

REPUBLIKA SRBIJA  
PROJEKAT REHABILITACIJE TRANSPORTA

**PRIRUČNIK ZA PROJEKTOVANJE  
PUTEVA U REPUBLICI SRBIJI**

**11. PROJEKTOVANJE TUNELA**

**11.3 OBLOGA TUNELA, PORTALI, SPOLJNI OBJEKTI**

**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>
1	30.04.2012	Početno izdanje

**SADRŽAJ**

<b>11.3.1</b>	<b>OPŠTA NAPOMENA.....</b>	<b>1</b>
<b>11.3.2</b>	<b>INICIJALNA ILI PRIMARNA PODGRADA.....</b>	<b>1</b>
11.3.2.1	OPŠTE.....	1
11.3.2.2	PLANIRANJE I IZVOĐENJE ISKOPA I PODUPIRANJA TUNELA; GEOTEHNIČKI MODEL TUNELA.....	1
11.3.2.2.1	Iskop tunela u stenama.....	2
11.3.2.2.2	Iskop tunela u tlu.....	2
11.3.2.3	RAČUNSKIE ANALIZE I DIMENZIONISANJE NOSEĆIH ELEMENATA .....	3
11.3.2.4	PRINCIPI KONVENCIONALNE METODE IZGRADNJE TUNELA .....	3
11.3.2.5	PLANIRANJE NOSEĆIH ELEMENATA .....	6
11.3.2.5.1	Standardni sistem podupiranja .....	6
11.3.2.5.2	Podela na sektore iskopavanja .....	7
11.3.2.5.3	Glavni noseći elementi.....	8
11.3.2.5.4	Dodatni ili pomoćni potporni elementi.....	12
<b>11.3.3</b>	<b>UNUTRAŠNJA BETONSKA OBLOGA (SEKUNDARNA OBLOGA).....</b>	<b>13</b>
11.3.3.1	OPŠTE.....	13
11.3.3.2	PROJEKTI ZAHTEVI.....	14
11.3.3.2.1	Minimalni projektni zahtevi za unutrašnju oblogu .....	15
11.3.3.3	VODONEPROPUSNA UNUTRAŠNJA BETONSKA OBLOGA.....	16
11.3.3.4	BETON.....	16
11.3.3.5	STRUKTURNA ANALIZA UNUTRAŠNJE OBLOGE.....	17
11.3.3.5.1	Opterećenje u dubokim tunelima .....	17
11.3.3.5.2	Opterećenje u plitkim tunelima .....	17
11.3.3.5.3	Strukturne analize obloga .....	17
11.3.3.5.4	Otpornost struktura na požar .....	18
<b>11.3.4</b>	<b>HIDROIZOLACIJA - MEMBRANSKA OBLOGA.....</b>	<b>19</b>
11.3.4.1	OPŠTE.....	19
11.3.4.2	HIDROIZOLACIJA U KLASIČNOJ GRADNJI TUNELA .....	20
11.3.4.3	HIDROIZOLACIJA U GRADNJI TUNELA U OTVORENOJ GRAĐEVINSKOJ JAMI .....	20
11.3.4.4	ALTERNATIVNO IZVOĐENJE HIDROIZOLACIJE .....	20
<b>11.3.5</b>	<b>PORTALI TUNELA.....</b>	<b>20</b>
11.3.5.1	OPŠTE.....	20
11.3.5.2	OBEZBEĐIVANJE STABILNOSTI KOSINA NA MESTU OTKOPAVANJA .....	21
11.3.5.3	KONCEPT PORTALA.....	22
11.3.5.4	GRANICA IZMEĐU OTVORENE TRASE I TUNELA .....	24
11.3.5.5	TEHNIČKI ZAHTEVI ZA PLANIRANJE PORTALA .....	24
11.3.5.6	INFROSTRUKTURNO PODRUČJE PORTALA.....	24
11.3.5.7	TEHNIČKI ZAHTEVI ZA PROJEKTOVANJE PORTALA TUNELA »CUT AND COVER« - POKRIVENI USECI .....	25
<b>11.3.6</b>	<b>SPOLJNI OBJEKTI (POGONSKE CENTRALE).....</b>	<b>26</b>
11.3.6.1	OPŠTE.....	26
11.3.6.2	POZICIONIRANJE POGONSKIH CENTRALA U PROSTORU .....	26
11.3.6.3	TEHNIČKI ZAHTEVI ZA PLANIRANJE .....	27
<b>11.3.7</b>	<b>INSTRUMENTACIJA I PRAĆENJE.....</b>	<b>28</b>
11.3.7.1	OPŠTE.....	28
11.3.7.2	PARAMETRI ZA PRAĆENJE .....	28
11.3.7.2.1	Podzemne vode .....	29
11.3.7.2.2	Deformacije tla .....	29
11.3.7.2.3	Interakcija tla i konstrukcije.....	29
11.3.7.2.4	Praćenje okoline (susedne građevine i konstrukcije), uglavnom u blizini ulaznih područja i u slučaju plitkih tunela .....	29

