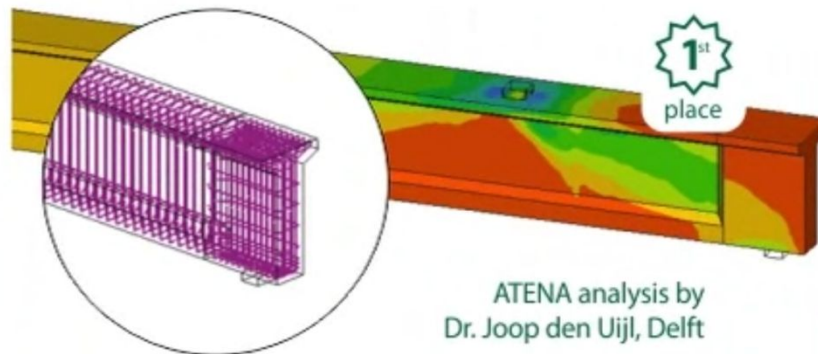


1st
place

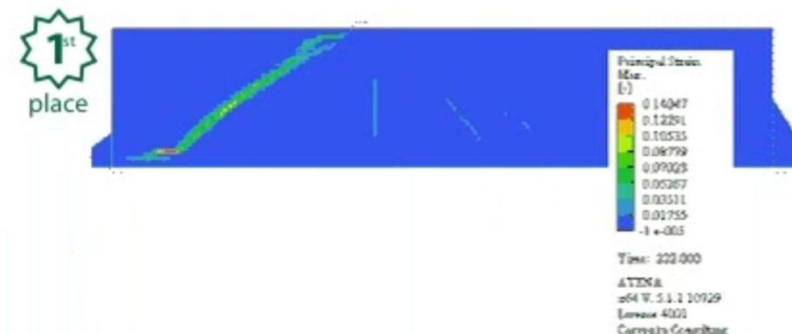
ETH Zurich, Prof. Marti 2006 – shear slabs



Univ. Parma, Prof. Belletti, 2014 – shear beams

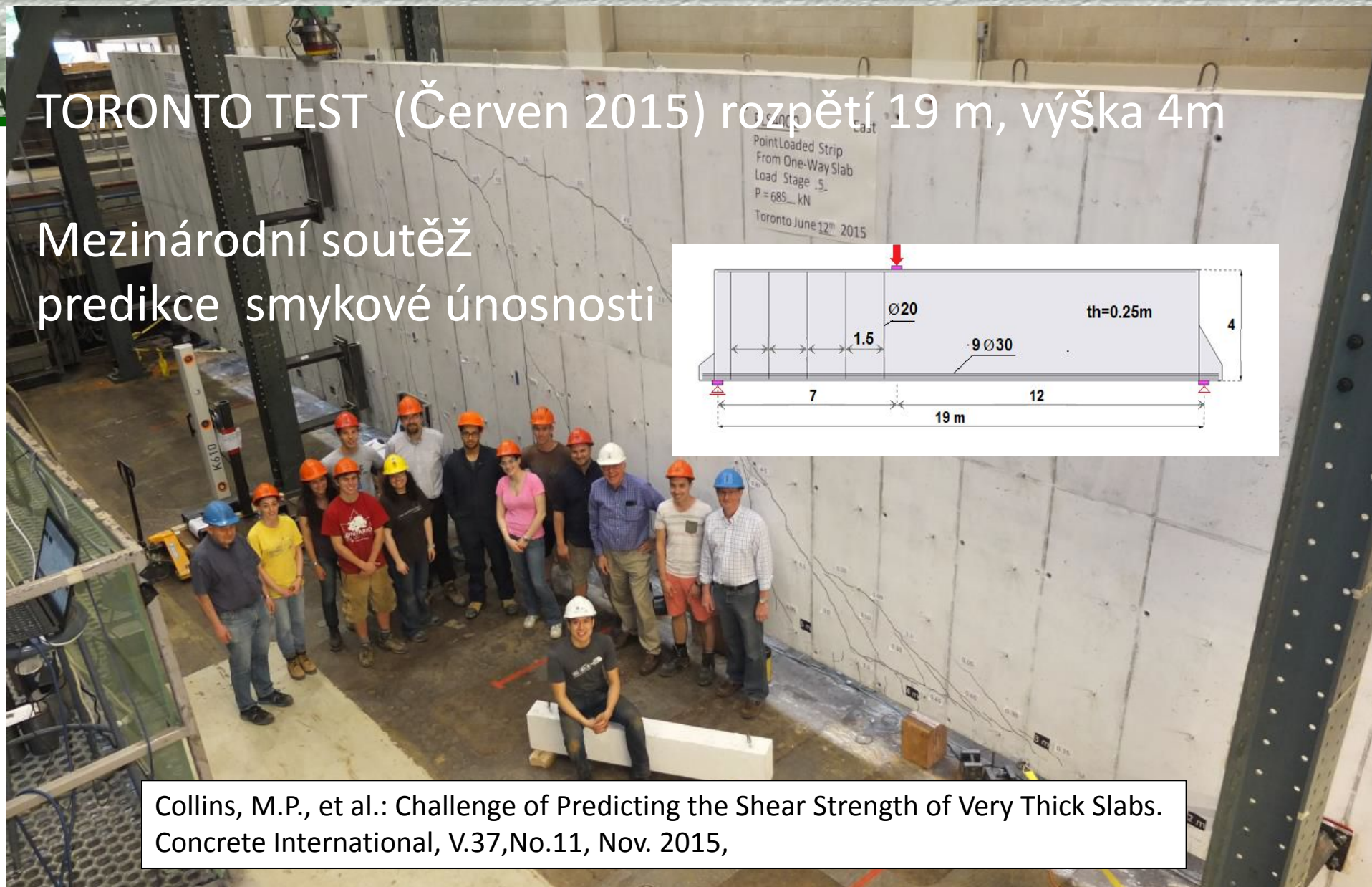
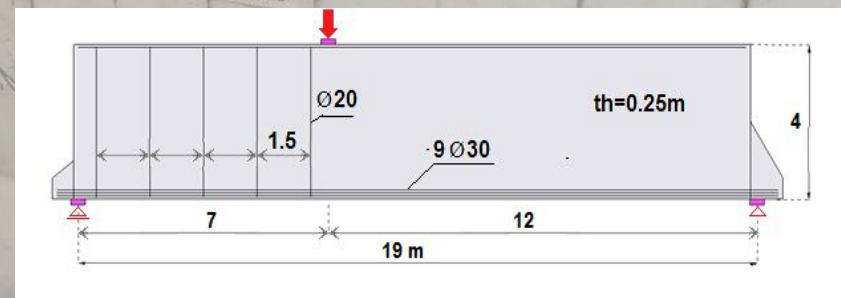


Univ. Toronto, Prof. Collins, 2015 – large shear beam



TORONTO TEST (Červen 2015) rozpětí 19 m, výška 4m

Mezinárodní soutěž
predikce smykové únosnosti



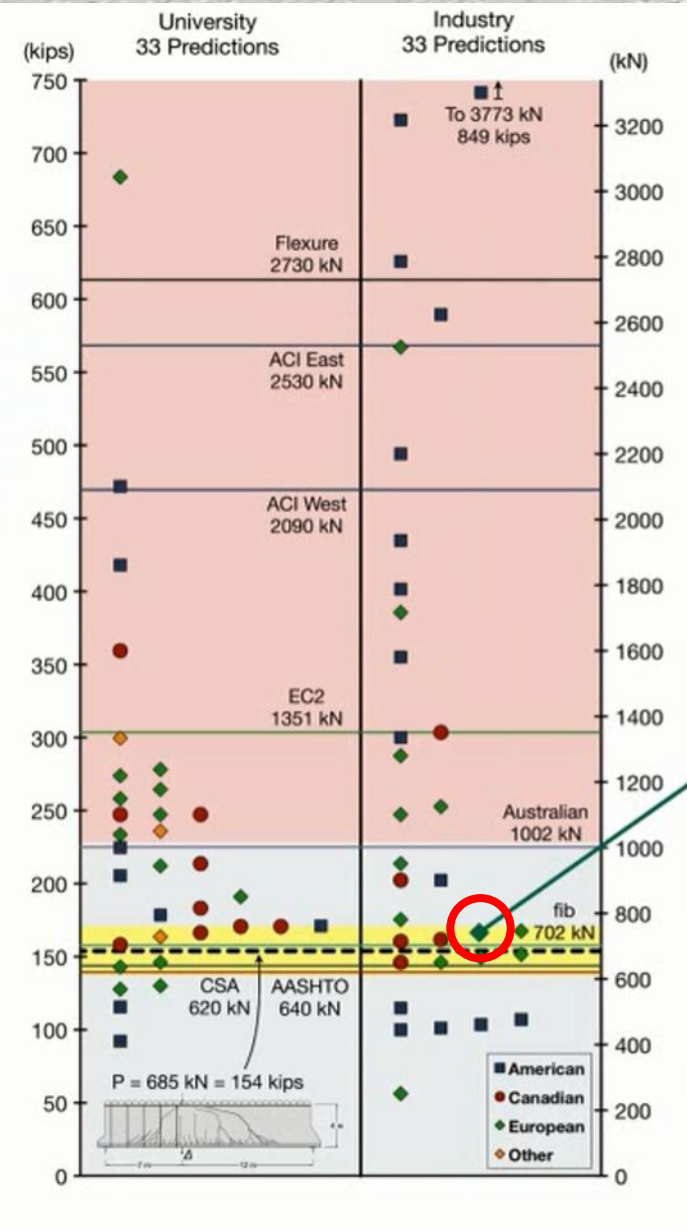
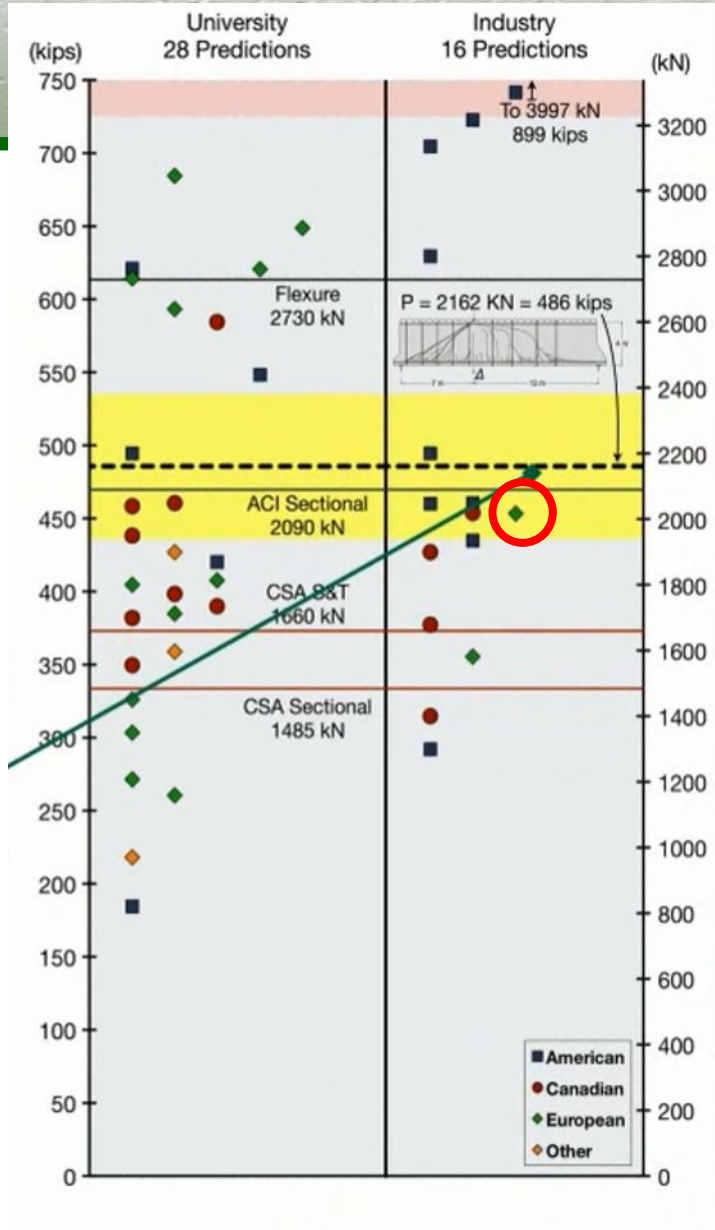
Collins, M.P., et al.: Challenge of Predicting the Shear Strength of Very Thick Slabs. Concrete International, V.37, No.11, Nov. 2015,

