

**Pavel ŠEDA<sup>1</sup>, Ladislav ŘOUTIL<sup>2</sup>**

NELINEÁRNÍ ANALÝZA MECHANICKÉ ODEZVY MOSTU Č. 2-2043-15,  
E4 KRISTINEBERG, STOCKHOLM

NONLINEAR ANALYSIS OF THE BRIDGE NR. 2-2043-15, E4 KRISTINEBERG,  
STOCKHOLM

### **Abstrakt**

Příspěvek představuje výstavbu a nelineární analýzu mechanické odezvy mostu č. 2-2043-15 E4 Kristineberg ve Stockholmu. Simulované výsledky jsou srovnány s hodnotami naměřenými při zatěžovací zkoušce a jsou identifikována místa se zvýšeným rizikem poškození, vyžadující monitorování během užívání stavby.

### **Klíčová slova**

Železobetonový silniční most, nelineární analýza, zatěžovací zkouška.

### **Abstract**

The paper is focused on the construction and nonlinear analysis of the bridge 2-2043-15 E4 Kristineberg in Stockholm. Simulated results are compared with load tests. Locations with higher risk of damage are pointed out – these places should be monitored during the life cycle of the bridge.

### **Keywords**

Reinforced concrete bridge, nonlinear analysis, loading test.

## **1 ÚVOD**

Mimoúrovňová křižovatka na švédské dálnici E4, exit 161, s místním názvem Trafikplats Kristineberg, je hlavním dopravním uzlem pro ostrov Kungsholmen ve městě Stockholm. Dálnice E4 je hlavní spojnici mezi severem a jihem Švédska, zároveň je také spolu s E20 součástí průtahu městem s názvem Essingeleden, přičemž spojuje ostrovy Kungsholmen, Lilla Essingen a Stora Essingen. Městem vede po mnoha estakádách, mostech a skoro z poloviny v tunelech. Dokáže pojmout více než 180 000 vozidel denně a udržet rušnou dopravu dostatečně izolovanou od hustě obydlených částí města. S narůstající dopravou již tato spojnice nevyhovuje a výstavba nového obchvatu města je nevyhnutelná.

Původní mimoúrovňová křižovatka s průletovými úseky, vystavěná v 50. letech minulého století, zabírala svými velkými oblouky značnou část přilehlých pozemků – jde většinou o možné stavební pozemky, o které je na ostrově velký zájem. Trafikplats Kristineberg je situována téměř uprostřed ostrova Kungsholmen – nově vyprojektovaná křižovatka o třech patrech s polokružní křižovatkou uprostřed je vítaným řešením. Připojovací a odbočovací rampy jsou navrženy tak, aby vedly těsně podél dálničního tělesa za účelem co nejmenšího záboru a průpletové úseky jsou naprojektovány v prostoru pod dálničním mostem společně s prostorem přilehlé křižovatky. Součástí

---

<sup>1</sup> Ing. Pavel Šeda, Habau Sverige AB, Lindhagensgatan 103, 112 51 Stockholm, Sweden, pavel.seda@habau.cz.

<sup>2</sup> Ing. Ladislav Řoutil, Ph.D., VUT v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební mechaniky, Veveří 331/95, 602 00 Brno, routil.l@fce.vutbr.cz.

rekonstrukce je výstavba 5-ti mostních objektů, 150 bm opěrných stěn a 250 bm monolitického koryta, ve kterém vede jedna z odbočovacích větví tzv. Tråg. Předpokládané náklady na výstavbu jsou 188 milionu švédských korun (1SEK = 3CZK).

První autor tohoto příspěvku se aktivně podílel na výstavbě jako technik pro realizaci monolitických železobetonových konstrukcí, přičemž jednu z hlavních náplní jeho práce představovala výstavba mostního objektu č. 2-2043-15.

