

Nova austrijska tunelska metoda (NATM)

Bošnjak, Ivana

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:531116>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-01**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering - FCERI Repository](#)



image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

Ivana Bošnjak

Nova austrijska tunelska metoda (NATM)

Završni rad

Rijeka, 2023.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Prijediplomski sveučilišni studij
Smjer građevinarstvo
Geotehičko inženjerstvo**

Ivana Bošnjak

JMBAG: 0114034202

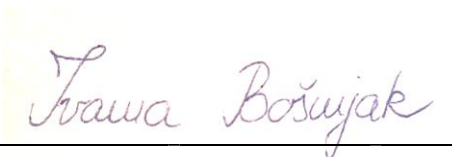
Nova austrijska tunelska metoda (NATM)

Završni rad

Rijeka, lipanj 2023.

IZJAVA

Završni rad izradila sam samostalno, u suradnji s mentorom i uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva u odnosu na ovaj rad.



Trava Bošnjak

U Rijeci, 16. lipnja 2023.

ZAHVALA

Zahvaljujem se svom mentoru, prof. dr. sc. Željku Arbanasu, na neizmjernej pomoći oko literature te strpljenju i vodstvu tijekom cijelog procesa izrade završnog rada. Također, veliku zahvalu dugujem svojoj obitelji i prijateljima koji su mi bili podrška na ovom izazovnom putu.

SAŽETAK

U ovom završnom radu opisat će se Nova austrijska tunelska metoda (NATM). Riječ je o tehnici izvedbe tunela koja je osvojila svijet i postala prepoznatljiva kao generalni koncept tunelogradnje. Na samom početku rada fokus će biti na tunnelima općenito, načinu njihovog projektiranja i tehnologiji izvedbe. Prije prelaska na suštinu tematike ukratko će se spomenuti i tradicionalne metode tunelogradnje koje su prethodile pojavi NATM. U glavnom dijelu rada razjasnit će se porijeklo imena metode, osnovni principi i način iskopa te pozitivni i negativni aspekti njene primjene. Naposljetku, obradit će se tunel izgrađen po principima NATM. Radi se o tunelu „Debeli Brijeg“, najsloženijem objektu projekta „Cestovna povezanost s južnom Dalmacijom“. Praktičnim primjerom na najbolji način će se objasniti primjena NATM, sve ono što toj primjeni prethodi, u smislu geotehničkih opažanja i mjerenja te u konačnici tehnike podgrađivanja i njihove glavne karakteristike.

Ključne riječi: tunelogradnja, Nova austrijska tunelska metoda, primarna i sekundarna podgrada, stijenska masa, iskop.

SUMMARY

In this final paper, The New Austrian Tunneling Method (NATM) will be described. This method has conquered the world and became recognizable as a general concept of tunnel construction. At the very beginning of the paper, the focus will be on tunnels in general, their design and different performance technology. Before moving on to the main subject, traditional tunneling methods that preceded the appearance of NATM will be mentioned briefly. The main part of the paper is about clarifying the origin of the name of the method, the basic principles and the method excavation and the positive and negative aspects of its application. In the end is also described a tunnel built according to NATM principles. It is the „Debeli Brijeg“ tunnel, the most complex object of the project „Road connection with southern Dalmatia“. This practical example at its best way will explain the application of NATM, everything that precedes that application, in terms of geotechnical observations and measurements and finally substructure techniques and their main characteristics.

Keywords: tunnel construction, The New Austrian Tunneling Method, primary and secondary support, rock mass, excavation.

SADRŽAJ

POPIS SLIKA.....	1
1. UVOD	3
2. OPĆENITO O TUNELIMA	4
2.1. Klasifikacija tunela.....	5
2.2. Postupak projekiranja tunela	6
2.2.1. Geotehnička istraživanja	6
2.2.2. Prethodna istraživanja	6
2.2.3. Istraživanja tijekom građenja.....	7
2.3. Tehnologija izvedbe tunela	7
2.3.1. Miniranje	8
2.3.2. Strojni iskop.....	9
2.3.3. Iskop rezanjem stijena	9
2.3.4. Iskop bagerima.....	10
2.4. Posebne metode izvedbe tunela.....	11
2.4.1. Lažni tuneli (engl. cut and cover tunells)	11
2.4.2. Uronjeni tuneli.....	11
2.4.3. Iskop pod zaštitom dijafragme	11
3. METODE ISKOPA TUNELA	12
3.1. Klasične metode iskopa tunela	12
3.1.1. Stara austrijska metoda.....	13
3.1.2. Belgijska metoda	14
3.1.3. Talijanska metoda.....	14
3.1.4. Njemačka metoda.....	14
3.2. Suvremene metode iskopa tunela	15
3.2.1. Norveška metoda	15
4. NOVA AUSTRIJSKA TUNELSKA METODA (NATM)	16
4.1. Uvod	16
4.2. Dostignuća tunelogradnje koja su pogodovala pojavi NATM	16
4.3. Retrospektiva nastanka NATM	17
4.4. Objašnjenje naziva metode.....	17
5. NAČELA TUNELOGRADNJE PREMA NATM.....	18
5.1. Osnovni principi NATM	18

5.2. Nosivi prsten.....	30
5.4. Višefazna NATM.....	31
6. PREDNOSTI I MANE NATM	33
7. TUNEL DEBELI BRIJEG	34
7.1. Osnovni podaci o tunelu	34
7.2. Geotehnička opažanja i mjerenja	36
7.3. Opis uzdužnog geotehničkog profila glavnog tunela	37
7.4. Kategorije stijenske mase i provedene podgradne mjere	39
7.5. Karakteristike podgradnih elemenata	49
8. ZAKLJUČAK.....	52
9. LITERATURA.....	53
10. GRAFIČKI PRILOZI	56
10.1. Projektni uzdužni geotehnički profil - glavni tunel, M 1:2000/2000.....	56
10.2. Situacija, M 1:1000.....	56

POPIS SLIKA

Slika 1. Poprečni presjek tunela [6]	4
Slika 2. Miniranje tunela Učka [19]	8
Slika 3. Stroj za iskop u punom profilu [20]	9
Slika 4. Izvedba iskopa rezanjem stijene [3]	9
Slika 5. Iskop tunela bagerom [21]	10
Slika 6. Redoslijed izvedbe radova kod stare austrijske metode [10]	13
Slika 7. Redoslijed izvedbe radova kod belgijske metode [7]	14
Slika 8. Redoslijed izvedbe radova kod njemačke metode [7]	15
Slika 9. Stijenska masa kao osnovna nosiva komponenta tunela [3]	18
Slika 10. Održavanje čvrstoće stijenske mase [3]	19
Slika 11. Izbjegavanje razrahljenja stijenske mase [3]	19
Slika 12. Formiranje troosnog stanja naprezanja [3]	20
Slika 13. Kontrola deformacije stijenske mase [3]	20
Slika 14. Pravovremena ugradnja podgrade [3]	21
Slika 15. Podgrađivanje u ovisnosti o kvaliteti stijenske mase [3]	21
Slika 16. Prethodna laboratorijska i terenska istraživanja [3]	22
Slika 17. Upotreba mlaznog betona umjesto drvene podgrade [3]	22
Slika 18. Upotreba tankostijene primarne i sekundarne podgrade [3]	23
Slika 19. Pojačanje podgrade [3]	23
Slika 20. Mjerenje pomaka konture iskopa [3]	24
Slika 21. Statičko razmatranje tunela [3]	24
Slika 22. Zatvaranje prstena tunela [3]	25
Slika 23. Zatvaranje podgradnog prstena [3]	25
Slika 24. Napredovanje u punom profilu [3]	26
Slika 25. Stabilizacija veze podgrada - stijenska masa [3]	26
Slika 26. Zaobljenje poprečnog profila [3]	27
Slika 27. Izvedba tanke sekundarne obloge [3]	27
Slika 28. Stabilizacija stijenske mase [3]	28
Slika 29. Kontrola stabilnosti podgrada [3]	28
Slika 30. Izvedba drenaže [3]	29
Slika 31. Nosivi prsten prema Golseru [3]	30
Slika 32. Iskop u dvije faze [4]	31
Slika 33. Iskop u tri faze [12]	32
Slika 34. Iskop u pet faza [12]	32
Slika 35. Konstrukcija unutrašnje linije glavnog tunela „Debeli Brijeg“ [17]	34
Slika 36. Konstrukcija unutrašnje linije servisnog tunela „Debeli Brijeg“ [17]	34
Slika 37. Završetak probijanja tunela [22]	35
Slika 38. Podgradni sustav TIP II [17]	39
Slika 39. Podgradni sustav TIP III [17]	40
Slika 40. Podgradni sustav TIP IV [17]	41
Slika 41. Podgradni sustav TIP V [17]	42
Slika 42. Podgradni sustav TIP Va [17]	43

Slika 43. Podgradni sustav TIP Vb [17]	44
Slika 44. Podgradni sustav TIP VI [17]	45
Slika 45. Podgradni sustav TIP VI-4 [17]	46
Slika 46. Podgradni sustav TIP VI-5 [17]	47
Slika 47. Upotreba mlaznog betona u tunelu [23].....	50
Slika 48. Prikaz čeličnog rešetkastog nosača [24].....	51

1. UVOD

Gradnja tunela ima bogatu prošlost. Još od prapovijesnih vremena ljudi imaju potrebu za ulaskom u podzemlje. U početku su to bili ulasci u špilje, a prvim oblici tunela smatraju se egipatske grobnice. Glavna zadaća tunela u starom vijeku bila je omogućavanje vodoopskrbe, dok se krajem 17. st. intenzivnijom primjenom baruta počinju koristiti za plovne kanale. Počeci tunelogradnje u Hrvatskoj datiraju iz antičkog doba, a posljednjih 30-ak godina najintenzivnija je izgradnja suvremenih cestovnih tunela. Danas je njihova osnovna svrha svladavanje prirodne prepreke i skraćivanje duljine puta [1,2].

Sve veći razvoj cestovnog i željezničkog prometa doveo je do potrebe gradnje velikih tunela. Ta potreba je popraćena pojavom inovacija u tunelogradnji, koje imaju za cilj prije svega omogućiti, a zatim i olakšati izvedbu. U te inovacije se ubrajaju: električni detonatori, dinamit i eksplozivi, špricani mort, stijenska sidra, strojevi za iskop tunela - TBM, mlazni beton i u konačnici Nova austrijska tunelska metoda. Sve navedene inovacije su, uz pojavu monitoringa (računalnog praćenja naprezanja i deformacija stijenske mase), pogodovale razvoju širokog spektra tehnika gradnje podzemnih objekata [1,2,3].

Prilikom izvedbe tunela najveća pažnja je usmjerena na unutarnja i vanjska naprezanja stijenske mase i poprečni presjek tunela. U ovisnosti o poprečnom presjeku, izvedbe projektiranja bit će različite. Većinom se radi o manje - više sličnim presjecima koji spadaju u neki od sljedećih oblika: kružni, eliptični, ovalni, pravokutni, oblik potkove i oblik svoda. Suvremena tunelogradnja se sve više nastoji prilagoditi tako da se novim metodama ojača stijenska masa kako bi i sama preuzela veliki dio opterećenja. Najbolje rezultate te prilagodbe pokazala je Nova austrijska tunelska metoda (NATM). Metoda je nastala kao rezultat preinaka starih metoda, uslijed čega je i nastao prefiks Nova, a Austrijskom se naziva jer se njeno otkriće pripisuje austrijskim inženjerima [2].

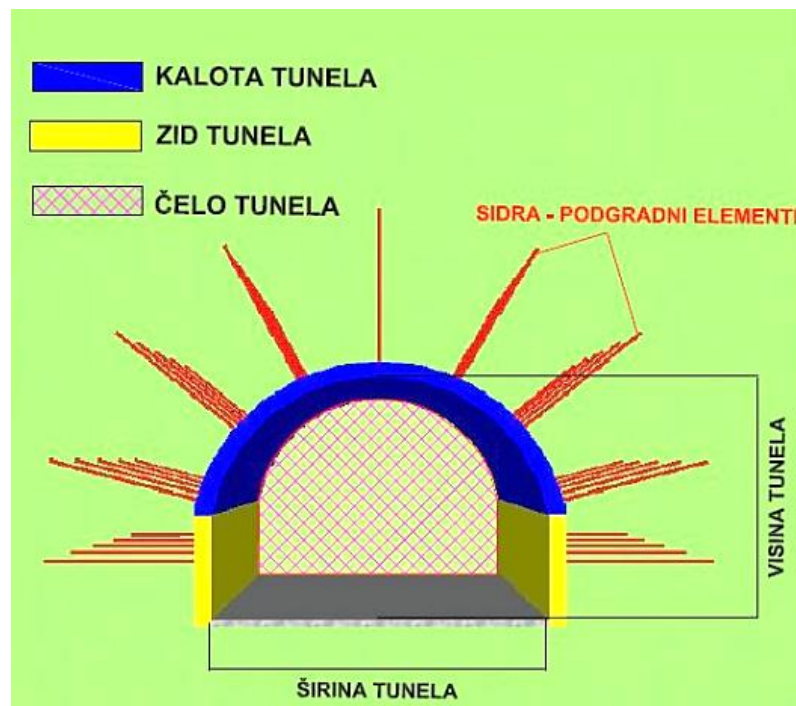
Bilo da je riječ o domaćoj ili stranoj literaturi, svaka od njih definirat će NATM kao generalni koncept tunelogradnje, a ne kao metodu. O ispravnosti te tvrdnje pokazuje činjenica da je većina današnjih tunela građena upravo po njenim principima. Iako je posljednjih godina popraćena raznim kontroverzama, ubraja se među najbitnija dostignuća tunelogradnje. Radom su detaljno obuhvaćeni osnovni principi koji je definiraju, dostignuća koja su pogodovala njenoj pojavi i i neke od pozitivnih i negativnih strana njene primjene. Sve to objedinjeno je u jednom konkretnom primjeru izvedbe tunela prema NATM, a radi se o tunelu „Debeli Brijeg“.

2. OPĆENITO O TUNELIMA

Tuneli se definiraju ovisno o tome promatra li ih se u užem ili širem smislu te riječi. U užem smislu, to su podzemne građevine čija je osnovna namjena omogućiti prometnici, vodnom toku ili komunalnim instalacijama prolazak kroz ili ispod, prirodne ili umjetne zapreke. U širem smislu, to su podzemni prostori većih gabarita koji mogu služiti kao energetska postrojenja, garaže, skladišta i sl. Zajedno s mostovima, ubrajaju se među najzahtjevnije inženjerske objekte jer moraju povezati preprekom razdvojene dijelove puta. Te prepreke mogu se pojavljivati u različitim oblicima, a najčešće su uvjetovane prirodno (jezera, rijeke, brda) ili kao posljedica slabe kvalitete tla (odroni, klizišta, obrušavanja) [4,5].

Glavni dijelovi poprečnog presjeka tunela su (slika 1.):

- 1) kruna - najviša točka
- 2) kalota - zakrivljeni gornji dio
- 3) zid - dio s lijeve i desne strane
- 4) čelo - početni neiskopani dio tunela
- 5) podnožni svod - luk ispod kolničke konstrukcije; neobavezan dio koji se primjenjuje samo pri izvedbi na lošijoj stijenskoj masi [10].



Slika 1. Poprečni presjek tunela [6]

2.1. Klasifikacija tunela

Postoje razne klasifikacije tunela u ovisnosti o uvjetima koji se razmatraju. Na osnovu njih, tuneli se mogu podijeliti prema: namjeni, obliku tunelske osi, položaju na terenu, dužini, broju voznih traka, težini rada i dr. [5].

Podjela tunela prema namjeni:

- 1) prometni - pješački, cestovni, plovni, željeznički
- 2) hidrotehnički - tuneli hidrocentrala (dovodni i odvodni), kanalizacijski
- 3) komunalni - smještaj telefonskih i električnih vodova, plinovoda, toplovoda
- 4) tuneli rudarske industrije - omogućuju eksploataciju [5,6]

Podjela tunela prema obliku tunelske osi:

- 1) u pravcu
- 2) u pravcu s krivinom (ulaznom/izlaznom ili na oba kraja)
- 3) kružni
- 4) helikoidalni [5]

Podjela tunela prema položaju na terenu:

- 1) podvodni - riječna prepreka
- 2) brdski - prepreka u formi brda
- 3) podzemni - metroi [4]

Podjela tunela prema dužini:

- 1) vrlo kratki - do 50 m
- 2) kratki - između 50 i 500 m
- 3) srednji - između 500 i 2200 m
- 4) dugi - između 2200 i 4000 m
- 5) vrlo dugi - iznad 4000 m [5]

Podjela tunela prema broju voznih traka:

- 1) jednotračni
- 2) dvotračni
- 3) višetračni [5]

Podjela tunela prema težini rada:

- 1) laki tuneli - izvedba u kamenu; ne zahtijevaju podgradu
- 2) teški tuneli - izvedba u trošnoj stijeni podložnoj raspadanju
- 3) vrlo teški tuneli - izvedba u zemlji; zahtijevaju komplicirano podgrađivanje [5].

2.2. Postupak projekiranja tunela

Ono što razlikuje gradnju tunela od nekih drugih grana graditeljstva jest to što projektant nema mogućnost biranja strukturnog materijala (materijal je tlo ili stijenska masa), dok kod drugih grana ima (materijal može biti opeka, armirani beton i sl.) [6]. Upravo je to jedan od glavnih razloga zbog kojih se tunelogradnja smatra visokorizičnom, kako u humanom, tako i u financijskom smislu. Projektiranje i izgradnja tunela pokazat će se uspješnima, onoliko koliko je uspješna prognoza svojstava stijene i tla te podzemne vode. Troškovi građenja tunela najviše ovise o dužini i geološkoj građi terena kroz koji se planira njegovo probijanje. Zbog toga je potrebno provesti detaljne analize kako bi se spriječile moguće poteškoće pri izvedbi. Prvi korak je utvrđivanje trase, nakon čega slijede geološka i geofizička istraživanja koja daju odgovore na pitanja kakav je geološki sastav tla te hoće li se trasa zadržati ili pomicati. Najpogodnijima su se za gradnju pokazale eruptivne stijene, a najslabijima glinovite i pjeskovite naslage ispunjene vodom [1,3,4].

2.2.1. Geotehnička istraživanja

Ovaj tip istraživanja vezan je uz najraniju fazu projekta i ima za cilj opisati svojstva tla, uvjete u tlu, moguća zagađenja, kao i utjecaj tunela na okoliš. Kako bi se moglo pristupiti projektiranju, najbitnije je prikupiti informacije o:

- geološkim profilima - struktura, klasifikacija i karakteristike osnovnih tipova stijena
- mehaničkim svojstvima i opisu stijenske mase
- hidrogeološkim svojstvima
- mogućim rizicima - pojava metana ili vode u rasjedima [3].

2.2.2. Prethodna istraživanja

Proces izgradnje tunela zahtijeva konstantno prikupljanje informacija, počevši od prvih, preko glavnih istraživanja i u konačnici za vrijeme i nakon izvođenja radova. Te rezultate je potrebno korak po korak prikazati u izvještaju [3].

Izradi projekta prethode početna i glavna istraživanja [3].

