

Meho-Saša KOVAČEVIĆ  
prof.dr.sc., dipl.inž.građ., Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za geotehniku

Petar LUŠO  
dipl.inž.građ., M-P-V d.o.o. Zagreb

Danijela JURIC-KAĆUNIĆ  
dipl.inž.građ., Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za geotehniku

Ivan ARAPOV  
dipl.inž.građ., Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za geotehniku

## **ANALIZA STANJA DEFORMACIJA U TUNELU POD VUGLEŠ NAKON ŠEST GODINA EKSPLOATACIJE**

**SAŽETAK:** Lijeva cijev tunela Pod Vugleš izvedena je 2000. godine i sastavni je dio poluautoceste Zagreb Rijeka. U postupku utvrđivanja stanja deformacija tunela prije početka iskopa desne tunelske cijevi 2006. godine provedeni su detaljni vizualni pregledi stanja pukotina i oštećenja sekundarne obloge te mjerenja vertikalnih i horizontalnih pomaka tla po dubini s površine terena na lijevoj tunelskoj cijevi. Mjerenje vertikalnih pomaka vršeno je kliznim mikrometrom a mjerenje horizontalnih pomaka inklinometrom. Iako su mjerenja koja su vršena za vrijeme izvedbe tunela pokazivala potpuni prestanak deformacija, mjerenja nakon 6 godina pokazala su da je došlo prirasta deformacija. U radu su prikazani rezultati vizualnog pregleda i mjerenja i dati mogući uzroci prirasta deformacija u eksploataciji.

## **DEFORMATION ANALYSES IN TUNNEL POD VUGLEŠ AFTER SIX YEARS OF USAGE**

**SUMMARY:** Left tunnel tube of tunnel Pod Vugleš has been performed in 2000. and makes part of the semy highway Zagreb - Rijeka. In the process of determining the tunnel deformation before excavation of the right tunnel tube in 2006, detailed visual inspection of fissures and damages of the secondary lining has been made, as well as vertical and horizontal soil displacement measurements in depth from soil surface, on the left tunnel tube. Measurements of vertical displacements have been performed by sliding micrometers, and horizontal measurements by inclinometers. Although these measurements performed during executing tunnel works, have shown that deformations have stopped completely, measurements after 6 years have shown increased deformations. Results of visual inspection and measurements as well as possible reasons for increased deformations during usage of tunnel have been shown in this paper.

## UVOD

Tunel Pod Vugleš nalazi se na autocesti Rijeka-Zagreb, dionica Kupjak-Vrbovsko. Dužina tunela je 595,00 m. Ima dvije cijevi sa po dvije prometne trake širine 3,50 m. Razmak osi tunelskih cijevi iznosi 25 m. Debljina betonske sekundarne obloge iznosi 30 cm. (slika 1). Lijeva (sjeverna) cijev tunela izvedena je 2000. godine. Desna (južna) cijev izvedena je 2007. godine.



**Slika 1.** Lijeva cijev tunela Pod Vugleš

Stijenski masiv u zoni iskopa tunela izgrađuju klastične naslage paleozoika koje su prekrivene nevezanim prekrivačem debljine do 8m, zastupljenim dijelom deluvijalnim šljunkovitim, a dijelom i glinovito-siltozno-pjeskovitim tlom. Ispod deluvijalnog pokrivača slijedi trošna zona debljine do 18 m izgrađena od oštrobridnih fragmenata matične stijene, povezanih siltoznom ili glinovito-siltoznom ispunom.