11.3.7.2.5	Praćenje napredovanja .....	29
11.3.7.3	SEKCIJE PRAĆENJA.....	29
11.3.7.4	MERNA OPREMA.....	30
11.3.7.4.1	Deformacije .....	30
11.3.7.5	MERENJA NAPONA NA ČELIČNIM LUKOVIMA.....	32
11.3.7.6	SILE U SIDRIMA.....	32
11.3.7.6.1	Merno sidro .....	32
11.3.7.6.2	Čelija za merenje opterećenja .....	32
11.3.7.7	DEFORMACIJA TLA.....	32
11.3.7.7.1	Ekstenzometar .....	32
11.3.7.7.2	Inklinometar.....	33
11.3.7.8	PODZEMNE VODE .....	33
11.3.7.8.1	Merenja podzemnih voda tokom operacija bušenja .....	33
11.3.7.8.2	Uspravne cijevi / Piezometri.....	33
11.3.7.9	POMERANJA GRAĐEVINA I KONSTRUKCIJA .....	34
11.3.7.9.1	Merenja sleganja.....	34
11.3.7.10	VIBRACIJE ZBOG MINIRANJA.....	35
11.3.7.10.1	Seizmograf.....	35
11.3.7.11	UNOS PODATAKA .....	36
11.3.7.11.1	Opšte.....	36
11.3.7.11.2	Ručni unos podataka .....	36
11.3.7.11.3	Kompjutorizovani unos podataka.....	36
11.3.7.11.4	Interpretacija mernih podataka .....	37
11.3.7.12	ISCRTAVANJE PODATAKA.....	38
11.3.7.13	MERENJA ZA VREME RADOVA .....	39
11.3.7.14	GEOTEHNIČKI NADZORNI ORGAN .....	39
<b>11.3.8</b>	<b>GEODETSKI RADOVI.....</b>	<b>39</b>
11.3.8.1	GEODETSKA KOORDINATNA OSNOVA.....	39
11.3.8.2	USPOSTAVLJANJE KOORDINATNE OSNOVE TERESTRIČKIM METODAMA .....	40
11.3.8.3	USPOSTAVLJANJE KOORDINATNE OSNOVE POMOĆU GPS TEHNOLOGIJE ....	40
11.3.8.4	PRECIZNOST KOORDINATNE OSNOVE .....	40
<b>11.3.9</b>	<b>TOLERANCIJE.....</b>	<b>41</b>
11.3.9.1	OPŠTE .....	41
11.3.9.2	TOLERANCIJA ZA POČETNE OBLOGE (PRIMARNE PODGRADE).....	41
11.3.9.2.1	Geodetske tolerancije: .....	41
11.3.9.2.2	Tolerance izvođenja (Konstrukcijske tolerancije).....	41
11.3.9.2.3	Neizbežno prekoprofilski izkop tunela: .....	41
11.3.9.3	TOLERANCIJE FINALNOG OBLOGA.....	41
11.3.9.3.1	Geodetske tolerancije: .....	42
11.3.9.3.2	Tolerancije kalupa: .....	42
11.3.9.3.3	Uticaj zavoja: .....	42
11.3.9.4	OSTALE TOLERANCIJE .....	42

### 11.3.1 OPŠTA NAPOMENA

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

### 11.3.2 INICIJALNA ILI PRIMARNA PODGRADA

#### 11.3.2.1 Opšte

Primjena konvencionalne metode gradnje tunela predviđa dve odvojene operacije postavljanja obloge:

- inicijalna obloga, postavlja se odmah ili vrlo kratko nakon iskopavanja. Kao dodatak stabilnosti tokom izgradnje, inicijalna obloga postaje deo celokupnog sistema obloge. Inicijalna obloga treba da bude dovoljna da stabilizuje deformacije tla,
- finalna unutrašnja obloga povećava bezbednost sistema tunelskih obloga i omogućuje jednoličnu unutrašnju površinu, te poboljšava vodenu nepropusnost tunela. Glatka, finalna unutrašnja obloga služi za protok vazduha u tunelu i zadovoljava estetske zahteve i zahteve za održavanjem.

Bilo u steni ili u tlu, projekat inicijalne (primarne) podgrade kombinuje razne potporne elemente u »tipične potporne tipove«. Inicijalna obloga se smatra delom kompletnog sistema obloga tunela.

Za odluku o projektovanju »krute« ili »fleksibilne« inicijalne podgrade, moraju da se sagledaju uslovi zemljišta i geometrijski uslovi (npr. debljina nadsloja, građevine, infrastruktura ili druge strukture iznad ili blizu tunela, itd.).

Tuneli sa plitkim nadslojem i oni koji su smješteni ispod zgrada ili drugih građevina, u osnovi zahtevaju krutu podgradu (kruta podgrada, brzo zatvaranje podgradnog prstena, ponekad rana ugradnja unutrašnje (sekundarne) obloge) kako bi se ograničile ili smanjile deformacije tla i sleganja na površini.

Kod tunela sa srednjim do visokim nadslojem, dopuštanje deformacija primenom fleksibilnih potpornih tipova (koristeći tanke fleksibilne obloge, stenska sidra, odloženo

zatvaranje podnožnog svoda, itd.) vodi do ekonomičnog projekta.

Svaki od geološkim modelom predviđenih tipova stena ili tla se pripisuju određenom potpornom tipom. Potporni tipovi mogu da se razlikuju u debljini mlaznoga betona, broju slojeva žičane mreže, položaju i razmeštaju čeličnih lukova, vrsti i dužini stenskih sidara, drugim potpornim merama, dužini koraka iskopavanja, redosledu iskopavanja i načinu raspodele iskopnog profila.

Kasnije se ovi potporni tipovi primenjuju prema klasifikaciji tokom iskopavanja i mogu po potrebi da se modifikuju ili prilagođavaju prema stvarnom ponašanju tla ili da se određuju prema rezultatima praćenja.

U projektu tendera za izvođenje radova treba da se pripreme nacrti sa tipičnim potpornim elementima za svaki navedeni tip stene. U tim se nacrtima takođe prikazuju moguće dužine koraka napredovanja, redosled iskopavanja i instalacija potpornog sistema.

Tokom izgradnje biće potrebni i radionički nacrti potpornih elemenata koji treba da se proizvedu za pojedinačni tunel, kao što su čelični lukovi i rešetkasti nosači.

