

UDK 624.191.3:528.484:528.41(497.5)

Stručni članak

# Primjena GPS-a na uspostavi geodetske osnove za potrebe tunelogradnje

Ilija GRGIĆ<sup>1</sup>, Zdravko KAPOVIĆ<sup>2</sup>, Nataša ŠABIĆ GRGIĆ<sup>3</sup> – Zagreb

*Sažetak. U ovome radu se prikazuje može li primjena GPS-a u tunelogradnji u potpunosti zamijeniti do sada primjenjivane načine razvijanja mreža, bez nužnosti izvođenja terestričkih mjerenja, a da se pri tom jamči proboj tunela u okviru dopuštenih odstupanja. Isto tako uspoređena je točnost proboja tunela ako su koordinate mikromreža određene GPS-tehnologijom u odnosu na oblik i broj točaka u mikromrežama. Rad obuhvaća načine opažanja, izvore pogrešaka te analizu i interpretaciju konkretnih rezultata dobivenih tijekom rada na projektu tunela "Sveti Rok". Nadzemnu geodetsku osnovu čine dvije samostalne mreže, a podzemnu geodetsku osnovu čine dva slobodno vođena poligonska vlaka duž jedne i druge strane tunela, s time da je izvršena stabilizacija samo za jedan slobodni poligonski vlak duž jedne strane. U svim izjednačenjima mjerenja korišten je Gauss-Markovljevi model posrednih mjerenja uz načelo najmanjih kvadrata.*

*Ključne riječi: tunelogradnja, točnost proboja, geodetska osnova.*

## 1. Uvod

Pri obradi tunelskih mreža zadaća je jednu matematički definiranu prostornu os, opisanu određenim brojem točaka s pripadajućim koordinatama i visinama, prenijeti u narav iskolčenjem. Kako bi se osigurao prijenos tih točaka na teren uspostavlja se specifična geodetska osnova koja svojom kvalitetom omogućuje iskolčenje osi tunela s unaprijed određenom preciznošću.

Geodetski radovi pri projektiranju tunelske trase obuhvaćaju radove na površini i u tunelu. Kako je tunel izdužen objekt, nadzemnu geodetsku osnovu tunela u pravilu čine dvije samostalne mreže na ulaznom i izlaznom portalu. Za sva izjednačenja najčešće se koristi Gauss-Markovljevi model posrednih mjerenja uz primjenu metode najmanjih kvadrata (Feil 1990). Koordinatni sustav mreže se a priori ne

<sup>1</sup> Mr. sc. Ilija Grgić, Hrvatski geodetski institut, Savska cesta 41, Zagreb

<sup>2</sup> Prof. dr. sc. Zdravko Kapović, Geodetski fakultet, Kačićeva 26, Zagreb

<sup>3</sup> Nataša Šabić Grgić, dipl. ing., Meixner d.o.o., Zagreb.

fiksira, već se mreža izjednačuje kao slobodna mreža. Podzemnu geodetsku osnovu čine u pravilu dva slobodno vođena poligonska vlaka od ulaznih portala duž jedne i druge strane tunela. Nakon izvršenog proboja izračuna se spojna točka iz slijepih vlakova podzemne geodetske osnove, te se na osnovi toga računa točnost proboja. U nizu obavljenih računanja, kako bi se došlo do optimalnog broja točaka u mikromrežama na ulaznom i izlaznom portalu, točnost proboja računana je u odnosu na cjelovitu geodetsku osnovu, a zatim je geodetska osnova reducirana izbacivanjem jedne po jedne točke iz svake pojedine mikromreže, do minimuma geodetske osnove, odnosno do dvije točke na svakom portalu. Tako su izvršena računanja točnosti proboja tunela iz mikromreža s dvije, tri, četiri, pet i šest točaka na različitim udaljenostima. Provedenom analizom izvedenih računanja želi se pokazati mogućnosti primjene GPS-tehnologije na uspostavi geodetskih osnova posebnih namjena i pronaći optimalni broj točaka u mikromrežama za sigurno ostvarenje točnosti proboja u dopuštenim odstupanjima.

## 1.1 Projektiranje i izgradnja tunela

Geodetski radovi vezani uz tunelogradnju dijele se: na nadzemne geodetske radove koji prethode projektiranju, a obuhvaćaju predradnje za idejni i glavni projekt; na nadzemne radove za određivanje geodetske osnove radi proračunavanja elemenata iskolčenja; zatim na geodetske radove u tunelu kao što su iskolčenje tunelske trase i objekata pod zemljom tijekom gradnje, te kontrolu izgradnje (Cvetković 1970).

Pri projektiranju geodetske osnove za potrebe izgradnje bilo kojeg tunela temeljno je polazište dopušteno odstupanje pri proboju tunela, što znači da geodetska osnova mora zadovoljiti najveće zahtjeve u vezi s preciznošću i pouzdanošću. Osnova koja služi za projekt geodetske mikromreže je idejni projekt tunela, koji osim trase tunela sadržava i plan organizacije gradilišta s točno lociranim objektima. Cjelokupna geodetska osnova projektira se na kartografskim podlogama odgovarajućih mjerila na kojima su naneseni svi relevantni podaci. Pri projektiranju je potrebno uzeti u obzir sljedeće parametre:

- projekt mreže radi se na projektu tunela, gdje su već projektirani i svi pomoćni objekti koji će služiti u tijeku građenja,
- projekt mreže mora pokrivati cijelo gradilište tunela i udovoljavati svim njegovim potrebama do kraja građenja,
- mreža u pogledu točnosti mora biti homogena za cijelo gradilište tunela i odgovarati točnosti koja je potrebna za označivanje točaka tunelske osi pri probijanju tunela,
- radi što lakšeg računanja koordinata raznih objekata koji se nastavljaju na tunel mreža točaka uklapa se u jedinstveni koordinatni sustav s osi tunela i osi ceste.

Budući da se geodetska osnova za potrebe izgradnje tunela računa u lokalnom sustavu, potrebno je pri izradbi projekta uključiti i nekoliko točaka poznatih po koordinatama u državnom koordinatnom sustavu, kako bi se geodetska osnova mogla uklopiti u koordinatni sustav u kojem je izrađen projekt tunela.

