



HRVATSKA KOMORA INŽENJERA GRAĐEVINARSTVA

15. Dani Hrvatske komore inženjera građevinarstva

Opatija, 2021.

PREDVIĐANJE PONAŠANJA TUNELA U KRŠKIM STIJENSKIM MASAMA PRIMJENOM ALATA UMJETNE INTELIGENCIJE

Mario Bačić

Meho Saša Kovačević

doc.dr.sc. Mario Bačić, mag.ing.aedif., Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet

prof.dr.sc. Meho Saša Kovačević, dipl.ing.građ., Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet

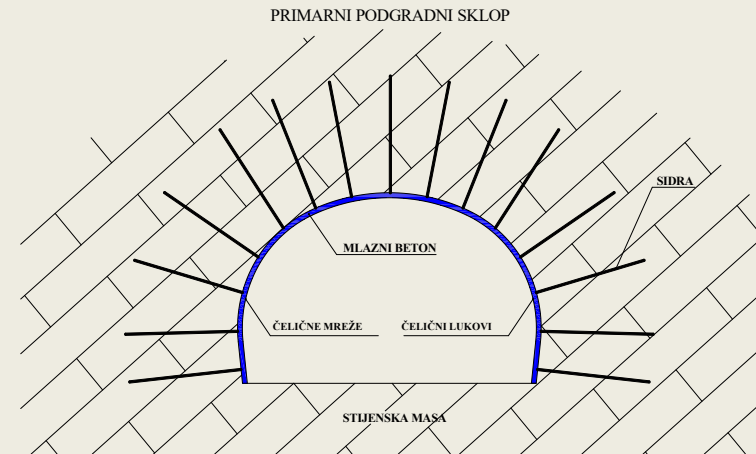
Sadržaj

- Problematika dugotrajnog deformiranja tunela
- Predviđanje dugotrajnog ponašanja tunela
- Tuneli Pećine (cestovni) i Brajdica (željeznički)

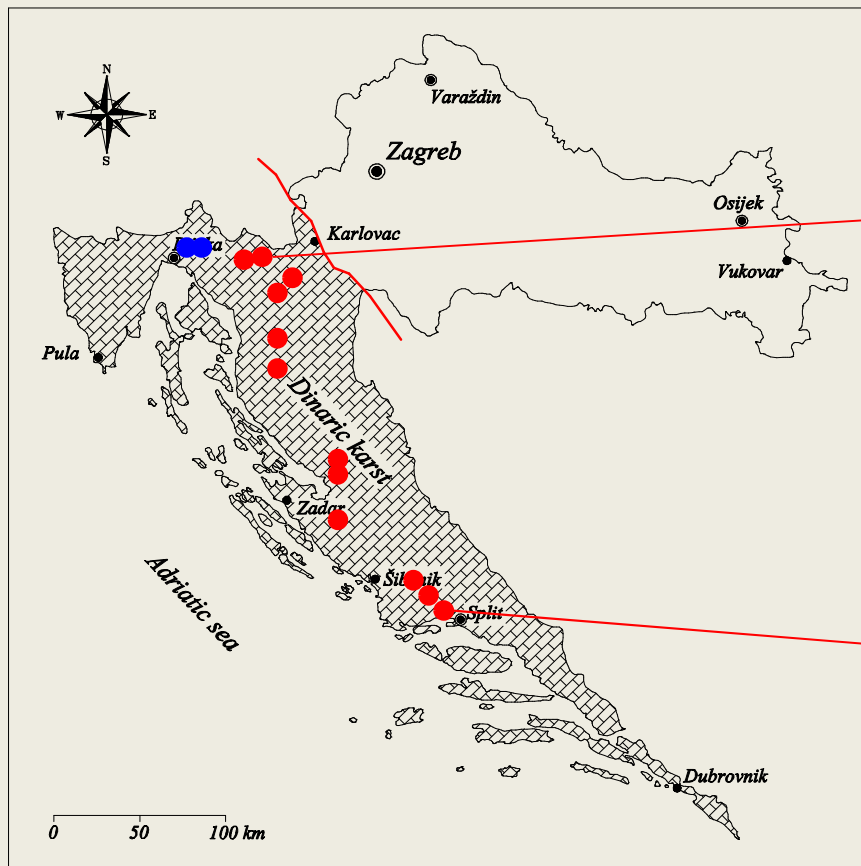


Dugotrajno deformiranje tunela

- Kao rezultat iskustva, niza mjerenja na tunelima, te teoretskih razmatranja razvijena je NATM-a kao metoda iskopa podzemnih građevina većih profila bez privremene podgrade.
- Prema osnovnim postavkama NATM primarna tunelska podgrada služi za trajno osiguranje tunelskog profila i u interakciji sa stijenskim masivom mora preuzeti cjelokupno opterećenje.
- U skladu s tim sekundarna tunelska obloga ne preuzima nikakvo značajnije opterećenje.



- Mjerenja deformacija oko podzemnih otvora u svijetu, ali i u Republici Hrvatskoj pokazala su znatne priraste napreznja i deformacija za vrijeme eksploatacije kako u primarnoj podgradi tako i u sekundarnoj oblozi.



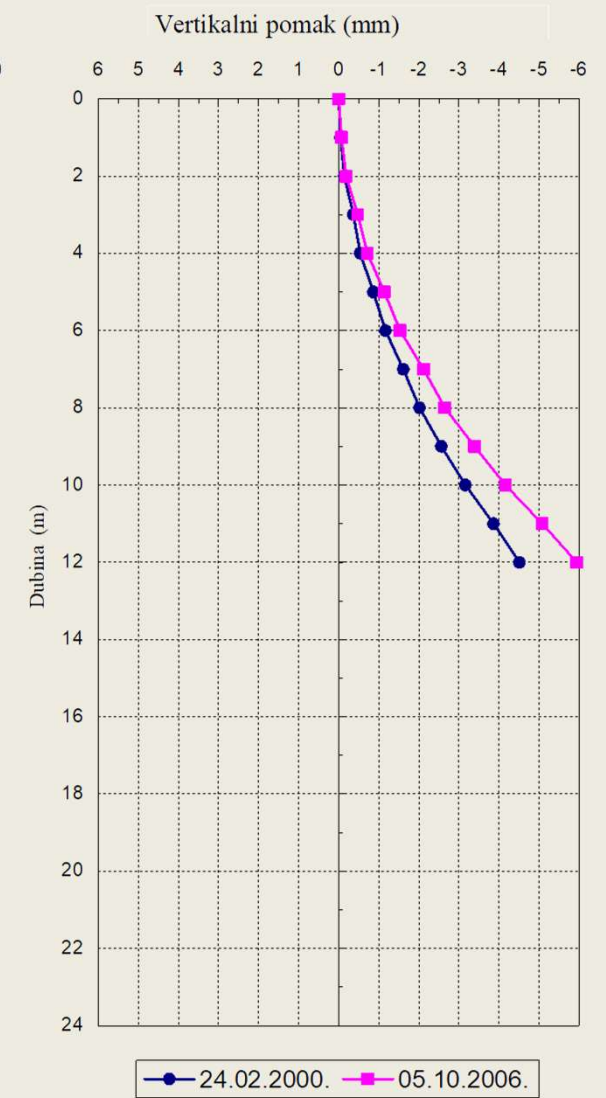
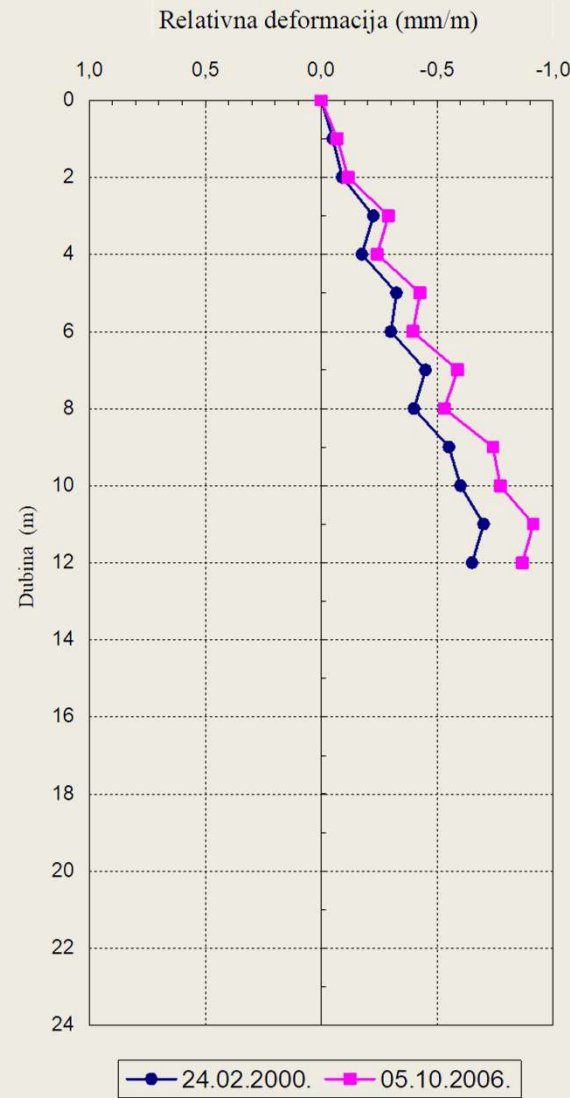
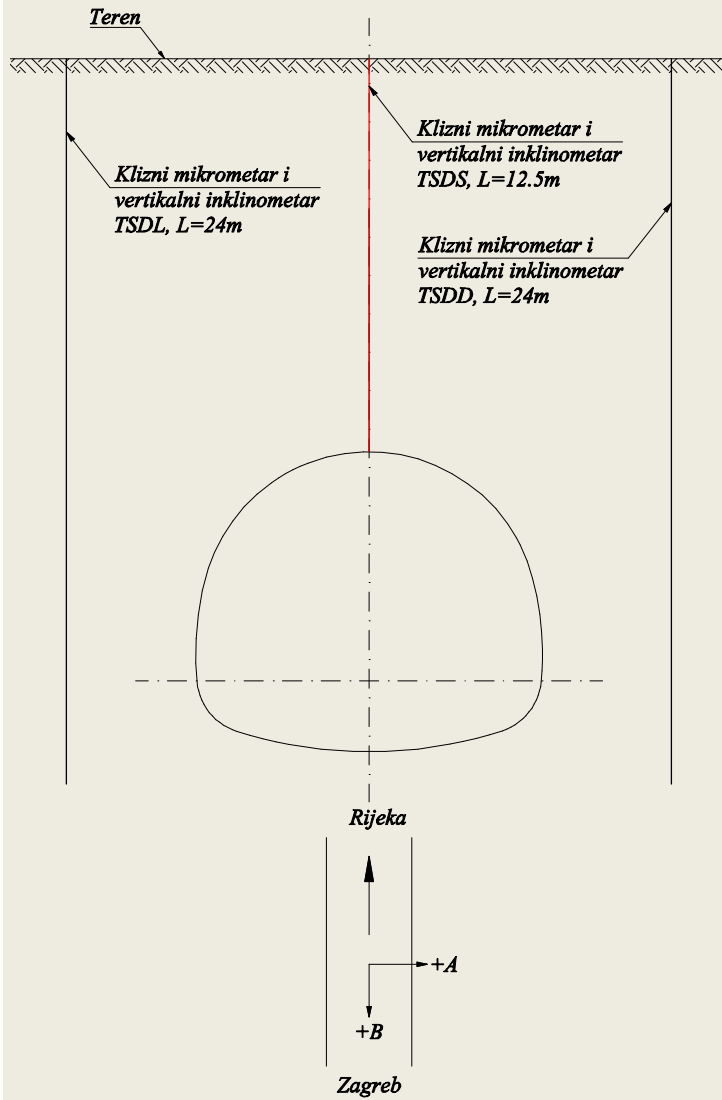
Primjer 1. Tunel Pod Vugleš



