

Mehanizovana izrada podzemnih prostorija velikog profila

Dušan Milaković



Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду

[ДР РГФ]

Mehanizovana izrada podzemnih prostorija velikog profila | Dušan Milaković | | 2022 | |

<http://dr.rgf.bg.ac.rs/s/repo/item/0006381>

Univerzitet u Beogradu
Rudarsko-geološki fakultet



Završni rad

Master akademske studije

МЕХАНИЗОВАНА ИЗРАДА ПОДЗЕМНИХ ПРОСТОРИЈА ВЕЛИКОГ ПРОФИЛА

Kandidat:

Dušan Milaković R544/21

Mentor:

Dr Rade Tokalić, red. prof.

Beograd, septembar, 2022.

Komisija:

1. Dr Rade Tokalić, redovni profesor, mentor

Univerzitet u Beogradu - Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

2. Dr Lutovac Suzana, vanredni profesor, član

Univerzitet u Beogradu - Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

3. Dr Vladimir Milisavljević, vanredni profesor, član

Univerzitet u Beogradu - Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

Datum odbrane: _____

Sadržaj

1.	UVOD	1
1.1.	Istorijski razvoj.....	1
1.2.	Opšte o tunelima.....	2
2.	METODE IZRADA PODZEMNIH PROSTORIJA VELIKOG PROFILA 4	
2.1.	Metode za izradu tunela	4
2.2.	Metode za izradu komora	6
3.	IZBOR MAŠINE ZA IZRADU TUNELA.....	9
3.1.	Izbor mašine za izradu tunela.....	9
3.2.	Elementi za razaranje stene	13
3.3.	Sistemi za kretanje i stabilizaciju mašina.....	15
3.3.1.	Sistem sa potiskivanjem.....	16
3.3.2.	Sistem sa povlačenjem	18
3.3.3.	Sistem sa odupiranjem	19
3.3.4.	Sistem sa gusenicama	20
3.4.	Sistemi za uklanjanje stenskog materijala.....	20
4.	MAŠINE ZA IZRADU TUNELA U STABILNOM STENSKOM MATERIJALU	23
4.1.	Izrada tunela u veoma čvrstim stenama	25
4.1.1.	Izrada tunela velikog prečnika	28
4.2.	Izrada tunela u čvrstim stenama	29
4.3.	Izrada tunela u slabim stenama	32
5.	MAŠINE ZA IZRADU TUNELA U NESTABILNOM STENSKOM MATERIJALU	34
5.1.	Earth pressure balance mašine	34

5.2.	Crossover mašine (Hibridne mašine)	37
5.2.1.	Crossover TBM – XRE mašine	38
5.2.2.	XRE kontrola i uklanjanje prljavštine.....	39
5.2.3.	Rezna glava XRE mašine.....	40
5.2.4.	Crossover TBM – XSE mašine.....	41
5.2.5.	XSE uklanjanje materijala i kontrola.....	41
5.2.6.	Rezna glava XSE mašine	42
6.	METODE IZRADA KOMORA.....	43
6.1.	Postupak izrade kod pravougaonog profila.....	43
6.1.1.	Izrada podsvodnog dela komore	44
6.1.2.	Izrada donjeg dela komore.....	48
7.	IZRADA TUNELA „VIŠNJICA“	55
7.1.	Rudarsko-geološki uslovi i istražni radovi kod projektovanja tunela „Višnjica“	56
7.2.	Izrada tunela „Višnjica“	57
7.3.	Radni ciklus.....	59
8.	ZAKLJUČAK	61

REZIME

Podzemne prostorije velikog profila, danas se uglavnom izrađuju mehannizovanim načinom. Izrada ovih prostorija je skup aktivnosti iz više oblasti koje se međusobno prepliću, a dominantne su oblast građevinarstva i rudarstva. Složena geološka sredina uslovljava izbor tehnologije iskopa, koja posredno utiče na nivo pritiska stenske mase i na izbor podgradne konstrukcije, odvodnjavanja, provetravanja, ... Završni izgled podzemnih objekata velikog profila zavisi od namene i veka trajanja.

U ovom radu, u potrebnom obimu, prikazana je mehanizovana izrada podzemnih prostorija velikog profila. Za izradu tunela u nestabilnom stenskom materijalu korsite se najčešće Earth pressure balance tunnel boring machine (EPB TBM) mašine i po potrebi Crossover (Hibridne) mašine, dok za izradu tunela u stabilnom stenskom materijalu koriste se TBM mašine otvorene konstrukcije i TBM mašine sa jednostrukim i dvostrukim štitom. Mehanizovana izrada tunela prikazana je na primeru izrade tunela „Višnjica“.

Ključne reči: *TBM mašine, tuneli, EPB TBM mašine, podzemne komore, Crossover TBM mašine.*

1. UVOD

Građenje podzemnih infrastrukturnih objekata, naročito transportnih tunela ima pozitivan uticaj na zaštitu životne sredine i istorijskog nasleđa, koje je povezano sa područjem gradnje. Izrada tunela je rezultat odlučivanja koje uzima u obzir trenutne i buduće potrebe, odnosno rezultat strateškog planiranja.

Izbor lokacije tunela ili nekog drugog podzemnog objekta nije rezultat samo geološko-inženjerskih uslova, već je povezano sa širokim konsenzusom zahteva lokalne i šire zajednice i političkih interesa.

Radovi se izvode u geološki delimično poznatoj sredini i za razliku od radova na površini izvode se u otežanim uslovima. Ovi uslovi zahtevali su razvoj različitih inženjersko-tehnoloških rešenja. Zahvaljujući tome danas gotovo da ne postoji radna sredina u kojoj se ne može sagraditi podzemni objekat.

Cilj je pronalaženje racionalnog i najisplativijeg rešenja uzimajući u obzir: planiranu upotrebu objekta, funkcionalne potrebe opreme, potrebe sigurnosti korisnika, planiran vek trajanja objekta, potrebe hidroizolacije i potrebe sigurnosti, upotrebljivosti i ekologije u fazi izvođenja i upotrebe.

U radu će detaljnije biti obrađena izrada tunela mašinama, uzimajući u obzir da se danas tuneli i ostali infrastrukturni objekti uglavnom izrađuju na ovaj način.

1.1. Istorijski razvoj

Počeci čovekovih napora da se iskopavanjem spuste ispod površine izgubljeni su u izmaglici antike, ali postoje brojni arheološki dokazi da je i čovek iz kamenog doba potapao okna i probijao tunele da bi izvukao kremen koji se koristio za izradu oruđa sa oštrim ivicama kao što su to bili noževi, sekire, vrhovi strela i strugala. Kasnije, pošto su daleki preci stekli elementarno znanje o metalurgiji, verovatno po prvi put u centralnoj Aziji, podzemno rudarstvo postalo je neophodno da bi se zadovoljile sve veće potrebe za metalima i legurama u tehnološkim i kulturno naprednim civilizacijama. Veoma rana podzemna otkopavanja ruda koje sadrže metal otkrivena su na Kavkazu, između Crnog i Kaspijskog mora i datiraju otprilike još od

3500. godine p.n.e. Iz ovog centra i drugih nepoznatih lokacija i kroz sve širu komunikaciju i trgovinu, počelo je širenje znanja o rudarstvu.

1.2. Opšte o tunelima

Izgradnja tunela predstavlja jedan od najskupljih, a u isto vreme i najopasnijih od svih inženjerskih poduhvata. Kada uporedimo planiranje izgradnje teških konstrukcija kao što su brane, hidroelektrane, neboderi, višespratnice i mostovi sa planiranjem izgradnjom tunela koje mogu da imaju dužinu od nekoliko stotina metara pa do nekoliko desetina kilometara možemo da kažemo sledeće:

- Istraživanja lokacije za većinu građevina na površini, obično se svodi na relativno male prostore na površini zemlje i sa zadovoljavajućim razumnim troškovima istraživanja i izgradnje.
- Na površini, iskopavanje otkriva nepredviđene uslove koji se mogu proceniti i otkloniti pre izgradnje projektovanog objekta.
- Nasuprot tome, istraživanja i izgradnja tunela odvija se u delimično nepoznatoj radnoj sredini, koja zahteva prilagođavanje i modifikaciju građevinskih procedura kako bi se održao i zaštitio iskop.

Procene troškova za tunele pre izgradnje, posebno za dugačke tunele u regionima geološke složenosti, rade se sa velikom nesigurnošću zbog nemogućnosti preciznog procenjivanja uslova pod zemljom. Nije neuobičajeno da početna procena troškova bude znatno prekoračena zbog poteškoća sa kojima se susreću na deonicama koje čine samo mali procenat ukupne dužine tunela (Ernest E. Wahlstrom, 1973).

Tuneli se izrađuju za različite namene, a osnovna klasifikacija je:

- 1) Tuneli koji se rade za eksploataciju i transport mineralnih sirovina. Ovi tuneli, po pravilu, obezbeđuju odvod podzemnih voda i adekvatnu cirkulaciju vazduha u podzemnim radovima.
- 2) Transportni tuneli, odnosno drumski, železnički, brodski i pešački. Ovi tuneli su među najdužim, a vrlo često se izrađuju u veoma složenoj radnoj sredini.

- 3) Hidrotehnički tuneli (za vodu i kanalizaciju). Ovi tuneli mogu biti gravitacioni ili tuneli za transport tečnosti pod pritiskom.
- 4) Vojni tuneli koji se izrađuju za različite namene, smeštaj eksplozivnih materija, pristup podzemnim aerodromima, skladištima goriva i drugo.
- 5) Pristupni tuneli koji služe za pristup do podzemnih komora ili trezora.
- 6) Tuneli za skloništa i zaštitu od atomskih eksplozija.
- 7) Komunalni tuneli. Izgrađeni su za smeštaj energetskih i komunalnih vodova, hidrovodova, cevi za gas, vodova za sabijeni vazduh i druge namene.

Ovaj rad će biti fokusiran na mehanizaciju koja se koristi za izradu podzemnih prostorija velikih profila i tunela.

2. METODE IZRADE PODZEMNIH PROSTORIJA VELIKOG PROFILA

Zbog velike raznovrsnosti koje se odnose na geološke uslove i oblike i dimenzije podzemnih prostorija, u tehnici građenja podzemnih prostorija razređeno je više različitih postupaka, od kojih je svaki prilagođen određenim uslovima. Odlučujuću ulogu na postupak i organizaciju izrade imaju geološki uslovi i oblik i veličina podzemne prostorije (Jovanović, 1984).

Sa stanovišta geoloških uslova podzemne prostorije mogu biti rađene u:

- 1) Čvrstom stenskom materijalu u kome nije potrebno postavljati privremenu podgradu,
- 2) Čvrstom stenskom materijalu koji iziskuje postavljanje privremene podgrade i
- 3) Nestabilnom stenskom materijalu koji iziskuje posebne mere zaštite od zarušavanja (gline, peskovi, šljunkovi i dr. stene) pri izradi.

Ova podela je izvršena na osnovu uslova izrade, podrazumevajući da li kod izrade iskopa stenski masiv treba ili ne privremeno podgraditi, što je sa stanovišta izrade od bitnog značaja. Da li će stalna podgrada biti postavljena ili ne i kakvih će biti dimenzija to zavisi od projekta i sigurnosnih uslova koje mora da zadovolji objekat u toku eksploatacije.

Sa druge strane na izbor metode izrade ima uticaja i veličina podzemne prostorije, tako da je potrebno razlikovati:

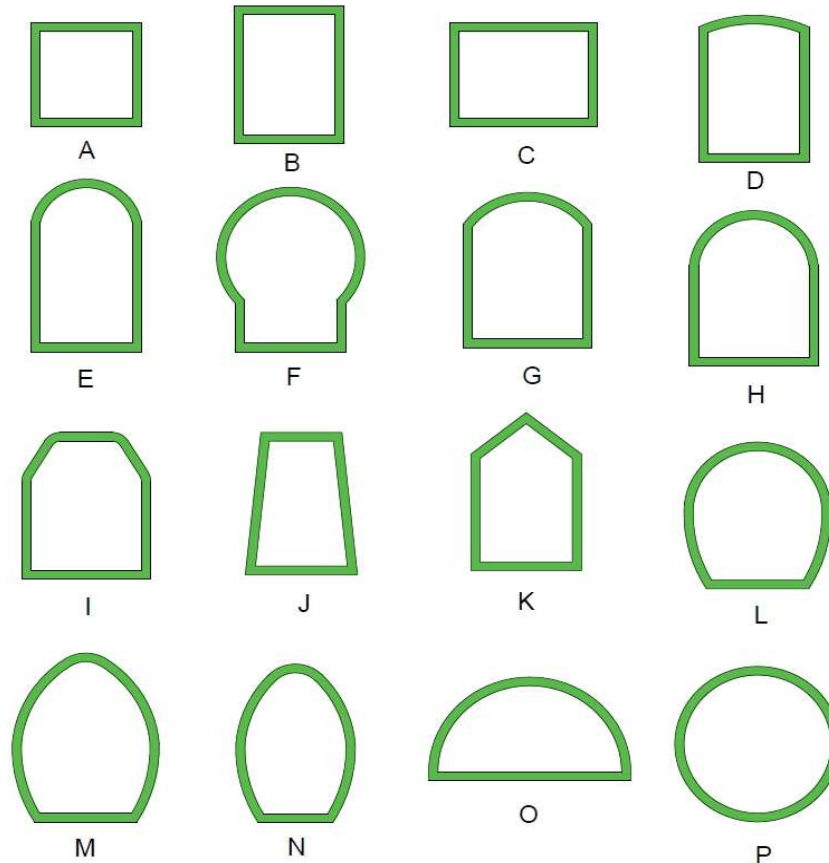
- Metode za izradu tunela i
- Metode za izradu komora.

2.1. Metode za izradu tunela

Dimenzije tunela se kreću od minimalnih do tunela sa velikim poprečnim presekom. Tuneli malog poprečnog preseka mogu biti širine od 1,2 m i visine 2 m, pa njihova izrada predstavlja veliki napor, jer zahteva uglavnom primenu ručnih alata,

kao i rad u skućenom prostoru. U tunelima većih dimenzija rad je olakšan i postoji mogućnosti primene mehanizacije koja ubrzava proces izrade tunela.

Na slici 1 su prikazani mogući oblici tunela koji mogu da se primenjuju:



Slika 1. Oblici tunela pre postavljanje podgrade. A,B,C – pravougaoni oblici; D,E,F,G,H,I – zasvođeni oblici (niskozasvođeni i visokozasvođeni); J,K – trapezni oblici; L,M,N – potkovičasti oblici; O – polukružni oblik; P – kružni oblik. (izvor: Ernest E. Wahlstrom, 1973)

U današnje vreme tuneli se izrađuju sa dva tehnološka postupka koja se međusobno veoma razlikuju i to su postupci izrade:

- eksplozivom i kopanjem i
- kombinovanim mašinama.

S obzirom da je tema ovog master rada vezana za mehanizovanu izradu, detaljan opis biće posvećen tehnološkom postupku koji se odnosina izradu kombinovanim mašinama.

2.2. Metode za izradu komora

Izgradnja komora (podzemnih prostorija velikih raspona, visina i dužina) sa stanovišta izgradnje predstavlja posebno tehničko rešenje, koje zavisi od više činilaca, kao što su: dimenzije komore, oblik komore i fizičko-mehaničke i strukturne osobine stenskog masiva u kome se komora izrađuje. Veoma bitno je pravilno izabrati metodu izrade i redosled radova kod izgradnje podzemnih komora. Mora se uzeti u obzir čitav niz uticajnih činilaca, među kojima se posebno ističu napred navedeni faktori (veličina komore, oblik komore, fizičko-mehaničke i strukturne osobine stenskog masiva) (Jovanović, 1984).

Prilikom izbora metode izrade u obavezi smo da analiziramo sve dobre i loše strane metoda koje mogu doći u obzir u konkretnom slučaju. Tako na primer u nekim slučajevima rudarsko-geološki uslovi omogućavaju da se veoma lako i bez dvoumljenja utvrdi najpogodnija metoda izrade, dok u nekim drugim uslovima izbor postupka izrade predstavlja veoma složen problem, koji se može rešiti samo posle veoma iscrpne i svestrane analize svih činilaca koji utiču na njen izbor (Jovanović, 1984).

Odlučujući uticaj prilikom izbora metode ima stepen istraženosti stenskog masiva na trasi objekta. Veći stepen istraženosti omogućava blagovremeno uočavanje činioca koji otežavaju radove i primenu postupaka za njihovo otklanjanje u pravom momentu. Sredstva i vreme uloženo za izvođenje dobro organizovanih istražnih radova se uvek višestruko isplate (Jovanović, 1984).

Jedan od bitnih faktora koje treba imati u vidu prilikom projektovanja metode izrade jeste stabilnost stenskog masiva u krovini i bokovima i njihovo ponašanje u toku procesa izrade. Stanje u kome se nalazi stenska masa koja okružuje komoru je od presudnog značaja i zavisi od fizičko-mehaničkih i strukturnih osobina dela stenskog masiva u kome se komora izrađuje, jer sve ovo ima direktonog uticaja na tehničko-ekonomske pokazatelje izrade, zaštitu i ekonomičnost. Iskustvo je pokazalo da kod utvrđivanja stabilnosti stenskog masiva nije presudan podatak o čvrstoći, već stepen stabilnosti krovine i bokova pri određenom stepenu otvorenosti (Jovanović, 1984).

Primer za to može biti stenski masiv koji ima veoma visoki stepen čvrstoće, ali ne mora biti stabilan ukoliko je ispresecan pukotinama i slojevima (bancima) mekših stena, duž čijih ravni stenski masiv pokazuje izrazitu nestabilnost u vidu obrušavanja manjeg ili većeg obima. Ova pojava kod komora, s obzirom na daleko veće otvorene površine nego kod tunela, je još izrazitija. U izvesnim slučajevima stene koje u momentu izrade pokazuju sve osobine stabilnih stenskih masa, u toku vremena – pod uticajem vlage iz vazduha ili nekih drugih uticajnih činilaca, počinju da pokazuju osobine nestabilnih stena. Ovakve stene je potrebno svrstati u nestabilne. Konačno, stepen stabilnosti stenskog masiva zavisi od fizičko-mehaničkih i strukturnih osobina i stepena i vremena otvorenosti. Iz navedenih razloga jasno je da na izbor metode izrade odlučujuću ulogu ima stepen stabilnosti stenskog masiva, pa prema tome u toku izvođenja radova stepen zaštite objekta, mehanizacije i zaposlenih u najvećoj meri zavisi od stabilnosti stene (Jovanović, 1984).

Po ovome možemo da zaključimo da prilikom izbora metode izrade prihvata se ona metoda koja obezbeđuje najveću sigurnost pri radu.

U toku izrade iskopa, sa stanovišta stabilnosti krovine i bokova komore, sve metode mogu se grupisati u dve velike grupe:

- Metode kod kojih se paralelno sa izradom iskopa izrađuje i stalna podgrada i
- Metode otvorenih otkopa.

Koja od ovih metoda će biti primenjena zavisi od više činilaca: dimenzija prostorije, stabilnosti stenskog masiva i primenjene mehanizacije.

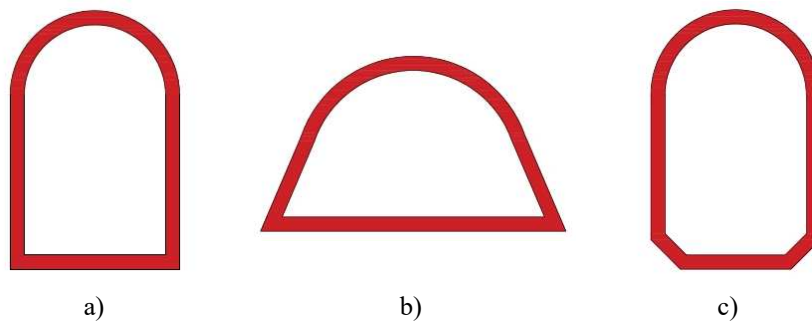
U praksi se često koristi kombinovana metoda izrade dve ili više metoda koje pripadaju ili jednoj ili drugoj navedenoj grupi. U ovakvim slučajevima radovi na izradi izvode se u fazama.

Prema načinu izvođenja radova metode koje se primenjuju kod izrade komora mogu se podeliti u dve osnovne grupe:

- Krovni postupak i
- Postupak sa ostavljanjem centralnog jezgra.

Sa stanovišta oblika ili forme podzemnih komora, u principu, komore mogu biti:

- U obliku pravougaonog poprečnog preseka, sa zasvođenim ili ravnim krovom,
- Zasvođenog poprečnog preseka i
- U obliku vertikalnih cilindara.