## 1.2 Podzemna poligonometrija

Podzemna poligonometrija omogućava prijenos ne samo osi tunela, nego i osi različitih uređaja koji se koriste u tunelogradnji (laseri). Priključak podzemne poligonometrije izvodi se na točke vanjske geodetske osnove neposredno kroz portale, ili kroz vertikalna okna, bočne štolne ili kose rovove.

Podzemnu poligonometriju karakterizira:

- oblik vlakova ovisi o obliku tunela,
- dužine poligonskih strana ovise o obliku tunela i mogu biti vrlo različite,
- vlakovi podzemne poligonometrije su slijepi, priključeni samo na jednom kraju (radi kontrole mogu se unutar tunela postavljati zatvoreni poligonski vlakovi),
- potpuni priključak i izjenačenje poligonskih vlakova u tunelu može se izvršiti nakon proboja tunela.

Podzemna poligonometrija unutar tunela dijeli se na radnu, koja služi za određivanje smjera kopanja i osnova je za unutarnja snimanja, a karakteriziraju je kratke strane ovisno o obliku tunela i napredovanju bušenja, i glavnu, u kojoj se točke postavljaju na udaljenostima većim od 150-500 m. Stabilizacija i izbor položaja točaka u podzemnoj poligonometriji ovisi o obliku trase i unutarnjoj vidljivosti. Izborom glavnih točaka dobivaju se teorijski povoljniji vlakovi s većim dužinama, što smanjuje poprečnu pogrešku mjerenog vlaka.

## 1.3 Uspostava geodetske osnove

Uvažavajući postavljene zahtjeve točnosti proboja tunela i ekonomske zahtjeve izabire se optimalna varijanta u pogledu oblika mreže i postupka mjerenja. To je moguće postići pomoću ispitivanja pojedinih varijanti primjenom računskog modela za optimiranje mreže. I pri najbrižljivijem biranju položaja pojedinih točaka mreže mora se računati s mogućom promjenom položaja točke u vertikalnom i horizontalnom smislu zbog slijeganja tla, iskopa, miniranja, transporta teških građevinskih strojeva itd. Pri uspostavi geodetske osnove potrebno je odabrati vrstu mreže, a kako je na taj problem teško općenito odgovoriti, pri izboru vrste mreže uvažavaju se sljedeći parametri (Schelling i dr., 1988):

- konfiguracija mreže (veličina, oblik),
- mjerna nesigurnost instrumentarija,
- ekonomski parametri,
- broj i utjecaj prekobrojnih mjerenja u mreži.

Atmosferski uvjeti u tunelu izrazito su opasan izvor za velike pogreške nastale zbog refrakcije, koji mogu izazvati pogrešku u smjeru do 3", pa se stoga preporučuje stabilizaciju podzemne mreže izvesti što je moguće bliže osi tunela, odnosno trebalo bi nastojati da točke ne budu bliže od 2 m zidu tunela. Pri gradnji tunela u krivini maksimalnu međusobnu udaljenost točaka podzemne mreže tunela, uvažavajući prethodni uvjet, moguće je izračunati iz sljedeće jednadžbe (Hennecke i dr., 1988):

$$s \leq 2\sqrt{2R(B - 2d)}, \quad (1)$$

pri čemu je:  $R$  – radijus osi tunela;  $B$  – širina tunela.

## 2. Tunel “Sveti Rok”

Zavod za fotogrametriju d. d. kao izvođač radova na uspostavi geodetske osnove za potrebe izgradnje tunela “Sveti Rok”, u dogovoru s naručiteljem IGH-om, pokrenuo je 1997. godine radove koji su bili nužni za realizaciju projekta. Prvi dio radova na uspostavi geodetske osnove obuhvatio je stabilizaciju mikromreža na ulaznom i izlaznom portalu, izmjeru točaka mikromreže GPS-tehnologijom i njihov priključak geometrijskim nivelmanom na točke državne visinske mreže, te obradu podataka i izračun koordinata i visina nakon toga. U tu svrhu provedena je revizija postojeće trigonometrijske mreže i izabrano pet točaka na temelju kojih su izračunani parametri transformacije. Nakon obavljenih radova u I. fazi, pristupilo se uspostavi cjelovite geodetske osnove koja će služiti za iskolčenje i periodične kontrole iskopa tunela. U okviru radova i mjerenja u II. fazi prvobitna geodetska osnova pretrpjela je znatne promjene zbog uznapredovalih radova na gradilištu, što je prouzrokovalo uništenje nekih točaka u neposrednoj blizini gradilišta. Osim toga na pogodnijim lokacijama stabilizirane su zamjenske ili potpuno nove točke kako bi se poboljšala kvaliteta mreže. Za sva izjednačenja korišten je Gauss-Markovljevi model posrednih mjerenja uz načelo najmanjih kvadrata. Geodetska osnova tunela “Sveti Rok” podijeljena je na horizontalnu, u kojoj su mjerenjima određene samo koordinate točaka u ravnini ili na referentnoj plohi (elipsoid), i visinsku, u kojoj su određene samo visine točaka. Radovi na uspostavi geodetske osnove podijeljeni su na terenske (organizacija i izvođenje mjerenja) i uredske radove (obrada podataka i interpretacija rezultata).