Pod početna istraživanja ubrajaju se:

- terensko kartiranje i razrada geoloških, hidrogeoloških, hidroloških, inženjersko-geoloških i topografskih karata, satelitske snimke i sl.
- analiziranje iskustava nastalih uslijed gradnje susjednih građevina
- određivanje geotehničkih profila uz pomoć mreže istražnih radova [3].

Početna istraživanja trebala bi svratiti pozornost na bitna svojstva tla i omogućiti procjenu količine glavnih istraživanja i načina na koji projekt utječe na uvjete u tlu [3].

Glavna istraživanja se provode unutar površine projekta ili površine koja je indirektnim ili direktnim načinom povezana s projektom. Pod glavna istraživanja ubrajaju se:

- prikupljanje informacija potrebnih pri projektiranju ili dimenzioniranju
- izrada proračuna, ponudbene dokumentacije i procjene opasnosti za objekte u užoj okolini [3].

2.2.3. Istraživanja tijekom građenja

Istraživanja koja se provode tijekom procesa građenja ili tzv. in situ istraživanja, osnovni su dio metode građenja. Ona obuhvaćaju:

- snimanje čela i formiranje uzdužnog profila
- mjerenje pomaka konture i točaka stijenske mase
- mjerenje naprezanja na kontaktima (obloga-tlo), u oblozi ili u elementima stabilizacije
- mjerenje vibracija
- praćenje nivoa podzemne vode
- geotehnička istraživanja [3].

2.3. Tehnologija izvedbe tunela

Tehnike koje se koriste u svrhu razaranja stijena kako bi se izveli podzemni prostori znatno se razlikuju od tehnika čija je jedina svrha razoriti stijenu za dobivanje mineralne sirovine. Primjena tehnike razaranja mora osigurati da se stijenska masa oko iskopanog prostora čim manje ošteti, što i čini glavnu razliku u odnosu na masovni iskop gdje takav zahtjev ne igra veliku ulogu. U moru različitih tehnika koje se mogu primijeniti, potrebno je odabrati onu koja će najpraktičnijim načinom donijeti najbolje rezultate. Najlakše ih je promatrati kroz 2 osnovne podjele, koje se dalje nadovezuju na svoje potpodjele. Osnovna podjela odnosi se na tehnike miniranja (grubi iskop, pogodne za tvrđe stijene) i tehnike strojnog iskopa (precizniji iskop, prilagođavaju se širokom rasponu vrsta tla) [3,6].

2.3.1. Miniranje

Postupak miniranja provodi se ako je potrebno razlomiti stijenu zbog eksploatacije ili dobivanja materijala za gradnju te kako bi se omogućila izvedba površinskog ili podzemnog prostora: usjeka/zasjeka, tunela i sl. (slika 2.). Tehnike izvedbe se za navedene potrebe znatno razlikuju, ali se u rudarstvu najčešće pojavljuju zajedno [3].

Uz miniranje se vežu sljedeće radnje:

- udarno ili udarno-rotacijsko bušenje minskih bušotina
- ispunjavanje bušotina eksplozivom, povezujući ih detonatorima
- paljenje eksploziva [3].

Postupak je sam po sebi jako bučan i može uzrokovati štete prilikom širenja vibracija ili letećih odlomaka stijena, pa se nastoji te učinke dovesti na prihvatljivu razinu. Ako se miniranje izvodi za potrebe stvaranja podzemnih prostora, jako je bitno posvetiti pažnju očuvanju stijenske mase i svesti njeno oštećenje na minimum. Zbog toga se razvila potreba za tzv. konturnim miniranjem (engl. *contour blasting*) u koje spadaju:

- prespliting metoda (engl. *pre-split*) - prethodno stvaranje pukotine po plohi iskopa; koristi se prilikom miniranja u blizini površine terena
- metoda glatkog miniranja (engl. *smooth-wall blasting*) - formiranje centralnog iskopa „grubim“ miniranjem i superponiranje povoljne orijentacije glavnih naprezanja i posljedica efekta miniranja; koristi se u podzemnoj gradnji [3].



Slika 2. Miniranje tunela Učka [19]

2.3.2. Strojni iskop

U literaturi se pojavljuje pod kraticom TBM (engl. *Tunnel Boring Machine*) i obuhvaća sve strojeve namijenjene iskopu tunela, koji se dijele na:

- strojeve za iskop u punom profilu - krtice (slika 3.)
- strojeve s pokretnom glavom - glodači i strojevi s diskovima
- blind shaft borer (bušenje) - primjena u mikrotunelima
- raise borer - bušenje u smjeru prema gore [3].



Slika 3. Stroj za iskop u punom profilu [20]

2.3.3. Iskop rezanjem stijena

Ova metoda je svoju primjenu našla kod srednje tvrdih i mekih stijena. Pokazala se vrlo učinkovitom zbog minimalnog poremećenja stijenske mase, uz također minimalno stvaranje buke i vibracija (slika 4.) [3].



Slika 4. Izvedba iskopa rezanjem stijene [3]

2.3.4. Iskop bagerima

Primjenjuje se ako se iskop vrši u tvrdom tlu ili mekšoj stijeni (slika 5.) [3].



Slika 5. Iskop tunela bagerom [21]

Osim prethodno navedenih metoda iskopa, postoje još i:

- metoda iskopa hidrauličkim čekićima i lopatama - koristi se pri iskopu glinovitih stijena
- hidrauličko razaranje stijena - koristi se kada postoji potreba za svođenjem vibracija na minimum kako bi se zaštitili okolni objekti
- upotreba ekspanzivnih materijala za razaranje stijena - lomljenje stijene primjenom osobine materijala da može povećati svoj volumen [3].

2.4. Posebne metode izvedbe tunela

Svaka vrsta tla ili stijene odreagirat će različito na otvaranje podzemne prostorije. Na osnovu tih različitih reakcija, formirane su 4 osnovne metode gradnje:

- 1) lažni tuneli - tlo ima funkciju opterećenja; primjenjivo u otvorenom načinu gradnje
- 2) podupiranje krutom podgradom - stijena također sudjeluje u prijenosu opterećenja; primjenjivo u zatvorenom načinu gradnje
- 3) stabilnost stijene bez podgrađivanja - moguće na određenoj dužini i u određenom vremenskom razdoblju; primjenjivo u polučvrstom tlu ili stijeni
- 4) stabilnost iskopa čvrste stijene uz dodavanje tanke podgrade po potrebi [3].

2.4.1. Lažni tuneli (engl. cut and cover tunells)

Engleski prijevod ove metode daje odgovor na pitanje na kojem principu je zasnovana, a radi se o principu iskopavanja i pokrivanja. Najčešće se primjenjuje ako tunel prolazi tik ispod površine terena jer daje ekonomičnija rješenja u odnosu na iskop klasičnim metodama. Iako je u tom pogledu u prednosti nad klasičnim metodama, svejedno je popraćena nekim drugim problemima pri izvedbi, kao što su: odvodnja, odabir tehnologije zasipavanja i iskopa te stabilnost kosina [3].

2.4.2. Uronjeni tuneli

Metoda služi savladavanju vodnih prepreka i u aktivnoj je upotrebi već više od 100 godina. Pogodna je iz više razloga, a među najbitnije se ubrajaju:

- poprečni presjek može biti proizvoljan, što je dobro ako je potrebno iskombinirati cestovni i željeznički promet
- u usporedbi s bušenim tunelom ima manju duljinu i nagib nivelete te brže vrijeme izgradnje
- sigurniji rad
- izvedba je moguća i na tlu koje ima lošija svojstva
- dobro podnosi seizmičke reakcije
- sve faze gradnje mogu se obavljati istovremeno [3].

2.4.3. Iskop pod zaštitom dijafragme

Najčešće se koristi u gradovima, u izvedbi dijafragme kao klasične armiranobetonske ili kao niz bušenih pilota. Osnovna prednost u odnosu na ostale metode je minimalan utjecaj na promet [3].

3. METODE ISKOPA TUNELA

Tehnike iskopa tunela i podzemnih prostorija te stabiliziranja neposredno iskopanog profila ubrajaju se među najizazovnije inženjerske zadatke. Postupak stabiliziranja jednostavnije se naziva podgrađivanjem [11].

Razlikuju se 2 metode iskopa tunela:

- 1) klasične metode
- 2) suvremene metode

O tome koju metodu koristiti, određuju fizičko-mehanička svojstva materijala u kojima se planira iskop. Osnovna razlika između ovih dviju metoda jest funkcija podgrade. Kod klasičnih metoda se koristila drvena podgrada i njena funkcija je bila samo privremeno podupiranje stijenske mase prije zamjene trajnom oblogom od opeke, kamena ili kamenih blokova. S druge strane, kod suvremenih metoda koristi se podgrada od trajnog materijala koja se smatra konstruktivnim elementom i ne uklanja se prilikom izvedbe trajne obloge [2,11].

3.1. Klasične metode iskopa tunela

Klasičnim metodama obuhvaćeni su načini gradnje od polovice 19. st do polovice 20. st. Karakterizira ih primjena u skućenom prostoru, gdje je odabir mehanizacije ograničen. U samim počecima podgrađivanje se vršilo privremenom drvenom podgradom, zatim čeličnom te naposljetku konačnom zidanom ili betonskom [2,4,7].

Postoji više varijanti klasičnih metoda, a među osnovne se ubrajaju:

- 1) stara austrijska metoda
- 2) belgijska metoda
- 3) talijanska metoda
- 4) njemačka metoda

Imena su dobile prema zemlji u kojoj su nastale [7].

3.1.1. Stara austrijska metoda

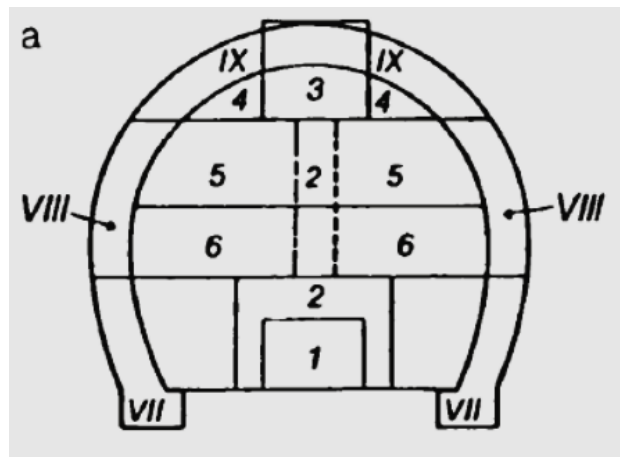
Glavno obilježje ove metode je iskop donjim potkopom. Slika 6. prikazuje redosljed izvedbe radova. Proces iskopavanja započinje smjernim potkopom u trapeznom profilu, a zatim se na svakih 20-ak metara osigurava vertikalni proboj koji ima za funkciju preuzeti iskopani materijal iz gornjeg u donji potkop. Slijedi ga bočno proširivanje potkopa, također u smjeru od gore prema dolje. Tako se otvaranjem cijelog profila stijena potpuno oslobodi od podgrade i prelazi se na proces postavljanja oplata. Obloga se najčešće betonira ili zida kamenim ili prefabriciranim betonskim blokovima [4,8].

Prednosti metode:

- izvedba istražnog tunela u funkciji drenaže
- moguće povećanje broja lokacija iskopa
- finalni oblik uvjetovan načinom iskopa

Mane metode:

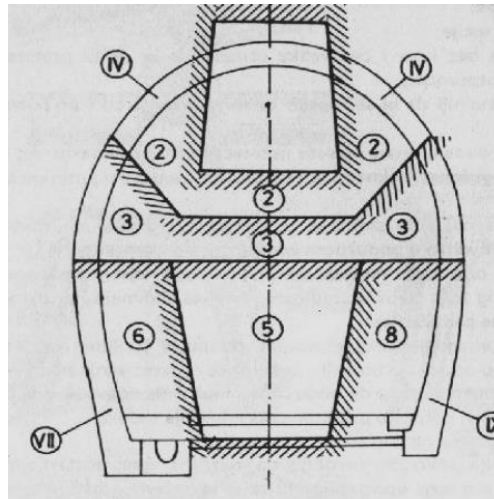
- ograničenost izvedbe zbog drvenih razupora
- pojava slijeganja i pomaka stijenske mase
- spor napredak tunela [10].



Slika 6. Redosljed izvedbe radova kod stare austrijske metode [10]

3.1.2. Belgijska metoda

Slikom 7. detaljno je prikazan redoslijed izvedbe radova kod ove metode. Iskop se vrši gornjim potkopom koji se zatim proširuje na bokove. Kalota obloge izvodi se neposredno nakon iskopavanja gornjeg dijela profila duž cijele širine, nakon čega se iskopava srednji dio profila na dolje. Bokovi se dovršavaju nakon što se iskopa i donji dio na punu širinu, a zatim se prelazi na zadnji korak - uklanjanje podgrade. Po potrebi se izvodi i podnožni svod [8].



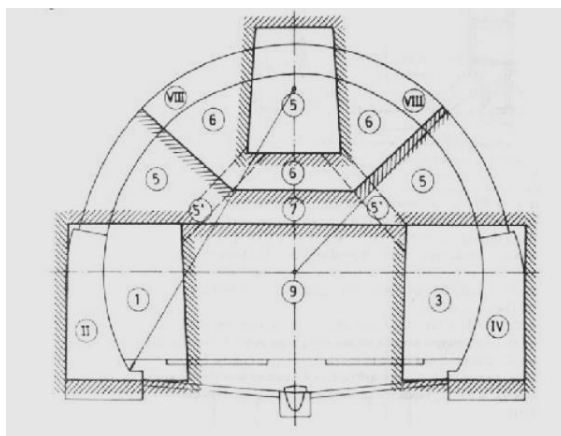
Slika 7. Redoslijed izvedbe radova kod belgijske metode [7]

3.1.3. Talijanska metoda

Metoda podrazumijeva zamjenu slabog stijenskog materijala i izvedbu suhozida koji služi preuzimanju opterećenja masiva i smanjenju opterećenja obloge. Ime je dobila prilikom iskopa dugih apeninskih tunela u teškim geotehničkim uvjetima [8,11].

3.1.4. Njemačka metoda

Često se pojavljuje pod izrazom metoda 3 potkopa. Svoju primjenu je našla u teškim geotehničkim uvjetima gradnje (npr. prisustvo velikih količina vode) i kod većih poprečnih profila podzemnih prostorija. Osnovni princip ove metode je oslanjanje oplata i kalote iskopa na centralnu jezgru, u svrhu uštede materijala podgrade (slika 8.). Danas se koristi u svojoj moderniziranoj verziji (NATM) [4,8].



Slika 8. Redosljed izvedbe radova kod njemačke metode [7]

Primjena klasičnih metoda rezultirala je slabljenju stijenske mase, nepravilnim oštećenjima i debelom podgradom, što je u konačnici dovelo do ograničavanja njihove primjene danas. Uz sve to, napredovanje se događa jako sporo, a troškovi koje ovakva izvedba iziskuje su preveliki i neisplativi [2,8].

3.2. Suvremene metode iskopa tunela

Pojavom novih disciplina, poput mehanika tla i stijena te razvojem geoloških i geofizičkih istraživanja, razvila se i potreba za osuvremenjivanjem metoda iskopa tunela. Glavnu razliku u odnosu na tradicionalne metode predstavlja iskopavanje tunela u punom profilu, bez potkopavanja. Izvedba ovakvim načinom postaje brža i lakša, ali s druge strane zahtijeva upotrebu složenije mehanizacije i osiguravanje iskopa sidrima, mrežom i špricanim betonom [2,7].

Među 2 najznačajnije suvremene metode spadaju:

- 1) Norveška tunelska metoda - NTM
- 2) Nova austrijska tunelska metoda - NATM [2,7].

3.2.1. Norveška metoda

Razvila se od strane poznatih norveških građevinskih firmi. Zasnovana je na istim principima kao i NATM uz neke bitne preinake: manji troškovi, veća briga za zaštitom okoliša, upotreba mlaznog betona s čeličnim vlaknima, primjena u dobroj stijenskoj masi. S obzirom na to da je NATM pogodnija za meka tla i slabije stijene, gdje se iskop vrši ručno ili pomoću stojeva, NTM se pokazala prikladnijom za tvrđa tla uz iskop tehnikama miniranja ili bušenja [7].

Nova austrijska tunelska metoda (NATM) bit će detaljno objašnjena u nastavku rada.

4. NOVA AUSTRIJSKA TUNELSKA METODA (NATM)

4.1. Uvod

Još u 19.st. započinje podgrađivanje primjenom trajnih materijala, a drvena podgrada zamjenjuje se čeličnom. Klasične metode iskopa podzemnih prostorija gotovo su potpuno iščeznule već u drugoj polovici 20.st. Najveći doprinos tome dali su austrijski inženjeri koji su 50-ih godina prošlog stoljeća osmislili Novu austrijsku tunelsku metodu (u nastavku, NATM). U godinama koje su uslijedile nakon njenog otkrića, stvorena je i inačica pod nazivom Norveška tunelska metoda (NTM), utemeljena na istim principima, ali s nešto drugačijim praktičnim rješenjima. Osnovni princip na kojem se zasniva NATM jest preraspodjela naprezanja na stijenu, a ne samo na podgradu jer one zajedno čine spregnutu konstrukciju [11].

4.2. Dostignuća tunelogradnje koja su pogodovala pojavi NATM

1948. godine austrijski inženjer i sveučilišni profesor Ladislaus von Rabcewicz osmislio je dvostruku tunelsku podgradu koja je imala za svrhu dopustiti stijeni deformiranje i prije nego li se ugradi konačna podgrada. Ipak, njegovim glavnim dostignućima smatraju se primjena in-situ mjerenja i sistematskog sidrenja, koja je uveo u suradnji s austrijskim inženjerima i geologom Leopoldom Müllerom. Zamjenu drvene podgrade čeličnom predložio je Rziha, poznati inženjer 19.st. Zatim je 1930-ih godina Rabcewicz uveo korištenje mlaznog betona kao podgrade za podzemni iskop, otprilike 10 godina nakon njegove prve upotrebe u podzemlju, a 1954. rudarski inženjer Anton Brunner dosjetio se iskoristiti ga kako bi stabilizirao stijenu podložnu gnječenju. Između ostalog, Brunner je bio zagovornik zamjene drvene i čelične podgrade mlaznim betonom kao trenutnom podgradom, što se kasnije pokazalo vrlo uspješnim u primjeni na tunelima diljem Italije i Austrije [3].

4.3. Retrospektiva nastanka NATM

Razvoj NATM počiva na iskustvima primjene i preinake tradicionalnih metoda. Prvi nagovještaj nove metode bio je davne 1944. godine, u Rabcewiczevoj knjizi „Gorski pritisak i tunelogradnja“. Četiri godine nakon, svojim novim patentom, Rabcewicz definira osnovne principe metode. U godinama koje su uslijedile, NATM se sve više razvijala kroz različita iskustva njene primjene, a ono što se zadržalo kroz sve te godine bili su njeni osnovni principi. Od 1956. do 1958. gradi se prvi veliki tunel u Venezueli, na temeljima primjene NATM. 1963. održan je 13. Geomehanički kolokvij u Salzburgu na kojem je NATM predstavljena svijetu i ta godina smatra se godinom njenog rođenja jer je prvi put nazvana imenom pod kojim je poznata i danas, a 1964. je dobila i međunarodno priznanje [2,3,6].

