

REPUBLIKA SRBIJA  
PROJEKAT REHABILITACIJE TRANSPORTA

**PRIRUČNIK ZA PROJEKTOVANJE  
PUTEVA U REPUBLICI SRBIJI**

**11. PROJEKTOVANJE TUNELA**

**11.2 ZEMLJANI RADOVI**

**BEOGRAD, 2012.**

---

**Izdavač: Javno preduzeće Putevi Srbije, Bulevar kralja Aleksandra 282, Beograd**

**Izdanja:**

<b>Br.</b>	<b>Datum</b>	<b>Opis dopuna i promena</b>
<b>1</b>	<b>30.04.2012</b>	Početno izdanje

**SADRŽAJ**

<b>11.2.1</b>	<b>OPŠTA NAPOMENA.....</b>	<b>1</b>
<b>11.2.2</b>	<b>ISPITIVANJE TLA.....</b>	<b>1</b>
11.2.2.1	UVOD.....	1
11.2.2.1.1	Svrha.....	1
11.2.2.2	PRELIMINARNA STUDIJA.....	1
11.2.2.2.1	Uredska studija.....	1
11.2.2.2.2	Terenska studija.....	1
11.2.2.2.3	Privremeni geološki izveštaji.....	2
11.2.2.3	DETALJNA STUDIJA.....	2
11.2.2.3.1	Geofizičko istraživanje.....	2
11.2.2.3.2	Istraživačko bušenje.....	4
11.2.2.3.3	Istraživački prilazi, šahtovi i tuneli.....	5
11.2.2.3.4	Uzorkovanje.....	5
11.2.2.3.5	In-situ ispitivanja.....	6
11.2.2.3.6	Laboratorijska ispitivanja.....	8
<b>11.2.3</b>	<b>KLASIFIKACIJA ZEMLJE I STENA.....</b>	<b>9</b>
11.2.3.1	PREGLED OPŠTIH SISTEMA KLASIFIKACIJE.....	9
11.2.3.1.1	Terzagijeva klasifikacija.....	9
11.2.3.1.2	Dirovo označavanje kvaliteta stena (RQD).....	9
11.2.3.1.3	Bjenjavskejeva klasifikacija.....	10
11.2.3.1.4	Indeks geološke čvrstoće (GSI).....	10
11.2.3.1.5	Bartonova klasifikacija.....	12
11.2.3.2	KLASIFIKACIJA STENSKIH MASA ZA PROJEKTOVANJE TUNELA PREMA AUSTRIJSKOM SISTEMU – ÖGG.....	12
11.2.3.2.1	Opšte.....	12
11.2.3.2.2	Faza 1 – Planiranje.....	13
11.2.3.2.3	Faza 2 – Izvođenje gradnje.....	24
11.2.3.2.4	Upravljanje geotehničkim rizicima.....	28
<b>11.2.4</b>	<b>PODZEMNI ISKOPI.....</b>	<b>30</b>
11.2.4.1	OPŠTE.....	30
11.2.4.2	MATRICA.....	30
11.2.4.3	RAZUMEVANJE MATRICE.....	35
11.2.4.3.1	Važenje potpornog tipa.....	35
11.2.4.3.2	Određivanje parametara napredovanja tokom iskopavanja.....	35
11.2.4.3.3	Određivanje cena za netenderske potporne tipe.....	36
11.2.4.3.4	Linije za obračunavanje iskopavanja i potpornih elemenata.....	37
11.2.4.3.5	Troškovi i vreme gradnje.....	39
<b>11.2.5</b>	<b>METODE ISKOPAVANJA.....</b>	<b>40</b>
11.2.5.1	OPŠTE.....	40
11.2.5.2	METODE GRADNJE TUNELA.....	40
11.2.5.3	KONVENCIONALNE METODE GRADNJE TUNELA.....	41
11.2.5.4	NAČELA KONVENCIONALNE METODE GRADNJE TUNELA.....	41
11.2.5.5	OBLIKA PREČNEGA PRESEKA.....	42
11.2.5.6	PLANIRANJE METODE ISKOPA TUNELA.....	43
11.2.5.6.1	Otvoreni sistem iskopa.....	43
11.2.5.6.2	Mašine za bušenje tunela u celokupnom profilu tunela.....	49
<b>11.2.1</b>	<b>PRAĆENJE GASOVA.....</b>	<b>51</b>
11.2.5.7	VENTILACIONI SISTEM ZA VRIJEME IZGRADNJE.....	51
11.2.5.8	VENTILACIJA GRADILIŠTA.....	52



### 11.2.1 OPŠTA NAPOMENA

Referentni normativi, Terminologija, Upotrebene skraćenice su date u odeljku u **11.1 Opšta smernici za projektovanje tunela.**

- privremeni geološki izvještaj uz privremeni geološki model,
- geofizičko istraživanje,
- istraživačko bušenje,
- istraživački potkopi i okna,
- uzorkovanje i ispitivanje »in-situ«,
- laboratorijsko ispitivanje,
- finalni geološki i geotehnički izvještaj.

### 11.2.2 ISPITIVANJE TLA

#### 11.2.2.1 Uvod

Studije o trasama već su napravljene, a odluka o lokaciji tunela već je skoro pa definitivna. Poglavlje o ispitivanju zemljišta stoga neće pokrivati radove na geološkim ispitivanjima tokom izvođenja, te studije odbira trase.

##### 11.2.2.1.1 Svrha

Cilj geoloških istraživanja na gradilištu je određivanje raspodele različitih vrsta tla i stena na području na kome su predviđeni radovi na izgradnji tunela, kao i njihovih relevantnih fizičkih i hemijskih osobina. Nije dovoljno samo prepoznati slojeve prema stratigrafičkoj terminologiji, nego tla i stene treba da budu opisane prema mehaničkim osobinama i njihovom očekivanom kratkoročnom i dugoročnom ponašanju u vezi sa konstrukcijom.

Glavni ciljevi istraživanja zemljišta za tunele su:

- razvoj trodimenzionalnog geološkog modela područja kroz koje će se probušiti tunel, uključujući i sve relevantne detalje o hidrogeološkoj situaciji,
- definisanje fizičkih karakteristika geoloških materijala kroz koje će se izvoditi tunel na osnovu kojih se može ustanoviti geotehnički model, uključujući i pribavljanje određenih konstrukcionih parametara stena i tla.

#### *Koraci i metode istraživanja*

U zavisnosti od vrste, veličine i stanja projekta moraju da se provedu specifična istraživanja. Tipični koraci kompletnog programa istraživanja za projekt izgradnje tunela su redom:

- proučavanje i procena raspoložive literature i dokumenata,
- interpretacija aero-fotografskih snimaka područja,
- geološko i hidrogeološko kartiranje,
- iskopavanje i beženje istraživačkih rovova,

#### 11.2.2.2 Preliminarna studija

##### 11.2.2.2.1 Uredska studija

###### 11.2.2.2.1.1 Pregled literature

Pre terenskog rada treba da se izvrši opsežan pregled informacija o geologiji, podzemnim vodama, seizmičkoj prošlosti, postojanju geoloških struktura na području projektovanja. U urbanim područjima važno je i detaljno poznavanje istorije lokacije jer tako mogu da se otkriju stara odlagališta otpada ili promene u predlošcima drenaže, koji bi mogli da utiču na projekt. Od posebne koristi mogu da budu geološke karte i karte zemljišta.

###### 11.2.2.2.1.2 Interpretacija aero-fotografskih snimaka

Razne tehnike mogu da se koriste prilikom izviđanja terena iz vazduha, kao što su vertikalna, oštrokutna, fotografija u boji i infracrvena fotografija, ali i bočni radar. Detaljna interpretacija aerofotografija zahteva usluge specijaliste. Mogu da se čitljivo prepoznaju mnoge relevantne pojave, poput: topografije, predloška drenaže, vegetacije, upotrebe zemljišta, potencijalne sirovine za građevinke materijale, klizišta i područja raseda.

Da bi snimci iz vazduha mogli da se upotrebe moraju se znaju razmera, orijentacija stena, geografska orijentacija (kompas) i datum fotografisanja; fotografije je najbolje proučavati kao vertikalne stereoskopske parove gledano u reflektovanom svetlu pomoću stereoskopa.

##### 11.2.2.2.2 Terenska studija

###### 11.2.2.2.2.1 Geološko kartiranje i studije površinskih stena

Geološko kartiranje je najvažniji korak istraživanja zemljišta, koji će kasnije da dovede do ekonomičnog korišćenja skupljih istraživačkih metoda kao što su geofizičke studije i istraživačko bušenje. Geološko kartiranje (razmera 1:5000, 1:2000 ili čak

1:1000) fokusira se prevashodno na geološke potrebe gradnje. Ono treba da pokrije relevantna geološka, petrografska, hidrogeološka i građevinska geološka obeležja, kao što su:

- raspodela vrsti tla i stena uz jasnu identifikaciju površinskih stena,
- oznaka preseka i dubine uležištenja, škrljavost, glavne spojne tačke i klizanja, strukturni detalji u skladu sa ISRM klasifikacijom,
- indikacija područja sa intenzivnim naborima i/ili pukotinama,
- indikacija raseda i rasednih područja,
- indikacija područja sa intenzivnim uticajem vremenskih prilika na hemijske i mehaničke procese u stenama,
- hidrogeološka obeležja kao što su izvori sa indikacijom temperature vode, kvantitet, električna provodljivost, lokacija prokopa, močvara, odvodnih jama, itd.,
- geološke opasnosti, kao što su nestabilni obronci, područja sa značajnim ulegnućima, emanacija gasova, vruće/mineralizovane (korozivne) vode, izbočine, karstični fenomen, seizmički aktivna područja raseda, itd.

Geološko kartiranje ne treba da bude vršeno samo uz bližem području budućeg tunela, već treba da bude izvršeno u obimu dovoljno velikom da se spoznaju svi relevantni faktori. Ono treba da uključi detaljne studije područja ulaza, kao i geološki opasne zone, kao što su velika pomeranja ili veliki rasedi koji mogu da utiču na trasu budućeg tunela.

#### 11.2.2.2.2 Istraživački iskopi

Iskopi i jame, koji su napravljeni tokom terenskog kartiranja, najčešće su najjeftiniji i najbrži način ispitivanja mekih prirodnih naslaga, zemljanih slojeva iznad vodenih bazena ili otkrivanja stenovite osnove. Posebno su korisni kada je tlo promjenljivo ili ako nedostaje prirodnih površinskih stena. Često su vrlo korisni kao izvor strukturalnih podataka (stepen napuklosti, smer i karakteristike diskontinuiteta, trajanje diskontinuiteta, itd.).

Mogu da budu iskopani pomoću mehaničkog kopača, ako je omogućen pristup, ili pomoću lopata odn. ašova. Njihova veličina može da varira od jednog do pet metara u dubinu, a širina može da im bude odabrana u skladu sa lokalnim uslovima. Geolog mora da ih ubeži, a za vreme i nakon iskopavanja potrebno je nadgledati stabilnost njihovih zidova.

#### 11.2.2.2.3 Privremeni geološki izveštaji

Potrebno je napraviti geološke podužne i poprečne preseke, te horizontalne preseke zasnovane na rezultatima kartiranja, uključujući i studije istraživačkih iskopa, kao i na rezultatima uredskih studija. Takvi preseki treba da uključuju sve relevantne strukturne podatke, kao i litološke i tektonske granice i očekivane hidrogeološke uslove.

U ovom trenutku se ustanovljava privremeni geološki model. Model treba da prikaže sva područja od posebnog značaja u vezi sa geološkom situacijom, kao i da omogući granice zona koje će se tretirati homogeno sa stanovišta strukturne geologije, litologije, hidrogeologije, geoloških opasnosti itd.

Privremeni geološki model je osnova za planiranje bilo kakvog budućeg istraživačkog rada. Sledeći koraci u istraživanju (većinom geofizička istraživanja i bušotinska istraživanja, mogući probni iskopi, probni prilazni potkopi itd.) treba da budu navedeni sa stanovišta ciljeva istraživanja i predloženih metoda istraživanja. Program je deo privremenog geološkog izveštaja i treba da bude prosleđen naručiocu koji treba da ga odobri.

### 11.2.2.3 Detaljna studija

#### 11.2.2.3.1 Geofizičko istraživanje

##### 11.2.2.3.1.1 Opšte

Geofizičke metode daju rezultate u obliku lokalne raspodele specifičnih fizičkih parametara (kao što su seizmičke brzine, magnetno polje, gravitacione anomalije, električni otpor, električna provodljivost, gama zračenje, protok toplote itd.). Njihova primena treba da bude pažljivo planirana u saradnji sa inženjerskim geologom, a privremene rezultate zajednički tumače geofizičar, geolog i hidrogeolog. U svakom slučaju, finalna geološka interpretacija geofizičkih podataka treba da bude sprovedena na kraju istraživanja kada su raspoloživi svi rezultati svih istraživačkih metoda (geološko kartiranje, površinske studije, iskopavanje istraživačkih iskopa, istraživačko bušenje, istraživački prilazi).

Tipične primene geofizičkih istraživanja za ispitivanje zemljišta prilikom gradnje tunela su:

- pomoć pri izviđanju geoloških (tektonskih) struktura, uključujući njihovu trodimenzionalnu konfiguraciju (uglavnom

- prema seizmičkim, geoelektričnim, mikrogravimetrijskim i/ili geotermalnim studijama, kao i prema elektromagnetskom kartiranju),
- pomoć pri interpretaciji hidrogeoloških uslova,
  - seizmičke studije,
  - određivanje dinamičnih parametara stenske mase,
  - studije o vibracijama i njihovo praćenje za vreme gradnje tunela,
  - studije o izvorima građevinskih materijala,
  - za izviđanje geoloških struktura korisno je ispitivanje primenom geofizičkih metoda,
  - litološke granice unutar materijala iznad tunela,
  - granice između pokrivnih zemljanih tla i stenovite osnove,
  - litološke granice unutar stenovite osnove
  - tektonske pojave poput raseda i rasednih područja,
  - dubina pužućih i klizajućih masiva.

Informacije o raspodeli brzina P - talasa (longitudinalni talasi) važne su za utvrđivanje kvalitativnih dinamičnih karakteristika i mogu da pomognu u proceni stepena frakturacije stenske mase. Merenja brzine P i S (smicajni talasi) talasa koriste se za određivanje dinamičnih parametara (Jangov modul elastičnosti, moduli smicanja, moduli sabijanja i Poasonov odnos). Adekvatno planiran program seizmičkih istraživanja može da pomogne u izradi trodimenzionalnoga modela raspodele dinamičnih karakteristika tla.

#### 11.2.2.3.1.2 Seizmička istraživanja

Seizmička istraživanja daju važne geofizičke podatke o kvalitetu zemljišta/tla i predstavljaju osnovne geofizičke metode koje pomažu pri rešavanju geotehničkih problema. Za inženjerske svrhe najčešće se koriste sledeće seizmičke tehnike: istraživanje refrakcije, istraživanje površinske refleksije (površinske tehnike), seizmička ispitivanja niz bušotinu, uz bušotinu, između bušotina i seizmička tomografija (merenje u bušotinama i između njih). Uobičajena oprema koja se koristi za seizmička istraživanja sastoji se od: izvora seizmičkih talasa (malj, slobodni pad mase ili ubrzanja mase, eksplozivi), detektora seizmičnih talasa (geofon), uređaja za beleženje (seizmografi), koji omogućavaju beleženje seizmičkih signala u odabranim vremenskim intervalima. Najčešće korišćeni seizmografi imaju 24 registraciona kanala (postoje i oni sa 12 ili 48 kanala). Svaki od kanala predstavlja pojedinačnu mernu tačku (geofon), koje su smeštene duž seizmičke linije (profila).

Dalje, seizmička istraživanja daju podatke za procenu dinamičkih karakteristika tla. Merenja refrakcije daju pri poznatoj geometriji i vremenu trajanje seizmičkih talasa podatke o odnosu dubine tla (seizmičke granice) i seizmičkih brzina. Merenja refrakcije mogu da budu ocenjena kao ispravna samo u slučaju kada se seizmička brzina povećava (raste) sa povećanjem dubine. U slučaju da se brzina povećava obrnuto proporcionalno (tj. seizmičke brzine nižih slojeva su manje od brzina viših slojeva), vrlo je verovatno će izračunavanje dubine biti netačno. Snimanje refleksije je korisno u strukturno-tektonskim procenama, ali zahteva vreme za izvođenje terenskih radova i stoga se ne primenjuje kao rutinsko merenje u inženjerske svrhe.

#### 11.2.2.3.1.3 Geoelektrično istraživanje

Geoelektrična istraživanja obično daju dodatne informacije o seizmičkim istraživanjima. U inženjerske svrhe najčešće se koriste sledeće tehnike merenja otpornosti: geoelektrično dubinsko sondiranje, geoelektrično kartiranje i geoelektrična tomografija. Pomoću geoelektričnih metoda definišu se slojevi na osnovu njihove električne otpornosti. Kvalitet uglavnom zavisi od postojanja i kvantiteta glinovitih minerala i vode u tlu.

Rezultat geoelektričnog dubinskog sondiranja je lista pojedinačnih merenja koja predstavljaju vertikalnu sliku individualne električne otpornosti svakog sloja i stoga omogućava određivanje modela tla koji se zasniva na otpornosti, odnosno dubini.

Geoelektrično kartiranje daje informacije o kvalitativnim horizontalnim i vertikalnim promenama električne otpornosti. Električna tomografija daje kontinuirane podatke koji su kombinacija geoelektričnog dubinskog sondiranja i kartiranja. Metoda je primerena za određivanje orijentacija glavnih diskontinuiteta (raseda), kao i granica između različitih litoloških slojeva, a naročito za određivanje glinenih slojeva.

#### 11.2.2.3.1.4 Elektromagnetno istraživanje

Elektromagnetna istraživanja daju podatke o električnoj provodljivosti tla. Osnovni delovi merne opreme su predajne i prijemne zavojnice. Obe ne moraju da budu u direktnom kontaktu sa tlom za vreme merenja. Elektromagnetno polje generiše se pomoću predajne zavojnice, dok prijemna zavojnica meri sekundarno elektromagnetsko polje. U inženjerske svrhe koriste se u

zavisnosti od frekvencije elektromagnetnim talasa, različite merne tehnike, kao što su georadar, merenje slabe elektromagnetne indukcije, itd.

Merenja mogu da se izvrše brzo i jednostavno, a obično su vrlo efikasna u određivanju relativno plitkih geometrijskih granica različitih geoloških materijala. Zbog nesigurnosti u interpretaciji, treba jih primenjivati u kombinaciji sa drugim istraživačkim merenjima.

#### 11.2.2.3.1.5 Geofizički karotaž bušotina

Geofizički karotaž bušotina je izraz za geofizička merenja u bušotinama. U inženjerske svrhe najčešće se koriste sledeće metode: gama-gama snimanje kod neprekidnih merenja gustine materijala, neutron-neutron snimanje kod neprekidnih procena poroznosti, merenja prečnika bušotina (da bi se dobile geomehaničke informacije o konfiguraciji zida bušotina), merenje električnim snimanjem kao i snimanje prirodne radioaktivnosti (za određivanje litoloških granica), kao i merenje temperature u bušotini. Merenja temperature pomažu pri proceni protoka podzemnih voda i stepena napuklosti stenskog masiva.

#### 11.2.2.3.2 Istraživačko bušenje

##### 11.2.2.3.2.1 Opšte

Istraživačko bušenje je glavni izvor direktnih informacija o uslovima koji vladaju na dubini tla većoj od 5 metara ispod površine, a to je obično i maksimalna dubina istraživačkim iskopa. Istraživačke bušotine daju nam podatke o tlu i njegovim varijacijama, o njegovim fizičkim karakteristikama i hidrogeološkim uslovima i omogućavaju uzimanje uzoraka, poremećenih i neporemećenih, za kasnije korišćenje u laboratorijskim testovima.

Jednom kada je ustanovljen plan programa bušenja, moraju da se pripreme tehnički uslovi za rad. Ti uslovi treba da uzmu u obzir različite namene istraživačkih bušotina – geološku, hidrogeološku i/ili uzorkovanje gasova, bušotinska testiranja u tlu i stenama i instalacije za praćenje stabilnosti, kao što su inklinometri, ekstenzometri i oprema za praćenje podzemnih voda.

Svi izvađeni uzorci treba da budu pažljivo odloženi u odgovarajuće kutije (npr. drvene sanduke obložene plastikom kako bi se sprečilo sušenje uzorka) i pravilno označeni podaci o mestu bušenja, bušotini, dubini

bušotine, itd... Sanduci sa uzorcima treba da budu odloženi na suvo i čisto mesto kako bi mogli da budu korišćeni za inspekciju u bilo koje doba i to sve dok izgradnja tunela ne bude završena. Upisivanje izbušenih uzoraka treba da se izvrši odmah nakon vađenja kako bi mogla da se prouče obeležja koja imaju dok su sveže izvađeni (originalna vlažnost, boja, čvrstoća, itd.). Nakon vađenja svakog uzorka bušotine, uzorci u sanduku treba da budu fotografisani filmom u boji, označeni prema odgovarajućoj bušotini i dubinskim intervalima.

Uspeh programa bušenja (uzorkovanje i terensko ispitivanje) zavisi od kvaliteta praćenja tokom operacije bušenja. Za tehničke aspekte programa bušenja treba da budu odgovorni iskusni i dobro obučeni stručnjaci.

##### 11.2.2.3.2.2 Bušenje u zemljanom tlu

Koriste se različite metode - u zavisnosti od vrste tla, gledano sa aspekta veličina zrna, gustine ili postojanosti, kao i stanja podzemnih voda.

Mokro i rotaciono bušenje su uobičajene metode koje se primenjuju u uglavnom fino zrnastom tlu (glinasto, muljevito, peskovito). Stabilizacija bušotina, koja je obično potrebna ispod nivoa podzemne vode ili u nekohezivnom tlu, vrši se ili sredstvom za ispiranje (muljevita smesa tla i vode sa dodatkom gline) ili pomoću umetnute cevi. Upotreba bušenja svrdlom, koje se koristi u slučaju bušenja stabilnih bušotina iznad nivoa podzemnih voda ili u visokoplastičnom tlu, često je ograničeno zadatom dužinom bušenja.

Perkusiono bušenje je uobičajen metod bušenja u krupno zrnastom tlu. Glinena masa ili obložna cev su obavezni.

Bušenje i uzorkovanje u tlu većih veličina zrna (krupan šljunak, obla i blokasta tla) može da bude prilično otežano. Stoga može da se primeni oprema za bušenje stena pomoću cevi ili oprema za bušenje velikoga prečnika sa izbušenim kalupom.

##### 11.2.2.3.2.3 Bušenje u stenama

Najčešća metoda bušenja u stenama je rotaciono bušenje. Sredstvo za ispiranje obično je voda, ali tamo gde mora da se izbegne erozija, može da se primeni vazdušni mlaz. Međutim, vazduh nije efikasan kao voda za hlađenje i vlaženje svrdla. U nestabilnom tlu obično se koriste



zaštitne cevi da bi se obezbedila stabilnost bušotine, a standardne dimenzije su utvrđene za prolaz rotirajućih šupljih svrdala unutar zaštitnih cevi. Kao alternativno sredstvo za ispiranje, može se koristiti isplačne suspenzije koji ako ima pravilan sastav sprečava da se rupa uruši. Najčešće su bušotine vertikalne. U posebnim prilikama potrebne su horizontalne ili nakošene bušotine.

Destruktivno bušenje, tj. perkusiono bušenje, koristi se kao sredstvo geološkog istraživanja samo pri posebnim uslovima. Na primer, ako postoji potreba da se odredi granica između mekih i tvrdih materijala. Rezultati su samo kvalitativni, ali je izvođenje brzo i jeftino.

#### 11.2.2.3.3 Istraživački prilazi, šahtovi i tuneli

Istraživački prilazi i šahtovi omogućavaju direktan pristup masivu u kojem će tunnel biti iskopan. Poprečni preseći istraživačkih potkopa, koji mogu da prolaze kroz delove ili čak celu trasu budućeg tunela, ne bi trebalo da budu manji od 2 puta 2 metra.

Pomoću njih mogu se da se izvrše detaljna građevinska geološka analiza, veliki opseg in-situ mehaničkih testova, testovi efikasnosti različitih tipova sistema podupiranja i metoda iskopavanja. Ciljevi mogu da budu nadzor podzemnih voda, uzorkovanje i drenaža i praćenje stanja gasova. Može da se izvrši i priprema deonica sa problematičnim tlom. Takođe, omogućavaju ponuđačima uvid u stanje stena na licu mesta, što je od koristi za davanje ponuda.

#### 11.2.2.3.4 Uzorkovanje

##### 11.2.2.3.4.1 Poremećeni uzorci

Poremećeni uzorci služe prvenstveno za identifikaciju tla. Uzimaju se iz perkusionih i rotacionih mokrih bušotina ili materijala izvađenih iz čaure i/ili svrdla. Kvalitet takvih uzoraka zavisi od metoda bušenja.

Ako se bušenje izvodi vodenom isplakom, može da dođe do gubitka finih zrna ili ako je brzina toka isplake neodgovarajuća, krupniji materijal može da pade unazad do svrdla i drobi se u finiji materijal. Grubi uzorci sa površine ili iz iskopa se takođe smatraju poremećenim uzorcima.

Uzorci uzeti višedelnom kašikom mogu da se koriste za klasifikacije i utvrđivanje jedinične težine. U opštem slučaju oni se primenjuju za tla finija od šljunka.

Metod uzorkovanja mora da bude naveden u izvještaju. Uzorci se obično odlažu u vakumirane metalne ili staklene posude ili u torbe i označavaju se na određeni način.

