

UDK 624.191.1:528.484(497.5)  
Pregledni znanstveni članak

# Podzemna geodetska osnova tunela "Mala Kapela"

Marko DŽAPO, Mladen ZRINJSKI – Zagreb\*

*SAŽETAK.* U ovom radu analizira se podzemna geodetska osnova tunela "Mala Kapela" trenutačno najduljeg tunela u Republici Hrvatskoj. Obradeni su izvori pogrešaka pri mjerenju pravaca s posebnim osvrtom na utjecaj bočne refrakcije i pogrešku početnoga smjernog kuta. Izložena je tunelska geodetska osnova u obliku lanca trokuta koja najbolje udovoljava postavljenim kriterijima u pogledu točnosti proboja tunela. Na kraju je prikazana položajna nesigurnost točaka s kojih je izveden proboj tunela "Mala Kapela".

*Ključne riječi:* tunelska geodetska osnova, gradnja tunela, bočna refrakcija, položajna nesigurnost točke proboja.

## 1. Uvod

Tuneli su građevinski objekti za gradnju kojih se od geodetskih stručnjaka zahtijeva najveća točnost pri geodetskim mjerenjima. Kako su oni sastavni dio prometnice, a njihova izvedba 4 do 5 puta skuplja od izvedbe otvorenoga dijela prometnice, geodetski radovi zahtijevaju posebnu pozornost.

Naime, tuneli su objekti koji sadrže niz specifičnosti po kojima se znatno razlikuju od drugih građevinskih objekata, što se posebno odnosi na opsežne pripremne radove i kompleksnost geodetskih radova pri njihovom proboju i gradnji.

Troškovi gradnje tunela ovise o geološkom sastavu tla, jačini podzemnih voda, deformacijama terena i nizu drugih faktora.

Međutim, sveukupni geodetski radovi znatno utječu na troškove izgradnje tunela, počevši od izradbe podloge za projektiranje, proboja tunela, iskolčenja osi trase, kontrole izvođenja radova i snimanja izvedenog stanja.

Za ostvarenje tih zadaća uspostavlja se specifična geodetska osnova, koja svojom kvalitetom udovoljava svim unaprijed određenim kriterijima točnosti.

\* Doc. dr. sc. Marko Džapo, Mladen Zrinjski, dipl. ing. geod., Sveučilište u Zagrebu, Geodetski fakultet, Kačićeva 26, 10000 Zagreb, e-mail: marko.dzapo@geof.hr, mladen.zrinjski@geof.hr

## 2. Tunelska geodetska osnova

Dozvoljeno odstupanje pri probodu tunela temeljno je polazište pri projektiranju i optimiranju geodetske osnove za potrebe izgradnje tunela.

S obzirom na unaprijed postavljene zahtjeve u pogledu točnosti proboda tunela, definira se optimalan izbor konfiguracije mreže, instrumentarija i metode mjerenja.

Geodetska osnova za potrebe izgradnje tunela sastoji se od tri dijela:

- 1) nadzemne geodetske osnove (mikromreže) u području ulaznog, odnosno izlaznog portala koja služi za prijenos smjera u podzemnu mrežu
- 2) nadzemne geodetske osnove koja povezuje mikromreže ulaznog i izlaznog portala
- 3) podzemne geodetske osnove koja služi za iskolčenje osi i ostvarenje proboda tunela.

Projekt nadzemne geodetske osnove radi se na idejnom projektu tunela tako da pokriva cijelo područje rasprostiranja budućeg objekta i udovoljava svim njegovim potrebama do kraja građenja.

S obzirom na kvalitetu, osnova mora biti stabilna, pouzdana i homogena da bi mogla odgovoriti postavljenim zahtjevima u pogledu točnosti proboda tunela.

## 3. Podzemna geodetska osnova

Podzemna geodetska osnova treba omogućiti prijenos matematički definirane tunelske osi izvjesnim brojem točaka s pripadajućim koordinatama ispod fizičke površine Zemlje.

Da bi se osigurao prijenos tih točaka, uspostavlja se geodetska osnova koja će svojom kvalitetom omogućiti iskolčenje osi tunela u granicama unaprijed propisanih tolerancija.

Oblik tunelske osnove i njezina točnost uvjetovani su građevinsko-tehničkim zahtjevima točnosti proboda tunela koja ovisi o njegovoj duljini.

Točnost proboda tunela u pravilu se definira vrijednošću  $\sigma$  po kilometru, pa se može dati izrazom (Krüger 1985):

$$s_D = \sigma T_{km}, \quad (1)$$

gdje je:  $s_D$  – standardno odstupanje proboda tunela

$T_{km}$  – duljina tunela u kilometrima.

Kako točnost proboda tunela ovisi o kvaliteti geodetske osnove i metodi mjerenja, potrebno je obaviti procjenu točnosti proboda s obzirom na odabrane kriterije.

### 3.1. Procjena konfiguracije mreže i proboja tunela

Brojčani pokazatelj za jednu mrežu određene konfiguracije da li zadovoljava utvrđene kriterije u pogledu točnosti proboja tunela dobije se simuliranim izjednačenjem portalskih mreža i mreže u tunelu.

Pri izjednačenju se primjenjuje Gauss-Markovljev model, koji se sastoji od funkcionalnog i stohastičkog dijela (Kuang 1996).

Funkcionalni dio toga modela dan je izrazom:

$$\hat{l} = l + v = A\hat{x}, \quad (2)$$

gdje je:  $\hat{l}$  – vektor izjednačenih vrijednosti mjerenja  
 $l$  – vektor mjerenih veličina  
 $v$  – vektor popravaka mjerenja  
 $A$  – konfiguracijska matrica  
 $\hat{x}$  – vektor nepoznanica.