4.4. Objašnjenje naziva metode

Nova austrijska tunelska metoda ili izvorno njem. *Neue Österreichische Tunnelbauweise*, kasnije njem. *Neue Österreichische Tunnelbaumethode*, ne smatra se metodom nego generalnim konceptom tunelogradnje. Upravo zbog toga je napravljena prepravka u imenu jer se njem. *Tunnelbauweise* prevodi kao način građenja, a kako se zapravo radi o filozofiji, ispravniji je prijevod njem. *Tunnelbaumethode*. U usporedbi s filozofijom kojom se nastoje razjasniti veze između stvari, tunelogradnjom se nastoje razjasniti veze u području gradnje tunela. Nazvana je Novom jer joj je prethodila Stara austrijska tunelska metoda, a austrijskom jer su je otkrila trojica austrijskih inženjera - Rabcewicz, Müller i Pacher, koji se smatraju očevima NATM [2,3].

5. NAČELA TUNELGRADNJE PREMA NATM

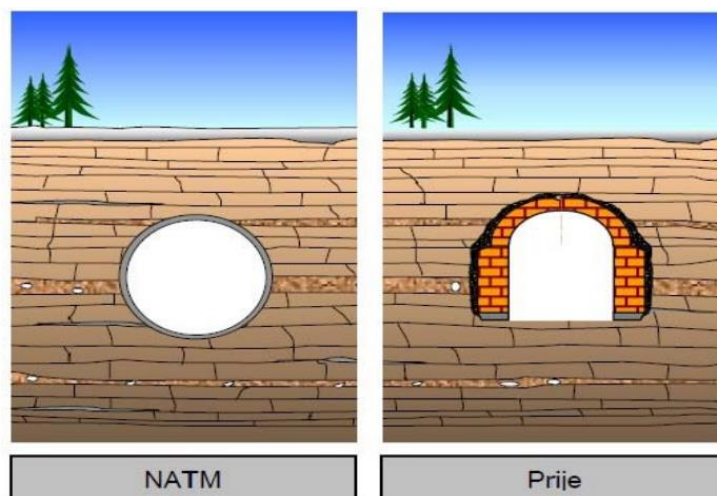
NATM se smatra konceptom tunelogradnje zbog toga što se zasniva na konceptu da tlo ili stijena oko podzemnog otvora također postanu dio nosive konstrukcije. Preciznije rečeno, stijena ima zadaću da preuzme dio preraspodijeljenog naprezanja, a dio preuzima primarna podgrada. Tako stijena zapravo postaje dijelom nosivog elementa podgrade, a deformacije stijenske mase dopuštene su u prihvatljivoj količini koja će biti dovoljna za aktivaciju nosivog prstena. Nosivim prstenom naziva se zona oko tunela gdje se događa proces preraspodjele naprezanja. Kroz cijeli proces gradnje nastoji se postići pojava stvarnog troosnog ili višeosnog stanja naprezanja, a izbjeći pojava jednoosnog ili dvoosnog. Bitno je naglasiti da sustav podgrade treba promatrati kao vremenski proces, a ne samo kao konstrukciju. NATM se kroz godine morala prilagoditi višefaznom iskopu te čestim geotehničkim i geološkim promjenama uvjeta na čelu iskopa [2,7].

5.1. Osnovni principi NATM

NATM se najbolje može opisati kroz 22 principa koja su definirali Rabcewicz, Müller i Pacher, a ti principi su sljedeći [3]:

1. Stijenska masa je osnovna nosiva komponenta tunela

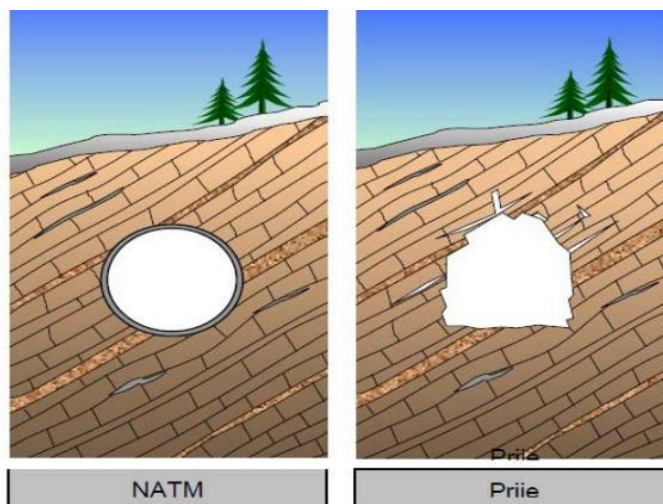
Zadaća primarne i sekundarne podgrade je uspostavljanje nosivog prstena u stijenskoj masi (slika 9.) [7].



Slika 9. Stijenska masa kao osnovna nosiva komponenta tunela [3]

2. Održavanje čvrstoće stijenske mase

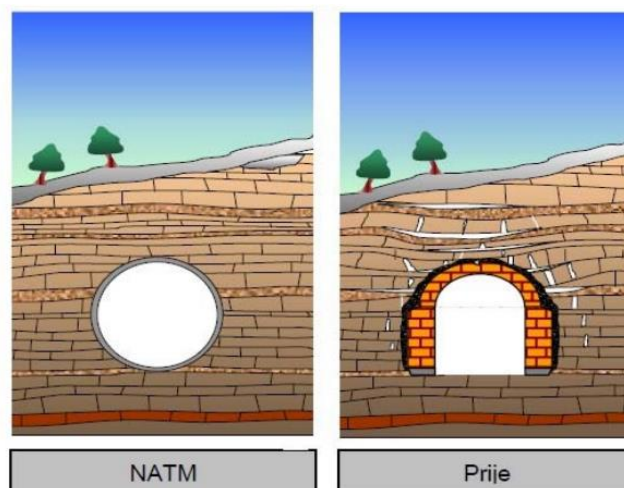
Kako je ranije navedeno, stijenska masa je glavni nosivi element tunela i kao takva treba zadržati svoju originalnu čvrstoću koju je imala i prije iskopa (slika 10.) [7].



Slika 10. Održavanje čvrstoće stijenske mase [3]

3. Izbjegavanje razrahljenja stijenske mase

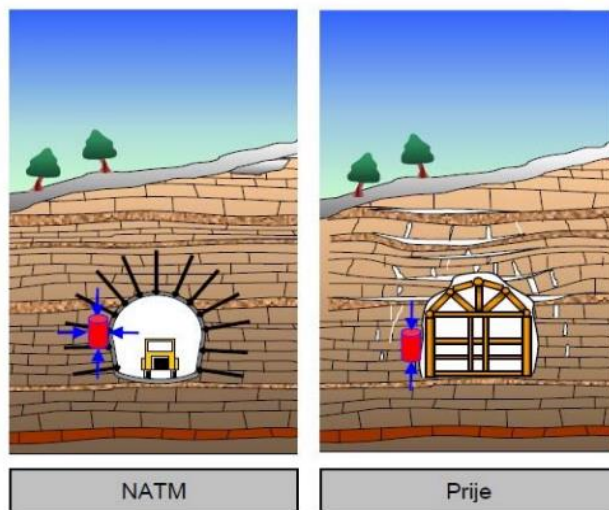
Razrahljenje dovodi do gubitka čvrstoće stijenske mase, a što je niža čvrstoća tla, to je jače opterećenje na podgradu (slika 11.) [3].



Slika 11. Izbjegavanje razrahljenja stijenske mase [3]

4. Kontrola deformacije stijenske mase

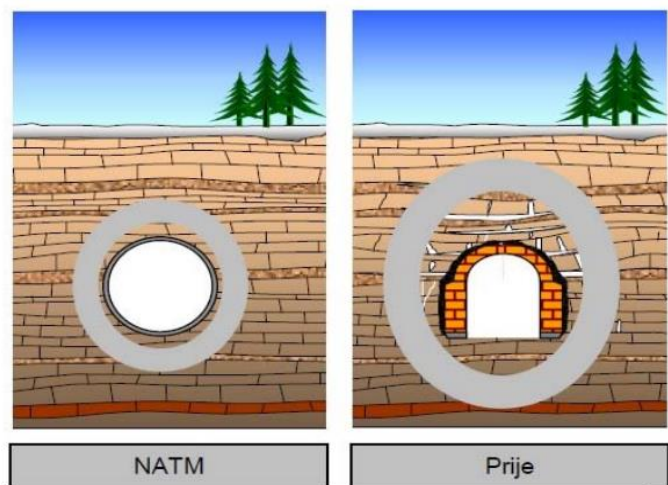
Nastoji se postići da stijena u okolini iskopa ne bude u jednoosnom ili dvoosnom stanju naprezanja, nego u troosnom jer joj je i čvrstoća u takvom stanju naprezanja (slika 12.) [3].



Slika 12. Formiranje troosnog stanja naprezanja [3]

5. Kontrola deformacija stijenske mase

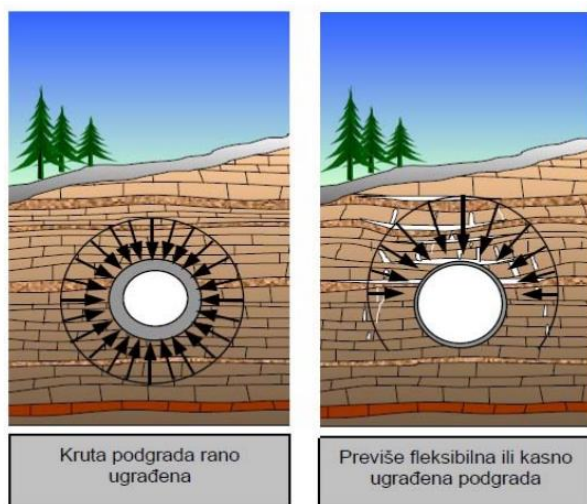
Deformaciju ne treba spriječiti, ali ju treba znati kontrolirati. To kontroliranje se postiže istovremenim formiranjem nosivog prstena oko tunela i onemogućavanjem razrahljenja, tj. gubitka čvrstoće stijenske mase. Veća uspješnost rezultirat će i većoj sigurnosti i ekonomičnosti građenja (slika 13.) [3,9].



Slika 13. Kontrola deformacije stijenske mase [3]

6. Pravovremena ugradnja podgrade

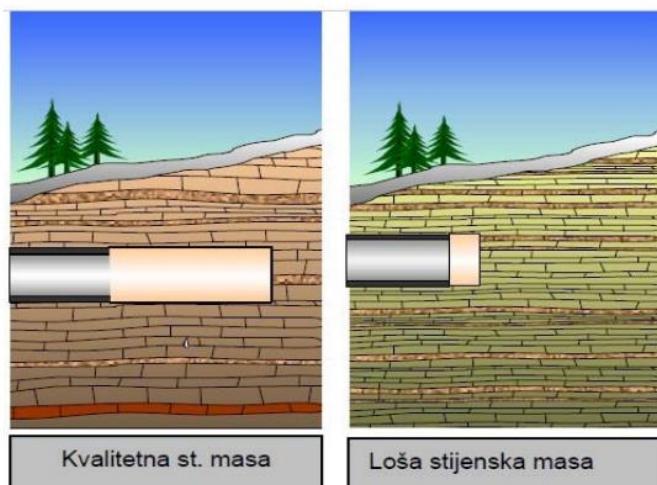
Ugradnja podgrade ne smije se izvesti ni prerano, ni prekasno. Također, podgrada koja se ugrađuje ne bi trebala biti ni previše kruta ni previše fleksibilna. Ako je podgrada prekruta i ugrađena prerano, vezat će za sebe visoka naprezanja. S druge strane, ako je podgrada previše fleksibilna i prekasno ugrađena, rezultirat će razrahljenjem stijenske mase što će također dovesti do visokih naprezanja (slika 14.) [3].



Slika 14. Pravovremena ugradnja podgrade [3]

7. Točna procjena specifičnog vremenskog čimbenika

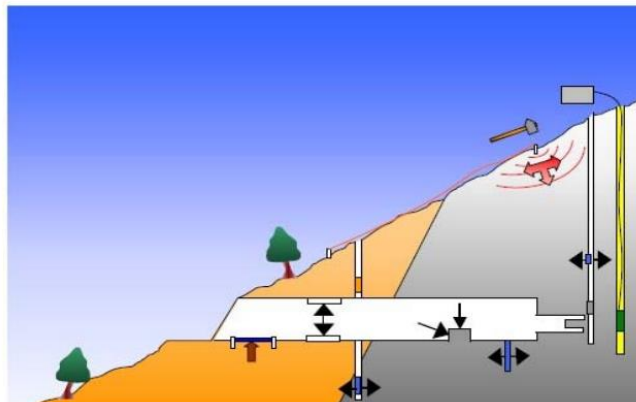
Ova procjena je bitna jer o njoj ovisi pravovremena ugradnja podgrade. Ako se radi o stijenskoj masi dobre kvalitete, tunel neko vrijeme može ostati nepodgrađen. Međutim, ako se radi o stijenskoj masi loše kvalitete, podgrađivanje treba izvesti odmah (slika 15.) [3].



Slika 15. Podgrađivanje u ovisnosti o kvaliteti stijenske mase [3]

8. Prethodna laboratorijska i terenska (in-situ) istraživanja

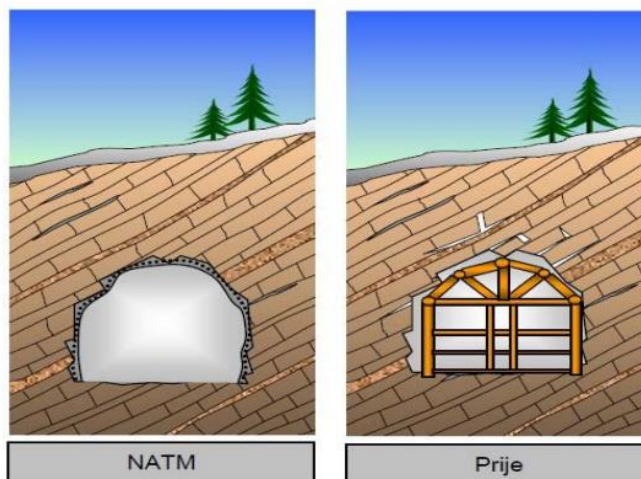
Istraživanja služe procjeni vremenskog čimbenika. Najbitniji podaci koje treba zabilježiti su: klasifikacija stijenske mase, vrijeme stabilnosti i brzina deformacije (slika 16.) [6].



Slika 16. Prethodna laboratorijska i terenska istraživanja [3]

9. Upotreba mlaznog betona umjesto drvene podgrade

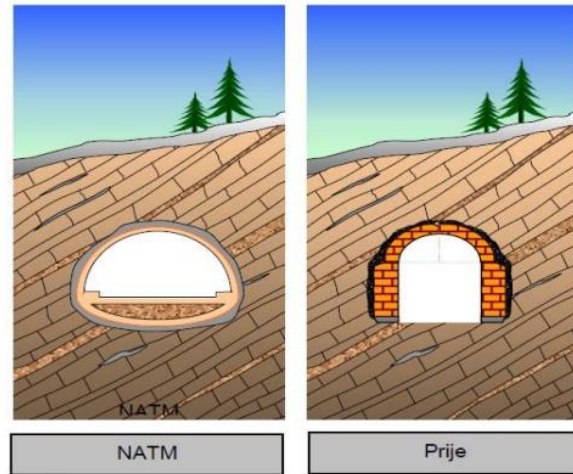
Primjenjuje se ako se očekuju veće deformacije i razrahljenje stijenske mase. Mlazni beton zatvara pukotine u stijeni i onemogućava ispadanje blokova stijene te samim tim pojavu progresivnog loma (slika 17.) [9].



Slika 17. Upotreba mlaznog betona umjesto drvene podgrade [3]

10. Tankostjena primarna i sekundarna podgrada

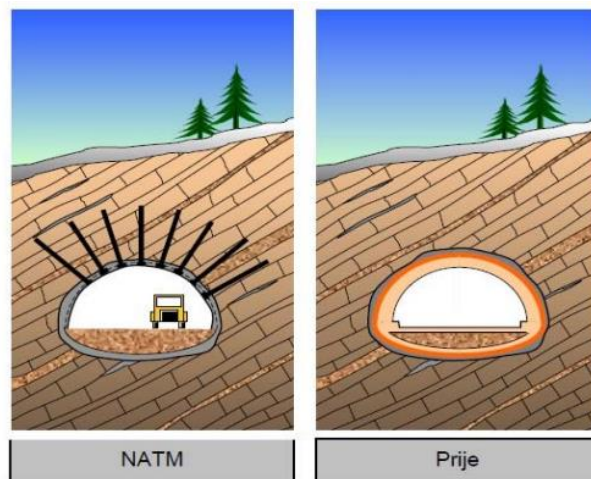
Tankostjenu podgradu karakterizira savitljivost, što je odlično ako se žele izbjeći veći momenti savijanja i pojava loma uslijed takvog savijanja (slika 18.) [9].



Slika 18. Upotreba tankostjene primarne i sekundarne podgrade [3]

11. Pojačanje podgrade

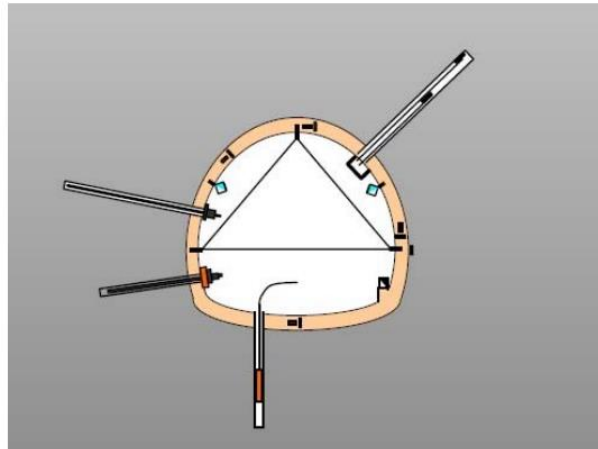
Podgradu je potrebno pojačati, a ne podebljati. Pojačanje se može izvesti pomoću armaturne mreže, tunelskih lukova ili sidara (slika 19.) [9].



Slika 19. Pojačanje podgrade [3]

12. Vrijeme i način ugradnje sekundarne podgrade

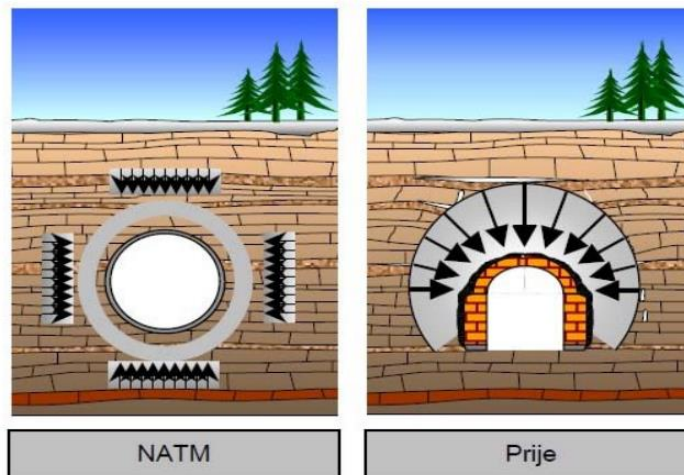
Sekundarna podgrada ugrađuje se na temelju rezultata zabilježenih pri mjerenju pomaka konture iskopa tunela (slika 20.) [3].