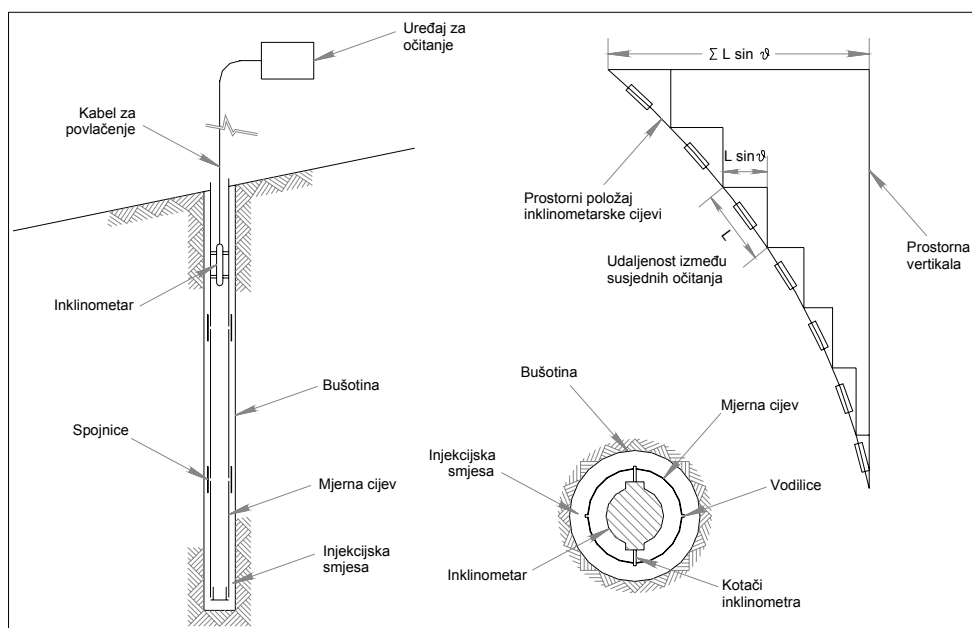
Tunel Pod Vugleš izveden je u skladu s principima NATM (New Austrian Tunneling Method) [1]. Sukladno tome za vrijeme izvedbe lijeve cijevi tunela Podvugleš proveden je opsežan program geotehničkih mjerenja i opažanja, odnosno provedena su kontrolna i podgradna mjerenja. Mjerenja su provedena kontinuirano sve do potpunog prestanka prirasta deformacija. Prema smjericama međunarodne tunelske asocijacije (ITA - International Tunneling Assosiation) postupak izgradnje tunela koji se stalno prilagođava napredovanju može se ostvariti kombiniranjem proračunskih metoda, empirijskog načina projektiranja i neposredne interpretacije in situ mjerenja [2]. Pri tome se in situ mjerenja deformacija masiva te deformacija i naprezanja u podgradi stalno koriste za potvrdu projekta ili njegovu promjenu. Dionice s intenzivnom instrumentacijom (test sekcije) daju ulazne podatke za taj postupak. Interpretacija izmjerenih vrijednosti daje uvid u ponašanje masiva kao reakciju na napredovanja tunela. Mjerenjima in situ ne provjerava se samo stabilitet i primijenjeni projektni računski model, nego se i verificira osnovni koncept reakcije masiva na izvedbu tunelskog otvora te djelotvornost konstruktivnih elemenata osiguranja [3].

Prije početka izvedbe desne cijevi tunela, šest godina nakon proboja lijeve cijevi, provedena su mjerenja vertikalnih i horizontalnih deformacija tla po dubini s površine terena na lijevoj tunelskoj cijevi. Ovim mjerenjima registrirani su horizontalni i vertikalni pomaci tla oko iskopa. Mjerenje horizontalnih pomaka vršeno je inklinometrom, a mjerenje vertikalnih pomaka kliznim mikrometrom [4].

