

Tehnologija obrade materijala od iskopa stijenske mase tijekom građenja tunela

Lovrečki, Domagoj

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:007223>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-06-30**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,
University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET



Sveučilište u Zagrebu

ZAVRŠNI RAD

Domagoj Lovrečki

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET



Sveučilište u Zagrebu

**TEHNOLOGIJA OBRADJE MATERIJALA OD ISKOPA
STIJENSKE MASE TIJEKOM GRAĐENJA TUNELA**

Mentorica:

Prof. dr.sc. Ivana Banjad Pečur

Student:

Domagoj Lovrečki

Zagreb, 2024.

ZADATAK

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET

OBRAZAC 2

TEMA ZAVRŠNOG ISPITA

Ime i prezime studenta: JMBAG: Završni ispit iz predmeta:

Naslov teme završnog ispita:	HR	TEHNOLOGIJA OBRADJE MATERIJALA OD ISKOPA STIJENSKE MASE TIJEKOM GRAĐENJA TUNELA
	ENG	TECHNOLOGY OF PROCESSING MATERIALS FROM ROCK MASS EXCAVATION DURING TUNNEL CONSTRUCTION

Opis teme završnog ispita:

U radu treba ukratko opisati tehnologiju vađenja materijala stjenske mase kod kopanja tunela. Također treba opisati koji strojevi se pri tome koriste te na koji način će usitnjavati veći komadi. Treba navesti na primjeru za što se sve može koristiti taj kameni materijal.

Datum: Komentor:
(Ime i prezime komentora)Mentor:
(Ime i prezime mentora)
(Potpis mentora)

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

U Zagrebu 13. veljače 2024.

Domagoj Lovrečki

SAŽETAK

U ovom radu opisane su građevinske tehnologije, načini i metode koje inženjeri prakticiraju prilikom izgradnje tunela. Objasnjena je pozadina nastanka tunela te njihova osnovna funkcija i svrha u današnjem svijetu. Objasnjeni su osnovni principi RMR (eng. *Rock Mass Rating*) i Q- (eng. *Rock Tunneling Quality Index, Q*) klasifikacija stijenske mase koje su važne za daljnje određivanje tehnologije iskopa tunela. Navedene su klasične i suvremene metode tunelogradnje te NATM metoda kao najzastupljenija i najkorištenija. Objasnjeni su procesi iskopa stijenske mase tehnologijom bušenja i miniranja te strojnog iskopa kao i pripadna građevinska mehanizacija u istima. Navedena je građevinska mehanizacija za obradu kamena (usitnjavanje) i daljnje eksploatacije stijenske mase nakon iskopa. Nabrojana su ispitivanja koja vršimo na kamenom agregatu kako bismo odredili za što se on može iskoristiti.

Ključne riječi: građevinska mehanizacija, kameni materijal, metode građenja tunela, stijenska masa, tunel.

SUMMARY

This paper describes the construction technologies, ways and methods that engineers practice when building tunnels. The background of the creation of tunnels and their basic function and purpose in today's world is explained. The basic principles of RMR (Rock Mass Rating) and Q- (Rock Tunnelling Quality Index, Q) classification of rock mass, which are essential for the further determination of tunnelling technology, are explained. Classic and modern methods of tunnel construction are listed, as well as the NATM method as the most represented and most used. The processes of rock mass excavation using drilling and blasting technology and mechanical excavation as a related construction mechanization in the same are explained. Construction mechanization for stone processing (shredding) and further exploitation of the rock mass after excavation is listed. The tests we perform on the stone aggregate in order to determine what it can be used for are listed.

Key words: construction machinery, rock mass, stone material, tunnel, tunnel construction methods,

Sadržaj

1. Uvod	1
2. Tuneli.....	2
2.1. Povijesni pregled tunelogradnje.....	3
2.2. Osnovna podjela tunela.....	5
3. Tunelski iskop.....	8
3.1. Kategorizacija iskopa stijenske mase.....	8
3.1.1. RMR klasifikacija	9
3.1.2. Q-klasifikacija	13
4. Tunelogradnja.....	19
4.1. Metode izgradnje tunela.....	20
4.2. Nova austrijska metoda (NATM)	22
4.2.1. Miniranje	27
4.2.2. Strojni iskop	34
5. Obrada i upotreba iskopane stijenske mase	36
5.1. Obrada stijenske mase.....	36
5.1.1. Građevinska mehanizacija za obradu iskopane stijenske mase na primjeru probijanja nove cijevi Tunela Učka	37
5.2. Upotreba obrađene stijenske mase	42
6. Zaključak	44
7. Literatura	45

1. Uvod

Ljudska potreba za gradnjom kroz stijensku masu seže daleko u prošlost u doba prvih ljudi kada se tlo oblikovalo radi izrade boravišta i zaštite od vanjskih utjecaja. U današnje vrijeme većina građevinskih zahvata sadrži i dio vezan uz iskope i oblikovanje temeljnog tla ili temeljne stijene. Među građevine čija je gradnja gotovo u potpunosti fokusirana na obradu tla i stijene pripadaju i tuneli, koji su zapravo linijske građevine građene kroz tlo u svrhu prevladavanja određenih prepreka. Tuneli su danas izrazito česte građevine koje svojom funkcijom i svrhom uvelike doprinose čitavome društvu. Gradnja prvih tunela seže u Antičko doba kada su se tuneli gradili primitivnim alatima.

Razvitak tehnologije u svim područjima života, pa tako i u građevini, mijenja procese izvedbe tunela pa se danas samom procesu izvedbe pristupa modernijim i suvremenijim metodama koje omogućavaju brže i preciznije građenje. Upravo je razvoj građevinske mehanizacije najbitniji faktor brzog razvoja tunelogradnje. Moderan pristup gradnji tunela obuhvaća i kompletnu pripremu prije gradnje u fazi projektiranja, kada se prilikom odabira tehnologije iskopa uzimaju u obzir parametri i glavne karakteristike stijenske mase kroz koju će tunel biti građen. Pomoću raznih klasifikacija stijenske mase određujemo kategoriju stijene iskopa koja će biti ključan faktor odabira metode iskopa.

U ovom radu navest će se osnovne moderne tehnologije gradnje tunela, odnosno tehnologije iskopa stijenske mase kao ključnog dijela gradnje tunela, a koji će uvelike ovisiti o klasifikaciji stijenske mase kroz koju gradimo.

2. Tuneli

U današnje vrijeme infrastrukturni projekti imaju veliki značaj pri povezivanju različitih geografskih regija, kao i u omogućavanju bržeg i kvalitetnijeg transporta ljudi i dobara te općeniti razvoj društva. Tuneli kao jednokratni infrastrukturni investicijski projekti, odnosno kao velika inženjerska dostignuća koja prolaze ispod prirodnih ili umjetno stvorenih prepreka, čine nezaobilaznu kariku u stvaranju efikasnih prometnih pravaca te kvalitetne prometne mreže, zbog čega su od velikog strateškog značaja za širu zajednicu.

Potreba za gradnjom podzemnih građevina – tunela, odnosno tunelogradnjom koju klasičnom definicijom možemo opisati kao kontinuirano probijanje određene šupljine kroz zemljanu koru [1], seže još u Antičko doba, a svoj vrhunac doseže krajem 20. i početkom 21. stoljeća kada su izgrađeni tehnički najzahtjevniji i najimpresivniji tuneli u svijetu, a i u Hrvatskoj.

Tablica 1: najduži cestovni tuneli svijeta [2]

Tunel	Država	Duljina (m)	Godina otvaranja
Lærdal	Norveška	24 510	2000.
Yamate	Japan	18 200	2015.
Zhongnanshan	Kina	18 040	2007.
Jinpingshan	Kina	17 540	2011.
Gotthard-Strassentunnel	Švicarska	16 918	1980.
Arlberg	Austrija	13 972	1978.

Tablica 2: najduži cestovni tuneli Hrvatske [2]

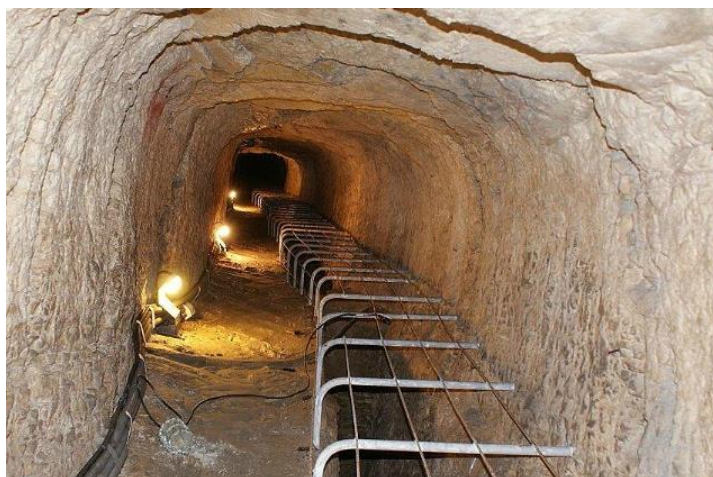
Tunel	Duljina (m)	Godina otvaranja
Mala Kapela	5821	2005.
Sveti Rok	5679	2003.
Učka (nova cijev)	5600	2024.
Učka (stara cijev)	5062	1981.
Sveti Ilija	4248	2010.
Plasina	2300	2005.
Tuhobić	2141	1997.
Sveta tri kralja	1741	2007.
Brinje	1560	2004.
Selca-Dubovica	1516	2000.

Prometovni tuneli, s obzirom na položaj, oblik i dužinu te geološka svojstva stijenske mase kroz koju su građeni, smatraju se cjevastim linijskim građevinama kojima je uzdužna dimenzija značajno veća od poprečne dimenzije te koje imaju obostrani ulaz, odnosno izlaz. Osim cestovnih tunela, ljudska potreba i normalno funkcioniranje cjelokupnog društva uvjetovalo je građenje tunela i u druge svrhe pa tako postoje tuneli različitih namjena poput komunalnih, hidrotehničkih i specijalnih (tuneli za vojne potrebe) . Današnji prometni pravci nezamislivi su bez tunela koji uvelike skraćuju i olakšavaju dionice raznih oblika prometovanja.

2.1. Povijesni pregled tunelogradnje

Kako je graditeljstvo prakticirano u najranijim poznatim dobima pračovjeka, kao osnovna potreba za stvaranjem skloništa od vremenskih nepogoda i svojevremenih opasnosti po čovjeka, moglo bi se reći da i tunelogradnja po klasičnoj definiciji seže u to davno doba ljudske prošlosti. Najčešća skloništa pračovjeka bile su pećine i špilje koje je pračovjek dostupnim oruđem proširivao, produbljivao i povezivao.

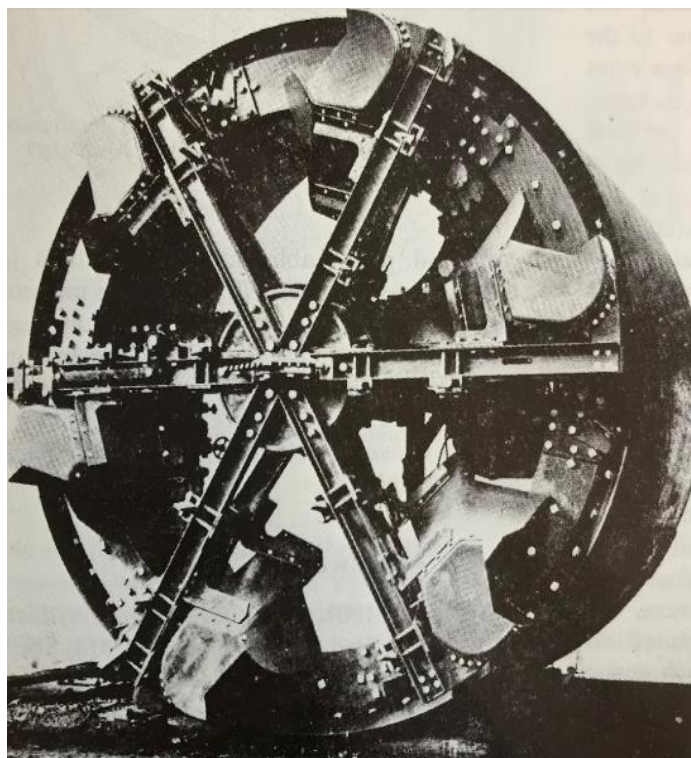
Ipak u doba Antike gradnja podzemnih građevina dobiva zamah pa tako i prvi priznati tunel, koji je paralelno probijan i građen s obje strane, datira iz antičkog doba čovječanstva, točnije u 6. stoljeće prije Krista. Riječ je o Eupalinosovom tunelu (Slika 1) koji je danas uvršten u UNESCO-ovu Svjetsku baštinu kulture: „Eupalinosov tunel prvi je tunel koji je istovremeno iskopan s oba kraja u 6. stoljeću prije Krista“ [3]. Sam je tunel dugačak 1036 metara te prolazi kroz planinu Kastro u Grčkoj, a služio je kao akvadukt, izgrađen je kako bi se drevnom gradu Samosu osigurala pitka voda.