#### 11.3.2.2 Planiranje i izvođenje iskopa i podupiranja tunela; geotehnički model tunela

Planiranje i izvođenje iskopavanja i podupiranja tunela se odvija uz uvažavanje načela koja se zasnivaju na uzajamnom delovanju sistema stenska masa / podgrada, pri čemu se posebno obrađuje:

- gradnja u stenama,
- gradnja u zemljištu.

Prilikom gradnje tunela zbog racionalnosti treba što bolje iskoristiti nosivost stenska masa. Iskorišćenost nosivosti stena se postiže prilagođavanjem postupaka iskopa i ugradnje nosećih elemenata geotehničkim uslovima.

Izrada geotehničkog dela projekta tunela može da obuhvati različite proračunske metode, npr. empirijske, analitičke (rešenja u zaključenoj formi), numeričke (metoda konačnih elemenata, metoda ivičnih elemenata, metoda razdvojenih elemenata, diferenciona metoda i sl.), kao i njihove kombinacije.

Obavezna je izrada procene rizika gradnje za sve elemente, na osnovu čijih rezultata naručilac donosi odluku o gradnji tunela.

#### 11.3.2.2.1 Iskop tunela u stenama

Ustanovljenje geološkoga modela ima zadatak da definiše koje će geotehničke karakteristike stenske mase da se koriste kao parametri projektovanja u nadolazećim koracima projekta.

Iznosi dobijeni u terenskim i laboratorijskim istraživanjima ne daju nam direktnu osnovicu za daljnja izračunavanja. Parametri stenske mase (npr. iz laboratorijskih testova) su maksimalne vrednosti, koje treba da se procene pre nego mogu da budu korišćene kao kriterijumi za projektovanje ili kao parametar geotehničkog projektovanja.

Cela stenska masa pod uticajem je raznih veličina, koje obično loše utiču na fizičke i mehaničke karakteristike stena, a to su:

- atmosferski uticaj,
- tektonski procesi,
- uticaji dubinskih i podzemnih voda,
- nestabilnost padina,
- promene u stanjima napetosti,
- dinamička opterećenja,
- promene u temperaturi.

Treba da se ustanove geotehničke karakteristike stenske mase na osnovu geološkog modela i uzimanja u obzir laboratorijskih testova i rezultata in-situ testova. Empirijski (kvalitativni ili kvantitativni), analitički ili numerički postupci projektovanja ili njihovo kombinovanje mogu da se koriste za izvođenje geotehničkog projekta tunela.

S obzirom da geološki uslovi (hidrogeološki, tektonski itd.) široko variraju od gradilišta do gradilišta, kao što variraju i individualni, sa geologijom povezani parametri podzemne strukture, mora da se izvrši ispitivanje njihovih uticaja na projekat, kako bi se dobio sistem ocenjivanja ili klasifikacije koji korisnik može da kroji prema svakom pojedinom projektu.

Za svaki projekat tunela, važnost (uticaj) svakoga parametra povezanog sa geologijom treba, da se vrednuje pojedinačno, zato što uticaj zavisi od:

- veličine otvora,
- primenjene metode izgradnje i metode iskopavanja,
- tipa potpornog sistema,
- orijentacije podzemnih otvora prema diskontinuitetima,

- uslova primarnih napetosti.

Za projekat tendera za izvođenje radova, mora da se pripremi geotehnički longitudinalni profil. Sada u tom longitudinalnom profilu mogu da se prepoznaju elementi tunela sa sličnim geotehničkim ponašanjem, kao i deonice u kojima će se sresti. To nam saznanje služi kao baza za procenu parametara projekta i klasifikaciju u fazi projekta.

Taj zadatak zahteva blisku saradnju inženjerskih geologa i geotehničkih inženjera. Klasifikacija se koncentriše na geotehničkom ponašanju stenske mase koja okružuje iskop te na režim i redosled iskopavanja kao i redosled i predmete stabilisanja.

Koristeći se empirijskom, kvalitativnom metodom projektovanja, kao rezultat dobijamo koncept klasifikacije koji se odnosi na ponašanje stenske mase i koji ima opseg od stabilnih uslova preko drobnih, pa sve do uslova gnječenja. Ovi uslovi treba da se podele u nekoliko klasa tipova stena za koje treba da se definišu osnovni geološki uslovi i očekivano ponašanje tla, kao što moraju da se definišu i zahtevi za podupiranjem i njihova projektovana funkcija su dati u odeljku 11.2. Zemljani radovi.

#### 11.3.2.2.2 Iskop tunela u tlu

Pouzdan alat kod projektovanja tunela u tlu su analitičke ili numeričke metode, naročito ako se tuneli nalaze pod malim nadslojem ili ispod zgrada i nekih drugih građevina (npr. mostovi, plinovodi, itd.). U takvim slučajevima treba da se obavi projektovanje metoda iskopavanja (korak napredovanja, podela profila iskopa u sekcije, potrebne pomoćne mere ...) i postavljanja obloga tunela ili barem treba da budu izvedene strukturne analize.

Kod definisanja različitih slučajeva opterećenja, treba da se uzmu u obzir kratkoročni i dugoročni uslovi kao i mogući opseg parametara projekta (npr. drenirani ili nedrenirani uslovi, visok i nizak nivo podzemnih voda).

Za bezbedno bušenje tunela mogu da se usvoje i neke pomoćne metode poboljšavanja tla, kao što su izvođenje sniženje nivoja podzemne vode postavljanje cevno štita, injektovanje, rad pod vazдушnim natpritiskom i veštačko smrzavanje tla (vidi odeljak 11.2.5.3.1.4 i 11.2.5.3.1.5).

