Nova austrijska tunelska metoda, NATM

Ilijaš, Lea

Master's thesis / Diplomski rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:369052

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-26**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations

Nova austrijska tunelska metoda, NATM

Ilijaš, Lea

Master's thesis / Diplomski rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:369052

Rights / Prava: In copyright

Download date / Datum preuzimanja: **2020-10-27**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Geotechnical Engineering

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET

Lea Ilijaš

NOVA AUSTRIJSKA TUNELSKA METODA, NATM

DIPLOMSKI RAD

VARAŽDIN, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET

DIPLOMSKI RAD

NOVA AUSTRIJSKA TUNELSKA METODA, NATM

KANDIDAT:

Lea Ilijaš

MENTOR:

Prof. dr. sc. Josip Mesec

NEPOSREDNI VODITELJ

dr. sc. Denis Težak, dipl. ing. geot.

VARAŽDIN, 2018.

Sveučilište u Zagrebu
Geotehnički fakultet

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnica: LEA ILIJAŠ

Matični broj: 173 - 2016./2017.

Smjer: GEOINŽENJERSTVO OKOLIŠA

NASLOV DIPLOMSKOG RADA:

NOVA AUSTRIJSKA TUNELSKA METODA, NATM

Rad treba sadržati:
1. Uvod
2. Tradicionalne metode izgradnje tunela prije NATM
3. Načela tunelogradnje po NATM-u
4. Nosivi prsten
5. Klasifikacija stijenske mase po NATM
6. Iskop tunela primjenom NATM
7. Oprema koja se koristi u novoj austrijskoj tunelskoj metodi
8. Geodetska kontrola mjerenja za tunelske projekte
9. Tunel Sveti Rok
10. Prednosti i mane NATM
11. Zaključak
12. Literatura

Popis slika
Popis tablica

Pristupnica je dužna predati mentoru jedan uvezen primjerak diplomskog rada sa sažetkom. Vrijeme izrade diplomskog rada je od 45 do 90 dana.

Zadatak zadan: 12.06.2018. Rok predaje: 10.09.2018.

Mentor:	Neposredni voditelj:	Predsjednik Odbora za nastavu:
Prof.dr.sc. Josip Mesec	Dr.sc. Denis Težak	Izv.prof.dr.sc. Igor Petrović

REPUBLIKA HRVATSKA
GEOTEHNIČKI FAKULTET
VARAŽDIN
SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je diplomski rad pod naslovom

NOVA AUSTRIJSKA TUNELSKA METODA, NATM

(naslov diplomskog rada)

rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom **Prof.dr.sc.JosipaMeseca.**

Izjavljujem da nijedan dio ovog diplomskog rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Također izjavljujem da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

U Varaždinu, 16. rujna 2018. godine

Lea Ilijaš

(ime i prezime)

Lea Ilijaš

(vlastoručni potpis)

SAŽETAK

Ime i prezime autora: Lea Ilijaš

Naslov teme: Nova austrijska tunelska metoda, NATM

U ovom diplomskom radu opisana je Nova austrijska tunelska metoda u nastavku NATM kao najsuvremenija metoda iskopa tunela. Nastala je iz bogatog rudarskog iskustva i dobrog poznavanja tradicionalnih metoda izgradnje tunela. NATM u klasičnom smislu nije metoda građenja već "generalni koncept tunelogradnje" kao i "postupak" gradnje tunela temeljen na znanstveno utvrđenim idejama i principima, kako bi se ostvarila optimalna sigurnost i ekonomičnost mobiliziranjem nosivog kapaciteta stijenske mase. Kao metoda iskopa prilagodljiva je čestim promjenama geoloških i geotehničkih uvjeta na čelu iskopa.U radu je uz pomoć domaće i strane literature koja je bila dostupna analizi detaljno opisana NATM iskopa tunela, sve njene faze, kao i svi elementi koji moraju biti obuhvaćeni da bi ta metoda mogla biti primijenjena u suvremenoj izgradnji tunela. U praksi NATM zahtijeva veliki broj aspekta tunelskog inženjerstva u stijenskoj masi, od ugovaranja i inženjeringa, do same ugradnje i monitoringa. Ova metoda se pokazala izvedivom u velikom broju kategorija stijena od onih "dobrih" pa do onih "loših".Mjerni uređaji kao što su GPS, elektronski tahimetar, ekstenziometri, viskovi, roboti za mjerenje mogu zadovoljiti navedene zahtjeve. Uglavnom se koriste automatski mjerni sustavi koji se sastoje od više komponenti. Primarni faktori koji ograničavaju točnost mjerenja udaljenosti i kutova u tunelskoj geodeziji su nepouzdanost indeksa refrakcije zraka i sustavni efekt atmosferske građe.

Ključne riječi:*tunelogradnja, nova austrijska tunelska metoda, primarna podgrada, klasifikacija stijenske mase.*

Sadržaj

1. UVOD 1

2. TRADICIONALNE METODE IZGRADNJE TUNELA PRIJE NATM 3

2.1. STARA AUSTRIJSKA METODA 3

2.2. BELGIJSKA METODA 4

2.3. TALIJANSKA METODA 5

2.4. NJEMAČKA METODA 5

3. NAČELA TUNELOGRADNJE PO NATM-u 6

3.1. OSNOVNA NAČELA NOVE AUSTRIJSKE TUNELSKE METODE 6

3.2. PREDUVJETI ZA USPJEŠNU PRIMJENU NATM-a 8

4. NOSIVI PRSTEN 20

5. KLASIFIKACIJA STIJENSKE MASE PREMA PRINCIPIMA NATM 22

5.1. RQD KLASIFIKACIJA 23

5.2. RMR KLASIFIKACIJA 23

5.3. Q KLASIFIKACIJA 25

5.4. LAUFFEROVA KLASIFIKACIJA 26

5.4.1. Modificirana Laufferova klasifikacija 27

5.5. TERZAGHIJEVA KLASIFIKACIJA STIJENSKE MASE 27

5.6. RSR KLASIFIKACIJA 28

6. ISKOP TUNELA PRIMJENOM NATM 30

6.1. POPREČNI PRESJECI 31

6.2. PODGRADNI SUSTAVI 33

6.2.1. Sidra 34

6.2.2. Mlazni beton 39

6.3. INSTRUMENTACIJA 42

7. OPREMA KOJA SE KORISTI U NOVOJ AUSTRIJSKOJ TUNELSKOJ METODI 43

8. GEODETSKA KONTROLA MJERENJA ZA TUNELSKE PROJEKTE 46
8.1. USPOSTAVLJANJE KONTROLNE MREŽE..... 46
8.2. TUNELSKA LASERSKA KONTROLA 47
8.3. MJERENJE DEFORMACIJA 48
9. TUNEL SVETI ROK..... 50
10. PREDNOSTI I MANE NOVE AUSTRIJSKE TUNELSKE METODE..... 55
11. ZAKLJUČAK 56
12. LITERATURA..... 57
Popis slika 59
Popis tablica 62

1. UVOD

Od prvih početaka pa svedo danas ljudi ulaze u podzemlje. U samom početku su ulazili u prirodne špilje, a nakon toga počinju s kopanjem podzemnih prostorija u svrhu rudarenja, stanovanja, navodnjavanja i drugo. S vremenom su uvjeti građenja podzemnih prostorija postajali sve teži jer se kopaju ispod gusto naseljenih gradova, ispod mora, rijeka i jezera.

Tuneli su inženjerske građevine, koji služe za savladavanje raznih terenskih prepreka, transport ljudi i/ili materijala, te za provođenje vodovoda, kanalizacija i slično. Riječ tunel potječe iz engleskog rječnika što znači cijev, koja ima ulaz i izlaz. Iz tog razloga tunelima se smatraju isključivo one podzemne građevine, koje imaju svoj ulaz i izlaz dok podzemne građevine poput skladišta, skloništa, drenažnih i rudarskih potkopa se ne smatraju tunelima.

Tuneli su također vrlo skupe kompleksne građevine koje se dugo se grade, zahtijevaju kvalificiranu radnu snagu, posebne strojeve i alate za građenje, te se teško održavaju u vidu eksploatacije. Grade se isključivo na područjima kada se usporednim kalkulacijama pokažu kao ekonomičnija rješenja od otvorenih puteva.

NATM dala je snažnu potporu u razvoju tehnika građenja podzemnih objekata odnosno tunela. U engleskom govornom području pojavila se pod nazivom *New AustrianTunnellingMethod* i time dobila kraticu NATM koja je prihvaćena u cijelom svijetu.

Ova metoda se također nekad naziva i *Sequentialsupportmethod* koja se bazira na sekvencijski pristup iskopu i podgrađivanju, te *Shotcretemethod* koja ističe važnu ulogu mlaznog betona. NATM nije metoda građenja koja se može prikazati shemom iskopa i nacrtima podgrade već je ona generalni koncept odnosno filozofija tunelogradnje. Također NATM nije vezana za bilo koju proceduru iskopa i podgrađivanja već se temelji na principima opažanja. Ona je postupak građenja tunela temeljena na znanstveno utvrđenim idejama i principima kao i u praksi potvrđenim idejama i principima, kako bi se mobiliziranjem nosivog kapaciteta stijenske mase ostvarila optimalna ekonomičnost i sigurnost [14].

NATM se razvila na iskustvima primjene starih metoda.U knjizi "GebiergsdruckundTunnelbau" prof. L.v.Rabcewicz dajeneke principe NATM. Godine 1948. svojim patentom formulirao je osnovne principe ove metode.Ključna formulacija je bila da se

sa fleksibilnom primarnom podgradomdostiže novo ravnotežno stanje koje se kontrolira terenskim opažanjima.Nakon što se ovo novo stanje uravnoteži, postavlja se unutarnja obloga tunela. Unekim se slučajevima obloga tunela može izostaviti [14].

NATM se razvijala kroz teorijske studije i praktične primjene. Njena primjena se stalno povećavala međutim njeni principi su uvijek ostali isti. Principi NATM prvi se puta primjenjujuna izgradnjitunela u Venezueli.U Austriji prvi pokušaj primjeneNATMbio je u pedesetim godinama prošlog stoljeća na izgradnji nekoliko malih hidrotehničkih tunela.

U mekim sredinama urbanih područja uspješna primjena ove metode bila je u Frankfurtu na Maini 1968. godine. Profesor Muller potaknuo je izvoditelja radova da prihvati metodu i na temelju nje izgradi pokusni tunel u Frankfurtskoj glini kako bi dokazao da je metoda primjenjiva.

Godine 1963. na geotehničkom kolokviju u Salzburgu prvi puta se ova metoda zvanično nazvala NATM, te se ta godina smatra kao godina rođenja NATM. Ova metoda nazvana je novom metodom kako bi se mogla razlikovati od stare metode, a Austrijska jer su je razvili austrijski inženjeri. Profesori Muller i Rabczewicz s velikim iskustvom u praksi, objašnjavali su metodu na teorijskoj osnovi sukladno novim konceptima mehanike stijena.

2. TRADICIONALNE METODE IZGRADNJE TUNELA PRIJE NATM

Tradicionalne metode izgradnje tunela bazirane su na jednom ili više potkopa gdje se prvo izvodi jedan potkop, uglavnom trapezastog presjeka do 10 m^2. Do polovine prošlog stoljeća, u početku se koristila drvena podgrada, a kasnije čelična za stabiliziranje tunela do ugradnje konačne podgrade koja je bila zidana ili od betona [1].

Kod tradicionalnih metoda izgradnje tunela opterećenje primarne podgrade bila je posljedica dezintegracije i razrahljenja okolne stijene. Ove teorije opterećenja razvili su Terzaghi, Komarell i dr. S obzirom na raspoložive tehnike iskopa i mnogo različitih iskopa, od iskopa do kompletiranja podgrade prolazilo je dosta vremena što je dovodilo do slabljenja stijenske mase. Rezultat ovog načina građenja bila su vrlo velika nepravilna opterećenja što je rezultiralo debelom podgradom. Još tada su inženjeri uočili neracionalnost takve podgrade i mogućnost da se iskoristi sama nosivost stijenske mase.

Postoji veliki broj tradicionalnih metoda koje se razlikuju prema načinu i redoslijedu otvaranja profila i formiranja konstruktivnog sistema. Osnovne tradicionalne metode su:

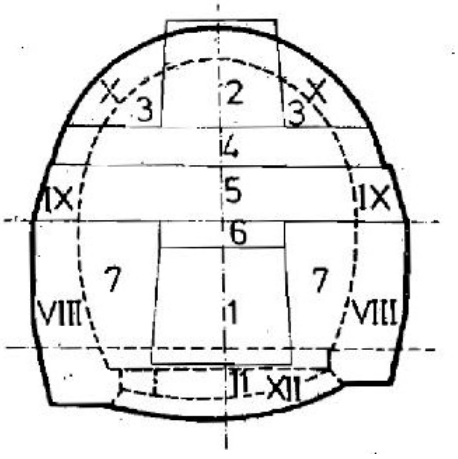
- stara austrijska metoda,
- belgijska metoda,
- talijanska metoda,
- njemačka metoda.

2.1. STARA AUSTRIJSKA METODA

Kod stare austrijske metode iskop započinje smjernim potkopomtrapezastog profila. Glavni transport se odvija na donjem dijelu potkopa nakon kojeg slijedi gornji na razmaku najvišedeset metara. Vertikalni proboj između dva potkopa izvodi se na svakih dvadeset metara, a služi za presipavanje iskopanog materijala iz gornjeg potkopa u donji potkop. Nakon toga,potkop se bočno proširuje počevši od nivoa poda gornjeg potkopa postepeno prema dolje, pri čemu podgrađivanje prati iskop.

Nakon što se cijeli profil otvori, stijena se oslobađa podgrade na razmaku od jednog nosivog okvira podgrade i postavlja se oplata. Obloga se betonira ili zida kamenim ili

betonskim prefabriciranim blokovima. Obloga se izvodi odozdo prema gore i oslanja se na oplatu sve dok se luk podgrade ne zatvori, kako je prikazano na slici 2.1.

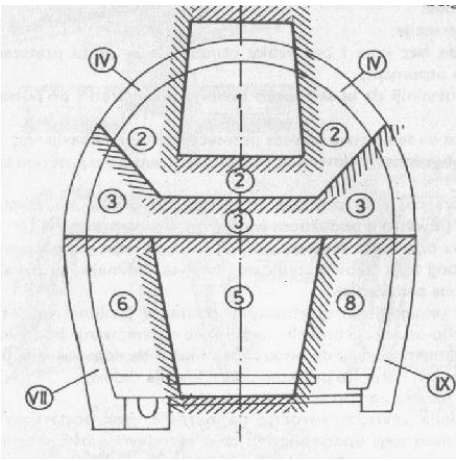


Slika 2.1 Redoslijed radova kod stare austrijske metode [1]

2.2. BELGIJSKA METODA

Kod ove metode iskop smjernog potkopa izvodi se u kaloti, te se nakon toga profilproširuje na bokove. Proširenjem profila tlo ispod već iskopanog dijela profilaoslobađa se od intezivnih naprezanja,što omogućava lakši iskop donjeg dijela profila. Nakon što je iskopan gornji dio profila po cijeloj širini, izvodi se obloga kalote. Nakon toga slijedi iskop srednjeg dijela profila prema dolje uz istovremeno podupiranje izvedene obloga kalote. Blokovi obloge se dovršavaju nakon iskopa donjeg dijela profila na punu širinu.

Prva kritična faza je uklanjanje podgrade na razmaku od 75 - 100cm to znači da sestijena oslobađa od podupirača i stvaraju se pomaci. Druga kritična faza je iskop blokova ispod već izvedene kalote obloge, koja će u tom trenutku ostati bez krutog oslonca, a oslanjati će se na posebnim podupiračima, kako je prikazano na slici 2.2. Ukoliko je potrebno, podnožni svod se izvodi nakon zatvaranja podgrade.



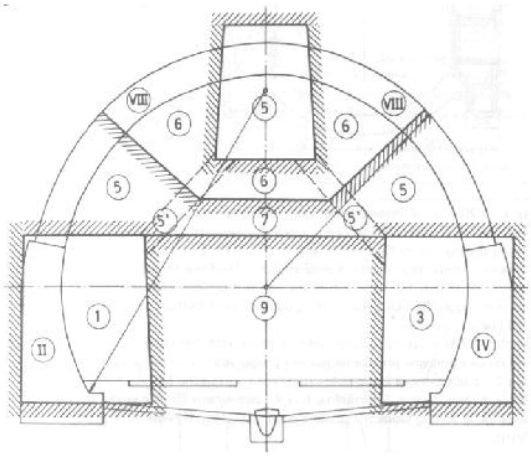
Slika 2.2 Shematski prikaz redoslijed radova kod Belgijske metode [1]

2.3. TALIJANSKA METODA

Ova metoda podrazumijeva zamjenu slabog stijenskog materijala uz profil suhozida koji preuzima opterećenje masiva i smanjuje konačno opterećenje obloge. Betonska obloga normalnih dimenzija izvodi se unutar podzida od suhozida.

2.4. NJEMAČKA METODA

Ova metoda se još naziva i metoda trećeg iskopa, te se često primjenjuje za veće profile podzemnih prostorija. Kako bi se uštedilo na materijalu u ovoj metodi, kalota iskopa i oplata za konačnu oblogu oslanja se na centralnu jezgru. Centralna jezgra se kopa tek nakon što je izveden svod konačne obloge. Ova metoda se uglavnom primjenjuje u teškim uvjetima građenja. Postupak građenja tunela Njemačkom metodom prikazano je na slici 2.3.



Slika 2.3 Shematski prikaz redoslijeda radova kod Njemačke metode [1]

3. NAČELA TUNELOGRADNJE PO NATM-u

NATM u klasičnom smislu nije metoda građenja već "generalni koncept tunelogradnje" kao i "postupak" gradnje tunela temeljen na znanstveno utvrđenim idejama i principima, kako bi se ostvarila optimalna sigurnost i ekonomičnost mobiliziranjem nosivog kapaciteta stijenske mase.

Godine 1980. Austrijski nacionalni komitet za podzemne gradnje dao je službenu definiciju NATM-a. NATM je osnovana na konceptu da stijena ili tlo koji okružuju podzemni otvor postaju dio nosive konstrukcije kroz aktivaciju nosivog prstena.

Primarno polje naprezanja iskopom tunela mijenja se u znatno nepovoljnije sekundarno polje naprezanja. Pravovremeno završavanje podnožnog svoda prstenastoj strukturi dati će statička svojstva cijevi.

Cilj NATM je smanjivanje pojava jednoosnog ili dvoosnog stanja naprezanja u masivu, te zadržati višeosno ili stvarno troosno stanje naprezanja u svim koracima gradnje.

3.1. OSNOVNA NAČELA NOVE AUSTRIJSKE TUNELSKE METODE

Glavna filozofija NATM je aktiviranje prstena ili luka mobiliziranjem nosivog kapaciteta stijenske mase ili tla koliko god je to moguće.

Konkretno rečeno, umjesto da primarna podgrada preuzme cijelo opterećenje okolnih pritisaka, veliki dio preraspodjele naprezanja oko izbijenog otvora u stijenskoj masi preuzima sama stijena, koja ujedno s primarnom podgradom čini stabilnu konstrukciju. Vrlo je bitno stijensku masu oko izbijenog otvora ne promatrati samo kao opterećenje već kao i nosivi element podgrade. Ekonomična primarna pograda stijenskoj masi omogućuje da se dijelom deformira. Samim time podgradana sebe preuzima dio preraspodjele naprezanja i smanjuje opterećenje primarne podgrade. Obavezna su mjerenja deformacija profila izbijenog otvora, kojima se dokazuje završetak faze deformiranja i stabilnost sprege primarne podgrade i stijenske mase.