Slika 1- Eupalinosov tunel u Grčkoj [4]

Dok su se tijekom antičkog doba i Srednjeg vijeka za tunelogradnju i iskop stijena koristila djetla i čekići, početkom 17. stoljeća dolazi do značajnog razvoja tehnologije iskopa te se počinju koristiti postupci grijanja i naglog hlađenja stijene vodom. Nakon pronalaska baruta 1612. godine i početka njegove primjene u tehničke svrhe, a zatim i pronalaska nitroglicerina 1847. godine [5], tunelogradnja je izrazito oživjela. Međutim, njen istinski zamah dogodio se 1876. godine kada je prvi put patentirana mehanička oprema za iskopavanje, nakon čega je prvi uspješno dizajnirani stroj Johna Pricea iz 1897. godine u potpunosti revolucionirao sam postupak iskopa i transporta izbijenog materijala. Stroj sa šest rotirajućih diskova značajno je transformirao pristup građevinskim radovima – umjesto tradicionalnog ručnog kopanja lopatama i krampovima te ručnog transportiranja izbijenog materijala, stroj sada obavlja sve radnje. Diskovi ovog stroja precizno stružu stijensku masu i zemlju, unoseći ih na pokretnu traku koja uklanja izbijeni materijal iz okna tunela. Ova mehanizacija nije samo znatno ubrzala proces gradnje, već je i unaprijedila preciznost i radnu efikasnost u odnosu na tradicionalne metode. Pojavom Priceovog stroja WEST p279, koji je usavršavao nekoliko godina,

tunelogradnja je počela zahtijevati znatno manje ljudske radne snage te je bila nekoliko puta sigurnija i brža od prijašnje.



Slika 2 – Price-ov WEST p279 stroj za bušenje tunela [6]

2.2. Osnovna podjela tunela

Podzemne građevine mogu se podijeliti u dvije velike skupine: tunele i kaverne. Glavnu razliku između tunela i kaverne čine odnosi između uzdužnih i poprečnih dimenzija pa će tako kod tunela dominantna biti uzdužna, a kod kaverne poprečna dimenzija. Tuneli i kaverne se nerijetko grade na istim položajima, pa će ulaz u samu kavernu biti tunel, a i sami tunel može sadržavati svojevrsnu kavernu po potrebi. Tako podijeljene podzemne objekte možemo dalje kategorizirati prema više karakteristika koje ih opisuju, kao što su npr. namjena, zahtjevnost izvođenja radova, načini izrade, dužina i poprečni presjek te položaj u terenu. Razlikujemo četiri skupine podzemnih građevina:

- ✚ Prometne građevine
- ✚ Hidrotehničke građevine
- ✚ Komunalne građevine
- ✚ Građevine specijalnih namjena

Daljnja podjela tunela kao skupine podzemnih građevina je sljedeća:

✚ PROMETNI TUNELI:

- Tuneli za željeznički promet
- Tuneli za cestovni promet
- Tuneli na plovnim putevima
- Tuneli za gradski željeznički promet (metro)
- Tuneli za pješački promet
- Mješoviti tuneli

✚ HIDROTEHNIČKI TUNELI:

- Tuneli bez pritiska (voda se sprovodi slobodnim padom)
- Tunele s pritiskom (protok vode je pod pritiskom)[5]

✚ KOMUNALNI TUNELI:

- Kanalizacijski tuneli
- Tuneli za postavu cjevovoda (vodovod, plinovod i sl.)
- Tuneli za elektro instalacije i napajanje

✚ TUNELI SPECIJALNE NAMJENE:

- Tuneli za vojne objekte i vojne svrhe
- Tuneli za podzemna industrijska postrojenja
- Tuneli za pristupe garažama
- Tuneli kao skloništa civilima od opasnosti [7]

Osim osnovne podjele u navedene četiri skupine, tunele još možemo podijeliti *prema dužini*, pri čemu su:

- vrlo kratki (<50 m),
- kratki (50-100 m),
- srednje dužine (500-2200 m),
- dugački (2200-4000 m),
- vrlo dugački (>4000 m).

Podjela se može vršiti i *prema površini poprečnog presjeka*;

- tunelske cijevi ($< 5 \text{ m}^2$),
- tunelski hodnici ($5\text{-}12 \text{ m}^2$),
- tuneli malog profila ($12\text{-}27 \text{ m}^2$),
- tuneli srednjeg profila ($27\text{-}56 \text{ m}^2$),
- tuneli velikog profila ($>56 \text{ m}^2$).

Nadalje, tuneli se mogu razlikovati i *prema težini izrade*;

- dobre,
- srednje teške,
- teške,
- jako teške.

Naposljetku tunele razlikujemo i *prema načinu izgradnje*;

- podzemni iskop s čela tunela,
- tuneli izgrađeni u otvorenom iskopu (cut and cover)
- potiskivanje podgrede. [7]



Slika 3 – primjer komunalnog tunela [8]

3. Tunelski iskop

Izvođač radova dužan je pridržavati se cjelokupne projektne dokumentacije i tehničkih uvjeta koji definiraju tunelski iskop, a koji su detaljno razrađeni u izvedbenom projektu. Kako bi se minimaliziralo pogoršanje i popuštanje okolne stijenske mase te kako bi se u potpunosti spriječilo oštećenje prethodno postavljene obloge, izvođač je dužan sve radove iskopa i podgrađivanja prilagoditi ispunjenju uvjeta osiguranja izvedbe za ustanovljenu tunelsku kategoriju. Također, izvođač mora minimalizirati pojavu prekoprofilnog iskopa tunela – iskopa pri kojem je u stvarnosti prokopan veći profil od onog projektiranog. Takva pojava izričito je greška izvođača te se reflektira izravno na cijenu gradnje. Osim na ekonomičnost gradnje utjecat će i na nosivost, jer će na pojedinim mjestima sekundarna obloga biti različitih debljina, što može uzrokovati pukotine u samoj oblozi [9]. Izvođač je također odgovoran za odabir opreme, alata i strojeva s kojima će izvoditi radove po fazama koje će biti usklađene s izvedbenim projektom i sa stanjem stijenske mase kroz koju će tunel biti građen. [10]

3.1. Kategorizacija iskopa stijenske mase

U modernoj klasifikaciji stijenskih masa postoji više geotehničkih klasifikacija [10] [11]:

1. Terzaghijeva klasifikacija (1946.)
2. Lauferova klasifikacija (1958.)
3. Modifikacija Lauferove klasifikacije
4. RSR (*Rock Structure Rating*, Wickeham i dr. 1972.)
5. Geomehanička klasifikacija Bieniawskog (RMR – *Rock Mass Rating*)
6. Q- klasifikacija Bartona (*Rock Tunneling Quality Index*, Q)

Danas u inženjerskoj praksi najčešće se koriste geomehaničke klasifikacije Bieniawskog (RMR) i Q klasifikacija.

Sama kategorizacija stijenske mase kroz koju je trasiran tunel obavlja se kontinuirano tijekom cijelog trajanja gradnje tunela. Kategoriju stijenske mase odredit ćemo na osnovi geomahničke kategorizacije (Bieniawski 1979) i Q kategorizacije. Koristiti ćemo ih prilikom izvođenja cestovnih tunela bušenjem i miniranjem ili strojnim iskopom. [10] Kako gradnja tunela napreduje, postoji mogućnost promjene geomehaničkih svojstava stijenske mase, zbog čega se izvode inženjersko-geološka kartiranja (nakon napredovanja u izvođenju). Kartiranje se ne treba izvoditi prilikom svakog napredovanja, već samo onda kada su uočene bitne

promjene geoloških i geomehaničkih obilježja stijenske mase duž trase tunela. Prilikom inženjersko-geološkog kartiranja, važno je odrediti sve relevantne parametre koji su potrebni za i koji utječu na kategoriziranje stijenske mase jer upravo je kategorizacija stijenske mase ključna za određivanje tehnologije izvedbe i tehnologije iskopa.

3.1.1. RMR klasifikacija

Šest osnovnih geomehaničkih parametara po kojima razlikujemo stijensku masu su:

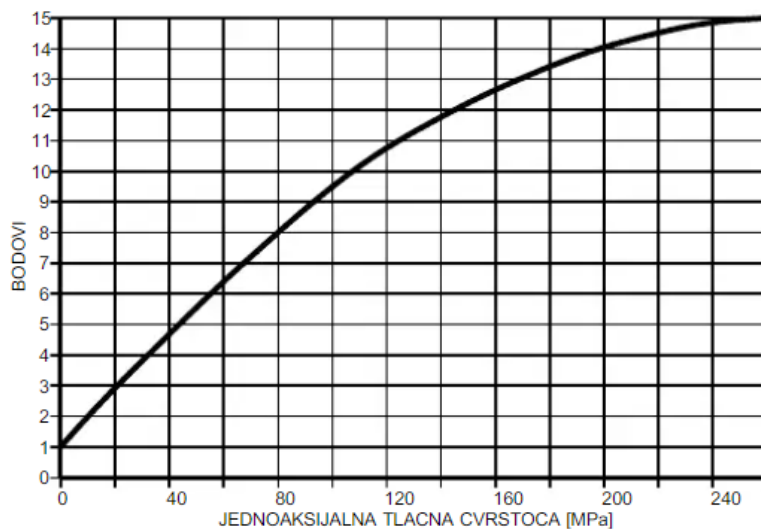
1. Jednoaksijalna tlačna čvrstoća stijenskog materijala
2. RQD (indeks kvalitete jezgre)
3. Razmak pukotina (diskontinuiteta)
4. Stanje diskontinuiteta
5. Stanje podzemne vode
6. Pružanje i nagib diskontinuiteta [10] [11]

Kategoriju stijene moći ćemo odrediti sagledavanjem navedenih parametara i bodovanjem svakog od njih ovisno o dobivenim rezultatima. Kategorizacija stijenske mase određena je u Tablici 3.

Tablica 3: kategoriziranje stijenske mase s obzirom na ukupan broj bodova [10]

ZBROJ BODOVA (RMR)	100 – 81	80 – 61	60 – 41	40 – 21	< 20
KATEGORIJA	I	II	III	IV	V
OPIS STIJENSKE MASE	Vrlo dobra	Dobra	Povoljna	Slaba	Vrlo slaba

Jednoaksijalnu tlačnu čvrstoću stijene ispitujemo klasičnim laboratorijskim pokusom - ispitivanjem jednoosne tlačne čvrstoće na uzorku stijenske mase koji odabire nadzorni inženjer. Ispitivanje vršimo u fazi projektiranja na uzorcima dobivenim istražnim bušotinama ili u fazi izvođenja kada nadzorni inženjer ocijeni da se čvrstoća stijene u iskopu bitno razlikuje od čvrstoće stijene u geotehničkom projektu. Broj bodova koji će određena stijenska masa dobiti na temelju jednoaksijalne čvrstoće možemo odrediti pomoću dijagrama na Slici br.4: [10]



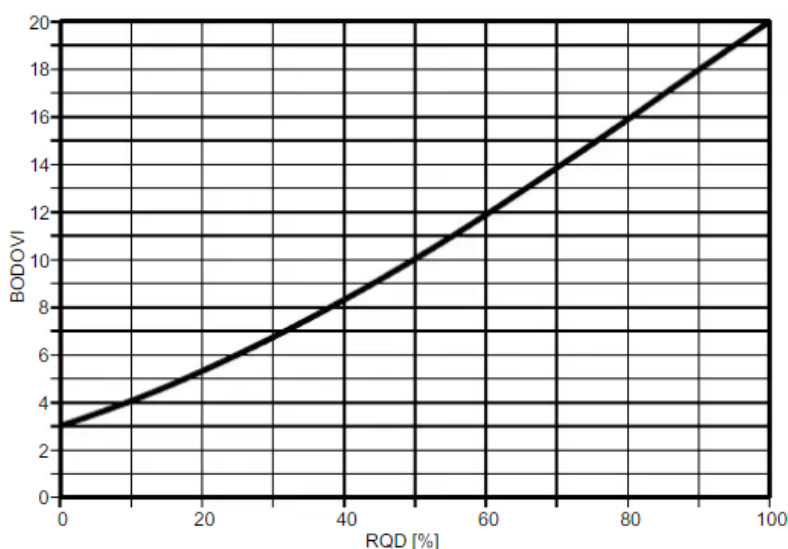
Slika 4- bodovanje jednoaksijalne tlačne čvrstoće stijenske mase prilikom kategoriziranja [10]

RQD (eng. *Rock Quality Designation*) dobiva se bušenjem, a pokazatelj je cjelovitosti stijenske mase, omjera zbroja svih bušenih komada stijene dužih od 10 cm i intervala bušenja. Izražen je u postocima. Osim bušenjem, RQD možemo odrediti s obzirom na ukupan broj diskontinuiteta u jediničnom volumenu prema izrazu:

$$RQD = 115 - 3.3 J_V$$

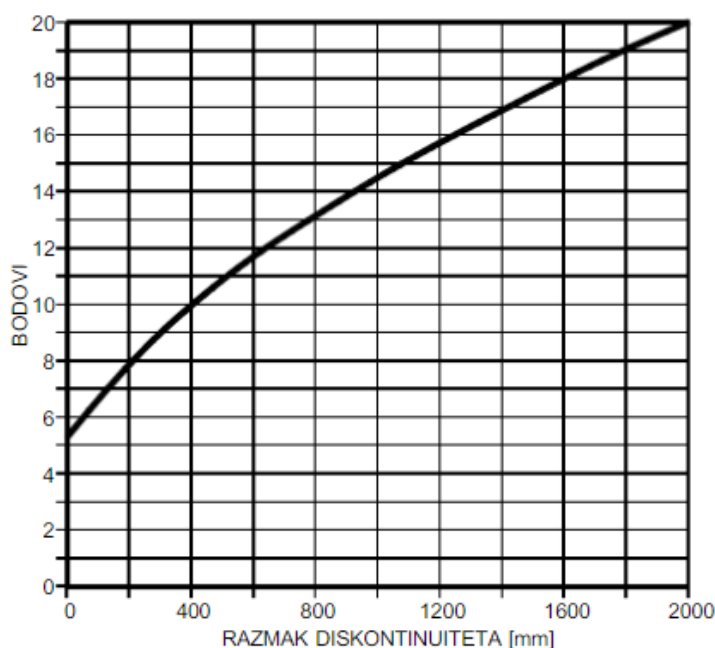
Gdje je J_V - zbroj pukotina po jediničnoj dužini za sve skupove pukotina [10] [11].