### 11.3.2.3 Računske analize i dimenzionisanje nosećih elemenata

Računske metode dimenzionisanja nosećih elemenata se koriste sa ciljem da se:

- u fazi planiranja proveriti izvodljivost (izgradnje) podzemnog objekta u odnosu na procenjene geotehničke uslove,
- proveriti i dokaže stabilnost podzemnog prostora odnosno objekta u svakoj fazi gradnje,
- povratnim geostatičkim analizama optimizuje primenjen način iskopavanja i podupiranja.

Potrebno je da se sačini dokazni dokument za:

- granično stanje nosivosti,
- granično stanje upotrebljivosti.

Metode provere odgovarajuće nosivosti podgrade:

- analitičke metode,
- numeričke metode,
- empirijske metode (metode posmatranja).

### 11.3.2.4 Principi konvencionalne metode izgradnje tunela

Konvencionalne metode izgradnje tunela (odjelak 11.2.5.3) je istovremeno i filozofija projektovanja i opšti, ali praktični pristup izgradnji tunela. Namena joj je postizanje tehnički čvrstog, sigurnog i ekonomičnog projektovanja.

To je koncept koji razmatra geološku formaciju koja okružuje tunelski iskop dvojako, kao opterećenje i kao prsten koji podnosi opterećenje. Taj aspekt odvaja metod od mnogih drugih filozofija projektovanja tunela, u kojima se pretpostavlja da masa tla prenosi svu ili deo težine na oblogu.

Kad je tunel iskopan, tada se in-situ stanje napetosti u okružujućem tlu pretvara, kroz nekoliko posrednih koraka redistribucije napetosti, sve dok se ne dosegne novo stanje ravnoteže. Uspešna primjena metoda zahteva pridržavanje ovih principa:

- Odabir odgovarajućeg oblika tunela treba da je u skladu sa postojećim uslovima napetosti i čvrstoće mase tla. Kao rezultat toga, pravilni oblik tunela smanjuje koncentracije napetosti i značajno doprinosi stabilnosti.
- Redosled iskopavanja i postavljanja potpornog sistema, treba da bude takav da deformacije okolnog materijala ostanu

dovoljno male, kako ne bi došlo do smanjenja čvrstoće sistema.

- Metod i procedure iskopavanja treba da budu pažljive kako bi smanjile narušavanje stanja tla izvan granica iskopavanja.
- Trebaju da se uzmu u obzir i hidrogeološki uslovi. Voda, naročito kada je pod visokim pritiskom, treba da otiče, kako bi se sprečio njezin negativan uticaj na čvrstoću stenske mase i kako bi se smanjio njezin pritisak.
- Obloge treba da budu relativno tanke i fleksibilne i u punom kontaktu sa okružujućim tлом kako bi se smanjili momenti savijanja koje apsorbuje obloga. Komponente obloge tunela, kao što su mlazni beton i lagani čelični lukovi moraju da se odaberu i dimenzionišu na način, koji će da pomogne tlu u zadržavanju svoje inherentne čvrstoće.
- Potporni elementi treba da se odaberu prema svojoj prilagodljivost promenama u geološkim uslovima uzduž tunelske trase zbog minimiziranja drastičnih promena u opštem sistemu podupiranja kako izgradnja tunela odmiče.
- Merenje deformacija je sastavni deo metoda i nije neophodno samo za postizanje bezbednosti tunela već i za proveravanje pretpostavki projektovanja pre postavljanja finalne obloge. Uobičajeno korišćena oprema sastoji se od konvergentnih igala i reflektora za trodimenzionalno optičko praćenje kako bi se utvrdile deformacije u inicijalnoj oblozi tunela, ekstenzometri za procenu ponašanja tla oko iskopa, tlačne ćelije, merači napetosti, inklinometri, nivelacioni merači, itd.

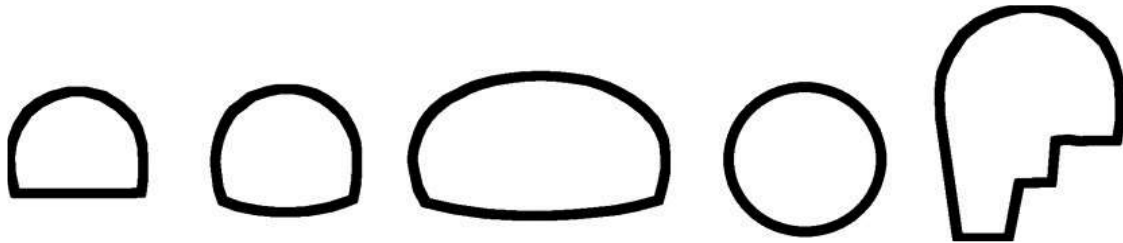
Ovi osnovni principi su u vezi izkopavanja sa bilo kojom tehnikom podupiranja i iskopavanja. Istorijsko iskustvo je pokazalo da mlazni beton i stenska sidra najekonomičnije zadovoljavaju tehničke zahteve metoda. Međutim, kao komponente obloge se koriste i lagani čelični lukovi i varene žičane mreže, uz ostale dodatne potporne elemente.

Konvencionalan metod podrazumeva aktivni pristup projektovanju koji zahteva bliski kontakt između projektanta i gradilišta jednom kad je završen početni projektni paket. Projekat nije gotov nakon projekta tendera za izvođenje radova, finalno projekat se razvija tokom iskopavanja kroz pristup „projektovanje in situ“. Sam projektant treba da rastumači rezultate praćenja, verifikuje pretpostavke projekta i da održava povratnu

spregu sa projektom za vreme izgradnje tunela.