Slika 20. Mjerenje pomaka konture iskopa [3]

13. Statičko razmatranje tunela

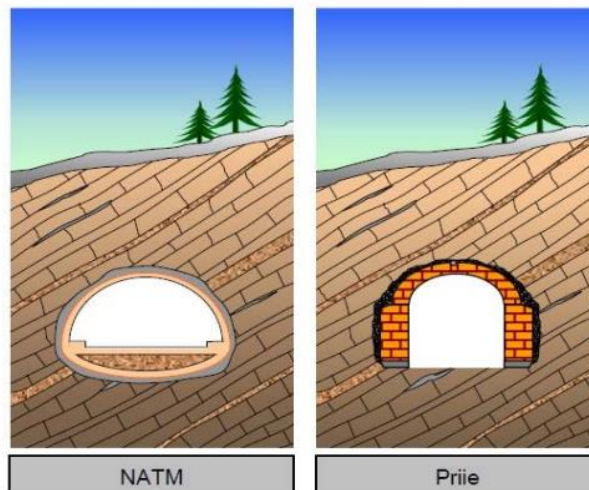
Tunel se razmatra kao debelostijena cijev koju sačinjavaju podgrada i nosivi prsten stijenske mase (slika 21.) [9].



Slika 21. Statičko razmatranje tunela [3]

14. Zatvaranje prstena

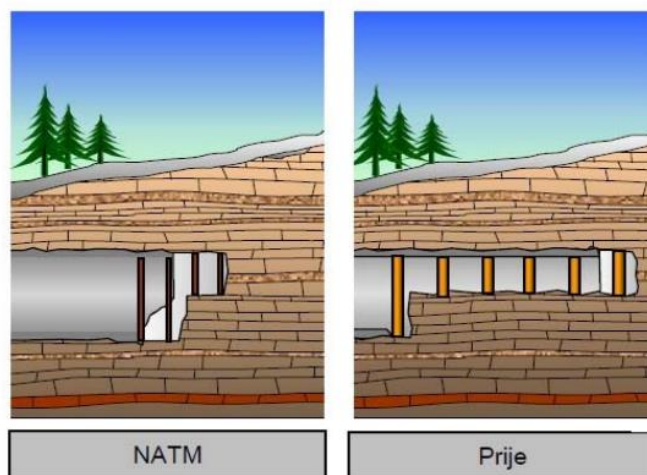
Ovaj princip je od posebne važnosti jer utječe na promatranje cijevi kao statičke samo ako nije prerezana (slika 22.) [9].



Slika 22. Zatvaranje prstena tunela [3]

15. Pravovremeno zatvaranje podgradnog prstena

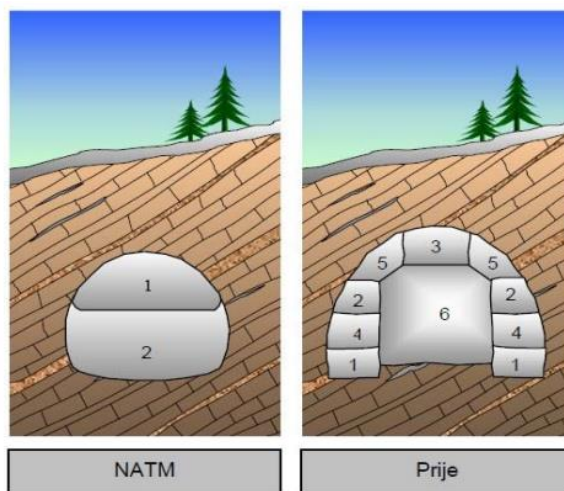
Vrijeme zatvaranja zapravo definira ponašanje stijenske mase. Ako se kalota odmiče, to vrijeme se produžuje i istovremeno se poluljuska i stijenska masa izlažu nepoželjnim velikim naprezanjima. Zbog toga se nastoji postići što kraće vrijeme između prve i posljednje faze, ako je riječ o ugradnji prstena u fazama (slika 23.) [3].



Slika 23. Zatvaranje podgradnog prstena [3]

16. Napredovanje u punom profilu

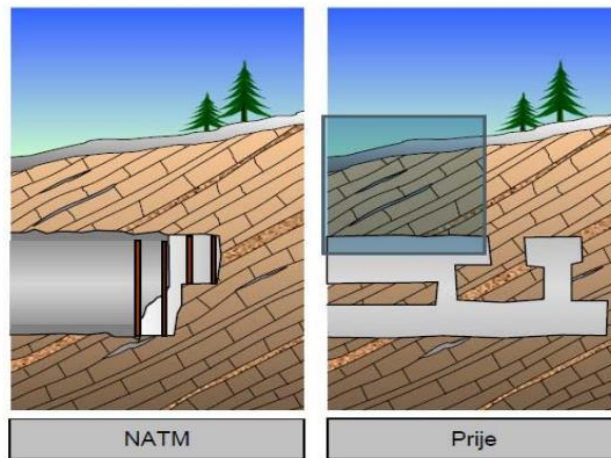
Kopanje cijelog profila tunela u isto vrijeme pogodnije je od pojedinačnog kopanja jer smanjuje oštećenje stijenske mase i uzrokuje manje komplikacija pri izvedbi. Pojedinačno kopanje s vremenskim pomakom također treba izbjegavati zbog promjene napreznja u okolici iskopa, ali postoje situacije kad se njegova primjena ne može izbjeći, npr. u teškim geotehničkim uvjetima (slika 24.) [3,9].



Slika 24. Napredovanje u punom profilu [3]

17. Sigurnost građevine

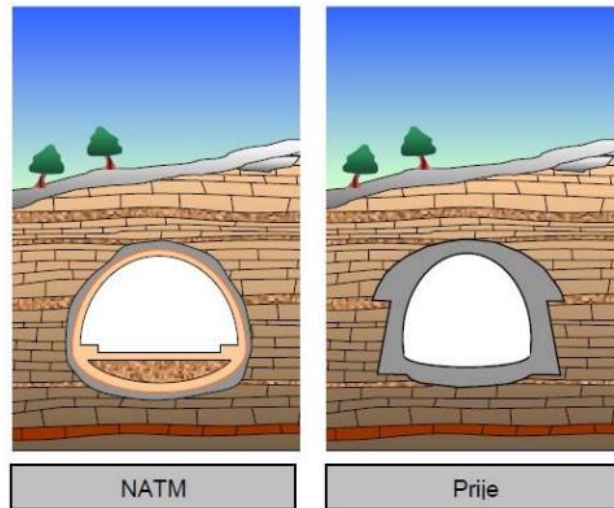
Odabir metode iskopa uvjetuje sigurnost građevine. Stabilizacija veze podgrada - stijenska masa postiže se promjenom dužine napredovanja i kalote, promjenom stijenskog pritiska i promjenom vremena podgrađivanja i zatvaranja prstena (slika 25.) [9].



Slika 25. Stabilizacija veze podgrada - stijenska masa [3]

18. Zaobljenje poprečnog profila tunela

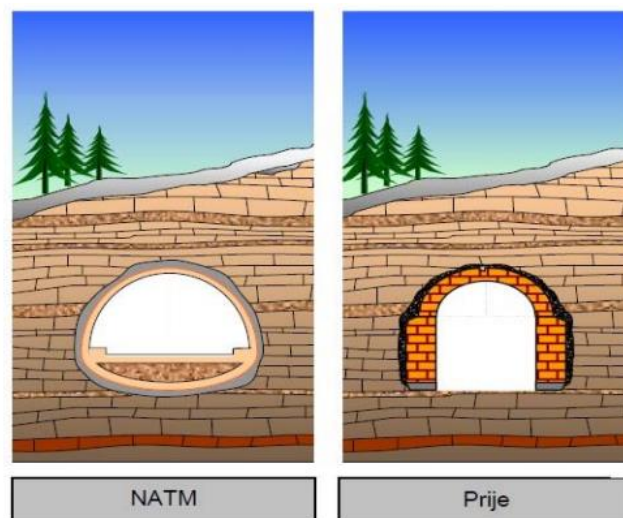
Zaobljen oblik poprečnog profila pogodniji je jer se tako smanjuje koncentracija naprezanja koja, ako se pojavi u kutu nekog profila, dovodi do progresivnog sloma i razaranja stijenske mase. Koncentracija naprezanja nastaje kad je normalno naprezanje puno manje od maksimalnog (slika 26.) [2,3].



Slika 26. Zaobljenje poprečnog profila [3]

19. Tanki sekundarna obloga

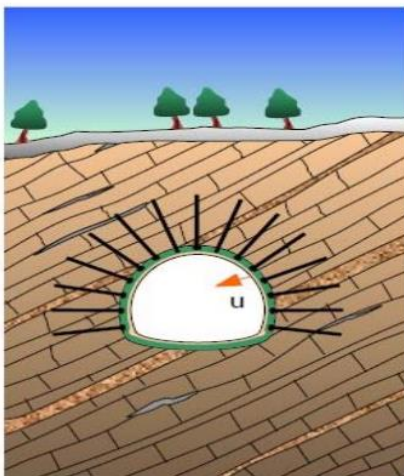
Nastoji se koristiti što tanja sekundarna obloga kako ne bi došlo do stvaranja sile trenja na kontaktu sekundarne s primarnom podgradom (slika 27.) [9].



Slika 27. Izvedba tanke sekundarne obloge [3]

20. Stabilizacija stijenske mase

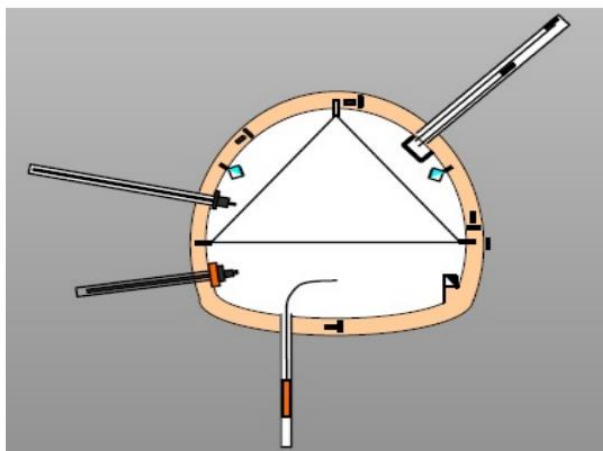
Stijensku masu stabilizira primarna podgrada, a sekundarna podgrada služi povećanju stabilnosti. Primarnu podgradu sačinjavaju: sidra, armirani ili nearmirani mlazni beton, čelični lukovi, cijevni kišobran i sl. Sekundarnu podgradu sačinjava armirana ili nearmirana betonska podgrada. Između ove dvije podgrade dolazi hidroizolacija (slika 28.) [3].



Slika 28. Stabilizacija stijenske mase [3]

21. Dimenzioniranje i kontroliranje stabilnosti podgrada

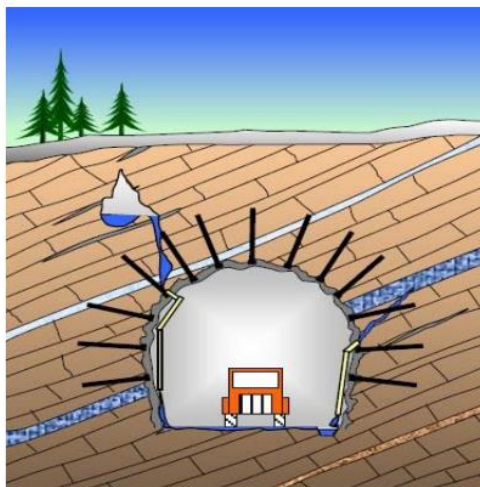
Primarna i sekundarna podgrada se dimenzioniraju i kontroliraju na stabilnost za vrijeme građenja i eksploatacije tunela uz pomoć monitoringa (opažanja). Taj proces obuhvaća mjerenje napreznja sekundarne obloge i mlaznog betona te napreznja na mjestu dodira mlaznog betona sa stijenom. Također, promatraju se pomaci u stijenskoj masi i pomaci na konturi iskopa tunela (slika 29.) [3].



Slika 29. Kontrola stabilnosti podgrada [3]

22. Izvedba drenaže

Drenaža rasterećuje stijensku masu od strujnog tlaka i podgradu od statičkog pritiska vode. Dreniranje vodi omogućuje pristup do tunela i zbog toga ne bi trebalo blokirati izvore na njegovoj konturi (slika 30.) [3].



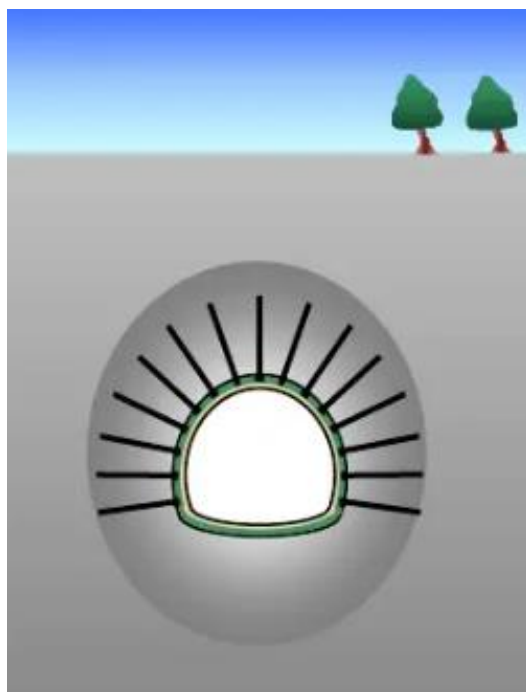
Slika 30. Izvedba drenaže [3]

Ovi principi se najčešće ne promatraju kao zasebne stavke, nego ih se grupira u 5 osnovnih principa:

- 1) Stijenska masa je osnovna nosiva komponenta tunela, a podgrada ima samo funkciju uspostavljanja nosivog prstena
- 2) Čvrstoća stijenske mase treba se održavati stabilnom, bez pojave razrahljenja
- 3) Poprečni profil je potrebno izvesti sa zaobljenjem, kako se na rubovima ne bi formirala koncentracija naprezanja
- 4) Podgrada se izvodi kao tanka i fleksibilna, ako se momenti savijanja žele svesti na minimum
- 5) Optimiziranje zahtjeva podgrade i radnih procesa vrši se monitoringom [10].

5.2. Nosivi prsten

Nosivi prsten ili zaštitnu zonu oko tunela teško je definirati i to je glavni razlog zašto se promatra kroz različite hipoteze. Heimova hipoteza tvrdila je linearno povećanje tlaka na podgradu s povećanjem dubine tunela, što se pokazalo krivim primjenom na tunelima ispod Alpa te je ova hipoteza opovrgnuta. Prema njoj bi se za stabilizaciju tunela na velikoj dubini koristile podgrade i do nekoliko metara debljine. Nekoliko godina nakon njegove hipoteze, Ritter primjećuje zanemariv utjecaj mase gornjih ležućih naslaga na stijensku masu nakon određene dubine. Njegova hipoteza dala je potpuno drugačiju analizu u odnosu na Heimovu. Tri godine nakon, Engesser daje jasnu predodžbu o vezi između deformacije stijenske mase i pritiska podgrade. 1912. godine Wiesmann počinje koristiti termin „zaštitna zona oko tunela“ u smislu zone u kojoj se dešava preraspodjela napreznja, tj. zone u kojoj stijena na sebe preuzima opterećenja od iskopane stijene. 1996. godine Golser iznosi najjasniju i najjednostavniju definiciju nosivog prstena. Prema njemu, nosivi prsten je „zona oko tunela u kojoj se desila značajna preraspodjela napreznja“ i obuhvaća zone elastičnog i plastičnog ponašanja te sidrene zone (slika 31.) [3].



Slika 31. Nosivi prsten prema Golseru [3]

5.4. Višefazna NATM

Za NATM se veže iskop u punom profilu i višefazni iskop. Primjena višefaznog iskopa uvjetovana je čestim geološkim i geotehničkim promjenama uvjeta duž stijenske mase, a geološki uvjeti na čelu definiraju razmak između tih faza. Ovaj tip iskopa primjenjuje se kod:

- tunela velikih poprečnih presjeka
- slabijih stijena/tla
- nadsloja manjeg od 20 m
- urbanih sredina [4].

Višefazni iskop pogodan je jer je primjenjiv u različitim geološkim uvjetima i prilagodljiv promjenama poprečnog presjeka iskopa. Također, iziskuje minimalne investicijske troškove. S druge strane, napreci po ciklusu su jako maleni i ističe se potreba za iskusim radnicima i tehničkim osobljem uz visoke zahtjeve kvalitete rada [4].

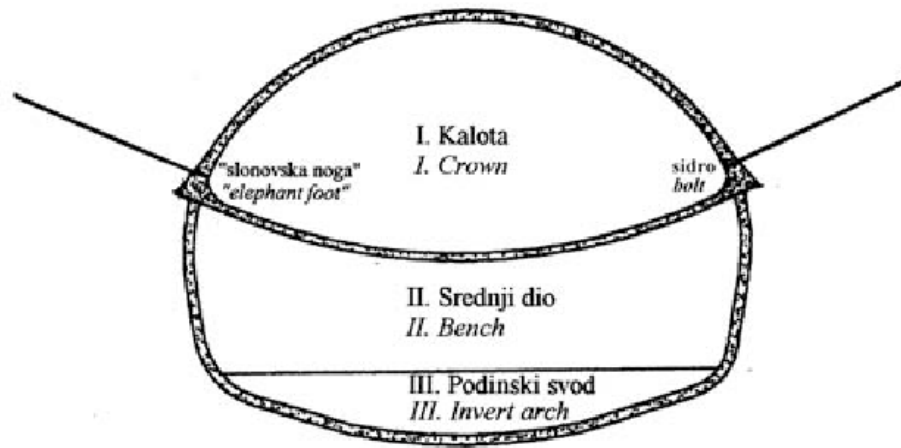
Tri najčešće korištena načina višefaznog iskopa su:

- 1) iskop u dvije faze - I. kalota, II. srednji dio (slika 32.) [12]



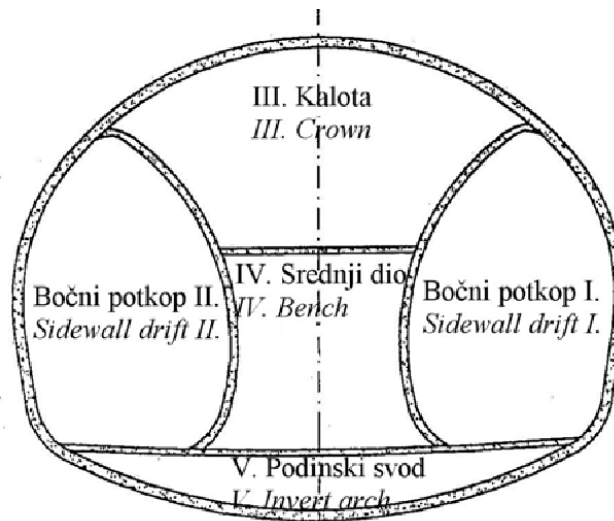
Slika 32. Iskop u dvije faze [4]

2) iskop u tri faze - I. kalota, II. srednji dio, III. podinski svod (slika 33.) [12]



Slika 33. Iskop u tri faze [12]

3) iskop u pet faza (iskop bočnim potkopima) - I. desni bočni potkop, II. lijevi bočni potkop, III. kalota, IV. srednji dio, V. podinski svod (slika 34.) [12].



