

# Građenje cestovnih tunela s osvrtom na posebnosti pri izgradnji tunela Šubir na autocesti A1 DANI PROMETNICA 2012

**mr.sc. Ivan Mustapić, dipl.ing.građ.**

*Institut IGH d.d., Zavod za projektiranje prometnica, Odjel za tunele  
Janka Rakuše 1, 10000 Zagreb*

## 1 Uvod

U ovom radu promišljaju se osnove gradnje cestovnih tunela. U početnom teoretskom dijelu navode se zajednička obilježja gradnje cestovnih tunela općenito, a potom se na primjeru tunela Šubir opisuju određene posebnosti praktične gradnje cestovnih tunela.



Slika 1. Tipičan tunel na autocesti

## 2 Građenje cestovnih tunela

Jedna od „klasičnih“ definicija tunelogradnje kaže da je „**građenje tunela kontinuirano probijanje određene šupljine kroz zemljanu koru**“ [1].

Iz te definicije proizlazi dojam jednostavnosti ove vrste podzemnih radova, no gradnja cestovnih tunela spada u razmjerno složene graditeljske pothvate.

Obzirom na oblik, položaj i dužinu, te geologiju stijenske mase kroz koju prolaze, cestovni tuneli definiraju se kao unikatne linijske građevine i kao jednokratni investicijski projekti koji su strateški značajni po širu društvenu zajednicu.

Izgradnja takvih tunela predstavlja značajan graditeljski pothvat koji bi se morao realizirati **ekonomično, pravodobno i tehnički kvalitetno**, što znači da je kod izgradnje tunela općenito nužno postići slijedeće ciljeve [2]:

- **najmanje moguće troškove iskopa tunela** u odnosu na planirane, odnosno najmanje moguće troškove materijala, radne snage i strojnog rada (uključujući i troškove podgradnog sustava) po jedinici iskopa stijenske mase tunela,
- **najveće moguće napredovanje iskopa tunela**, odnosno najkraći mogući rok proboja tunela ili maksimalno/optimalno iskorištenje učinaka primijenjene tehnike i tehnologije na probijanju tunela i
- **potpunu i trajnu stabilnost nosive konstrukcije podgrade tunela**, odnosno iskopanog profila u projektiranim okvirima uz zadovoljenje svih pravila struke i ostalih odgovarajućih propisa i zakona.

Na troškove, rok i kvalitetu izvedbe tunela u najvećoj mjeri utječe način (tehnologija) izvođenja građevinskih radova, **posebice tehnologija iskopa**. Pored toga značajan utjecaj imaju i geologija stijenske mase, opremljenost izvođača radova i organizacija rada, eventualna faznost gradnje, karakteristike samog tunela te razni nepredvidivi čimbenici kojih pri probijanju tunela ne nedostaje. Zbog toga je **prije početka radova na izgradnji tunela ključno izvršiti izbor odgovarajuće tehnologije građenja** (posebice tehnologije iskopa) i optimalnog korištenja iste uvažavajući bitne i specifične karakteristike svakog tunela (broj i duljina tunelskih cijevi, širina poprečnog presjeka, raspored poprečnih prolaza, moguća blizina susjednih objekata...).

## 2.1 Tehnologija građenja tunela

Izgradnja tunela obuhvaća relativno mali broj vrsta građevinskih radova. Tehnologija građenja tunela obuhvaća slijedeće **tri osnovne grupe podzemnih radova** (bez radova vezanih uz namjenu tunela) [3]:

- radovi na iskopu profila tunela (zemljani radovi u širem smislu pojma), odnosno **iskop tunela**,
- radovi na podgrađivanju (osiguranju, te odvodnji) iskopanog profila tunela, odnosno **primarna podgrada tunela**,
- radovi na izvedbi stalne obloge podgrađenog profila tunela (sa eventualnom prethodnom izvedbom izolacije i eventualnom naknadnom izvedbom radova na injektiranju oko obloge tunela) odnosno **sekundarna obloga tunela**.

Obzirom da je **primarna podgrada onaj dio konstrukcije koji daje konačnu stabilnost tunela**, onda sekundarna betonska obloga (posebice nearmirana) ima najčešće neke druge funkcije, kao npr.: preuzimanje dijela naprezanja stijenske mase u slučaju da ju primarna podgrada ne može u potpunosti stabilizirati (povećava faktor sigurnosti sistema cjelokupne tunelske obloge), osiguravanje ujednačene unutrašnje površine i poboljšavanje vodonepropusnosti tunelske obloge, davanje tunelu aerodinamičkog oblika, pridržavanje hidroizolacije, izgled, preglednost, mogućnost lakšeg osvjjetljenja i provjetravanja, itd.

Zbog toga **radovi na sekundarnoj betonskoj oblozi ne predstavljaju niti ključnu niti kritičnu aktivnost kod građenja tunela**, posebice što se oni u većini slučajeva odvijaju neovisno od iskopa tunela uglavnom unutar unaprijed (nakon iskopa) utvrđenog i osiguranog prostora.

Iz tog se razloga radovi na izvedbi sekundarne betonske obloge tunela stavljaju u „drugi plan“, odn. **radove iskopa tunela s podgrađivanjem iskopanog profila smatra se ključnom aktivnosti kod izvedbe tunela** [2].

Zbog svoje istovremenosti i međusobne ovisnosti radovi na iskopu i podgrađivanju tunela stavljaju se pod zajednički nazivnik kao **radovi na probijanju tunela**.

**Radovi na probijanju tunela imaju dominantnu ulogu u tehnoekonomskom smislu**, a kao njihov sastavni dio podrazumijevaju se još i odvodnja iskopanog profila, odvoz i odlaganje iskopanog materijala, kao i svi ostali pomoćni radovi u tehnološkom procesu probijanja tunela [3].

Radove na probijanju tunela karakterizira velika upotreba građevinske mehanizacije.

Tunelsku mehanizaciju čine strojevi, uređaji i ostala složena oprema, uglavnom posebne namjene, jer izvode ograničenu vrstu radova. Malo se strojeva standardne građevinske mehanizacije za vanjske radove može primijeniti u tunelogradnji, a ako se i primjenjuju onda su ti strojevi prilagođeni svojom veličinom i ostalim konstrukcijskim obilježjima podzemnim (prostorno skućenim) radovima [3].

Već navedena specifična obilježja tunela (njihov oblik, položaj i dužina, te geologija stijenske mase) određuju tehnologiju njihova građenja, posebice tehnologiju iskopa.

**Najvažnije obilježje za odabir tehnologije građenja, odn. iskopa tunela, je geologija stijenske mase kroz koju tunel prolazi [3].**

Karakteristika tunela je da, obzirom na svoj položaj i dužinu, prolaze uglavnom kroz planinske masive promjenljivih makro i mikro strukturnih odnosno fizičko-mehaničkih svojstava te je **u takvim promjenljivim geološkim uvjetima općenito najpovoljnija uvijek moguća "klasična" tehnologija iskopa tunela bušenjem i miniranjem stijene (tzv. „drill and blast technique“)**, jer se u primjeni razmjerno lakše može prilagoditi neplaniranim promjenama predviđenih geoloških uvjeta podzemnog prostora kroz koji tunel prolazi [3].

Velika većina prometnih tunela u Republici Hrvatskoj prolazi kroz stijenske masive Dinarida (Dalmacija, Lika, Gorski Kotar), koji su uglavnom karbonatne stijene koje karakterizira veliki broj kastrifikacijskih objekata (špilja, dimnjaka) te učestala pojava da se između zona sa stjenkim materijalom nalaze zone ispunjene razlomljenim materijalom ili glinom, tj. vrlo su promjenljivi geološki uvjeti podzemnog prostora.

Iz tog razloga je kod nas kao optimalna tehnologija iskopa prometnih tunela odabrana tzv. klasična ili konvencionalna tehnologija iskopa miniranjem pod određenim uvjetima (tzv. „drill and blast technique“), bazirana na NATM-u (Nova austrijska tunelska metoda), gdje je izboj tunela vršen sa jednog radnog čela u punom profilu (uglavnom), te su tom tehnološkom metodom iskopani gotovo svi tuneli na našim cestama i autocestama [4].

Obzirom na navedene karakteristike geološke strukture stijenske mase, kao i iz razloga nedovoljnih duljina tunela (do 6 km gdje je upitna isplativost takvog načina iskopa) te fazne izgradnje naša dva najduža cestovna tunela (Sveti Rok i Mala Kapela), primjena metode iskopa tunela TBM (Tunnel Boring Machine – Tunelski bušači strojevi) do sada nije korištena na tunelima na našim cestama i autocestama, te iz tog razloga neće biti ni obuhvaćena u ovom radu.

### **2.1.1 Tehnologija iskopa tunela bušenjem i miniranjem („drill and blast technique“)**

Navedena tehnologija podrazumijeva razaranje stijenske mase, odnosno drobljenje pomoću pritiska, topline i akustičkih valova koji nastaju aktiviranjem postavljenog eksploziva unutar stijenske mase [3].

Tehnologija iskopa tunela bušenjem i miniranjem primjenjuje se od sredine 19. stoljeća, te se od tada neprestano usavršava sve do današnjih dana kada je dosegla svoj optimum. Moguća su daljnja

usavršavanja u razvoju visokoproduktivnih bušilica, zatim u razvoju nekih novih vrsta eksploziva, opreme za njihovo aktiviranje, te opreme za automatsko punjenje bušotina eksplozivom [3].

Tehnologija iskopa tunela bušenjem i miniranjem primjenjuje se za tunele svih dimenzija poprečnog profila (dakle i za tunele malih, srednjih i velikih profila), omogućava radove na iskopu u punom profilu ili razradom punog profila, te je lakše prilagodljiva neočekivanim promjenama predviđenih geoloških uvjeta podzemnog prostora kroz koji tunel prolazi.

Iz gore navedenih razloga može se zaključiti da je jedna od osnovnih karakteristika ove tehnologije iskopa i prednost nad drugim tehnologijama iskopa njena **univerzalnost i fleksibilnost u primjeni**.

Tehnologija iskopa tunela bušenjem i miniranjem sastoji se od izvedbe minskih bušotina u određenom rasporedu, nagibu i dužini (tzv. dužina izboja) na čelu iskopa, njihovog punjenja eksplozivom i otpucavanja [3].

Prilikom miniranja, nakon sigurnosti rada, glavna briga se posvećuje [5]:

- čim manjem oštećenju stijenske mase u zidovima iskopa i
- postizanju konture iskopa koja je čim bliže projektiranoj (čim manji prekoprofilski iskop i neminirani dio koji treba biti uklonjen).

Kako bi se ostvarila čim pravilnija kontura iskopa sa minimalnim oštećenjem stijenske mase u zidovima iskopa, danas se uglavnom koriste dvije tehnike miniranja koje se jednim imenom nazivaju „konturnim miniranjem“ (eng. „contour blasting“) [5]:

- tehnika ravnog (glatkog) miniranja (eng. „smoothblasting“),
- tehnika prethodnog odvajanja stijene (eng. „presplitting“).

**Tehnološki proces iskopa tunela bušenjem i miniranjem odvija se ciklički.** Pri tome se nastoji jedan ciklus izboja (dužine od 1,0 m do čak 6,0 m, ovisno o veličini poprečnog presjeka izbijenog otvora, geotehničkim obilježjima stijenske mase i eventualnim restrikcijama miniranja) u potpunosti završiti u jednoj radnoj smjeni (odn. sa istom radnom ekipom) ili barem u jednom radnom danu.