Uzorci izvađeni iz sržne cevi i kontinuirano poremećeni uzorci odlažu se pravilnim redosledom u drvene i metalne kutije za uzroke, na kojima su gornje i donje dubine svakog bušenja jasno naznačene. Odabrani delovi uzorka mogu da se urone u tečni vosak ili parafin kako bi se sačuvala vlažnost sadržaja. Kod uzoraka stena koje su podložne trošenju, treba da se snime fotografije u boji odabranih svežih uzoraka.

##### 11.2.2.3.4.2 Neporemećeni uzorci

Korišćenjem uzorkovanja pomoću cilindra sa tankim zidom neporemećeni uzorci mogu da se sačuvaju od mekih i krutih kohezivnih uzoraka pri dimenzijama od 50 do 150 mm u prečniku, odnosno 600 do 750 mm dužine. Veličina uzorka zavisi od primerka koji će biti testiran. Za uzorke sa manjim prečnikom, mora da se uzme u obzir veći odnos ivičnih smetnji (promena originalnih uslova kao što je čvrstoća itd., na spoljašnjoj ivici uzorka). Na odabranim dubinama za vreme operacije bušenja ili sa dna istraživačkih iskopa ili prilaza, cevi za uzorkovanje pritiskaju se pomoću pneumatski ili hidraulički primenjene sile. Nije prihvatljiva upotreba pogonske sile.

Uobičajeni tipovi uzorkivača su Šelbijeva cev i uzorkivač sa pridržanim klipom. Šelbijeva cev je otvoreni uzorkivač koji se primenjuje za čvrsto i kruto tlo. Cev uzorkivača sa pridržanim klipom sadrži klip koji se pokreće šipkom koja prolazi kroz unutrašnjost šipke za bušenje. Napredniji uzorkivači sa klipom (npr. Osterbergov tip) pokreću se pomoću hidrauličke. Klip sprečava zemlju da uđe u cev i kontaminira uzorak sve dok nije dosegnuta željena dubina uzorkovanja. Stvara i vakuum koji drži uzorak. Uzorkivači sa klipom koriste od vrlo mekog do čvrstog tla.

U vrlo krutom i tvrdom tlu neporemećeni uzorci mogu da se uzimaju slično pri procesima koje u steni vrši dvocevni (Denison) uzorkivač. On se sastoji se od rotirajućeg spoljašnjeg cilindra i reznog svrdla, koje sadrži fiksiran unutrašnji cilindar pričvršćen na rezni prsten. Zbog tvrdoće tla, rezni prsten može da se pokreće u nastavku za rezanje.

Neporemećeni uzorci stena dobivaju se bušenjem tla rotacionom sržnom cevi. Uzorak tla skuplja se u cilindru koji je odmah iza svrdla. Jednocevni cilindri su primjenjivi

samo u tvrdim homogenim stenama. U opštem dvocevne i trocevne sržne cevi daju mnogo bolje rezultate, pa su zato i poželjnije. Na raspolaganju su i dvocevne sržne cevi sa stacionarnom unutrašnjom cevom, i orijentiranom cevom za uzorak. Poslednja spomenuta sržna cev omogućava orijentaciju izvađenog stenskog uzorka.

Uzorci tla izvađeni iz bubnja i kontinuirani poremećeni uzorci odlažu se u drvene ili metalne sanduke, sa jasno naznačenom gornjom i donjom dubinom svakoga iskopa. Odabrani delovi tla mogu da budu uronjeni u tečni vosak ili parafin da bi se sačuvao sadržaj vlage. Kod stenskih uzoraka koji su podložni kvarenju, treba snimiti fotografije u boji odabranih svežih uzoraka.

#### 11.2.2.3.5 In-situ ispitivanja

In situ ispitivanja u steni vrši se da bi se odredile karakteristike stenske mase. Ovo pomaže u pretvaranju rezultata koji su dobijeni u laboratorijskim testovima na (malim) uzorcima stena.

##### 11.2.2.3.5.1 Ispitivanje standardnom penetracijom (SPT)

Primena SPT-a je ograničena na tla kojima nedostaje šljunka i kamenja. Poremećeni uzorci mogu da se izvade pomoću uzorkivača sa višedelnim bubnjem, koji se zabija u tlo pomoću čekića. Broj udaraca za penetraciju od 30 cm, indikator je konačnog otpora i trenja proboja, pa time i tvrdoće ili gustine tla. Ovo je vrlo uobičajen test, zato što ima široku primenu i postoje različite empirijske korelacije sa drugim parametrima tla.

##### 11.2.2.3.5.2 Ispitivanje čvrstoće smicanja krilnom sondom

Korisno u vrlo mekanom tlu, u kome je teško sačuvati dobar kvalitet neporemećenih uzoraka. Ne sme da se koristi u tvrdom glinastom ili tlu koje sadrži šljunak.

##### 11.2.2.3.5.3 Ispitivanje opteretnom pločom

Meri karakteristike deformacije materijala in-situ i dozvoljava procenu njegove čvrstoće i nosivosti.

##### 11.2.2.3.5.4 Presiometrijska i dilatometrijska testiranja

Karakteristike deformacije materijala (tlo i meka stena) mogu da se istražuju in-situ pomoću presiometra. Kod ovog tipa instrumenta, deformacija tla meri se na

osnovu promene zapremine ćelije pri promenljivom pritisku gasa. Korisni opseg metode ograničen je na materijale sa modulima deformacije (tangentni ili sekantni moduli) koji su manji od 3,5 GPa zbog preciznosti kojom mogu da izmere promene.

U slučaju anizotropnih uslova u tvrdom kamenu, preporučuje se upotreba sonde dilatometra umesto presiometra.

##### 11.2.2.3.5.5 Testiranja vazдушnim jastukom

Stanje koje postoji u zemljinoj kori menja se usled građevinskih radova koji stvaraju novu distribuciju indukovanih napona unutar okružujuće stenske mase. Ovo novo stanje može da dovede do porasta koncentracije napona, što može da ima veliki uticaj na stabilnost podzemnog iskopavanja.

Vazdušni jastuci su hidraulične ćelije pritiska koje se koriste da bi se izmerio napon u kamenoj masi. Vazdušni jastuk se obično smešta unutar useka u kamenom zidu sa ciljem da se stenska masa na tom delu oslobodi naprežanja iz okoline. Naponi u dvoosnom polju mogu da se mere urezivanjem dva useka pod pravim uglom. Postojeći napon može da se izmeri povezivanjem sa naponima za koje su poznati moduli deformacije ili tako da se vrši pritisak dok se stena ne napregne nazad u svoj približno izvorni oblik pri čemu se polazi od pretpostavke da je pritisak potreban da se stena vrati u svoj izvorni oblik ekvivalentan naponu koja ji oslobođen prilikom eliminisanja okolnog medijuma. Ovi testovi koriste se samo u slučajevima kada se očekuje pojava neobično visokih napona ili asimetričnih napona. Razlog zašto se ovi testovi ne primenjuju kao rutinski su relativno visoki troškovi i relativno dugo vreme koje potrebno za njihovu pravilnu primenu.

##### 11.2.2.3.5.6 Ostala testiranja napona i naprežanja u stenskim masivima

Svi uobičajeni metodi in-situ merenja napona u stenskoj masi pretpostavljaju da je oslobađanje napona u stennoj masi elastično-reverzibilan proces.

Tehnika overcoringa meri oporavak od deformacije u stenskoj masi pomoću električnog ili fotoelastičnog instrumenta. Takav merač napona postavlja se u bušotinu malog prečnika. Izolovan je od postojećeg polja napona zato što se oko njega buši rupa širokog prečnika.

»Door-stopper« organizacije Csiro je deformaciona ćelija za merenje napona u bušotini i može da se koristi u 60 milimetarskim bušotinama. Opremljena tako da omogućava merenje napona u vertikalnom i horizontalnom položaju, kao i u pravcima pod uglom od 45 stepeni.

Ispitivanja hidrauličnim lomom funkcionišu kao merenja promene napona. Ispitivanja se sprovode tako što se sekcija bušotine izoluje pneumatskim zaptivačem, na određenoj dubini. Zatim se postepeno povećava pritisak fluida na odabranoj sekciji sve dok okolna stenska masa ne počne da puca. Proces pucanja na određenom nivou pritiska je povezan sa in-situ stanjem napona u stenskoj masi.

Međutim, kao što je i navedeno gore, ovakva merenja nisu neophodan deo rutinskih programa istraživanja tla.

#### 11.2.2.3.5.7 Ispitivanja propustljivosti (uglavnom zemljanog tla)

Terenska ispitivanja propustljivosti uobičajeno se sprovode tokom izvođenja bušenja na određenim dubinskim intervalima u bušotini. Poželjan metod ispitivanja je promenjivim pritiskom, kako opadajućim tako i rastućim.

Da bi se definisalo područje ulaza, potrebna je cev koja se tesno ubacuje uz zid bušotine. U najjednostavnijem obliku, dno bušotine se očisti i ispitivanje se sprovodi merenjem protoka kroz otvoreni završetak cevi (test otvorenog završetka). Ovo ispitivanje može da se izvede prilično brzo, ali treba da se koristi samo kao kvalitativni pokazatelj. Za tačnija merenja potrebno je da se izvrši ispitivanje na određenoj dužini (oko 1 metar). Zbog nestabilnosti područja koje se ispituje potrebno je da se postavi druga cev sa sitom i nepropusno pričvrsti na prvu cev. Sito je okruženo granulacionim filterom kako bi se sprečila erozija tla. Bušotina iznad filtera treba da se zabrtvi.

Merenjem promene nivoa vode sa vremenom može da se utvrdi propustljivost. Grafikon promene pritiska u vremenskom semilogaritamskom prikazu, predstavlja pravu liniju. Objavljene su brojne formule, delom empirijske. Ona sa najširokom primjenom je Hvorslijeva.

#### 11.2.2.3.5.8 Ispitivanja pumpanjem (uglavnom tla)

Propustljivost je karakteristika tla koja se najviše menja. Posebna pažnja treba da se posveti minimiziranju grešaka tokom ispitivanja propustljivosti kao i pri proceni i ekstrapolaciji rezultata u odnosu na pravo stanje u tlu. Stoga u posebno osetljivim slučajevima treba da se sprovede ispitivanje pumpanjem.

Iz njega mogu da se dobiju sledeće informacije:

- prenosivost (i permeabilnost),
- koeficijent skladištenja,
- izdašnost izvora,
- odnos postojeće vodene ploče u izvoru i brzine pumpanja
- poluprečnik uticaja,
- nagib krive oticanja.

Principijelno, ispitivanje pumpanjem podrazumeva pumpanje pri konstantnom protoku iz izvora i praćenje efekta oticanja na nivou podzemnih voda pomoću piezometra na određenoj udaljenosti od izvora.

Ispitivanje pumpanjem zahteva pravilno postavljanje izvora za pumpanje i nekoliko nizova piezometara. Ostala oprema koja je potrebna za ispitivanje su pumpa i njeno napajanje i otpusna slavina, vodeni rezervoar, aparat za merenje protoka, hronometar, sonde za merenje vodenih ploča u izvoru i piezometar. Za merenja sleganja može da bude potreban instrument za nivelisanje.

Raspored na mestu ispitivanje kao i sva oprema treba da budu zasnovani na rezultatima preliminarnih ispitivanja. Pre ispitivanja treba da bude izvršeno istraživanje kako bi se otkrio neki drugi eventualni izvor uticaja na podzemne vode, npr. postojeći bunari, reke, ribnjaci, plimni efekti, itd.

Pun program ispitivanja sastoji se od kratkoročnih ispitivanja pumpanjem u nestacionarnim uslovima, etapna ispitivanja pumpanjem i dugoročnih ispitivanja pumpanjem. Kao dodatak, treba da se prate i mogućnosti oporavka.

#### 11.2.2.3.5.9 Ispitivanja vodom pod pritiskom u bušotinama (uglavnom u kamenim masivima)

Za merenje lokalne in-situ propustljivosti stenske mase koriste se testovi sa jednim ili dvostrukim pakerom. Testovi sa jednim pakerom ograničavaju rizik od nekontrolisanih gubitaka vode. Razmeštaj

pakera zavisi od uslova u stenskoj masi, o čemu se odlučuje pažljivim upisivanjem stanja uzoraka bušenja.

Na određenim dubinama uvodi se pneumatski paker bušotine, zatim se voda potiskuje u spomenuto područje bušotine poznatog prečnika. Za vreme ispitivanja beleži se potrošnja vode i pritisak vode u ispitivanim sekcijama. Ovakva Lugeonova konfiguracija ispitivanja može da se primeni obično u pet rastućih ili padajućih koraka pritiska. Za svaki od tih koraka treba da se postigne konstantan nivo pritiska u trajanju od barem 5 minuta, uz stalno beženje potrošnje vode.

Interpretacija rezultata je zahtevna. Za vrednovanje se često upotrebljava formula koju predlaže United States Bureau of Reclamation - Earth Manual (1963):

$$k = \frac{Q}{2\pi LH_t} \log_e \left( \frac{L}{r} \right)$$

važi za  $L \geq 10 r$

- k = propustljivost, u m/s
- Q = celokupni konstantni protok
- p = dužina testne komore
- r = radius bušotine

#### 11.2.2.3.6 Laboratorijska ispitivanja

##### 11.2.2.3.6.1 Laboratorijsko ispitivanje tla

Procena parametara projekta i evaluacija ponašanja tla tokom izvođenja tunela tla u mnogome zavise od parametara tla koji će se dobiti laboratorijskim testovima. Potrebno je da budu poznati barem sledeći parametri:

- osnovne fizičke karakteristike, sadržaj vlage, jedinična težina, distribucija veličine zrna, specifična gravitacija i Aterbergove granice,
- čvrstoća smicanja pod dreniranim i nedreniranim uslovima, koja se određuje direktnim ispitivanjima čvrstoće smicanja jednoosnim i troosnim testovima kompresije,
- promena zapremine pod dreniranim i nedreniranim uslovima, koja se određuje jednoosnim i troosnim testovima, kao i edometarskim testovima,
- konsolidacija koja se određuje edometarskim testovima,
- propustljivost koja se određuje pomoću testova propustljivosti i edometarskim testovima,

- vodopropustnost koja se određuje edometrom ili posebnim metodama.

##### 11.2.2.3.6.2 Laboratorijska ispitivanja stena

Mehanička laboratorijska ispitivanja koja se izvode obično na izbušenim uzorcima, treba da daju barem sledeće parametre:

- suhu gustinu,
- prirodnu gustinu,
- jednoosnu pritisnu čvrstoću sa merenjem i bez merenja deformacije tokom testa,
- module deformacije,
- sekantne moduli,
- efektivnu čvrstoću smicanja,
- rezidualnu čvrstoću smicanja,
- čvrstoća izvlačenja,
- Poasonov odnos.

U zavisnosti od uslova ispitivanog tla naredni ciljevi laboratorijskog ispitivanja mogu da budu.:

- čvrstoća smicanja duž izrazitih diskontinuiteta,
- potencijal bubrenja/pritisak bubrenja,
- propustljivost,
- poroznost,
- otpornost na isušivanje,
- otpornost na smrzavanje/otapanje (otpornost na smrzavanje),
- Los Angđelos i/ili Deval ispitivanje.

Minerološka i petrografska istraživanja tipičnih uzoraka stena, tanki delovi za mikroskopsku analizu i rengensku analizu kamenog praha, uključujući i rajedne iskopine, već su uveliko izvedena za vreme geološkog kartiranja terena. Ta studija treba da bude kompletirana u ovoj fazi. Poseban naglasak treba da bude stavljen na inženjersko geološke aspekte stena, kao što su sposobnost bubrenja, higroskopnost, erozivnost, itd. Za abrazivnost i procene mogućnosti bušenja potrebno je da se izvrše kvantitativne minerološke analize i studije mikropukotina. Na određenim lokacijama mogu da budu potrebna i paleontološka istraživanja za određivanje starosti i radi očuvanja istorijskih područja.

##### 11.2.2.3.6.3 Finalni geološki i geotehnički izveštaj

Ovaj izveštaj treba da veoma detaljno prikaže sve stvarne podatke i da omogući jasno odvojenu interpretativnu analizu rezultata istraživanja.

Izveštaj uključuje i finalni geološki model prikazan u obliku plana, longitudinalnih, horizontalnih i poprečnih preseka, ali i pisani izveštaj koji naglašava sve inženjersko

geološke i hidrogeološke aspekte za projekt izgradnje tunela. Ovaj izvještaj je baza za klasifikaciju stenske mase i radove na geotehničkom projektu. Zato treba da pruži i finalni geotehnički model sa pripadajućim parametrima tla, stena i stenske mase, koji su potrebni za projekat.

Na kraju, treba da se navede da li postoji potreba za daljim istraživanjima, planovima za nadzor padina prema topografskim ispitivanjima, inklinometrima, ekstenzometrima, nadzorom podzemnih voda pomoću praćenja njihovog nivoa, nadzor pražnjenja količine vode, hemije vode itd.

### 11.2.3 KLASIFIKACIJA ZEMLJE I STENA

Podzemno iskopavanje je vrlo složeni opostupak, a teoretski alati koji pritom pomažu projektantu su skup jako pojednostavljenih modela nekih procesa koji su u interakciji sa kontrolom stabilnosti samog iskapanja. Čak je mnogo puta nemoguće da se i teoretski odredi interakcija tih procesa, pa je projektant primoran da donose projektantske odluke i sprovodi korake za koje je od velikog značaja njegova inženjerska procena u čemu veliku ulogu ima iskustvo stečeno u praksi.

Sa namerom da se u vezu dovedu vlastita iskustva sa uslovima koje su susretali drugi, tokom godina se razvio velik broj sistema klasifikacije. Baš kao i metode projektovanja, tako ni različiti sistemi klasifikacije nisu »kuvar« za konstrukciju tunela nekom neiskusnom korisniku, a kada se primenjuju to treba da se radi veoma oprezno. Ipak, većina sistema ima svoje prednosti i nesumnjivo iste unapređuje razumevanje uslova tla.

Dole opisani različiti sistemi klasifikacije razvijeni su u različite svrhama i iz različitih potreba, pa ih i treba razmatrati u skladu sa originalnim namerama.

Uopšteno postoje tri glavna tipa sistema klasifikacije:

- geološki, geotehnički opisi u kojima je standardizovan jedan ili više parametara,
- kvantitativni opisi značajnih parametara stenske mase koji mogu da se direktno ili indirektno koriste kao ulazni podatak za projektovanje,
- opisi kvalitativnog ponašanja stenske mase za vreme i nakon iskopavanja, uključujući i uticaj podupiranja.

Zapravo, ono što čini klasifikaciju stenskih masiva tako teškom je redosled važnosti značajnih parametara i njihovi međusobni uticaji, kao i poteškoće da se dobiju objektivni, umjesto subjektivnih ulaznih parametara.

#### 11.2.3.1 Pregled opštih sistema klasifikacije.

##### 11.2.3.1.1 Terzagijeva klasifikacija

Terzaghi je 1946. godine predložio sistem jednostavne klasifikacije stena da bi se procenilo opterećenje koje moraju da podnesu čelični lukovi u tunelima. Opisao je razne tipove tla i razradio razrede opterećenja stenske mase za različite uslove tla na osnovu svog iskustva u čeličnim lukovima poduprtim željezničkim tunelima u Alpima.

Treba naglasiti da je ova klasifikacija odgovarajuća za svrhu zbog koje je i razvijena, dakle za procenu opterećenja kamene mase za tunele sa čeličnom podgradom, i da nije odgovarajuća za modernu gradnju tunela pri kojoj se koriste mlazni beton, sidra, segmentne obloge, itd. Sistem uzima u obzir loše navike pri gradnji tunela koje omogućavaju formiranje područja otpuštanja i zanemaruje zahteve za pravilnu interakciju stenske mase i potpornog sistema kao i puni kontakt stena i potpornja. U slučaju pravilnih tehnika gradnje tunela, data opterećenja stenske mase previše su konzervativna, dok se u slučaju debelih naslaga zanemaruje uticaj naprezanja.

##### 11.2.3.1.2 Dirovo označavanje kvaliteta stena (RQD)

Dir je predložio kvantitativni indeks kvaliteta stenske mase koji se zaniva na vađenju uzorka tla nakon dijamantskog bušenja. Ovo označavanje kvaliteta stena (RQD) vrlo je široko rasprostranjeno, naročito u zemljama engleskog govornog područja.

RQD se definiše kao procenat izvađenih neoštećenih uzoraka tla većih od 100 mm po dužini tokom celog vađenja uzoraka.

Opšte prihvaćeno je da se RQD određuje na uzorku koji je veličine barem 50 mm (NX) u prečniku i koji je izbušen/izvađen pomoću opreme za dijamantsko bušenje koja ima dvostruku sržnu cev. Vrednost RQD bi obično trebalo da se određuje za hod bušenja, od recimo 2 metra. Ovo određivanje

je jednostavno i brzo čak i ako se izvodi u sprezi sa normalnim geološkim beženjem uzoraka, a veoma malo doprinosi troškovima istraživanja gradilišta.

Dir je predložio sledeću vezu između numeričke vrednosti RQD-a i građevinskog kvaliteta stenske mase:

RQD	kvalitet stene
< 25 %	vrlo loš
25 - 50 %	loš
50 - 75 %	solidan
75 - 90 %	dobar
90 - 100 %	vrlo dobar

Prilično je jasno da proizvoljno odabrana dužina dela uzorka sama ne može da pravilno opiše uslove stenske mase. Stoga, bez namere da se umanju vrednosti RQD-a kao brzog i jeftinog praktičnog indeksa, njime se ipak ne dobija adekvatna indikacija opsega predložaka ponašanja koji mogu da se susretnu prilikom podzemnih iskopavanja.

Da se izbegne pogreška zbog različite kvalitete bušenja, vrednovanje RQD može biti izvedeno i analizom TV snimka bušotine.

#### 11.2.3.1.3 Bjenjavskejeva klasifikacija

Geomehaničku klasifikaciju ili Sistem ocenjivanje masiva stena (RMR) razvio je 1973. godine Bjenjavski. Ova građevinarska klasifikacija stenskog masiva koristi sledećih šest parametara:

- jednoosna pritisna čvrstoća netaknutog stenskog materijala,
- označavanje kvaliteta stenske mase (RQD),
- razmještaj diskontinuiteta,
- stanje diskontinuiteta,
- stanje podzemnih voda,
- orijentacija diskontinuiteta (dip and strike).

Da bi se primenila geomehanička klasifikacija, stenska masa duž tunela podeljena je u brojna strukturna područja, npr. zone u kojima su određena geološka obeležja manje-više uniformna. Šest gore navedenih parametara klasifikacije određuju se za svaku zonu strukture iz terenskih merenja, a zatim se unose u standardni obrazac za unos podataka.

Pet prvih parametara podeljeno je u grupe od pet opsega vrednosti. Kako različiti parametri nisu isti za celokupnu klasifikaciju stenske mase, stepeni važnosti dodeljeni su različitim opsezima vrednosti parametara, tako da veći

stepen znači bolje uslove stene. Ovi stepeni određeni su na osnovi istorije 49 slučajeva (Bieniawski, 1976).

Nakon što se ustanove ocene parametara klasifikacije, sumiraju se ocene pet parametara što rezultira bazičnom ocenom stenske mase za posmatrano strukturno područje.

U ovoj fazi se uključuje i uticaj orijentacije diskontinuiteta prilagođavanjem osnovne procene stenske mase. Ovaj korak vrši se odvojeno zato što uticaj orijentacije diskontinuiteta zavisi od građevinske primene, npr. tunel (rudnik), kosina ili temelj. Treba napomenuti da vrednost parametra orijentacije diskontinuiteta nije data u kvantitativnom obliku nego pomoću kvalitativnog opisa.

Nakon prilagođavanja sa stanovišta orijentacije diskontinuiteta, stenska masa se klasifikuje dodelom finalnih (prilagođenih) ocena stenskog masiva (RMR) kao jedan od pet razreda stenske mase.

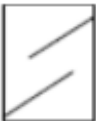
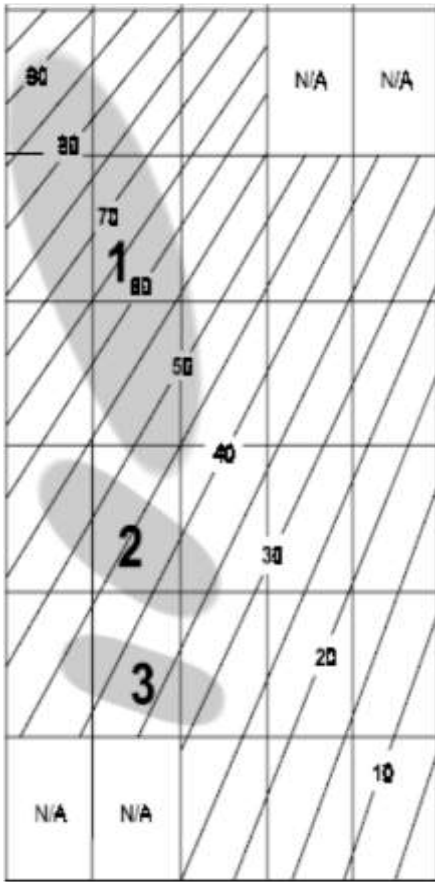
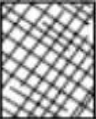




#### 11.2.3.1.4 Indeks geološke čvrstoće (GSI)

Za projekte podzemnih iskopavanja, potrebne su pouzdane procene karakteristika čvrstoće i deformacije stenske mase. Hoek i Braun su 1980. godine predložili metod, koji se zasniva na proceni međusobnih veza kamenih blokova i uslova površina između tih blokova. Važan doprinos spomenuta dva autora je u povezivanju jednačine sa geološkim opažanjima u obliku Bjenjavskejevog RMR-a.