Slika 34. Iskop u pet faza [12]

6. PREDNOSTI I MANE NATM

Uzme li se u obzir činjenica kako tunelogradnja spada među najkompleksnije radnje povezane uz stijenu ili tlo, lako se dolazi do zaključka kako ne postoji metoda koja se prilagođava svim vrstama geoloških formacija. Na odabir odgovarajuće metode utječu: utjecaj okoline na tunel, utjecaj tunelogradnje na okolinu te ekonomičnost izgradnje. Odnosno, treba naći optimalnu vrijednost između navedenih čimbenika. Važno je napomenuti kako je svaka konstrukcija tunela individualan slučaj i kriteriji jednoga ne smiju se nekritički prenijeti na drugi tunel. Poput i ostalih metoda, NATM je okarakterizirana svojim prednostima i manama [2,13].

Prednosti NATM:

- našla je svoju primjenu u širokom rasponu tla i geotehničkih uvjeta
- lako se prilagođava različitim poprečnim presjecima
- iziskuje niske početne troškove i manje ukupne troškove podgrade
- dobro se kombinira s TBM (engl. *Tunnel Boring Machines*) iskopom
- moguće je jednostavno postaviti vodonepropusnu membranu i primarnu podgradu [9]

Mane NATM:

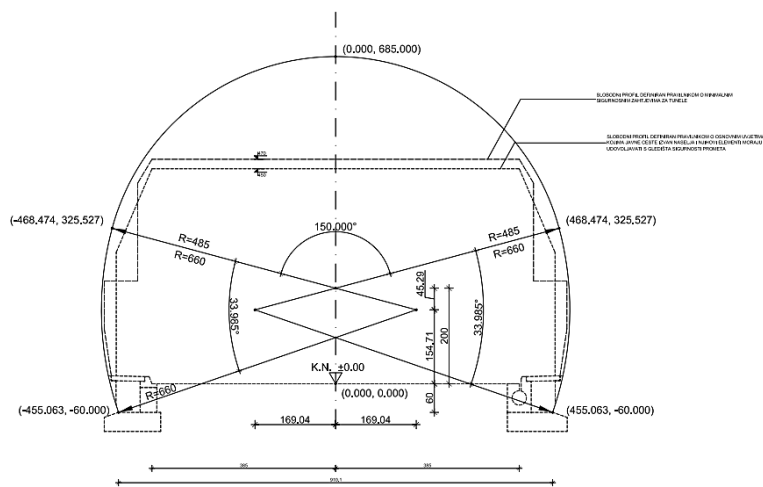
- napredak po ciklusu je malen i bez značajnog povećavanja
- potrebno je osigurati obrazovani kadar i visoku kvalitetu izvedbe i materijala
- primjenjiva je na uvjete podzemne vode samo uz dodatne mjere
- podjela rizika za investitora i izvođača popraćena je teškoćama [13].

Kako bi primjena NATM bila uspješna i prije svega sigurna, treba voditi računa o pridržavanju njenih osnovnih principa. Najbitnije je pratiti deformacije kroz sve faze iskopa i podgrađivanja te pravovremeno zatvoriti nosivi prsten [14].

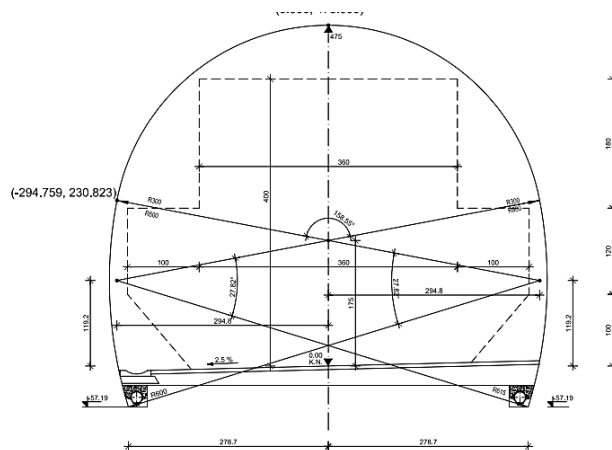
7. TUNEL DEBELI BRIJEG

7.1. Osnovni podaci o tunelu

Tunel „Debeli Brijeg“ izgrađen je kao dio druge dionice pristupnih cesta mostu „Pelješac“ i spada u najkompleksniji objekt projekta „Cestovna povezanost s južnom Dalmacijom“, a za koji su zaslužne Hrvatske ceste. Tunel je izgrađen kao dvotračni. Dužina glavnog tunela (slika 35.), zajedno s portalnim građevinama iznosi 2467 m, dok je dužina servisnog tunela (slika 36.) koji nema portalnih građevina 2463,781 m. Između glavnog i servisnog tunela je devet pješačkih i dva poprečna prolaza za servisna vozila, a koja ujedno služe i pješacima. Glavna tunelska cijev omogućava nesmetano odvijanje prometa, a servisna služi evakuaciji sudionika prometa i osigurava siguran prolaz interventnih vozila prema i iz glavne tunelske cijevi [15,17,18].



Slika 35. Konstrukcija unutrašnje linije glavnog tunela „Debeli Brijeg“ [17]



Slika 36. Konstrukcija unutrašnje linije servisnog tunela „Debeli Brijeg“ [17]

Radovi na izlaznom portalu tunela započeli su 1. travnja 2020. u jeku pandemije COVID-19, a na ulaznom portalu 25. svibnja 2020. Tunel je probijen 16. prosinca 2020. nakon točno 259 dana, odnosno 74 dana prije planiranog roka završetka koji je definiran za 28. veljače 2021. (slika 37.). Na njemu je svakodnevno radilo oko 100 radnika, uz prosjek od 9,43 m iskopa po danu. Građen je prema principima NATM uz najsuvremenije tehnološke i inženjerske trendove [15,17,18].



Slika 37. Završetak probijanja tunela [22]

7.2. Geotehnička opažanja i mjerenja

S obzirom na to da se tuneli smatraju linijskim građevinama, gotovo je neizvedivo provođenje takve količine geotehničkih istražnih radova koja će točno definirati stanje osnovnog strukturnog materijala jer on varira u ovisnosti o složenosti geoloških formacija duž trase. To je razlog zbog kojeg je potrebno geotehničko praćenje tunela za vrijeme njegove izvedbe i ono daje uvid u:

- stvarnu kvalitetu stijenske mase, tj. inženjersko-geološkog profila duž trase tunela
- optimizaciju mjera stabilizacije iskopa
- verifikaciju stabilnosti iskopa [16,17].

Kako bi se odredila stvarna kvaliteta stijenske mase potrebno je izvesti klasifikaciju i određivanje parametara stijenske mase te inženjersko-geološko kartiranje, na osnovu čega se zatim pristupa izboru tehnologije mjera izvedbe i stabilizacije iskopa. Geotehničko opažanje treba ukazati na moguće zone nestabilnosti kako bi se omogućilo pravovremeno djelovanje, a to se najbolje postiže svakodnevnim pregledavanjem podgradnih sklopova [16,17].

Geotehnička mjerenja, s druge strane, mogu biti:

- kontrolna - prate deformacije iskopa i osiguravaju konstrukciju i radnike
- podgradna - prate ponašanje primarne podgrade i razvoj ispucale zone
- mjerenja stabilnosti - određuju opterećenje sekundarne betonske obloge [16,17].

7.3. Opis uzdužnog geotehničkog profila glavnog tunela

Tunel je zbog različitih inženjersko-geoloških značajki podijeljen na dva strukturalna bloka: blok A i blok B te dvije litostratigrafske jedinice. Kombinacija tih dvaju čimbenika rezultirala je podjeli tunela na dvije geotehničke jedinice, približno jednakih geoloških i geotehničkih karakteristika bitnih za stabilizaciju iskopa. Blok A pripada geotehničkoj jedinici 1 i obuhvaća stacionaže glavnog tunela od 10+927,00 do 11+400,00. Taj dio sačinjavaju gornjokredni vapnenci (V, $K_2^{2,3}$), koji su mikritni i rekristalizirani. Strukturni blok B dio je geotehničke jedinice 2 i obuhvaća stacionaže glavnog tunela od početne 11+400,00 do krajnje 13+370,00. Područje do stacionaže 13+225,00 u svom geološkom sastavu sadržava kasnodijagenetske, dobro slojevite dolomite (D, K_2^1) iz doba cenomana, a područje od stacionaže 13+225,00 pa sve do kraja trase sastavljeno je od dobro uslojenih, svijetlo smeđih dolomitnih vapnenaca. Unutar prvih 400 m od sjevernog ulaznog portala tunela pruža se, uzdužno i dijagonalno u odnosu na projektiranu os, zona pukotina-rasjed u kojoj je razlomljena stijenska masa [16,17].

Dio od stacionaže 10+927,00 do 10+950,00 pripada geotehničkoj jedinici 1 i u svojoj ukupnoj dužini od 23 m sadržava dva tipa podgradnog sustava i prolazi jednom kategorijom stijenske mase. Podgradni sustav TIP V primijenjen je na prvih 11,50 m, što u postotku primjene čini 50%, a na preostalim 11,50 m primijenjen je podgradni sustav TIP Va i u jednakom postotku. Kategorija stijenske mase koja se pruža tim dijelom pripada V. kategoriji, na osnovu Geomehaničke klasifikacije (vrlo slaba stijenska masa) [17].

Dio od stacionaže 10+950,00 do 11+400,00 također pripada geotehničkoj jedinici 1 i u svojoj ukupnoj dužini od 450 m sadržava četiri tipa podgradnog sustava i prolazi kroz četiri kategorije stijenske mase. Podgradni sustav TIP II primijenjen je na prvih 112,50, čime čini 25% primjene. Taj dio pripada II. kategoriji stijenske mase (dobra stijenska masa). Na sljedećih 225 m primijenjen je podgradni sustav TIP III, u postotku od 50% i u III. kategoriji stijenske mase (povoljna stijenska masa). Nakon njega primijenjen je podgradni sustav TIP IV u dužini od 67,50 m, tj. 15% od ukupne primjene i taj dio prolazi IV. kategorijom stijenske mase (slaba stijenska masa). Preostalim 45 m podgrađeno je podgradnim sustavom TIP V, što čini 10% primjene i prolazi kroz stijensku masu V. kategorije [17].

Najduži dio dionice dužine 1723,04 m, s početnom stacionažom 11+400,00 i krajnjom stacionažom 13+350,00, pripada geotehničkoj jedinici 2 i obuhvaća četiri tipa podgradnog sustava i četiri kategorije stijenske mase, potpune jednake kao i prethodni dio dionice samo što su primijenjene na drugim stacionažama. Na prvih 775,37 m primijenjen je podgradni sustav TIP II (45% primjene) u II. kategoriji stijenske mase. Na idućih 775,37 m primijenjen je podgradni sustav TIP III, u jednakom postotku primjene, ali kroz III. kategoriju stijenske mase. Podgradni sustav TIP IV primijenjen je u dužini od 120,61 m, u ukupnom postotku od 7% i u IV. kategoriji stijenske mase. Na posljednjih 51,69 m primijenjen je podgradni sustav TIP V (3% primjene) u stijenskoj masi V. kategorije [17].

Na području od stacionaže 11+708,49 do stacionaže 11+765,23, također dijelovima geotehničke jedinice 2, u ukupnoj dužini od 56,74 m primijenjena su tri tipa podgradnih sustava na četiri kategorije stijenske mase. Prvih 22,70 m (40% primjene) podgrađeno je podgradnim sustavom TIP VI i taj dio obuhvaća II. kategoriju stijenske mase. Isti podgradni sustav korišten je na sljedećih 22,70 m i čini jednak postotak primjene, ali se pruža stijenskom masom III. kategorije (gornji dio). Podgradni sustav TIP VI-4 korišten je 5,67 m nakon, u postotku od 10% i u III. i IV. kategoriji stijenske mase (donji dio). Na posljednjih 5,67 m te dionice primijenjen je podgradni sustav TIP VI-5, u postotku od 10% i u V. kategoriji stijenske mase [17].

Dio dionice koji obuhvaća stacionaže od početne 11+781,76 do krajnje 11+838,50 pripada geotehničkoj jedinici 2. Podgrađen je s tri tipa podgradnog sustava koja se pružaju unutar četiri kategorije stijenske mase. Podgradni sustavi, kao i kategorije stijenske mase, potpuno su jednakim prethodnom dijelu dionice dužinom pružanja, postotkom primjene i kategorijom stijenske mase [17].

Sljedeći dio dionice počinje stacionažom 12+531,50, a završava stacionažom 12+588,24 i pripada geotehničkoj jedinici 2. Kao i prethodna dva dijela dionice koristi tri tipa podgradnog sustava primijenjena na četiri kategorije stijenske mase, na jednakim dužinama i postocima primjene podgrade te kategorijama stijenske mase koje se pružaju određenim dijelom dionice [17].

Posljednji dio dionice obuhvaća stacionaže od početne 13+350,00 do krajnje 13+370,00 i također spada pod geotehničku jedinicu 2. U svojoj ukupnoj dužini od 20 m obuhvaća dva tipa podgradnih sustava i jednu kategoriju stijenske mase, jednake početnom dijelu dionice. Prvih 10 m podgrađeno je podgradnim sustavom TIP V, u postotku od 50% i u V. kategoriji stijenske mase, dok je posljednjih 10 m podgrađeno podgradnim sustavom TIP Va, također u postotku od 50% i u V. kategoriji stijenske mase [17].

7.4. Kategorije stijenske mase i provedene podgradne mjere

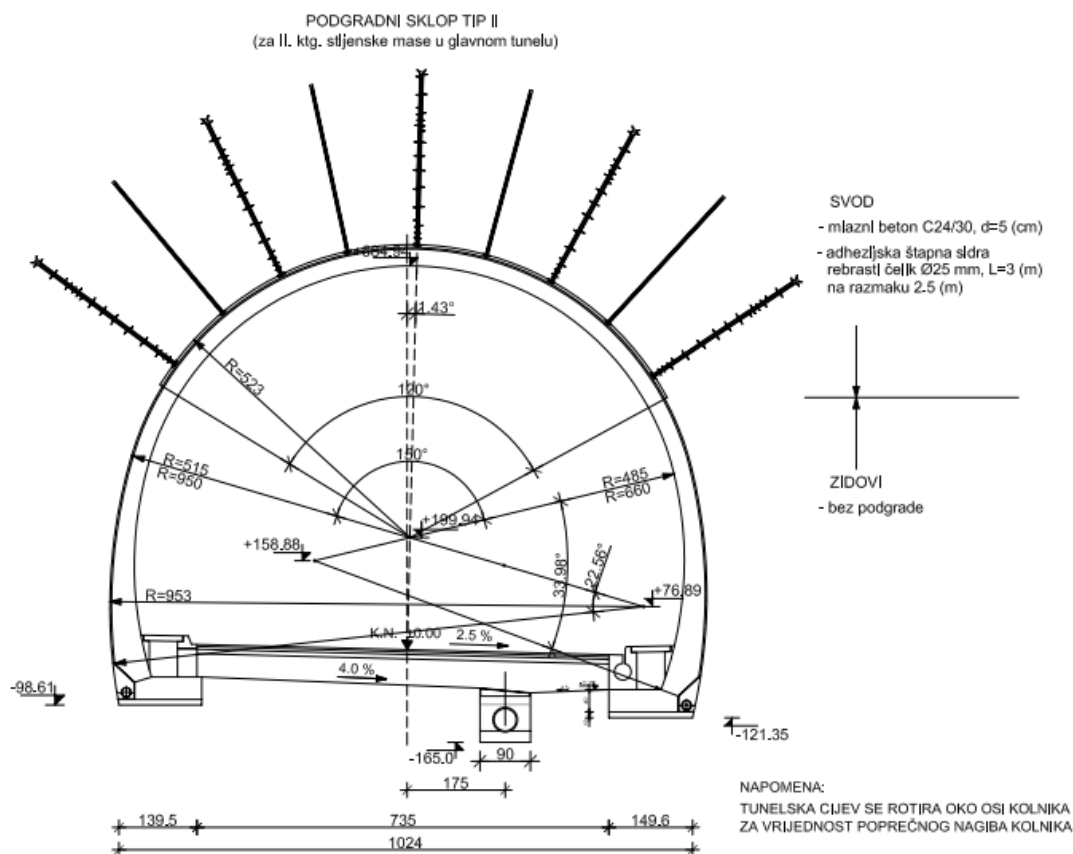
Na osnovu podataka iz Izvedbenog projekta, a koji se nastavlja na Glavni projekt, opisane su prognozirane kategorije stijenske mase i korišteni podgradni sustavi pri izvedbi glavnog i servisnog tunela [17].

Glavni tunel sadržava 9 tipova podgradnih sustava. To su redom [17]:

PODGRADNI SUSTAV TIP II

Podgradni elementi korišteni na svodu su mlazni beton C24/30 u debljini od 5 cm i adhezijska štapna sidra od rebrastog čelika $\varnothing 25$ mm, duljine 3 m na razmaku od 2,5 m, dok su zidovi izvedeni bez podgrađivanja (slika 38.).

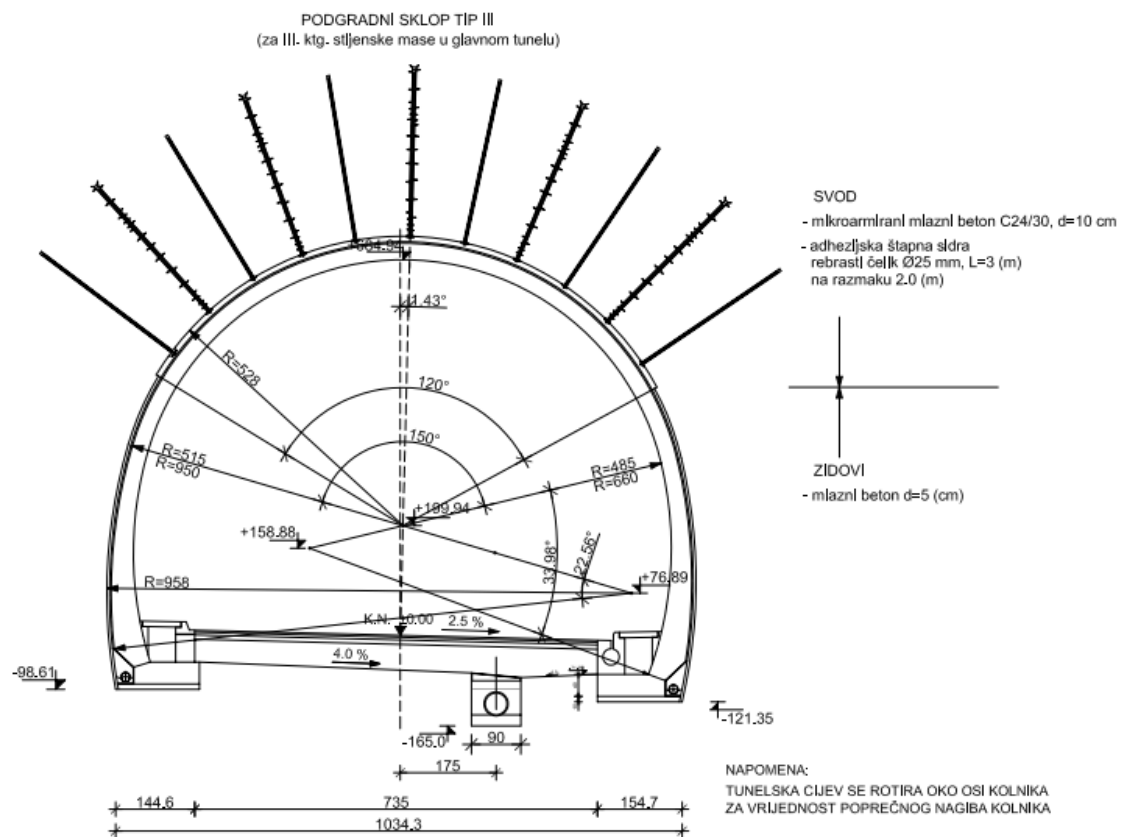
Ovaj tip podgradnog sustava primjenjiv je za podgrađivanje stijenske mase II. kategorije na osnovu Geomehantičke klasifikacije (RMR=61-80) [17].