Radni dan u tunelogradnji (zbog kontinuiteta napredovanja na probijanju) je najčešće organiziran u tri smjene, odnosno traje dvadesetičetiri sata (vezano uz to interesantna je konstatacija „da je još Napoleon ukinuo izrabljivanje čovjeka a tunelogradnja ni dan-danas to nije učinila“ [6]).

Jedan ciklus izboja (uključujući istovremeno i međusobno ovisnu izvedbu podgrade) obuhvaća slijedeće radne operacije [3][7]:

- (dolazak smjene radnika, primopredaja poslova)
- **priprema bušenja mina**
  - doprema opreme za bušenje mina
  - namještanje bušaće opreme
  - obilježavanje bušotina mina, kontrola
- **bušenje mina**, kontrola
- **punjenje bušotina eksplozivom**, povezivanje i opskrba mina inicijalnim sredstvima, kontrola
- **uklanjanje** (otprema) bušaće opreme, radnika i ostalih resursa, kontrola
- priprema za otpucavanje eksploziva i **otpucavanje** (aktiviranje) eksploziva, (eksplozija)
- **provjetranje** (ujedno i smjenski odmor radnika)

- **kontrola (pregled) izvršenog miniranja** (može se izvršiti i sekundarno tj. naknadno otpucavanje mina)
- eventualna izvedba primarne podgrade (npr. tankog sloja mlaznog betona)
  - doprema opreme (torkret aparata) i materijala
  - nabacivanje (ugradnja) mlaznog betona, kontrola
  - otprema opreme
- **utovar i odvoz izminiranog materijala**
  - doprema opreme
  - utovar i odvoz
  - čišćenje i poravnanje podnožnog svoda tunela, kontrola
  - otprema opreme
- **kavanje (ručno ili strojno dotjerivanje)** izbijenog profila tunela (kalote i bokova, te čela iskopa ako je potrebno) i priprema za izradu podgrade
- utovar i odvoz otkavanog materijala
- **izvedba podgrade**
  - doprema opreme i materijala za izvedbu sidara, mreža i slično
  - bušenje sidara
  - ugradnja sidara, mreže, eventualno tunelskih čeličnih lukova
  - doprema opreme i materijala za izvedbu mlaznog betona
  - nabacivanje mlaznog betona (završnog sloja)
  - otprema opreme
  - kontrola (pregled izvršenih radova)
- (produžavanje kolosijeka kod kolosječnog utovara i transporta, raznih cjevovoda i drugih energetske vodova, rasvjete) i
- geodetska kontrola, kontrola kakvoće izvedenih radova.

Iz gore prikazanog ciklusa izboja uočljivo je da su osnovne cjeline tehnološkog procesa radova na izboju tunela:

- **minerski radovi**, koji se dijele na međuovisne radove bušenja mina i na samo miniranje
- **utovar i odvoz** izbijenog materijala i
- **izvedba podgrade**.

Prema određenim istraživanjima [8] bušenje minskih bušotina odnosi 35-40% radnog vremena ciklusa izboja tunela (napomena: istraživani ciklus izboja nije sadržavao izvedbu podgrade) uključujući sve pomoćne radove, dok utovar i odvoz izbijenog materijala odnosi 40-45% radnog vremena istog ciklusa. Ostali pomoćni radovi (provjetravanje, kavanje, obilježavanje minskih bušotina...) odnose svega 20-25% radnog vremena jednog ciklusa izboja tunela [8]. Potrebno je ponovno napomenuti da se radi o istraživanju ciklusa izboja tunela gdje nisu uzeti u obzir radovi na izvedbi primarne podgrade, tako da se navedeni postoci trebaju uzeti s rezervom, odn. trebalo bi dobivene postotke radnog vremena korigirati.

U drugim izvorima [3] navodi se da „kod najbolje usklađene tehnologije iskopa bušenjem i miniranjem, utovar i odvoz čine oko 25% radnog vremena jednog zatvorenog radnog ciklusa, a kod neusklađenosti operacija tehnološkog procesa i do 50% radnog vremena jednog zatvorenog ciklusa.“



Kako se iz gore navedenog vidi, **bušenje mina te utovar i odvoz izbijenog materijala su dvije vremenski (a time i troškovno) najznačajnije aktivnosti u jednom ciklusu izboja tunela.**

Za bušenje mina najčešće se koristi tzv. visokofrekventno ili vibracijsko udarno-kružno bušenje (eng. „vibro-drilling“) pomoću lafetiranih tunelskih "jumbo" bušilica na hidraulični pogon. Navedene hidrauličke „jumbo“ bušilice omogućuju tri tipa bušenja stijenske mase: udarno, kružno i njihova kombinacija (kružno udarno bušenje – „rotary percussive drilling“).

Osnovnu koncepcijsku i konstruktivnu osobinu lafetiranih tunelskih "jumbo" bušilica čine dva ili više krakova (ruku ili grana) koje nose lafete po čijim vodilicama kližu bušači čekići. Na kraju lafete nalazi se vodilica pribora za bušenje. Hidraulični pogon i transmisija omogućavaju bušačem kraku i lafetu lako bušenje u različitim smjerovima [3].

Neke osnovne karakteristike suvremenih lafetiranih tunelskih "jumbo" bušilica koje omogućuju visoku produktivnost minerskih radova pri izboju tunela su:

- namještanje hidraulične lafete s visokom točnošću usmjeravanja (lasersko navođenje),
- velika brzina bušenja,
- brzo i automatizirano (čak i robotizirano - upravljanje računalom) upravljanje i premještanje (podvozje im može biti na pneumaticima, gusjenicama ili tračnicama),
- višestruka iskoristivost (može se koristiti i za izvedbu bušotina sidara primarne podgrade, te njihovu ugradnju).

Jedna od osnovnih karakteristika tehnologije iskopa tunela bušenjem i miniranjem je **serijska veza između radnih operacija u ciklusu izboja tunela**, koje imaju svoj vremenski slijed i omogućavaju jedna drugoj daljnje funkcioniranje, odn. ovisne su jedna o drugoj.

Angažirani strojevi su uglavnom pojedinačna oprema, (jedna ili najviše dvije "jumbo" bušilice, jedan tunelski utovarivač, jedan torkret-aparat, određeni broj transportnih vozila ovisno o duljini transportnog puta) te njihov otkaz ili kvar predstavlja "otkaz" čitavog sustava [3].

Radovi na iskopu tunela, obzirom na primijenjenu tehniku, vrlo su fleksibilni u smislu potrebne izmjene tj. dopremu i otpremu pojedinih strojeva.



Slike 2. i 3. Radovi na iskopu tunela

Usprkos visokoj automatiziranosti radova na iskopu tunela, **na točnost i sigurnost procesa iskopa temeljni utjecaj ima "uigranost tima" radne smjene tj. ljudski faktor.**

Ispravna je tvrdnja da „kod tehnologije iskopa tunela bušenjem i miniranjem pouzdanost tehnološkog procesa velikim dijelom ovisi o pouzdanosti živog rada te da njegovo pravilno djelovanje omogućava u najvećoj mjeri funkcioniranje ukupnog tehnološkog procesa iskopa tunela“ [3]. Navedena konstatacija je osnovni razlog (pored sigurnosnih razloga) zašto se nastoji jedan ciklus izboja tunela u potpunosti završiti sa istom radnom ekipom (odn. u jednoj radnoj smjeni).

Kod iskopa tunela tehnologijom bušenja i miniranja nužno je **posvetiti veliku pozornost sigurnosti rada**, jer se radovi odvijaju u podzemnom iskopu čija je stabilnost strukture stijenskog masiva u određenoj zoni oko izbijenog profila tunela narušena miniranjem i zbog toga jer se kod minerskih radova rukuje opasnim eksplozivom.

Stoga se kod minerskih radova primjenjuju tzv. sigurnosni eksplozivi koji se aktiviraju električnim putem, što opasnost minerskih radova svodi na najmanju moguću mjeru.

Kao što je već ranije navedeno, **utovar i odvoz izbijenog materijala čine značajan segment radova na ciklusu izboja tunela**. Učinkovitost transportnih sredstava (koja osim utovara i odvoza izbijenog materijala služe i za prijevoz svih ostalih potrebnih resursa kroz tunel) ovisi o njihovim tehničkim karakteristikama, te o transportnoj dužini i o veličini poprečnog presjeka tunela.

Obzirom da cestovni tuneli spadaju u tunele velikog poprečnog presjeka, kod njih je moguća uporaba standardnih građevinskih utovarivača i bagera, te kamiona kipera i zglobnih dampera koji su razmjerno manjih dimenzija.

Iako se pri izgradnji tunela na hrvatskim autocestama nije primjenjivao, značajno je napomenuti da je prema nekim istraživanjima za dugačke tunele velikog poprečnog presjeka općenito najučinkovitiji transport na tračnicama koji daje 10-20% manje troškove te manje zagađuje zrak u tunelu, čime se automatski smanjuje potrebni kapacitet sustava za provjetravanje tunela pri izgradnji [3].

### 2.1.2 Izvedba primarne podgrade

Stijensku masu oko izbijenog profila tunela nužno je stabilizirati efikasnom primjenom primarnog podgradnog sklopa.

Osnovu primarnog podgradnog sklopa (posebice u okviru Nove austrijske tunelske metode - NATM) prvenstveno čini sloj mlaznog betona koji zajedno sa sidrima odgovarajućeg rasporeda onemogućava popuštanje stijene pretvarajući je u samonosivi luk. Mlazni beton nanosi se na površinu stijene strojnim nabacivanjem pod pritiskom, odnosno njegova ugradnja se obavlja bez oplata [3].

Osnovni dijelovi primarnog podgradnog sklopa, uz mlazni beton i sidra (SN, PG, IBO, Swellex), su još i čelične mreže, čelični lukovi, čelične platice (talpe), piloti, mikropiloti, cijevni „kišobran“ („pipe-roof“) te drenažne cijevi i polucijevi.

Tunelska podgrada koja se postavlja odmah nakon iskopa izravno je vezana za utvrđenu kategorizaciju stijenske mase. Osnovu za kategoriziranje stijenskih masa čine rezultati inženjerskogeološkog kartiranja tunela koje je potrebno obaviti nakon svakog izvršenog koraka napredovanja iskopa tunela.

Projektom su dani standardni tipovi podgrade za očekivane kategorije stijenske mase, no međutim, kao posljedica varijacija u odnosu na očekivane karakteristike stijenske mase, standardne tipove podgrade za očekivane kategorije stijenske mase potrebno je usklađivati tijekom izvedbe u dogovoru s projektantom i nadzornim inženjerom [9].

Ugradnju elemenata primarne podgrade nužno je izvoditi takvim slijedom i na takav način da ne dođe do ispadanja i popuštanja stijenske mase ispred i oko iskopa tunela. Osim iskopanog profila tunelske cijevi i radno čelo iskopa također mora biti osigurano u skladu s projektom.

Tehnologija izvedbe primarnog podgradnog sklopa, obzirom na angažman značajnih sredstava za rad, predstavlja poslije samog iskopa jednu od najvažnijih aktivnosti kod izgradnje tunela [3].

Nakon dovršetka radova na izboju tunela slijedi posljednja od 3 osnovne grupe podzemnih radova u tunelogradnji, a to je izvedba hidroizolacije i betonske sekundarne obloge tunela.

### 2.1.3 Izvedba hidroizolacije

Hidroizolacija tunela predviđena je na cijeloj dužini tunela i to po cijeloj kaloti i bokovima tunela, a izvodi se nakon dovršenog iskopa i izvedenog primarnog osiguranja tunela, te nakon smirivanja eventualnih pomaka u primarnoj oblozi tunelske cijevi.

Postavlja se između sekundarne obloge tunela i primarne podgrade a sastoji se od izolacijskog sloja od PVC folije sa signalnim slojem, izrađene u jednom komadu, debljine 2 mm, koji je zaštićen zaštitnim slojem geotekstila minimalne težine 500 g/m<sup>2</sup> [9].