## 2 KONSTRUKCE A VÝSTAVBA MOSTU

Mostní objekt je tvořen železobetonovou rámovou konstrukcí o 2 polích. Celková délka přemostění v ose komunikace je 26,0 m a volná šířka na mostě je minimálně 7,0 m. Mostovka je v podélném i příčném sklonu 2,5 %. Spodní stavbu tvoří dvě krajní opěry a jeden mezilehlý pilíř. Obě opěry svírají s osou komunikace různé úhly a liší se významně od sebe co do velikosti i tvaru. Jižní opěra je 3,5 m vysoká profilovaná tenká stěna se základovým pasem zhotoveným na skalním podkladu, zatímco severní opěra je 0,9 m široká, 5,0 vysoká a 15,0 m dlouhá masivní stěna, která svírá úhel s mostovkou 152°. Severní opěra je založena na velké základové desce, která tvoří patu opěry a zároveň slouží jako část silniční komunikace vedoucí pod mostem. Deska není přímo uložena na skalním podloží, ale z důvodů její hloubky pod okolním terénem je posazena na drenážní vrstvě štěrku, která odvádí veškerou vodu do přečerpávací stanice a to z důvodu příznivého vodního režimu, jenž má podstatný vliv na funkčnost a trvanlivost spodní stavby. Pilíř o průměru 1,2 m je založen ve stejné úrovni jako severní opěra a je umístěn excentricky mimo osu mostu v 1/3 délky rozpětí. Mostovku tvoří 0,7 m vysoká deska o šířce 7,0 m na začátku a 12,0 m na konci mostu. Mostovka i její římsy se betonovaly současně, což jednak urychlilo postup výstavby a zároveň uspokojilo požadavky investora, které jsou ve skandinávských zemích poměrně vysoké.

Detaily projektu lze nalézt v [1], zkušenosti z výstavby včetně rozboru vybraných aspektů (např. chlazení betonu v průběhu hydratace vč. problémů při provádění tenké stěny, možnosti bednění hlavní nosné konstrukce aj.) přibližuje [2].

Představu o konstrukci si lze udělat i na základě Obr. 1, 2, 3, 6 a 7.



Obr. 1: Betonáž mostovky



Obr. 2: Dokončený most č. 2-2043-15

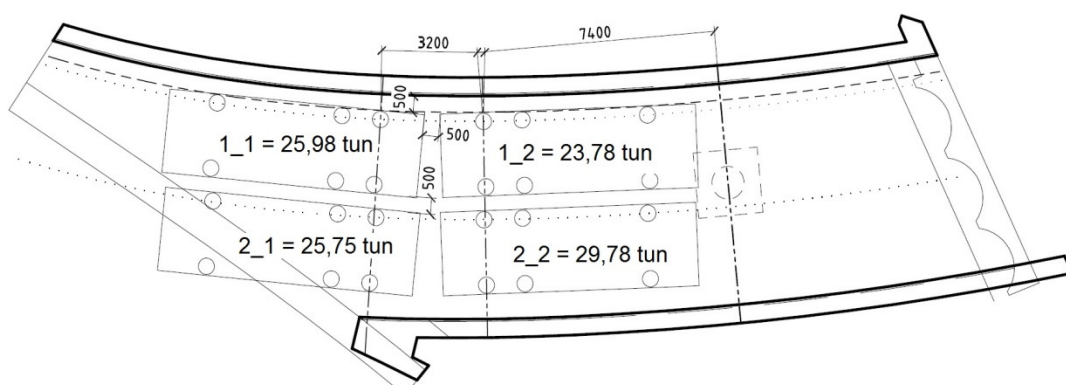
## 2.1 Zatěžovací zkouška

Hotová konstrukce byla podrobena zatěžovací zkoušce s následujícím programem:

- nezatížený most – nulové měření;
- 1. zatěžovací stav – dvě nákladní vozidla (1\_1 a 1\_2 – viz Obr. 3 a 4) za sebou při východním okraji desky mostu mezi opěrou 3 a pilířem;
- 2. zatěžovací stav – čtyři nákladní vozidla (1\_1, 1\_2, 2\_1 a 2\_2 – viz Obr. 3 a 5) po dvou za sebou stojících mezi opěrou 3 a pilířem.

Jako zatížení byla využita 4 nákladní vozidla každé s hmotností od 24–29 tun (Obr. 3). Hmotnost každého vozidla byla ověřena vážením před zahájením zatěžovací zkoušky.

Při zatěžovací zkoušce se měřily svislé posuny na předem nainstalovaných pevných měřičských bodech (Obr. 9, Tab. 2). Těchto celkem 68 bodů bylo rozmístěno v rastru po celé spodní části mostovky a v místě největších předpokládaných posunů byl rastr zhuštěn za účelem zpřesnění výsledků v těchto kritických místech. Měření se provádělo digitálním nivelačním přístrojem Leica DNA03 společně s nivelační latí GPCL2 Professional. Nejedná o standardní normovou zatěžovací zkoušku.