Stohastički dio Gauss-Markovljeva modela dan je izrazom:

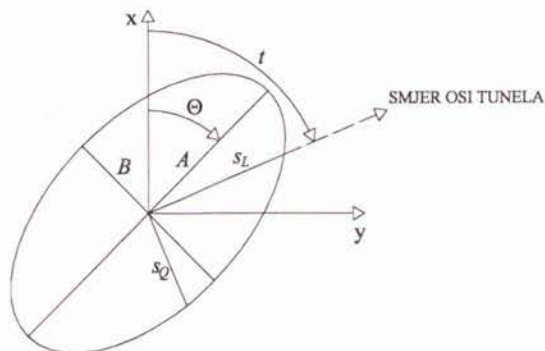
$$K_{ll} = \sigma_0^2 Q_{ll} = \sigma_0^2 P^{-1} \quad (3)$$

gdje je:  $K_{ll}$  – matrica varijance-kovarijance mjerenja  
 $\sigma_0^2$  – *a priori* faktor varijance  
 $Q_{ll}$  – matrica kofaktora mjerenja  
 $P$  – matrica težina mjerenja.

Pritom je matrica kofaktora izjednačenih nepoznanica dana izrazom:

$$Q_{\hat{x}\hat{x}} = (A^T P A)^{-1}. \quad (4)$$

Pri procjeni kvalitete konfiguracije mreže i točnosti mjerenja temeljni je kriterij položajna nesigurnost točaka s kojih je izveden proboj tunela, koja se određuje iz oba smjera bušenja tunela. Prikazana je relativnom elipsom pogrešaka, koja sadrži informacije o uzdužnom ( $s_L$ ) i poprečnom ( $s_Q$ ) odstupanju točke proboja tunela (slika 1).



Slika 1. Uzdužno i poprečno odstupanje točke proboja tunela.

Relativna elipsa pogrešaka računa se iz kofaktora koordinatnih razlika točkaka kojima je definiran proboj, a elementi su joj velika poluos  $A$ , mala poluos  $B$  i smjerni kut velike poluosi  $\Theta$ .

Elementi relativne elipse pogrešaka dani su izrazima:

$$\lambda_{1,2} = \frac{1}{2} \left( q_{\Delta x \Delta x} + q_{\Delta y \Delta y} \pm \sqrt{(q_{\Delta x \Delta x} - q_{\Delta y \Delta y})^2 + 4q_{\Delta x \Delta y}^2} \right) \quad (5)$$

$$\Theta = \frac{1}{2} \arctg \left[ \frac{2q_{\Delta x \Delta y}}{q_{\Delta x \Delta x} - q_{\Delta y \Delta y}} \right] \quad (6)$$

$$A = s_0 \sqrt{\lambda_1} \quad B = s_0 \sqrt{\lambda_2}, \quad (7)$$

gdje je:  $\lambda_{1,2}$  – svojstvene vrijednosti matrice kofaktora koordinatnih razlika  
 $q_{\Delta x \Delta x}$ ,  $q_{\Delta y \Delta y}$ ,  $q_{\Delta x \Delta y}$  – elementi matrice kofaktora koordinatnih razlika  
 $s_0$  – referentno standardno odstupanje *a posteriori*.

Relativna elipsa pogrešaka nije ovisna o udaljenosti dviju točkaka ako su one određene neovisno.

Ako se to primijeni za točku proboja tunela, dobit će se poprečno i uzdužno odstupanje proboja iz izraza:

$$\begin{aligned} s_Q^2 &= A^2 \sin^2(t - \Theta) + B^2 \cos^2(t - \Theta) \\ s_L^2 &= A^2 \cos^2(t - \Theta) + B^2 \sin^2(t - \Theta), \end{aligned} \quad (8)$$

gdje je:  $t$  – smjerni kut osi tunela.

Osim preciznosti kvalitetu mreže definira i pouzdanost. Pouzdanost mreže ispitana je metodama matematičke statistike.

#### 4. Tunel "Mala Kapela"

Tunel "Mala Kapela" nalazi se na Autocesti Zagreb – Split, poddionici broj III-A2 (Bosiljevo – Sv. Rok), dugoj 14,5 km.

Sastoji se od dviju paralelnih tunelskih cijevi s razmakom osi od 25 m. Desna tunelska cijev proteže se od stacionaže ulaza 8+500,00 do stacionaže izlaza 14+260,00, odnosno duljine je 5760,00 m, dok je duljina lijeve cijevi 5761,76 m.

Tunel "Mala Kapela" dulji je od tunela "Sv. Rok" za 90 m i to je za sada najdulji tunel u Republici Hrvatskoj.

Iz projektne je dokumentacije vidljivo da su sva dozvoljena odstupanja između projektiranog i izvedenog stanja u granicama od 0,5 do 3 cm, što je geodetske stručnjake upućivalo na temeljite analize prije uspostave geodetske osnove koja će trebati udovoljiti postavljenim kriterijima.

Kako točnost proboja tunela ovisi primarno o točnosti nadzemne i podzemne geodetske osnove, preciznosti instrumentarija, metodama mjerenja, načinu prijenosa elemenata u tunel, obliku tunela, načinu građenja (puni profil ili potkop), pogreškama pri građenju i deformaciji građevine, stoga je pogreška pri proboju tunela rezultat ukupnog djelovanja svih iznesenih izvora pogrešaka.

Najveći dio pogreške u proboju tunela potječe od podzemne geodetske osnove, kvaliteta koje ovisi o točnosti mjerenja pravaca i dužina te od geometrijskog oblika mreže i/ili poligonskih vlakova.

Nadzemna geodetska osnova za potrebe izgradnje tunela "Mala Kapela" sastoji se od:

- dva geodetska četverokuta (jedan u blizini sjevernog i drugi u blizini južnog portala)
- preciznog poligonskog vlaka koji položajno povezuje te dvije mreže
- preciznog nivelmanskog vlaka koji visinski povezuje te dvije mreže.

Homogenost mikromreža ispitana je i potvrđena preciznim poligonskim vlakom kojim su te mreže povezane, a njegova je položajna relativna točnost 1:60 000.

