

GEOTEHNIČKI PRISTUP ODRŽAVANJU SERVISNOG TUNELA SV. TRI KRALJA

ZVONIMIR DEKOVIĆ¹, TOMISLAV TOMAŠKOVIĆ²

¹ *Autocesta Zagreb-Macelj d.o.o., Hrvatska*

² *Geoekspert d.o.o., Hrvatska*

Sažetak

U radu je na primjeru servisnog tunela Sv. Tri Kralja prikazan značaj geotehničkog pristupa u održavanju tunela. Za uspješnu realizaciju održavanja servisnog tunela, u sklopu standardnih procedura redovitog održavanja tunela, bitno je za kontrolu stabilnosti geotehničke konstrukcije tunela provesti geotehnička mjerenja i opažanja. Praćenje geotehničke konstrukcije tunela geotehničkim mjerenjima i opažanjima neizostavno je za funkcionalnost servisnog tunela Sv. Tri Kralja.

Ključne riječi

geotehnička mjerenja i opažanja, stijenska masa, funkcionalni uvjeti, podgradni sklop, kontrolni mjerni profil

1 Uvod

Na autocesti A2 Zagreb-Macelj na dionici Krapina – Macelj sagrađeno je šest tunela. Dio dionice u duljini od 3,7 km čini poluautocesta na kojoj se nalaze tuneli Sv. Tri Kralja i Brezovica s po jednom tunelskom cijevi. Tunel Sv. Tri Kralja osim prometne (desne) tunelske cijevi ima i servisnu tunelsku cijev (servisni tunel). Ostala četiri tunela imaju po dvije tunelske cijevi, odnosno sagrađeni su za puni profil autoceste. U tablici 1 navedene su dužine tunela. Tuneli su projektirani sukladno propisima i regulativi RH te austrijskim smjernicama RVS iz 2002. godine. Gradnja dionice Krapina-Macelj ukupne dužine 17,9 km započela je u jesen 2004. U proljeće 2007. godine tuneli su pušteni u promet. Tuneli su izvedeni sukladno Novoj austrijskoj metodi tunelogradnje, odnosno NATM (engl. *New Austrian Tunnelling Method*). Servisni tunel Sv. Tri Kralja (slika 1) je prva geotehnička građevina takvog tipa izgrađena u RH za potrebe upravljanja i održavanja (servisiranja) prometne (desne) tunelske cijevi (slika 2). Obzirom da je servisni tunel izveden samo u primarnoj oblozi, projektnom dokumentacijom predviđena je periodična kontrola stabilnosti geotehničke konstrukcije tunela. Cilj je rada prikazati važnost sustavnog praćenja deformacija i primjene opažačkog pristupa u procjeni stabilnosti tunelske konstrukcije kao temeljnog uvjeta za funkcionalnost servisnog tunela.

Tablica 1. Dužine tunela u smjeru jug (Zagreb) – sjever (Macelj)

Tunel	Desna tunelska cijev (m)	Lijeva tunelska cijev (m)
Levačica	358	358
Vidovci	261	266
Sv. Tri Kralja	1740	1242 (servisna cijev)
Brezovica	590	nije izgrađena
Đurmanec	204	204
Frukov Krč	354	354



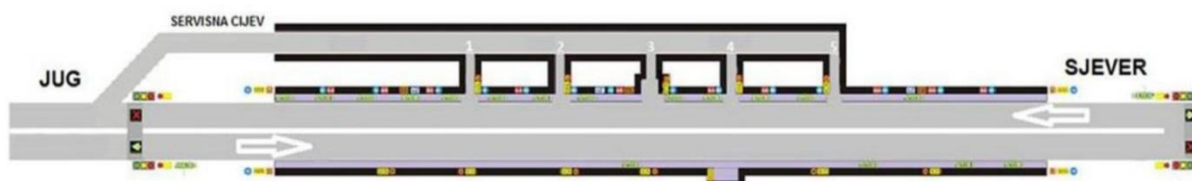
Slika 1. Prikaz servisne tunelske cijevi (servisnog tunela) Sv. Tri Kralja



Slika 2. Prikaz prometne tunelske cijevi Sv. Tri Kralja

2 Servisni tunel Sv. Tri Kralja

Dužina servisnog tunela Sv. Tri Kralja iznosi oko 2/3 duljine desne tunelske cijevi te ima jedan južni portal tunela. Na slici 3 prikazan je shematski prikaz prometne i servisne tunelske cijevi tunela Sv. Tri Kralja.