Podložni sloj hidroizolacije je od mlaznog betona optimalne debljine i čvrstoće, čija površina mora biti suha i ravna te na kojoj ne smije biti ostataka armature, sidara, čeličnih lukova, žice i sl.

Na tako pripremljenu podlogu od mlaznog betona postavlja se zaštitni sloj od geotekstila. Njegova funkcija je sprječavanje oštećenja termoplastične PVC folije prilikom izvedbe betonske sekundarne obloge, te djelotvorno provođenje brdskih voda do drenažnog kanala.

Preklopi geotekstila su najmanje 5 cm (tako da prekriju svu površinu mlaznog betona), a za mlazni beton se pričvršćuju sintetičkim podložnim pločicama, kompatibilnim termoplastičnoj PVC foliji, kroz koju se specijalnim pištoljem zabijaju čavli.

Izolacijski sloj od termoplastične PVC folije polaže se od jedne do druge strane bočnih drenaža tako da se zavaruje toplim zrakom za prije postavljene podložne pločice. Dvije susjedne trake termoplastične PVC folije optimalno se preklapaju kako bi se na tom mjestu mogle vodonepropusno zavariti. Prije zavarivanja, preklope između dviju traka folije treba očistiti, tako da ne bude primjesa prašine, masti ili vode [9].

Vodonepropusno spajanje dviju susjednih traka folije izvodi se tehnikom termičkog zavarivanja, specijalnim strojem koji u jednom prijelazu uzduž spoja pravi dva paralelna vara ukupne širine približno 5 cm.



Slika 4. Hidroizolacija tunela



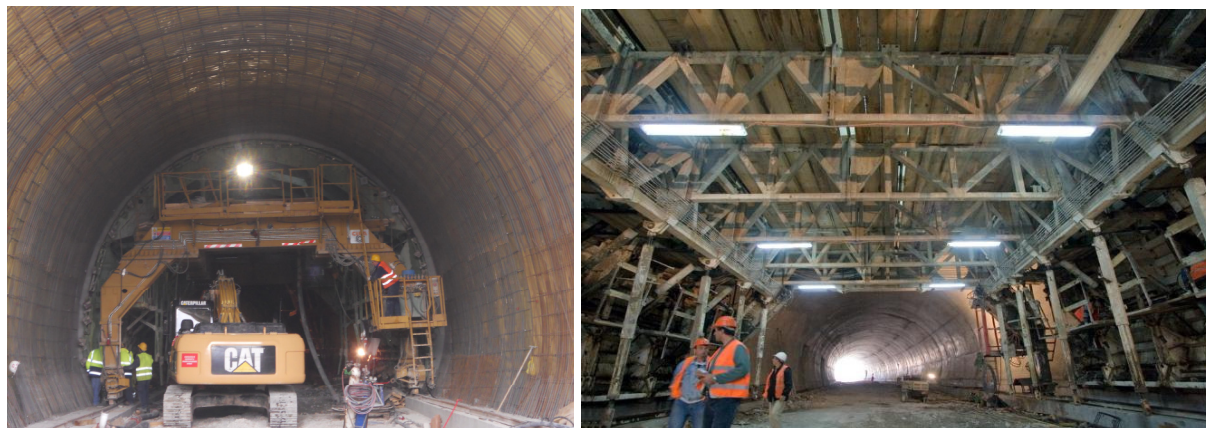
#### 2.1.4 Izvedba sekundarne obloge

Sekundarna obloga cestovnih tunela se izvodi od betona klase tlačne čvrstoće C 25/30 minimalne debljine 30 cm i u pravilu je nearmirana, osim na mjestima niša i mjestima ovješnja ventilatora te područja tunela s lošijim karakteristikama stijenske mase.

Nakon iskopa tunelske cijevi i izvršene kategorizacije stijenske mase podzemnog iskopa ustanovljuju se zone tunela u kojima je zbog slabijih karakteristika stijenske mase (V i Va kategorija) potrebno sekundarnu tunelsku oblogu izvesti od betona klase tlačne čvrstoće C 30/37 i koju je potrebno armirati (konstruktivno ili statički), te zone gdje je nužno izvesti podnožni svod.

Osim tih zona, armiraju se i dijelovi tunela s nadslojem manjim od 10m (tzv. portalne kampade) te dijelovi dvocijevnih tunela u zoni spojeva sa poprečnim prolazom, kao i zone tunela u kojima su se prilikom iskopa pojave veće odvale, špilje, dimnjaci ili slični speleološki objekti.

Za izvedbu sekundarne tunelske obloge, zbog ekonomskih razloga i vremena izgradnje, koristi se mehanička ili/ i hidraulična pomična oplata. Sekundarna obloga se betonira u blokovima (kampadama) duljine do 12,0 m. Između blokova betoniranja nužne su dilatacijske spojnice s brtvenim trakama minimalne širine 300 mm [9].



Slike 5. i 6. Tunelska oplata

Iako se tuneli izvode prema glavnom projektu koji je rađen prije početka radova i temeljen na prognoznim geološkim podacima, tek nakon proboja većeg dijela tunelske cijevi može se utvrditi stvarno stanje stijenske mase i sukladno tome izraditi izvedbeni projekt građevinskih radova, koji u nekim segmentima može manje ili više odstupati od glavnog projekta.

Osnovni dio izvedbenog projekta je grafički prikaz rasporeda blokova (kampada) betoniranja sekundarne tunelske obloge, s ucrtanim slijedećim elementima:

- točno ucrtanim pozicijama i duljinama blokova betoniranja,
- blokovima u kojima je sekundarnu oblogu potrebno armirati (konstruktivno ili statički),
- blokovima u kojima je nužno izvesti armiranobetonsku oblogu od betona višeg razreda klase tlačne čvrstoće (C 30/37),
- zonama tunela u kojima je nužno izvesti podnožni svod,
- točnim rasporedom tunelskih niša i poprečnih prolaza,
- točno ucrtanim lokacijama karstifikacijskih objekata (kaverne, dimnjaci...).

Blokovi (kampade) betoniranja se raspoređuju uvažavajući resurse izvođača radova (duljina tunelske oplate), projektne parametre (radijus horizontalne krivine tunela), te geološke uvjete stijenske mase kroz koju tunel prolazi.

Duljina blokova (kampada) betoniranja varira kako bi se postigla optimalna pokrivenost navedenih specifičnih zona u tunelu, odn. uvijek se nastoji sve lokalne karstifikacijske objekte (kaverne...), zone značajnijeg prekoprofilnog iskopa, zone podnožnog svoda, zone stijenske mase lošijih karakteristika (V ktg.), zone spoja tunelske cijevi s poprečnim prolazom te lokacije niša smjestiti u jednu cijelu kampadu (odn. u neki cijeli broj kampada ako su te zone veće duljine), po mogućnosti u njenu sredinu.

Proizvodnja i ugradnja betona treba u svemu zadovoljavati uvjete zadane projektom (Program kontrole i osiguranja kakvoće, Betonska konstrukcija tunela, Osnovni tehnički uvjeti kvalitete betonske konstrukcije) i pravilima struke (Tehnički propis za betonske konstrukcije -TPBK, važeće tehničke norme iz predmetnog područja - HRN EN 206, OTU- Opći tehnički uvjeti za radove na cestama...).

U pravilu, betonska mješavina se proizvodi u gradilišnim betonarama te se transportira do mjesta ugradnje u tunelskoj cijevi uz obavezno miješanje (kamionima-mješalicama). Tako dopremljeni beton nužno je ugraditi u roku od najkasnije 2 sata nakon otpreme iz betonare.

Beton se može ugrađivati hidrauličkim uređajem za betoniranje, razdjelnom pumpom ili ručnim prebacivanjem preko nastavka za punjenje. Zbijanje betona izvodi se visokoučinskim unutarnjim vibratorima ili oplatnim vibratorima.

Da se izbjegnu pukotine u sekundarnoj oblozi, treba odrediti što je moguće kasnije vrijeme skidanja oplate. Kako bi se održao uobičajeni 24-satni takt za betoniranje jednog dijela (kampade), za beton proizlazi vrijeme skidanja oplate od 13 do 14 sati, što je povoljno sa stajališta tehnologije betona [9].

### **2.1.5 Metoda izgradnje tunela u otvorenom iskopu (tzv. „cut and cover“ metoda)**

Kod malih visina nadsloja iznad tunelske cijevi te kod izgradnje portalnih građevina ili tunelskih galerija, koristi se tzv. „cut and cover“ metoda izgradnje tunela, gdje se armiranobetonska tunelska cijev radi u otvorenom iskopu te ju se potom zatrpava iskopanim materijalom.

Tehnologija izvedbe i angažirani strojevi su isti kao i za izvedbu usjeka i potom zasipa u otvorenoj trasi (bušilice, rovokopači, utovarivači, buldozeri, kamioni damperi ili kiperi...).

Kod ove metode izgradnje tunela dopušteni su nešto strmiji nagibi privremenih bočnih kosina usjeka, koji će nakon izgradnje betonske obloge tunelske cijevi ili portalne građevine biti zatrpan, ali se ipak mora voditi računa o stabilnosti tih privremenih pokosa tokom odvijanja radova zbog mogućeg zarušavanja ili erodiranja pokosa te mogućeg pada blokova na mjesto izvođenja radova.

## **2.2 Ekonomičnost građenja tunela**

Ekonomičnost se u praksi najčešće iskazuje putem troškova, tako da **kao mjeru ekonomičnosti izgradnje jednog cestovnog tunela treba uzeti odnos ugovorene cijene tog tunela i zbroja troškova izgradnje tog istog tunela.**

Tako se i ekonomičnost gradnje tunela može se postići samo ako se mijenja, odnosno smanjuje, ukupna vrijednost troškova izgradnje tog tunela.

Kako su troškovi izgradnje (posebice probijanja) tunela u jednom svom dijelu ovisni o vremenu građenja, a ono uvelike ovisi o napredovanju radova na probijanju tunela, to postoji određena relacija između troškova izgradnje i napredovanja na probijanju tunela (općenito rečeno, troškovi izgradnje tunela su manji što je napredovanje proboja veće).

Slijedom svega navedenog može se konstatirati da su osnovni čimbenici koji utječu na ekonomičnost (odn. troškove) izgradnje cestovnih tunela slijedeći:

- geologija stijenske mase kroz koju tunel prolazi,
- osnovne karakteristike samog tunela (duljina tunela, broj cijevi, poprečni profil, poprečni prolazi...),
- model izgradnje kod dvocijevnih tunela (fazna ili istovremena izgradnja obaju tunelskih cijevi),
- kapacitiranost izvođača radova i organizacija rada na izgradnji tunela,
- mogućnost investitora za financijskim praćenjem radova.