## MJERNA OPREMA

### Inklinometri

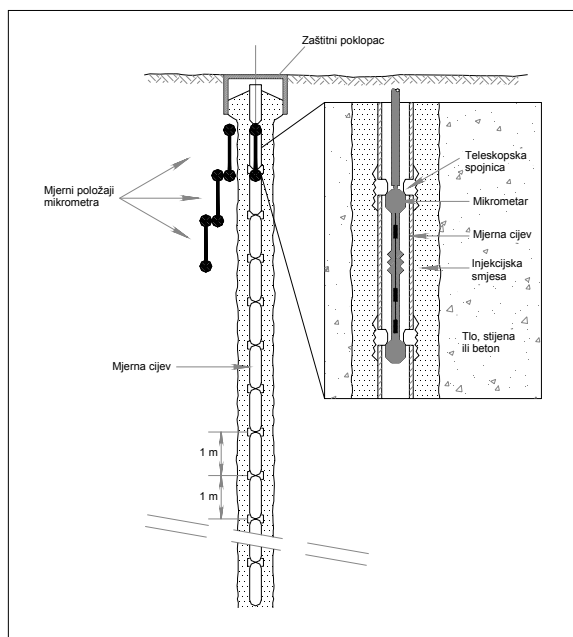
Inklinometri se koriste za podgradna mjerenja horizontalnih pomaka tla s površine terena prije, za vrijeme i nakon prolaska čela tunela kraj mjernog profila. Mjerenje se zasniva na mjerenju relativnih kuteva zaokreta u tlo ugrađenih PVC cijevi koje ujedno služe i za mjerenje kliznim mikrometrom. Cijevi se injektiranjem ugrađuju u izvedene bušotine. Točnost inklinometra u terenskim uvjetima iznosi  $\pm 0.1$  mm/m. Princip mjerenja inklinometrom prikazan je na slici 2. Pomoću ojačanog električnog kabela inklinometarska sonda spušta se na dno bušotine. Inklinometarske cijevi imaju na sebi urezana dva para vodilica koje omogućavaju vođenje inklinometra bez zakretanja. Inklinometar na sebi ima ugrađene kotače koji ulaze u vodilice inklinometarske cijevi. Ugrađeni gravitacijski senzor mjeri kut zaokreta inklinometarske sonde u odnosu na prostornu vertikalu. Povlačenjem sonde prema vrhu te očitanjem na svaki metar dobivaju se kutevi zaokreta inklinometarske cijevi u odnosu na vertikalu. Integriranjem kuteva zaokreta dobivaju se horizontalni pomaci inklinometarske cijevi [5].