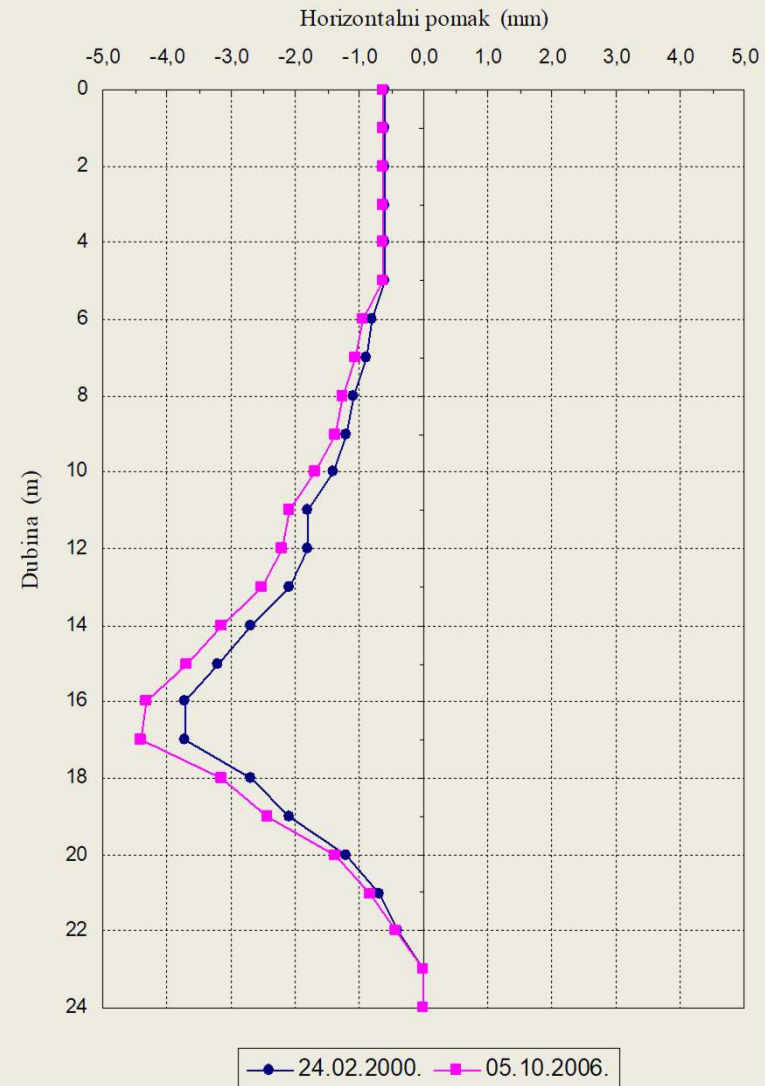
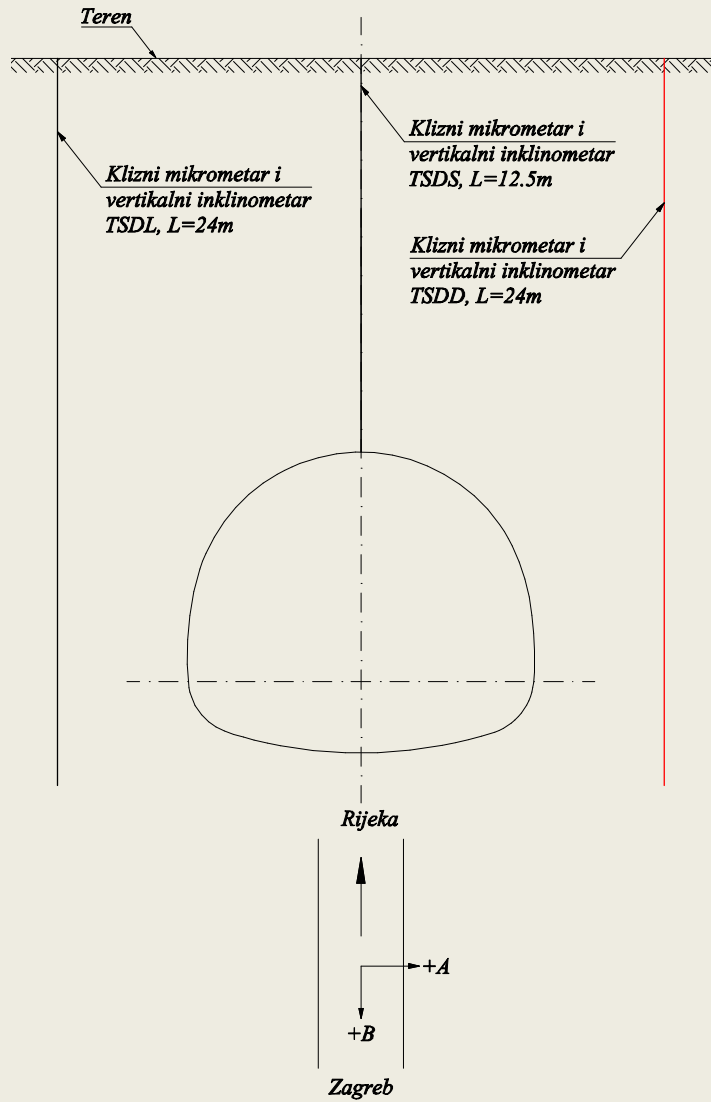
Primjer 2. Tunel Konjsko



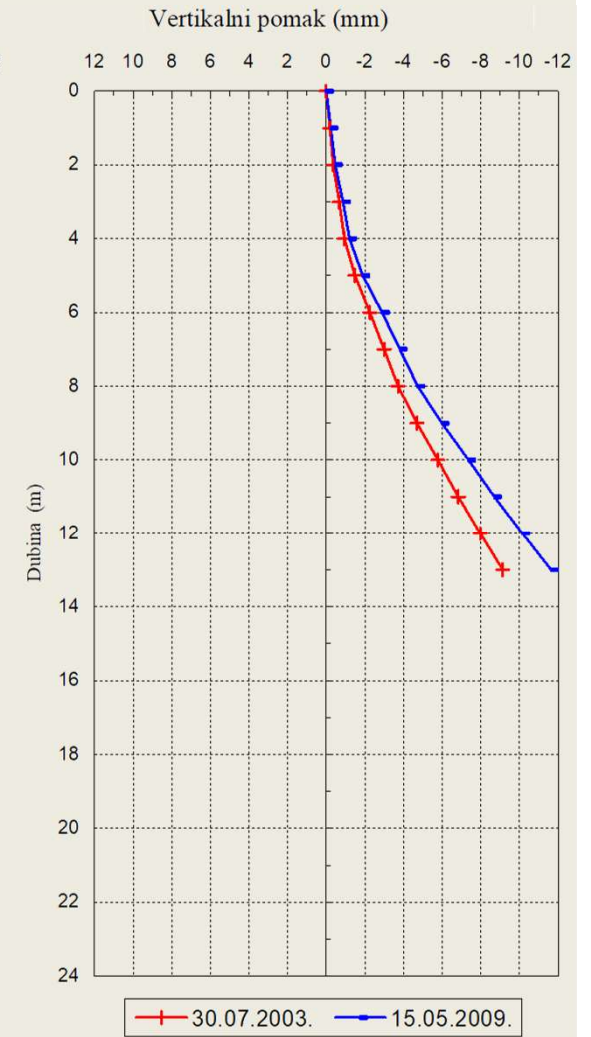
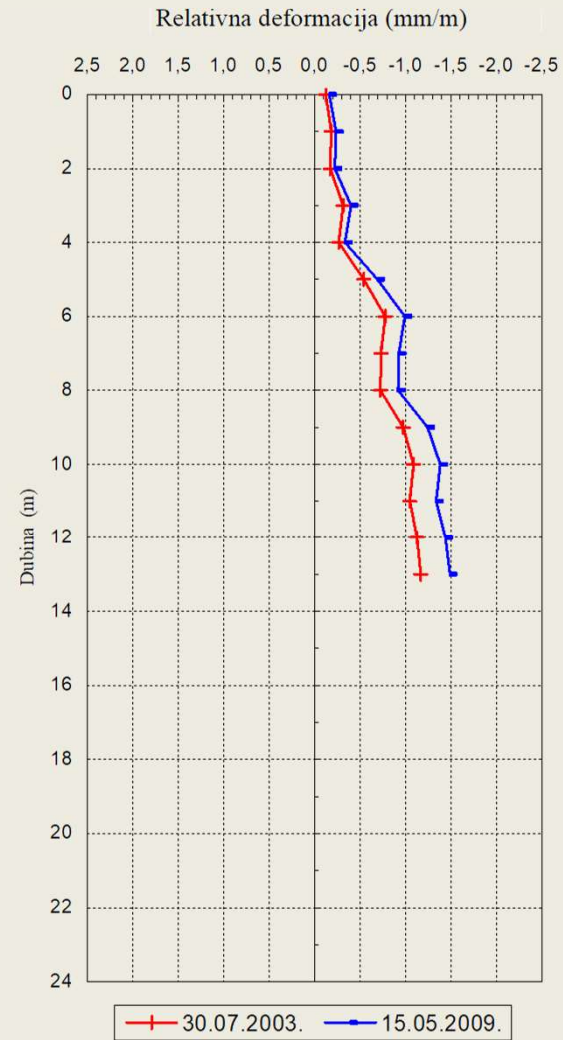
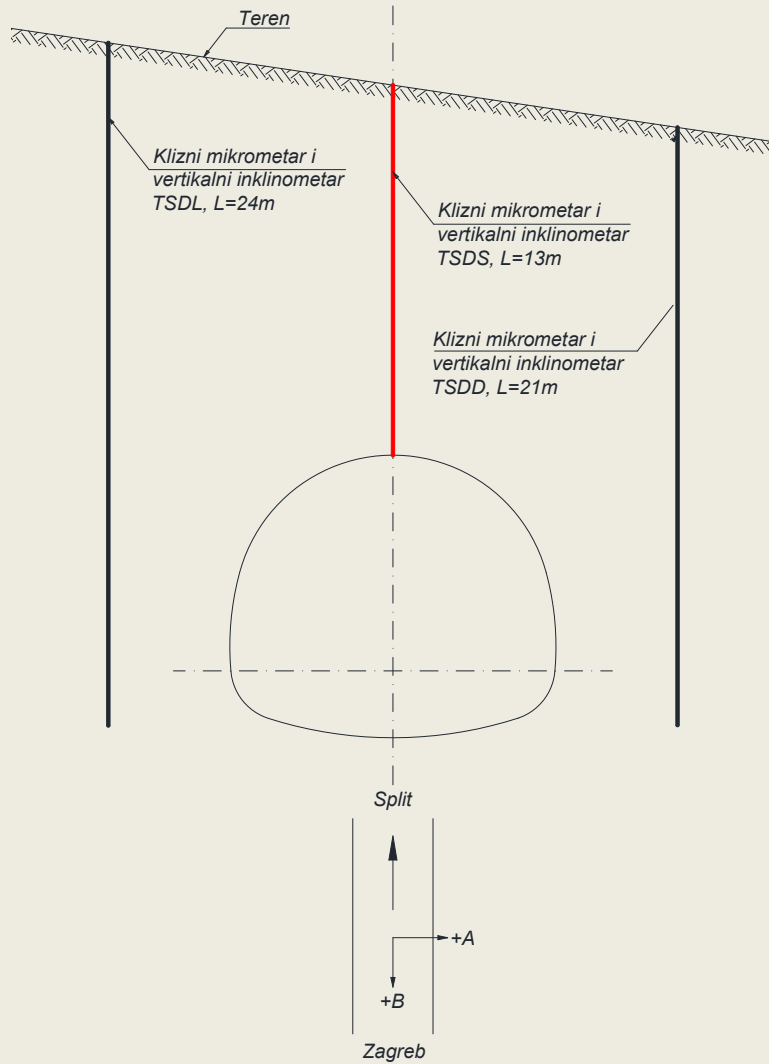
Primjer 1. Tunnel Pod Vugleš