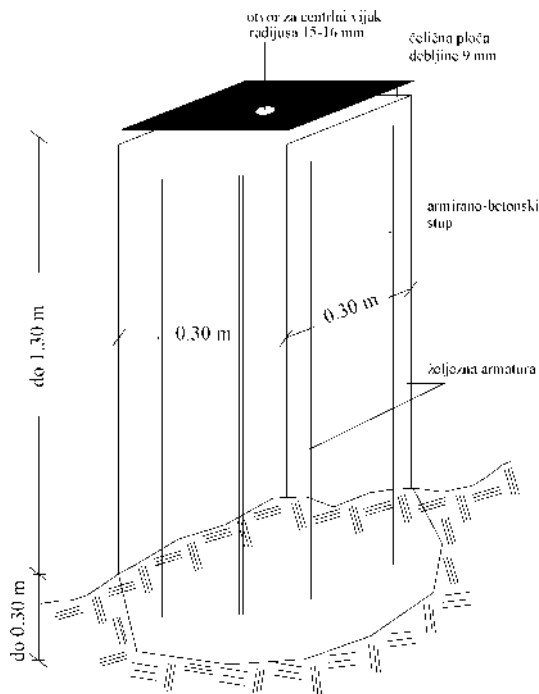
Tijekom gradnje obavljeno je pet kontrolnih mjerenja proboja tunela nakon svakih 500 m ostvarenog iskopa. Za vrijeme kontrolnih mjerenja u tunelu nije bilo nikakvih intenzivnijih građevinskih aktivnosti, a prije početka mjerenja tunel je ventiliran kako bi se mogle nesmetano obaviti sve potrebne geodetske aktivnosti.

Tunel “Sveti Rok” povezuje Dalmaciju s Likom, a prema obliku tunelske osi ubraja se u tunele u pravcu s krivinama na oba kraja. Iskop tunela “Sveti Rok” izveden je metodom probijanja punog profila (Grgić, 2003).

### 2.1 Stabilizacija točaka geodetske osnove tunela “Sveti Rok”

Posebna pažnja posvećena je stabilizaciji i signalizaciji točaka geodetske osnove radi osiguranja visoke točnosti koja je nužna u tunelskim mikromrežama i geodetskim radovima koji se na njih nastavljaju. Točke su stabilizirane stupovima na koje su postavljeni uređaji za prisilno centriranje instrumenta i signala kako bi se smanjio utjecaj sustavnih pogrešaka koje nastaju zbog mehaničkih pomaka tla i centriranja. Stupovi su fundirani do čvrstog terena i izrađeni od armiranog betona.

Oko tunelskih portala točke geodetske osnove postavljene su na mjestima s kojih se mogu prenijeti smjerni kutovi s najmanje dvije točke na početnu stranu vlaka podzemne poligonometrije (na sjevernoj strani s jedne točke), a da je pri tom omogućeno dogledanje do najmanje tri točke mikromreže na ulaznom, odnosno izlaznom portalu.



Slika 1. Primjer stabilizacije točke geodetske osnove.

Sve stabilizirane točke geodetske osnove trebale su zadovoljiti sljedeće zahtjeve:

- centar treba precizno fiksirati tjeme mjerenog pravca ili prijelomnoga kuta,
- točka geodetske osnove treba biti stabilizirana na geološki stabilnom tlu,
- točka geodetske osnove treba služiti i kao reper za potrebe nivelmana,
- točka treba biti jednostavna za izradu i udobna za mjerenja.

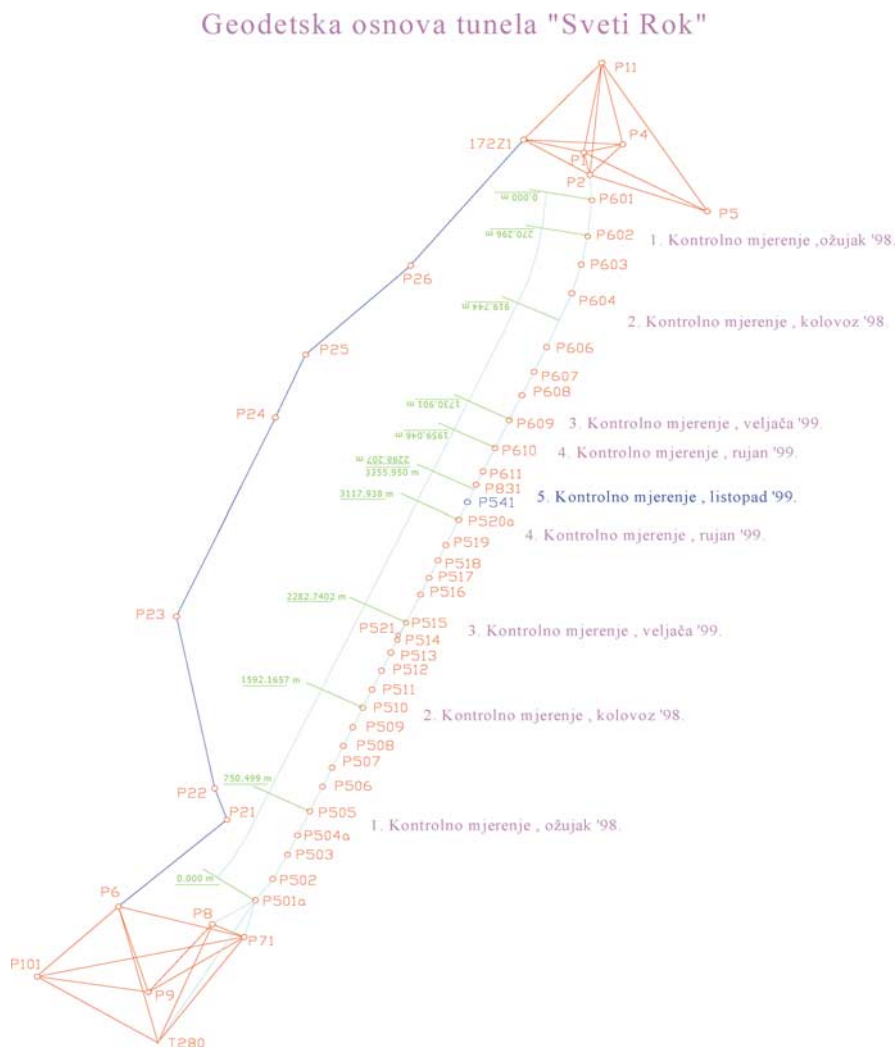
Točke geodetske osnove za potrebe gradnje tunela “Sveti Rok” stabilizirane su betonskim stupom dimenzija 0,90-1,30x0,30x0,30 m s ubetoniranom čeličnom pločom debljine 9 mm i promjera otvora 15-16 mm (slika 1). Nekoliko točaka geodetske osnove do kojih nije bio moguć jednostavan pristup stabilizirane su betoniranjem repera u živu stijenu ili stupićem na kamenom zidu uz cestu.

