

Metodologija geotehničkog projektiranja tunela *Sveti Marko*

Branko Stojković, Bogdan Stanić, Meho Saša Kovačević

Ključne riječi

tunelogradnja, metodologija, geotehničko projektiranje, tehnologija izvođenja, geotehnička mjerenja i opažanja

Key words

tunneling, methodology of geotechnical design, construction technology, geotechnical measurements and observations, numerical analyses

Mots clés

construction des tunnels, méthodologie de la conception géotechnique, technique de l'exécution, mesures et observations géotechniques, analyses numériques

Ключевые слова:

туннелестроительство, методология геотехнического проектирования, технология строительства, геотехнические измерения и наблюдения

Schlüsselworte:

Tunnelbau, Methodologie des geotechnischen Entwurfens, Ausführungstechnologie, geotechnische Messungen und Beobachtung, numerische Analysen

B. Stojković, B. Stanić, M. S. Kovačević

Metodologija geotehničkog projektiranja tunela *Sveti Marko*

Integralna metoda projektiranja objedinjuje empirijski, racionalni i opažački pristup projektiranju tunela. Opisuje se primjena integralne metode na tunelu Sv. Marko koja je omogućila potpunu kontrolu nad geotehničkom konstrukcijom tunela u svim fazama izvedbe te uspješni završetak gradnje. Prikazana su projektna rješenja, program i druga faza projektiranja, tehnologija izvođenja, rezultati mjerenja i povratne analize te intervencije tijekom gradnje.

B. Stojković, B. Stanić, M. S. Kovačević

Methodology of geotechnical design as applied on the *Sveti Marko* tunnel

The paper starts with the assertion that the integral method of design combines empirical, rational and observational approaches to tunnel design. The application of the integral method at the *Sveti Marko* tunnel is described. This method enabled the total control of the geotechnical structure of the tunnel in all phases of realization, and allowed successful completion of the construction work. The authors present design solutions, the program and the second stage of design, construction technology, back analysis and measurement results, and interventions made in the course of tunnel construction.

B. Stojković, B. Stanić, M. S. Kovačević

La méthodologie de la conception géotechnique du tunnel "*Sveti Marko*"

L'on part du principe que la méthode intégrale de la conception réunit les approches empirique, rationnelle et observationnelle de la conception des tunnels L'article décrit la mise en oeuvre de la méthode intégrale au tunnel "*Sveti Marko*", qui a permis un contrôle total de la construction géotechnique du tunnel dans toutes les phases de la construction, qui fut couronnée de succès On décrit les solutions retenues, le programme et la deuxième phase de la conception, la technique de l'exécution, les résultats des mesures et les analyses de retour, ainsi que les interventions au cours de la construction.

Бранко Стојковић, Богдан Станић, Мехо-Саша Ковачевић

Методологја геотехническог пројектирања тунела "*Святой Марко*"

В работе исходит из утверждения, что интегральный метод проектирования объединяет эмпирический, рациональный и наблюдательный подход к проектированию тунелей. Описывается применение интегрального метода на примере "*Святого Марка*", который обеспечил возможность полного контроля над геотехнической конструкцией тунеля во всех фазах строительства и успешное завершение объекта. Показаны проектные решения, программа и другие фазы проектирования, технология строительства, результаты измерений и возвратные анализы и вмешательства в течении строительства.

B. Stojković, B. Stanić, M. S. Kovačević

Methodologie des geotechnischen Entwurfens des Tunnels *Sveti Marko*

Man geht von der Behauptung aus dass das integrale Entwurfsverfahren den empirischen, rationalen und beobachtenden Zutritt zum Tunnelentwurf vereint. Beschrieben ist die Anwendung des integralen Verfahrens am Tunnel Sv. Marko, das die vollständige Kontrolle über die geotechnische Konstruktion des Tunnels in allen Ausführungsphasen und den erfolgreichen Abschluss des Baus ermöglichte. Dargestellt sind Entwurfslösungen, Programm und zweite Entwurfsphase, Ausführungstechnologie, Messungsergebnisse und rückbezügliche Analysen, sowie Eingriffe während des Bauens.

Pregledni rad

Subject review

Ouvrage de synthèse

Обзорная работа

Übersichtsarbeit

Autori: Mr. sc. **Branko Stojković**, dipl. ing. građ.; mr. sc. **Bogdan Stanić**, dipl. ing. građ., Institut građevinarstva Hrvatske, Zagreb, Rakušina 1.; doc. dr. sc. **Meho-Saša Kovačević**, dipl. ing. građ., Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26

1 Uvod

Tunel *Sveti Marko* izveden je na autocesti Zagreb-Rijeka, otprilike 6,5 km zapadno od Karlovca. Sastoji se od dviju tunelskih cijevi pojedinačnih duljina 243 m i 266 m smještenih na osnovj udaljenosti od 25 m. Za tunel je karakterističan mali nadsloj, najveće visine 22 m. Odabran je tunel umjesto usjeka radi očuvanja groblja na površini terena (slika 1.).



Slika 1. Gradilište tunela *Sveti Marko*

Iako su radovi na iskopu predusjeka i tunela započeli u nepovoljnim vremenskim uvjetima, obilne kiše u zimskom razdoblju, predusjeci i proboj tunela završeni su bez problema u roku od 4,5 mjeseci, odnosno 2,5 mjeseca prije roka. Jedna od bitnih karakteristika koja je uvjetovala uspješnost izvođenja jest potpuna kontrola izrade i ponašanja geotehničkih konstrukcija, odnosno portalnih predusjeka i tunela, ostvarena stalnim geotehničkim nadzorom i provođenjem složenog programa geotehničkog opažanja i mjerenja.

2 Geologija

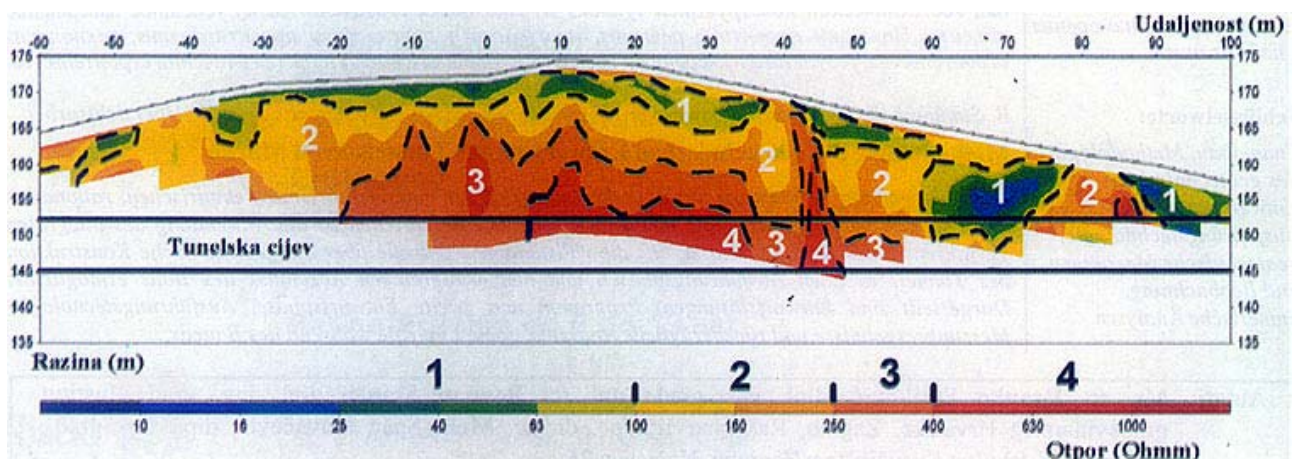
Teren je u području tunela i predusjeka izgrađen od potpuno dezintegriranih klastičnih naslaga zastupljenih mješavinama gline, pijeska, praha i odlomaka pješčenjaka. Ispod navedenog sloja, čija se debljina kreće od 10 do 20 m nepravilno se pojavljuje sloj potpuno dezintegriran dolomita s osnovnom stijenskom masom dolomita u podlozi.