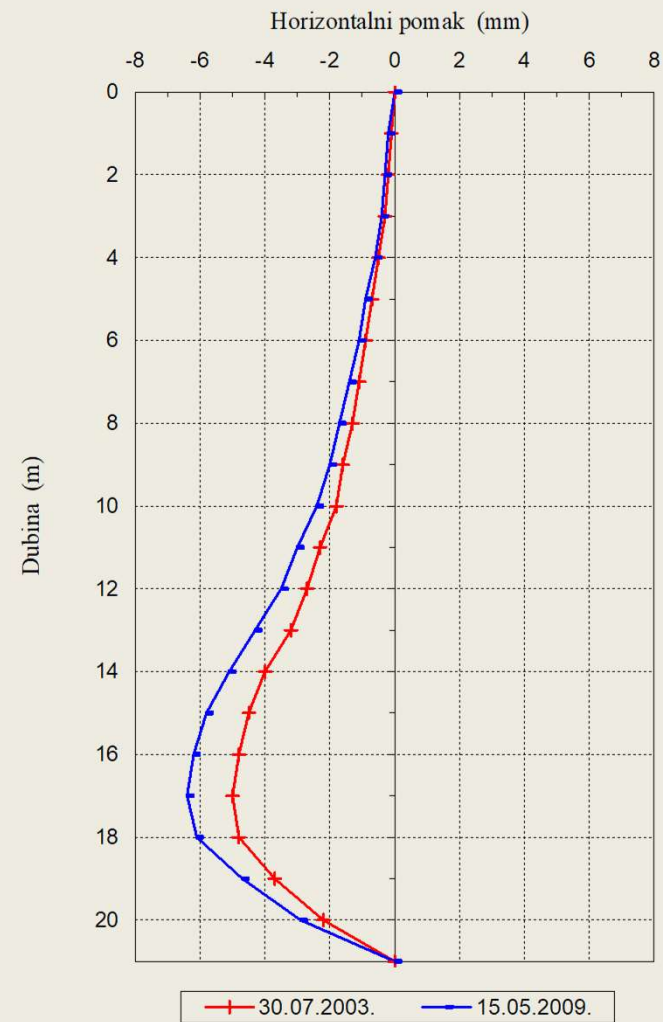
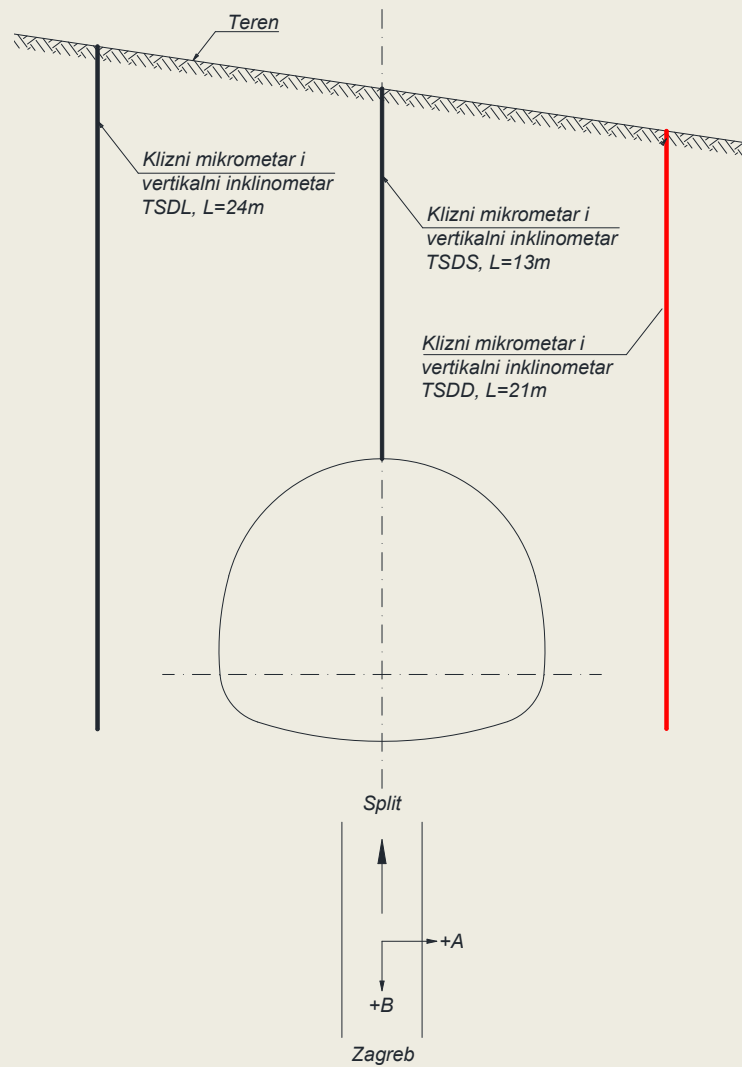
Primjer 1. Tunnel Pod Vugleš



Primjer 2. Tunel Konjsko



Primjer 2. Tunel Konjsko



Dugotrajno deformiranje tunela

Primjer 1. Tunel Pod Vugleš

Vertikalni pomaci porasli su do 30%
Horizontalni pomaci porasli su do 16%

| Pro fil | T SDL | T SDS | TSDD |
|---------------|-------|-------|-------|
| | [m m] | [m m] | [m m] |
| $u_{v,2000}$ | 4.80 | 4.50 | 4.50 |
| $u_{v,2006}$ | 6.00 | 6.00 | 5.70 |
| $u_{hA,2000}$ | 3.20 | - | 3.75 |
| $u_{hA,2006}$ | 3.80 | - | 4.40 |
| $u_{hB,2000}$ | 3.60 | 1.90 | 3.90 |
| $u_{hB,2006}$ | 4.10 | 2.10 | 4.50 |

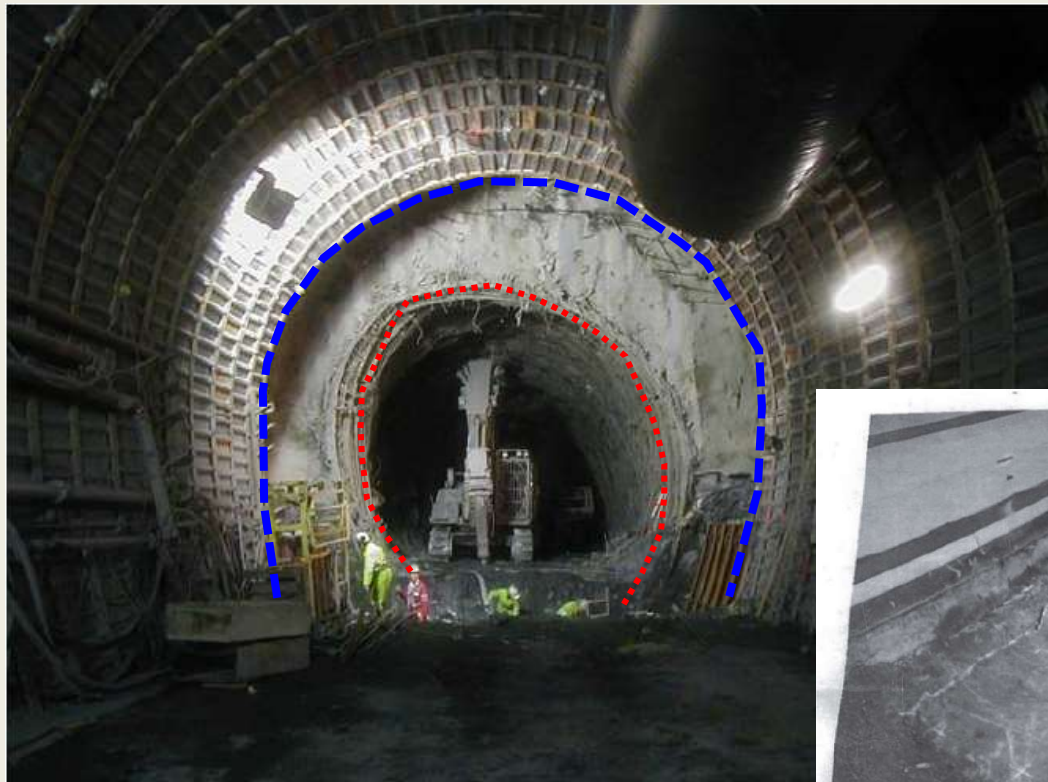
Primjer 2. Tunel Konjsko

Vertikalni pomaci porasli su do 28%
Horizontalni pomaci porasli su do 31%

| Pro fil | T SDL | T SDS | TSDD |
|---------------|-------|-------|-------|
| | [mm] | [mm] | [mm] |
| $u_{v,2003}$ | 8.53 | 9.13 | 8.32 |
| $u_{v,2009}$ | 10.52 | 11.64 | 10.35 |
| $u_{hA,2003}$ | 5.50 | 0.60 | -5.00 |
| $u_{hA,2009}$ | 6.90 | 0.80 | 6.40 |
| $u_{hB,2003}$ | 3.10 | 2.90 | 2.70 |
| $u_{hB,2009}$ | 3.90 | 3.80 | 3.60 |



- Omekšavajuće ponašanje i vremenski ovisno ponašanje - ISRM definira "rock squeezing" kao vremenski ovisnu konvergenciju ili deformaciju koja može prestati tijekom gradnje ili se nastaviti tijekom dužeg vremenskog razdoblja.