### 3. Projekt GPS-mjerenja položajne osnove tunela

Prilikom projektiranja mreže geodetske osnove za potrebe izgradnje tunela “Sveti Rok” uvažavani su zahtjevi da geodetska osnova bude podesna kako za GPS-mjerenja tako i za klasična terestrička mjerenja. Mreža je morala zadovoljiti postavljene zahtjeve točnosti pri proboju tunela, te su stoga u projektu mreže uvažavani sljedeći parametri:

- nadzemna geodetska osnova morala je imati na portalima najmanje dvije točke za prijenos smjernoga kuta za potrebe podzemne poligonometrije,
- visoka relativna točnost (do 2 cm),
- osim točaka geodetske osnove, u blizini portala stabilizirane su najmanje dvije do tri kontrolne točke na udaljenosti do oko 1 km (ovisno o duljini tunela) od portalnih točaka radi orijentacije poligonskog vlaka u tunelu,
- nadzemna geodetska osnova integrirana je u državni koordinatni sustav.

Koordinatni sustavi mikromreža za potrebe izgradnje tunela “Sveti Rok” definirani su s 12 točaka, 6 u južnoj i 6 u sjevernoj mikromreži (slika 2).



Slika 2. Geodetska osnova tunela “Sveti Rok”.

### 3.1 Izbor položaja točaka

Kako bi se osigurali najbolji mogući preduvjeti za kvalitetan prijam satelitskih signala, prilikom izbora položaja točaka vodilo se računa o sljedećim parametrima:

- nisu smjele postojati nikakve prepreke između antene i satelita koje zatvaraju kut od 15° i više stupnjeva s horizontom jer je to moglo reducirati broj satelita s kojih se može primati signal,
- u blizini antene nisu se smjele nalaziti reflektirajuće površine koje mogu prouzročiti multipath-efekt satelitskih signala,
- u blizini antene nisu smjela biti nikakva električna postrojenja ni električni vodovi koji mogu prouzročiti smetnje u prijama satelitskih signala.

### 3.2 Planiranje izvođenja GPS-mjerenja

Za provedbu svih potrebnih GPS-mjerenja na uspostavi geodetske osnove tunela "Sveti Rok" bili su postavljeni sljedeći kriteriji:

- korištenje dvofrekvencijskih uređaja istog proizvođača,
- korištenje antene istog tipa,
- na svim točkama geodetske osnove antene prisilno centrirati,
- u sesijama koristiti najmanje dvije referentne točke, čije su koordinate određene u kampanji CROREF'96,
- korištenje registracijskog intervala od 15 sekundi,
- korištenje elevacijske maske od 15°,
- granična vrijednost za PDOP je 6,
- trajanje opažanja u jednoj sesiji najmanje 20 minuta + 2 minute/km.

Na projektu geodetske osnove za potrebe izgradnje tunela zbog tražene točnosti za mjerenje prostornih vektora odabrana je relativna statička metoda koja prema uputama proizvođača postiže točnost  $\pm(5 \text{ mm} + 1 \text{ ppm})$ .

### 3.3 Korišteni instrumentarij za uspostavu geodetske osnove

Prema postavljenim kriterijima na projektu geodetske osnove za tunel korištena je sljedeća mjerna oprema za određivanje nadzemne geodetske osnove:

- prijammnici 4000 System Surveyor SSI / 2,5 Mb RAM, koji se temelje na Maxwell tehnologiji, a posjeduju 9 kanala na dvije frekvencije, te precizni kod (P-kod),
- antene COMPACT L1/L2 ANTENNA with GROUND PLANE.

Pravci u podzemnoj poligonometriji mjereni su prisilnim centriranjem sekundnim elektroničkim instrumentom LEICA TC 1800, a istodobno je obavljeno mjerenje duljina, s istim instrumentarijem i priborom, u istom vremenskom razdoblju, a mjerenja su izvršili isti stručnjaci. Mjerna nesigurnost elektroničkog instrumenta LEICA TC 1800 je 1" (pravci) i 1mm + 2ppm (duljine).

Mjerenja visinskih razlika u nivelmanskom vlaku obavljena su prema normativi-  
ma za precizni nivelman. Korišteni su digitalni instrumentarij, automatski elek-  
tronički niveliri LEICA NA3003, te parovi kodiranih nivelmanskih letava. Dekla-  
rirana mjerna nesigurnost elektroničkog instrumenta LEICA NA3003 na 1 km  
dvostrukog nivelmana je  $\pm 1,5$  mm, odnosno  $\pm 0,7$  mm s certificiranim kodiranim  
letvama. Mjerenja visinskih razlika geometrijskim nivelmanom u podzemnoj poli-  
gonometriji obavljena su nivelnirom KONI 007, te s parom invarnih letava s polu-  
centimetarskom podjelom, dok su mjerenja visinskih razlika trigonometrijskim  
nivelmanom izvedena istim sekundnim elektroničkim instrumentom kojim su iz-  
vedena i sva ostala terestrička mjerenja.