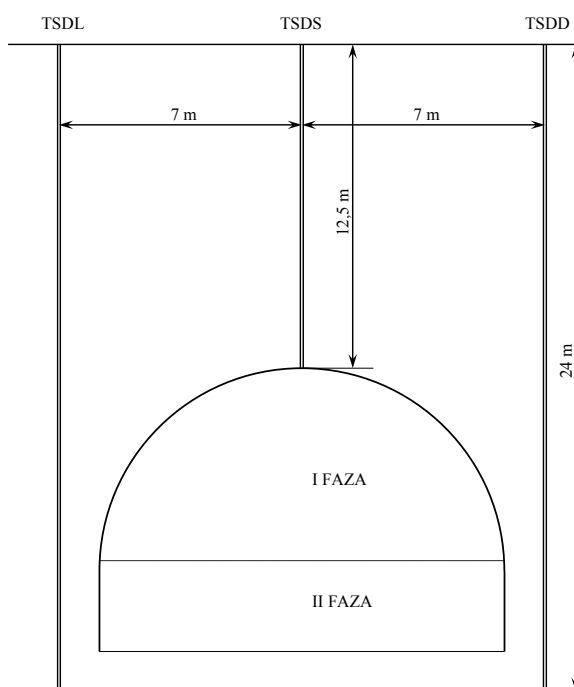
Slika 2. Princip mjerenja inklinometrom

### Klizni mikrometri

Klizni mikrometri koriste se za podgradna mjerenja vertikalnih deformacija tla s površine terena prije, za vrijeme i nakon prolaska čela tunela kraj mjernog profilakao i za mjerenja deformacija tla oko podzemnog otvora. Mjerenje se zasniva se na mjerenju relativnih deformacija u tlo ugrađenih specijalnih PVC cijevi. Cijevi su duljine 1 m i spajaju se specijalnim spojnica. Spojnice se teleskopski deformiraju i tako omogućavaju mjerenje relativnih deformacija. Cijevi se injektiranjem ugrađuju u izvedene bušotine. Točnost kliznog mikrometra u terenskim uvjetima iznosi  $\pm 0.003$  mm/m. Princip mjerenja prikazan je na slici 3. Mikrometar se klizanjem uvlači u mjernu cijev do prvog para teleskopskih spojnica. U kliznom položaju mikrometar se može nesmetano kretati između spojnica. Zakretanjem za  $45^{\circ}$  mikrometar dolazi u mjerni položaj. Povlačenjem mikrometra aktivira se mjerni senzor kojim se mjeri razmak između spojnica. Nakon očitavanja mikrometar se zakreće u klizni položaj i pomjera do slijedećeg para spojnica. Na taj način očitavaju se razmaci između svih ugrađenih spojnica. Prvo mjerenje ujedno je i referentno mjerenje. Deformacijom tla mijenjaju se međusobni razmaci spojnica. Ponovno mjerenje razmaka spojnica rezultira relativnim deformacijama mjerne cijevi na metar dužine. Integriranjem relativnih deformacija izračunavaju se pomaci tla [5].



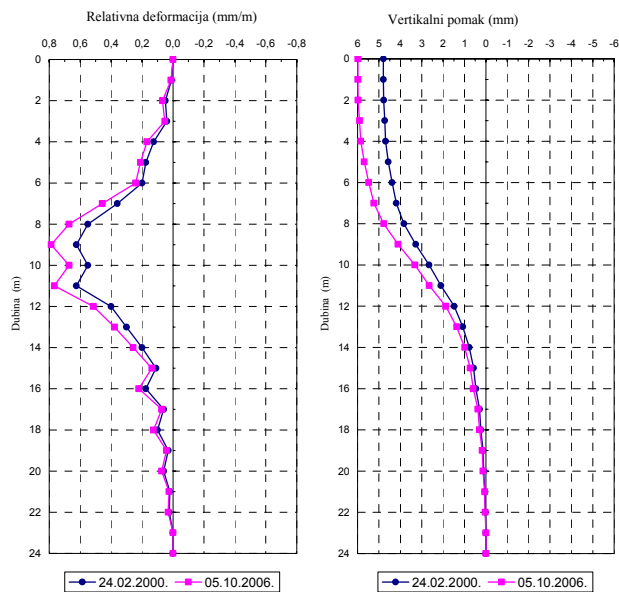
**Slika 3.** Princip mjerenja kliznim mikrometrom



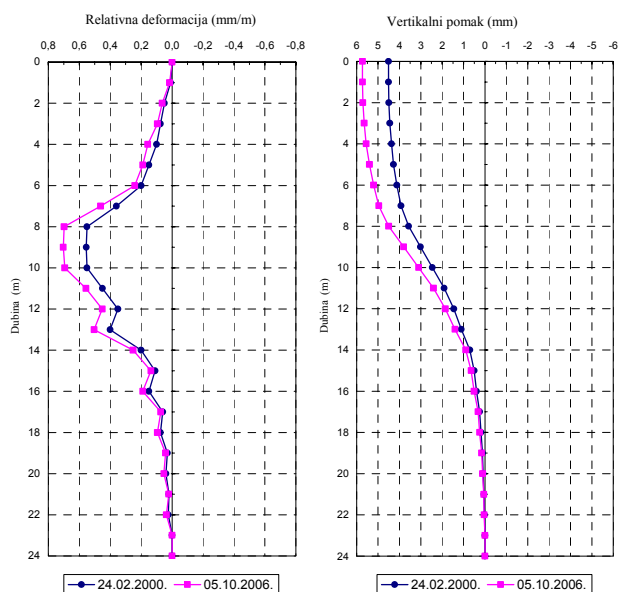
**Slika 4.** Mjerenje horizontalnih i vertikalnih pomaka tla u zoni tunela s površine terena