Slika 38. Podgradni sustav TIP II [17]

PODGRADNI SUSTAV TIP III

Podgradni elementi korišteni na svodu su mikroarmirani mlazni beton C24/30 u debljini od 10 cm i adhezijska štapna sidra od rebrastog čelika $\varnothing 25$ mm, duljine 3 m na razmaku od 2 m. Na zidovima je korišten mlazni beton C24/30 u debljini od 5 cm (slika 39.).
Ovaj tip podgradnog sustava primjenjiv je za podgrađivanje stijenske mase III. kategorije na osnovu Geomehaničke klasifikacije (RMR=41-60) [17].

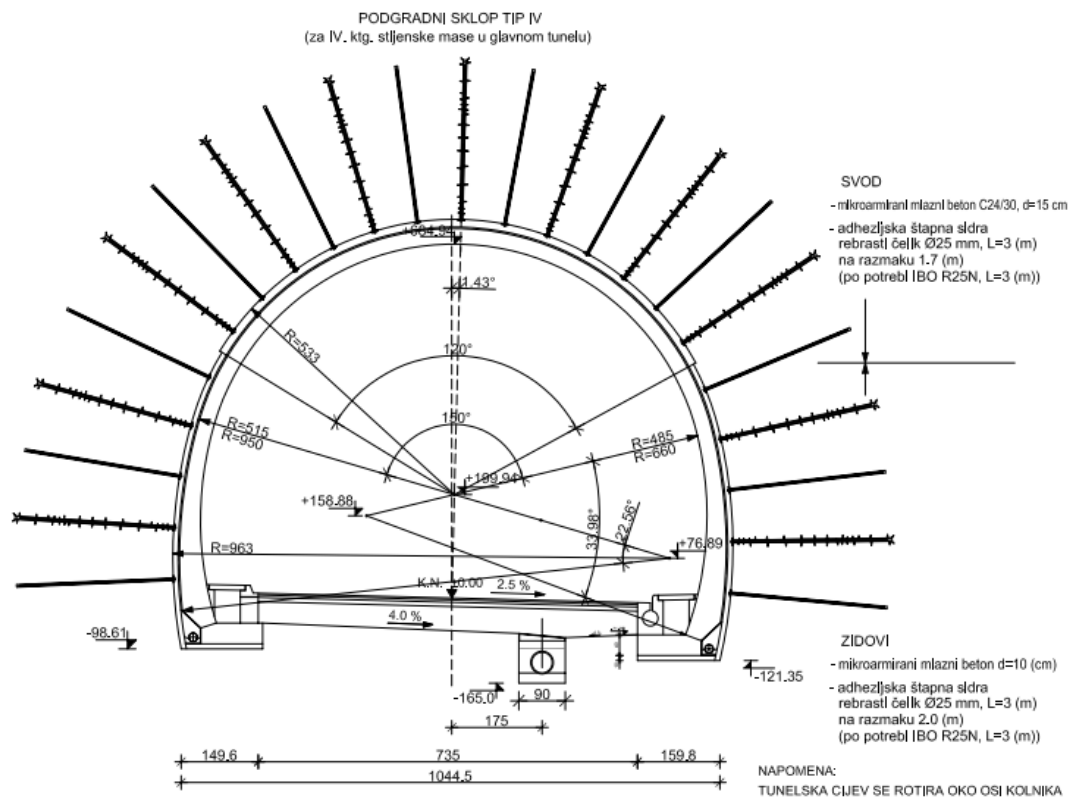


Slika 39. Podgradni sustav TIP III [17]

PODGRADNI SUSTAV TIP IV

Podgradni elementi korišteni na svodu su mikroarmirani mlazni beton C24/30 u debljini od 15 cm i adhezijska štapna sidra od rebrastog čelika Ø25 mm, duljine 3 m na razmaku od 1,7 m. Na zidovima je korišten mikroarmirani mlazni beton C24/30 u debljini od 10 cm i adhezijska štapna sidra od rebrastog čelika Ø25 mm, duljine 3 m na razmaku od 2 m. Po potrebi su se koristila samobušeca injekcijska sidra tipa IBO R25N (Ø25/14 mm) na razmaku od 1,7 za svod ili 2 m za zidove (slika 40.).

Ovaj tip podgradnog sustava primjenjiv je za podgrađivanje stijenske mase IV. kategorije na osnovu Geomehantičke klasifikacije (RMR=21-40) [17].

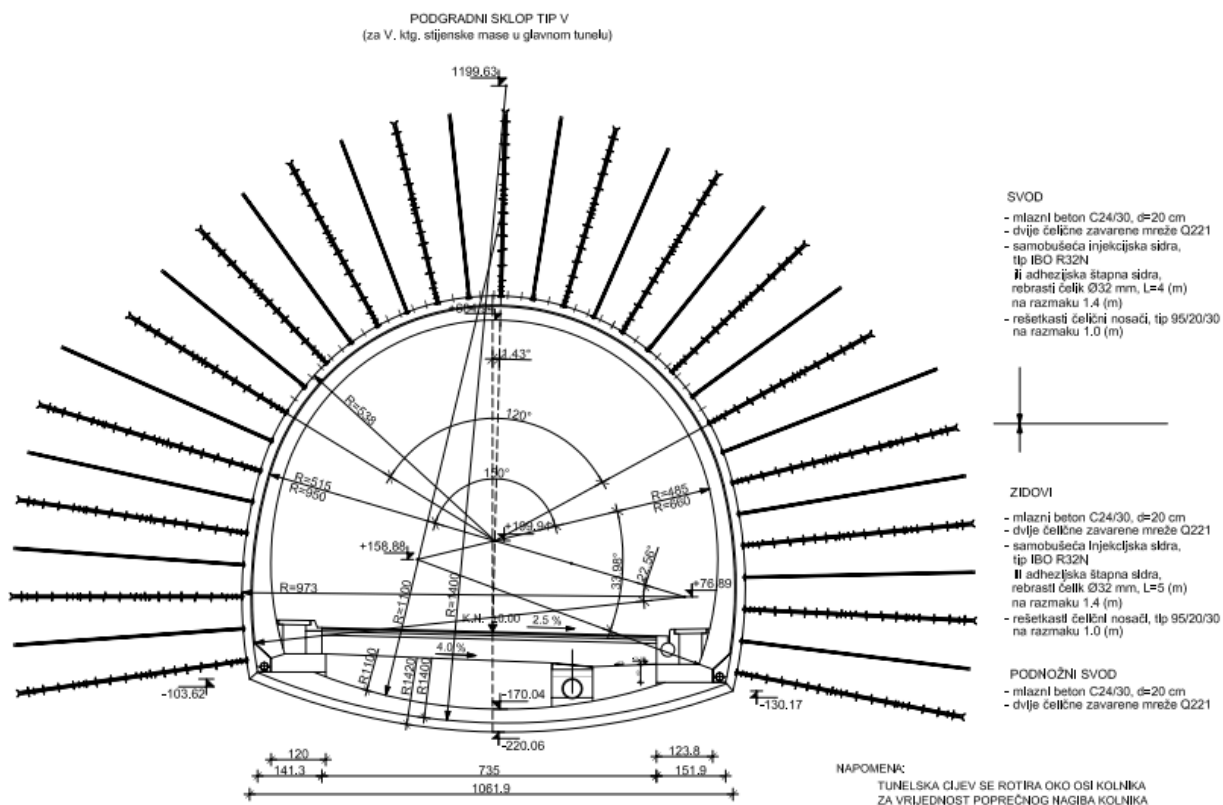


Slika 40. Podgradni sustav TIP IV [17]

PODGRADNI SUSTAV TIP V

Podgradni elementi korišteni na svodu su mlazni beton C24/30 u debljini od 20 cm, dvije čelične zavarene mreže Q221, samobušuća injekcijska sidra tipa IBO R32N ($\varnothing 32/18,5$ mm) u duljini od 4 m na razmaku od 1,4 m ili adhezijska štapna sidra od rebrastog čelika $\varnothing 32$ mm na jednakoj duljini i razmaku te rešetkasti čelični nosači tipa 95/20/30 na razmaku od 1 m. Na zidovima je također korišten mlazni beton C24/30 u debljini od 20 cm, dvije čelične zavarene mreže Q221, samobušuća injekcijska sidra tipa IBO R32N ($\varnothing 32/18,5$ mm) u duljini od 5 m na razmaku od 1,4 m ili adhezijska štapna sidra od rebrastog čelika $\varnothing 32$ mm na jednakoj duljini i razmaku te rešetkasti čelični nosači tipa 95/20/30 na razmaku od 1 m. Za podnožni svod korišten je mlazni beton C24/30 u debljini od 20 cm i dvije čelične zavarene mreže Q221 (slika 41.).

Ovaj tip podgradnog sustava primjenjiv je za podgrađivanje stijenske mase V. kategorije na osnovu Geomehaničke klasifikacije (RMR ≤ 20) [17].

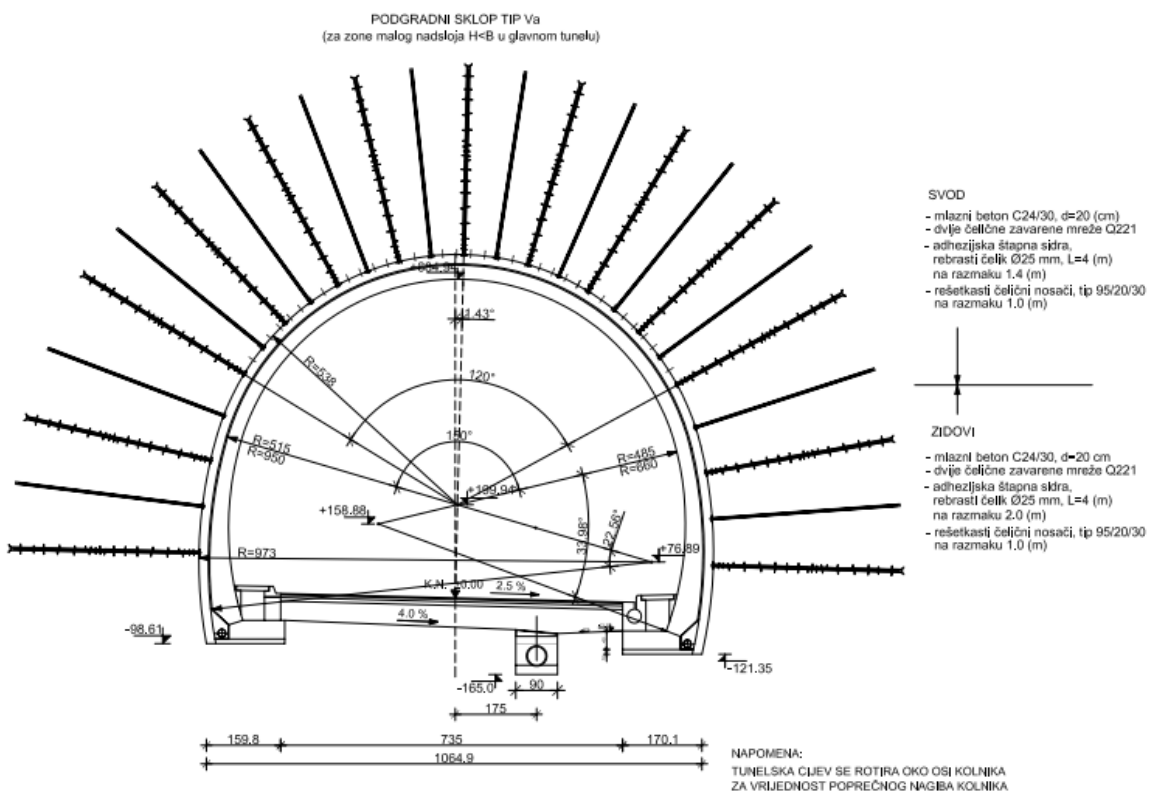


Slika 41. Podgradni sustav TIP V [17]

PODGRADNI SUSTAV TIP Va

Podgradni elementi korišteni na svodu su mlazni beton C24/30 u debljini od 20 cm, dvije čelične zavarene mreže Q221, adhezijska štapna sidra od rebrastog čelika Ø25 mm, duljine 4 m na razmaku od 1,4 m te rešetkasti čelični nosači tipa 95/20/30 na razmaku od 1 m. Na zidovima je također korišten mlazni beton C24/30 u debljini od 20 cm, dvije čelične zavarene mreže Q221, adhezijska štapna sidra od rebrastog čelika Ø25 mm, duljine 4 m na razmaku od 2 m te rešetkasti čelični nosači tipa 95/20/30 na razmaku od 1 m (slika 42.).

Ovaj tip podgradnog sustava primjenjiv je za podgrađivanje u zonama malog nadsloja, odnosno u zonama gdje je njegova visina manja od širine podzemnog iskopa ($H < B$). Bez obzira na kvalitetu stijenske mase, iskop iz navedenih zona ubraja se u V. kategoriju zbog mogućeg neravnomjernog opterećenja podgrade nevezanim blokovima (slika 42.) [17].

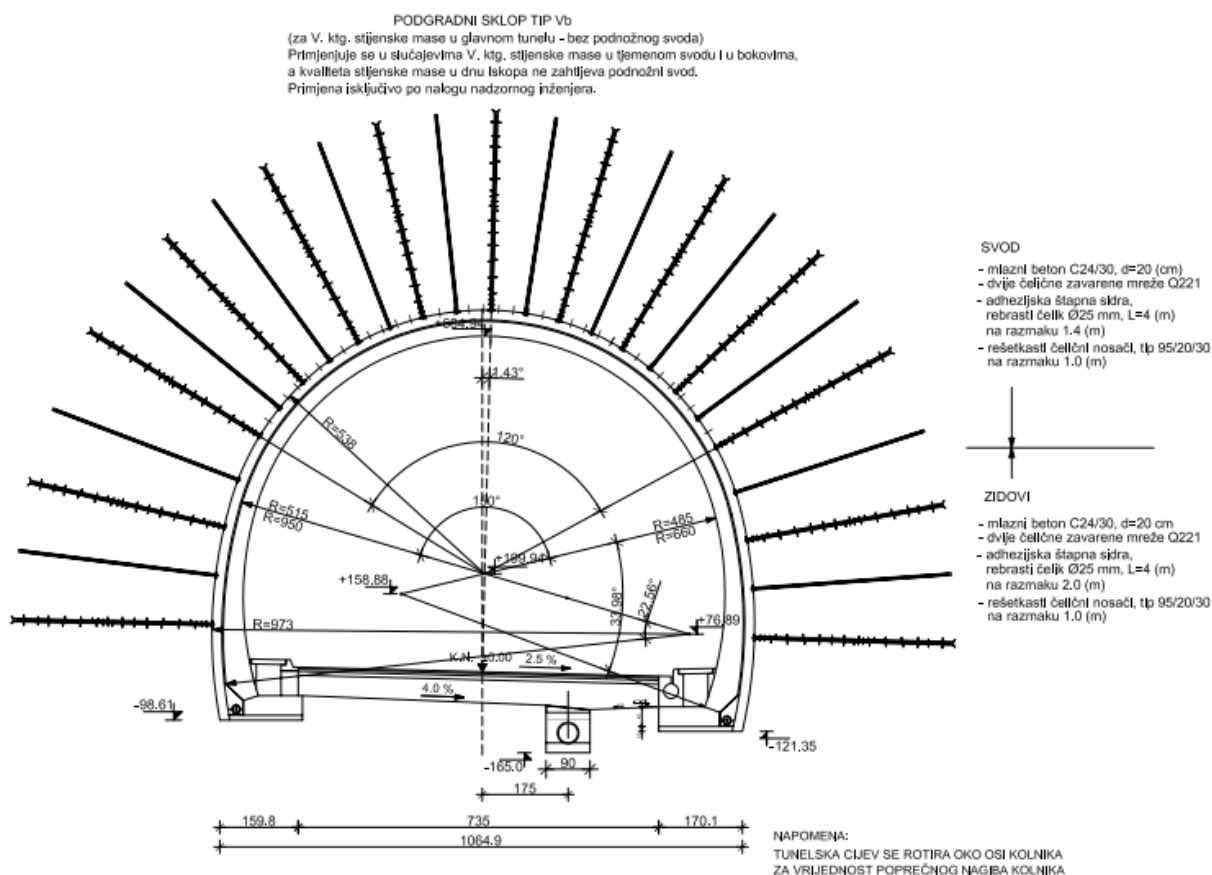


Slika 42. Podgradni sustav TIP Va [17]

PODGRADNI SUSTAV TIP Vb

Podgradni elementi korišteni na svodu su mlazni beton C24/30 u debljini od 20 cm, dvije čelične zavarene mreže Q221, adhezijska štapna sidra od rebrastog čelika Ø25 mm, duljine 4 m na razmaku od 1,4 m te rešetkasti čelični nosači tipa 95/20/30 na razmaku od 1 m. Na zidovima su korišteni isti podgradni elementi, samo je razlika što su adhezijska štapna sidra postavljena na razmaku od 2 m, a ne od 1,4 m kao kod svoda (slika 43.).

Ovaj tip podgradnog sustava primjenjiv je za podgrađivanje stijenske mase V. kategorije na bokovima i u tjemenu svodu, dok dno iskopa karakterizira kvalitetnija stijenska masa i nije potrebna izvedba podnožnog svoda. Također, dionica s ovakvim slučajem nije unaprijed predviđena, zasnovana je samo na temelju iskustava sa sličnih tunela i ugrađuje se samo uz nalog nadzornog inženjera [17].

