

X Predavanje

Tuneli. Tunelske mreže, podzemna i nadzemna, njihovo povezivanje, proračun tačnosti proboja. Geodetski radovi pri iskopu tunela. Mjerenja konvergencije i osmatranje pomjeranja tunela u izgradnji i eksploataciji.

10.1 Tuneli

Podzemne građevine u obliku cijevi otvorene na oba kraja, postavljene horizontalno ili u blagom nagibu, a kroz koje se provodi saobraćajnica: željeznička pruga, put, kanal ili vodni tok, koji spajaju dva dijela puta razdvojena preprekom koju nije moguće savladati na drugi način, nazivamo tunelima.

Uz mostove, tuneli se mogu svrstati u najsloženije inženjerske objekte za saobraćaj koji spajaju dva dijela saobraćajnice razdvojene preprekom.

Prema namjeni tuneli se dijele na:

- saobraćajne – metro, drumski, plovni,
- hidrotehničke – dovodni i odvodni tuneli hidrocentrala, irigacioni tuneli itd.,
- komunalne – kanalizacioni, kolektori itd.,
- tunele rudarske industrije – za omogućavanje eksploatacije rudnih nalazišta.

Prema položaju na terenu tuneli se dijele na:

- brdske tunele (ispod brda i planina),
- podvodne tunele (ispod rijeka i zaliva),
- gradske tunele (ispod naselja - metro).

Podjela tunela prema veličini iskopa:

- tunelski potkopi 5-12 m²,
- mali tunelski profili 12-27 m²,
- srednji tunelski profili 27-56 m²,
- veliki tunelski profili 56-75 m²,
- vrlo veliki tunelski profili preko 75 m².

Podjela tunela prema broju voznih traka:

- jednotračni tuneli,
- dvotračni tuneli,
- višetračni tuneli.

Podjela tunela prema dužini:

- mali tuneli – kraći od 50 m,
- kratki tuneli – 50-500 m,
- srednji tuneli – 500-2200 m,
- dugi tuneli – 2200-4000 m,
- vrlo dugi tuneli duži od 4000 m.

Zavisno od načina građenja tunela razvijeno je nekoliko metoda nazvanih po zemljama u kojima su prvi puta našle svoju primjenu, pa tako razlikujemo: belgijsku, austrijsku, englesku, njemačku, italijansku metodu itd.

Kod klasičnih metoda radovi uvijek počinju kopanjem jednog potkopa, pa se one međusobno razlikuju redoslijedom kopanja potkopa u tunelskom profilu. Osim toga postoji način rada kopanja punog profila koji se najčešće primjenjuje u čvrstom i postojanom materijalu (stijena) tako da se u čelu napredovanja buši nekoliko minskih rupa koje se nakon toga ispunjavaju eksplozivnim materijalom. U tom slučaju se tunelski profil ne podgrađuje ali se stijene ne ostavljaju dugo otvorene zbog atmosferskih uticaja kako ne bi došlo do njihovog raspadanja.

Tunel je sastavni dio saobraćajnice, pa se njegova trasa označava na karti sitnije razmjere, a način projektovanja trase zavisi od dužini tunela. Kod kratkih tunela oblik ose tunela prilagođava se osi saobraćajnice. Kod dugačkih tunela prvo se izabere položaj tunela, a zatim se trasa saobraćajnice ispred i iza tunela prilagođava sa već izabranim položajem i pravcem.

Prirodno je da su niski tuneli najduži, što najčešće znači i najskuplji. Kako bi se oni skratili tunel se može projektovati na višoj koti. Tunel se znatno skraćuje projektovanjem na višoj koti, ali se zbog toga trasa saobraćajnice mora razvijati tako da bi se pod povoljnim usponom i padom mogla priključiti na osu tunela.

Osim dužine tunela, troškovi građenja zavise i od geološkog sastava terena kroz koji će se tunel probijati (vrsta stijene, nagib slojeva, itd.). Jačina podzemnih voda i deformacije tla koje one izazivaju i niz drugih faktora jednako tako utiču na trasu tunela. Sve provedene analize trebaju otkloniti teškoće građenja tunela koje se mogu izbjeći pomicanjem njegove trase, kao i da omoguće predviđanje metode podgrađivanja i kopanja.

Kada je trasa tunela utvrđena, potrebno je obaviti opsežna geološka i geofizička istraživanja da bi se provjerile pretpostavke o geološkom sastavu tla kroz koji se probija tunel. Na osnovu provedenih istraživanja trasa tunela se zadržava ili pomjera, odnosno utvrđuje se definitivna trasa tunela. Kad je usvojena definitivna trasa tunela slijede visokoprecizni geodetski radovi.

10.2 Nadzemne tunelske mreže – terestička i GPS metoda

Za geodetske radove način izgradnje tunela vrlo je bitan jer od njega zavise metode rada, način stabilizacije tačaka i tačnost mjerenja. Tačnost proboja tunela može biti bitno manja pri izgradnji tunela metodom potkopa, nego što je to slučaj pri kopanju tunela u punom profilu. U prvom se slučaju nakon proboja može korigovati iskolčenje

projektovane trase, dok se u drugom proboj tunela mora ostvariti u okviru unaprijed postavljenih zahtjeva tačnosti.

Cilj izrade projekta geodetskih radova u probouju tunela je da se uradi optimizacija tih radova: geometrije, tačnosti, grešaka, broja mjerenja i tačnosti mjerenja elementarnih veličina u mreži. Na taj način utvrdiće se kojim instrumentima i metodama mjerenja i pod kojim uslovima tačnosti i uslovima pri mjerenju treba izvesti mjerenja elementarnih veličina u mreži izabrane geometrije u cilju dobijanja geodetske mreže odgovarajućeg kvaliteta.

Cjelokupna geodetska osnova, mikromreže ispred ulaznog i izlaznog portala, kao i mreža tačaka koja ih povezuje projektuje se na karti razmjere 1:5000, a same mikromreže projektuju se na topografskom planu razmjere 1:1000 na kojem je nanesen plan organizacije gradilišta.

Osnovu pri projektovanju geodetske osnove za potrebe izgradnje bilo kojeg tunela je dozvoljeno odstupanje pri probouju tunela, što znači da geodetska osnova mora zadovoljiti najveće zahtjeve u vezi s preciznošću i pouzdanošću. Glavne osobine projekta geodetske osnove u pravilu su:

- Nadzemna geodetska osnova mora imati na ulaznom, odnosno izlaznom portalu najmanje dvije tačke za prenos direkcionog ugla u podzemnu poligonometriju;
- Osim tačaka u blizini portala potrebno je stabilizovati još najmanje dvije kontrolne tačke radi preciznijeg definisanja orijentacije poligonskog vlaka u tunelu;
- Nadzemna geodetska osnova treba biti integrisana u državni koordinatni sistem;
- Projekt mreže se radi na projektu tunela, gdje su već projektovani i svi pomoćni objekti koji će služiti u toku građenja;
- Projekt mreže mora pokrivati cijelo gradilište tunela i udovoljavati svim njegovim potrebama do kraja građenja;
- Mreža mora biti homogena za cijelo gradilište tunela i odgovarati tačnosti koja je potrebna za označavanje tačaka tunelske osovine pri probijanju tunela;
- Tačke nadzemne tunelske triangulacije ne treba postavljati iznad same trase, jer tokom izgradnje može doći do deformacije terena i prema tome i do pomjeranja tačaka. To zavisi i od dubine na kojoj će se tunel graditi i od kvaliteta tla kroz koje tunel prolazi.

Prilikom izrade projekta tunelskih mikromreža na ulaznom i izlaznom portalu, kao i mreže tačaka koja povezuje mikromreže najveću teškoću predstavlja činjenica da se ne može sa sigurnošću tvrditi da postoji međusobno dogledanje za tačke mikromreže kako su zamišljene na kartografskim podlogama, tj. da se vizure na terenu mogu nesmetano ostvariti, bez prepreka.