U dijagramu prikazanom na Slici br. 5 vidi se način bodovanja u odnosu na RQD.



Slika 5 - bodovanje u ovisnosti na RQD postotak stijenske mase prilikom kategoriziranja stijenske mase [10]

Mjerenjem okomito na diskontinuitete na uzorku 10 puta većem od procijenjenog razmaka s mjernom trakom određujemo razmak pukotina (diskontinuiteta).[11] Bodovanje je vidljivo na dijagramu prikazanom na Slici br. 6:



Slika 6 - bodovanje u ovisnosti na razmak diskontinuiteta stijenske mase prilikom kategoriziranja stijenske mase[10]

Stanje diskontinuiteta i pripadni bodovi određeni su Tablicom 4:

Tablica 4 - bodovanje u ovisnosti na stanje diskontinuiteta stijenske mase prilikom kategoriziranja stijenske mase [10]

PARAMETAR	PODRUČJE VRIJEDNOSTI				
Dužina diskontinuiteta	< 1m	1 – 3 m	3 – 10 m	10 – 20 m	> 20 m
Bodovi	6	4	2	1	0
Zijev	zatvorene	< 0,1mm	0,1 – 1,0 mm	1 – 5 mm	>5 mm
Bodovi	6	5	4	1	0
Hrapovost	vrlo hrapave	hrapave	neznatno hrapave	glatke	skliske
Bodovi	6	5	3	1	0
Ispuna	bez ispune	tvrda ispuna		meka ispuna	
		< 5 mm	>5 mm	< 5 mm	>5 mm
Bodovi	6	4	2	2	0
Rastrošenost	nerastrošene	neznatno rastrošene	umjereno rastrošene	jako rastrošene	potpuno rastrošene
Bodovi	6	5	3	1	0

Utjecaj pružanja i nagiba diskontinuiteta ovisno o veličinama njihovih parametara određeni su

Tablicom 5:

Tablica 5- opis mase za svrhu bodovanja u ovisnosti na pružanje i nagib diskontinuiteta prilikom kategoriziranja stijenske mase [10]

PRUŽANJE OKOMITO NA TUNELSKU OS				PRUŽANJE PARALELNO S TUNELSKOM OSI		BEZ OBZIRA NA PRUŽANJE
Iskop u smjeru nagiba diskontinuiteta		Iskop protiv smjera nagiba diskontinuiteta				
Nagib 45° - 90°	Nagib 20° - 45°	Nagib 45° - 90°	Nagib 20° - 45°	Nagib 20° - 45°	Nagib 45° - 90°	Nagib 0° - 20°
vrlo povoljno	povoljno	dobro	nepovoljno	dobro	vrlo nepovoljno	dobro

Kada odredimo kvalitetu stijenske mase s obzirom na smjer pružanja i nagib diskontinuiteta pripadni bodovi određeni su Tablicom 6:

Tablica 6 -bodovanje u ovisnosti na opis mase s obzirom na pružanje i nagib diskontinuiteta stijenske mase prilikom kategoriziranja stijenske mase [10]

PRUŽANJE I NAGIB DISKONTINUITETA		Vrlo povoljno	Povoljno	Dobro	Nepovoljno	Vrlo nepovoljno
Bodovi	Tuneli	0	-2	-5	-10	-12

Kada provedemo sve klasifikacije i odredimo konačan zbroj bodova u Tablici 3 očitavamo kategoriju stijenske mase. Saznanje o kategoriji stijenske mase ima velik značaj na izvedbu tunela s obzirom na tehnologiju građenja koja će biti odabrana za izvođenje.

3.1.2. Q-klasifikacija

Q-klasifikaciju razvili su Barton, Lien i Lunde u Norveškom geotehničkom institutu 1974. godine. Indeks kvalitete stijenske mase (Q), osim za određivanje kvalitete stijenske mase, služi i za određivanje elemenata podgradnog sustava u tunelogradnji. [12] [13]

Određuje se izrazom:

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n}\right) \times \left(\frac{J_r}{J_a}\right) \times \left(\frac{J_w}{SRF}\right)$$

Gdje su:

RQD – indeks kvalitete jezgre

J_n – broj familija pukotina

J_a – koeficijent alteracije pukotina

J_r – koeficijent hrapavosti pukotina

J_w – faktor koji uzima u obzir vodu u pukotinama

SRF – faktor koji uzima u obzir naponsko stanje [12]

Analizom gornje jednadžbe vidi se da je indeks Q funkcija triju parametara:

1. Veličine bloka $-\left(\frac{RQD}{J_n}\right)$
2. Posmične čvrstoće među blokovima $-\left(\frac{J_r}{J_a}\right)$
3. Aktivnih naprezanja $-\left(\frac{J_w}{SRF}\right)$

Indeks Q varira na logaritamskoj skali u granicama od 0,001 do 1000, a kategoriju ovisno o veličini indeksa prikazuje Tablica 7: [13]

Tablica 7- kategorije stijene prema Q klasifikaciji [13]

Q	Kategorija stijenske mase
0,001 – 0,01	Krajnje slaba
0,01 – 0,1	Iznimno slaba
0,1 – 1,0	Vrlo slaba
1,0 – 4,0	Slaba
4,0 – 10,0	Povoljna
10,00 – 40,0	Dobra
40,0 – 100,00	Vrlo dobra
100,0 – 400,0	Iznimno dobra
400,0 – 1000,0	Krajnje dobra

Tablicom 8 opisano je kako dolazimo do 6 osnovnih parametara koji određuju funkciju indeksa Q.

Tablica 8 – Parametri Q klasifikacije [13]

Opis		Vrijednost	Napomene
1. Indeks kvalitete jezgre		RQD	Kada se izmjeri $RQD < 10$ (uključujući i 0) kod izračunavanja vrijednosti Q uzima se da je $RQD = 10$. Dovoljno je točno da se RQD izrazi u intervalima od 5 (100; 95; 9 itd.).
A	vrlo slaba	0 – 25	
B	slaba	25 – 50	
C	povoljna	50 – 75	
D	dobra	75 – 90	
E	odlična	90 – 100	
2. Broj familija pukotina (J)		J_n	Na križanjima koristi $(3,0 * J_n)$ Za portale koristi $(2,0 * J_n)$
A	masivna stijena bez ili s nekoliko pukotina	0,5 – 1,0	
B	jedna familija pukotina	2	
C	jedna familija pukotina i slučajne pukotine	3	
D	dvije familije pukotina	4	
E	dvije familije pukotina i slučajne pukotine	6	
F	tri familije pukotina	9	
G	tri familije pukotina i slučajne pukotine	12	
H	četiri ili više familija pukotina, slučajne pukotine, jako ispucale stijene	15	
J	razdrobljena stijena slična zemlji	20	
3. Indeks hrapavosti pukotine		J_r	Dodaj 1,0 ako je srednji razmak kod mjerodavnog skupa pukotina veći od 3 m. $J_r = 0,5$ za planrne pukotine koje imaju izraženu lineaciju.
a) kontakt zidova pukotina			
b) kontakt zidova pukotine prije posmika od 10 cm			
A	diskontinualne pukotine	4	
B	hrapave ili nepravilne pukotine, valovite	3	
C	glatke, valovite	2	
D	skliske valovite	1,5	
E	hrapava ili nepravilne, ravne	1,5	
F	glatke, ravne	1,0	
G	skliske, ravne	0,5	
c) nema kontakta zidova pukotina pri posmiku			
H	glinovita min. ispunjena dovoljne debljine da spriječi kontakt stijenci pukotine	1,0	
J	pjeskovita, šljunčana ili zdrobljena ispunjena dovoljne debljine da spriječi kontakt stijenci pukotine	1,0	
4. Indeks alteracije pukotine		J_a	Približni rezidualni kut trenja ($^{\circ}$)

			<i>**Rezidualni kut trenja odnosi se na produkte alteracije ako postoje</i>	
a) kontakt zidova pukotina				
A	zbijena, zacijeljena, čvrsta pukotina, nerazmekšavajuća, nepropusna ispunjena	0,75		
B	nepromijenjen zid pukotine, površina samo s mrljama	1,0	25 – 35	
C	neznatno promijenjeni zid pukotine nerazmekšavajuća mineralna prevlaka pjeskovite čestice, dezintegrirana stijena bez gline itd.	2,0	25 – 30	
D	prašnasta ili pjeskovito – glinovita prevlaka, mali dio glinene frakcije (nerazmekšavajuća)	3,0	20 – 25	
E	prevlaka od glinenih materijala, meka ili s niskim kutem trenja (diskontinualna prevlaka, 1 – 2 mm ili manje debljine)	4,0	8 – 16	
b) kontakt zidova pukotine prije posmika od 10 cm				
F	pjeskovite čestice, dezintegrirana stijena bez gline itd.	4,0	25 – 30	
G	jako prekonsolidirana nerazmekšavajuća glinovito mineralna ispunjena (neprekinuta <5mm debljine)	6,0	16 – 24	
H	srednja ili mala prekonsolidacija, razmekšana glinovito mineralna ispunjena (neprekinuta <5mm debljine)	8,0	12 – 16	
J	bubrivna glinovita ispunjena tj. montmorilonit (neprekinuta <5mm debljine). Vrijednosti Ja ovise o postotku bubrivih glinovitih čestica, pristupu vode itd.	8,0 – 12,0	6 - 12	
c) nema kontakta zidova pukotina pri posmiku				
K,L,M	zone ili pojasevi dezintegrirane ili zdrobljene stijene i gline (vidi I,H i J za opis uvjeta u pogledu gline)	6,8 ili 8-12	6 – 24	
N	zone ili pojasevi prašnaste ili pjeskove gline, mala frakcija gline (nerazmekšavajuća)	5,0		
O,P,R	debela neprekinuta zona ili pojas gline (vidi I,H i J za opis uvjeta u pogledu gline)	10, 13 ili 13-20	6 - 24	
5. Faktor pukotinske vode		Jw	Približni tlak vode (bara)	1. faktori C i D su grubo određeni; Povećaj Jw ako je ugrađena drenaža
A	suhi iskop ili manji priliv (dotok < 5l/min, lokalno)	1,00	<1	
B	srednji priliv ili tlak (ispuna ponegdje isprana iz pukotina)	0,66	1,0 – 2,5	

C	veliki priliv ili visoki tlak vode u zdravoj stijeni (pukotine bez ispune)	0,5	2,5 – 10,0	2. nije razmatrano smrzavanje vode
D	veliki priliv ili visoki tlak vode, značajno ispiranje ispune pukotina	0,33	2,05 – 10,0	
E	iznimno veliki priliv ili tlak	0,2 – 0,1	>10	
F	iznimno veliki priliv ili tlak vode koji se nastavlja bez zamjetljivog opadanja	0,1 – 0,05	>10	
6. Faktor redukcije naprezanja				1. Reduciraj ove vrijednosti SRF za 25-50% samo ako relevantne posmične zone ne presjecaju iskop 2. Za jako anizotropno polje naprezanaj (ako je izmjereno): - kada je $5 \leq \sigma_1/\sigma_3 \leq 10$, reducirati σ_c i σ_t na $0,8 \sigma_c$ i $0,8 \sigma_t$
a) oslabljene zone sijeku iskop što može uzrokovati restresanje stijenske mase pri iskopu				
A	učestala pojava rasjed zona koje sadrže glinu ili kem. raspadnutu stijenu, vrlo rastresena okolna stijena (sve dubine)	10,0		
B	jedna rasjedna zona koja sadrži glinu ili kem. raspadnutu stijenu (dubina iskopa ≤ 50 m)	5,0		
C	jedna rasjedna zona koja sadrži glinu ili kem. raspadnutu stijenu (dubina iskopa ≥ 50 m)	2,5		
D	učestale rasjedne zone u zdravoj stijeni (bez gline) rastresena okolna stijena (sve dubine)	7,5		
E	učestale rasjedne zone u zdravoj stijeni (bez gline, dubina iskopa ≤ 50 m)	5,0		
F	učestale rasjedne zone u zdravoj stijeni (bez gline, dubina iskopa > 50 m)	2,5		
G	Rastresene otvorene pukotine, jaka ispučanost itd. (sve dubine)	5,0		
b) Zdrava stijena, problemi naprezanja			SRF	
H	niska naprezanja, blizu površine	>200	>13 2,5	
J	srednja naprezanja	200-10	13-0,66 1,0	
K	visoka naprezanja, vrlo zbijena struktura (obično povoljno za stabilnost, može biti nepovoljno za stabilnost zidova)	10-5	0,66-0,33 0,5-2,0	
L	gorski udari slabog intenziteta (masivna stijena)	5-2,5	0,33-0,1 5,0-10,0	
M	gorski udari jakog intenziteta (masivna stijena)	<2,5	<0,16 10,0-20,0	
c) zgnječena stijena: plastični tok stijene pod utjecaje visokog naprezanja			SRF	
N	slabi tlak zgnječene stijene	5,0 – 10,0		
O	jaki tlak zgnječene stijene	10,0 – 20,0		
d) bubriva stijena, intezitet ovisi o raspoloživoj vodi				
P	slabi tlak zgnječene stijene	5,0 – 10,0		
R	jaki tlak zgnječene stijene	10,0 – 15,0		