Rezultati geoelektričnog profiliranja LIS tehnikom (*Lund Imaging System*) prikazuju karakteristike predmetne geološke sredine (slika 2.), gdje su izdvojeni sljedeći materijali: 1. dominantno pjeskovite gline, 2. mješavine gline pijeska, praha i odlomaka pješčenjaka, 3. potpuno dezintegrirani dolomit i 4. dolomit.

3 Metodologija geotehničkog projektiranja

Prema Eurocodu No.7 [1] predmetni tunel pripada geotehničkoj kategoriji 3. u kojoj su najsloženije geotehničke konstrukcije [2]. Za projektiranje geotehničke konstrukcije tunela odnosno stabilizacije podzemnog iskopa tunela primijenjena je integralna metoda projektiranja [3]. Integralna metoda ujedinjuje empirijski, racionalni i opažajući pristup projektiranju, omogućavajući projektantu temeljito i sveobuhvatno spoznavanje i rješavanje problema, svodeći pri tom na minimum pogreške. Ta metoda omogućuje projektiranje u dvije faze. Prva faza projektiranja jest prije početka gradnje tunela i daje prognoza rješenja čija točnost ovisi o količini i kakvoći podataka dobivenih istražnim radovima. U drugoj se fazi tijekom gradnje tunela na osnovi stvarnog ponašanja građevine obavlja verifikacija ili modifikacija projektnih rješenja prve faze.

Empirijski pristup projektiranju tunela temelji se na iskustvu stečenom pri realizaciji prijašnjih projekata. Osnovu takvog pristupa čine inženjerske klasifikacije



stijenskih masa, koje omogućuju sistematizaciju stečenih iskustava glede odnosa kvalitete stijenske mase, načina iskopa i zahtijevane podgrade u tunelu. U integralnoj metodi klasifikacije su polazna osnova za određivanje prognoznih podgradnih sklopova. Osim toga tijekom gradnje tunela samo na osnovi klasifikacija može se odrediti kategorija stijenske mase i odabrati pripadni podgradni sklop.

S obzirom na to da tunel *Sveti Marko* pripada skupini tunela kod kojih je ponašanje podzemnog iskopa pri iskopu i stabilizaciji iskopa primarno kontrolirano stajima naprezanja i njihovom promjenom, u projektu je primijenjena austrijska klasifikacija ÖNORM B 2203 [4] i Q sustav [5, 6].

Racionalni se pristup projektiranju tunela temelji na numeričkim analizama naprezanja i deformacija stijenske mase i tla oko podzemnog iskopa ili analizama naprezanja i deformacija sustava medija i podgrade te omogućuje dimenzioniranje odabranih podgradnih sklopova. U okviru racionalnog pristupa za predmetne analize upotrijebljen je programski paket "Final" Sveučilišta u Innsbrucku [7].

Na osnovi rezultata klasificiranja, numeričkih analiza i dosadašnjeg iskustva na izvedenim tunelima određeni su

prognozni podgradni sklopovi čime je završena prva faza projektiranja.

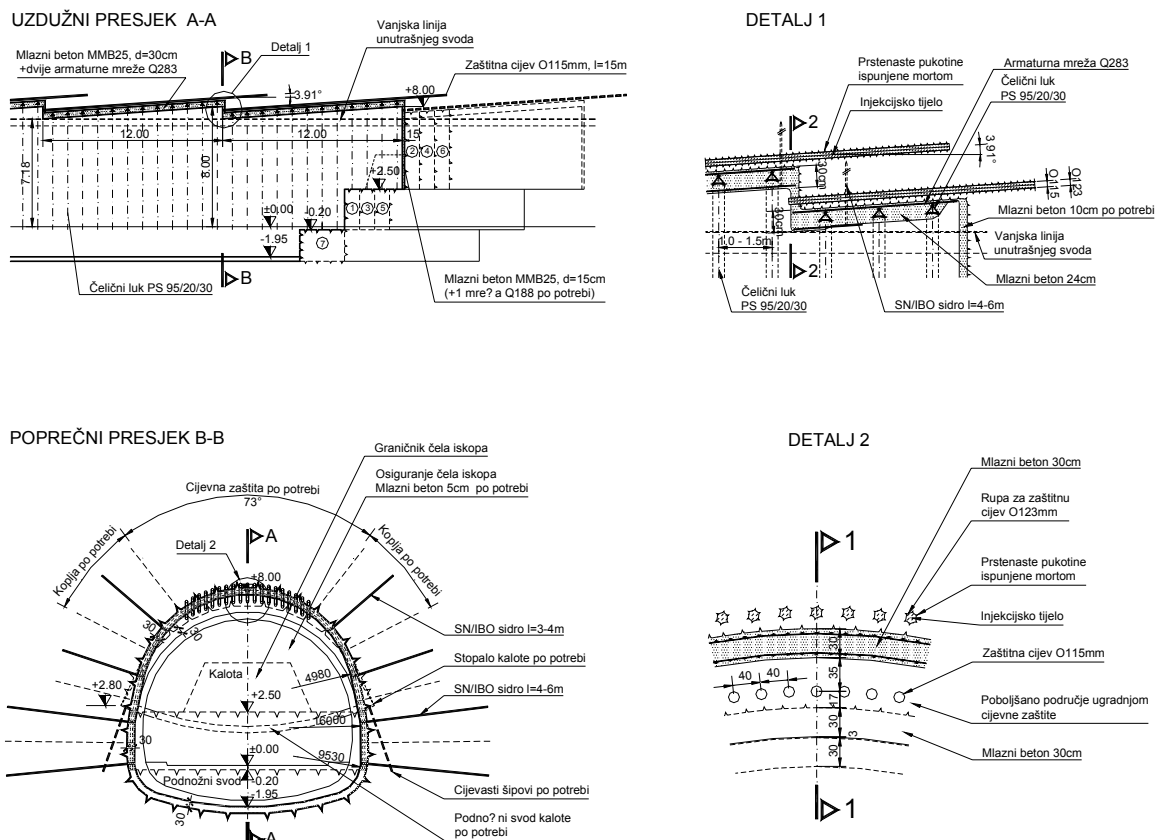
Opažački pristup omogućuje da se tijekom gradnje tunela na osnovi opažanja i mjerenja te povratnih analiza izvrši verifikacija ili eventualno korekcija odabranih podgradnih sklopova, odnosno svih mjera na stabilizaciji podzemnog iskopa, što je druga faza projektiranja. Projektom je definiran program druge faze projektiranja provođenje kojega omogućuje sigurno i ekonomično izvođenje tunela.