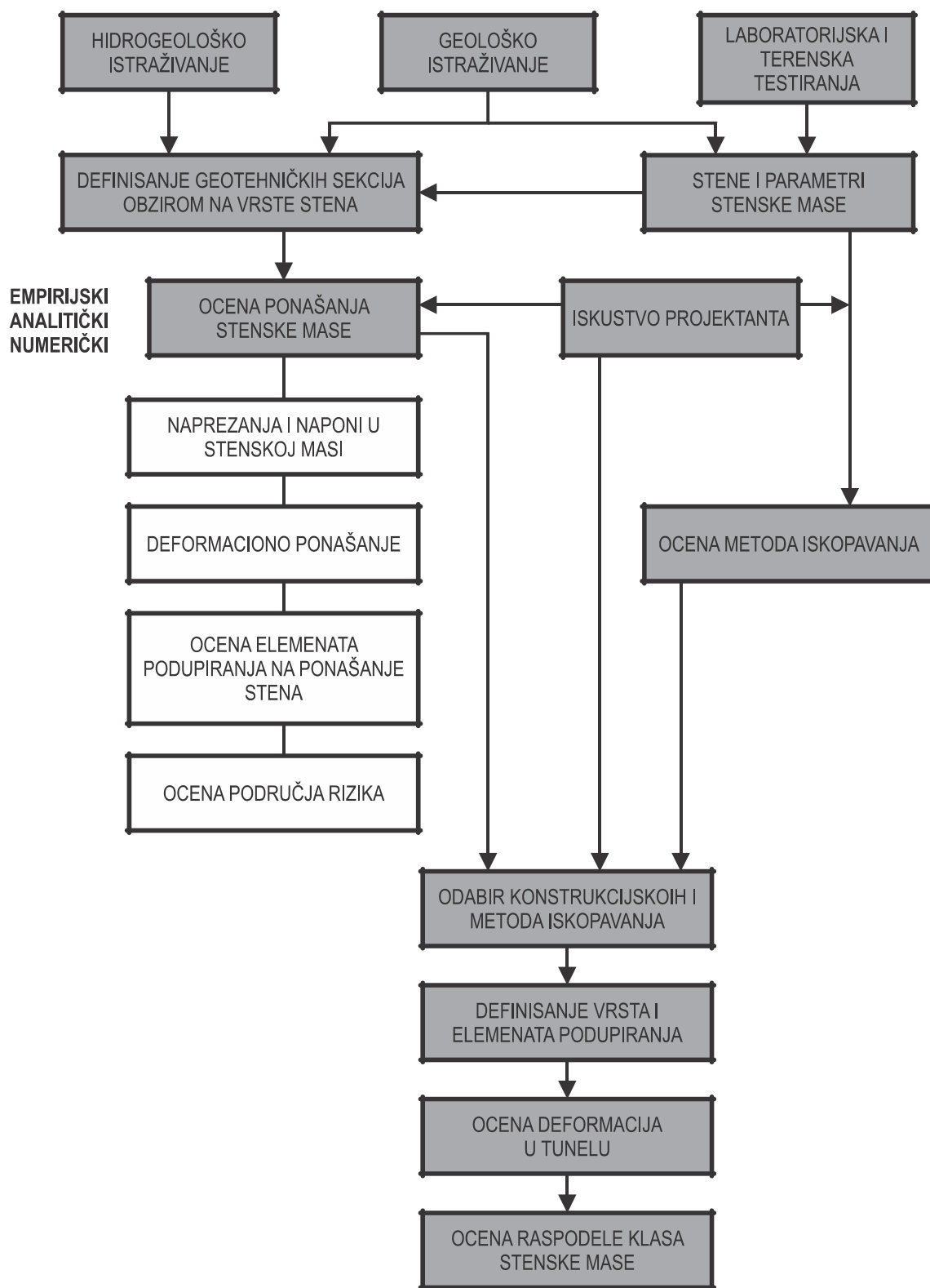
Veliki deo uspeha konvencionalne metode tokom protekle tri decenije, treba da se pripíše njegovoj prilagodljivosti skoro svim tipovima uslova tla, ali i maksimalnoj fleksibilnosti u odabiru metoda izgradnje oblaganja tunela. Takođe, može da se

primijeni na tunele svih veličina i različitih oblika i da istovremeno vrši blagovremena ekonomska prilagođavanja promenjivim uslovima u tlu čime poboljšava izvodljivost projekata izgradnje tunela čak i u područjima gdje su uslovi u stenama vrlo osetljivi.



Slika 11.3.1: Tipični poprečni preseki kod konvencionalne tunelogradnje





Slika 11.3.2. Konvencionalna metoda pristup projektovanju

### 11.3.2.5 Planiranje nosećih elemenata

Primarni noseći elementi su konstrukcioni elementi koji samostalno ili u različitim kombinacijama trajno obezbeđuju propisanu stabilnost iskopnog prostora. Zbog toga je prilikom planiranja ugradnje ovih elemenata potrebno da se definišu odnosno uvažavaju tipski načini podupiranja koji generalno uključuju kombinacije standardnih nosećih elemenata.

Primarna podgrada čiji su sastavni delovi pojedinačni noseći elementi uzeta je u obzir kao sastavni deo celokupnog sistema podupiranja u tunelu.

Planirani odabir krutog ili prilagodljivog odnosno fleksibilnog (popsutljivog) načina primarnog podupiranja generalno zavisi od geometrijskih osobina preseka, geotehničkih osobina stena i stanja površine na području uticaja (naseljeno, nenaseljeno, prošarano infrastrukturnim objektima i sl.) tunela i od visine nadsloja. Izvođenje primarne obloge je striktno i brzo, da bi se sprečile odnosno