Tehnološka i tehnička koncepcija NATM temelji se na činjenici da sustav podgrade nije samo konstrukcija već i vremenski proces.

Glavna zadaća konstrukcije podgradnog sustava je da stijensku masu oko izbijenog otvora tunela pretvori u samonosivu konstrukciju koja omogućava stvaranje sigurne podzemne šupljine.

NATM iskopa je prilagodljiva čestim promjenama geotehničkih i geoloških uvjeta na čelu iskopa. Također iskopi u slabim materijalima duž trase tunela uvjetuju razradu profila tj. primjenu višefaznog iskopa. Razrada profila na kalotni dio, srednji dio, donji potkop i eventualne bočne potkope, ovisi o primijenjenoj tehnologiji i tehnici pri iskopu tunelakao i o geološkim uvjetima kroz koje tunel prolazi.

Ukratko rečeno NATM se sastoji od pet osnovnih principa, a to su:

- osnovna nosiva komponenta tunela je stijenska masa,
- održavanje čvrstoće stijenske mase,
- poprečni profil treba biti zaobljen,
- podgrada treba biti fleksibilna i tanka,
- mjerenja in-situ [14].

Načela NATM ujedno su temeljna načela suvremenog načina građenja tunela. U praksi ova načela kao i tehnološka i tehnička obilježja NATM omogućavaju prilagodbu metode:

- različitim geotehničkim i inženjersko-geološkim svojstvima brdskog masiva kroz koji se tunel gradi,
- različitim oblicima poprečnog presjeka tunela,
- prilagodbu metode temeljnim oblicima tehnologije i tehnike iskopa tunela,
- raznim oblicima organizacije radova na čelu iskopa tunela,
- raznim uvjetima ukupne organizacije tehnologije i tehnike iskopa i podgrađivanje tunela u vidu pripreme i dopreme svih resursa, posebno sklopova podgrdanog sustava i materijala,
- te veliku sigurnost radova na iskopu tunela kod primjene Nove austrijske tunelske metode gdje glavnu ulogu ima pripadajući podgradni sustav tj. međuovisnost iskopa i primjerene podgradene konstrukcije omogućava višu razinu tehnike i tehnologije tunelskih radova [14].

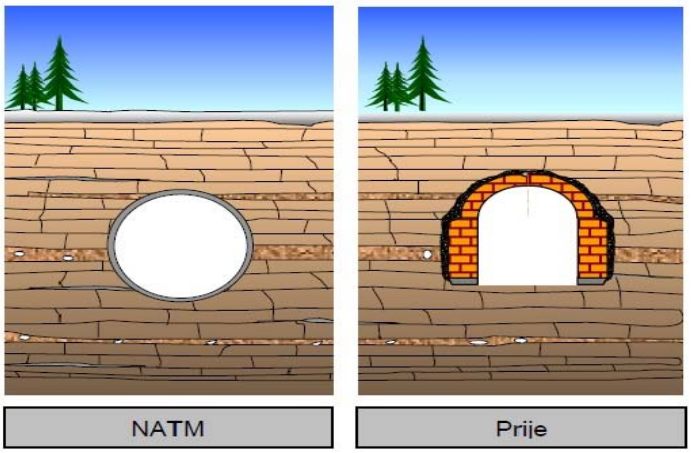
3.2. PREDUVJETI ZA USPJEŠNU PRIMJENU NATM-a

NATM je bazirana na poluempirijskom projektiranju i in-situ mjerenjima tijekom građenja tunela. Ovim mjerenjima u tlu osigurava se optimalan način primjene primarne tunelske podgrade prije same ugradnje sekundarne odnosno konačne betonske obloge.

Rabcewicz, Muller, Pacher, ova trojca inženjera i znanstvenika koji sesmatraju očevima NATM prikazali su je kroz 22 načela:

- ***Stijenska masa je glavni nosivi element tunela***

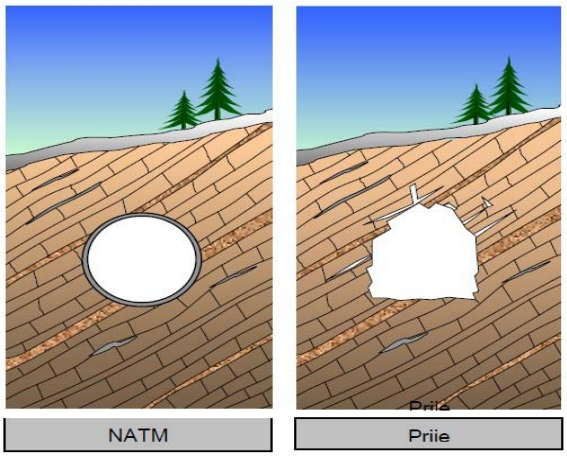
Primarna i sekundarna podgrada samo služe za uspostavljanje nosivog prstena ili trodimenzionalne sferične nosive ljuske u stijenskoj masi, slika 3.1[14].



Slika 3.1 Stijenska masa kao glavni nosivi element[14]

- ***Održavanje čvrstoće stijenske mase***

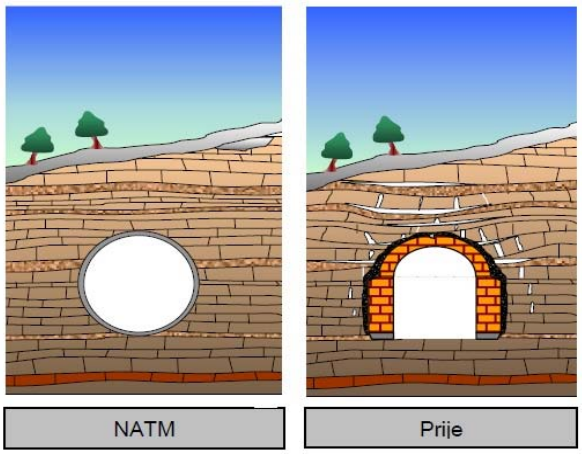
S obzirom da je stijenska masa glavni nosivi element tunela, treba nastojati izbjegavati štetno razrahljenje odnosno nastojati održati njenu originalnu čvrstoću koju je imala prije iskopa. To se postiže pažljivim iskopom i trenutnom ugradnjom podgrade, slika 3.2[14].



Slika 3.2 Održavanje čvrstoće stijenske mase[14]

- ***Izbjegavanje razrahljenjastijenske mase***

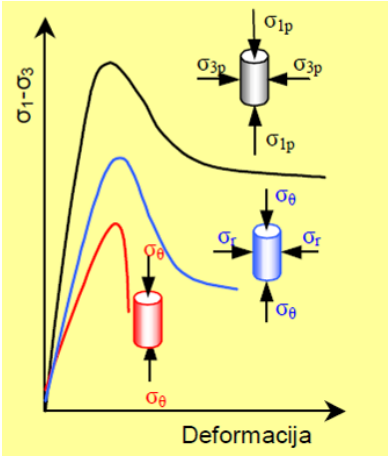
Treba izbjegavati razrahljenjestijenske mase jer ono izaziva gubitak čvrstoće. Tlo niže čvrstoće jače opterećuje podgradu, slika 3.3[14]



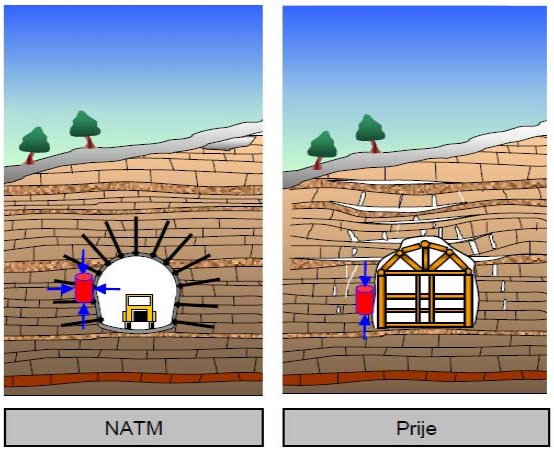
Slika 3.3 Izbjegavanje razrahljenjastijenske mase[14]

- ***Kontrola deformacija stijenske mase***

Treba nastojati da stijena u okolini iskopa bude u troosnom, a ne u dvoosnom ili jednoosnom stanju naprezanja jer joj je čvrstoća u troosnom stanju, slika 3.4 i 3.5[14].



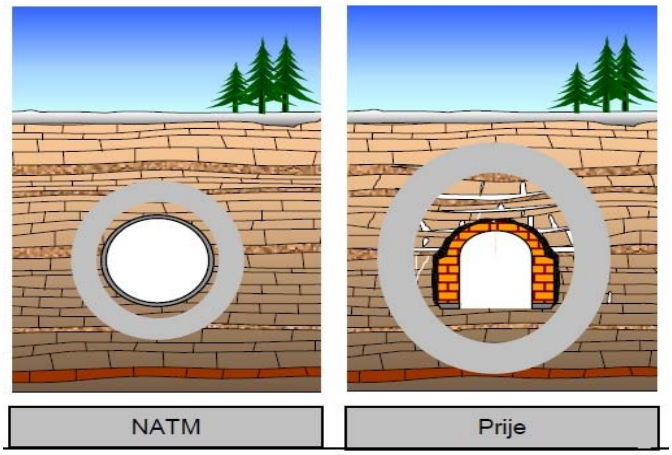
Slika 3.4 Dijagram troosnog stanja naprezanja[14]



Slika 3.5 Kontrola deformacije stijenske mase[14]

- ***Kontrola deformacija stijenske mase***

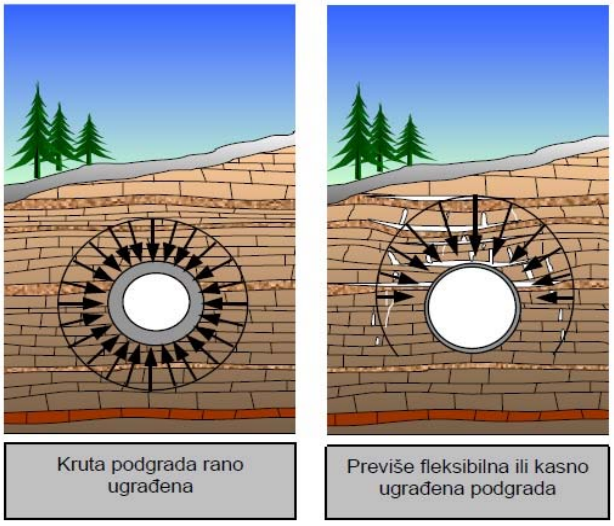
Deformaciju stijenske mase ne treba sprječavati ali ju je potrebno kontrolirati. Kontroliranom deformacijom pobuditi će formiranje nosivog prstena u okolini tunela i neće dopustiti prekomjerno razrahljenje i na taj način onemogućuje gubitak čvrstoće stijenske mase. Što bolje je to postignuto veća je sigurnost i ekonomičnost građenja, slika 3.6[14].



Slika 3.6 Kontrola deformacija stijenske mase[14]

- ***Pravovremena ugradnja podgrade***

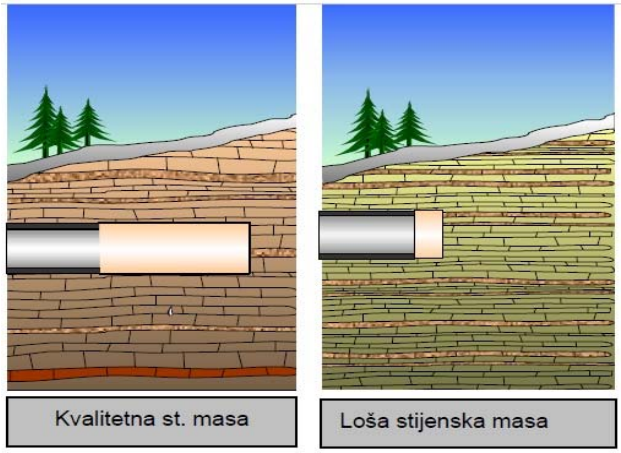
Podgradu treba ugraditi pravovremeno što znači ni previše rano ni previše kasno. Podgrada također nesmije biti ni previše kruta ni previše fleksibilna. Kruta i rano ugrađena podgrada preuzet će na sebe visoka naprezanja. Fleksibilna i kasno ugrađena podgrada prouzročit će razrahljenjestijenske mase što će rezultirat visoka naprezanja na podgradu, slika 3.7[14].



Slika 3.7 Pravovremena ugradnja podgrade[14]

- ***Točno procijeniti vremenski čimbenik***

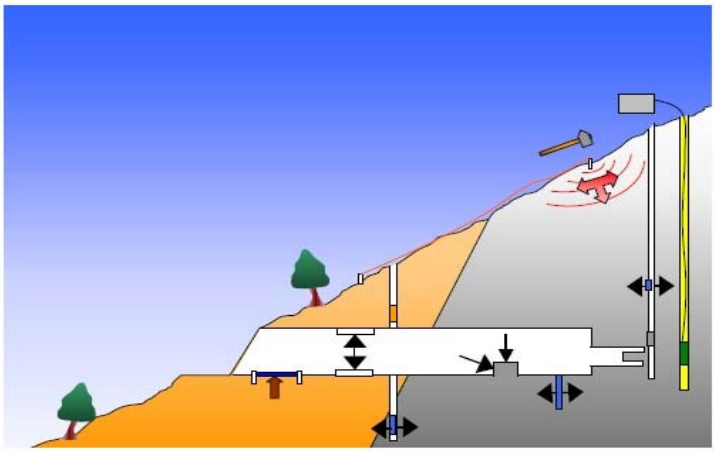
Kako bi se podgrada ugradila pravovremeno trebamo točno procijeniti vremenski čimbenik. U kvalitetnoj stijenskoj masi tunel može ostati duže ne podgrađen. U stijenskoj masi lošije kvalitete tunel je potrebno odmah podgraditi, slika 3.8[14].



Slika 3.8 Pravovremena ugradnja podgrade[14].

- ***Opažanja, laboratorijska i terenskaispitivanja***

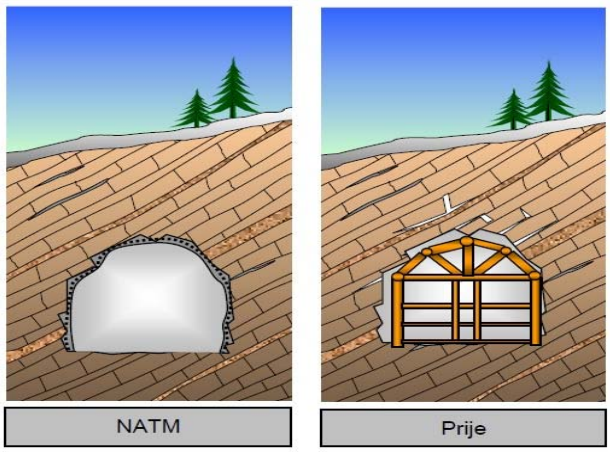
Vremenski čimbenik se procjenjuje na osnovi rezultat laboratorijskih ispitivanja i terenskih mjerenja pomaka u tunelu, slika3.9[14].



Slika 3.9 Laboratorijska i terenska ispitivanja[14]

- ***Primjena mlaznog betona umjesto primarne podgrade***

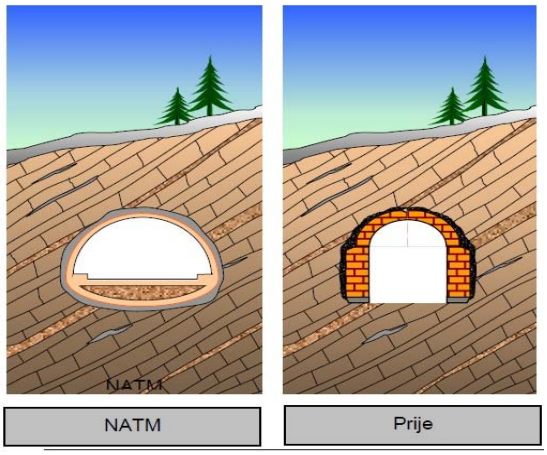
Koristi se mlazni beton umjesto drvene podgrade jer mlazni beton sprječava veće deformacije pa tako i razrahljenjestijenske mase, slika 3.10[14].



Slika 3.10 Primjena mlaznog betona umjesto drvne podgrade[14]

- ***Upotreba tankostijene primarne i sekundarne podgrade***

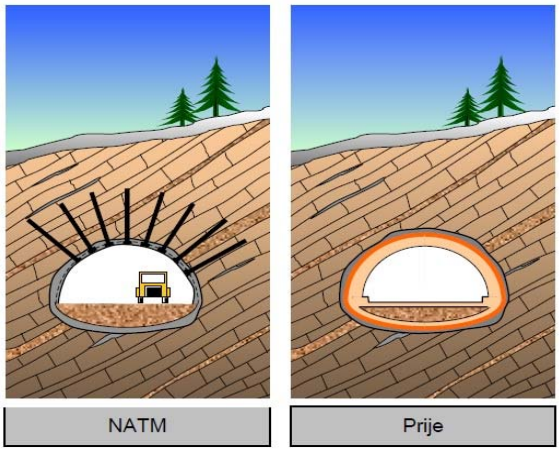
Koristi se tankostijena primarna i sekundarna podgrada jer je ona savitljiva čime se izbjegava pojava većih momenata savijanja, slika 3.11[14].



Slika 3.11 Upotreba tankostijene primarne podgrade[14]

- ***Upotreba pojačanja podgrade***

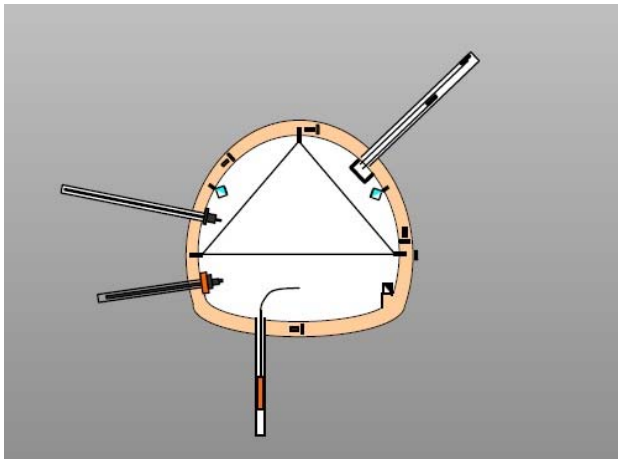
Probleme stabilnosti rješavaju se pojačavanjem primarne podgrade armaturnim mrežama, lukovima i sidrima, a ne rješavaju se njenim podebljanjem, slika 3.12[14].



Slika 3.12 Pojačanja primarne podgrade[14]

- ***Mjerenje pomaka konture iskopa tunela***

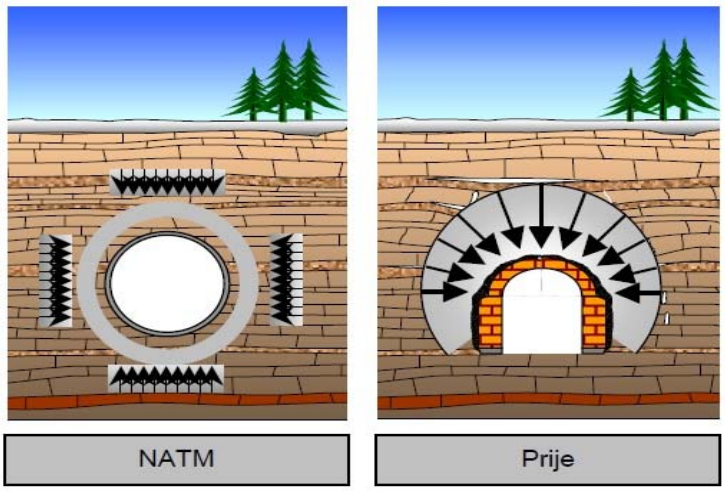
Vrijeme i način ugradnje sekundarne podgrade treba odrediti prema rezultatima mjerenja pomaka konture iskopa tunela. Rezultati mjerenja su konvergencija, ekstenziometri, mjerno sidro, mjerenje sile na glavi sidra, tlačne ćelije, mjerenje naprezanja u betonu, akcelerografi i geodetska opažanja, slika 3.13[14].