Takav je način projektiranja u skladu s preporukama "Internacionalnog društva za tunelogradnju" [8] te je verificiran na više značajnih podzemnih objekata [9, 10]. Slični se postupci projektiranja primjenjuju i drugdje u svijetu [11, 12].

4 Projektna rješenja

Karakteristike geotehničkih materijala u zoni tunela, visina nadsloja, veličina podzemnog iskopa i duljina tunela uvjetovali su izbor tehnologije iskopa i podgrađivanja.

Niska čvrstoća tla i neznatna inicijalna stabilnost podzemnog iskopa uvjetovali su izbor jedne od posebnih metoda poboljšanja stabilnosti iskopa u zoni svoda tune-



Slika 3. Primarni podgradni sklop i tehnologija izvođenja

la. Primijenjena je tehnologija izvedbe zaštitnog svoda od čeličnih injektiranih cijevi (*pipe roof*). Projektirana duljina cijevi iznosila je 15 m s preklapom od 3 m. U portalnom dijelu tunela predviđena je ugradnja 42 cijevi na razmaku 0,4 m, dok je za sva daljnja napredovanja predviđeno 29 cijevi na razmaku 0,4 m i u vertikalnom nagibu oko 4^0 .

S obzirom na malu duljinu tunela i činjenicu da sekundarna naprezanja prekoračuju čvrstoću tla već pri djelomičnom iskopu profila, predviđen je iskop tunela u tri faze s kratkim napredovanjima i uz brzo zatvaranje podgradnog prstena i zaštitu čela iskopa. Time je izbjegnuta potreba stabiliziranja prve faze iskopa dodatnim mjerama kao što su izvedba proširene podgradne stope ili eventualna ugradnja privremenoga podnožnog svoda.

Mali nadsloj i kvaliteta medija uvjetovali su izbor krutoga podgradnog sklopa. Na osnovi provedenih analiza stabilizacije podzemnog iskopa empirijskim i racionalnim pristupom te dosadašnjeg iskustva, dimenzioniran je primarni podgradni sklop koji se sastojao od 30 cm mlaznog betona MB 25 s dvije čelične zavarene mreže Q 238, čeličnih rešetkastih lukova Pantex 95/20/30 na razmaku 1 m te sidrenja zidova tunela IBO sidrima R 32/20 nosivosti 250 kN, dužine 6 m, na razmaku 2 m. Na slici 3. prikazan je primarni podgradni sklop i tehnologija izvođenja s pripadnim detaljima.

5 Program druge faze projektiranja

Geotehničkim projektom definirana je druga faza projektiranja koju čine:

- program određivanja stvarne kvalitete medija duž trase tunela
- program geotehničkih opažanja i mjerenja
- procedura druge faze projektiranja.

Stvarna kvaliteta medija (stijenske mase ili tla) duž trase tunela određuje se na osnovi geološkog i inženjerskogeološkog kartiranja tijekom iskopa, klasificiranja medija i ispitivanja uzoraka geotehničkih materijala iz iskopa odnosno definiranja svih relevantnih parametara medija.

Program geotehničkih opažanja i mjerenja ima za cilj verifikaciju stabilnosti podzemnog iskopa u svim fazama gradnje i optimalizaciju svih mjera na stabilizaciji podzemnog iskopa. Geotehničko opažanje obuhvaća određivanje ponašanja stijenske mase ili tla na čelu tunela, snimanje procesa građenja i svakodnevni pregled ugrađenih podgradnih sklopova. Opažanjima je potrebno verificirati projektom predviđene dužine napredovanja, vrijeme stabilnosti nepodgrađenih raspona te vrijeme i redosljed izvođenja svih propisanih mjera na stabilizaciji podzemnog iskopa, odnosno snimanje procesa gradnje i utjecaja pojedinih zahvata na stabilnost podzem-

nog iskopa. Svakodnevni pregled ugrađenih podgradnih sklopova obavlja se radi uočavanja mogućih zona nestabilnosti geotehničke konstrukcije koje se ogledaju u deformacijama i razaranjima elemenata podgradnih sklopova. Rezultati geotehničkih opažanja u sprezi s rezultatima geotehničkih mjerenja osnova su za analizu i procjenu stabilnosti geotehničke konstrukcije tunela.

Geotehničkim mjerenjima *in situ* ne provjerava se samo stabilitet i primijenjeni računski model, nego se verificira i osnovni koncept reakcije masiva na izvedbu podzemnog iskopa te djelotvornost podgradnih sklopova i svih mjera na stabilizaciji iskopa. Time geotehnička mjerenja postaju integralni dio projekta.

Mjerenja u tunelogradnji općenito se dijele u tri skupine [13]:

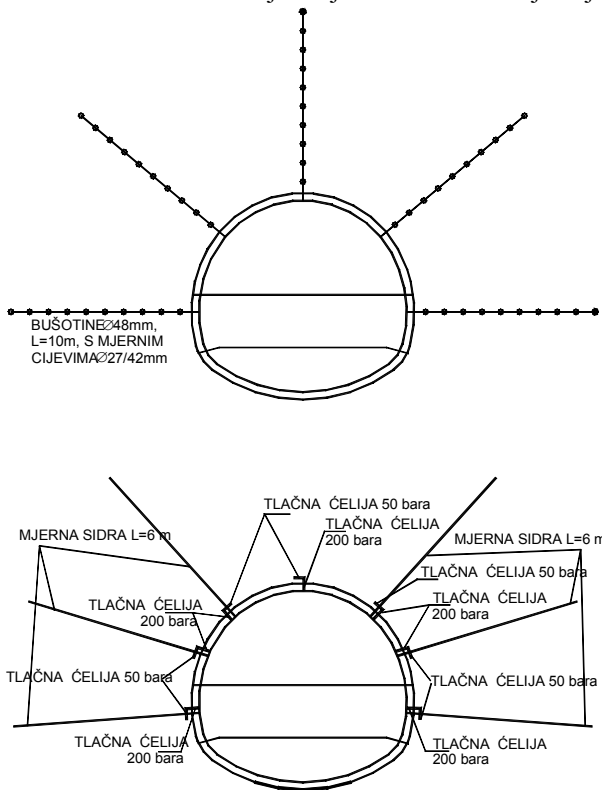
- kontrolna mjerenja koja prate deformacije podzemnog iskopa radi osiguranja radnika i geotehničke konstrukcije
- podgradna mjerenja koja prate pomake oko podzemnog iskopa i naprezanja u elementima podgradnih sklopova radi verifikacije primijenjene metodologije iskopa i podgrađivanja, optimalizacije primarnih podgradnih sklopova i verifikacije stabilnosti geotehničke konstrukcije
- stabilizacijska mjerenja koja određuju opterećenje sekundarne betonske obloge radi dokaza stabilnosti tunela.