Metod je nešto modifikovan tokom godina, sa posebnim naglaskom na masive stena lošeg kvaliteta. Primena metode zahtevala je razvijanje nove klasifikacije nazvane Indeks geološke čvrstoće – GSI, kao zamene za Bjenjavskejev RMR. Posljednja faza tog razvoja održava se u novoj GSI tabeli heterogenih slabih masiva stena, tj. flišnih sedimenta i tektonsko neporemećenih molasnih sedimenta. Osim toga, razvijen je i besplatan program za Windows nazvan "Rocklab" koji omogućava izračunavanja kohezije, frikcionog ugla i, konačno, modula deformacije stenske mase. Program se bazira na vezi između Hoek-Braunovog i Mor-Kulonovog kriterijuma.

Tabela 11.2.1: Primer matrice za određivanje GSI indeksa. Prikazan je primer homogene stenske mase (krečnjak). Za pojedinačne slučajeve treba koristiti odgovarajuće tabelle (npr. masivne stenske mase, heterogeni sedimenti – fliš, heterogeni sedimenti – molasa...)

### INDEKS GEOLOŠKE ČVRSTOĆE ZA ISPUCALE STENE – krečnjak (Hoek & Marinos, 2000)

<p>Na osnovu litološkog opisa, strukture i stanja površine sa stanovišta diskontinuiteta odaberite kolonu tabelle. Locirajte položaj kolone koja odgovara uslovima diskontinuiteta i ocenite prosečnu vrednost GSI. Ne pokušavajte da budete tačni. Realnije je da vrednost bude između 33 i 37, nego da se tvrdi da je GSI = 35. Uzmite u obzir da se kriterijum Hoek-Braun ne poziva na strukturno kontrolisano urušavanje. Tamo gde postoje nepovoljno orijentisani slabo povezani planarni diskontinuiteti, oni će uticati na ponašanje stenske mase. Čvrstoća nekih stenskih masa se smanjuje usled prisustva podzemnih voda, pa je dozvoljeno manje pomeranje udesno u koloni za umerene, loše i veoma loše uslove. Pritisak vode ne utiče na vrednost GSI i obrađuje se primenom analize efektivnog napona</p>	<p>STANJE POVRŠINSKOG SLOJA - DISKONTINUITET (preovlađujući površinski sloj)</p>	<p>VEOMA DOBRO – Veoma hrapave, sveže, nedeградirane površine</p>	<p>DOBRO – Hrapave, blago degradirane površine</p>	<p>UMERENO – Glatke, umereno degradirane i izmenjene površine</p>	<p>LOŠE – Veoma glatke, mestimično tekt. uglučane površine sa kompaktnom prevlakom / ispunom od uglastim fragmentima</p>	<p>VEOMA LOŠE – veoma glatke, tekt. uglučane / jako degrad. površine sa mekom glinastom prevlakom ili ispunama</p>
<p>SASTAV I STRUKTURA</p>		<p>UMANJENJE KVALITETA POVRŠINSKOG SLOJA → PUKOTINE</p>				
 <p>INTAKTNA ILI MASIVNA – intaktni uzorci stene ili masivne in situ stene sa nekoliko široko razmaknutih diskontinuiteta</p>						
 <p>BLOKOVNA – malo ispucala, neoštećena stenska masa kubnih blokova, ograničenih sa 3 sistema pukotina</p>						
 <p>JAKO BLOKOVNA – ispucala, delimično oštećena stenska masa sa višestranim nepravilnim blokovima koji su ograničeni sa 4 ili više sistema pukotina</p>						
 <p>BLOKOVNA/OŠTEĆENA/NABORANA – naborana i tektonski oštećena sa nepravilnim blokovima koji su ograničenim brojnim sistemima pukotina</p>						
 <p>IZDROBLJENA – veoma ispucala, jako oštećena stenska masa sa mešavinom nepravilnih i zaobljenih fragmenata stenske mase</p>						
 <p>LAMINIRANA/DEFORMISANA SMICANJEM – nedostatak strukture blokova zbog malih razmaka kod slabe škriljavosti ili površina smicanja.</p>						

### 11.2.3.1.5 Bartonova klasifikacija

Q-sistem klasifikacije masiva stena razvili su u Norveškoj 1974. godine Barton, Lien i Lunde iz Norveškog geotehničkog instituta. Razvoj ovog sistema znači ogroman doprinos problemu klasifikovanja masiva stena iz više razloga: sistem je predložen na osnovu analize približno 200 slučajeva izgradnje tunela u Skandinaviji, u pitanju kvantitativni sistem klasifikacije i građevinski sistem koji omogućava projektovanje potpornih sistema u tunelima.

Q-sistem se zasniva na numeričkoj (kvantitativnoj) proceni kvaliteta masiva stena pomoću sledećih šest parametara:

- RQD,
- broj nizova pukotina,
- hrapavost najnepovoljnije pukotine ili diskontinuiteta,
- stepen promene ili punjenja duž najslabije pukotine,
- dotok vode,
- stanje napetosti.

Gore navedenih šest parametara grupisani su u tri razlomka kako bi se dobio kvalitet ukupne stenske mase Q, gde je:

- RQD = oznaka kvaliteta stene;
- Jn = broj nizova pukotina;
- Jr = koeficijent hrapavosti pukotina;
- Ja = koeficijent alternacija pukotina;
- Jw = redukcioni faktor koji uzima u obzir vodu u pukotinama;
- SRF = redukcioni faktor koji uzima u obzir napon.

Svaka od numeričkih vrednosti gore navedenih parametara tumači se na sledeće načine:

Prva dva parametra predstavljaju ukupnu strukturu stenske mase, a njihov odnos je relativne mera veličine bloka. Odnos trećeg i četvrtog parametra treba da bude indikator čvrstoće smicanja između blokova (pukotina). Peti parametar je mera pritiska vode, dok je šesti parametar mera za:

- otpuštanje opterećenja u slučaju zona sa pukotinama i glinene noseće stene,
- napona stene u kompetentnoj steni, i
- opterećenja u vezi sa gnećenje i bubrenje u plastičnim, nekompetentnim stenama.

Šesti parametar se još naziva i parametar »ukupnog napona«. Odnos petog i šestog parametra opisuje ono što se naziva »aktivno naprezanje«.

Bartonova klasifikacija (1974) smatra da parametri Jn, Jr, i Ja igraju važniju ulogu

nego orijentacija pukotine, a kada bi orijentacija pukotina bila uključena, klasifikacija bi bila manje uopštena. Međutim, orijentacija je implicitna u parametrima Jr i Ja, zato što se primenjuju na najnepovoljnije pukotine.

Utvrđena je korelacija između RMR-a i Q-vrijednosti (Bieniawski 1974). S obzirom da Q sistem i RMR sistem uključuju nešto drugačije parametre, oni ne mogu da budu striktno dovedeni u vezu. Približna povezanost koju je predložio Bieniawski zasniva se na studiji velikog broja istorijskih slučajeva (standardna devijacija = 9.4).

$$RMR = 9 \ln Q + 44$$

Na osnovu uspoređenja različitih baza podataka brojni drugi avtor predlažu i drugačije korelacije.

Poređenje vremena bez podupiranja i maksimalnog rastojanja bez podupiranja pokazuje da je RMR klasifikacija konzervativnija od Q-sistema, što je posledica prakse izgradnje tunela u Skandinaviji koja se bazira na izvrsnim stenama i dugotrajnom iskustvu u gradnji tunela.

### 11.2.3.2 Klasifikacija stenskih masa za projektovanje tunela prema austrijskom sistemu – ÖGG

#### 11.2.3.2.1 Opšte

Za klasifikaciju stenskih masa u svrhe projektovanja tunela postoji nekoliko tipova klasifikacija stenskih masa kojima su na ovaj ili onaj način obuhvaćeni u prethodnom poglavlju opisani opšti sistemi klasifikacije stenskih masa, uz poštovanje specifičnosti ponašanja materijala u toku izgradnje tunela (način iskopavanja, podupiranja, uticaja na vodu, pomeranja...).

Sastavni deo novog austrijskog sistema projektovanja potpornih mera prema standardu ÖNORM 2203 je i novi sistem klasifikacije stenskih masa.

#### Definicije

##### *Stenska masa*

Čvrsti deo zemljine kore koje čine stene, uslovljen anizotropijama, diskontinuitetima, šupljim prostorima i prostorima ispunjenim tečnim ili gasnim fazama.

##### *Stena*



Prirodnim procesima nastao mineralni agregat, čija svojstva zavise od vrste i količine minerala u njegovom sastavu i njihovih svojstava.

#### *Čvrsta stena*

Smesa minerala čija svojstva su određena fizičko-hemijskim svojstvima minerala.

#### *Tla*

Nagomilane neorganske i organske čvrste materije različitih granulacija, čija svojstva su uglavnom određena mineralnim sastavom, oblikom i rasporedom zrna, kao i sadržajem vode.

#### *Vrsta stene*

Stena sa određenim pripadajućim svojstvima.

#### *Diskontinuiteti*

Ravni prekida mehaničke povezanosti stenske mase koje mogu da nastanu bilo tokom samog nastanka stene i/ili kao rezultat tektonskih procesa.

#### *Vrsta stenske mase*

Stenska masa sa određenim pripadajućim svojstvima.

#### *Tip ponašanja stenske mase*

Prognoza ponašanja stenske mase određenih svojstava tokom iskopavanja sa pripadajućim očekivanim deformacijama (kako vremenskim tako i prostornim), kao i očekivani oblici rušenja, bez uzimanja u obzir potpornih i dodatnih mera i faznog izvođenja iskopa

#### *Ponašanje sistema*

Ponašanje celog sistema, koje je rezultat svojstava stenske mase i odabranih građevinskih mera.

#### *Mehanizam rušenja*

Potencijalna kritična situacija ili neželjeni događaj za građevinski objekat i/ili njegovo okruženje u fazi izgradnje.

### 11.2.3.2.2 Faza 1 – Planiranje

#### 11.2.3.2.2.1 Dijagram toka planiranja

Prikazani način planiranja i prilagođavanja planova tokom izgradnje proizlazi iz smernica austrijskog društva za geomehaniku: Smernice za geomehaničko planiranje podzemnih radova sa cikličnim iskopom (ÖGG; Richtlinie für die Geomechanische Planung von Untertagebauarbeiten mit zyklischem Vortrieb. – Oktober 2001).

U postupku sveobuhvatnog planiranja tunela treba da se izvrši geomehaničko planiranje koje čini osnov za pokretanje postupka izdavanja dozvole, pripremu tendera (utvrđivanje potpornih tipova i njihovo raspoređivanje) i određivanje građevinsko-tehničkih mera na odabranoj lokaciji (osnovni konstrukcioni plan radova za iskopavanje tunela).

Dijagram toka (Slika 11.2.1) prikazuje načelni tok geotehničkog planiranja, od određivanja vrste stene, pa sve do utvrđivanja potpornih tipova. Postupak treba da se izvede u sledećih pet koraka:

#### **1. korak – Određivanje tipova stenske mase**

U prvom koraku se opisuju relevantni geomehanički parametri stenske mase i njena svojstva. Prema tim svojstvima se određuje vrsta stenskih masa. Broj vrsta stenskih masa koje treba odrediti je specifičan za projekat i proizlazi iz geoloških uslova na projektom području.

#### **2. korak – Određivanje tipova ponašanja stenskih masa**

U drugom koraku pojedinačne vrste stenskih masa se povezuju sa uslovima koji se odnose na vodu u stenskoj masi, prostornom orijentacijom diskontinuiteta i lokalnim raspodelom napona i drugim faktorima koji eventualno utiču na ponašanje stenske mase. Na osnovu dobijenih podataka određuju se karakteristični tipovi ponašanja stenskih masa.

Bitno je da se u ovom koraku obuhvati i opiše svako ponašanje stenske mase do kojeg bi moglo doći na ukupnom preseku bez uticaja planskih mera prilikom iskopavanja.

#### **3. korak – Određivanje iskopavanja i podupiranja**

Na osnovu karakterističnih tipova ponašanja stenskih masa, u trećem koraku određuju se građevinske mere koje su prilagođene svim određenim tipovima ponašanja stenske mase.

Na osnovu kombinacije ponašanja stenske mase i odabranih građevinskih mera dobija se ponašanje sistema. Potom je potrebno da se utvrđeno ponašanje sistema uporedi sa određenim zahtevima (kriterijumi prikladnosti za upotrebu). Ukoliko ponašanje sistema ne odgovara zahtevima, način gradnje i/ili izbor

potpornih sredstava se prilagođava sve dok se ti zahtevi ne ispune.

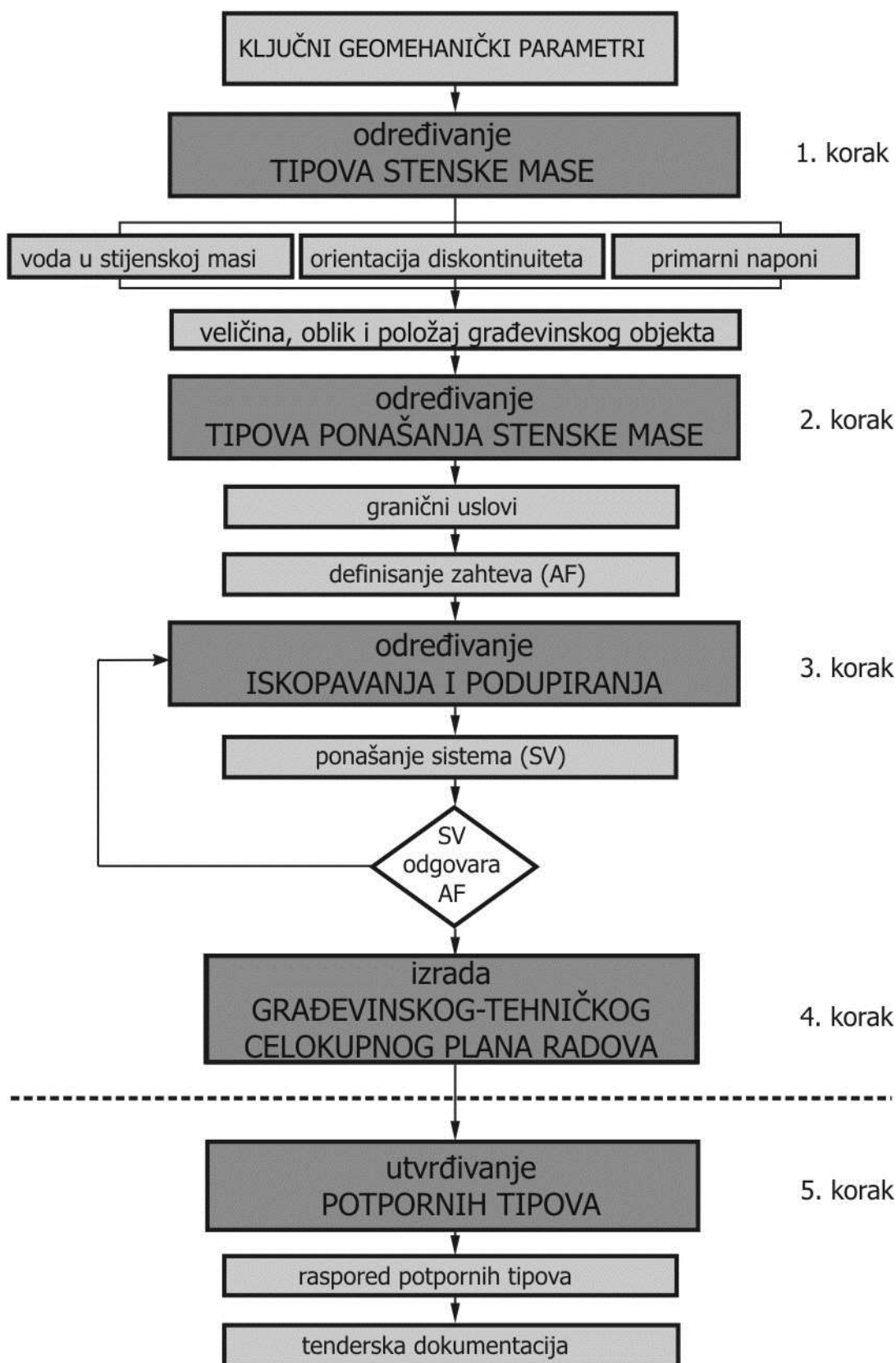
#### **4. korak – Određivanje građevinskog – tehničkog celokupnog plana radova**

Na osnovu koraka od jedan do tri za geomehaničko planiranje potrebno je da se izvrši razgraničenje deonica iskopa koje su istovrsne sa građevinsko-tehničkog aspekta. Za njih potom treba da se izradi osnovni konstrukcioni plan radova za iskopavanje tunela, koji treba da sadrži jasno definisane zahteve vezane za iskopavanje i podupiranje, kao i ostale navode i utvrđene činjenice.

#### **5. korak – Određivanje potpornih tipova**

Peti korak obuhvata određivanje potpornih tipova koji proizlaze iz vrednovanja građevinskih mera (prema standardu ÖNORM B2203-1) i koji se koriste za pripremu metode obračunavanja u tenderskoj dokumentaciji.

Da bi mogla da se odredi količina za popis radova, potrebno je da se na osnovu predviđene raspodele tipova ponašanja stenske mase izradi prognoza o distribuciji potpornih tipova duž podzemnog prostora.



Slika 11.2.1 Šematski prikaz toka geomehantičkog planiranja

#### 11.2.3.2.2 Određivanje tipova stenske mase

Pod pojmom tip stenske mase podrazumeva se geotehnički relevantna zapremina stene, zajedno sa diskontinuitetima i tektonskom strukturom, za koju su značajna sledeća svojstva:

- u čvrstoj steni: parametri čvrstoće (stene – stenske mase), svojstva diskontinuiteta, granulacija, stanje stene i stenske mase, tip diskontinuiteta,
- u tlu: parametri raspodele zrna, parametri komponenti zemlje, parametri matrice, voda u porama (zasićenost).

Različite vrste stenske mase imaju različite karakteristike koje utiču na njihovo ponašanje, pa je stoga potrebno da se za opis različitih vrsta stenskih masa definišu i odrede adekvatni ključni parametri. Stene čiji su merodavni parametri slični po vrsti i veličini raspoređuju se u istu vrstu stenske mase.

Vrste stenskih masa se određuju na osnovu tekućih saznanja, uz poštovanje njihovog značaja u izgradnji građevinskog objekta. Broj određenih vrsta stenskih masa je dakle specifičan za projekat, a zavisi i od faze planiranja i proizlazi iz složenosti geoloških uslova. Po pravilu u ranim fazama projekta dovoljno je grubo razvrstavanje. Sa narastućim poznavanjem i napredovanjem, postaje moguće, odnosno smisleno dalje razvrstavanje.

Na kraju se pojedinačne vrste stenskih masa pripisuju pojedinačnim područjima podzemnog objekta (prognoza).

#### Metodologija

Geotehničke karakteristike stenske mase se opisuju odabranim parametrima. Tabela 11.2.2 treba da posluži kao pomoć za izbor odgovarajućih geotehničkih parametara prema vrsti stena. U zavisnosti od specifičnih okolnosti projekta, može da se izvrši i drugačije ponderisanje parametara. Uvek treba proveriti da li odabrani parametri omogućavaju tačan opis karakteristika stenske mase.

Za određivanje pojedinačnih parametara u načelu trebalo bi da se odaberu uobičajeni regionalni standardi. Ukoliko se primenjuju drugi postupci, njihova upotreba treba da se argumentuje.

U svim fazama obrade je potrebno da se, pored navođenja broja upotrebljenih, odnosno analiziranih podataka, koriste i vrednosti parametara min./maks., „Most probable/best estimate“ (ili statističke raspodele, momenti, kvantili i sl.).

Iste vrste stena (stenskih masa), koje se po karakteristikama diskontinuiteta i/ili stena u velikoj meri razlikuju i karakteristične su za područje koje je dovoljno veliko da mogu da se obuhvate i razgraniče, treba da se podele na više tipova stenskih masa.

Parametri se određuju na osnovu vrste predviđenog građevinskog objekta i stenske mase. I za pojedinačne faze projekta važi da broj parametara koji se koristi za definisanje vrsta stenskih masa, odnosno njihovo razvrstavanje u klase, može da bude različit. Za određivanje i razgraničenje vrsta stenskih masa, uvek treba da se utvrde i mehaničko ponašanje i hidraulične karakteristike stenske mase.

U ranijim fazama projekta (npr. studija izvodljivosti, idejna studija) mogu da se primene jednostavni postupci ocenjivanja, pri čemu za koeficijent stena i stenskih masa često treba da se koriste vrednosti iz literature i iskustvene vrednosti. Korišćene vrednosti treba da se navedu.

U kasnijim fazama projekta (npr. projekat za dobijanje građevinske dozvole, projekat za tender) za utvrđivanje karakteristika reprezentativne zapremine stenske mase mogu da se koriste empirijski postupci ili numeričke metode.

Uz čvrstoću stenske mase i deformacione karakteristike, treba da se prikažu i posebne karakteristike (npr. jaka anizotropija, malo trenje na diskontinuitetima, uključivanje drugih vrsta stena, mogućnost bubrenja i sl.) i da se na osnovu toga navedu specifični problemi koje one mogu da izazovu.

Pod pojmom vrsta stenske mase podrazumeva se geotehnički relevantna zapremina stene, zajedno sa diskontinuitetima i tektonskom strukturom, za koju su značajna sledeća svojstva:

- u čvrstoj steni: koeficijenti čvrstoće (stene – stenske mase), svojstva diskontinuiteta, granulacija, stanje stene i stenske mase, tip diskontinuiteta,
- u tlu: parametri raspodele zrna, parametri komponentata tla, parametri matrice, voda u porama (zasićenost).


Različite vrste stenske mase imaju različite karakteristike koje utiču na njihovo ponašanje, pa je stoga potrebno da se za opis različitih vrsta stenskih masa definišu i odrede adekvatni ključni parametri. Deonice stena, čiji su merodavni parametri slični po vrsti i veličini, raspoređuju se u istu vrstu stenske mase.

Vrste stenskih masa određuju se na osnovu tekućih saznanja, uz poštovanje njihovog značaja u izgradnji građevinskog objekta. Broj određenih vrsta stenskih masa je dakle

specifičan za projekat, a isto tako zavisi od faze planiranja i proizlazi iz složenosti geoloških uslova. Po pravilu je u ranim fazama projekta dovoljno grubo razvrstavanje. Sa rastućim poznavanjem i napredovanjem, moguće je, odnosno smisljeno, dalje razvrstavanje.

Na kraju se pojedinačne vrste stenskih masa pripisuju pojedinačnim područjima podzemnog objekta (prognoza).

GT 1b

<b>Lithology:</b>		Intercalations of marl and sandstone layers, 10% < sandstone < 50%	
<b>Rock Mass Characteristics:</b>		Sheared and/or weathered rock mass. Jointing increasingly dominant. Many discontinuity surfaces slickensided. Fracturing: F5-F4 (20mm-200mm).	
<b>Discontinuities:</b>			
Bedding	Anisotropy:	moderate	Joints:
	Spacing:	< 300mm	Sets:
	Persistence:	> 20m	Spacing:
	Conditions:	undulating / smooth, locally stepped or planar / rough or slickensided	Persistence:
	Opening:	< 1mm	Conditions:
	Filling:	locally clay	Opening:
			Filling:
<b>Intact Rock Parameters:</b>			
	Density (kN/m <sup>3</sup> ):	24 - 26	estimated
	UCS (MPa):	5-25	estimated
<b>Rock Mass Parameters:</b>			
	Density (kN/m <sup>3</sup> ):	25	estimated
	Friction angle (°):	21	Hook&Brown assessment, general approach without consideration of overburden
	Cohesion (MPa):	0.430	
	E Modulus (MPa):	900	
<b>Discontinuity Parameters:</b>			
	c (MPa):	0	estimated
	φ (°):	15-25	estimated
<b>Standard Classification:</b>			
	IS:R:	20-35	
	RMR:	iv	
V8a (8m - 13m)			
			
<b>In situ Stress:</b>		Overall rock mass strength usually exceeds in situ stress, depending on overburden.	
<b>Water:</b>		Joint water. Damp to wet, locally dripping, rarely flowing.	
<b>Prevailing Rock Mass Behaviour / Failure&amp;Deformation Modes:</b>		Gravity and discontinuity controlled block/wedge/slab failure. Failure geometry controlled by low-angle bedding and sub-vertical joint system. Stress-induced deformations / failure of low-strength rock mass, depending on in situ stress.	
<b>Potential Geotechnical Problems:</b>		Slab failure of layers (e.g. thick sandstone bed) in and/or immediately above tunnel crown, implying the potential for sudden large scale failure. Slaking and disintegration of marl if exposed to water and/or mechanical loads (e.g. machine loads on rock in unprotected tunnel invert).	

Slika 11.2.2: 1. korak– Određivanje vrste stenske mase, opisuju relevantni geomehanički parametri stenske mase i njena svojstva.