Toronto experiment $P_{exp} = 685 \text{ kN}$ (Collins, M.P., Bentz, E. 2015)



ATENA simulace $P_{sim} = 745 \text{ kN}$





Predikce ATENA

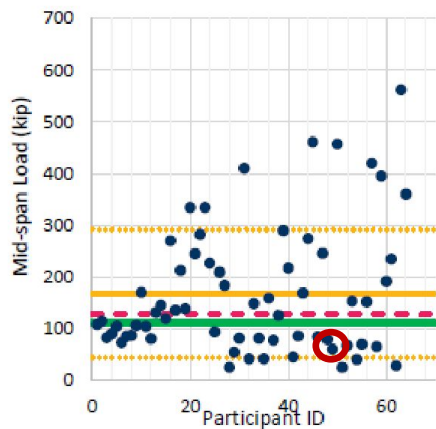
ZÁPAD

VÝCHOD

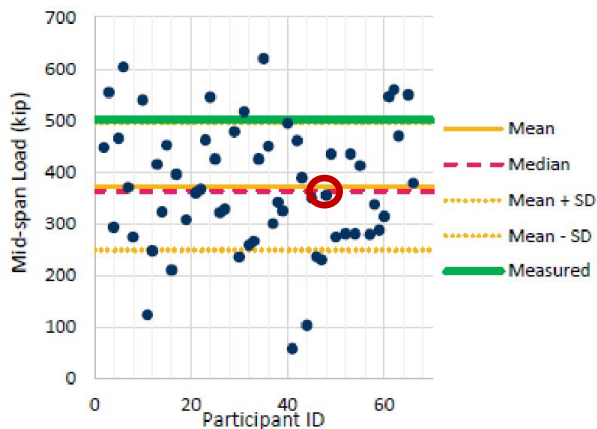
UC-Berkeley – smykové porušení masivního nosníku/pruhu základové desky – soutěž, 2021



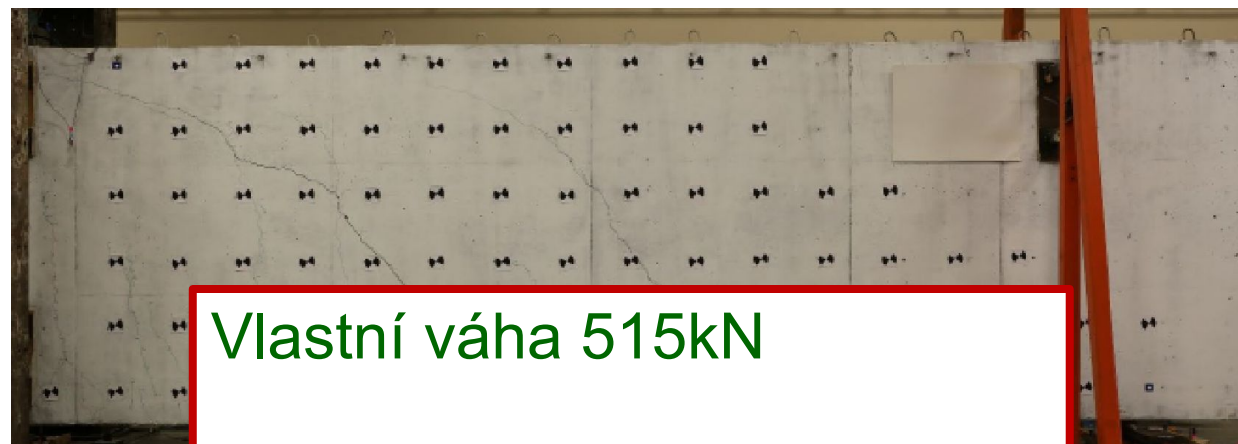
Jack P. Moehle | Professor, University of California Berkeley
 Jerry Zhai | PhD Student, University of California Berkeley



(a) Phase 1



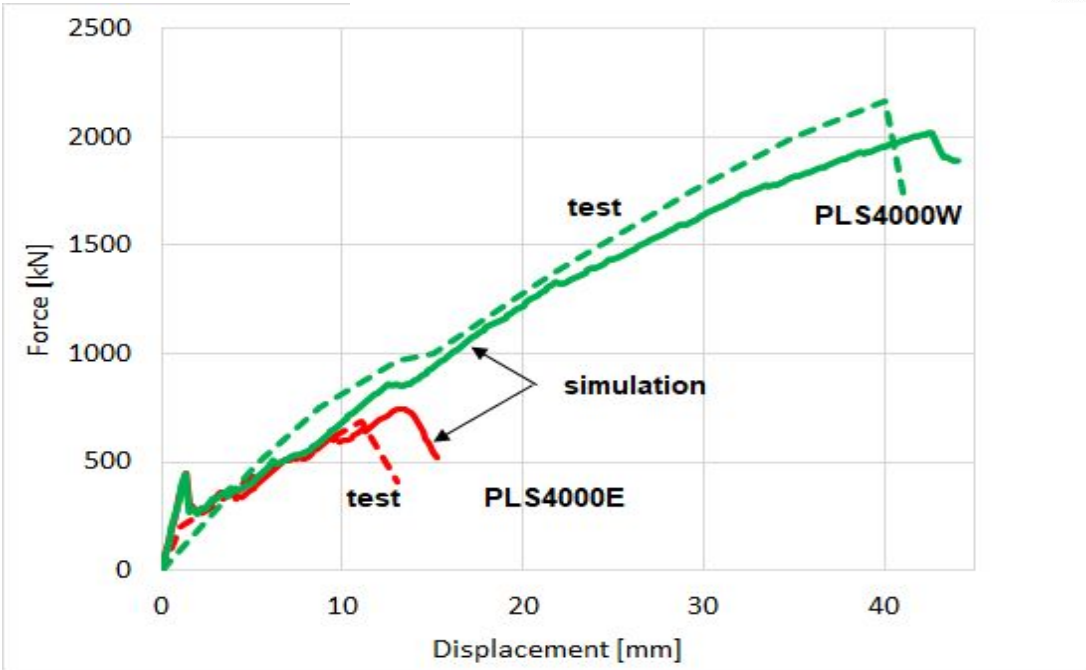
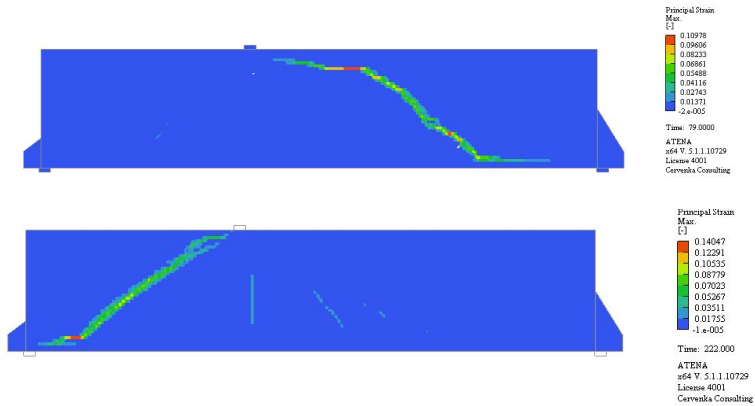
(b) Phase 2



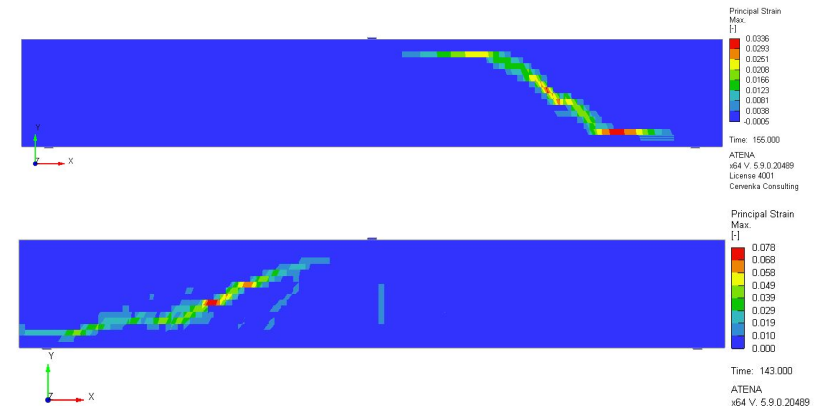
Vlastní váha 515kN
 Fáze 1 chyba ~ -25%
 Fáze 2 chyba ~ -22%