U tunelu *Sveti Marko* za svako je napredovanje zaštitnog svoda od čeličnih injektiranih cijevi predviđena ugradnja jednoga kontrolnog mjernog profila s pet mjernih točaka na rubu podzemnog iskopa (slika 7.). Mjerna se točka sastoji od nosača mjerne točke koji se ugrađuje u mlazni beton i na koji se postavlja birefleksni ili prizmatički cilj. Mjerenja apsolutnih pomaka točaka provode se elektronskim teodolitom s integriranim koaksijalnim sustavom mjerenja udaljenosti. Potrebna točnost mjernog instrumenta za mjerenja udaljenosti jest $\leq \pm 1$ mm. Mjerenja se obično obavljaju u okviru sustava integriranog praćenja tunela koji također uključuje mjerenja slijeganja i provjeru položaja poprečnih profila tunela. Snimljeni rezultati mjerenja obrađuju se s pomoću programskog paketa za interpretaciju podataka i dostavljaju geotehničkom nadzoru.

Za podgradna je mjerenja predviđena izvedba test-sekcije na svakoj tunelskoj cijevi te izvedba integralnoga mjernog profila za obje tunelske cijevi u zoni građevina na površini terena (groblje, kapelica). Test-sekcije lociraju se u jasnoj i za geotehničku jedinicu geološki reprezentativnoj lokaciji. Lokaciju test sekcija određuje projektant geotehničar u suradnji s geologom. U svakoj test-sekciji predviđeno je mjerenje pomaka tla oko podzem-

nog iskopa iz tunela i s površine terena te mjerenje naprezanja u elementima podgradnog sklopa.

Podgradni mjerni profili za mjerenje pomaka oko podzemnog iskopa iz tunela prikazan je na slici 4. U bušotine se ugrađuju mjerne cijevi s mjernim točkama koje se nalaze na međusobnoj udaljenosti od 1 m. Mjerenja



Slika 4. Podgradni mjerni profili

pomaka u smjeru bušotina obavljaju se kliznim deformetrom. Pri mjerenju pomaka s površine terena predviđene su tri vertikalne mjerne bušotine locirane u zoni zidova i osi tunela. Mjerne cijevi se koriste i za mjerenje horizontalnih pomaka inklinometrom. Geodetskim se mjerenjima registriraju apsolutni pomaci ušća svake mjerne bušotine. Mjerni profil unutar tunela potrebno je postaviti što bliže čelu tunela. Mjerenja s površine terena treba započeti pri udaljenosti čela iskopa otprilike 20 m od mjernog profila i obavljaju se u što je moguće kraćim vremenskim razmacima za prolaska čela tunela kroz zonu mjernog profila i nakon njega sve do potpunog prestanka pomaka. Isto se odnosi i na integralni mjerni profil koji je lociran u zoni građevina na površini terena (groblje, kapelica), koji sadrži sedam mjernih bušotina i obuhvaća praćenje pomaka obiju tunelskih cijevi (slika 10.).

Mjerenje naprezanja u elementima podgradnog sklopa sastoji se od mjerenja naprezanja i deformacija sidara i mjerenja naprezanja u mlaznom betonu i na kontaktu podgrade i okolnog medija. Za mjerenje naprezanja i deformacija sidara predviđena je ugradnja 6 mjernih

sidara pojedinačne dužine 6 m. Za mjerenje naprezanja na kontaktu tla i primarnoga podgradnog sklopa i mjerenje naprezanja u mlaznom betonu predviđeno je sedam mjernih mjesta s po dvije tlačne ćelije i to tlačne ćelije mjernog područja do 50 bara za mjerenje radijalnih naprezanja između tla i podgrade i tlačne ćelije mjernog područja do 200 bara za mjerenje tangencijalnih naprezanja u podgradi od mlaznog betona. Podgradni mjerni profil za mjerenje naprezanja u elementima podgradnog sklopa prikazan je na slici 4. Mjerni se profil ugrađuje što bliže čelu tunela, a mjerenja se obavljaju u što je moguće kraćim vremenskim razmacima te ovisno o građevinskim zahvatima u zoni mjernog profila do potpunog prestanka pomaka.

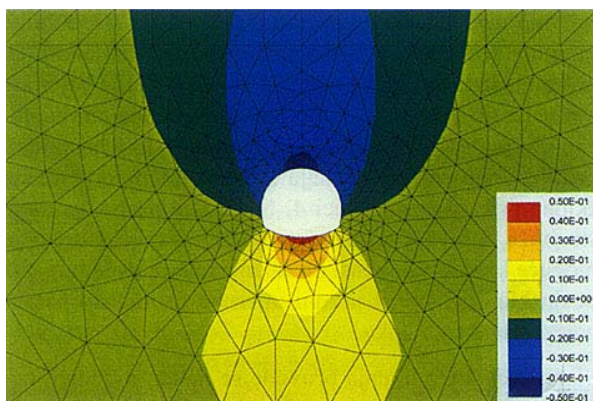
Stabilizacijska mjerenja provode se nakon ugradnje betonske obloge na mjestima gdje nisu prestala pomacanja kod materijala kod kojih se očekuju dugotrajni efekti zbog bujanja ili rastrošbe. Mjerenjima se određuju opterećenja sekundarne betonske obloge radi dokaza stabilnosti tunela. Sastoje se od mjerenja deformacija betonske obloge i mjerenja konvergencije. Stabilizacijski mjerni profil sadrži pet mjernih mjesta u betonskoj oblozi s po 2 kratka deformetra za mjerenje radijalnih i tangencijalnih deformacija betonske obloge te mjerenje horizontalne konvergencije u jednom mjernom pravcu. Mjerenja započinju nakon skidanja oplate s betonske obloge i ovisno o registriranim promjenama naprezanja mogu biti dugotrajna i nastaviti se tijekom upotrebe tunela u okviru stavke održavanja. Interpretaciju mjerenja obavlja geotehničar projektant u suradnji s projektantom betonske konstrukcije.