Slika 3. Shematski prikaz prometnog i servisnog tunela Sv. Tri Kralja

evakuacijskog puta u slučaju nesreće ili incidentnog događaja u prometnoj tunelskoj cijevi. U tu svrhu su i ugrađeni tunelski sustavi opreme koji omogućavaju navedenu funkciju servisnog tunela.

Tablica 2. Zastupljenost pojedinih sustava tunelske opreme u servisnom tunelu Sv. Tri Kralja

Sustavi tunelske opreme	Servisna tunelska cijev tunela Sv. Tri Kralja
Elektroenergetski sustav tunela	da
Besprekidno napajanje tunela	da
Rasvjeta tunela	da
Ventilacija tunela	da
Vatrodojava i vatrozaštita	da
Telefonsko pozivni sustav (TPS)	da
Sustav ozvučenja	da
Video nadzor	samo u portalnoj zoni
Sustav daljinskog upravljanja i nadzora (SCADA) (CSS)	da

2.1 Geotehničke značajke servisnog tunela Sv. Tri Kralja

Geotehnički projekti tunela na dionici autoceste A2 Krapina-Macelj izrađeni su u skladu s metodologijom integriranog geotehničkog projektiranja u tunelogradnji (Stojković, 1999). Glavna značajka metodologije je integriranje sva tri postojeća projektna pristupa u geotehničkom inženjerstvu – empirijskog, racionalnog i opažackog, te mogućnost kontinuiranog projektiranja u dvije faze: (1) prije i (2) za vrijeme gradnje tunela. Metodologijom je definirana uloga geotehnike u tunelogradnji od faze istražnih radova do kontrole geotehničkih konstrukcija tijekom eksploatacije.

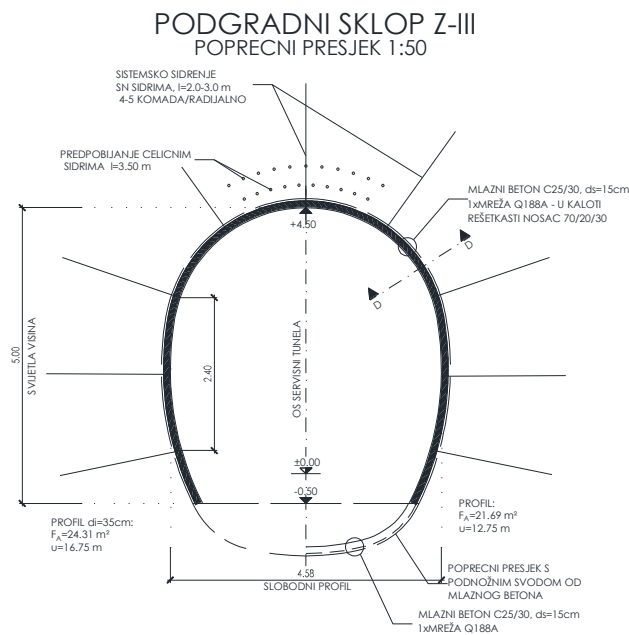
Stijensku masu u kojoj se izvodio iskop servisnog tunela Sv. Tri Kralja čine uglavnom silitični lapor, vapnenac, konglomerat, pješčenjak i zaglinjeni silit. U tektonskom smislu to je područje komplicirane građe s prisutnošću brojnih rasjeda koji ujedno predstavljaju intenzivno razlomljene i oslabljene zone, a što je bilo i dokazano tijekom iskopa tunela. Za klasificiranje stijenskih masa duž trase servisnog tunela primijenjena je Geomehanička klasifikacija (Bieniawski, 1989). Rezultati klasificiranja odnosno postotci udjela pojedinih kategorija stijenske mase u odnosu na ukupnu dužinu servisnog tunela prikazani su u tablici 3.

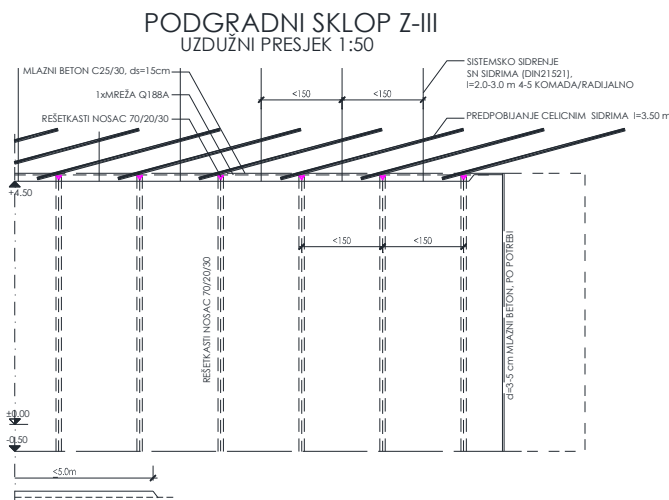
Tablica 3. Postotak udjela pojedinih kategorija stijenskih masa duž trase servisnog tunela Sv. Tri Kralja