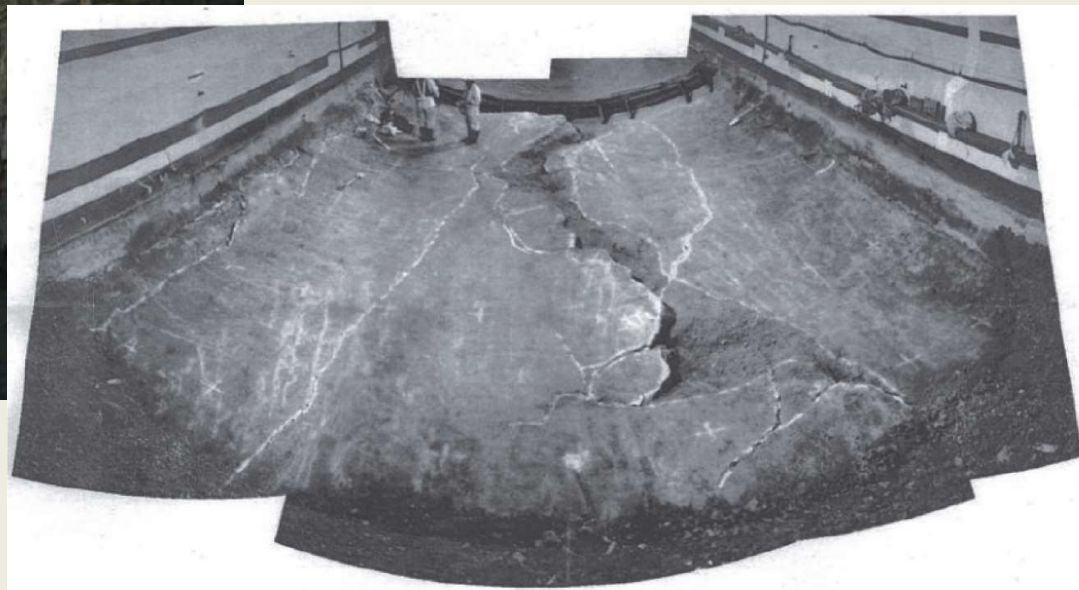


Lyon-Torino željeznička linija

(Barla, 2008)

*Cestovni tunel u Japanu
slom nakon 17 godina eksploatacije*

(Okui, 2012)



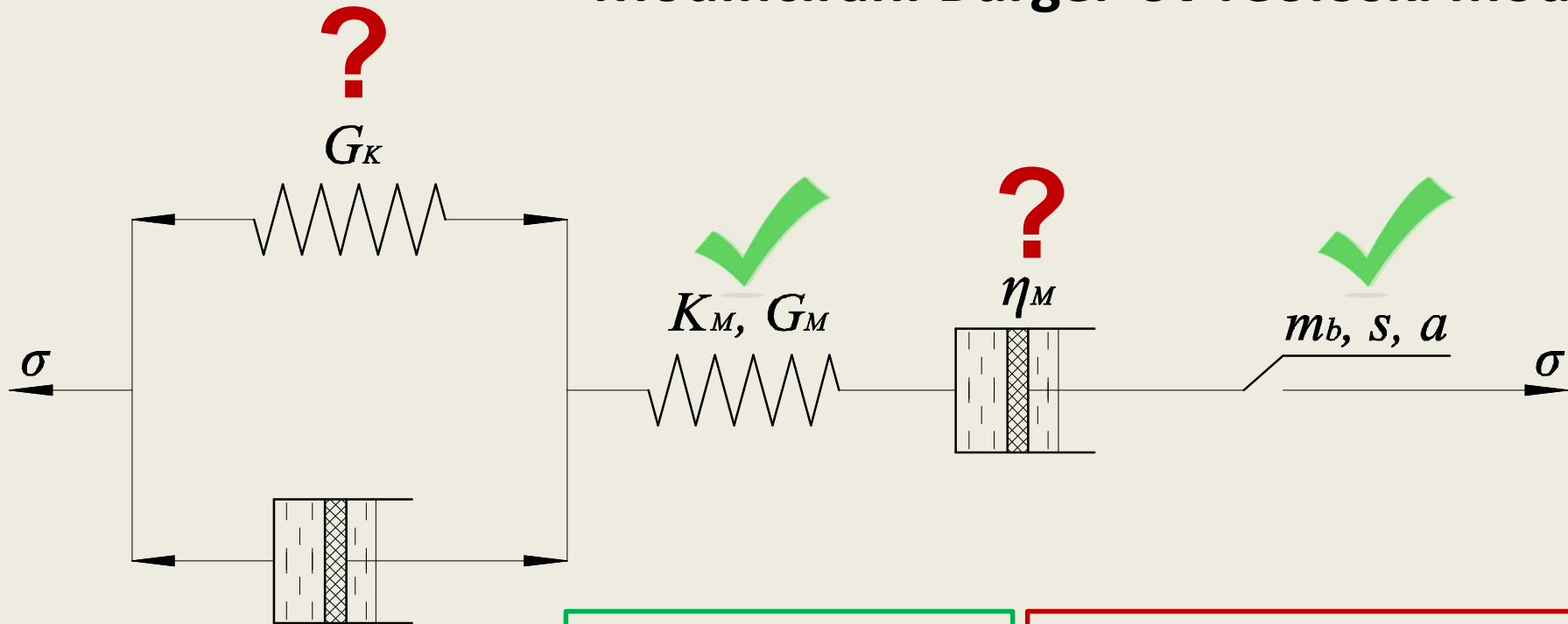
Dugotrajno deformiranje tunela

Reološki parametri se generalno mogu odrediti na dva načina:

1. Iz rezultata laboratorijskih (pokusi puzanja, relaksacije itd.) i in-situ ispitivanja odnosno krivulja puzanja. Navedeni način uspješno funkcionira kod jednostavnijih modela, ali kod složenijih modela, gdje postoji čitav niz parametara koje je potrebno odrediti, nailazi se na poteškoće + **dugotrajni i skupi pokusi!**
2. Iz rezultata **povratnih numeričkih analiza**, gdje se na osnovu rezultata mjerenja, te usvojenog reološkog modela, raznim metodama traže parametri, koji bi uspješno oponašali dugotrajne deformacije.



Modificirani Burger-ov reološki model



$$K_M = \frac{E_{rm}}{3 \cdot (1 - 2\nu)}$$

$$G_M = \frac{E_{rm}}{2 \cdot (1 + \nu)}$$

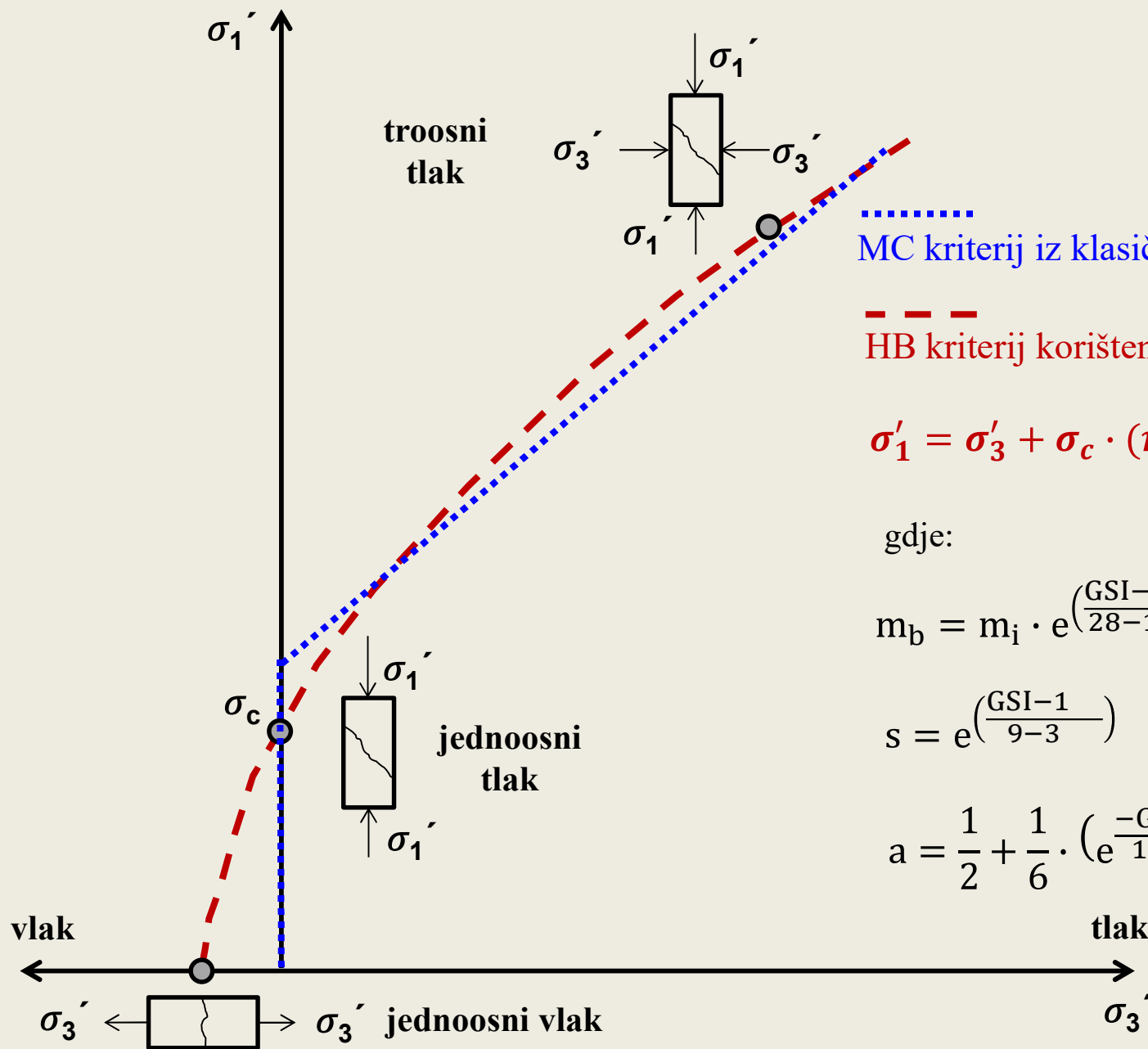
$$E_{rm} = ID_m \cdot GSI^2 \cdot V_p^2$$

Kelvin-ova viskoznost: η_K

Maxwell-ova viskoznost: η_M

Omjer modula: G_K/K_M





troosni tlak

..... MC kriterij iz klasičnog Burgerovog modela

----- HB kriterij korišten u istraživanju

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_c \cdot (m_b \cdot \frac{\sigma_3'}{\sigma_c} + s)^a$$

gdje:

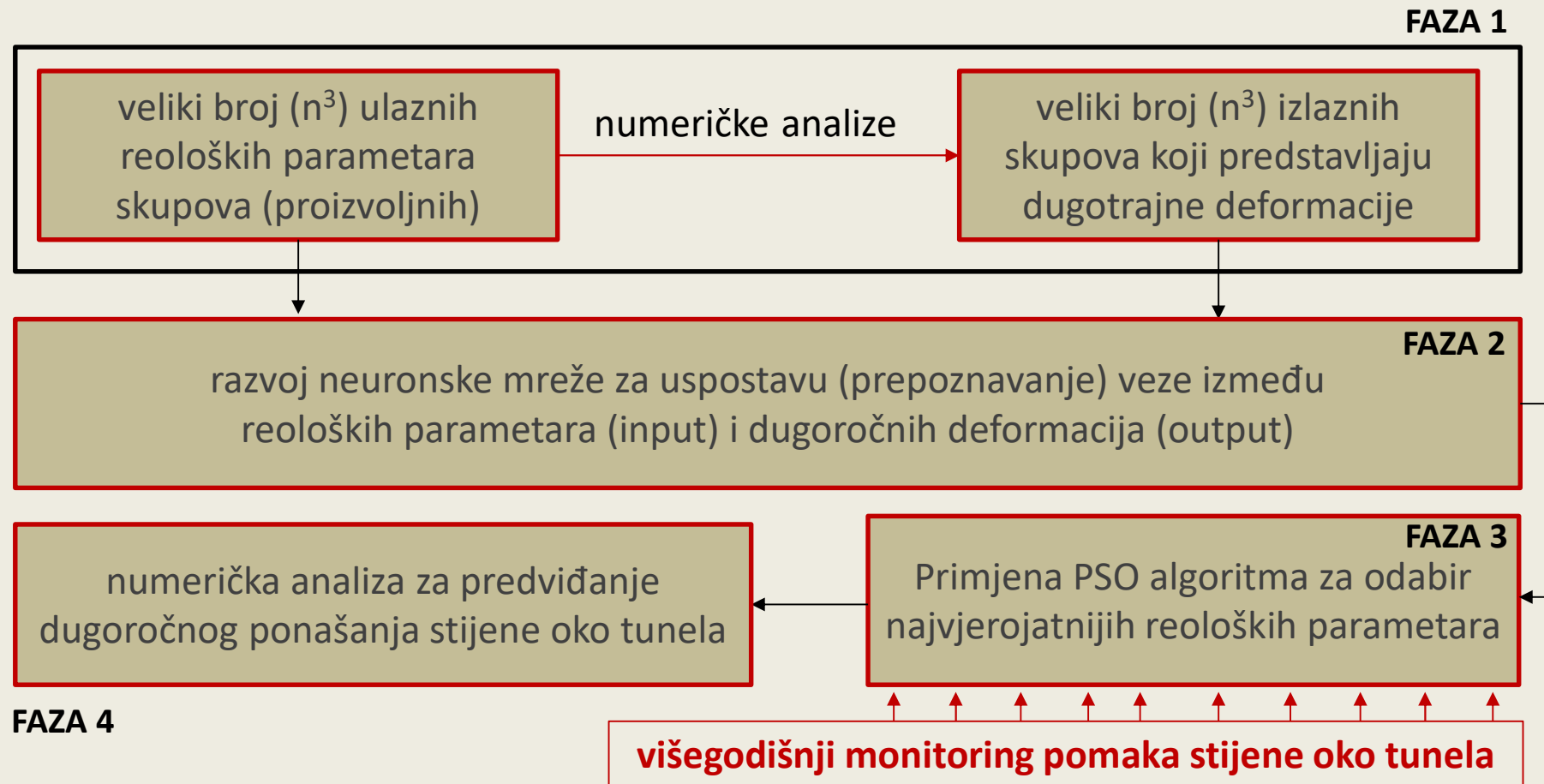
$$m_b = m_i \cdot e^{\left(\frac{GSI-100}{28-1}\right)}$$