Obr. 3: Schéma rozmístění zatěžovacích vozidel a jejich nominální hmotnosti



Obr. 4: Zatěžovací zkouška – 1. zatěžovací stav – dvě nákladní vozidla

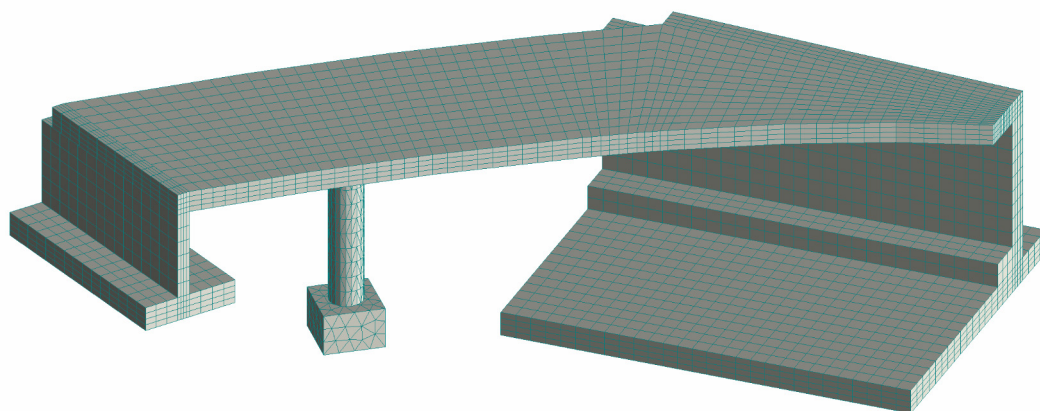


Obr. 5: Zatěžovací zkouška – 2. zatěžovací stav – čtyři nákladní vozidla

### 3 MODEL KONSTRUKCE

Geometrie modelu byla idealizována v programu ATENA 3D [3], [4] pomocí 37 makroprvků (Obr. 6). Pro beton je použit materiálový model CC3DNonLinCementitious [3]. Hodnoty parametrů materiálového modelu jsou odvozeny z krychelných pevností získaných z výsledků laboratorních zkoušek prováděných na zkušebních tělesech vyrobených při betonážích jednotlivých částí konstrukce [Tab. 1]. Jednotlivé pruty výztuže jsou umístěny dle výkresu výztuže. Veškerá nosná výztuž odpovídá realitě, rozdělovací výztuž je zanedbána. Smyková výztuž je modelována pomocí rozetřené výztuže. Celkem je v modelu 1635 prutů o průměru 16–32 mm (Obr. 7). Použitá betonářská ocel pro výztuž konstrukce je třídy B500B. Na základě certifikátu jakosti od výrobce byly definovány hodnoty materiálového modelu CCReinforcement (bilineární pracovní diagram oceli se skutečnou mezí kluzu, mezí pevnosti a přetvoření na mezí kluzu). Charakter sítě MKP je částečně zřejmý z Obr. 6. Model obsahoval celkem 11351 prvků.





Obr. 6: Geometrie modelu a MKP síť

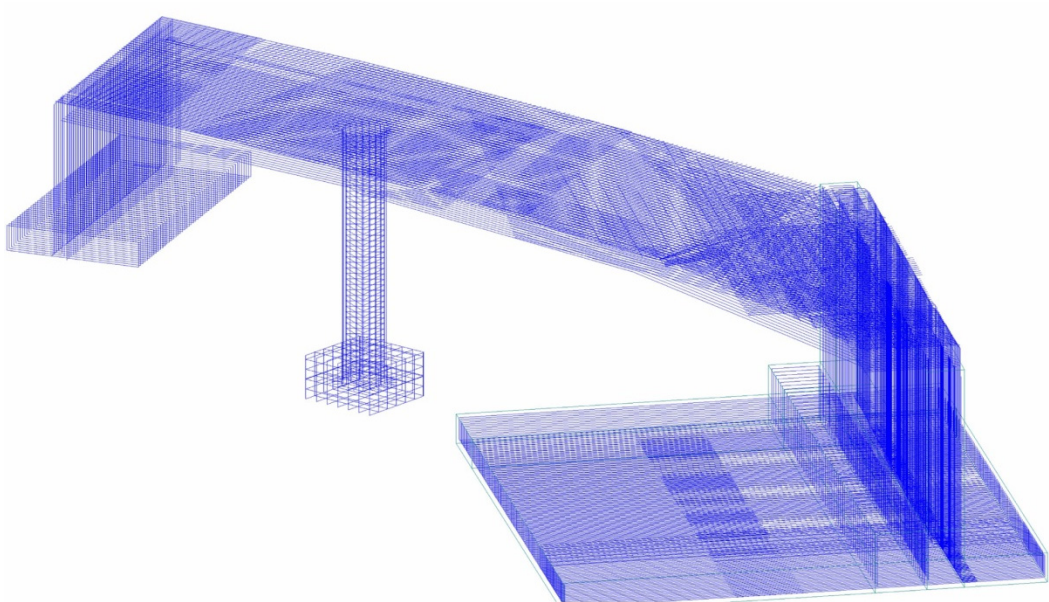
Tab. 1: Výsledky laboratorních zkoušek betonu