*Slika 2. Šema najčešćih poprečnih preseka komora: a) pravougaoni sa svodom;
b) zasvođeni; c) cilindrični*

Kako sem stabilnosti stenskog materijala na način izvođenja radova ima uticaja i oblik komore, to će kod izbora metode izrade biti neophodno voditi računa i o obliku komore kao činiocu od koga zavisi izbor postupaka.

U okviru ovih izlaganja biće opisano nekoliko tehnoloških postupaka šema izrade komora u svetlu prikazanih podela i mogućih varijanti.

3. IZBOR MAŠINE ZA IZRADU TUNELA

Raznovrsnost geoloških uslova, oblika, dimenzija i namena podzemnih prostorija uslovlila je razvoj različitih postupaka i opreme za izradu prostorija. Brzina izrade, stabilnost prostorije, ponašanje konture, način podgrađivanja i odvodnjavanje u fazi izrade, zavisiće od izabranog tipa mašine, pa je potrebno detaljnije obraditi ovu oblast.

3.1. Izbor mašine za izradu tunela

Pri izradi neke podzemne prostorije teži se da se proces izrade pojednostavi, što podrazumeva da se radni ciklus vremenski skрати, rad na izradi olakša, spreči oštećenje stenske mase oko izrađene prostorije, što je neizbežno kod upotrebe eksploziva i iskopna kontura približi projektovanoj. U savremenoj tehnologiji izrade podzemnih prostorija (jamske prostorije, tuneli i dr.) teži se skraćanju radnog ciklusa i pronalaženju jedne mašine koja će istovremeno obavljati više radnih operacija. Ove mašine se zovu kombinovane mašine za izradu podzemnih prostorija, koje s obzirom na uslove rada mogu biti prilagođene za potrebe jame (rudnika) ili za izradu tunela (Jovanović, 1984).

Mašine koje se koriste za izradu tunela su dostigle takav stepen razvoja da se sa sigurnošću mogu koristiti, samo je pitanje pravilnog izbora mašine i principa mehaničkog razaranja stenskog materijala na čelu tunela. Kod ovih mašina za mehaničko razaranje stena u fazi iskopa koriste se različiti postupci, koji zavise od osobina stenskog materijala, i mogu biti na principu: struganja, rezanja i drobljenja. Radi veće efikasnosti i manjeg utroška alata sa kojima se vrši razaranje, ovi postupci se obično kombinuju još i sa smicanjem.

Efikasnost ovih mašina i opravdanost primene vrši se upoređenjem sa metodama izrade miniranjem. Kod ove procene, u većini slučajeva su presudni ekonomski i tehnički pokazatelji, mada to ne mora biti uvek slučaj, jer u izvesnim slučajevima mogu odlučujući da budu: ušteta na vremenu, nedostatak radne snage, sigurnost ili neki drugi specifični zahtevi (Jovanović, 1984).

Prednosti mehaničkog postupka razaranja su:

- rad na izradi izvodi se kontinualno, uz minimalnu buku i bez oštećenja dela stenskog masiva oko izrađene prostorije, što je kod izrade tunela u naseljenim mestima od posebnog značaja,
- stabilnost izrađenog profila, u odnosu na isti profil izrađen miniranjem, je veća dok je opasnost od zarušavanja manja,
- uslovi rada su bolji i sigurnost veća,
- veća brzina izrade i
- veće su uštede u građevinskom materijalu.

Nedostaci su:

- Nabavna cena ovih mašina je veoma visoka, te su početne investicije veoma velike, a otpis znatan,
- Veoma visoki troškovi alata za rad na iskopu i to naročito u tvrdom i abrazivnom stenskom materijalu,
- Vreme pripremnih radova, koje obuhvata nabavku i montažu mašine, je veoma dugo,
- Za rad sa ovom opremom neophodna je stručna i kvalifikovana i u pogledu specijalnosti raznovrsna radna snaga,
- Veći obim naknadnih radova, s obzirom da ove mašine najčešće vrše iskop kružnog profila i
- Izdrobljeni stenski materijal najčešće se ne može koristiti za potrebe betoniranja.

Kada je u pitanju mogućnosti primene ovih mašina, odnosno granice u okviru kojih može doći do njihovog korišćenja, ograničenja su uglavnom tehničke i/ili ekonomske prirode.

Pod tehničkim uslovima podrazumevamo sledeće:

- stenska masa je nepodesna za rad sa kombinovanim mašinama (suviše raspucala, slabe nosivosti, veliki priliv vode i dr.) i

- mašina nije prilagođena radnoj sredini (oblik i dimenzije mašine nisu odgovarajuće za datu radnu sredinu ili se ne mogu izraditi oblik i dimenzije željenog profila).

Ekonomski uslovi obuhvaćeni su sledećim činiocima:

- neusklađenost dužine objekta sa minimalnom ekonomskom dužinom za odgovarajući tip mašine,
- visoki troškovi potrošnog materijala (energije, alata kojim se razara stena i dr.) i
- visoka nabavna cena mašine.

Primenjenost mašine, što podrazumeva koji i kakav tip će da se izabere za rad u nekoj određenoj sredini, isključivo zavisi od osobine stenskog materijala. Sve stene možemo da podelimo u dve grupe:










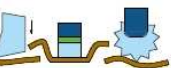








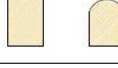




- stabilne i
- nestabilne.

Pod stabilnim stenama podrazumevaju se one stene koje obezbeđuju dobre uslove za rad, koje daju dovoljnu stabilnost da prilikom izrade podzemne prostorije ne mora da se postavi podgradna konstrukcija, kao i da su male šanse da može da dođe do zarušavanja podzemne prostorije.

Pod nestabilnim stenama podrazumevamo one stene kod kojih je neophodno postavljanje privremene i/ili stalne podgradne konstrukcije radi održavanja stabilnosti podzemne prostorije. To su najčešće stene koje imaju osobinu da se odmah po izradi podzemne šupljine zarušavaju, a to su stene u kojima se izrada obavlja u srednjeteškim, teškim i veoma teškim uslovima rada.

U tabeli 1. šematski je prikazana mogućnost primene pojedinih tipova kombinovanih mašina prema karakteristikama stenskog materijala, sa koje se mogu uočiti najosnovnije karakteristike mašina za određene radne uslove.

Tabela 1. Šematski prikaz mogućnosti primene pojedinih tipova kombinovanih mašina u zavisnosti od čvrstoće stenskog materijala (izvor: Jovanović, 1984)

	NEVEZANA STENA	ČVRSTA STENA				
Jednoosna stenska čvrstoća na pritisak MPa		Veoma mala ispod 40	Mala 40 - 80	Srednja 80 - 130	Visoka 130 - 180	Veoma visoka preko 180
Osnovna konstrukcija						
Nosač bušačih alata, odnosno bušačih glava						
Bušači alat						
Tok (način) bušenja						
Profil tunela						
Pogon bušaće glave	Električni (naizmjenični, istosmerni) Hidraulički					
Smeštaj pogonskih motora bušaće glave						

Izbor alata sa kojima se vrši mehaničko razaranje stena ne zavisi samo od stepena čvrstoće stene već i od tvrdoće, koja predstavlja otpor stene protiv mehaničkog dejstva alata. U zavisnosti od ove osobine – koja isključivo zavisi od mineralnog sastava stena, čvrste stene se dele na:

- tvrde i
- meke.

U zavisnosti od stepena abrazivnosti stene alati za razaranje ojačani su tvrdom legurom ili su izrađeni od kvalitetnog legiranog čelika.

Što se tiče stabilnosti otkopane prostorije i njenog ponašanja u momentu izrade, od velikog značaja je ponašanje radnog čela i konture prostorije (Jovanović, 1984). Ovakva karakteristika stenskog masiva posebno je interesantna sa stanovišta obezbeđenja prostora u kome se kreće mašina za izradu. Po ovome u praksi može da nastane jedna od četiri kombinacije stabilnosti konture i čela:

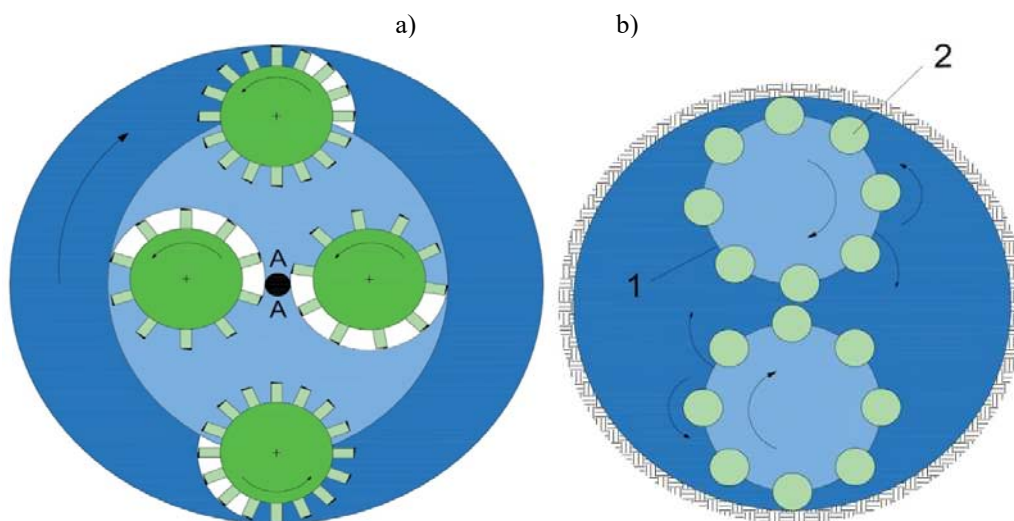
<i>Slučaj</i>	<i>Bokovi</i>	<i>Čelo</i>
<i>1.</i>	<i>Stabilni</i>	<i>Stabilno</i>
<i>2.</i>	<i>Stabilni</i>	<i>Nestabilno</i>
<i>3.</i>	<i>Nestabilni</i>	<i>Stabilno</i>
<i>4.</i>	<i>Nestabilni</i>	<i>Nestabilno</i>

3.2. Elementi za razaranje stene

Elemente za razaranje stene možemo da podelimo u dve grupe:

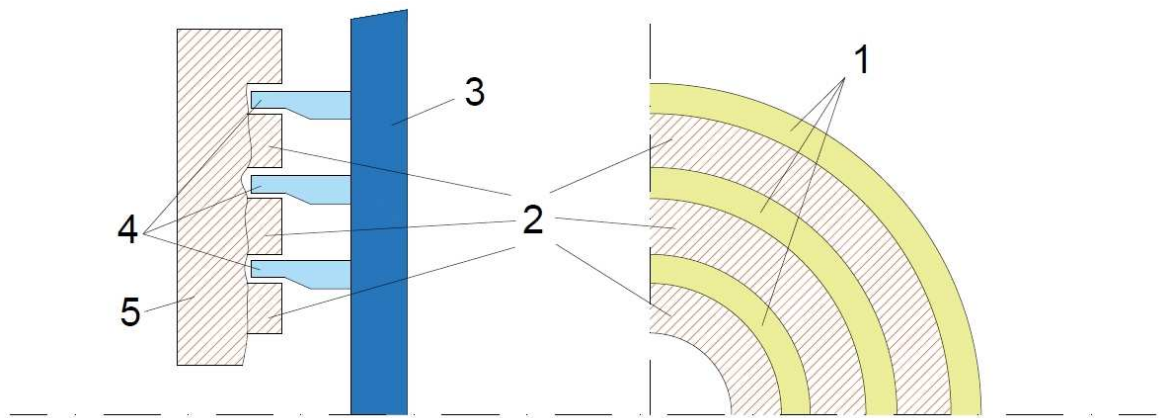
- 1) Elementi koji razaraju stenu upravno ili skoro upravno na pravac izrade tunela i tunela i
- 2) Elementi koji razaraju stenu paralelno pravcu izrade tunela.

U prvu grupu ovih elemenata spadaju različiti tipovi strugača i zuba (slika 3). Primena ovakvih elemenata pokazala se uspešna u slabim neabrazivnim stenama manjih čvrstoća i čvrstih stena koje su u toku razaranja plastično ponašaju (Jovanović, 1984).



Slika 3. Elementi iz prve grupe: a) sa zubima; b) sa diskovima; 1 - rotaciona glava; 2 - rotacioni diskovi

U drugu grupu elemenata spadaju elementi koji se koriste u obliku strugača i šiljaka (slika 4). Za čvrste i abrazivne stene upotrebljava se zupčasti valjci (slika 5), diskovi (slika 6) i valjci sa bradavicama (slika 7).



Slika 4. Elementi iz druge grupe za stene manje čvrstoće: 1 - brazde; 2 - rebra; 3 - glava mašine; 4 - noževi; 5 - čelo tunela



Slika 5. Zupčasti valjci (izvor: sajt www.rock-cutters.com)

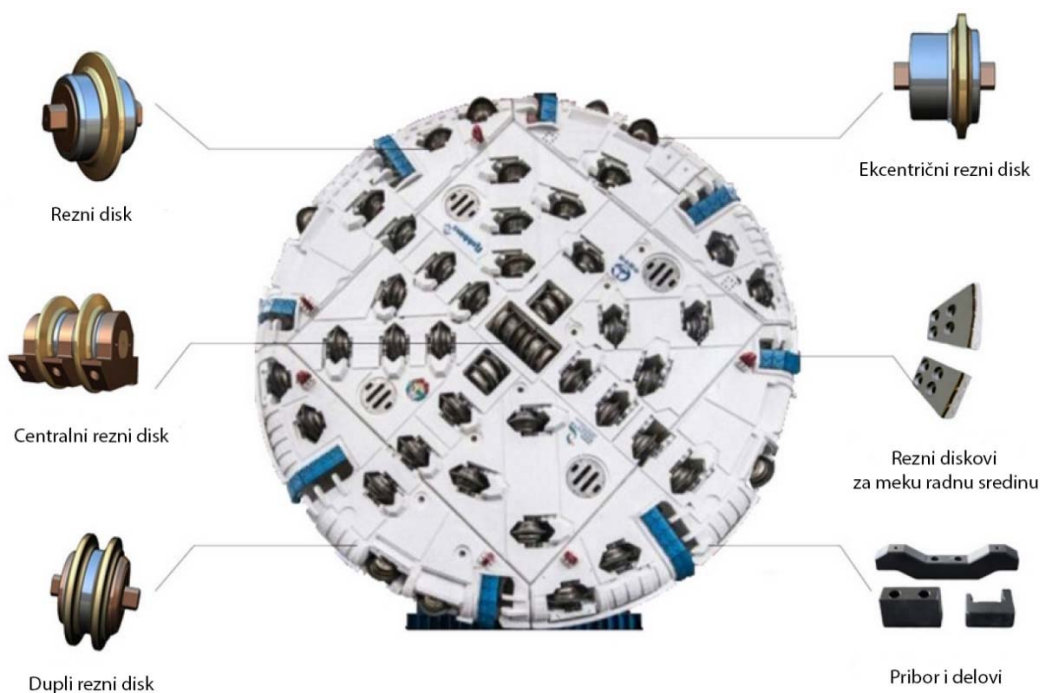


Slika 6. Diskovi (izvor: sajt www.rock-cutters.com i www.litechtools.com)



Slika 7. Valjci sa bradavicama (izvor: sajt www.rock-cutters.com i www.litechtools.com)

Za izbor grupe i koja vrsta elemenata za razaranje će biti primenjena u datim uslovima, isključivo zavisi od čvrstoće, abrazivnosti i bušivosti stene. Na narednoj slici (8) možemo da vidimo izgled bušaće glave i razmeštaj elemenata jedne TBM mašine (Tunnel Boring Machine).



Slika 8. Izgled bušaće glave i njenih elemenata jedne TBM mašine kompanije Litian Rock Tools. (izvor: sajt <https://www.litechtools.com>)

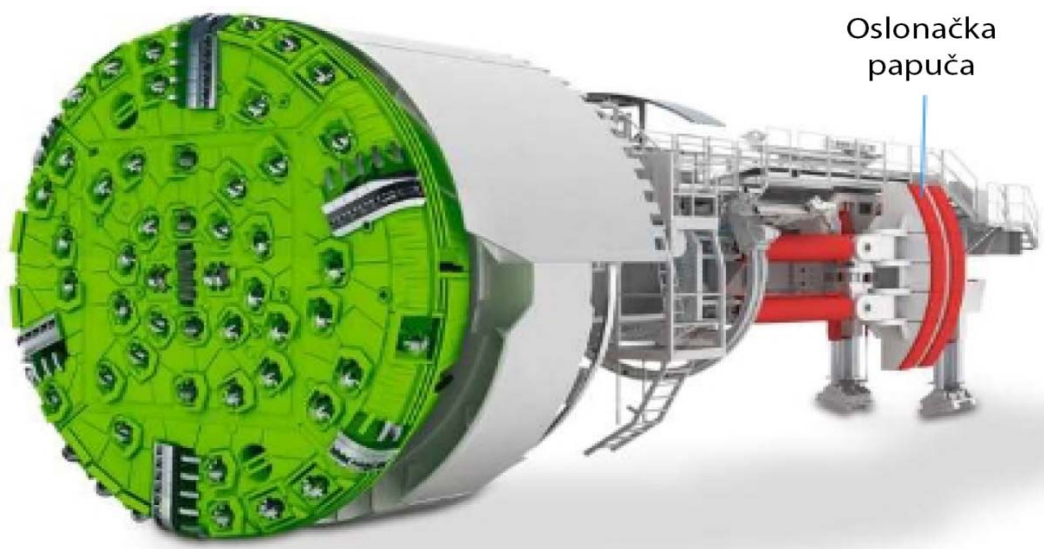
3.3. Sistemi za kretanje i stabilizaciju mašina

Jedan od osnovnih uslova koji moraju biti ispunjeni da bi se obavljao rad na razaranju kod primene kombinovanih mašina je da mašina svojim prednjim delom bude dovoljno snažno pritisnuta uz čelo tunela i da u toku rada bude stabilna. Prvi

uslov je neophodan da bi se savladao otpor stene prema prodiranju radnih elemenata (penetraciji), dok drugi uslov ima za zadatak da se suprotstavi obrtnom momentu koji se javlja kod rada mašina (Jovanović, 1984). Da bi oba ova uslova bila ispunjena koristi se jedan od sledećih sistema: potiskivanje, povlačenje, odupiranje ili sistem sa gusenicama.

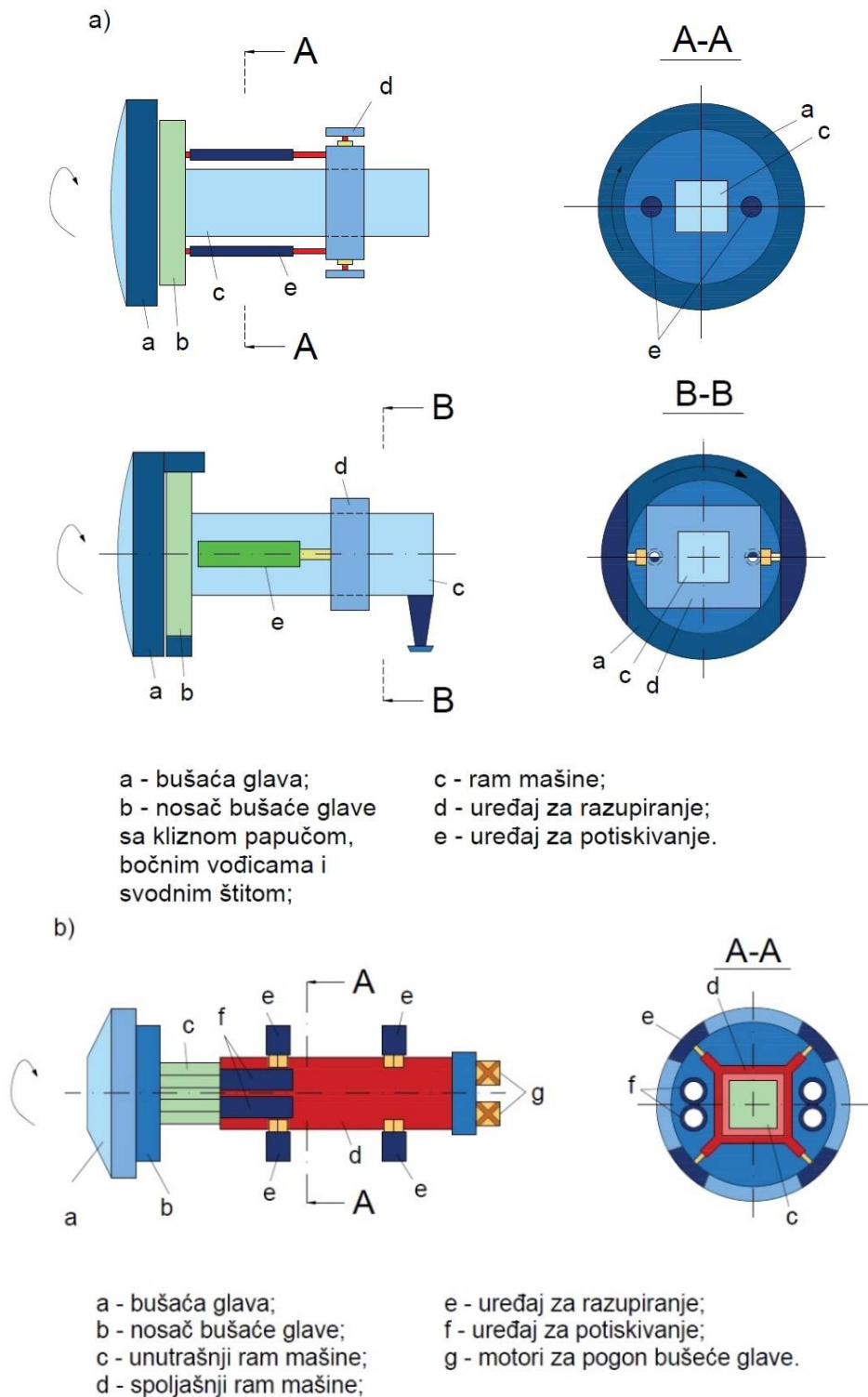
3.3.1. Sistem sa potiskivanjem

Ovaj sistem najčešće ima jedan ili više pari potiskivača koji su bočno postavljeni na hidraulične cilindre oslonačkih papuča (slika 9). Mašina funkcioniše tako što se pomoću oslonačkih papuča učvrsti o bokove već izrađenog tunela, što mašini daje odličnu stabilnost za dalje napredovanje. Kod ovako učvršćene mašine obezbeđeno je potiskivanje prednjeg dela (glave mašine) opremljene sa elementima za razaranje. Potiskivanje i učvršćivanje rezne glave obavlja se hidrauličnim potiskivačem i potisnim papučama - osloncima. Rezna glava se potiskuje do maksimalne dužine izvlačenja cilindra, posle čega se mašina pomera na novu poziciju. Na taj način je postignuta stabilizacija mašine i omogućena mogućnost za ostvarenje velikih pritisaka glave mašine na čelo tunela (Jovanović, 1984).