Rezultati numeričkog modela polazna su osnova za interpretaciju rezultata mjerenja. Na osnovi rezultata numeričkog modela definirano je normalno ponašanje geotehničke konstrukcije i određene razine upozorenja. Razine upozorenja mogu se definirati očekivanim pomakom ili naprežanjem ovisno o rezultatima numeričkog modela i veličinama koje se mjere. Prekoračenje razina upozorenja dovodi u pitanje stabilnost geotehničke konstrukcije i zahtijeva hitnu intervenciju dodatnim podgradnim mjerama koje se unaprijed propisuju geotehničkim projektom.

Na slici 5. prikazani su ukupni vertikalni pomaci za tunel dobiveni numeričkim modeliranjem u prvoj fazi projektiranja. Pomaci i naprezanja u podgradnom sklopu dani su i za svaku fazu iskopa i podgrađivanja tunela [14].

Provođenje procedure druge faze projektiranja tijekom gradnje tunela omogućuje verifikaciju stabilnosti podzemnog iskopa u svim fazama izvođenja čime se postiže potpuna kontrola nad ponašanjem geotehničke konstrukcije odnosno sigurno i ekonomično izvođenje tunela.

Procedura druge faze projektiranja za tunel *Sveti Marko* sastoji se od sljedećih koraka:



Slika 5. Ukupni vertikalni pomaci dobiveni na osnovi numeričkog modela

- izvođenje tunela započeti prema rješenjima u geotehničkom projektu
- nakon svakog napredovanja izvršiti geološko i inženjerskogeološko kartiranje iskopanog dijela tunela
- na osnovi rezultata geološkog i inženjerskogeološkog kartiranja, geolog definira geotehničku jedinicu u kojoj se nalazi predmetni iskop. Na osnovi klasificiranja i procjene karakteristika materijala iz iskopa geotehničar uspoređuje kvalitetu materijala s projektom predviđenom kvalitetom i eventualno uzima uzorke za laboratorijska ispitivanja
- ako karakteristike materijala ne odstupaju bitno od karakteristika predviđenih geotehničkim projektom, geotehničar određuje primjenu pripadajuće metodologije izvođenja odnosno tipa podgradnog sklopa i sve ostale mjere na iskopu i stabilizaciji iskopa prema rješenjima u geotehničkom projektu. Eventualna pojava materijala koji bitno odstupaju od projektom predviđenih zahtijeva hitnu intervenciju projektanta geotehničara glede modifikacije tehnologije izvedbe i podgrađivanja tunela
- geotehničkim motrenjem potrebno je verificirati ili modificirati projektne preporuke glede dužine napredovanja, procjenjenog vremena stabilnosti nepodgrađenih raspona te vremena i redoslijeda izvođenja svih propisanih mjera na stabilizaciji podzemnog iskopa;
- na osnovi geotehničkih mjerenja i opažanja projektant geotehničar treba ustanoviti je li došlo do stabilizacije podzemnog iskopa te ponaša li se podzemni iskop u skladu s kriterijima u projektu
- ako ponašanje podzemnog iskopa bitno odstupi od projektom postavljenih kriterija, potrebno je na osnovi ispitivanja i povratnih analiza korigirati ulazne parametre ili primijeniti adekvatniji računski model te na

osnovi rezultata modificirati sve potrebne mjere na stabilizaciji podzemnog iskopa

- kada se uskladi računski model s ponašanjem podzemnog otvora moguće je na dužim dionicama s uniformnim geotehničkim karakteristikama stijenske mase pristupiti optimalizaciji podgradnih sklopova. Optimalizacija se postiže postupnom redukcijom podgradnog sklopa na početku dionice uz zadovoljavanje kriterija za verifikaciju stabilnosti podzemnog iskopa.

Projekt stabilizacije podzemnog iskopa druge faze treba sadržavati rezultate svih navedenih postupaka i analiza što je osobito značajno u slučaju bilo kakvih problema sa stabilnošću ili održavanjem građevine u budućnosti.

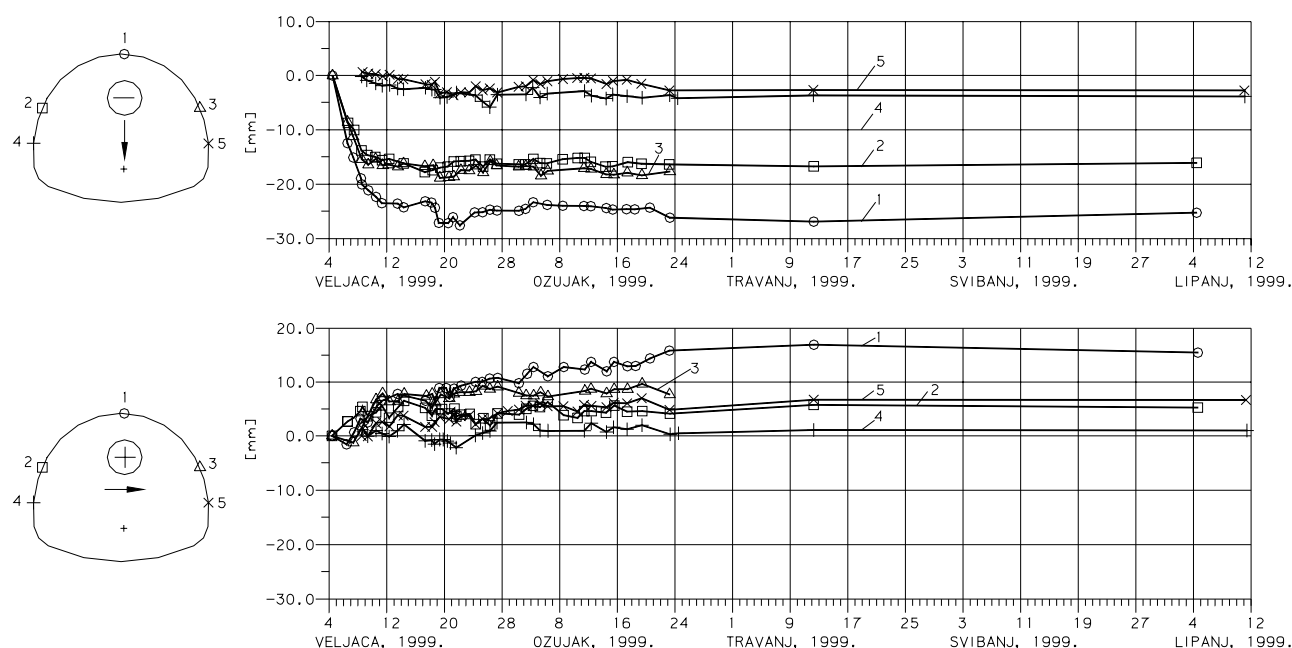
6 Izvedba

Na izvedbi tunela *Sveti Marko* prvi je put u Hrvatskoj primijenjena tehnologija izvedbe zaštitnog svoda od čeličnih injektiranih cijevi (*pipe roof*). Odabran je sustav Alwag-Techmo čije su prednosti u mogućnosti ugradnje zaštitnog svoda s bilo kojim tunelskim bušačim strojem (na bušaču granu stroja potrebno je samo postaviti vodilice) te u brzini i preciznosti ugradnje što je bitno jer se neposredno ispod cijevi ugrađuju rešetkasti lukovi čija geometrija prati projektirani nagib cijevi.