Casting journal - Bridge 2-2043-15										
Casting date	Element	Object	Concrete quality	Slump		Aircontent		w/c	Temperature of pure concrete (°C)	Cube strenght 28 days (Mpa)
				ordered	delivered (mm)	air min (%)	air .place (%)			
2.6.2014	Foundation 1	2-2043-15	C35/45 XD3/XF4	S4	155,0	4,0	5,9	0,4	17,5	58,8
		2-2043-15			160,0		7,0		17,6	
		2-2043-15			150,0		6,5		17,2	
18.7.2014	Foundation 2	2-2043-15	C35/45 XD3/XF4	S3	145,0	4,0	4,8	0,4	22,5	54,6
		2-2043-15								
		2-2043-15								
4.7.2014	Foundation 3	2-2043-15	C35/45 XD3/XF4	S4	180,0	4,0	6,5	0,4		59,6
		2-2043-15			190,0		4,5			
		2-2043-15			140,0		5,3			
25.9.2014	Support 1	2-2043-15	C35/45 XD3/XF4	S4	210,0	4,0	6,4	0,4		54,4
		2-2043-15			200,0		5,6			
		2-2043-15			220,0		4,8			
29.8.2014	Support 2	2-2043-15	C35/45 XD3/XF4	S4	230,0	4,0	8,0	0,4		54,0
		2-2043-15			220,0		5,5			
		2-2043-15			210,0		4,5			
28.7.2014	Support 3	2-2043-15	C35/45 XD3/XF4	S4	180,0	4,0	7,5	0,4	18,5	40,7
		2-2043-15			150,0		7,9		19,6	
		2-2043-15			160,0		6,5		18,2	
20.10.2014	Top desk	2-2043-15	C35/45 XD3/XF4	S4	170,0	4,0	5,6	0,4	16,8	41,2
		2-2043-15			140,0		6,5		18,0	
		2-2043-15			180,0		5,8		17,9	

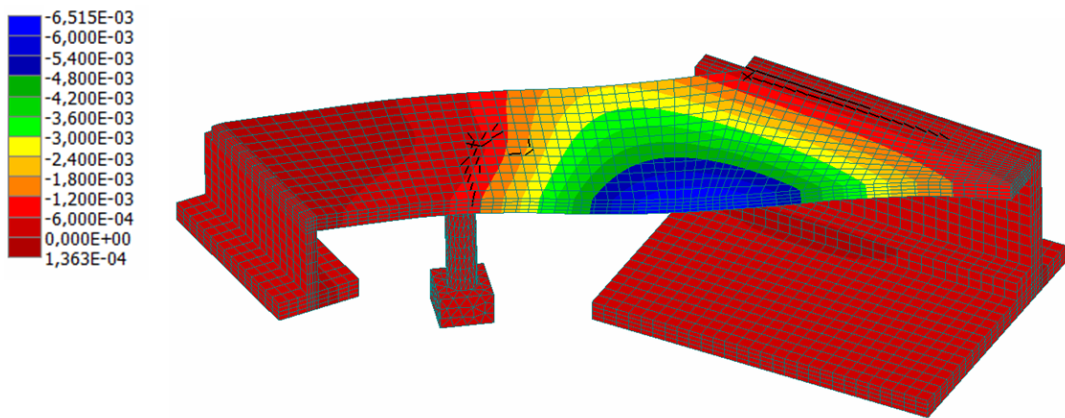
### 3.1 Výsledky, srovnání se zatěžovací zkouškou.