Podzemna geodetska osnova sastoji se od:

- dvije mreže u desnoj tunelskoj cijevi (jedna na sjevernom, a druga na južnom dijelu tunela), koje su izvedene u obliku lanca trokuta
- dva poligonska vlaka u lijevoj tunelskoj cijevi (jedan na sjevernom, a drugi na južnom dijelu tunela) koji povezuju podzemne mreže u desnoj tunelskoj cijevi i nadzemnu geodetsku osnovu na sjevernom, odnosno južnom portalu tunela
- dva precizna zatvorena nivelmanska vlaka (jedan na sjevernom, a drugi na južnom dijelu tunela).

U ovome radu posebno se opisuje samo položajna točnost podzemne geodetske osnove.

#### 4.1. Analiza pogrešaka pri mjerenju pravaca

Mjerenje pravaca u podzemnoj geodetskoj mreži poseban je problem zbog velikog izvora pogrešaka koje mogu znatno utjecati na točnost proboja tunela, budući da se sva mjerenja obavljaju pod zemljom.

Točnost mjerenog pravca funkcija je pogrešaka vezanih uz instrument, pogreške centriranja instrumenta, pogreške centriranja signala te pogreške viziranja, koja ovisi o atmosferskim uvjetima, osvjetljenju unutar tunela i utjecaju bočne refrakcije. Utjecaj bočne refrakcije izrazito je velik zbog relativno malog promjera tunelske cijevi, pa vizura prolazi blizu stijene koja je hladnija od zraka u tunelu. Pogreška orijentacije prenosi se izravno u tunelsku mrežu u svom punom iznosu, što je posebno nepovoljno kod ispruženih poligonskih vlakova.

Ukupni utjecaj svih pojedinačnih pogrešaka treba biti manji od standardnog odstupanja kuta, koje se dobije iz poprečnog odstupanja ispruženoga poligonskog vlaka (Janković 1981):

$$s_{\beta}'' = \frac{0,45\Delta\varphi''}{L} \sqrt{\frac{6(n-1)}{n(2n-1)}}, \quad (9)$$

gdje je:  $\Delta$  – dozvoljeno poprečno odstupanje

$L$  – duljina dijagonale vlaka

$n$  – broj prijelomnih kutova.

Pogreške instrumenta i njihovo djelovanje na mjereni kut mogu se u velikoj mjeri ukloniti metodom mjerenja, izuzev pogreške vertikalne osi koja je rezultat osjetljivosti sustava za horizontiranje instrumenta, a procjenjuje se (Kuang 1996):

$$s_h'' = 0,2 v'', \quad (10)$$

gdje je:  $v''$  – vrijednost parsu libele izražena u sekundama.

Pogreška viziranja ovisi u prvom redu o optičkim svojstvima instrumenta, vidnim sposobnostima opažača, promjenama atmosferskih uvjeta, oblicima i udaljenostima signala te o njegovoj osvjetljenosti.

Zbog turbulencije zraka, velike vlage te loše osvjetljenosti, pri duljini vizure od oko 200 m, ta će pogreška iznositi (Kuang 1996):

$$s_v'' = \frac{60''}{M}, \quad (11)$$

gdje je:  $M$  – povećanje durbina.

Kada se radi s instrumentom koji ima optički mikrometar za koincidiranje, pogreška očitavanja ( $s_{oc}$ ) ovisi o najmanjoj kutnoj podjeli horizontalnog limba i skale optičkog mikrometra i može se prikazati izrazom (Kuang 1996):

$$s_{oc} = 2,5 d'', \quad (12)$$

gdje je:  $d''$  – najmanji podatak horizontalnoga kruga.

#### 4.1.1. Utjecaj bočne refrakcije

Djelovanje bočne refrakcije u tunelu ne može se izbjeći ni dovoljno točno ispitati. Uzrokovana je nehomogenim sredstvom rasprostiranja optičkih valova i prepoznaje se kao veliki iznos sustavnih pogrešaka pri preciznom određivanju udaljenosti, horizontalnih pravaca i vertikalnih kutova.

Nesigurnost mjenenog kuta zbog utjecaja bočne refrakcije može se izračunati po izrazu (Bilajbegović 1990):

$$\varepsilon'' = \frac{\rho''}{d} \sum_{i=1}^j l_i L_i \cdot 0,29993 \cdot 10^{-6} \frac{p}{\alpha T_i^2} \text{ grad } T, \quad (13)$$

gdje je:  $\varepsilon''$  – kut refrakcije

$L_i$  – udaljenost sredine plohe koja uzrokuje refrakciju od cilja viziranja

$d$  – ukupna duljina trajektorije optičke zrake

$l_i$  – duljina stijene koja izaziva bočnu refrakciju

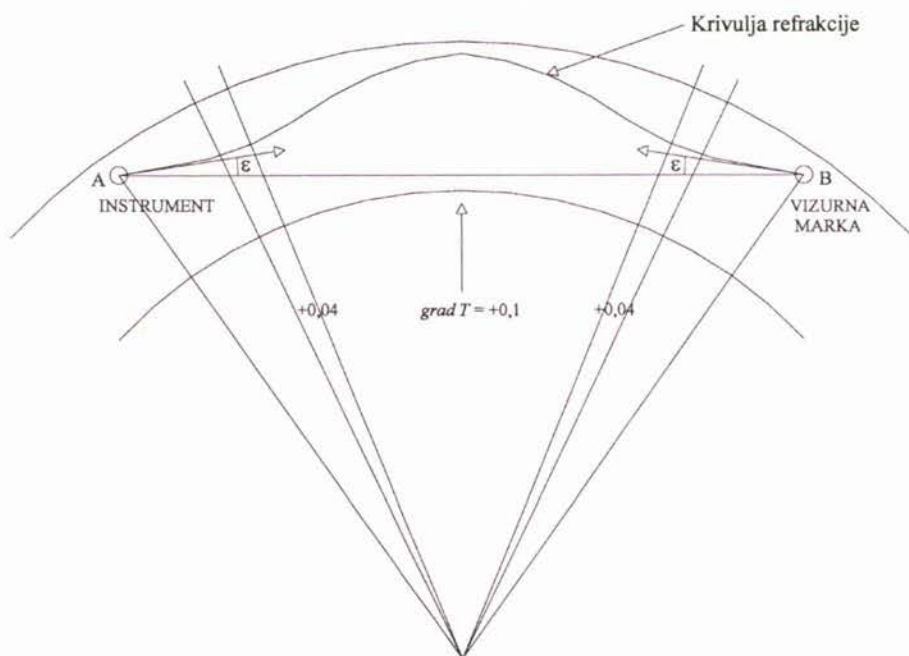
$p$  – tlak zraka u mbar

$\alpha$  – koeficijent širenja zraka = 1/273,2

$T_i$  – temperatura u K

$grad T$  – horizontalni temperaturni gradijent u K/m.