### **2.2.1 Utjecaj geologije stijenske mase na troškove izgradnje tunela**

Geološki sastav stijenske mase kroz koju tunel prolazi ima najvažniji utjecaj na troškove izgradnje tunela. Geologija utječe i na vrijeme građenja i na utrošak potrebnih materijala (posebice primarne podgrade). Geološki sastav stijenske mase najviše utječe na:

- napredovanje radova na iskopu tunela, a time i na ukupno vrijeme izgradnje, zbog činjenice da duljina koraka napredovanja iskopa ovisi o kategoriji stijenske mase,
- primjenu posebnih tehnika iskopa i podgrađivanja (npr. „pipe-roof“, iskop razradom profila...), što znatno utječe na napredovanje radova,
- obim radova na izradi primarne podgrade, jer vrsta, količina i raspored elemenata podgrade također ovisi o kategoriji stijenske mase,
- pojavu raznih speleoloških objekata (kaverne, dimnjaci...) i pojavu podzemnih voda, koje uzrokuju nepredvidive zastoje radova i zahtijevaju određene sanacijske mjere koje pak iziskuju dodatne troškove,
- iskoristivost iskopanog materijala u daljnjim radovima na izgradnji tunela, gdje se kod stijenske mase dobre kvalitete može i do 25% iskopanog materijala „vratiti“ u tunel (npr. u sastavu betona sekundarne obloge i podnožnog svoda, kao ispuna podnožnog svoda, drenažni beton, tamponski sloj kolničke konstrukcije i sl.),
- količinu ugrađene armature u sekundarnu oblogu, budući da se u zonama tunela s stijenskom masom lošije kvalitete (V i Va kategorija) sekundarna tunelska obloga izvodi od armiranog betona, često višeg razreda klase tlačne čvrstoće (C 30/37),

Nažalost, na sastav stijenske mase se u fazi izgradnje tunela ne može utjecati, nego ga se mora prihvatiti takvog kakav jest, i sukladno njemu izvoditi radove.

### **2.2.2 Utjecaj karakteristika tunela na troškove izgradnje**

Osnovne karakteristike svakog tunela imaju očiti utjecaj na troškove izgradnje, te ih nije potrebno detaljnije elaborirati.

Logično je da se troškovi izgradnje tunela povećavaju s povećanjem njegove duljine, broja tunelskih cijevi, poprečnog profila i eventualnih poprečnih prolaza kod dvocijevnih tunela. Navedene karakteristike su zadane projektom i na njih se također tokom izgradnje ne može utjecati.

### **2.2.3 Utjecaj modela izgradnje kod dvocijevnih tunela na troškove izgradnje**

Sasvim je jasno da je kod dvocijevnih tunela najekonomičnije istovremeno graditi obje tunelske cijevi, no ukoliko kod investitora ne postoje dovoljna financijska sredstva a predmet investicijskog projekta je gradnja dugačkih tunela (> 2000m), često se u praksi polazi za tzv. faznom izgradnjom dvocijevnih tunela, koja može imati više različitih modela. Dokazano je [4], a i u praksi potvrđeno (tuneli Mala Kapela i Sveti Rok), da je najoptimalniji model fazne gradnje dvocijevnih tunela kada se obje tunelske cijevi probijaju istovremeno, a potom se samo jedna od njih u potpunosti dovršava i pušta u promet dok druga cijev ostaje podgrađena i služi kao servisna tokom određenog vremenskog perioda dok se ne steknu potrebni uvjeti za njen dovršetak i puštanje u promet.

### **2.2.4 Utjecaj kapacitiranosti izvođača radova i organizacije rada na troškove izgradnje**

Najveći utjecaj na smanjenje troškova izgradnje tunela izvođač radova ima u vlastitoj organizaciji radova na izgradnji tunela (posebice na organizaciji radova na probijanju tunela) i osiguravanju optimalnih resursa i kapaciteta potrebnih za te radnje.

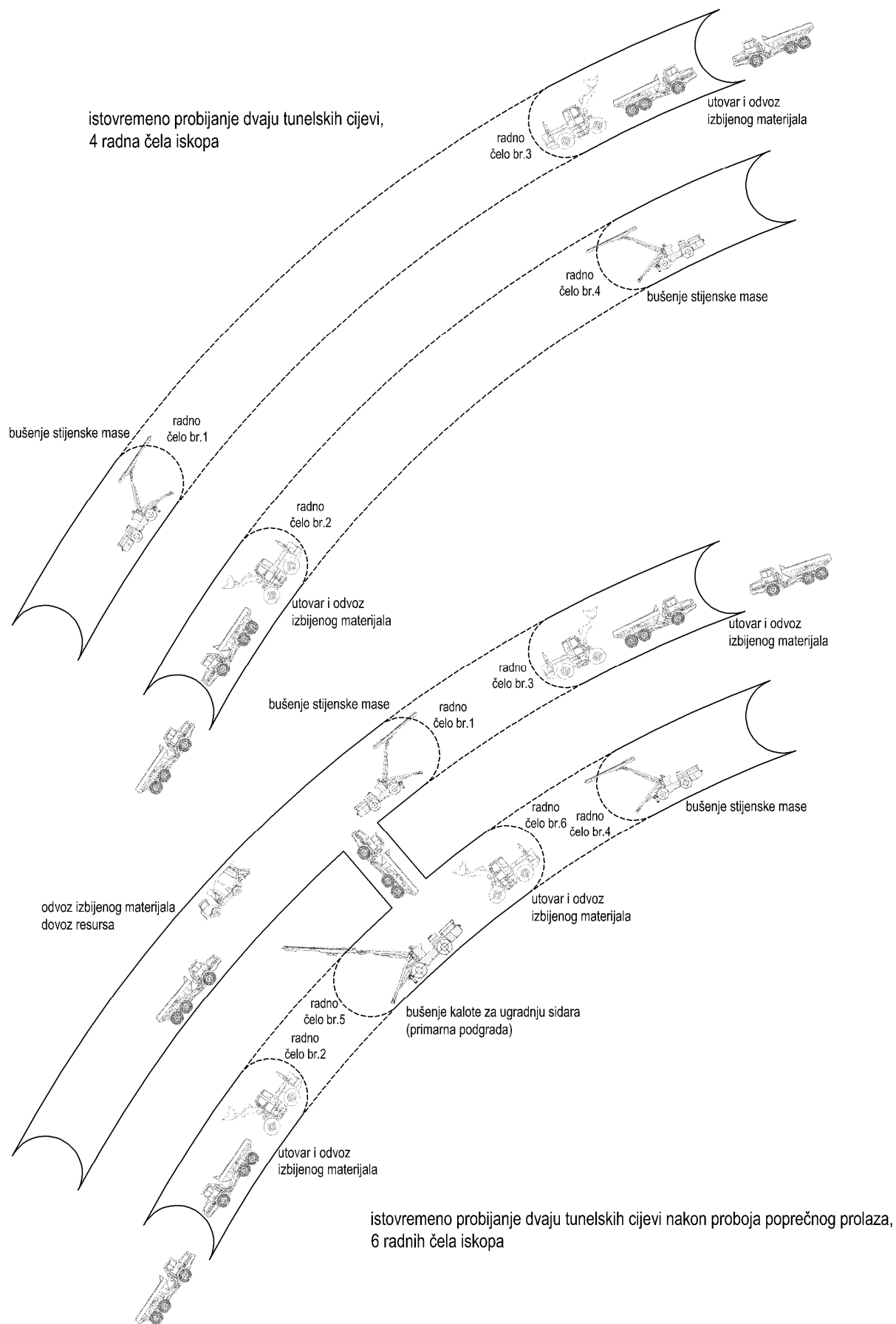
Ključni čimbenik pri organizaciji rada na iskopu tunela, a time i angažmanu i iskoristivosti resursa (tehnike i tehnologije) i dinamici napredovanja na probijanju tunela, je broj napadnih (radnih) čela podzemnog iskopa tunela.

Budući da se tehnološki proces iskopa tunela bušenjem i miniranjem odvija ciklički, dakle aktivnosti slijede jedna iza druge, što konkretno znači da dok se odvijaju radovi na bušenju mina, mehanizacija za utovar i odvoz izbijenog materijala je na čekanju, i obratno. Već je ranije napomenuto da su te dvije aktivnosti vremenski (a time i troškovno) najznačajnije aktivnosti u jednom ciklusu izboja tunela.

Otvaranjem što većeg broja radnih čela iskopa postiže se puno bolja iskorištenost resursa izvođača. Najveće mogućnosti otvaraju se kod paralelnog probijanja obaju tunelskih cijevi kod dvocijevnih tunela, gdje se mogu istovremeno odvijati dvije različite aktivnosti istog radnog ciklusa, svaka u svojoj tunelskoj cijevi, i potom se zamijeniti (dakle, nema čekanja). Konkretno, dok se u prvoj tunelskoj cijevi odvijaju radovi na bušenju mina, u susjednoj cijevi se može odvijati utovar i odvoz ranije izbijenog materijala. Dobrom organizacijom rada može se optimizirati istovremeni vremenski dovršetak obaju aktivnosti i potom se mehanizacija i ljudstvo jednostavno zamijeni iz jedne cijevi u drugu i nastavi s radom.

Obzirom da su tunelske "jumbo" bušilice samohodne, kao i mehanizacija za utovar i odvoz (utovarivači ili bageri-rovokopači i kamioni damperi), njihovo premještanje iz jedne tunelske cijevi u drugu ne predstavlja nikakav problem. Navedena organizacija rada u dvije tunelske cijevi može se organizirati i na ulaznoj i na izlaznoj strani tunela, tako da se mogu iskoristiti sva četiri radna čela iskopa.

Obzirom da svi tuneli (bez obzira na broj tunelskih cijevi) dulji od 500 m moraju imati poprečne prolaze između tunelskih cijevi ili drugu vrst evakuacijskih izlaza u slučaju nužde, njihovim probijanjem se izvođačima radova otvaraju dodatne mogućnosti još veće ekspanzije radova na probijanju dvocijevnog tunela, što već može dovesti i do „problema“ gdje izvođač ima veće mogućnosti nego što ima kapacitete (resurse) za potpuno iskorištavanje istih.



Slika 7. Mogućnosti organizacije rada na iskopu dvocijevnog tunela



Zbog specifičnosti tunelogradnje u odnosu na ostale grane građevinarstva (podzemni radovi, upotreba eksplozivna, nužno provjetravanje za vrijeme radova, 24-satni radni dan...) **relativno je visok udio troškova pripremnih radova** te troškova objekata i opreme za sigurnost rada koji zajedno čine oko 10% ukupnih troškova građenja kod dugačkih tunela [3].

Tako OTU [9] navodi slijedeće **osnovne pripreme radove kod izgradnje tunela**: izrada pristupa gradilištu i gradilišnih prometnica, izrada skladišta eksplozivnih tvari, izrada kompresorske stanice s cijevnim razvodom po gradilištu, izrada priključka visokog napona i trafostanica, izrada priključka za opskrbu gradilišta vodom, odlaganje iskopanog materijala i odvod vode iz tunela..., dok su **osnovni objekti i oprema za sigurnost rada**: objekti za pružanje prve pomoći, i to na zemlji i ispod zemlje u skladu sa zahtjevima posla, oprema za spašavanje i evakuaciju osoba ispod zemlje, sveobuhvatna sredstva za gašenje požara, kemijski ili komprimirani kisik u kompletu za samopomoć za osobe ispod zemlje, sigurnosne ograde, upozorenja...



**Slika 8.** Gradilište tunela

### 2.2.5 Utjecaj mogućnost investitora za financijskim praćenjem radova na troškove izgradnje

Praksa pokazuje da su mogući slučajevi kada investitor uslijed nedostatka financijskih sredstava za dovršetak projekta smanjuje intenzitet radova na izgradnji tunela, odn. usporava radove, ili ih čak i obustavlja na neko određeno ili neodređeno vrijeme.

Obustavljanjem već započetih radova na izgradnji tunela nužno je **obezbjediti sigurnost na gradilištu** tijekom dužih prekida rada i **konzervirati gradilište** do ponovnog početka radova. U tom vremenskom periodu mora biti onemogućen bilo kakav štetni utjecaj na nezavršeni dio građevine i svi u njoj izvedeni radovi moraju ostati neoštećeni.

U svrhu osiguranja sigurnosti na gradilištu potrebno je tijekom cijelog perioda u kojem će radovi na drugoj tunelskoj cijevi biti obustavljeni istu zaštititi od neovlaštenog pristupa pristupa (postavljanjem ograda ili drugih barijera, osiguranjem čuvarske službe ili video-nadzora, te redovitih obilazaka).