Slika 3.13 Mjerenje pomaka konture iskopa[14]

- ***Razmatranje tunela kao debelostijena cijev***

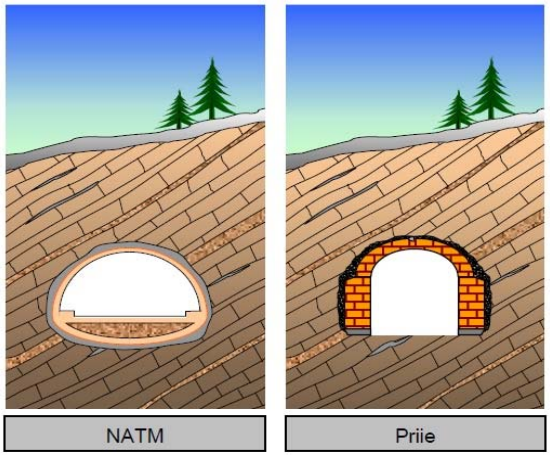
Statički se tunel razmatra kao debelostijena cijev koja se sastoji od nosećeg prstena u stijenskoj masi i podgrade, slika 3.14[14]



Slika 3.14 Tunel kao debelostijena cijev[14]

- ***Zatvaranje prstena***

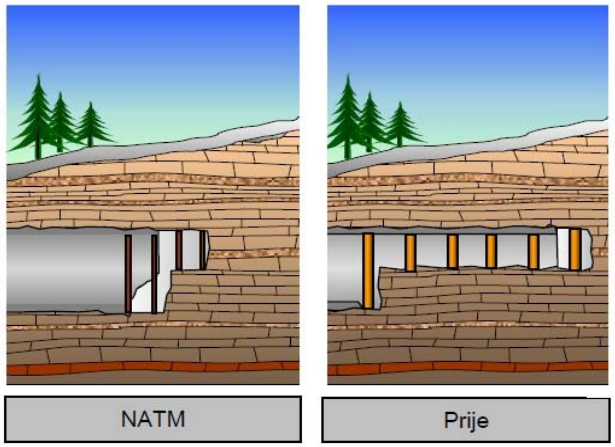
Pravovremeno zatvaranje prstena bitno utječe na tunel kao statičku cijev, slika 3.15[14].



Slika 3.15 Zatvaranje tunela[14]

- ***Pravovremeno zatvaranje podgradnog prstena***

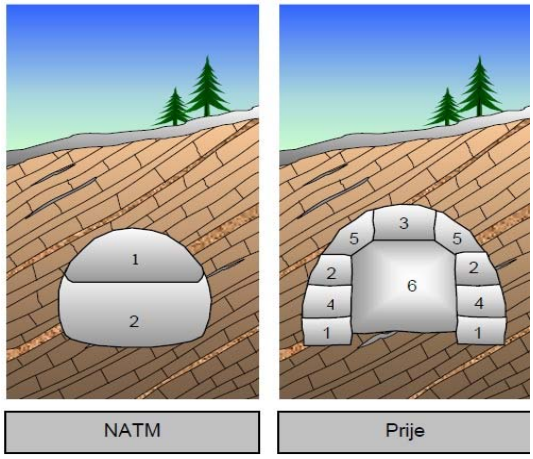
Podgradni prsten treba zatvoriti čim prije. Ako se ugrađuje u fazama, onda vrijeme između ugradnje prve i posljednje faze, kojom se prsten potpuno zatvara, treba biti čim kraće. Dugotrajno otvoren podgradni prsten za posljedicu će imati velika naprezanja u većim ugrađenim dijelovima prstena i nepovoljna naprezanja u stijenskoj masi, slika 3.16[14].



Slika 3.16 Pravovremeno zatvaranje podgradnog prstena[14]

- ***Odabiranje odgovarajuće metode iskopa***

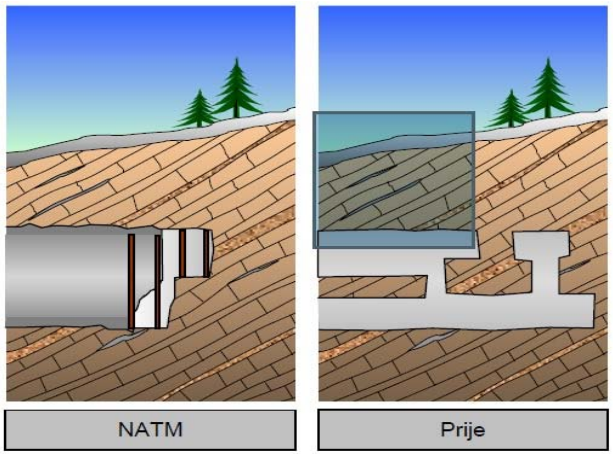
Treba kopati cijeli profil tunela istovremeno. Iskop razradom profila, kada se pojedini djelovi poprečnog presjeka tunela kopaju s vremenskim pomakom, nisu poželjni iako se u teškim geotehničkim uvjetima to ne može izbijeći. Iskop razradom profila komplicira i umnogostručuje promjene naprezanja i oštećuje stijenu.



Slika 3.17 Pravovremeno zatvaranje podgradnog prstena[14]

- ***Odabiranje odgovarajuće metode iskopa***

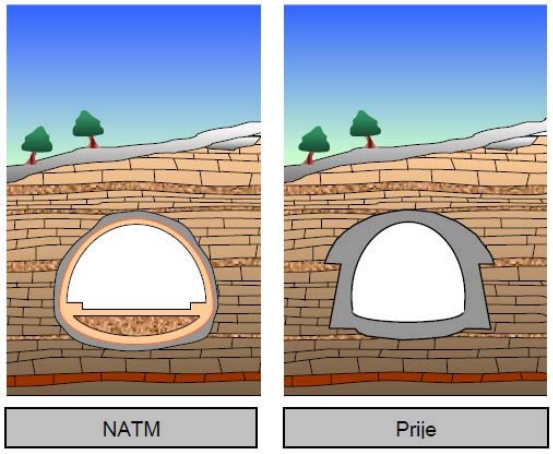
Metoda iskopa može biti presudna za sigurnost građevine. Mjenjanje vremena podgrađivanja, vremnea zatvaranja prstena, dužine kalote i stijenskog pritiska sustavno se koristi za proces stabilizacije sustava masiv – podgrada.



Slika 3.18 Stabilizacija sustava masiv –podgrada[14]

- ***Poprečni profil treba biti zaobljen***

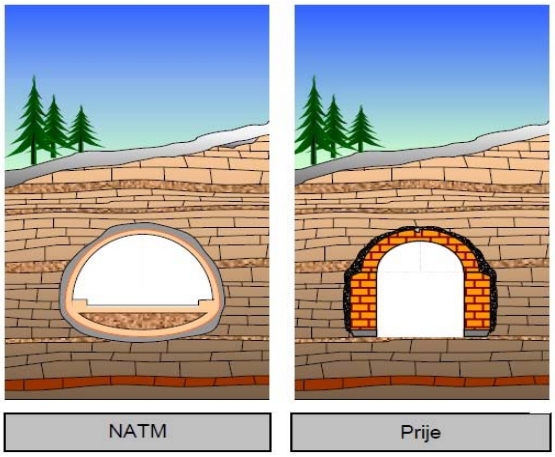
Zaobljenim poprečnim profilom tunela izbjegavamo koncentraciju naprezanja. U nekom kutu poprečnog profila koncentracija naprezanja može provocirati progresivni slom mase u široj zoni. Koncentracija naprezanja je zapravo pojava u kojoj maksimalno naprezanje može biti puno veće od normalnog naprezanja, slika 3.19[14].



Slika 3.19 Zaobljeni poprečni profil tunela[14]

- ***Sekundarna obloga mora biti tanka***

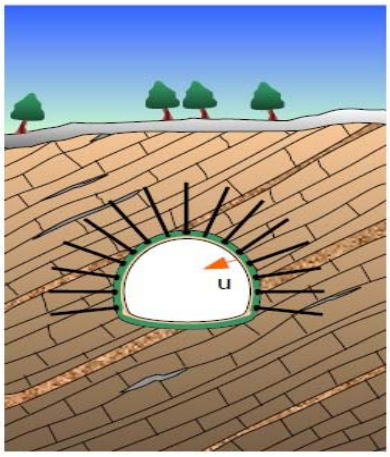
Isto tako sekundarna obloga treba biti tanka. Nije poželjno da sile između primarne i sekundarne podgrade se prenose trenjem, slika 3.20[14].



Slika 3.20 Tanka sekundarna obloga[14]

- ***Primarna podgrada treba stabilizirati masiv, a sekundarna povećati sigurnost***

Primarna podgrada treba stabilizirati masiv. Sekundarna podgrada treba samo povećati sigurnost. Mlazni beton koji može biti armirani ili nearmirani, sidra čelični lukovi, *pipe roof* i slično čine primarnu podgradu. Sekundarnu podgradu čini sekundarna betonska podgrada tunela armirana ili nearmirana. Između primarne i sekundarne podgrade postavlja se hidroizolacija, slika 3.21[14].



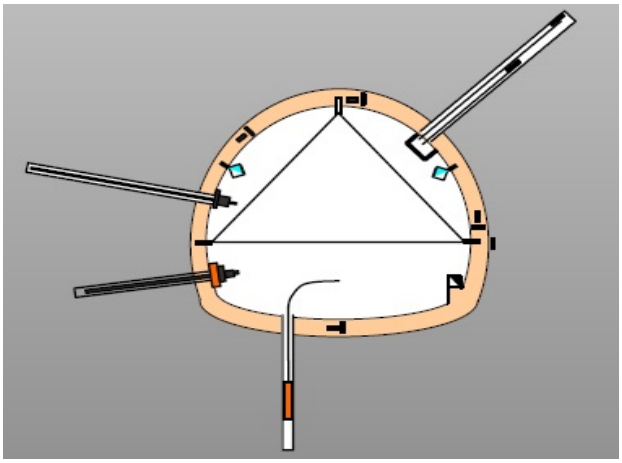
Slika 3.21 Stabilizacija masiva primarnom podgradom i povećanje sigurnosti sekundarnom podgradom[14]

- ***Dimenzioniranje i kontrola stabilnosti primarne i sekundarne obloge***

Dimenzioniranje i kontrola stabilnost primarne i sekundarne obloge vrši se opažanjima tijekom građenja i eksploatacije tunela, slika 3.22.

Opažanja ili monitoring obuhvaćaju:

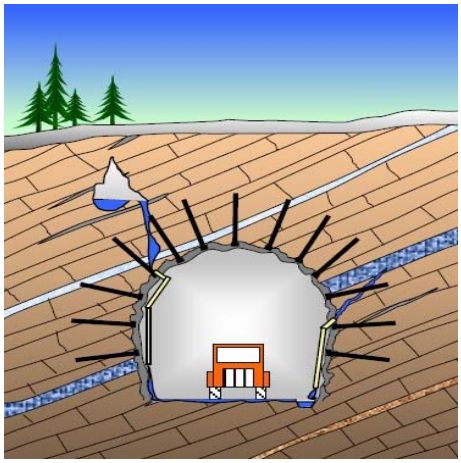
- mjerenja naprezanja u mlaznom betonu i sekundarnoj oblozi,
- naprezanja na kontaktu mlaznog betona i stijene,
- pomaka konture iskopa tunela,
- pomaka unutar stijenske mase.



Slika 3.22 Stabilizacija primarne i sekundarne obloge[14]

- ***Dreniranje stijenske mase***

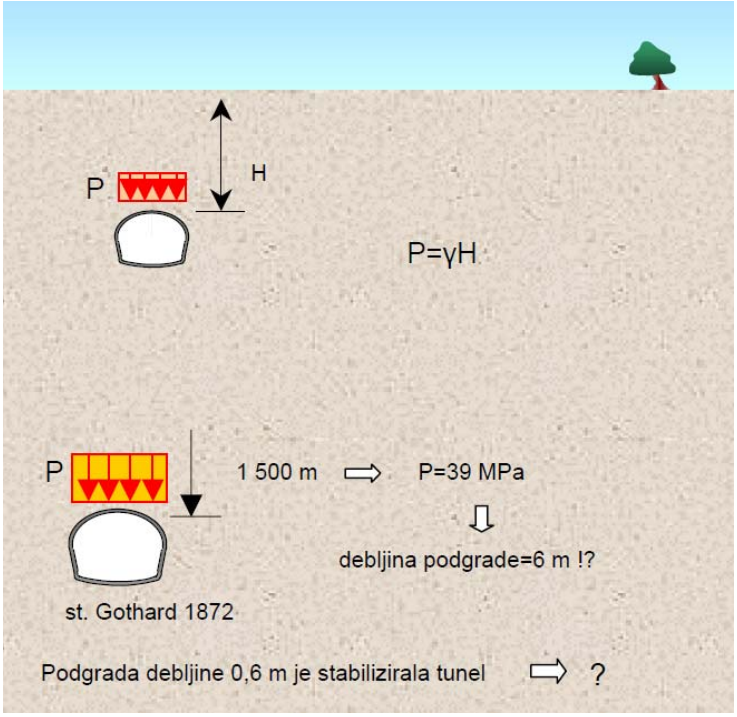
Hidrostatski tlak i strujne vode povećavaju opterećenje na podgradu. S obzirom na to stijensku masu je potrebno drenirati omogućavajući vodi dotok u tunel. Ne smiju se blokirati izvori na konturi tunela, slika 3.23[14].



Slika 3.23 Dreniranje stijenske mase[14]

4. NOSIVI PRSTEN

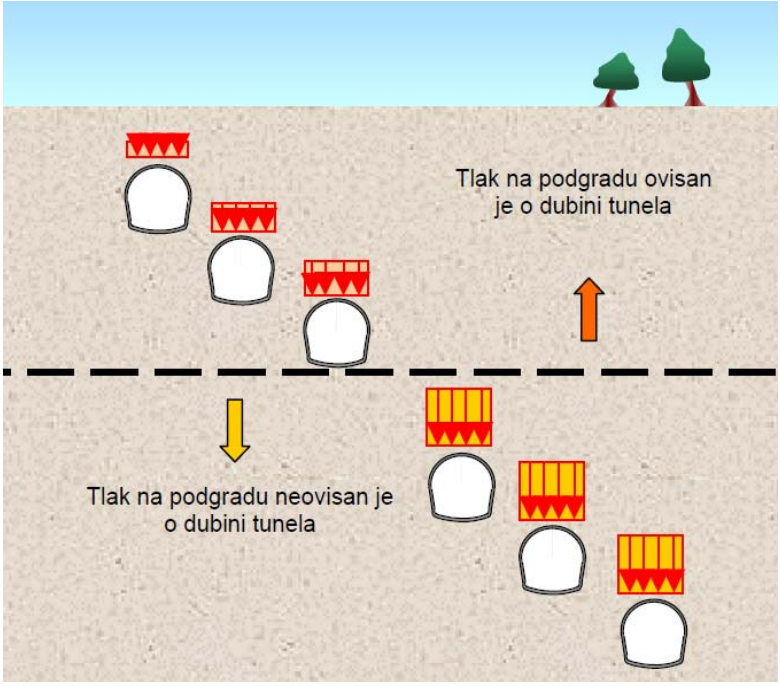
Za nosivi prsten ili tvz. zaštitna zonau engleskom se govornom području koriste izrazi poput: "protective zone", "protective ring" i drugi. Prema Heimovoj hipotezi, tlak na podgradu raste linearno s dubinom tunela. U praksi ova se tvrdnja nije pokazala točnom. Sukladno ovoj hipotezi za stabilizaciju tunela potrebna bi bila podgrada od nekoliko metara kako je prikazano na slici 4.1.



Slika 4.1 Ne primjenjivost Heimovehipoteze[14]

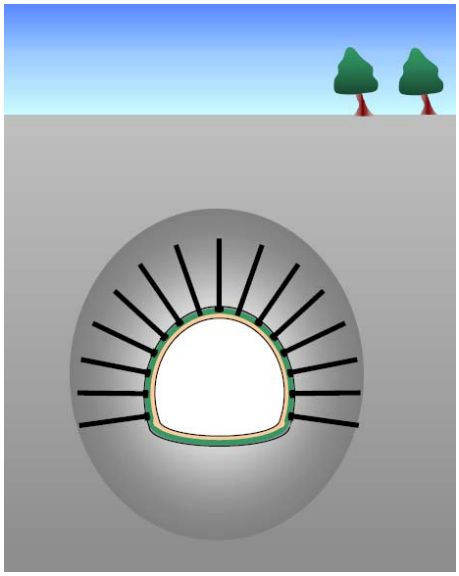
Ritter je 1879. godine primijetio da utjecaj mase gornje ležećih naslaga nakon neke dubine ima zanemariv ili puno manji utjecaj na opterećenje stijenske mase koja djeluje na podgradutunela,kako je prikazano na slici 4.2.

Engesser je 1882. godine definirao lučno djelovanje iznad podzemne prostorije u tlu bez kohezije. Od tada je bila prepoznata i jasno formulirana veza deformacije stijenske mase i pritiska na podgradu. Zaštitnu zonu oko tunela spominje Wiesmann 1912. godine gdje ju opisuje kao zonu u kojoj stijena preuzima na sebe opterećenja koje je trpila iskopana stijena, slično preraspodijeli naprezanja oko rupe u zidu. Također napominje da podgradu ne treba dimenzionirati na način da ona preuzme kompletna naprezanja izazvana iskopom, jer će veći dio naprezanja na sebe preuzeti zaštitna zona.



Slika 4.2 Pritisci na podgradu se nakon neke dubine ne povećavaju linearno s dubinom [14]

Najjasnija i najjednostavnija definicija nosivog prstena je od Golser-a 1996. godine koji govori da je nosivi prsten zona u okolini tunela u kojoj se desila značajna preraspodjela naprezanja. Zona nosivog prstena širi se od periferije iskopa i uključuje zone elastičnog i zone plastičnog ponašanja i armirane zone Nosivi prsten u okolni teren zapravo nije nimalo jednostavno definirati. Na slici 4.3 ilustrirana je Golser-ova definicija nosivog prstena [14].



Slika 4.3 Nosivi prsten prema Golserovoj definiciji [14]

5. KLASIFIKACIJA STIJENSKE MASE PREMA PRINCIPIMA NATM

U praksi NATM zahtijeva veliki broj aspekta tunelskog inženjerstva u stijenskoj masi, od ugovaranja i inženjeringa, do same ugradnje i monitoringa. Ova metoda se pokazala izvedivom u velikom broju kategorija stijena od onih "dobrih" pa do onih "loših". S obzirom da je stijena glavni nosivi element tunela potrebno ju je klasificirati prema jednoj od klasifikacija NATM, a to su:

- RQD klasifikacija,
- RMR klasifikacija,
- Q klasifikacija,
- Laufferova klasifikacija,
- Terzaghijeva klasifikacija,
- RSR klasifikacija.