## REZULTATI MJERENJA

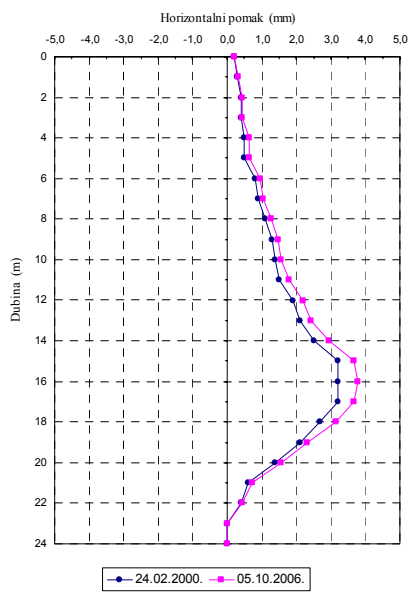
Mjerenja su provedena na stacionaži 56+136,5. Rezultati mjerenja prikazani su u odnosu na zadnje mjerenje provedeno nakon izvedbe lijeve cijevi tunela. Oznake i pozicije mjernih cijevi u odnosu na tunel su prikazane u na slici 4. Na slikama 5 do 12 prikazani su karakteristični rezultati mjerenja.



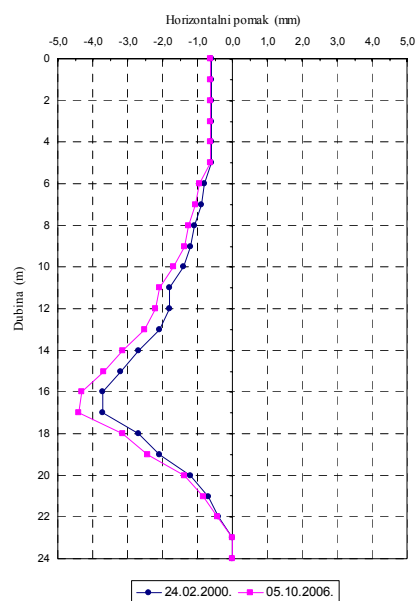
**Slika 5.** Vertikalne relativne deformacije i pomaci pomaci u lijevoj mjernoj cijevi (TSDL)



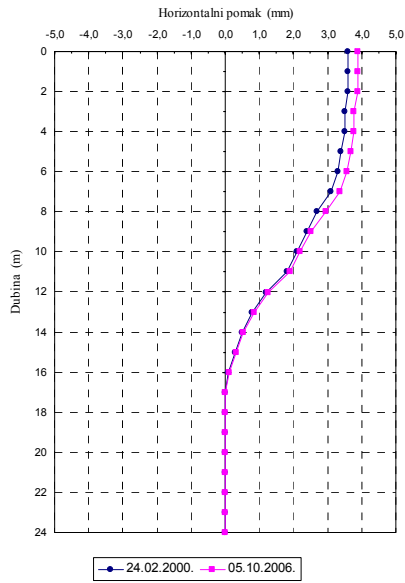
**Slika 6.** Vertikalne relativne deformacije i pomaci pomaci u desnoj mjernoj cijevi (TSDD)



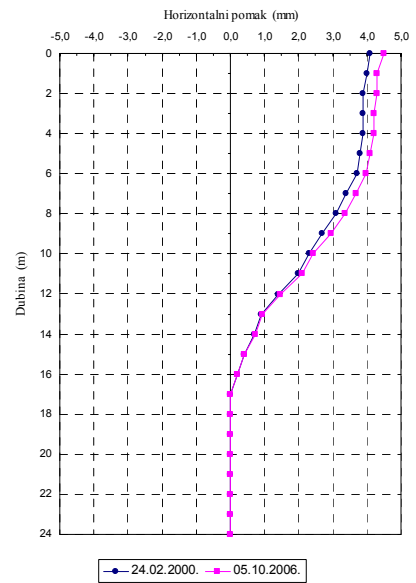
**Slika 7.** Horizontalni pomaci okomito na os tunela u lijevoj mjernoj cijevi (TSDL)