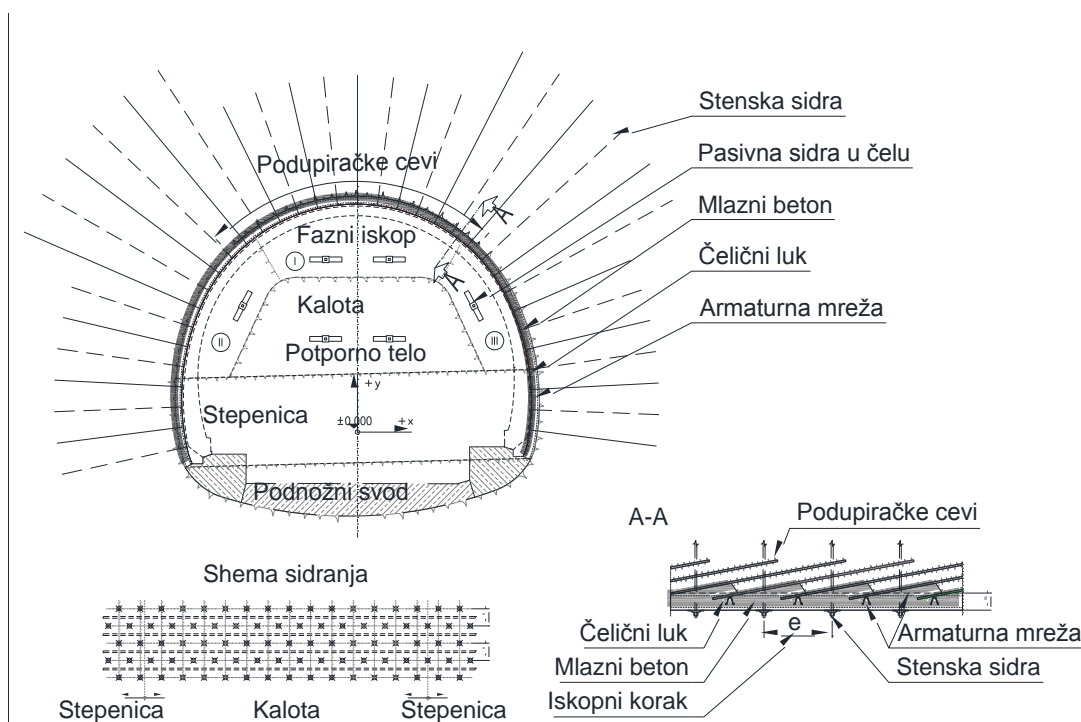
smanjile deformacije tla, te da bi se smanjio red veličine sleganja površine iznad tunela.

Kod tunela koji imaju srednje visoku ili visoku natkrivenost, prilikom planiranja gradnje treba dozvoliti veću deformaciju, što zahteva ugradnju elastičnog i istovremeno ekonomičnog sistema podupiranja (tanke obloge od mlaznog cementnog betona, primena raznih vrsta čeličnih lukova i stenskih sidra, izvođenje deformacijskih otvora sa ugrađivanjem popusujućih elemenata podgrade i sl.).

#### 11.3.2.5.1 Standardni sistem podupiranja

Standardno podupiranje mora da bude određeno za svaki tip stenske mase koja je određena u geotehničkom modelu.

Standardni potporni elementi treba da se odaberu prema prilagodljivosti promenama u geološkim uslovima duž trase tunela



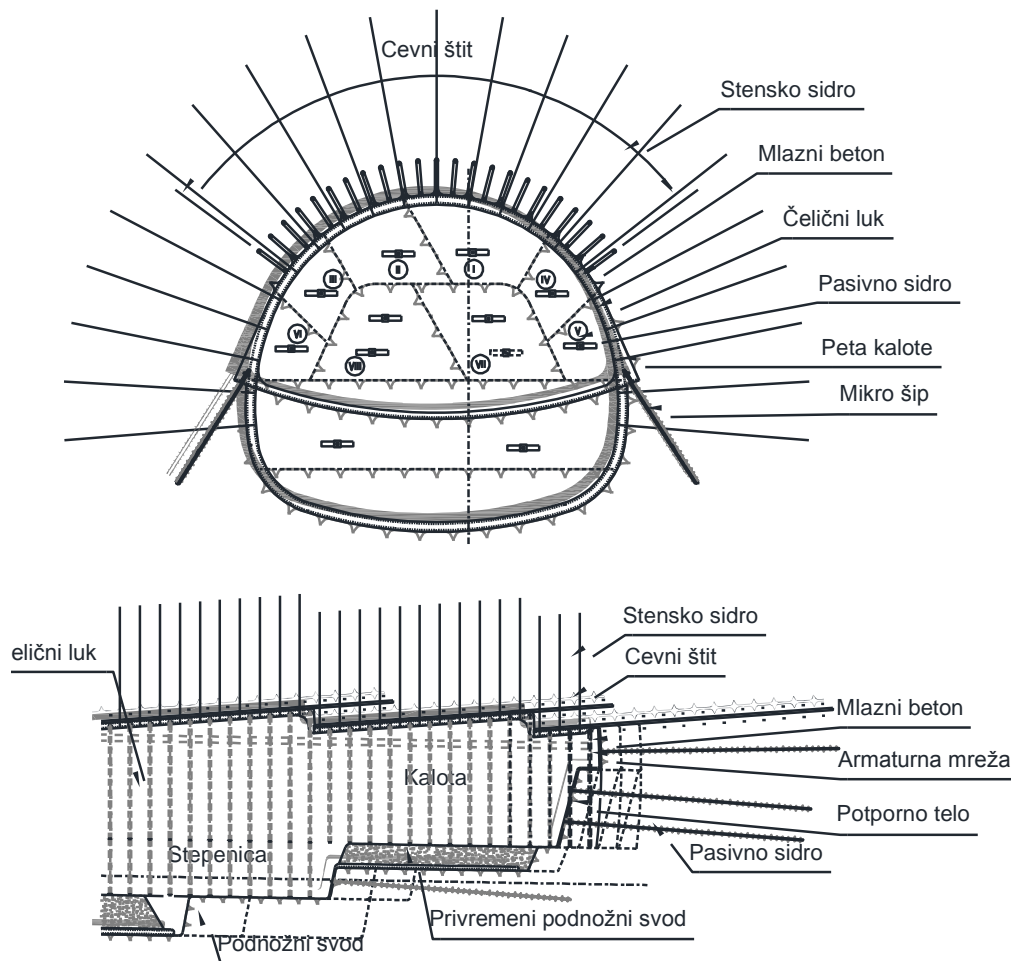
Slika 11.3.3: Primjer s standardnih tipa podgrade u nepovolnim geološkim uslovima