Kategorija stijenske mase (RMR)	[%]	Tip podgradnog sklopa
II	17,80	Z-I
III	9,74	Z-II
IV	51,82	Z-III
V	20,64	Z-IV i Z-V

U povoljnoj stijenskoj masi iskop se izvodio bušenjem i miniranjem, dok se u slabijim, lošijim uvjetima stijenske mase iskop izvodio mehanički tunelskim bagerom. Prilikom iskopa tunela podzemna voda se pojavljivala kontinuirano različitim intenzitetom od vlaženja, kapanja do značajnijeg curenja. Najznačajniji dotok podzemne vode iznosio je od 25 – 125 l u minuti/10m tunela u području završnog dijela tunela sa sjeverne strane. Tijekom iskopa tunela radno čelo tunela nalazilo se uvjetima od suhog, vlažnog do saturiranog vodom. Kontinuirano sa izvođenjem radova iskopa i podgrađivanja na radnom čelu tunela obavljalo se geološko i inženjerskogeološko kartiranje tunela na temelju kojeg se klasificirala i procjenjivala karakteristika stijenskog materijala iz iskopa (Prebeg i Ženko, 2006). U sklopu programa geotehničkih mjerenja paralelno sa radovima na iskopu obavljana su i kontrolna mjerenja deformacija podzemnog iskopa – konvergencije.

Karakteristični kontrolni mjerni profil sadržavao je 5 mjernih točaka pozicioniranih na rubu podzemnog iskopa. Mjerna točka sastoji se od nosača mjerne točke koji se ugrađuje u mlazni beton ili stijensku masu i na koji se postavlja birefleksni cilj ili prizmatski cilj. Rezultati kontrolnih mjerenja ostvarenih pomaka u tunelu obrađivani su uz pomoć programskog paketa za interpretaciju podataka „Dedalos“. Prosječni ostvareni pomaci u zonama vapnenaca i konglomerata bili su reda veličine nekoliko milimetara, dok su se kod klastičnih naslaga kretali od 2 -5cm. Mjestimično zabilježeni veći pomaci do 10 cm uzrokovani su nepravovremenim zatvaranjem podgradnog prstena. Pomaci potvrđuju prognozne pomake dane u geotehničkom projektu što ukazuje na optimizaciju podgradnog sklopa. Nakon izvedbe cijelog prstena primarne podgrade pomaci dobivaju trend smirivanja i u konačnici se zaustavljaju. Ustanovljavanjem stvarnog inženjerskogeološkog profila duž trase tunela, odnosno stvarne kvalitete stijenske mase duž trase tunela dovelo je do optimizacije svih mjera na stabilizaciji iskopa datih u prvoj fazi geotehničkog projektiranja tunela te u konačnici i do verifikacije stabilnosti podzemnog iskopa tijekom druge faze geotehničkog projektiranja. Podgradne sklopove primarne obloge čine mlazni beton, čelična armaturna mreža, čelični rešetkasti nosači, SN/IBO sidra, čelična koplja. Podgradni sklopovi tip od Z-I do Z-IV korišteni su za izradu normalnog profila servisne tunelske cijevi, a na mjestima proširenja profila servisne tunelske cijevi korišten je podgradni sklop Z-V (Schwaiger, 2004). Na slikama 6 i 7 prikazan je podgradni sklop primarne obloge tip Z-III za IV. kategoriju stijenske mase izveden u servisnoj tunelskoj cijevi. Podgradni sklop tip Z-III čine SN sidra $\varnothing 25$ mm, $l=3,0$ m, sistemsko sidrenje; 2 sloja armaturne mreža Q188A, čelični rešetkasti nosač 50/20/30, predpobijanje kopljima $\varnothing 25$ mm, $l= 3,5$ m, mlazni beton MB30 $d_s=15$ cm, po potrebi podnožni svod kojeg čine mlaznog beton MB30 $d_s=15$ cm i 2 sloja armaturne mreža Q188A.