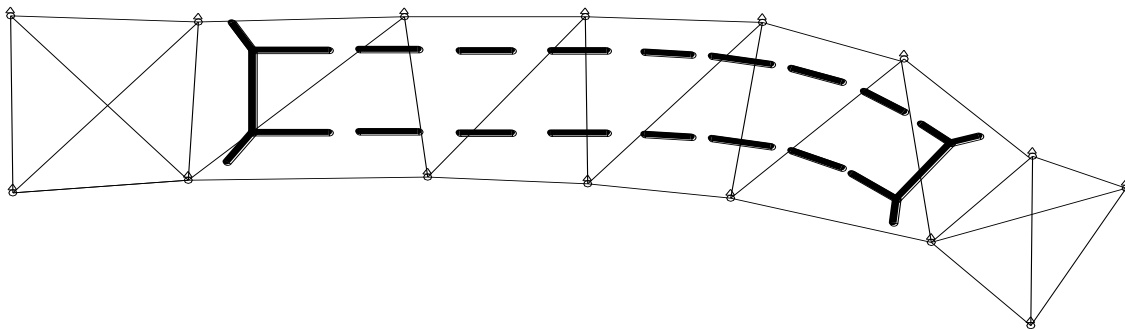
Kada se s kartografskih podloga ne može pouzdano utvrditi međusobno dogledanje između tačaka mikromreže potrebno je izraditi uzdužni profil terena za pravce gdje postoji sumnja da postoji neka prepreka koja onemogućava slobodnu vizuru.

Ukoliko uzdužni profil pokaže da postoje moguće prepreke do nivoa tangiranja sa tačkama između kojih treba provesti terenska mjerenja, tada se na terenu treba provjeriti

da li se spomenute tačke međusobno dogledaju. Tamo gdje se projekt mikromreže ne može ostvariti prema projektu, koriguje se na samom terenu uvijek kada je to moguće.

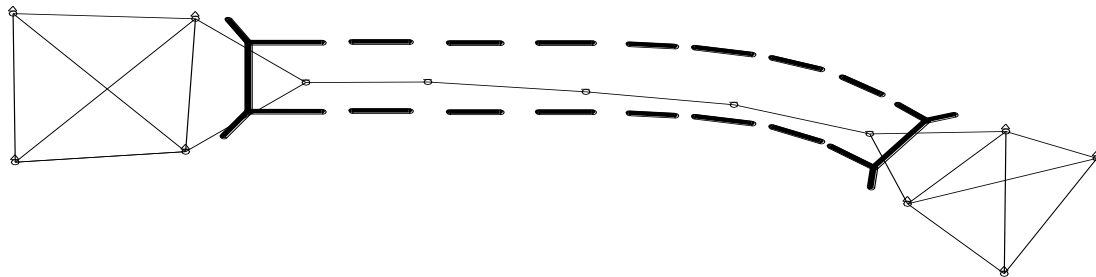
Pri tome treba voditi računa da su mjesta izabrana za stabilizaciju pojedinih tačaka mikromreže geološki stabilna (izbjegavati geološki nestabilan teren kao što su klizišta i sl.), kao i da u neposrednoj blizini vizure nema objekata, zidova, drveća itd. što se zbog uticaja refrakcije može nepovoljno odraziti na rezultate mjerenja.

Tunelska mreža, kao geodetska osnova za izgradnju tunela ima dva dijela: nadzemni i podzemni dio. Nadzemna mreža je uvijek neki oblik triangulacije (Slika 1). Kako je tunel izdužen objekat, tunelska triangulacija je do pojave GPS uređaja, kao po pravilu imala oblik jednostavnog lanca trouglova, kombinovanog sa dva geodetska četvorogla kod početnog i izlaznog portala tunela.



Slika 1. Nadzemna tunelska triangulacija

U posljednje vrijeme, upotrebom novih tehnika i tehnologija, lanac trouglova, koji je bio za mjerenja dosta težak i komplikovan jer je postavljan preko planinskih predjela, zamijenjen je poligonometrijskim vlakom (Slika 2) koji povezuje dvije manje trigonometrijske mreže kod oba portala, a kod kraćih tunela je potpuno napušten jer se rade samo mreže kod portala.



Slika 2. Tunelska triangulacija sa poligonometrijskim vlakom

Dužine strana triangulacijske mreže će zavistiti od mjesnih uslova (konfiguracija terena), broja i razmaka napadnih tačaka za izvođenje radova u tunelu. Što je više napadnih tačaka i što je veća nepravilnost u udaljenosti između njih, to će mreža biti složenija. Prema tome, ako se tunel izgrađuje samo kroz ulazni i izlazni portal, onda će tunelska triangulacija imati formu kao na slikama 1 i 2, pri čemu će se ulazna i izlazna tačka odrediti neposrednim uključanjem u osnovnu triangulaciju.

Nadzemna triangulacija se koristi u projektovanju pozicije tunela na terenu, određivanju tačne dužine tunela i da se omogućavanju tačnog proboja tunela, koji će

zavisiti od tačnosti i nadzemne i podzemne mreže koja se kasnije razvija kroz prokopane djelove tunela.

Materijalizacija tačaka dijela mreže kod oba portala izvodi se pomoću stubova za prisilno centrisanje instrumenta i signala, slično kao kod mostovske mreže. Visina stuba nad zemljom obično je 1.3-1.5m, a u presjeku ima dimenzije 0.4x0.4m ili je oblika valjka (Slika 3). Moguće je gornju površinu uređaja za prisilno centriranje definirati kao visinsku tačku.

Formu nadzemne i podzemne mreže najčešće generišu geodetski stručnjaci u zavisnosti od konfiguracije terena za nadzemni dio i oblika osovine tunela za podzemni dio.



Slika 3. Izgled tačaka tunelske mreže za posebne namjene

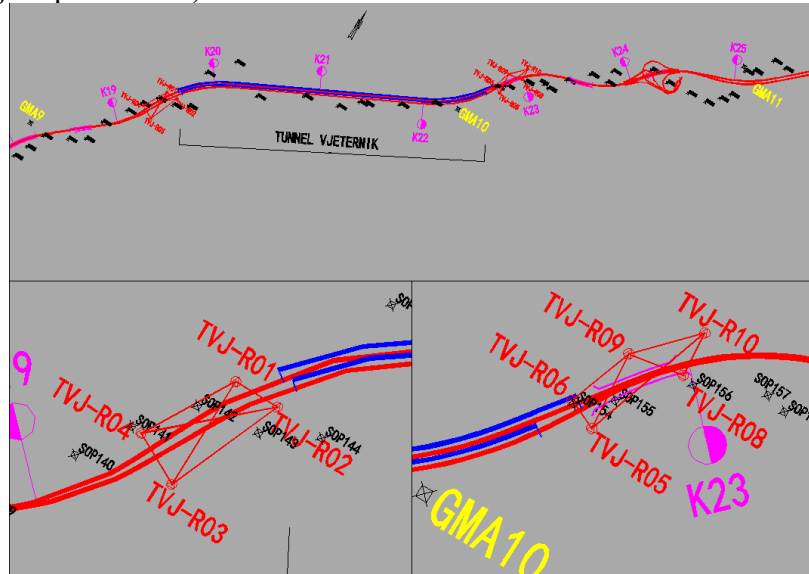
U posljednje vrijeme, razvojem GPS tehnologije sve više se ova metoda koristi kod određivanja koordinata tačaka spoljne tunelske geodetske mreže, naročito kod tunela veće dužine (na svim tunelskim mrežama dionice Autoputa Smokovac Mateševo korišćena je ova metoda).

S obzirom da su tuneli najčešće locirani u teško pristupačnim terenima, i obzirom da je za terestičko određivanje mreže potrebno ostvariti međusobna dogledanja između tačaka 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 nasuprot klasičnom terestričkom načinu prilikom razvijanja geodetske osnove ogleda se u naknadnim izmjenama projekta, kada je potrebno izvršiti dodatna mjerenja, budući da se GPS mjerenja mogu izvesti vrlo brzo nezavisno od vremenskih uslova i uklopiti u već postojeću mrežu.