Cijevi se ugrađuju bušenjem bušotine bušačom krunom koja je nešto većeg promjera od promjera cijevi i koja za sobom tijekom bušenja povlači samu cijev. Bušača se kruna sastoji od centralne bušače krune koja se nakon završetka ugradnje izvlači s ostalim bušačim priborom kroz cijev i prstenaste krune Ø 120 mm koja ostaje na čelu ugrađene cijevi. Cijevi su promjera Ø 114,3 mm, debljine stijenske 3 mm i pojedinačne duljine 3 m s mogućnošću nastavljanja do željene duljine. Nakon ugradnje, cijevi su se injektirale normalno vezujućom cementnom injekcijskom smjesom pod pritiskom od 5 bara. Injektiranjem se ostvarenje bolji kontakt cijevi i okolne stijenske mase te zapunjavanje nekoherentnog ili zbijanje koherentnog tla u zoni cijevi.

Ugradnja zaštitnog svoda obavljala se naizmjenično u lijevoj i desnoj tunelskoj cijevi istom bušačom garniturom. Prosječno vrijeme potrebno za ugradnju zaštitnog svoda od 29 čeličnih injektiranih cijevi iznosilo je oko 36 sati. Dok se u jednoj tunelskoj cijevi ugrađivao zaštitni svod u drugoj su se cijevi pod zaštitom već izvedenog svoda obavljali iskop i podgrađivanje. Time se postiglo prosječno napredovanje iskopa i podgrađivanja približno 3,5 m/dan (ukupno za obje cijevi) uz najveće napredovanje od 8 m/dan.

Stabilizacija podzemnog iskopa u slabom mediju zahtijevala je brzu ugradnju kvalitetnoga krutoga podgrad-



Slika 6. Rezultati kontrolnih mjerenja u zoni portala lijeve tunelske cijevi

nog sklopa. Mlazni beton projektiran je prema austrijskim smjericama za mlazni beton [15]. Primijenjen je mokri postupak izrade mlaznog betona. Mlazni se beton ugrađivao u slojevima najveće debljine do 15 cm. Jednodnevne tlačne čvrstoće iznosile su 10-15 Mpa u zavisnosti od početne temperature betona. Srednja vrijednost 28-dnevne čvrstoće iznosila je 45,27 Mpa [16]. Zbog slabih karakteristika tla iskop pojedinih faza tunela obavljen je tek nakon prispjeća automješalice s mlaznim betonom na gradilište. Zahvaljujući primijenjenoj tehnologiji bilo je moguće održavati svježi beton u miješalici do 24 sata prije ugradnje. Navedenim pristupom podgrađivanje tunela započelo je neposredno nakon završetka iskopa čime su izbjegnuti mogući problemi sa stabilnošću podzemnog iskopa.

Od pasivnih podgradnih elemenata prvi su put u Hrvatskoj primijenjeni rešetkasti čelični nosači tipa Pantex koji su uporabljeni na više značajnih svjetskih projekata [17, 18, 19]. Rešetkasti čelični nosači praktički su nezamjenjivi u tlima sa slabim stijenskim masama i imaju višestruke prednosti u odnosu prema punim čeličnim profilima (TH, I). Nosači su projektirani i izvedeni tako da promjenom geometrije prate položaj ugrađenoga zaštitnog svoda.

Od aktivnih podgradnih elemenata pri stabilizaciji podzemnog iskopa tunela primijenjena su samobušaća injekcijska sidra tipa IBO R 32/20, duljine 6,0 m i nosivosti 250 kN koja pripadaju adhezijskim štapnim sidrima. Injektiraju se normalno vezujućom cementnom injekcijskom smjesom kroz sidro, od čela bušotine prema ušću,

čime je osigurana kvalitetna ugradnja. Uobičajeno se rabe u slabim materijalima kod kojih postoji problem održavanja stabilnosti i prohodnosti bušotine.

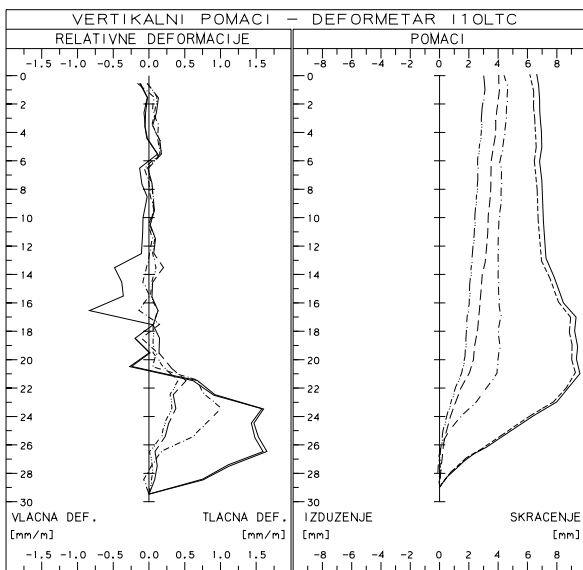
Prije početka radova na iskopu tunela IBO sidra su testirana na predusjeku tunela. Ispitivanje sidara je provedeno u skladu s preporukama ISRM-a [20]. Testom aplicirana najveća sila od 200 kN nije izazvala popuštanje niti jednog od testiranih sidara.

Potpuna kontrola ponašanja geotehničke konstrukcije ostvarena je na osnovi svakodnevnih opažanja i analiza rezultata kontrolnih mjerenja. Kontrolni mjerni profili ugrađivali su se neposredno nakon iskopa druge faze na prosječnoj udaljenosti otprilike 6 m od čela prve faze iskopa. Rezultati svakodnevnih geodetskih mjerenja apsolutnih pomaka pet točaka na rubu podzemnog iskopa obrađivali su se programskim paketom Dedalos (Geodata) i dostavljali geotehničkom nadzoru na interpretaciju.