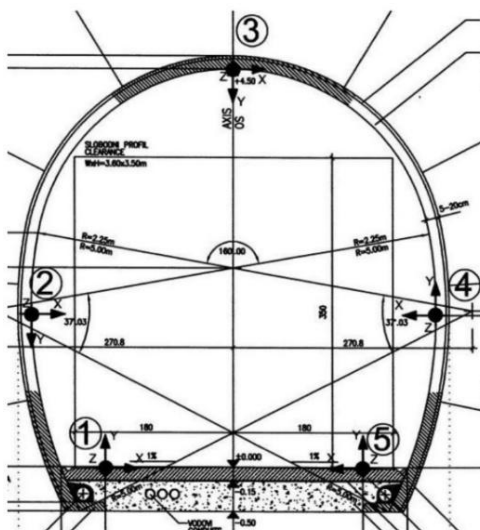




Slika 7. Uzdužni presjek podgradnog sklopa Z-III

3 Geotehnički pristup održavanju servisnog tunela Sveta Tri Kralja

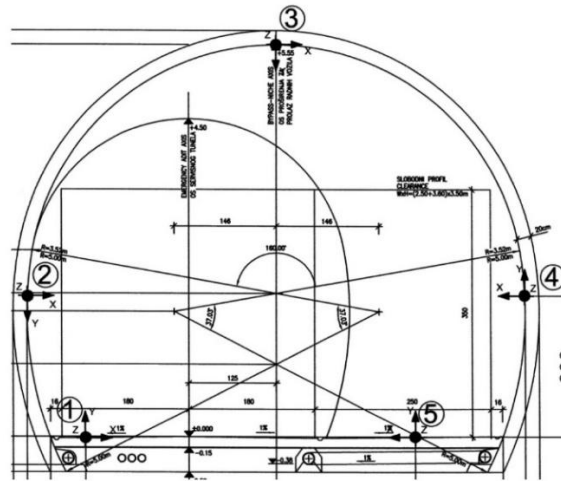
Obzirom da je servisni tunel izveden samo u primarnoj oblozi, projektnom dokumentacijom predviđena je periodična kontrola stabilnosti geotehničke konstrukcije tunela. Tijekom obavljanja periodičnih sezonskih pregleda servisnog tunela nisu uočeni nikakvi tragovi nestabilnosti, već je na više mjesta uočeno vlaženje i curenje vode što je i očekivano s obzirom na visoku razinu podzemne vode u stijenskoj masi i ne hidroizoliranost servisnog tunela. U svrhu kontrole stabilnosti izrađen je program geotehničkih mjerenja i opažanja kojim su radi ekonomičnosti propisana kontrolna mjerenja koja geodetski prate apsolutne pomake točaka po obodu servisne tunelske cijevi kako je i prikazano na sl. 8 (Stojković, 2012).



Slika 8. Položaj mjernih točaka u kontrolnom mjernom profilu servisne tunelske cijevi

Na raspored kontrolnih mjerenja utjecala je kvaliteta stijenske mase duž trase servisne tunelske cijevi kao i položaj za stabilnost tunelske cijevi kritičnih mjesta (spojevi poprečnih prolaza i servisne tunelske cijevi). Prema inženjerskogeološkom profilu izvedenog stanja stijenska masa se duž trase servisnog tunela načelno može podijeliti na dvije geotehničke sredine. U prvoj geotehničkoj sredini koja se proteže od ulaznog portala do poprečnog prolaza broj 3, odnosno od st. 39+558 do st. 40+380 uglavnom prevladavaju kvalitetnije stijenske mase zastupljene pješčenjacima, laporima, konglomeratima i vapnencima. U drugoj geotehničkoj sredini koja se proteže od poprečnog prolaza broj 3 do kraja servisne tunelske cijevi, odnosno od st. 40+380 do st. 40+800 prevladavaju stijenske mase vrlo slabe kvalitete predstavljene slabo vezanim klastičnim

naslagama ($\sigma_c < 1$ MPa). Programom je u prvoj geotehničkoj sredini predviđena ugradnja kontrolnih mjernih profila na svakih 100 m, a u drugoj geotehničkoj sredini na svakih 50 m. U okviru navedenog rasporeda u zonama spojeva poprečnih prolaza sa servisnom tunelskom cijevi ugrađen je po jedan kontrolni mjerni profil. Navedenim programom predviđena je ugradnja ukupno 17 kontrolnih mjernih profila. Svaki kontrolni mjerni profil ima pet mjernih točaka za geodetsko praćenje apsolutnih pomaka po obodu servisne tunelske cijevi kao što je prikazano na slici 8. Na slici 9 prikazan položaj mjernih točaka na spojevima servisnog tunela s poprečnim prolazima (zone proširenja). Mjerna točka sastoji se nosača mjerne točke koji se ugrađuje u mlazni beton ili betonsku ploču poda na koji se postavlja bi-refleksni cilj ili prizmatski cilj. Mjerenja se provode elektronskim teodolitom s integriranim koaksijalnim sustavom mjerenja udaljenosti. Potrebna točnost mjernog instrumenta za mjerenje udaljenosti treba biti $\geq \pm 1$ mm.