Najčešće, prije nego što počnu radovi na proboju tunela već postoji operativni poligon razvijen za potrebe gradnje saobraćajnice. Za uklapanje slobodne GPS mreže potrebno je mjerenjima obuhvatiti i tačke operativnog poligona na ulaznom i izlaznom portalu, odnosno tačke državne trigonometrijske mreže kada ne postoji operativni poligon, i nakon sprovedenog izravnjanja sve tačke transformisati u državni koordinatni sistem. Pri ovom postupku ne dolazi do deformacija ni uglova ni dužina. Osim toga, sa obzirom da se prilikom izravnjanja GPS-om mjerenih podataka ponekad ne može utvrditi

iz obrađenih vektora postojanje moguće greške, potrebno je prije računanja podzemne poligonometrije poređenjem međusobnih udaljenosti (iz direktnih mjerenja na terenu i koordinata dobijenih transformacijom u državni koordinatni sistem) ustanoviti pouzdanost svake pojedine tačke mikromreže. Radi dobijanja što preciznijih koordinata koristi se statička GPS metoda sa unaprijed napravljenim planom opažanja da bi se dobilo što veći broj zatvorenih poligona za lakšu o bolju obradu dobijenih podataka.

Na Slici 4 prikazan je raspored tačaka tunelske mikromreže na tunelu Vjeternik (dužina jedne cijevi preko 3km).



Slika 4. Izgled tačaka tunelske mreže na tunelu Vjeternik

Na lokacijama tačaka tunelske triangulacije mora biti obezbijeđeno otvoreno nebo, radio vidljivost i drugi uslovi neophodni za primjenu satelitske GPS tehnologije a na istima treba biti obezbijeđena i optička vidljivost, za potrebe korišćenja terestričke mjerne tehnologije.

Istraživanjima na postignutim rezultatima dobijenih iz slobodnih mreža određenih GPS-om i klasičnim terestričkim mjerenjima, je pokazano da ne postoji značajna razlika u tačnosti proboja. Iz toga se može zaključiti da se GPS metoda, kao sigurno ekonomičnija, preporučuje kao metoda koju treba koristiti na uspostavljanju horizontalne geodetske osnove za potrebe tunelogradnje.

Analiza rezultata tačnosti proboja u visinskom smislu je pokazala da se u podzemnoj poligonometriji za određivanje visina pojedinih tačaka može u potpunosti geometrijski nivelman zamijeniti trigonometrijskim, ukoliko se mjerenje visinskih razlika trigonometrijskim nivelmanom vrši s instrumentima čija je preciznost mjerenja pravaca 1" i dužina 1mm + 2ppm. Ovo dosta skraćuje postupak sa obzirom na veliki broj izmjerenih visinskih razlika trigonometrijskim nivelmanom (vrše se kontrole iskopa tunela svakih 500m prilikom kojih se ponovno opaža cijela podzemna mreža u određenom broju girusa), budući da se visinske razlike mjere istovremeno s prelomnim uglovima. Pri tome valja napomenuti da se svaka visinska razlika trigonometrijskim nivelmanom mora određivati naprijed i nazad, uzimajući u obzir atmosferske uslove, visine instrumenta i signala, uticaje refrakcije, Zemljine zakrivljenosti i srednje nadmorske visine tačaka.

10.3 Podzemne tunelske mreže

Nakon određivanja koordinata tačaka spoljašnje mreže pristupa se iskopu tunela koji se zajedno sa svim ostalim podzemnim radovima prati kroz privremenu unutrašnju mrežu. Prije toga potrebno je orjentisati podzemnu mrežu, tj uspostaviti geometrijsku vezu između nje i nadzemne mreže jer obje moraju biti određene u istom koordinatnom sistemu.

Kod tunela, za orijentaciju su karakteristična dva slučaja: kada se prenos direkcionog ugla i koordinata izvodi kroz tunelske portale i slučaj prenosa ovih elemenata kroz vertikalna okna.

Slučaj orijentacija kroz vertikalno okno se sreće u rudarstvu i pri gradnji metroa. Žiro teodolit ima žiroskop koji omogućuje određivanje pravca sjevera. Orijentacija pomoću žiro teodolita je danas sve više primjenjiva, jer ne zahtijeva i ne traži prekid drugih radova u tunelu. Ovim teodolitom se može izmjeriti direkciono ugao sa tačnošću $\pm 4-10''$.

Podzemna mreža je nekad razvijana kroz tunel, načešće preko poligonskog vlaka čije tačke su bile materijalizovane u sredini kalote probijenog tunela. Taj vlak je bio dosta nesiguran jer je u stvari to bio takozvani slijepi poligonski vlak. Danas se ova metoda više ne koristi.

Kada se prenos direkcionog ugla i koordinata vrši preko tunelskih portala postoji nekoliko načina za taj postupak kao i način stabilizacije tačaka podzemne mreže.

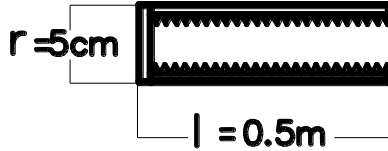
Ove tačke je moguće postaviti na bočni zid prije betoniranja sekundarne obloge na način što se u njega ugrađuje postolja sa položajnim zavrtnjem (Slika 5).



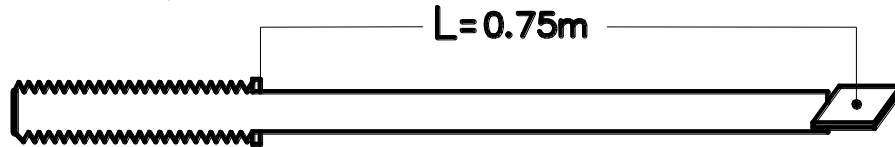
Slika 5. Izgled privremene tačke tunelske mreže (Tip 1)

Materijalizacija tačaka podzemne mreže može da se izvodi i sa specijalnim šipkama stalne dužine koje na jednom kraju imaju pločicu sa rupicom (Slika 6) u sredini iznad koje se centriše instrument i signal a na drugom kraju zavrtnanj kojim se šipka uvrće u jednu metalnu cijev sa unutrašnjim navojem koja je ugrađena u stijenu tunela.

narezana metalna šipka koja se ugradjuje u zid tunela

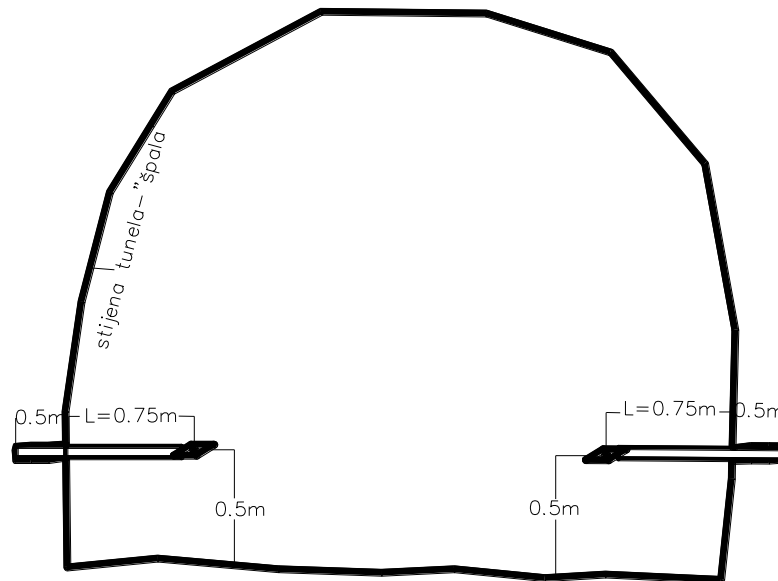


prenosna metalna šipka stalne dužine



Slika 6. Izgled privremene tačke tunelske mreže (Tip 2)

Prednost ovog načina sastoji se u tome, što prije svega ovim tačkama ne opterećujemo normalnu komunikaciju kroz tunel (Slika 7) jer su tačke ugrađene u „špalu” (bočni zid), lako se pronalaze, dobro su zaštićene od eventualnog uništenja, nakon izvršenih mjerenja, šipke se odvrnu i pakuju sa ostalim geodetskim priborom. Centrisanje instrumenta je omogućeno iznad tačke, jer se instrument u toku mjerenja nalazi uz sam zid tunela, tako da ne opterećuje normalnu komunikaciju i rad ostalim izvođačima radova.