Tabela 11.2.2: Primer za pripisivanje geotehnički merodavnih parametara VRSTA STENE

VRSTA STENE		MERODAVNI PARAMETRI																				
		KARAKTERISTIKE STENE											KARAKTERISTIKE DISKONTINUITETA									
		Mineralni sastav	Sadržaj minerala gline (kvalitativni)	Sadržaj minerala gline (kvantitativni)	Sadržaj minerala gline (kvalitativni)	Cementacija	Veličina zrna	Tekstura	Odnos matrica/komponente	Poroznost	Alteracija/degradiranost	Fenomeni relaksacija	Bubrenje	Čvrstoća	Anizotropija	Orijentacija dominantne familije	Broj i orijentacija familija	Stepen ispuicalosti	Stepen isprekidanosti	Otvorenost	Karakteristike smicanja / hrapavost	Zapunjenost
ČVRSTE STENE	Intruzivne stene	■				■	■			□			■			■	■	□	■	□	□	
	Vulkanske stene (masivne)	□							■	■			■			■	■	□	■	□	■	
	Vulkanoklastične stene	□	□		□	□		■	■	■		□	□									
	Krupnozrne klastične stene (masivne)	□		□	■	■	□	■	□	□			■			□	□	□	□			
	Sitnozrne klastične stene (masivne)		■	■	■	■				□		■	□			□	□					
	Krupnozrne klastične stene (slojevite)	□		□	■	■		■	□	□			■	■	■						■	
	Sitnozrne klastične stene (slojevite)		■	■	■	■				□		■		■	■						■	□
	Karbonatne stene (masivne)	■										■		■		□	■	□	■			□
	Karbonatne stene (slojevite)	■										■		■		■	■				□	□
	Sulfatne stene	■										■	■	□								
	Metamorfne stene (masivne)	■					■	■		□				■		■	■	□	■			
	Metamorfne stene (slojevite)	■					■	■		□				■	■	■	■	□			■	■
	Tektonski materijal	□	■	■	■			■		□		■	■									
NEVEZANI SEDIMENTI	Krupnozrna zemlja (šljunak)					■	■	□					■									
	Sitnozrna zemlja (pesak)					■		□	□				■									
	Zemlja s mešovitim zrnima	□		■		■		■	□			□	■									
	Sitnozrno tlo (mulj)					■			□				■									
	Sitnozrna zemlja (gline)	□		■		■			□			■	■									

**Legenda:** ■ Karakteristika signifikantnog značaja □ Karakteristika manjeg značaja

Tabela 11.2.3: Primer merodavnih parametara i mogućih metoda za obuhvatanje parametara u zavisnosti od faze projekta

Faza projekta	Merodavni parametri	Obuhvatanje parametara
Studija izvodljivosti Idejna studija	Vrsta stene	Regionalne geološke karte, literatura, pregled terena, avionski i satelitski snimci
	Karakteristike stene (npr. čvrstoća, tropija)	Literatura, uporedne vrednosti
	Karakteristike diskontinuiteta (npr. orijentacija dominantne glavne familije)	Literatura, uporedne vrednosti, pregled terena, avionski i satelitski snimci
Idejni projekat	Vrsta stene	Kartiranje, bušotine, geofizika, avionski i satelitski snimci
	Karakteristike stene (npr. čvrstoća, tropija)	Gruba klasifikacija na osnovu terenskih rezultata i bušotina
	Karakteristike diskontinuiteta (npr. orijentacija dominantne familije, broj i orijentacija familija, stepen ispućalosti)	Klasifikacija na osnovu daljinske detekcije i terenskih rezultata, avionskih i satelitskih snimaka
Projekat za dobijanje građevinske dozvole	Vrsta stene	Detaljno kartiranje, bušotine, geofizika, avionski i satelitski snimci
	Karakteristike stene (npr. čvrstoća, tropija, mineralni sastav, veličina zrna, Odnos matrica/komponente, degradiranost, poroznost)	Klasifikacija na osnovu detaljnog kartiranja, bušotina, rezultata laboratorijskih ispitivanja
	Karakteristike diskontinuiteta (npr. orijentacija ominentnefamilije, broj i orijentacija familija, stepen ispućalosti, stepen isprekidanosti, hrapavost)	Klasifikacija na osnovu statističke analize podataka (detaljno kartiranje, bušotine, geofizikalni eksperimenti u bušotinama, odabrani izdanci)
Projekat za tender	Vrsta stene	Produblivanje saznanja na geotehnički kritičnim područjima, izračunavanja na osnovu modela
	Karakteristike stene	
	Karakteristike diskontinuiteta	

### 11.2.3.2.2.3 Određivanje tipova ponašanja stenskih masa

Prvo se na pojedinačnim područjima podzemnog objekta opisuju i obrađuju karakteristike i orijentacija merodavnih struktura, sa stanovišta podzemnog prostora. Nakon toga se utvrđuje ponašanje stenske mase na određenim područjima, uz uzimanje u obzir postojećeg primarnog stanja napona i količine vode u stenskoj masi. U sledećem koraku određuju se tipovi ponašanja stenskih masa koji mogu da se očekuju na području projekta i vrši se prognoza njihove raspodele duž podzemnog građevinskog objekta.

Tipovi ponašanja stenskih masa predstavljaju značajnu podlogu za planiranje toka iskopavanja i potrebnih potpornih mera. Opisuje se ponašanje stenske mase prilikom iskopavanja punog konačnog preseka, bez uticaja faznog izvođenja iskopavanja i potpornih mera.

#### Metodologija

U ovom koraku se kod dugačkih podzemnih prostora u načelu polazi od beskonačno dugog nepoduprtog podzemnog prostora. Sve građevinsko-tehničke mere treba da budu takve da mogu razumljivo da se izvedu na osnovu ponašanja nepoduprte stenske mase.

Podzemni građevinski objekti kod kojih postoji ograničenje širenja po dužini (npr. proširenja, pećine i sl.) treba da se obrade celom dužinom.

Za određivanje tipa ponašanja stenske mase uopšteno se koriste sledeći faktori uticaja:

- vrsta stenske mase,
- primarno stanje napona (ocena uslova naponu u stenskoj masi bez pukotina),
- oblik, veličina i položaj podzemnog prostora, metod iskopavanja (prečnik i oblik preseka u konačnom stanju podupiranja, ne za pojedinačna međustanja izgradnje),
- orijentacija građevinskog objekta s obzirom na strukturu diskontinuiteta (opisuje položaj građevinskog objekta s obzirom na merodavne familije diskontinuiteta; služi kao podloga za kinematičku analizu i utvrđivanje strukturno uslovljenih promena naponu),

- voda u stenskoj masi, hidrostatički pritisak.

Za određivanje tipova ponašanja stenske mase, između ostalog, preporučuju se sledeća istraživanja:

- Kinematika: kinematička istraživanja za evidentiranje strukturno uslovljenih naknadnih lomova, odnosno proklizavanja blokova. Metode: npr. Key Block Theory, analiza kružne projekcije diskontinuiteta.
- Opterećenje: proizlazi iz odnosa između prostornog stanja naponu, koji preovlađuje na području uticaja iskopavanja tunela, i čvrstoće i deformacionih karakteristika stenske mase.
- Mehanizam rušenja: mogući mehanizmi rušenja treba da se ispituju i bar kvalitativno opišu (npr. plitko smicajno rušenje, relaksacija stenskih masa sa diskontinuitetima malog trenja, duboka smicajna rušenja i sl.).
- Metode: testiranje modela, analitičke metode, numeričke metode koje modeliraju oblikovanje diskretnih lomova, izrađeni i merenjima potkrepljeni primeri.

Ako pojedinačni faktori uticaja ne mogu da se odrede sa odgovarajućom sigurnošću, treba da se izvede studija varijanti sa očekivanim rasponom oscilacije parametara.

Za oblikovanje modela su u načelu prikladne sve analitičke i numeričke metode pomoću kojih se realistično odslikavaju karakteristike svake stenske mase u datim graničnim uslovima.

Utvrđeni tipovi stenskih masa se razvrstavaju u jedanaest kategorija, prikazanih u Tabeli 11.2.4. Ako se identifikuje veći broj tipova ponašanja stenskih masa, koje inače spadaju u istu kategoriju, ali se razlikuju u detaljima, potrebno je uvesti podgrupe (npr. 2/1, 2/2, i sl. za stensku masu koja se kruni i ima različite kombinacije diskontinuiteta ili različite orijentacije diskontinuiteta).

Za stalno ažuriranje geološkog modela koriste se dodatna zapažanja na već otkopanom području, kao što su znakovi preopterećenja, deformacioni mehanizmi, mehanizmi rušenja i potencijalne mere za prethodno pripremljeno utvrđivanje.



Tip obnašanja BT		10(4)
Tipi tal. GT	GT2a s povećano vešćernošću gline, lokalno s prvom omejenom tekstu (GT2a, GT1b), GT2b pred omejenoga razdružena uzduž glavnih štržnih con.	
Orientacija diskontinuitet	Srednje (lokalno štržni) vpadajuće razpoke / štržne razpoke prevladavaju. Srednje štržne razpoke / štržne razpoke vpadaju u dijelno čvrsto. Vpadajuće razpoke se spreminjaju, tipično polučne do srednje štržne. Delno kaotična struktura.	
Napetost	Napetost preovlađuje iznad horizontalne (općim / po - 0.1E - 0.5E)	
Dotok vode	Lokalno dotok vode iz pašnjaka / tipično <math>0.5 \text{ m}</math>. Dotok iz površnih con štržni preovlađuje 0.5 m. Povećane količine vode su moguće, ovaj je GT 3 pešč. Lokalno vodonosni dotok do najveć 2 m od površnih con - možno.	
Obnašanje horizontalne mase	Voda iznad horizontalne v povezani s relikvijama iz leđetjem uzduž štržnih con vodi do duboko segejućih porušev. Porušev se se povezuje s dotok u uzduž štržnih con inili peščenoga tektonskoga materijala. Pojavljivanje zemlji porušev tektonskoga materijala v povezani s štržne horizontalne mase vodi do anisotropnoga struktura horizontalne. Velika nepravilnost porušev izloženoga dela. Nabrekanje glinenih minerala v 2a in 3b tako vodi do povećanja volumne in posledično čestvno odvijane konvergenca v obodu predora inili dug tal.	

Slika 11.2.3: 2. korak– Određivanje tipa ponašanja aktuelne stenske mase:

Tabela 11.2.4: Kategorije tipova ponašanja stenskih masa

Tipovi ponašanja stenske mase – BT (Behaviour Types of rock)	Opis ponašanja stenske mase (bez potpornih mera)
<b>1. Stabilna stenska masa</b>	Stabilna stenska masa sa potencijalom za težinom uslovljeno ispadanje ili proklizavanje malih blokova
<b>2. Stabilna sa mogućnošću ispadanja klina</b>	Ispadanje klinova koje se proteže u dubinu i koj je uslovljeno težinom, mestimično lokalno prekoračenje čvrstoće smicanja na diskontinuitetima
<b>3. Plitka smicajna rušenja</b>	Plitka smicajna rušenja prouzrokovana naponom, u kombinaciji sa rušenjem stenske mase koju prouzrokuju gravitacija i orijentacija diskontinuiteta
<b>4. Duboka smicajna rušenja</b>	Duboka smicajna rušenja prouzrokovana naponom i velike deformacije
<b>5. Udar stenske mase</b>	Iznenadno i silovito rušenje stenske mase, nastalo usled jako opterećenih krhkih stena i brzog oslobađanja akumulirane deformacione energije
<b>6. Prelomi slojeva</b>	Prelomi tankih ploča, često u kombinaciji sa smicajnim rušenjem
<b>7. Smicajno rušenje kod niskog nivoa napona</b>	Potencijal za rušenje velikog obima i progresivno smicajno rušenje usled stanja niskog napona
<b>8. Rastresita stenska masa</b>	Isticanje većinom nekohezivne, suve do vlažne stenske mase
<b>9. Tečenje raskvašene stenske mase</b>	Isticanje stenske mase sa visokim sadržajem vode

Tipovi ponašanja stenske mase – BT (Behaviour Types of rock)	Opis ponašanja stenske mase (bez potpornih mera)
<b>10. Stenska masa koja bubri</b>	Vremenski uslovljeno povećanje zapremine stenske mase usled fizičko-hemijske reakcije stenske mase i vode, u kombinaciji sa otpuštanjem napona
<b>11. Veoma heterogena stenska masa sa deformacionim potencijalom koji se brzo menja</b>	Brza promena napona i deformacija, uslovljena blokovsko-matričnom strukturom (npr. heterogene zone smetnji, tektonska mešavina)

### Podaci

Za svaki tip ponašanja stenske mase treba da se navedu najmanje sledeći podaci:

- skica očekivane strukture stenske mase i mehanizama rušenja,
- vrsta stenske mase,
- orijentacija merodavnih diskontinuiteta u odnosu na podzemni prostor,
- opis opterećenja stenske mase,
- voda u stenskoj masi; količina i uticaj na ponašanje stenske mase,
- ponašanje stenske mase (ponašanje svoda i čela iskopa prilikom iskopavanja, vrsta preopterećenja, mehanizam rušenja, dugoročno ponašanje),
- pomeranje ivice podzemnog prostora, procena veličine i pravca.

Međusobno razgraničenje pojedinačnih tipova ponašanja stenskih masa unutar jedne kategorije se npr. može izvesti sa sledećih aspekata:

- vrsta stenske mase,
- struktura stenske mase,
- voda u stenskoj masi,
- kinematika, način rušenja,
- veličina pomeranja.

#### 11.2.3.2.2.4 Određivanje iskopavanja i podupiranja

Nakon što su izvedeni prethodni koraci određivanja vrsta stenskih masa i tipova ponašanja stenskih masa, određuju se građevinske mere (iskopavanje, podupiranje i eventualne mere za korigovanje stenske mase), istražuje se ponašanje sistema (međusobni uticaj stenskih masa, podupiranje i tok gradnje) i vrši poređenje sa zahtevima.

#### Faktori uticaja

Faktore uticaja na ponašanje sistema čine:

- tip ponašanja stenske mase,
- oblik i veličina profila iskopavanja,
- trodimenzionalni razvoj toka gradnje,
- vremenski uslovljene karakteristike građevinskog područja i potpornih sredstava, ukoliko je to relevantno,
- potporno mesto, mesto i vreme njihove ugradnje.

#### Metodologija

Metodologija istraživanja određuje se prema graničnim uslovima svakog građevinskog objekta pojedinačno. Pritom značajnu ulogu imaju disperzija faktora uticaja i eventualni uticaji građevinskog objekta. Mogu da se koriste sledeća metodološka pomoćna sredstva:

- analitičke metode,
- numeričke metode,
- uporedna istraživanja na osnovu iskustva stečenog pri gradnji sličnih građevinskih objekata.

Faktori uticaja za procenu ponašanja sistema po pravilu nisu unapred zadate veličine, nego se njihove vrednosti većinom kreću u nekom intervalu. Posledice varijacije kritičnih faktora uticaja na ponašanje sistema treba da se istraže u parametrijskoj studiji.

#### Potvrđivanje

Istraživanjem ponašanja sistema treba da se potvrdi:

- stabilnost u svim stanjima gradnje,
- poštovanje dozvoljenih uticaja na sredinu (sleganje, podrhtavanje, intervencije u prirodi i sl.),
- poštovanje pomeranja u okviru unapred određenih tolerancija (dozvoljenost, primerenost za upotrebu, usklađenost i sl.).

U slučajevima kada potrebni parametri ne mogu unapred da se odrede sa potrebnom preciznošću, u okviru geotehničke kontrole rizika treba da se navedu metode i načini postupanja za propratnu verifikaciju pretpostavki, za ocenjivanje i obezbeđivanje stabilnosti, za poštovanje dopuštenih uticaja na sredinu i za usmeravanje i određivanje potrebnih građevinsko-tehničkih mera.

#### 11.2.3.2.2.5 Izrada građevinskog – tehničkog celokupnog plana radova

Građevinsko-tehnički zbirni plan radova za iskopavanje tunela (za iskopavanje i podupiranje) se koristi kao pregledan prikaz rezultata geomehaničkog planiranja, i u sažetom obliku treba da sadrži sledeće:

- geološku prognozu sa raspodelom očekivanih vrsta stenskih masa i tipova ponašanja stenskih masa,
- razgraničenje deonica iskopavanja za koje važe određeni uslovi koji se određuju na samoj lokaciji,
- zahteve u vezi sa iskopavanjem i podupiranjem (npr. dužina koraka iskopavanja, tok iskopavanja, nadprofil, brzina iskopavanja, uslovi zatvaranja podnožnog svoda, potporne i zaštitne mere i sl.),
- navođenje mera koje treba da se odrede na samoj lokaciji (npr. unapred pripremljene potporne mere, podupiranje čela iskopa i sl.),
- podatke o ponašanju sistema (ponašanje tokom iskopavanja, deformaciono ponašanje, stepen opterećenja potpornih sredstava i sl.),
- podatke u okviru geotehničkog upravljanja rizicima (alarmni kriterijumi, mere, i sl.).

#### 11.2.3.2.2.6 Utvrđivanje potpornih tipova

Nakon što se odrede sve građevinsko-tehničke mere za pojedinačne tipove ponašanja stenske mase, vrši se utvrđivanje potpornih tipova prema standardu ÖNORM B 2203-1. To se obavlja isključivo za potrebe popisa radova, izračunavanja i obračuna radova. Potporni tipovi se definišu pomoću dva vodeća parametra: dužinom koraka iskopavanja i potpornim brojem (brojem potpornih elemenata).

Svakom tipu ponašanja stenske mase ne mora obavezno pripadati poseban potporni tip, pošto se, u zavisnosti od okolnosti, za različite tipove ponašanja stenske mase mogu smisljeno primeniti iste građevinsko-tehničke mere. Međutim, sa druge strane može da bude potrebno da se za jedan tip

ponašanja stenske mase planira više potpornih tipova ako odgovarajući tip ponašanja stenske mase npr. pokriva širu paletu potrebnih potpornih mera.

Za određivanje količina treba da se izvrši prognoza distribucije potpornih tipova. Raspodela treba da se izradi za najverovatniji scenario, kao i za optimističku i pesimističku procenu.

Pri tom u obzir treba da se uzmu ne samo različiti geološki i geotehnički uslovi, nego i heterogenost i promenljivost stenske mase duž trase. To se inače radi zato što proces traženja rešenja za promenu građevinskih mera koje određuju potporni tip kad se naiđe na bolju stensku masu, uvek traje duže nego kada je slučaj obrnut. Kod izraženo heterogene stenske mase može da se desi da preusmeravanje u kratkim deonicama „dobre stenske mase“ ne predstavlja racionalno, odnosno ekonomično rešenje.

#### 11.2.3.2.2.7 Geomehanički izveštaj

Rezultati geomehaničkog planiranja treba pregledno i razumljivo da se objedine u poseban geomehanički izveštaj, u kome treba da se navedu pojedinačni koraci prikazani u ovim smernicama.

Geomehanički izveštaj je utemeljen na mišljenju i nalazima pojedinačnih stručnjaka iz oblasti građevinarstva i trebalo bi da ga, uz poštovanje delimične odgovornosti koja je izvedena na osnovu svakog pojedinačnog sadržaja nabavke, zajednički izradi tim zadužen za geomehaničko planiranje, koji čine stručnjaci iz oblasti građevinarstva, geomehničari i projektanti tunela.

Geomehanički izveštaj svakako treba da sadrži:

- kratak prikaz rezultata detekcije građevinskog područja i njegove interpretacije kao osnovu za geomehaničko planiranje,
- opis vrsta stenskih masa i prikaz relevantnih parametara,
- opis tipova ponašanja stenskih masa i prikaz relevantnih faktora uticaja, izvršenih istraživanja i pretpostavljenih geomehaničkih modela koji su korišćeni kao osnova,
- izveštaj o određivanju iskopavanja i podupiranja i prikaz merodavnih skica opasnosti, upotrebljenih računskih metoda i izrađenih propratnih dokumenata,
- građevinsko-tehnički zbirni plan radova za iskopavanje tunela (pregledan prikaz),

- detaljne napomene uz građevinsko-tehnički zbirni plan radova za iskopavanje tunela (mere na samoj lokaciji, ponašanje sistema, alarmni kriterijumi i sl.),
- Izveštaj o utvrđenim potpornim tipovima i njihovoj distribuciji duž podzemnog prostora.

### 11.2.3.2.3 Faza 2 – Izvođenje gradnje

#### 11.2.3.2.3.1 Dijagram toka faze gradnje

Pošto uslovi stenske mase većinom ne mogu detaljno da se istraže pre samog početka gradnje, pa zato u celini nisu ni poznati, za ostvarenje cilja je po pravilu potrebno da se tokom izgradnje vrši dopuna i ispravka prognoza, kao i prilagođavanje građevinsko-tehničkih mera. Konačni izbor odabir građevinsko-tehničkih mera za svaki konkretni slučaj postojećih uslova stenske mase (određivanje podupirača i iskopavanja) je zato u većini slučajeva moguća tek na samoj lokaciji. Da bi se u uslovima takvog načina rada obezbedila potrebna bezbednost, neophodan je adekvatan sistem kontrole rizika.

Slika 1.2.4 šematski prikazuje načelni tok za jedan presek.

#### 1. korak– *Određivanje aktuelne vrste stenske mase*

U prvi korak spada geološko evidentiranje tokom gradnje, kojim su obuhvaćeni parametri potrebni za utvrđivanje aktuelne vrste stenske mase.

#### 2. korak– *Određivanje tipa ponašanja aktuelne stenske mase:*

Za stalno ažuriranje geološkog modela koriste se dodatna zapažanja na već otkopanom području, kao što su znakovi preopterećenja, deformacioni mehanizmi, mehanizmi rušenja i potencijalne mere za prethodno pripremljeno utvrđivanje.

Dalje je potrebno da se, upotrebom prikladnog geotehničkog mernog programa, obuhvati i prikaže uticaj izrade podzemnog prostora na građevinsko područje.

Na osnovu tih zapažanja izrađuje se kratkoročna prognoza, a području, na kojem će se nastaviti iskopavanje, pripisuje se tip ponašanja stenske mase.

#### 3. korak– *Određivanje iskopavanja i podupiranja*

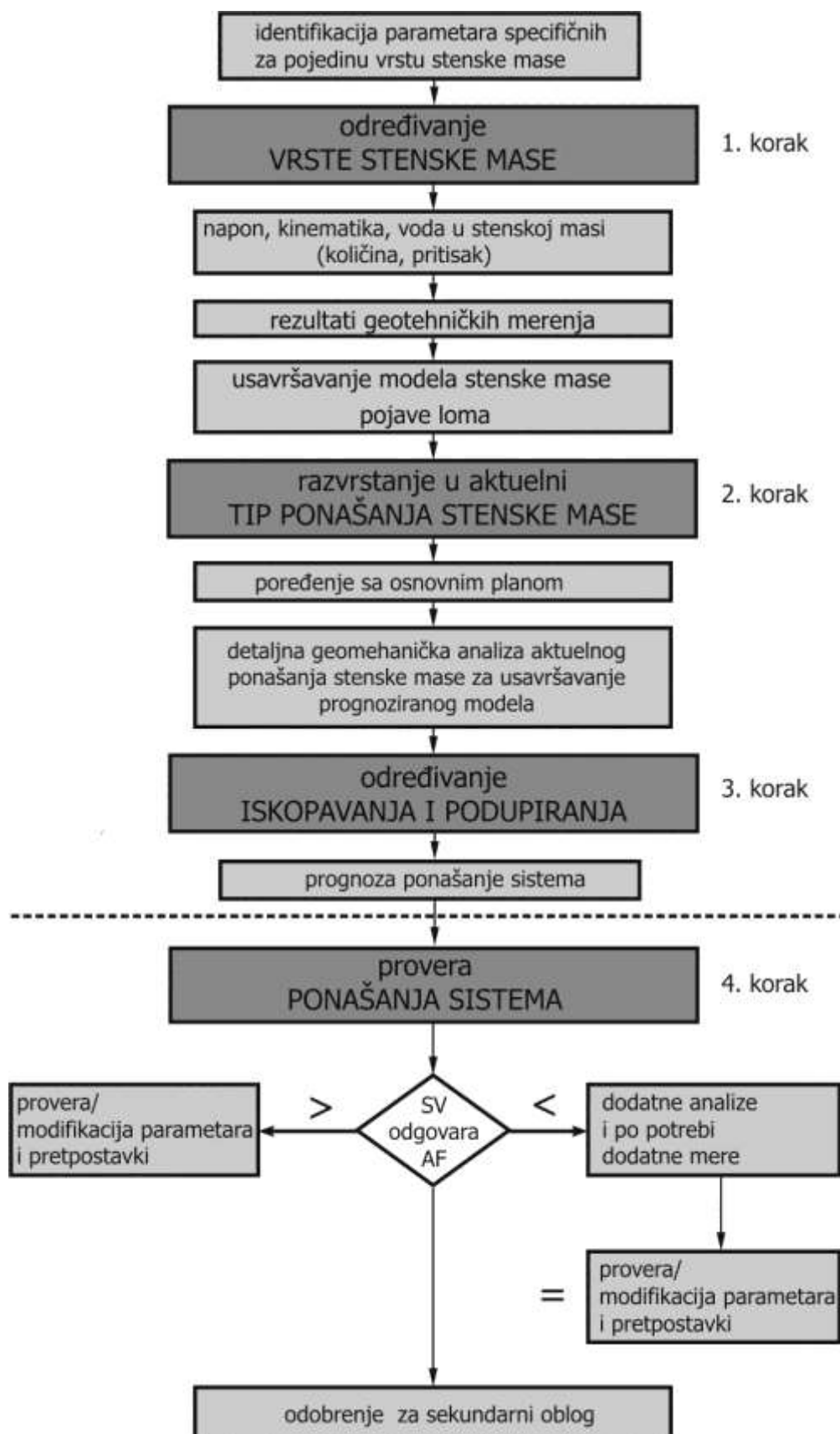
Uopšteno gledano, određivanje iskopavanja i podupiranja treba da se izvrši u okviru zahteva građevinsko-tehničkog osnovnog konstrukcionog plana radova za iskopavanje tunela. Zato prvo treba da se proveru u kojoj meri su zatečeni uslovi stenske mase (vrsta stenske mase, tip ponašanja stenske mase) u skladu sa pretpostavkama od kojih se pošlo u planu. Potom treba da se izvrši detaljna geomehanička analiza aktuelnog ponašanja stenske mase, u cilju dopune modela prognoze. Na osnovu saznanja dobijenih na samoj lokaciji, građevinsko-tehničke mere treba konačno da se odrede na način koji će omogućiti ekonomično i bezbedno iskopavanje u svakoj fazi.