Osim dodatnih troškova uzrokovanih osiguranjem sigurnosti na gradilištu postoje i znatni **troškovi konzerviranja radova**. Osnovne radnje nužne za konzerviranje radova na djelomično izgrađenoj tunelskoj cijevi su [10]:

- zaštita čela podzemnog iskopa tunela mlaznim betonom, čeličnim zavarenim mrežama i po potrebi sidrima,
- potrebno je u cijelosti izvesti primarnu podgradu kao i sve ostale mjere na iskopu i stabilizaciji podzemnog iskopa,
- u dijelovima tunelske cijevi u stijenskoj masi II kategorije potrebno je izvesti sloj mlaznog betona na zidovima, a koji je prema projektnoj dokumentaciji predviđen kao sloj podloge za hidroizolaciju,
- uspostaviti kontinuiranu i sigurnu evakuaciju vode iz podzemnog iskopa izvan tunelske cijevi kako se ne bi ugrozila stabilnost podzemnog iskopa, a eventualnu pojavu većih količina procjedne vode potrebno je adekvatno kaptirati (skupiti) te ju također ispustiti izvan tunelskog iskopa,
- potrebno je u cijelosti izvesti sekundarnu betonsku oblogu u ulaznim i izlaznim portalnim zonama tunelske cijevi, (prve 2 kampade),
- potrebno je izvesti sekundarnu betonsku oblogu u svim dijelovima tunelske cijevi u stijenskoj masi V kategorije (rasjedne i oslabljene zone), te u zonama karstifikacijskih objekata (špilje, kaverne) kako bi se sa sigurnošću postigla trajna stabilnost podzemnog iskopa,
- ulazne/izlazne dijelove tunelske cijevi u duljini od 100 metara, ako nije izvedena konačna betonska obloga, potrebno je zaštititi od utjecaja smrzavanja (ugradnjom dodatnog sloja mlaznog betona adekvatne debljine otpornog na smrzavanje ili ugradnjom odgovarajućeg hidrofobnog premaza),
- potrebno je periodično (svakih 6 mjeseci) obaviti vizualnu kontrolu objekata od strane stručnih lica (projektanti, investitorova stručna služba),

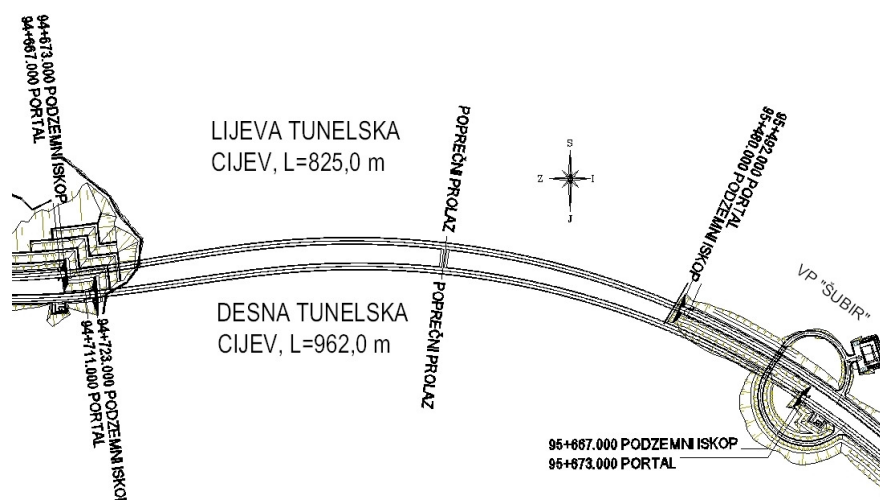
### 3 Posebnosti pri izgradnji tunela Šubir na autocesti A1

Prikaz nekih posebnosti koje se javljaju kod izgradnje gotovo svih cestovnih tunela, kao i neke karakteristične samo za tunel Šubir, bit će dan temeljem iskustva projektanta tunela, koji je aktivno uključen u cijeli proces izgradnje putem izrade izvedbenih projekata, projektantskog nadzora i davanja rješenja za određene nepredviđene situacije kojih u tunelogradnji uvijek ima.

#### 3.1 Opće karakteristike tunela Šubir

Tunel Šubir se nalazi na autocesti A1, na dionici Ravča-Ploče, i u prvobitnoj varijanti je trebao prolaziti južnom padinom brda Šubir, te je 2008. izrađen glavni građevinski projekt, kojim su predviđene duljine tunelskih cijevi od 2.326,0 m i 2.406,0 m sa 5 poprečnih prolaza [11].

Investitorovom odlukom promijenjena je trasa navedene dionice autoceste A1 (u tzv. „sjevernu dionicu“), tako da je i glavni projekt tunela Šubir promijenjen na način da tunel sada prolazi sjevernom padinom istog brda, ali sa znatno kraćim tunelskim cijevima, duljina 962,0 m i 825,0 m sa 1 poprečnim prolazom samo za interventna vozila [12].



Slika 9. Situacija tunela Šubir

### 3.2 Osnovne nepovoljne karakteristike pri izgradnji tunela Šubir

Osnovni problem sa novom, sjevernom, trasom tunela pojavio se u vidu puno lošijeg materijala na ulaznom dijelu tunela, koji se sastoji od flišnih naslaga (lapora) s mjestimičnom pojavom podzemnih voda. Navedena činjenica rezultirat će **značajnim poskupljenjem radova na iskopu ulaznog predusjeka i radova na podzemnom iskopu u ulaznoj portalnoj zoni obaju tunelskih cijevi.**

Jedan od ograničavajućih čimbenika pri ponovnom projektiranju tunela Šubir je bio i **izričit zahtjev investitora da duljina obaju tunelskih cijevi mora bit manja od 1.000 m** i sa samo jednim manjim poprečnim prolazom (samo za interventna vozila), iz razloga smanjenja troškova izgradnje tunela i ugradnje tunelske opreme.

Prema uvjetima terena, trasiranja autoceste u zoni brda Šubir i kvalitete stijenske mase (posebice na ulaznom dijelu tunela), logične duljine tunelskih cijevi bile bi oko 1.040 m i 1.010 m s jednim većim poprečnim prolazom (za sva vozila) i dvjema zaustavnim površinama u tunelu, te s izgradnjom 60-metarske tunelske galerije na ulaznom dijelu lijeve tunelske cijevi (u zoni lošeg materijala, odn. flišnih naslaga s pojavom podzemnih voda).

Udovoljavanje gore navedenom zahtjevu rezultiralo je slijedećim:

- tunelske cijevi su kraće od 1.000 m,
- izveden je manji poprečni prolaz,
- nisu izvedene zaustavne površine,

čime su ostvarene uštede na svim građevinskim radovima u tunelu, kao i na ugradnji tunelske opreme (ventilacija, elektro i prometna oprema, SOS....), ali su također ostvareni i slijedeći nepovoljni aspekti:

- ogromni ulazni predusjek s lijeve strane lijeve osi autoceste,
- veliki i dugi izlazni usjek lijevog kolnika autoceste neposredno iza tunela,
- nejednolike duljine portalnih građevina.

#### 3.2.1 Utjecaj flišnih naslaga (lapora) na podzemni iskop u ulaznim portalnim zonama

Zbog flišnih naslaga (lapora) i moguće pojave podzemnih voda, za podzemni iskop u ulaznim portalnim zonama obaju tunelskih cijevi korištena je **specifična tehnologija iskopa pod tzv. „cijevnim kišobranom“ (eng. „pipe-roof“)** koja znatno poskupljuje radove zbog veće površine

iskopnog profila tunela te zbog upotrebe dodatnih materijala (čeličnih cijevi koje se koso injektiraju prije samog iskopa tunela i kao takve ostaju ugrađene u primarnu podgradu) i same tehnologije iskopa po fazama koja utječe na dinamiku radova.

Navedenom tehnologijom iskopano je oko 75 m tunelske cijevi (cca. 4,2% podzemnog iskopa).

Osnovne karakteristike ove metode su da se iskop i podgrađivanje izvode pod zaštitom svoda od čeličnih injektiranih cijevi promjera cca 110 -120 mm, na razmaku 40 cm, dužine 15 m s preklopom od 3 m, pod nagibom od oko 40° po slijedećim fazama [13]:

- 0 faza uključuje izvedbu zaštitnog svoda od čeličnih cijevi,
- I faza uključuje iskop i podgrađivanje svoda tunela,
- II faza uključuje iskop i podgrađivanje sredine tunela,
- III faza uključuje iskop i podgrađivanje podnožnog svoda tunela.



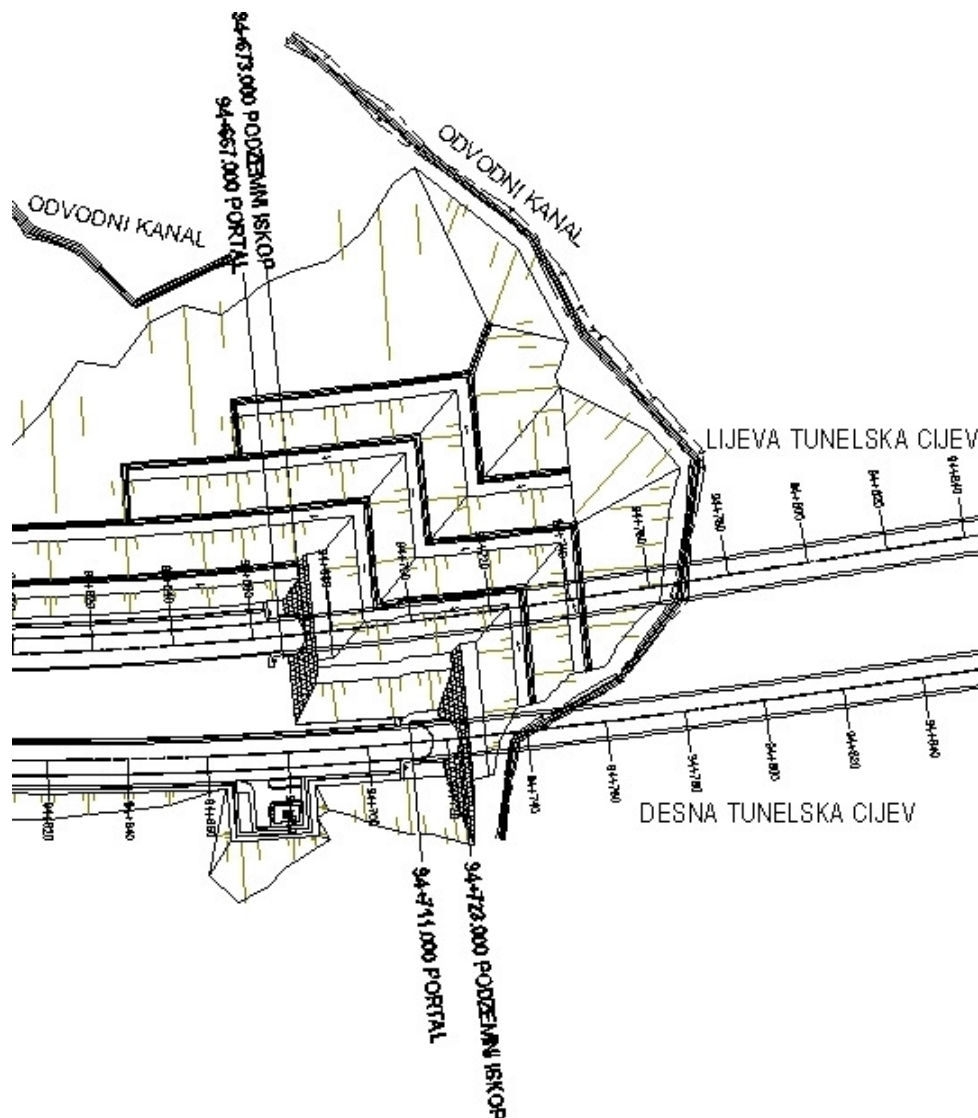
Slika 10. Iskop tunela Šubir metodom pipe-roof

### 3.2.2 Utjecaj flišnih naslaga (lapora) na ulazni predusjek

Navedeni sastav tla od flišnih naslaga (lapora) najveću implikaciju imao je na otvoreni iskop ulaznih predusjeka, i to na samu geometriju, a time i na količinu otvorenog iskopa predusjeka, i na mjere zaštite stabilnosti pokosa predusjeka.