Jednu ze sledovaných sad výsledků představují svislé posuny mostní konstrukce. Obr. 8 přibližuje celkovou situaci. Obr. 9 a Tab. 2 potom porovnávají simulované a naměřené hodnoty svislých posunů vybraných bodů na dolní straně mostovky. Dosažená shoda je uspokojivá, zdůvodnění významnějších odchylek ještě bude předmětem dalších analýz.

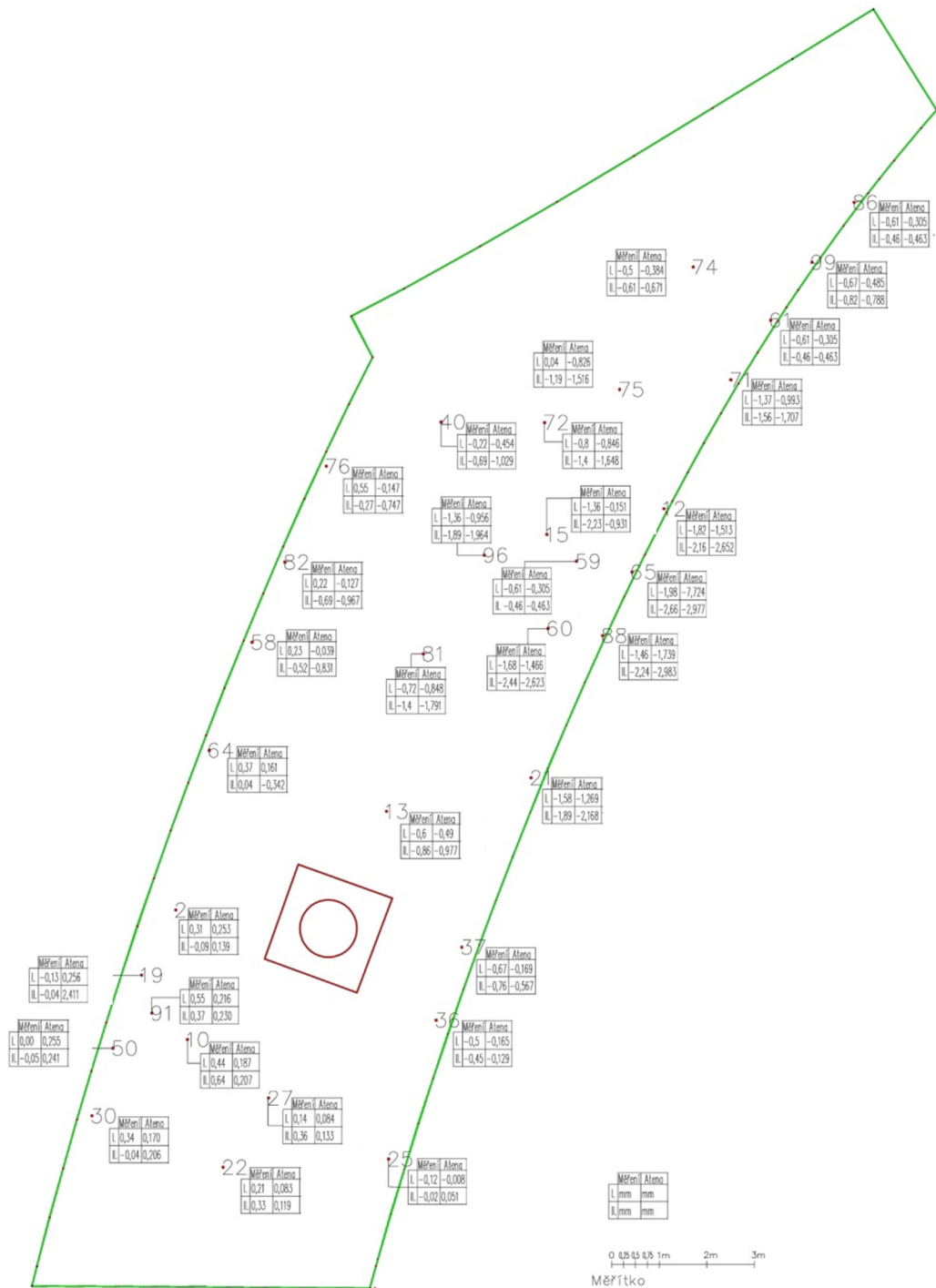
Analýza dalších výsledků (např. Obr. 10 a Obr. 11) modelu umožňuje vytipování míst s významnějším poškozením konstrukce. Ke vzniku trhlin by mohlo docházet především na horním povrchu mostovky nad středovým pilířem a u severní opěry. Simulovaná šířka trhlin nepřekračuje limitní hodnoty definované normami, může ale ovlivnit životnost konstrukce. Proto by tato místa měla být sledována při prohlídkách mostu.