### 3.4 GPS mjerenja i obrada podataka

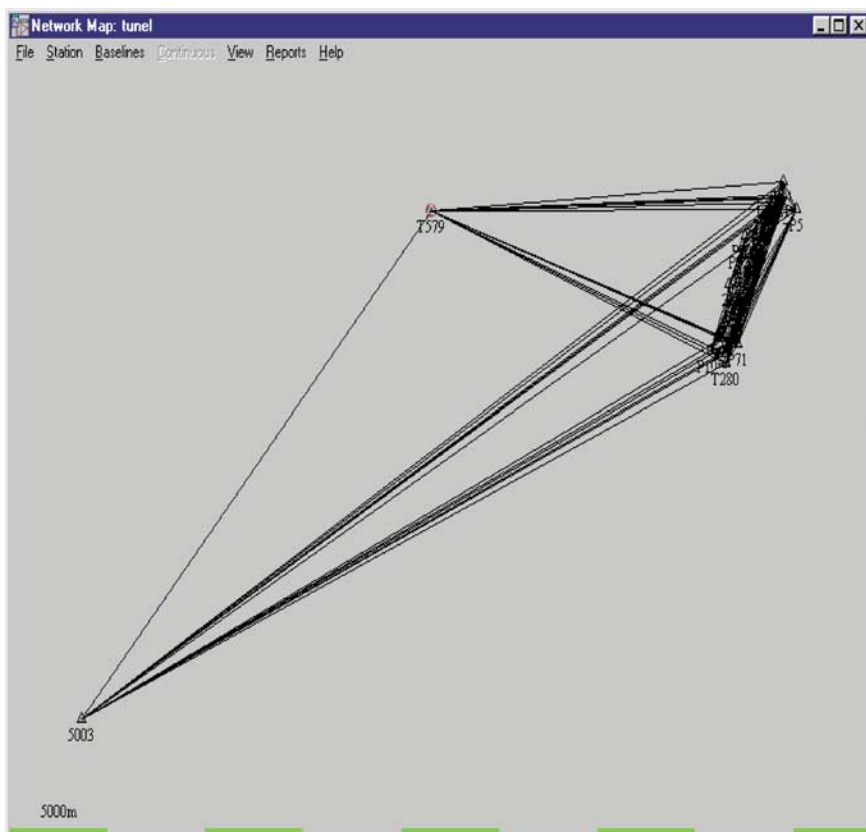
Na osnovi namjene i drugih parametara koji su određeni projektom, na kartama  
je određeno područje koje pokriva sve potrebne točke na kojima je planirano  
opažanje za potrebe uspostave geodetske osnove tunela “Sveti Rok”, te je suklad-  
no tomu izrađen plan opažanja na pojedinim točkama. Tijekom opažanja geodet-  
ske osnove tunela antene su postavljene na mjerne stupove ili na stative, a usmje-  
ravane su prema sjeveru prije početka opažanja kako bi se eliminirao utjecaj  
ekscentriciteta faznog centra kod antena iste izvedbe. Zbog potrebe isključenja  
pogreške mjerenja, visina antene mjerena je prije i nakon opažanja na svakoj poje-  
dinoj točki. Osim toga, bila je osigurana mogućnost neprestane komunikacije iz-  
među pojedinih radnih skupina preko mobilnih telefonskih uređaja kako bi se  
izbjegla kašnjenja prilikom seljenja s točke na točku u pojedinim sesijama.

Svi mjereni vektori računski su obrađeni raspoloživim programskim paketom  
tvrtke Trimble (GPSurvey). Prilikom unošenja podataka mjerenja kontrolirani su  
svi ulazni podaci, a na sve mjerene podatke primijenjeni su jedinstveni parametri  
obrade. Isto tako je izvršeno optimiranje svih mjerenih vektora. Kao efekt optimi-  
ranja vektora, za sve obrađene prostorne dužine dobiveni su statistički pokazatelji  
kojima ocjenjujemo kvalitetu opažanih vektora, a to su korišteni model za ionosfe-  
ru (Solution type), prostorna dužina (Slope), omjer između jačine signala i šuma  
(Ratio) i referentne varijance čija se vrijednost obično kreće oko 1. Dana ocjena  
točnosti određena je s vjerojatnošću od 95%, što odgovara  $\pm 1,96\sigma$ . Ukupno su  
u južnoj i sjevernoj mikromreži, točkama preciznoga poligonometrijskog vlaka,  
točkama u državnome koordinatnom sustavu koje su poslužile za izračun pa-  
rametara transformacije i referentnim točkama obrađena 142 vektora, od toga  
120 nezavisnih (slika 3).

Obrada vektora pokazala se uspješnom, pa su rješenja nakon obrade bila fiksna.  
Sukladno rezultatima u primarnoj obradi nije bilo potrebno dodatno optimiranje  
vektora promjenom elevacije, odnosno skraćivanjem prozora opažanja.

Nakon numeričke obrade svih izmjerenih vektora, cjelokupno je polje izjednačeno  
u koordinatnom sustavu ETRF'89. Kao fiksne odabrane su točke 579 Veliki Vi-  
trenik i 5003 Mareograf Zadar iz europskog referentnog sustava s poznatim  
pravokutnim koordinatama  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , čije su koordinate određene u kampanji  
CROREF'96. Nakon izjednačenja dobivena je ocjena točnosti izvršenih mjerenja  
kao i konačnih rezultata. U okviru toga računane su položajne nesigurnosti novo-  
određenih točaka i pripadajuće elipse pogrešaka za vjerojatnost 95%. Kako bi ko-  
ordinate dobivene izjednačenjem bile uporabive za geodetsku praksu u Hrvatskoj