Na temelju stečenih iskustva 2001. godine izdane su austrijske smjernice za geomehaničko planiranje podzemnih radova, koje se mogu sažet u nekoliko koraka:

- prvi korak u kategorizaciji stijenske mase je određivanje tipova stijenske mase koje su definirane laboratorijskim ispitivanjima i terenskim opažanjima;
- drugi korak je odrediti modele ponašanja stijene u neposrednoj blizini podzemnog otvora. Izvodi se kombinacijom prethodno određenih tipova stijenske mase s projektnim faktorima, kao su: stanje naprezanja i orijentacija diskontinuiteta u odnosu na uzdužnu os iskopa. Pažljivo istraživanje mogućih modela ponašanja stijenske mase su od ključne važnosti u ovoj fazi;
- treći korak je prikupljanje dodatnih informacija o nađenom stanju stijenske mase tijekom iskopa odnosno građenja tunela. Ti podaci koriste se za verifikaciju pretpostavki postavljenih tijekom planiranja iskopa. U ovoj fazi ponašanje stijene sa iskopom, određuje se na temelju analiza interakcije stijenske mase i podgrade ili armature stijenske mase. Dobiveni podaci se uspoređuju sa projektnim zahtjevima [13].

5.1. RQD KLASIFIKACIJA

Rock QuailityDesignation (RQD) indeks definiran je kao postotak intaktne jezgre koja sadrži odlomke duže od 100 mm ili duže u ukupnoj dužini izbušene jezgre. International Society for Rock Mechanics (ISRM) određuje promjer jezgre koji iznosi 54,7 mm za dobivanje vrijednosti RQD, tablica 5.1. Tijekom godina predloženo je više korekcijskih faktora za izračunavanje RQD za različite promjere jezgre. Iz toga je zaključeno da se granična vrijednost koja iznosi 100 mm može koristiti za sve veličine ukoliko se prilikom mjerenja isključuju oštećenja jezgre nastala bušenjem i rukovanjem. Ukoliko nema dovoljno podataka o stijenskoj masi dobivenih bušenjem, RQD indeks može se odrediti iz utvrđenog broja pukotina vidljivih na površini po jedinici volumena stijenske mase[13].

Tablica 5.1 Određivanje kvalitete stijenske mase prema RQD faktoru [13]

RQD[%]	Kvaliteta stijene
<25	vrlo slaba
25-30	slaba
50-75	povoljna
75-90	dobra
90-100	odlična

5.2. RMR KLASIFIKACIJA

Geomehanička klasifikacija (GeomechanicsClassification) ili Rock Mass Rating (RMR) klasifikacija razvijena je za potrebe karakterizacije stijenske mase i projektiranje tunelskog podgradnog sustava. Na osnovi rezultata primjene i provjere na većem broju podzemnih građevina u različitim geološkim sredinama i uvjetima klasifikacija se mijenjala te prilagođavala procedurama i standardima [13].

RMR klasifikacija sastoji se od šest parametara koje treba odrediti, a to su:

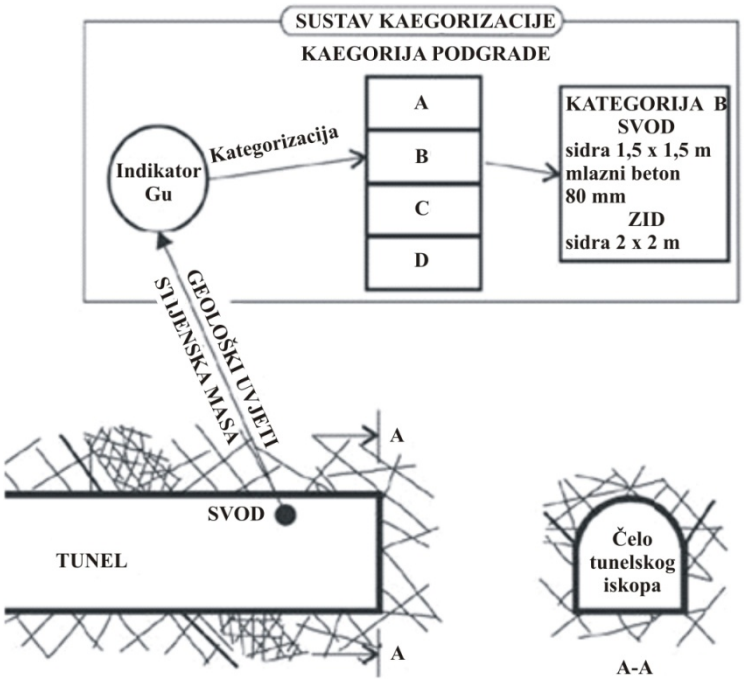
- jednoosna tlačna čvrstoća RQD indeks (Rock QualityDesignation),
- razmak, stanje i orijentacija diskontinuiteta,
- uvjeti podzemne vode,
- jednoosna tlačna čvrstoća.

Prilikom primjene RMR klasifikacije, stijenska masa se dijeli na pojedinačne strukturne regije koje se klasificiraju odvojeno. Granice regija određene su značajnim strukturnim pojavama kao što su promjena tipa stijenske mase ili rasjedi. Klasifikacija se temelji na bodovanju, pri čemu različitim parametrima pridodane su različite numeričke vrijednosti. Te vrijednosti se pridružuju ovisno o njihovoj važnosti za potpunu klasifikaciju stijenske mase, tablica 5.2. Dobiveni bodovi se zbrajaju te njihov ukupan zbroj daje vrijednost RMR. Izračunatu RMR vrijednost koristimo kako bi odredili kategoriju stijene [13].

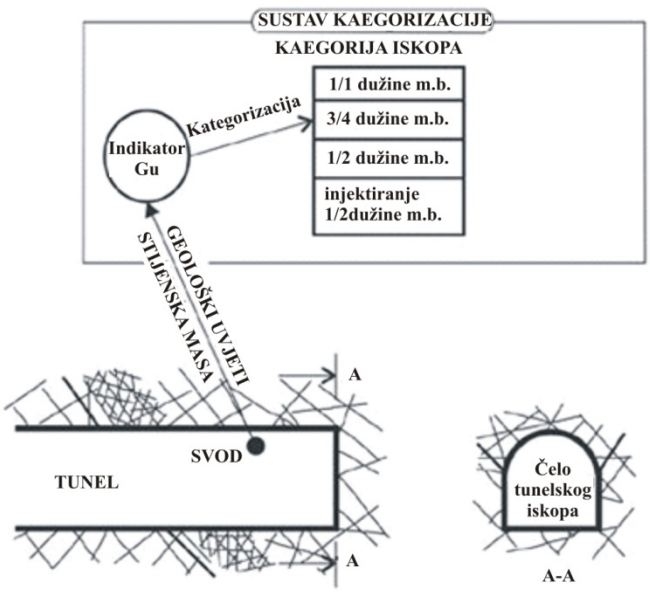
Tablica 5.2 Kategorija stijenske mase premaRMR klasifikaciji [13]

Σ bodova	81 - 100	61 - 80	41 - 60	40 - 21	<20
Kategorija	I	II	III	IV	VI
Opis stijene	Vrlo dobra	dobra	povoljna	loša	Vrlo loša

Svi parametri su mjerivi na terenu, a neke od njih moguće je odrediti i determinacijom jezgri istražnih bušotina. U praksi ocjena je usko povezana s dužinom minske bušotine jednog ciklusa miniranja ili s duljinom napredovanja. Bieniawski je objavio smjernice za procjenu vremena stabilnosti nepodgrađenog podzemnog otvora i za izbor podgrade na temelju RMR vrijednosti. Na slici 5.1 i 5.2 prikazan je sustav kategorizacije podgrade i sustav kategorizacije iskopa.



Slika 5.1 Razvrstavanje u kategorije podgrade [13]



Slika 5.2 Razvrstavanje u kategorije iskopa [13]

5.3. Q KLASIFIKACIJA

Barton i drugi (Bartonetal, 1974) sa norveškog geotehničkog instituta (NGI) na osnovu razmatranja velikog broja opažanja u tunelskim iskopima, predložili su tunelski indeks kvalitete (TunnelingQuality Index - Q) kao klasifikacijski sustav za određivanje pograde ili armiranja stijene u tunelskom iskopu. Q klasifikacija temeljena je na numeričkoj ocjeni kvalitete stijenske mase [13].

Numerička vrijednost indeksa Q u logaritamskom mjerilu varira od 0,001 do 1000. Indeks Q određen je izrazom:

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n}\right) \cdot \left(\frac{J_r}{J_a}\right) \cdot \left(\frac{J_w}{SRF}\right) \qquad 5\text{-}1$$

gdje je: RQD - Rock QualityDesignation,

J_n - broj familija pukotina,

J_r - indeks hrapavosti pukotina,

J_a - indeks trošnosti pukotina,

J_w - faktor pukotinske vode,

SRF - faktor redukcije naprezanja.

Razlika $\left(\frac{RQD}{J_n}\right)$ predstavlja strukturu stijenske mase i prezentira veličinu bloka [13].

Razlika $\left(\frac{J_r}{J_a}\right)$ predstavlja veličinu približne posmične čvrstoće između blokova u funkciji hrapavosti i trošnosti pukotina [12].

Razlika $\left(\frac{J_w}{SRF}\right)$ predstavlja aktivni pritisak. Prikazana je kao odnos pritiska vode u pukotinama i parametara SRF koji predstavlja opterećenje rastresene zone u području zone stijenske mase s glinom ili rasjednih zona zatim naprezanja nastalih uslijed bubrenja i gnječenja plastičnih stijenskih masa i naprezanja kod zdravih stijenskih masa[13].

Unutar ove klasifikacije definirano je devet različitih kategorija stijenske mase od "jako loše"stijenske mase do "jako dobre"stijenske mase.

Q klasifikacija se obično koristi kao empirijska metoda za projektiranje podgrade ili armiranje stijenskog tunelskog otvora. Q indeks zajedno s podgradnim koeficijentom iskopa (Excavationsupportratio) (ESR) i omjerom raspona ili visine otvora ukazuju na preferiranu podgradu ili armiranje stijene. Točnost određivanja je vrlo teško ocijeniti. U lošijoj kategoriji stijene (Q<1) klasifikacija daje neodgovarajuću podgradu [13].

Bitan čimbenik u raspucanoj stijeni je orijentacija pukotina. U takvim slučajevima bitno je da koeficijenti J_r i J_a budu u korelaciji s plohom diskontinuiteta po kojoj će najvjerojatnije doći do klizanja bloka.

Q indeks je najbolje koristiti kao jedini indikator za određivanje kategorije stijene koja je u pitanju.

5.4. LAUFFEROVA KLASIFIKACIJA

Laufferova klasifikacija razvijena je za potrebe projektiranja i izvedbe tunelskih podgradnih sustava. Razvila se na prethodnim saznanjima na području mehanike stijena i tunela. Ona predlaže korelaciju između vremena postojanosti stijenskog iskopa nepodgrađenog raspona u odnosu na različite kategorije koje je podijeljena stijenska masa.

Nepodgrađeni raspon je širina tunelskog iskopa ili udaljenosti od izvedene podgrade ukoliko je isti raspon manji od raspona iskopa. Laufferova klasifikacija se zahtijeva skraćenje vremena potrebnog za ugradnju podgrade. Parametri ovise o orijentaciji osi tunela u odnosu

na strukturni sklop stijenske mase, metodi podgrađivanja metodi iskopa i nagib u poprečnim presjecima [13].

5.4.1. Modificirana Laufferova klasifikacija

U modificiranoj Laufferovoj klasifikaciji stijenska se masa dijeli u četiri grupe, a te grupe se sastoje od šest klasa. Grupe stijenske mase su:

- grupa A (klasa I i klasa II),
- grupa B (klasa III),
- grupa C (klasa IV i Va),
- grupa D (klasa Vb)[13].

Klasa I i klasa II predstavljaju neznatno do jako obrušljivestijenske mase. Prilikom otvaranja podzemnog iskopa sekundarna naprezanja ne prelaze čvrstoću stijenske mase, te se iskop provodi u punom profilu. Klasu I čine stabilne do neznatno obrušljivestijenske mase koje su sklone ispadanju pojedinih blokova. Stijena oko podzemnog otvora bez podgrađivanja ostaje stabilna. Klasu II čine jako obrušljive stijene kod kojih je prisutno jače odvajanje.

Klasa III predstavlja rastresenu do vrlo rastresenu stijensku masu. Sekundarna naprezanja koja se javljaju na obodu otvora prelaze čvrstoću stijenske mase. Iskop se izvodi u punom profilu.

Kasa IV i klasa Va predstavljaju stijensku masu koja nakon iskopa izaziva pritiske na podgradni sklop. U klasu IV spadaju stijenske mase koje izazivaju umjerene pritiske na podgradni sklop. U klasu Vaspadaju stijene koje izazivaju jaki pritisak na podgradni sklop. Sekundarna naprezanja koja su izazvana otvaranjem podzemnog iskopa prelaze čvrstoću stijenske mase.

5.5. TERZAGHIJEVA KLASIFIKACIJA STIJENSKE MASE

Ova vrsta klasifikacije stijenske mase predstavlja prvu praktičnu kao i prvu racionalnu metodu razvijenu na osnovi opterećenja stijenske mase. U tunelogradnji ovaj sustav klasifikacije bio je dominantan tijekom 50 godina prošlog stoljeća u SAD-u. Nakon što su se usvojile moderne metode izvođenja radova uz korištenje mlaznog betona i geotehničkih sidra ovaj sustav klasifikacije prestaje bit prihvatljiv. Stručnjaci su nakon velikog broja studija

zaključili da se ovaj sustav Terzaghijeva klasifikacija temelji na objektivno stanje kvalitete stijenske mase, što ujedno ne daje zadovoljavajuće informacije o značajkama stijenske mase [13].

Terzaghijeva klasifikacija doprinosi u opisu pojedinih značajki stijenske mase koje daju presudan utjecaj na ponašanje stijenske mase, pogotovo u uvjetima u kojima geotehnička naprezanja imaju presudan utjecaj [13].

5.6. RSR KLASIFIKACIJA

RSR (Rock StructureRaiting) klasifikacija razvijena je u SAD-u od strane Wickhama, Skinnera i Tiedemanna. RSR koncept, kao model za predviđanje potrebnog podgradnog sustava pri iskopu tunela daje kvantitativnu metodu opisa kvalitete stijenske mase. Također ovaj koncept daje izbor podgradnog sustava i predstavlja prvi cjeloviti sustav klasifikacije stijenske mase predložen nakon Terzaghijeve klasifikacije. Prilikom razvoja ove klasifikacije koristili su se podaci o izvedbi tunela u stijenskoj masi. Ova klasifikacija je ujedno i prva klasifikacija koja je usvojila mlazni beton kao sustav podgrade.

Glavna značajka ove klasifikacije je ta da ova klasifikacija predstavlja sustav bodovanja stijenske mase. RSR sustav predstavlja zbroj vrednovanja pojedinih parametara usvojenih u sustav klasifikacije. RSR sustav je zasnovan na podacima izvedenih građevina kao i brojnih radova o različitim aspektima u pristupu izvedbe tunelskih podgrada. [13].

Dvije glavne kategorije faktora koje usvaja RSR sustav su:

- geološki parametri,
- parametri podgradne konstrukcije.

Ovi faktori ujedno utječu na ponašanje stijenske mase u tunelima.

Geološki faktori su:

- tip i značajke stijenske mase,
- prosječan razmak pukotina,
- orijentacija pukotina,
- tip diskontinuiteta,
- glavni smjer rasjeda, smicanja i preklapanja,
- trošenje ili alteracija.

Pri tome su pojedine značajke promatrane odvojeno, a pojedine zajedno.

Parametri podgradne konstrukcije su:

- veličina tunela,
- smjer napredovanja tunela,
- metoda iskopa.

Numerička veličina dionice tunela sastoji se od:

$$RSR = A + B + C \qquad 5\text{-}2$$

gdje je: A - generalna ocjena geološke strukture zasnovana na:

- Porijeklu stijenske mase (magnetska, metamorfna, sedimentna),
- Tvrdoći stijenske mase (tvrda, srednje meka, raspadnuta),
- Geološkoj strukturi (masivna, slabo raspucala, srednje raspucala, jako raspucala).

B - efekt položaja pukotina uz poštivanje smjera napredovanja tunela zasnovana na:

- Razmaku i orijentaciji pukotina,
- Smjeru napredovanja tunela.

C - efekt utjecaja toka podzemne vode i uvjeta pukotina zasnovana na:

- Ukupnoj kvaliteti stijenske mase na osnovi kombinacije A i B parametara,
- Uvjetima pukotinskog sustava (dobar, povoljan, slab),
- Vrijednost dotoka podzemne vode.

RSR vrijednost dobiva se zbrajanjem numeričkih vrijednosti određenih za pojedini parametar i ukupna vrijednost može iznositi maksimalno 100. Ova vrijednost povezuje kvalitetu stijenske mase s potrebnom podgradom. Krivulja koja se koristi za odabir tipa podgrade su zavisne od načinaizvođenja i raspona tunela [13].

RSR klasifikacija se danas rijetko koristi, međutimtijekom svoje primjene koristila se prilikom izvedbe velikog broja tunela. Definicije pojedinih parametara koje se koriste u klasifikaciji nisu jasno određene i ne koriste se u uobičajenim standardnim opisima pukotinskih sustava [13].

6. ISKOP TUNELA PRIMJENOM NATM

NATM u tunelogradnji obuhvaća iskop tunela bušenjem i miniranjem, gdje se miniranje izvodi na čelo tunela u punom profilu. Okolna stijena se promatra kao nosivi dio podgrade, a ne kao opterećenje. Prilikom iskopa mjere se reakcije okolne stijene, koje se mogu odraziti u obliku deformacija i tlakova podgrade. Primarna podgrada se sastoji od nekoliko elemenata, a to su:

- stijenska masa,
- mlazni beton,
- čelične mreže,
- čelični lukovi,
- sidra.

Kod NATMpodgrađivanje se izvodi primjenom stijenskih sidra i mlaznog betona, ovisno o kategoriji iskopa i armaturnih mreža. Kako bi osigurali ispravan oblik odnosno geometriju koriste se čelični lukovi kao privremena podgrada dok mlazni beton ne očvrsne [13].

Iskop tunela bušenjem i miniranjem izvodi se u ciklusima. Jedan ciklus se sastoji od slijedećih radova:

- dopreme bušaće opreme na čelo gradilišta,
- obilježavanje minskog polja,
- bušenje bušotina za eksploziv,
- punjenje bušotina eksplozivom,
- povezivanje minskog polja i kontrole minskog polja,
- aktiviranje eksploziva u minskim bušotinama,
- provjetravanje,
- pregled izvršenog miniranja uz otklanjanje nestabilnih dijelova stijene u konturi iskopa,
- utovar i odvoz odminiranogstijenskog materijala,
- ugrađivanje podgrade[13].

Nakon što je završio proces miniranja potrebno je čekati određeno vrijeme dok se razina štetnih plinova spusti ispod razine propisane pravilnicima. Također treba dati veliku važnost

kontroli obavljenog miniranja, kako bi se u slučaju da postoji još neaktivnih mina uništile [13].

Prednosti NATM mogu se najbolje usporediti sa mehanikom stijena tunela koja ima oblogu prema staroj i novoj metodi. Uglavnom sve stare metode prilikom izvedbe uzrokuju razrahljenje stijene i pukotina popuštanjem različitih dijelova podgradne strukture. Tanki sloj mlaznog betona na stijenu zajedno s odgovarajućim sustavom sidrenja neposredno poslije miniranja, sprječava razrahljenje i do izvjesnog stupnja smanjuju se tlakovi u stijeni, a stijena postaje samonosivi luk [13].

NATM zahtijeva tim stručnjaka sa velikim iskustvom i znanjem koji su u stanju izvesti sve postupke precizno.