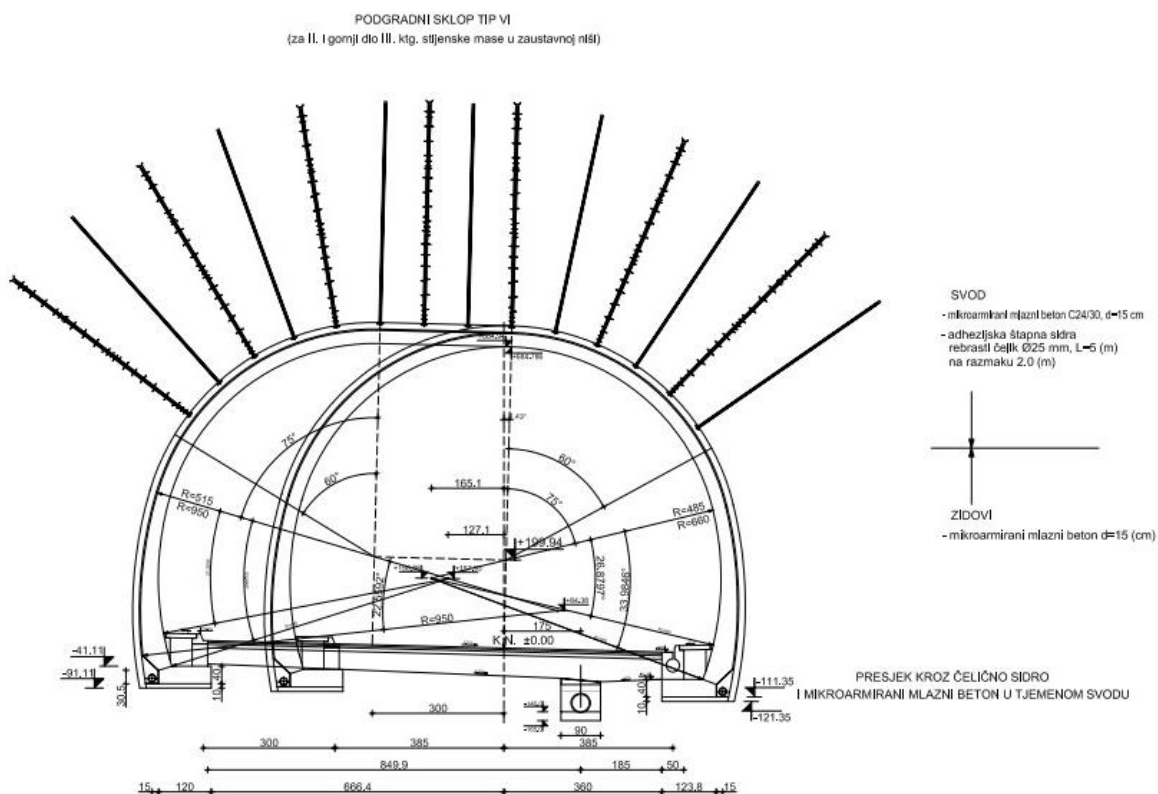


Slika 43. Podgradni sustav TIP Vb [17]

PODGRADNI SUSTAV TIP VI (za prošireni profil u zaustavnoj niši)

Podgradni elementi korišteni na svodu su mikroarmirani mlazni beton C24/30 u debljini od 15 cm, adhezijska štapna sidra od rebrastog čelika Ø25 mm, duljine 5 m na razmaku od 2 m. Na zidovima je korišten mikroarmirani mlazni beton C24/30 u debljini od 15 cm (slika 44.).

Ovaj tip podgradnog sustava primjenjiv je za podgrađivanje stijenske mase II. kategorije i gornjeg dijela III. kategorije na osnovu Geomehaničke klasifikacije (RMR=51-80) u zoni zaustavne niše [17].

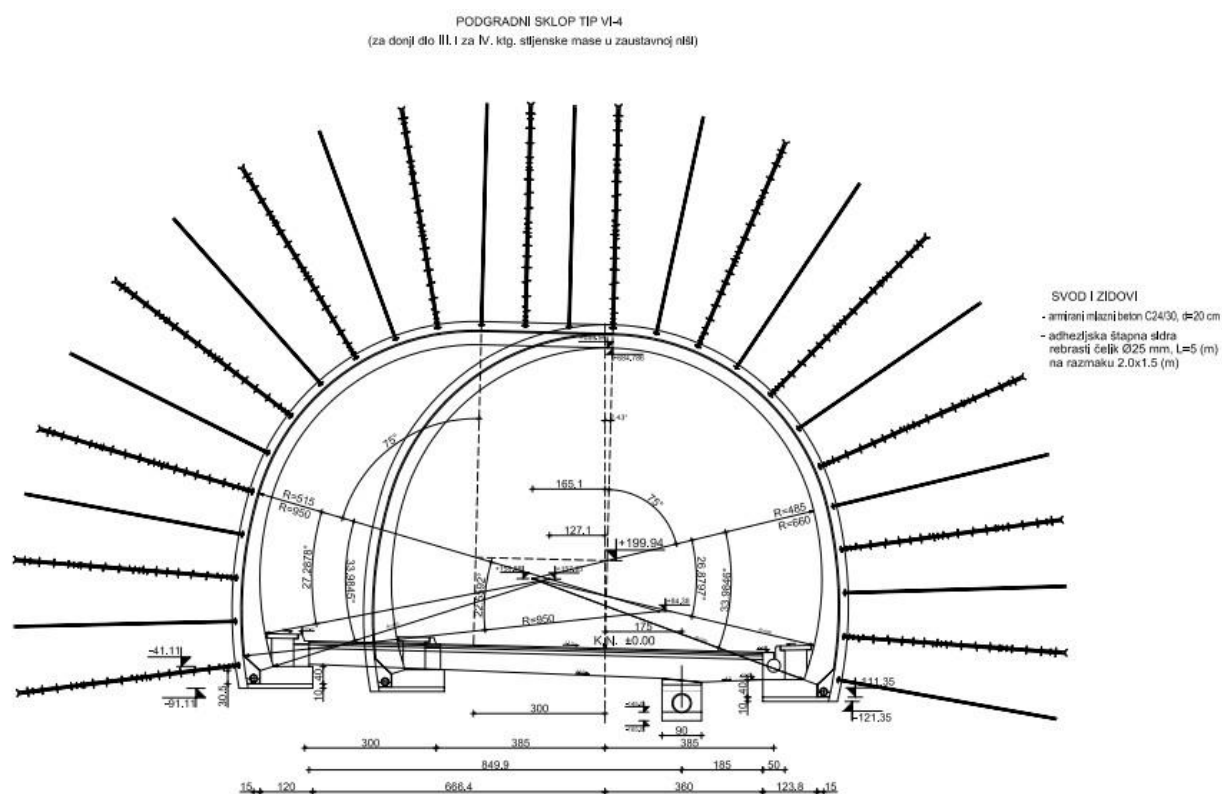


Slika 44. Podgradni sustav TIP VI [17]

PODGRADNI SUSTAV TIP VI-4 (za prošireni profil u zaustavnoj niši)

Podgradni elementi korišteni na svodu i zidovima su armirani mlazni beton C24/30 u debljini od 20 cm, dvije čelične zavarene mreže Q221, adhezijska štapna sidra od rebrastog čelika Ø25 mm, duljine 5 m na razmaku od 2x1,5 m te rešetkasti čelični nosači tipa 95/20/30 na razmaku od 1,5 m (slika 45.).

Ovaj tip podgradnog sustava primjenjiv je za podgrađivanje stijenske mase donjeg tijela III. kategorije i kompletne IV. kategorije na osnovu Geomehničke klasifikacije (RMR=21-50) u zoni zaustavne niše [17].

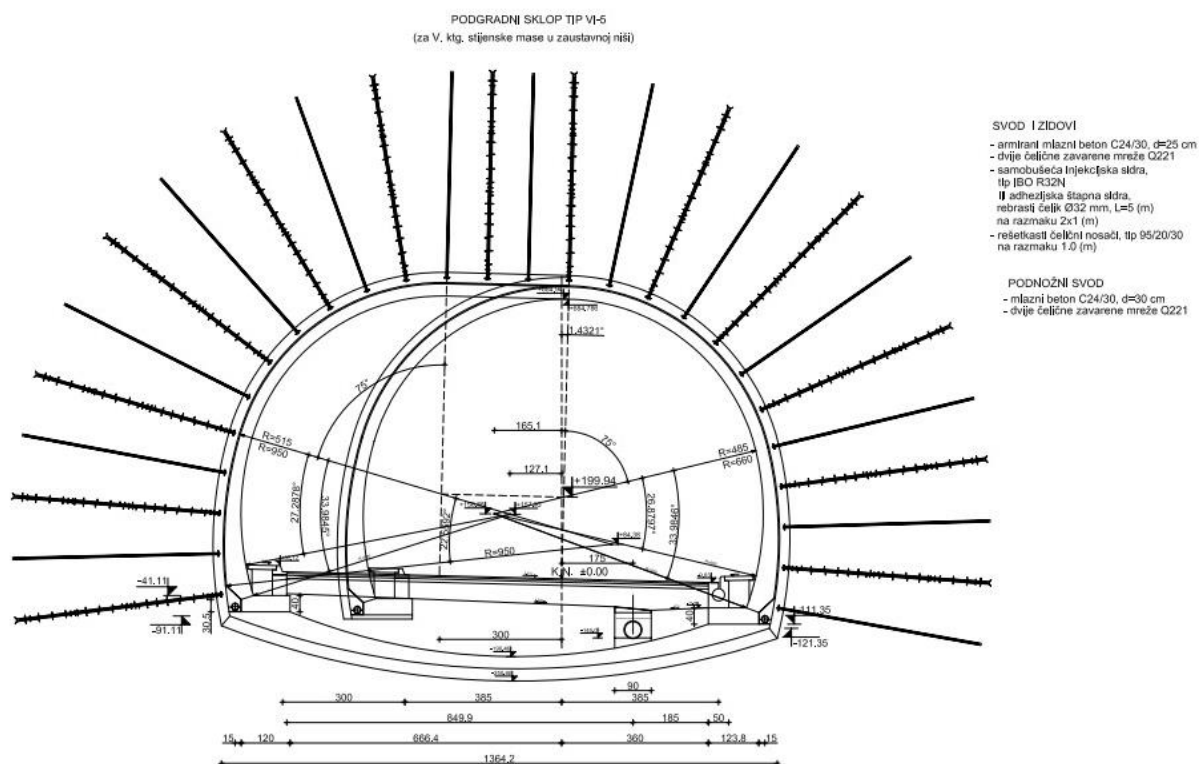


Slika 45. Podgradni sustav TIP VI-4 [17]

PODGRADNI SUSTAV TIP VI-5 (za prošireni profil u zaustavnoj niši)

Podgradni elementi korišteni na svodu i zidovima su armirani mlazni beton C24/30 u debljini od 25 cm, dvije čelične zavarene mreže Q221, samobušuća injekcijska sidra tipa IBO R32N ili adhezijska štapna sidra od rebrastog čelika Ø32 mm, duljine 5 m na razmaku od 2x1 m te rešetkasti čelični nosači tipa 95/20/30 na razmaku od 1 m (slika 46.).

Ovaj tip podgradnog sustava primjenjiv je za podgrađivanje stijenske mase donjeg dijela V. kategorije na osnovu Geomehaničke klasifikacije ($RMR \leq 20$) u zoni zaustavne niše [17].



Slika 46. Podgradni sustav TIP VI-5 [17]

Podgradni sustav servisnog tunela sastoji se od 6 tipova podgradnih sustava, a to su:

1. podgradni sustav TIP II-S
2. podgradni sustav TIP III-S
3. podgradni sustav TIP IV-S
4. podgradni sustav TIP V-S
5. podgradni sustav TIP V-S-obilazna površina
6. podgradni sustav TIP VI-S-trafostanica [17].

Na svodovima i zidovima su od podgradnih elemenata korišteni mlazni te mikroarmirani mlazni beton C24/30, čelična zavarena mreža Q221 (izuzev kod obilaznih površina i trafostanice), adhezijska štapna sidra od rebrastog čelika Ø25 mm, uz nerijetku primjenu samobušućih injekcijskih sidara tip IBO R23N (Ø24/14 mm) te kod podgradnog sustava TIP V-S rešetkasti čelični nosač tipa 95/20/30 [17].

Podgradni sustav za interventna vozila obuhvaća dva karakteristična poprečna presjeka. Prvi odgovara poprečnom presjeku glavnog tunela (na dionici 11,02 m iza glavnog tunela), dok drugi odgovara poprečnom presjeku servisnog tunela (na dionici zadnjih 3,05 m, na spoju glavnog i servisnog tunela). Za svod i zidove prvog poprečnog presjeka, od podgradnih elemenata korišteni su mikroarmirani mlazni beton C24/30 u debljini od 10 cm i adhezijska štapna sidra od rebrastog čelika Ø25 mm, duljine 3 m na razmaku od 2 m. Za svod i zidove drugog poprečnog presjeka korišteni su adhezijska štapna sidra jednakog profila, duljine i razmaka kao i kod prvog, samo s razlikom u debljini mikroarmiranog mlaznog betona (25 cm). Podgrada je pojačana zbog izostavljanja sekundarne betonske obloge tunela [17].

Podgradni sustav za pješake od podgradnih elemenata u svodu i zidovima sadržava mikroarmirani mlazni beton C24/30 u debljini od 10 cm i adhezijska štapna sidra Ø25 mm, duljine 2 m na razmaku od 2 m [17].

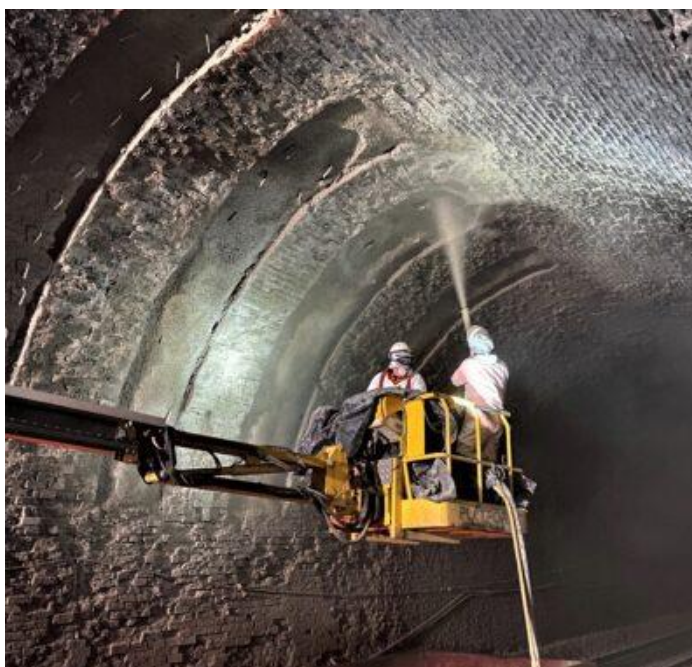
7.5. Karakteristike podgradnih elemenata

Podgradni sustavi obuhvaćaju primjenu materijala i zahvata koji imaju zadaću poboljšati stabilnost i održati nosivost stijenske mase. Mogu ih sačinjavati aktivni ili pasivni podgradni elementi. Aktivnim podgradnim elementima smatraju se cjeloviti dijelovi stijenske mase koji je ojačavaju, dok se pasivnim podgradnim elementima smatraju dijelovi van stijenske mase koji se aktiviraju samo u slučaju njenog pomaka. Za stabilizaciju podzemnog iskopa tunela „Debeli Brijeg“ od aktivnih podgradnih elemenata korištena su samobušeca injekcijska i adhezijska štapna sidra, a od pasivnih podgradnih elemenata korišteni su mlazni beton te čelične zavarene mreže i rešetkasti nosači [16,17].

Samobušeca injekcijska sidra - tip IBO R32N ($\varnothing 32/18,5$ mm), s podložnom pločicom dimenzija 200x200x10 mm, nosivost 280 kN ili tip IBO R25N ($\varnothing 25/14$ mm), s podložnom pločicom dimenzija 150x150x8 mm ili 180x18x8 mm, nosivosti 200 kN. Ovaj tip sidara se uglavnom koristi kod slabih materijala čija je osnovna problematika održavanje stabilnosti bušotine. Kvalitetna ugradnja temelji se na principu injektiranja cementnom smjesom kroz sidro, u smjeru od čela bušotine prema ušću. Prave se u duljinama od 1 do 4 m s mogućnošću nastavljanja i ugradnje duljih sidara [16,17].

Adhezijska štapna sidra - profila $\varnothing 25$ mm, od rebrastog čelika (B500B, HRN EN 10080:2005; HRN 1130-2:2008) navoja M22 ili profila $\varnothing 32$ mm, s podložnim pločicama dimenzija 150x150 ili 200x200 mm i debljine oko 10 mm. Njihova prednost je injektiranje cijelom dužinom, što znači da ako dođe do sloma glave sidra, preostali dio neće izgubiti svoju nosivost. Nedostatak im je nesposobnost prednaprezanja pa se ugrađuju prije pomaka stijenske mase i to što bliže čelu tunela kako bi se održala kompaktnost blokova. Razlikuju se pojedinačna i sistematska sidrenja. Pojedinačna sprječavaju lokalne pojave nestabilnosti, dok sistematska povećavaju čvrstoću stijenske mase i raspodjeljuju opterećenje ravnomjerno oko iskopa. Stijenska masa ostvaruje svoju nosivost putem sistematskog sidrenja i sidra se zapravo smatraju trajnom podgradom [16,17].

Mlazni beton - razreda C24/30. Ugradnja se postiže mokrim postupkom, uz što kraće vrijeme nanošenja prvog i drugog sloja u svrhu postizanja kvalitetnije prionljivosti. Prvi sloj omogućava kontakt podloge i čelične mreže i potrebno ga je poprskati vodom ili „ispuhati“ komprimiranim zrakom prije nanošenja drugog sloja. Drugi sloj mora prekriti glave štapnih sidara koje se po potrebi štite poklopcima, ako se planiraju kontrolna ispitivanja odmah nakon što se on nanese. Nakon ispitivanja se glava prekrije ili cementnim mortom ili slojem mlaznog betona. Uobičajena debljina sloja mlaznog betona za podgrađivanje iznosi od 5 do 10 cm. Njegova uloga je sprječavanje pomaka blokova i površinske degradacije stijenske mase i smatra se najjačim podgradnim elementom, u smislu preuzimanja opterećenja (slika 47.) [16,17].



Slika 47. Upotreba mlaznog betona u tunelu [23]

Mikroarmirani mlazni beton - omogućava bržu ugradnju i veću sigurnost izvedbe. Na ovaj način izbjegava se postavljanje mreže na nepodgrađeni iskop, što predstavlja jako opasnu radnju. Koristi se za stabilizaciju i sanaciju objekata poput špilja ili kaverni [16,17].

Čelične zavarene mreže - Q131 ili Q221 (HRN EN 10080:2005; HRN 1130-4:2008, B500A, MAG 500/560). Kod podgrada od mlaznog betona debljine ≥ 10 cm primjenjuje se armaturna mreža Q131, dok se kod podgrada od mlaznog betona debljine ≥ 20 cm primjenjuje armaturna mreža Q221. Mreže se polažu na prvi, tj. drugi sloj mlaznog betona uz minimalni zaštitni sloj mlaznog betona od 3 cm. Za stabilizaciju podzemnog iskopa glavne cijevi tunela „Debeli Brijeg“ u podgradnim sustavima TIP III i TIP IV mlazni beton je zamijenjen mikroarmiranim mlaznim betonom [16,17].