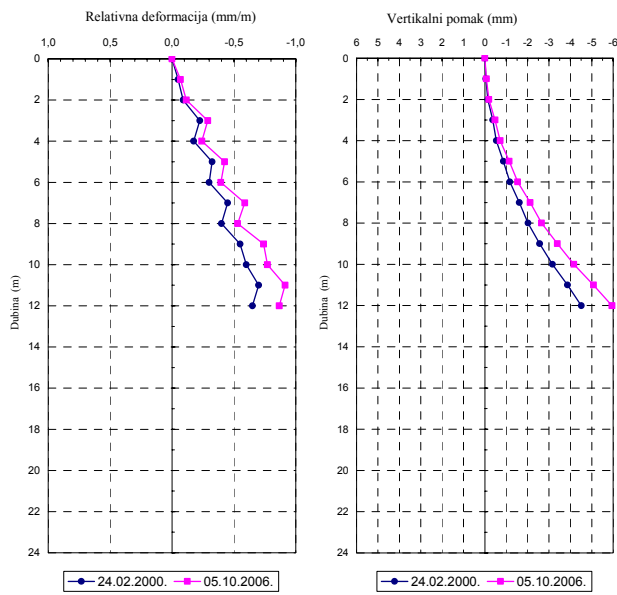
**Slika 8.** Horizontalni pomaci okomito na os tunela u desnoj mjernoj cijevi (TSDD)



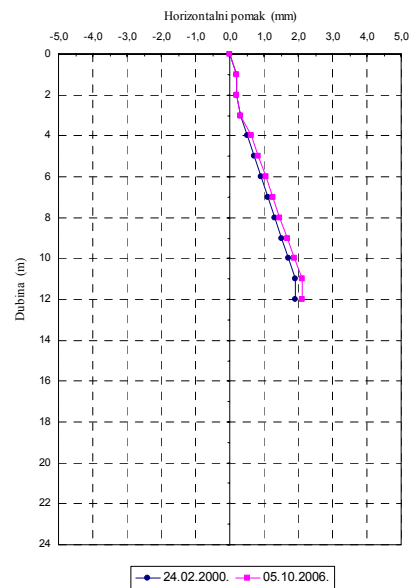
**Slika 9.** Horizontalni pomaci u smjeru osi tunela u lijevoj mjernoj cijevi (TSDL)



**Slika 10.** Horizontalni pomaci u smjeru osi tunela u desnoj mjernoj cijevi (TSDD)



**Slika 11.** Vertikalne relativne deformacije i pomaci u srednjoj mjernoj cijevi (TSDS)



**Slika 12.** Horizontalni pomaci u smjeru osi tunela u srednjoj mjernoj cijevi (TSDS)

## MOGUĆI UZROCI PRIRASTA DEFORMACIJA

Iako su mjerenja nakon izvedbe lijeve cijevi tunela Pod Vugleš pokazivala potpuni prestanak prirasta deformacija, mjerenja provedena šest godina kasnije, prije početka izvedbe desne cijevi tunela pokazala su značajne priraste deformacija. Vertikalni pomaci porasli su do 25%, horizontalni pomaci okomito na os tunela porasli su do 16%, a horizontalni pomaci u smjeru osi tunela porasli su do 8%. Vizualnim pregledom sekundarne obloge zamijećene su vertikalne pukotine u lijevom i desnom boku koje ulaze u kalotni dio 50-60cm (slika 13).



**Slika 13.** Pukotina u desnom boku sekundarne obloge

Mogući uzrok pojave pukotina u sekundarnoj oblozi svakako je skupljanje i puzanje betona [6]. Skupljanje i puzanje betona je dugotrajan proces i uzrokuje deformacije sekundarne obloge. O pouzdanosti mjerenja reoloških i mehaničkih karakteristika ugrađenog betona ovisi preciznost određivanja intenziteta opterećenja. Usljed ovog opterećenja stanje naprezanja i deformacija u sekundarnoj oblozi se mijenja u vremenu ali ono značajnije ne utječe na stanje naprezanja u primarnom podgradnom sustavu i okolnoj stijeni.