Na osnovu određenih mera treba da se definiše, odnosno dopuni očekivano ponašanje sistema za svaku pojedinačnu deonicu otkopa.

Građevinsko-tehničke mere uglavnom treba da se odrede pre početka iskopavanja. Nakon iskopavanja, po pravilu, moguća su samo manja prilagođavanja (npr. lokalno sidrenje, učestalost i dužina sidara). Donošenje odluke je i u ovoj fazi zasnovano na (poboljšanoj) prognozi.

#### 4. korak– *Provera ponašanja sistema*

Provera da li je ponašanje sistema u skladu sa definisanim zahtevima, odnosno kriterijumima geotehničkog plana za kontrolu rizika vrši se posmatranjem predmetnog preseka tokom iskopavanja i nakon njega (vizuelno i merenjima). Ako su deformacije ili opterećenja na podupiračima veća ili manja od očekivanih za svaki pojedinačni slučaj, svakako treba proveriti parametre i pretpostavke upotrebljene za procenu. Ako su pomeranja i opterećenja veća od onih na kojima je zasnovano očekivano ponašanje sistema, treba izvršiti dodatnu analizu istog i po potrebi primeniti adekvatne mere (npr. ojačanje potpornog sistema). Ako su vrednosti niže od očekivanih, parametri i pretpostavke takođe treba da se provere i po potrebi modifikuju. Na ovaj način je omogućeno stalno poboljšavanje i usavršavanje određivanja potpornog sistema i iskopavanja.



Slika 11.2.4: Načelni tok određivanja i proveravanja građevinskih mera tokom izvođenja (SV = ponašanje sistema, AF = zahtevi)

#### 11.2.3.2.3.2 *Određivanje vrste stenske mase*

Za diferenciranje pojedinih vrsta stenskih masa podaci koji su korišćeni za prognozu dopunjavaju se parametrima koji su bili ili će biti odabrani na samoj lokaciji. Za pripremu gradnje se za pojedine očekivane vrste stenskih masa određuju ključni parametri. Treba paziti da se parametri odrede tako da mogu sa lakoćom da se utvrde na samoj lokaciji.

##### *Metodologija*

Pojedinačni ključni parametri dele se u tri kategorije. Gde god je to moguće, treba da se koriste numeričke vrednosti (npr. razmak između diskontinuiteta, orijentacija diskontinuiteta, otvorenost pukotina i sl.). Iz praktičnih razloga neki parametri se na samoj lokaciji opisuju samo kvalitativno (npr. hrapavost).

Ponderisanjem i kombinovanjem pojedinačnih parametara definišu se kriterijumi za određivanje vrsta stenskih masa. Smisleno je da se oni razvrstaju u obliku tabele.

##### *Utvrdjivanje parametara na samoj lokaciji*

Geološko evidentiranje na samoj lokaciji usmereno je na obuhvatanje relevantnih geotehničkih podataka i strukture stenske mase. Utvrđeni parametri upisuju se u formulare iz kojih se vidi određena vrsta stenske mase prema prethodno definisanim kriterijumima. Kod heterogenih uslova stenske mase, čelo treba da se podeli na različite deonice, pri čemu se parametri utvrđuju za svaku deonicu posebno.

Geološko-geotehničko evidentiranje na samoj lokaciji koristi se kao osnova za ekstrapolaciju geološko-geotehničkih uslova na onu zapreminu stenske mase koja je merodavna za ponašanje stenske mase. Zato je potrebno da se u obzir uzme i prognozom obuhvati ne samo čelo iskopa nego i šira prostorna situacija.

#### 11.2.3.2.3.3 *Razvrstavanje u aktualni tip ponašanja stenske mase*

##### *Metodologija*

Osim parametara za utvrđivanje vrste stenske mase treba da se zabeleže i faktori uticaja, kao što su npr. prisustvo vode u stenskoj masi, strukturni uslovi, stanje

napona, kinematičke pojave i zapažanja vezana za ponašanje tokom iskopavanja.

Dalje je potrebno da se, upotrebom prikladnog geotehničkog mernog programa, obuhvati i prikaže reakcija građevinskog područja. Pri tome naročito treba stalno da se meri pomeranje nezatvorenog nosećog prstena tunela (po potrebi i površina terena) u njihovim prostornim komponentama, a naročita pažnja treba da se posveti stručnoj analizi rezultata istraživanja i merenja.

U kombinaciji sa prognoziranom strukturom stenske mase, za prognozu ponašanje stenske mase deonice koja se nalazi neposredno ispred čela potom se koriste rezultati geotehničkih merenja i osmatranja na samoj lokaciji (npr. pojava lomova).

Na osnovu obuhvaćenih faktora uticaja na samoj lokaciji vrši se klasifikacija aktuelnog tipa ponašanja, uz saglasnost geologa i inženjera odgovornih za izgradnju tunela i u skladu s kriterijumima koji su definisani planovima.

Tokom izgradnje, model stenske mase treba stalno da se usavršava, odnosno ažurira na osnovu planiranja i stvarno uočenih uslova.

#### 11.2.3.2.3.4 *Određivanje iskopavanja i podupiranja*

*Poređenje sa osnovnim građevinsko-tehničkim konstrukcionim planom radova za iskopavanje tunela*

Da bi konačno mogle da se utvrde mere za iskopavanje i podupiranje, prvo treba da se utvrdi da li su i u kojoj meri planski usvojene pretpostavke u vezi sa vrstama stenske mase i ponašanjem stenske mase za aktuelnu deonicu iskopavanja u skladu sa stvarnim uslovima stenske mase. Naročito treba proveriti da li je tip ponašanja stenske mase, koji je zatečen na deonici iskopavanja, u osnovnom građevinsko-tehničkom konstrukcionom planu iskopanih radova za tunel bio očekivan za konkretnu deonicu iskopavanja ili da li je bar bio prognoziran i opisan za druge deonice podzemnog prostora. U slučaju da nije tako, treba da se obavi usklađivanje sa projektantom.

U slučaju kad su postojeći uslovi građevinskog područja na samoj lokaciji obuhvaćeni važećim planom, pri detaljnom određivanju građevinsko-tehničkih mera, koje treba da se izvrše na samoj lokaciji, u obzir svakako treba da se uzmu zahtevi, odrednice

i navodi zbirnog plana radova pri iskopavanju. Lokalno potrebne dodatne mere treba da se izvedu i onda kada planom nisu izričito zahtevane.

#### *Geomehanička detaljna analiza*

U nastavku se u okviru detaljne analize aktuelnog ponašanja stenske mase istražuju i opisuju geomehanička događanja u okruženju podzemnog prostora, uz poštovanje prostornog i vremenskog sadejstva različitih komponenti uticaja. Kod geotehničko zahtevnih podzemnih građevinskih objekata ili objekata sa znatnim stepenom rizika neophodno je prisustvo geotehničara (inženjera za izgradnju tunela sa geotehničkim iskustvom).

Za analizu ponašanja stenske mase na osnovu merenja mogu da se koriste sledeće metode :

- analiza prostornog pomeranja sa vrednovanjem linija trendova,
- ekstrapolacija trendova pomeranja,
- analiza orijentacije vektora pomeranja i/ili analiza uslova pomeranja različitih mernih tačaka,
- na samoj lokaciji obavljene analize u vezi sa aktuelnim ponašanjem stenske mase služe za usavršavanje prognoziranog modela. Na osnovu ovoga izvedena saznanja trebalo bi da se na odgovarajući način uzmu u obzir pri određivanju građevinsko-tehničkih mera (dužina koraka iskopavanja, nadvišenje, unapred pripremljene zaštitne mere, potporne mere i sl.).

#### *Određivanje na samoj lokaciji*

Konačno određivanje građevinsko-tehničkih mera mora da se izvrši na osnovu svih saznanja koja su dobijena na samoj lokaciji. Izrada podzemnog objekta mora u svakoj fazi da bude bezbedna i ekonomična. Određivanje mora da se izvrši uz opštu saglasnost i na sopstvenu odgovornost predstavnika naručioca i izvođača koji su na samoj lokaciji zaduženi za nadzor gradnje, odnosno izvođenje gradnje.

U slučaju neslaganja po pitanju tehničkih aspekata, u skladu sa standardom ÖNORM B2203-1 treba konsultovati stručnjaka za gradnju tunela.

#### *Usavršavanje kategorija parametara*

Po pravilu tokom planiranja pojedinačnog tipa ponašanja stenske mase određuje se

iskopavanje, faze iskopavanja i dužina koraka iskopavanja, kao i vrsta potpornih sredstava. Ukoliko stenska masa i ponašanje stenske mase to zahtevaju, tokom izgradnje interval iskopavanja mora da se skрати. Da bi se preciznije odredile i argumentovale pojedine mere, broj kategorija parametara može da se poveća daljim raščlanjivanjem ili, ako je potrebno, mogu da se definišu dodatni kriterijumi. Novo razvrstavanje treba da se argumentuje i svakako je moguće samo u okviru dalje izrade osnovnog građevinsko-tehničkog konstrukcionog plana radova za iskopavanje tunela.

#### *Ispravke prognoze ponašanja sistema*

Na isti način na koji tokom izgradnje može da se vrši usavršavanje kategorija parametara i dodeljivanje dužine koraka iskopavanja i potpornih sredstava tipovima ponašanja stenske mase, može da se preciznije opiše i prognozirano ponašanje sistema. U tom slučaju mora da se da što detaljniji prikaz, pri čemu naročito moraju da se poštuju aktuelni uzorci ponašanja. Prognoza se izrađuje za svakih sledećih 10 do 20 m i stalno se ažurira.

Prognoza treba da sadrži najmanje:

- očekivani obim i pravac pomeranja podzemnog prostora i, ako je potrebno, površine, vremenski tok i prostornu raspodelu pomeranja,
- očekivano ponašanje stenske mase prilikom iskopavanja,
- očekivano opterećenje potpornih elemenata.

Potrebna je redovna provera alarmnih kriterijuma koji su određeni geotehničkim planom kontrole rizika, a na osnovu stvarno zatečenih uslova i zapažanja po potrebi treba da se izvrši povratna analiza.

#### *11.2.3.2.3.5 Provera ponašanja sistema*

Posmatranjem ponašanja sistema tokom iskopavanja i vrednovanjem i analizom podataka koji su dobijeni merenjem vrši se provera i poređenje uočenog ponašanja sa prognoziranim ponašanjem sistema. Dodatna merenja, odnosno vrednovanja mogu da se upotrebe, ako je potrebno, da se npr. bar približno utvrdi stepen opterećenja potpornih sredstava.

Svako odstupanje između predviđenog i stvarnog ponašanja treba pažljivo da se analizira.

### *Ponašanje sistema povoljnije od prognoziranog*

Ako je ponašanje sistema povoljnije, npr. pomeranja su manja od prognoziranih, uzrok za to može da bude netačna dodela parametara, odnosno netačne pretpostavke. Uzroci odstupanja treba da se analiziraju. Ako se radi o netačnoj proceni faktora uticaja, parametre treba na odgovarajući način modifikovati, a modifikacija mora da se adekvatno argumentuje i dokumentuje u okviru daljeg geomehaničkog planiranja.

A ako je ovakvo ponašanje sistema rezultat neočekivano boljeg kvaliteta stenske mase, treba da se preradi prognozirani model. Ukoliko dođe do značajnih odstupanja, treba da se modifikuju i zahtevi koji se odnose na potporni sistem i potporne mere na sledećim deonicama. U ovakvom slučaju se po pravilu vrši dopuna osnovnog građevinsko-tehničkog konstrukcionog plana radova za iskopavanje tunel.

### *Ponašanje sistema nepovoljnije od prognoziranog*

U slučaju kada je ponašanje sistema nepovoljnije od prognoziranog, razlog može da bude pogrešna procena geološko-tehničkih uslova ili netačno vrednovanje faktora uticaja i/ili parametara. Uzrok odstupanja treba da se analizira. Ako se radi o netačnoj proceni faktora uticaja, parametri treba da se modifikuju na odgovarajući način, a takva modifikacija mora da se adekvatno argumentuje i dokumentuje u okviru dopune geomehaničkog planiranja.

Ako se stabilnost stenske mase neočekivano smanji, potporni sistem treba da se ojača. To se delimično može obaviti naknadno (npr. naknadno sidrenje, ugradnja privremenog podnožnog svoda i sl.), a ponekad ojačanje potpornog sistema na sledećoj deonici sa sobom povlači željene učinke na već otkopanoj deonici. Prognozirani model u svakom slučaju mora da se dopuni, a kada su odstupanja veća, dopunjava se i osnovni građevinsko-tehnički konstrukcioni plan radova za iskopavanje tunela.

### *Dopuna planiranja*

U okviru planiranja podzemnog građevinskog objekta na osnovu prikupljenih rezultata istraživanja treba da se usvoje brojne pretpostavke i prognoze koje se koriste pri geomehaničkom planiranju i značajne su za određivanje stavki u osnovnom građevinsko-

tehničkom konstrukcionom planu radova za iskopavanje tunela i u tenderskoj dokumentaciji (npr. distribucija potpornih tipova i sl.).

Dok tenderska dokumentacija predstavlja ključni deo ugovora o gradnji tunela i ima odlučujuću ulogu pri opisu i obračunu radova, osnovni građevinsko-tehnički konstrukcioni plan radova za iskopavanje tunela i pripadajući geomehanički izveštaj predstavljaju osnov za planiranje i detaljno određivanje građevinsko-tehničkih mera koje se vrše na samoj lokaciji.

Za postizanje cilja, koraci geomehaničkog planiranja (opisani u geomehaničkom izveštaju) treba tokom izgradnje da se redovno dopunjavaju novim podacima.

To važi kako za određivanje vrsta stenskih masa i dodeljivanje, odnosno kalibrisanje ključnih parametara, tako i za određivanje tipa ponašanja stenske mase i eventualno smisljeno usavršavanje kategorija parametara ili pak dodavanje novih. Svi ovi koraci koriste se za poboljšanje geološko-tehničkog prognoziranog modela.

Ovo posebno važi za osnovni građevinsko-tehnički konstrukcioni plan radova za iskopavanje tunela, jer njegovo prilagođavanje trenutnim uslovima u tunelu ima izuzetno važnu ulogu za bezbedno i ekonomično izvođenje mera.

Geotehničar odn. za to ovlašćeni inženjer je dužan da projektanta bez odlaganja obavesti o značajnijim odstupanjima od aktuelnih geološko-tehničkih uslova (naročito po pitanju vrste stenske mase i tipa ponašanja stenske mase) i da u saradnji sa geologom i licima nadležnim za gradilište dostavi detaljan pisani izveštaj sa prikazom svih relevantnih informacija.

Nakon toga, projektant je dužan da na adekvatan način dopuni osnovni građevinsko-tehnički konstrukcioni plan radova za iskopavanje tunela (nakon što su činjenice obrazložene) i da to dokumentuje u dopunskom izveštaju koji prilaže uz geomehanički izveštaj.

#### 11.2.3.2.4 Upravljanje geotehničkim rizicima

U okviru geomehaničkog planiranja pitanje stabilnosti, s obzirom na očekivane uslove stenske mase i granične uslove, kako u fazi planiranja tako i u fazi gradnje ima prilično različitu ulogu, koja, međutim, u određenim



slučajevima može da bude izrazito merodavna.

Statičko-konstrukciono inženjerstvo definiše bezbednost na osnovu uglavnom poznatih opterećenja i otpornosti, koje mogu dobro da se opišu i da se izvedu na osnovu korišćenih građevinskih materijala i jasno definisane konstrukcije. Opterećenja i otpornost izračunavaju se sa delimičnim rezervama, na taj način su u obzir uzete statistički poznate oscilacije karakteristika, čime se verovatnoća rušenja svodi na minimum.

Suprotno tome, za gradnju podzemnih prostora uglavnom je karakterističan veći obim uslova građevinskog područja, a time i opterećenja, statičkog sistema i otpornosti. Ni iscrpnim istraživanjima po pravilu ne mogu da se obezbede dovoljno precizne definicije graničnih uslova koje bi po pouzdanosti i razgraničenju mogle da se porede sa ostalim inženjerstvom. Zato je ponekad potrebno da se taj nedostatak, zbog nemogućnosti da se unapred odredi dovoljno precizna verovatnoća rušenja, nadoknadi geotehničkim sistemom upravljanja rizicima.

U okviru geotehničkog sistema upravljanja rizicima treba da se izrade koncepti i uređenja naročito za sledeće tri oblasti:

- koncept dimenzionisanja za određivanje podupiranja, građevinskog postupka i karakterističnih količina za ocenjivanje stabilnosti u skladu sa uslovima građevinskog područja koji su poznati pre izvođenja,
- koncept nadzora, zajedno sa svim tehničkim i organizacionim merama predostrožnosti, za svrhe tekućeg poređenja činjeničnog stana sa planiranim,
- koncept upravljanja u slučaju odstupanja uslova građevinskog područja u obimu koji je veći od očekivanog – u slučaju kako povoljne, tako i nepovoljne tendencije.

#### *Koncept dimenzionisanja (polazni osnov)*

Geomehaničko planiranje podzemnih građevinskih objekata, obuhvata 1. fazu planiranja (pre početka izgradnje), međutim, potrebno je da se i tokom izvođenja stalno prilagođava i dopunjava. Da bi se omogućilo racionalno izvođenje tog procesa, potrebno je da se kao osnova za specifične granične uslove projekta upotrebi prilagođen koncept dimenzionisanja.

#### *Koncept nadzora tokom izvođenja (kontrola)*

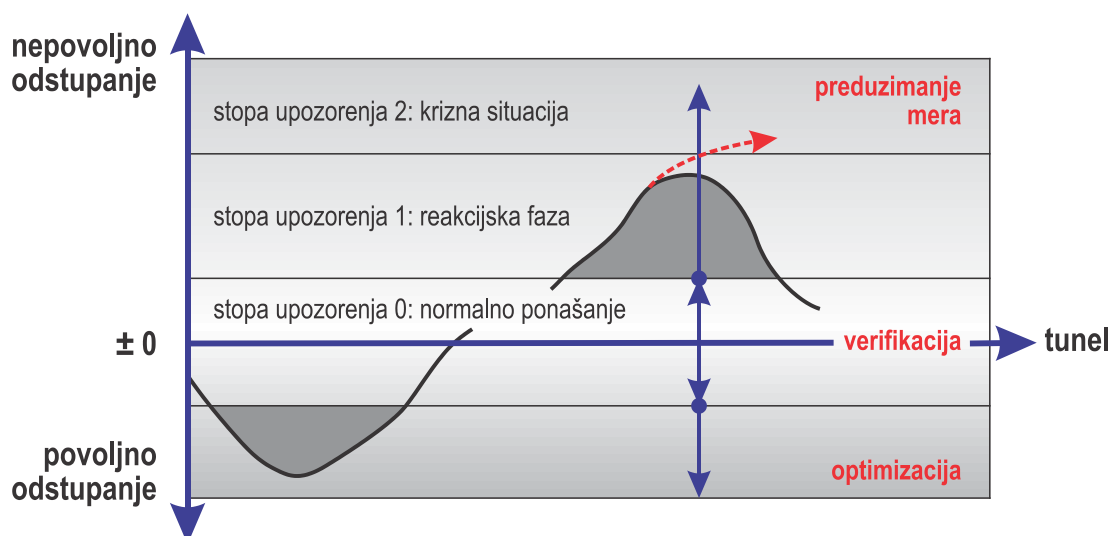
Pored nedvosmislenih zahteva koji su određeni osnovnim građevinsko-tehničkim konstrukcionim planom radova za iskopavanje tunela, geotehničko upravljanje rizicima se tokom izvođenja gradnje prvenstveno oslanja na sledeće:

- adekvatna organizacija gradilišta,
- tehnički preduslovi za kvalitativno obuhvatanje karakteristika stenske mase i ponašanje sistema,
- efikasan protok informacija i organizovano izveštavanje.

#### *Koncept upravljanja rizicima u slučaju odstupanja*

Upravljanje odstupanjima tokom izvođenja gradnje treba da usvoji uređenja i mere predostrožnosti za najmanje sledeće situacije:

- ponašanje sistema unutar očekivanog okvira,
- stalno poređenje sa odredbama osnovnog konstrukcionog plana radova iskopavanja (verifikacija),
- ponašanje sistema povoljnije od očekivanog,
- ekonomska optimizacija sa prilagođavanjem osnovnog konstrukcionog plana radova na iskopavanju,
- ponašanje sistema nepovoljnije od očekivanog: preduzimanje mera u okviru alarmnog sistema i izvođenje kriznog upravljanja.



Slika 11.2.5: Primer stepena alarmantnosti i nivo dejstva geotehničkog bezbednosnog menadžmenta

## 11.2.4 PODZEMNI ISKOPI

### 11.2.4.1 Opšte

U ovom poglavlju prikazana je klasifikacija stenskih masa i različitih tipova ponašanja stenskih sa aspekta izgradnje podzemnih prostora, a sa naglaskom na geotehničke karakteristike stenskih masa u području uticaja gradnje tunela. U većini zemalja određivanje razreda iskopavanja je koncipirano i određeno nacionalnim propisima i standardima. Uopšteno posmatrano, klasifikacija stenskih masa je preuzeta iz austrijskog standarda ÖNORM B 2203 (izdanje iz oktobra 2001).

Takva kategorizacija stenskih masa ne uzima u obzir samo karakteristike stenskih masa u okruženju podzemnog prostora nego omogućava i procenu očekivanih deformacija, zahteva za podelu profila iskopavanja na pojedine deonice, omogućava procenu tempa napredovanja, rasporeda radnih faza prilikom iskopavanja, uticaja podzemne vode i procenu intenziteta ugradnje potpornih elemenata.

U planovima su prikazane vrste potpornih elemenata i mogući tempo napredovanja iskopavanja za svaki tip ponašanja stenske mase. Promenljivi geotehnički uslovi gradnje i nehomogene karakteristike stenskih masa često zahtevaju prilagođavanje intenziteta potpornih mera u skladu sa stvarnim uslovima na gradilištu. Potporne mere, koje

su prikazane u planovima za određeni tip, odnose se na tip ponašanja stenske mase. Broj sidara može da se menja, kao i pravac sidrenja, što mora da bude prilagođeno preovlađujućem položaju diskontinuiteta i slojevitosti. Povećanje ili smanjenje debljine obloge od mlaznog cementnog betona i armaturnih mreža zavisi od geotehničkih uslova na gradilištu. Na sličan način je određena i udaljenost između čeličnih potpornih lukova (TH lukovi, I-profil, rešetkasti nosači), koja mora da odgovara tempu napredovanja iskopavanja.

### 11.2.4.2 Matrica

Izvođenje iskopavanja i podupiranja tunela po sistemu matrice zasnovano je na austrijskom standardu ÖNORM B 2203-1: Untertagebauarbeiten - Werksvertragsnorm, Teil 1: Zyklischer Vortrieb. – decembar 2001, koji obrađuje način definisanja potpornih tipova, kao i merenje i plaćanje izvedenih radova.

Suština sistema je u tome da se na osnovu definisanja tipova stenske mase, uzimanjem u obzir količine vode, orijentacije struktura i primarnih napona i vrednosti, oblika i položaja otvora, određuju tipovi ponašanja stenske mase. Iz tipova ponašanja stenske mase proizlaze potporni tipovi koji predstavljaju zbir potpornih elemenata koji u obliku mera treba da se izvedu radi obezbeđivanja stabilnosti podzemne gradnje.

Pojedinačni potporni tip je u matrici predstavljen kao pravougaonik, kod koga prostiranje koordinate predstavlja područje dužina koraka iskopavanja unutar tog tipa, a prostiranje apscise područje potpornog broja.

Potporni broj se određuje na osnovu tabele kojom su određeni faktori ponderisanja za pojedinačne potporne elemente. Potporni broj je koeficijent između zbira produkata količina potpornih elemenata na zbirni metar

tunela sa faktorima ponderisanja i računске površine iskopa. Faktori ponderisanja se preuzimaju iz standarda ÖNORM B 2203-1 12/2001 – tabela 11.2.7.

U potporni broj / potporni tip uključuju se potporni elementi i potporne mere (prema tabeli 11.2.7) koji su ugrađeni na čelu iskopa, odnosno najviše 20 m iza čela iskopa.