Toronto 2015

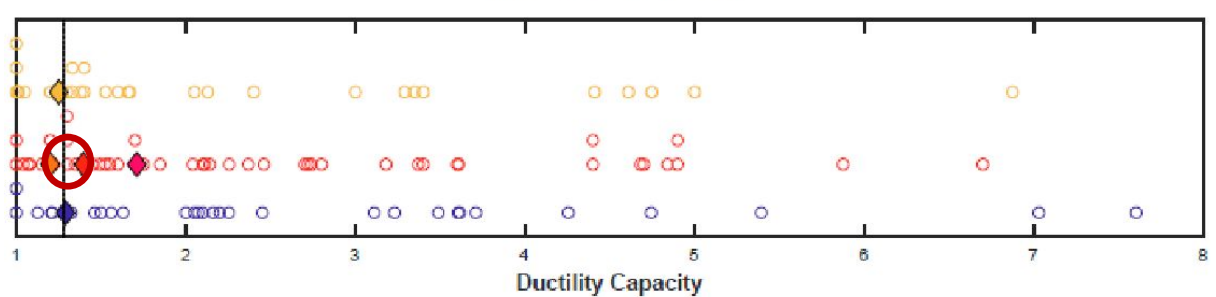
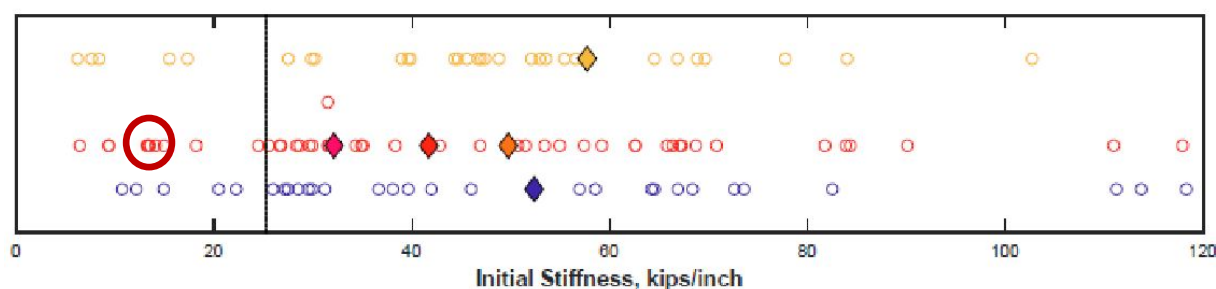
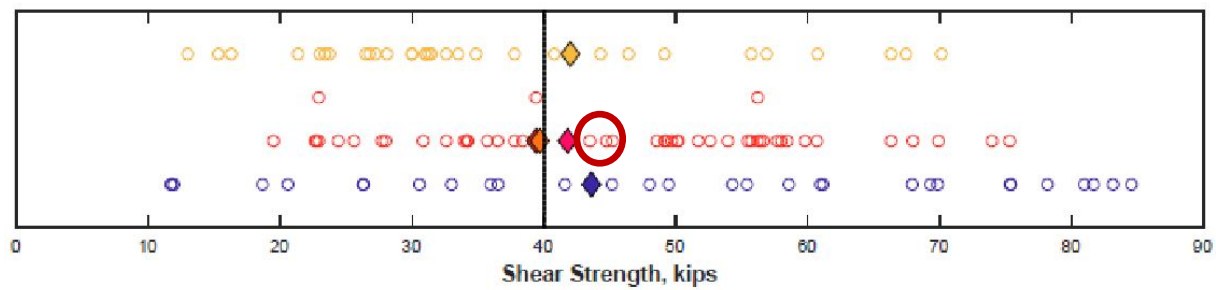
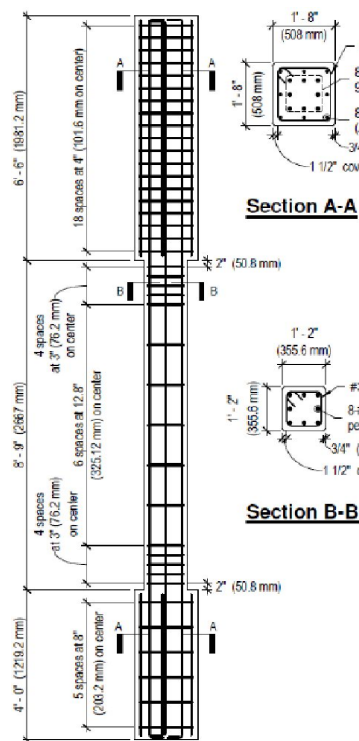


Berkeley 2021



Smršťování!!!
Význam smykové tuhosti pro beton s trhlinami

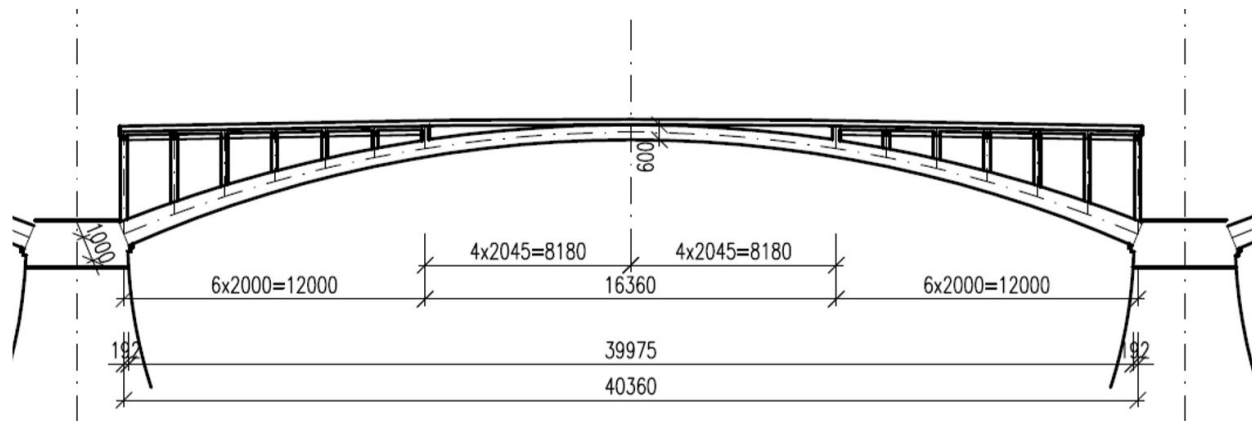
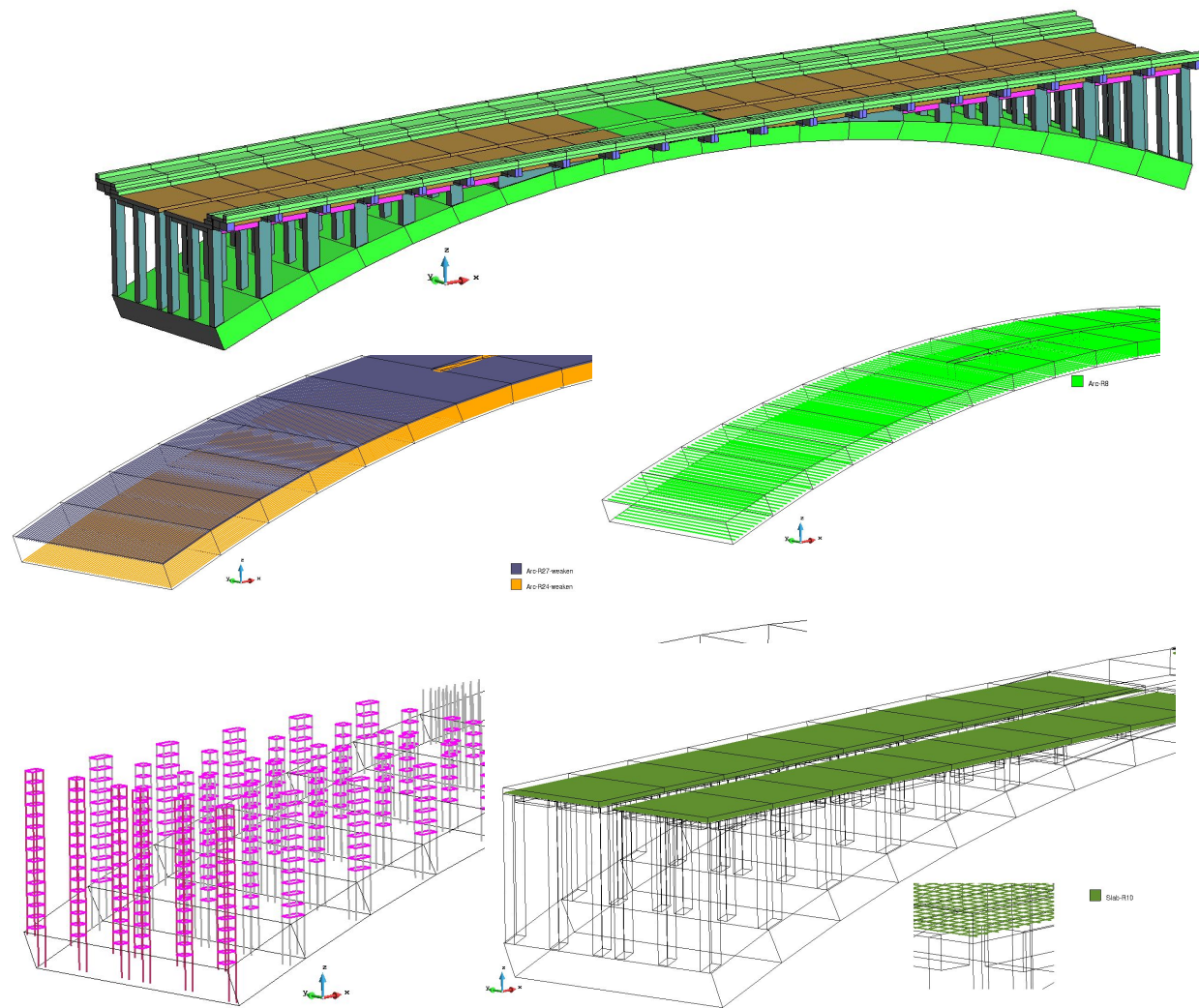
UC-Berkeley – Kvazistatická cyklická zkouška ŽB sloupu – soutěž, 2021