Slika 7. Materijalizacija tačke podzemne mreže (Tip 2)

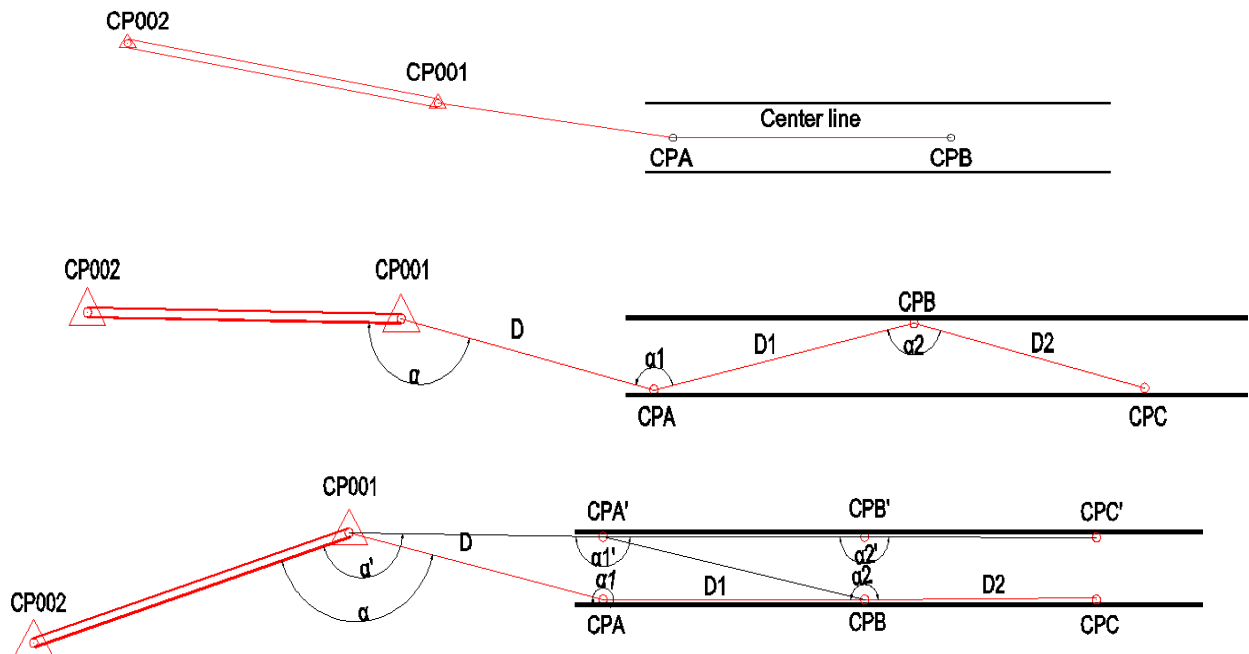
Za potrebe mjerenja izrađuju se najmanje četiri šipke iste dužine, sa graničnikom koji spaja šipku sa dijelom u koji se navrće, uvijek do kraja, jer od dužine šipke zavisi položaj rupice na kraju šipke a to znači i položaj poligonske tačke.

Treći način stabilizacije kontrolnih tačaka podzemne mreže je njihova materijalizacija direktno na izbetonirani dio u temelju tunela. Ovdje treba imati u vidu da se tačke kvalitetno stabilizuju a da pri tome ne smetaju prilikom transporta kamiona (Slika 8). Ovakve stabilizovane tačke se obično postavljaju na samim portalima tunela, služe za orijentaciju i na njima se signal obavezno centriše pomoću držača za prizmu.



Slika 8. Izgled privremene tačke tunelske mreže (Tip 3)

Koordinate privremenih tačaka unutrašnje tunelske mreže se sukcesivno određuju zajedno sa prokopom tunela. Ove tačke se stabilizuju u dijelu gdje je tunel ravan na 150 – 250m a u dijelu gdje je tunel zakrivljen, dužina poligonske stanice će biti najmanje 70m. One služe za praćenje iskopa, postavljanje remenata, praćenje primarne i sekundarne obloge kao i praćenje konvergencije u tunelu. Određivanju koordinata ovih tačaka se mora pristupiti maksimalno oprezno sa najpreciznijim instrumentima i mjerenjem uglova i visinskih razlika u bar dva girusa.

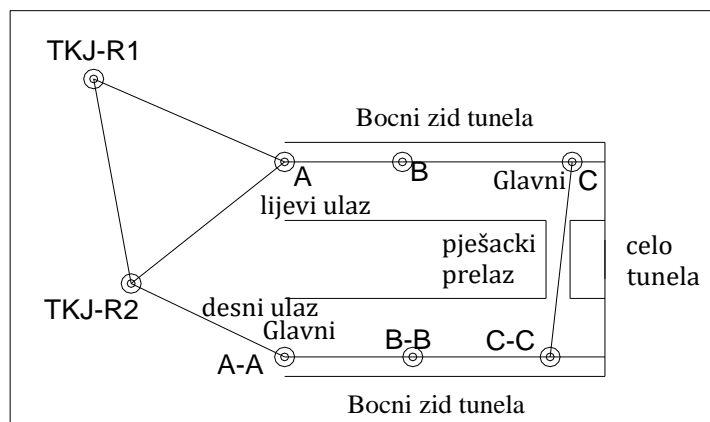
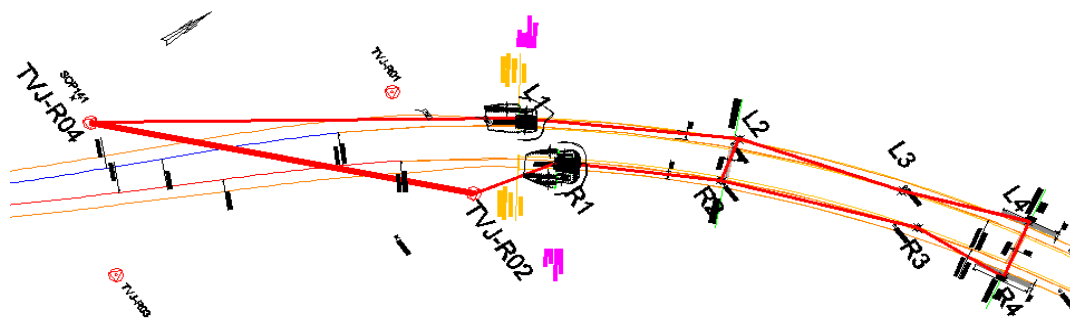


Slika 9. Oblici privremene unutrašnje tunelske mreže

Prilikom probijanja višetračnih tunela (autoput) situacija sa određivanjem koordinata tačaka privremene unutrašnje mreže je nešto povoljnija. Ovdje je moguće kroz poprečne prolaze koji se postavljaju na cca 250m (Slika 10) zatvoriti poligonski vlak na tačke spoljašnje tunelske mreže (Slika 11). Na ovaj način je moguće izravnati koordinate unutrašnjih tačaka i time povećati njihovu tačnost.



Slika 10. Poprečna veza u tunelu



Slika 11. Zatvoreni poligonski vlak kroz poprečnu vezu u tunelu

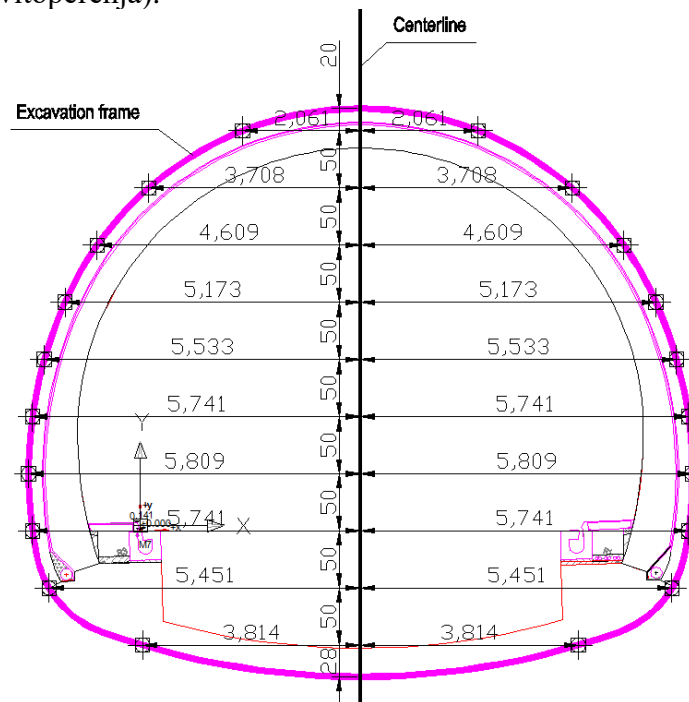
Pri proboju tunela treba osigurati tačnost ne samo u horizontalnom nego i u visinskom smislu. Radi osiguranja prenosa visina u tunel i zbog izgradnje podzemnih građevina, potrebno je na površini u blizini tunela razviti visinsku geodetsku osnovu. Sve napadne tačke tunela trebaju biti međusobno povezane nivelmanskom mrežom. Tačke visinske geodetske osnove (reperi) moraju biti brižljivo stabilizirane i osigurane. Tako posebno razvijenu mrežu treba priključiti na više repera državne nivelmanske mreže, pri tome nastojati da se priključak izvrši na repere što je moguće višeg reda. Za repere na koje se vrši priključak potrebno je provesti kontrolu njihove stabilnosti.