Zbog tako lošeg materijala geometrija predusjeka je zadana s **vrlo blagim nagibima pokosa** (od nožice prema kruni pokosa: 2:1, 1:1, i 1:2) i s bermama širine 4 m između etaža. Tako blagi nagibi pokosa i berme između svake etaže rezultirali su, slobodno se može reći, **ogromnim predusjekom** s lijeve strane lijeve osi autoceste i iznad obaju tunelskih cijevi. Navedeni predusjek sastoji se od 5 kosina visina oko 10 m i 4 berme širine 4 m, što je u konačnici rezultiralo količinom otvorenog iskopa od cca. 100.000 m<sup>3</sup> sraslog materijala [12].





Slika 11. Tlocrt ulaznog predusjeka tunela Šubir

Pokose tako iskopanog „ogromnog“ predusjeka u flišnim naslagama (laporima), potrebno je adekvatno stabilizirati što je učinjeno ugradnjom samobušivih IBO R51N i IBO R38N sidara duljina 9 m ili 18 m na rasteru 2,0x2,0 m koja su površinski zaštićena mlaznim betonom armiranim armaturnim mrežama [14]. Dakle, radi se o **vrlo gusto postavljenim vrlo dugim sidrima** koja su dobro površinski zaštićena, što govori i o „kvaliteti“ materijala koji se osigurava kao i o samim troškovima te zaštite.

Pored sidrenja provodi se i dreniranje podgradnog sklopa kratkim drenovima duljine 3 m i dreniranje procjernih voda iz zaleđa zasjea dugim drenovima duljine 20 m. Drenažne bušotine izvedene su na međurazmacima sidara s time da je svaki treći dren dugi (duljine 20 m). U izbušene rupe ugrađene su perforirane PVC cijevi promjera 50 mm i 80 mm uz zaštitu geotekstilom. Odvodnja drenova izvodi se površinskim kanalima do ulijeva u zatvorenu odvodnju autoceste [14].





Slika 12. Pogled na ulazni predusjek u fazi izvođenja (cca. 50% dovršenosti)



Slika 13. Pogled na ulazni predusjek u fazi izvođenja (cca. 50% dovršenosti)

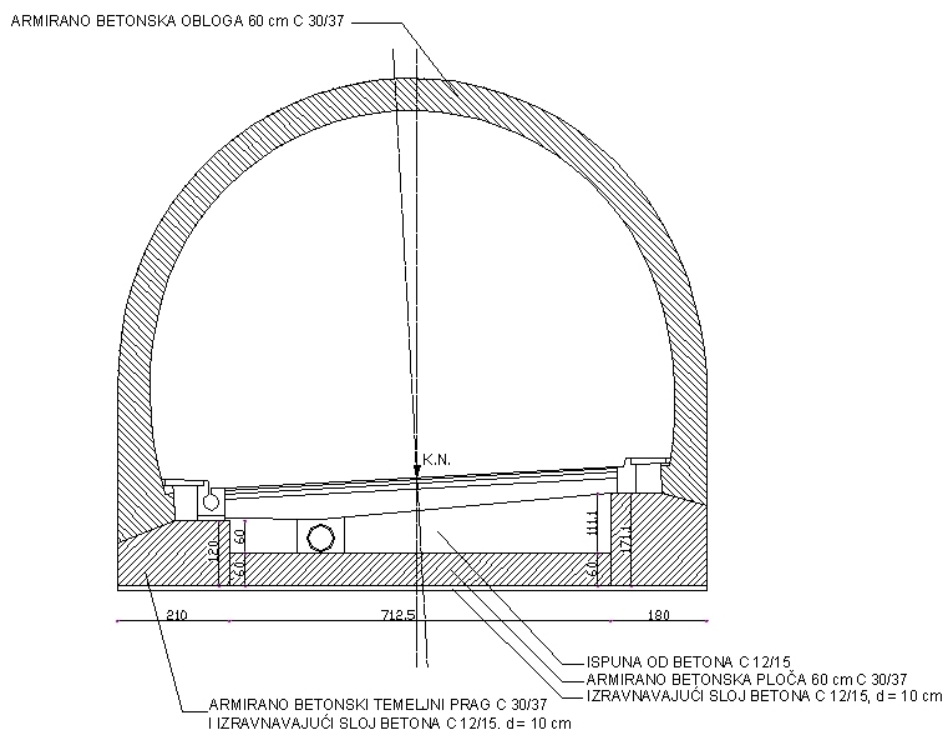
Iz priloženih fotografija navedenog predusjeka (koji je još uvijek u fazi izgradnje, ali se konačno rješenje neće puno razlikovati od prikazanog) vidi se da **ovo rješenje estetski i nije najbolje ukopljeno u okoliš.**

Predloženi način na koji su se navedene nepovoljnosti u velikoj mjeri mogle eliminirati, u vidu izgradnje **tunelske galerije** duljine cca. 60 m na ulaznom predusjeku lijeve tunelske cijevi, nije usvojen jer bi to zahtijevalo produljenje tunela, izmjenu projekta i generiralo troškove izgradnje same armiranobetonske galerije.

Navedenu tunelsku galeriju izvelo bi se tzv. „cut and cover“ metodom, gdje bi se u otvorenom iskopu s nešto strmijim radnim pokosima koje bi bilo potrebno osigurati i drenirati, izgradila armiranobetonska galerija koja bi imala djelomično otvorenu bočnu stranu prema desnoj osi autoceste, i potom ista djelomično zatrpala materijalom iz iskopa.

Primjenom tog rješenja izbjegle bi se velike količine otvorenog iskopa, bitno bi se smanjio sam predusjek i samim time i mjere zaštite stabilnosti pokosa, a i rješenje bi bilo estetski puno prihvatljivije.

Kao dodatni problem uzrokovan sastavom tla od flišnih naslaga (lapora) pojavilo se i temeljenje portalnih građevina. Naime, zbog opasnosti od sloma tla ispod temelja ulaznih portalnih građevina predviđena je izvedba armiranobetonske temeljne ploče ispod cijele širine i duljine obaju ulaznih portalnih građevina.



Slika 14. Normalni poprečni presjek ulaznih portalnih građevina

### 3.2.3 Izlazni usjek lijevog kolnika autoceste neposredno iza tunela

U svrhu izgradnje što kraćeg tunela dobivani su veliki predusjeci. Najočitiiji primjer navedenog je na izlaznom usjeku lijevog kolnika autoceste neposredno iza tunela, gdje je lijeva tunelska cijev mogla biti produljena za cca. 150 m, no morala bi proći ispod jedne zone s nešto manjim nadslojem (tzv. „sedlo“) duljine cca. 40 m, što ne bi predstavljalo nikakav problem, no taj prijedlog nije prihvaćen. Time je dobiven oko 150 m dugačak usjek, visine pokosa oko 15 m, zbog čega su izlazni portali dosta razmaknuti.



Slika 15. Izlazni usjek lijevog kolnika autoceste

### 3.2.4 Nejednolike duljine portalnih građevina

Pored činjenice da je trasa autoceste u zoni tunela Šubir vođena po pribrežnoj strani brda, što je rezultiralo da su portalne građevine susjednih tunelskih cijevi izmaknute jedna u odnosu na drugu, i same nasuprotne portalne građevine su različitih duljina (12 m i 6 m), iz razloga da tunel bude kraći od 1.000 m i samo s jednim poprečnim prolazom između tunelskih cijevi.

Dodavši tome i ogromni ulazni predusjek i dugački izlazni usjek lijevog kolnika, može se zaključiti da ulazne i izlazne zone tunela Šubir u estetskom pogledu nisu najsretnije koncipirane.

Teorija kaže da pristupne zona tunelu (tunelski predusjek) trebaju minimalno zadirati u krajobraz, te su moguća dva suprotna pristupa projektiranju istog [5]:

- pristupna zona tunelu integrirana u postojeći krajobraz,
- pristupna zona tunelu koja sadrži pozitivni vizualni kontrast u odnosu na krajobraz.

U konkretnom slučaju tunela Šubir nažalost nije postignut ni jedan od gore navedenih pristupa.

### 3.3 Nepredvidivi događaji pri izgradnji tunela

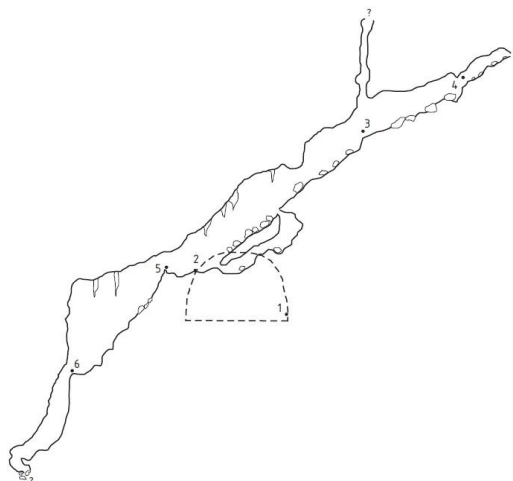
Izgradnju cestovnih tunela, između ostalog, karakterizira i velika mogućnost pojave raznih nepredvidivih događaja pri samoj gradnji. Na slučaju tunela Šubir vidi se da su te nepredvidivosti pri gradnji uzrokovane uglavnom s dvije strane: geološke i investitorske.

**Geološke nepredvidivosti** koje su se desile kod izboja tunela Šubir jesu: zona sa manjim kavernama i jednom većom koja dijagonalno presijeca desnu tunelsku cijev, opravdani prekoprofilni iskop u pojedinim zonama, pomjeranje određenih tunelskih niša zbog lošije stijenske mase u njihovim prvobitnim stacionažama, znatno dulje zone s flišnim naslagama unutar desne tunelske cijevi nego što su predviđene.

**Nepredvidivosti uzrokovane naknadnim intervencijama od strane investitora** su: izrada vatrogasnog prijelaza iznad desne tunelske cijevi te namjera obustave radova na izgradnji tunela na neodređeno vrijeme.

#### 3.3.1 Kaverne u tunelu

Tijekom iskopa desne tunelske cijevi pojavila se zona duljine cca. 30 m sa manjim kavernama u iskopanom profilu stijenske mase, a daljnjim napredovanjem radova unutar te zone otkrivena je i jedna kaverna većih gabarita (cca. 50 duljine i 45 m dubine) na gornjem desnom boku („ramenu“) tunelske cijevi koja dijagonalno presijeca tunelsku cijev. Navedena kaverna je djelomično zapunjena osulinom pijeska, gline i kamenih blokova, a prekrivena sigovinom.