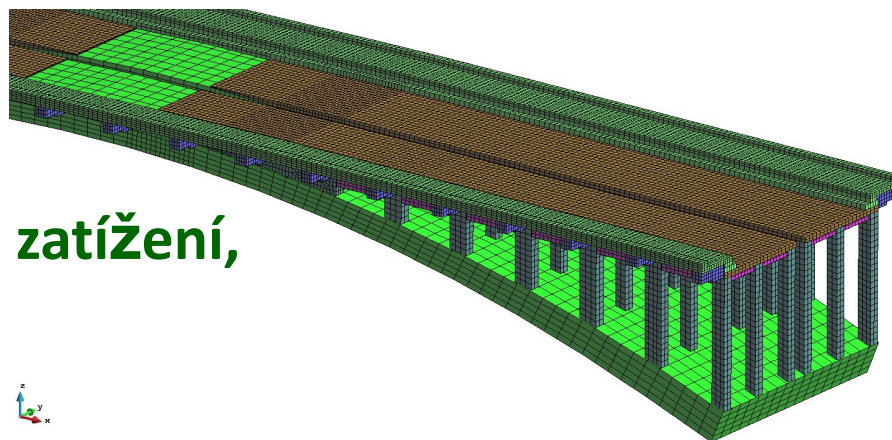
○ Student ○ Researcher ○ Practicing Engr Experiment ◆ Stu. Winner ◆ Res. Winner ◆ Prac.Engr. Winner

Příklady praktického použití nelineární analýzy v praxi

Historický most Nymburk, posouzení kapacity mostu

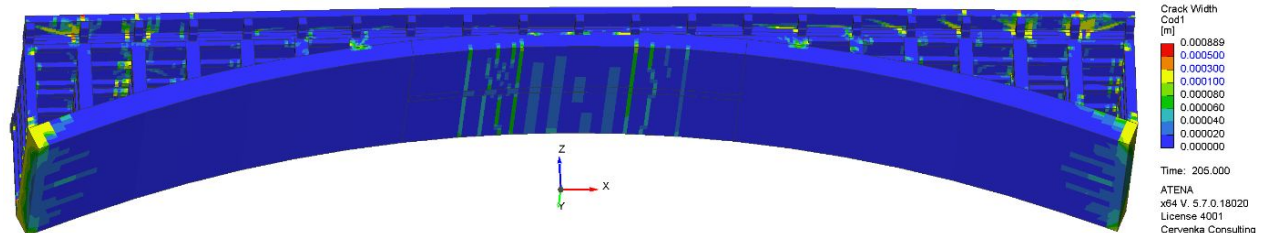
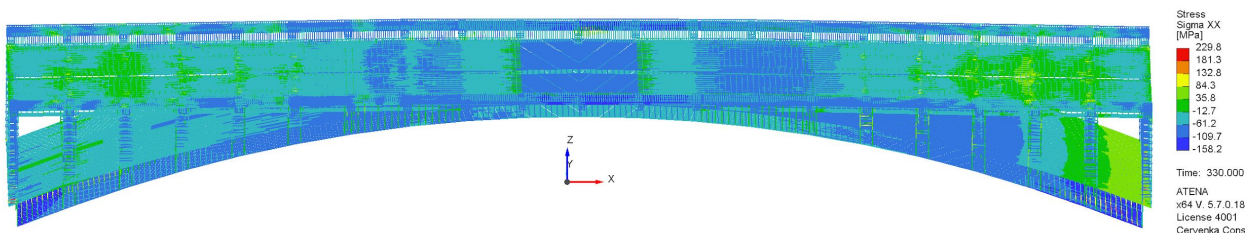
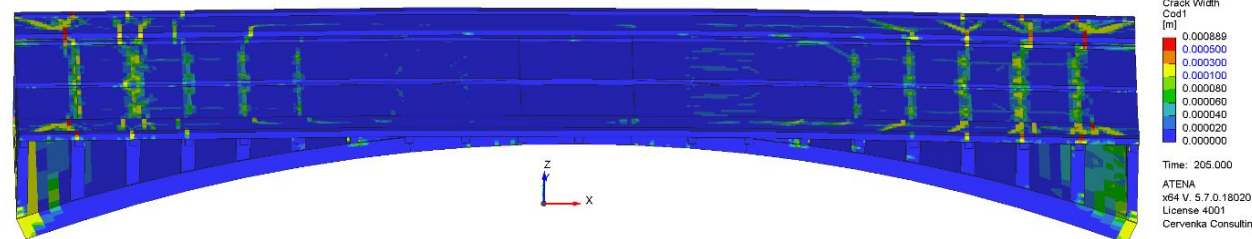
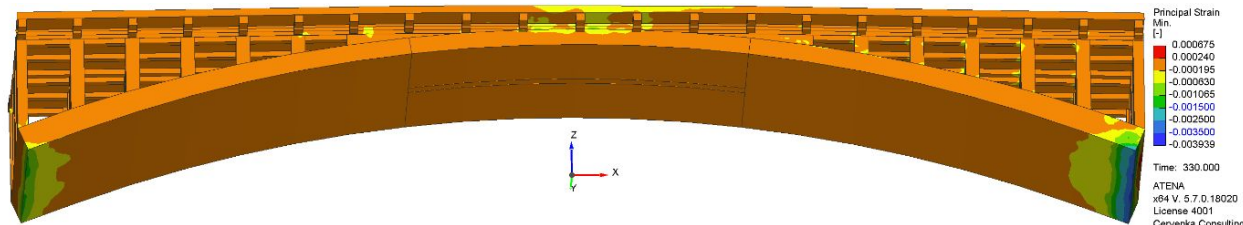


Výsledky při maximálním zatížení,
MSÚ, Běžný provoz
Kapacita 28.35 t
Drcení betonu v místě podpor