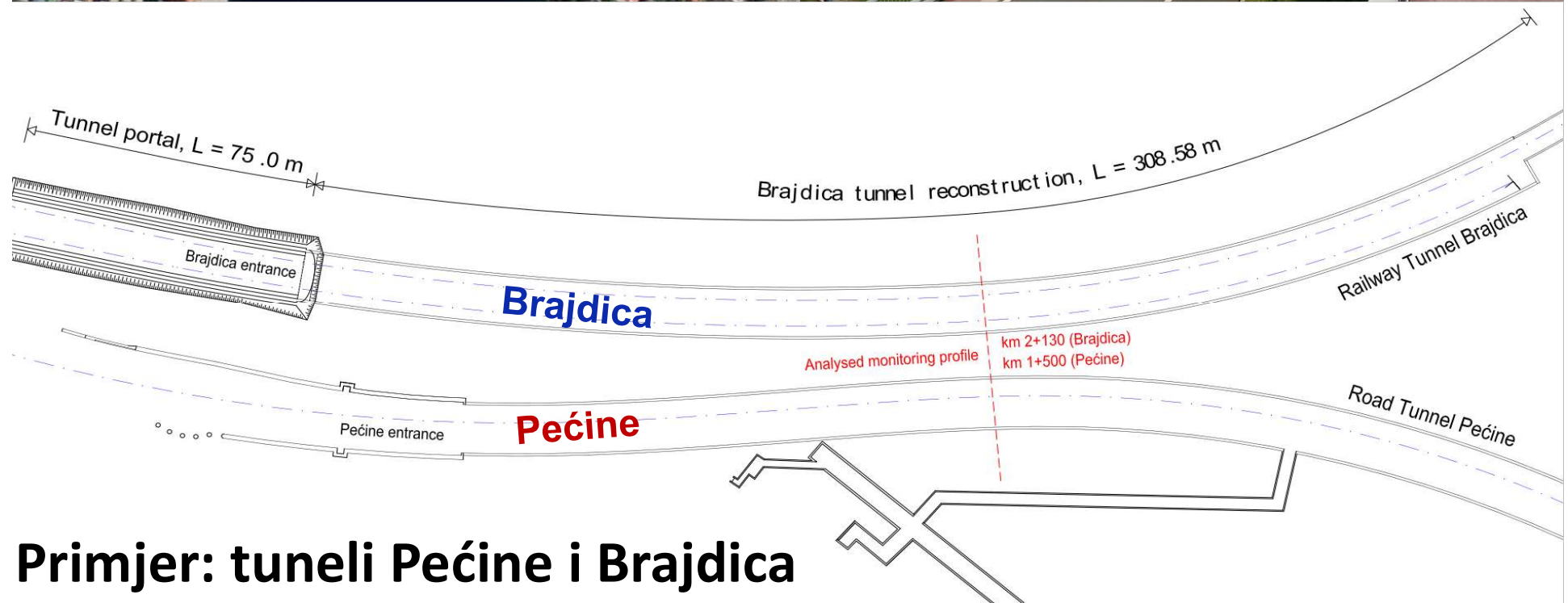
$$s = e^{\left(\frac{GSI-1}{9-3}\right)}$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \cdot \left(e^{\frac{-GSI}{15}} - e^{\frac{-20}{3}}\right)$$

Cilj i metodologija istraživanja

- Cilj:** određivanje najvjerojatnijeg skupa reoloških nepoznanica radi predviđanja dugotrajnog ponašanja tunela





Primjer: tuneli Pećine i Brajdica



Primjer: tuneli Pećine i Brajdica

Tunel Brajdica: pruga M603, koridor TEN-T

Duljina: 1838 m

Broj kolosijeka prije rekonstrukcije: 1 / Broj kolosijeka nakon rekonstrukcije: 2

Primarna podgrada rekonstruiranog tunela:

20 cm mlazni beton

čelični rešetkasti nosači na 1,5 m razmaka

samobušiva sidra duljine 6 m (21 sidro po presjeku)

Tunel Pećine: državna cesta D404

Duljina: 1259 m

Trotračni 60% / Četverotračni 40% duljne tunela

Primarna podgrada rekonstruiranog tunela:

20 cm mlazni beton

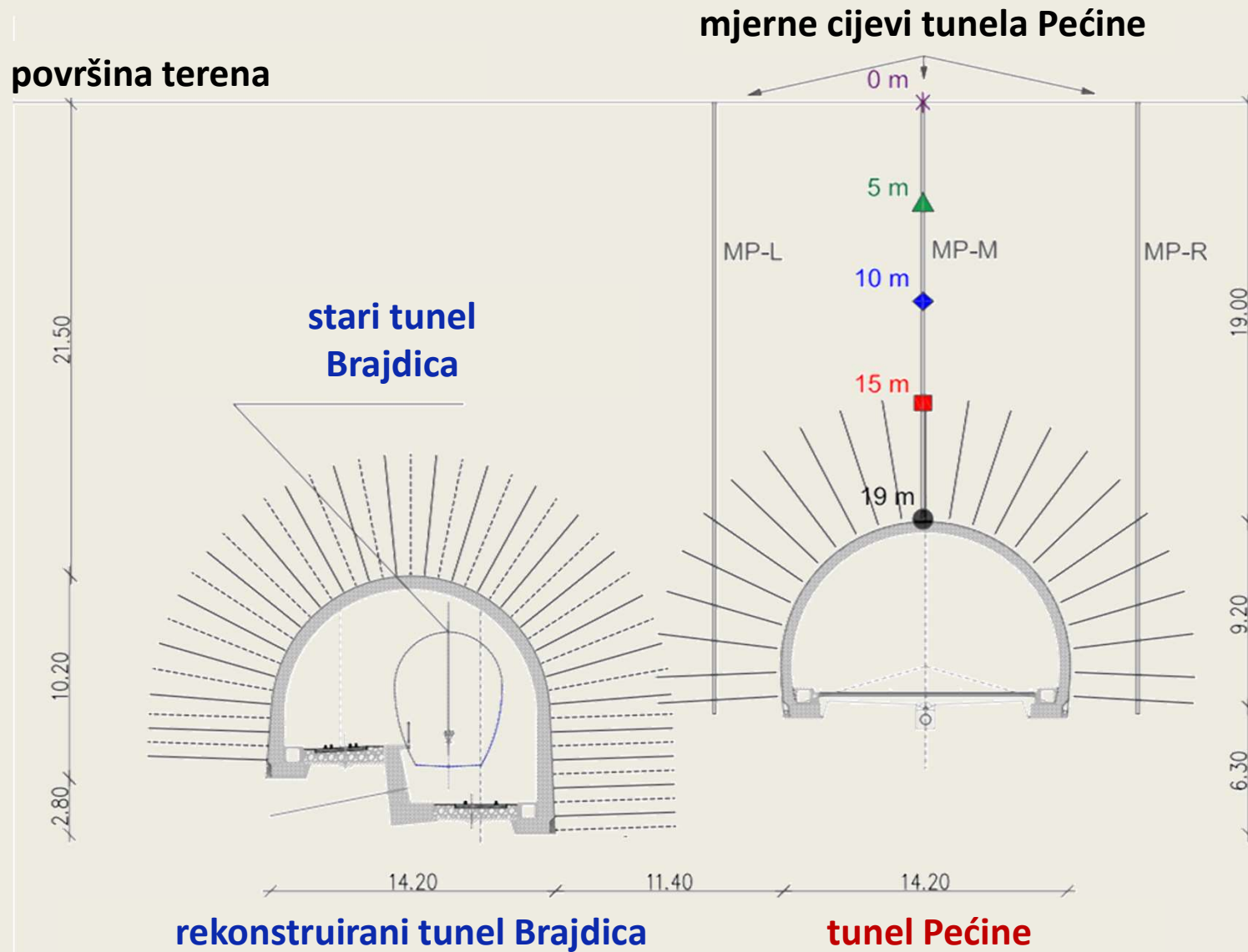
samobušiva sidra duljine 6 m (23 sidra po presjeku)



Primjer: tuneli Pećine i Brajdica



Primjer: tuneli Pećine i Brajdica



Faza 1: provedba numeričkih analiza

Omjer modula, G_k/K_M = [0.2; 0.4; 0.6; 0.8; 1.0]

Kelvin-ova viskoznost, η_K = [$2 \cdot 10^5$; $4 \cdot 10^5$; $6 \cdot 10^5$; $8 \cdot 10^5$; $1 \cdot 10^6$]

Maxwell-ova viskoznost, η_M = [$2 \cdot 10^6$; $4 \cdot 10^6$; $6 \cdot 10^6$; $8 \cdot 10^6$; $1 \cdot 10^7$]