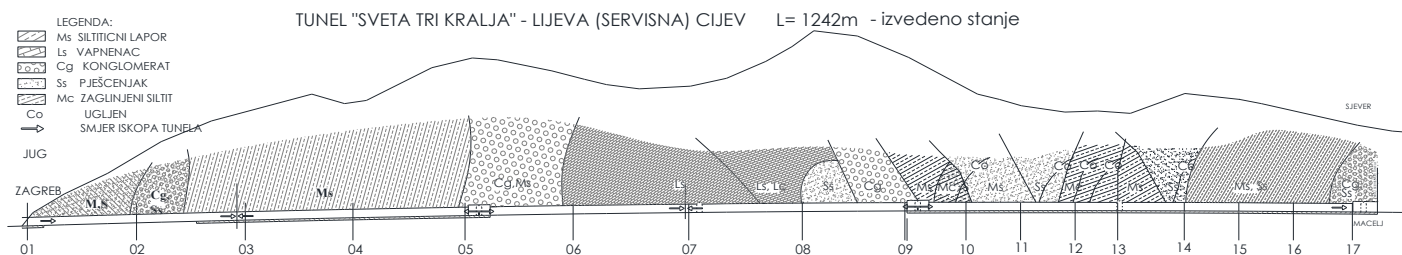
Slika 9. Položaj mjernih točaka u kontrolnom mjernom profilu – zona proširenja

4 Analiza i rezultati mjerenja pomaka

Interpretacija izmjerenih pomaka tunelske obloge dana je u usporedbi sa podgradnim sklopovima (Tomašković i Hlupić, 2025). Projektom je predviđeno izvođenje 5 tipova podgradnih sklopova od Z-I do Z-V. Pregled izvedenih prodgradnih sklopova i pozicije kontrolnih mjernih profila prikazani su u tablici 4 i na slici 10.

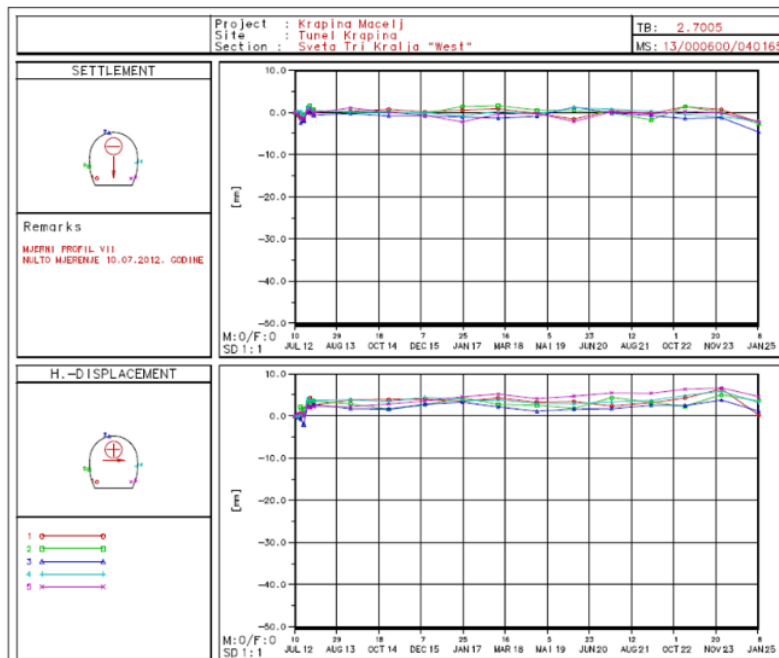
Tablica 4. Prikaz kontrolnih mjernih profila

Kontrolni mjerni profil	Stacionaža	Napomena	Primijenjeni tip zaštite			
1	39+570	Zona portala	Z-III			
2	39+670	Prva geotehnička sredina	Z-III			
3	39+770	Prva geotehnička sredina	Z-III			
4	39+870	Prva geotehnička sredina	Z-III			
5	39+971	Poprečni prolaz br.1	Z-III			
6	40+070	Prva geotehnička sredina	Z-II			
7	40+176	Poprečni prolaz br.2	Z-1			
8	40+280	Zona slabo vezanog pješčenjaka	Z-1			
9	40+374	Poprečni prolaz br.3	Z-III			
10	40+430	Druga geotehnička sredina	Z-III			
11	40+480	Druga geotehnička sredina	Z-III			
12	40+530	Druga geotehnička sredina	Z-III			
13	40+569	Poprečni prolaz br.4	Z-III			
14	40+630	Druga geotehnička sredina	Z-III			
15	40+680	Druga geotehnička sredina	Z-III			
16	40+730	Druga geotehnička sredina </tr <tr> <td>17</td> <td>40+784</td> <td>Poprečni prolaz br.5</td> <td>Z-V</td> </tr>	17	40+784	Poprečni prolaz br.5	Z-V
17	40+784	Poprečni prolaz br.5	Z-V			