Slika 9. Izgled oslonačkih papuča (Herrenknecht AG, 2021)

Na slici 10a prikazan je sistem sa jednim redom dok na slici 10b sistem sa dva reda oslonačkih papuča. Prednost sistema sa dva reda oslonačkih papuča jeste u manjem specifičnom opterećenju bokova.



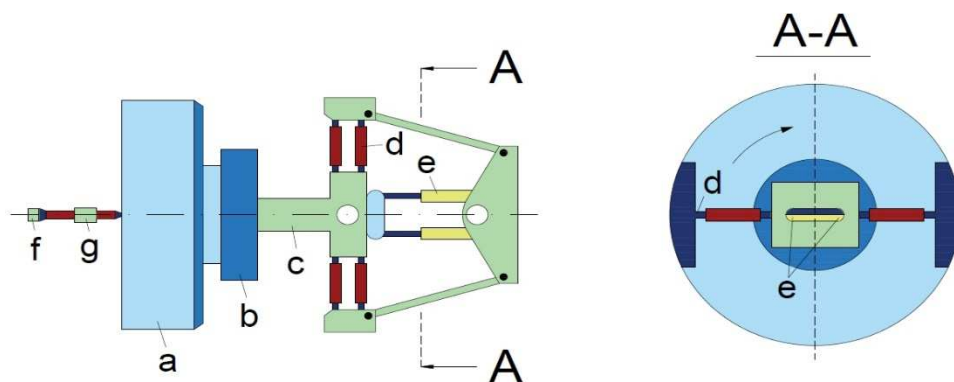
Slika 10. Šema funkcionisanja sistema za potiskivanje

Prednost ovog sistema je u veoma jednostavnoj konstrukciji uređaja za razupiranje i potiskivanje, dok je nedostatak što može da se koristi samo u veoma čvrstim stenama. Problematična je primena ovog sistema čak i u veoma čvrstim ali raspucalim stenama, dok kod izrade tunela kroz neke veštačke ili prirodne šupljine je

praktično (bez neke prethodne obrade ovih šupljina ili specijalnih dodataka) nemoguća.

3.3.2. Sistem sa povlačenjem

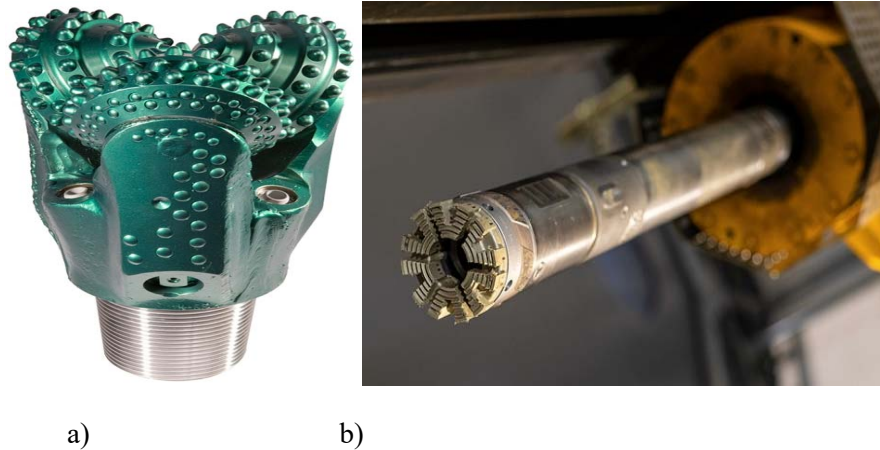
Kod ovog sistema stabilizacija mašine u toku rada takođe se ostvaruje uz pomoć oslonačkih papuča (slika 11), dok se pritisak glave mašine na čelo tunela ostvaruje preko jednog hidrauličnog cilindra učvršćenog pomoću ekspanzione glave u vodećoj bušotini ispred glave mašine (slika 12). Potiskivanje cele mašine ostvaruje se uz pomoć posebnih hidrauličnih potiskivača oslonjenih na oslonačke papuče.



- | | |
|----------------------------|-----------------------------|
| a - bušačka glava; | e - uređaj za potiskivanje; |
| b - nosač bušačke glave; | f - pilot - kruna; |
| c - ram mašine; | g - sidro (ekspanziono). |
| d - uređaj za razupiranje; | |

Slika 11. Šema funkcionisanja sistema za povlačenje

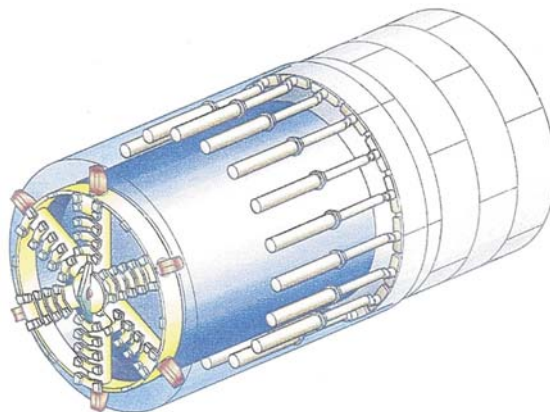
Ovaj sistem se takođe primenjuje u čvrstom i raspucalom stenskom materijalu, koji je u stanju da izdrži zatezna napreznja izazvana ekspanzionom glavom i pritisna napreznja oslonačkih papuča. Najbolja primena ovog sistema je kod stenskih masiva kod kojih se javlja potreba za predbušivanjem.



Slika 12. Sistem sa povlačenjem: a - izgled pilot krune; b - šipka na koju se postavlja pilot kruna (ekspanziona pilot kruna) (izvor: Mining Services V2, 2022 i Devco, 2022)

3.3.3. Sistem sa odupiranjem

Upoređujući sa ostalim sistemima, kod kojih se stabilizacija postiže učvršćenjem o bokove već izrađenog tunela, kod ovog sistema mašina se učvršćuje o već izrađenu stalnu ili privremenu podgradu putem većeg broja hidrauličnih presa, koje su ravnomerno raspoređene po spoljašnjem vencu iza mašine. Pomoću hidrauličnih presa istovremeno se ostvaruje i pritisak glave mašine na čelo tunela i stabilizacija mašine u toku rada (Jovanović, 1984).



Slika 13. Sistem sa odupiranjem (izvor: ugitec.co.jp)

Pošto se mašina u toku rada oslanja iza sebe, najčešće na privremenu podgradu izrađenu od segmenata, a ne o nepodgrađene bokove tunela, kao što smo to imali slučaj kod prethodnih sistema, primena ovog sistema se koristi u slučajevima kada

prethodni sistemi ne mogu da zadovolje (slab, raspucan ili nevezan stenski materijal). Takođe, ovaj sistem je primenljiv i kod izrade tunela kroz prirodne ili veštačke šupljine.

3.3.4. Sistem sa gusenicama

Ovaj sistem je namenjen da obezbedi kod kombinovanih mašina za izradu tunela, i još češće kod kombinovanih mašina za izradu jamskih podzemnih prostorija stabilizaciju i ostvari potreban pritisak glave mašine na čelo tunela sa gusenicama.

Prednost ovog sistema su znatno veće manevarske sposobnosti mašine, dok su nedostaci da je njihova primena ograničena na čvrste stene koje nisu podložne uticaju vode i složenost opravki sistema u slučaju kvara (Jovanović, 1984). Osim toga kod ovog sistema suprotstavljanje obrtnim momentima u toku rada mašine iziskuje još najmanje jedne ili dve gusenice u gornjem delu tunela. Što ovu konstrukciju čini kod nekog kvara glomaznom i nepristupačnom, gde zahteva veoma obimne radove i kod manjih kvarova. Pored svega ovog primena u mekim stenama sa sadržajem vode gusenice se ukopavaju i na taj način otežavaju održavanje željenog pravca.



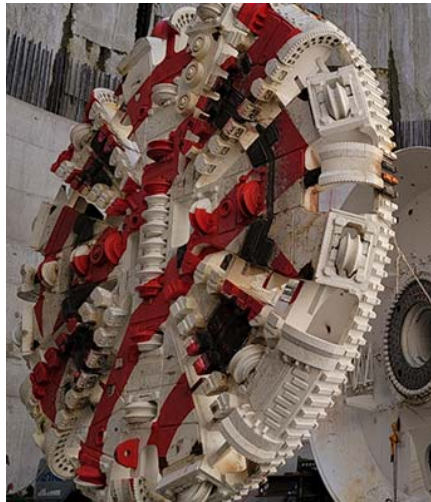
Slika 14. Sistem sa gusenicama

3.4. Sistemi za uklanjanje stenskog materijala

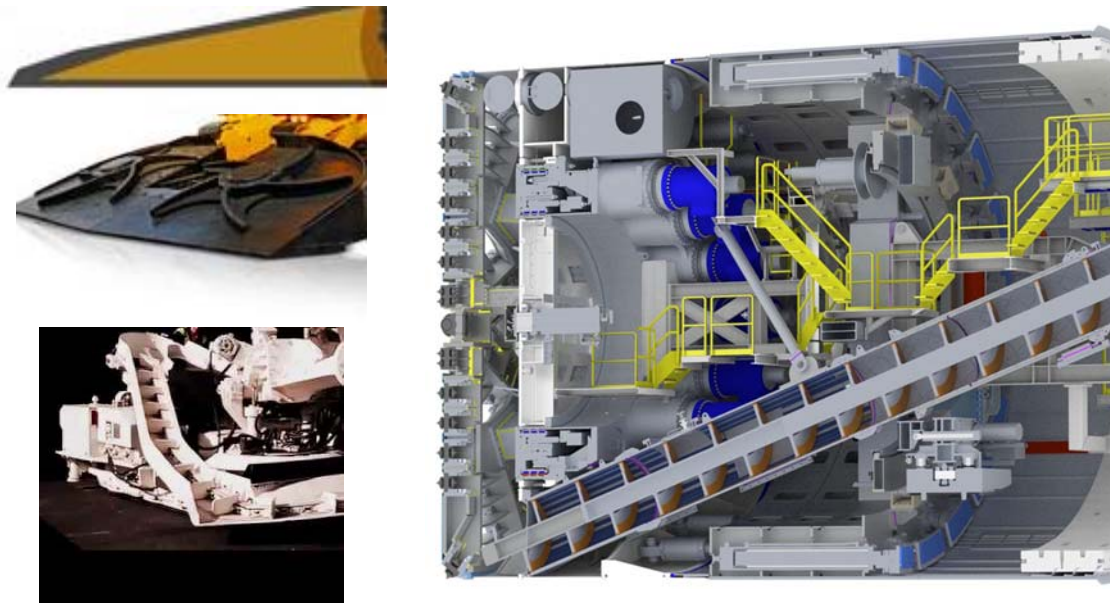
Kada se vrši uklanjanje stenskog materijala sa čela tunela, i to kada je u pitanju rad u čvrstoj radnoj sredini, postoje dva načina koja su se pokazala pouzdanim:

1. Vedricama koje su učvršćene po obimu glave mašine i u vršnom položaju vrše isipavanje sitneži na transportnu traku (slika 15),

2. Sistem sa grabuljama, koji je obično smešten na beskonačni lanac, sistemi sa ekcentrima, kosa ploča, ... (slika 16).



Slika 15. Sistem sa vedricama (izvor: <https://www.enr.com/articles/51605-mudhoney-seattles-latest-tunnel-boring-machine-will-dig-27-miles>)



Slika 16. Različiti sistemi za uklanjanje i transport materijala

Izbor sistema koji će se primeniti u nekim određenim uslovima uglavnom zavisi od krupnoće stenskog materijala, mada ovo ne mora da bude pravilo.

Prema dosadašnjem iskustvu sistem sa vedricama podesniji je za sitne i ravnomernije granulacije, jer kod ovog sistema ukoliko nisu usklađene zapremine

vedrica sa veličinama komada koje treba ukloniti, veoma često dolazi do zaglavljivanja i oštećenja glave mašine, pa čak i do prekida rada (Jovanović, 1984).

Sistem sa grabuljama se pokazao boljim za krupnije granulacije, jer ne postoji mogućnost zaglavljivanja ovih komada među grabulje. Dok kod sitne granulacije nije pokazao tako dobre rezultate, jer kamena sitnež može da zapadne u žleb kojim prolazi pogonski lanac i da ga zaglavi, što obično dovodi do prekida rada sistema za uklanjanje izdrobljenog materijala sa čela tunela.

Oba ova sistema iziskuju da se transport uklonjenog materijala vrši transportnom trakom ili grabuljastim transporterom smeštenim u gornjem delu mašine, što kod sistema sa grabuljama iziskuje da se kroz samu mašinu materijal diže na potrebnu visinu za šta se koristi grabuljasti ili pužni transporter (Jovanović, 1984). Kod sistema sa vedricama ovaj prenosni sistem nije neophodan već se materijal direktno iz vedrica putem odgovarajućeg žleba sipa na gumenu traku.

Ovi sistemi se primenjuju samo kada je u pitanju rad u čvrstom i suvom, sa malo vode, stenskom materijalu.

Kada je rad vezan za radno okruženje gde je u pitanju pesak, mulj ili neki drugi vodom zasićen stenski materijal, obično se koriste štitne mašine, gde se uklanjanje i transport ovog materijala vrši uz pomoć muljnih pumpi ili sabijenog vazduha (slika 17).



Slika 17. Izgled jedne muljne pumpe (Focus Technology Co, Ltd., 2022)

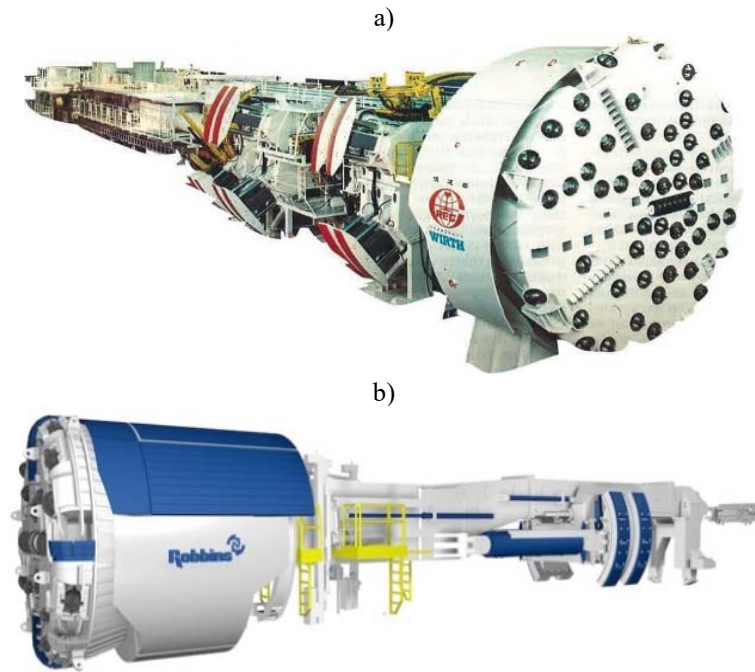
4. MAŠINE ZA IZRADU TUNELA U STABILNOM STENSKOM MATERIJALU

Za izradu tunela u čvrstom i stabilnom stenskom materijalu koriste se kombinovane mašine različite po konstrukciji, koje su zavisne od čvrstoće stenskog materijala u kome treba da rade i patenta proizvođača (Jovanović, 1984). Bez obzira o kom proizvođaču se radi i u kakvoj radnoj sredini treba da radi, sve ove mašine funkcionišu na sličan način tako što razaraju stenu na čelu tunela putem rotacije glave mašine koja je opremljena odgovarajućim alatom za razaranje. U današnje vreme mašine koje se koriste za izradu tunela nazivaju se „TBM“ mašine što je skraćenica od „Tunnel Boring Machine“ ili na srpskom „Mašina za izradu tunela“. Ovaj tip mašina našao je značajnu primenu u građevinarstvu i niskogradnji (tunelogradnji) i to za izradu horizontalnih podzemnih prostorija kružnog poprečnog preseka, prečnika od 1,75 do oko 14 m. Može se primeniti u skoro svim radnim sredinama od slabih i rastresitih stena do veoma čvrstih i abrazivnih (Milisavljević, 2019).

Osnovna podela ovih mašina može se izvršiti na:

TBM mašine otvorene konstrukcije (slika 18), nemaju štit i primenjuju se u čvrstim i stabilnim sredinama. Mašine ove konstrukcije mogu se podeliti u dve podgrupe:

- Mašine sa dva pomoćna oslonca, napred i nazad, na koje se mašina oslanja tokom pomeranja (napredovanja).
- Mašine sa jednim pomoćnim osloncem, samo nazad, pri čemu se tokom pomeranja sa prednje strane mašina oslanja na radni uređaj.

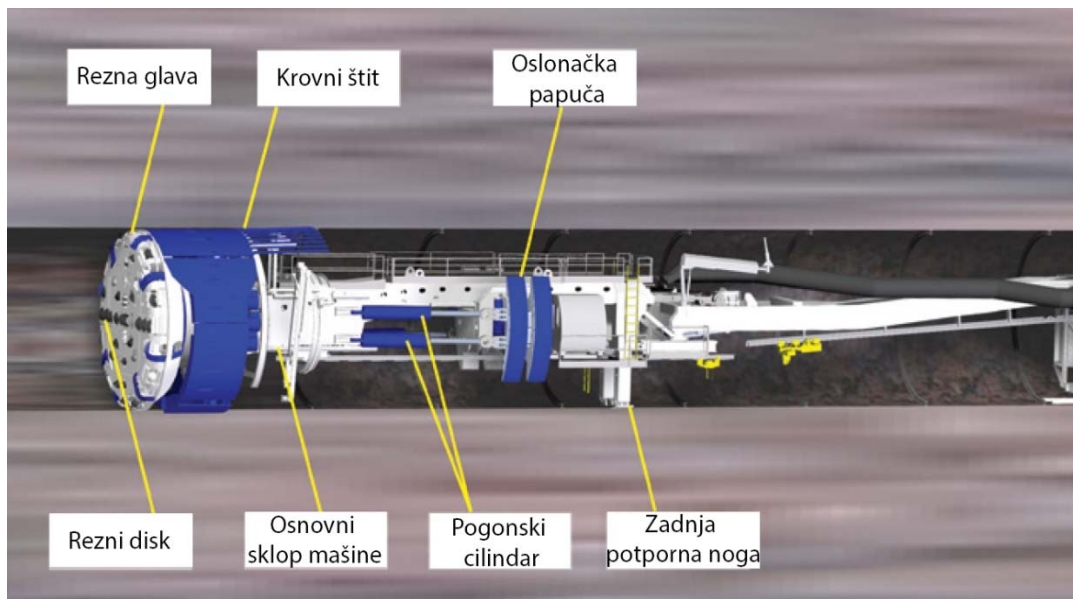


Slika 18. Osnovni tipovi otvorenih konstrukcija TBM mašina: a) firme WIRTH; b) firme ROBBINS (izvor: sajt www.tunneltalk.com i www.robbinstbm.com)

TBM mašine štit konstrukcije, za koje je karakterističan štit čija je osnovna namena sprečavanje prodora (zarušavanja) materijala u radni prostor odnosno privremeno podgrađivanje podzemne prostorije do ugradnje stalne podgrade. Na osnovu ovog opisa može se zaključiti da se ovakva konstrukcija TBM mašina primenjuje u rastresitim i slabim sredinama, koje su sklone brzom zarušavanju (Milisavljević, 2019). U okviru ove grupe mašina postoje četiri podgrupa mašina:

- Mašine sa jednodelnim štitom,
- Mašine sa dvodelnim štitom,
- Crossover mašine i
- EPB (Earth Pressure Balance) mašine.