Vrijednost temperaturnoga gradijenta kreće se u granicama od 0,0 do 0,1 K/m, a iznos bočne refrakcije ovisi o udaljenosti trajektorije optičke zrake od bočnih zidova tunela (slika 2).

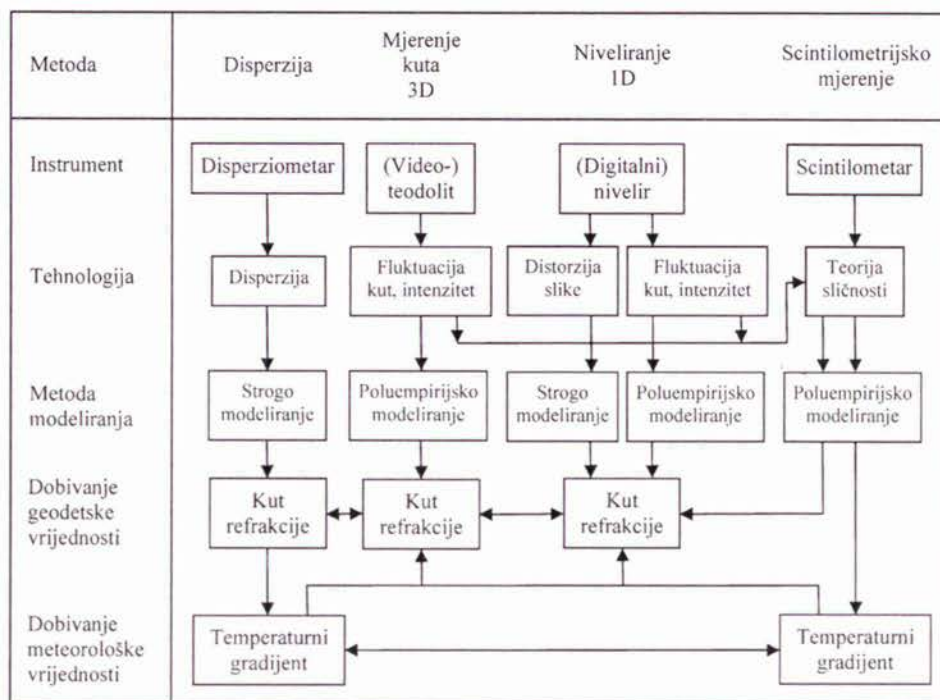


Slika 2. Shematski prikaz utjecaja bočne refrakcije.

Zbog relativno malog profila tunela "Mala Kapela" i njegove izvedbe na početku i kraju u kružnoj krivini, utjecaj bočne refrakcije veći je zbog male udaljenosti trajektorije optičkih valova od bočnih zidova tunela. Kako se tunel "Mala Kapela" nalazi 300 do 400 m ispod površine Zemlje, zrak može biti ekstremno zagrijan i visoki tlak u tunelu uzrokovat će znatan temperaturni gradijent, koji je okomit na bočne zidove tunela. Ta nepovoljna pojava pri geodetskim mjerenjima utjecat će na optička mjerenja pa vizura neće biti pravac, što može proizvesti poprečno odstupanje u probodu tunela i do 0,5 m.

Sva dosadašnja ispitivanja pokazala su da lokalna meteorološka mjerenja ne pružaju zadovoljavajuće rezultate. Razvojem i uvođenjem u ispitivanje teodolita disperziometra, dobit će se zadovoljavajuća rješenja s vrlo sofisticiranom instrumentalnom konstrukcijom. Nadalje, omogućena je kompenzacija utjecaja refrakcije sa sveukupnim metodama rada temeljenima na efektima scintilacije.

Metode mjerenja i određivanja temperaturnoga gradijenta prikazane su na slici 3.



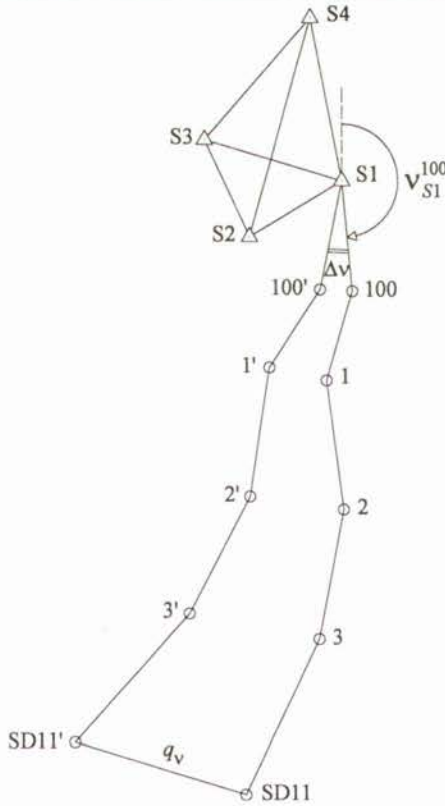
Slika 3. Metode mjerenja i određivanja temperaturnoga gradijenta (URL 1).