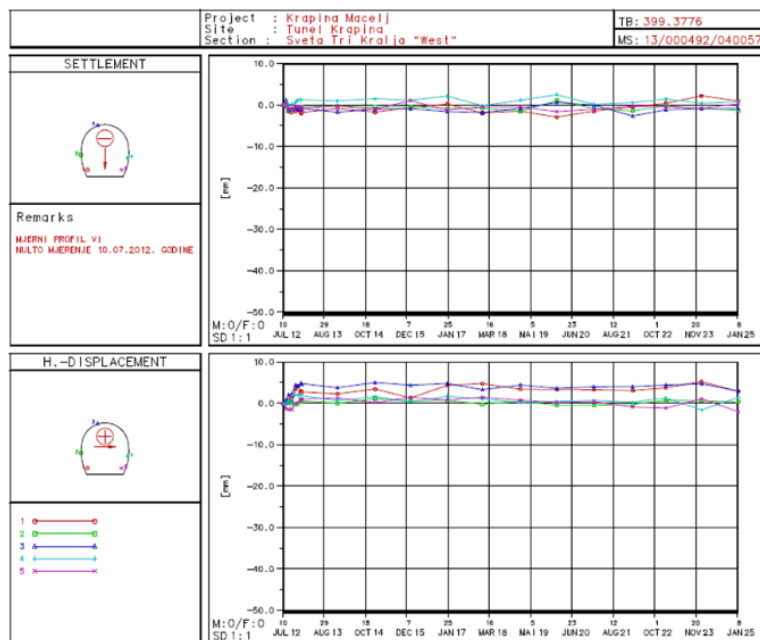
Slika 10. Uzdužni profil servisnog tunela s prikazom mjernih profila

Podgradni sklop Z-I je definiran kao podgradni sklop na mjernom profilu 7 i 8. Prema projektu predviđeni pomak za sklop Z-I je 2-4 mm. Prema podacima mjerenja na profilima 7 (slika 11) i 8 tijekom mjerenja se kreću oko 4-5 mm od nultog mjerenja. Obzirom da se u razdoblju od 10 godina nije ustanovilo povećanje niti trend povećanja pomaka pa se može zaključiti da su se pomaci primarne obloge smirili i naprezanja u okolnoj stijenskoj masi ponovno došla u ravnotežno stanje.



Slika 11. Prikaz mjerenja vertikalnih i horizontalnih deformacija mjernog profila 7

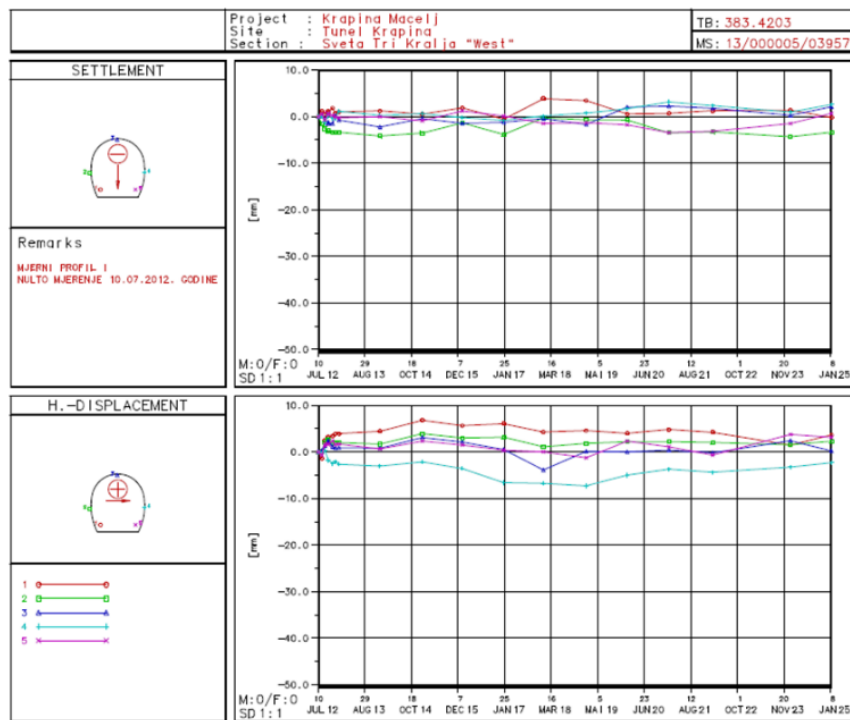
Podgradni sklop Z-II je definiran kao podgradni sklop na mjernom profilu 6. Prema projektu predviđeni pomak za sklop Z-II je 2-4 mm. Prema podacima mjerenja na profilu 6 (slika 12) tijekom mjerenja se kreću oko 2-3 mm od nultog mjerenja. Obzirom da se u razdoblju od 10 godina nije ustanovilo povećanje niti trend povećanja pomaka pa se može zaključiti da su se pomaci primarne obloge smirili i naprezanja u okolnoj stijenskoj masi ponovno došla u ravnotežno stanje.