Primena ovih mašina obezbeđuje neprekidan rad na izradi iskopa, bez rasčlanjivanje radova na pojedine radne operacije, kao što je to slučaj kod primene bušačko-minerskih radova. Kod ovih mašina istovremeno se vrši iskop, uklanjanje i utovar stenskog materijala. Na slici 19 možemo da vidimo delove TBM mašine otvorene konstrukcije.



Slika 19. Mašina za rad u stabilnom stenskom materijalu (TBM mašina otvorene konstrukcije) (izvor: sajt www.robbinstbm.com)

Savremene mašine za izradu tunela (TBM) prilagođene su čvrstoći stenskog materijala u kome treba da rade, i prema ovom pokazatelju mogu se razvrstati u:

- Mašine za rad u veoma čvrstim stenama,
- Mašine za rad u čvrstim stenama i
- Mašine za rad u slabim stenama.

Za svaku od ovih sredina prilagođava se element za razaranje, njegove dimenzije, broj i raspored. Veličina glave mašine je prilagođena veličini iskopanog profila, i uz to i ostali elementi, kao što su: pogonski motor, dimenzije režućih elemenata, raspored, broj i sl. (Jovanović, 1984).

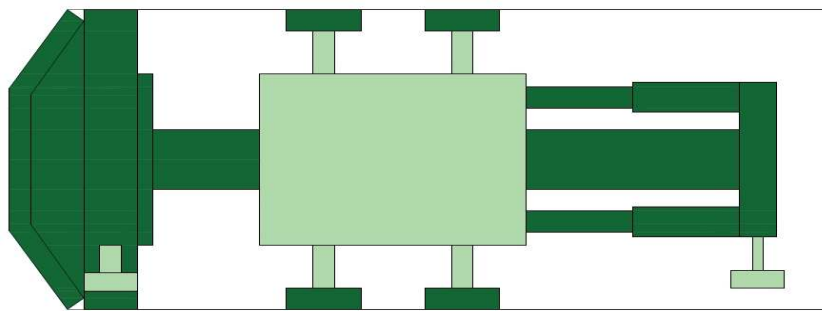
4.1. Izrada tunela u veoma čvrstim stenama

Kod izrade tunela u veoma čvrstim stenama, gde vrednost jednoosne čvrstoće na pritisak veći od 180 MPa, najbolje su se pokazale TBM mašine otvorene konstrukcije koje se već dugi niz godina koriste. Razaranje stenskog masiva pomoću diskova vrši se delovanjem sila koje su normalne ili približno normalne na površinu masiva tako da ove mašine karakteriše velika sila potiska. Potrebna sila potiska se stvara pomoću hidrauličnih cilindara koji potiskuju radni uređaj u masiv. Fiksiranje

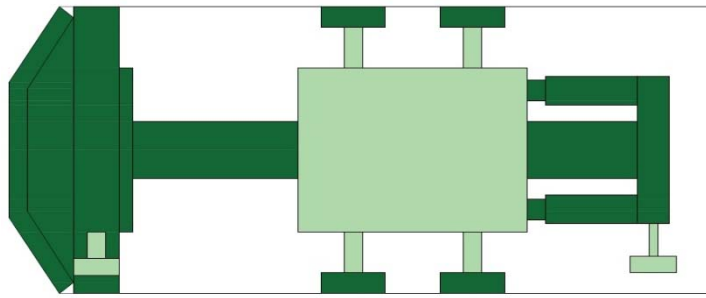
mašine vrši se pomoću glavnih oslonaca (papuča), hidraulički pogonjenih, kojima se obezbeđuje stabilan rad mašine. Razoren materijal pada na pod prostorije odakle se različitim konstrukcijama utovarnog uređaja prvo utovara u pretovarni transporter, a zatim na transporter sa gumenom trakom kojim se izvozi na površinu (Milisavljević, 2019).

Osnovna prednost TBM mašina je kvazikontinualni način rada koji u poređenju sa u potpunosti cikličnim bušačko-minerskim načinom rada obezbeđuje efikasnije vremensko iskorišćenje. Pod kvazikontinualnim načinom rada, ne misli se na proces razaranja stenskog masiva koji je u suštini kontinualan sve dok je radni uređaj u pogonu, već se misli na ceo ciklus koji obuhvata aktivnosti razaranja stenskog masiva i aktivnost napredovanja (pomeranje) mašine (Milisavljević, 2019). Detaljnije razložene navedene aktivnosti za mašine otvorene konstrukcije (firme WIRTH) mogu se predstaviti na sledeći način:

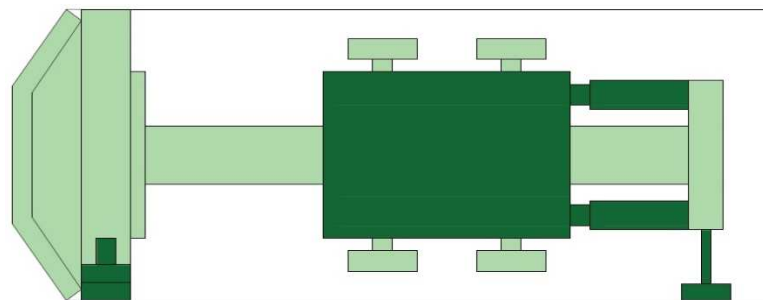
- Kada je mašina fiksirana pomoću glavnih oslonaca (papuča) spremna je za početak razaranja stenskog masiva. Sa početkom rada hidraulički cilindri potiskuju radni uređaj u masiv.



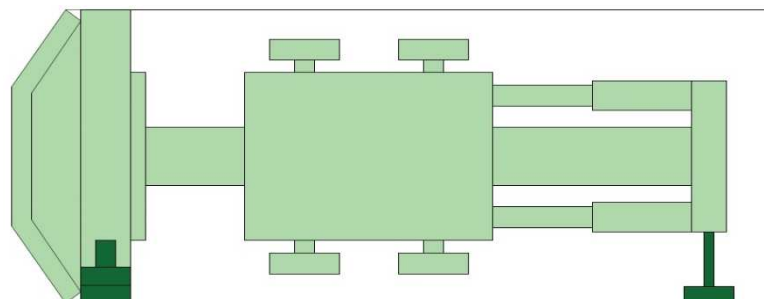
- Postupnim razaranjem stenskog masiva radni uređaj se pomera napred usled delovanja potisnih hidrauličkih cilindara. Po ostvarenju koraka napredovanja obustavlja se proces razaranja stenskog masiva (zaustavlja se rad radnog uređaja).



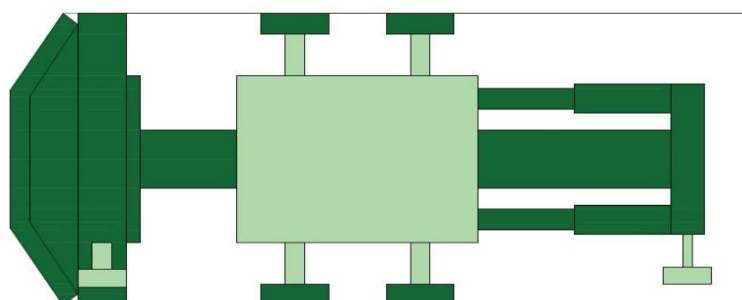
- Aktiviraju se pomoćni oslonci mašine (napred i nazad) a zatim se „opuštaju“ glavni oslonci (papuče). Potisni cilindri se uvlače i sa sobom povlače mašinu.



- Po potrebi se vrši usmeravanje mašine pomoću pomoćnih oslonaca.



- Po zauzimanju željenog položaja mašina se fiksira pomoću glavnih oslonaca (papuča), tako što su oni upru o bokove podzemne prostorije, čime počinje novi ciklus napredovanja.



Na slici 20a je prikazana TBM mašina koja se koristila za izradu kanalskog tunela između Francuske i Velike Britanije, gde je izgradnja tunela počela 1988. godine i završila se 1994. godine.

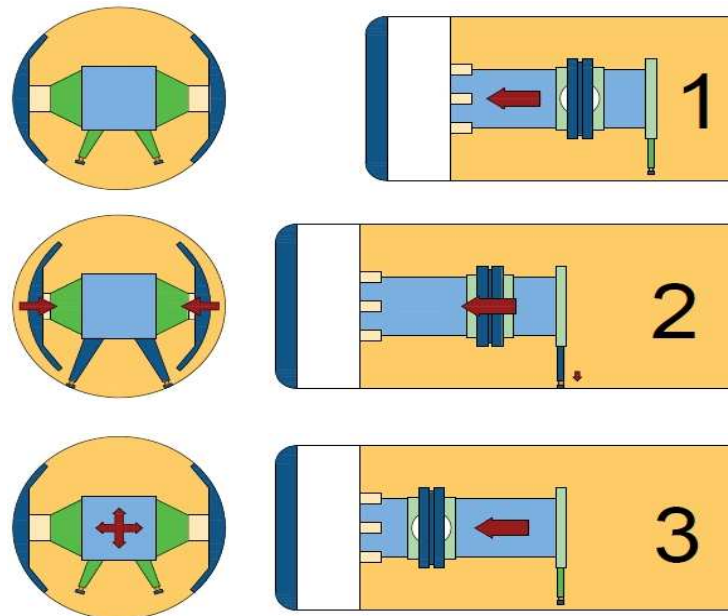


Slika 20a. Izgled TBM mašine prilikom izrade kanalskog tunela

4.1.1. Izrada tunela velikog prečnika

Pošto se često ukazuje potreba za izradom tunela velikog prečnika u veoma čvrstim stenama, čiji prečnik iznosi i preko 10 m, u današnje vreme se najviše primenjuju TBM mašine čiji prečnik može da ide i do 15 m. Ove mašine su TBM mašine otvorene konstrukcije (kompanije Robbins), koje funkcionišu na sledeći način (slika 20b):

- U položaju jedan mašina je učvršćena glavnim osloncima i nalazi se u postupku razaranja stenskog materijala. Po ostvarivanju maksimalne dužine napredovanja spušta se zadnji oslonac i rasterećuju glavni oslonci. U tom trenutku mašina se oslanja na radni uređaj i zadnji pomoćni oslonac. Potisni cilindri se uvlače i povlače telo mašine (položaj 2). Posle pomeranja mašina se učvršćuje glavnim osloncima i spremna je za sledeći ciklus napredovanja (položaj 3).



Slika 20b. Šematski prikaz faza rada TBM-a otvorene konstrukcije

Na slici 21 prikazan je izgled TBM mašine (firme Robbins) koja ulazi u tunel.

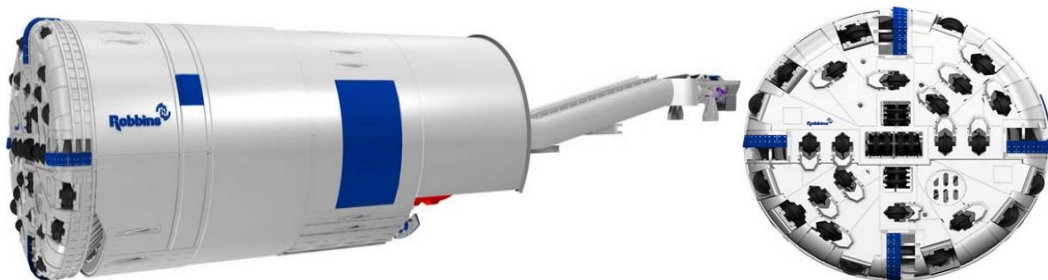


Slika 21. Pristup TBM mašine u tunel (izvor: sajt www.robbinstbm.com)

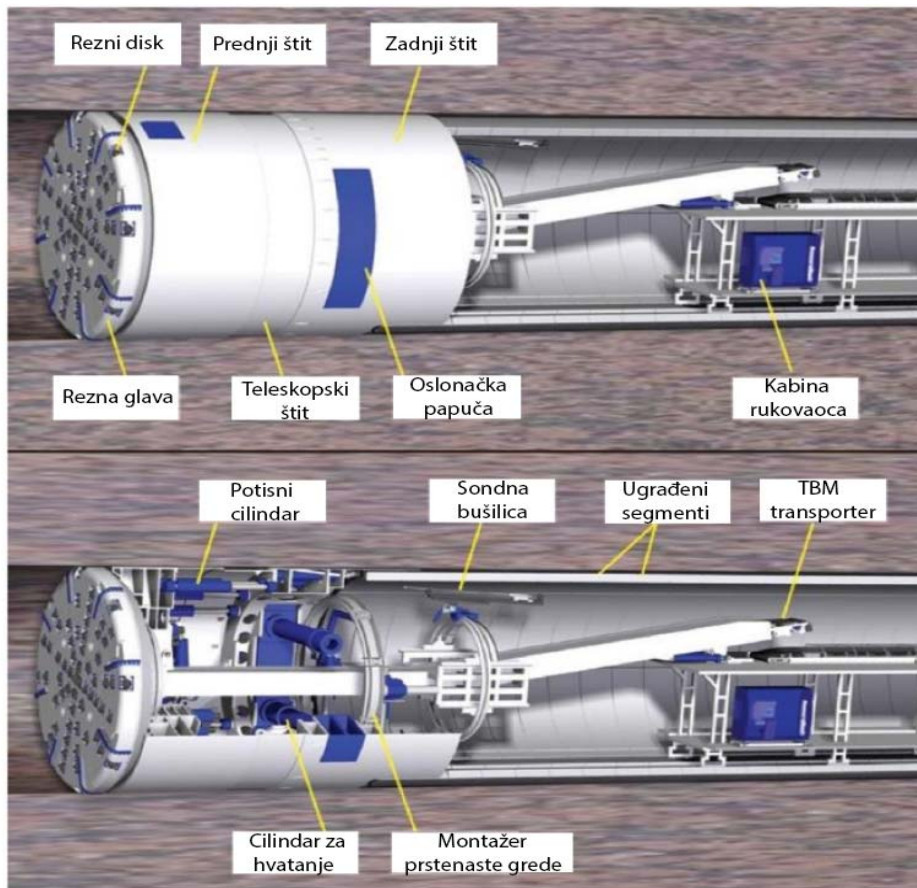
4.2. Izrada tunela u čvrstim stenama

Pod čvrstim stenama podrazumeva se da granica jednoosne čvrstoće stene se kreće od 40 do 180 MPa. Za izradu tunela kod ovih stena dobro se pokazala TBM

mašina sa dvodelnim štitom. Konstrukcija TBM mašina sa dvodelnim štitom suštinski predstavlja rešenje koje objedinjuje osnovne karakteristike TBM mašine otvorene konstrukcije i štit konstrukcije. Sličnost sa otvorenom konstrukcijom ogleda se u postojanju glavnih oslonaca (papuča) koji osiguravaju stabilnost mašine tokom rada upiranjem u bokove podzemne prostorije. Zbog toga ne postoji potreba za vezom između mašine i podgrade, a samim tim, nema dopunskog opterećenja podgradne konstrukcije i njenog korišćenja kao oslonca za potiskivanje mašine (Milisavljević, 2019). Sličnost sa štit konstrukcijom se ogleda u postojanju samog štita koji ovoj konstrukciji omogućava primenu u teškim uslovima u kojima je neophodna brza ugradnja podgrade. Smatra se najbržom mašinom za tunele od čvrstih stena pod povoljnim geološkim uslovima sa ugradnjom segmentne obloge. Moguće je izraditi 100 m na dan. Sastoji se od rotirajuće rezne glave i dvodelnih štitova (slika 22), teleskopskog štita (unutrašnji štit koji klizi unutar većeg spoljašnjeg štita) i štita za hvatanje zajedno sa zadnjim štitom.



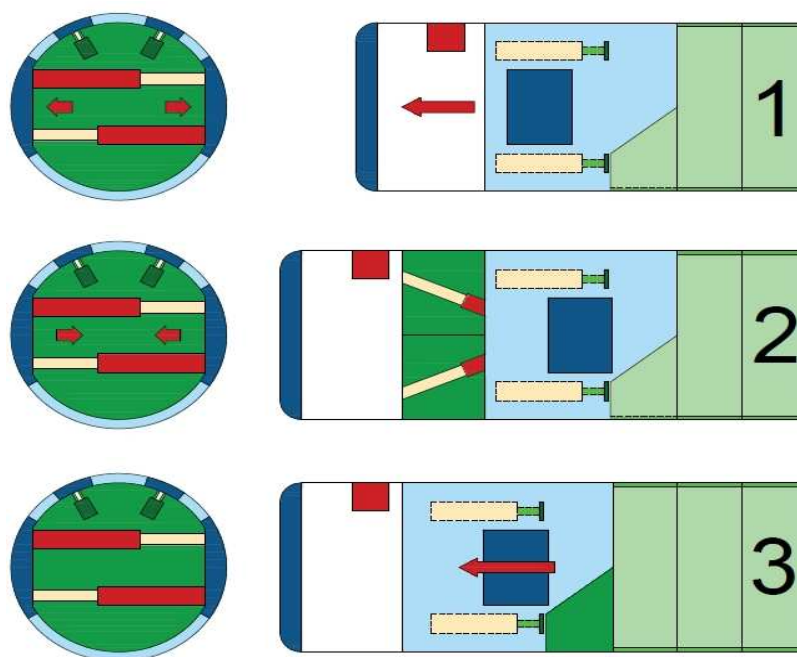
Slika 22. TBM mašina sa dvodelnim štitom (izvor: sajt www.robbinstbm.com)



Slika 23a. Tipičan izgled TBM mašine sa dvostrukim štitom. Kompanije Robbins (izvor: sajt www.sciencedirect.com)

Tehnologija rada TBM mašine sa dvodelnim štitom može se opisati na sledeći način:

- U položaju 1 mašina je spremna za sledeći korak napredovanja s tim da je glavni (bočni) oslonac na zadnjem štitu uprt, a glavni (gornji) oslonac na prednjem štitu rasterećen. Sa razaranjem masiva radni uređaj se potiskuje hidrauličnim cilindrima, a slobodan prostor se stvara između dva štita (položaj 2). Po ostvarivanju koraka napredovanja upire se oslonac na prednjem štitu, rasterećuje oslonac na zadnjem štitu koji uvlačenjem cilindra prati napredovanje (položaj 3 – slika 23b). Posle pomeranja slobodan prostor se nalazi iza zadnjeg štita. U ovom slobodnom prostoru se vrši ugradnja podgrade (Milisavljević, 2019).



Slika 23b. Šematski prikaz faza rada TBM-a sa dvodelnim štitom

4.3. Izrada tunela u slabim stenama

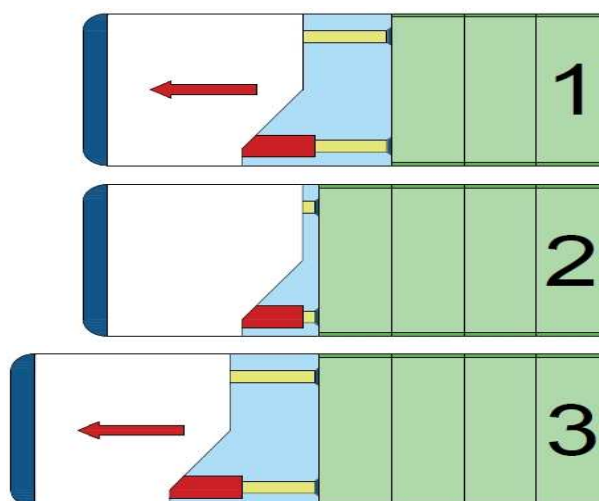
Pod slabim stenama podrazumeva se da je jednoosna čvrstoća na pritisak manja od 40 MPa. Za ove vrste stena se koristi TBM mašina sa jednim štitom (slika 24a) i po potrebi može da se iskoristi Crossover mašina (Hibridna) koja će biti opisana u narednom poglavlju. TBM mašine štit konstrukcije opremljene su štitom čija je osnovna namena zaštita radnog prostora, ljudi i elemenata mašine od zarušavanja. S obzirom da su ove mašine predviđene za rad u teškim uslovima odnosno u uslovima u kojima je veoma bitan faktor brza ugradnja podgrade podzemne prostorije tehnologija njihovog rada se razlikuje od već opisane mašine otvorene konstrukcije. Koriste se u stenama gde su uslovi manje povoljni nego kod TBM mašina sa dvodelnim štitom, kao na primer u zonama slabih raseda. Štit je obično kratak tako da se može postići mali radijus zakrivljenosti (Milisavljević, 2019).