6.1. POPREČNI PRESJECI

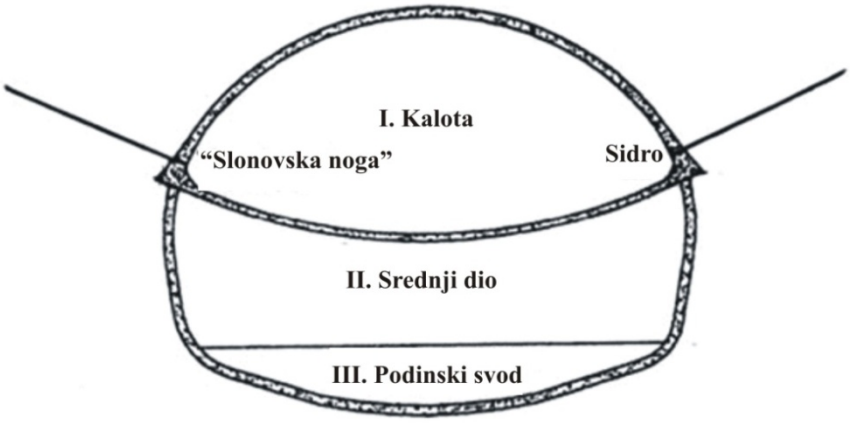
Najvažnije prednosti NATM su: sloboda pri mijenjanju poprečnih profila, brzina mobilizacije konstrukcije i jednostavnost u preklapanju podzemnih prostorija. U ovoj metodi može se promijeniti veličina i oblik bilo kojeg poprečnog presjeka te prilagoditi posebnim zahtjevima [1].

U čvrstoj stijeni odjednom može se otvoriti cijelo čelo tunela. Zbog sigurnosti i optimizacije podgrađivanja, bušenja i miniranja, iskopi u ovoj metodi mogu biti u nekoliko faza ili punoprofilni. Zbog čestih promjena geotehničkih i geoloških uvjeta stijenske mase po dužini trase tunela uvjetuje se primjena višefaznog iskopa tj. razrada profila. Faze se odvijaju ovisno o geološkim uvjetima na čelu iskopa. U slabom tlu ili stijeni srednji dio i podinski svod izvode se na razmaku ne većem od jednog tunelskog promjera zbog bržeg zatvaranja podgradnog prstena i uspostave novog stanja ravnoteže kako bi se spriječila pojava većih konvergencija.

Iskop u tri faze i iskop u pet faza su dva najčešće primjenjivana načina višefaznog iskopa. Ova dva iskopa su prikazana na slici 6.1, 6.2 i 6.3.

Iskop u tri faze sastoji se od:

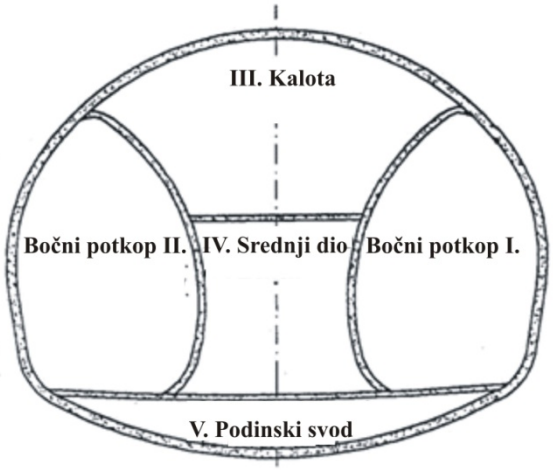
- I. kalota,
- II. srednji dio,
- III. podinski svod.



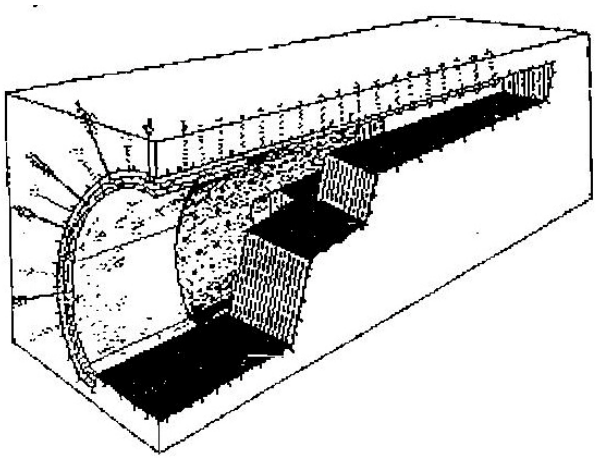
Slika 6.1 Iskop u tri faze [8]

Iskop bočnim potkopima sastoji se od:

- I. bočni potop,
- I. - II. bočni potkop,
- II. - III. kalota,
- IV. srednji dio,
- V. podinski svod.



Slika 6.2 Iskop u pet faza [8]



Slika 6.3 Iskop tunelskog profila u pet faza [1]

Mjerodavni kriterij za procjenu stabilnosti stijene je vrijeme stabilnosti nepodgrađenog raspona. Prema novom austrijskom standardu za tunelogradnju stabilnost nepodgrađenog iskopa definirana je kao vrijeme u kojem je nepokrivena površina stijene stabilna bez podgrade. Faktori koji utječu na to vrijeme su:

- kvaliteta stijene,
- veličina poprečnog presjeka,
- dužina napredovanja po ciklusu.

Standard za kategorizaciju i klasifikaciju opisuje stijenu uzimajući u obzir stabilnost, gubitak čvrstoće i deformaciju, uključujući i tri glavna tipa i nekoliko podtipova. Tri glavna tipa formacije stijene su:

- stabilna ili nepodgrađenastijena,
- nestabilna stijena,
- stijena koja stvara pritiske.

6.2. PODGRADNI SUSTAVI

Podgradni sustavi predstavljaju podgradne konstrukcije koje pridonose aktiviranju sila, također uključuju tehnička rješenja kao što su izvedba betonskih, armiranobetonskih i drugih podgradnih konstrukcija. Upodgradni sustav se uključuju i elementi ojačanja stijenske mase bezobzira na klasu i tip stijene. Odabir podgradnog sustava predstavlja inženjersko rješenje

osiguranja stijenskog zasjeka određeno lokalnim uvjetima pojedinog zasjeka u stijenskoj masi.

Prilikom izgradnje tunela ravnoteža sila u stijenskoj masi promijenit će se u novo sekundarno stanje i jednako tako uravnoteženo stabilno stanje. To se postiže nizom prijelaznih stanja koje prate razni procesi preraspodjele naprezanja. Svrha podgrađivanja je aktiviranje stijenskog luka, koji ujedno postaje glavni dio nosivog luka.

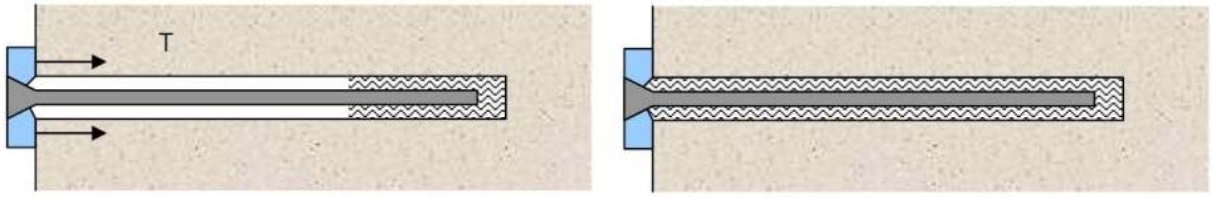
Neposredno nakon iskopa cijelog profila ili dijela profila tunela ugrađuje se primarna podgrada. Ona mora osiguravati stabilnost poduprte stijene ili tla tijekom napredovanja iskopa. Prema NATM glavni elementi primarne podgrade su: čelična sidra i mlazni beton, koji zajedno tvore cjelinu koja ne dozvoljava popuštanje stijene. Na temelju podataka o ravninama diskontinuiteta, njihovoj orijentaciji, ispunama diskontinuiteta, pojavama podzemne vode i dimenzijama blokova može se odrediti gustoća i raspored mlaznog betona. Podgrada od mlaznog betona mora biti vitka kako bi se izbjegao moment savijanja. U slučaju težih geotehničkih uvjeta primijeniti će se i armaturne mreže, rešetkasti čelični lukovi ili posebni zahvati kao što su na primjer crijevni krov, zaštita kalote i bokova mlaznim injektiranjem ili armiranje čela [1].

6.2.1. Sidra

Jedna od najvažnijih pogradnih elemenata su sidra, kojima se poboljšavaju fizičke i mehaničke karakteristike stijene oko iskopa. Stijensko sidro je element za armiranje, koji je formiran od punog ili cijevnog čeličnog profila, koji se ugrađuje u stijensku masu sa ili bez prednaprezanja.Na slici 6.4. prikazano je lijevo aktivno sidro i desno pasivno sidro.

Ako se stijenska sidra prilikom ugradnje prednapinju ili ne,klasificiraju se na:

- aktivna ili prednapregnuta,
- pasivna ili neprednapregnuta.



Slika 6.4 Aktivno i pasivno sidro[12]

Bušotine za sidra buše se okomito na površinu, a sidra se postavljaju unakrsno.S obzirom na kvalitetu stijenske mase, veličinu i oblik poprečnog presjeka pa tako i dužinu napredovanja, određuje se broj sidra, nosivost, njihova dužina i raspored [12].

Štapna sidra se primjenjuju za osiguranje stabilnosti iskopa. Kako bi stijenska masa mogla izdržat sva opterećenja pa tako i svoje, koristi se sustav za ojačanje stijenske mase, pri čemu štapna sidra predstavljaju dio stijenske mase, kao sastavni dio podgradnog sustava. Prijenos opterećenja se vrši preko dijelova konstrukcije sidra izvan stijenske mase i prenosi na stijensku masu opterećenjem preko vanjskih veza. U tom slučaju štapna sidra mobiliziraju ili ojačavaju pripadajuću čvrstoću stijenske mase. Podgradni sustavi na licu iskopa pridonose smanjenju pomaka stijenske mase kao cjeline [12].

Optimalni podgradni sustav za stabilizaciju stijenske mase predstavlja kombinacija štapnih sidra i mreža, bilo to za trajne ili privremene podgradne sustave.

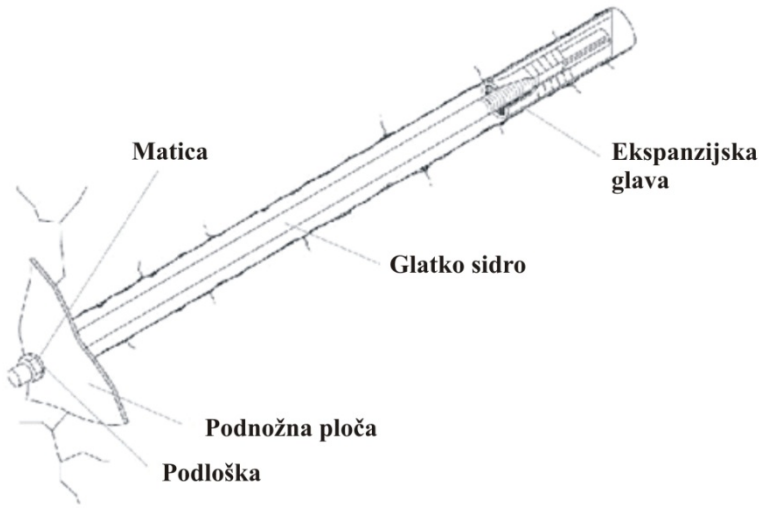
Glavni razlozi za upotrebu štapnih sidra su:

- svestrana mogućnost uporabe, za bilo koju odabranu geometriju iskopa.
- jednostavnost i brza mogućnost uporabe.
- relativno mala cijena koštanja.
- ugradnja je u potpunosti mehanizirana [12].

Štapna sidra se također mogu podijeliti na:

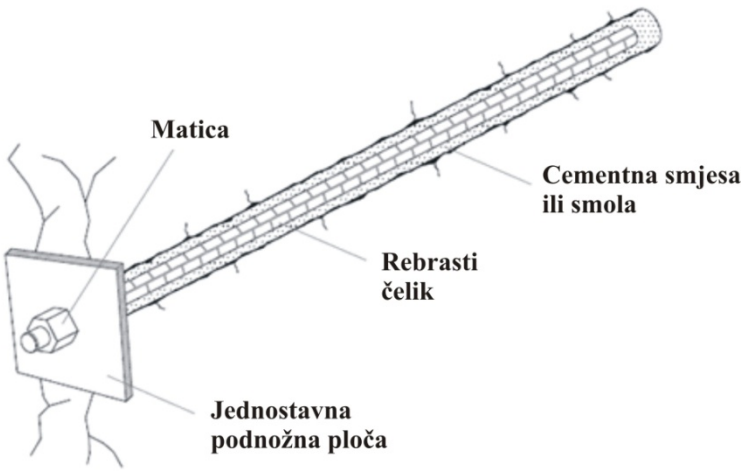
- mehanički usidrena štapna sidra,
- injektirana štapna sidra i pletena sidra od čeličnih niti i
- trenjem usidrena štapna sidra [12].

Štapna sidra s ekspanzijskom glavom je najčešćioblik mehanički usidrenih štapnih sidra, slika 6.5. Ekspanzijska glava konusno se širi rotacijom sidra pri čemu dolazi do utiskivanja elementa glave u zidove bušotine. Sidrenje se postiže na osnovi dva mehanizma, a to su trenje ekspanzijske glave i zidova bušotine, te uklještenja glave u neravnine zidova bušotine. Uklještenje predstavlja značajnu komponentu u ukupnoj nosivosti sidra. Najčešće se koriste kao privremena ojačanja stijenske mase zbog toga što uslijed djelovanja korozije s vremenom smanjuje se nosivost. Što se tiče trajnih konstrukcija obavezna je primjena naknadnog injektiranja bušotine [12].



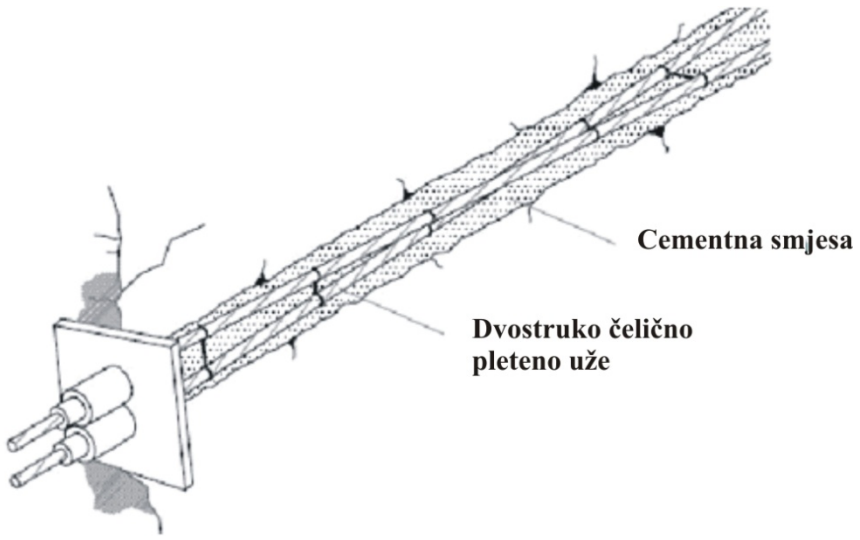
Slika 6.5 Mehanički usidrena štapna sidra[12]

Injektirana štapna sidra i pletena sidra od čeličnih niti ugrađuju se u bušotine ispunjene cementnom smjesom ili smjesom od umjetnih smola, kako je prikazano na slici 6.6. Sidrenje, odnosno veza sa stijenskom masom, uspostavlja se cijelom injektiranim dužinom elemenata ojačanja na osnovi kemijskih veza, trenja i uklještenja. Ova vrsta sidra također predstavljaju najčešće ojačanje stijenske mase u svijetu. Materijal za štapna sidra najčešće je rebrasto obrađeni čelik, koji se koristi u građevinarstvu ili odgovarajuće obrađeni presjeci čelika posebno proizvedeni za geotehnička sidra. Za injektiranje se koriste suspenzije na bazi cementa ili umjetnih smola. Kod injektiranog sidra potrebno je bušotinu prije postavljanja sidra ispuniti gustom injekcijskom cementnom smjesom i zašiljeno sidro utisnuti pneumatskim čekićem. Kad se cement u injekcijskoj smjesi veže sidro će biti nosiv element.



Slika 6.6 Injektirano sidro [1]

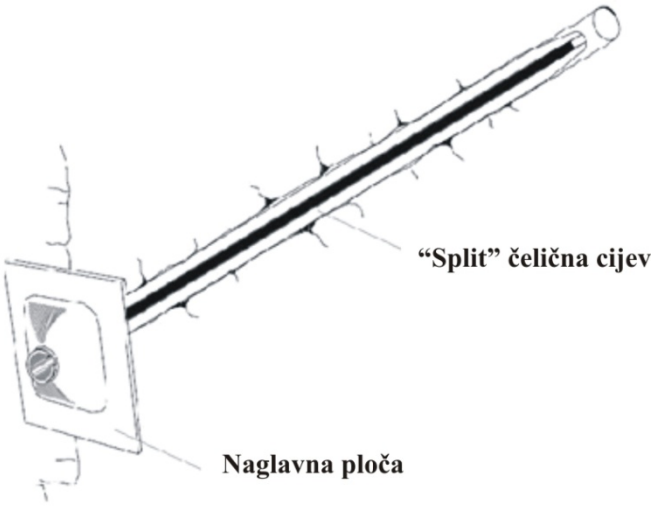
Injektiranje pletenih sidra od čeličnih niti radi ojačanja stijenske mase koriste se posljednjih tridesetak godina. Pleteno sidro je zapravo element ojačanja stijenske mase, izveden od čeličnih niti pletenih kao čelično uže i ugrađeno bez unesenog vlačnog opterećenja ili kao vlačno opterećeno i injektirano u kontaktu sa stijenskom masom. Prednost ovih sidra je u mogućnosti uporabe velike duljine istih kao i kombinacije unošenja vlačnih naprezanja i prijenosa na podgrađenustijensku masu. Zbog visoke kvalitete upotrjebljenih čelika su veće nosivosti od krutih štapnih sidra[12].



Slika 6.7 Pletena sidra od čeličnih niti

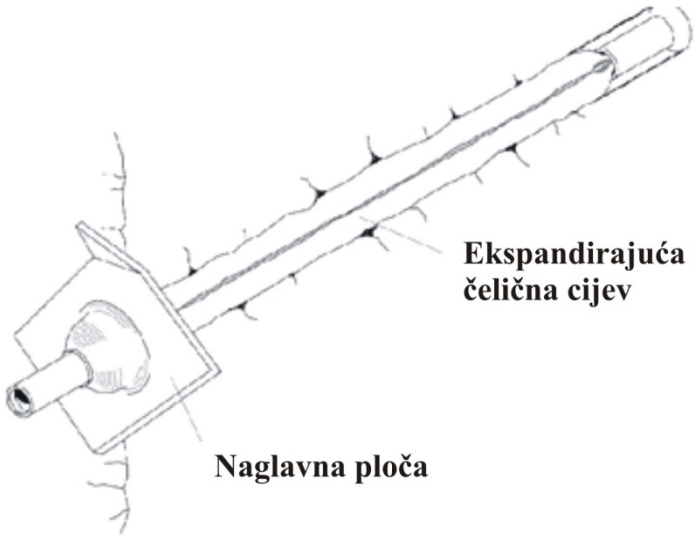
Trenjem usidrena štapna sidra predstavljaju najnovija dostignuća u tehnici ojačanjastijenske mase. U praksi se upotrebljavaju dvije vrste ovakvih sidra, a to su *Split Set* sidra, slika 6.7i *Swellex*sidra, slika 6.8. Kod jednog i drugog sustava prijenos opterećenja ostvaruje se trenjem uslijed radijalne sile koja djeluje na zidove bušotine duž cijele dužine bušotine.Također, u oba sustava sidro se sastoji od čelične cijevi koja se mehaničkim ili hidrauličkim putem širi sve dok stijenke cijevi dostignu kontakt sa zidovima bušotine. Na element ojačanja izravno se prenosi opterećenje stijenske mase, bez završnog elementa prijenosa i injektiranja bušotine [12].