Planiranje sistema podupiranja određeno je:

- debljinom obloge od mlaznog cementnog betona,
- brojem armaturnih mreža,
- debljinom i razmacima između čeličnih lukova,

- nosivošću i dužinom stenskih sider,
- dužinom koraka iskopa,
- dodatnim ili pomoćnim, potpornim elementima,
- podelom iskopa na pojedinačne faze i redosled radova.

- pomožne mere za poboljšanje stenske mase.

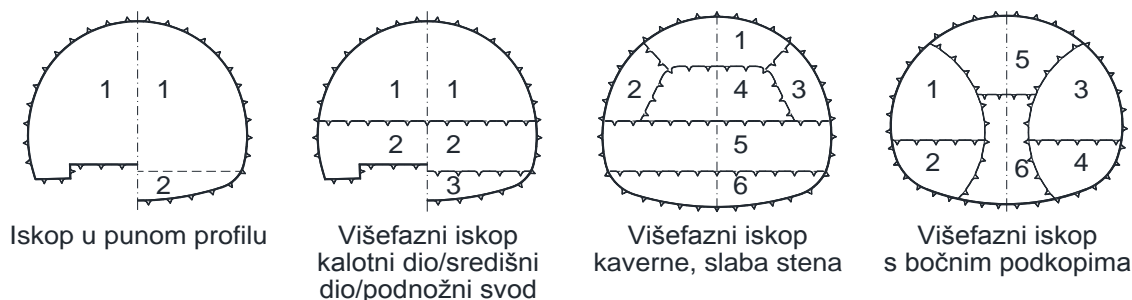


Slika 11.3.4: Projekat postupaka iskopa – primer iskopa u steni slabe nosivosti, gdje je cjelokupni iskopni profil podjeljen u kalotu, stepenicu i podnožni svod, i upotrebljen cevni štit, fazni izkop kalote u 8.faza, usidremo potporno telo, privremeni podnožni svod, mikro šipovi i raširena stopa kalote

#### 11.3.2.5.2 Podela na sektore iskopavanja

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

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



Slika 11.3.5: Planirani redosled faza iskopavanja u gradnji tunela

Prilikom planiranja redosleda faza iskopa treba uzeti u obzir:

- veličinu poprečnog preseka tunela,
- kategoriju stenske mase,
- ograničenja vremenskog razvoja deformacija,
- ograničenja zbog vibracija (miniranje).

Planirani standardni sistemi podupiranja i redosled radova u iskopavanju tokom izvođenja radova mogu da se prilagođavaju činjeničnim geotehničkim uslovima i drugim mogućim zahtevima koje diktira naručilac ili su posledica više sile.

Projektom za dobijanje građevinske dozvole moraju da budu određeni:

- geometrija i tipovi standardnih potpornih sistema za predviđene kategorije hridina,
- dužine korakâ iskopa,
- izvođenje podupiranja i drugi specifični zahtevi.

Svi drugi detalji i specifičnosti određene su u projektu za izvođenje radova.

#### 11.3.2.5.3 Glavni noseći elementi

Prilikom gradnje tunela planirani su sledeći glavni noseći elementi:

- mlazni cementni beton (nearmiran, armiran armaturnim mrežama ili mikroarmiran čeličnim kompozitnim vlaknima),
- stenska sidra od čelika ili od drugih odgovarajućih materijala (staklena vlakna, kompozitna vlakna i sl.),
- čelični lukovi ili pojedinačni elementi konstrukcije od drugih materijala (I-profil od zakrivljenog konstrukcionog čelika, TH-čelični i drugi slični profili osmišljeni za gradnju podzemnih objekata, čelični lukovi u obliku šipki raznih dimenzija i statičnih svojstava).

#### 11.3.2.5.3.1 Mlazni beton

Mlazni beton se primenjuje kako bi se izbeglo popuštanje okružujuće stenske mase ali i kao nosivi element. Obloga mlaznog betona pokriva i zatvara pukotine u kamenu i sprečava otpadanje i pucanje. Održavanje početne čvrstoće stene je presudno za formiranje stenskog svoda oko profila iskopa.

U osnovi, obloga mlaznog betona u običnim tunelima može da se smatra nearmiranim betonom. Praktično iskustvo pokazuje da obloga tunela ne popušta pred savijanjem, nego pod preteranim pritiscima što ima za posledicu raspukline pri smicanju. Preterani momenti savijanja redukuju se puzanjem i njihova se preraspodela vrši formiranjem pukotina tako stvarajući zglobni sistem. Takav višestruki zglobni sistem tunnelske obloge je stabilan u odnosu na kinematičke principe pod uslovom da je „potpuno ugnežđen“ u okružujuće stene ili zemlju i da je obloga tunela pravilno oblikovana, sa glatkim, zavijenim stropom i zidovima.

Minimalna pritisna čvrstoća (kubična čvrstoća) 25 MPa posle 28 dana, kakva se navodi u mnogim projektima, može da se postigne korišćenjem suve mešavine 350 do 400 kilograma portland cementa po kubnom metru.