Slika 24a. TBM mašina sa jednodelnim štitom (izvor: sajt www.robbinstbm.com)

Tehnologija rada TBM mašine sa jednim štitom može se opisati na sledeći način:

- U položaju 1 radni uređaj ostvaruje maksimalan korak napredovanja potiskivan hidrauličkim cilindrima. Treba napomenuti da štit prati radni uređaj i da iza štita, postupnim razaranjem radne sredine i napredovanjem, stvara slobodan prostor. Posle uvlačenja potisnih cilindara montira se podgrada u slobodnom prostoru iza štita (položaj 2). Posle ugradnje podgrade, njenog fiksiranja i vezivanja potisnih cilindara za podgradu započinje sledeći ciklus napredovanja (položaj 3 – slika 24b). Kao što se može videti, suštinska razlika u poređenju sa otvorenom konstrukcijom je postojanje veze između mašine i podgrade, pri čemu podgrada predstavlja oslonac za potiskivanje radnog uređaja i štita (Milisavljević, 2019).



Slika 24b. Šematski prikaz faza rada TBM-a sa jednim štitom

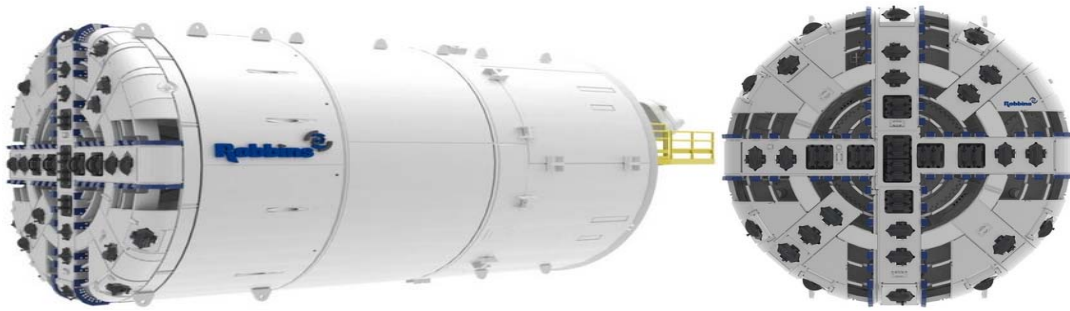
5. MAŠINE ZA IZRADU TUNELA U NESTABILNOM STENSKOM MATERIJALU

U čvrstom jako raspucalom stenskom materijalu, kod koga čelo tunela i bokovi se odmah po izradi obrušavaju, kao i kod nevezanog stenskog materijala sa i bez vode, radovi na izradi ne mogu se izvoditi, a da se čelo tunela i izrađena prostorija ne osiguraju. Da bi se osigurao radni prostor na čelu tunela obično se obezbeđuje uz pomoć čeličnog, običnog cilindričnog uređaja, a prostor iza ovog podgradom od segmenata izrađenih od: livenog gvožđa, armiranog betona, betonskih blokova ili betonskih lukova (Jovanović, 1984). Jedan od najboljih izbora mašina za ove uslove su se pokazale EPB (Earth Pressure Balance) TBM mašine, kao i Crossover (hibridne) mašine.

5.1. Earth pressure balance mašine

EPB tehnologija (što na srpskom možemo da prevedemo kao uravnotežen pritisak na tlo) je pogodna za iskopavanje tunela u nestabilnom stenskom materijalu kao što su glina, mulj, pesak ili šljunak (Bai Yun, 2019). To je mehanizovana metoda koja pri izradi tunela koristi iskopani materijal za podupiranje čela tunela dok se plastificira korišćenjem pene/mulja i drugih aditiva kako bi se učinio transportnim i nepropusnim. Iskopani materijal se transportuje u mašinu za izradu tunele (TBM) preko sistema pužnog transportera koji omogućava da pritisak na prednjoj strani TBM-a ostane uravnotežen bez upotrebe suspenzije. Od pužnog transportera iskopani materijal se transportuje kroz iskopnu komoru pa do trake (sajt www.creg-germany.com).

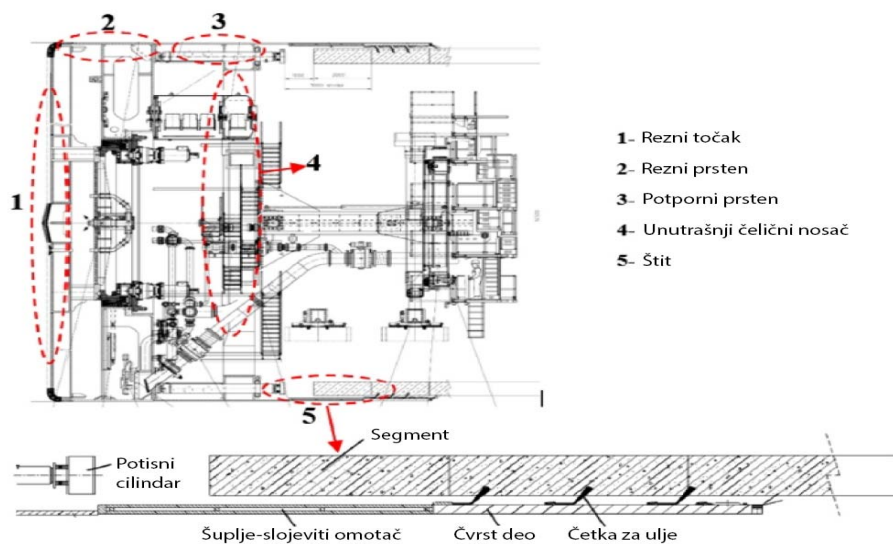
Kombinacija izlaza pužnog transportera i brzine napredovanja TBM-a osigurava da se pritisak potpore u komori za iskop može tačno kontrolisati. Kontinuirano praćenje stanja ravnoteže u komori za iskop pomoću senzora pritiska masiva, omogućava operateru da kontroliše i sinhronizuje sve parametre tunela. Omogućava visoku stopu napredovanja i smanjuje rizik od promena na površini (sajt www.creg-germany.com). Na slikama 25 i 26 prikazan je izgled EPB mašine, na slici 27 je prikazana šema mašine i na slici 28 šema pritiska.



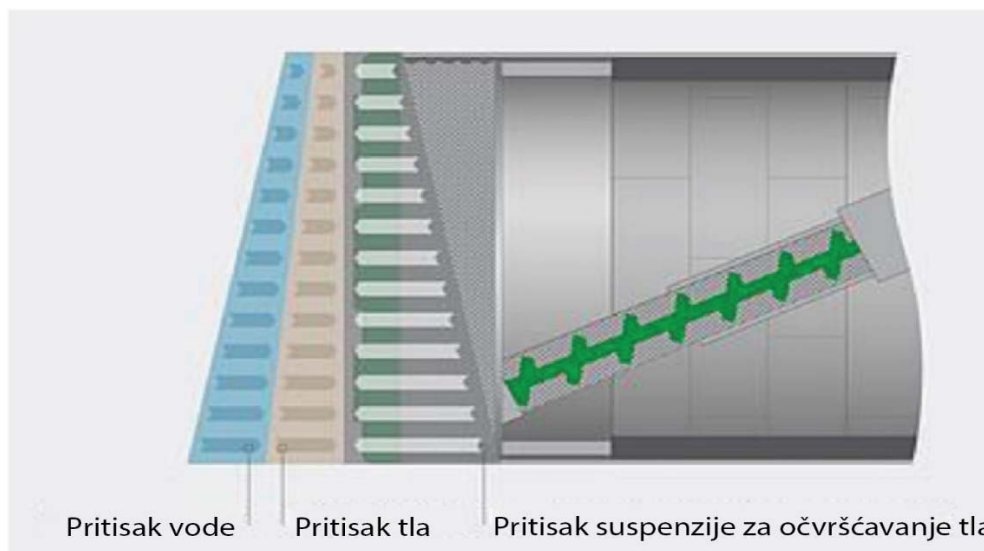
Slika 25. EPB mašina kompanije Robbins (izvor: sajt www.robbinstbm.com)



Slika 26. EPB mašina u radionici (izvor: sajt www.creg-germany.com)

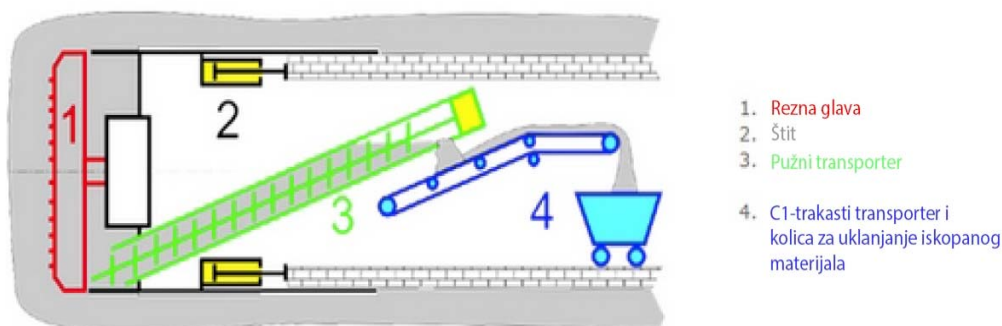


Slika 27. Šema EPB mašine (izvor: sajt www.sciencedirect.com)



Slika 28. Šema pritiska za EPB mašinu kompanije Herrenknecht AG (izvor: sajt www.sciencedirect.com)

Brzina napredovanja TBM-a (priliv iskopanog materijala) i odlaganje materijala iz pužnog transportera reguliše potporni pritisak na čeonj strani tunela. Ovo se prati na pregradi na kojoj su postavljeni senzori za očitavanje pritiska (Bai Yun, 2019).

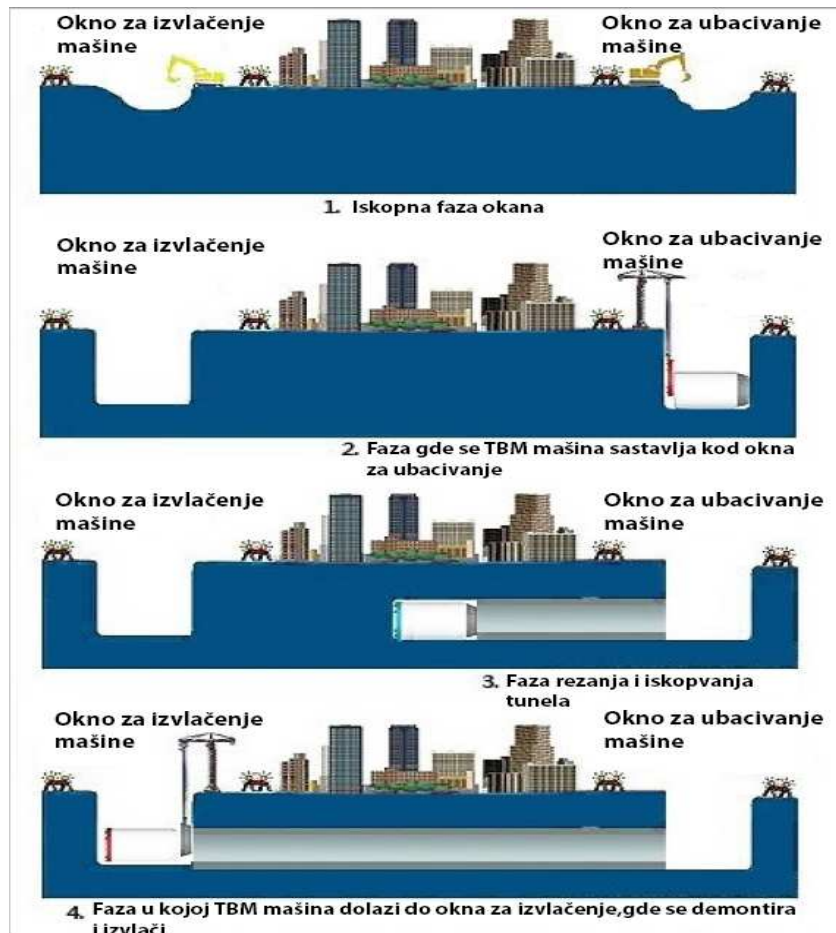


Slika 29. Prikaz postupka rada EPB mašine (izvor: sajt www.railsystem.net)

Osnovne prednosti EPB mašine je da se koristi za meke, mokre ili nestabilne stenske materijale gde je brzina i sigurnost izrade tunela mnogo napredovala što pre nije bilo izvodljivo. Takođe ograničava sleganje tla i stvara gladak zid tunela. Ovo značajno smanjuje troškove oblaganja tunela i čini ga pogodnim za upotrebu u jako urbanim područjima (sajt www.railsystem.net).

Glavni nedostatak je početni kapital. TBM-e su skupe za izgradnju, teške za transport, zahtevaju značajne rezervne sisteme i veliku pogonsku snagu (sajt www.railsystem.net).

Na slici 30 prikazane su faze izgradnje sa TBM-a.



Slika 30. Faza montaže, rada i demontaže TBM-a (izvor: sajt www.railsystem.net)

5.2. Crossover mašine (Hibridne mašine)

Hibridne ili „Crossover“ TBM mašine pružaju fleksibilnost za prelazak sa jednog režima rada na drugi na osnovu uslova na terenu. Dok mali podskup ove kategorije radi prvenstveno u zatvorenom režimu, osnovna karakteristika dizajna većine „Crossover“ mašina je njihova sposobnost da rade u otvorenom i zatvorenom režimu. Otvoreni režim se primenjuje na tvrdom stenskom materijalu ili u radnoj sredini niske propusnosti (glina i mulj), dok se zatvoreni režim primenjuje na uslove

meke radne sredine visoke propustljivosti uglavnom sa hidrostatičkim pritiskom (Tyler D. Sandell, Jacek Stypulkowski, 2015).

Postoji mnogo tipova „Crossover“ mašina, ali većina spada u jednu od nekoliko kategorija. Prvi je „Hard rock/EPB“ dizajniran za iskopavanje u otvorenom ili zatvorenom režimu, u tvrdom stenskom materijalu ili u mekoj radnoj sredini. Ovaj tip ima pužni transporter za rad u zatvorenom režimu. U daljem tekstu ćemo se pozivati na ove mašine koristeći inicijale „XRE“ (što je skraćenica od Crossover (X) između „Rock“ (R) i „EPB“ (E), hibrid između čvrstog i EPB režima) (Tyler D. Sandell, Jacek Stypulkowski, 2015).

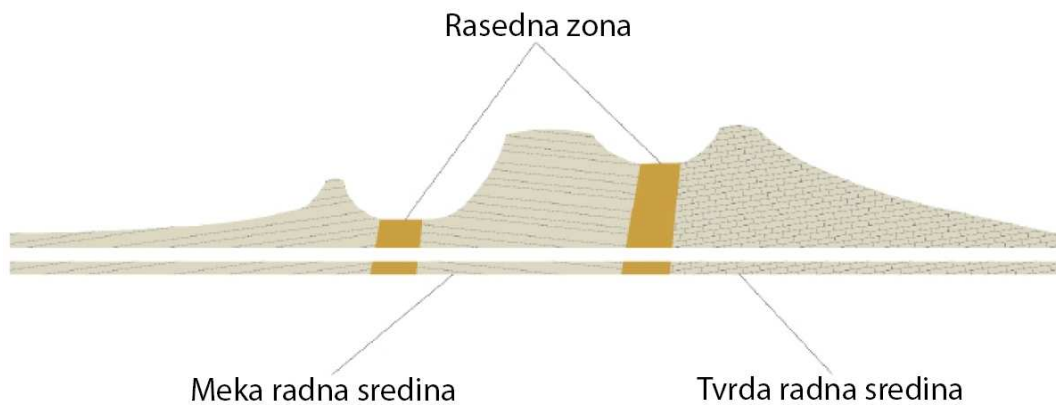
Još jedan primer „crossover“ mašine za izradu tunela je „Slurry/EPB“. Ovaj tip TBM-a ima pužni transporter, ali je takođe opremljen sistemom sa suspenzijom za rad kada nije moguće ili isplativo napraviti „čep“ u zavrtnju (Tyler D. Sandell, Jacek Stypulkowski, 2015).

Radi lakšeg snalaženja u ovom radu, ove mašine ćemo nazvati „XSE“ (što je skraćenica od Crossover (X) između „Slurry“ (S) i „EPB“ (E), hibrid između mekog i EPB režima) (Tyler D. Sandell, Jacek Stypulkowski, 2015).

Druge vrste hibridnih mašina su u razvoju i uključivale bi dizajne za tvrdi stenski masu sa sistemima za mešanje, poznate kao „XRS“ (što je skraćenica od Crossover(X) između „Rock“(R) i „Slurry“(S), hibrid („Crossover“) ili ukrštanje stenskog masiva i mulja) mašine (Tyler D. Sandell, Jacek Stypulkowski, 2015).

5.2.1. Crossover TBM – XRE mašine

XRE mašine se obično predlažu za mešovite uslove radne sredine koji uključuju delove mekog i tvrdog stenskog masiva, tako da ni standardna mašina za tvrdi stenski masiv (Hard rock) ni EPBM mašina ne bi mogli efikasno da iskopaju celu dužinu tunela (slika 31). Izgled mašine može se videti na slici 32 (Tyler D. Sandell, Jacek Stypulkowski, 2015).



Slika 31. Primer tipične mešovite radne sredine idealne za XRE TBM mašinu (izvor: Tyler D. Sandell, Jacek Stypulkowski, 2015)

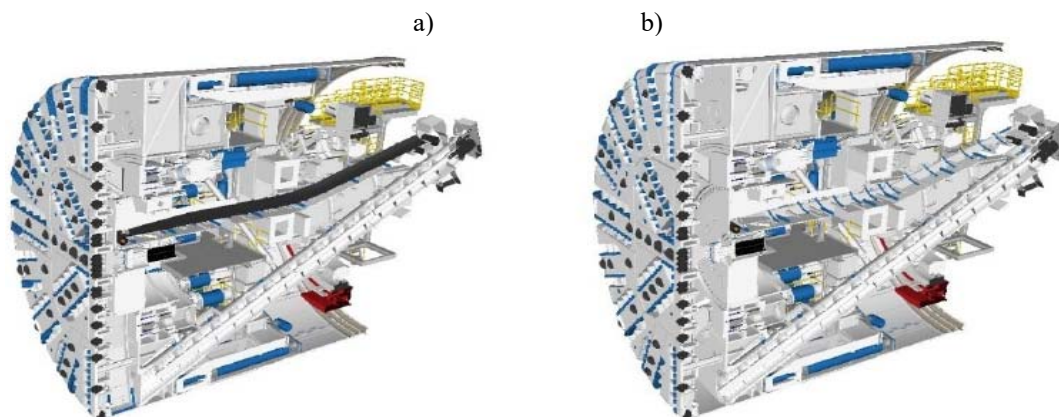


Slika 32. Crossover TBM - XRE mašina firme Robbins (izvor: sajt www.robbinstbm.com)

5.2.2. XRE kontrola i uklanjanje prljavštine

XRE model će biti optimizovan prema geologiji predviđenoj za veći deo trase. Na primer, ako je tunel 20% meka i 80% tvrda radna sredina, celokupni dizajn mašine će biti optimizovan prema tvrdoj stenskoj masi. Kada tipovi tla nisu podeljeni na dugačke delove, ili kada je geologija terena 50% tvrda i 50% meka radna sredina, dizajn TBM mašine postaje složeniji. Mašine u ovim uslovima mogu biti optimizovane za brže konverzije između režima. U svakom slučaju, sve mašine u ovoj klasi imaju pužni transporter za rad u zatvorenom režimu. Neke mašine u ovoj kategoriji će takođe biti opremljene transporterom za bolje performanse u otvorenom režimu u tvrdom stenskom masivu. Kod mašina većeg prečnika oba tipa transportera se mogu instalirati istovremeno, dok kod manjih veličina transporteri obično moraju da se zamene. Ovaj proces konverzije, naravno, zahteva određeno vreme zastoja, ali može biti opravdano ako postoje dugi delovi određene geologije koji više odgovaraju

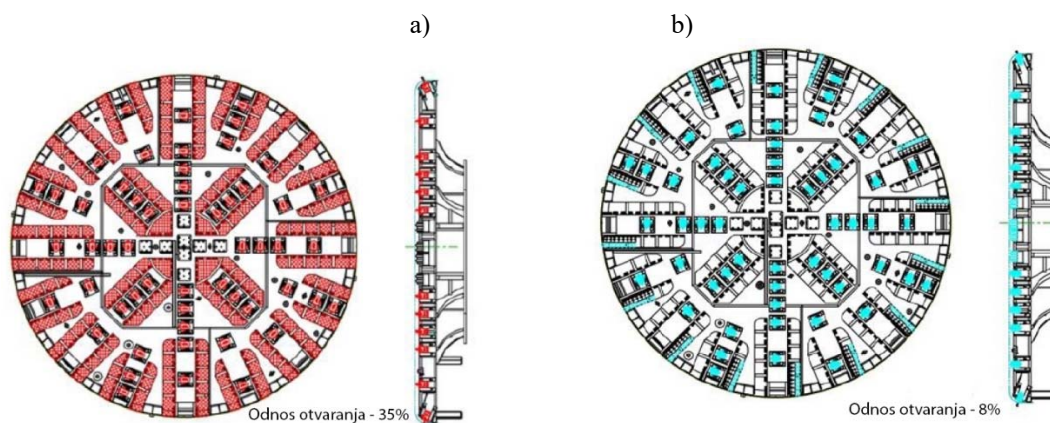
tom režimu (na slikama 33 - a, b. možemo videti kako izgleda konstrukcija za tvrdi stenski masiv i za meko tlo) (Tyler D. Sandell, Jacek Stypulkowski, 2015).