Mreža visinskih tačaka se dijeli na repere nadzemne i repere podzemne nivelmanske mreže, a njihova veza se ostvaruje kroz ulazni, odnosno izlazni portal. Tačnost mjerenja za tako razvijenu mrežu računa se na osnovu potrebne visinske tačnosti tokom gradnje tunela, kao i u momentu proboja. Mreža visinskih tačaka je osnova za sva visinska mjerenja i obilježavanja tokom gradnje tunela, kao i kontrolna mjerenja.

Kao što je već rečeno, sa poboljšanjem preciznosti totalnih stanica, sve se više koristi trigonometrijski nivelman za kontrolu visine. Ovdje se istovremeno sa izravanjem unutrašnje mreže u položajnom smislu vriši i njeno visinsko izravanje mjereći vertikalne uglove i dužine pa se tako dobija unutrašnja tunnelska 3D mreža.

10.4 Geodetski radovi pri iskopu tunela

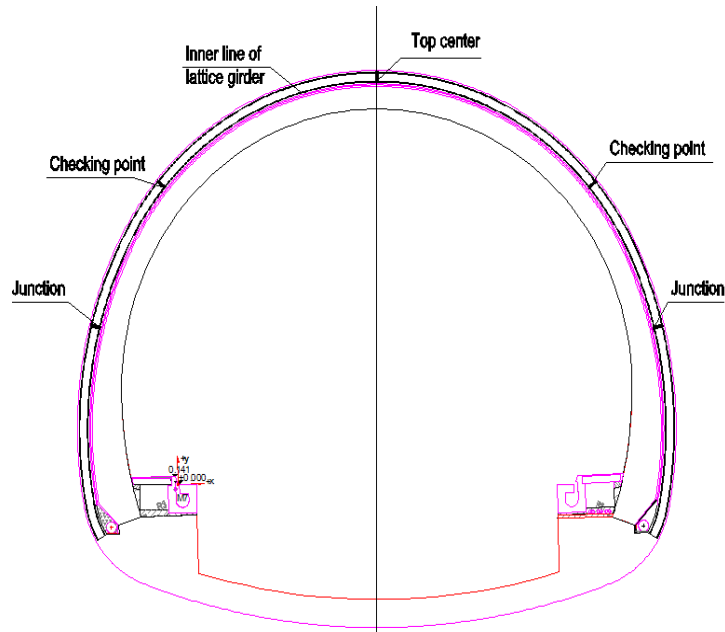
Iskop se vrši obilježavanjem njegove linije na čelu tunela. Iz projekta tunela se uzimaju karakteristični profili koji se nanose na osovinu saobraćajnice iz kojih se očitavaju koordinate linija iskopa na odgovarajućim stacionažama. Ova linija se može računati odnosu na osu tunela (Slika 12). Pri proračunu ovih koordinata posebno se treba voditi računa o horizontalnim i vertikalnim krivinama osovine kao i promjenama poprečnih padova (vitoperenja).



Slika 12. Obilježavanje iskopa u odnosu na centralnu osu tunela

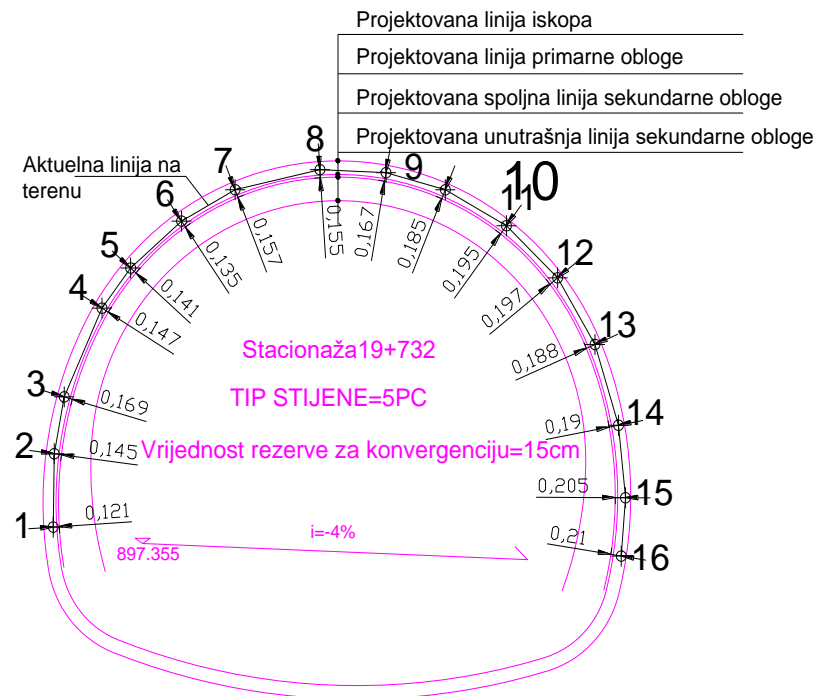
Tradicionalnom metodom iskolčavanja linije iskopa unaprijed se označava projektni okvir a zatim se mjeri rastojanje od konturne linije do centralne linije na svakih 0.5m.

U lošijim kategorijama terena potrebno je postavljati rešetkaste nosače – remenate. Rešetkasti nosač (remenata) je fiksirani model čije su dimenzije predviđene projektom. On se fiksira pomoću 5 tačaka se označavaju na istim pozicijama (Slika 13) na čelu kosine.



Slika 13. Tačke za fiksiranje remenata

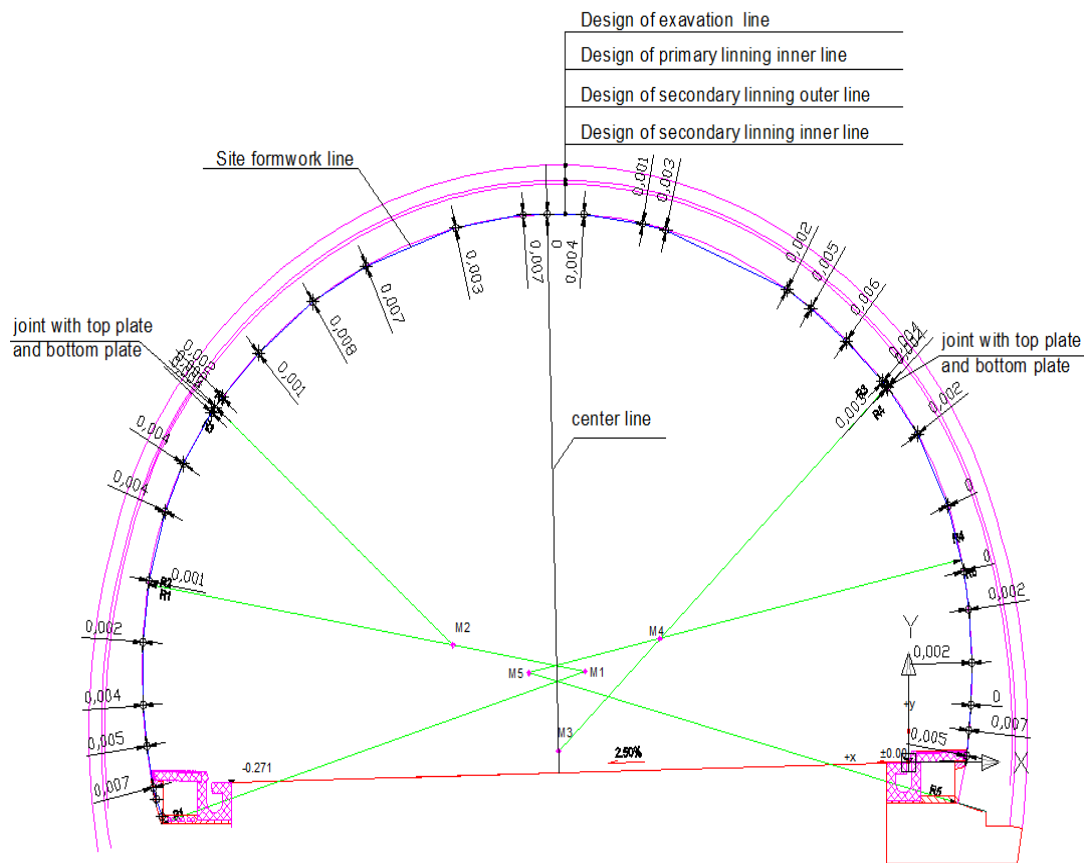
Prilikom izvođenja terena potrebno je praviti geodetske izvještaje na kojima će biti prikazane koordinate tačaka na profilima kao i njihova rastojanja od odgovarajuće projektovane linije. Na Slici 14 su prikazana rastojanja aktuelne linije na terenu od projektovane unutrašnje linije sekundarne obloge. Uz ovaj crtež se pravi i spisak koordinata mjerenih tačaka.



