

Metode iskopa podzemnih prostorija

Jandrić, Martin

Master's thesis / Diplomski rad

2019

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:130:817158>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-27**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET

Martin Jandrić

METODE ISKOPA PODZEMNIH PROSTORIJA

DIPLOMSKI RAD

VARAŽDIN, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET

DIPLOMSKI RAD

METODE ISKOPA PODZEMNIH PROSTORIJA

KANDIDAT:

Martin Jandrić



MENTOR:

Prof. dr. sc. Josip Meseć

NEPOSREDNI VODITELJ:

Dr.sc. Denis Težak, dipl. ing. geot.

VARAŽDIN, 2019.



Sveučilište u Zagrebu
Geotehnički fakultet



ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: MARTIN JANDRLIĆ
Matični broj: 197 - 2017./2018.
Smjer: GEOINŽENJERSTVO OKOLIŠA

NASLOV DIPLOMSKOG RADA:


METODE ISKOPA PODZEMNIH PROSTORIJA


Rad treba sadržati: 1. Uvod
2. Tuneli
3. Načini izrade tunela
4. Miniranje
5. NATM
6. Principi izrade tunela po NATM-u
7. Strojni iskopi (Tunnel-boring machines)
8. Primjer: Željeznički tunel Passante Ferroviario u Milanu
9. Zaključak


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

Zadatak zadan: 20.03.2019.

Rok predaje: 04.07.2019.

Mentor:

Prof. dr. sc. Josip Mesec

Neposredni voditelj:

Dr. sc. Denis Težak

Predsjednik Odbora za nastavu:

Izv. prof. dr. sc. Igor Petrović



IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je diplomski rad pod naslovom

METODE ISKOPA PODZEMNIH PROSTORIJA

(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.Josip Mesec**

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

U Varaždinu, 03.07.2019.

MARTIN JANDRLIĆ

(Ime i prezime)

Martin Jandrić

(Vlastoručni potpis)

SAŽETAK:

Ime i prezime autora: Martin Jandrić

Naslov teme: Metode iskopa podzemnih prostorija

U ovom diplomskom radu opisane su metode iskopa podzemnih prostorija kroz povijest do današnjih dana. Od prvih početaka do danas ljudi sve dublje ulaze u podzemlje, u početku u prirodne špiljske fenomene ali i vrlo rano počinju s kopanjem podzemnih prostorija za potrebe stanovanja, rudarenja, navodnjavanja i slično.

U bližoj prošlosti, pojavom prekomjernog prometa i sve većeg broja stanovništva, došlo je do problema s prijevozom, što je potaknulo razvitak podzemne željeznice. Prva podzemna prometnica ispod gradskog naselja otvorena je 1863. godine u Londonu.

Općenito, inovacije u zadnjih stotinjak godina kao što su dinamit i AN/FO eksplozivi (1867.), električni detonatori (1867.), strojevi za iskop tunela-TBM, (1881.), špricani mort (1909.), stijenska sidra (1918.), mlazni beton (1942.), tungsten carbide bušaći pribori (1940.), Nova Austrijska Tunelska Metoda (1950.) i hidrauličko udarno bušenje (1971.), dali su snažnu potporu enormnom razvoju tehnika gradnji podzemnih objekata.

Uz to, razvoj mnogih uređaja za opažanja pokreta i naprezanja u stijenskoj masi (monitoring), praćen naglim razvojem računalnih tehnika (hardware i software), smanjila su rizik havarija tijekom građenja te na taj način ubrzala gradnju te učinila tunelogradnju humanijom i sigurnom inženjerskom disciplinom.

Ključne riječi: iskop podzemnih prostorija, miniranje, TBM, NATM, tuneli.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. TUNELI.....	3
2.1. Konstrukcijski dijelovi tunela.....	4
2.2. Klasifikacija tunela s obzirom na namjenu.....	5
3. NAČINI IZRADE TUNELA	6
3.1. Lažni tuneli (cut and cover tunells)	6
3.2. Uronjeni tuneli.....	8
3.3. Iskop pod zaštitom dijafragme	10
4. MINIRANJE.....	12
4.1. Eksplozivi	13
4.2. Djelovanje detonacije na stijenu.....	14
5. NATM.....	21
5.1. Tunelogradnja prije NATM.....	21
5.1.1. Belgijska metoda	23
5.1.2. Stara austrijska metoda.....	24
5.1.3. Njemačka metoda	25
5.1.4. Talijanska metoda.....	26
6. PRINCIPI IZRADE TUNELA PO NATM-U	26
6.1. Nosivi prsten.....	29
7. STROJNI ISKOP (TUNNEL-BORING MACHINES)	32
8. PRIMJER: ŽELJEZNIČKI TUNEL PASSANTE FERROVIARIO U MILANU	38
Zaključak	46

Literatura	47
-------------------------	-----------

Popis slika

Slika 2.1. Potkovasti tunel [5].....	3
Slika 3.1. Princip gradnje lažnih tunela [5].	7
Slika 3.2. Mogući načini osiguranja stabilnosti uronjene plutajuće tunelske cijevi [6].	8
Slika 3.3. Četiri rješenja uronjenog plutajućeg tunela [6].	9
Slika 3.4. Tipovi stabilizacije uronjenih plutajućih tunela [6].....	10
Slika 3.5. Princip izgradnje tunela pod zaštitom dijafragme [5].	10
Slika 4.1. Zona djelovanja eksplozije u stijeni [5].....	14
Slika 4.2. Osnovni elementi minskog polja [5].	16
Slika 4.3. Minska bušotina [16].....	16
Slika 4.4. Punjenje minske bušotine eksplozivom. [16].....	17
Slika 4.5. Osnovni principi prespliting tehnike miniranja [5].	18
Slika 4.6. Princip glatkog miniranja na primjeru iskopa tunela kružnog poprečnog presjeka [5].....	20
Slika 4.7. Jasni tragovi minskih bušotina, govore o kvalitetnom miniranju ali i o kvalitetnoj stijenskoj masi [5].	20
Slika 5.1. Stara austrijska tunelska metoda [5].....	22
Slika 5.2. Teška drvena podgrada u tunelu Moffat, 1923. (USA) [5].	22
Slika 5.3. Shematski prikaz redosljed radova kod Belgijske metode [10]	24
Slika 5.4. Redosljed radova kod stare austrijske metode [10].	25
Slika 5.5. Shematski prikaz redosljeda radova kod Njemačke metode [10]	25

Slika 6.1. Stijenska masa kao glavni nosivi element [5].	27
Slika 6.2. Izbjegavanje razrahljenja stijenske mase [5].	27
Slika 6.3. Zaobljeni poprečni profil tunela [5].	28
Slika 6.4. Upotreba tankostijene primarne podgrade [5].	28
Slika 6.5. Pojačanja primarne podgrade [5].	29
Slika 6.6. Prikaz primjenjivosti Heimove hipoteze [5].	30
Slika 6.7. Nakon neke dubine, pritisci na podgradu se ne povećavaju linearno s dubinom [5].	30
Slika 6.8. Nosivi prsten (Golser, 1996) [5].	31
Slika 7.1. Stroj za iskop tunela u punom profilu [5].	33
Slika 7.2. Stroj sa pokretnom glavom [5].	33
Slika 7.3. Raise borer [12].	34
Slika 7.4. Blind shaft borer [5].	35
Slika 7.5. Stroj bez štita [5].	35
Slika 7.6. Stroj sa štitom [15].	36
Slika 7.7. Princip iskopa tunela pod zaštitom štita [5].	37
Slika 8.1. Lokacija projekta [17].	38
Slika 8.2. Prikaz milanske željezničke mreže i podzemne željeznice - nova linija Passante Ferroviario označena je crno-bijelom linijom [18].	39
Slika 8.3. Postavljeni stroj TBM u tvornici NFM u Lyonu (Francuska) [19].	41
Slika 8.4. Montaža štita u tvornici i postavljanje pužastog transportera u polazno okno na gradilištu u Milanu [15].	43

Slika 8.5. Postavljanje stroja u početno okno na gradilištu u Milanu; prikaz stražnjeg dijela stroja s podizačem kojim se segmenti postavljaju u prstenove segmentne obloge[21].	44
Slika 8.6. Završetak prvog tunela probijanjem kroz zid na kraju; dinamika iskopa za obje cijevi (prva cijev: plavo, druga cijev: crveno) [21].....	45

Popis tablica

Tablica 4.1 Minirljivost stijena prema J.A Tangajevu [5].	15
Tablica 8.1. Prosječna količina armature potrebne za segmentnu oblogu [15].	40
Tablica 8.2. Kapacitet i ostali podaci o tunelskom bušaćem stroju [19, 20].	41
Tablica 8.3. Iskaz napredovanja [15].	42

1. UVOD

Iskop podzemnih prostorija započeo je u davnoj prošlosti, ljudi od prapovijesti ulaze u podzemlje, u počecima nastanjuju prirodne špiljske fenomene koji su im služili kao skloništa, a vrlo rano počinju s kopanjem podzemnih prostorija za potrebe stanovanja, rudarenja i slično. Najveći korak u podzemnoj gradnji počeo se događati pojavom rudarstva koje seže u prapovijesno doba, kada čovjek još nije prepoznao vrijednost metala.

Međutim, to nisu počeci rudarske djelatnosti. Najstarijim rudarstvom smatra se rudarstvo bakra i olova u Maloj Aziji, na istočno sredozemnim otocima Cipru i Kreti, na Kavkazu i u Mezopotamiji. Iz tog područja poznavanje metala i njegova obrada širila se na zapadu Europe, te na istok, u Indiju i Kinu. Intenzitet i vrijeme tog širenja povezano je s prijelazom iz nomadskog na sjedilački način života. Rudarski zanat zahtjeva profesionalni pristup radu, on se ne može obavljati u hodu, pa je zato shvatljiv i relativno veliki vremenski razmak u počecima rudarske djelatnosti u različitim krajevima svijeta [1].

Ulazak u podzemne prostorije tijekom povijesti predstavljao je niz poteškoća, neke od njih bile su kako lakše prodrijeti ispod Zemljine površine. To je uspio švedski kemičar i inženjer Alfred Nobel koji je 1867. godine., izumio i patentirao dinamit. Danas se dinamit upotrebljava u rudarstvu, građevinarstvu, kamenolomima i za rušenje objekata. Jedno je od osnovnih sredstava za iskop rovova, te je jeftinija alternativa lijevanim eksplozivima. Dinamit se ponekad koristi kao upaljač ili pojačivač djelovanja eksplozivnih punjenja zasnovanih na amonij-nitratu(AN/FO eksplozivi).

Najpovoljnija mješavina ANFO eksploziva sastoji se od 94,5 % amonijevog nitrata i 5,5 % goriva, pri čemu je bilanca kisika približna nuli. Amonijev nitrat već pomiješan s gorivom, dakle ANFO, ima loša svojstva prilikom skladištenja. S vremenom otpušta gorivo i gubi eksplozivna svojstva, te nije vodootporan, odnosno lako je topljiv u vodi. Vremenski period skladištenja ANFO eksploziva ne bi smio biti duži od tri mjeseca [2].

Električni detonatori, su upaljači cjelokupnog eksplozivnog sredstva, punjeni inicijalnim eksplozivom. Građeni su uglavnom od bakrene aluminijske ili kapsule od nekog polimera, te punjeni inicijalnim eksplozivom. Primjenjuju se za miniranje na

površinskim i podzemnim kopovima, na suhim i vlažnim terenima. Električne detonatore ne smijemo primjenjivati za miniranje u sredstvima s pojavom metana i eksplozivne ugljene prašine.

Veliki napredak u podzemnoj gradnji dogodio se 1881. godine pojavom strojeva za iskop tunela (TMB). Strojni iskop (eng. Tunnel-Boring Machines) predstavlja sve strojeve koji se koriste za iskop tunela bez obzira radili se o strojevima za iskop u punom profilu ili strojevima s pokretnom glavom.

Špricani mort prije poznat kao "Torkretbeton" je već prije 70 godina upotrebljavan u SAD-u. 1909 godine tvrtka Cement Gun u Allentown (Pennsylvania) je prskala pijesak-cement mort i 1911 godine dobiva Amerikanac Akeley patent za svoj stroj za prskanje "Cement Gun". Iz istog vremena vrijedi dokaz od George Rice-a Bureau of Mines (Pittsburgh) o primjeni morta za prskanje u niskogradnji. 1914 godine je isti isproban u probnim jamama [3].

Geotehnička sidra predstavljaju poseban element u grupi geotehničkih konstrukcija koje na poseban način učvršćuju prirodni teren iza profila tla ili zaštitne konstrukcije. Sidrima se vlačna sila s konstrukcije prenosi u tlo. Za prenošenje vlačne sile koristi se posmična čvrstoća okolnog tla. Rana uporaba sidara uključivala je primjenu štapnih sidara u Poljskoj 1918., a kasnije u Čehoslovačkoj 1926. godine. Sidra su prvi put uvedena u građevinarstvu 1934. godine od strane francuskog inženjera André Coynea (kabelska sidra u pješčenjaku kako bi se omogućila izgradnja brane Cheurfas u Alžiru) [4].