Obr. 7: Výztuž modelu



Obr. 8: Simulované svislé posuny od 2. zatěžovacího stavu (zvětšeno 150×) vč. obrazu trhlin (černé úsečky)



Obr. 9: Měřené a simulované posuny na dolní části mostovky (hodnoty shrnuty v Tab. 2)

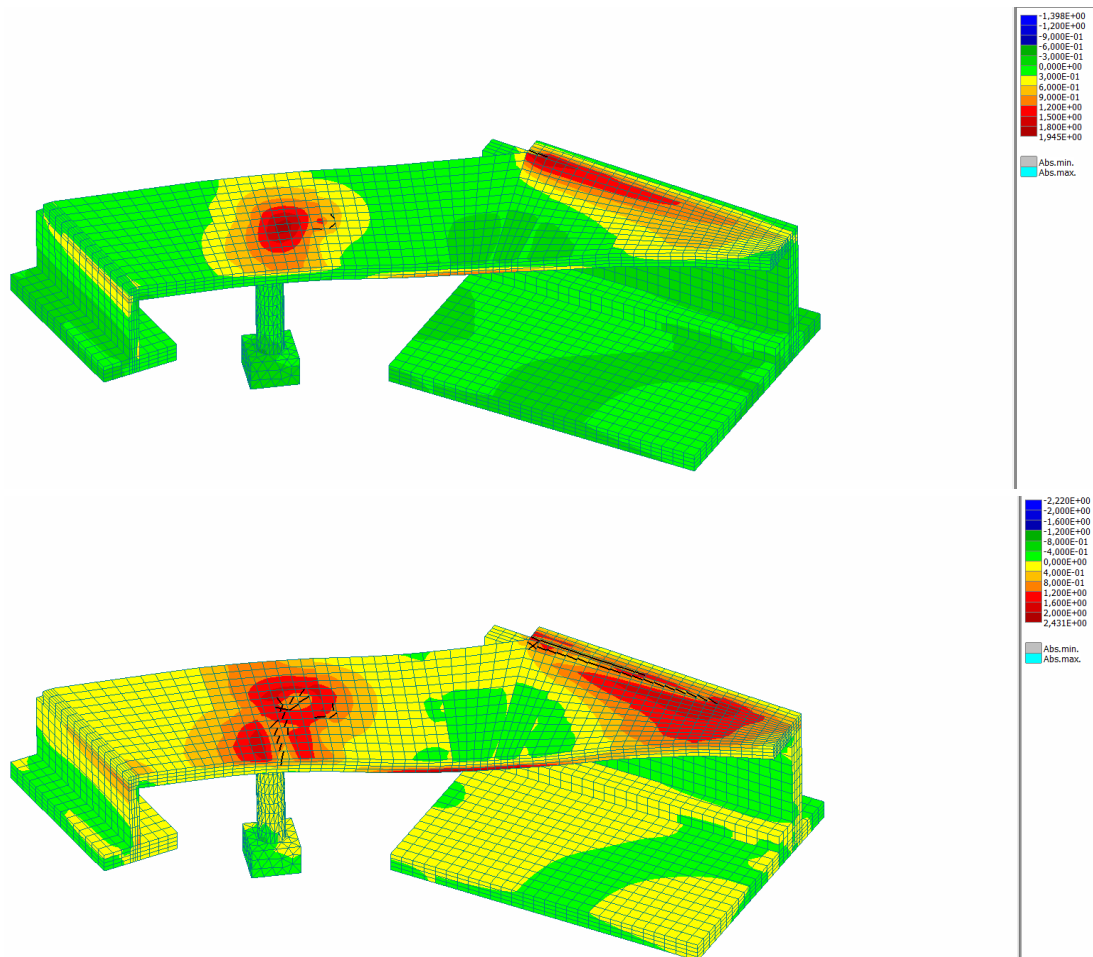
Tab. 2: Porovnání naměřených a simulovaných hodnot svislých posunů na dolním povrchu mostovky