Tabela 11.2.5: Primer matrice potpornih tipova za kalotu ili kalotu i stepenicu (ÖNORM B 2203-1)

PRVI BROJ RAZVRSTAVANJA	iskopni korak do		DRUGI BROJ RAZVRSTAVANJA											
	kalota ili kalota + stepenica	STEPENICA	POTPORNI BROJ											
			1	2	3	4	5	6	7	8	9			
1	bez ograničenja	određeno projektom												
2	4,0 m													
3	3,0 m													
4	2,2 m					▲ 4/2,4	▲ 4/3,6							
5	1,7 m						▲ 5/4,5	▲ 5/6,1						
6	1,3 m							▲ 6/5,5	▲ 6/7,5					
7	1,0 m													
8	0,8 m													
9	0,6 m													

Tabela 11.2.6: Primer matrice potpornih tipova za podnožni svod (ÖNORM B 2203-1, **tabela 2**)

PRVI BROJ RAZVRSTAVANJA	Iskopni korak	DRUGI BROJ RAZVRSTAVANJA			
		POTPORNI BROJ			
		Otvoreno dno	Podnožna ploča	Podnožni svod sa uzdužnom razdelom	Podnožni svod bez uzdužne razdele
		1	2	3	4
1	Bez ograničenja	1/1			
2	36,0 m		2/2		
3	24,0 m		3/2		
4	12,0 m		4/2	4/3	4/4
5	6,6 m				5/4
6	4,4 m				
7	2,2 m				

Tabela 11.2.7: Vrednovanje potpornih elemenata i dodatnih mera (ÖNORM B 2203-1)

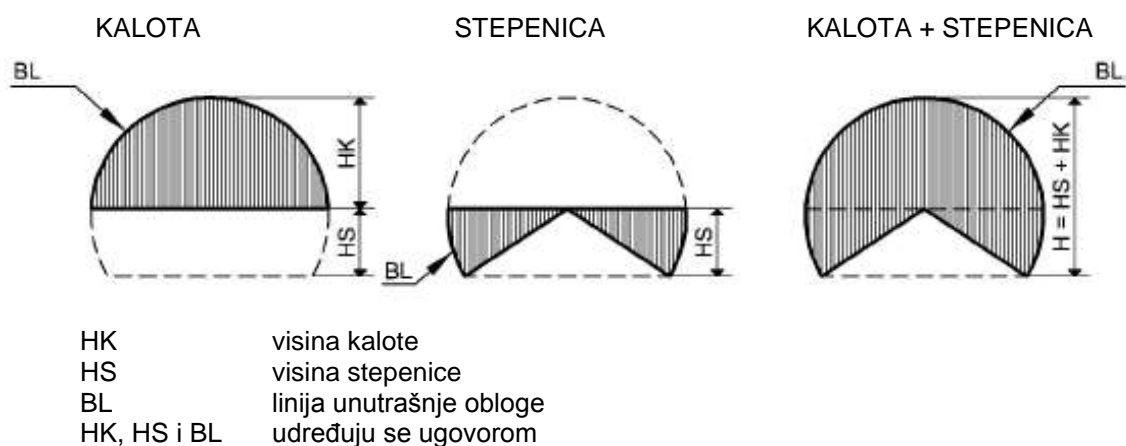
Potporni element (na 1 m tunela)	Jedinica	Količina	Faktor	Delimič. Br.	Napomene
<b>Sidro</b>	Swellex ili slično	m	<b>0,8</b>		
	SN sidro u malteru	m	<b>1,1</b>		
	Samonavajno injekciono sidro	m	<b>1,7</b>		
	Injekciono sidro	m	<b>2,0</b>		
	Prednapregnuto sidro	m	<b>2,5</b>		
<b>Sidra u čelu</b>	Broj sidara u koraku	kom	<b>8,0</b>		1
	Sidrena ploča bez prednaprezanja	kom	<b>1,7</b>		2
	Sidrena ploča sa prednaprezanjem	kom	<b>5,0</b>		2
<b>Koplja</b>	Utisnuti rebrasti štapovi	m	<b>0,5</b>		
	Rebrasti štapovi u bušotini	m	<b>0,6</b>		
	Rebrasti štapovi u malteru	m	<b>0,9</b>		
	Samonavajna injekciona koplja	m	<b>1,3</b>		
	Injekciona koplja	m	<b>1,6</b>		
<b>Injektiranje</b>	Injektiranje >10 kg na m sidra, koplja, pilota	kg	<b>0,1</b>		
<b>Čelična mreža</b>	Spoljašnja strana sa lukom	m <sup>2</sup>	<b>1,0</b>		3
	Unutrašnja strana sa lukom	m <sup>2</sup>	<b>1,5</b>		3
	Spoljašnja strana bez luka	m <sup>2</sup>	<b>2,0</b>		3
	Privremeni podnožni svod	m <sup>2</sup>	<b>0,8</b>		3
	Dodatno armiranje, čelo iskopa	m <sup>2</sup>	<b>2,0</b>		3,4
<b>Čelični luk</b>	Čelični luk	m	<b>2,0</b>		
<b>Mlazni beton</b>	Kalota i stepenica	m <sup>3</sup>	<b>20,0</b>		5
	Podnožni svod, privremeni podnožni svod	m <sup>3</sup>	<b>12,0</b>		5
	Čelo	m <sup>3</sup>	<b>14,0</b>		5
	Popunjavanje klina i viška iskopavanja	m <sup>3</sup>	<b>14,0</b>		5,6
<b>Deformacioni elementi</b>	Bez deformacionih elemenata	m	<b>3,5</b>		7
	Sa deformacionim elementima	m	<b>5,0</b>		7
<b>Talpe</b>	Talpe	m <sup>2</sup>	<b>5,5</b>		
<b>Piloti na peti kalote</b>	Piloti ≤ 38 mm	m	<b>4,5</b>		
	Piloti > 38 mm	m	<b>5,0</b>		
<b>Fazno iskopavanje</b>	Fazno iskopavanje	kom	<b>22,0</b>		8
<b>Iskopavanje pete kalote – proširenje</b>	Iskopavanje pete kalote – proširenje	m	<b>50,0</b>		9
<b>Iskopavanje privremenog podnožnog svoda</b>	Iskopavanje privremenog podnožnog svoda prilikom napredovanja stepenice	m	<b>50,0</b>		10
<b>Zbir</b>					

## NAPOMENE:

1. Broj postojećih sidara na svakom koraku iskopavanja. Faktorom ponderisanja su u obzir uzeti ugrađivanje, skraćivanje i opterećivanje pri iskopavanju.
2. Broj sidrenih ploča, postavljenih na predmetnom čelu.
3. Teorijske količine, bez uzimanja u obzir prekoračenja u podužnom i poprečnom pravcu
4. Površina situacionog plana, prekrivena armaturom – armatura na spojevima kalota/stepenica i stepenica / podnožni svod se ne procenjuje.
5. Teorijske količine, bez uzimanja u obzir nadprofila i odboja.
6. Punjenje planiranih klinova (pri zabijenim čeličnim talpama itd.) ili popunjavanje priznatih više iskopa na stenskoj strani granične ravni A.
7. Dužni metar deformacionog proreza.
8. Kao površina faznog iskopavanja se priznaje samo fazno iskopavanje kod kojeg se odmah nakon iskopavanja vrši adekvatno podupiranje.
9. Za obe pete kalote, po dužnom metru tunela.
10. Dužina privremenog podnožnog svoda pri predmetnom koraku iskopavanja stepenice, nezavisno od potencijalnih faznih iskopavanja.

Tabela 11.2.8: Područje važenja za drugi broj razvrstavanja (potporni broj)

Korak iskopavanja	Maksimalno važenje za drugi broj razvrstavanja (jedinica podupiranja) kalota	Korak iskopavanja stepenica do	Maksimalno važenje za drugi broj razvrstavanja (jedinica podupiranja) stepenica
Bez ograničenja	± 0,35	Bez ograničenja	0,45
4,0 m	± 0,35		
3,0 m	± 0,45		
2,2 m	± 0,60	3,0 m	0,70
1,7 m	± 0,80		
1,3 m	± 1,00	2,0 m	1,20
1,0 m	± 1,30		
0,8 m	± 1,60	1,0 m	2,10
0,6 m	± 2,10		



Slika 11.2.6 Računske površine (šematski prikaz)

### 11.2.4.3 Razumevanje matrice

Sistem matrice u ovom ugovoru predstavlja teoretski model za plaćanje izgradnje tunela u obliku paušala.

Način plaćanja se određuje sledećim faktorima:

- Paušalno plaćanje za iskopavanje i određeni potporni tip, koji je određen prvom ili drugom karakterističnom vrednošću (područje dužina koraka iskopavanja, potporni broj).
- Paušalno plaćanje rada za potporne elemente koje je preneseno na stavke iskopavanja.
- Ugovoreno vreme za izvođenje je varijabilno i zavisi od zatečenih uslova.
- Gradnje koje se odražavaju u stvarnoj raspodeli potpornih tipova, koja se generalno razlikuje od tenderske. Na taj način se vremenski uslovljeno plaćanje gradilišta prilagođava stvarnim uslovima stenske mase.

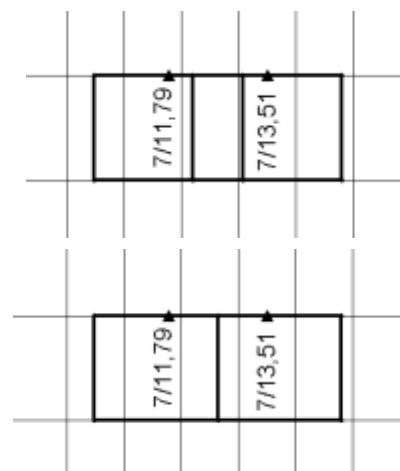
- Dodatna plaćanja za otežani rad usled doticanja vode iz stenske mase.
- Plaćanje za stvarno ugrađene potporne elemente s obzirom na stavku podupiranja.

#### 11.2.4.3.1 Važenje potpornog tipa

- Potporni tip se prema standardu ÖNORM B2203 definiše izračunavanjem potpornog broja (druga karakteristična vrednost) i uzimanjem u obzir prve karakteristične vrednosti (područje dužina koraka iskopavanja).
- Pri izračunavanju potpornog broja u obzir se uzimaju potporni elementi definisani samim potpornim tipom, kao i potporni elementi dodatnih potpornih mera.
- U slučaju da se dve čelije (potpornih tipova) u matrici poklapaju, kao gornja vrednost nižeg potpornog tipa odn. donja vrednost višeg potpornog tipa uzima se srednja vrednost preklapanja te dve čelije (videti primer ispod).

Primer:

Potporni tipovi:	7/11,79	7/13,51
Donja granica:	10,49	12,21
Gornja granica:	13,09	14,81
Preklapanje:	12,21 – 13,09	
Srednja vrednost preklapanja:	12,65	
Važeća donja granica:	10,49	<b>12,65</b>
Važeća gornja granica:	<b>12,65</b>	14,81



#### 11.2.4.3.2 Određivanje parametara napredovanja tokom iskopavanja

Određivanje koraka iskopavanja služi kao osnova za plaćanje i mora da se zavede u odgovarajući obrazac (obrazac za određivanje potpornog tipa – tabela 11.2.7). Potporni broj je važeći ako je izračunat na čelu iskopavanja tokom određivanja tipova potpora i elemenata ili naknadno u kancelariji.

Navedene količine za računsku površinu i platnu liniju 1a su fiksne količine. Pri potencijalnoj promeni debljine unutrašnje obloge, računska površina ostaje ista.

Vrednovanje stepenice se vrši nezavisno od toga da li se iskopavanje stepenice vrši u delovima ili u celini. Korak iskopavanja i potporni tip za podnožni svod moraju da se odrede pre izvođenja istog.

Izvođač je dužan da u posebnom delu tehničkog izveštaja odredi (ponudi) brzinu napredovanja odn. vremenske norme

napredovanja. Ponuđene vrednosti čine sastavni deo ugovora.

Niše i prolazi moraju da se izvedu naknadno (bez površine iskopavanja).

#### 11.2.4.3.3 Određivanje cena za netenderske potporne tipe

U jednostavnim slučajevima odstupanja upotrebljenih potpornih tipova od tenderskih potpornih tipova, zajedno sa njihovom tolerancijom u matičnom polju, standard ÖNORM 2203/1 sistematski omogućava određivanje novih jedinstvenih cena iskopavanja i ugovorne brzine napredovanja odn. vremenskih normi napredovanja.

Prema standardu ÖNORM B2203-1 ekstrapoliran može da bude najviše jedan tenderski potporni tip levo, odnosno desno.

##### 11.2.4.3.3.1 Ekstrapolacija kada je u horizontalnom redu matičnog polja samo jedan potporni tip:

Ako je u tenderskoj dokumentaciji predviđen samo jedan potporni tip u horizontalni matrice, treba se pridržavati sledećeg postupka:

Ekstrapolacija ponuđene jedinstvene cene mora da se izračuna na sledeći način:

$$F = 1 + \left[ \left( \frac{B}{A} \right) - 1 \right] * 0,6$$

$$UP_{new} = UP_{old} * F$$

$$V_{new} = \frac{V_{old}}{F}$$

A	2. karakteristična vrednost ponuđenog polja matrice
B	2. karakteristična vrednost novoodređenog polja matrice
UP <sub>new</sub>	ekstrapolirana jedinstvena cena
UP <sub>old</sub>	jedinstvena cena tenderskog potpornog tipa
V <sub>new</sub>	ekstrapolirana ugovorena brzina iskopavanja
V <sub>old</sub>	ugovorena brzina iskopavanja tenderskog potpornog tipa

##### 11.2.4.3.3.2 Ekstrapolacija kada se dva ili tri potporna tipa nalaze tačno jedan pored drugog u horizontalnom redu matrice

Ekstrapolacija treba da se izvede kao što to prikazuje primer B2 standarda ÖNORM B2203-1.

Primer ekstrapolacije za dva potporna tipa u horizontalnom redu matrice:

Potporni tipovi:

5/4,5      5/6,1

Ponuđene jedinstvene cene:

41,--      52,--      €/m<sup>3</sup>

Ponuđene jedinstvene brzine:

2,0      1,7      m/dan

Drugi broj razvrstavanja (potporni broj) pri ugradnji više potpornih elemenata iznosi 8,1.

Sledeći veći drugi broj razvrstavanja (jedinica podupiranja) iznosi:

$$6,1 + 2 * 0,8 = 7,7$$

Za potporni tip 5/7,7 cena iznosi:

$$52,-- + (52 - 41) = 63,-- \quad €/m^3$$

Za potporni tip 5/7,7 brzina iznosi:

$$1,7 - (2,0 - 1,7) = 1,40 \text{ m/dan}$$

Primer ekstrapolacije za tri potporna tipa u horizontalnom redu matrice:

Potporni tipovi:

5/4,5      5/6,1      5/7,7

Ponuđene jedinstvene cene:

41,--      52,--      69,--      €/m<sup>3</sup>

Ponuđene jedinstvene brzine:

2,0      1,7      1,3      m/dan

Drugi broj razvrstavanja (potporni broj) pri ugradnji više potpornih elemenata iznosi 9,1.

Sledeći veći drugi broj razvrstavanja (potporni broj) iznosi:

$$7,7 + 2 * 0,8 = 9,3.$$



Kao aproksimativna funkcija koristi se kvadratni polinom.

Ekstrapolacijska kriva za jedinstvenu cenu novog potpornog tipa je za dati primer sledeća:

$$UP_{new} = 1,1719 * B^2 - 5,5469 * B + 42,23$$

Ekstrapolacijska kriva za jedinstvenu brzinu novog potpornog tipa je za dati primer sledeća:

$$V_{new} = - 0,0195 * B^2 + 0,0195 * B + 2,3076$$

- B – potporni broj novog potpornog tipa
- Za potporni tip 5/9,3 cena iskopa iznosi: 92,00 €/m<sup>3</sup>
- Za potporni tip 5/9,3 brzina iznosi: 0,80 m/dan

Ako su u tenderskoj dokumentaciji predviđena više od tri potporna tipa u jednoj horizontali matrice, pri ekstrapolaciji za određivanje novog potpornog tipa treba uzeti u obzir tri tenderska susedna potporna tipa.

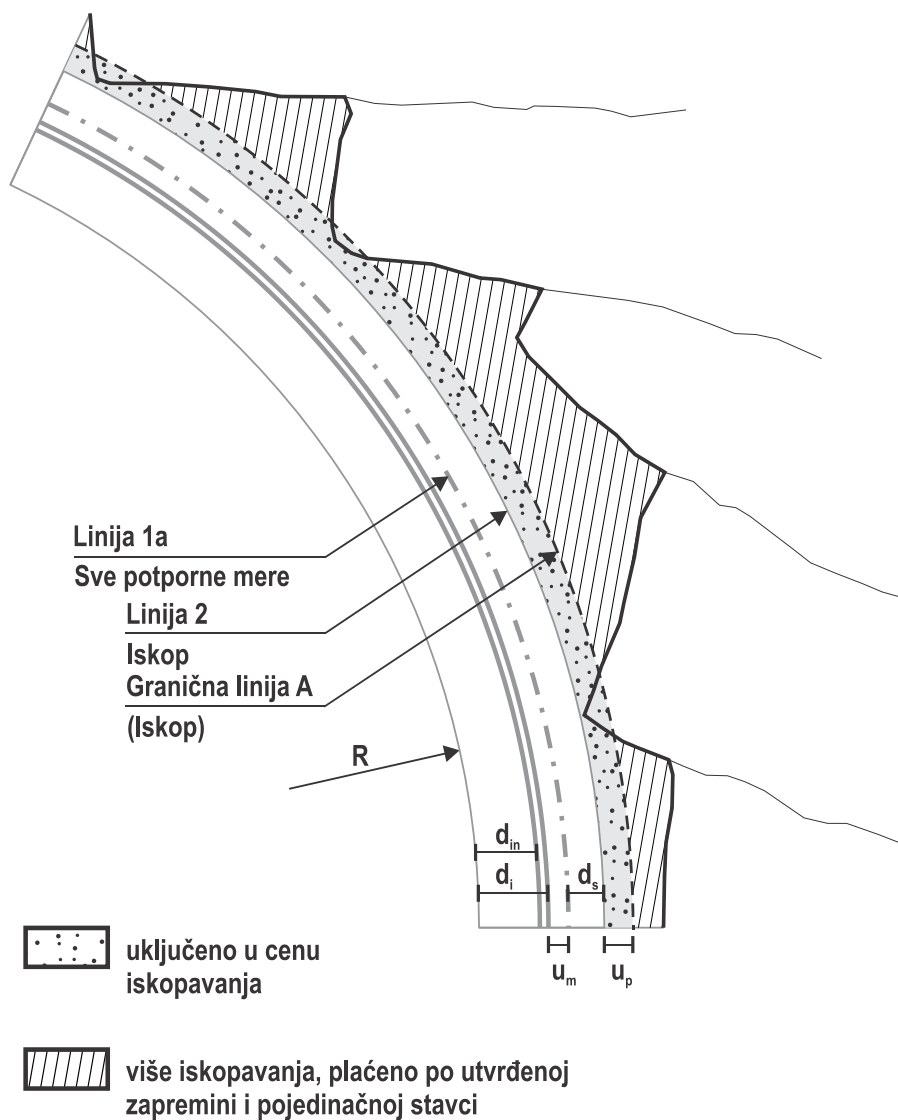
#### 11.2.4.3.4 Linije za obračunavanje iskopavanja i potpornih elemenata

##### 11.2.4.3.4.1 Pre deformacija

U zavisnosti od kvaliteta stenske mase, treba da se izvede prikladno povećanje teoretskog profila iskopavanja da bi se obezbedilo dovoljno prostora za radijalne deformacije i tolerancije izvođenja.

Linija iskopavanja 1a – crta je određena za kompenzaciju radijalnih deformacija  $U_m$  za različite tipove potpore. Za svaki tip potpore date su deformacije koje odgovaraju deformacionim tolerancijama  $U_m$ .

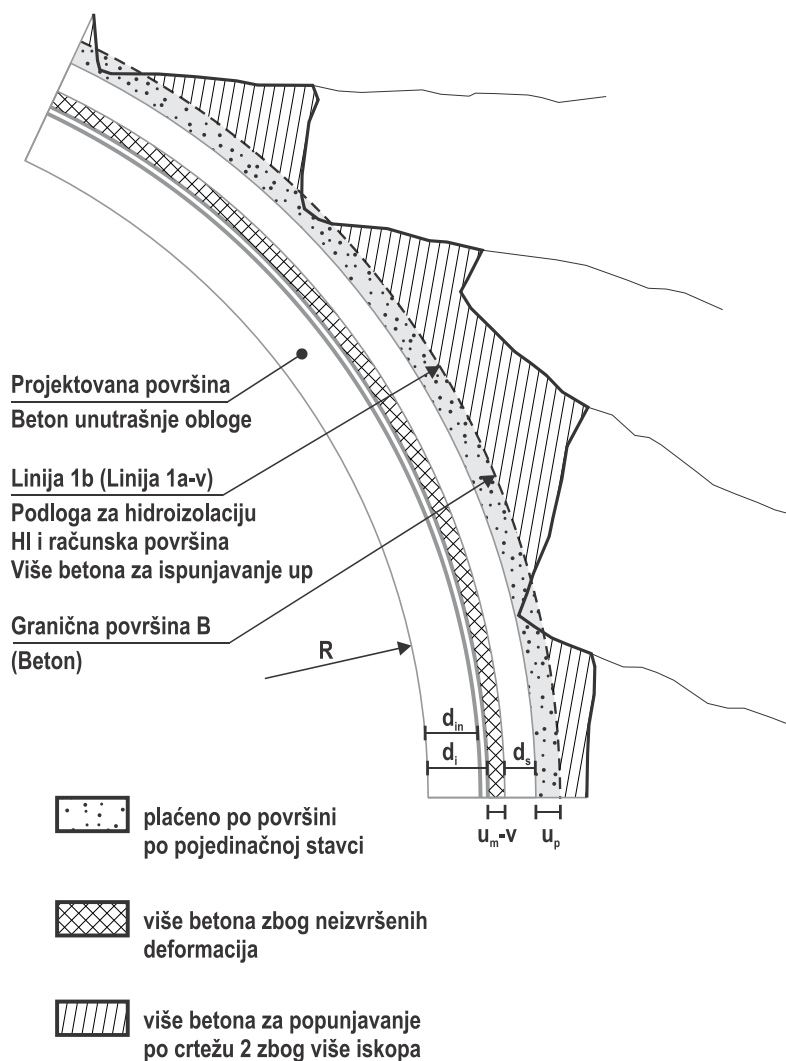
Vrednosti prikazane na pripadajućim slikama ili u tenderskim dokumentima za očekivane deformacije  $U_m$  mogu da se prilagode tako što se uzmu u obzir stvarne deformacije u skladu sa iskustvom stečenim tokom iskopavanja. Linija A predstavlja minimalni profil iskopavanja. Stenska masa generalno ne sme da prelazi tu liniju tokom iskopavanja. To je dozvoljeno samo lokalno, za isturene ivice i uglove zdrave stenske mase, u granicama tolerancije koje iznose najviše 2/3 minimalne debljine mlaznog cementnog betona.



- R radijusi svetlog poprečnog profila  
 $d_i$  debljina unutrašnje obloge sa izravnanjem za hidroizolaciju i hidroizolacija  
 $d_{in}$  debljina unutrašnje obloge  
 $d_s$  određena debljina mlaznog betona kao potporni element  
 $U_p$  tokom tendera određuje naručilac (naručilac ograničava na do 5 cm za lučno dno i do 5 cm za kalotu i stepenicu)  
 $U_m$  nadvišenje koje tokom radova iskopavanja odredi naručilac  
 $V$  izvršene deformacije stenske mase

Slika 11.2.7: Obračunske linije: iskopavanje i potporni elementi – prikaz pre deformacija

## Nakon deformacija



- R radijusi svetlog poprečnog profila  
 $d_i$  debljina unutrašnje obloge sa izravnanjem za hidroizolaciju i hidroizolacija  
 $d_{in}$  debljina unutrašnje obloge  
 $d_s$  određena debljina mlaznog betona kao potporni element  
 $U_p$  tokom tendera određuje naručilac  
 $U_m$  nadvišenje koje tokom radova iskopavanja odredi naručilac  
 $V$  izvršene deformacije stenske mase

Slika 11.2.8: Obračunske linije: beton i više betona – prikaz po izvršenju deformacija

## 11.2.4.3.5 Troškovi i vreme gradnje

Popis radova mora da se podeli na troškove gradilišta i građevinskog materijala. Dalje, troškovi gradilišta moraju da se podele na jednokratne troškove, troškove zbog obustave rada i vremenski zavisne troškove u najmanje sledeće faze kao na primer:

- T1: vreme od početka izgradnje do početka iskopavanja,

- T2: vreme od početka do završetka podzemnog iskopavanja,
- T3: vreme za izvođenje radova betoniranja,
- T4: završni radovi nakon ugradnje unutrašnje obloge.

Vremenske vrednosti, podela prema svakom radilištu i preklapanje faza rada treba da se odrede za svaki projekat posebno. Vremena T1, T3 i T4 predstavljaju fiksno vreme. Vreme

T2 je varijabilno u odnosu na vremenske norme svakog potpornog tipa posebno. Za određivanje vremena gradnje moraju da se opišu faze gradnje i da se izradi vremenski model gradnje. U slučaju kada postoji više radilišta na kojima se istovremeno radi, u obzir treba uzeti preklapanje tih radova. Potrebno je da se definiše zavisnost radova i da se to prikaže na kritičnom putu gradnje.

### 11.2.5 METODE ISKOPAVANJA

#### 11.2.5.1 Opšte

Za gradnju tunela može da se koristi svaka metoda koja je uspešno testirana u uporedivim uslovima i kojom se obezbeđuje:

- ispunjavanje svih funkcionalnih zahteva glavnog objekta i njegovih pomoćnih delova,
- propisani uslovi stabilnosti tokom gradnje i korišćenja objekta,

- odgovarajuća bezbednost podzemnog prostora u svim fazama radova,
- propisana bezbednost i zdravlje ljudi koji izvode sve vrste radova tokom gradnje objekta,
- pravovremene i adekvatne mere u slučaju povećanih deformacija,
- dovoljno mali uticaj gradnje tunela na površinu u naseljenim područjima i druge podzemne objekte u okruženju,
- ispunjavanje drugih propisanih uslova za konkretni podzemni objekat.