Slika 14. Geodetska kontrola tunelskih profila

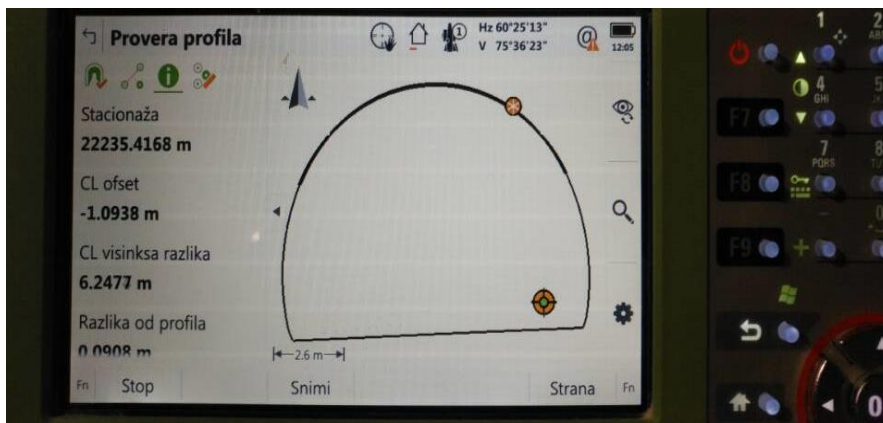
U zavisnosti od načina iskopa tunela, kao i kategorije zemljišta mogu se posebno obilježavati različiti elementi tunela: gornji svod, lijevi i desni oporac kao i donji svod (temelj).

Prije postavljanja sekundarne obloge potrebno je i geodetski provjeriti dimenzije pokretne oplata. Nakon sastavljanja pokretne oplata, totalna stanica se koristi za snimanje obrisa oplata (pomoću fiksnih tačaka kao kod remenata) koje se porede sa projektovanim linijama sekundarne obloge (Slika 15).



Slika 15. Klizna oplata i njena kontrola

Sa razvojem elektronike i precizne mehanike razvijaju se i odgovarajući softveri za totalne stanice za rad sa tunelima. Jedan od takvih programa je *Roadrunner tunnel* i njegov prateći softver *Amberg* koji se instalira u PC računar. U *Amberg* se ubacuju podaci o osovini tunela, niveleti tunela, poprečnim padovima (njihove promjene na stacionažama iz projekta) i kategorizaciji zemljišta (za svaku kategoriju je u projektu definisan karakterističan poprečni profil). Na ovaj način se u totalnu stanicu mogu unijeti sve projektovane karakteristične površi u tunelu: površ iskopa, površ primarne obloge, površ sekundarne obloge itd. Nakon klasične orijentacije instrumenta u podzemnoj mreži tunela i pokretanjem ovog programa može se provjeriti bilo koja tačka u tunelu i njeno rastojanje od izabrane površi (Slika 16). Neki od tunelskih programa se mogu instalirati i preko aplikacija na mobilnom telefonu koji se pomoću bluetooth-a poveže sa totalnom stanicom i na taj način daju podatke za obilježavanje. U okviru ove aplikacije potrebno je unijeti podatke o osovini tunela.



Slika 16. Prikaz iz tunelskog programa za totalnu stanicu

Treba napomenuti da danas postoje još napredniji i sofisticiraniji programi (npr. *TMS office*) koji u sistemu sa odgovarajućom mehanizacijom mogu služiti za automatizaciju njenog rada.

U posljednje vrijeme sve je veća i upotreba laserskih skenera (biće opisani u narednom predavanju) u mjerenjima u tunelu. Pomoću njih je moguće dobiti oblak tačaka sa kompletnim 3D modelom terena ili snimljene profile sa velikim brojem tačaka.

10.5 Proračun tačnosti proboja tunela

Građevinski inženjer treba da bude načelno obaviješten o formi mreže radi učešća u izradi tačaka nadzemne i podzemne mreže ali je njegovo učešće posebno važno kod određivanja dozvoljene tolerancije razmimoilaženja osovina odnosno koliko je dozvoljeno odstupanje u proboju tunela u slučajevima kad se proboj izvodi kroz dvije ili više napadnih tačaka.

Prema tome, projektant će u zavisnosti od vrste tunela, načina proboja i ugrađivanja betonske oplata, projektovati dozvoljeno odstupanje mimoilaženja osovina tunela obilježenih sa podzemne mreže kod oba portala.

Tačnost proboja tunela zavisice od:

- tačnosti nadzemne i podzemne geodetske osnove,
- metoda mjerenja,
- načina prenosa elemenata u tunel (bilo da se radi o prenosu kroz ulazne portale ili vertikalna okna),
- načina prostiranja tunela (pravac, kružni luk) i načina građenja (puni profil, potkop),
- grešaka pri građenju.

Greške pri proboju tunela su rezultat ukupnog djelovanja svih navedenih faktora.

Malo dopušteno odstupanje pri proboju dovodi do potrebe da se i nadzemna i podzemna geodetska osnova moraju odrediti sa visokom tačnošću kako se ne bi prekoračilo dozvoljeno odstupanje i time prouzrokovale velike štete u gradnji tunela.

U tački proboja tunela mogu nastati odstupanja od projektovanog položaja trase:

- Po smjeru q_p ;
- Po dužini q_l ;
- U visinskom smislu q_h .

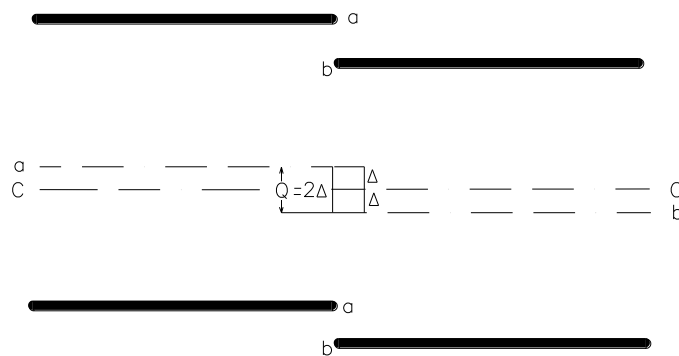
Uzdužna greška q_l za tunele u pravcu nema veliko značenje jer će se susret osovina dogoditi malo ranije ili kasnije bez negativnih posledica. Ova greška ima veliki značaj ako je tunel u krivini ili u vezi se drugim objektima

Poprečna greška proboja štetna je za sve vrste tunela. Usled greške dolazi do nepoklapanja profila tunela na mjestu susreta radova (tzv. paralaksa). Na tim mjestima se kod željezničkih tunela osjećaju bočni udari a ako je riječ o tunelima za vodu pod pritiskom tu može doći do razaranja zidova od vodenih struja.

Visinska greška je takođe štetna kada pređe unaprijed zadato odstupanje. Ova greška nastaje usled grešaka visinske osnove i visinskog obilježavanja u procesu građenja tunela.

Osa tunela CC (Slika 17), ako ne bi postojale greške mjerenja, trebalo bi da se poklopi na mjestu susreta dva proboja.