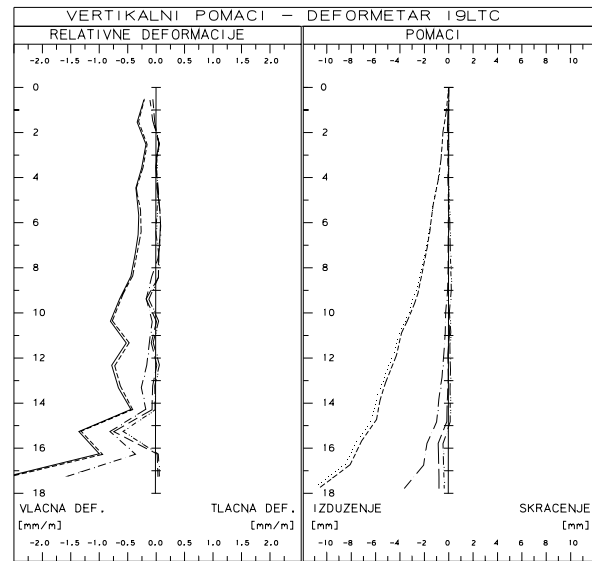
Dodatni podgradni zahvati na stabilizaciji portalnog dijela lijeve tunelske cijevi karakterističan su primjer intervencije na osnovi rezultata kontrolnih mjerenja. U portalnom dijelu lijeve tunelske cijevi na prva dva kontrolna mjerna profila tijekom napredovanja iskopa tunela registrirani su pomaci svih mjernih točaka u smjeru predusjeka desne tunelske cijevi (slika 6.). Interventno su u lijevom zidu tunela ugrađena dodatna IBI sidra u parovima na razmaku od 1,5 m uz uvjet da im sidrena dionica bude barem dva metra u rastrošenom dolomitu. Duljina sidara kretala se od 9 do 12 m. Nakon ugradnje sidara došlo je do stabilizacije i prestanka pomaka.

Na osnovi rezultata numeričkog modela projektom su predviđena slijeganja na površini terena u zoni integralnoga mjernog profila od 3,3 do 3,5 cm u području iznad i između tunelskih cijevi te vertikalni pomaci svoda tunelskih cijevi od 5,2 cm. U proračunu je radi sigurnosti usvojen modul deformabilnosti $E = 80 \text{ MPa}$ dobiven na osnovi presiometarskih ispitivanja.

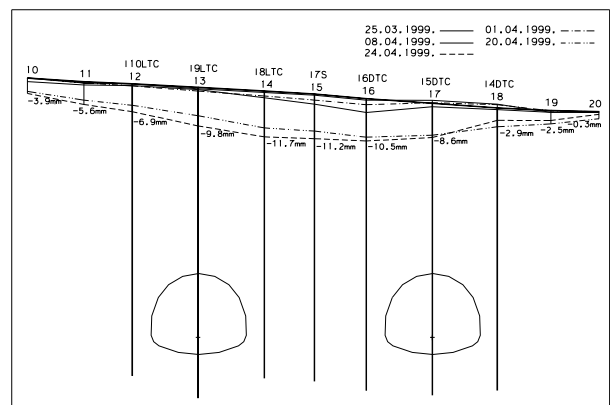
Rezultati mjerenja pomaka kliznim deformetrima na integralnom podgradnom profilu (slike 7. i 8.) kao i rezultati geodetskih mjerenja točaka uz mjerne bušotine na površini terena pokazali su da su slijeganja na površini terena u zoni iznad i između obje tunelske cijevi iznosila oko 1 cm (slika 9.) uz vertikalne pomake svoda tunelske cijevi približno 2 cm (slika 8.).



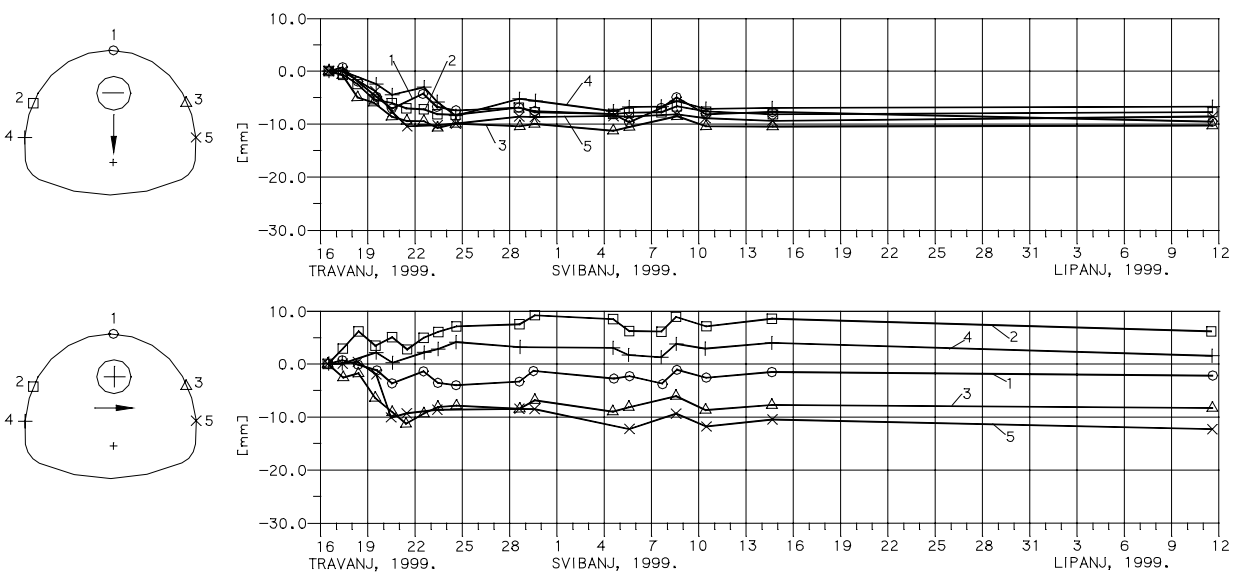
Slika 7. Vertikalni pomaci - deformetar I10LTC



Slika 8. Vertikalni pomaci - deformetar I9LTC



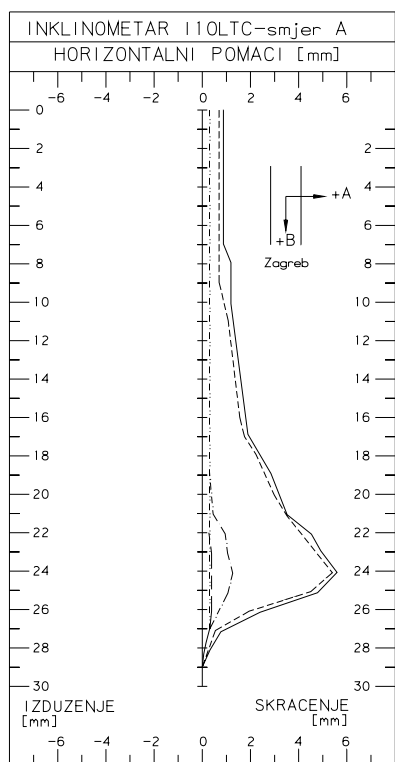
Slika 9. Integralni mjerni profil s rezultatima mjerenja slijeganja



Slika 10. Rezultati kontrolnih mjerenja na lijevoj tunelskoj cijevi u zoni integralnoga mjernog profila na površini terena

Rezultati mjerenja pomaka na kontrolnom mjernom profilu u zoni integralnog mjernog profila registrirali su oko 50% ukupnog pomaka (slika 10.).