Nakon razvitka geotehničkih sidra 1918. godine, došlo je do razvoja mlaznog betona čija primjena započinje sredinom 20. st. isti ima određene prednosti u odnosu na klasični beton, a neki od tih prednosti su: praktičnost, manji troškovi, brza ugradnja, betoniranje u tankim slojevima i sl. Tungstencarbide bušaći pribori početci njihovog korištenja dolaze iz 1940 godine., koji predstavljaju tvrdi metal velike izdržljivosti od fine granulacije. Nova Austrijska Tunelska Metoda (1950) 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. Te na posljetku 1971 godine dolazimo do početka hidrauličko udarnog bušenja, koji su sa

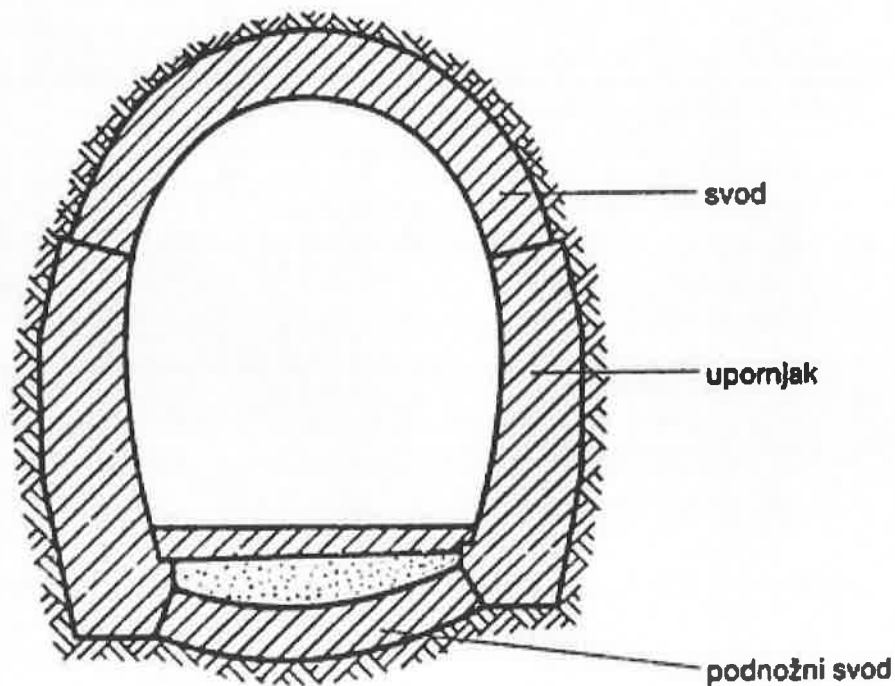
svim prethodno navedenim metodama dali snažnu potporu enormnom razvoju tehnika gradnji podzemnih objekata [5, 22].

2. TUNELI

Tuneli su podzemne građevine u obliku cijevi koje imaju ulaz i izlaz. Poprečni presjek tunela najčešće je potkovast ili kružni. Također tuneli su podzemni objekti za savladavanje terenskih prepreka a i za osiguranje tehničkih elemenata ceste na kojoj se projektiraju i grade [5].

Potkovasti tuneli, (slika 2.1.), sastoje se od sljedećih glavnih konstruktivnih dijelova:

- tjemenog svoda (kalote),
- upornjaka,
- podnožnog svoda.



Slika 2.1.Potkovasti tunel [5].

2.1. Konstrukcijski dijelovi tunela

Primjenjuju se u slučajevima:

- za svladavanje velikih visinskih razlika ili ako ne postoji mogućnost razvijanja trase,
- za prijelaze preko vododjelnica,
- na terenu s lošim značajkama (klizanje terena) koje mogu ugroziti razvijanje trase pruge,
- pri gradnji željeznica u velikim gradskim naseljima.

Profil tunela mora zadovoljiti potrebne uvjete glede namjene, oblika, konstrukcije i ekonomičnosti. To znači da veličina i oblik tunelskog profila ovise o:

1. slobodnom profilu prometnog sredstva koje prolazi tunelom,
2. vrsti vuče i prometa,
3. širini, razmaku i broju kolosijeka u tunelu,
4. potrebnim prostorima za ugradbu uređaja za signalizaciju, kontaktnu mrežu,
5. odvodnju, provjetravanje, rasvjetu, zaštitu osoblja, spremišta,
6. utjecajima stijenskih masa,
7. vrsti gradiva od kojega se gradi tunel i o tehnologiji građenja [5].

Brzina i oblik prometnog sredstva, zbog djelovanja tlaka zraka pri mimoilaženju vozila u tunelu, znatno utječu na izmjere tunela. Povećanjem brzine prilikom mimoilaženja dvaju vozila, dolazi do snažnih udara tlaka zraka pa je nužno razmak u dvosmjernom tunelu povećati.

2.2. Klasifikacija tunela s obzirom na namjenu

Tunele možemo klasificirati s obzirom na njihovu namjenu na: Prometni tuneli, hidrotehnički tuneli, komunalni tuneli, podzemne građevine.

Prometni tuneli su podzemne građevine koje služe za prolaz prometnica kroz prirodne ili umjetne zapreke ili ispod njih.

Prometne tunele možemo raspodijeliti na:

- Cestovni,
- Pješački,
- Brodski,
- Tuneli mješovite namjene [5].

Hidrotehnički tuneli su tuneli za dovod i odvod pogonske vode, dovod pitke vode te odvod otpadnih voda.

Podjela hidrotehničkih tunela:

- Vodovodni,
- Melioracijski,
- Kanalizacijski,
- Tuneli u sklopu hidrocentrale [5].

Komunalni tuneli:

- Smještaj električnih i telefonskih vodova, plinovoda, toplovoda i dr.

Podzemne građevine:

- Za skladištenje radioaktivnog otpada,
- Podzemna skloništa, skladišta, garaže, sportski i kulturni sadržaji i sl.,
- Podzemne električne strojarnice,
- Skladištenje plina i tekućina [5].

3. NAČINI IZRADE TUNELA

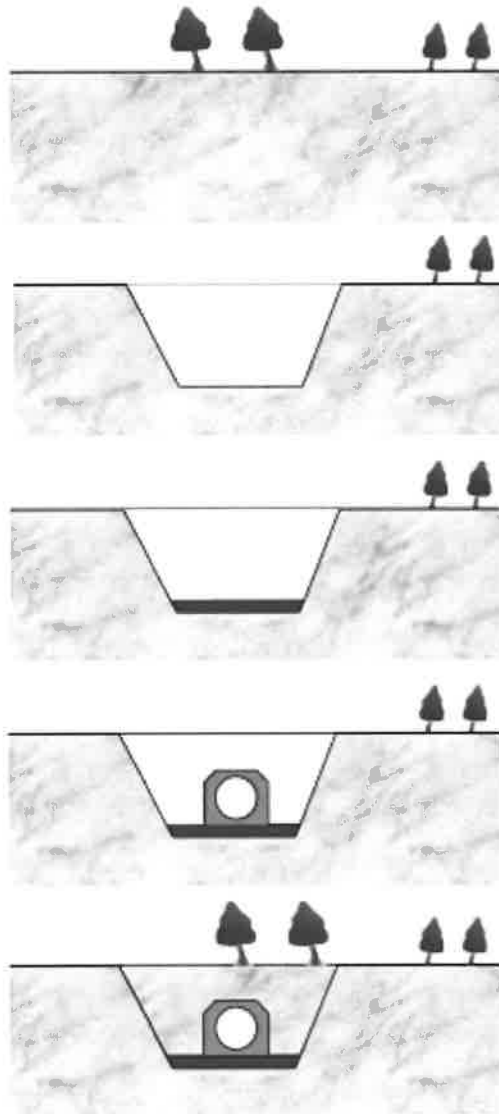
Osim podjela tunela prema namjeni, cestovni, željeznički, komunalni, hidrotehnički, oni se mogu razvrstati i po drugim kriterijima, odnosno karakteristikama kao što su duljina, veličina poprečnog profila, tlo kroz koje prolaze, ograničenja iskopa, tehnologije izvedbe i dr. Nakon određivanja karakteristika dolazimo do metoda prilikom izvedbe tunela. Neke od tih metoda su: bušenje, miniranje, gradnja podzemne prostorije u otvorenoj građevnoj jami, uronjeni tuneli, iskop pod zaštitom dijafragme i sl.

3.1. Lažni tuneli (cut and cover tunnels)

Metoda iskopa i zatrpavanja tzv. „cut and cover“ je metoda tunelogradnje koja se sastoji od iskopa građevne jame s površine terena, izvedbe tunelske konstrukcije u jami te zatrpavanja izvedene konstrukcije tlom iz iskopa. Primjenjuje se u zonama malog nadsloja. Kao takva, to je tehnika koja iskopom ograničava određene funkcije, ali je i obično najisplativija konstrukcijska metoda. Prilikom izrade tunela ispod gradske ulice, konstrukcija može uzrokovati smetnje u prometu, komunalnim uslugama, poduzećima i drugim urbanim aktivnostima. „Cut and cover“ je metoda gradnje koja je obično rezervirana za relativno plitke tunele, nije rijetkost da se koristi na dubinama od oko 20 m, ali rijetko prelazi 30 m.

Kod ovog načina gradnje, javlja se sljedeća geotehnička problematika:

- stabilnost kosina građevne jame,
- treba odabrati tehnologiju iskopa primjerenu geološkim svojstvima stijenske mase,
- treba riješiti problem odvodnje građevne jame tijekom kišnih perioda ili dotoka podzemne vode,
- treba riješiti tehnologiju zasipavanja kako tunelska cijev ne bi trpjela nesimetrična opterećenja [5].



Slika 3.1. Princip gradnje lažnih tunela [5].

Gradnja lažnih tunela (slika 3.1.), sastoji se od pet faza. Faza 1: Priprema površine (sječa raslinja, uklanjanje objekata na površini i slično). Faza 2: Iskop rova. Faza 3: Izgradnja podloge tunelske cijevi (beton ili kameni nasip). Faza 4: Izgradnja tunelske cijevi. Faza 5: Zatrpavanje tunela i rekultivacija površine [5].

3.2. Uronjeni tuneli

Prometno povezivanje između nasuprotnih obala, jezera, morskih zaljeva i sl., oduvijek je bio jedan od najvažnijih građevinskih zadataka. Složenost strukturalnih i ekonomskih problema koji se javljaju prilikom projektiranja, izvedbe i korištenja velikih infrastrukturnih građevina eksponencijalno raste s porastom njihove duljine, zbog čega velike vodene površine često nije moguće izvesti tradicionalnim rješenjima poput: mostova, i podvodni uronjeni ili bušeni tuneli.

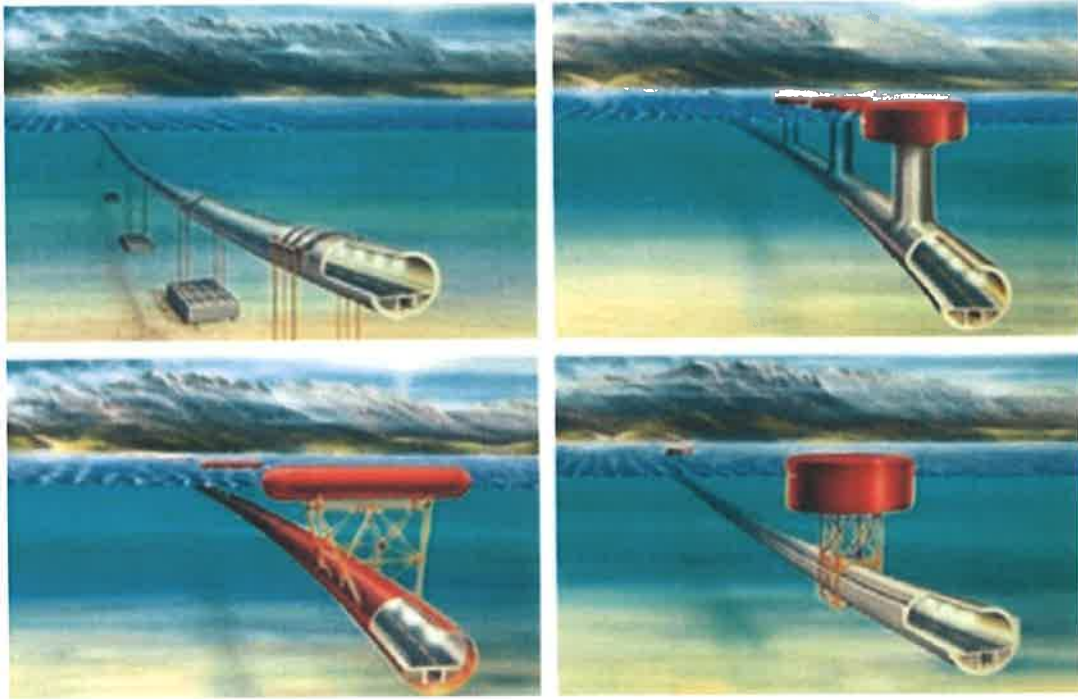
Rješenje kojim bi se ublažili navedeni problemi kao i smanjio negativan utjecaj građevine na okoliš mogao bi biti takozvani uronjeni plutajući tunel (engl. Submerged Floating Tunnel – SFT) poznat i kao Arhimedov most. Ta je građevina zamišljena kao cjevasta konstrukcija koja pluta na određenoj dubini ispod vodene površine, osiguravajući minimalnu dubinu za siguran prolazak plovila.

Njezina vertikalna i horizontalna stabilnost osigurana je sidrenjem kabelima, šipkama ili stupovima povezanim s morskim dnom ili pontonima koji plutaju po slobodnoj vodnoj površini (slika 3.2.) [6].



Slika 3.2. Mogući načini osiguranja stabilnosti uronjene plutajuće tunelske cijevi [6].

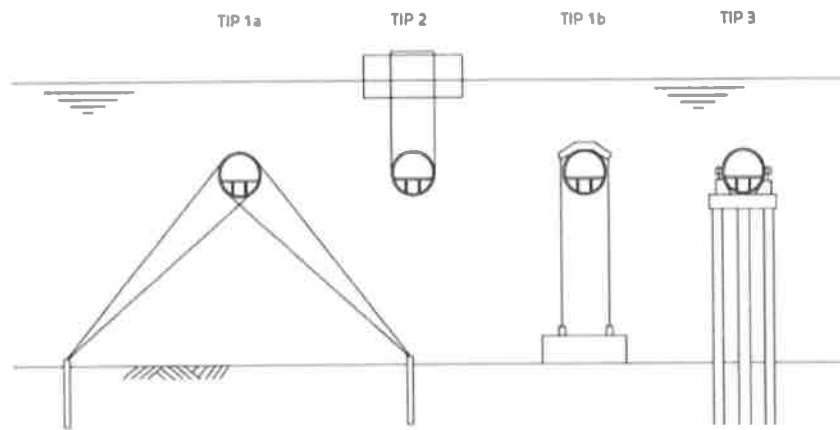
Iako je prvi poznati podvodni tunel sagrađen prije više od četiri tisuće godina uronjeni i plutajući tuneli relativna su novost u prometnome povezivanju. Tako je prvi zabilježeni prijedlog povezivanja nasuprotnih obala "uronjenim mostom" (slika 3.3.), bio onaj inženjera S. Préaulta, koji ga je zamislio još 1860., ali ga nije i ostvario. Riječ je o elegantnome željezničkom uronjenom vijaduktu preko Bospora, dugačkom približno 150 metara, temeljenome na stupovima te uronjenome u dubinu od 20 metara ispod površine vode.