Q klasifikacija stijenske mase popularna je među inženjerima i zato što su Barton i dr. (1974.) definirali dodatan parametar D_e , kojeg nazivaju ekvivalentom dimenzija iskopa, a koji izravno povezuje indeks Q i potrebnu podgradu tunela. Ekvivalent dimenzije iskopa prikazan je sljedećom formulom:[12] [13]

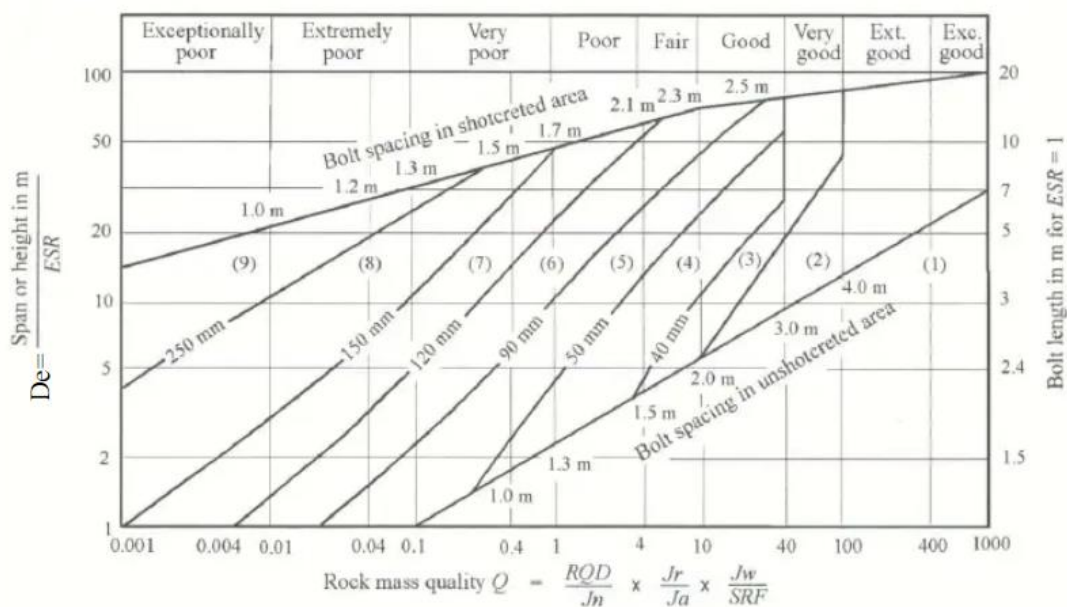
$$D_e = \frac{\text{raspon, promjer ili visina tunela [m]}}{ESR}$$

Pri čemu je ESR *excavation support ratio* koji se dobiva empirijski na mjerenjima 38 kategorija iskopa, a predstavlja sigurnosnu razinu potpornog sustava. Veći ESR znači veću razinu sigurnosti.

Tablica 9 -Parametri Q klasifikacije [13]

Kategorija iskopa		ESR
A	Privremeni rudarski otvori	3 – 5
B	Vertikalna okna:	2,5
	Kružni presjek Pravokutni presjek	2,0
C	Stalne rudarske prostorije, hidrotehnički tuneli (nisu uključeni tuneli pod visokim tlakom), pilot tuneli, tuneli kod razrade profila za veće iskope	1,6
D	Skladišta, postrojenja za tretman vode, manje značajni cestovni i željeznički tuneli, prilazni tuneli i slično	1,3
E	Skladišta nafte, strojarnice, glavni cestovni i željeznički tuneli, skloništa, portali, raskrižja	1,0
F	Podzemno nuklearne centrale, željezničke postaje, sportski i javni objekti, tvornice i slično	0,8

Grimsted i Barton 1993. godine objavljuju oblik dijagrama s izdvojenih 9 kategorija iskopa kako bi ukazali na povećanu uporabu mikroarmiranog mlaznog betona, vidljivo na dijagramu na Slici br. 7: [13]



Slika 7- 9 kategorija iskopa prema Bartonu i Grimstedu [13]

9 podgradnih kategorija na osnovi Q indeksa (Grimsted i Barton, 1993) su:

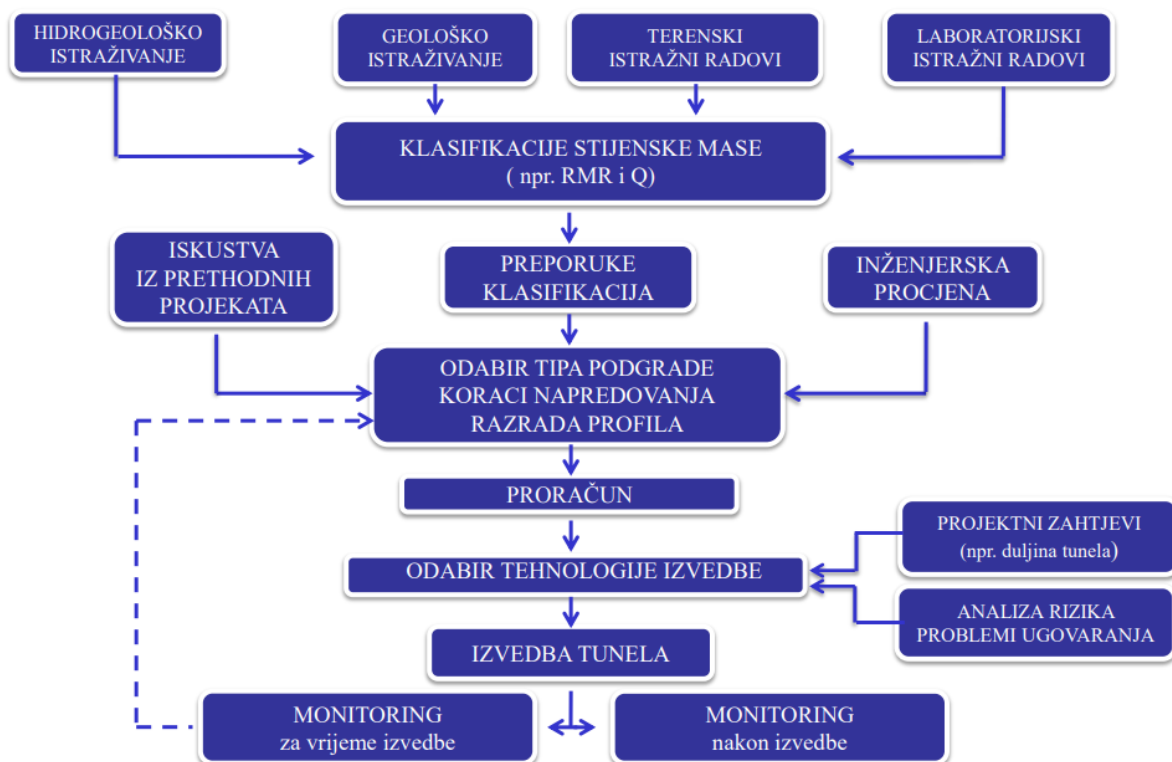
1. Nepodgrađeno
2. Mjestimično sidrenje
3. Sistemsko sidrenje
4. Sistemsko sidrenje sa 40-100 mm nearmiranog mlaznog betona
5. Mikroarmirani mlazni beton, 50-90 mm i sidrenje
6. Mikroarmirani mlazni beton, 90-120 mm i sidrenje
7. Mikroarmirani mlazni beton, 120-150 mm i sidrenje
8. Mikroarmirani mlazni beton, >150 mm i sidrenje
9. Lijevani beton

1994. Barton i Grimsted na osnovi Q indeksa pronalaze vezu Q i RMR klasifikacije i definiraju slijedeći donos :

$$RMR = 9 \ln Q - 44 \quad [12] [13]$$

4. Tunelogradnja

Gradnja tunela predstavlja složen inženjerski pothvat koji zahtijeva visoku razinu preciznosti i stručnosti. Iako se sama izgradnja ne sastoji od puno faza, svaka od faza zasebno predstavlja složen proces i iziskuje velike organizacijske sposobnosti odgovornih ljudi na gradilištu. Specifičnost tunelogradnje očituje se već na samom početku projektiranja kada je potrebno prisustvo stručnjaka iz raznih disciplina poput hidrogeologije, geotehnike, geologije, tehnike iskopa i napredovanja te građevinskog konstrukterstva. Projektiranje tunela traži drugačiji pristup u odnosu na uobičajene građevine i konstrukcije. Najveću razliku u složenosti projektiranja tunela u odnosu na druge, „standardiziranije“ građevine nailazimo u geotehničkom projektu. Projektiranje tunela zahtijeva poseban pristup, razlikujući se ne samo od uobičajenih građevinskih konstrukcija, već i od drugih geotehničkih projekata. Proces projektiranja nije zaključen u projektantskom uredu na osnovi preliminarnih geotehničkih istraživanja. Istražni su radovi kontinuirani proces usmjeren na definiranje karakteristika i stanja tla, te se nastavljaju i tijekom izvođenja radova.[14] Razlog za konstantnim istražnim radovima je pouzdano definiranje karakteristika stijenske mase kroz koju tunel prolazi, a čije se osobine mogu razlikovati duž projektirane trase.



Slika 8 – proces geotehničkog projektiranja tunela [14]

S obzirom na kvalitetu stijenske mase i stanje naprezanja u njoj, između raznih tehnika iskopa izabiremo onu koja je najpraktičnija [14].

4.1. Metode izgradnje tunela

Metode izgradnje tunela dijele se na dvije skupine:

1. Tradicionalne (klasične) metode
2. Suvremene metode

Osnovne tradicionalne metode gradnje tunela su:

- a) Stara austrijska metoda
- b) Belgijska metoda
- c) Talijanska metoda
- d) Njemačka metoda [15]

Nabrojane metode smatraju se osnovnim tradicionalnim metodama, ali postoje i neke druge. Svaka se metoda od ostalih razlikuje prema načinu i redoslijedu otvaranja profila te prema formiranju konstruktivnog sistema.[16]

Razvoj tradicionalnih metoda datira u 19. stoljeće te je povezan s razvojem željezničke infrastrukture u Europi i Sjevernoj Americi. Gradnja tunela tradicionalnom metodom započinje probijanjem potkopa odnosno podgrađenog rova malih dimenzija koji je služio za upoznavanje sa geotehničkim osobinama stijenske mase i uvjetima građenja. Iz tog jednog, ili više izrađenih potkopa, proširuje se iskop na puni profil tunela [17]. Taj se iskopani prostor podgrađivao s privremenom pregradom kako bi se stabilizirao do ugradnje konačne, stalne podgrade. Privremena podgrada je isprva bila drvena, a s vremenom su se počele koristiti i čelične, dok je konačna podgrada bila zidana ili betonska. [7]

Tradicionalne metode izgradnje tunela danas su skoro potpuno napuštene zbog sporog napredovanja i značajnih troškova izvedbe, ali je nužno poznavati njihova osnovna načela i principe jer su se upravo analizama i proučavanjima tradicionalnih razvile suvremene metode. S obzirom na geološke prilike, površinu poprečnog presjeka i primjenu mehanizacije razvio se veći broj suvremenih metoda izgradnje tunela [7]. Glavnu razliku između tradicionalnih i suvremenih metoda uočavamo u odnosu prema funkciji podgrade. Klasične metode prakticirale su podgrade od drva kao privremenu funkciju podupiranja stijenske mase dok se nove

suvremene metode prema podgradi odnose kao prema dijelu konstruktivnog elementa koji se izvodi kao trajan konstruktivan element te trajno ostaje u funkciji, čak i nakon izvedbe sekundarne obloge.

U skupinu suvremenih metoda izgradnje tunela pripadaju:

1. Iskop tunela miniranjem
2. Američka metoda
3. Kelnska metoda
4. Bernoldova metoda
5. Norveška metoda
6. Metoda čeličnog štita
7. Metoda izgradnje rotacijskim strojevima – TBM-ovima
8. Nova austrijska tunelska metoda [7]

Suvremene metode donose niz novih tehnoloških rješenja u tunelogradnji, a širok izbor metoda građenja omogućava izvedbu tunela i u najkompleksnijim uvjetima. Odabir metode tako će ovisiti o glavnim parametrima projektiranog tunela i glavnim fizičko-mehaničkim svojstvima stijenske mase kroz koju će biti građen. Danas se Nova Austrijska Metoda nameće kao najpopularnija zbog svoje prilagodljivosti na uvjete građenja i na prirodne uvjete s kojima se susrećemo prilikom samog izvođenja. [7]

4.2. Nova austrijska metoda (NATM)

Početak i sredinom 20. stoljeća, s pojavom Nove Austrijske Metode za koju su zaslužni i koju su formirali austrijski inženjeri, stari načini gradnje tunela tradicionalnim metodama gotovo su u potpunosti napušteni. Iako se više radi o filozofiji nego metodi, NATM je promijenio pogled na funkciju stijenske mase koja okružuje tunel - od izvora opterećenja, ona postaje noseći element tunela[18]. Prof. Ladislaus Rabcewicz, otac same metode, predstavio je metodu inženjerskom svijetu na 13. konferenciji geomehanike u Salzburgu, a NATM se prvi put u znanstvenom članku spominje 1964. godine kada je opisan kao moderan pristup tunelogradnji. Glavni je novitet u procesu gradnje, koji prof. Ladislaus Rabcewicz uvodi, princip primarne i sekundarne podgrade. Osim Rabcewicwa, začetnici NATM-a također su bili i dr. Leopold Muller i Franz Pacher – koji zajedno čine takozvani „Salzburški krug“.