Kod *Split Set*metode ugradnja sidra izvodi se mehaničkim utiskivanjem sidra u bušotinu, gdje je promjer cijevi sidra veći od promjera bušotine. Sidro se može prilagoditi velikim pomacima bez sloma.



Slika 6.8 Split Set sidro [12]

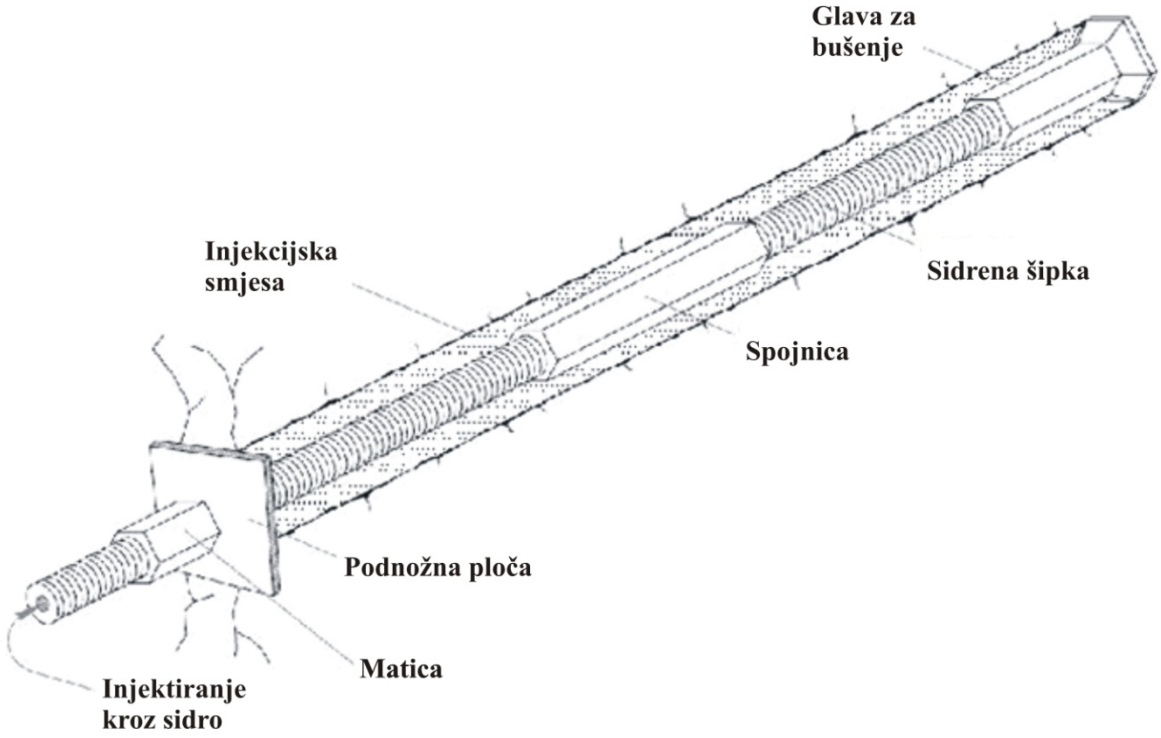
*Swellex*sidro, slika 6.9 po mehanizmu sidrenja je sidro koje trenjem i uklještenjem nosi u zidove bušotine.*SWELLEX* sidra su u obliku cijevi zatvorena na dnu. Sidro djeluje na stijenku bušotine kada se u njega utisne voda pod velikim tlakom[12].



Slika 6.9SWELLEX sidro[12]

Samobušivo sidro je vrlo praktična aplikacija štapnih sidra odgovarajuće obrađenog čeličnog presjeka namijenjenog za ojačanje stijenske mase, kako je prikazano na slici 6.10. Posebna prednost ovih sidra je uporaba u jako oštećenim stijenskim masama. Ova vrsta sidra koriste se kao dio bušaćeg sustava na način da se umjesto bušaće šipke koriste elementi u sekcijama standardne dužine i po potrebi nastavljaju odgovarajućim spojnicama.Prilikom bušenja sidra odgovarajuće dužine završeno je i postavljanje sidra. Injektiranje sidra izvodi se

kroz samo sidro, gdje injekcijska smjesa izlazi kroz otvore na bušaćoj glavi, sve dok injekcijska smjesa ne počne izlaziti na ušću bušotine.



Slika 6.10 Samobušivoštapnosidro[12]

6.2.2. Mlazni beton

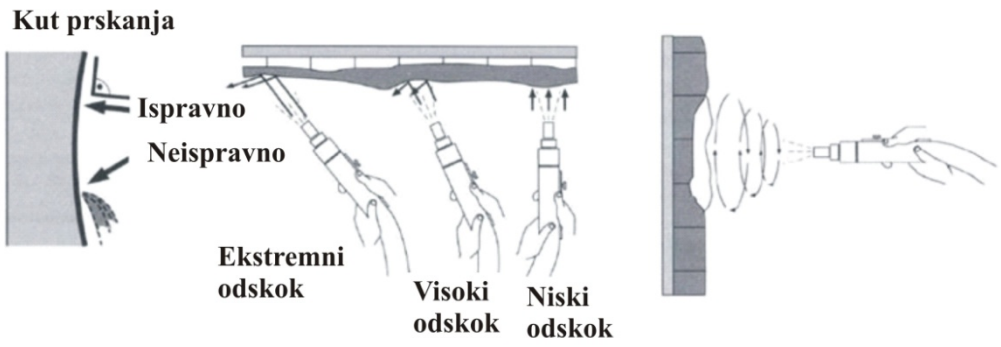
Mlazni beton se uglavnom upotrebljava u svrhu sprečavanja razrahljenja stijene i postajepodgradni element. Primjena mlaznog betona kod tunela ima višestruka značenja, a to su:

- zaštita higroskopskih stijena i stijena osjetljivih na prisustvo zraka.
- oblaganjem sprječavaju se pojave bubrenja.
- uvremenu vezivanja betona stvara se obloga koja je popustljiva zbog visokog modula elastičnosti, a kada očvrsne ima visoku nosivost.
- sprječava odlamanje manjih blokova.
- sloj prskanog betona daje kvalitetnu ljusku u nekvalitetnoj stijeni.
- zatvaranjem pukotina i vezivanjem za stijenu poboljšavaju se mehanička svojstva stijene i sprječava se raspadanje [12].

Osnovne komponente mlaznog betona su:

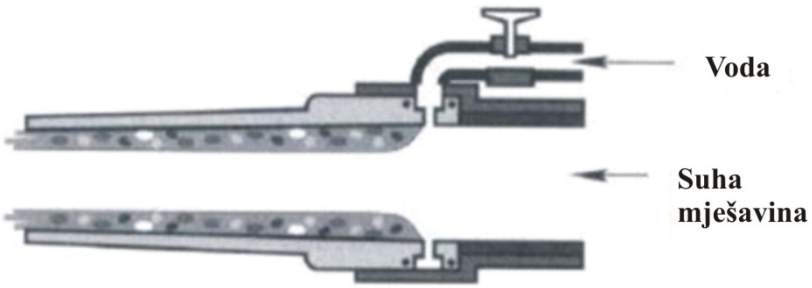
- agregat,
- cement,
- voda,
- aditivi.

Mlazni beton se na stijenu nabacuje mlaznicama pomoću komprimiranog zraka. Dva načina nabacivanja su: suhi i mokri. Na slici 6.11prikazana su pravila ispravnog prskanja kod ugradnje mlaznog betona.



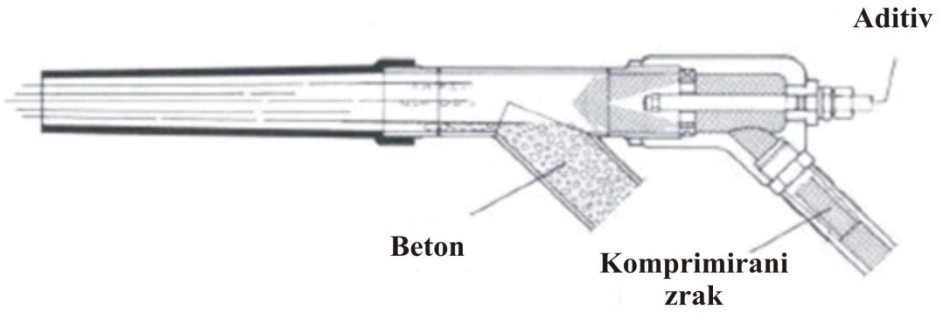
Slika 6.11 Pravilno prskanje kod ugradnje mlaznog betona[12]

Kod suhog postupka voda i ubrzivač vezivanja dodaju se tek prije izlaska iz mlaznice. Suha smjesa se ubacuje u ljevak stroja ispod kojeg se nalazi bubanj s odjeljcima. Cijev s komprimiranim zrakom istiskuje smjesu iz bubnja. Suha smjesa putuje kroz cijev i kada dođe blizu izlaza iz mlaznice, dodaju joj se voda i ubrzivač vezivanja, kako je prikazano na slici 6.12. Takva vrsta gotove smjese se lijepi za stijenu vrlo brzo. Prednosti suhog postupka su: velika duljina transporta, nije potrebno miješati, mogu se nanijeti debeli slojevi u jednom koraku, nema zastoja u radu, niski troškovi održavanja opreme i dugi vijek opreme [12].



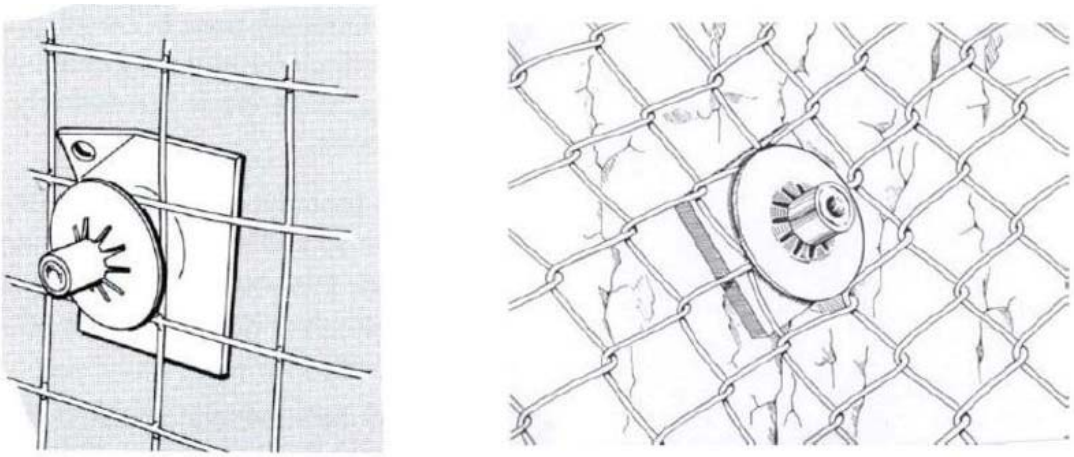
Slika 6.12 Suhi postupak[12]

Mokri postupak nabacivanje betona posebno kod većih tunela je bolje i efikasnije. Gotova smjesa betona se lijeva u stroj za nabacivanje. Takva vrsta stroja se sastoji od dva rotora. Jedan rotor pomoću krila utiskuje gotovu smjesu u elastičnu cijev, a drugi pritišće takvu elastičnu cijev i tjera smjesu kroz nju, kako je prikazano na slici 6.13. Cijev je opterećena i pod tlakom tako da i sama usisava smjesu. Prednosti mokrog postupka su: smanjenje emisije prašine, lako primjenjiv postupak u slučaju malog prostora, jednostavna završna obrada, postojana konzistencija morta, potrebna je minimalna okolna zaštita i minimalni radni prostor.



Slika 6.13 Mokri postupak[12]

Primarna podgrada se aktivira nakon određene deformacije tunelskog otvora. Iz tog razloga podgrada mora biti duktilna. S obzirom da nearmirani mlazni beton je krti materijal ono za posljedicu ima krti lom. Kako bi se poboljšala prilagodljivost mlaznog betona deformacijama tunelskog otvora, on se mora armirati. Uglavnom se mlazni beton armira varenim čeličnim mrežama i žičanim pletivom, kako je prikazano na slici 6.14[1].



Slika 6.14 Varena čelična mreža i žičano pletivo[12]

Mlazni beton se u klasičnom smislu armira s armaturnim mrežama varenim ili pletenim. Početkom 70-tih godina radili su se prvi pokusi s armiranjem betona čeličnim vlaknima. Od tada se mikro armirani beton koristi u podzemlju i na površini kao zamjena za čelične mreže i žičana pletiva. Za ugradnju ovakve vrste betona koriste se i suhi i mokri postupak [12].

6.3. INSTRUMENTACIJA

Integralni dio NATM je zapravo kontrola redistribucije naprezanja u stijeni prilikom napredovanja, prilagođavanje redoslijeda izvođenja primarne podgrade i vremena koje je potrebno za postavljanje podgrade. Potrebno je održati troosno staje naprezanja i deformacija, u skladu s geotehničkim svojstvima stijene ili tla. Jednako tako potrebno je izbjegavati štetno razrahljivanje površine stijene.

Također integralni dio NATM su konstantna mjerenja i praćenje ponašanja tunela kao i različitih podgradnih elemenata. Konstantna mjerenja garantiraju sigurnost izvedbe. Prethodno izračunate dimenzije podgrade mogu se usporediti i ukoliko je potrebno mogu se ponovo dimenzionirati prilikom same izvedbe. Ovim mjerenjima može se postići optimizacija izvedbenih faktora, te također omogućuju objektivnu procjenu za geomehaničku dokumentaciju [1].

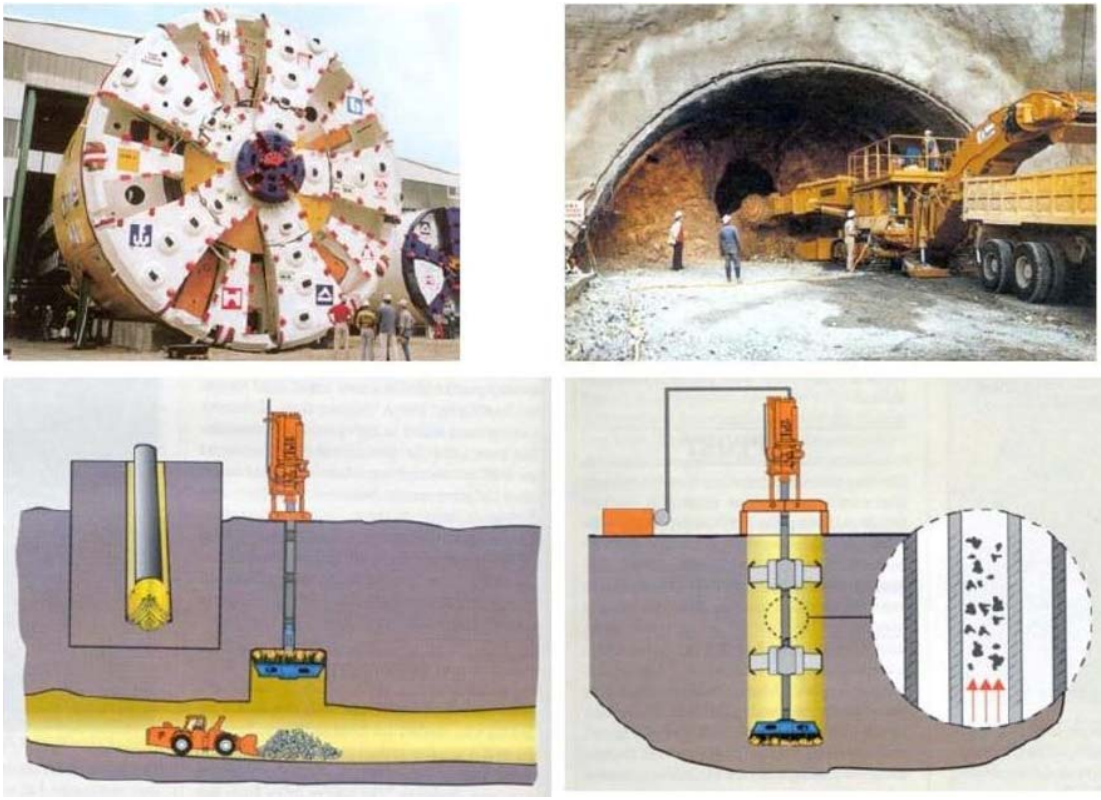
Uz redovno geometrijsko niveliranje pomaka krovine i podnožnog svoda mjeri se i konvergencija na bočnim stranama. Slijeganje unutar određenog vremena pokazuje deformaciju pod opterećenjem redistribucije naprezanja. Suvremenim mjernim metodama može se proračunati i interpretirati deformacija iskopa [1].

U slabim stijenama potrebna su dodatna mjerenja . U različitim geološkim formacijama horizontalni i vertikalni ekstenziometri pokazuju deformacije. Ukupna deformacija može se mjeriti inklinometrom. Deformacije pojedinačnih mjernih traka nanose se jedna za drugom na zajedničku glavnu liniju i time daju točan prikaz ukupnog slijeganja. U rastresitom tlu tuneli zbog nekih graničnih uvjeta kao dozvoljena slijeganja tla zahtijevaju da geotehnička mjerenja, interpretacija i proračun budu baza za procjenu stvarne stabilnosti tunela. Geotehnička analiza deformacija stavlja težište na točno predviđanje deformacija i slijeganja, te također daje potrebno vrijeme za reakciju.

7. OPREMA KOJA SE KORISTI U NOVOJ AUSTRIJSKOJ TUNELSKOJ METODI

Ova metoda tunelogradnje zahtijeva pripremu odgovarajuće opreme. Iskop stijene može se izvoditi bušenjem i miniranjem ili sa TBM strojem (TunnelBoringmachines). TBM su svi strojevi koji se koriste za iskop tunela u punom profilu u svim geološkim formacijama ili strojevi s pokretnom glavom.Ako se iskop izvodi u slaboj stijeni ili tlu koriste se bageri ili glodači. TBM strojevi ovisno o konstrukciji dijele se na, slika 7.1:

- strojevi za iskop u punom profilu ili krtice,
- strojevi s pokretnom glavom,
- Blindshaft borer,
- Raise borer.



Slika 7.1 Vrste strojeva

Na slici 7.1 prikazani su strojevi ovisno o njihovoj konstrukciji gdje je: a) stroj za iskop tunela u punom profilu, b) stroj sa pokretnom glavom, c) raise borer, d) blindshaft borer.

Ukoliko se koristi ili ne koristi štit, strojevi se dijele na:

- strojevi bez štita,
- strojevi sa štitom (shiled TBM).