Na slici 11. prikazani su apsolutni horizontalni pomaci na inklinometarskoj bušotini udaljenoj 6,5 m od osi lijeve tunelske cijevi. Najveći horizontalni pomak od oko 6 mm registriran je u zoni spoja svoda i zida tunela što je u skladu s rezultatima numeričkog modela.



Slika 11. Horizontalni pomaci – inklinometar I10LTC

Povratnom analizom, usklađenjem vertikalnih pomaka dobivenih na osnovi numeričkog modela (slika 12.) s izmjerenim pomacima na integralnom mjernom profilu (slika 9.), dobiven je stvarni modul deformabilnosti potpuno dezintegriranih klastičnih naslaga koji iznosi oko $E = 300$ MPa.

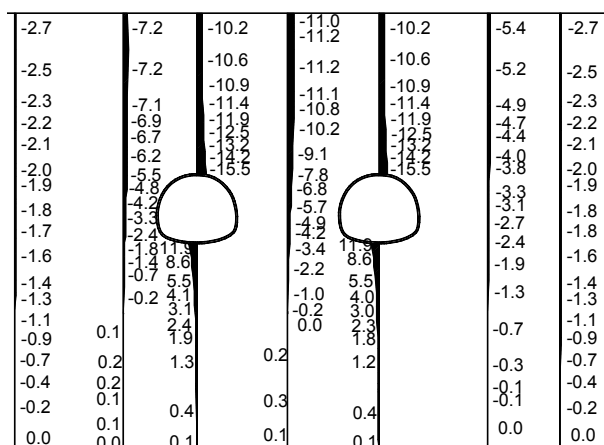
Općenito se može zaključiti da mjerenja pomaka oko podzemnog iskopa s površine terena imaju višestruke prednosti u odnosu prema mjerenjima pomaka iz tunela kao što su:

- mogućnost registriranja pomaka prije i za napredovanja tunela kroz zonu mjernog profila (na tunelu)

LITERATURA

[1] CEN/TC 250/SC 7 Preliminary draft EN 1997-1 Eurocode 7 Geotechnical design Part 1 General rules. Document nr. CEN/TC 250/SC 7 N 301, 1999.

Sveti Marko se oko 30% ukupnih pomaka ostvarilo prije prolaska čela iskopa kroz zonu mjernog profila)



Slika 12. Vertikalni pomaci - rezultati povratne analize

- mjerenje apsolutnih pomaka
- nemogućnost kolizije s proizvodnim procesom odnosno mogućnost nesmetanog mjerenja u svakom trenutku
- manja mogućnost oštećenja mjernih uređaja.

Stabilizacijska mjerenja nisu provedena s obzirom na to da je prije ugradnje betonske obloge došlo do potpunog prestanka pomaka na svim kontrolnim mjernim profilima i na mjernim reperima koji su duž osi obiju tunelskih cijevi postavljeni na površini terena.

7 Zaključak

Prikazan je uspješan postupak projektiranja i izvedbe tunela *Sveti Marko*. Tome su pridonijeli;

- primjena integralne metode projektiranja
- provođenje propisane procedure druge faze projektiranja
- provođenje programa geotehničkog opažanja i mjerenja
- izbor optimalne tehnologije izvođenja uz ugradnju podgradnih elemenata visoke kvalitete
- stručan investitor sposoban procijeniti vrijednost novih postupaka projektiranja i tehnologija izvođenja i prihvatiti njihovu primjenu
- discipliniran izvođač s iskustvom i vještinom potrebnom za uspješno izvođenje.

[2] Orr, T.L.L., Farrell, E.R *Geotechnical Design to Eurocode 7*. Springer Verlag, London, 1999.

- [3] Stojković, B: *Projektiranje prometnih tunela u stijenskim masama integralnom metodom*. Magistarski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet građevinskih znanosti, Zagreb, 1986.
- [4] *ÖNORM B 2203 Untertagearbeiten. Werkvertragsnorm*. 1994.
- [5] Barton, N., Lien, R., Lunde, J: *Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support*. Rock Mechanics, Vol. 6, No. 4, (1974), 183.-236.
- [6] Grimstad, E., Barton, N: *Updating of the Q-sistem for NMT*. Proc. Int. Symp. on Sprayed Concrete-Modern use of wet mix sprayed concrete for underground support, Fagernes, Oslo, 1993.
- [7] Swoboda, G. *Programsystem FINAL*. University of Innsbruck, Innsbruck, Austrija, 1997.
- [8] ITA: *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, (1988), 237.-249.
- [9] Stojković, B., Mirić, N: *Integral design method at the Bekhme Dam Project*. Proc. Seventh Int. Congress on Rock Mechanics, Aachen, Germany, Vol. 2, (1991), 1369.-1373.
- [10] Stojković, B., Ortolan, Ž., Lisac, Z: *Sidi Yacoub Dam vertical shaft and spillway tunnel*. In Underground Hydropower Plants, Proc. Int. Conference on Hydropower in Oslo, Norway, June, Vol. 2, (1987), 989.-1000.
- [11] Grimstad, E., Barton, N: *Design and methods of rock support*. In Norwegian Tunnelling Today, Tapir Publishers, Publication No. 5, (1988), 59.-64.
- [12] Barton, N: *Geotechnical design*. World Tunnelling, Vol. 4, No. 7, (1991), 410.-416.
- [13] John, M: *Adjustment of programs of measurement based on the results of current evaluation*. Proc. Int. Symp. Field Measurements in Rock Mechanics, Zurich, Vol. 2, (1977), 639.-656.
- [14] Marenče, M: *Numerička analiza iskopa i primarnog osiguranja tunela Sveti Marko*. Arhiv IGH, 1997.
- [15] Österreichischer Betonverein: *Richtlinie spritzbeton – Anwendung und prüfung*. 1998.
- [16] Schubert P., Potočnjak Ž: *Performance requirements of sprayed concrete in tunnelling*. Proc. MESTU, Zagreb, (1999), 281.-286.
- [17] Schrewe, F: *Erfahrungen aus dem Bereich der Neubaustrecken der Deutsche Bundesbahn*. Tunnel, Nr. 3/1987, (1987), 102.-116.
- [18] Duddek, H., Städing, A: *Tunnelling in Soft Ground and Sedimentary Rock for High-Speed Double-Track Railway Lines in Germany*. Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 5, No. 3, (1990), 257.-263.
- [19] Myers, A., John, M., Fugeman, D., Lafford, M., Purrer, W: *Planung und Ausführung der britischen Überleitstelle im Kanaltunnel*. Felsbau, Jg. 9, Nr. 1, (1991), 27.-36.
- [20] ISRM: *Suggested methods for rockbolt testing*. In Rock characterization, testing and monitoring. ISRM Suggested Methods, ed E. T. Brown, Pergamon Press 1981, (1974), 161.-168.