Slika 9 – Ladislaus von Rabcewicz (lijevo), Leopold Muller (sredina), Franz Pacher (desno)
[16]

Doprinos znanstvenika iz „Salzburškog kruga“ tunelogradnji i pristupu građenja tunela te svih podzemnih građevina je velik s obzirom da je Nova Austrijska Metoda – NATM metoda građenja od svojeg predstavljanja pa sve do danas najzastupljenija metoda.

Samom razvoju metode prethodili su brojni koraci, inženjerska i znanstvena dostignuća, kronološki prikazani u Tablici 10.

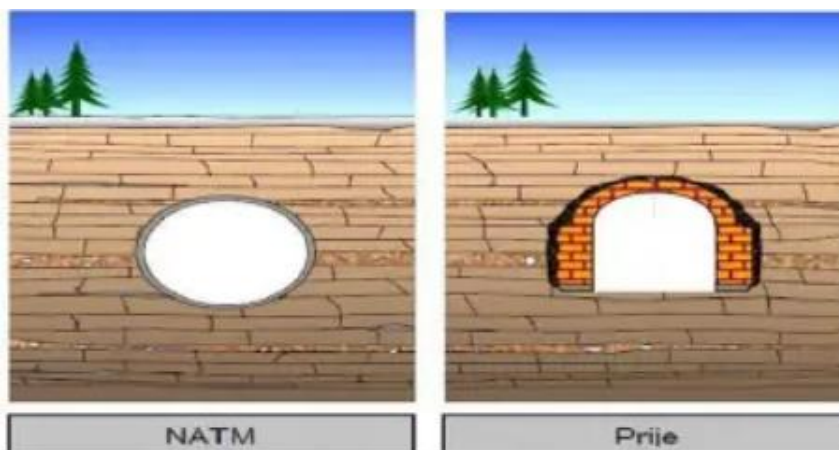
Tablica 10: kronološki prikaz razvoja koji vodi do razvoja NATM-a [16]

Godina	Razvoj tehnologije	Izumitelj
1811.	Izum kružnog štita (privremene podgrade) za iskope u mekim tlima	Marc Isambard Brunel
1848.	Prvi pokušaj korištenja brzosušećeg morta u rudniku ugljena u Weywanowu, Čehoslovačka	/
1872.	Zamjena drvene podgrade čeličnom	Franz von Rzhna
1908.	Izum revolverskog stroja za mlazni beton	Carl E. Akeley
1914.	Prva primjena mlaznog betona u rudniku ugljena u Denveru, SAD	/
1948.	Izum sustava dvoslojne obloge	Ladislav von Rabcewicz
1954.	Korištenje mlaznog betona za stabilizaciju tla u tunelo gradnji	Anton Brunner
1955.	Usavršavanje postupka sidrenja tla	Ladislav von Rabcewicz
1956.	Prvo zajedničko korištenje mlaznog betona i sidrenja u tunelu u Venezueli	Ladislav von Rabcewicz
1960.	Prepoznata važnost sistema sustavnog mjerenja deformacija tla	Leopold Müller
1962.	Predstavljanje NATM-a na 13.Konferenciji geomehanike u Salzburgu	Ladislav von Rabcewicz
1964.	Engleski izraz za NATM prvi put spominjan u znanstvenom članku	Ladislav von Rabcewicz
1964.	Javno priznanje NATM metode nakon uspješne aplikacije na tunelu Schwaikheim u Njemačkoj	Rabcewicz, Müller, Pacher
1969.	Prva primjena NATM-a u urbanom području u Frankfurtu na Maini, Njemačka	/

Od prvog javnog iznošenja metode sve do danas, NATM je najraširenija metoda upravo zbog svoje velike prilagodljivost uvjetima građenja. U početku je metoda bila namijenjena samo za uporabu u stijinama, ali se zadnje desetljeće koristi i u mekim sredinama, u kojem ju nazivamo SCL (eng. *Sprayed Concrete Lining*) - metoda obloge od prskanog betona.

NATM kao generalni koncept, Salzburški kruga prikazao je kroz 22 principa, ali s obzirom da principi nemaju istu težinu i da se jedan veže na drugi, može se razaznati 5 osnovnih principa:

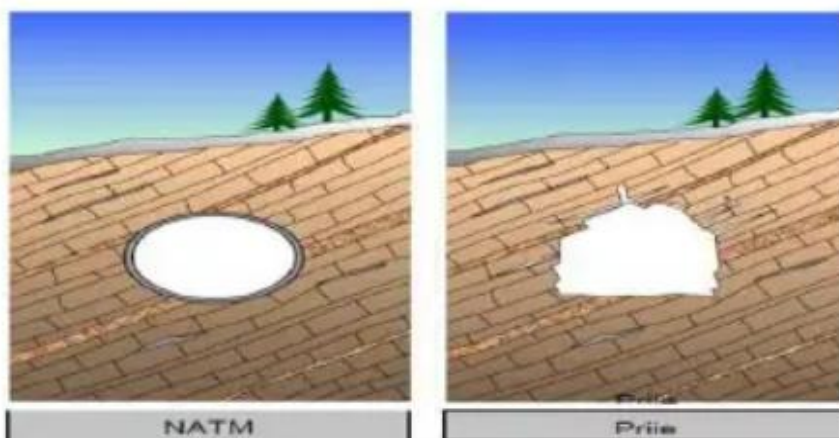
1. Osnovna nosiva komponenta tunela je stijenska masa - podgrade služe za stvaranje sferične ljuske ili nosivog prstena



Slika 10 – stijena u obliku sferične ljuske postaje nosivi element[19]

2. Održavanje čvrstoće stijenske mase

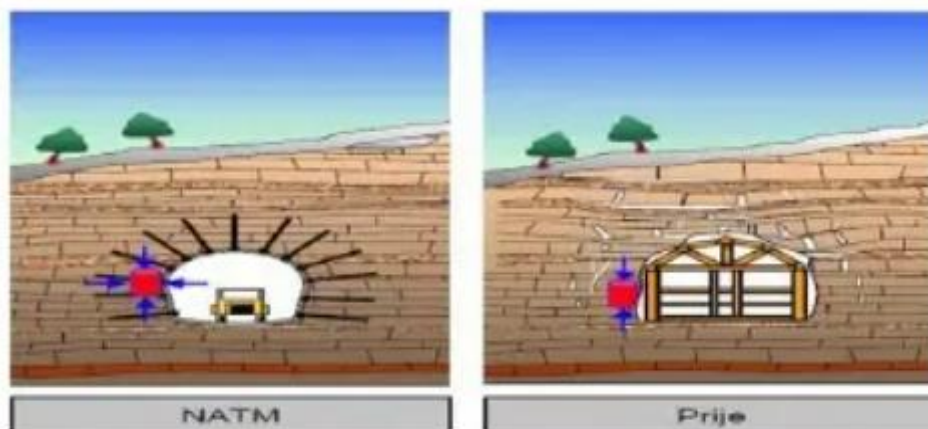
- stijenska masa predstavlja glavni nosivi element i kao takvu moramo održati njenu originalnu čvrstoću pažljivim i kontroliranim iskapanjem te pravovremenim ugradnjama podgrade.



Slika 11 – održavanje čvrstoće stijenske mase [19]

3. Poprečni profil treba biti zaobljen

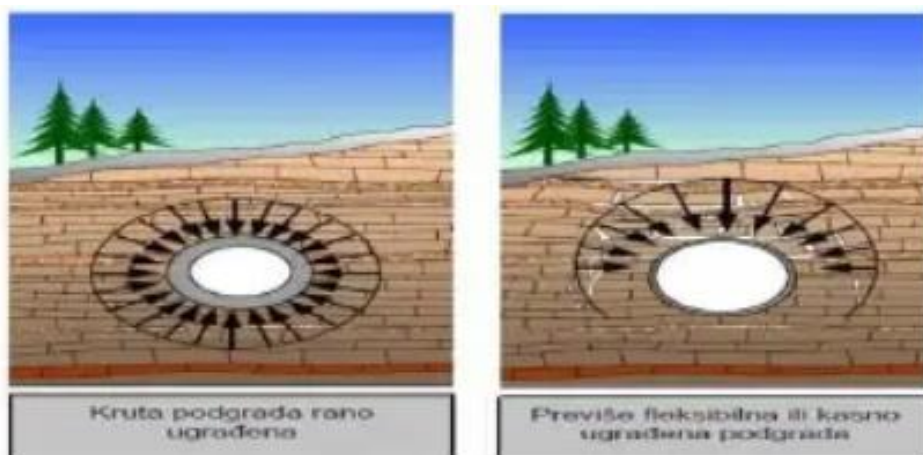
- nastojanje da stijenska masa u okolici iskopa bude u troosnom stanju naprezanja pošto joj je i čvrstoća troosna



Slika 12- troosno stanje naprezanja stijenske mase u okolini [19]

4. Podgrada treba biti tanka i fleksibilna

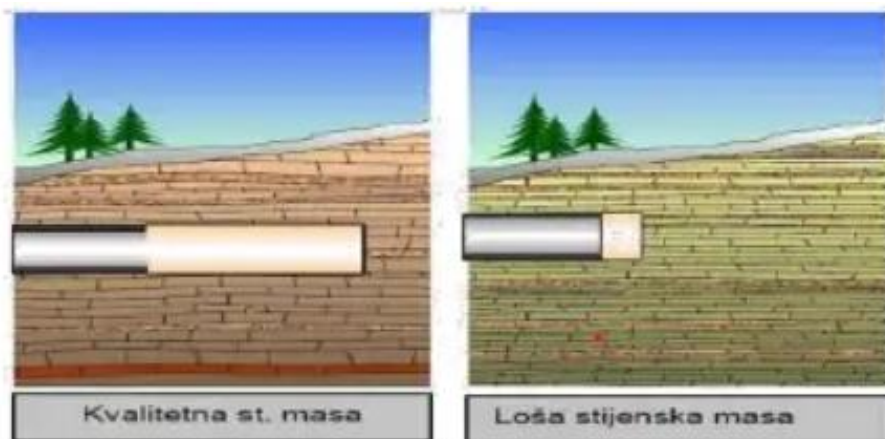
- Osim na debljinu podgrade i njenu fleksibilnost, podgrada mora biti ugrađena pravovremeno - niti previše rano niti previše kasno.
- Kruta i rano ugrađena- preuzima na sebe prevelika naprezanja
- Fleksibilna i kasna- razrahljenje stijenske mase- visoka naprezanja podgrade



Slika 13- dimenzionalne karakteristike podgrade [19]

5. Opažanja tijekom građenja (monitoring)

- Pažljivo i točno promatranje ponašanja stijenske mase kako bih se moglo točno utvrditi vrijeme gradnje podgrade.
- Kvalitetna stijenska masa - dopuštena veća dužina ne podgrađenog tunela
- Ne kvalitetna stijenska masa - podgradu je potrebno ugrađivati odmah



Slika 14 - pravovremena ugradnja obloge u ovisnosti o kvaliteti stijenske mase [19]

Kada konstatiramo kako je NATM-ova teoretska osnova upravo ta da se okolna stijenska masa, tlo, više ne promatra kao opterećenje koje moramo spriječiti već kao jedan od nosivih dijelova podgrade, promatramo faktore reakcije izazvane iskopom te prilagođavamo količine i tipove ostalih, puno zahtjevnijih, podgradnih elemenata. Podgradni sustav od mlaznog betona, sidara mreža i tunelskih lukova, zajedno u interakciji s nosećim prstenom stijenskog masiva, predstavlja temeljnu pretpostavku tehnološkog koncepta NATM iskopa i podgrađivanja tunela [20].

Glavnih 4 koraka u jednom ciklusu građenja NATM metodom su:

1. Iskop
2. Ugradnja primarne podgrade
3. Kontrolirana deformacija stijenske mase
4. Ugradnja sekundarne podgrade

NATM metodom iskop se vrši miniranjem ili strojnim iskopom.

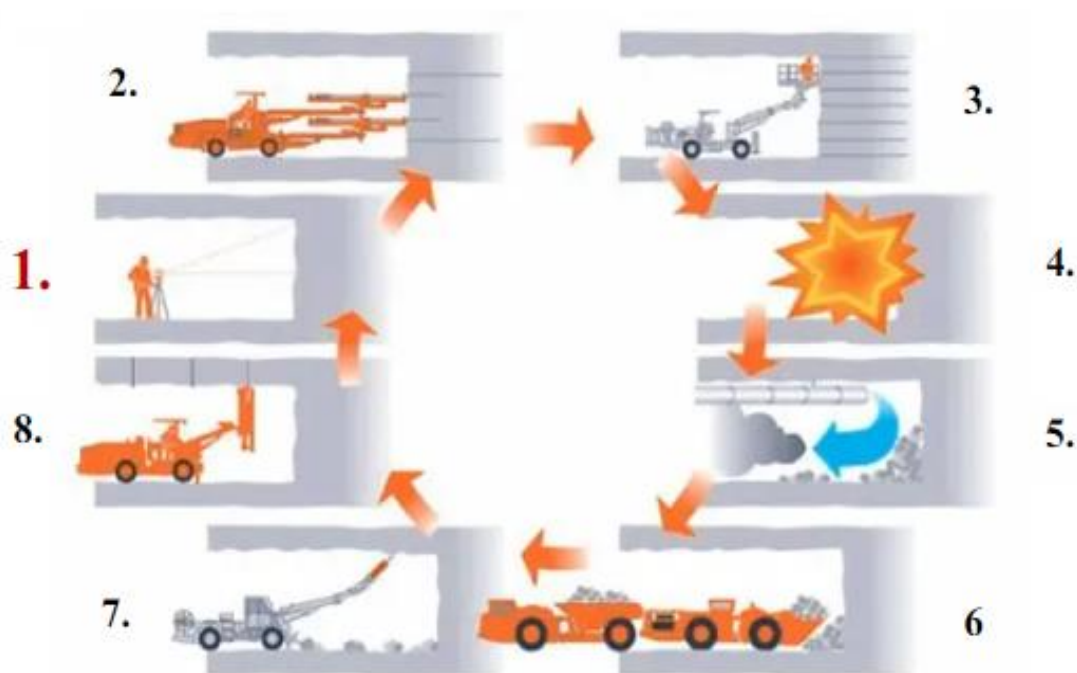
4.2.1. Miniranje

Proces miniranja u tunelu je cikličko razaranja stijenske mase eksplozivom. Miniranje ili „drill and blast“ metoda iskopa je razaranje ili razbijanje ili usitnjavanje neke čvrste ili tvrde građe (stijene) djelovanjem određene eksplozivne tvari (eksploziva), odnosno eksplozijom [16].