Slika 7.2 Stroj sa i bez štita

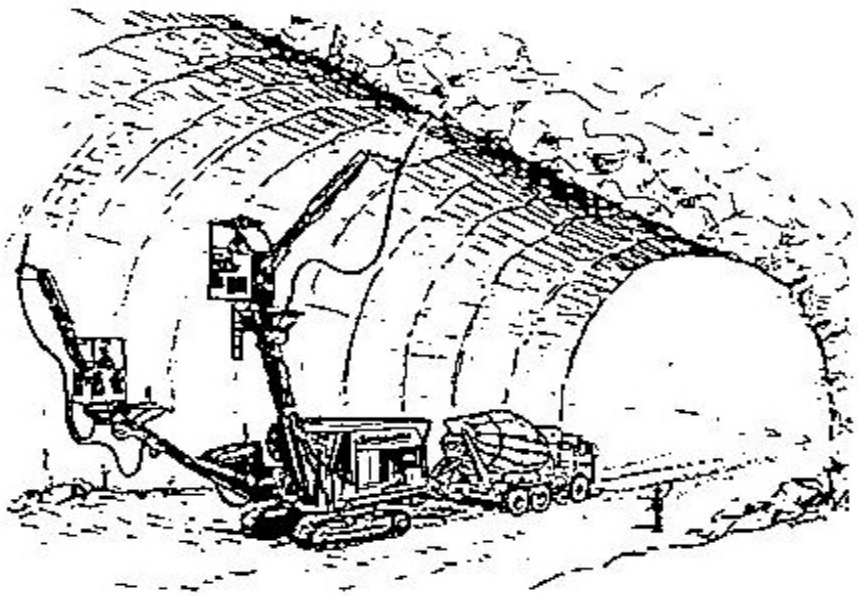
Na slici 7.2. Prikazan je: a) Stroj sa štitom i b) stroj bez štita.

Štit je čelični cilindar koji ima promjer tunela i pod čijom se zaštitom vrši iskop. Ovakva vrsta stroja koristi se za iskop tunela u teškim geotehničkim uvjetima, to jest u uvjetima kada je teško osigurati stabilnost nepodgrađenog tunela.

Konačna obloga tunela ugrađuje se ispod štita. U tom slučaju materijal u kojem se kopa tunel vidljiv je samo na čelu tunela.

Prema NATM ukoliko se tunel gradi ispod razine podzemne vode potrebno je ili spuštanje nivoa podzemne vode ispred iskopa ili se iskop vrši strojevima sa štitom. Strojevi sa štitom imaju visoku sigurnost protiv prodora vode i potpuno su zatvoreni.

Što se tiče strojeva za postavljanja sidra, mlaznog betona i čeličnih lukova su nezavisne jedinice osim u slučaju potpuno mehaniziranog ili štitnog stroja, gdje su integrirani u konstrukciju, slika 7.3. Završna obloga se uglavnom postavljanakon prestanka slijeganja i deformacija. Obloga se radi u segmentima sa pokretnom oplatom, a izvođenje završne obloge obično se radi nakon završetka iskopa i uklanjanja ventilacije.



Slika 7.3 Stroj za mlazni beton "Buffalo"

Prema NATM izgradnja tunela zahtjeva brz i efikasan odvoz iskopa. Kod velikih poprečnih presjeka za izvoz iskopa koriste se utovarivači na kotačima i specijalni terenski kamioni. Ukoliko veličina poprečnog presjeka ne omogućava manevriranje kod utovara koristi se utovarna mehanizacija na tračnicama.

8. GEODETSKA KONTROLA MJERENJA ZA TUNELSKE PROJEKTE

PrimjenaNATM zahtijeva visoku preciznost kontrole smjera, pa tako i kontrolna mjerenja deformacija. Nove geodetske metode kao što su GPS, elektronski tahimetar, ekstenziometri, viskovi, roboti za mjerenje mogu zadovoljiti navedene zahtjeve. Uglavnom se koriste automatski mjerni sustavi koji se sastoje od više komponenti. Primarni faktori koji ograničavaju točnost mjerenja udaljenosti i kutova u tunelskoj geodeziji su nepouzdanost indeksa refrakcije zraka i sustavni efekt atmosferske građe.

8.1. USPOSTAVLJANJE KONTROLNE MREŽE

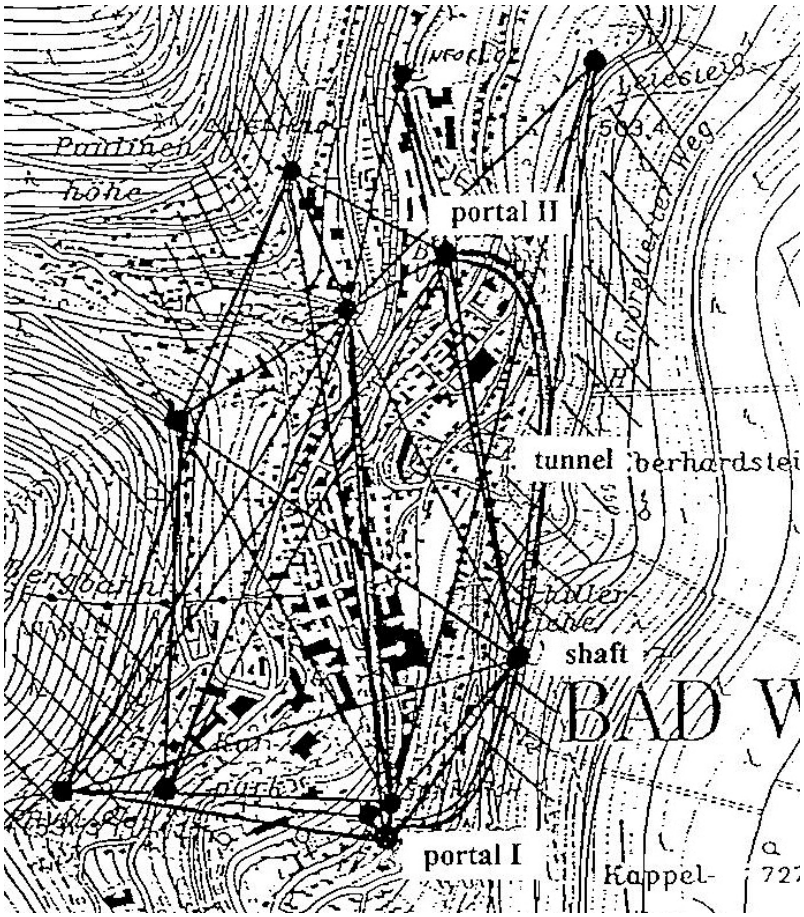
GPS (GeodeticPositioning System) za uspostavljanje kontrole mreže kod tunelogradnje uvodi relativnu pogrešku pozicioniranja od ± 3 mm po kilometru između stajališta. GPS uz visoku točnost daje i fleksibilnost u projektiranju kontrolnih mreža na površini. U slučaju kada izvođenje projekta traje duže od planiranog, projekt i održavanje GPS kontrolnih mreža pa tako i postavljanje stalnih poligonskih točaka iziskuje pažljivo razmatranje [1].

Primarna nivelmanska kontrolna mreža koja uključuje GPS kontrolne točke i druge nivelmanske točke koje se opažaju posebnim geodetskim nivelmanskim tehnikama. Glavni cilj primarne nivelmanske kontrolne mreže osiguranje točaka na koje se može povezati podzemna kontrolna mreža kako je prikazano na slici 8.1.

Unutar nekoliko centimetara od projektirane lokacije pozicionira se iskop tunela. Za horizontalna i vertikalna kontrolna mjerenja uobičajena tolerancija relativnog pozicioniranja je 1:100 000 koja uključuje mjerne kontrolne greške. Kako bi se postigla visoka točnost pozicioniranja, podzemna mreža se mora povezati sa površinskom, a to se postiže pomoću instrumenata visoke kvalitete. Prilikom dobre kalibracije elektronskih teodolita i elektronskih daljinomjera može se postići visoka točnost prilikom mjerenja kuteva i dužina. Dva primarna faktora koji ograničavaju točnost elektronskih daljinomjera i kutnih mjerenja su:

- nestalnost indeksa refrakcije zraka i
- sistematske i slučajne pojave atmosferske reakcije.

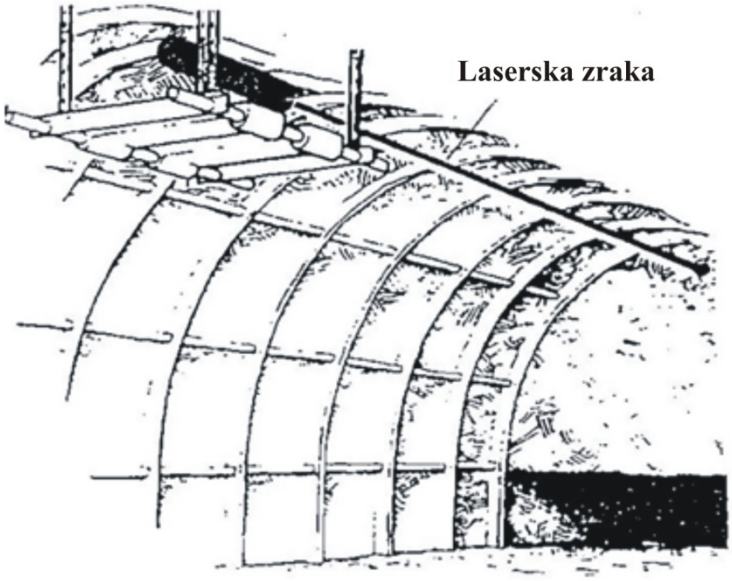
Prema konačnom projektu, udaljenost između stajališta u tunelu većim od 200 m mora se voditi cik-cak linija ili dvostruka cik-cak linija.



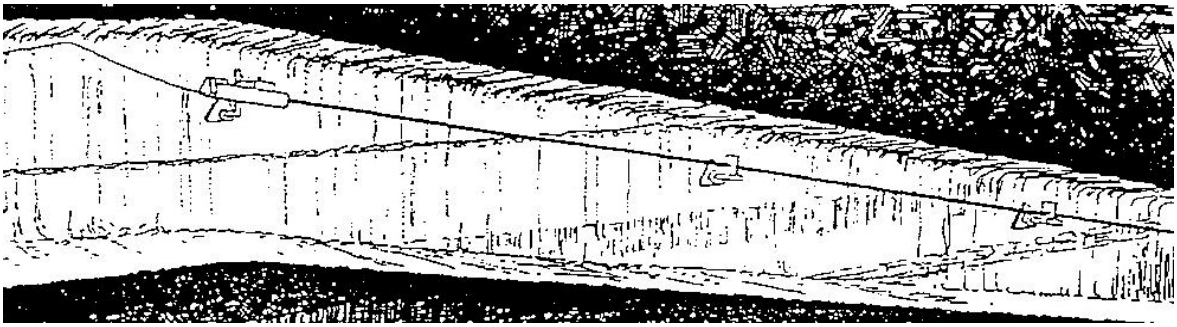
Slika 8.1 Tunelska kontrolna mreža[1]

8.2. TUNELSKA LASERSKA KONTROLA

Prilikom vođenja tunela u pravom smjeru koriste se podzemne kontrolne mreže. U većini slučajeva laseri predstavljaju idealno rješenje za potrebe preciznog vođenja pa tako i njihovog korištenja u kontroli izvedbe tunela. Za dobivanje stalne vidljive referentne linije paralelne sa željenim smjerom koriste se helijum-neon laseri. Glavni problem u postavljanju tunelske kontrolne mreže je izvođenje radova ispod površine terena uz sve karakteristične probleme kao što su voda, temperatura, prašina i dr. Laserska metoda za kontrolu tunelogradnje mora se projektirati u skladu s navedenim štetnim uvjetima prisutnim na gradilištu. Iz tih razloga tunelski laseri su otporni na vodu, prašinu i udarce i jednostavno se primjenjuju. Tunelski laseri nemaju standardno ugrađen uređaj za postavljanje nagiba ili uređaj za automatsko niveliranje. Kada se odredi smjer, laser i laserske kontrolne točke pomiču se niz tunel u ravnini s prethodnim stajalištima. Kontrolne točke ili reperi definiraju traženi nagib i smjer tunela. Slika 8.2 i 8.3 prikazuje princip tunelske laserske kontrole [1].



Slika 8.2 Princip rada laserske kontrole[1]

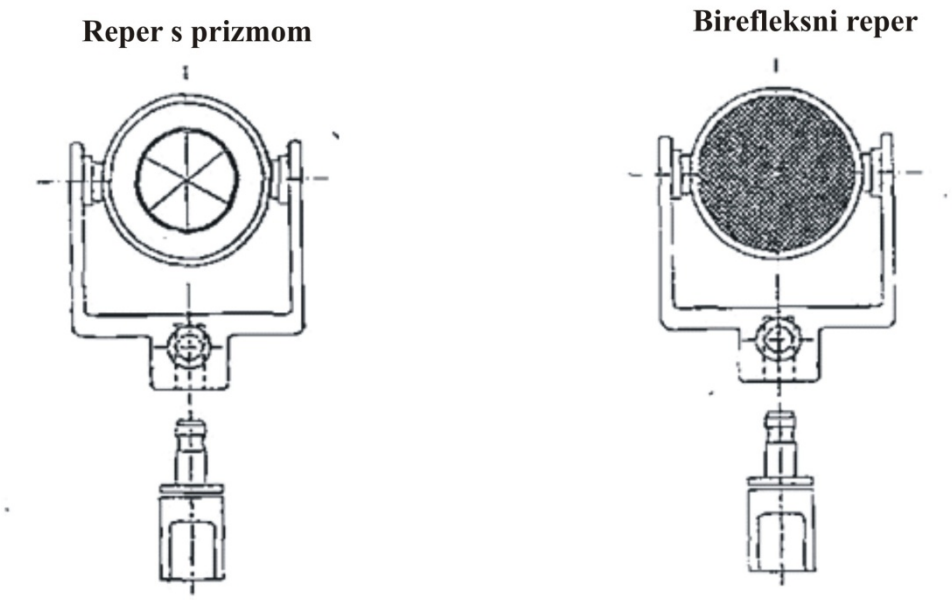


Slika 8.3 Princip laserske kontrole[1]

8.3. MJERENJE DEFORMACIJA

Mjerenja deformacija također predstavljaju vrlo važan segment prilikom izgradnje tunela prema Novoj austrijskoj tunelskoj metodi. Konvencionalne metode čija osnova je mjerenje ekstenziometrima ili očitanje konvergencije daju relativne rezultate. Sa takvim se mjerenjima ne mogu otkriti pojave svih deformacija. Danas se koriste optička 3D mjerenja koja daju znatno bolje rezultate. Za 3D promatranje uglavnom se koriste elektronski tahimetri sa integriranim koaksijalnim mjerenjem udaljenosti. Točke se promatraju posebno dizajniranim reperima koji imaju čvrsto definiranu centralnu točku. Ovisno o vrsti posla koji se obavlja koriste se dvije vrste repera kao što su birefleksni reperi i reperi s prizmom. Birefleksni reperi imaju reflektirajuću foliju s jedne i druge strane. Koriste se za udaljenosti do 140 m i pomoću

njih promatra se normalni poprečni presjek.Na slici 8.4 prikazan je reper s prizmom i birefleksni reper [1].



Slika 8.4 Reper s prizmom i birefleksni reper [1]

Reper se postavlja slobodno stacioniran i prema nekoliko poprečnih presjeka i referntnim točkama uzimaju se očitanja. Polarne koordinate repera predstavljaju originalna očitanja koja definiraju poprečni presjek. Apsolutne 3D koordinate poprečnog presjeka računaju se sa polarnim koordinatama.

Svrha 3D mjerenja je:

- verifikacija geoloških istraživanja,
- prilagodba podgrade stvarnom stanju,
- provjera ispravnosti svih podgradnih mjera[1].

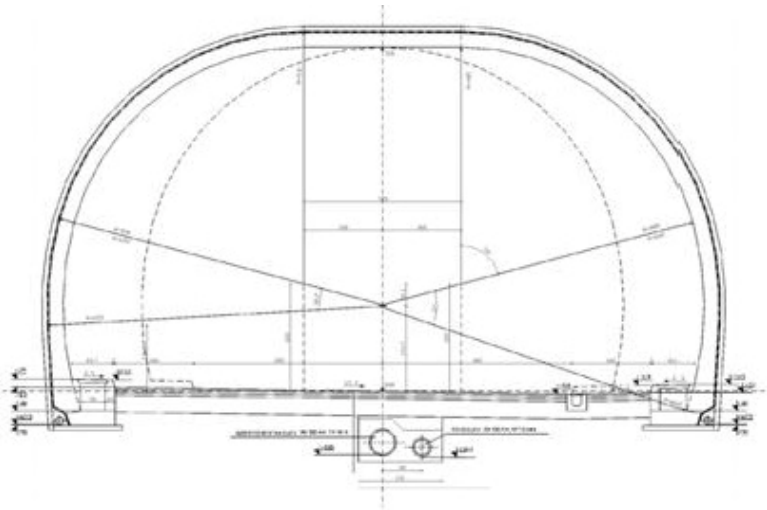
9. TUNEL SVETI ROK

Tunel Sveti Rok, slika 9.1, je dvocijevni tunel koji je izgrađen prema načelima NATM. Nalazi se na trasi autoceste Zagreb - Split i jedan je od najduljih tunela u Republici Hrvatskoj. U cjelini tunel Sveti Rok predstavlja jedno od najvećih djela zbog složenosti zahvata i njegove duljine. Prolazi kroz masiv Velebita ispod Tulovih greda i ulazi u skupinu tunela s velikim nadslojem koji iznosi 450 m.

Slika 9.1 Tunel Sveti Rok

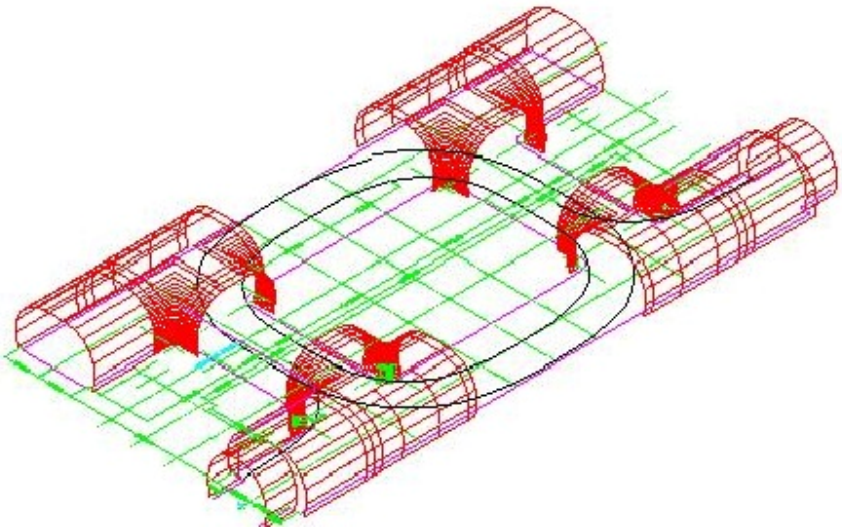
Tunel Sveti Rok projektiran je sa dvije tunelske cijevi čiji osni razmak iznosi 35 m. Glavna karakteristika ovog tunela je ta da je iskop izveden djelomičnim napredovanjem na jednom čelu, a unutrašnji dio na više čela istodobno.

Na slici 9.2prikazan je poprečni profil tunela Sveti Rok.



Slika 9.2 Poprečni profil tunela Sveti Rok[12].

Na tunelu Sveti Rok projektirano i izvedeno je dvanaest zaustavnih niša i četiri okretišta sa po dva poprečna prolaza, slika 9.3. Ti prolazi spajaju lijevu i desnu tunelsku cijev.