Slika 33. Izgled XRE mašina. a) XRE (prečnika 13,77 m) za tvrdi režim; b) XRE (prečnik 13,77 m) za meki režim (izvor: Tyler D. Sandell, Jacek Stypulkowski, 2015)

5.2.3. Rezna glava XRE mašine

Bez obzira na koji način se rukuje sa otkopanim materijalom, dizajn rezne glave je ključ za uspešan TBM projekat. XRE mašine generalno imaju mešovite brušene glave za sečenje sa mogućnošću ugradnje kompletnih diskova, alata za meku radnu sredinu ili njihove kombinacije (slika 34). Još jedna karakteristika koja može značajno poboljšati performanse je upotreba pogona rezne glave sa promenljivom brzinom u kombinaciji sa višebrzinskim menjačima koji mogu da obezbede veliki obrtni moment pri malim brzinama za meku radnu sredinu, kao i visoki broj obrtaja za bolje performanse u tvrdom stenskom materijalu. Ako postoje veći delovi tvrdog stenskog masiva, veliki dobici u efikasnosti se mogu postići korišćenjem rezne glave koja se može konvertovati iz dvosmernog režima rada u jednosmerni i obrnuto (Tyler D. Sandell, Jacek Stypulkowski, 2015).



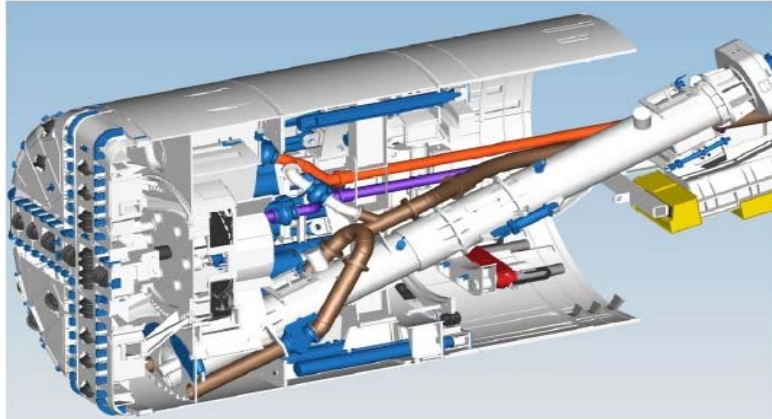
Slika 34. Konvertibilna rezna glava za tvrdi i meki stenski masiv. a) Dvosmerni način (meki stenski masiv); b) Jednosmerni režim (tvrđi stenski masiv) (izvor: Tyler D. Sandell, Jacek Stypulkowski, 2015)

5.2.4. Crossover TBM – XSE mašine

Drugi tip Crossover mašina su hibridni „EPB/Slurry“ ili XSE. Ovi TBM-e skoro uvek rade u zatvorenom režimu i mogu da se koriste u širokom spektru radne sredine visoke i niske propusnosti, peska, gline, šljunka i stena. Posebno su korisni u urbanim sredinama i drugim naseljenim mestima. Imaju sposobnost da iskopaju teško mešanu radnu sredinu precizno kontrolišući visoke i niske hidrostatičke pritiske. Ovo umanjuje rizik od izduvavanja usled čeonog pritiska ili sleganje površine usled gubitka čeonog pritiska (Tyler D. Sandell, Jacek Stypulkowski, 2015).

5.2.5. XSE uklanjanje materijala i kontrola

U radnim sredinama niske propustljivosti bez visokih hidrostatičkih pritisaka, XSE model može napredovati brzo i efikasno u „EPB“ režimu bez troškova i komplikacija pri rukovanju tečnim materijalom na bazi mulja. U radnim sredinama visoke propustljivosti i oblastima sa visokim hidrostatičkim pritisacima XSE model može da radi u suspenziji, čime se eliminišu problemi netačnog praćenja zapremine i kontrole pritiska sa kojima se „EPB“ mogu susreti u ovim uslovima (Tyler D. Sandell, Jacek Stypulkowski, 2015). Na slici 35 prikazan je izgled ove mašine.



Slika 35. XSE mašina (izvor: Tyler D. Sandell, Jacek Stypilkowski, 2015)

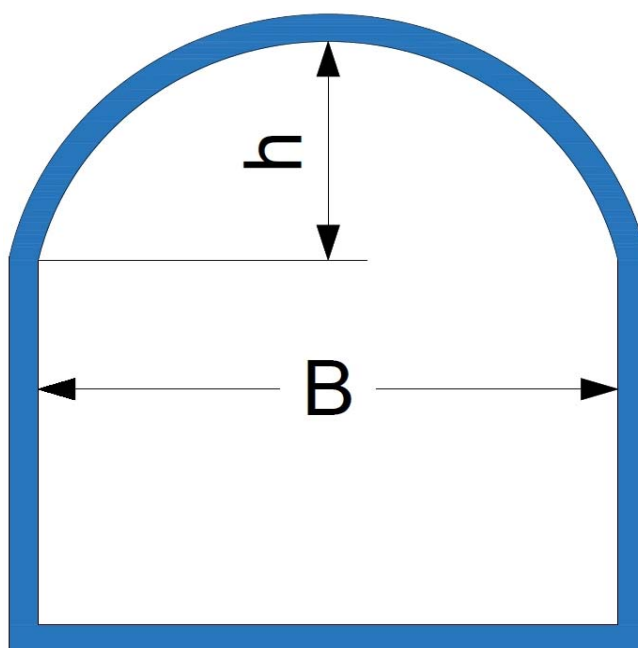
5.2.6. Rezna glava XSE mašine

XSE model je uglavnom opremljen standardnim dvosmernim EPB-om – tipom sa mešovitim brušenim reznim glavama sa mogućnošću ugradnje disk rezača i/ili alata za meki stenski masiv za maksimalnu iskorišćenost. Veliki otvori omogućavaju različite veličine kamenih blokova u komori za mešanje. U EPB režimu kamene gromade koje mogu da prođu kroz otvore rezne glave dalje prolaze kroz pužni transporter. U režimu rada sa muljem, kamene gromade koje ne mogu da prođu kroz cevi za mulj se razbijaju pomoću mehanizma za drobljenje. Ovo može biti čeljusna drobilica u komori za mešanje i/ili rotirajuća drobilica postavljena na strani pregrade sa slobodnim vazduhom (Tyler D. Sandell, Jacek Stypulkowski, 2015).

6. METODE IZRADE KOMORA

6.1. Postupak izrade kod pravougaonog profila

Pravougaoni poprečni profil komore obično se sastoji iz zasvođenog krovinskog dela, čije dimenzije stoje u određenoj proporciji sa širinom komore. Svodovi su definisani dimenzijama sa širinom B i veličinom strele svoda h, koja je prikazana na slici 36.



Slika 36. Izgled i elementi komora pravougaonog preseka

Strela svoda se obično kreće od $\frac{1}{2}$ do $\frac{1}{6}$ širine komore. Kod ovakvih komora prilikom izrade neophodno je razlikovati podsvodni deo od donjeg pravougaonog dela komore. S obzirom na različite oblike, položaje i veličine ovih delova komore razumljivo je što se kod iskopa obično razmatraju odvojeno i primenjuju različite metode (Jovanović, 1984).

Veličina podsvodnog dela zavisi od više činilaca, gde se ističu oni faktori koji su vezani za tehnologiju izrade: mehanizacija na bušenju, utovaru, transportu, podgrađivanju i sl.

Neophodno je kod izgradnje ovakvih komora razlikovati fazu izrade podsvodnog dela i fazu izrade donjeg dela komore, znajući sve prethodne navedene

razloge u organizacionom smislu. Pošto svaka od ovih faza poseduje različite specifičnosti, posebno će biti obrađena faza izrade podsvodnog dela a posebno faza izrade donjeg dela komora.

6.1.1. Izrada podsvodnog dela komore

Kod iskopa podsvodnog dela komore u primeni su dva različita postupka, i to:

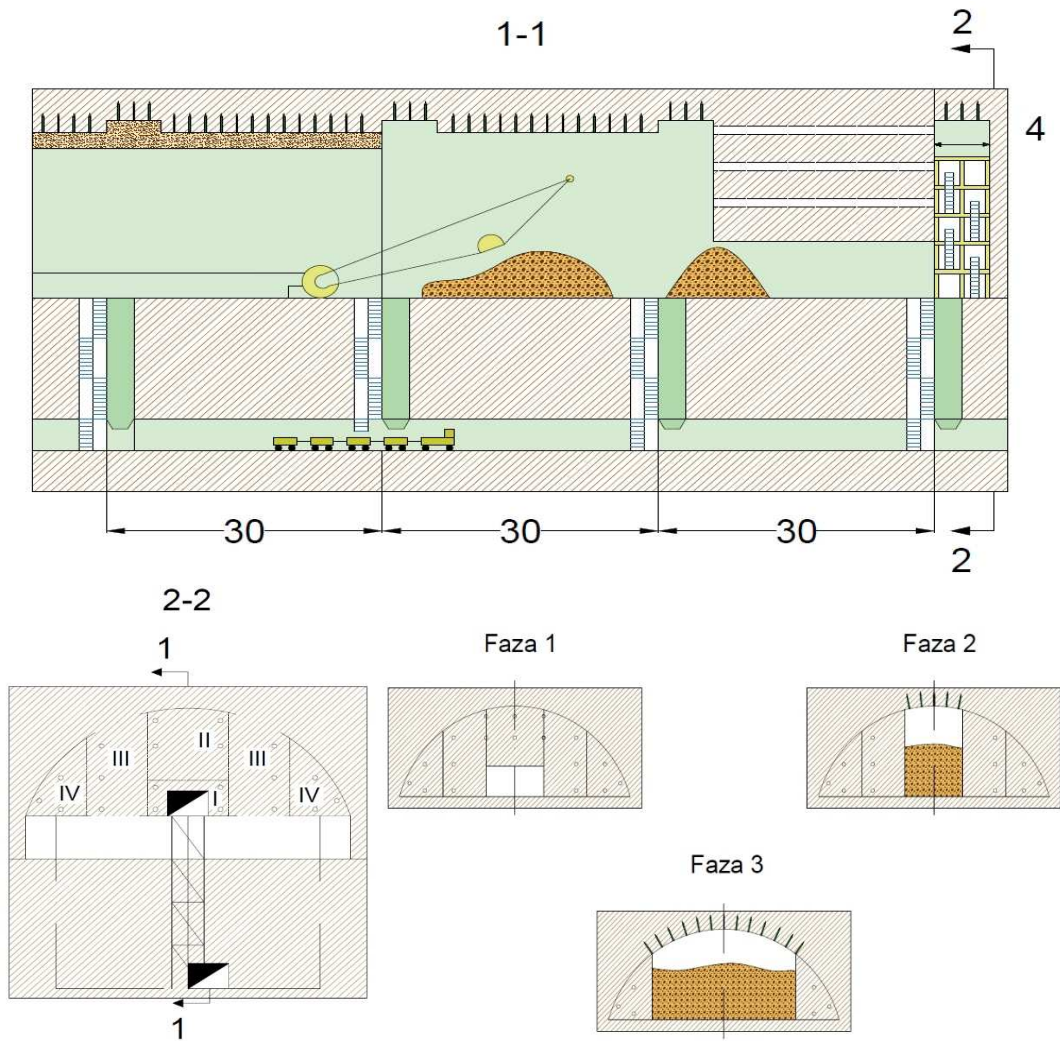
- Postupak sa dugačkim minskim bušotinama i
- Postupak sa kratkim minskim bušotinama.

Kada će koji postupak biti primenjen, osim dimenzija podsvodnog dela na izbor, u najvećem broju slučajeva, zavisi od raspoložive mehanizacije.

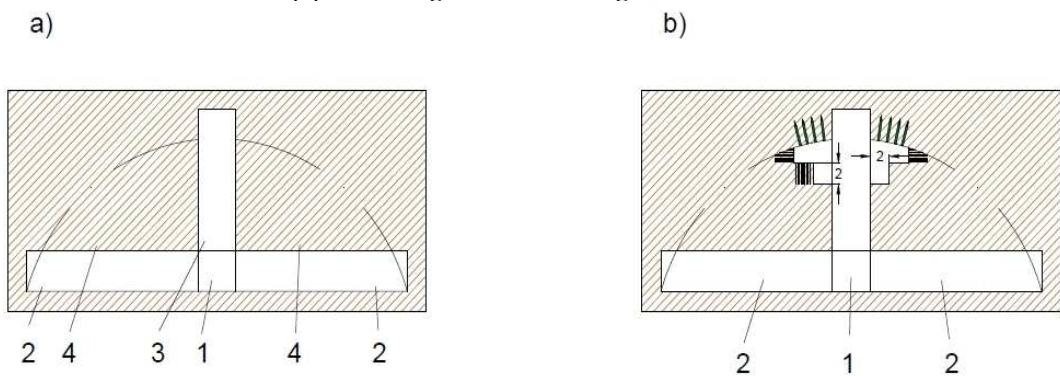
Postupak sa dugačkim minskim bušotinama

Kod ovog postupka neophodno je komoru podeliti u sekcije dužine od 10 – 30 metara i pri dnu, po sredini podsvodnog dela, izraditi hodnik (slika 37). Za vezu između osnovnog transportnog hodnika, koji se nalazi na podu komore i hodnika u podsvodnom delu izrađuje se vertikalna okna, koja služe kao sipke i kao prolazi. Rastojanje između ovih okana odgovara dužini sekcije. Dužina sekcije zavisi od stabilnosti stenskog masiva (Jovanović, 1984).

Rad se obično organizuje u više sekcija paralelno radi ubrzanja radova na izradi, i to tako što se u jednoj sekciji obavljaju radovi na betoniranju, u drugoj radovi na uklanjanju miniranog materijala, a u trećoj radovi na bušenju i pripremi za miniranje. Na slici 37 je prikazana tehnološka šema jedne ovakve organizacije rada. Da bi bili u mogućnosti da primenimo jednu ovakvu tehnološku šemu neophodno je da se bušenje obavlja sa suprotne strane slobodne površine. U ovu svrhu, na rastojanju od slobodne površine koje odgovara dužini sekcije, izradi se poprečno na osu komore prosek po čitavom preseku podsvodnog dela. Širina ovog preseka zavisi od veličine mehanizacije sa kojom se izrađuju bušotine (Jovanović, 1984). Obično širina preseka iznosi od 3 – 4 m. Na slici 38 prikazan je redosled radova na preseku.



Slika 37. Iskop podsvodnog dela komore dugačkim minkim bušotinama



Slika 38. Izrada poprečnog preseka.

Radovi na izradi preseka izvode se na sledeći način i po sledećem redosledu (slika 38). Iz hodnika koji je izrađen pri dnu podsvodnog dela komore – 1, na dužini sekcije izrađuje se prečni hodnik dimenzija 3 x 3 ili 3 x 4 m – 2 i vertikalna prostorija – 3. Ova vertikalna prostorija (3) izrađuje se za 1 – 1,5 m izvan projektovane iskopne

konture svoda (slika 38a). Dalje, prosek se izrađuje na taj način što se iz vertikalne prostorije uz pomoć kratkih minskih bušotina vrši prosecanje delova podsvodnog dela označenog sa – 4, a koji se nalazi između vertikalne prostorije (3) i prečnog hodnika (2). Šema radova na izradi ovog preseka prikazana je naslici 38b (Jovanović, 1984).

Iz ovakvo izrađenog preseka, uz pomoć stubnih bušaćih čekića, buše se dugačke međusobno paralelne bušotine. Ove bušotine buše se horizontalno (slika 38b). Miniranje podsvodnog dela izvodi se u IV faze. U I fazi obavlja se proširenje centralnog hodnika (1) do dimenzije koje obezbeđuje smeštaj miniranog stenskog materijala posle miniranja u fazi II. U III i IV fazi vrši se miniranje u sektorima III i IV (slika 37) (Jovanović, 1984).

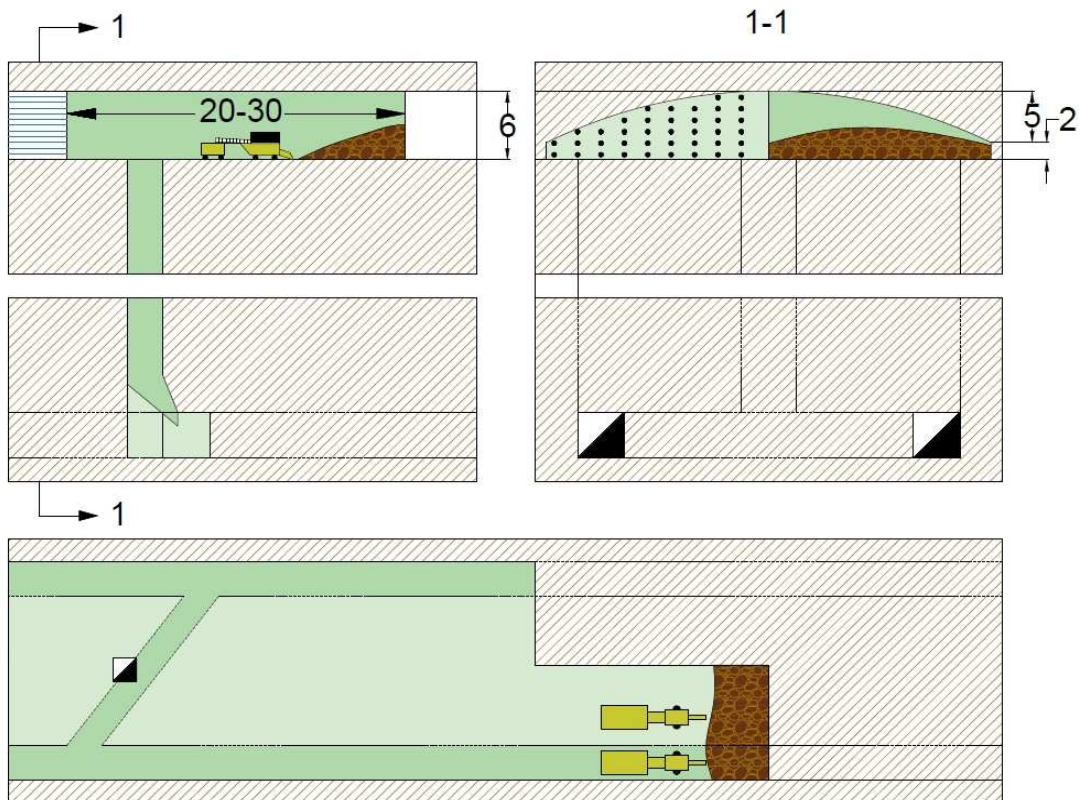
Nakon obavljenog miniranja, zavisnosti od potrebe, postavlja se privremena podgrada sidrenjem. Postavljanje sidara vrši se sa miniranog materijala.

Za utovar i transport miniranog materijala do sipki mogu se koristiti različite utovarne-transportne mašine (utovarne lopate, skreperi, buldozeri i sl.).

Stalna podgrada (svod) obično se izrađuje od monolitnog ili armiranog betona, ređe od armiranobetonskih lukova i torkret-betona. Ukoliko se stalna podgrada izrađuje od monolitnog betona tada se obično pri betoniranju koristi klizna (pokretna) oplata (Jovanović, 1984).