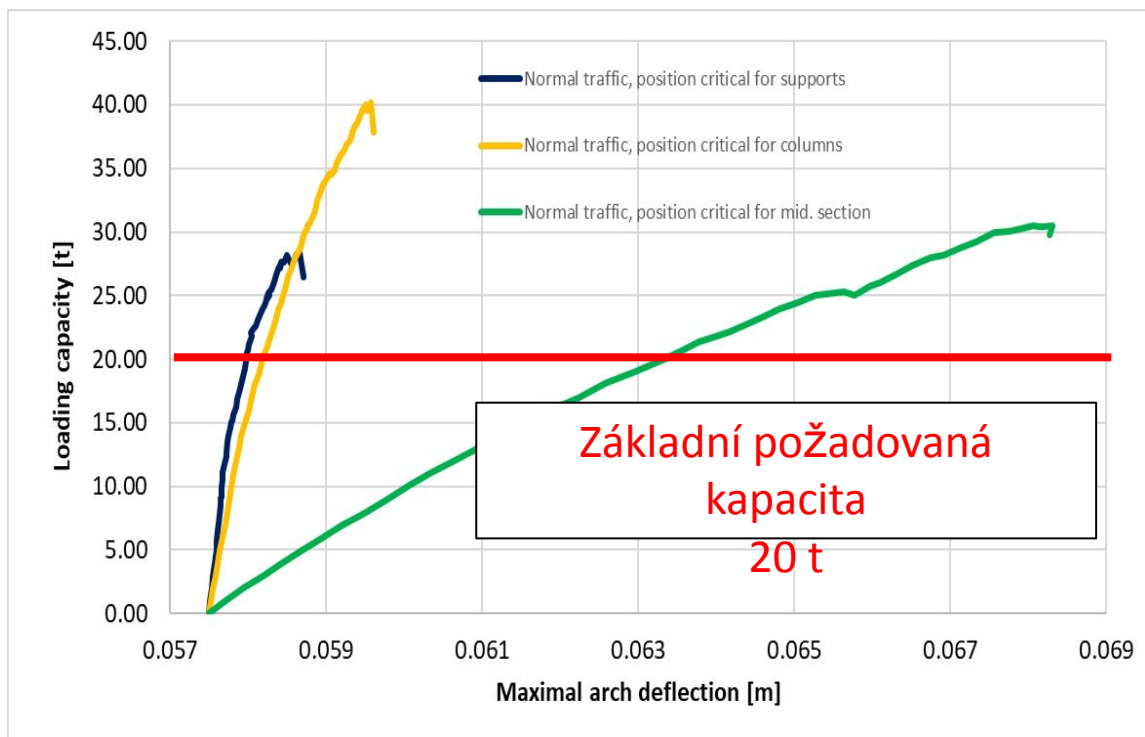
Výsledky MSP
kombinace zatížení

Šířka trhlin 0.1 – 0.3 mm

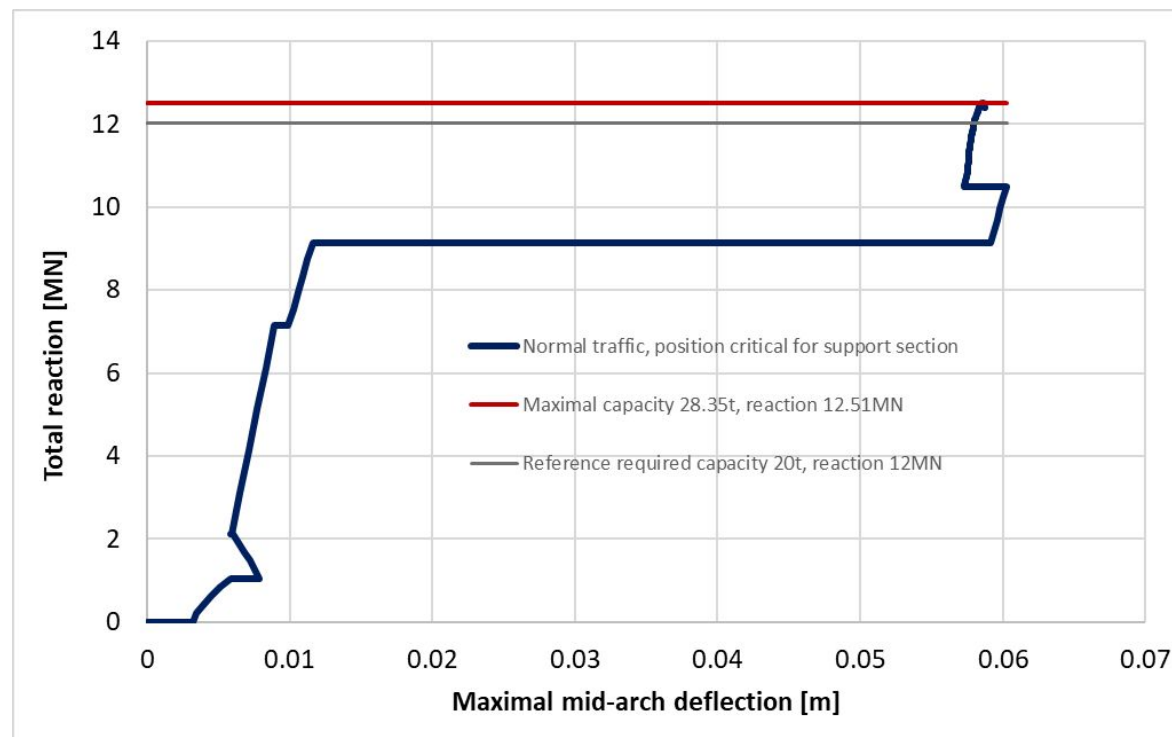


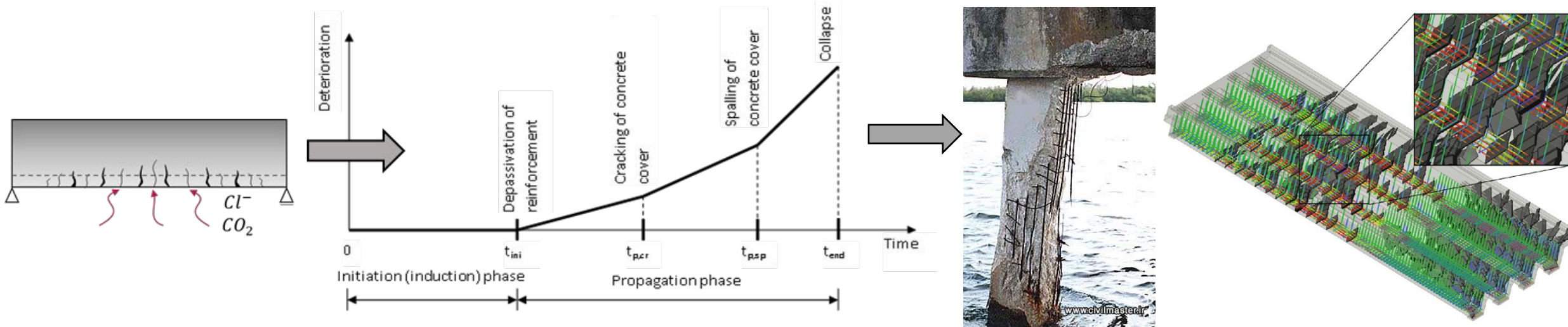
Kontrola kapacity mostu

Vlastní tíha	Provoz	Teplota	Smršťování
$\Sigma(\xi \cdot \gamma_G \cdot G)$	$\gamma_{Q,D} \cdot D$	$\gamma_{Q,T} \cdot \psi_{0,T} \cdot T$	$\gamma_{Q,s} \cdot S$
$\Sigma(0.85 \cdot 1.35 \cdot G)$	$1.35 \cdot D$	$1.5 \cdot 0.6 \cdot T$	$1.0 \cdot S$



Celková historie zatěžování





Iniciační/indukční fáze – fáze končí ve chvíli, kdy koncentrace chloridů dosáhne kritické hodnoty (0.4-0.6% v kg/kg pojiva) v hloubce výztuže a začne působit koroze.

Vliv trhlin – pro tradiční materiály z cementu, trhliny 0.3 mm zkrátí iniciační fázi přibližně 5 krát pro šíření chloridů v betonu oproti případu bez trhlin. (Kwon 2009, 2011)

Fáze Šíření koroze – probíhá koroze výztuže a vznikají expandující produkty.

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

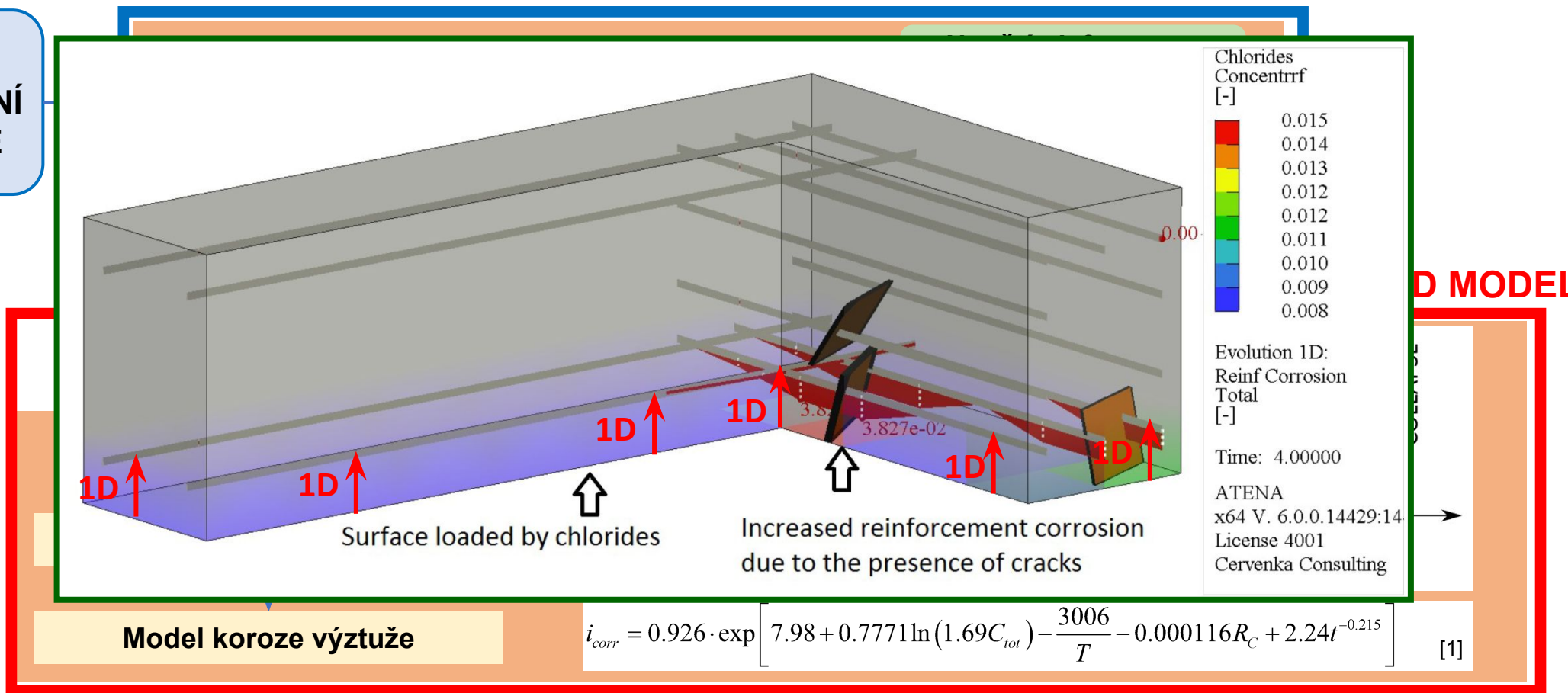
Zrychlení vlivem trhlin

$$\dot{x}_{corr}(t) = 0.0116i_{corr}(t), x_{corr}(t) = \int_{t_{ini}}^t 0.0116i_{corr}(t)R_{corr}dt, d(t) = d_{ini} - \psi 2x_{corr}(t)$$

Schéma analýzy trvanlivosti: působení chloridu

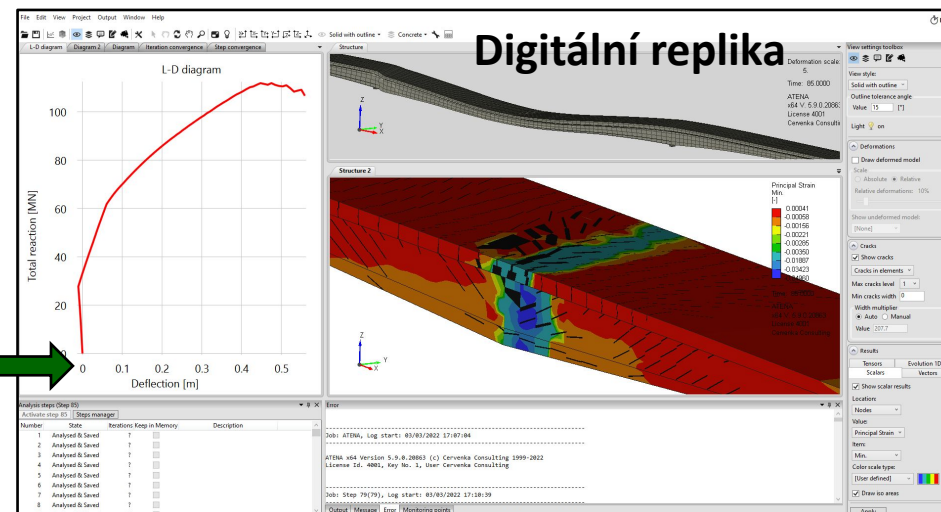
3D MODEL

MODEL
VIRTUÁLNÍ
DVOJČE



[1] Liu Y, Weyers R.E., Modeling the Dynamic Corrosion Process in Chloride Contaminated Concrete Structures, CCR, 28(3), 365-367, 1998.

Digitální dvojče - koncept



VLASTNOSTI DIGITÁLNÍHO DVOJČETE

Krátkodobé chování:

- statické/dynamické/cyklické zatěžování
- nelineární materiálové chování (trhliny betonu, poddajnost výztuže)
- náhodné scénáře
-

Dlouhodobé chování:

- působení chloridů/karbonátce
- koroze výztuže
- dotvarování a smršťování
- ASR/AAR mechanismy
-