Slika 3.3. Četiri rješenja uronjenog plutajućeg tunela [6].

Imamo četiri tipa stabilizacije uronjenih plutajućih tunela (slika 3.4.):

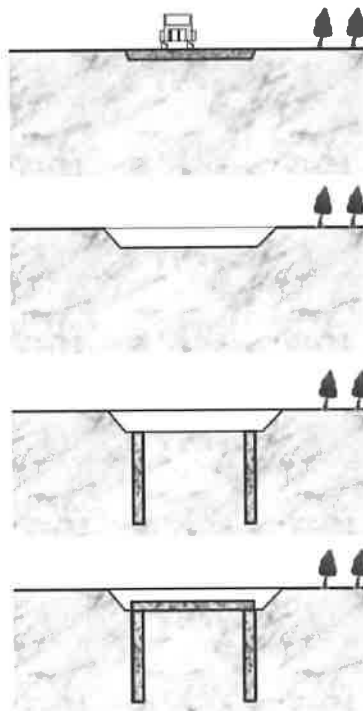
- tunelska cijev pričvršćena je za dno čeličnim cijevima ili kabelima koji mogu biti postavljeni pod kutem ili vertikalno u odnosu na dno te se mogu primijeniti i na dubini od nekoliko stotina metara,
- tunelska cijev povezana je s plutajućim pontonima pri čemu je sustav izložen vjetru, valovima, strujama i opasnostima od mogućeg udara plovila, ali istodobno ne ovisi o dubini vode,
- tunelska cijev položena je na stupove pri čemu znatno ograničenje predstavlja dubina vode i čvrstog tla u kojemu se stupovi temelje,
- tunelska cijev učvršćena je samo na sekcijama uz obalu, zbog čega primjenjivost takvog sustava ne ovisi o dubini vode, ali ovisi o prometnome opterećenju i duljini plutajućeg dijela tunela [6].



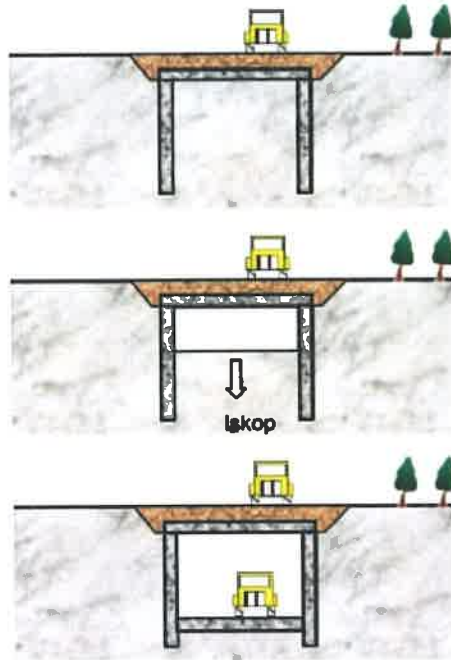
Slika 3.4. Tipovi stabilizacije uronjenih plutajućih tunela [6].

3.3. Iskop pod zaštitom dijafragme

Ovaj se način vrlo često koristi u gradovima tijekom iskopa tunela podzemnih željeznica i drugih objekata. Dijafragma može biti izvedena kao niz bušenih pilota ili kao klasična armiranobetonska dijafragma, (slika 3.5.). i (slika 3.6.). Prednost ovog načina građenja je što uz dobru organizaciju građenja, poremećaj prometa na površini može biti minimalan [5].



Slika 3.5. Princip izgradnje tunela pod zaštitom dijafragme [5].



Slika 3.6. Princip izgradnje tunela pod zaštitom dijafragme [5].

Kontinuirana dijafragma izrađena u tlu prema modernim metodama treba sigurno podnositi aktivni tlak okolnog tla i eventualno hidrostatski predtlak. Horizontalne sile preuzimaju bušene i injektirane zatege u obliku sidra ili vodoravni konstrukcijski elementi koji se izvode u prostoru omeđenom dijafragmom. Dijafragma se može dosegnuti veća dubina nego pomoću zabijenih zagata (više od 30 m). One su nepropusne pa sprječavaju prodor podzemne vode u građevnu jamu [7].

Osnovne radnje pri izvedbi su:

- Izvedba uvodnog kanala,
- Iskop rova u tlu,
- Ugradnja armaturnog koša,
- Ugradnja ispune,
- Uređenje vrha stijenske [7].

4. MINIRANJE

Kod izrazito čvrstih stijena kao osnovni način dobivanja mineralnih sirovina primjenjuje se miniranje. Pri dobivanju mineralnih sirovina miniranjem najvažnija zadaća je optimiranje zone drobljenja ili usitnjavanja stijene. To u praksi znači odabrati najpovoljniju vrstu rudarskog eksploziva za miniranje određene vrste stijene, za koji je iskorištenje potencijalne energije eksplozivnog naboja najveće, a gubici te iste energije najmanji [16].

U površinskim kopovima uvedena je metoda miniranja s dubokim minskim bušotinama. Pri tome se odjednom otpucavaju velike količine eksplozivnih punjenja, uslijed čega nastaju oscilacije okružujućeg tla, odnosno umjetni potres. Za bušenje minskih bušotina postoje različiti tipovi bušilica koje su opremljene bušaćim priborom za rotacijsko ili udarno-rotacijsko bušenje, ovisno o vrsti stijene [8].

Miniranje stijenske mase obavlja se uglavnom za potrebe:

- razlamanja stijene ili rudnog tijela (masovna miniranja radi eksploatacije rudača ili stijenske mase kako bi se dobio materijala za gradnju),
- kreiranja podzemnog ili površinskog prostora (tuneli, usjeci i zasjeci, temeljenje i slično).

Kada se miniranje obavlja u blizini površine, često se pojavljuje problem zaštite okoliša. Miniranje u blizini postojećih zgrada, tunela u eksploataciji, naftovoda, plinovoda, vodovoda i slično, ne smije oštetiti iste. U ovom slučaju se učinkovitost miniranja smanjuje a troškovi rastu [5].

Utjecaj miniranja na okoliš podrazumijeva ograničenja sljedećih efekata miniranja:

- vibracije koje mogu oštetiti postojeće građevine,
- štete koje uzrokuju leteći fragmenti stijene,
- buka se mora svesti na dopuštenu mjeru,
- količina prašine se mora svesti na dopuštenu mjeru [5].

4.1. Eksplozivi

Eksplozivi su kemijski spojevi koji zagrijavanjem, udarcem, trenjem ili paljenjem u kratkom vremenskom razdoblju oslobađaju veliku količinu energije. Primjenjuje se najviše u rudarstvu i građevinarstvu, a u specijalna miniranja ubrajaju se podvodna i konturna miniranja, rušenje građevina, miniranje leda i snježnih lavina, miniranje u poljoprivredi i šumarstvu, te miniranje radi konsolidacije slabo nosivog terena [16].

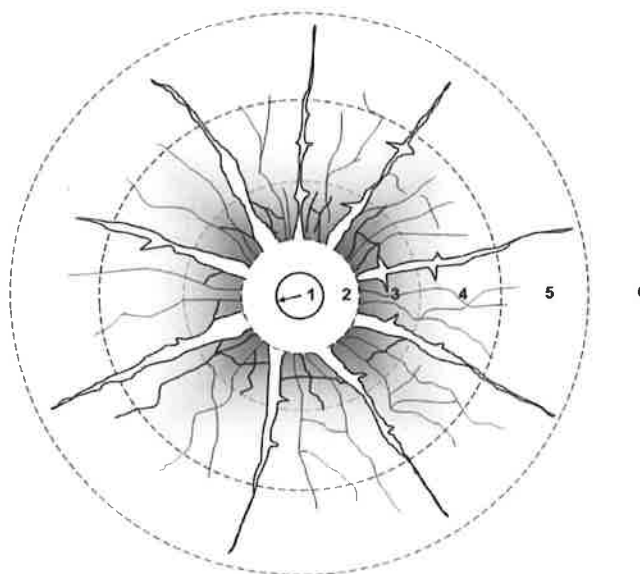
Kod gotovo svih eksploziva kemijska je reakcija trenutna oksidacija: potrebni kisik nalazi se u molekulama samog eksploziva, na primjer sumpor i ugljen u crnom barutu izgaraju na račun kisika kojeg u salitri (KNO_3) ima oko 50%. Crni barut je homogenizirana 75%-tna smjesa kalijevog nitrita (KNO_3), 12% sumpora (S) i 13% drvnog ugljena. Crni barut je i danas nezamjenjiv u izradi sporogorućeg štapina. Godine 1865. Alfred Nobel je objavio svijetu svoj izum - detonacijsku kapicu koja je sadržavala živin fulminat, osjetljiv eksploziv pomoću kojeg se nitroglicerina mogao sigurno paliti u svako doba. Taj upaljač bio je osnova za svaku daljnju tehnologiju eksploziva. Nitroglicerina je naziv za ester glicerola i nitratne kiseline. To je eksplozivno ulje od kojeg se izrađuje dinamit. Moderni eksplozivi dijele se na potisne (deflagrantne) eksplozive i brizantne eksplozive. U deflagrantne eksplozive spadaju baruti i eksplozivna salitra, izazivaju eksploziju prvog reda kod koje je brzina detonacije manja od oko 1000 m/sek. Brizantni eksplozivi izazivaju eksploziju drugog reda čija je brzina detonacije veća od 1000 m/sek. Gospodarski eksplozivi dijele se prema konzistenciji ili agregatnom stanju, na praškaste, granulirane, poluplastične, plastične i vodoplastične - kašaste brizantne eksplozive [9].

Minersko-tehničke značajke gospodarskih eksploziva su: brzina detonacije (brzina širenja detonacijskog vala kroz eksploziv odnosno brzinu širenja eksplozije kroz eksploziv; u m/s, za gospodarske eksplozive iznosi od 3000 m/s do 7000 m/s), a zatim brizantnost (razorna snaga koja se utvrđuje kao tlak detonacije), snaga (radna sposobnost eksploziva), prijenos detonacije (razmak prijenosa detonacije s patrone na patronu; u cm) kao i energija eksploziva, obujam plinova, specifični tlak, temperatura eksplozije, gustoća eksploziva, bilanca kisika, osjetljivost (na udar, trenje iniciranje, toplinsko djelovanje i slično) te otpornost na vodu, na mraz i slično [9].

4.2. Djelovanje detonacije na stijenu

Prilikom detonacije eksplozivni naboj prelazi iz čvrstog u plinovito stanje. To je egzotermna reakcija pri kojoj se oslobađa velika količina topline i plinova. Uslijed velike brzine i visoke temperature 2000 – 4000 °C u zatvorenom i ograničenom minskom prostoru naglo se povećava tlak plinova. Radi tog na stijenama minskog prostora nastaje tlačni udarni val koji se širi na sve strane brzinom od 1500 do 5000 m/s, ovisno o gustoći stijenske [8]. Od centra eksplozivnog naboja, ili zone eksplozije, slika 4.1, u stijeni, kao mediju kružno se oblikuju:

1. minska bušotina,
2. zona drobljenja,
3. značajno frakturirana zona,
4. umjereno frakturirana zona,
5. malo frakturirana zona i
6. neporemećena stijenske masa.



Slika 4.1. Zona djelovanja eksplozije u stijeni [5].

Prema stupnju raspucanosti razlikuju se lako, srednje i teško minirljive stijene. Lako minirljivim stijenama smatraju se jako raspucane i razdrobljene stijene. Osim toga, prema J.A. Tangajevu, minirljivost stijene ocjenjuje se i na osnovi brzine širenja uzdužnih valova, tablica 4.1. [5].

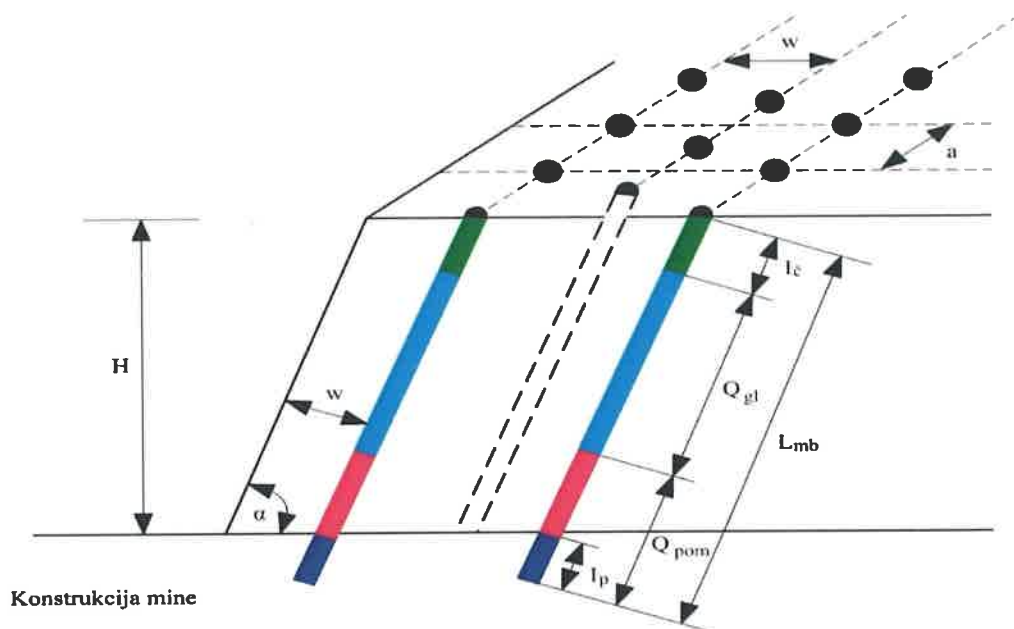
Tablica 4.1 Minirljivost stijena prema J.A Tangajevu [5].