Postupak sa kratkim minskim bušotinama

Primena ovog postupka izvodljiva je u slučajevima kada se podsvodni deo izrađuje u veoma stabilnom stenskom materijalu, koji omogućava da se čitav profil istovremeno otvori bez opasnosti od rušenja. Prema tehnološkoj šemi predviđenoj za ovaj postupak neophodno je da se čitavo čelo podsvodnog dela podeli u dve sekcije (slika 39). Ovo je potrebno kako bi se mogao organizovati paralelan rad na utovaru i bušenju, jer dok u jednoj sekciji vrši utovar i uklanjanje stenskog materijala u drugoj se vrši bušenje i priprema za miniranje (Jovanović, 1984).



Slika 39. Iskop podsvodnog dela komore kratkim minkim bušotinama

Miniranje se obavlja uz pomoć kratkih minskih bušotina dužine 3÷4 m. Bušenje ovih bušotina izvodi se uz pomoć bušačkih čekića smeštenih na bušača kola ili neku drugu pomoćnu mehanizaciju.

Utovar miniranog materijala obavlja se utovaračima, najčešće utovarnih lopata različitog tipa i dimenzija, mada kod prostorija većeg profila utovara se može izvoditi i uz pomoć bagera. Kao transportna mehanizacija koriste se vagoneti ili kamioni damperi (u zavisnosti od utovarne mehanizacije). Za transport do osnovnog transportnog hodnika, koji se kao i u prethodnom slučaju nalazi na podu komore, izrađuju se vertikalne sipke. Rastojanje između sipki zavisi od vrste transporta koji se primenjuju (Jovanović, 1984).

Dobre osobine ovog postupka sastoje se iz sledećeg:

- Mogućnost dobijanja veoma dobrih bušačkominerskih pokazatelja i
- Mali obim pripremnih radova.

Među nedostatke može da se ubroji nemogućnost primene ove metode kod rada u raspucalom stenskom materijalu.

6.1.2. Izrada donjeg dela komore

U okviru donjeg dela komore iskop stenskog materijala moguće je organizovati na više načina, što uglavnom zavisi od veličine komore, stenskog masiva i raspoložive mehanizacije. Kao najpouzdanije za sada su se pokazale podetažna metoda sa magaciniranjem miniranog materijala i metoda otkopavanja u horizontalnim pojasevima. Svaka od ovih metoda može se izvoditi u više različitih varijanti.

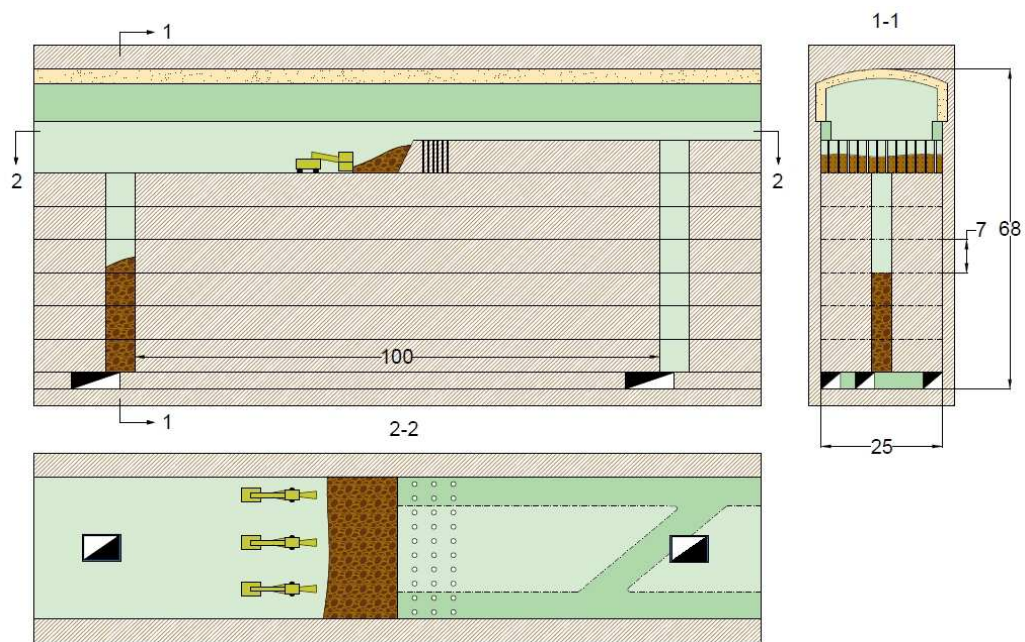
Postupak izrade iskopa u horizontalnim pojasevima

Ovaj postupak odlikuje se radovima na iskopu dela stenskog masiva obuhvaćenog donjim delom komore u etažama odozgo na niže po čitavoj širini komore (Jovanović, 1984). Visina etaža (pojasa) kreće se od 6÷7 m. Miniranje se izvodi vertikalnim bušotinama postavljenim u jedan ili više redova, upravnim na dužinu komore. Za bušenje bušotina obično se koriste lafetne bušilice opremljene teškim bušačim čekićima. Prilikom miniranja vodi se računa da se od iskopne konture poslednje mine udalje za oko 2÷3 m, čime se ostavlja jedan deo stenskog masiva koji ima zadatak da nosi svod komore a kasnije da posluži kao noseća stopa kod betoniranja bokova. Ovaj preostali deo stenskog masiva se kasnije kratkim minskim bušotinama izminira i na taj način omogući postavljanje betonske obloge. Stalna betonska podgrada postavlja se u pojasevima onako kako se oni otkopavaju. Za postavljanje ove podgrade mogu se koristiti specijalno izrađena čelična oplata ili klizna oplata. Sa betoniranjem se ide odozgo na niže. Prilikom betoniranja neophodno je voditi računa da radovi na betoniranju budu dovoljno udaljenji od čela radilišta kako isti ne bi miniranjem bili oštećeni (Jovanović, 1984).

Prema načinu utovara i transporta miniranog materijala kod ove metode moguće je razlikovati više varijanti. Neke od ovih varijanti biće i obrađene.

Varijanta sa utovarnom lopatom. Kod ove varijante što je specifično i što je izdvaja od ostalih jeste organizacija utovara i transporta. Kao osnovna mehanizacija

na utovaru koristi se utovarna lopata, a na transportu jamski vagoneti. Na slici 40 prikazana je šema tehnološkog procesa po ovoj varijanti.



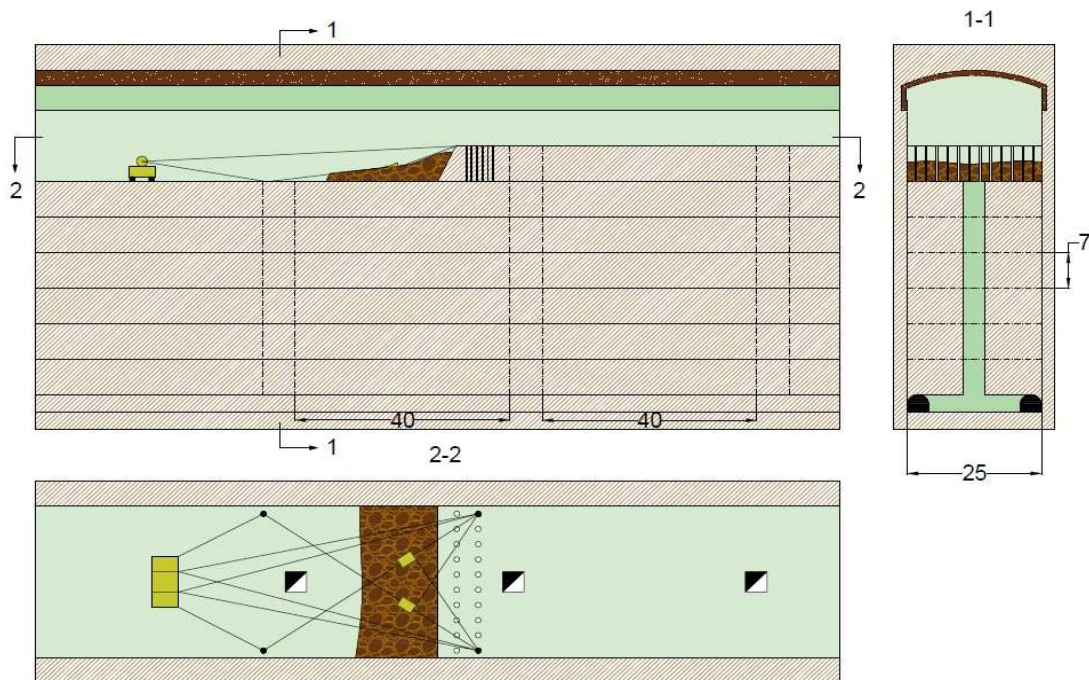
Slika 40. Iskop donjeg dela komore u horizontalnim pojasevima (varijanta sa utovarnom lopatom)

Otvaranje niže etaže započinje se od sipke, i to na taj način što se od sipke prema bokovima rade poprečni useci širine $4\div 5$ m. Po izradi ovih useka otvaranje etaže je završeno i može se započeti sa otkopavanjem u pravcu pružanja komore, na ranije opisan način. Uklanjanje miniranog materijala u prvoj fazi otkopavanja (dok se ne postigne rastojanje od sipke za oko $20\div 25$ m) vrši se uz pomoć skrepera. Tek kada se završi ova prva faza izrade rad na utovaru i transportu organizuje se pomoću skrepera, utovarnih lopata i jamskih vagoneta, na način kako je to prikazano na slici 40. Ova mera predviđena je iz sigurnosnih razloga s obzirom da opasna zona razletanja komada kamena u toku miniranja iznosi $20\div 25$ m (Jovanović, 1984).

Za transport miniranog materijala po osi komore na svakih 100 m rade se sipke sa dva odeljenja (jedno odeljenje za prolaz zaposlenih a drugo za odeljenje za spuštanje materijala). Ove sipke spojene su sa osnovnim izvoznim hodnikom izrađenim na nivou poda komore.

Dobra strana ove varijante je što ima mali obim pripremnih radova, dok je slaba strana što može da se primeni samo u slučaju kada se izrađuju komore veilke dužine.

Varijanta sa skreperima. Otvaranje etaže započinje se na isti način kao što je to opisano i kod prethodne varijante. Razlika je jedino u tome što se za utovar i transport koriste skreperi. S obzirom da su u pitanju veći komadi stena, tu skreper obično ima zapreminu od 0,8 do 1,0 m³. Optimalna dužina skreperovanja smatra se da iznosi do 40 m, stoga se i sipke, koje se izrađuju po sredini komore do osnovnog transportnog hodnika (prečnika) koji se nalazi na nivou poda komore, izrađuju na međusobnom rastojanju od 30 do 40 m (Jovanović, 1984). Na slici 41 prikazana je šema izrade po ovoj varijanti.



Slika 41. Iskop donjeg dela komore u horizontalnim pojasevima (varijanta sa skreperima)

Kod ove varijante obim pripremnih radova je znatno veći nego kod prethodne, ali se ista može koristiti i za komore manje dužine.

Podetažni postupak sa magaciniranjem

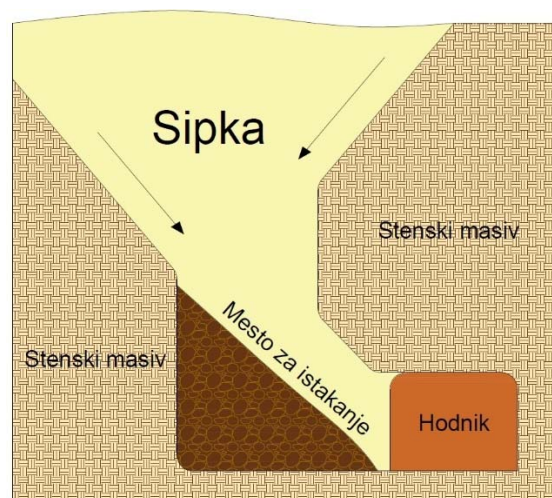
Opšta karakteristika ove metode ogleda se u činjenici što se dugačkim minskim bušotinama u određenim sekcijama izvrši razaranje stenskog materijala, i to odozdo na više. Ovako razoren stenski materijal se zadržava u novostvorenoj šupljini, s tim što se višak koji nastaje kao posledica povećanja zapremine posle miniranja ispusti kroz za ovu svrhu specijalno izrađene otvore pri dnu komore. Minirani

materijal ostavljen u komori održava bokove i na taj način sprečava njihovo zarušavanje. U izvesnim slučajevima, kada se proceni da ovaj izlomljeni stenski materijal nije dovoljan ostavljaju se i poprečni stubovi, koji se naknadno miniraju (Jovanović, 1984). Kod ove metode miniranja u obimu projektovane komore vrši se postepeno odozdo na više, pri čemu se mora voditi računa da se pri miniranju iz komore istoči 30÷40 % od one količine stenskog materijala koja će se minirati (stvari tzv. kompenzacioni prostor). Ovo je neophodno potrebno jer za ovu zapreminu se stenski materijal posle miniranja povećava, pa da bi miniranje bilo uspešno i bez zbijanja već izdrobljenog materijala u komori (koje je ovde nepoželjno) za navedenu količinu materijala komoru treba isprazniti.

Kada se izminira celokupna masa kamena u obimu komore, tada se započinje sa pražnjenjem komore kroz za ovu svrhu izrađene otvore. Visina pražnjenja mora biti usklađena sa visinom betoniranja (Jovanović, 1984).

Betoniranje se izvodi odozgo na niže uz pomoć viseće klizne oplata.

Kod ove metode istakanje miniranog materijala predstavlja jednu od veoma važnih radnih operacija, jer u zavisnosti od radova na istakanju umnogome zavisi uspeh izvođenja radova na izradi. Da bi snižavanje nivoa miniranog materijala se obavljalo ravnomerno neophodno je izgraditi veći broj sipki za istakanje, čiji raspored i dimenzije moraju biti prilagođene veličine komore i granulometrijskom sastavu miniranog materijala. Na slici 42 prikazana je konstrukcija sipke za istakanje.



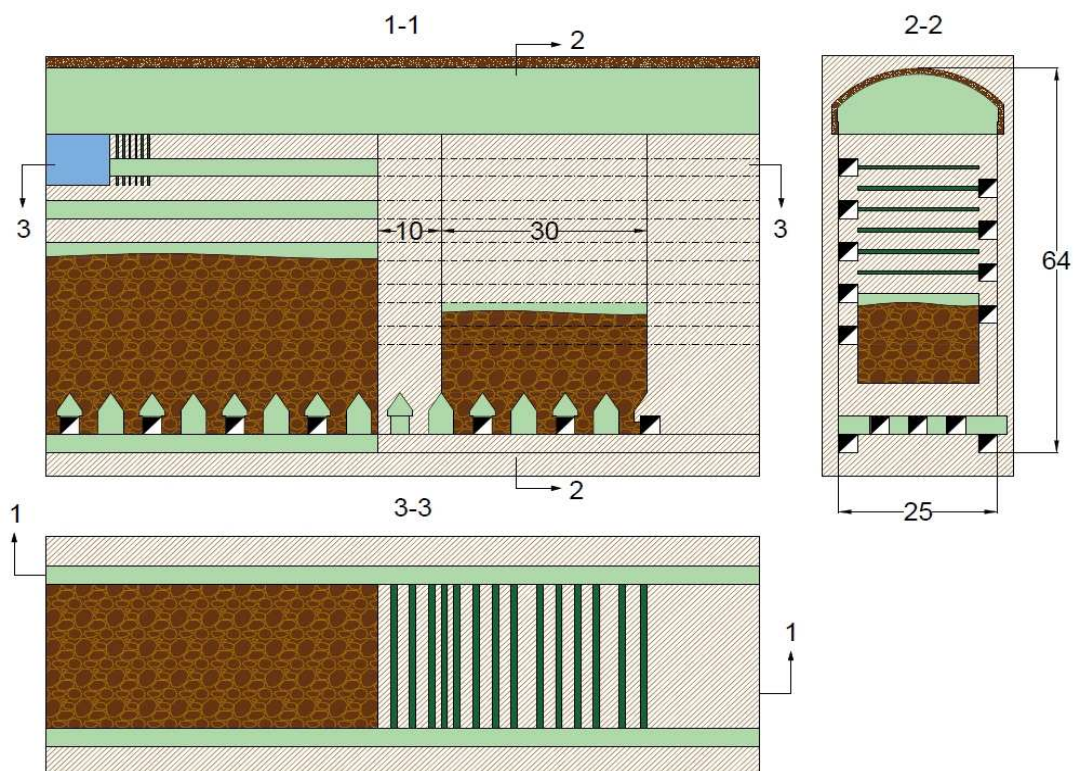
Slika 42. Konstrukcija sipke za istakanje

Uklanjanje miniranog materijala od mesta istakanja može se organizovati uz pomoć skrepera ili utovarno-transportne mehanizacije.

S obzirom da izrada sipki za istakanje zahteva visinu od $8\div 10$ m, to ova metoda može se primeniti samo kod komore čije su visine preko 30 m.

U zavisnosti od rasporeda minskih bušotina kod ove metode može se razlikovati veći broj varijanti. Međutim, treba razlikovati varijante sa lepezasto i varijante sa paralelno postavljenim minskim bušotinama (Jovanović, 1984).

Varijanta sa paralelnim rasporedom bušotina. Postupak izrade kod koga su bušotine bušene međusobno paralelno i obično horizontalne, u praksi se primenjuje u vidu različitih podvarijanti. Za sve ove postupke je zajedničko da se iz neke horizontalne prostorije, koja je izrađena po dužini komore ili poprečno, izrađuju horizontalne bušotine (Jovanović, 1984). Jedna ovakva podvarijanta je prikazana na slici 43.



Slika 43. Iskop donjeg dela komore magacinskom metodom (varijanta sa paralelnim rasporedom bušotina)

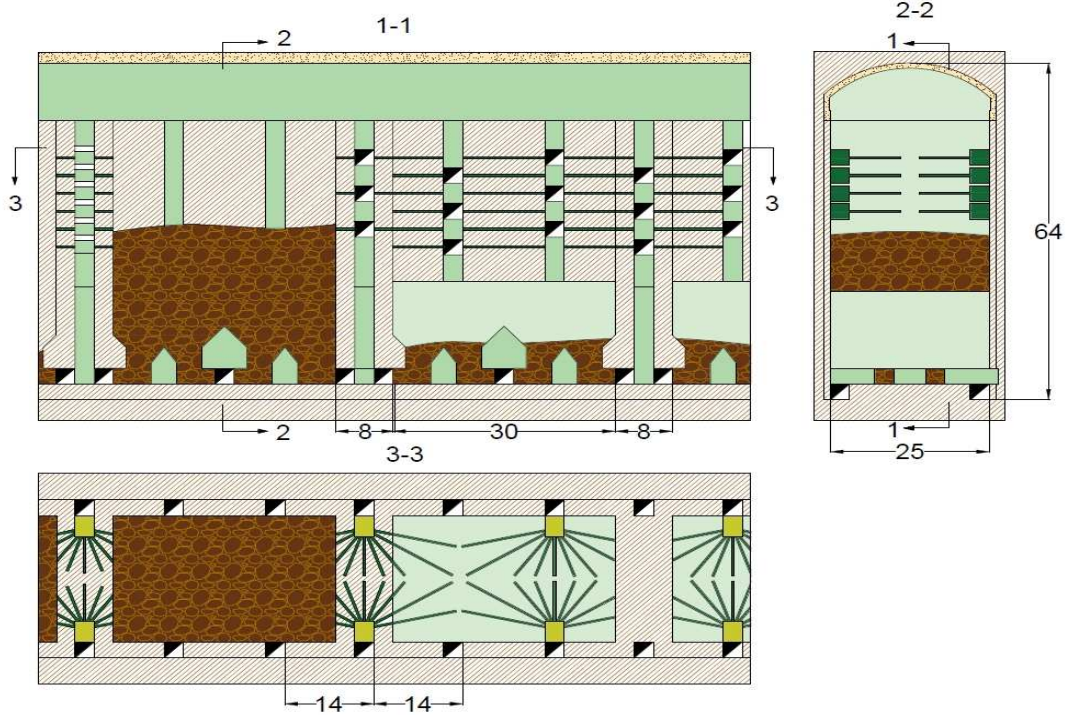
Prema ovoj podvarijanti duž bokova komore izrađuju se hodnici čije međusobno visinsko rastojanje odgovara visini pojasa koji želi da obori miniranjem. Ovi hodnici izrađuju se naizmjenično sa jedne i druge strane boka komore. Ova mera preduzima se s ciljem da se što manje oslabi bok prostorije. Iz ovih hodnika uz pomoć stubnih bušaćih čekića buše se horizontalne bušotine dužine koja odgovara širini komore (slika 43).

Ako se komora radi u čvrstom ali raspucalom stenskom materijalu, tada se kod većih dužina komora ista može podeliti u sekcije od oko 30 m. Između sekcija ostavljaju se zaštitni stubovi širine $8\div 10$ m. Ovi se stubovi miniraju naknadno (Jovanović, 1984).