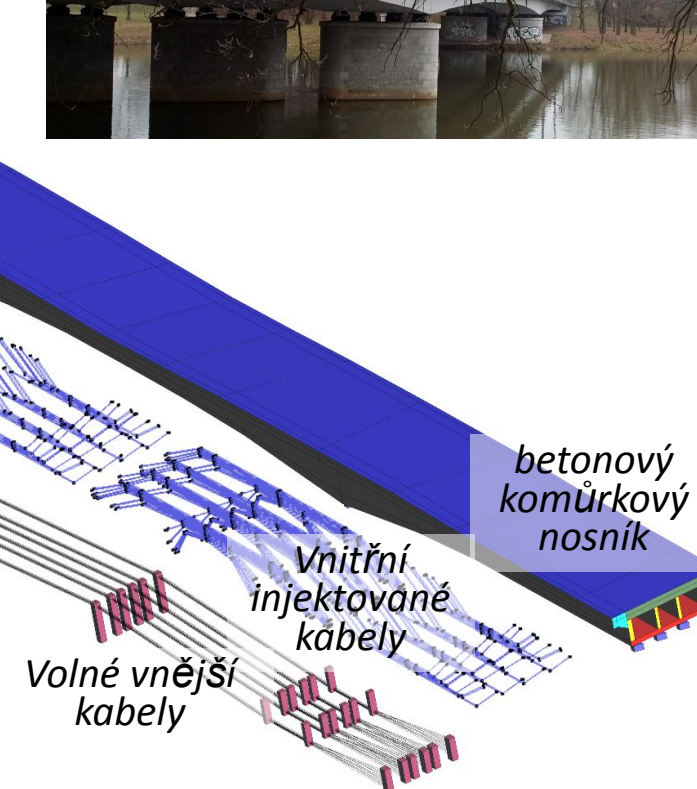
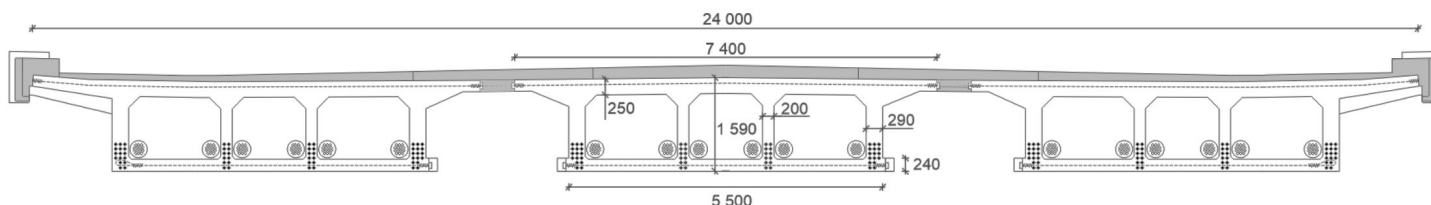
Pilotní Studie 1: Wonka Bridge, Pardubice, Czech Republic

Prostředí: 50 + 70 + 50 m

- konstrukce postavena v roce 1959
- **typ konstrukce:** předepjatý komorový most
vnitřní injektované a volné dodatečně předepjaté kabely
- **zatížení:** silniční provoz a enviromentální zatížení
(chloridy, posypová sůl)
- Rekonstrukce proběhla v roce 2006

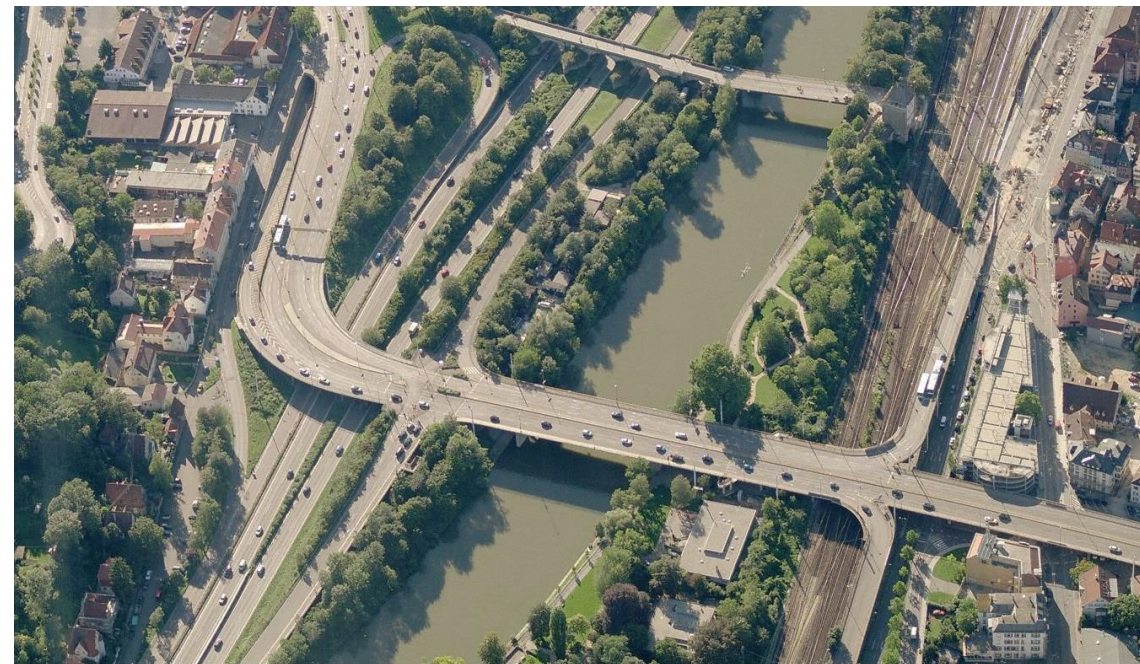
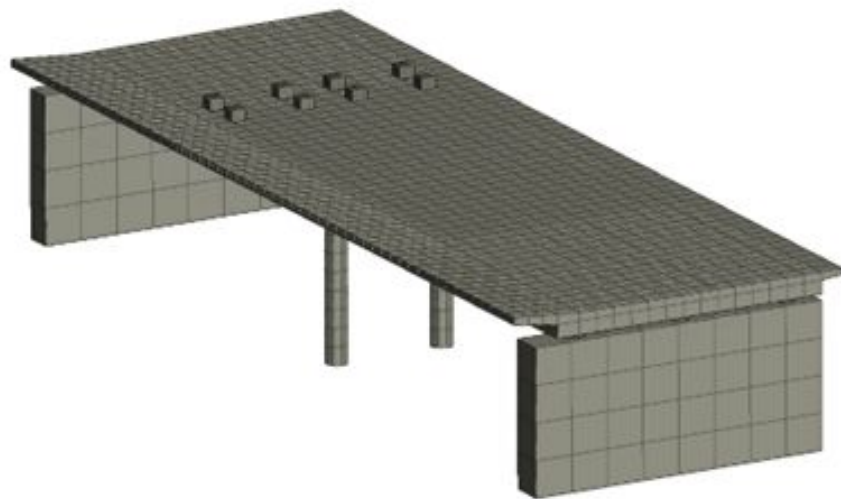


Příčný řez uprostřed rozpětí nosníku:



Pilotní Studie 2 : Vogelsang Bridge, Esslingen, Germany

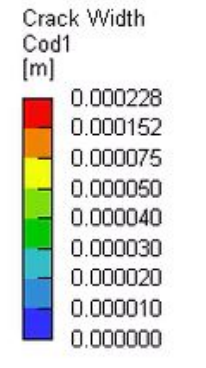
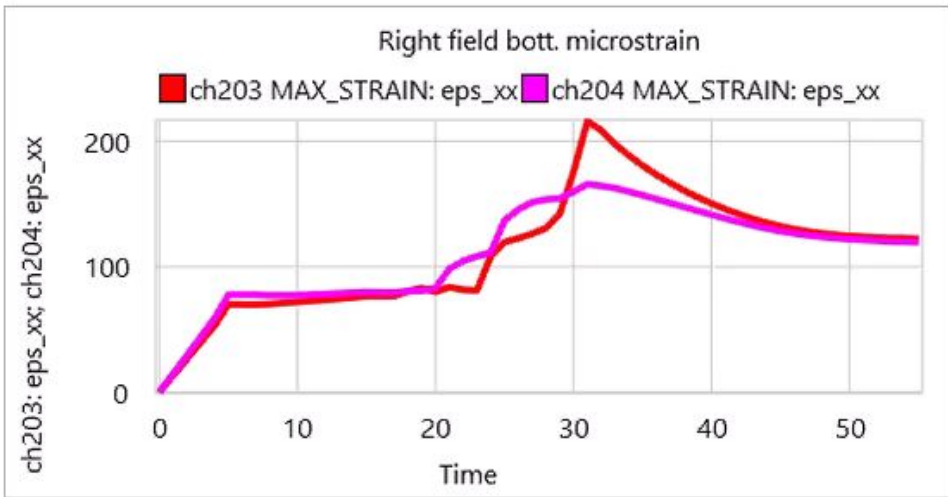
- 8 subkonstrukcí se 3 rozdílnými konstrukčními typy
výstavba v letech **1971 – 1973**, celková délka **595 m**
- měření a analýza pro 2 rozpětí (**13.8 + 13.2 m**)
- **Typ konstrukce:** průběžný nepředepjatý ŽB nosník
s výškou 0.6 m
- **zatížení:** silniční provoz a enviromentální zatížení



Použitý monitorovací systém

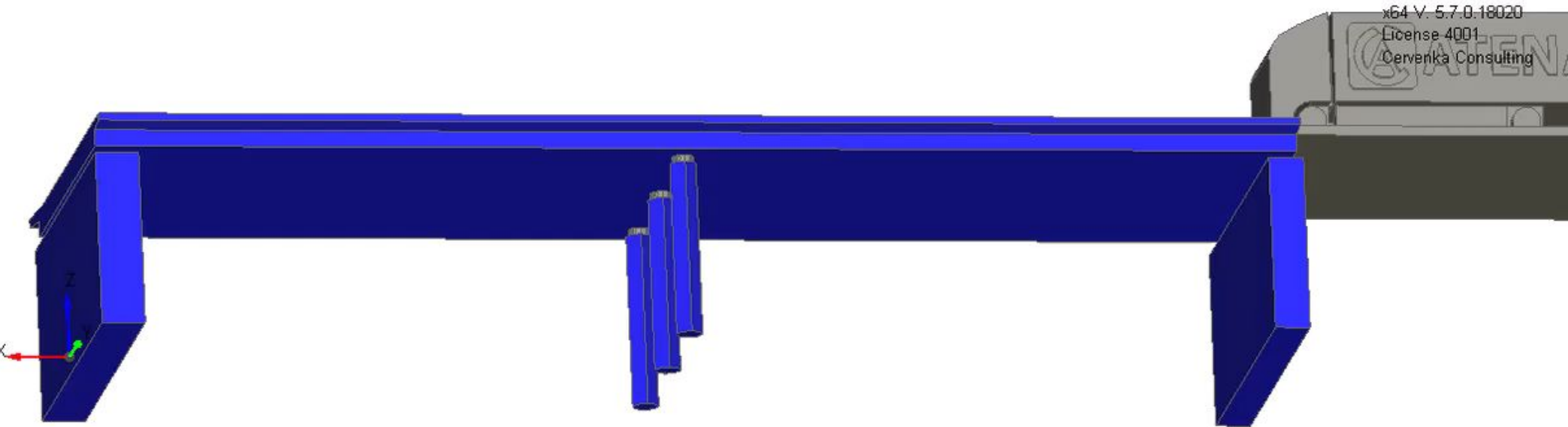
- tenzometry ve spojení s laserovým snímačem
- vhodné pro zatížení nad 3.5 tuny
- instalováno na spodní stranu desky → nedojde k narušení provozu
- tenzometry jsou kalibrovány před měřením
- **poskytovatel:** iBWIM technologie od Petschacher Consulting GmbH