Stijena	Brzina širenja uzdužnih valova m/s
Lako minirljiva	900 do 1800
Srednje minirljiva	1800 do 2500
Teško minirljiva	Više od 2500

Kada je na osnovi minimalnih troškova bušenja određena optimalna visina etaže H, pristupa se proračunu ili pokusnom utvrđivanju osnovnih veličina za miniranje s plitkim ili dubokim minskim bušotinama, a to su [5]:

- razmak minskih bušotina a [m],
- linija najmanjeg otpora (izbojnica) w [m],
- duljina minskih bušotina L_{mb} [m],
- nagib minskih bušotina α [0],
- promjer minskih bušotina D [mm],
- vrsta eksploziva
- količina glavnog eksplozivnog punjenja Q_{gl} [kg],
- količina pomoćnog eksplozivnog punjenja Q_{pom} [kg],
- duljina čepa minskih bušotina l_c [m],
- duljina probušenja l_p [m].

Udarno rotacijsko bušenje najčešće je u primjeni na kamenolomima tehničko-građevnog kamena. Izbušene i eksplozivom napunjene bušotine različitih promjera i duljina nazivaju se mine. Na slici 4.2. su prikazani osnovni konstruktivni elementi trorednog minskog polja. Proračuni i pokusna miniranja moraju zadovoljavati poglavito zahtjev željene granulacije minirane stijenske mase kod proizvodnih miniranja [5].



Slika 4.2. Osnovni elementi minskog polja [5].

Na slici 4.3. vidi se izbušena minska bušotina, a slika 4.4. prikazuje punjenje minske bušotine eksplozivom iz svibnja 2017. godine.



Slika 4.3. Minska bušotina [16].



Slika 4.4. Punjenje minske bušotine eksplozivom. [16].

Kako bi se ostvarila čim pravilnija kontura iskopa s minimalnim oštećenjem stijenske mase u zidovima iskopa, danas se uglavnom koriste dvije tehnike miniranja koje se jednim imenom nazivaju konturnim miniranjem (contour blasting):

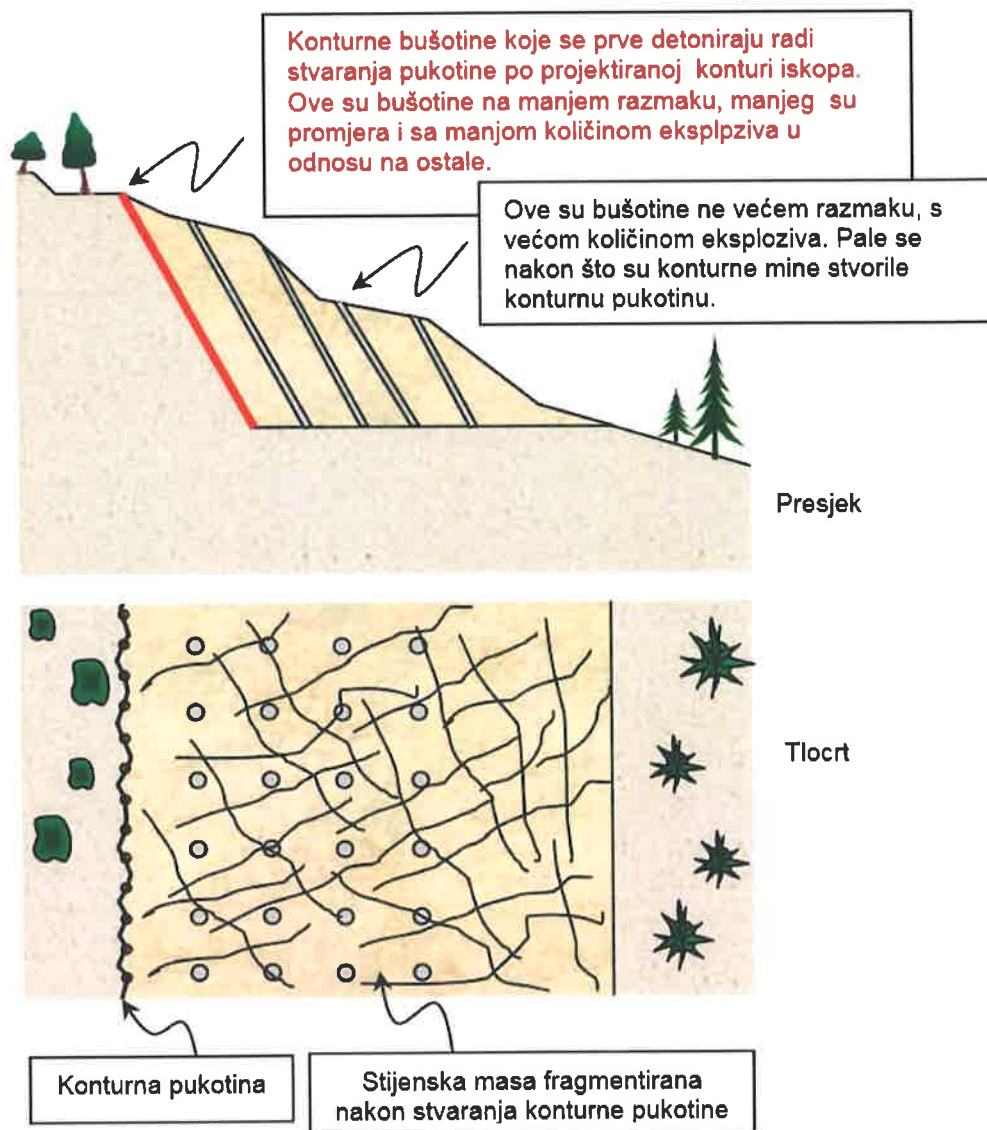
- prespliting (pre-split) metoda,
- glatko miniranja (smooth-wall blasting).

Prespliting (pre-split) metoda

Kada se miniranje obavlja na površini ili blizu površine terena, obično se koristi tehnika prethodnog stvaranja pukotine po projektiranoj konturi iskopa. Ova je metoda poznata kao prespliting (pre-split) metoda. Osnovna karakteristika ove metode je da se u prvoj fazi miniranja stvori pukotina po konturi projektirane plohe iskopa a nakon toga se, s vremenskim pomakom koji se mjeri milisekundama, minira ostali dio stijenske mase. Na ovaj se način stijenska masa koja ostaje iza plohe iskopa izolira od negativnog utjecaja masovnog miniranja [5].

Konturne bušotine se izvode na malom razmaku a količina eksploziva treba biti dovoljna samo za stvaranje pukotine koja će bušotine povezati. Ove minske bušotine nisu predviđene za fragmentiranje stijenske mase [5].

Nakon što je konturna pukotina stvorena, aktivira se glavno misko punjenje sa svrhom fragmentiranja stijenske mase. Pri tome se udarni valovi reflektiraju od prethodno stvorene konturne pukotine, a također dolazi do disipacije tlaka u plinovima koji su posljedica eksplozije. Na taj način masovno miniranje (bulk blast), ima mali učinak na stijenu iza konturne pukotine, slika 4.5. Za stabilnost kosine je naročito bitno da stijenska masa bude čim manje poremećena miniranjem. Na taj se način značajno smanjuju troškovi održavanja.



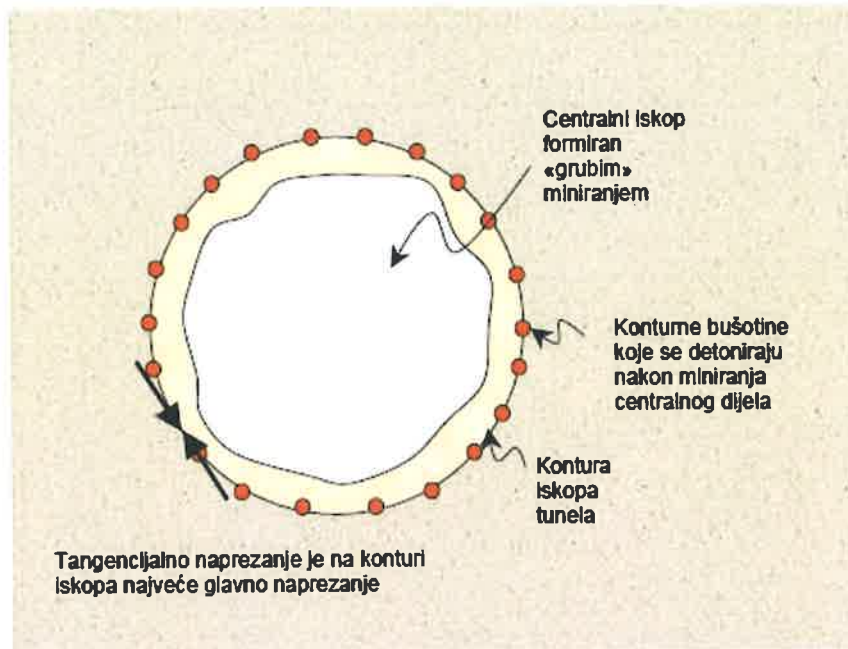
Slika 4.5. Osnovni principi prespliting tehnike miniranja [5].

Za uspješno prespliting miniranje treba ispuniti slijedeće uvjete:

- Konturne bušotine moraju biti paralelne i u ravnini projektiranoj završne plohe iskopa,
- Konturne bušotine moraju biti na malom razmaku. Razmak bušotina ne smije biti veći od desetstrukog promjera bušotine,
- Bušotine moraju biti napunjene s manjom količinom eksploziva i eksplozivno punjenje ne smije dolaziti u dodir sa zidovima bušotine (decoupled) čime će se lokalna raspadanje u prah (pulverization) svesti na minimuma a efekt plinova pod tlakom će biti maksimalan,
- Sve se konturne bušotine detoniraju istovremeno što će imati maksimalni učinak na stvaranje konturne pukotine,
- Osigurati kvalitetno bušenje (pravilna dubina i nagib bušotina čime će se ostvariti uvjet njihove paralelnosti u ravnini konture iskopa) [5].

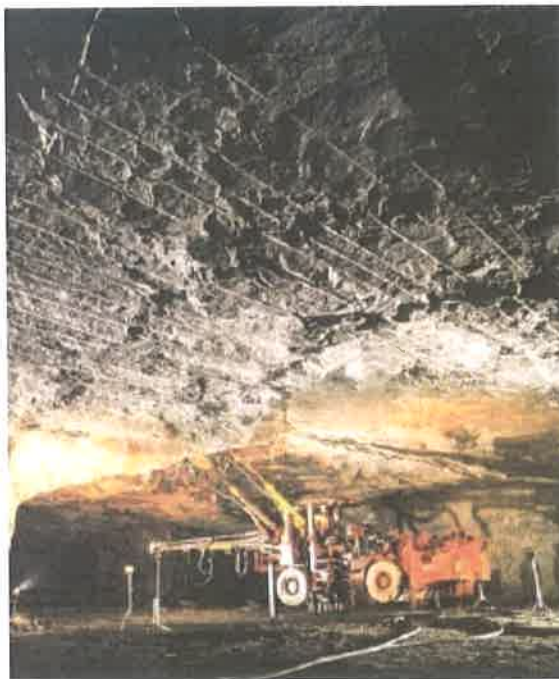
Glatko miniranje (smooth-wall blasting)

Glatko miniranje razvijeno je u Švedskoj 1950-tih i 60-tih. Slika 4.6., prikazuje osnovni princip glatkog miniranja na primjeru iskopa tunela kružnog poprečnog presjeka. U prvoj se fazi minira veći dio tunela “grubim miniranjem” (centralni iskop) što će za posljedicu imati pojavu visokih tangencijalnih naprezanja na projektiranoj konturi tunela. Tangencijalno naprezanje predstavlja veće glavno naprezanje jer su radijalna naprezanja gotovo zanemariva. Ako se podsjetimo da se kod prespliting tehnike miniranja, pukotina otvara u ravnini najvećih glavnih naprezanja, dolazimo do osnovne filozofije glatkog miniranja: superponiranja utjecaja efekta miniranja i povoljne orijentacije glavnih naprezanja [5].



Slika 4.6. Princip glatkog miniranja na primjeru iskopa tunela kružnog poprečnog presjeka [5].

Za uspješno glatko miniranje, slika 4.7., treba ispuniti sve uvjete izvođenja konturnih bušotina koji su navedeni za prespliting miniranje.



Slika 4.7. Jasni tragovi minskih bušotina, govore o kvalitetnom miniranju ali i o kvalitetnoj stijenskoj masi [5].

5. NATM

Primjena suvremenih metoda izgradnje tunela omogućila su stečena iskustva kod klasičnih metoda gradnje. Razvitak tunelogradnje treba pripasti geološkim i geofizičkim istraživanjima i razvitku disciplina kao što su mehanika stijena i mehanika tla. Suvremene metode nisu najracionalnije za gradnju kratkih tunela i kod vrlo promjenjivih geoloških i hidrogeoloških uvjeta zbog velikih investicijskih ulaganja radi nabave potrebne opreme koja se koristi kod primjenjivanja suvremenih metoda gradnje.

Među najpopularnije metode gradnje tunela spada Nova austrijska tunelska metoda (NATM). U klasičnom smislu NATM nije metoda gradnje 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 je dao službenu definiciju NATM-a. Nova austrijska tunelska metoda je osnovana na konceptu da stijena ili tlo koji okružuju podzemni otvor postaje dio nosive konstrukcije kroz aktivaciju nosivog prstena.

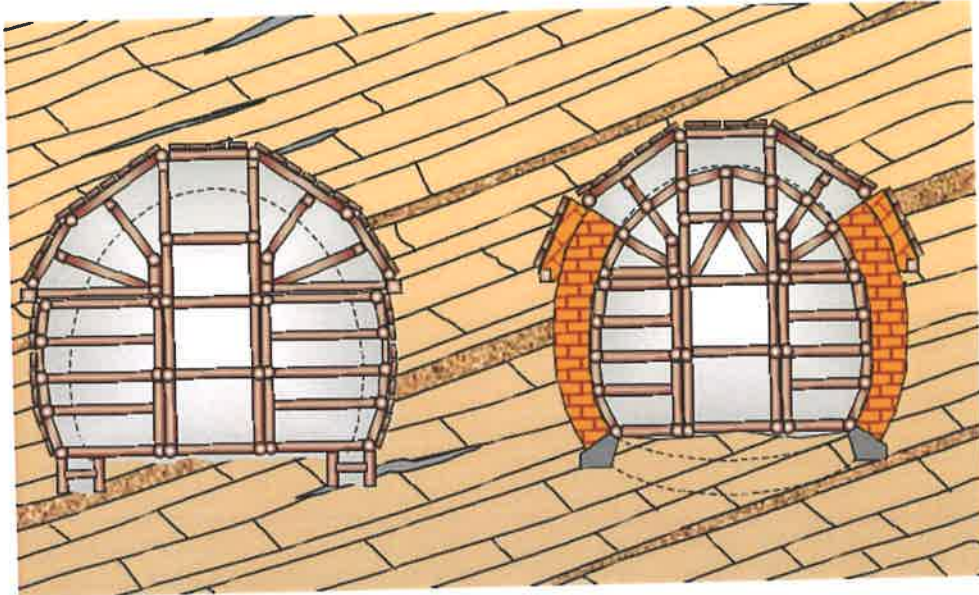
Cilj Nove austrijske tunelske metode je smanjivanje pojava jednoosnog ili dvoosnog stanja naprezanja u masivu, te zadržati višeosno ili stvarno troosno stanje naprezanja u svim koracima gradnje [10].