125 (5^3) kombinacija input podataka

125 proračuna

125 output podataka

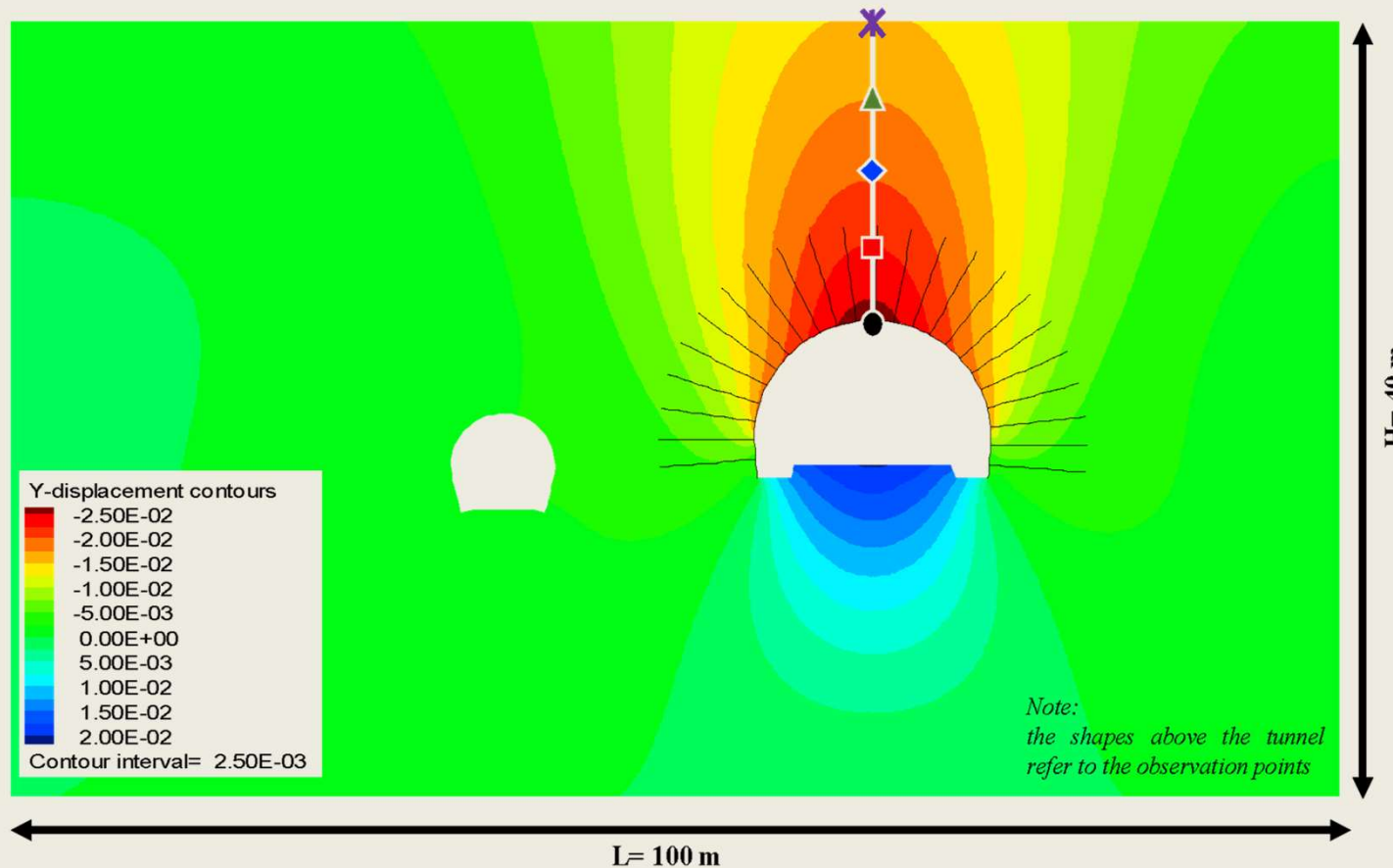
| Kelvin parametri | | Maxwell parametri | | | Hoek-Brown parametri | | | |
|----------------------------|----------------------------|--|--------------|----------------------------|----------------------|---------|-----------|--|
| G_K (MPa) | η_K (-) | K_M (MPa) | G_M (MPa) | η_M (-) | m_b (-) | s (-) | a (-) | |
| iz proizvoljnog seta | iz proizvoljnog seta | $E_{rm} = IKs \cdot GSI^2 \cdot V_p^2$ | | iz proizvoljnog seta | 1.870 | 0.001 | 0.500 | |
| | | iz parametara stijene na lokaciji | | | | | | |
| | | GSI (-) | V_p (km/s) | | m_i (-) | GSI (-) | UCS (MPa) | |
| | | 29 | 0.1 – 4.0 | | 7 | 29 | 60 | |



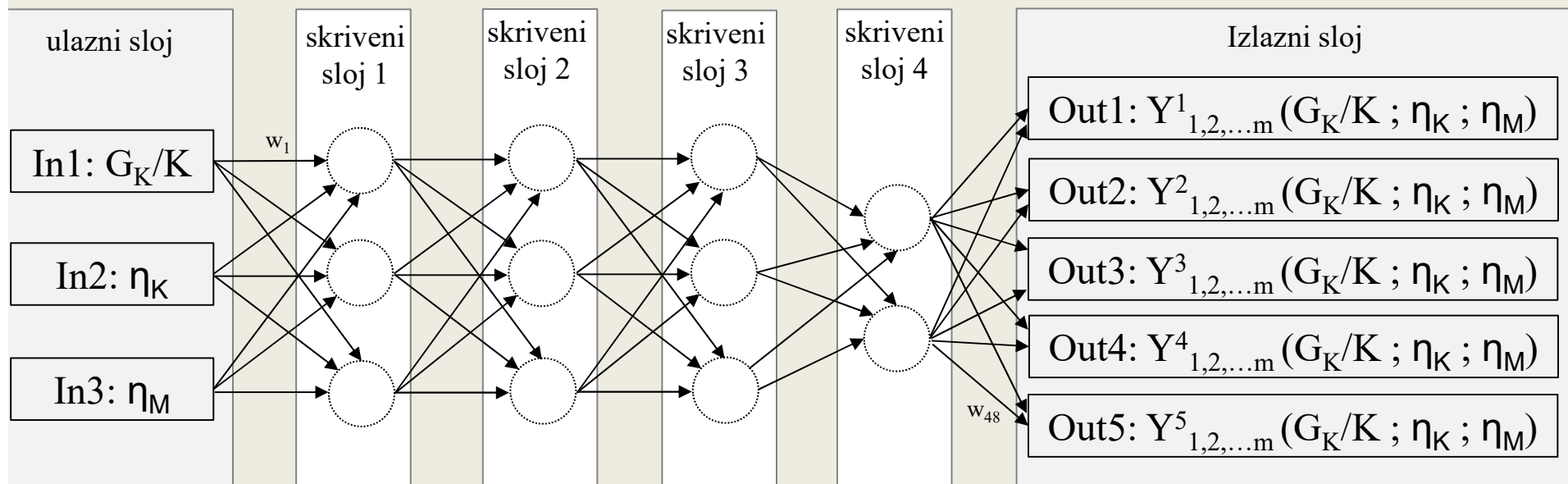
Faza 1: provedba numeričkih analiza

125 simulacija – 1 simulacija: 50 minuta

rezultat svake simulacije: pomaci u 5 točaka tijekom 15 godina eksploatacije tunela Pećine



Faza 2: treniranje neuronske mreže



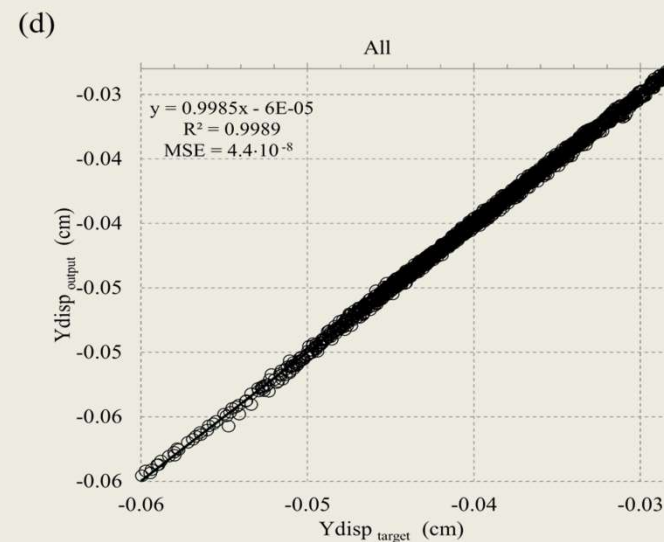
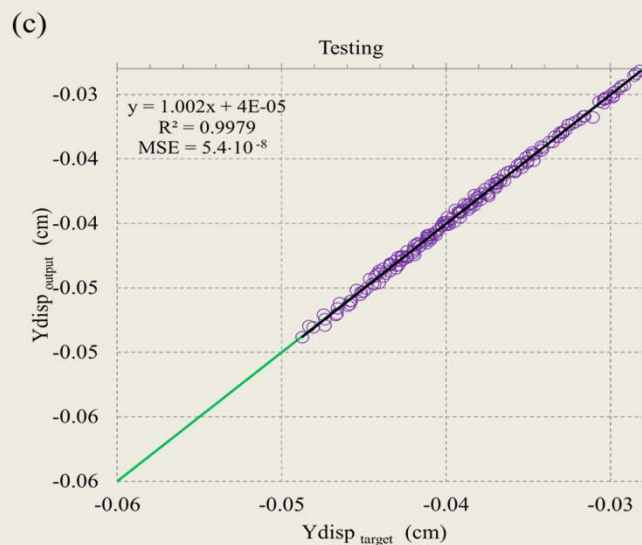
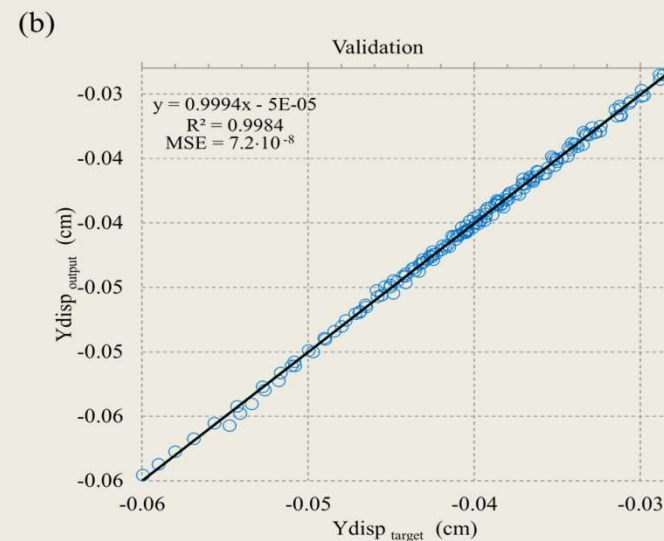
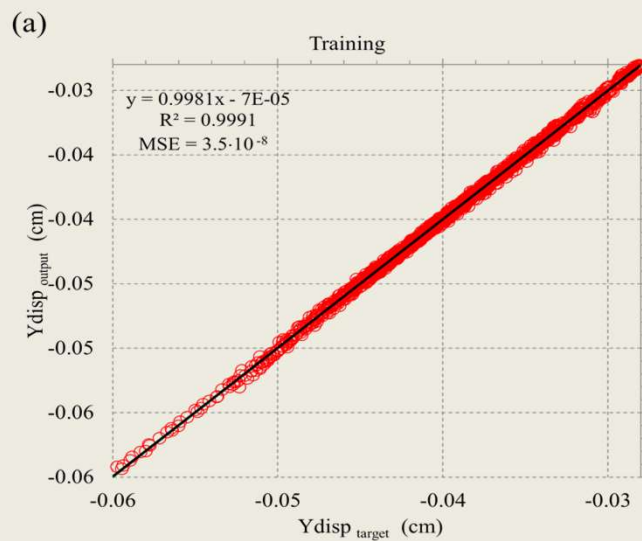
**125
kombinacija**

**pomaci u 5 točaka
tijekom 15 godina
za 125 ulaznih kombinacija**

ukupno 9 375 podataka



Faza 2: treniranje neuronske mreže



Faza 3: traženje najvjerojatnijih reoloških param.