Slika 16. Presjek kaverne u desnoj tunelskoj cijevi





**Slika 17.** Ulaz u kavernu na čelu iskopa



**Slika 18.** Unutrašnjost kaverne

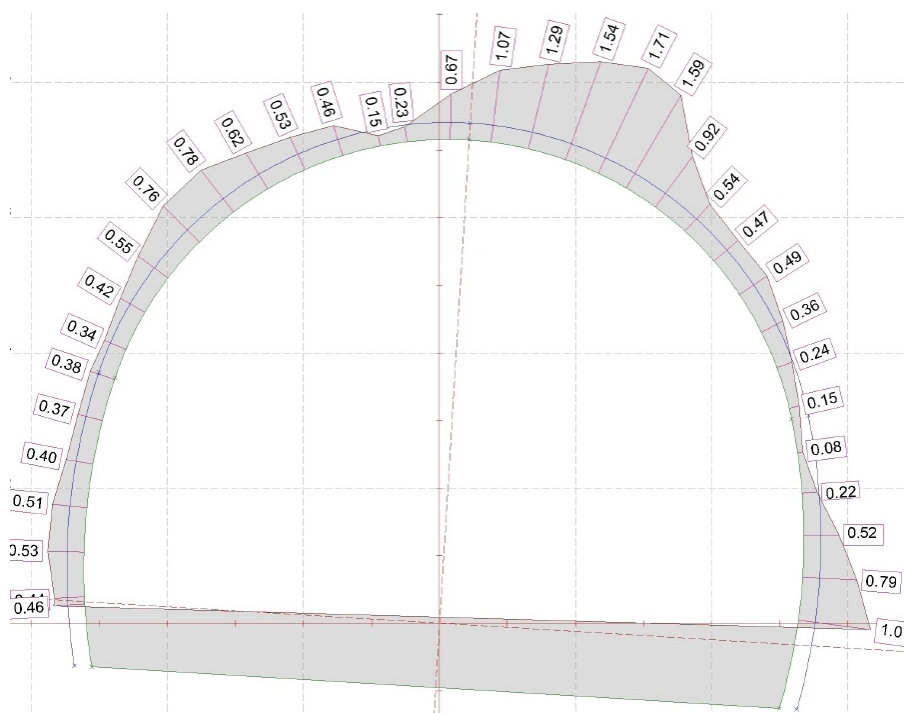
Nakon zajedničkog obilaska navedene kaverne od strane speleologa i projektanata, i uvida u zatečeno stanje, dogovorene su slijedeće mjere za sanaciju kaverne i daljnji nastavak radova [15]:

- za cijelu 30-metarsku zonu kaverni u stijenskoj masi desne tunelske cijevi predviđa se osnovni podgradni sklop tip V, s podnožnim svodom,
- stijenke kaverne moraju biti prekrivene (zaštićene) mlaznim betonom debljine 10-15 cm i kavanjem uklonjeni svi dohvatljivi nestabilni blokovi,
- segmenti iskop bokova tunela s korakom od maksimalno 0.5 m te privremenom zaštitom čela mlaznim betonom debljine 10-15 cm kako bi se omogućila ugradnja (uspostava) rešetkastog čeličnog nosača 95/20/30 po cijelom profilu tunela,
- potrebno je ostavljati trup na čelu iskopa (maksimalne debljine ovisno o mogućnosti ugradnje gore navedenog rešetkastog nosača) privremeno zaštićen mlaznim betonom,
- na osnovnom podgradnom sklopu tip V potrebno je povećati sloj mlaznog betona do debljine od 30 cm i prema potrebi povećati duljinu sidara,

- u slučaju većeg razmaka između kopalja potrebno je između rešetkastih nosača ugraditi rebrasti čelik Ø25 mm,
- na svakom drugom rešetkastom nosaču (koraku) potrebno je u desnom boku (zidu) izvršiti predpobijanje kopljima od samobušućih injekcijskih sidara tip IBO R32N L= 3 m kroz rešetkaste čelične nosače, pod kutom od 15-20° u odnosu na smjer iskopa, te čim prije bude moguće s obzirom na kavernu (šupljinu) u zoni kalote tunela također uspostaviti koplja,
- na tako potpuno izvedeni primarni podgradni sklop u zoni kaverne postaviti (ugraditi) čelične „jastuke“ od čelične mreže Q131 (1 mreža četverostruko savijena) po cijeloj dohvatljivoj površini. Na tako ugrađene „jastuke“ potrebno je aplicirati mlazni beton hidrauličnom rukom torkretnog stroja sa čela tunela (raspršiti po cijelom volumenu postavljenih „jastuka“),
- potrebno je ostaviti i dodatne cijevi na desnoj strani kalote do vidljivog stabilnog čela za moguće naknadno injektiranje mlaznog betona u kavernu,
- dodatno osiguranje navedene zone se ostvaruje i izvedbom sekundarne tunelske obloge kao armiranobetonske, sa betonom klase C 30/37 u koji je ugrađena teška armatura.

### 3.3.2 Odvale stijenske mase u kaloti

Tokom izvođenja radova na probijanju desne tunelske cijevi u dvije zone duljina 6,5 i 7 m došlo je do odvala stijenske mase u kalotnom dijelu tunelske cijevi. Budući da do tog prekoprofilnog iskopa nije došlo zbog neodgovarajuće izvedbe i nepažljive tehnike rada nego iz razloga na koje izvođač ne može utjecati (odn. iz geoloških razloga) taj prekoprofilni iskop se smatra opravdanim.



Slika 19. Geodetski snimak iskop desne tunelske cijevi

Navedene odvale u kaloti su sanirane na način da su u te zone postavljeni armaturni koševi od armaturnih profila Q-221, dimenzija prema konturama šupljine u kaloti nastale odvalom. Potom je sekundarna obloga u navedenim zonama u cijelosti izvedena kao armiranobetonska, sa betonom klase C 30/37 u koji je ugrađena lakša armatura [16].



### 3.3.3 Pomjeranje lokacija tunelskih niša uslijed stijenske mase lošijih karakteristika

Ukoliko je na glavnim projektom definiranim lokacijama tunelskih niša (drenažnih, elektro, SOS, hidrantskih) stijenska masa loših karakteristika (V ili Va kategorija) ili se nalaze neki speleološki objekti, opravdano je te niše pomjeriti na neku manju udaljenost (do 12 m) gdje je stijenska masa nešto kvalitetnija. U tunelu Šubir je iz tog razloga na novu lokaciju pomjereno 6 tunelskih niša.

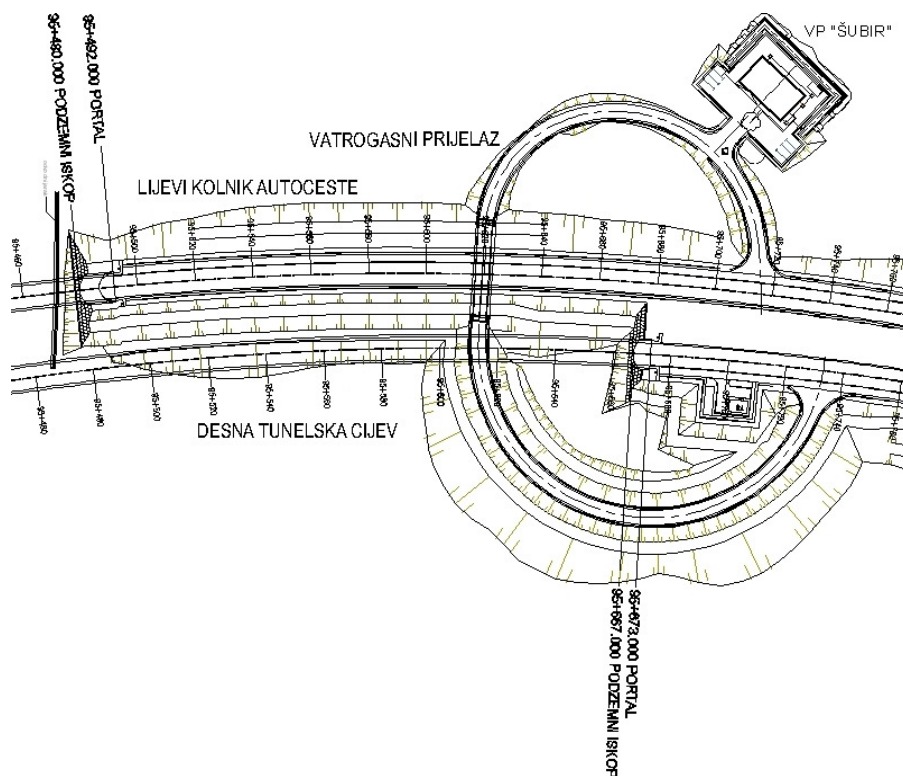
### 3.3.4 Znatno dulje zone podzemnog iskopa s „stijenskom“ masom lošijih karakteristika nego što je predviđeno

Iako u principu prognozni inženjersko-geološki profili u velikoj mjeri uspješno prognoziraju stvarno stanje stijenske mase u tunelima, kod tunela Šubir to nije bio slučaj, te su zone tunela s flišnim naslagama (posebice unutar desne tunelske cijevi) znatno dulje nego što su bile predviđene.

Kao što je već ranije rečeno (potpoglavlje 3.2.1), u tim zonama tunela korištena je specifična tehnologija iskopa pod tzv. „cijevnim kišobranom“ (eng. „pipe-roof“).

### 3.3.5 Izrada vatrogasnog prijelaza iznad desne tunelske cijevi

U toku izvođenja radova na probijanju desne tunelske cijevi investitor je naložio izradu vatrogasnog prijelaza koji bi objektom prelazio preko usjeka lijevog kolnika autoceste a usjekom iznad desne tunelske cijevi tunela Šubir. Budući da su radovi na probijanju tunela napredovali taman do lokacije usjeka iznad tunela, po nalogu projektanta su zaustavljeni kako bi se prvo izveo usjek vatrogasnog prijelaza iznad tunela.



Slika 20. Tlocrt vatrogasnog prijelaza i desne tunelske cijevi

Naime, nakon iskopa usjeka vatrogasnog prijelaza debljina stijenske mase (tzv. „mesa“) iznad kalote desne tunelske cijevi do nivelete vatrogasnog puta je cca. 4 m a kako je stijenska masa dobre kvalitete potrebno ju je minirati kod radova na otvorenom iskopu usjeka. Iz tog razloga su radovi na podzemnom iskopu tunela zaustavljeni dok nije u potpunosti izveden iskop i odvoz materijala iz

usjeka, te zaštita pokosa usjeka vatrogasnog prijelaza iznad tunela. Nakon izvedbe tih radova vatrogasni prijelaz je zatvoren, te više nije bilo nikakvih aktivnosti iznad tunela i radovi na podzemnom iskopu se nastavljaju, ali pod posebnim uvjetima.