5.1. Tunelogradnja prije NATM

Tradicionalna tunelogradnja do polovine prošlog stoljeća, koristila je u početku drvenu slika 5.2., a kasnije i čeličnu podgradu za privremeno stabiliziranje tunela do ugradnje konačne podgrade. Konačna podgrada bila je zidana ili od betona. Kod ovog načina građenja, opterećenje podgrade bila je posljedica dezintegracije i razrahljenja okolne stijene.

Teorije ovih opterećenja razvili su Komarell, Terzaghi i dr. S obzirom na raspoložive tehnike iskopa i mnogo različitih faza iskopa, od iskopa do kompletiranja podgrade prolazilo je puno vremena što je pogodovalo razrahljenju stijenske mase. Rezultat ovakvog načina građenja bila su vrlo velika nepravilna opterećenja što je rezultiralo

debelom podgradom. Međutim, još u to vrijeme znanstvenici su razumjeli potrebu reduciranja deformacija s ciljem korištenja nosivog kapaciteta stijenske mase i recipročnog odnosa između otpornosti podgrade i deformacija slika 5.1. [5].



Slika 5.1. Stara austrijska tunelska metoda [5].



Slika 5.2. Teška drvena podgrada u tunelu Moffat, 1923. (USA) [5].

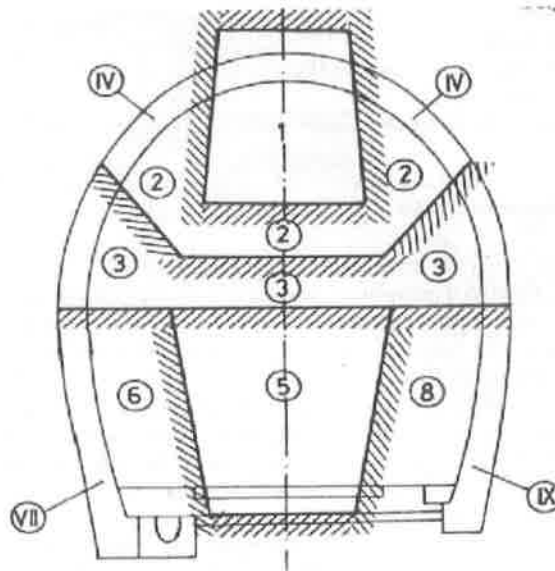
Tradicionalne metode prije NATM-a bile su bazirane na jednom ili više potkopa, prvo se izvodi jedan potkop, obično trapezastog presjeka do 10 m². Do polovine prošlog vijeka bila je korištena drvena (rudarska) podgrada od oblica, gredica i dasaka s metalnim spojenim elementima. Konačna podgrada bila je zidana ili od betona. S obzirom na mnogo različitih iskopa, od iskopa do kompletiranja podgrade prolazilo je mnogo vremena što je dovodilo do slabljenja stijenske mase. Rezultat ovog načina gradnje bila su vrlo velika nepravilna opterećenja što je rezultiralo debelom podgradom. Postoji niz tradicionalnih metoda koje se razlikuju prema redosljedu otvaranja profila i načinu formiranja konstruktivnog sistema. Osnovne tradicionalne metode su:

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

5.1.1. Belgijska metoda

Kod gradnje belgijskom metodom izvode se iskopi smjernih potkopa u kaloti, te se nakon toga proširuje profil na bokove. Proširenjem profila ispod već iskopanog dijela profila, oslobađa se intenzivnih naprezanja, što omogućava lakši iskop donjeg dijela profila. Nakon iskopa gornjeg dijela profila po cijeloj širini, izvodi se obloga kalote. Kad se to završi slijedi iskop srednjeg dijela profila prema dolje uz istovremeno podupiranje izvedene obloge kalote. Blokovi obloge se dovršavaju po posljertku iskopa donjeg dijela profila na punu širinu.

Prva dio kritične faze je uklanjanje podgrade na razmaku od 75 - 100 cm, to znači da se stijena oslobađa od podupirača i stvaraju se pomaci. Nakon toga slijedi druga faza, iskop blokova ispod već izvedene kalote obloga, koja će u tom trenutku ostati bez krutog oslonca i oslonit će se na posebnim podupiračima, kako je i prikazano na slici 5.3. Ako ima potrebe za podnožnim svodom on se izvodi nakon zatvaranja podgrade.

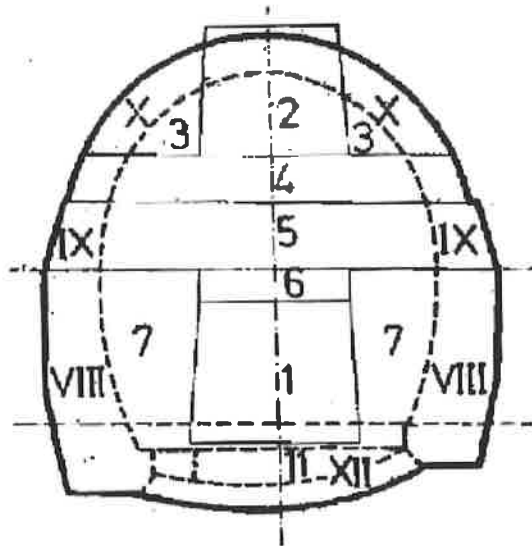


Slika 5.3. Shematski prikaz redoslijed radova kod Belgijske metode [10]

5.1.2. Stara austrijska metoda

Stara austrijska metoda iskopa tunela započinje potkopom trapezastog profila. Glavni prijenos odvija se na donjem dijelu potkopa, nakon kojeg slijedi gornji na razmaku od maksimalno deset metara. Vertikalni proboj između dva pokopa izvodi se na razmaku od svakih deset metara, a služi prilikom presipavanja iskopanog materijala iz gornjeg potkopa u donji. Nakon toga slijedi proširenje bočnih dijelova potkopa počevši od nivoa poda gornjeg potkopa postepeno prema dolje, pri čemu podgrađivanje prati iskop.

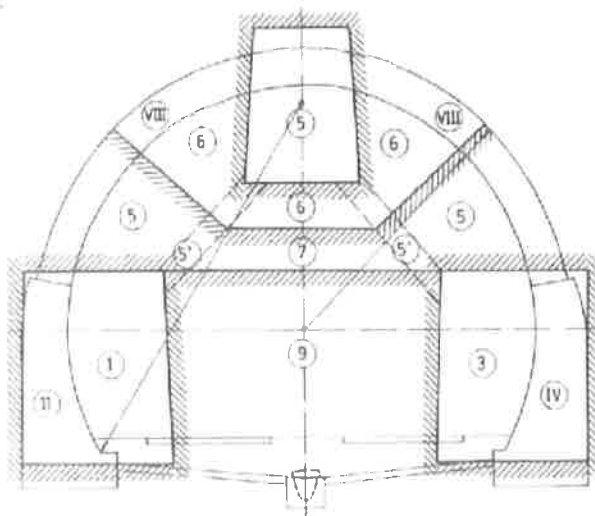
Prilikom oslobađanja cijelog profila, stijena se oslobađa cijele podgrade i postavlja se oplata. Obloga se betonira ili zida kamenim i betonskim blokovima. Izvodi se odozdo prema gore i oslanja se na oplatu sve dok se luk podgrade ne zatvori, kako je prikazano na slici 5.4.



Slika 5.4. Redoslijed radova kod stare austrijske metode [10].

5.1.3. Njemačka metoda

Kada govorimo o njemačkoj metodi iskopa još se podrazumijeva naziv metoda trećeg iskopa, te se često primjenjuje za veće profile podzemnih prostorija. Radi uštede na materijalu prilikom gradnje ovom metodom, kalota iskopa i oplata za konačnu oblogu oslanja se na centralnu jezgru. Centralna jezgra se kopa nakon što je izveden svod konačne obloge. Ova metoda se primjenjuje u teškim uvjetima građenja. Postupak građenja tunela Njemačkom metodom prikazano je na slici 5.5.



Slika 5.5. Shematski prikaz redoslijeda radova kod Njemačke metode [10]

5.1.4. 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 [10].

6. PRINCIPI IZRADE TUNELA PO NATM-U

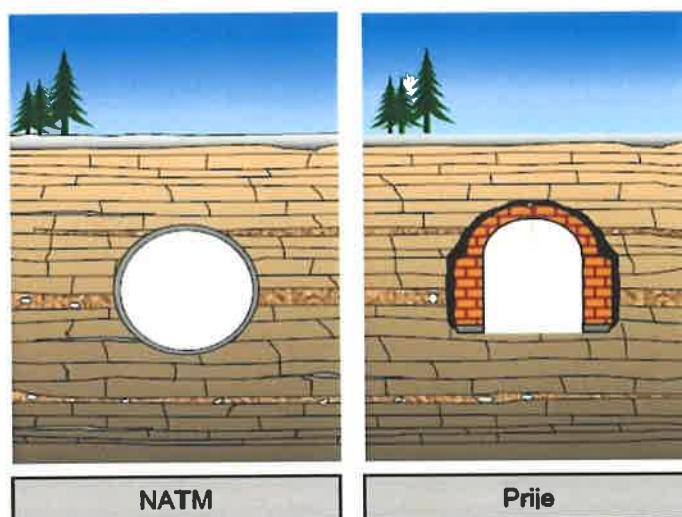
NATM je osnovana na konceptu da tlo ili stijena koji okružuju podzemni otvor postaje dio nosive konstrukcije kroz aktivaciju nosivog prstena [5].

NATM fokusira kompozitno ponašanje strukture koja se sastoji od tunelske podgrade (lining/support) i okolnog tla. Korištenje okolnog tla kao glavne nosive komponente, nije ekskluzivno princip samo NATM. Ali, bazična filozofija NATM je aktiviranje luka (groundarch) ili prstena mobiliziranjem nosivog kapaciteta tla/stijenske mase koliko god je to moguće, uključujući i odgovarajući tretman tla [5].

Glavni zadatak konstrukcije podgradskog sustava je da stijensku masu oko izbijenog otvora tunela pretvori u samonosivu konstrukciju koja omogućava stvaranje sigurne podzemne šupljine.

Imamo 5 osnovnih principa NATM, a to su:

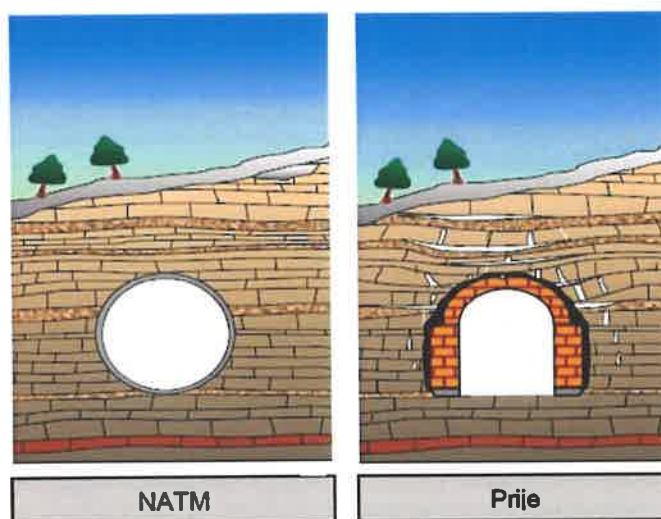
- **Osnovna nosiva komponenta tunela je stijenska masa.** Primarna i sekundarna podgrada (preliminarysupportandfinalining) imaju samo tzv. “confiningefect”. One samo služe za uspostavljanje nosivog prstena (loadbearing ring) ili trodimenzionalne sferične nosive ljuske u stijenskoj masi.



Slika 6.1. Stijenska masa kao glavni nosivi element [5].

- **Održavaj čvrstoću stijenske mase.** Treba izbjegavati štetno razrahljenje (loosening) pažljivim iskopom i trenutnom ugradnjom podgrade.

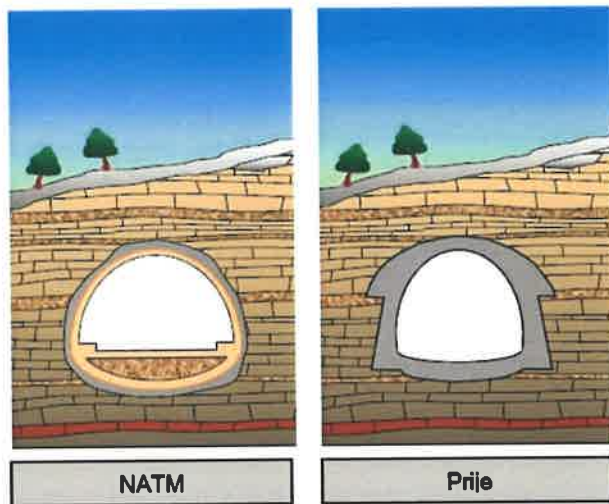
Treba izbjegavati razrahljenje stijenske mase jer ono izaziva gubitak čvrstoće. Tlo niže čvrstoće jače opterećuje podgradu.



Slika 6.2. Izbjegavanje razrahljenja stijenske mase [5].

- **Poprečni profil treba biti zaobljen.** Treba izbjegavati koncentraciju naprezanja u kutovima gdje može započeti progresivni slom.