Nedostatak ove podvarijante je u veoma velikom obimu pripremnih radova, a prednosti su bezbedan rad i dobra ventilacija.

Varijanta sa lepezastim rasporedom bušotina. Prednost ove varijante ogleda se u specifičnom rasporedu bušotina, koje se buše sa jednog mesta i imaju oblik horizontalne lepeze. Pripremnih radovi započinju se na taj način što se pri podu komore duž oba boka izrade podužni hodnici iz kojih se na svakih $10\div 15$ m izrade vertikalna okna. Iz ovih okana, za visinu pojasa koji se minira, izrađuju se specijalne komore iz kojih se obavlja bušenje. Da bi se što manje oštetila stenska masa u komori, ove komorice se tako raspoređuju da se na istom nivou izrađuju iz svakog drugog okna, tako da ako se posmatra po pojasevima ove komorice su međusobno pomerene za rastojanje između okana. Veličina ovih komora zavisi od mehanizacije sa kojom se buši i najčešće su veličine $2 \cdot 2,5$ m (Jovanović, 1984). Za bušenje bušotina koristi se stubni bušaći čekić.

Prednost ove varijante jeste još što omogućava da se buše kraće bušotine i manjeg prečnika (od 65 do 85 mm), dok nedostatak je što ima veći obim pripremnih radova. Na slici 44 je prikazana šema ove varijante.

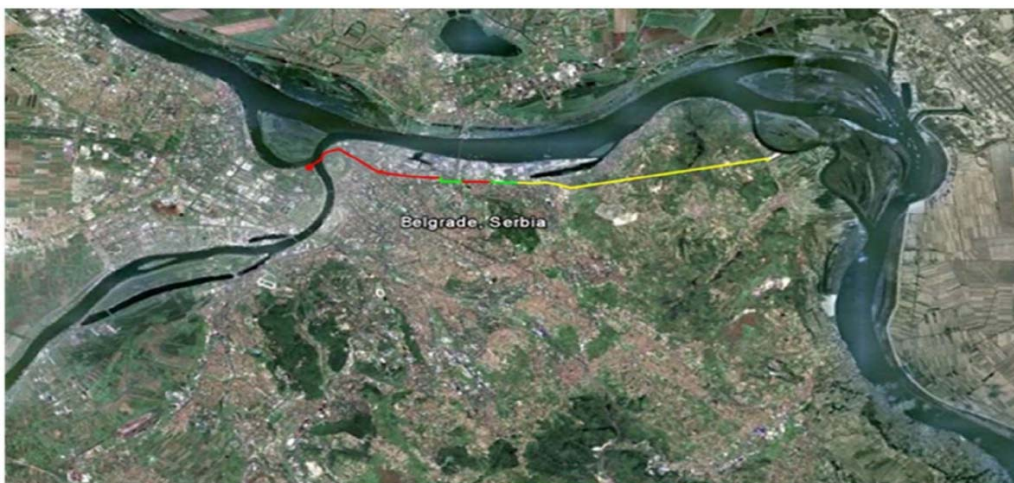


Slika 44. Iskop donjeg dela komore magacinskom metodom (varijanta sa lepezastim rasporedom bušotina)

7. IZRADA TUNELA „VIŠNJICA“

Tunel „Višnjica“ čini deonicu kolektora Interceptor Ušće-Veliko Selo. Kolektor Interceptor Ušće-Veliko Selo predviđen je za prikupljanje i odvođenje otpadnih voda i dela atmosferskih voda iz centralnog beogradskog kanalizacionog sistema (uključujući Novi Beograd i Zemun) u Dunav. Ukupna dužina Interceptora iznosi 12639 m i proteže se od crpne stanice „Ušće“ do budućeg postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda „Veliko Selo“. Slivna površina Interceptor iznosi oko 28000 hektara na kome danas prema procenama živi oko 1150000 građana Beograda. Poslednja deonica tunel „Višnjica“ građena je mehanizovano uz primenu tunelske mašine (TBM) i podeljena je u tri deonice: otvorenu izlaznu deonicu, duboku deonicu i plitku deonicu. Ukupna dužina tunela „Višnjica“ iznosi 6772 m, sa unutrašnjim svetlim prečnikom od 4,10 m (Institut Jaroslav Černi AD, 2012).

Na slici 45 prikazana je trasa Interceptora Ušće-Veliko Selo, gde je žutom bojom označena deonica koju predstavlja tunel „Višnjica“ (Institut Jaroslav Černi AD, 2012).



Slika 45. Trasa Interceptora Ušće-Veliko Selo

Početak deonice je na Slanačkom putu u zoni Rospa Ćuprije na stacionaži km 5+867, a završava se kod obale Dunavca u blizini Velikog Sela na stacionaži km 12+639. Na osnovu obrade i analize različitih tipova tehnologije građenja, poprečnih profila i obloge tunela i sprovedenih tehnokonomskih analiza usvojena je metoda

izrade primenom tunelske mašine – TBM (skraćeno od engleskog: Tunnel Boring Machine), tj. metodom mehanizovanog štita sa montažnom oblogom (Institut Jaroslav Černi AD, 2012).

7.1. Rudarsko-geološki uslovi i istražni radovi kod projektovanja tunela „Višnjica“

Kod izgradnje tunela, potrebno je pre definitivnog izbora trase, dimenzija podgradne konstrukcije i metode izrade, obaviti pripremne radove. Ovi radovi obuhvataju prikupljanje geoloških i hidroloških podataka terena, kao i izradu topografske osnove na kojoj se ucrtava idejna trasa tunela. Prikupljeni podaci služe za izradu prognoznog geološkog profila terena i idejnog projekta izrade tunela.

Nakon izrade idejnog projekta planiraju se i organizuju dalji istražni radovi sa ciljem prikupljanja detaljnijih podataka o geološkoj građi terena, hidrogeološkim uslovima, geotehničkim i geomehaničkim karakteristikama stenske mase i masiva, tektonici, temperaturi.

Prilikom izrade Interceptora „Ušće-Veliko Selo“, deonica tunel „Višnjica“, obavljani su istražni radovi u cilju boljeg upoznavanja sa radnom sredinom. Prva geotehnička i geofizička ispitivanja duž trase tunela „Višnjica“ urađena su 1978. godine za potrebe izrade idejnog projekta u kome je razmatrana varijanta izgradnje tunela bušačko-minerskim radom, ali taj projekat kasnije nije razrađen. 2004. i 2005. godine „Geozavod“ iz Beograda uradio je nova geološko-geotehnička istraživanja koja su obuhvatala 36 istražnih bušotina ukupne dužine preko 2900 metara, 9 piježometra, geofizička i laboratorijska merenja. U proseku su istraživanja rađena na svakih 250 m, osim u zonama ulaznog i izlaznog portala gde ih je bilo više (Institut Jaroslav Černi AD, 2009).

Obim ovih istraživanja je bio manji nego što preporučuje prof. dr Petar Jovanović (1984) koji se bavio ovom problematikom. Po njegovoj preporuci, za tunele dužine preko 300 m i dubine do 300 m, u složenim rudarsko-geološkim uslovima u cilju istraživanja i upoznavanja sa radnom sredinom potrebno je uraditi po 3 bušotine na svakom portalu, po 1 bušotinu na 50 m od portala i po jednu bušotinu

na svakih 100 do 150 metara po osi tunela. Iako obimni, realizovani istražni radovi u datom trenutku nisu bili dovoljni da se pouzdano definišu svi geološki uslovi zastupljeni prilikom izrade tunela. Iz tog razloga prilikom izrade tunela vrše se dodatna geološka istraživanja ispred mašine i tehničko osmatranje.

Na osnovu obavljenih geoloških istraživanja utvrđeno je da je tlo izgrađeno od sedimenata neogene (miocene) starosti. Pretežno su to glinovito-laporoviti sedimenti, sa retkim proslojcima zbijenih prašinstih peskova, konglomerata i šljunka u masi, dok će se samo manjim delom iskop izvoditi u sedimentima karbonatnog sastava, ili kvartnim glinovito-peskovitim sedimentima (Institut Jaroslav Černi AD, 2009).

7.2. Izrada tunela „Višnjica“

Prilikom odabira metode izrade tunela „Višnjica“, uzimajući u obzir prečnik 4,1 m i ukupnu dužinu tunela i na osnovu rudarsko-geoloških uslova usvojena je metoda izrade kombinovanim mašinama (Tunnel Boring Machine).

Tunelska mašina korišćena pri izradi tunela Višnjica je tipa EPB (Earth Pressure Balance). Mašina se suprotstavlja čeonom pritisku i pomera prilikom napredovanja iskopa odupiranjem na ranije ugrađenu betonsku oblogu preko hidrauličnih presa. Stabilnost čela iskopa održava se pritiskom iskopanog materijala u prostoru između čela iskopa i čela mašine (Institut Jaroslav Černi AD, 2009).

Osnovne celine mašine su: rezna glava (cutter head), štit (shield) i prateća kompozicija (trailer). U štitu i na pratećoj kompoziciji su smešteni sistemi-mehanizmi za pogon mašine, uklanjanje i utovar iskopanog materijala, postavljanje betonskih segmenata, injektiranje zazora između konture iskopa i betonskih segmenata, istražno bušenje ispred mašine, podmazivanje kontakta štit-tlo, vođenje mašine, ventilaciju, osvetljenje i drugo potrebno za rad mašine. Ukupna dužina mašine iznosi oko 120 m, težina 420 t (25 t rezna glava, 55 t prednji deo štita, 170 t srednji zadnji štit, 170 t prateća kompozicija) (Cavity Mountain Engineering, 2007). Na slici 46 prikazana je tunelska mašina Earth Pressure Balance.

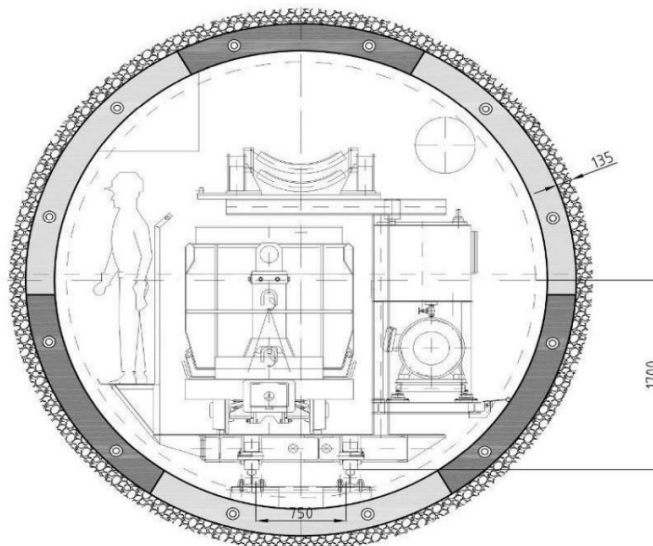
Tunel „Višnjica“ proteže se od portala na stacionaži 12+486,27 do 5+867 sa unutrašnjim prečnikom od 4,1 m i debljinom obloge od 24 cm. Razmatrana je

primena prstenova dužine 1,2 m, ali zbog ekonomske prednosti u vidu smanjenja broja zaptivača, vezivnih materijala i zastoja TBM tokom izrade odlučeno je da se usvoji dužina prstena od 1,4 m. To se smatra maksimalnom dužinom koja je u vezi sa slobodnim prostorom tunelske mašine. Jedan podgradni prsten čini 6 armiranobetnoskih segmenata.

Na slici 47 prikazan je poprečni presek tunela u toku izrade.



Slika 46. Tunelska mašina Earth Pressure Balance (Institut Jaroslav Čemir AD, 2009)



Slika 47. Poprečni preseka tunela u toku izrade (Cavity Mountain Engineering, 2007)

Dopremanje potrebnog materijala, segmenata, izvoz iskopanog materijala i prevoz ljudi vršeno je vagonetima dostavnog voza. Dostavni voz ulazi na samu prateću kompoziciju tunelske mašine. Zbog relativno malog prečnika tunela i mašinskog načina iskopa, na delu koji zauzima tunelska mašina (oko 120 m od čela

iskopa), u poprečnom preseku tunela praktično nema uslova za bušenje iz tunela radi ugrađivanja instrumenata za osmatranje (Institut Jaroslav Černi AD, 2012).

Analizom proračunatog trenja i očekivanog trenja na osnovu geološkog sastava radne sredine proračunata je opasnost od zaglavljivanja tunelske mašine i izvođaču radova predloženo je više mogućnosti otkopanog režima (prekop i/ili podmazivanje kontakta između mašine i radne sredine) Tričković (2012).

7.3. Radni ciklus

Mašina je izrađivala tunel u koracima od po 1,4 m, pri čemu se rad odvijao pod zaštitom štita i prethodno montirane obloge na već izrađenim deonicama. Prvo se vršio iskop rotacionom reznom glavom, koja sitni stensku masu ispred mašine i prema potrebi dodaje penu ili druga sredstva, tako da se stvara masa koja može da se ukloni pužnim transporterom postavljenim od dna čeone pregrade-zida. Iskopni materijal se iz pužnog transportera presipa na transporter sa trakom kojim se prebacije duž prateće kompozicije do mesta gde se utovaruje u vagonete dostavnog voza, kojim se potom izvozi iz tunela. Prema podacima proizvođača, pužni transporter može da izdrži hidrostatičke pritiske do 4 bara. Prečnik rezne glave iznosi 4,87 m, dok je njena osovina postavljena ekscentrično na geometrijsku osu štita, tako da iskop u dnu ima prekop od 0 cm, a u kruni od 3 cm, mereno u odnosu na spoljnu konturu štita uz reznju glavu. Rezna glava ima mehanizam za povećanje prekopa (copy cutter) kojim može da se dobije najveći prekop u kruni od 11 cm (Institut Jaroslav Černi AD, 2012).

Po izvršenom iskopu mašina poseduje uređaj za montažu, odnosno ugradnju, betonskih segmenata, tako što ih vakum uređajem preuzima iz skladišta na kolicima iza štita, a zatim rotacionim kretanjem postavlja u odgovarajući položaj po obimu. Zatim se segment podužno potiskuje sa po 2 hidraulične prese u pravcu prethodno montirane obloge, pri čemu u tom spoju dolazi do utiskivanja 2 moždanika u otvore prethodnog prstena. Posle postavljanja punog prstena, podužni spojevi između segmenata se pritežu sa po 2 zavrtnja kroz otvore i čaure ostavljene u segmentima (Institut Jaroslav Černi AD, 2012).

Potiskivanje mašine napred, vrši se za vreme iskopa, presama koje drže segmente. Prostor između montirane obloge i konture iskopa se popunjava cementnim malterom, koji se ubrizgava – injektira kroz cevi postavljene po obodu štita. Prodiranje maltera između betona i štita se sprečava zaptivkama u obliku žičane četke, koje naležu na spoljnu konturu betona i koje se podmazuju tehničkom mašću. Prema podacima proizvođača mašine, sistem za injektiranje može da ostvari radne pritiske do 4 bara, a maksimalne do 6 bara, a zaptivke mogu da izdrže pritisak do 4 bara (Institut Jaroslav Černi AD, 2012).

8. ZAKLJUČAK

Proces izrade tunela, podzemne prostorije ili komore je kompleksan. U uvodnom delu dato je objašnjenje o tunelima, gde je opisano šta su tuneli, koja im je namena i za kakve sve svrhe mogu da se koriste. Prilikom određivanja najracionalnijeg rešenja za izradu tunela potrebno je znati sve ključne faktore koji su sledeći: kakvi su geološki uslovi (o kakvom tipu stenske mase se radi), veličina i oblik tunela, koja vrsta mehanizacije će se koristiti, vrsta podgrade koja će se postaviti, klasifikacija tunela (namena tunela) i naravno izvodljivost i isplativost celokupnog procesa.

Za komore je drugačija stvar, gde smo naveli da su to podzemne prostorije velikih raspona, visina i dužina. One predstavljaju posebno tehničko rešenje, koje zavise od više činilaca, kao što su: dimenzije komore, oblik komore i fizičko-mehaničke i strukturne osobine stenskog masiva u kome se komora izrađuje. Problematika kod izgradnje komora jeste sama izrada komore, što podrazumeva izbor metode izrade i redosled izgradnje podzemnih komora, gde se moraju uzeti u obzir svi navedeni činiooci.

Od mehanizacije su se najbolje pokazale TBM mašine, gde je njihova prednost najviše predstavljena na adaptaciju za radnu sredinu. Pod time se podrazumeva da mogu da rade u najčvršćim, kao i u najslabijim stenskim masivima. Za određenu radnu sredinu ima TBM mašina koja je specijalizovana za te uslove. Kao za primer ćemo uzeti EPB TBM mašinu koja je namenjena za najslabiji stenski masiv, dok za veoma čvrstu sredinu se najbolje pokazala TBM mašina otvorene konstrukcije.

Ovim možemo da zaključimo da prilikom izrade tunela, podzemne prostorije ili komore ima dosta izazova koja su vezana za istraživanja radne sredine, izvodljivosti samog procesa izrade, vrstu mehanizacije i ekonomsku opravdanost.

u Beogradu,

dana 25.09.2022. god.

Izradio

Dušan Milaković

LITERATURA

1. Petar Jovanović – Izrada podzemnih prostorija velikog profila, Rudarsko-geološki fakultet, 1984.
2. Ernest E. Wahlstrom – Tunneling in Rock, University of Colorado, 1973.
3. Vladimir Milisavljević – Praktikum za nastavu, Beograd, 2019.
4. Luka Crnogorac, Master rad „Izrada tunela Višnjica sa posebnim osvrtom na podgrađivanje“, Beograd, 2017.
5. Railsystem.net – prikupljeno 20.08.2022., link:
<http://www.railsystem.net/tunnel-boring-machine-tbm/>
6. Bai Yun, Underground Engineering, 2019.
7. Tyler D. Sandell, Jacek Stypulkowski, Duel Mode, „Crossover“ Type Tunnel Boring Machine: A Unique Solution for Mixed Ground in the Middle East, 2015.
8. Creg-germany.com – prikupljeno 20.08.2022., link:
<https://www.creg-germany.com/epb>

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ ЗАВРШНОГ РАДА

Име и презиме студента: Душан Милаковић

Број индекса: Р544/21

И з ј а в љ у ј е м

да је завршни рад под насловом:

Механизована израда подземних просторија великог профила

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да завршни рад у целини ни у деловима није био предложен за стицање друге дипломе на студијским програмима Рударско-геолошког факултета или других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

У Београду, 25.09.2022

Потпис студента

ИЗЈАВА
О ИСЛОВЕТНОСТИ ШТАМПАНЕ И ЕЛЕКТРОНСКЕ ВЕРЗИЈЕ
ЗАВРШНОГ РАДА

Име (име родитеља) и презиме студента: Душан (Милан) Милаковић

Број индекса: Р544/21

Студијски програм: Рударско инжењерство – модул: Подземна градња

Наслов рада: Механизована израда подземних просторија великог профила

Ментор: Проф. др Раде Токалић

Изјављујем да је штампана верзија мог завршног рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради одлагања у Дигиталном репозиторијуму Рударско-геолошког факултета.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити у електронском каталогу и у публикацијама Рударско-геолошког факултета.

У Београду, 25.09.2022

Потпис студента

ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ ЗАВРШНОГ РАДА

Овлашћујем библиотеку Рударско-геолошког факултета да у Дигитални репозиторијум унесе мој завршни рад под насловом:

Механизована израда подземних просторија великог профила

који је моје ауторско дело.

Завршни рад са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Мој завршни рад одложен у Дигиталном репозиторијуму Рударско-геолошког факултета је *(заокружити једну од две опције)*:

I. редуковано доступан кроз наслов завршног рада и резиме рада са кључним речима;

II. јавно доступан у отвореном приступу, тако да га могу користити сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Цреативе Цоммонс) за коју сам се уз сагласност ментора одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Заокружите само једну од шест понуђених лиценци. Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве.)

У Београду, 25.09.2022

Потпис ментора

Потпис студента

1. **Ауторство.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.
 2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.
 3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.
 4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.
 5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.
 6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.
-

Библиотека Рударско-геолошког факултета

ПОТВРДА

О ПРЕДАЈИ ЕЛЕКТРОНСКЕ ВЕРЗИЈЕ ЗАВРШНОГ РАДА

Потврђује се да је студент Душан (Милан) Милаковић

(име (име родитеља) презиме)

бр. индекса Р544/21

предао/ла електронску верзију завршног рада на

основним/мастер академским студијама под насловом:

Механизована израда подземних просторија великог профила

који је урађен под менторством Раде Токалић, редовни професор

(име, презиме и звање)

за Дигитални репозиторијум завршних радова РГФ-а.

Потврда се издаје за потребе Одељења за студентска и наставна питања и не може се користити у друге сврхе.

У Београду, 25.09.2022

Библиотекар