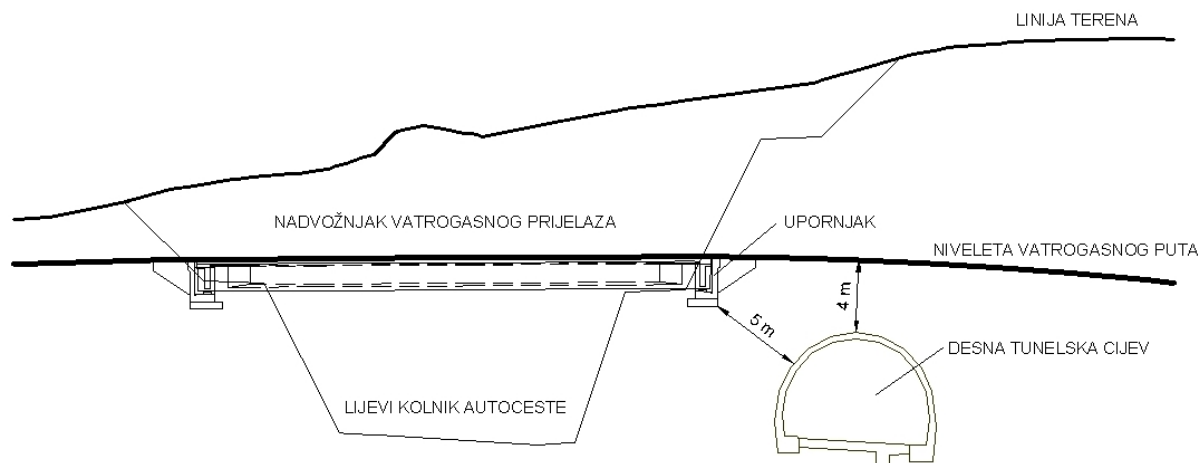
**Slika 21.** Vatrogasni prijelaz nakon dovršenog iskopa

Zbog navedenog malog nadsloja stijenske mase desne tunelske cijevi u zoni vatrogasnog prijelaza (cca. 4 m u kaloti), bez obzira što je stijenska masa na toj lokaciji dobre kvalitete (III kategorija), predviđena je nešto modificirana primarna podgrada za Va kategoriju stijenske mase (mlazni beton  $d=30$  cm, čelični rešetkasti nosači 95/20/32 na razmaku od 70 cm, čelična dupla armaturna mreža Q-503, adhezijska štapna sidra RA  $\varnothing 25$  mm,  $l=3$  m, 9,19 kom/m' tunela) s maksimalnim korakom napredovanja prilikom podzemnog iskopa do 1,0 m.

Zona desne tunelske cijevi ispod vatrogasnog prijelaza dodatno je osigurana i izvedbom podnožnog svoda i sekundarne tunelske obloge kao armiranobetonske, sa betonom klase C 30/37 u koji je ugrađena teška armatura.

Budući da je dugo premišljano na koji način premostiti usjek lijevog kolnika autoceste (prvobitno je trebao biti nadvožnjak, potom tzv. „lažni tunel“ i naposljetku je odlučeno da se ipak pristupi izradi nadvožnjaka) radovi na desnoj tunelskoj cijevi su napredovali te je ona većim dijelom izbetonirana.

Zbog toga se pojavio problem iskopa upornjaka navedenog nadvožnjaka, jer je i njega zbog kvalitetne stijenske mase trebalo iskopati pomoću miniranja, a vrlo je mali nadsloj (odn. „meso“) iznad kalote izbetonirane sekundarne tunelske obloge i nožice tog upornjaka (cca. 5 m).



**Slika 22.** Presjek vatrogasnog prijelaza i desne tunelske cijevi

Ovo je tipičan slučaj miniranja pod posebnim uvjetima, jer postoji velika mogućnost oštećenja izvedene sekundarne tunelske obloge, te je izvođaču radova na iskopu upornjaka propisano da te radove izvede na slijedeći način [17]:

- potrebno je eliminirati bilo kakve utjecaje iskopa temelja upornjaka, neovisno o primijenjenoj tehnologiji iskopa, na stabilnost izvedene sekundarne betonske obloge desne tunelske cijevi,
- tehnologija radova na iskopu temelja mora biti u skladu s dozvoljenim brzinama vibracija. Maksimalno dozvoljene brzine moraju biti u skladu sa standardom DIN 4150 (ova norma je u procesu prihvaćanja kao HRN),
- sukladno normi DIN 4150-3-1999-02, (tablica 1, odjeljak 1), najveća dozvoljena brzina oscilacija za inženjerske građevine jest 40 mm/s, te je ista odabrana kao najveća dozvoljena vrijednost i u slučaju tunela Šubir,
- prije početka radova na iskopu temelja upornjaka potrebno je napraviti Elaborat ili Plan iskopavanja na osnovu kojega je potrebno obaviti pokusno iskopavanje (miniranjem ili iskopavanjem pomoću hidrauličnog čekića) u okviru kojeg treba mjeriti brzine oscilacija, akceleraciju i eventualne pomake odn. sve parametre i seizmičke efekte relevantne za procjenu utjecaja iskopa temelja upornjaka na izvedenu sekundarnu betonsku oblogu desne tunelske cijevi,
- na osnovi rezultata navedenih ispitivanja potrebno je uskladiti daljnji iskop temelja upornjaka na način da se tehnologija iskopa prilagodi zadanom uvjetu za najveću dozvoljenu brzinu oscilacija od 40 mm/s,
- obaveza je Izvođača da prije početka radova na iskopu temelja upornjaka izradi Izvedbeni projekt ili Plan miniranja ili iskopavanja pomoću hidrauličnog čekića u skladu s gore navedenim uvjetima koji mora biti odobren po nadzornom inženjeru,
- tijekom radova na iskopu temelja upornjaka potrebno je kontinuirano mjeriti utjecaj iskopa temelja upornjaka na sekundarnu betonsku oblogu desne tunelske cijevi (monitoring seizmičkih efekata na tunelsku oblogu),
- sve troškove eventualne sanacije sekundarne betonske obloge desne tunelske cijevi tunela „Šubir“ prouzrokovane radovima na upornjacima nadvožnjaka „Šubir“ dužan je snositi izvođač tih istih radova. U svrhu toga potrebno je, prije i nakon dovršetka radova na nadvožnjaku, obaviti temeljiti pregled sekundarne obloge desne tunelske cijevi tunela „Šubir“ u zonama upornjaka, o čemu mora biti sastavljen zapisnik supotpisan od svih zainteresiranih strana (izvođač radova na nadvožnjaku Šubir, nadzor, investitor, izvođač radova na tunelu Šubir).

### 3.3.6 Obustava radova na neodređeno vrijeme

U toku radova na izgradnji tunela Šubir, kada je dobar dio tunela već bio probijen, investitor je uslijed nedostatka financijskih sredstava namjeravao obustaviti radove na izgradnji tunela na neko neodređeno vrijeme.

U tu svrhu je dano projektantsko mišljenje o mogućnosti zaustavljanja-konzerviranja radova na tunelu [10], te je temeljem toga (potpoglavlje 2.2.5) i analize troškova obezbjeđenja sigurnosti na gradilištu tokom dužih prekida rada i posebice troškova konzerviranja gradilišta ipak odlučeno da se radovi na izgradnji tunela nastave.

Pored svih navedenih događaja pri izgradnji tunela Šubir, u tunelogradnji su mogući i razni drugi nepredvidivi događaji, npr. zarušavanje dijela tunela i sl.

### 3.4 Česti zahtjevi izvođača radova za određene modifikacije projekta tokom gradnje tunela

Iako nisu toliko značajne kao modifikacije projekta izgradnje uzrokovane geologijom stijenske mase i intervencijama investitora, i izvođači radova često imaju razne zahtjeve za određenim promjenama i pogodovanjima njihovoj tehnologiji izgradnje pojedinih tunelskih elemenata (rubnjaci, šuplji rubnjaci, sifonski ispusti, drenaža tampona, poprečni prolazi...) u čemu im se u pravilu izlazi u susret ukoliko te modifikacije projekta ne narušavaju bitne elemente projekta cestovnog tunela.

Izvođači navedene zahtjeve uglavnom imaju iz razloga smanjenja troškova i povećanja dinamike izvođenja radova uslijed toga što bi koristili vlastitu tehniku i tehnologiju, optimalno iskorištavajući vlastite resurse i koristeći vlastite standardizirane postupke proizvodnje i ugradnje pojedinih elemenata.

U prvom redu tu se radi o predgotovljenim i standardiziranim oplatama (niša, poprečnih prolaza), tunelskoj oplati, te izvođenju određenih monolitnih elemenata umjesto predviđenih montažnih i sl.

Nisu rijetki slučajevi da ukoliko izvođač ima npr. nešto širu predgotovljenu oplatu za niše ili poprečni prolaz o svom trošku izvede nešto širi iskop kako bi mogao koristiti upravo tu oplatu, ili npr. da sam izvođač predloži iskop nešto širih poprečnih prolaza od predviđenih, opet o svom trošku, kako bi ih mogao koristiti kao transportni put tokom izgradnje tunela i sl.

Isto tako, uslijed možebitine visoke nabavne cijene montažnih elemenata, a želeći maksimalno zaposliti svoje resurse, izvođači često traže izvedbu monolitnih rubnjaka, šupljih rubnjaka, sifonskih okana i sl. umjesto predviđenih montažnih.

## 4 Resume

Iz ovog rada se može vidjeti koliko je zapravo tunelogradnja specifično i kompleksno područje građevinarstva, ali samim time i izazovno za svakog sudionika u gradnji tunela; bilo kao investitora, projektanta, revidenta, izvođača ili nadzora.

Izgradnji cestovnih tunela nužno je pristupiti s određenom dozom respekta prema tunelu kao složenoj i „živoj“ građevini, strogo poštujući pravila struke i uvažavajući sve značajne čimbenike koji utječu na sam proces gradnje tunela i njegovu konačnu funkcionalnost kao prometne građevine.



## Literatura

- [1] A.D.Parker, *Planning and estimating underground construction*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1970.
- [2] Linarić Z., *Rizici u tehnologiji građenja dugačkih tunela u kršu*, doktorska disertacija, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2000.
- [3] Linarić Z., *Izbor i planiranje tehnike i tehnologije građenja baznih tunela*, magistarski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 1992.
- [4] Mustapić I.: *Analiza različitih modela etapne gradnje dvocijevnih tunela na autocestama*, magistarski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2010.
- [5] Vrkljan I., *Podzemne građevine i tuneli*, udžbenik, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka.
- [6] Ebert A., *Schicht-Betriebssysteme in Tunellbau*, Tunnel 1/1987
- [7] Heraković D., *Tehnika i tehnologija građenja tunela velikih profila*, Savremena tehnika i tehnologija izvodjenja podzemnih radova, Biro za gradjevinarstvo, Beograd, 1974.
- [8] Aćimović M., *Tehnika i tehnologija građenja tunela srednjih profila*, Savremena tehnika i tehnologija izvodjenja podzemnih radova, Biro za gradjevinarstvo, Beograd, 1974.
- [9] Opći tehnički uvjeti za radove na cestama (OTU), *knjiga V - Cestovni tuneli*, Institut građevinarstva Hrvatske, Zagreb, 2001.
- [10] Projektantsko mišljenje o mogućnosti zaustavljanja-konzerviranja dijela radova za tunele „Umac“, „Puljane“, „Kobiljaču“ i „Šubir“, Institut IGH d.d., Zavod za projektiranje prometnica i Zavod za geotehniku, Zagreb, 2009.
- [11] Glavni građevinski projekt tunela Šubir, Institut građevinarstva Hrvatske d.d., Zavod za studije i projekte, Zagreb, 2008.
- [12] Glavni građevinski projekt tunela Šubir, Institut IGH d.d., Zavod za projektiranje prometnica, Zagreb, 2010.
- [13] Izvedbeni geotehnički projekt tunela Šubir, Institut IGH d.d., Zavod za geotehniku, Zagreb, 2010.
- [14] Izvedbeni geotehnički projekt stabilizacije pokosa ulaznog predusjeka i portala tunela „Šubir“, Institut IGH d.d., Zavod za geotehniku, Zagreb, 2010.
- [15] Zapisnik o potrebnim radovima na izboju i podgrađivanju tunela kroz speleološki objekt na st. 95+388, Gradilište tunela „Šubir“, 2009.,
- [16] Izvedbeni građevinski projekt tunela Šubir, Institut IGH d.d., Zavod za projektiranje prometnica, Zagreb, 2011.
- [17] Zahtjev projektanta tunela Šubir vezan za radove na iskopu temelja upornjaka nadvožnjaka „Šubir“, Institut IGH d.d., Zavod za projektiranje prometnica, Zagreb, 2011.