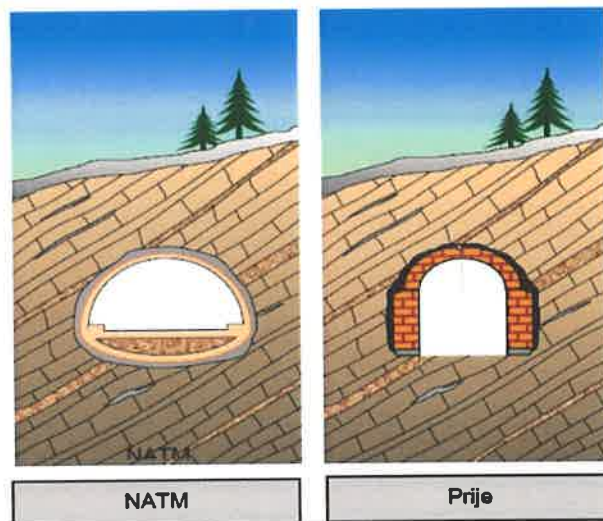
Poprečni profil tunela treba biti zaobljen kako bi se izbjegla koncentracija naprezanja. Koncentracija naprezanja u nekom kutu poprečnog profila može provocirati progresivni slom stijenske mase u široj zoni.



Slika 6.3. Zaobljeni poprečni profil tunela [5].

- **Podgrada treba biti tanka i fleksibilna.** Primarna podgrada (primary support) treba biti fleksibilna kako bi se momenti savijanja sveli na minimum i olakšala preraspodjela naprezanja bez izlaganja podgrade nepovoljnim reznim silama (sectional forces). Podgradu ne treba pojačavati povećanjem njene debljine već sidrenjem stijenske mase.

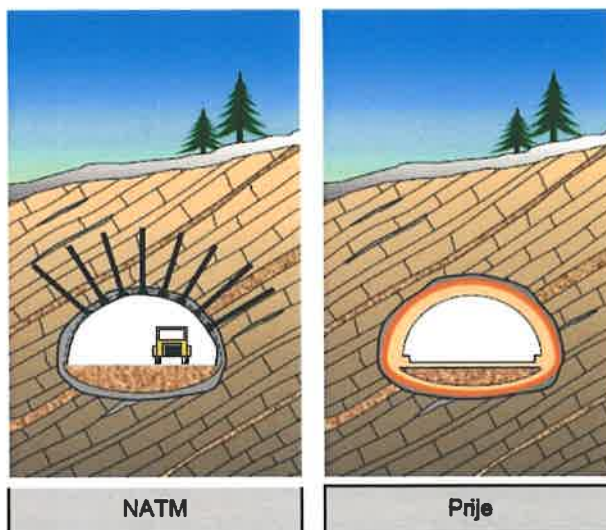
Treba koristiti tankostijenu primarnu i sekundarnu podgradu jer je ona savitljiva čime se izbjegava pojava većih momenata savijanja.



Slika 6.4. Upotreba tankostijene primarne podgrade [5].

- **Opažanja tijekom građenja (monitoring).** Opažanja tunela tijekom građenja integralni je dio NATM. Opažanjem i interpretacijom pomaka, deformacija, i naprezanja moguće je optimizirati radne procese i zahtjeve na podgradu [5].

Probleme stabilnosti treba rješavati pojačavanjem primarne podgrade (armaturne mreže, lukovi i sidra) a ne njenim podebljanjem.

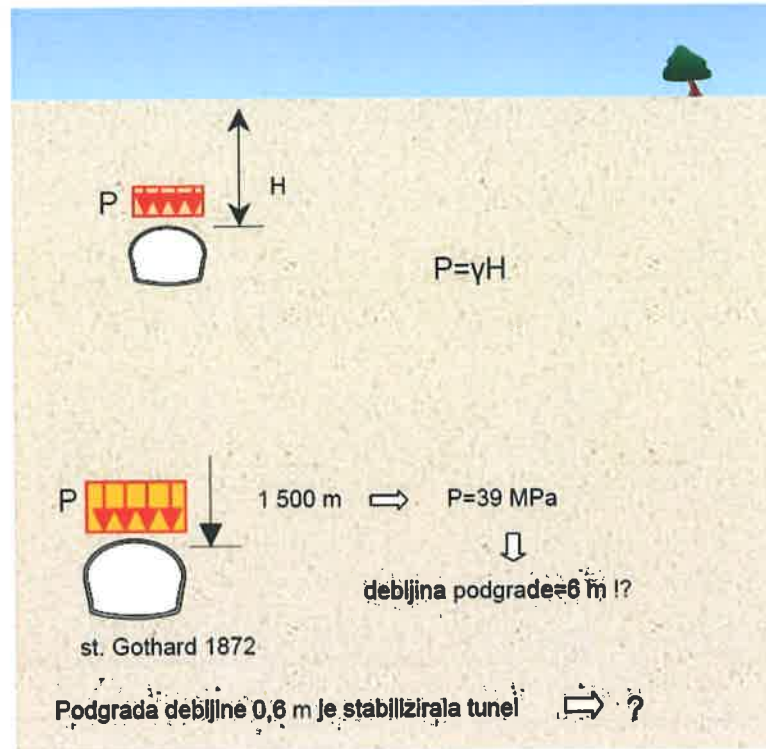


Slika 6.5. Pojačanja primarne podgrade [5].

6.1. Nosivi prsten

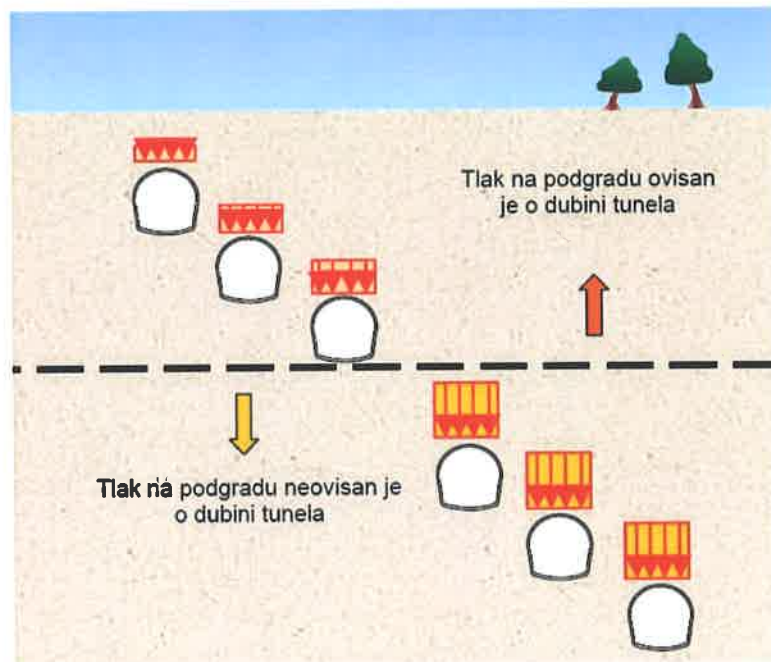
Za nosivi prsten u engleskom govornom rječniku koristimo izraze poput: protective zone, protective ring, ground ring. Prema Heimovoj hipotezi, tlak na podgradu linearno raste s dubinom tunela. Ova tvrdnja se u praksi nije pokazala točnom, na velikim dubinama za stabilizaciju tunela bila bi potrebna podgrada debljine od nekoliko metara, kao što je ti prikazano na slici 6.6.

Prema Himovoj hipotezi, na dubini od 1500 m, tlak na podgradu iznosio bi oko 39 MPa. Procjenjuje se da bi za ovo opterećenje trebala podgrada debljine 6 m, što je apsurdno. Tijekom građenja tunela st. Gothard (1872), tunel je bio stabiliziran podgradom debljine 0,6 m. Ova su iskustva pokazala da se na većim dubinama ne prenose sva opterećenja na podgradu [5].



Slika 6.6. Prikaz primjenjivosti Heimove hipoteze [5].

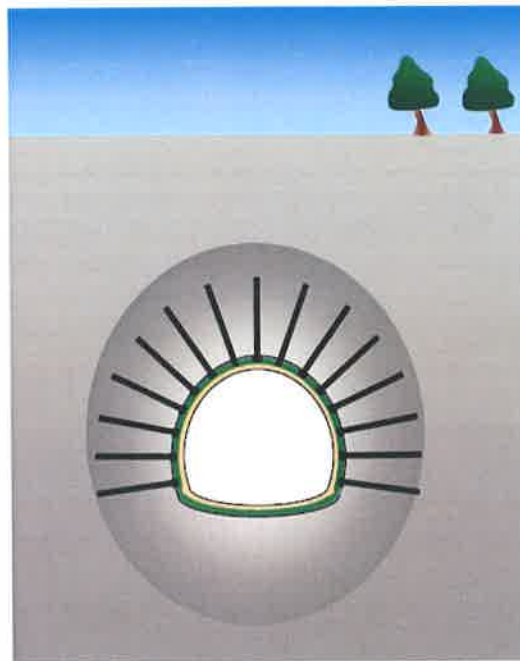
1879. godine Ritter je primijetio da utjecaj mase gornje ležećih naslaga nakon neke dubine ima zanemariv ili puno manji utjecaj na opterećenje stijenske mase koja djeluje na podgradu tunela, kako je prikazano na slici 6.7.



Slika 6.7. Nakon neke dubine, pritisci na podgradu se ne povećavaju linearno s dubinom [5].

Engesser 1882. godine definirao je lučno djelovanje iznad podzemne prostorije na tlu bez kohezije. Od tada je bila jasno formulirana veza deformacije stijenske mase i pritiska na podgradu. Wiesmann (1912.) govori o zaštitnoj zoni oko tunela u kojoj stijena preuzima na sebe opterećenje koje je trpjela iskopana stijena. Napominje da podgradu ne treba dimenzionirati tako da preuzme kompletna naprezanja, nego će veći dio naprezanja na sebe preuzeti zaštitna zona. Inženjeri trebaju svu pažnju posvetiti zaštiti ove zone, pod zaštitom podrazumijevamo zonu u kojoj se desila preraspodjela naprezanja. Maillart 1923. godine kao i Mohr 1957. godine. govore o zaštitnim zonama i povezanosti deformacije stijenske mase i pritiska na podgradu. Nosivi prsten nije jednostavno definirati, možda najjednostavniju i najjasniju definiciju dao je Golser 1996. godine., koja glasi:

Nosivi prsten je 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 (sidrene) zone [5], prikazano na slici 6.8.



Slika 6.8. Nosivi prsten (Golser, 1996) [5].

7. STROJNI ISKOP (TUNNEL-BORING MACHINES)

TBM-(eng. Tunnel-Boring Machine). Tunelski bušači strojevi su strojevi koji se koriste za iskop tunela bez obzira radi li se o strojevima za iskop u punom profilu tunela ili strojevima s pokretnom glavom. Također su poznati kao „krtice“, radi iskopa tunela kružnim poprečnim presjekom kroz različite slojeve tla i stijena. Koristimo ih za prolaz kroz sve vrste tla, od tvrdih stijena do pjeskovitog tla. TBM predstavlja oblik složene tehnološke opreme koja obuhvaća otkopne rotacijske strojeve i neke vrste rotacijskih štitova za mehanički iskop tunela u svim vrstama stijena u punom kružnom poprečnom presjeku.

TBM radi na način da tiska okretnu bušaču glavu na čelo iskopa, a po njoj su raspoređeni određeni alati-rezači. Prevladava uglavnom koncepcija disk rezača. Oni se okreću kao kotači i putuju koncentričnim krugovima po čelu iskopa. Pri tome na njih istodobno djeluje tlačna sila, uslijed čega oštrica rezača djeluje poput klina koji razara stijenu u obliku pločica. TBM obavlja istodobno niz radnih operacija, kao što je iskop stijene, zahvaćanje iskopanog materijala te njegovo premještanje kroz TBM i punjenje transportnih sredstava iza sebe. TBM kao tehnički sustav za sebe obuhvaća nekoliko podsustava: za bušenje, za upiranje i podupiranje, za unutrašnji transport iskopanog materijala, za otprašivanje, za odvodnju, za pogon, za energetiku, za upravljanje itd. Pogonski i energetske podsustav zajedno s dijelom transportnoga podsustava i podsustavom za otprašivanje te ostalom pomoćnom opremom za rad čine pomoćni podsustav TBM-a [11].

Ovisno o konstrukciji, strojevi se dijele na:

- Strojevi za iskop u punom profilu (krtice) (Full face tunnel boring machines),
- Strojevi s pokretnom glavom (Partial face tunnel boring machines),
- Blind shaft borer (bušenje),
- Raise borer (bušenje prema gore).

Strojevi za iskop u punom profilu

Mogu biti koncipirani za bušenje čvrste i tvrde stabilne stijene ili za bušenje srednje čvrste, odnosno razmjerno meke stijene ili kao otkopni rotacijski štitovi za iskop nestabilnih jako razlomljenih polučvrstih trošnih stijena. Strojove za iskop u punom profilu često nazivamo „krtice“.



Slika 7.1. Stroj za iskop tunela u punom profilu [5].

Strojevi s pokretnom glavom

Koristimo ih prilikom iskopa tunela kao što je prikazano na slici 7.2. Nalaze se učvršćeni na stabilnoj površini te sa pokretnom glavom razaraju stijensku masu, odnosno iskopavaju stijensku masu.



Slika 7.2. Stroj sa pokretnom glavom [5].