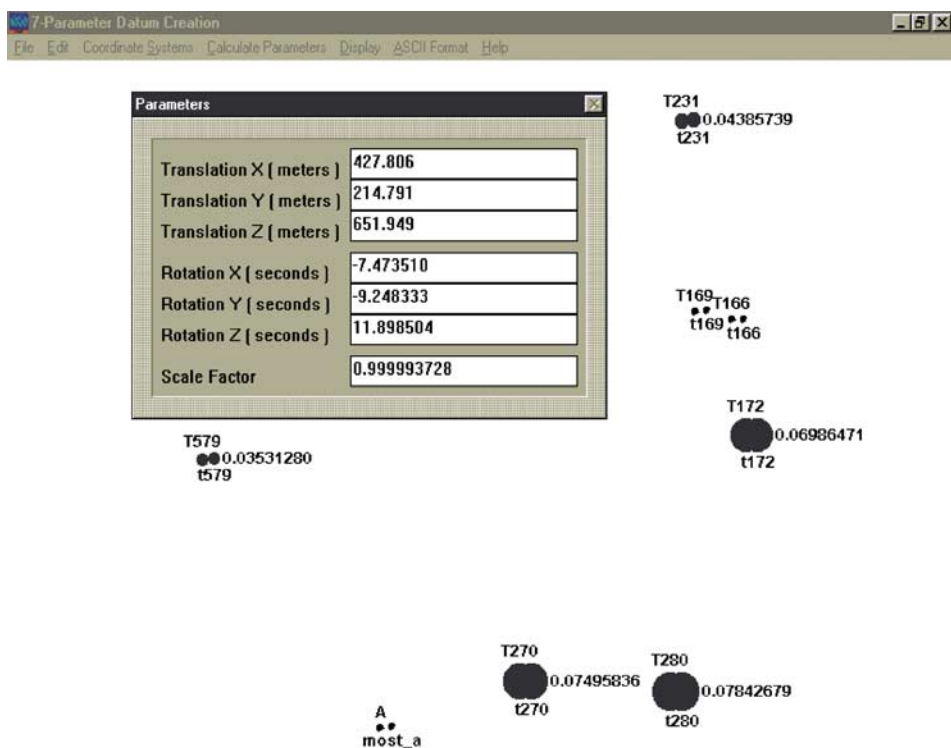




Slika 3. Prikaz mjerenih vektora.

transformirane su u državni koordinatni sustav. U tu je svrhu izabrano 5 trigonometrijskih točaka (slika 4.) na temelju kojih su izračunani parametri transformacije (T270, T172, T280, T231, T579). U izjednačenju GPS-mjerenja nije uzeta u obzir undulacija geoida. Dobra položajna i visinska podudarnost na postojećim trigonometrijskim točkama koje su poslužile za izračun transformacijskih parametara su oni parametri po kojima možemo prosuditi kvalitetu izvršenih radova, odnosno kvalitetu stare mreže.

U svrhu analize mikromreža na sjevernom i južnom ulazu provedeno je izjednačenje u više modela, kako bi se pokazalo koji se od modela može primijeniti na uspostavi specifičnih mreža za posebne potrebe. Prvi model izjednačenja proveden je preko 5 izabranih trigonometrijskih točaka iz kojih su izračunani parametri transformacije (na kojima su odstupanja bila najmanja, a pokrivala su cijelo područje zadatka), te su nakon toga sve točke iz WGS 84 pomoću parametara transformacije prevedene u Gauss-Krügerovu projekciju. Tim je modelom dobivena zavisna mreža, koja je opterećena pogreškama iz stare mreže, i ona na području oko tunela “Sveti Rok” iskazuje primjerenu položajnu i visinsku točnost.



Slika 4. Parametri transformacije i odstupanja na identičnim točkama.

U drugome modelu su koordinate točke P71 izabrane kao fiksne u Gauss-Krügerovoj projekciji u položajnom i visinskom smislu. Nakon toga je korištenjem mogućnosti programskog paketa GPSurvey Trimble provedeno izjednačenje direktno u samoj projekciji uz uvažavanje parametara Gauss-Krügerove projekcije (faktor mjerila na dodirnom meridijanu 0,9999 i dimenzije Besselova elipsoida).

### 3.5 Računanje podzemne poligonometrije

Nakon definiranja koordinata točaka položajne geodetske osnove u izjednačenju GPS-mjerenja obavljeno je računanje podzemne poligonometrije, i to:

- u odnosu na mrežu točaka čije su koordinate određene izjednačenjem GPS-mjerenja kao djelomično slobodne mreže fiksirane u jednoj točki,
- u odnosu na mrežu točaka čije su koordinate određene izjednačenjem GPS mjerenja kao zavisne mreže.

Za računanje podzemne poligonometrije korištena je uobičajena približna metoda izjednačenja, tj. zasebnog izjednačenja prijelomnih kutova i koordinatnih razlika. Na osnovi razlika koordinata točke P541 dobivene iz slijepoga poligonskog vlaka s južne i sjeverne strane izračunana su odstupanja u smjeru osi tunela, odnosno u

smjeru okomitom na os tunela. S obzirom na to da su za visinske točke u podzemnoj poligonometriji uzete gornje površine željeznih ploča koje su ubetonirane na betonskim stupovima, čija je primarna uloga da služe kao mehanizam za prisilno centriranje, mogla se izvršiti usporedba točnosti proboja u spojnoj točki *P541* određene iz trigonometrijskog i geometrijskog nivelmana. Budući da na površini željeznih ploča nije bilo materijaliziranih repera, za visinske točke su izabrani prednji lijevi rubovi željeznih ploča u smjeru proboja tunela.

Priključkom slijepih podzemnih poligonskih vlakova na izjednačenu nadzemnu geodetsku osnovu, određenu na temelju obavljenih GPS-mjerenja, izvršeno je računanje koordinata spojne točke *P541* korištenjem uobičajene približne metoda izjednačenja, zasebnim izjednačenjem prijelomnih kutova i koordinatnih razlika.

#### 4. Analiza rezultata

Svi modeli izjednačenja i računanja točnosti proboja u podzemnoj poligonometriji analizirani su radi donošenja odluke koji je od njih najprikladniji kao definitivno rješenje. Za svaki model ispitana je točnost proboja kod različitog broja točaka mikromreža na ulaznom (sjevernom), odnosno izlaznom (južnom) portalu.

Ostvarenjem proboja tunela omogućen je izračun stvarno postignute točnosti proboja tunela po položaju i visini. To je obavljeno računanjem koordinata točke *P541* iz slijepih poligonskih vlakova s južne i sjeverne strane, koja je uzeta kao točka u kojoj je izveden spoj slijepih poligonskih vlakova. Na osnovi razlika koordinata točke *P541* dobivene iz slijepoga poligonskog vlaka s južne i sjeverne strane izračunana su odstupanja u smjeru osi tunela, uzdužno odstupanje *L*, i u smjeru okomitom na os tunela, poprečno odstupanje *Q*. Stvarno odstupanje pri proboju tunela računa se u odnosu na srednju vrijednost koordinate za spojnu točku, a ono karakterizira tunel "Sveti Rok" kao sigurno jedan od najuspješnije spojenih tunela vođenih iz dva smjera.

Na osnovi razlika visina točke *P541* dobivenih geometrijskim nivelmanom sa sjeverne i južne strane omogućen je izračun visinskog odstupanja *dh* proboja tunela, tablica 1.