Korištenjem žiroskopa za određivanje azimuta u podzemnoj geodetskoj osnovi eliminirao bi se utjecaj bočne refrakcije. Istraživanja koje je proveo Korittke 1988. pokazala su da standardno odstupanje u određivanju azimuta žiroskopom Gyromat iznosi 0,9 miligradi. Na temelju provedenih ispitivanja i analiza (Korittke 1988) na EURO TUNELU, koji spaja Veliku Britaniju i Francusku, pokazalo se da je prijeko potrebno korištenje žiroskopa za određivanje azimuta u podzemnoj geodetskoj osnovi. Naime, korištenjem žiroskopa na svakoj drugoj poligonskoj strani postiglo bi se poprečno odstupanje u probouju tunela od 63 mm, a korištenjem na svakoj desetoj točki poprečno odstupanje bi iznosilo 217 mm za točku probouja tunela na 19,1 km s francuske, odnosno na 31,4 km s britanske strane.

#### 4.1.2. Pogreška početnoga smjernog kuta

Vanjska geodetska osnova za potrebe gradnje tunela postavlja se u blizini ulaznog i izlaznog portala. Sastoji se od određenog broja stabiliziranih točaka, a njihov broj ovisi o duljini tunela i konfiguraciji terena. Te točke služe za prijenos orijentacije u tunelsku geodetsku osnovu, kako na ulaznom tako i na izlaznom portalu. Točnost orijentacije ili prijenosa početnog smjernog kuta vrlo je važna jer povećanjem duljine slijepoga poligonskog vlaka utjecaj te pogreške raste linearno (slika 4).





Slika 4. Utjecaj pogreške početnoga smjernog kuta na poprečno odstupanje proboja tunela.

Ako je početni smjerni kut  $v_{S1}^{100}$  određen pogreškom  $\Delta v$  tada s povećanjem duljine vlaka utjecaj te pogreške raste. Poprečno odstupanje  $q_v$ , uzrokovano pogreškom početnoga smjernog kuta, u točki SD11 koja se nalazi na udaljenosti  $D$  od početne točke vlaka S1, određuje se po izrazu (Cvetković 1970):

$$q_v = D \operatorname{tg} \Delta v. \tag{14}$$

Zbog toga treba odrediti standardno odstupanje smjernoga kuta početne strane podzemne mreže, koje će definirati konfiguraciju mreže i metodu rada kako bi utjecaj pogreške početnoga smjernog kuta bio što manji. Budući da se vezni kut mjeri na sve vidljive točke mikromreže, moguće je za početni smjerni kut dobiti više vrijednosti. Najvjerojatnija vrijednost početnoga smjernog kuta dobit će se iz orijentacije kao obična aritmetička sredina (Džapo 1992):

$$v_{S1}^{100} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (v_{S1}^{100})_i, \tag{15}$$

gdje je:  $n$  – broj mjerenih veznih kutova prema točkama mikromreže.

Koordinate točaka nadzemne geodetske osnove dobivene su iz zajedničkog izjednačenja, što znači da su međusobno zavisne veličine, pa su sukladno tomu i smjerni kutovi  $v_{S1}^{S2}$ ,  $v_{S1}^{S3}$  i  $v_{S1}^{S4}$  korelirane veličine, što se pri računanju standardnih odstupanja mora uzeti u obzir.

Ako je:

$$f = \frac{v_{S1}^{S2} + v_{S1}^{S3} + v_{S1}^{S4}}{3},$$

tada se standardno odstupanje početnoga smjernog kuta može izračunati po izrazu:

$$s_{v_{S1}^{100}}^2 = s_f^2 + \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n s_{\beta_i}^2, \quad (16)$$

gdje je:  $s_{\beta_i}$  – standardno odstupanje mjenjenih veznih kutova.

Za računanje vrijednosti  $s_f$  potrebno je naći matricu kofaktora smjernih kutova  $v_{S1}^{S2}$ ,  $v_{S1}^{S3}$  i  $v_{S1}^{S4}$ , koja se računa prema izrazu:

$$Q_v = FQ_{xx}F^T,$$

gdje je:  $Q_v$  – matrica kofaktora smjernih kutova

$F$  – matrica koeficijentata smjernih kutova.

Izraz  $s_f^2$  izračuna se iz matrice kofaktora smjernih kutova:

$$s_f^2 = s_0^2 \begin{bmatrix} 1 \\ n \\ \vdots \\ 1 \\ n \end{bmatrix} Q_v \begin{bmatrix} 1 \\ n \\ \vdots \\ 1 \\ n \end{bmatrix}, \quad (17)$$

gdje je:  $s_0^2$  – faktor varijance *a posteriori*.

Na temelju izračunane vrijednosti  $s_f$  i standardnih odstupanja veznih kutova dobit će se standardno odstupanje početnoga smjernog kuta kako za sjevernu tako i za južnu podzemnu geodetsku mrežu.

## 4.2. Konfiguracija mreže i mjerene veličine

Prema Pravilniku o tehničkim normativima i uvjetima za projektiranje i gradnju tunela na cestama, čl. 53 Zakona o normizaciji, za tunel "Mala Kapela" ( $L = 5760,00$  m) dozvoljeno poprečno odstupanje bilo bi:

$$\Delta = 60 \text{ mm} \sqrt{L_{\text{km}}} = 60 \text{ mm} \sqrt{5,760} = 144 \text{ mm}.$$

Na temelju vrijednosti  $\Delta$  te pretpostavke da na duljini poligonskog vlaka od 3 km ima 14 prijelomnih kutova, došlo se do potrebne preciznosti prijelomnih kutova preko izraza (9):

$$s_{\beta} = 2,0''.$$

S obzirom na uvjete rada u tunelu (loša osvjetljenost, prašina, turbulencija zraka i atmosferski uvjeti) te analizom svih izvora pogrešaka, došlo se do *a priori* ocjene točnosti mjerenja kutova u iznosu  $s_{\beta_i} = 2,1''$ .

Standardno odstupanje početnoga smjernog kuta izračunano po izrazu (16) za sjeverni dio mreže iznosi  $s_{v_{S1}^{100}} = 2,86''$ , a za južni dio mreže  $s_{v_{J1}^{100}} = 3,30''$  i prouzročilo bi pogrešku u probodu tunela, korištenjem slijepoga poligonskog vlaka, kroz sjeverni portal u iznosu od 41,6 mm, odnosno 48,0 mm na južnom dijelu tunela. Temeljem izračunanih vrijednosti i pogreške refrakcije koja se ne može sa sigurnošću odrediti, a iz ispitivanja je utvrđeno da može iznositi i do 0,5 m, vidljivo je da slijepi poligonski vlak neće zadovoljiti postavljene kriterije u pogledu točnosti probodja tunela.