Raise borer (bušenje prema gore)

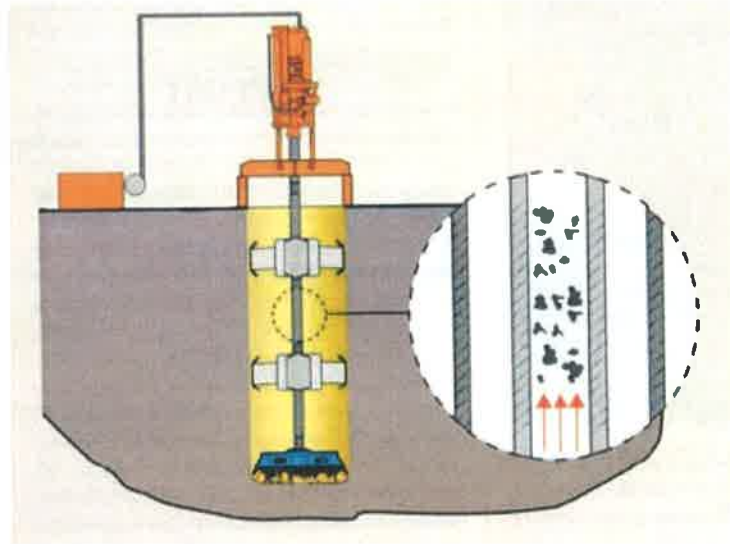
Bušenje prema gore slika 7.3. osmišljeno je za izgradnju osovina u stijenama do dubine od 2000 metara, pomoću koje stijenu možemo bušiti odozdo prema gore odnosno prema površini. Radi kompaktnog dizanja nudi visoku fleksibilnost, čak i prilikom prostornih ograničenja, te je ta metoda pogodna za različite primjene u rudarskoj industriji.



Slika 7.3. Raise borer [12].

Blind shaft borer (bušenje)

Za iskop rupa vertikalnog bušenja može se primijeniti postupak slijepog bušenja. Bušenje je temeljeno na rotacijskom drobljenju i u uklanjanju drobljene stijene vakumskim ispiranjem i usisavanjem kroz bušaču šipku prikazano na slici 7.4.



Slika 7.4. Blind shaft borer [5].

Ovisno o tome koristi li se ili ne koristi štiti, strojevi se dijele na:

- strojevi bez štita.
- strojevi sa štitom (shield TBM)

Strojevi bez štita

Koncentrični krugovi su tragovi razaranja stijene i predstavljaju putanju diskova pri rotaciji rezne glave (slika 7.5.). Vrlo čvrste stijene i stijene koje sadrže minerale visoke tvrdoće, znatno će povećati trošenje diskova na reznoj glavi što će za posljedicu imati velike troškove i smanjeno napredovanje.



Slika 7.5. Stroj bez štita [5].

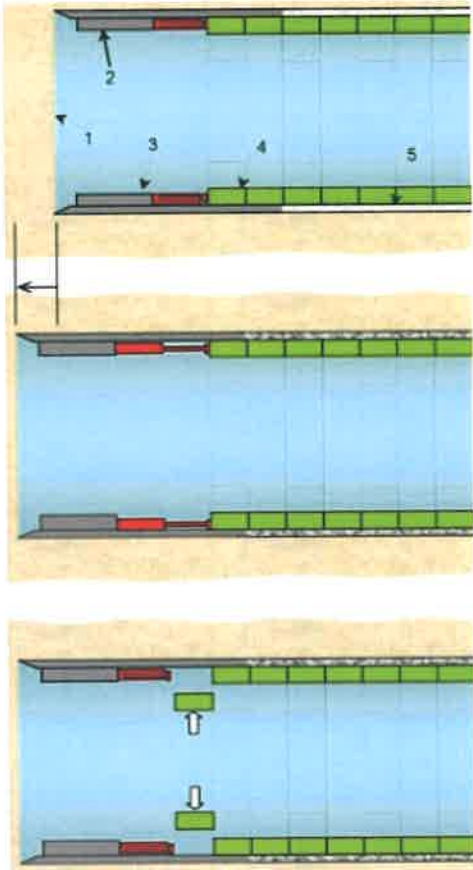
Strojevi sa štitom (shield TBM)

Štit je čelični cilindar slika 6.6. koji ima promjer tunela i pod čijom se zaštitom vrši iskop. Koristi se za iskop tunela u teškim geotehničkim uvjetima kada je teško osigurati stabilnost nepodgrađenog tunela (čela, kalote, bokova). Štit se u tunelogradnji prvi puta koristio za prolaz ispod rijeke Thames u Londonu 1823. godine (štit je patentirao Brunel 1818). Gotovo redovito, konačna se obloga tunela ugrađuje ispod štita tako da je materijal u kojem se kopa tunel vidljiv isključivo na čelu tunela [5].



Slika 7.6. Stroj sa štitom [15].

Princip iskopa tunela pod zaštitom štita prikazan je na slici 7.7. Kao što će se vidjeti, za iskop pod zaštitom štita koriste se sve metode strojnog i ručnog iskopa osim metoda masovnog miniranja (može se koristiti miniranje za sekundarno drobljenje pojedinačnih blokova stijene koja se nađe u tlu koje se kopa) [5].



Kazalo:

1-Čelo iskopa

2-Štit

3-Hidraulika za potiskivanje štita

Napomena: ako se radi o vrlo lošem tlu pumpani mort nije potreban jer samo tlo u kojem kopamo pumpani prostor koji ostane nakon klizanja štita.

Napredovanje iskopa prati klizanje štita za širinu jednog betonskog segmenta. Štit potiskuje snažne hidrauličke preše koje se nalaze između čelične konstrukcije štita i betonske obloge.

Umetanje novih segmenata obloge pod zaštitom štita.

Nakon što hidrauličke preše oslobode prostor, ugrađuju se segmenti betonske obloge.

Slika 7.7. Princip iskopa tunela pod zaštitom štita [5].

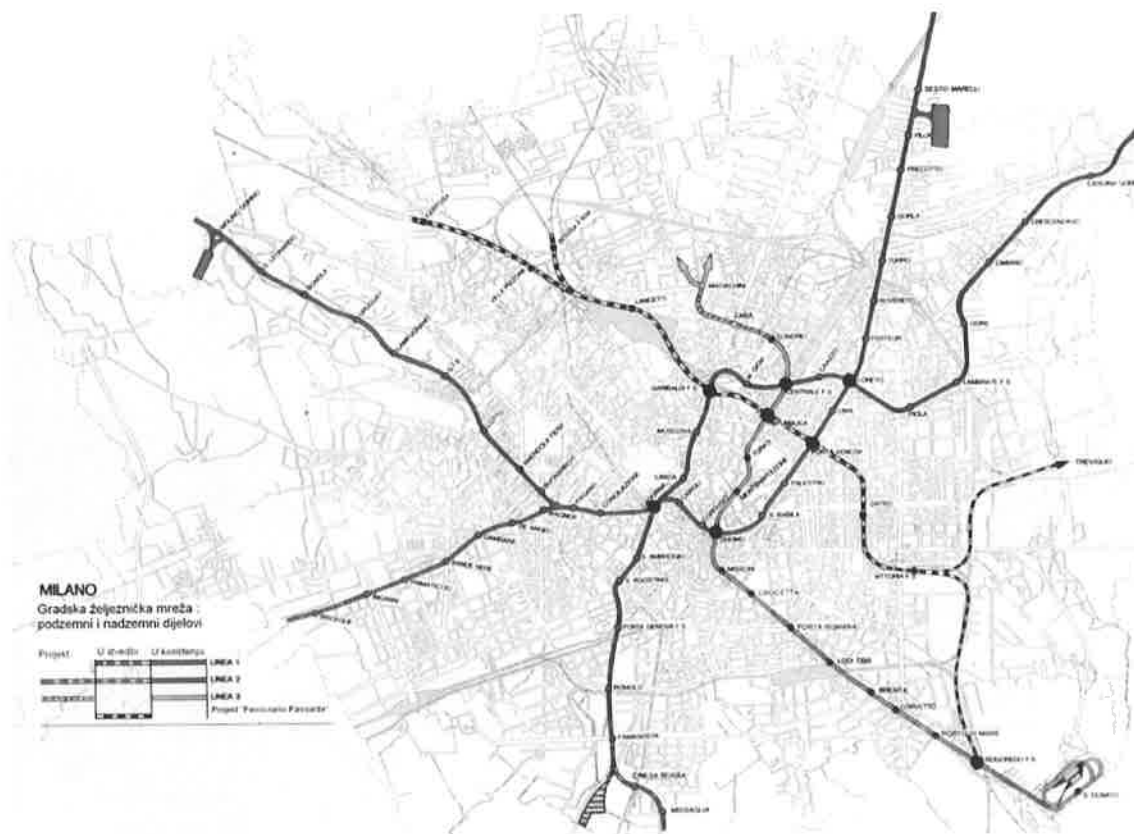
8. PRIMJER: ŽELJEZNIČKI TUNEL PASSANTE FERROVIARIO U MILANU

Ovaj primjer opisuje gradnju željezničkog tunela Passante Ferroviario u Milanu (slika 8.1.) koji spaja kolodvore Porta Garibaldi i Porta Vittoria. Trasa tunela sastoji se od tri dijela ukupne duljine 4.568,00 metara. Dvije tunelske cijevi bušene su iznad razine podzemne vode u aluvijalnom, pjeskovitom i šljunkovitom tlu. Tunelske cijevi bušene su pomoću TBM stroja, to je bio prvi stroj u Europi opremljen sustavom za proizvodnju kemijske pjene prema originalnom rješenju.



Slika 8.1. Lokacija projekta [17].

Grad Milano smješten je na sjeveru Italije, a prema popisu iz 2010. godine, ima 1,3 milijuna stanovnika. U njemu se nalaze dva glavna željeznička kolodvora - Porta Garibaldi i Porta Vittoria. Ti su kolodvori čelnog tipa i nisu izravno spojeni što je u skladu s načinom gradnje koji je prevladavao u devetnaestom stoljeću. Stoga bi nova željeznička linija, ukupne duljine 18.360 m, trebala povezivati te kolodvore. s regionalnim i državnim linijama te s kolodvorom Bovisa i Certosa koji se nalaze u sjeverozapadnom dijelu grada. Nova željeznička linija nosi naziv Passante Ferroviario (željeznički prolaz), a također je na četiri mjesta povezana i s postojećom gradskom mrežom [15].



Slika 8.2. Prikaz milanske željezničke mreže i podzemne željeznice - nova linija Passante Ferroviario označena je crno-bijelom linijom [18].

Novom će se linijom osigurati podzemna veza između kolodvora: Vittorie na jugoistoku, Garibaldi u središnjem dijelu grada te Bovisa i Certosana sjeverozapadu Milana. Planirana su i tri spoja te nove linije s postojećim milanskim sustavom podzemne željeznice, i to na raskrižjima podzemnih postaja (stanice podzemne željeznice: Garibaldi, Republica i Venezia) (slika 8.2.). Sveukupna duljina nove željezničke linije iznosi 18,36 km, s tim da duljina podzemnog dijela iznosi 11,3 km. Ukupna duljina iznosi 4568 m, od toga 4008 m otpada na izvođenje tunela tunelskim bušaćim strojem (TMB).

Tuneli prolaze kroz meko tlo: radi se o aluvijalnom, pjeskovitom i šljunkovitom tlu u zoni iznad razine podzemnih voda. Radi se uglavnom o nestabilnom materijalu zbog čega se čelo iskopa trebalo podupirati u toku iskopavanja. Abrazivnost pijeska prilično je velika [15].

Karakteristični podaci:

- kut trenja: 35 stupnjeva (32-35 stupnjeva)
- gustoća: 20 kN/m³
- kohezija c: 0
- granulometrijski sastav: veličina < 0,074 mm - 20 %
(glina < 5 %)
veličina > 2 mm - 70 %
veličina > 10 mm - 10 %
(do 100 mm) [17].

Koncepcija segmentne obloge

Segmentna obloga tunela izvedena je pomoću prstena širine 1,20 m. Obloga se sastoji od prstena unutarnjeg promjera 6,90 m i debljine 30 cm. Svaki se prsten sastoji se od 7 segmenata [15].

Armiranje segmentne obloge

Armatura za segmentnu oblogu dimenzionirana je u skladu s talijanskim normama za armirani beton. Prosječna količina armature za čitav tunel definirana je vrijednostima koje su iskazane u tablici 8.1., pri čemu je u obzir uzeta širina prstena 1,20 m i debljina 30 cm.

Tablica 8.1. Prosječna količina armature potrebne za segmentnu oblogu [15].

Opis	Iznos
Ukupna količina armature po prstenu	518,88 kg
Količina betona po prstenu, segment t = 30 cm	14,053 m ³
Količina armature po kubnom metru betona	36,92 kg/m ³
Količina armature po dužnom metru tunela	432,4 kg/m ¹

Projektiranje i izrada TBM-a

Tunelski bušaći stroj (TBM) za izvođenje tunelskog dijela projekta zamišljen je kao štiti s mogućnošću kopanja u promjeru od 8,03 m (s fiksnim dodatnim zahvatom od 15 mm) (slika 8.3.).



Slika 8.3. Postavljeni stroj TBM u tvornici NFM u Lyonu (Francuska) [19].

Tablica 8.2. Kapacitet i ostali podaci o tunelskom bušaćem stroju [19, 20].

Opis	Kapacitet
Promjer štita stroja	8,03 m
Duljina štita stroja	8,56 m
Duljina pratećeg vlaka	70 m
Težina	650 tona
Ukupna instalirana snaga	1.600 kW
Brzina rotacijske rezne glave	promjenljiva, od 0 do 1 okr/min u oba smjera, hidraulička pogonska jedinica
Trenutačna brzina prodiranja	70 mm/min
Nazivni okretni moment	9.000 kNm
Maksimalni neiskoristivi moment	13.500 kNm
Ukupni potisak	19 preša x 2.900 kN = 55.100 kN
Podizač segmenta	hod +/- 220 stupnjeva

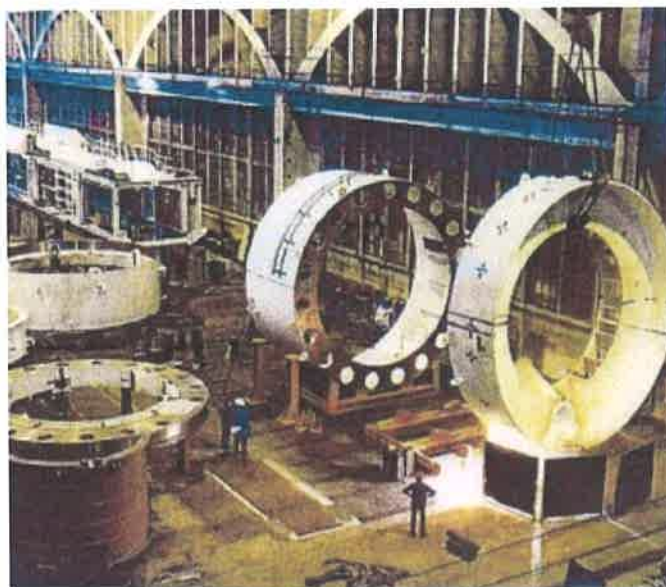
Primjena štita i brzina napredovanja

Iskop strojem počeo je u rujnu 1992. godine, a prosječna brzina napredovanja nakon početnoga jednomjesečnog razdoblja učenja iznosila je otprilike 10 m/dan. Prva cijev duljine 2.054 m dovršena je nakon 14 mjeseci, a najviše je u jednom danu iskopano oko 17 metara (tablica 8.3.).