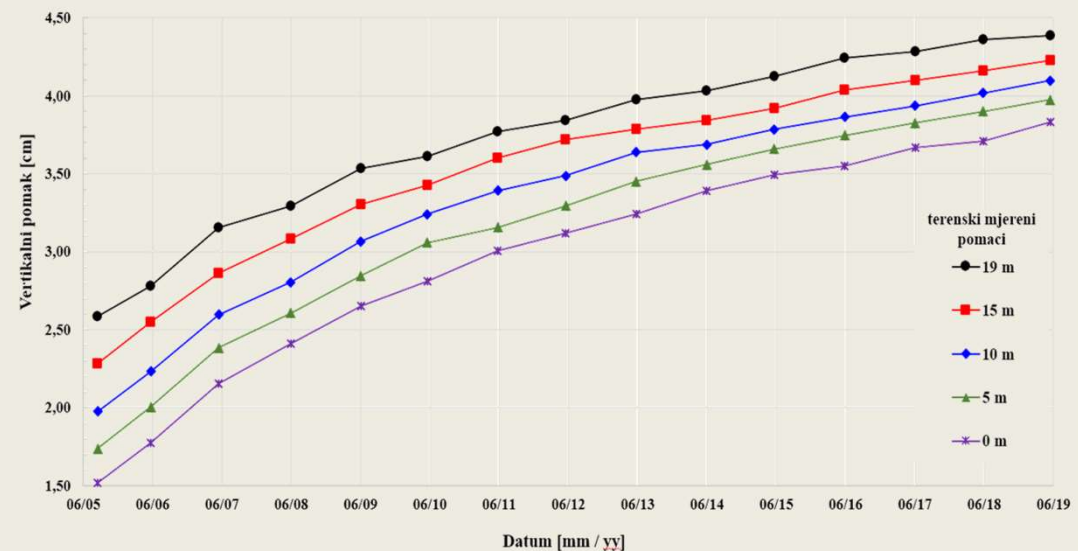
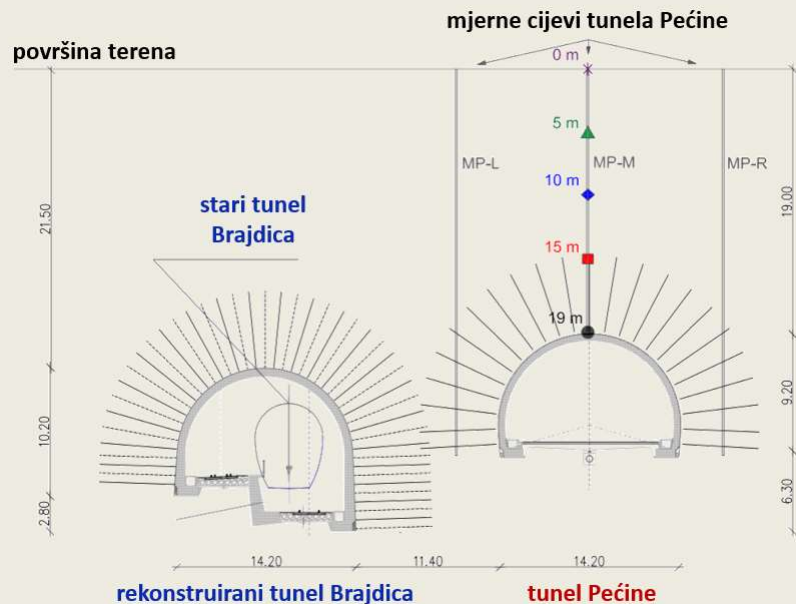
nakon Faze 1: numeričke analize - formiranje baze podataka za neuronsku mrežu

te

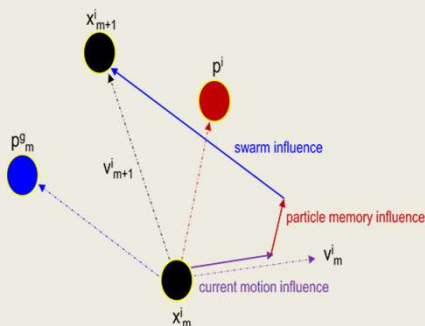
nakon Faze 2: treniranje neuronske mreže da nauči povezanost inputa - outputa

slijedi

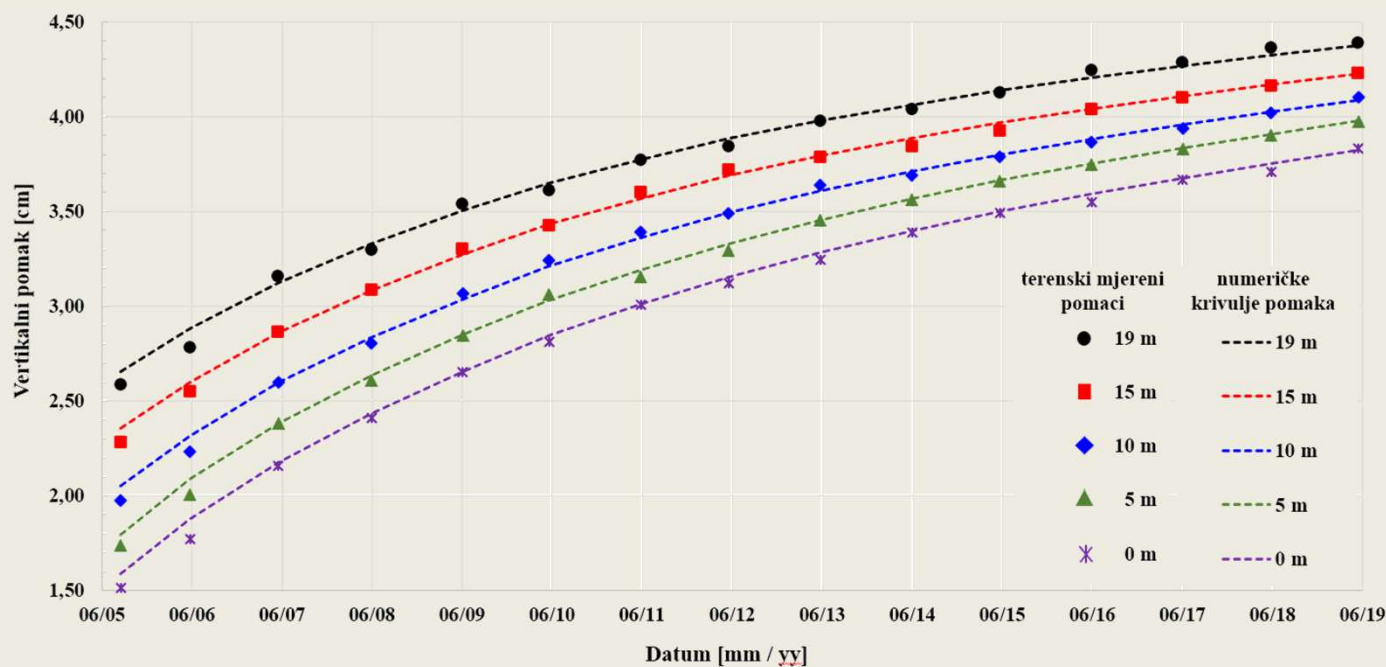
Faza 3: iz rezultata 15 godina monitoringa – naći najvjerojatnije reološke parametre



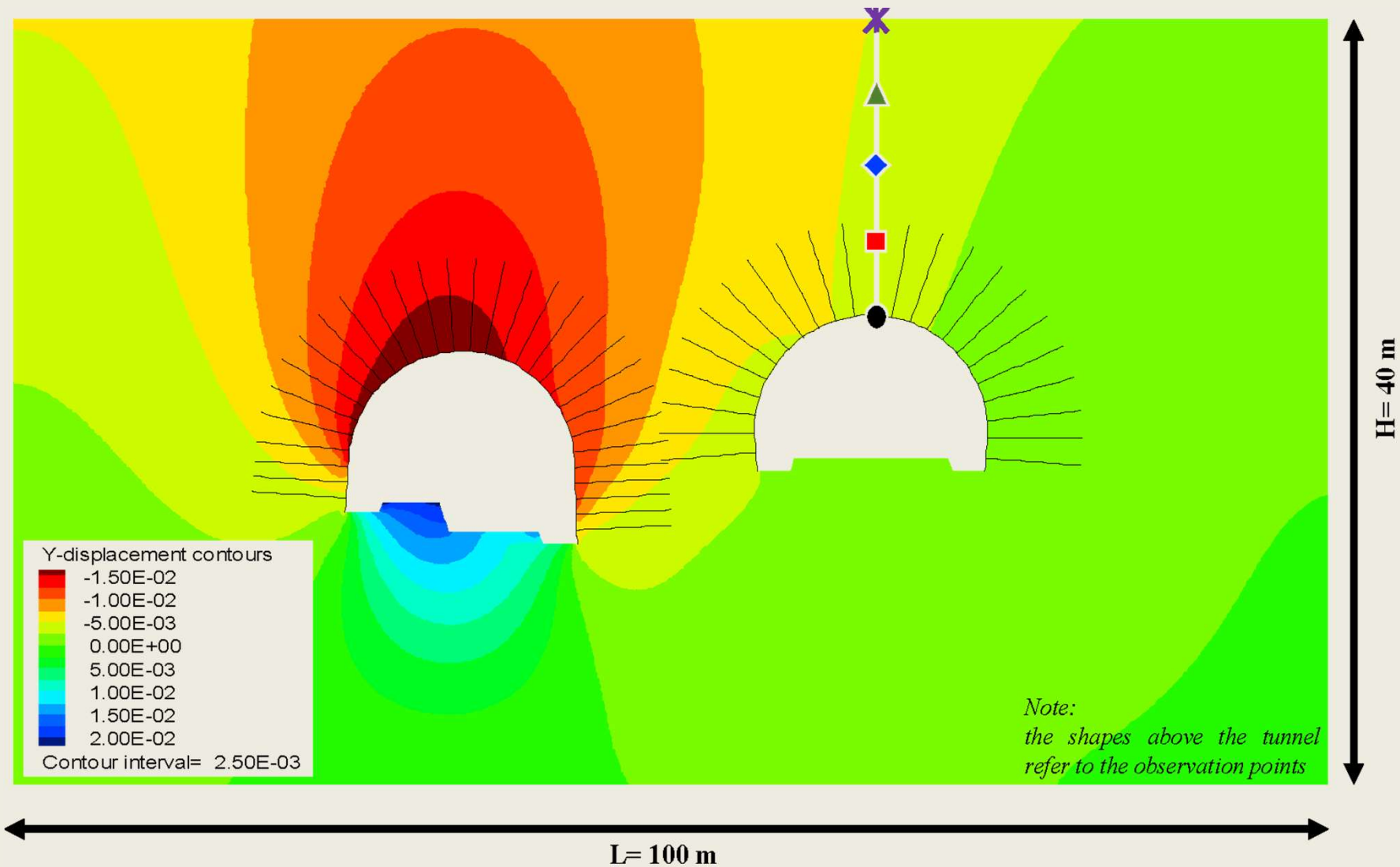
Faza 3: traženje najvjerojatnijih reoloških param.



| | Optimizacija roja čestica (PSO) | Genetski algoritam (GA) |
|---------------|---------------------------------|-------------------------|
| $G_k/K_M (-)$ | 0.5639 | 0.5732 |
| $\eta_K (-)$ | 669861 | 675382 |
| $\eta_M (-)$ | 5798236 | 5832913 |
| f_{\min} | $1.2597 \cdot 10^{-8}$ | $1.7823 \cdot 10^{-8}$ |