Bod číslo	1.zatěžovací stav			2.zatěžovací stav		
	Naměřené posuny (mm)	ATENA posuny (mm)	rozdíln posunů (%)	Naměřené posuny (mm)	ATENA posuny (mm)	rozdíln posunů (%)
2	0,31	0,253	18,30	0,09	0,139	54,56
10	0,44	0,187	57,61	0,64	0,207	67,71
12	-1,82	-1,513	16,87	-2,16	-2,652	22,78
13	-0,6	-0,490	18,33	-0,86	-0,977	13,60
15	-1,36	-1,171	13,90	-2,23	-1,917	14,04
19	-0,13	0,256	296,66	-0,04	0,241	702,98
21	-1,58	-1,269	19,68	-1,89	-2,168	14,71
22	0,21	0,083	60,46	0,33	0,120	63,66
25	-0,12	-0,009	92,89	-0,02	0,051	355,05
27	0,14	0,084	39,67	0,36	0,133	62,98
30	0,34	0,170	49,87	-0,04	0,206	615,02
36	-0,5	-0,165	66,94	-0,45	-0,130	71,20
37	-0,67	-0,170	74,69	-0,76	-0,568	25,32
40	-0,22	-0,454	106,36	-0,69	-1,029	49,13
50	0,00	0,256	2456,60	-0,05	0,241	582,38
58	0,23	-0,039	116,96	-0,52	-0,831	59,81
59	-2,46	-1,452	40,98	-3,23	-2,606	19,32
60	-1,68	-1,466	12,74	-2,44	-2,623	7,50
64	0,37	0,162	56,24	0,04	-0,343	956,25
65	-1,98	-1,724	12,93	-2,66	-2,977	11,92
71	-1,37	-0,993	27,52	-1,56	-1,707	9,42
72	-0,8	-0,846	5,75	-1,4	-1,648	17,71
74	-0,5	-0,384	23,14	-0,61	-0,671	10,05
75	0,04	-0,826	2165,00	-1,19	-1,516	27,39
76	0,55	-0,147	126,73	-0,27	-0,747	176,67
81	-0,72	-0,848	17,78	-1,4	-1,791	27,93
82	0,22	-0,127	157,73	-0,69	-0,967	40,14
86	-0,61	-0,305	49,97	-0,46	-0,463	0,70
88	-1,46	-1,739	19,11	-2,24	-2,983	33,17
91	0,55	0,217	60,62	0,37	0,230	37,81
96	-1,36	-0,956	29,71	-1,89	-1,964	3,92
99	-0,67	-0,485	27,61	-0,82	-0,788	3,90

Rozdíl posunů v Tab. 2 je definován dle (1).

$$\text{rozdíl posunů} = \left| \frac{(\text{měření} - \text{ATENA}) \times 100}{\text{měření}} \right| \quad (1)$$