Slika 9.3 Okretište u tunelu Sv. Rok [10]

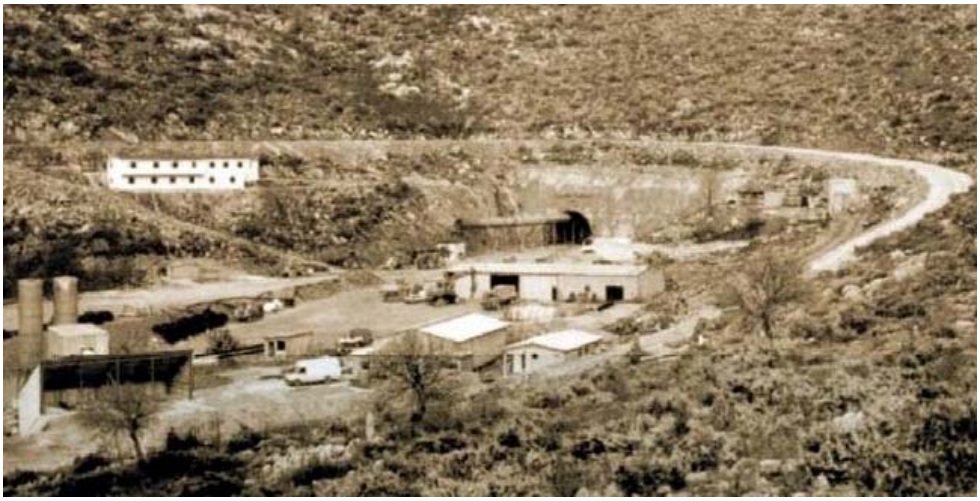
Uz oplatu normalnog poprečnog presjeka tunela koji iznosi 58,09 m^2 bilo je potrebno pribavit i posebne oplate za betoniranje sekundarne betonske obloge [12].

Po dužini izvedbe iskopa, slika 9.4, tunel Sveti Rok pripada srednje teškim tunelima u raspucanim krškim terenima uz upotrebu lake podgrade [12].

Slika 9.4 Iskop tunela Sveti Rok [12]

Slika 9.5 Spajanje dijela okretišta [12]

U listopadu 1996. godine započela je izgradnja tunela Sveti Rok kroz golemi velebitski masiv kopanjem predusjeka, a proboj tunela započeo je početkom veljače 1997. godine. Prvo se kopala desna cijev, a lijeva naknadno. Desna cijev tunela duga je 5670 m, a lijeva cijev 5679 m, slika 9.5. Južni portal nalazi se na nadmorskoj visini od 510,65 m, a sjeverni portal na 561,44 m nadmorske visine, slika 9.6[10].

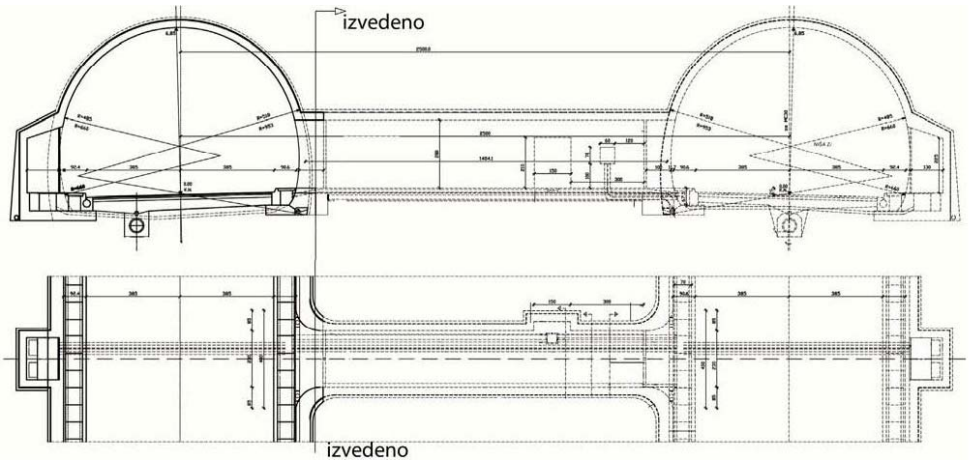


Slika 9.6 Južni portal tunela tijekom proboja desne cijevi[10].

Teren iza južnog portala sa strmim velebitskim padinama koje iznose od 200 m nadmorske visino do 650 m nadmorske visine za projektante predstavio je veliki izazov. Projektanti su se morali prilagoditi padinama izbjegavajući zasjeke visokih pokosa kao i dugačke potporne zidove. Primjenjivali su se niski nasipi, dublji usjeci, vijadukti i tuneli. [10].

S obzirom da su u prvoj fazi izgradnje tunela Sveti Rok iskopane i podgrađene obje tunelske cijevi, desna cijev je opremljena i puštena u promet, a lijeva cijev je služila za evakuaciju. U lijevoj tunelskoj cijevi po projektu obuhvaćeni su svi građevinski radovi zatim radovi hidroizolacije i odvodnje kao i kolnička konstrukcija. Sva projektna rješenja uključuju ugradnju uređaja i opreme. Veličina i oblik tunelske cijevi uvjetovana je potrebnom širinom kolnika, brdskim pritiscima i prostoru za smještaj opreme i uređaja, slika 9.7. Ukupna širina kolnika iznosi 7,7 m. Koristila se betonska obloga tunela marke betona C 25/30 debljine 0,3 m u cijeloj duljini tunela. Tunelska obloga se izvodila na već izvedenoj primarnoj zaštiti koja se sastoji od ugrađenih sidra, mlaznog betona i čeličnih mreža. Koristila se PVC hidroizolacija sa zaštitnim slojem geotekstila koja se postavila između primarnog osiguranja i sekundarne obloge po cijeloj dužini tunela [10].

Radi visinskih odnosa autoceste, smanjivanja zagađenja zraka od motornih vozila, geoloških uvjeta i mogućnosti gravitacijske odvodnje niveleta tunela se nalazi u dvostranom nagibu i to sa sjeverne strane u usponu 0,4 posto, a prema južnom portalu 1,5 posto. Poprečni nagib tunela u pravcu iznosi 1,5 posto, a u krivinama iznosi 2,5 posto. Površina svijetlog otvora tunela iznosi 58,09m^2, a visina 4,5 m koja ujedno omogućuje nesmetanu montažu prometne ventilacije i signalizacije. S unutrašnje strane u energetski kanal smještene su instalacije jake struje, a na drugoj strani instalacije slabe struje i hidrantski vod.Kako bi se spriječilo širenje vatre kanalizacijom sifonski su preljevi rađeni s potopljenom pregradom, a za odvodnju su predviđeni šuplji rubnjaci. Kanalizacijske cijevi su smještene u osi tunela. Tekućina s kolnika i voda prikupljena bočnim drenažama uvodi se u kanalizacijsku cijev preko revizijskih okana i izravnih sifonskih ispusta [10].



Slika 9.7 Presjek i tlocrt pješačkog prolaza[10].

Desna i lijeva cijev spojene su sa petnaest prolaza za pješake i četiri prolaza za vozila. Okretišta su izvedena u prvoj fazi izgradnje tunela i opremljena vatrootpornim vratima za prolaz vozila i s posebnim prolazima za pješake. Pješački prolazi se nalaze na svakih 350 m. U lijevoj tunelskoj cijevi nalazi se dvanaest niša koje služe za zaustavljanje vozila ili uklanjanje vozila. Zbog eventualnog preusmjeravanja prometa iz desne u lijevu tunelsku cijev u sredini tunela s lijeve strane izvedene su još dvije niše [10].

U prvoj fazi izgradnje tunela izveden je iskop i podgrada u obje tunelske cijevi. S obzirom da su dijelovi lijeve cijevi u nepovoljnim geološkim uvjetima izvedene su s betonskom oblogom.

Od građevinskih radova na tunelu 90% tunela izvedeno je na betonskoj oblozi. Sekundarna betonska zaštita iskopa izvodila se pomoću samohodnih hidrauličkih oplata s kampadama od 12 metara kako je prikazano na slici 9.8.

Slika 9.8 Samohodna hidraulična oplata[10].

Za izgradnju tunela koristilo se oko 200000 tona betona, 121000 m^2hidroizolacije od PVC folije te oko 17000 tona asfalta[10].

10. PREDNOSTI I MANE NOVE AUSTRIJSKE TUNELSKE METODE

S obzirom da izgradnja tunela predstavlja vrlo kompleksnu operaciju unutar strukture stijene, ne postoji metoda koja odgovara svim geološkim formacijama. Odgovarajuća metoda iskopa se odabire s obzirom na utjecaj okoline na tunel i utjecaj izgradnje tunela na okolinu.

Svaka konstrukcija tunela je jedinstvena i ima svoje kriterije koji se ne smiju nekritički prenijeti na drugi tunel. S obzirom na te kriterije konstrukcija Nova austrijska tunelska metoda ima svoje prednosti i mane [1].

Prednosti Nove austrijske tunelske metode su:

- primjenjivost u širokom rasponu geotehničkih uvjeta ili tla,
- visoka ekonomičnost optimizacije potrebnih podgradnih elemenata,
- brzo i jednostavno prilagođavanje na različite poprečne presjeke,
- ekonomična primjena na kraće ugovorne odsjeke,
- laka kombinacija s TBM (TunnelBoring Machines) iskopom,
- relativno mala investicija s brzom amortizacijom [1].

Mane Nove austrijske tunelske metode su:

- napredak po ciklusu je vrlo mali i ne može se puno povećati,
- visoki zahtjevi za obrazovanjem,
- smanjenja mogućnosti automatizacije,
- teškoće u formiranju i podjeli rizika za investitora i izvođača,
- primjena u uvjetima podzemne vode samo sa dodatnim mjerama,
- visoki zahtjevi za kvalitetom izvedbe i materijala [1].

Nova austrijska tunelska metoda prvenstveno je metoda u kojoj prevladavaju praksa i opažanja. Znanost uz pažljivo planiranje i kalkuliranje uvijek prati izvedbu u ovom slučaju tunela. Kako bi osigurali kvalitetnu primjenu odnosno izvedbu potrebne su stalne procjene stvarnih geotehničkih uvjeta i mjerenja in situ s njihovom brzom interpretacijom[1].

11. ZAKLJUČAK

Nova austrijska tunelska metoda nije metoda građenja koja se može prikazati shemom iskopa i nacrtima podgrade već je ona generalni koncept odnosno filozofija tunelogradnje. Nije vezana za bilo koju proceduru iskopa i podgrađivanja već se temelji na principima opažanja. Ona je postupak građenja tunela temeljena na znanstveno utvrđenim idejama i principima kao i u praksi potvrđenim idejama i principima, kako bi se mobiliziranjem nosivog kapaciteta stijenske mase ostvarila optimalna ekonomičnost i sigurnost.

Nastala je iz bogatog rudarskog iskustva i dobrog poznavanja tradicionalnih metoda izgradnje tunela.

Uspjeh NATM projekta ovisi o odlukama koje se donose za vrijeme iskopa na čelu tunela, a na terenu a ne u projektnom uredu. Planovi izvedbe se razmatraju kao uputstva, međutim nadzorni inženjer i izvoditelj radova moraju biti ovlašteni kako bi djelovali nezavisno ukoliko je to potrebno.

Iskop stijene može se izvoditi bušenjem i miniranjem ili sa TBM strojem (TunnelBoringmachines). TBM su svi strojevi koji se koriste za iskop tunela u punom profilu u svim geološkim formacijama ili strojevi s pokretnom glavom.Ako se iskop izvodi u slaboj stijeni ili tlu koriste se bageri ili glodači.

Za NATM vrlo je važna stalna kontrola izvedbe i primjene. NATM zahtijeva određenu formu ugovora koja osigurava svim sudionicima u izgradnji da snose svoj specifičan rizik. Ukoliko bi se izbjegla podjela rizikaspriječilo bi se djelotvorno kontroliranje.

NATM je zahtjevna i efikasna izvedbena metoda čiji cilj je rad s visokim standardima izvedbe i kvalitete. Procjena stabilnosti čela, pa tako i procjena vremena nepodgrađenog raspona, pravi izbor razrade iskopa po fazama i dužina napredovanja važan je dio kod izbora načina izvedbe. Rad s NATM bez najviših zahtjeva za projektiranje, izvođene i nadzor na gradilištu može uzrokovati nepotrebne troškove i nepredvidive rizike. Najvjerniji primjer primjene te metode je tunel Sveti Rok, ponajprije zbog svog specifičnog položaja, nalazi se na vrlo zahtjevnom terenu i prolaz kroz Velebitski masiv. U njegovoj izgradnji prvo se kopala desna tunelska cijev, a lijeva naknadno. Desna tunelska cijev djelomično je podgrađena primarnom podgradom prema NATM (Nova Austrijska Tunelska Metoda).

12. LITERATURA

1. Hudec M. (2000): Nova Austrijska Tunelska Metoda, Sveučilište u Zagrebu Rudarsko geološko naftni fakultet, Sveučilišna skripta.
2. https://www.grad.unizg.hr/_download/repository/GI_13.predavanje_Tunelogradnja.pdf, Datum pristupa 05.08.2018
3. https://bib.irb.hr/datoteka/617867.Mustapi_Ivan_Analiza_razliitih_modela_etapne_gradnjedvocijevnih_tunela_na_autocestama.pdf, Datum pristupa 31.8.2018.
4. https://www.grad.unizg.hr/_download/repository/PG_-_5.pdfDatum pristupa 31.8.2018.
5. https://bib.irb.hr/datoteka/618029.Mustapic_Ivan_Gradjenje_cestovnih_tunela.pdfDatum pristupa31.8.2018.
6. https://helpdesk.uniri.hr/system/resources/docs/000/007/247/original/Skripta_Inženjerska__mehanika_stijena.pdf?1450268943Datum pristupa 31.8.2018.
7. https://hrcak.srce.hr/13081Datum pristupa 31.8.2018.
8. https://hrcak.srce.hr/13390Datum pristupa 31.8.2018.
9. https://scindeks-clanci.ceon.rs/data/pdf/0543-0798/2015/0543-07981504021J.pdfDatum pristupa 31.8.2018.
10. http://www.casopis-gradjevinar.hr/assets/Uploads/JCE-61-2009-02-05.pdf, Datum pristupa 15.08.2018
11. Žderić Ž, Pervan G, Radić Đ. Primjena suvremene tehnologije u tunelogradnji.
12. Jovanćević D. S. Inženjerska mehanika stijena, Rijeka, Dostupno na: https://helpdesk.uniri.hr/system/resources/docs/000/007/247/original/Skripta_Inženjerska_mehanika_stijena.pdf?1450268943
13. Lončarić M. Koncentracije štetnih plinova pri iskopu tunela miniranjem, Zagreb 2017.
14. Mesec J. Nova Austrijska tunelska metoda, Varaždin 2018. Dostupno na: https://moodle.srce.hr/2017-2018/course/view.php?id=21269
15. Mesec J. (2009): Mineralne sirovine, vrste i načini dobivanja,Sveučilište u Zagrebu Geotehnički fakultet, Sveučilišni udžbenik, Varaždin, ISBN 978-953-96597-4-3.
16. Vrkljan, M. (2001): Minerologija i petrologija, Osnove i primjena. Udžbenici Sveučilišta u Zagrebu. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb.

Popis slika

Slika 2.1 Redoslijed radova kod stare austrijske metode [1] 4

Slika 2.2 Shematski prikaz redoslijed radova kod Belgijske metode [1]..... 5

Slika 2.3 Shematski prikaz redoslijeda radova kod Njemačke metode [1]..... 5

Slika 3.1 Stijenska masa kao glavni nosivi element [14]..... 8

Slika 3.2 Održavanje čvrstoće stijenske mase [14]..... 9

Slika 3.3 Izbjegavanje razrahljenja stijenske mase [14] 9

Slika 3.4 Dijagram troosnog stanja naprezanja [14] 10

Slika 3.5 Kontrola deformacije stijenske mase [14] 10

Slika 3.6 Kontrola deformacija stijenske mase [14] 11

Slika 3.7 Pravovremena ugradnja podgrade [14]..... 11

Slika 3.8 Pravovremena ugradnja podgrade [14]..... 12

Slika 3.9 Laboratorijska i terenska ispitivanja [14] 12

Slika 3.10 Primjena mlaznog betona umjesto drvne podgrade [14] 13

Slika 3.11 Upotreba tankostijene primarne podgrade [14] 13

Slika 3.12 Pojačanja primarne podgrade [14]..... 14

Slika 3.13 Mjerenje pomaka konture iskopa [14]..... 14

Slika 3.14 Tunel kao debelostijena cijev [14]..... 15

Slika 3.15 Zatvaranje tunela [14]..... 15

Slika 3.16 Pravovremeno zatvaranje podgradnog prstena [14] 16

Slika 3.17 Pravovremeno zatvaranje podgradnog prstena [14] 16

Slika 3.18 Stabilizacija sustava masiv –podgrada [14]..... 17

Slika 3.19 Zaobljeni poprečni profil tunela [14] 17

Slika 3.20 Tanka sekundarna obloga [14] 18

Slika 3.21 Stabilizacija masiva primarnom podgradom i povećanje sigurnosti sekundarnom podgradom [14] 18

Slika 3.22 Stabilizacija primarne i sekundarne obloge [14] 19

Slika 3.23 Dreniranje stijenske mase [14] 19

Slika 4.1 Ne primjenjivost Heimove hipoteze [14] 20

Slika 4.2 Pritisci na podgradu se nakon neke dubine ne povećavaju linearno s dubinom [14] 21

Slika 4.3 Nosivi prsten prema Golserovoj definiciji [14] 21

Slika 5.1 Razvrstavanje u kategorije podgrade [13] 24

Slika 5.2 Razvrstavanje u kategorije iskopa [13] 25

Slika 6.1 Iskop u tri faze [8] 32

Slika 6.2 Iskop u pet faza [8] 32

Slika 6.3 Iskop tunelskog profila u pet faza [1] 33

Slika 6.4 Aktivno i pasivno sidro [12] 34

Slika 6.5 Mehanički usidrena štapna sidra [12] 36

Slika 6.6 Injektirano sidro [1] 36

Slika 6.7 Pletena sidra od čeličnih niti 37

Slika 6.8 Split Set sidro [12] 38

Slika 6.9 SWELLEX sidro [12] 38

Slika 6.10 Samobušivo štapno sidro [12] 39

Slika 6.11 Pravilno prskanje kod ugradnje mlaznog betona [12] 40

Slika 6.12 Suhi postupak [12] 41

Slika 6.13 Mokri postupak [12] 41

Slika 6.14 Varena čelična mreža i žičano pletivo [12] 41

Slika 7.1 Vrste strojeva 43

Slika 7.2 Stroj sa i bez štita 44

Slika 7.3 Stroj za mlazni beton "Buffalo" 45

Slika 8.1 Tunelska kontrolna mreža [1] 47

Slika 8.2 Princip rada laserske kontrole [1] 48

Slika 8.3 Princip laserske kontrole [1] 48

Slika 8.4 Reper s prizmom i birefleksni reper [1] 49

Slika 9.1 Tunel Sveti Rok 50

Slika 9.2 Poprečni profil tunela Sveti Rok [12]. 50

Slika 9.3 Okretište u tunelu Sv. Rok [10] 51

Slika 9.4 Iskop tunela Sveti Rok [12] 51

Slika 9.5 Spajanje dijela okretišta [12] 52

Slika 9.6 Južni portal tunela tijekom proboja desne cijevi [10]. 52

Slika 9.7 Presjek i tlocrt pješačkog prolaza [10]. 53

Slika 9.8 Samohodna hidraulična oplata [10]. 54

Popis tablica

Tablica 5.1 Određivanje kvalitete stijenske mase prema RQD faktoru [13]..... 23

Tablica 5.2 Kategorija stijenske mase prema RMR klasifikaciji [13]..... 24