Tablica 8.3. Iskaz napredovanja [15].

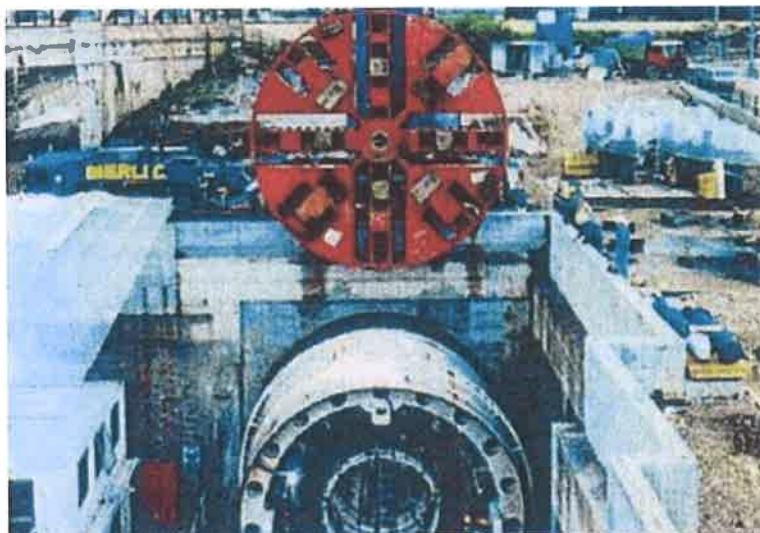
Opis	Iznos	Iznos
Vrijeme	Prva cijev L1 = 2.054 m	Druga cijev L2 = 1.950 m
Najbolji dan (3 smjene)	14 prstenova (tj. otprilike 17 m)	20 prstenova (tj. otprilike 24 m)
Najbolji tjedan (7 dana, 3 smjene)	88 prstenova (tj. otprilike 106 m)	_____
Najbolji mjesec (3 smjene)	267 prstenova (tj. otprilike 320 m, 26 dana)	390 prstenova (tj. otprilike 468 m, 31 dan)
Vrijeme izvođenja	14 mjeseci	7,5 mjeseci

Prije početka rada stroj je demontiran u proizvodnom pogonu u Lyonu te je u dijelovima transportiran u Milano. Tamo je montiran u početnom oknu i pripremljen za iskop (slike 8.4. i 8.5.). Da bi se moglo početi s iskopom, u stražnjem dijelu stroja instalirana je okvirna konstrukcija. Zatim su aktivirane preše na zadnjem dijelu štita pa je tako bušeća glava uvedena u tunel.



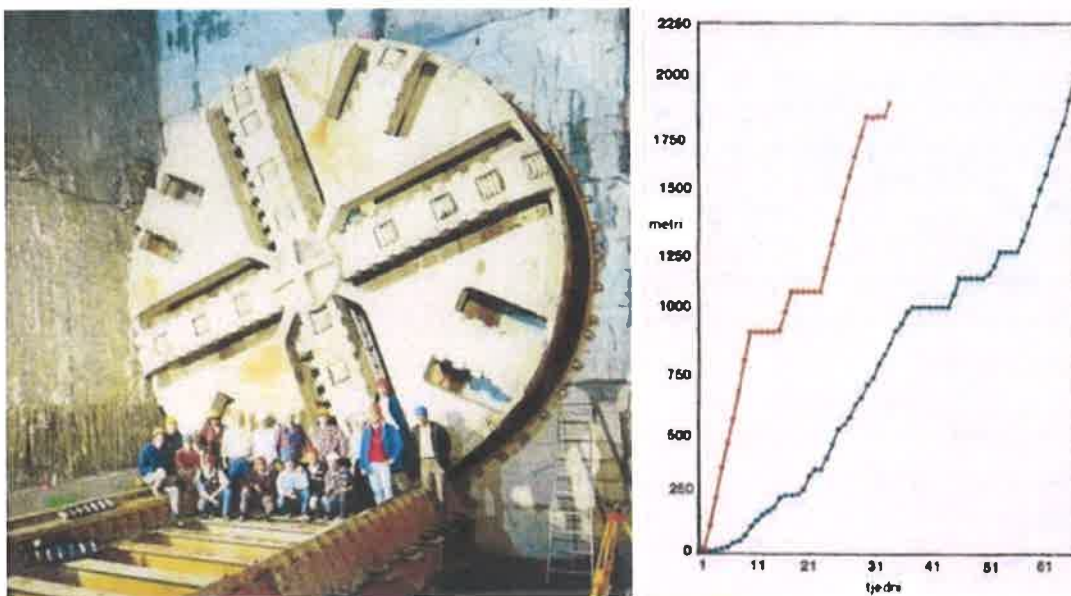
Slika 8.4. Montaža štita u tvornici i postavljanje pužastog transportera u polazno okno na gradilištu u Milanu [15].

Nakon što je čitav stroj uveden u tunel, instaliran je sustav podrške s kompletnom opremom. Brzina napredovanja prikazana je na dijagramu (slika 8.5.), a u iskazano vrijeme uključeno je i vrijeme potrebno za demontažu stroja i sustava podrške te za njihov prijenos kroz već izvedene građevine na stanicama Aprica i Lancetti. Nakon iskopa prve cijevi, graditeljima je trebalo 2 mjeseca da stroj prenesu do početnog mjesta te da obave pregradnje za iskopavanje druge cijevi [15].



Slika 8.5. Postavljanje stroja u početno okno na gradilištu u Milanu; prikaz stražnjeg dijela stroja s podizačem kojim se segmenti postavljaju u prstenove segmentne obloge[21].

Iskop druge cijevi trajao je mnogo manje od iskopa prve cijevi, posao je završen za samo 7,5 mjeseci.



Slika 8.6. Završetak prvog tunela probijanjem kroz zid na kraju; dinamika iskopa za obje cijevi (prva cijev: plavo, druga cijev: crveno) [21].

Koristi od projekta i tehničke implikacije

Primjenom rješenja kojim su spojena dva željeznička kolodvora u Milanu znatno se popravilo stanje u željezničkom prometu, a to je i bio osnovni cilj ovog projekta. Međutim, bez obzira na sve te nove metode i tehnologije, najvažnija zadaća na projektu bila je kontrola površinskih slijeganja. Površinska su se slijeganja mjerila i pratila kroz čitavo razdoblje upotrebe tunelskog štita. Slijeganja zabilježena duž trasa tih dviju tunelskih cijevi iznosila su mnogo manje od 10 mm, u rijetkim su slučajevima slijeganja ipak dosegala i do 25 mm [15].

Zaključak

Ovim radom analizirane su i obrađene najvažnije metode podpovršinskog iskopa. Poseban naglasak baziran je na opis iskopa tunela i podzemnih željeznica.

Prilikom miniranja u tunelima, proračunava se točna količina eksploziva potrebna za razlamanje stijenske mase, dubina iskopa minske bušotine i razmaka između istih. Vrlo je važno provesti istražne radove prije samog početka, da ne bi došlo do urušavanja stijene, te da se sigurnost ljudi i strojeva ne dovede u pitanje. Pravilnim rasporedom i odgovarajućom dubinom bušenja utječe se na smanjenje potrošnje eksploziva a time se smanjuju vršne brzine oscilacije te dubina zone oštećenja.

Osim miniranja u stijenskim masivima koriste se ostale metode iskopa opisane u ovom radu. Jedna od njih je strojni iskop (TBM- tunelski bušaći strojevi), koji se koriste za iskop tunela bez obzira radi li se o strojevima za iskop u punom profilu tunela ili strojevima s pokretnom glavom. Namijenjen je ponajprije u tvrdim stijenama, ali se primjenjuje i za slabe stijene i tlo. Princip njegovog rada je tiskanje okretne glave na čelu iskopa, a po njoj su raspoređeni određeni alati-rezači. Stroj se izrađuje većinom za potrebe određenog tunela, odnosno kako su u projektu zadane veličine tunelskih cijevi po tim izrazima se gradi stroj. Zbog tog razloga tunelski bušaći strojevi su među najvećim samokretnim strojevima na svijetu.

Danas je jedna od najzastupljenijih metoda iskopa tunela svakako NATM (nova austrijska tunelska metoda). Prilikom gradnje ovom metodom važna je stalna kontrola izvedbe. Pojavom ove metode učinjen je pozitivan zaokret u tunelogradnji, te je trenutačno nova austrijska tunelska metoda jedna od najzastupljenijih metoda u tunelogradnji.

Iskop podzemnih prostorija složen je i zahtjevan proces, koji podrazumijeva valorizaciju različitih metoda unutar istog projekta, s ciljem utvrđivanja najpovoljnijeg rješenja.

Literatura

1. Anita Abramović. Život i rad rudara kroz povijest. Dostupno na: <https://repositorij.unipu.hr/islandora/object/unipu:1901/preview>. Datum pristupa: 03.04.2019.
2. Luka Zečić. Emulzijski i ANFO eksplozivi s dodatkom organskog otpada. Dostupno na: <https://repositorij.rgn.unizg.hr/islandora/object/rgn:84/preview>. Datum pristupa: 04.04.2019.
3. Bela Kovač, Petar Brana, Držislav Vidaković. Tehnologija građenja. Dostupno na: <http://gfosweb.gfos.hr/portal/images/stories/studij/strucni/tehnologija-i-strojevi-za-gradjenje/tehgra.pdf>. Datum pristupa: 09.04.2019.
4. Ispitivanje geotehničkih sidra. Dostupno na: <https://www.geotech.hr/ispitivanje-geotehnickih-sidara/>. Datum pristupa: 09.04.2019.
5. Josip Mesec. Podzemne građevine. Dostupno na: <https://moodle.srce.hr/2018-2019/course/view.php?id=30259>. Datum pristupa: 10.04.2019.
6. Jasmina Dizdar, Saša Ahac. Nevidljive infrastrukturne građevine. Dostupno na: <https://bib.irb.hr/datoteka/913614.JCE-69-2017-5-7-Zanimljivosti.pdf>. Datum pristupa: 22.04.2019.
7. Danijel Kišiček. Primjer analize i izrade dijafragme kod zaštite građevinske jame. Dostupno na: http://www.gfv.unizg.hr/modules/m_gfv/zavrzni_diplomski_radovi/kisicek_danijel_1.pdf. Datum pristupa: 22.04.2019.
8. Krsnik J (1989): Miniranje, Sveučilište u Zagrebu Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilišni udžbenik, Zagreb, ISBN 86-80891-08-8
9. Mesec J. (2009): Mineralne sirovine, vrste i načini dobivanja, Sveučilište u Zagrebu Geotehnički fakultet, Sveučilišni udžbenik, Varaždin, ISBN 978-953-96597-4-3.
10. Lea Ilijaš. Nova austrijska tunelska metoda. Dostupno na: <https://repositorij.gfv.unizg.hr/islandora/object/gfv:371/preview>. Datum pristupa: 25.04.2019.
11. Dostupno na: <http://www.gradnja.org/gradevinski-strojevi/leksikon-strojeva/401-krtica.html>. Datum 04.05.2019.
12. Dostupno na :<https://www.herrenknecht.com/en/products/productdetail/raise-boring->

- rig-rbr/. Datum pristupa: 06.05.2019.
13. Dostupno na: <https://tunneltalk.com/images/article-0574/Robbins-Double-Shield-TBM.jpg>. Datum pristupa: 10.05.2019.
 14. Davorin Kolić, Antonio Nicola, AnneBrissaud. Željeznički tunel PassanteFerroviario u Milanu Dostupno na: [file:///C:/Users/Martin/Downloads/1%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/Martin/Downloads/1%20(1).pdf). Datum preuzimanja: 17.05.2019.:
 15. Davorin Kolić, Antonio Nicola, Anne Brissaud. Željeznički tunel Passante Ferroviario u Milanu. Dostupno na: <https://hrcak.srce.hr/file/102335>. Datum pristupa: 26.05.2019.
 16. Martin Jandrlić. Načini eksploatacije mineralnih sirovina. Dostupno na: <https://zir.nsk.hr/islandora/object/gfv%3A214/datastream/PDF/view>. Datum pristupa: 29.05.2019.
 17. Dostupno na: <https://sh.wikipedia.org/wiki/Datoteka:Stadmilaanligging.png>. Datum pristupa: 01.06.2019.
 18. Metropolitana Milanese, 1992: Qui c'è sotto un'idea per il nostro futuro – Il Passante Ferroviario, L'informazione al servizio della città', pp.16. Datum pristupa: 01.06.2019.
 19. Marcheselli, P.; Peron J.-Y. 1995: Construction of the "Passante Ferroviario" Link in Milano, Lots 3P-5P, 6P – Excavation by Large Earth Pressure Balanced Shield with Chemical Foam Injection", RETC 1995, Chapter 36, San Diego, June 1995, pp.459-483. Datum pristupa: 03.06.2019.
 20. Kolic, D., 2010: Urban TBM Tunneling, Seminar „New Technologies and Materials: Traffic Days 2010“, Four-Points Sheraton Zagreb, Feb.22-23, 2010, pp. 401-432 (in Croatian). Datum pristupa: 03.06.2019.
 21. Kolic, D. et al. 2000: Development of Dowelled Connectors for Segmental Linings, Felsbau 18 (2000), No.6, pp. 32-40
 22. Babendererde S., 1986: Extruded Concrete Lining, Congresso internazionale su grandi opera sutterene, Firenze, June 1986, pp.8
 22. Vrkljan, Ivan. Općenito o podzemnoj gradnji. Dostupno na: <https://fr.scribd.com/doc/290018224/01-Općenito-o-podzemnoj-gradnji-pdf>. Datum pristupa: 15.05.2019.