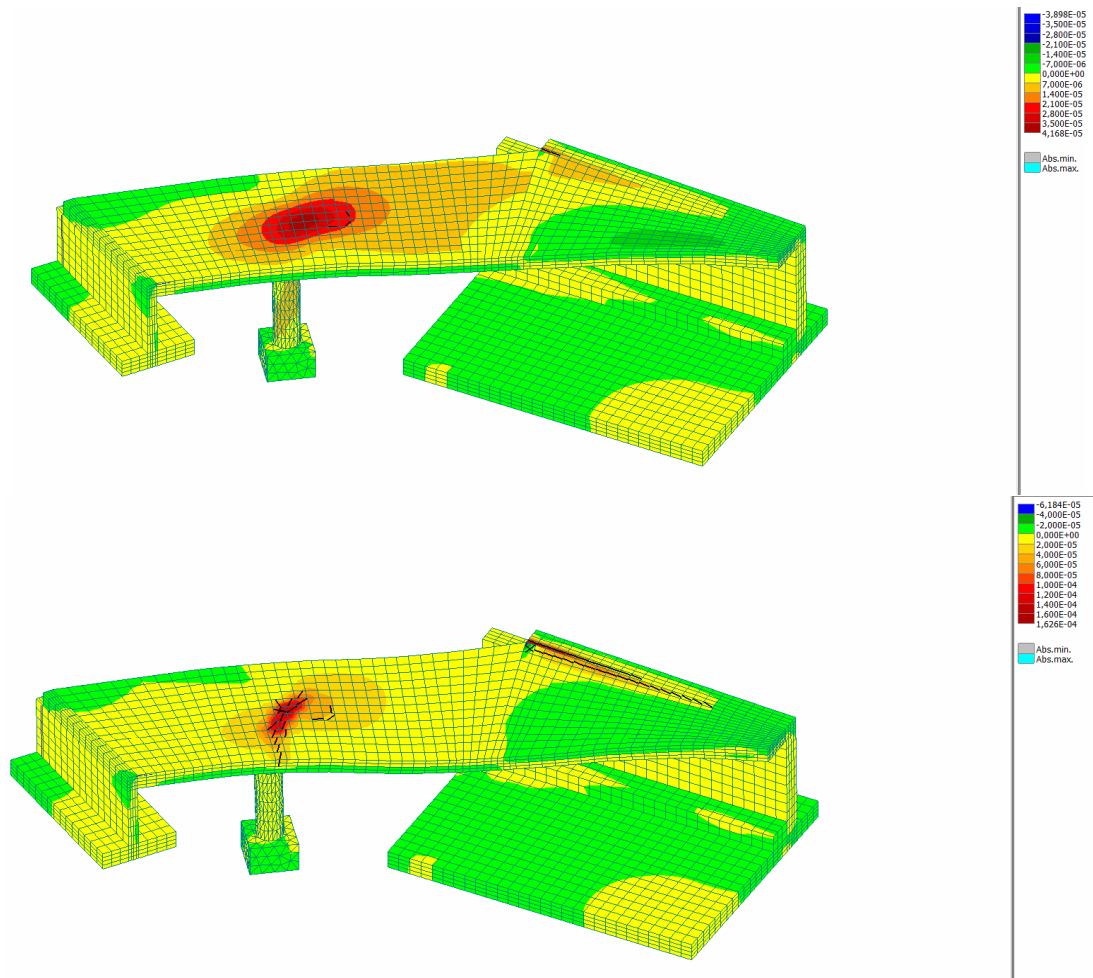
Obr. 10: Izoplochy prvních hlavních napětí vč. MKP sítě a obrazu trhlin (černé úsečky) – max. šířka 0,285 mm (přetvoření konstrukce zvětšeno 150×); horní obr. – vlastní tíha, dolní obr. – 2. zatěžovací stav

#### 4 ZÁVĚR

Príspevek predstavuje výsledky nelineárnej analýzy mechanickej odezvy mostu č. 2-2043-15 E4 Kristineberg ve Stockholmu. Ukazuje dobrou shodu výsledků simulací s daty ze zatěžovací zkoušky. Jsou identifikována místa se zvýšeným rizikem poškození, vyžadující sledování v průběhu užívání stavby. Odladěný model může být využit k parametrickým či pravděpodobnostním studiím chování konstrukce a tak přispět k optimálnímu užívání konstrukce.

#### PODĚKOVÁNÍ

Príspevek byl vytvořen v rámci řešení projektu č. LO1408 "AdMaS UP - Pokročilé stavební materiály, konstrukce a technologie" podporovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy v rámci účelové podpory programu „Národní program udržitelnosti I“ a projektu CZ.1.07/2.3.00/30.0005 – “Podpora tvorby excelentních týmů mezioborového výzkumu na VUT”.



Obr. 11: Poměrné přetvoření  $\epsilon_{xx}$  vč. obrazu trhlin (černé úsečky) – max. šířka 0,285 mm (přetvoření konstrukce zvětšeno 150×); horní obr. – vlastní tíha, dolní obr. – 2. zatěžovací stav

## LITERATURA

- [1] PEKÁR, M. Projektová dokumentace stavby – Trafikplats Kristineberg, Stockholm. Valbek s. r. o., 2014.
- [2] ŠEDA P. Nelineární analýza mostu č. 2-2043-15, E4 Kristineberg, Stockholm. Diplomová práce (vedoucí práce Ing. Ladislav Řoutil, Ph.D.). Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra dopravního stavitelství, Pardubice, 2015, 70 s.
- [3] ČERVENKA V. et al. ATENA Program Documentation, Part 1 – Theory. Červenka Consulting s. r. o., Praha, 2014.
- [4] ČERVENKA V. et al. ATENA Program Documentation, Part 2-2 – User's Manual for Atena 3D. Červenka Consulting s.r.o., Praha, 2014.

## Oponentní posudek vypracoval:

Ing. Roman Fojtík, Ph.D., Katedra konstrukcí, Fakulta stavební, VŠB-TU Ostrava.

Ing. Radomír Pukl CSc., Červenka Consulting s.r.o., Praha.