Zato je geodetska osnova u tunelu "Mala Kapela" izvedena u obliku 2 lanca trokuta u desnoj cijevi (1 na sjeveru i 1 na jugu) i 2 poligonska vlaka u lijevoj tunelskoj cijevi (1 na sjeveru i 1 na jugu) (slika 5). Na taj je način reducirana utjecaj refrakcije, pogreške centriranja instrumenta i signala i pogreške početnoga smjernog kuta na točnost probodja tunela. Točke su postavljene na udaljenosti od 200 do 300 m i stabilizirane su armiranobetonskim stupovima s metalnom pločom u sredini kojih je vijak za prisilno centriranje. Sva su mjerenja obavljena priborom za prisilno centriranje preko betonskih stupova i/ili stativa. Točke su od bočnih zidova tunela udaljene što je više moguće zbog utjecaja refrakcije, ali na takvoj udaljenosti da se nesmetano može odvijati transport iskopanog materijala. Kako su sve točke geodetske osnove postavljene u zoni slijeganja i deformacije Zemljine površine, tijekom građenja se nakon svakih 500 m iskopanog tunela moraju obavljati kontrolna opažanja kako bi se ustanovila njihova stabilnost.

Mjerene su veličine horizontalni pravci, zenitne daljine i dužine.

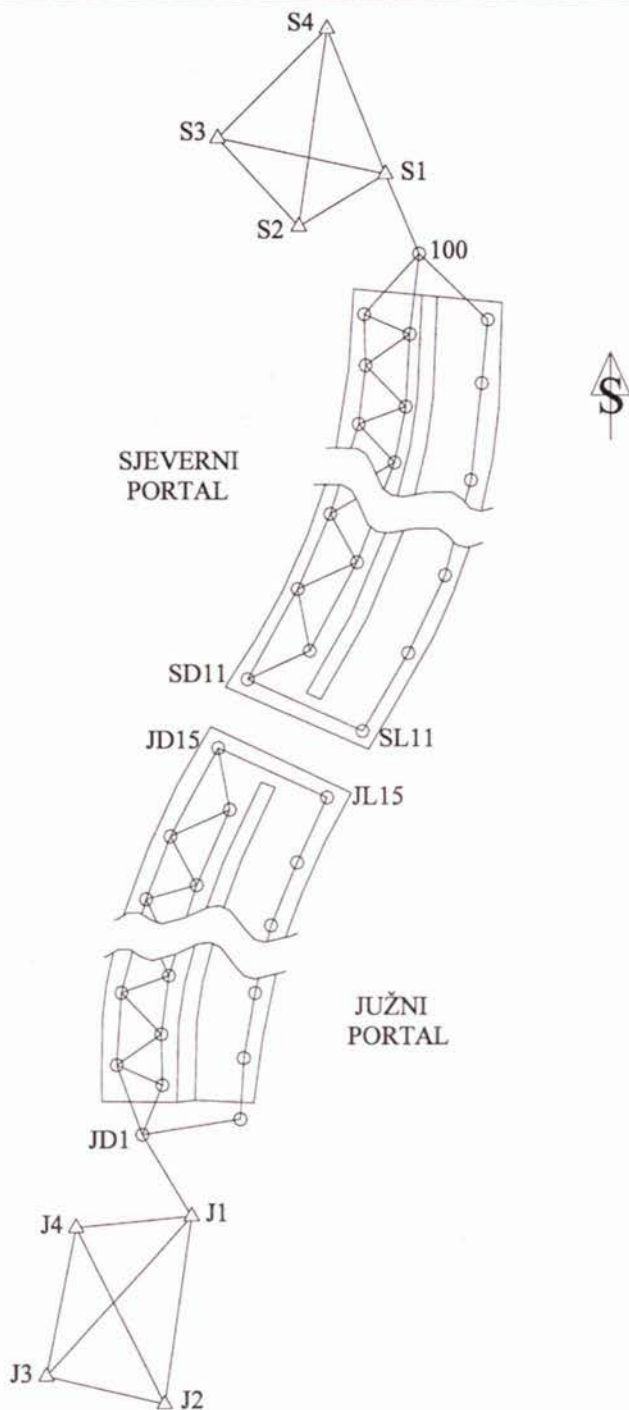
Mjerenja tih osnovnih veličina izvedena su u sljedećem broju ponavljanja:

- horizontalni pravci mjereni su u 2 girusa
- zenitne daljine mjerene su obostrano, u 2 serije, u 2 položaja durbina
- kose dužine mjerene su obostrano, u 2 serije po 3 ponavljanja (ukupno 6 mjerenja u svakom smjeru).

Na temelju stajališnog izjednačenja i zatvaranja trokuta definirane su odgovarajuće preciznosti mjerenja pravaca standardnim odstupanjem pojedinog pravca koje iznosi  $s_p = 1,80''$ , a standardno odstupanje mjerenih dužina je  $s_d = 2,1$  mm.

S obzirom na nepovoljne uvjete rada u tunelu i deklariranu mjernu nesigurnost elektroničkog instrumenta LEICA TC 1600 od  $1''$  za pravce i  $3$  mm +  $2$  ppm za dužine, postignuto standardno odstupanje je zadovoljavajuće.

U vrijeme izvođenja mjerenja razlika temperature u tunelu i izvan njega bila je maksimalno  $26$  °C (južni portal), što je zahtijevalo dodatna kontrolna mjerenja na prijelazu iz jednog medija u drugi. Pri izvođenju tih mjerenja na sjevernom portalu, temperatura u tunelu i izvan njega bila je približno jednaka. Bez obzira na to, izvedena su također dva neovisna kontrolna mjerenja na ulaznom i izlaznom portalu.



Slika 5. Skica podzemne geodetske osnove tunela "Mala Kapela".