Do pojave pukotina u sekundarnoj oblozi može doći i zbog temperaturnih promjena u tunelu [6]. Temperaturne promjene u tunelu izazivaju deformacije betona a time i promjenu stanja naprezanja u sekundarnoj oblozi. Temperature u tunelu ljeti se mogu povećati do  $10^0$  a zimi smanjiti do  $10^0$ . Intenzitet ovog opterećenja moguće je prilično pouzdano odrediti. Ovo opterećenje na utječe značajnije na stanje naprezanja u primarnoj podgradni i okolnoj stijeni.

Do pojave značajnijeg prirasta deformacija u stijenskoj masi može doći zbog trajnosti primarnog podgradnog sustava, odnosno gubitka mehaničkih svojstava pojedinih elemenata primarnog podgradnog sustava i to na slijedeće načine [6]:

1. Stijenska masa koja je uključena u primarni podgradni sustav izložena je dugotrajnom opterećenju i različitim režimima podzemnih voda. Zbog puzanja, bujanja ili rastrožbe dolazi do povećanog opterećenja na primarnu podgradu, te prirasta deformacija.
2. Primarna podgrada opterećena iznad 1/2 čvrstoće imat će znatne viskozne deformacije puzanja, a rezultat toga bit će prirast deformacija.
3. Čelična geotehnička sidra, naročito ona bez zaštite, nakon većih deformacija izvrgnuta su intenzivnoj koroziji te nakon toga potspuno zakazuju. To dovodi do slabljenja primarnog podgradnog sustava i prirasta deformacija.

## ZAKLJUČAK

Za vrijeme izvedbe lijeve cijevi tunela Pod Vugleš provedena su intenzivna geotehnička mjerenja koja su pokazivala potpuni prestanak prirasta deformacija u primarnom podgradnom sustavu koji uključuje i stijensku masu. Šest godina kasnije, prije početka izvedbe desne tunelske cijevi ponovljena su mjerenja horizontalnih i vertikalnih pomaka po dubini stijenske mase s površine terena. Mjerenja su pokazala relativno značajan prirast deformacija u eksploataciji. Vizualni pregled sekundarne obloge pokazao je pukotine na oba boka tunela.

Mogući uzroci pojave pokotina i prirasta deformacija su skupljanje i pizanje betona, temperaturne promjene u tunelu te trajnost primarnog podgradnog sustava.

Da bi se utvrdio stvarni uzrok prirasta deformacija za vrijeme eksploatacije bit će potrebno provesti složene 2D ili 3D numeričke povratne analize koje će osim nelinearnog odnosa naprezanja i deformacija uključivati i reološke karakteristike kako betona tako i stijenskog masiva. Takve numeričke analize moraju uključiti i povijest nastanka stanja naprezanja koje je prethodovalo gubitku trajnosti.

## LITERATURA

- (1) Stojković, B., Stanić, B., Kovačević, M. S. (2002): Geotechnical design of the St. Mark tunnel U: Proceedings of the AITES-ITA DOWNUNDER 2002, 28<sup>th</sup> ITA General Assembly and World Tunnel Congress (CD), Sydney 2-8 March 2002, Congress program and abstract book, pp 47.
- (2) ITA 1988. Guidelines for the design of tunnels. ITA Working Group on General Approaches to the Design of Tunnels, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 3, No. 3
- (3) Kovačević, M.S. (2003). The Observational Method and the use of geotechnical measurements, Proc. Geotechnical problems with man-made and man influenced grounds, XIII European conference on soil mechanics and geotechnical engineering, Prague, 25-28.08.2003., 575-582.
- (4) Lušo, P., Balen, B., Kovačević, M.S. (2006). Elaborat stanja izvedene cijevi tunela Pod Vugleš.
- (5) Kovačević, M.S. Arapov, I., Lušo, P., Kuželički, R. (2006), Povratne numeričke analize u tunelu Pećine, 4. Savjetovanje HGD-a Ojačanje tla i stijena, 05-07 listopada 2006, Opatija, Hrvatska, 143-152.
- (6) Kovačević, M.S., Skazlić, Ž., Skazlić, M. (2004). Durability Of Tunnel Primary Support, Proc. International Symposium on Durability and Maintenance of Concrete structures, Cavtat, 21-23.10.2004., 257-264.