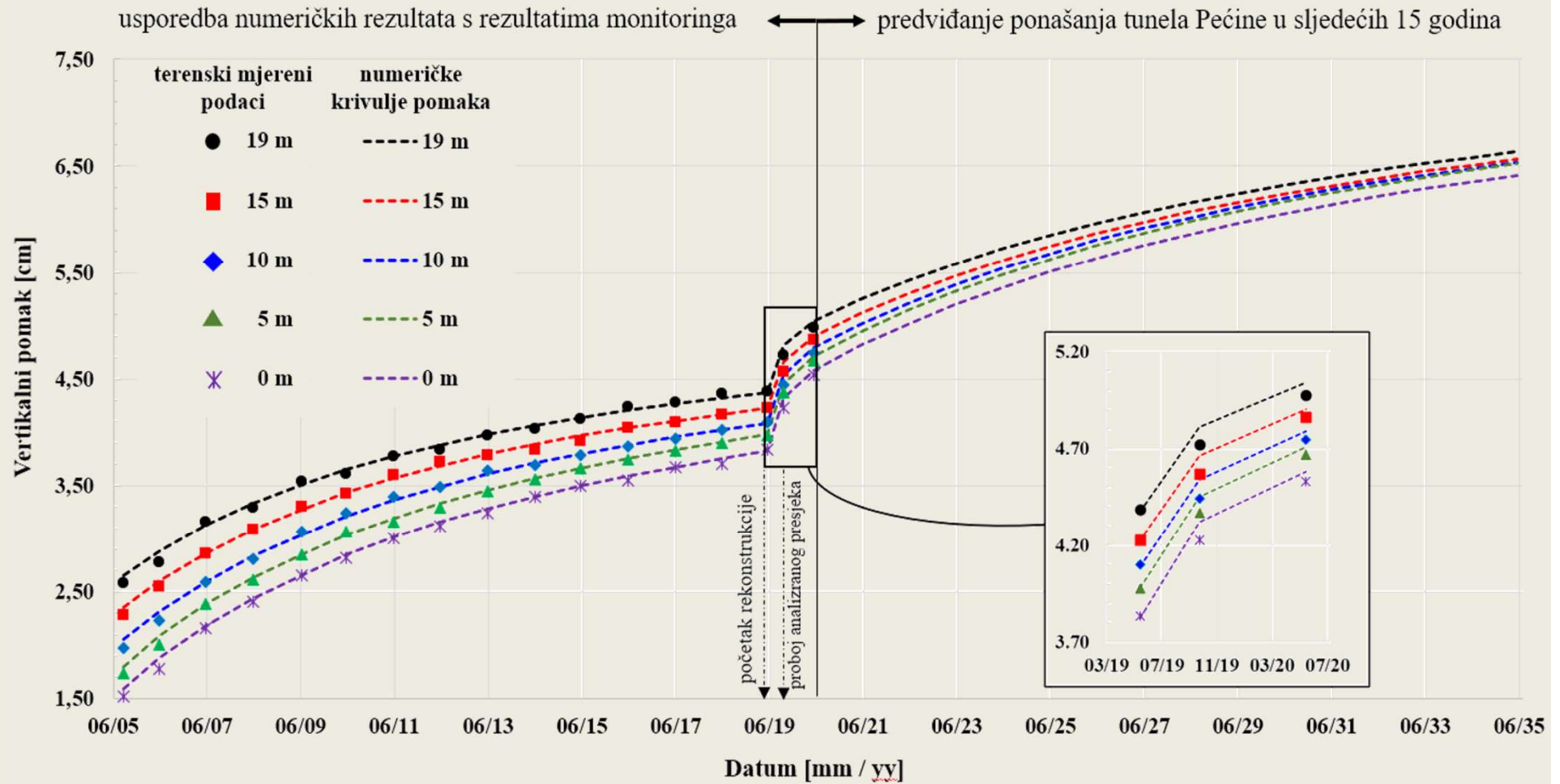


Faza 4: num. simulacije za predviđanje ponašanja



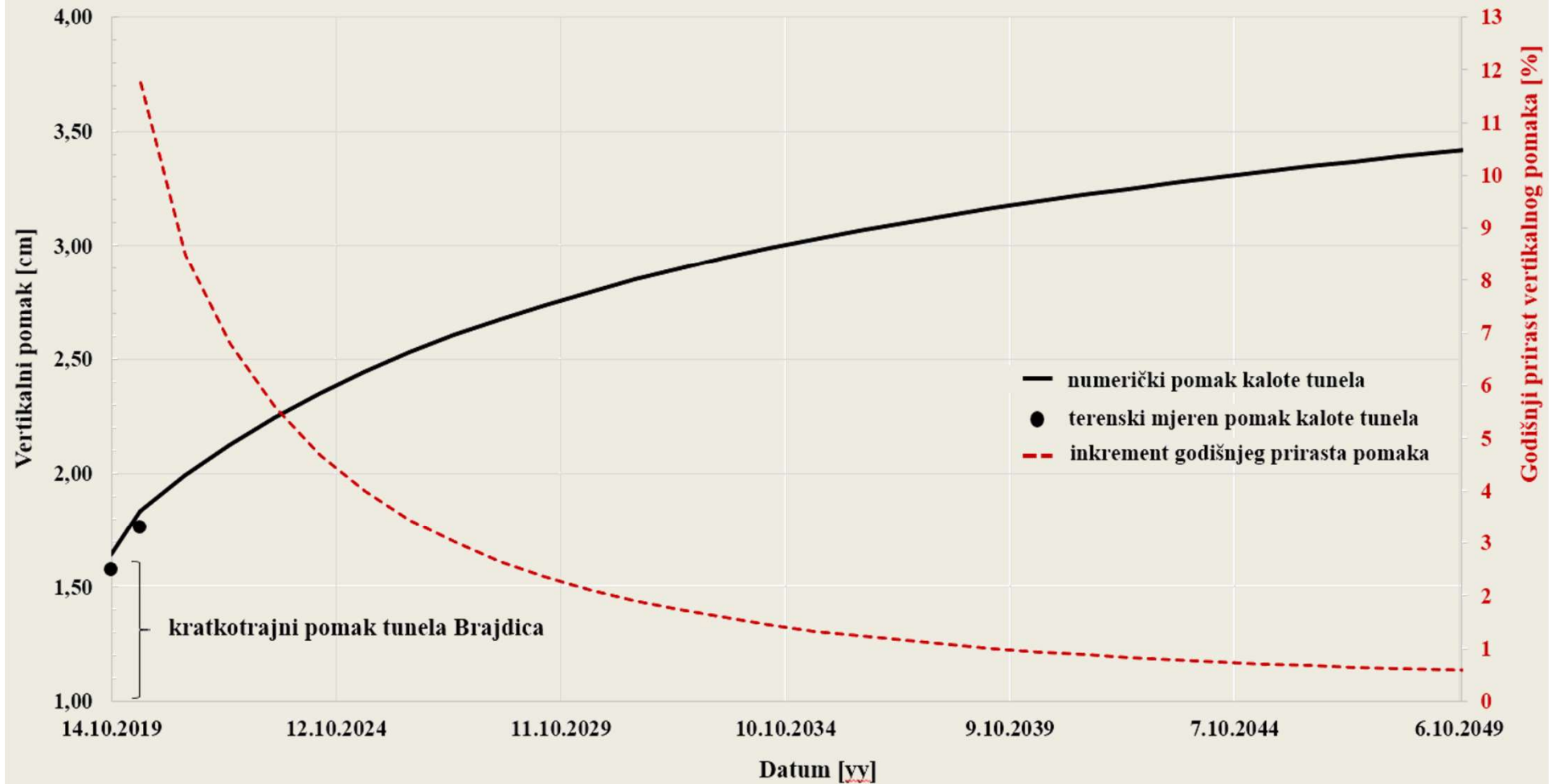
Faza 4: num. simulacije za predviđanje ponašanja

Tunel Pećine



Faza 4: num. simulacije za predviđanje ponašanja

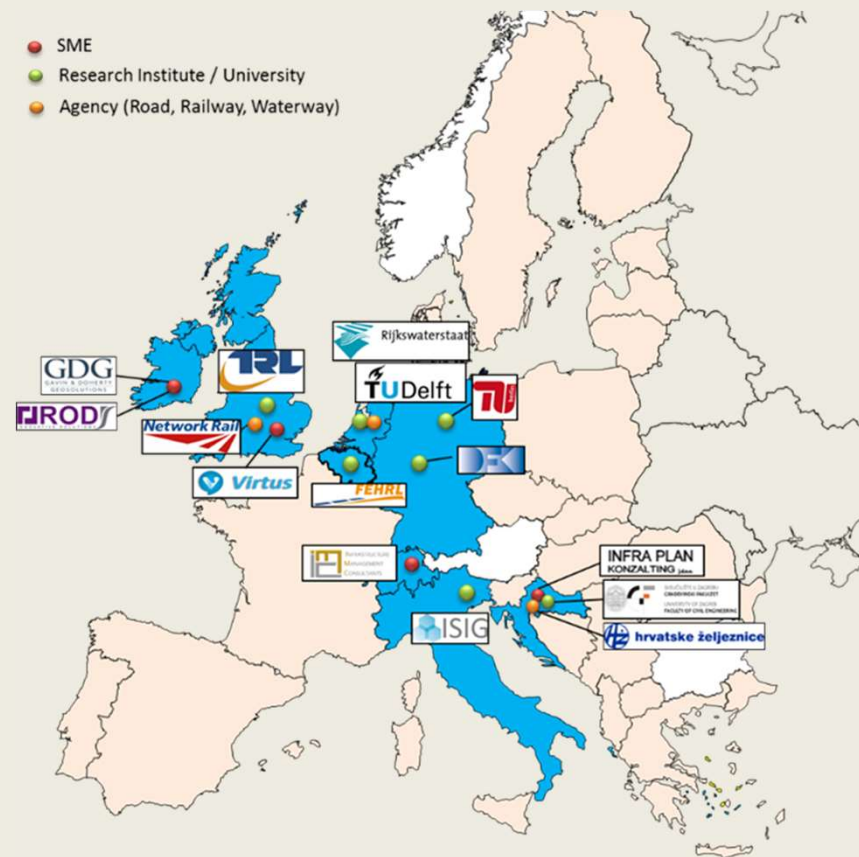
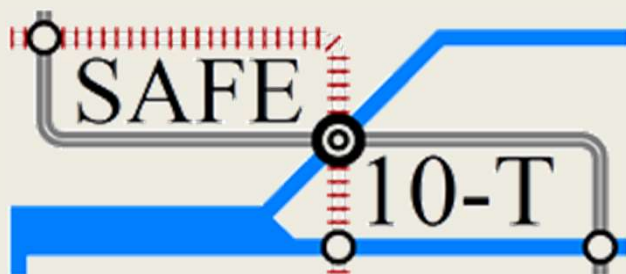
Tunel Brajdica



Financiranje istraživanja

SAFE-10-T (Safety of Transport Infrastructure on the TEN-T Network)

- Trajanje projekta: 36 mjeseci (2017-2020)
- Vrijednost: 3 000 000 EUR
- Broj država: 8
- Broj partnera: 15



- Zavod za geotehniku Građevinskog fakulteta u Zagrebu:
 - a. Analiza dugotrajnih deformacija oko tunelskog otvora u cilju povećanja sigurnosti
 - b. Implementacija sustava kontinuiranog monitoringa uz primjenu neuronskih mreža

Rekonstrukcija tunela Brajdica:

Multimodalna platforma razvoja luke Rijeka i veze s kont. Term. Vrata Jadrana (36 000 000 EUR)



*Kovačević, Meho Saša; Bačić, Mario; Gavin, Kenneth; Stipanović, Irina. Assessment of long-term deformation of a tunnel in soft rock by utilizing particle swarm optimized neural network // **Tunnelling and underground space technology**, 110 (2021), 103838, 15 doi:10.1016/j.tust.2021.103838*

*Kovačević, Meho Saša; Bačić, Mario; Gavin, Kenneth. Application of Neural Networks for the Reliability Design of a Tunnel in Karst Rock Mass // **Canadian geotechnical journal**, (2020), 1-15 doi:10.1139/cgj-2019-0693*

*Kovačević, Meho Saša; Bačić, Mario; Vukomanović, Mladen; Cerić, Anita. A framework for automatic calculation of life-cycle remediation costs of secondary lining cracks // **Automation in construction**, 129 (2021), 103714, 9 doi:10.1016/j.autcon.2021.103714*



Hvala na pažnji

doc.dr.sc. Mario Bačić, mag.ing.aedif.

+385 1 4639 636

mbacic@grad.hr

prof.dr.sc. Meho Saša Kovačević, dipl.ing.građ.

+385 1 4639 250

msk@grad.hr

Zavod za geotehniku

Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu

Fra Andrije Kačića Miošića 26,

10 000 Zagreb, Croatia