Cijeli ciklus sastoji se od više usko povezanih radnji kako bi cijeli proces bio učinkovit i što manje destruktivan za okolnu stijenu.

Ciklus odvijanja radova miniranja odvija se u osam koraka:

1. Označavanje položaja minskih bušotina
2. Izrada minskih bušotina
3. Izrada minskog polja- postavljanje eksploziva
4. Aktiviranje minskog polja i eksplozija
5. Ventiliranje ispušnih plinova i slijeganje prašine
6. Utovar i odvoz iskopanog materijala
7. Kavanje
8. Instalacija podgrade [16]



Slika 15- svi procesi rada prilikom DRILL and BLAST metode iskopa [21]

Proces započinje točnim određivanjem pozicija minskih bušotina koje su definirane elaboratom miniranja. Točne pozicije mogu biti rukom iscrtane od strane odgovorne osobe na profilu koji se minira te ih strojar izvodi vlastitom navigacijom stroja, ali ta metoda je zastarjela pa se danas više koriste digitalna rješenja i programi koji su povezani na sami stroj za bušenje, koji ga usmjeravaju da buši na točnim pozicijama određenim elaboratom miniranja.



Slika 16 – ručno ocrtavanje pozicija bušotina za miniranje i stvaranje minskog polja [14]

Nakon što se odrede pozicije bušotina, započinje bušenje rupa u stijenskoj masi. Bušenje, u smislu djelovanja alata na poziciju dodira sa stijenskom masom, može biti dinamičko ili statičko. Pri dinamičkom bušenju stijenu drobimo udarom alata dok kod statičkog stijenu usitnjujemo pritiskom uz okretanje glave alata. Perkusivno bušenje, koje je kombinacija udara i zaokretanja glave alata, najčešći je oblik na koji se odlučuju izvođači radova zbog najveće učinkovitosti. Oprema za bušenje minskih bušotina uglavnom podrazumijeva lafetirane bušeće čekiće i samohodne bušilice sa dubinskim bušećim čekićima [16].

Uvjeti na gradilištu su promjenjivi pa je potrebno imati više varijacija obrazaca bušenja. Uspješnost bušenja očituje se glatkim stijenkama točnih dimenzija poprečnog profila tunela.

Prema veličini promjera bušotine se dijele na:

1. Male : <38 mm
2. Srednje: 38-64 mm
3. Velike: >64 mm [21]

Što je bušotina manja, potrebno je manje svrdlo. Manje svrdlo u odnosu na veliko je savitljivije te je mogućnost izrade nepravilne bušotine puno veća, odnosno veća je šansa da nam miniranje neće biti uspješno. Svako neuspješno miniranje povećava trošak i produljuje trajanje radova.



Slika 17- bušeci strojevi [22]

Nakon izrade minske bušotine, slijedi treći korak ciklusa u kojem se u bušotinu postavlja eksplozivna tvar. Eksploziv, uz djelovanje visoke topline ili udara, u kratkom vremenskom periodu oslobađa velike količine energije koje demoliraju stijensku masu. Najpoznatiji i najčešće korišteni eksploziv je trinitrotulen poznatiji kao T.N.T. Eksplozivne tvari koje se koriste pri miniranju tunela moraju biti otporne na mehaničke osjetljivosti, na udar i trenje te na različita toplinska djelovanja koja se mogu pojaviti prilikom njihovog ugrađivanja, transporta, skladištenja i sl.

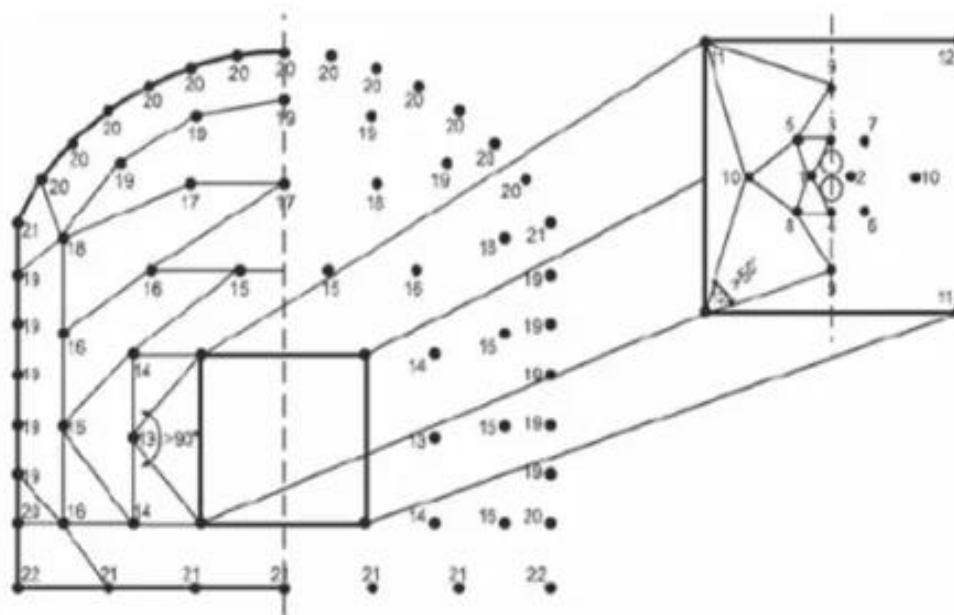
Eksplozive karakteriziraju:

1. Brzina detonacije – brzina širenja detonacijskog vala kroz eksploziv (u m/s)
2. Brizantnost – razorna snaga, tlak detonacije
3. Snaga – radna sposobnost eksploziva
4. Prijenos detonacije – razmak prijenosa detonacije s patrone na patronu (u cm)
5. Energija eksploziva
6. Obujam plinova
7. Temperatura eksplozije
8. Gustoća eksploziva
9. Bilanca kisika
10. Osjetljivost
11. Otpornost na vodu, na mraz i sl. [20]

Jednom kada je bušotina napunjena eksplozivnom tvari i aktivacijskim sredstvom, naziva se mina. Polaganjem eksploziva u sve minske bušotine, izrađeno je minsko polje - određen broj mina raspoređen po nekom pravilu u stijeni. Svako punjenje mine sadrži glavno punjenje (glavni eksplozivni naboj) i inicijalno punjenje koje aktivira eksploziv glavnog punjenja. [16]

Eksplozivnim tvarima smiju rukovati samo kvalificirani radnici koji su odgovorni za provedbu radova miniranja.

Nakon što je minsko polje ugrađeno, ono se aktivira i dolazi do pojave eksplozije, koja svojom snagom i energijom razara stijensku masu. Ne minira se cijelo minsko polje u isto vrijeme, već postoje pravila po kojima se određuju redoslijedi eksplozija. Glavni koncept miniranja je da svaka mina oslabi onu ispred sebe [21]. Kontroliranim redoslijedom eksplozija reguliramo posljedice od udara, a i omogućavamo razvaljenoj stijenskoj masi kretanje prema otvoru tunela, a ne prema čvrstoj okolini. Na Slici 17 prikazan je vremenski slijed aktiviranja pojedinih mina u minskom polju.



Slika 18- redoslijed aktivacije mina u minskom polju [21]

Peti korak u ciklusu miniranja je ventiliranje nakupljenih plinova koji se javljaju kao posljedica eksplozije. Neki od štetnih plinova koji nastaju eksplozijom su dušikov monoksid, dušikov dioksid, ugljikov monoksid i ugljikov dioksid te amonijak. Osim što je ventiliranje važno za evakuiranje štetnih plinova, jednako je važno i za evakuaciju stijenske mase koja je usitnjena do razine prašine. Prašinu i plinove bitno je ukloniti iz tunelske cijevi prije nastavka radova.[16]

Proces ventiliranja može se vršiti na dva načina. Prvi način u funkciji paralelno koristi dvije cijevi, jednu za upuhivanje svježeg zraka, a drugu za isisivanje kontaminiranog zraka. Druga varijanta prvog načina koristi jednu cijev u podijeljenim ulogama, odnosno ista cijev u prvom koraku dovede svježji zrak u tunelsko okno, a zatim isisa štetne plinove i prašinu te ih vodi van okna. Drugi način obuhvaća samo upuhivanje svježeg zraka, uz pretpostavku da će štetni plinovi izići kroz otvor tunela. To međutim traži više vremena za stvaranje povoljnih radnih uvjeta, koje se produljuje napredovanjem iskopa s obzirom da raste udaljenost od otvora tunela [16].

Kada se ostvare povoljni uvjeti rada ventiliranjem tunelskog okna, nastupa šesta faza ciklusa iskopa miniranjem, a to je uklanjanje minirane stijene. Transport će uvelike ovisiti o načinu na koji je stijena minirana. Ako miniranju pristupimo na način da stijensku masu što ekonomičnije usitnimo, olakšavamo si baratanje s usitnjenim materijalom koji se može jednostavno ukloniti

i koristiti kao mineralna sirovina ili građevinski materijal. Međutim, ako miniranju pristupimo na način da stijensku masu koja ostaje trebamo što više očuvati, uklanjanje kamenog iskopa iz tunelskog okna bit će kompliciranije zbog veličine razorenih komada.

Transport iskopanog materijala, s obzirom da je tunel horizontalna linijska građevina, spada u unutarnji vodoravni transport koji može biti kontinuirani, isprekidani ili složeni. Izvoz materijala prekinut je u svakom ciklusu tijekom provođenja procesa miniranja, no svejedno može biti organiziran kao kontinuirani, korištenjem transportnih traka, grabuljastih i pločastih transporterera, konvejnera i ostalih transportnih sredstava [16]. Transportni sustavi zahtijevaju i strojeve koji će puniti njihove kapacitete, najčešće utovarivače. Kontinuirani transport odvozi iskapani materijal na gradilišni deponiji gdje se može razvrstavati po granulaciji ili usitnjavati.



Slika 19 – transportna traka za odvoz usitnjene stijenske mase izvan okna tunela[23]



Slika 20- drobilica kamena [24]

Isprekidanim transportom se sa čela tunela iskopa utovarivačem utovaruje iskop u kiper, damper ili sandučar te se zatim vozi ili na gradilišnu deponiju ili direktno na odlagalište što smanjuje cijenu rada zbog manje radnih procesa utovara i istovara iskopanog materijala.

Sedmi proces tzv. kavanje kreće kad je sav razvaljeni materijal uklonjen s čela tunela, a u tom procesu se pikamerom uklanjaju nepravilnosti u slobodnom profilu tunela koje se pojavljuju zbog (ne)uspješnog miniranja. Što je miniranje bilo uspješnije potreba za kavanjem se smanjuje i obrnuto – neuspješno miniranje znači više kavanja. Prilikom uređenja slobodnog profila tunela kavanjem također se nakuplja materijal koji treba transportirati van tunelskog okna. Jednom kada je slobodni profil tunela i okolni stijenski masiv „spreman“ te sav iskop transportiran ugrađuje se primarna podgrada. [16]

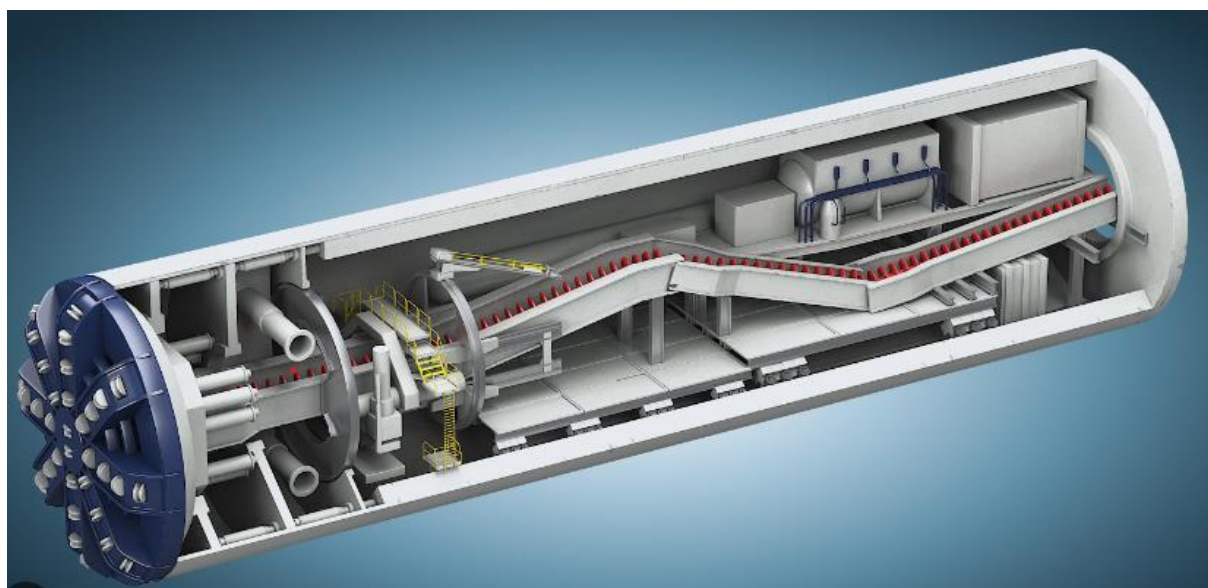
4.2.2. *Strojni iskop*

Za razliku od miniranja, metoda iskopa tunelske cijevi strojnim iskopom manje je dinamična i mnogo sporija. Odabir mehanizacije ovisi o uvjetima na gradilištu, odnosno o kvaliteti stijenskog materijala koja uvjetuje faznost iskopa s obzirom na slobodni profil tunela [16].