Međutim, zbog poznate činjenice da sva mjerenja sadrže neizbježne greške mjerenja, to će se odraziti kao mimoilaženje osa a i b za neku vrijednost $Q = 2\Delta$.



Slika 17. Dozvoljena odstupanja mimoilaženja osovina

Veličina dopuštenog odstupanja uslovljena je veličinom gabaritne rezerve, koju određuje projektant. Ovaj podatak geodetama omogućava da izvrše proračun tačnosti nadzemnih i podzemnih mjerenja, da bi se proboj tunela izveo s dozvoljenom tolerancijom.

Preciznost u geodeziji razmatra se na osnovu standardnih odstupanja. Polazeći od dozvoljenog odstupanja koje je, obično, zadano projektom, trebalo bi usvojiti odnos između standardnog i dozvoljenog odstupanja (tolerancije). Pri iskolčenju tunelskih osa uzima se da je standardno odstupanje jednako polovini tolerancije.

Ako je projektom predviđeno granično odstupanje u veličini Δ , onda će međusobno odstupanje (razmimoilaženje) radnih osa biti 2Δ , pa će proračun tačnosti u probouju tunela polaziti od ove veličine kao date tolerancije:

$$Q = 2\Delta / 2 = \Delta ,$$

gdje je Q - ukupna srednja greška svih mjerenja.

Sada se na osnovu ove vrijednosti vrši izbor metode, instrumenata i proračunava tačnost sa kojima treba vršiti mjerenja elementarnih veličina.

U literaturi se mogu naći dozvoljena odstupanja probouja za pravolinijske tunele koja se računaju po formulama:

$$\Delta_p = \pm 8.5 * \sqrt{L/2} \text{ za poprečno odstupanje,}$$

$$\Delta_H = \pm 3.5 \sqrt{L/2} \text{ za visinsko odstupanje,}$$

Gdje se:

$$\Delta_p \text{ i } \Delta_H \text{ dobijaju [cm] ako se L izrazi u [km].}$$

10.6 Mjerenja konvergencije i oskultacije u tunelima

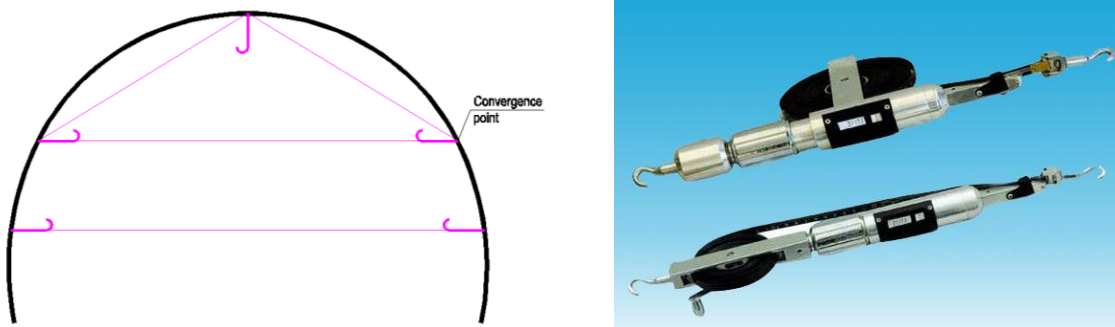
Postoji još jedna vrsta geodetskih mjerenja koja je u toku izgradnje tunela veoma važna, jer je povezana sa neposrednom bezbjednošću izvođača radova. Radi se o mjerenju „konvergencije” tunelskih zidova i kalote.

Poznata je činjenica, da kod izrade probouja tunela, postoji tendencija zidova tunela i kalote ka izvjesnom sažimanju, odnosno težnji da se uruše u otkopani dio.

Da bi se to spriječilo u posljednje vrijeme se radi betonska obloga tunela skoro paralelno sa iskopom, pa ipak zbog tehnologije radova, uvijek ostaje jedan dio između izvedene obloge i probijenog dijela na kojemu je moguće da dođe do obrušavanja izazvanog konvergencijom.

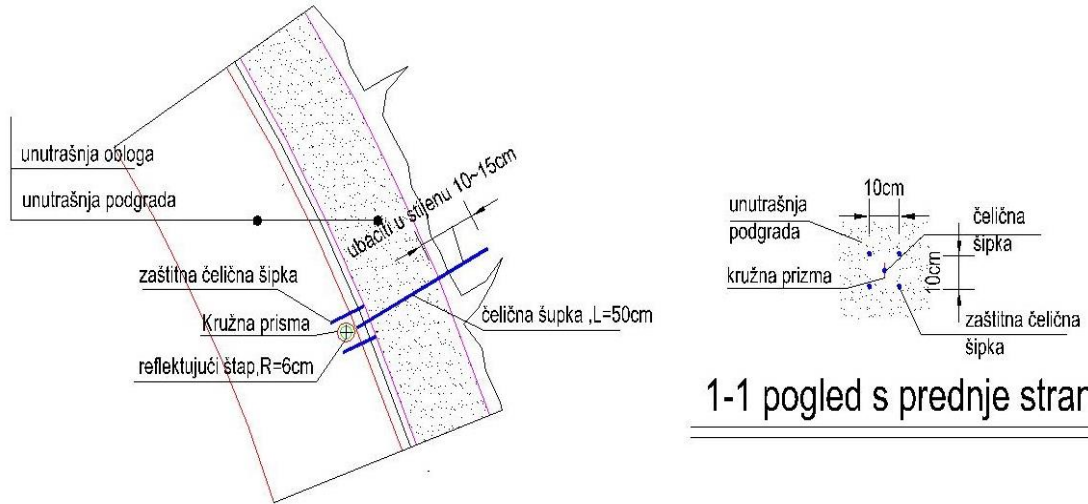
Mjerenja konvergencije se vrše po profilima koje zadaje projektant ili nadzorni organ u tunelu. Pored lokacije profila, projektant ili nadzorni organ u tunelu zadaju i tačke na kojima treba mjeriti konvergenciju.

Ranije su se konvergencije mjerile preciznim mjerenjima dužina na mjernim mjestima pomoću specijalnih instrumenata (Slika 18).



Slika 18. Mjerenje konvergencija mjerenjem dužina

Sa unapređenjem preciznosti totalnih stanica mijenja se pristup ovim mjerenjima. Sada se na mjernim mjestima ugrađuju reflektori (Slika 19) na projektovanim pozicijama kojima se određuju 3D koordinate da bi se izračunale konvergencije i pomjeranja. Reflektirajuća prizma treba biti postavljena na armaturi koja je ugrađena u zid i čiji kraj treba da bude zaobljen na način da se ona sa njega može stavljati i skidati. Ovo je naročito bitno zbog toga što prilikom bušenja tunela miniranjem ove prizme treba privremeno skidati sa profila bliskih čelu da iste ne bi bile uništene. Ako je tačka mjerenja oštećena, treba je odmah zamijeniti bušenjem rupe u blizini prethodne tačke mjerenja i postaviti armaturu u rupu sa malterom. Obično se konvergencija mjeri na pet mjernih mjesta i to jedna, ključna tačka smještena na kruni tunela, dvije tačke sa strane (srednji dio iskopanog prostora u prvoj fazi iskopavanja), zatim dvije tačke smještene na bočnim zidovima.