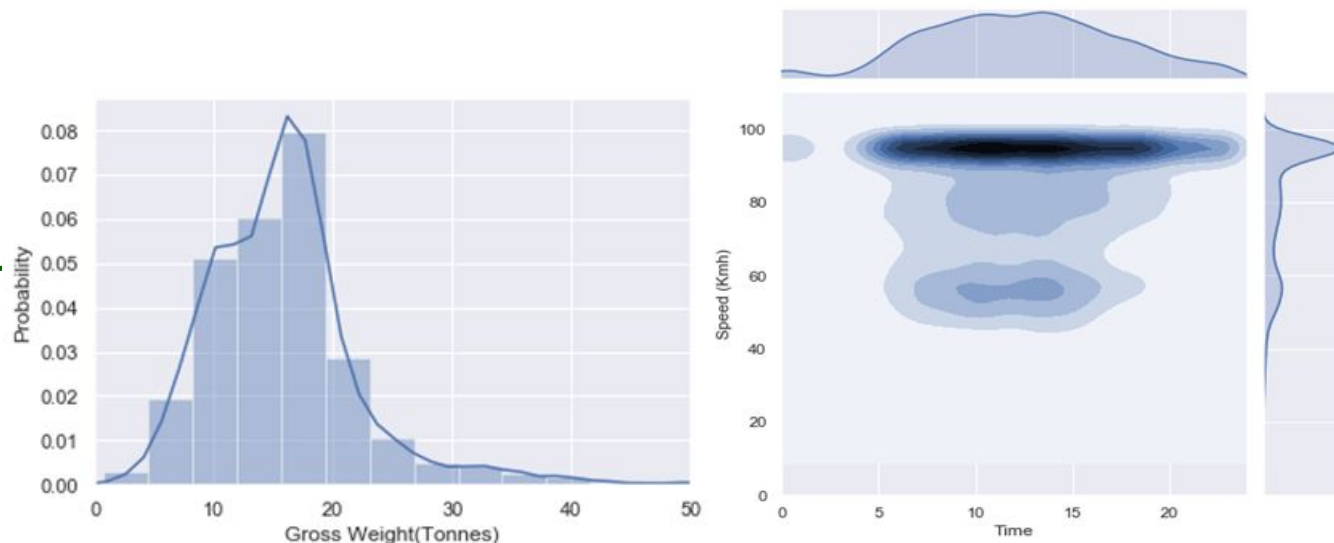
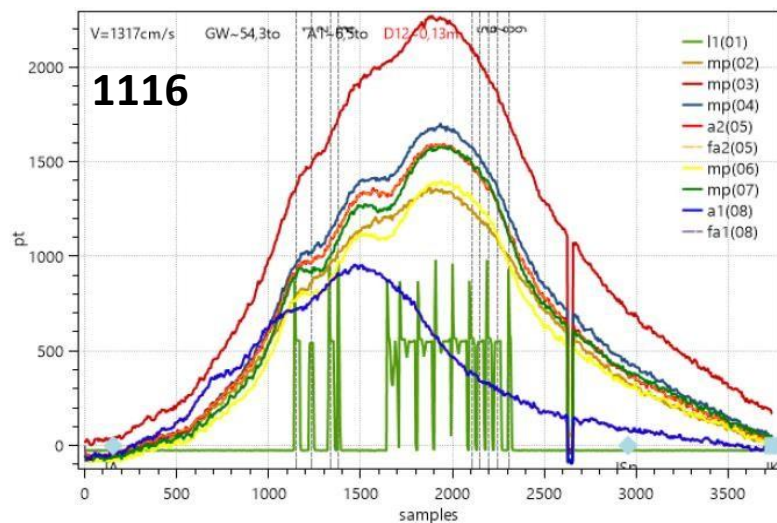
Deformation scale: 1.
Time: 1.00000

ATENA
x64 V. 5.7.0.18020
License 4001
Cervenka Consulting



Sledování výsledků

- doba sledování: 61 dní (2018)
- nahraná data: rychlost vozidel, váha, zatížení rozložení náprav, vzdálenost mezi nápravami, atd.
- data k dispozici pro vyhodnocení
- lze získat časový průběh dopravy



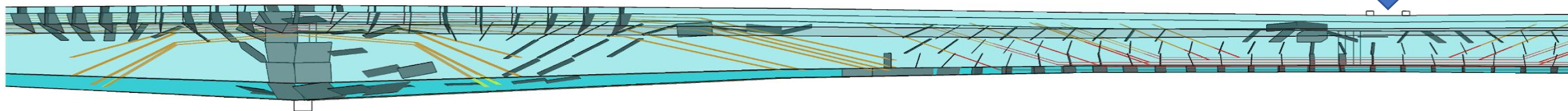
TST	ID	V	AC	VC	GW	Axles	Length	A2A	Q	T	S	y
20180825 07:00:50	1116	47.4	4	80	59.4	18.6 25.4 9.0 6.4	19.96	3.91 12.50 3.55	7	23.7	15.590	4.477

TST: čas a datum, ID: číslo akce, V: rychlost [km/h], AC: počet náprav, VC: třída vozidla, GW: hrubý odhad váhy vozidla [t], Axles: váha nápravy [t], Length: vzdálenost mezi první a poslední nápravou, A2A: vzdálenost mezi nápravami [m], Q: kvalita uložení [%], T: teplota, S: průměrné namáhání [10⁻³], y: příčná vzdálenost [m]

Numerické výsledky: Simulace přetížení

Stress
Sigma XX
[MPa]

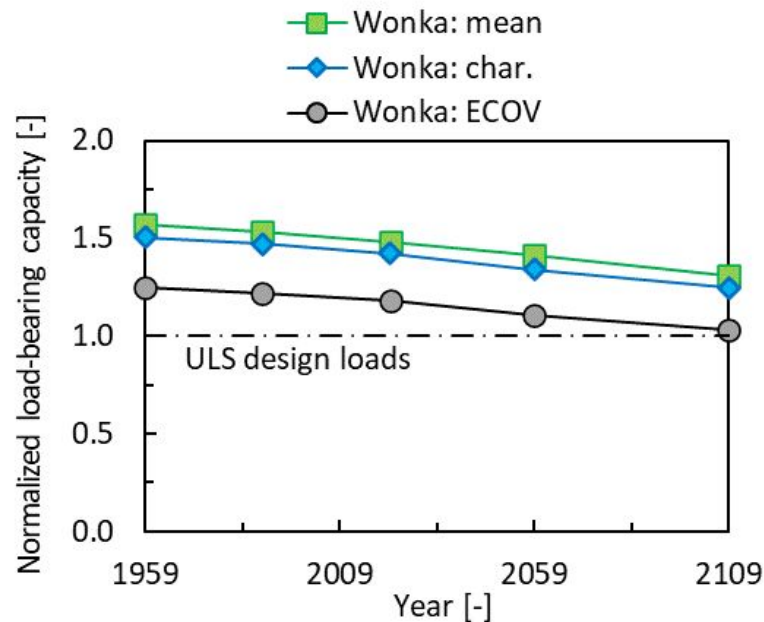
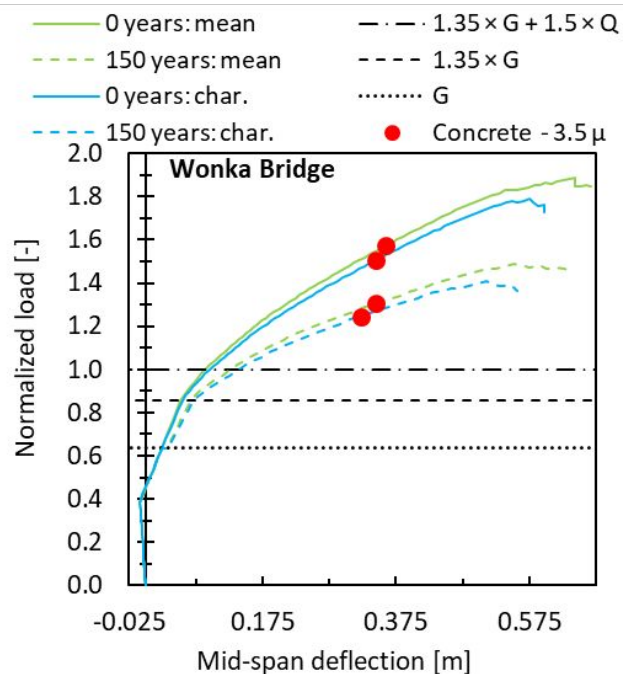
1305.9
1064.2
822.5
580.8
339.1
97.3
-144.4
-386.1
-627.8



- kolaps dochází v důsledku drcení betonu nad podporou – rozvoj diagonálních trhlin
- nadměrný průhyb uprostřed nosníku způsobuje kolaps
- způsob porušení není ovlivněn korozi výztuže



Posouzení životnosti: Wonka Bridge



- působení chloridů -> snížení únosnosti konstrukce
- robustní design poskytuje dobrou odolnost konstrukce před poškozením
- kolaps konstrukce je hlavně zapříčiněn drcením betonu v okolí podpor

ECoV metoda (fib MC 2010):

variační koeficient:

$$V_R = \frac{1}{1.65} \ln \left(\frac{R_m}{R_k} \right)$$

součinitel globální odolnosti:

$$\gamma_R = \exp(\alpha_R \beta V_R) \cong \exp(3.04 V_R)$$

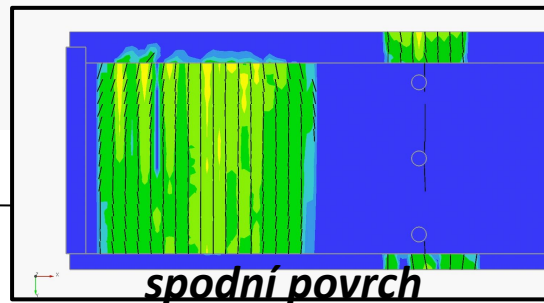
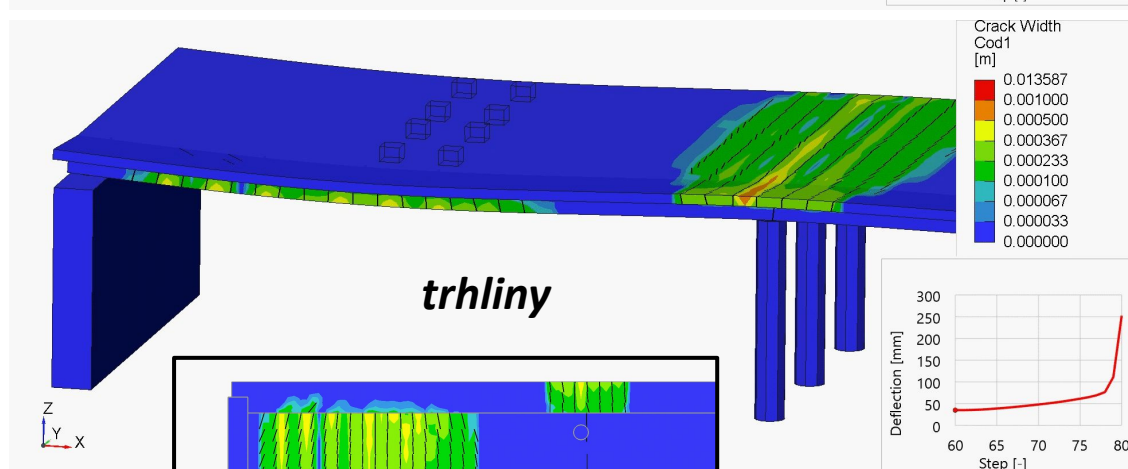
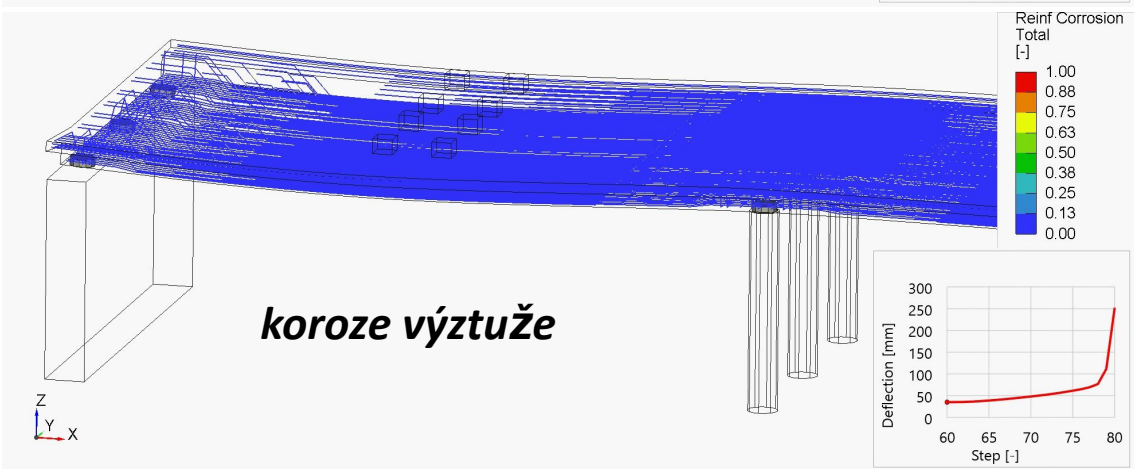
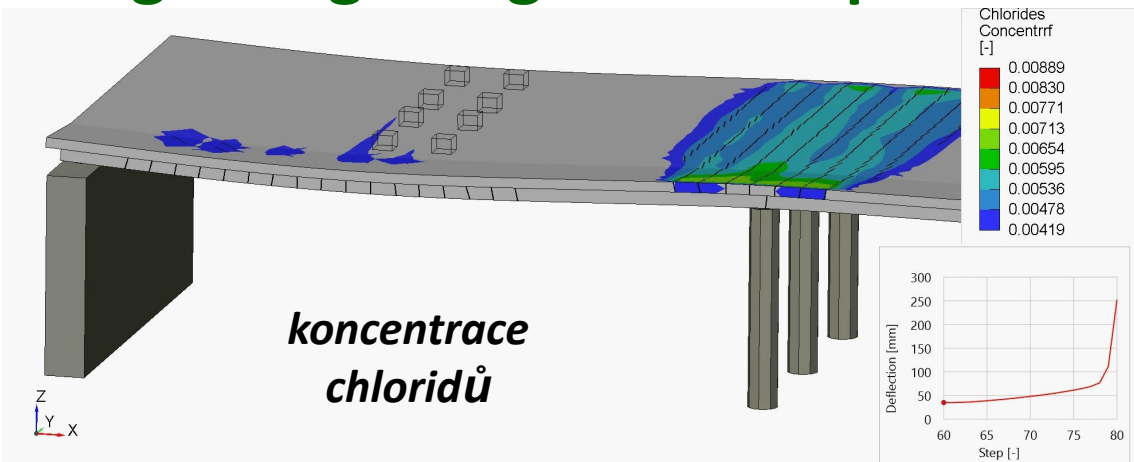
návrhová odolnost:

$$R_{d,ECOV} = \frac{R_m}{\gamma_R \gamma_{Rd}}$$

Návrhové posouzení:

$$E_d < R_{d,ECOV}$$

Vogelsang Bridge: 150 let působení chloridů

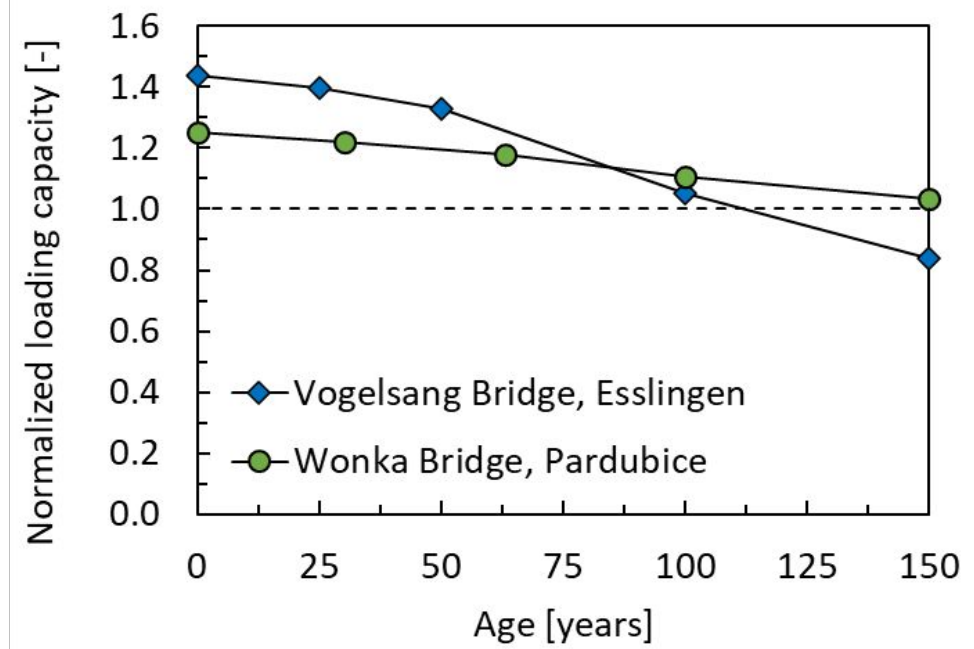
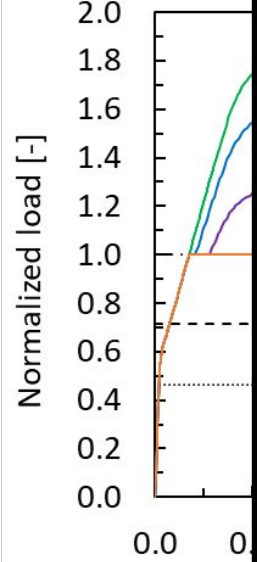


Posouzení životnosti : Vogelsang Most SRN

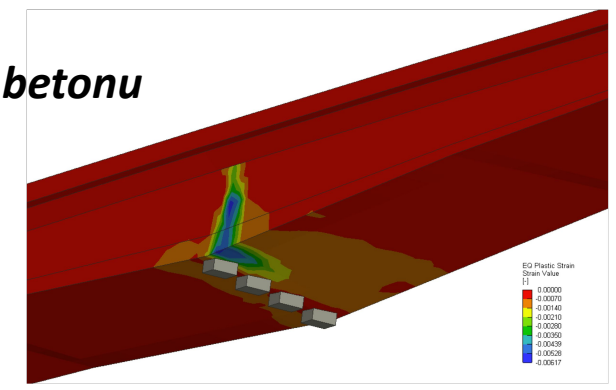
ECoV metoda (fib MC 2010):

Posouzení životnosti: porovnání

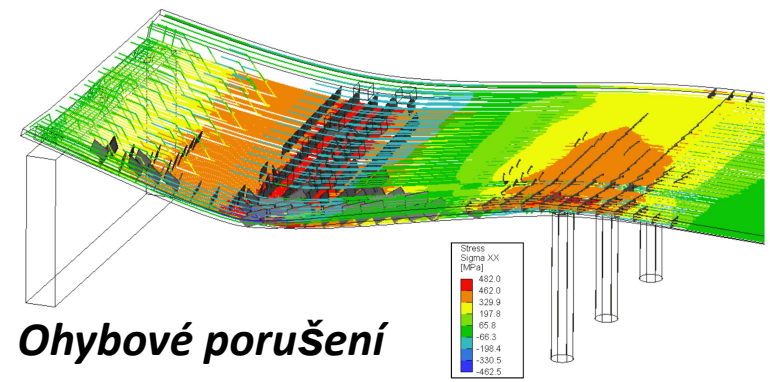
— 0 years: m
 — 50 years: m
 — 100 years: m
 — 150 years: m



◆ *drcení betonu*



● *Ohybové porušení*



▪ kons
 maximálním zatížení

$\frac{m}{k}$
 olnosti:
 $\exp(3.04 V_R)$

n
 R_d

COV

Závěr:

Nelineární analýza ŽB konstrukcí je důležitým nástrojem v inženýrské praxi

Formáty spolehlivosti pro nelineární analýzu jsou k dispozici

Při praktických aplikacích důležité vyhodnotit a uvažovat modelové nejistoty

Soutěže v slepých predikcích jsou užitečné a zábavné, ale vypovídací hodnota je někdy sporná

Aplikace nelineární analýzy v praxi roste a proto jsou důležité vhodné spolehlivostní formáty, pravidla a návody

**T A
Č R**



Výsledky z projektu:

CK03000023 “Digitální dvojče pro zvýšení spolehlivosti a životnosti betonových mostů”
s finanční podporou TA ČR

20-01781S – Modelování nejistot v bezpečnostních formátech betonových konstrukcí, GAČR



Děkuji za pozornost

S finanční podporou Technologické Agentury České republiky, projektu CK03000023
“DIGITÁLNÍ DVOJČE PRO ZVÝŠENÍ SPOLEHLIVOSTI A ŽIVOTNOSTI BETONOVÝCH MOSTŮ”

Jan Cervenka

jan.cervenka@cervenka.cz