Rešetkasti čelični nosači - tip 95/20/30 (Pantex i sl.), kvalitete čelika 500/550 (EN 10080:2005; HRN 1130-5:2008), od rebrastog čelika 2xØ20 mm ili 1xØ30 mm razmaka 95 mm (slika 48.). Ima brojne prednosti u usporedbi s punim čeličnim profilima kao što su: lakša ugradnja, bolja veza s mlaznim betonom, bolja nosivost i manja težina [16,17].



Slika 48. Prikaz čeličnog rešetkastog nosača [24]

8. ZAKLJUČAK

Kako podzemlje postaje sve zanimljivijim prostorom za izgradnju objekata, tako se pred inženjerima postavljaju sve noviji zahtjevi u smislu kvalitete korisnog prostora. Tradicionalne metode gotovo su potpuno napuštene, izuzev na opravdanim dijelovima tunela gdje su geološki uvjeti teški i nepovoljni, a gradnja podzemnih objekata danas najčešće je povezana uz primjenu NATM. Pojava tog praktičnog i racionalnog postupka rezultirala je revolucionarnom unapređenju građevinskih aktivnosti izvedbe podzemnih radova. Suvremena mehanizacija kojom se ovaj postupak koristi, zamijenila je nekadašnje teške fizičke poslove radnika i utjecala bržoj, sigurnijoj i ekonomičnijoj izvedbi. Suština NATM je u tome da se dovoljno brzo nakon iskopa izvede dio zaštitne konstrukcije kroz sloj mlaznog betona ili sistematskim sidrenjem, čime se omogućava postepeno tečenje deformacije prema otvoru iskopa. Dugogodišnja praksa potvrdila je ispravnost temeljnih principa na kojima je NATM zasnovana, ali svakako je razumljivo da je podložna prilagođavanju u ovisnosti o različitim inženjersko-geološkim i geotehničkim osobinama stijene ili tla. Ta prilagodba se manifestira u obliku konstruktivnih rješenja, tehnoloških postupaka građenja te korištenju iskustva i najpovoljnijih tehničkih sredstava za rad.

Upravo na principima NATM odvijao se i iskop tunela „Debeli Brijeg“ u sklopu projekta „Izgradnja pristupnih cesta mostu Pelješac“. Pri iskopu su se koristile metode konturnog miniranja i podgrađivanja mlaznim i mikroarmiranim mlaznim betonom te adhezijskim sidrima. Ovakav način iskopa osigurava zadržavanje integriteta stijenske mase oko iskopa, uz primjenu minimalne podgrade od mlaznog betona i sidara.

NATM je u posljednjih nekoliko godina popraćena raznim kontroverzama zbog svoje pozicije kao nadređene metode u odnosu na sve ostale metode građenja. Bez obzira na negativne tendencije, osvojila je svijet svojom prilagodljivosti različitim situacijama. S obzirom na to da u imenu sadrži riječ „Nova“, lako se da zaključiti kako će i u budućnosti biti na poziciji nadređene. Budući da nečemu novom treba dosta vremena da zastari, figurativno se može reći kako je Nova austrijska tunelska metoda - vječna.

9. LITERATURA

- [1] *Tunel* / *Hrvatska enciklopedija*, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021. (<https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=62681>) pristup 25.4.2023.
- [2] Ivas, D. , *Opterećenje na tunelsku podgradu i primjena nove austrijske tunelske metode*, Diplomski rad, Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2019. (<https://zir.nsk.hr/islandora/object/rgn%3A1053/datastream/PDF/view>) pristup 24.4.2023.
- [3] Vrkljan, I. , *Podzemne građevine i tuneli*, Interna skripta Građevinskog fakulteta u Rijeci, Rijeka, 2003.
- [4] Frgić, L. , Gradiški, K. , *Tunelogradnja*, Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2015. (<https://www.scribd.com/document/336062501/tunelogradnja-spojeno>) pristup 25.4.2023.
- [5] *Tuneli* / *PDF* (<https://www.scribd.com/document/206362252/tuneli>) pristup 28.4.2023.
- [6] Unknown (n.d.): *Predavanje 13. Tunelogradnja*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2009. (https://www.grad.unizg.hr/download/repository/GI_13.predavanje_Tunelogradnja.pdf) pristup 28.4.2023.
- [7] Alijagić, L. , Ramić, E. , Imamović, A. , Plakalović, N. , Čulović, N. , *Različite metode izgradnje tunela* (<https://www.scribd.com/presentation/461834022/Razlicite-metode-izgradnje-tunela-prez-1>) pristup 28.4.2023.
- [8] Tarakčija, E. , *Tunelogradnja*, seminarski rad, Fakultet politehničkih nauka, Internacionalni univerzitet Travnik, Travnik, 2019. (<https://www.scribd.com/document/409658255/Mostovi-i-Tuneli#>) pristup 25.4.2023.
- [9] Demirović, D. , *NOVA AUSTRIJSKA TUNELSKA METODA*, seminarski rad, Tehnički fakultet, Univerzitet u Bihaću, Bihać, 2016. (<https://pdfslide.net/documents/natmseminarski.html?page=6>) pristup 24.4.2023.
- [10] Jovančević, D. S. , materijali s predavanja iz kolegija Podzemne građevine i tuneli, Građevinski fakultet u Rijeci, 2022.

[11] Hudec, M. , Kolić, D. , Hudec, S. , *Tuneli - iskop i primarna podgrada*, Hrvatska udruga za betonsko inženjerstvo, Zagreb, 2009.

[12] Frgić, L. , Tor, K. , Hrestak, T. , *Naprezanja pri višefaznom iskopu tunela*, Rudarsko-geološko-naftni zbornik, Vol. 15, Zagreb, 2003.

[13] *Geomehaničke karakteristike tla i osnove NATM i NTM* (<https://www.scribd.com/document/461833678/NATM-i-NTM-i-Geomehanicke-kara-tla-pdf>) pristup 1.5.2023.

[14] Demirović, D., *NOVA AUSTRIJSKA TUNELSKA METODA*, seminarski rad, Tehnički fakultet univerziteta u Bihaću, Bihać, 2016.
(https://www.academia.edu/27874122/NOVA_AUSTRIJSKA_TUNELSKA_METODA) pristup 17.4.2023.

[15] *Na Pelješcu probijen tunel Debeli brijeg (2,5 km), peti najduži tunel u državi* (<https://likemetkovic.hr/portal/na-peljescu-probijen-tunel-debeli-brijeg-25-km-peti-najduzi-tunel-u-drzavi/>) pristup 31.5.2023.

[16] *Glavni građevinski projekt tunela Debeli Brijeg*, Institut IGH d.d., Zavod za geotehniku, Zagreb, 2016. , dopuna 2018.

[17] *Izvedbeni građevinski projekt tunela Debeli Brijeg*, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Sveučilište u Splitu, Split, 2020.

[18] Bralić, E. , *Problematika građenja i ugovornih ograničenja - odgovori na ugovorne zahtjeve i ograničenja*, 15. Dani hrvatske komore inženjera građevinarstva, Opatija, 2021.

[19] Dnevnik.hr (<https://image.dnevnik.hr/media/images/1920x1080/Sep2021/62152636.jpg>), pristup 8.5.2023.

[20] Geotech. hr (<https://www.geotech.hr/wp-content/uploads/2021/02/virginie.jpg>), pristup 8.5.2023.

[21] Ministarstvo mora, prometa i infrastrukture (<https://mmpi.gov.hr/vijesti-8/probijena-druga-cijev-tunela-tuhobic/3906>), pristup 9.5.2023.

[22] Dalmatinski portal (<https://dalmatinskiportal.hr/sadrzaj/vijesti/velika/2021-01-15-15-13-3618-.jpg>), pristup 8.6.2023.

[23] Natural Cement (<https://naturalcement.co.uk/wp-content/uploads/2022/04/Wilpshire-Shotcrete-Case-Study-398x379.jpg>), pristup 15.6.2023.

[24] Trend arm d.o.o. (<https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRwYkgxFo2gO0cVn3RXTldmSwGq6NIJcWd3IoPzRFoFTfnmaDch9uFCsj9ABylTbYvPbr0&usqp=CAU>), pristup 22.6.2023.

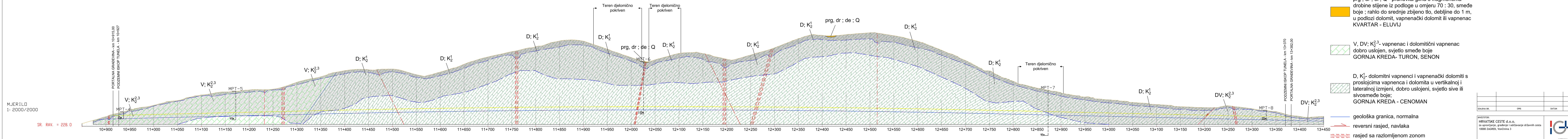
10. GRAFIČKI PRILOZI

10.1. Projektni uzdužni geotehnički profil - glavni tunel, M 1:2000/2000

10.2. Situacija, M 1:1000

TUNEL "DEBELI BRIJEG"

L=2467 m



MJERIL0
1: 2000/2000

SR. RAV. = 228.0

KOTE NIVELETE	10+900 228.39 241.36			11+000 248.99			11+100 247.74			11+200 249.27			11+300 253.02			11+400 256.71			11+500 258.32			11+600 258.32			11+700 258.32			11+800 258.32			11+900 258.32			12+000 258.32			12+100 258.32			12+200 258.32			12+300 258.32			12+400 258.32			12+500 258.32			12+600 258.32			12+700 258.32			12+800 258.32			12+900 258.32			13+000 258.32			13+100 258.32			13+200 258.32			13+300 258.32			13+400 258.32			13+450 258.32		
KOTE TERENA	[Detailed elevation data points for each station]																																																																																
STACIONAZA	[Detailed stationing data points]																																																																																
LITOSTRATIGRAFSKA JEDINICA	V; K ₂ ^{2,3}															D; K ₂ ¹															D; K ₂ ¹															DV; K ₂ ^{2,3}																																			
STRUKTURNI BLOK	A															B															C															D																																			
GEOTEHNIČKA JEDINICA	1															2															3															4																																			
GSI	44 - 71															53 - 73															48 - 65															MALI NADSL0J																																			
RMR	H<B															H<B															H<B															MALI NADSL0J																																			
KATEGORIZACIJA STIJENSKE MASE	V															II/III (25% II KAT; 50% III KAT; 15% IV KAT; 10% V KAT)															II/III (45% II KAT; 45% III KAT; 7% IV KAT; 3% V KAT)															V																																			
Q	1.25 - 13.33															2.5 - 9.44															23/17 - 18/0 (5/3 - 4/0)															10m																																			
KATEGORIJA PODGRADE	23/21 - 14/0 (5/4 - 3/0)															23/17 - 18/0 (5/3 - 4/0)															23/17 - 18/0 (5/3 - 4/0)															10m																																			
TIP OSNOVNOG PODGRADNOG SKLOPA	50% TIP V 50% TIP Va															25% TIP II; 50% TIP III; 15% TIP IV; 10% TIP V															40% TIP II; 40% TIP III; 7% TIP IV; 3% TIP V (10% TIP VI PROŠIRENI PROFIL - cca 200 m ZAUSTAVNE NIŠE)															50% TIP V 50% TIP Va																																			

LEGENDA:

prg, dr; el; Q - prahovita glina s fragmentima drobne stijene iz podloge u omjeru 70 : 30, smeđe boje ; rahlo do srednje zbijeno tlo, debljine do 1 m, u podlozi dolomit, vapnenački dolomit ili vapnenac KVARTAR - ELUVIJ

V, DV; K₂²⁻³- vapnenac i dolomitični vapnenac dobro uslojen, svjetlo smeđe boje
GORNJA KREDA- TURON, SENON

D, K₂¹- dolomiti vapnenac i vapnenački dolomiti s proslojcima vapnenca i dolomita u vertikalnoj i lateralnoj izmjeni, dobro uslojeni, svjetlo sive ili sivosmeđe boje;
GORNJA KREDA - CENOMAN

— geološka granica, normalna

↔ reversni rasjed, navlaka

--- rasjed sa razlomljenom zonom

--- rasjed utvrđen geofizičkim istraživačkim radovima

--- granica utvrđena geofizičkim istraživačkim radovima

— Niveleta tunela

Površinska i gornja zona trošenja (prema seizmičkom refrakcijskom profilu)

Donja zona trošenja (prema seizmičkom refleksijskom profilu)

MPT-4
10m
istražne bušotine

IZAJENA BR.	OPIS	DATUM	POTPIS

INVESTITOR: HRVATSKE CESTE d.o.o. Za upravljanje, gradnje i održavanje državnih cesta 10000 ZAGREB, Voćnica 3

VISTA PROJEKTA (RAZINA I STRUK): GLAVNI GRAĐEVINSKI PROJEKT

ZAJEDNIČKA OZNAKA PROJEKTA: GP 0245/05

GRAĐEVINAR: PRISTUPNE CESTE MOSTU PELJEŠAC

MAPA: PELJ - GP - G 0170

NAZIV MAPE: GEOTEHNIČKI PROJEKT TUNELA DEBELI BRIJEG

SADRŽAJ: PROJEKTI USUŽNI GEOTEHNIČKI PROFIL GLAVNI TUNEL

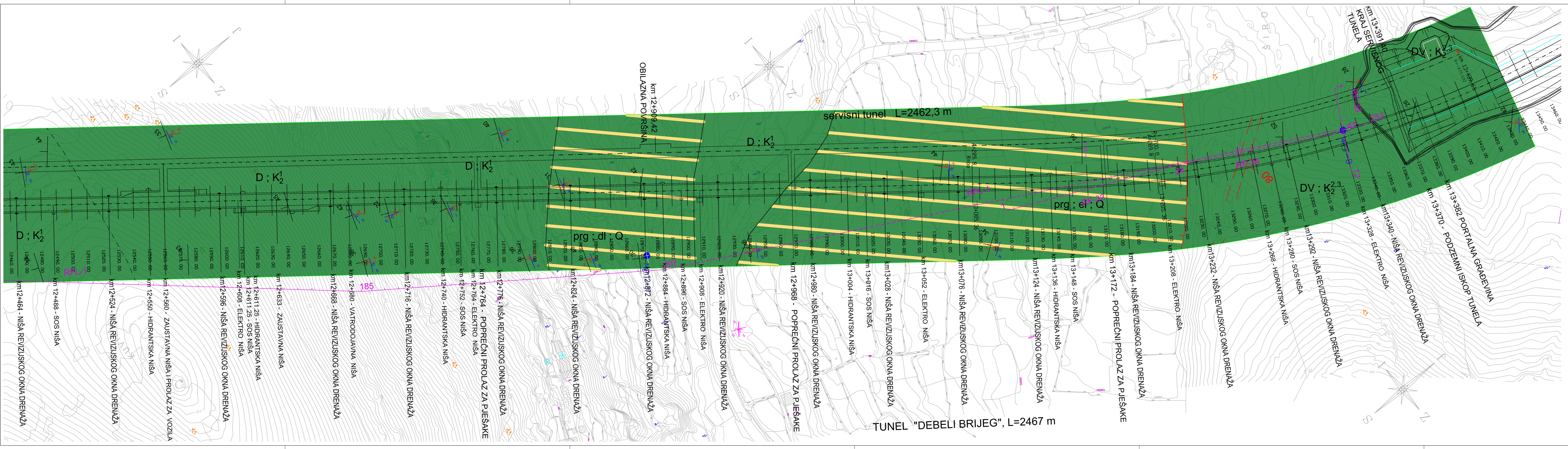
GLAVNI PROJEKTANT: DARKO SVIRAČ, dipl.ing.grad. MUJERO: 1:2000/2000

PROJEKTANT: DONAT UŽAREVIĆ, dipl.ing.grad. DATUM: travanj, 2014.




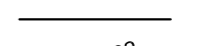






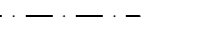

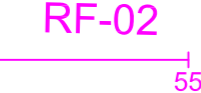
BROJ PROJEKTA: 4000-1233-2014

SURADNICI: GORAN STOJKOVIĆ, struč.sp.ec.ing.grad. BROJ PRILOGA: 1001
dr.sc. RENATO BULJAN, dipl.ing.geol.
VLATKO GULAM, dipl.ing.geol.

OZNAKA DOKUMENTA: IGH-PELJ-GP-G0170-1001



LEGENDA:

-  prg , dr ; el ; Q - prahovita glina s fragmentima drobine stijene iz podloge u omjeru 70 : 30, smeđe boje ; rahlo do srednje zbijeno tlo, debljine do 0.5 m, u podlozi dolomit, vapnenački dolomit ili vapnenac. Izdanci stijene podloge izviruju iz tankog pokrivača. KVARTAR - ELUVIJ
-  prg , dr ; el ; Q - prahovita glina s fragmentima drobine stijene iz podloge u omjeru 70 : 30, smeđe boje ; rahlo do srednje zbijeno tlo, debljine do 1 m, u podlozi dolomit, vapnenački dolomit ili vapnenac. KVARTAR - ELUVIJ
-  D, V; K₂^{1,2} - dolomiti i vapnenci, dobro uslojeni, svjetlo smeđe boje
GORNJA KREDA - CENOMAN, TUROM
-  geološka granica, normalna
-  položaj sloja s oznakom smjera i kuta nagiba
-  položaj diskontinuiteta OR iz strukture
-  položaj diskontinuiteta OB iz strukture
-  reversni rasjed, navlaka
-  zona pukotina, rasjed s oznakom smjera i kuta nagiba
-  rasjed s razlomljenom zonom
-  rasjed pretpostavljeni
-  istraživačka bušotina
-  profil geofizičkih istraživanja

IZMJENA BR.	OPIS	DATUM	POTPIS
INVESTITOR: HRVATSKE CESTE d.o.o. za upravljanje, građenje i održavanje državnih cesta 10000 ZAGREB, Vončinina 3		 <small>INSTITUT KH d.o.o.</small>	
VRSTA PROJEKTA (RAZINA I STRUKA): GLAVNI GRAĐEVINSKI PROJEKT		ZAJEDNIČKA OZNAKA PROJEKTA: GP 0245/05	
GRAĐEVINA: PRISTUPNE CESTE MOSTU PELJEŠAC			
MAPA: PELJ - GP - G 0170			
NAZIV MAPE: GEOTEHNIČKI PROJEKT TUNELA DEBELI BRIJEG			
SADRŽAJ: SITUACIJA			
GLAVNI PROJEKTANT: DARKO SVIRAČ, dipl.ing.grad.		MJEŠKO: 1:1000	
PROJEKTANT: DONAT UZAREVIĆ, dipl.ing.grad.		DATUM: travanj, 2014.	
SURADNICI: GORAN STOJKOVIĆ, struč.spec.ing.grad. dr.sc. RENATO BULJAN, dipl.ing.geol. VLATKO GULJAM, dipl.ing.geol.		BROJ PROJEKTA: 4000-1233-2014	
OZNAKA DOKUMENTA: IGH-PELJ-GP-G0170-901/c		BROJ PRILOGA: 901/c	