Tablica 1. *Točnost proboja u spojnoj točki P541.*

Br. točke	DY (m)	DX (m)	<b>Q</b> (m)	<b>L</b> (m)	<b>dh</b> (m)
P541	Y = 5553624.879	X = 4904442.177	H = 560.6201	dobiveno sa sjeverne strane	
P541	Y = 5553624.892	X = 4904442.143	H = 560.6108	dobiveno s južne strane	
<b>P 541</b>	<b>0.013</b>	<b>0.034</b>	<b>0.009</b>	<b>0.024</b>	<b>0.0093</b>
<b><i>Odstupanje od srednje vrijednosti za spojnu točku P541</i></b>					
Br. točke	DY (m)	DX (m)	<b>Q</b> (m)	<b>L</b> (m)	<b>dh</b> (m)
<b>P541</b>	<b>0.065</b>	<b>0.017</b>	<b>0.005</b>	<b>0.012</b>	<b>0.0047</b>

Točnost proboja tunela znatno nadmašuje dopuštena odstupanja u točnosti proboja tunela propisane Pravilnikom o tehničkim normativima i uvjetima za projektiranje i gradnju tunela na cestama, čl. 53 Zakona o normizaciji (NN 55/96-2336). Dopuštena odstupanja po položaju i visini, u skladu s Pravilnikom, za eventualno mimoilaženje tunelskih osi vođenih iz dva smjera iznose:

$$\text{po osi } \text{mm} \pm 60\sqrt{L} \qquad \text{po niveleti } \text{mm} \pm 23\sqrt{L},$$

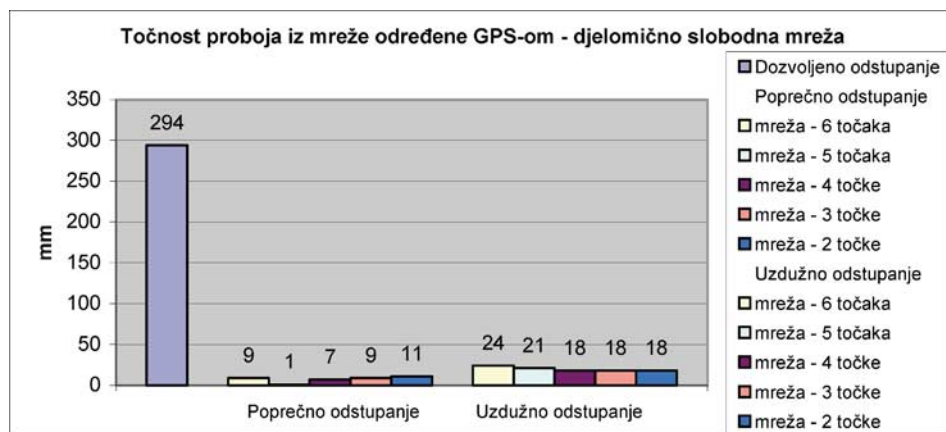
gdje je  $L$  duljina tunela izražena u kilometrima.

Kako je u slučaju tunela Sveti Rok  $L \approx 6$  km, dopuštene razlike iznose:

$$\text{po osi } \pm 147 \text{ mm} \qquad \text{po niveleti } \pm 56 \text{ mm}.$$

#### 4.1 Poprečna i uzdužna točnost proboja

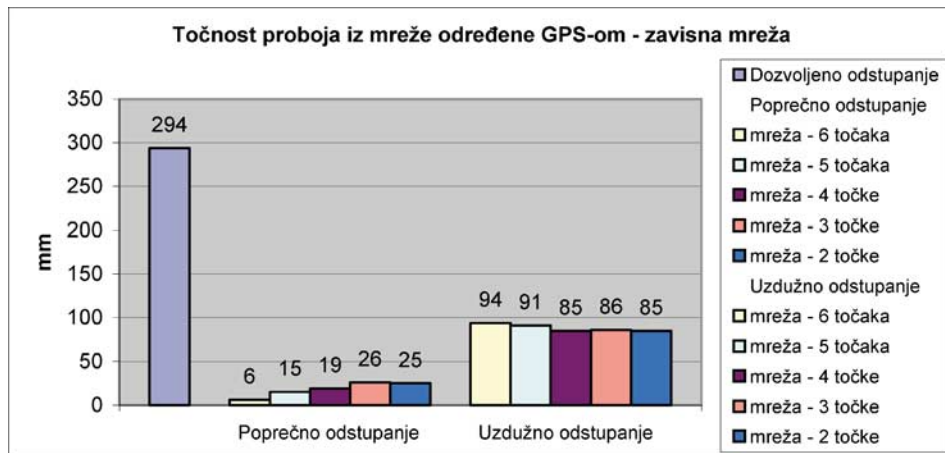
Analiza proboja tunela iz mikromreže koja je izmjerena GPS-om i nakon toga izjednačena kao poluslobodna mreža s fiksiranom točkom P71 pokazuje oscilacije za poprečnu pogrešku proboja tunela u spojnoj točki P541 ovisno o broju točaka mikromreže koje su uzete za prijenos orijentacije u podzemnu poligonometriju, dok je uzdužna pogreška proboja tunela obrnuto proporcionalna broju točaka mikromreže. Većina računanih modela i u ovom slučaju, bez obzira na broj točaka uključenih u prijenos orijentacije, daje bolje rezultate za poprečno odstupanje (slika 5).



Slika 5. Točnost proboja iz djelomično slobodne GPS-mreže.

Analiza proboja tunela iz mikromreže koja je izmjerena GPS-om i nakon toga izjednačena kao zavisna mreža pokazuje lagani trend rasta točnosti proboja tunela za poprečnu pogrešku u spojnoj točki P541 ovisno o broju točaka mikromreže koje su uzete za prijenos orijentacije u podzemnu poligonometriju, dok je uzdužna pogreška proboja tunela obrnuto proporcionalna broju točaka mikromreže. Većina računanih modela u ovom slučaju, bez obzira na broj točaka uključenih u prijenos

orijentacije, daje višestruko bolje rezultate za poprečno nego za uzdužno odstupanje. Usporedni rezultati proboja tunela ovisno o obliku mreže u odnosu prema dozvoljenim odstupanjima prikazani su slikom 6.