#### 11.2.5.2 Metode gradnje tunela

Glavne metode gradnje tunela prikazane su u tabeli 11.2.9. Izbor metode zavisi od uslova gradnje i određuje oblik poprečnog preseka tunela.

Tabela 11.2.9: Glavne metode gradnje tunela

Metoda izgradnje	Primer primene	Oblik poprečnog preseka tunela	Napomena
U otvorenoj građevinskoj jami (pokriveni ukop)	Kod niskog nadsloja i/ili u naseljenoj sredini	Često pravougaon, može da bude i u obliku potkovice	*
Klasična konvencionalna metoda (postepeno iskopavanje)	Zbog prilagodljivosti veoma široka primena	Često u obliku potkovice ili kružan, može da bude eliptičan, generalno veoma prilagodljiv	
Iskopavanje mašinom za bušenje celokupnog profila tunela (TBM) – otvoreni sistem	Dugački tuneli u relativno homogenim geološkim uslovima	Kružni	
Iskopavanje mašinom za bušenje celokupnog profila tunela (TBM) – zatvoreni sistem	Dugački tuneli u homogenim geološkim uslovima, meko tlo	Kružni	Obloga je duž celog tunela ista.
Potopljeni tunel	Ispod vodenih tokova	Pravougaoni, kružni	

\* Takođe i varijanta predhodno izvedenog armiranobetonskog svoda iznad kalote u otvorenoj građevinskoj jami

Izbor između pojedinačnih metoda pre svega zavisi od:

- geometrijskih zahteva (dužine i poprečnog profila tunela, visine natkrivenosti i oblika površine),
- geoloških i geotehničkih uslova na širem području planirane gradnje,
- drugih prirodnih okolnosti (npr. tunel ispod vodenog toka),

- planiranja korišćenja prostora iznad tunela ili već iskorišćenog prostora, koje je povezano sa osetljivošću eventualnih objekata na deformacije koje bi mogle da nastanu tokom gradnje tunela,
- rezultata ekonomske procene gradnje,
- procene rizika gradnje i drugih okolnosti (osetljivost na miniranje, buku).

Tabela 11.2.10 Glavne metode gradnje tunela u skladu sa geološkim i geotehničkim uslovima na širem području planiranja gradnje

Vrsta tla / stena	Tla	Meka stena	Tvrda stena
Mehaničko iskopavanje			
Ručno	XXXXXX		
Bager	XXXXXXXXXXXXXXXXXX		
Bušilica		XXXXXXXXXXXXXXXXXX	
TBM – sa štitom	XXXXXXXXXXXXXXXXXX		
TBM – otvorene			XXXXXXXXXXXXXXXXXX
Bušenje i miniranje		XXXXXXXXXXXXXXXXXX	

### 11.2.5.3 Konvencionalne metode gradnje tunela

Definicija „konvencionalna metode gradnja tunela“ je priličnoj meri arbitrarna – proizvoljna i istovremeno je predmet različitih tumačenja, u zavisnosti od koncepta na koji se odnosi.

U slučaju da se pomenuti koncept zasniva na nizu mašina za iskopavanje, pojam konvencionalne metode gradnje može da se odnosi na bilo koju metodu osim na metodu iskopavanja rotacionim bušilicama (za iskopavanje profila tunela u potpunosti) – TBM.

Konvencionalna metoda gradnje tunela se definiše kao izrada podzemnih otvora bilo kog oblika kroz ponavljanje cikličnih procesa gradnje koji se sastoje od sledećih faza

- iskopavanje tunela bušenjem i miniranjem ili korišćenjem mašina za mehaničko iskopavanje, osim rotacionih bušilica za iskopavanje profila u potpunosti – TBM,
- utovar i odvoženje iskopanog materijala,

- ugradnja potpornih elemenata osnovne podgradnje (sekundarna podgradnja), kao što su:
  - čelični lukovi ili rešetkasti nosači,
  - mlazni beton (sa ili bez vlakana),
  - armaturna mreža,
  - stenska sidra.

### 11.2.5.4 Načela konvencionalne metode gradnje tunela

Konvencionalna metoda gradnje tunela zasniva se na ponavljajućem – cikličnom radnom procesu izvođenja ponovljenih koraka iskopavanja posle kojih uvek sledi izrada odgovarajuće osnovne podgradnje. Dužina iskopnih koraka i obim osnovnog podupiranja zavise od datih uslova u stenskoj masi. Svaki pojedinačni radni ciklus mora da izvodi iskusna ekipa tunelskih radnika (rudara) iz podršku standardne i/ili posebne opreme i mašina.

U konvencionalnoj metodi gradnje tunela obično se koriste standardne mašine i uređaji, pa je prilaz do čela iskopa najčešće

dostupan. Metoda je veoma prilagodljiva u slučajevima ili na područjima koja zahtevaju promene u podupiranju zbog izmenjenih statičkih uslova ili promena u projektu.

Konvencionalna metoda gradnje tunela u vezi sa širokim spektrom pomoćnih dodatnih tehnologija iskusnim rukovodiocima projekata pruža mogućnost najprikladnijeg izbora sa ciljem postizanja bezbednog i ekonomičnog napredovanja tunela i u slučaju promenljivih i nepredviđenih geotehničkih uslova. Metoda omogućuje prilagođavanje izmenjenim uslovima u oba slučaja, bilo da se uslovi poboljšaju ili pogoršaju u odnosu na predviđeno stanje. Ovakva prilagodljivost u brojnim projektima dovodi do toga da konvencionalna metoda gradnje tunela postane najprikladnija.

Konvencionalna metoda gradnje omogućuje kako gradnju linijskih tunela, kao što su npr. železnički, putni i hidrotehnički tuneli, tako i podzemnih mašinskih odeljenja hidroelektrana, podzemnih skladišta, stanica podzemne železnice i železničkih stanica. Podzemna gradnja može da se odvija na maloj dubini (plitki tuneli) ili da bude veoma natkrivena u stabilnim ili veoma opterećenim geotehničkim uslovima, kao i u uslovima zasićenosti vodom ili u suvim uslovima gradnje.

Konvencionalna metoda gradnje tunela je najpovoljniji izbor u projektima koji se karakterišu visokom promenljivošću geotehničkih uslova ili većim odn. češćim promenama oblika podzemnih prostora.

Konvencionalna metoda gradnje tunela omogućuje:

- mogućnost velikog prilagođavanja oblika (poprečnog profila) podzemnih prostora,
- bolje upoznavanje sa geotehničkim uslovima gradnje koje se postiže sistematičnim istraživačkim bušenjem ispred čela iskopa tunela,
- veću prilagodljivost metode iskopavanja u skladu sa zatečenim stenskim uslovima,
- veću prilagodljivost redosleda iskopavanja u skladu sa zatečenim stenskim uslovima,
- lakša optimizacija osnovne podgradnje primenom posmatračke metode dimenzionisanja i
- veću prilagodljivost u izboru dodatnih tehnoloških rešenja u skladu sa zatečenim stenskim uslovima gradnje.

Konvencionalna metoda gradnje tunela je naročito pogodna za:

- zahtevne stenske uslove koji su skloni čestim promenama,
- projekte u kojima se naglašeno menja oblik poprečnog preseka,
- projekte visokog rizika od prodiranja vode pod visokim pritiskom,
- projekte sa ograničenim pristupačnošću i
- kratke tunele.

Odgovornost iskusnih inženjera jeste da u skladu sa pravilima struke i ličnim iskustvima izaberu odgovarajuće metode koje omogućuju bezbednu i ekonomičnu gradnju.

#### 11.2.5.5 Oblika prečnega preseka

Oblik i dimenzije poprečnog preseka podzemnog otvora u načelu su određeni:

- zahtevima upotrebljivosti vezanim za namenu podzemnih radova,
- geološko-geotehničkim uslovima i
- aspektima izgradnje.

Zahtevani slobodni profil je ključni činilac u određivanju poprečnog preseka podzemnog otvora. Slobodni profil određuje se u skladu sa aspektima vezanim za opseg i namenu objekta, kao što su na primer železnica, metro, autoput, komunalna infrastruktura, pristup, putevi u slučaju nužde, skladišta, elektrane, podzemna skloništa ili vojne instalacije. Pored namene objekta, odlučujući značaj u izboru poprečnog preseka mogu da imaju dodatni kriterijumi upotrebljivosti koje određuje naručilac. To su:

- zahtevi za dodatnim prostorom za radnu ili sigurnosnu opremu (kablovske instalacije, signalni sistemi, vizuelna signalizacija, rasveta, ventilacija, itd.),
- aerodinamički zahtevi,
- zahtevi vodonepropusnosti u odnosu na dotok vode iz tla ili gubitak vode iz otvora (na primer zahtevi za potpunim zaptivanjem protiv prodiranja podzemne vode pod pritiskom zahtevaju podnožni svod ili čak kružni poprečni presek),
- zahtevi održavanja i
- zahtevi koji proizlaze iz koncepta bezbednosti i evakuacije korisnika tunela (izlazi i putevi u tunelu u slučaju nužde, raspoloživost postrojenja u nuždi).

Oblik i dimenzije poprečnog preseka takođe su uslovljeni uslovima u tlu budući da upravo oni određuju obim zahtevanih mera podgrađivanja u fazi izvođenja radova (tunelska podgrada) kao i u fazi eksploatacije (završna obloga). Nedopustivo smanjenje poprečnog preseka otvora zbog konvergencije tla mora se izbeći dodatnim iskopom u svrhu kompenzovanja deformacije

tla kao i odgovarajućim merama podgrađivanja.

Zone slabe stene, pojava gnječenja ili bubrenja stene i meka tla zahtevaju kružni poprečni presek ili barem poprečni presek potkovičastog oblika uključujući i podnožni svod.

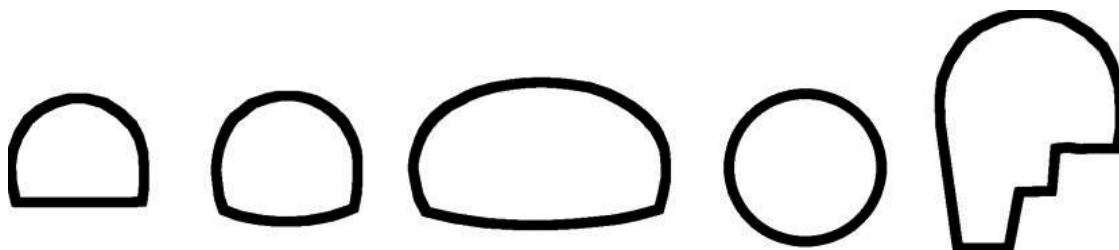
Ekonomski razlozi kao i raspoloživost potrebne opreme i mehanizacije takođe mogu biti odlučujući činilac u izboru metode izgradnje i time imati značajan uticaj na oblik poprečnog preseka. Za razliku od tunnelske metode kod koje se koristi TBM (mašina za probijanje tunela) ili mašinski iskop pod zaštitom štita, poprečni presek kod tunela izvedenog konvencionalnim metodama može

se slobodno izabrati u okviru ograničenja nametnutih geološkim uslovima.

Osnovni oblici su:

- potkovičasti poprečni presek,
- potkovičasti poprečni presek sa podnožnim svodom i
- kružni poprečni presek.

Kod određivanja oblika i dimenzija poprečnog preseka posebnu pažnju treba posvetiti tolerancijama u odnosu na tačnost probijanja tunela, tolerancije gradnje i tolerancije geodetskog snimanja.



Slika 11.2.9: Tipični poprečni preseki kod konvencionalne tunelogradnje

### 11.2.5.6 Planiranje metode iskopa tunela

Planiranje iskopavanja tunela treba da bude u skladu sa procenjenim geotehničkim, bezbednosnim i ekonomskim okolnostima, koje su određene na osnovu različitih vrsta analiza, pri čemu moraju da se ispune funkcionalni, statički, kvalitativni uslovi, uslovi trajnosti i drugi uslovi. Najčešće se planira da se iskopavanje vrši bušenjem i miniranjem ili mehaničkim iskopavanjem.

Tokom planiranja mehaničkog iskopavanja moraju se poštovati:

- geotehničke karakteristike tla i stena,
- savremene tehnologije koje često uključuju mašinsko iskopavanje rovokopačima, bagerima i drugim mašinama koje seku, kao i mašinama za bušenje celokupnog profila tunela.

Iskopavanje mašinama za bušenje celokupnog profila tunela može da se planira kao:

- otvoreni sistem iskopavanja, izgradnja tunela sa kontinuiranim napredovanjem iskopavanja i primarnog podupiranja – otvoreni TBM,

- zatvoreni sistem iskopavanja, izgradnja se vrši korišćenjem mašina za sečenje celokupnog profila – TBM sa štitom.

#### 11.2.5.6.1 Otvoreni sistem iskopa

Iskopavanje bušenjem i miniranjem može da se vrši:

- u celom profilu iskopa,
- u podeljenom profilu iskopa.

Iza čela iskopa se odmah ugrađuju standardni potporni elementi, poput mlaznog cementnog betona, čeličnih lukova, stenska sidra, armaturne mreže i sl. Podupiranje se odmah prilagođava geotehničkim karakteristikama izgradnje.

##### 11.2.5.6.1.1 Oprema i mašine za gradnju

- Garniture za bušenje,
- bageri za iskopavanje,
- mašina za utovar,
- mašine za odvoz iskopanog materijala i dovoz materijala,
- mašine za ugradnju mlaznog cementnog betona,
- mašine za sečenje stene,

- mašine za obavljanje pomoćnih radova (čišćenje, pranje i sl.),
- oprema za ventilaciju (ventilatori, ventilacione cevi i sl.),
- oprema za odvodnjavanje (pumpe, cevovodi).

#### *Tunelska mašina sa krakom sa rotirajućom glavom*

U mekoj i srednje tvrdoj steni iskopavanje može da se vrši pomoću tunelske mašine sa krakom sa rotirajućom glavom. Ova mašina može da se montira na gusenice. Rotirajuća rezna glava, opremljena zubima ili utorima za rezanje, montirana je na krak za iskopavanje. Utovar iskopine i punjenje se vrši pomoćnim alatima za utovar iskopine na trak za transportovanje. Iskopani materijal se odlaže u vagone za iskopinu odn. kamione (dempere) koji su smešteni iza mašine.

S obzirom na smer ose rotacije rezača, pokretne bušilice se dele u dve kategorije:

- pokretne bušilice sa uzdužnom reznom glavom,
- pokretne bušilice sa poprečnom reznom glavom.

Efikasnost takvih mašina uglavnom zavisi od sledećih faktora:

- količina kvarcnog sadržaja i ostalih tvrdih minerala,
- veličina čestica tvrdih minerala,
- deformaciono ponašanje stene,
- petrografska struktura,
- pritiska čvrstoća stene,
- žilavost kamene mase,
- mehanizam naprezanja i loma stene.

#### *Tunelski bager*

Bageri mogu da se koriste u mekom tlu i mekim stenama. Uglavnom mogu da se koriste svi tipovi bagera sa hidrauličnim stražnjim krakom. U zavisnosti od materijala koji se iskopava montiraju se različite kašike. Teleskopski bageri se koriste obično u malim, uskim prokopima. Grana treba da bude teleskopska i da može da se okreće za 360 stepeni.

##### *11.2.5.6.1.2 Metoda bušenja i miniranja*

Vršenje miniranja je jedan od najbitnijih elemenata za postizanje visokih brzina napredovanja i uspešnog izvođenja radova na izgradnji tunela. Loše izvođenje radova dovodi do sledećeg:

- miniranje premalog profila: u ovom slučaju je neophodno ponovno miniranje, što dovodi do gubitka vremena i novca. Profil

je nakon ponovljenog miniranja po pravilu prevelik,

- miniranje prevelikog profila: znači gubitak vremena i novca zbog betoniranja ili dodatnih količina unutrašnje betonske obloge.

Na kvalitet obloge od mlaznog betona utiče radnik koji mora da nanese tanak sloj tako da ispuni šupljine između stene i nanesenog betona. Moguće su u neželjene deformacije okolne stenske mase. Ako je minirani profil nepravilan, problematično bi moglo da bude postavljanje žičane mreže u blizini kamene površine, što ponovo dovodi do šupljina iza obloge.

Glatko miniranje (smooth blasting) je najraširenija tehnika koja se koristi: konturne rupe bliže su razmeštene i lagano napunjene dobro razmještenim punjenjima. Za vreme izgradnje, plan miniranja treba da se kontinuirano prilagođava postojećim uslovima i rezultatima na terenu.

Kao oprema za bušenje, koriste se hidraulični čekići. Moderni hidraulički čekići za bušenje montiraju se na hidrauličke, pokretne grane takozvanih divovskih bušilica. Obično čekići koriste perkusijsko rotacione tehnike bušenja. Moderne divovske bušilice imaju kombinovani pogon. Dizel motori omogućavaju pomeranje mašine a električnim napajanjem hidrauličnih pumpi izveden je pogon bušećih sklopova. Bušilice imaju dve ili više krakova za bušenje, koje su automatski kontrolisane za paralelno bušenje i većina je opremljena dodatnim krakom koji nosi korpu za punjenje eksplozivom.

##### *11.2.5.6.1.3 Redosled iskopavanja*

#### *Podela na sektore iskopavanja*

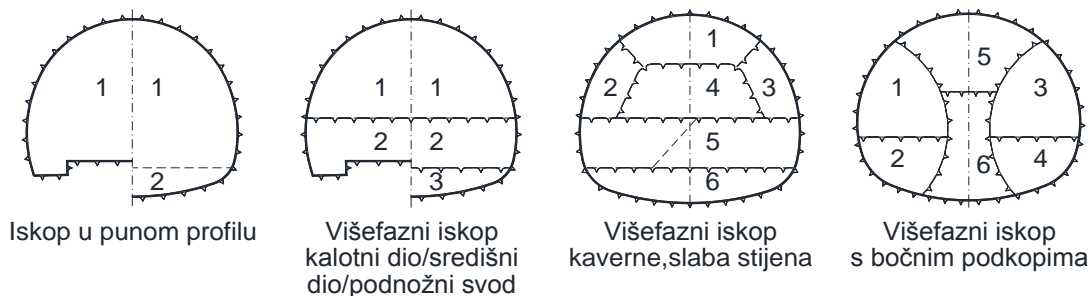
U uslovima lošega tla može da bude neophodno da se izvrši raspodela sektora iskopavanja (npr. kalota - stepenica) u manje delove s obzirom na zatečene uslove u stenama.

Prilikom planiranja redosleda faza iskopa treba uzeti u obzir:

- veličinu poprečnog preseka tunela,
- kategoriju stenske mase,
- ograničenja vremenskog razvoja deformacija,
- ograničenja zbog vibracija (miniranje).
- tipovi opreme i kapaciteti,
- iskustvo izvođača radova.



Planirani redosled faza iskopa u gradnji tunela zavisi od geotehničkih uslova i veličine poprečnog profila tunela i suštinski utiče na terminski plan iskopa.



Slika 11.2.10 Planirani redosled faza iskopa u gradnji tunela

### Dobri (stabilni) uslovi stena:

*Mali tuneli – potkopi (površina poprečnog preseka do 25 m<sup>2</sup>)*

Mali tuneli obično se iskopavaju odjednom po celom preseku pomoću metoda bušenja i miniranja. Vibraciona ograničenja u okolini zgrada i u urbanim područjima mogu da zahtevaju korišćenje kamenolomaca ili raspodelu radne zone na nekoliko zona miniranja kako bi se ograničila punjenja po kašnjenjima.

*Tuneli srednje veličine (površina poprečnog preseka: 25 - 60 m<sup>2</sup>)*

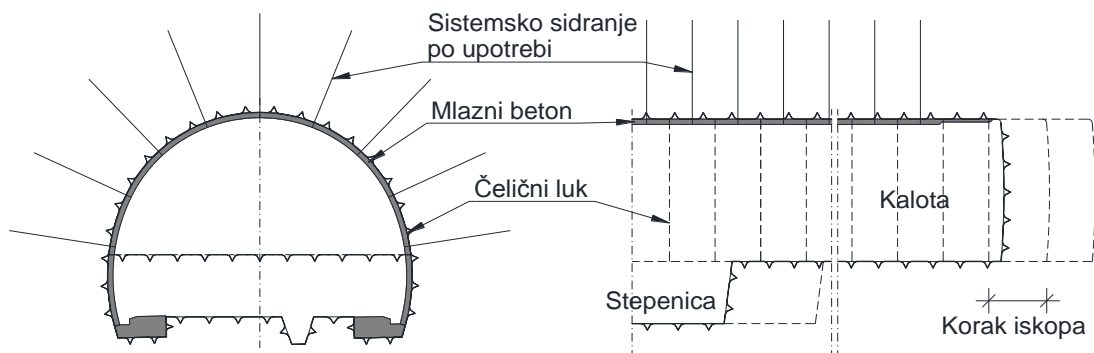
Pri dobrim uslovima stena, tuneli ove veličine mogu da se iskopavaju odjednom po celom preseku, međutim, zbog izbora opreme može da dođe do podele iskopavanja na kalotu i stepenicu. Sistem za podupiranje biće ograničen na lokalno podupiranje sidrima i tankim slojevima mlaznoga betona.

*Veliki i vrlo veliki tuneli (površina poprečnog preseka > 60 m<sup>2</sup>)*

Kod velikih tunela neophodna je raspodela iskopavanja, čak i pri dobrim uslovima stena, uglavnom zbog operativnih razloga. Bušenje, punjenje eksplozivom i podgrađivanje zahtevaju specijalnu opremu za velike tunele.

Za tunele na autoputu sa dve ili tri trake, kao i za željezničke tunele sa dva koloseka, obično je dovoljna podela na kalotu i stepenicu, dok se za iskopavanje kaverna preporučuje korišćenje više stepenica, a često i raspodela na pojedinačne nivoe iskopavanja.

Kod dobrih stenskih uslova odluka o izboru kratke ili duge kalote donosi se gotovo isključivo u skladu sa operativnim razlozima, i obično u korist duge kalote (min. 100 m razmaka između radne zone kalote i stepenice).



Slika 11.2.11: Primjer s standardnih tipa podgrade u povoljnim geološkim uslovima

### Slaba ili jako ispucala stena

*Mali tuneli (površina poprečnog preseka do 25 m<sup>2</sup>)*

Kod tunela visina do 5 metara iskopava se odjednom ceo presek, ali sa smanjenim etapama iskopavanja. Podgrada se postavlja blizu radne zone i uglavnom se sastoji od kombinacije stenskih sidara i mlaznog betona da bi se ojačala kamena masa i sprečilo odlamanje.

*Tuneli srednje veličine (površina poprečnog preseka: 25 - 60 m<sup>2</sup>)*

Pri slabim uslovima stena iskopavanje odjednom celog preseka tunela srednje veličine nije isplativo zbog problema sa stabilnošću. U svim slučajevima treba da se primeni metod iskopavanja sa kalotom i stepenicom, uz postavljanje podgrade pri svakom koraku napredovanja.

*Veliki i vrlo veliki tuneli (površina poprečnog preseka > 60 m<sup>2</sup>)*

Slabi uslovi stena zahtevaju vrlo oprezna iskopavanja u malim koracima i postavljanje podgrade pre iskopavanja sledećeg koraka. Koraci iskopavanja treba da se prilagode dozvoljenom vremenu bez podupiranja stena i da se na taj način omogući sigurno postavljanje podgrade tokom ove vremenske margine. Sa povećavanjem razmaka i visine tunela, stenska sidra postaju vrlo važna, dok je funkcija mlaznog betona ograničena na sprečavanje otpuštanja kamene mase i na krpljenje pukotina i ostalih diskontinuiteta.

#### 11.2.5.6.1.4 Dopunske mere u izgradnji tunela

##### *Potporno telo*

U slučaju loših geoloških uslova i nepogodnih diskontinuiteta zona iskopavanja može da postane nestabilna što zahteva privremeno podupiranje.

Prilikom iskopavanja tunela pomoću bušenja i miniranja, mašine sa krakom sa rotirajućom glavom ili tunelskim bagerom, jedna od mogućnosti privremenog podupiranja zone iskopavanja je ostavljanje potpornog tela. Treba izbegavati gubitak potpornog tela. Olabavljeno ili samo popunjeno potporno telo ima samo ograničenu funkciju. Potrebno je posvetiti pažnju da postoji dovoljno radnog prostora iznad i pored potpornog tela.

Pravilan razmak za ispravno nanošenje mlaznog betona je 2 metra.

Druga mogućnost je podupiranje čela iskopa mlaznim betonom. Potrebno je uzeti u obzir da sloj mlaznog betona na čelu iskopa za vreme iskopavanja narednog koraka treba iskopati.

Efikasno sredstvo potpore u gnječecim uslovima stena su horizontalna stenska sidra koja su postavljena subparalelno sa osom tunela. Ona mogu da se kombinuju sa mlaznim betonom na čelu iskopa. S obzirom da se sidra seku nakon svakog koraka iskopavanja i da se ploča mora ponovo postaviti poželjno je korišćenje IBO sidara.

*Postranične galerije koriste se često i za raspodelu površine na manje delove.*

Kod kraćih tunela preporučuje se završavanje postraničnih galerija pre početka glavne kalote, dok je za duže delove simultano iskopavanje neizbežno zbog vremenskog ograničenja. Iskopavanje u različitim radnim zonama treba da bude na prikladnom razmaku da bi se minimizovalo ometanje između iskopa (minimalna udaljenost je oko 30 m).