### 4.3. Obrada podataka i izjednačenje položajne geodetske osnove

Na temelju provedenih mjerenja izračunana su standardna odstupanja mjerenja pojedinih kutova i duljina koja su poslužila za računanje težina pri izjednačenju.

Kako se sve točke na osi tunela odnose na jedinstveni koordinatni sustav Gauss-Krügerove projekcije meridijanskih zona, tako je i koordinate točaka geodetske osnove trebalo računati u istom sustavu.

Stoga je za sve dužine mjerene na fizičkoj površini Zemlje trebalo uvesti sljedeće korekcije i redukcije:

- atmosfersku korekciju
- redukciju mjerene dužine na horizont
- korekciju za svodenje dužine na ploh referentnog elipsoida
- korekciju za redukciju dužine u ravninu Gauss-Krügerove projekcije.

Reducirani su, također, mjereni pravci s fizičke površine Zemlje na plovu referentnog elipsoida, međutim te su korekcije bile vrlo malena iznosa.

Nakon uvedenih korekcija, a prije izjednačenja, ustanovljeno je da u mreži nema grubo pogrešnih mjerenja.

Prije računanja koordinata točaka podzemne geodetske mreže napravljeno je stajališno izjednačenje pravaca, izjednačeni su kutovi u trokutu prvo na teorijsku vrijednost od  $180^\circ$ , a zatim su izjednačeni na sumu kutova u zatvorenom poligonu.

Za izjednačenje je korišten Gauss-Markovljev model (vidi izraze (2) i (3)).

Izjednačenje je provedeno u dvije iteracije i pokazalo se da rješenje konvergira.

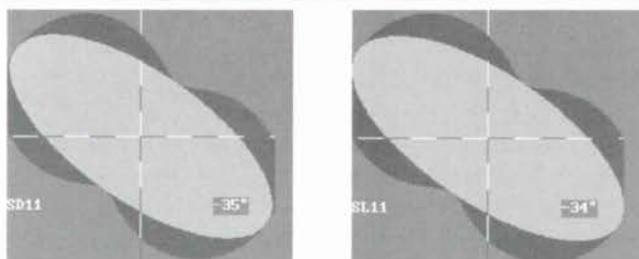
Kao rezultat izjednačenja dobivene su koordinate traženih točaka, njihova standardna odstupanja  $s_y$  i  $s_x$ , elementi elipse pogrešaka ( $A$ ,  $B$ ,  $\Theta$ ) i izjednačena mjerenja uz pripadnu ocjenu točnosti.

Koordinate točaka u podzemnoj geodetskoj mreži i pripadajuće ocjene točnosti izračunate su programskim paketom GPSurvey v. 2.35.

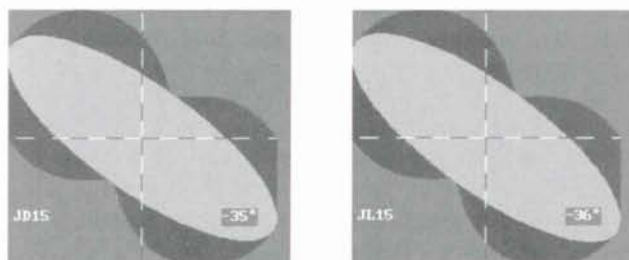
Ovdje su iskazani samo rezultati za ocjenu točnosti koordinata posljednjih točaka mreže s kojih je izveden proboj na sjevernoj i južnoj strani tunela (tablica 1) te su prikazane elipse pogrešaka tih točaka na sjevernom (slika 6) i južnom portalu tunela (slika 7).

Tablica 1. Standardna odstupanja koordinata posljednjih točaka mreže s kojih je izveden proboj na sjevernoj i južnoj strani tunela.

$T_n$	Standardna odstupanja	
	$s_y$ [m]	$s_x$ [m]
SD11	0,039	0,029
SL11	0,040	0,029
JD15	0,059	0,045
JL15	0,059	0,046



Slika 6. *Elipse pogrešaka posljednjih točaka mreže s kojih je izveden proboj na sjevernom portalu tunela (jedinica skale = 1 cm).*



Slika 7. *Elipse pogrešaka posljednjih točaka mreže s kojih je izveden proboj na južnom portalu tunela (jedinica skale = 1 cm).*

#### 4.4. Položajna nesigurnost točke proboja tunela

U tijeku iskopa tunela "Mala Kapela" izvedena su dva kontrolna mjerenja, prvo u srpnju 2003. i drugo u siječnju 2004. godine, te su napravljena dva neovisna izjednačenja tih dviju serija mjerenja.

Posljednje je mjerenje izvedeno kada je do konačnog proboja tunela preostalo oko 400 m.

Podzemna geodetska osnova priključena je na nadzemnu geodetsku osnovu, koja je određena izjednačenjem terestričkih mjerenja.

Na početnim točkama podzemne geodetske osnove (S1 na sjeveru i J1 na jugu) računana je orijentacija pravaca iz svih triju točaka u sjevernoj (S2, S3 i S4) i južnoj (J2, J3 i J4) mikromreži, čime je postignuta veća točnost prijenosa početnoga smjernog kuta  $v_{S1}^{100}$  (na sjeveru) i  $v_{J1}^{JD1}$  (na jugu) u podzemnu geodetsku osnovu.

Lijeva cijev tunela "Mala Kapela" probijena je u veljači, a desna u ožujku 2004. godine.

Nakon toga obavljena su mjerenja kako bi se izračunala položajna nesigurnost točke proboja u desnoj i lijevoj tunelskoj cijevi, koja je iskazana poprečnim i uzdužnim odstupanjem.

*Za točku proboja u desnoj tunelskoj cijevi dobiveno je poprečno odstupanje  $s_Q = 0,008$  m i uzdužno odstupanje  $s_L = 0,021$  m (tablica 2).*

*Za točku proboja u lijevoj tunelskoj cijevi dobiveno je poprečno odstupanje  $s_Q = 0,010$  m i uzdužno odstupanje  $s_L = 0,022$  m (tablica 3).*

Tablica 2. Položajna nesigurnost točke proboja u desnoj tunelskoj cijevi.