Slika 12. Prikaz mjerenja vertikalnih i horizontalnih deformacija mjernog profila 6

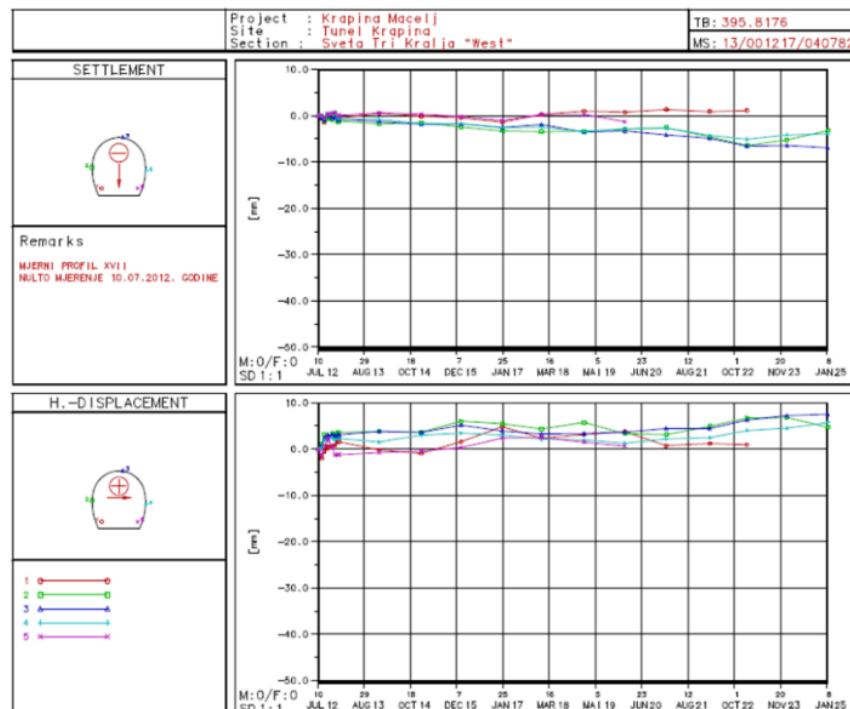
Podgradni sklop Z-III je definiran kao podgradni sklop na mjernim profilima od 1 do 5 i od 9 do 16. Prema projektu predviđeni pomak za sklop Z-III je u vertikalnom smjeru 3-7 cm i horizontalnom 0,5-2,5 cm. Prema podacima mjerenja na profilima 1-5 i 9-16 (slika 13, mjerni profil 1) tijekom mjerenja se kreću oko 4-5mm od nultog mjerenja. Obzirom da se u razdoblju od 10 godina nije ustanovilo povećanje niti trend povećanja pomaka pa se može zaključiti da su se pomaci primarne obloge smirili i naprezanja u okolnoj stijenskoj masi

ponovno došla u ravnotežno stanje. Na mjernom profilu 1 (blizu portalne građevine) se primjećuju povećani pomaci, ali su u granicama zadanim projektnim proračunima te prikazuju tendenciju smirivanja, razlog takvih pomaka može biti zbog malog nadsloja i utjecaja s površine terena na tunelsku oblogu.



Slika 13. Prikaz mjerenja vertikalnih i horizontalnih deformacija mjernog profila 1

Podgradni sklop Z-V je definiran kao podgradni sklop na mjernom profilu 17. Prema projektu predviđeni pomak za sklop Z-V je u vertikalnom smjeru 3-7 cm i horizontalnom 0,5-2,5 cm. Sklop Z-V je izveden u punom profilu jer je na tom mjestu spoj sa poprečnim tunelom za vozila sa nišom. Prema podacima mjerenja na profilu 17 (slika 14) tijekom mjerenja se kreću oko 3-7 mm od nultog mjerenja.