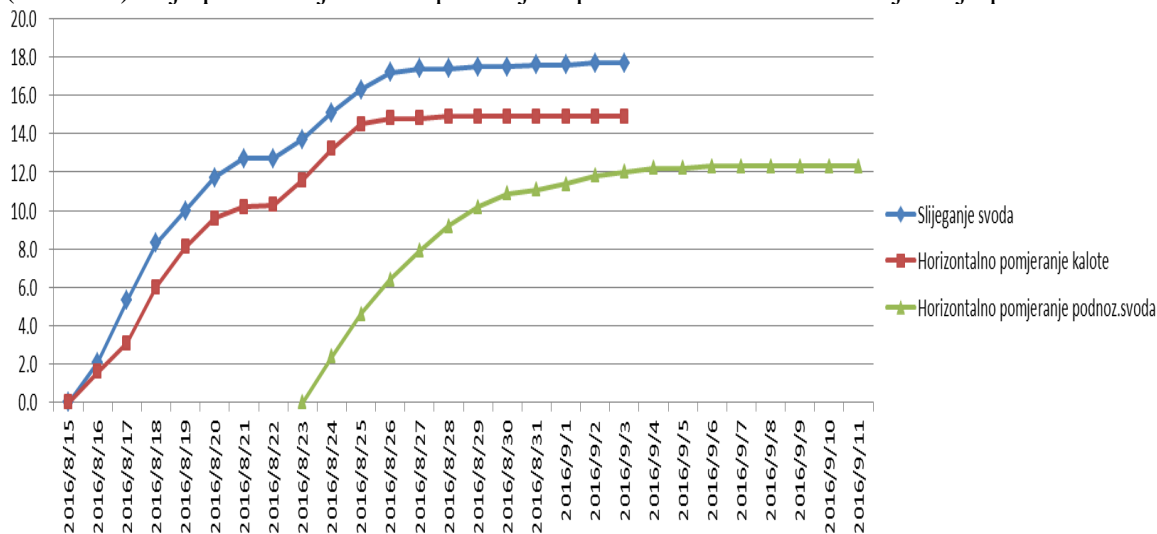


Slika 18. Reflektori (prizme) za mjerenje konvergencije u tunelima sa načinom stabilizacije

Mjerenje se vrši po određenoj frekvenciji i tada se poređenjem dobijenih koordinata sa nultim mjerenjem može dobiti konvergentna deformacija. Bušenje tunela izaziva pomjeranje zemljišta, pa se test profili određuju na osnovu geoloških uslova i tipova ojačanja. Profili provjere i profili mjerenja rade se u intervalu od 20m-50m. Na području gdje su geološki uslovi loši, test profili se mjere na kraćem intervalu. Veoma je važno da se tačke na profilu za konvergenciju stabilizuju i odrede njihove nulte koordinate najviše 24h od miniranja jer su tada očekivana pomjeranja najveća.

Frekvencija mjerenja se utvrđuje u zavisnosti od dobijenih pomjeranja. U početku se mjerenja vrše svakodnevno, zatim kad dođe do postepenog umirivanja sve rjeđe dok se ne postignu projektom predviđeni zahtjevi za prestanak mjerenja konvergencije. Pri ovoj metodi mjerenja, uporedo sa mjerenjem konvergencije, tj rastojanja među postavljenim mjernim tačkama računaju se i ukupna trodimenzionalna pomjeranja tačaka.

Nakon što se završe mjerenja, izrađuje se dijagram sa osama vrijeme i pomjeranje (Slika 19) koja predstavlja odnos položaja u prostoru sa vremenom mjerenja podataka.



Slika 19. Dijagram vrijeme – pomjeranje

Prema analizi podataka praćenja, može se predvidjeti konačna vrijednost slijeganja i stanje bezbjednosti tunela. Mjerenja ukazuju na promjene vremena ili razdaljine od čela iskopa kroz krivulju slijeganja i konvergencije. S obzirom na tendenciju stabilizacije, određuje se je li potporna konstrukcija na mjeranom mjestu odgovarajuća i adekvatna. Ako nije stabilna, može se koristiti za provjeru oblasti koja se obrađuje, a usvaja se čak i dodatno i dopunsko ojačanje.

Konačne referentne vrijednosti za svaki tip profila koji se prati i kontroliše (a koje su date od strane projektanta ili stručnog nadzora) i provjerene vrijednosti se upoređuju da bi se analizirao opseg i snaga obrade i ojačavanja.

Maksimalno dozvoljene deformacije zavise od tipa stijene koji utvrđuju geolozi i definisane su u projektu. Obično je projektom definisano da kada mjerenja pokažu da je stopa radijalnog izmiještanja na svakoj poziciji periferije tunela manja od 4mm za 30 dana, smatra se da je okolna stijena generalno dostigla stabilnost. U tom momentu se demontiraju mjerne tačke i izvode se radovi na sekundarnoj oblogi.

Osim praćenja pomjeranja konvergencije na terenu je potrebno i pratiti vertikalno slijeganje i horizontalno izmiještanje površine tla.

Ova mjerenja obuhvataju dvije pozicije - portali tunela i lokacije sa plitkim nadslojem između dva portala tunela, kao što su doline (Slika 20). Kada je debljina nadsloja iznad svoda tunela manja od širine tunela, neophodno je pratiti stabilnost okolnog tla. Ako postoje neka pomjeranja iznad dozvoljenih tolerancija, izgradnja se odmah obustavlja i moraju se preduzeti mjere da ne bi došlo do urušavanja tunela. Sve ove koordinate tačaka praćenja treba da se odrede pomoću tačaka referentne mreže.



Slika 20. Tačke mjerenja za mjerenje slijeganja tla u plitko ukopanim presjecima

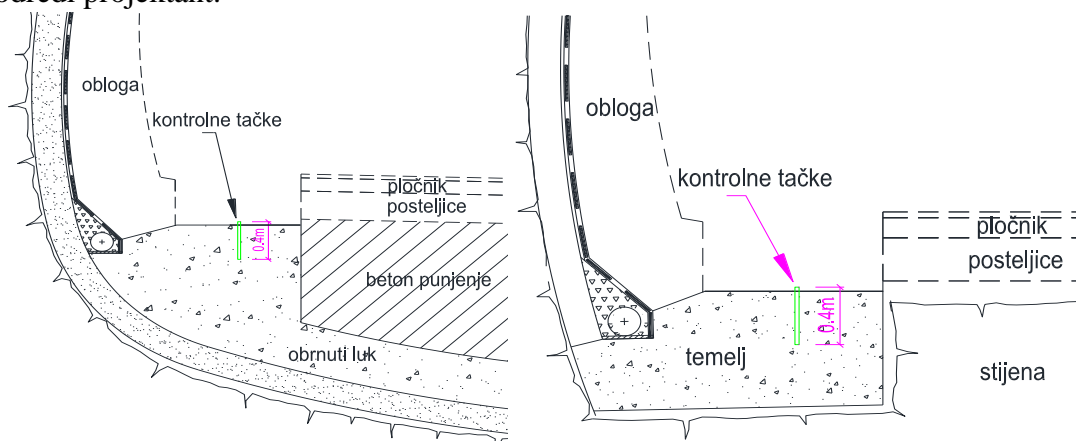
Nakon kompletno završenih radova i početka perioda eksploatacije tunela, u zavisnosti od metode izgradnje tunela u njema se vrše geodetska mjerenja osmatranja stabilnosti tunela, takozvane „oskultacije”.

Projekat oskultacije tunela treba da urade građevinski i geodetski inženjeri, svaki za svoj dio radova.

Građevinski inženjer, još za vrijeme radova u tunelu, treba da projektuje profile na kojima će se vršiti oskultacije i da se na vrijeme ugrade neophodne fluorescentne markice ili reflektujuće prizme koje će poslužiti za oskultacije na sličan način kao kod mjerenja konvergencije.

Geodetski stručnjak u projektu oskultacije, treba da projektuje osnovnu mrežu sa koje će se vršiti mjerenja, način stabilizacije tačaka, izbor instrumenata i metodu mjerenja, sa prethodnom ocjenom tačnosti koja će kao i kod proboja zavisiti od tolerancija koja zadaje projektant.

Da bi se vršile oskultacije tunela potrebno je stabilizovati i odrediti koordinate stalnih tačaka unutrašnje tunelske mreže. Ove tačke se postavljaju u beton oporca, i obično se njihova stabilizacija vrši čeličnim bolcnama na čijem čelu se nalazi urezani krst. Spoljašnji dio čelika treba da bude 1cm dug i da pokriven gvozdenom pločom ili daskama. Na Slici 21 se vidi način i mjesto stabilizacije ovih tačaka za slučaj kada ima i kada nema podnožni svod. Iznad ovih tačaka trebalo bi da stoji znak upozorenja i mjere zaštite za spriječavanje štete od vozila ili nečeg drugog. Nulto mjerenje za oskultaciju, izvodi se odmah po kompletnom završetku radova a kontrolna mjerenja u terminima koje odredi projektant.



Slika 21. Mjesta stabilizacije trajne tačke tunelske mreže

Prilikom bušenja tunela novijim metodama sa primarnom oblogom oskultacije tunela se vrše samo po potrebi ukoliko je vizuelniom pregledom utvrđeno da se na sekundarnoj oblogi javljaju pukotine.