Točka proboja	Koordinata	Sjeverni portal (1)	Južni portal (2)	Razlika (1) - (2) [m]	Poprečno odstupanje $s_Q$ [m]	Uzdužno odstupanje $s_L$ [m]
A	y	5 518 063,287	5 518 063,267	0,020	0,008	0,021
	x	4 994 441,017	4 994 441,006	0,011		

Tablica 3. Položajna nesigurnost točke proboja u lijevoj tunelskoj cijevi.

Točka proboja	Koordinata	Sjeverni portal (1)	Južni portal (2)	Razlika (1) - (2) [m]	Poprečno odstupanje $s_Q$ [m]	Uzdužno odstupanje $s_L$ [m]
B	y	5 518 096,040	5 518 096,017	0,023	0,010	0,022
	x	4 994 427,541	4 994 427,533	0,008		

## 5. Zaključak

Geodetske osnove za potrebe izgradnje tunela sadrže niz specifičnosti, što se posebno odnosi na njihov oblik, metodu mjerenja i zahtijevanu točnost.

Kako točnost proboja tunela ovisi u prvom redu o preciznosti i pouzdanosti geodetske osnove, njezino projektiranje, izvedbu i obradu podataka treba izvesti nakon temeljito provedenih analiza.

U ovome radu provedene su analize vezane za pogreške pri mjerenjima kutova u podzemnoj geodetskoj osnovi te njihov utjecaj na točnost proboja tunela, a na temelju podataka mjerenja podzemne geodetske osnove tunela "Mala Kapela".

Nakon provedenih analiza i *a priori* ocjene točnosti mjerenja kutova definirane na temelju poprečnog odstupanja ispruženog poligonskog vlaka i maksimalno dozvoljenoga poprečnog odstupanja u proboju tunela, uočeno je da ispruženi slijepi poligonski vlak teško može zadovoljiti unaprijed postavljene kriterije točnosti.

Kod ispruženih slijepih poligonskih vlakova pogreška prijenosa orijentacije prenosi se u svom punom iznosu kao i pogreška centriranja instrumenta i pogreška centriranja signala, a utjecaj refrakcije nije moguće izbjeći ni egzaktno odrediti.

Stoga je geodetska osnova u desnoj tunelskoj cijevi (na sjevernom i južnom portalu) projektirana i izvedena u obliku lanca trokuta, te je na početku izravno priključena na nadzemnu geodetsku osnovu, a na kraju je poligonskim vlakom kroz lijevu tunelsku cijev (na sjevernom i južnom portalu) također priključena na nadzemnu geodetsku osnovu.

Tako su dobivena dva zatvorena poligona (1 na sjeveru i 1 na jugu), veliki broj prebrojnih mjerenja te mogućnost izjednačenja kutova po trokutima i zatvorenim poligonima na teorijsku vrijednost  $(n - 2)180^\circ$ .

Pri prijenosu kuta orijentacije u podzemnu geodetsku osnovu potrebno je odrediti orijentaciju pravaca s pomoću svih točaka nadzemne geodetske osnove koje se dogledaju.

Mjerenja na ulazu i izlazu iz tunela potrebno je izvesti pri približno izjednačenoj temperaturi u tunelu i izvan njega.

Radi smanjenja utjecaja refrakcije udaljenost vizure od bočnih zidova tunela mora biti najmanje 1,5 m.

Kontrolu podzemne geodetske osnove koja služi za proboj tunela potrebno je provesti nakon svakih 500 m iskopanog tunela.

Mjerenje dužina i njihove korekcije, kao i ostala problematika vezana uz geodetsku osnovu potrebnu za proboj tunela, a koja ovdje nije prikazana, bit će obrađeni u jednom od sljedećih radova.

## Literatura

- Bilajbegović, A. (1990): Idejni projekt geodetske mreže tunela Čičarija. Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Cvetković, Č. (1970): Primena geodezije u inženjerstvu. Građevinska knjiga, Beograd.
- Džapo, M. (1992): Neki aspekti izjednačenja poligonskih vlakova s posebnim osvrtom na mjerenje poligonskih strana. Magistarski rad, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Janković, M. (1981): Inženjerska geodezija II. Sveučilišna naklada Liber, Zagreb.
- Korittke, N. (1988): Einsatz des Präzisionsvermessungskreisels GYROMAT. Ingenieurvermessung 88 Beiträge zum X. Internationalen Kurs für Ingenieurvermessung, Band 2, D4 1-12, Ferd, Dümmlers Verlag, Bohn.
- Krüger, J. (1985): Geodätische Netze in Landes- und Ingenieurvermessung II. Absteckungsnetze, speziell für Tunnelabsteckungen, Vorträge des Kontaktstudiums Februar 1985 in Hannover, Konrad Wittwer Verlag, Stuttgart.
- Kuang, S. (1996): Geodetic Network Analysis and Optimal design: Concept and Applications. Ann Arbor Press, Inc., Chelsea - Michigan.
- URL 1: Refraction Influence Analyses and Investigations on Automated Methods for Elimination of Refraction Effects on Geodetic Measurements, <http://www.geod.ethz.ch/fe97/gmt1/gmt1.html>, (16.04.2004.).

## Underground Geodetic Basis of the Tunnel "Mala Kapela"

*ABSTRACT. This paper analyses the underground geodetic basis of the tunnel "Mala Kapela" being the longest tunnel in the Republic of Croatia at the moment. There are the sources of errors in direction measurements processed with special reference to the lateral refraction and the error of initial bearing grid. The paper present the tunnel geodetic basis in the form of a triangle chain that meets the given criteria referring to accuracy of cutting the tunnel in the best possible way. At the end there is the positional uncertainty of points presented that were used as a reference for cutting the tunnel "Mala Kapela".*

*Key words: tunnel geodetic basis, tunnel construction, lateral refraction, positional uncertainty of cut points.*

Prihvaćeno: 2004-05-28