*Proširena stopa kalote – »Slonova stopa«*

Širenje osnove gornjeg dela spoljašnje obloge (ljuska od mlaznog betona) preporučuje se u određenim slučajevima da bi se smanjila reakcija podloge na kamenu masu koja okružuje otvor tunela. Na taj način sprečava se proboj mlazno betonske ljuske u stensku masu. Ovaj metod koristi se za tla male nosivosti.

*Mikro šipovi (micro piles)*

Planiranje mikro šipovi predviđeno je u području male natkrivenosti. Mikro šipovi se ugrađuju u petu kalote. Mikro šipovi prenose opterećenja sa obloge od mlaznog cementnog betona na okolno stenje. Na ovaj način smanjuje se sleganje u oblozi od mlaznog cementnog betona u kaloti, te opasnost od obrušavanja stenja između kalote i privremenim podnožnim svodom. To omogućuje povećanje stabilnosti bočnih strana tokom iskopavanja stepenika.

### Privremeni podnožni svod

Privremeni luk od mlaznog betona u podnožnom svodu neophodan je u nestabilnim tunelima sa višestrukim iskopima (kalota, stepenica, podnožni svod) da bi se postiglo ranije (privremeno) zatvaranje nosećeg prstena zbog stabilnosti (npr. ispod građevina). Uobičajeno se privremeni podnožni svod sastoji od žičane mreže i mlaznog betona. Ako je vreme za ugradnju prekratko, zbog prevelikih deformacija, oni mogu da se brzo postavje kao uvrnute pruge (trake) sa prekidima u longitudinalnom smeru.

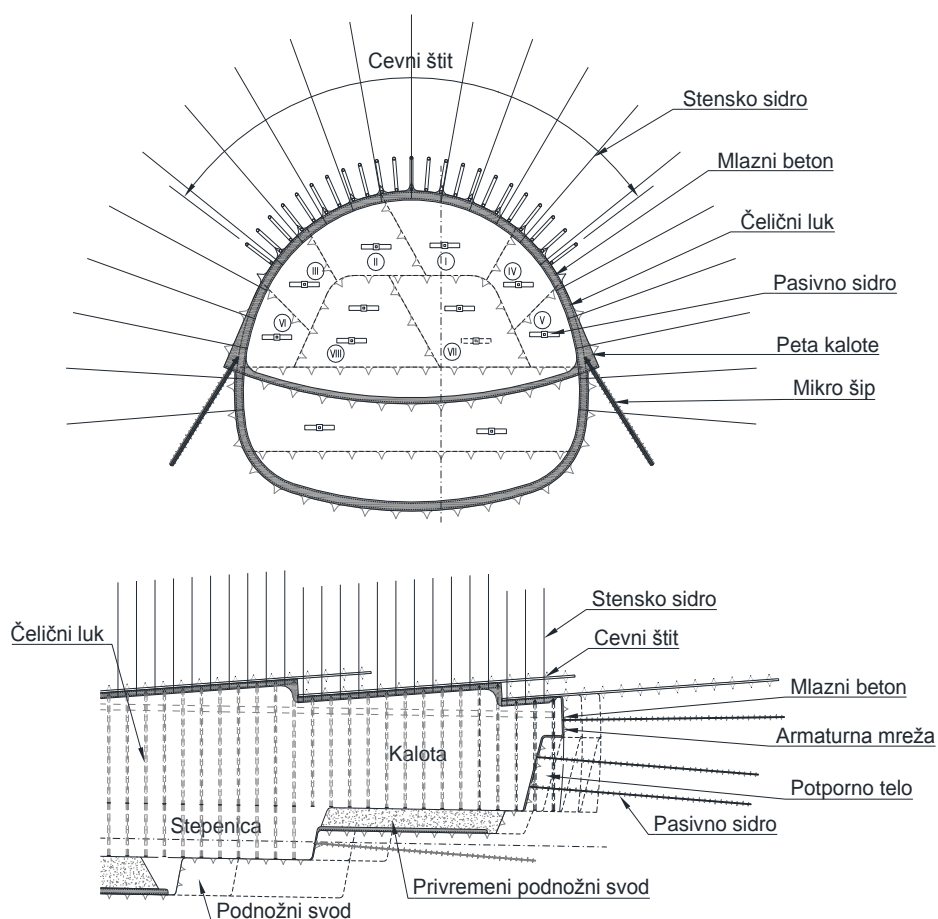
### Podnožni svod

U slaboj i jako ispucalnoj steni potrebno je iskopati podnožni svod i zatvoriti noseći prsten postavljanjem betonskog podnožnog svoda. U osrednjim uslovima podnožni svod

treba iskopati na određenoj udaljenosti iza iskopa stepenice, a u većini slučajeva beton se uliva pre formiranja zatvorenog betonskog prstena.

Pri vrlo lošim geološkim uslovima, može da bude neophodno da se prsten postavi odmah iza iskopa stepenice. U ovom slučaju treba najpre oblikovati zatvoreni prsten od mlaznog betona. Beton za podnožni svod može da se uliva nezavisno od zahteva za zatvaranje prstena.

Odluka da li da se za podnožni svod koristi mlazni beton ili in-situ beton takođe zavisi i od veličine poprečnog preseka tunela, izabranog redosleda izgradnje i metoda iskopavanja.



Slika 11.2.12: Primjer iskopavanja u steni slabe nosivosti, kada je celokupni profil iskopavanja podeljen u faze iskopavanja kalote, stepenice i podnožnog svoda, i upotrebe cevnog štita, faznog iskopavanja kalote, usidrenog potpornog tela, privremenog podnožnog svoda, mikro šipova i raširene stope kalote.

#### 11.2.5.6.1.5 Dopunski tehnički postupci u izgradnji tunela

Razvijene su specijalne tehnologije za dopunsko bušenje tunela pod ekstremno nepogodnim podzemnim i/ili uslovima podzemnih voda. Takve dopunske mere obuhvataju:

- komprimovani vazduh,
- mlazno cementiranje (*jet grouting*),
- veštačko zamrzavanje tla,
- cementiranje (upotrebom cementa i/ili hemikalije),
- spuštanje nivoa podzemnih voda.

Izbor i projektovanje dopunskih mera zavisi uglavnom od podzemnih uslova, uslova podzemnih voda, tipa i veličine tunela, visine zemljanog pokrivača, uslova u okolini i površinskim ograničenjima.

##### *Komprimovani vazduh*

Komprimovani vazduh je dopunska mera pri izgradnji tunela u tlu i ispod nivoa podzemnih voda koja ima najširu primenu. Tokom proteklih godina upotreba komprimovanog vazduha pokazalo se kao ekonomična i efikasna metoda održavanja uslova podzemnih voda, stabilisanja radne zone iskopavanja i minimizacije površinskih sleganja.

Primena komprimovanog vazduha za tunele ispod *nivoa podzemnih voda* ima nekoliko prednosti:

- pritisak vazduha može da se podesi tačno prema hidrostatskom pritisku,
- komprimovani vazduh može da se kombinuje sa drugim dopunskim merama,
- nema uticaja nivoa podzemnih voda i hemijskih jedinjenja,
- dolazi do smanjenje površinskih ulegnuća,
- komprimovani vazduh ponaša se kao potpora izloženom tlu u radnoj zoni iskopavanja.

Međutim, primena komprimovanog vazduha u izgradnji tunela sadrži i neke rizike koje treba minimizovati sistematskim kontrolnim merama i oprezom. Takvi rizici su:

- iznenađan pad pritiska vazduha (opasan po zdravlje),
- isticanje komprimovanog vazduha,
- opasnost od urušavanja i dotoka vode u slučaju nekontrolisanog pada vazdušnog pritiska.

Ako je to moguće, vazdušni pritisak ne bi sme da pređe iznos od 1,2 bara. Viši

vazdušni pritisak zahteva duže vreme za početak i završetak rada radnika i smanjuje efektivno radno vreme svake smene. Kombinovanje izgradnje tunela pod komprimovanim vazduhom uz delimično snižavanje nivoa podzemnih voda, bio je uspešan metod smanjivanja vazdušnog pritiska na nekoliko gradilišta.

##### *Mlazno cementiranje – Jet Grouting*

Mlazno cementiranje može da se koristi kao *način* podupiranja kako bi se održala ili tek postigla stabilnost radne zone iskopa i kako bi se omogućila privremena potpora novoiskopanog koraka iskopavanja dok podgrada (mlazni beton) ne razvije dovoljnu čvrstoću. U tu se svrhu cementni malter injektira pod visokim pritiskom kroz horizontalne ili malo nakošene cevi (zapravo, šipke za bušenje) koje su izbušene malo izvan profila tunela.

##### *Injektovanje cementom ili hemikalijama*

Injektovanje može da bude potrebno u ekstremno mekim ili nekohezivnim vrstama tla kako bi se poboljšao kvalitet tla do te mere da se omogući njegovo iskopavanje, da se poveća vreme bez podupiranja u odnosu na iskopavanje tunela, kao i da se poveća sposobnost nošenja. Redukcija permeabiliteta da bi se sprečio preterani dotok vode u zonu tunela je drugo područje primjene injektovanja. Međutim, treba imati na umu da injektovanje može da trajno utiče na protok podzemnih voda i njihov kvalitet. Tamo gde se podzemne vode koriste za javno snabdevanje vodom, hemijsko injektovanje je zabranjeno.

Uspešnost metode injektovanja u mnogome zavisi od odabranog materijala za injektovanje i preciznosti bušenja. Važan za uspeh ili neuspeh ove skupe mere može da bude položaj i *rastojanje među bušotinama*, izbor materijala za injektovanje, kao i pritisak injektovanja.

Za izbor odgovarajućeg materijala za injektovanje trebaju da se uzmu u obzir sledeće karakteristike tla (zemljišta):

- vrsta tla,
- granice i debljine slojeva,
- hemijsko-minerološki sastav,
- distribucija veličina čestica,
- kompaktnost,
- poroznost,
- vodopropustljivost,

- uslovi podzemnih voda: kao što su nivo podzemnih voda, promenljivost, smer i brzina toka, hemijske odrednice,
- temperatura.

#### Zamrzavanje tla

Veštačko zamrzavanje terena kombinuje oba željena učinka – poboljšanje tla i upravljanje podzemnim vodama – u jednom. Zamrznuti prsten tla daje značajnu čvrstoću i više je ili manje nepropusan. Kao rashladno sredstvo mogu da se koriste tečni azot ili vodeni rastvor natrijum hlorida. Korišćenje vodenog rastvora natrijum hlorida je jeftinije, ali zahteva duže vreme za stvaranja neprekidnog prstena. Sredstvo za hlađenje cirkuliše kroz brojne čelične cevi, koje su smeštene duž spoljašnje ivice profila tunela. Cevi su spojene sa pogonom za zamrzavanje u kojem se čuvaju i generišu sredstva za hlađenje.

Zamrznut prsten može da preuzme povećani pritisak zbog sloja tla i podzemnih voda. Opterećenje obloge tunela unutar prstena zamrznutog tla zavisi od vremena, jer reološko (puzajuće) ponašanje zamrznutog tla prouzrokuje sporo, neprekidno deformisanje što ima za posledicu neprekidni prenos opterećenja. Sve dok oko tunela postoji zatvoreni ledeni prsten, postoji i funkcija zaustavljanja dotoka vode.

Posebna pažnja treba da se posveti podizanju tla. Proces zamrzavanja treba pažljivo proceniti da bi se smanjilo podizanje tla. Korišćenje vodenog rastvora natrijum hlorida kao sredstva za hlađenje omogućava hlađenje sa prekidima nakon izgradnje zamrznutog prstena oko tunela. Održavanje ledenog prstena treba da se prati i kontroliše pomoću senzora temperature koji mere temperaturu i smešteni su u specijalne čelične cevi. Svaka cev za zamrzavanje može da se napuni posebno, čime je omogućeno da se reaguje u slučaju podizanja tla ili nejednakog otapanja.

Zbog visokih troškova, primena zamrzavanja je ograničena na posebno teške uslove na terenu. Takođe, treba napomenuti da se danas sve više koriste moderni metodi izgradnje tunela zbog čega je veštačko zamrzavanje sve manje privlačno nego pre nekoliko godina.

#### Spuštanje nivoa podzemnih voda

Radi smanjivanja uticaja podzemnih voda na stabilnost tunela za vreme iskopavanja ili radi

smanjivanja potrebnog pritiska komprimovanog vazduha, treba razmotriti mogućnost delimičnog i potpunog spuštavanja nivoa podzemnih voda. Međutim, treba pažljivo proceniti površinsko sleganje, uticaje na zgrade i samo telo podzemne vode.

#### Drenaža

Dotok vode u tunelima komplikuje i utiče na procese gradnje. Betoniranje na mokroj (kapanje) površini je moguće jedino povećanjem doza ubrzivača, što znači smanjenje finalne čvrstoće mlaznog betona. U opštem slučaju voda koja kaplje trebalo bi da bude prikupljena pomoću cevi ili creva i preusmerena u korita pre betoniranja.

Dotok vode može da utiče i na stabilnost površine koja se iskopava i da komplikuje ugradnju stenskih sidara. Kao mere za rešenje mogu da se izbuše velike odvodne rupe u radnoj zoni iskopavanja. Da bi se sprečilo urušavanje rupa zbog drobljenja kamena/stene ili miniranja u rupe treba da se ubace PVC cijevi.

#### 11.2.5.6.2 Mašine za bušenje tunela u celokupnom profilu tunela

*Iskop mašinama za bušenje tunela u celokupnom profilu tunela se planira tako da se predvidi istovremena ugradnja prefabrikovanih armiranobetonskih elemenata. Postoje dva tipa mašina za bušenje tunela:*

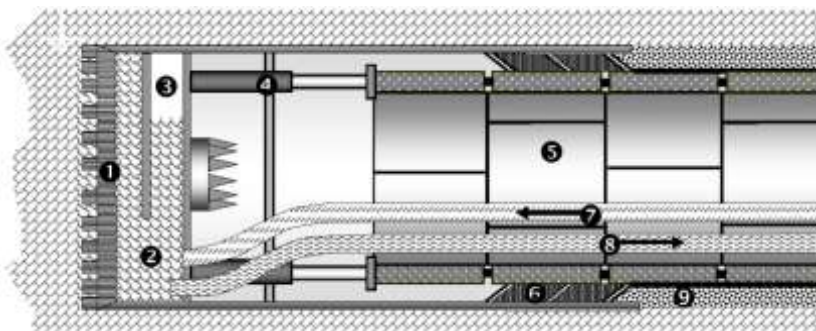
- otvoreni tip (neoklopljene) TBM i
- TBM sa štitom.

U slučaju kada se koristi otvoreni tip TBM, podupiranje stenske mase postiže se pomoću stenskih sidara, čeličnih lukova, žičane mreže i mlaznog betona. Moguće je da se podešava sistem podupiranja stenske mase s obzirom na varirajuće uslove u stenskoj masi. Kada prevladaju uslovi visoke droblivosti stena, ovaj metod ima svoja tehnička i ekonomska ograničenja.

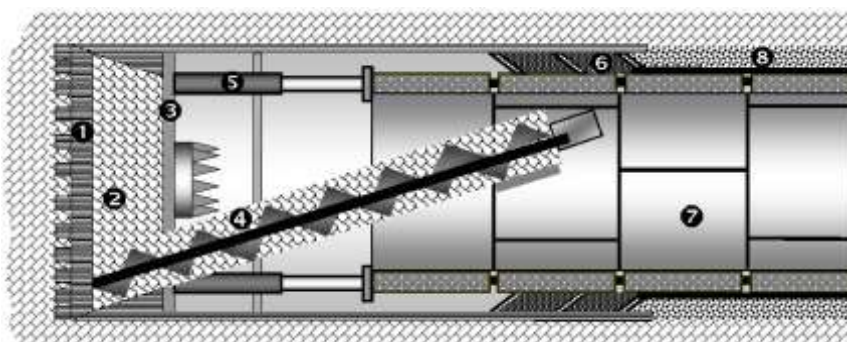
Tuneli iskopani pomoću *TBM sa štitom* poduprti su segmentisanom oblogom. Prednost ovog metoda je u tome što može da se primeni u tunelima sa relativno niskim stenskim pokrovom. Preduslov za primenu *TBM sa štitom* je da prevladavaju homogeni uslovi u tlu (npr. zemljište ili tlo sa stenama potpuno pod atmosferskim uticajem). Glavni nedostatak je što tip i debljina potpore ne mogu da se prilagođavaju promenljivim uslovima u tlu i uvek treba da budu projektovani za najnepovoljnije kombinacije opterećenja.

Uz postojeće tehnologije, tuneli koji se izbuše pomoću TBM-a mogu da se grade do prečnika od 12 metara, ali treba da se pomno

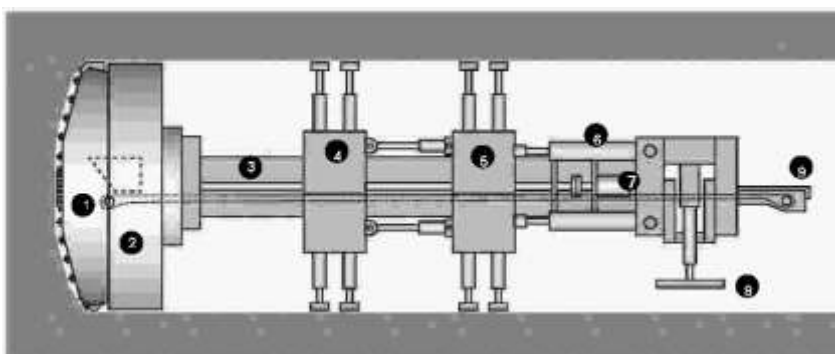
istraži rentabilnost s obzirom visoke investicijske troškove.



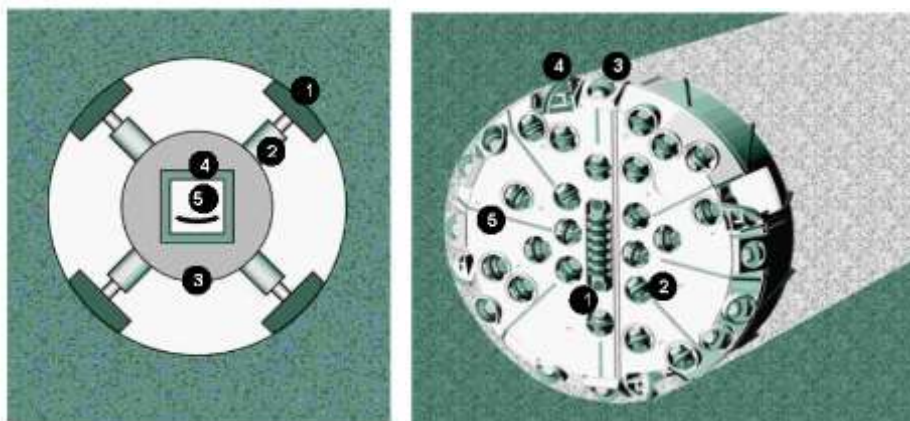
Slika 11.2.13: Šematski prikaz mašine za bušenje tunela u celokupnom profilu tunela sa štitom kod koje se čelo iskopa stabilizuje bentonitnom suspenzijom: 1. bušača glava, 2. bentonitnom suspenzijom/tlo, 3. vazdušni mehur, 4. uređaj za potiskavanje, 5. segmenti, 6. repni zaptivač, 7. dovod bentonitne suspenzije, 8. odvod bentonitne suspenzije sa iskopnim materijalom i 9. injekcioni prsten.



Slika 11.2.14: Šematski prikaz mašine za bušenje tunela u celokupnom profilu tunela sa štitom kod koje se čelo iskopa stabilizuje iskopanim materijalom: 1. bušača glava, 2. radna komora, 3. kompresioni zid, 4. pužni transporter, 5. uređaj za potiskavanje, 6. repni zaptivač, 7. segmenti 8. injekcioni prsten



Slika 11.2.15: Šematski prikaz mašine za bušenje tunela u celokupnom profilu tunela u čvrstoj stenskoj masi (otvoreni tip): 1. bušača glava, 2. nosač bušaće glave, 3. unutrašnji ram mašine, 4. prednji uređaj za razupiranje, 5. zadnji uređaj za razupiranje, 6. uređaj za potiskavanje, 7. pogonski motori, 8. zadnji oslonac, 9. transporter iskopanog materijala



Slika 11.2.16: Sklop razupirača: 1. šapa razupirača, 2. cilindar, 3. spoljašnji ram, 4. unutrašnji ram, 5. transporter iskopanog materijala; b) Rezna glava, pogled spreda: 1. središnji sekač, 2. čeonu sekač, 3. dubinski sekač, 4. strugač, 5. pločice

### 11.2.1 PRAĆENJE GASOVA

- mjerenje zagađenja (gasovi, prašina),
- klimatski uslovi (temperatura i brzina vazдушnih struja te vazdušni pritisak),
- funkcionisanje ventilacionog sistema i njegovog napajanja,
- ugljični monoksid (CO) u izduvnim gasovima.

### 11.2.5.7 Ventilacioni sistem za vrijeme izgradnje

Moraju, da se preduzmu sljedeće mjere verifikovanja ventilacionog sistema za vrijeme izgradnje, naročito ako unutar njega rade mašine sa dizel-motorima:

Tabela 11.2.11: Pregled najčešćih vidova zagađenja vazduha koja nastaju kod podzemnih radova:

Supst.	Svojstva	Dejstvo	MDK
Prah	Lebdeće čestice u prahu; > 5 $\mu$ brzo padajuće, < 5 $\mu$ sporo padajuće, prodiru u pluća	Silikoza; silicijum dioksid i određeni škodljivi silikati	Za čestice u prahu < 5 $\mu$ u zavisnosti od procenta silicijum dioksida; pri 70 % silicijum dioksida ispod 1 mg/m <sup>3</sup>
Ugljen dioksid (CO <sub>2</sub> )	Većinom u velikim količinama u produktima eksplozija i izduvnih gasova dizel agregata	Bez mirisa; u velikim koncentracijama (> 4 vol. ‰) glavobolja, koja trenutno vodi gubitku svesti.	5.000 ppm
Ugljen monoksid (CO)	Proizvod nepotpunog sagorevanja, u znatnim količinama u produktima eksplozija	Bez mirisa; u koncentracijama > 1 vol ‰ (1000 ppm) otrovan, malaksalost prelazi u gubitak svesti a zatim u smrt	50 ppm

Supst.	Svojstva	Dejstvo	MDK
Azotni gasovi	Mešavina NO+NO <sub>2</sub> i ostalih viših azotnih oksida; nastaju u produktima eksplozija i izduvnih gasova dizel agregata	U koncentracijama preko 10 – 50 ppm nadražujući (kašalj), koji zatim prelazi u plućni edem i smrt	NO 25 ppm NO <sub>2</sub> 5 ppm
Aldehidi	Formaldehid (H <sub>2</sub> CO) i viši aldehidi i akrolein (CH <sub>2</sub> :CH. CHO); produkti izduvnih gasova dizel agregata	Nadražujući (kašalj, oči i ždrelo)	Formaldehid 5 ppm akrolein 0,1 ppm
Sumpor dioksid (SO <sub>2</sub> )	Nastaje od sumpora iz dizel ulja	Oštrog mirisa, izaziva kašalj, u većim koncentracijama izaziva plućni edem	5 ppm
Metan CH <sub>4</sub>	Nastaje izvirući iz stenske mase	Zapaljiv, stvara eksplozivne mešavine	Do 0,5 vol % na gradilištu

#### *Eksplozivni gasovi u stenskoj masi*

Tokom ispitivanja terena, moguće je da se kombinuju geotehnička ispitivanja sa preliminarnim studijama i procenama rizika zbog opasnih gasova. Detekcija i uzorkovanje može da se izvrši za vreme bušenja bušotina, a instaliranje jednostavnih piezometara sa stojećom cevi može da omogući dugotrajno praćenje područja koja su označena kao posebno rizična zbog prisutnosti gasova. Za vreme miniranja tunela, potreban je neki oblik konstantnog praćenja gasova u određenim sektorima gde se očekuje pojavljivanje tih gasova. To može da bude u obliku jednostavnih elektronskih detektora više gasova, ili u situacijama povišenoga rizika to mogu da budu sofisticiraniji detektorski uređaji povezani na način da isključe svu opremu kada zabeleže pojavu gasova. Predbušenje, mora da se primeni u delovima tunela gde može, da se očekuje pojava gasa. Ta praksa osigurava iskopavanja u tlu odn. stenama koje je istraženo do određenog stepena. Predbušenje može da se izvrši do, pa čak i preko 50 metara ispred čela iskopa. Sva merenja metana i ostala merenja u tunelima treba da budu izvedena u skladu sa lokalnim

pravilima i „programom bezbjednosti“ koje je zadao ugovarač.

#### **11.2.5.8 Ventilacija gradilišta**

Ventilacioni sistem treba da bude projektovan i korišćen u skladu sa lokalnim zakonskim propisima.

Ventilacioni sistem treba da bude projektovan tako da odgovara dužini tunela, metodi iskopavanja, korišćenoj opremi i broju radnika koji rade unutar tunela. Toksični gasovi, dim i čestice prašine koji su zabeleženi merenjima na gradilištu, ne smeju da pređu dopuštene koncentracije. U tunelima u kojima postoje eksplozivni gasovi (npr. metan), ventilacioni sistem treba da bude projektovan i korišćen tako da se postigne adekvatno razređenje opasnih gasova. Merenja koncentracije gasova treba da se vrše pomoću prenosivih i fiksno instaliranih mernih naprava. U tunelima u kojima mogu da se pojavljuju gasovi, može da radi samo za to dobro osposobljeno osoblje. Pušenje unutar tunela je zabranjeno.