Strojeve koje koristimo pri strojnom iskopu možemo generalno podijeliti u dvije skupine:

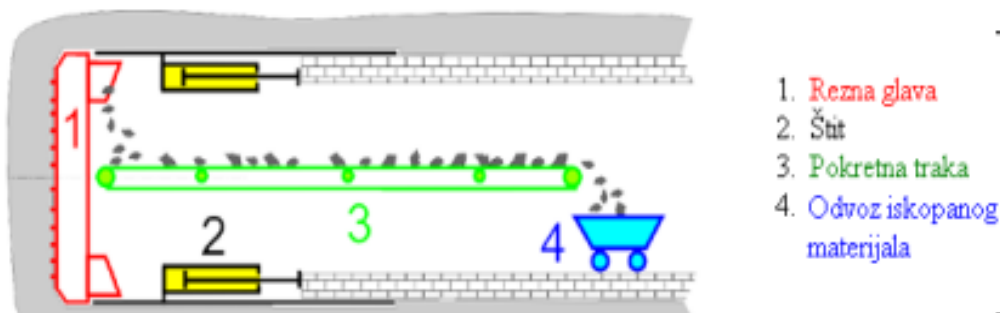
1. Strojevi za iskop tunelskog otvora u punom profilu
2. Strojevi za sukcesivni (djelomičan) iskop tunelskog otvora [25]

Strojeve za iskop u punom profilu nazivamo još i „krtice“ (TBM - *Tunnel Boring Machines*). Strojevi za iskop u punom profilu su među najsvremenijim strojevima za podzemni iskop. Na njihovom čelu nalazi se rotirajuća rezna glava koja vrši iskop. Reakcija potisnoj sili ostvaruje se preko razupirača koji se opiru o bokove tunela [14].



Slika 21 - stroj za iskop u punom profilu – „krtica“ [26]

Na Slici br. 22 vidi se način funkcioniranja i osnovni principi rada „krtice“. Rotirajuća rezna glava vrši iskop materijala koji se vodi na traku za transport do gradilišne deponije.



Slika 22 - shema procesa rada stroja za bušenje u punom profilu [14]

Sukcesivan iskop vrši se po fazama, ali i po punom profilu kao i kod TBM metode. Najčešća građevinska mehanizacija koja se koristi pri ovoj vrsti iskopa je stroj sa hidrauličkim čekićem (pikamer) i strojevi s glodačima ili diskovima na pokretnoj glavi. Pikamer tj. bager s hidrauličkim čekićem češće je u upotrebi prilikom iskopa stijenske mase lošije kvalitete, pri čemu se oblik kopanog profila izvodi preciznije u odnosu na miniranje, ali uzročno-posljedično ta metoda iskopa je sporija. [1] Strojeve s glodačima na pokretnoj glavi koristit ćemo prilikom iskopa stijenske mase lošije i srednje kvalitete, a rijetko i u čvrstim stijenama. Metodom strojnog iskopa čvrste stijene koristit će se strojevi s diskom na pokretnoj glavi. [26]



Slika 23- razbijanje stijenske mase s pikamerom [27]

5. Obrada i upotreba iskopane stijenske mase

Kako bi proces gradnje, ne samo tunela već i drugih građevina, bio financijski što optimalniji i uspješniji, trebamo iskoristiti sve dostupne resurse na koje nailazimo prilikom građenja. Izvedba tunela je specifični proces građenja jer kroz cijelo trajanje projekta susrećemo se s velikim brojem prirodnih resursa koje moramo što optimalnije iskoristiti kako bi smanjili troškove građenja, a i ubrzali sam proces. Tijekom radova na iskopu tunela stvara se velika količina građevinskog materijala (kamena) koji se treba adekvatno obraditi kako bi se mogao ponovo upotrebljavati kao sirovina za druge radove na samom tunelu ili na drugom objektu.

5.1. Obrada iskopane stijenske mase

Prilikom gradnje tunela, neovisno o odabranoj tehnologiji izvedbe, stijensku masu iskopa treba na adekvatan način transportirati do gradilišne, privremene ili stalne deponije. Stijenska masa iskopa nastaje kao direktan utjecaj djelovanja strojeva na stijensku masu kroz koju se tunel gradi. Prilikom korištenja različitih tehnologija izvedba građenja, metodom bušenja i miniranja ili strojnog iskopa, odvaljena stijenska masa unutar tunela zahtijeva određenu obradu prije samog transporta. Ta obrada će prvenstveno značiti smanjenje veličine odvaljene stijenske mase. Tako će komadi stijenske mase odvaljeni miniranjem biti različitih veličina dok će se strojnim iskopom veličine komada moći reducirati prilikom samog iskopa preciznijim radom strojara. Možemo reći da se potreba za obradom iskopanog materijala javlja odmah nakon procesa miniranja ili strojnog iskopa u smislu reduciranja veličina odvaljenih komada koji transportni sustav može podnijeti, odnosno transportirati u svojim gabaritima, a da ne dolazi do preopterećenja ili trganja opreme i uređaja instaliranih u samom sustavu. Također, reduciranje veličine odvaljenih komada zahtijevaju strojevi poput utovarivača (stroj kojim se najčešće vrši tovarjenje materijala), koji će prilikom kontinuiranog transporta odlomljeni stijenski iskop tovariti na transportnu traku, a pri isprekidanom transportu u kamione kipere ili u dumpere. Takvi strojevi imaju limitirane tehničke specifikacije poput maksimalne težine podizanja, veličine korpe - volumen korpe, maksimalne ukupne težine da stroj nije u pretovaru i sl. koji ne smiju biti premašeni prilikom rada.

Bager koji ima instalirani hidraulični čekić – pikamer, odlomljene komade stijene kreće usitnjavati odmah nakon faze probijanja u kojoj je ostvareno napredovanje po dužini trase

tunela. Tako će, nakon miniranja i ventiliranja tunelskog okna, kada rad bude ponovo omogućen, usitniti veće komade kako bi utovarivač mogao početi utovar u transportni sustav.

Transportnim sustavom, usitnjena stijenska masa iskopa putuje van tunela gdje se može privremeno deponirati – princip kontinuiranih transporta. Na takvoj se gradilišnoj deponiji najčešće nalazi mobilna drobilica kamena koja može usitnjavati iskopani materijal po frakcijama. U prvoj fazi obrade kamena pikamerom u obzir treba uzeti i maksimalnu veličinu komada koje drobilica može izdrobiti da se isti radni proces usitnjavanje ne vrši dva puta, odnosno da se na gradilišnoj deponiji ne treba opet usitnjavati kamen, već da ga se samo tovari u drobilicu.

5.1.1. Građevinska mehanizacija za obradu iskopane stijenske mase na primjeru probijanja nove cijevi Tunela Učka

Građevinskom mehanizacijom možemo zvati svaki stroj s motornim pogonom koji služi kao pomoćno radno sredstvo u procesu gradnje. Svaki stroj opisan je svojom tehničkom specifikacijom kojom se navodi njegova masa, prostorna veličina, snaga, kapacitet, odnosno radni učinak. Glavni preduvjet za izvođenje grubih građevinskih radova iskopa stijenske mase te obrade iste u zadanom roku i financijskim okvirima je odabir adekvatne građevinske mehanizacije. U procesu gradnje tunela uključen je veliki broj radnika i strojeva kroz čitavo trajanje radova.

Na primjeru probijanja druge cijevi Tunela Učka nabrojana je građevinska mehanizacija uključena u građenje

Građevinska mehanizacija za kompletan obim posla građenja druge cijevi tunela Učka:

1. Kamion sandučar
2. Kamion kiper
3. Zglobni damper
4. Utovarivač
5. Bager s korpom (i bager s hidrauličkim čekićem)
6. Tunelska bušilica
7. Transportna traka
8. Podizna platforma
9. Čeljusna drobilica

10. Viljuškar
11. Stroj za sidrenje
12. Pumpa za beton
13. Automješalica
14. Strojna mlaznica za ugradnju mlaznog betona
15. Vibracijski valjak
16. Buldožer
17. Finišer [16]

Nabrojana mehanizacija se koristi u međusobnoj interakciji ovisno o radnim procesima faze koja je u izvođenju, stoga možemo izdvojiti dio te mehanizacije koja sudjeluje u procesu iskopa i obrade stijenskog iskopa.

Tunel Učka građen je tehnologijom bušenja i miniranja po NATM metodi građenja, a koristio se kontinuirani transport trakom za evakuaciju materijala pa se u tim uvjetima građenja za iskope i obradu materijala odabrala sljedeća građevinska mehanizacija:

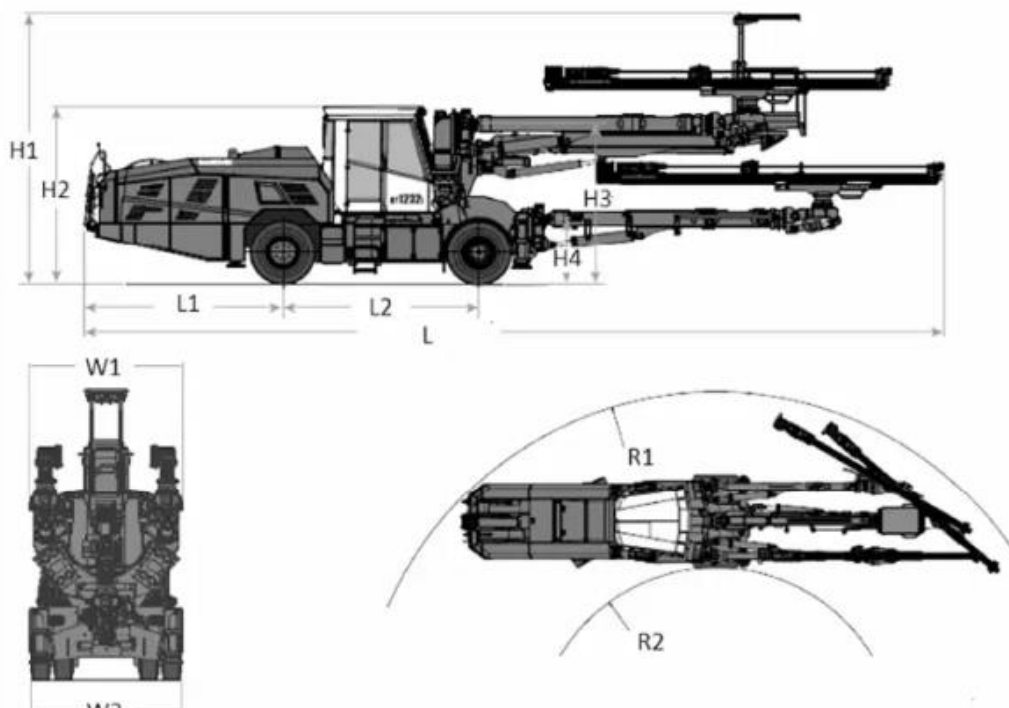
1. Kamion sandučar
2. Kamion kiper
3. Zglobni damper
4. Utovarivač
5. Bager s korpom (i bager s hidrauličkim čekićem)
6. Tunelska bušilica
7. Transportna traka
8. Podizna platforma
9. Čeljusna drobilica [16]

Dio navedene mehanizacije je puno uže povezan sa tunelogradnjom i obradom kamena kao npr. tunelska bušilica, transportna traka i čeljusna drobilica, dok ostatak možemo svrstati u uobičajeniju gradilišnu mehanizaciju bez koje teško da se može izvesti bilo koji ozbiljni projekt od niskogradnje do visokogradnje.