Slika 14. Prikaz mjerenja vertikalnih i horizontalnih deformacija mjernog profila 17

Na mjernom profilu 17 se primjećuje trend povećanja pomaka na tjemenu svoda i na desnim zidovima u predzadnjem snimanju, međutim na zadnjem snimku taj trend nije vidljiv te nisu zabilježeni veći pomaci mjernih mjesta. Veće vrijednosti pomaka se mogu pripisati većem profilu iskopa te činjenici da je izveden spoj sa poprečnim tunelom. Međutim vrijednosti pomaka su unutar projektnih parametara stoga nije potreban hitni zahvat na tom mjernom mjestu.

Programom geotehničkih mjerenja i opažanja predviđeno je provođenje mjerenja u razdoblju od šest mjeseci, s time da učestalost mjerenja ovisi o brzini prirasta deformacije. U slučaju progresivnih deformacija mjerenja će se po potrebi intenzivirati. Na početku mjerenja obavljeno je sedam kontrolnih mjerenja u preporučenoj učestalosti od jednog mjerenja mjesečno. Na osnovi analize provedenih mjesečnih kontrolnih mjerenja proizlazi da je servisna tunelska cijev stabilna. Nakon toga, od 2013. godine, periodična kontrola pomaka u servisnoj tunelskoj cijevi provodi se jednom godišnje na istim kontrolnim mjernim profilima. Također, na osnovi analize provedenih godišnjih kontrolnih mjerenja proizlazi da je servisna tunelska cijev stabilna.

5 Zaključak

Održavanje tunela ima za cilj održati normalne funkcionalne uvjete u tunelu te na taj način osigurati nesmetano i sigurno upravljanje prometom kroz tunel, odnosno održavanje tunela ima za cilj osigurati kontinuitet poslovanja na dionici autoceste na kojoj se nalazi tunel. Proaktivan preventivni pristup u redovitom održavanju tunela predstavlja osnovu za optimalno održavanje tunela kojim se osigurava ostvarenje cilja održavanja tunela. Na primjeru servisnog tunela Sv. Tri Kralja prikazana je važnost primjene standardnih procedura kao dio preventivnih mjera u redovitom održavanju tunela kao što je opažački pristup koji je dio geotehničkog projektiranja. Upravo kroz geotehnički pristup tijekom razdoblja građenja i razdoblja održavanja tunela proizlazi nerazdvojiva povezanost razdoblja građenja i održavanja tunela. Tijekom izgradnje tunela naglasci su na savladavanju inženjerskogeoloških odnosno geotehničkih obilježja stijenske mase kroz koju prolazi tunel, kvaliteti izvedenih radova te vremenskom roku izgradnje tunela. Održavanje tunela zahtijeva prije svega sustavni pristup nesmetanom i sigurnom odvijanju prometa kroz tunele što podrazumijeva optimizaciju svih parametara tunela kao cjeline od sustava tunelske opreme do održavanja i praćenja tunelske konstrukcije te spremnosti djelovanja u slučaju neželjenih događaja. U oba slučaja, izgradnje ili održavanja tunela, naglasak je na aktivnom praćenju, opažanju i analiziranju stanja okruženja u kojem se primjenjuje tehnika i tehnologija potrebna za ostvarivanje zadanih ciljeva izgradnje tunela odnosno ciljeva održavanja tunela.

Literatura

- Bieniawski, Z. T. (1989): Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil and petroleum engineering, A Wiley-Interscience publication, John Wiley and Sons
- Deković, Z., Pili, I., (2012): Management of tunnels on the Zagreb – Macelj motorway in the course of tunnels exploitation, Rudarsko-geološko-naftni zbornik, Vol. 25, str. 81-92
- Prebeg I. Ženko T. (2006): Izvještaj nadzornog inženjera o izvedenom stanju - tunel Sv. Tri Kralja lijeva (zapadna) cijev, IGH Zagreb, str. 4-7.
- Schwaiger, S. (2004): Tunel Sv. Tri Kralja geotehnički projekt – servisni tunel, Müller+Hereth Ingenieurbüro für Tunnel und Felsbau GmbH
- Stojković, B. (1999): Geotehnički projekt tunela Sv. Tri Kralja, IGH Zagreb
- Stojković, B. (2012): Tunel Sv. Tri Kralja, servisni tunel – Program geotehničkih mjerenja i opažanja, Intergeo d.o.o., Zagreb, str. 1-6
- Tomašković, T., Hlupić, H., (2025) Servisna cijev tunela Sv. Tri Kralja - analiza mjerenja pomaka, elaborat, Geokspert d.o.o., Zagreb