Slika 6. Točnost proboja iz zavisne GPS mreže.

Iz usporedbe postignutih rezultata točnosti proboja tunela "Sveti Rok" evidentno je da mikromreže određene GPS-om, izjednačene kao poluslobodne s jednom fiksiranom točkom, neovisno o broju točaka uključenih u prijenos orijentacije u podzemnu poligonometriju, osiguravaju visoku točnost proboja tunela. Vrijednosti rezultata postignute točnosti proboja u odnosu na tako određene položajne geodetske osnove pokazuju visoku podudarnost, osim kada je računana točnost proboja iz mikromreža reduciranih na dvije točke, gdje je razlika poprečnog odstupanja nešto veća (23 mm).

Usporedba postignutih rezultata točnosti proboja tunela iz poluslobodne mreže određene GPS-om s jednom fiksiranom točkom s postignutim rezultatima točnosti proboja iz mreže izmjerene GPS-om, i nakon toga izjednačene kao zavisne, pokazuje podudarnost u poprečnom odstupanju i evidentnu razliku u uzdužnom odstupanju.

## 5. Zaključak

Specifične geodetske osnove su se još donedavna, kako u svijetu tako i u nas, određivale klasičnim metodama triangulacijom, trilateracijom, preciznom poligonometrijom i preciznim nivelmanom. Iz obavljenih računanja i provedene analize podataka proizlazi da postignuti rezultati u točnosti proboja tunela pomoću GPS-om određene poluslobodne mreže s fiksiranom točkom P71 prema postignutim rezultatima u pogledu točnosti zadovoljavaju, odnosno uvelike nadmašuju unaprijed postavljene zahtjeve točnosti.

Budući da su tuneli najčešće locirani na teško pristupačnim terenima i da je za terestričko određenje mreže potrebno ostvariti međusobna dogledanja između točaka mikromreže i povezati mikromreže na ulaznom i izlaznom portalu, GPS-tehnologija nameće se sama po sebi kao ekonomičnije i lakše rješenje. Posebna prednost primjene GPS-tehnologije, prilikom razvijanja geodetske osnove, nasuprot klasičnom terestričkom načinu očituje se u naknadnim izmjenama projekta, kada je potrebno obaviti dodatna mjerenja, budući da se GPS-mjerenja mogu izvesti vrlo brzo, neovisno o vremenskim uvjetima, te uklopiti u već postojeću mrežu.

Na osnovi obavljenih računanja pokazalo se da i mikromreža sa samo dvije točke na ulaznom i dvije točke na izlaznom portalu osigurava ostvarenje točnosti proboja u okviru dopuštenih odstupanja. Optimalni broj točaka mikromreže bio bi tri do četiri; dvije točke na portalu i jedna do dvije kontrolne točke koje će služiti za povećanje preciznosti prijenosa orijentacije u podzemnoj poligonometriji, dok bi svaka sljedeća točka nepotrebno podizala troškove na uspostavi geodetske osnove.

Za ostvarenje visoke točnosti proboja dugih tunela potrebno je, osim redovnih kontrola iskopa tunela svakih 500 m koje omogućuju praćenje smjera proboja i pravodobno korigiranje eventualnog skretanja osi tunela, izabrati najbolji mogući postupak mjerenja i računanja geodetske osnove, s obzirom na kompleksnost tunela, te osigurati savjestan, stručan i odgovoran pristup svih onih koji rade na takvom projektu.

## Literatura

- Cvetković, Č. (1970): Primena geodezije u inženjerstvu, Građevinska knjiga, Beograd.
- Feil, L. (1990): Teorija pogrešaka i račun izjednačenja – drugi dio, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu.
- Grgić, I. (2003): Specifičnosti geodetske osnove u tunelogradnji, Magistarski rad, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu.
- Hennecke, F., Müller, G., Werner, H. (1988): Grundlagenetze, Handbuch Ingenieurvermessung, Band I 202-247, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin.
- Schelling, G., Hofmann-Wellenhof, B. (1988): GPS-Einsatz für Grosstunnels, Ingenieurvermessung 88 Beiträge zum X. Internationalen Kurs für Ingenieurvermessung, Band 2, D2 1-26, Ferd. Dümmlers Verlag, Bonn.
- Zakon o normizaciji (1996): Narodne novine, Službeno glasilo Republike Hrvatske, Zagreb.

## Anwendung vom GPS im Aufbau von Tunnelnetze

*Zusammenfassung. Das Ziel dieser Forschung war zu zeigen ob die bis jetzt angewendeten Methoden der Netzentwicklungen im Tunnelbau durch die Anwendung des Globalen Positionierungssystems GPS erfolgreich ersetzt werden kann, ohne terrestrische Messungen durchführen zu mußen, daß dabei der Durchschlag des Tunnels gewährleistet wird. Das weitere Ziel war die Durchschlagsgenauigkeiten des Tunnels zu vergleichen abhängig von der Netzform und der Zahl der Punkte in dem Vermessungsnetz. Diese Arbeit erfaßt die Beobachtungsmethoden, die Fehlerquellen und die Analyse und die Interpretation der konkreten Ergebnisse, die durch die Bearbeitung der durchgeführten Messungen aus dem Projekt des Tunnels "Sveti Rok" hervorgekommen sind. Das überirdische Vermessungsnetz bilden zwei freien Netze, und das unterirdische Vermessungsnetz bilden zwei freigeführten Polygonzüge entlang der beiden Tunnelseiten, wobei die Vermarkung nur für ein freigeführter Polygonzug gemacht worden ist. In allen Ausgleichungen der Messungen ist der Gauß-Markoff-Modell der vermittelten Messungen mit der Methode der kleinsten Quadrate angewendet worden.*

*Schlüsselworte: Tunnelbau, Durchschlagsgenauigkeit, Tunnelnetz.*

*Prihvaćeno: 2007-06-04*