Mehanizacija na probijanju druge cijevi tunela Učka:

Glavni izvođač druge cijevi Tunela Učke odabrao je tunelske bušilice tipa;

1. SANDVIK DT 1232i
2. ROBODRILL Robofore 640
3. ROBODRILL Pantofore 649
4. ROBODRILL Crawler Caterpiler 604 [16]



Slika 24- tunelska bušilica SANDVIK DT 1232i [28]

Specifikacije tunelske bušilice SANDVIK DT 1232i su sljedeće:

Dimenzije:

- $H1 = 5,780 \text{ m}$
- $H2 = 3,800 \text{ m}$
- $L = 19,160 \text{ m}$
- $W1 = 3,065 \text{ m}$
- $R1 = 11,860 \text{ m}$
- $R2 = 6,040 \text{ m}$

Tehničke specifikacije:

- brzina vožnje $v = 15 \text{ km/h}$
- masa stroja $m = 35.000 \text{ kg}$
- masa lafete $m_l = 232 \text{ kg}$
- duljina lafete $l = 1,01 \text{ m}$
- snaga bušenja 31 kW
- maksimalni pritisak bušenja 225 bar
- snaga motora 164 kW
- kapacitet spremnika za gorivo 150 l [28]

Glavni izvođač odabire čeljusnu drobilicu CHRUSER GIPOBAC B 1185 PB FDRE

Slika 25- čeljusna drobilica CHRUSER GIPOBAC B1185 PB FDR E [29]

Dimenzije:

- visina $H = 4,20$ m
- širina $W = 3,10$ m
- duljina $D = 18,00$ m

Tehničke specifikacije:

- otvor: $1,10 \times 2,50$ m
- ulaz u drobilicu: $1,13 \times 8,50$ m
- izlaz: $1,20 \times 13,00$ m
- kapacitet $q = 500$ t/h
- kapacitet otvora $q_0 = 6$ m³
- masa stroja $m = 72.000$ kg
- snaga motora 328 kW

Glavni izvođač odabire transportnu traku REI-RBL TI



Slika 26- Istarska strana gradilišta- transportna traka REI- RBL TI [30]

- prosječna duljina sustava $L = 310$ m
- širina trake $W = 1,2$ m
- učinak $U = 2000$ t/h
- snaga pogonske jedinice 500 kW
- jedna pogonska jedinica

5.2. Upotreba obrađene stijenske mase

Kroz povijest, a i danas, kameni agregati imaju široku primjenu u građevinarstvu.

Agregat definiramo kao granulirani materijal prirodnog, industrijski proizvedenog ili recikliranog podrijetla koji se upotrebljava za građenje. [31]

Osnovnom podjelom agregat se može podijeliti na:

1. Prirodni kameni agregat (šljunak) – nastaje raspadanjem kamenih masiva
2. Drobljeni kameni agregat (tucanik) – nastaje drobljenjem većih masiva u proizvodnom procesu
3. Lagani agregat – gustoća manja od 2000 kg/m^3 i nasipne gustoće manje od 1200 kg/m^3
4. Specijalni agregat – agregat za betone velike volumne mase [31]

Područje primjene kamenog agregata u građevinarstvu je veliko. Agregate koristimo u visokogradnji i niskogradnji. U visokogradnji agregat se koristi u betonima kao osnovna komponenta betona, a kako je današnji princip gradnje teško zamisliv bez upotrebe betona, možemo reći da je agregat izuzetno bitan za sve građevinske pothvate. U niskogradnji kameni agregat se koristi za nasipavanje nosivih slojeva kolničke konstrukcije od nevezanog materijala, nasipavanje cijevi, nasipavanje plaža, nasipavanje šumskih puteva, gabioni za potporne zidove. Agregat također koristimo za izradu nosivog sloja asfalt betona, izradu veznog sloja asfalta te izradu habajućeg sloja asfalta.

Prilikom obrade kamena građevinskom mehanizacijom opisanom u poglavlju 5.1. dobiva se drobljeni kameni agregat (tucanik). Ovu vrstu agregata najčešće koristimo u nasipavanju nosivog sloja kolničkih konstrukcija i za nasipavanje donjeg ustroja pruge.

Svaki agregat ima različita svojstva koja će diktirati njegovu daljnju uporabu. Ispitivanja koja provodimo na kamenom agregatu:

1. Granulometrijski sastav
2. Oblik zrna
3. Indeks plosnosti
4. Otpornost na drobljenje
5. Otpornost na abraziju
6. Otpornost na smrzavanje/odmrzavanje

7. Minerološko-petrografski sastav
8. Udio drobljenih i lomljenih površina
9. Otpornost na polirnost
10. Otpornost na trošenje
11. Otpornost na toplinski šok
12. Prionjivost bitumenskih veziva
13. Određivanje šupljina u suhozbijenom punilu
14. Gustoća punila za betone i kolničke konstrukcije [31]

Sva ispitivanja na agregatu provodimo s ciljem da ga što adekvatnije, u širokoj primjeni, iskoristimo u odnosu na njegove karakteristike i svojstva. Agregat koji je nastao drobljenjem stijenske mase prilikom građenja tunela možemo ponovo koristiti u tunelu za nasipavanje kolničkih konstrukcija, kao osnovnu komponentu betona primarne i sekundarne podgrade te za sve za što nam treba kameni agregat kao sirovina, ali pod uvjetom da zadovolji sva ispitivanja u odnosu na ono za što je predviđena njegova nova upotreba.

6. Zaključak

Izgradnja tunela je ozbiljan i izrazito odgovoran proces. Nužno je projekt shvatiti ozbiljno i na taj način pristupiti rješavanju problematike koju gradnja tunela povlači za sobom. Potrebna je velika suradnja svih inženjera i stručnih osoba izravno uključenih u projekt - od projektanata do odgovornih ljudi na gradilištu. Sama priprema za izgradnju tehnologije je veoma zahtjevna i opširna te je potrebno predvidjeti sve moguće scenarije koji bi mogli utjecati na razvoj izvedbe. Ključna uloga u odabiru metode građenja odnosno iskopa tunelske cijevi je kvaliteta stijenske mase kroz koju će tunel biti građen. Na uzorku stijene provest ćemo odgovarajuća ispitivanja te ćemo ju prema rezultatima kategorizirati.

Proces iskopa odnosno odabir metode iskopa stijenske mase nameće se kao ključan faktor u gradnji tunela. Odabrana metoda za sobom povlači organizaciju svih radnih procesa gradnje te odabir odgovarajuće građevinske mehanizacije. Nakon odabira tehnologije iskopa pred izvođačem je velik zadatak: kako optimizirati izvedbu gradnje s dostupnom mehanizacijom kako bi projekt bio završen u roku i financijski uspješan. Doprinos uspješnosti projekta postiže se i ispravnom obradom i uporabom izbijene stijenske mase na način da istu gledamo kao resurs za daljnje potrebe gradnje (npr. nasip kolničke konstrukcije, agregat za beton primarne i sekundarne obloge i sl.).

Stoga može se zaključiti da je proces gradnje tunela izrazito izazovan inženjerski pothvat čija uspješnost ovisi o puno faktora koje treba detaljno proučiti i analizirati.

7. Literatura

[1] A.D.Parker, Planning and estimating underground construction, McGraw-Hill Book Company, New York, 1970.

[2] HRVATSKA ENIKLOPEDIJA- dostupno na:

<https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=62681>

[3] Nicholas Vlachopoulos: EUPALINOS TUNNEL -First tunnel to be excavated simultaneously from both ends in the 6th century B.C. – ITA-AITES World Tunnel Congress 2023, 11472. Athens, Greece. Dostupno:

<https://mailchi.mp/923c681bd320/on-line-workshop-with-itacus-4969266?e=6ca3115e87>

[4] TRIP ADVISOR - https://www.tripadvisor.com/Attraction_Review-g644219-d3219324-Reviews-Tunnel_of_Eupalinos-Pythagorion_Samos_Northeast_Aegean_Islands.html

[5] TUNELI I PODZEMNE KONSTRUKCIJE, prof dr. ZVONKO TOMANOVIĆ dipl.ing.grad, Sveučilište Crne Gore, Građevinski fakultet

[6] Brian Potter- The Evolution of Tunnel Boring Machines, Construction Physics, 2023.

Dostupno:

<https://www.construction-physics.com/p/the-evolution-of-tunnel-boring-machines>

[7] Doris Ivas, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-Geološko_naftni Fakultet. Diplomski rad: Opterećenja na tunelsku podgradu i primjene nove austrijske metode, Zagreb, 2019.

Dostupno:<https://repozitorij.rgn.unizg.hr/islandora/object/rgn:1053>

[8] POLIECO GROUP- web -

dostupno:<https://polieco.com/casehistory/installation-in-an-underground-tunnel/?lang=en>

[9] Banjad Pečur I, Banjad I – Prekoprofilni iskop tunela // 1. BH kongres o cestama /Ibrulj, Vedran;Jašarević Emir(ur.) Sarajevo: Udruženje konsultanata inženjera Bosne i Hercegovine, 2007. str 939-943.

[10] Hrvatske ceste- Hrvatske Autoceste- Opći tehnički uvjeti za radove na cestama: KNJIGA V – CESTOVNI TUNELI, Zagreb, prosinac 2001.

[11] Bieniawski Z.T. 1976. ROCK MASS CLASSIFICATION IN ROCK ENGINEERING, in Exploitation for rockengineering proc.of.the symp., (ed. Z.T. Bieniawski) 1, 97-106. Cape Town:Balkema.

[12] Barton N.R., Lien R., and Lunde J. 1974. ENGINEERING CLASSIFICATION OF ROCK MASSES FOR THE DESIGN OF TUNNEL SUPPORT, Rock Mech, 6(4), 189-239.

[13] Vrkljan I, KLASIFIKACIJA STIJENSKIH MASA NEZAMJENJIV JE ELEMENT EMPIRIJSKOG PRISTUPA, objavljena skripta,

Dostupno: <https://pdfcoffee.com/03-klasifikacija-stijenskih-masa1-pdf-free.html>

[14] Sveučilište u Zagrebu, Preddiplomski studij- GEOTEHNIČKO INŽENJERSTVO, predavanje 13, TUNELOGRADNJA.

Dostupno:

https://www.grad.unizg.hr/download/repository/GI_13.predavanje_Tunelogradnja.pdf

Usao 07,02,

[15] Ivana Bošnjak, Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet. NOVA AUSTRIJSKA TUNELSKA METODA (NATM) – Rijeka, lipanj 2023.

Dostupno: <https://zir.nsk.hr/islandora/object/gradri%3A1554/datastream/PDF/view>

[16] Katarina Žipovski, PRIKAZ I ANALIZA TEHNOLOGIJE IZVOĐENJA RADOVA NA PROJEKTU DRUGE CIJEVI TUNELA UČKA, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, diplomski rad- Zagreb, rujan 2022.

Dostupno:

https://www.academia.edu/93467847/Prikaz_i_analiza_tehnologije_izvo%C4%91enja_radova_na_projektu_druge_cijevi_tunela_U%C4%8Dka

[17] Hudec M, Kolić D. Hudec S.- TUNELI ISKOP I PRIMARNA PODGRADA

[18] Golser J, Keusching M, Weichenberger F, NATM – Review and Outlook- Geomechanics and Tunneling, 2020: 13(5) 466-474.

[19] Alijagić L, Ramić E, Imamović A, Plakalović N, Čulov N,;RAZLIČITE TEHNOLOGIJE IZGRADNJE TUNELA, Univerzitet u Sarajevu, Sarajevo 2020.

[20] Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Tehnologija građenja 1

. Neobjavljena skripta. Zagreb: Građevinski fakultet; 2020

[21] Michele P., Rock-excavation-handbook-tunneling. StudyLib. Dostupno : <https://studylib.net/doc/25246377/rock-excavation-handbook-tunneling>

[22] Dario Jelčić, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-Geološko _naftni Fakultet. Diplomski rad: CIKLUS IZRADE TUNELA BUŠENJEM I MINIRANJEM, Zagreb, 2021.

Dostupno: <https://repositorij.rgn.unizg.hr/islandora/object/rgn:1763>

[23] Privredna hrvstaka: članak Hina/P.hr, srpanj 2022.

Dostupno : <https://privredni.hr/druga-cijev-tunela-učka-je-vazan-projekt-koji-sjajno-napreduje>

[24] Svijet strojeva – drobilica RM 70GO!2.0

Dostupno: <https://www.svet-strojev.com/hr/droblilica-rm-70go-20>

[25] Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Mehanika stijena Neobjavljena skripta. Zagreb: Građevinski fakultet; 2020

[26] Encardio RITE Metasensing For Mega Structures- All About Tunnel Boring Machine – Components, Types and Advantages.

Dostupno: <https://www.encardio.com/blog/all-about-tunnel-boring-machine-components-types-advantages>

[27] Istra Terra Magica- <https://www.istriaterramagica.eu/novosti/gospodarstvo/do-probijanja-druge-cijevi-tunela-učka-jos-samo-500-metara-evo-koliko-ce-trajati-putovanje-od-zagreba-do-pule/>

[28] Sandvik, DT1232i Tunneling Jumbo. Sandvik

Dostupno: <https://www.rocktechnology.sandvik/en/products/underground-drill-rigs-and-bolters/tunneling-jumbos/dt1232i-tunneling-jumbo/>

[29] Gipobac, Gipobac B 1185 PB FDR, Gipobac B 1385 PB FDR and gipo feed point on runners

Dostupno : <https://www.gipo.ch/en/news/2019/gipobac-b-1185-pb-fdr-gipobac-b-1385-pb-fdr-und-kufenmobile-aufgabestelle>

[30] Ibrišević R. , Druga cijev tunela Učka: najveće infrastrukturno gradilište u zemlji – svakim miniranjem do novih 10 metara, u Jutarnjem listu, ožujak 2023.

dostupno : <https://www.jutarnji.hr/autoklub/aktualno/druga-cijev-tunela-ucka-najvece-infrastrukturno-gradiliste-u-zemlji-svakim-miniranjem-do-novih-10-metara-15319455>

[31] Serdarušić A., METODE ISPITIVANJA KAMENIH AGREGATA, , Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-Geološko-naftni Fakultet. Diplomski rad, Zagreb 2018.

Dostupno: <https://repozitorij.rgn.unizg.hr/islandora/object/rgn:788>