Konvencionalne dodatne mešavine za ubrzavanje sa visokim sadržajem alkalnim ubrzivača za brže vezanje i veću pritisna čvrstoća na početku, utiču na smanjenje finalne pritisne čvrstoće. Stoga su one pogodne samo za mlazni beton koji nema konstrukcijsku funkciju (npr. izolacioni slojevi, zapunjavanje prekomernih lomova itd.). Alkalni ubrzivači ugrožavaju zdravlje radnika i predstavljaju dugoročnu pretnju okolini.

Nealkalni i niskoalkalni ubrzivači nude značajne prednosti u radnim uslovima, kompatibilnost sa okolinom i tehnološkim karakteristikama. Oni izazivaju tek lagano smanjenje finalne pritisne čvrstoće mlaznog betona.

Najnovija dostignuća primenjuju mlazni beton sa brzovežućim cementima bez ikakvog ubrzivača. Pritom nema nikakve redukcije finalne pritisne čvrstoće.

S obzirom na pitanja zaštite okoline, zdravlja radnika i održavanja (npr. odvodne cevi) smeju da se koriste samo nealkalni ubrzivači ili brzovežućci cementi.

#### 11.3.2.5.3.2 Armaturna mreža

Armaturna mreža se primenjuje kao konstrukcijsko pojačanje obloga mlaznog betona. Uz to ima i sledeće funkcije:

- poboljšanje adhezije slojeva mlaznog betona,
- stabilisanje i ojačavanje nanetog sloja mlaznog betona dok se ne veže i ne stvrdne,
- ojačanje smicajne čvrstoće,
- ojačanje konstrukcijskih spojeva,
- smanjenje i ograničenje pukotina zbog puzanja i prenaprezanja,
- korišćenje pojačanja obloga tunela u longitudinalnom smeru na granicama faza izgradnje (npr. nadvoji / klupe),
- sprečavanja otpadanja komada mlaznog betona posle naprsina ili pucanja obloga,
- zaštita radnika i opreme pre betoniranja mlaznim betonom.

Samo ako je mlazni beton nanet kao lokalna potpora (npr. u izvrsnim stabilnim uslovima) ili kao zaptivni sloj, žičana mreža može da se izostavi za tanke slojeve (manje od 5 cm).

Kako bi se minimizovao odboj i postigao dobar kvalitet mlaznog betona, razmak između žica zavarenih u mrežu ne bi smeo da bude manji od 100/100 mm, a poželjan je razmak od 150/150 mm. Radi učinkovitosti, prečnik žica ne bi smeo da bude manji od 5 mm. Za praktičnu upotrebu, savijanje, popravljavanje itd. prečnik žica ne bi smeo da bude veći od 8 mm.

#### 11.3.2.5.3.3 Mlazni beton pojačan vlaknima

Za specijalne primene mlaznog betona, može da se traži dodavanje čeličnih ili kompozitnih vlakana. Dodavanjem vlakana mlaznom betonu znatno se pojačava čvrstoća

savitljivosti, smicajna čvrstoća, udarna čvrstoća, direktna čvrstoća vlakna, otpornost na udarce, žilavosti otpornost na lom. Kada je mlazni beton armiran vlaknima, žičana mreža može da se izostavi. Komparativne prednosti su:

- brža izrada osnovne podgrade,
- veći učinak i bezbednija izrada (tunelski radnici nisu izloženi opasnosti na radu pod samo delimično zaštićenim otvorenim prostorom, čemu bi inače bili izloženi prilikom montiranja armaturne mreže).

#### 11.3.2.5.3.4 Čelični lukovi

U modernoj izgradnji tunela, funkcija čeličnih lukova je ograničena na ulogu armature i elementa distribucije tereta u oblozi mlaznoga betona te na momentalnu potporu onih područja koja se nalaze direktno pored mesta iskopa, gdje mlazni beton još nije nanesen ili gdje nije još razvijena dovoljno velika nosivost.

Stoga čelični lukovi uglavnom služe kao privremeni potporni elementi koji osiguravaju radno područje dok mlazni beton nije nanesen i dok još nije očvrstnuo. Tamo gdje je potrebno korišćenje koplja, čelični lukovi mogu da se koriste za usmeravanje bušenja i za podupiranje cevi nakon sledećeg koraka iskopavanja.

Postoji nekoliko tipova čeličnih lukova:

- U obliku slova H,
- U obliku slova U („TH” profili),
- Rešetkasti nosači.

*H-nosači* mogu da se proizvedu kao zavareni ili valjani profili. Povezivanje različitih segmenata u oblik prstena postiže se pritezanjem završnih ploča. Lukovi u obliku slova H dozvoljavaju tek relativno male deformacije. U slučaju velikih deformacija, H-lukovi su opterećeni na izvijanje.

*U-profil* omogućavaju klizne spojeve, koji su neophodni u tunelima sa očekivanim velikim deformacijama. Takođe, u tunelima gde su bočne galerije unapred izgrađene, ovi profili moraju se odabrati za delove gornjega nadvoja radi lakše ugradnje i povezivanja u krunu.

Zbog svoje manje težine, *rešetkasti nosači* mogu se lagano složiti i postaviti. Vitkija konstrukcija, je međutim, sklonija mehaničkom oštećivanju tokom transporta, skladištenja i podizanja. U slučajevima velikih deformacija, rešetkasti nosači su pod uticajem naprezanja na izvijanje svijanja – baš kao i H-lukovi.

### 11.3.2.5.3.5 Stenska sidra

Stenska sidra su jedni od glavnih potpornih elemenata u modernoj izgradnji tunela u stenama, bez obzira na okružujuće stenske mase same po sebi. Oni mogu da se postave lokalno da podupiru pojedine blokove ili da smanje razmak između tankih stenovitih slojeva, ili se primjenjuju sistematski kao dio standardnog potpornog sistema.

Stenska sidra pojačavaju kvalitet stena povećavajući smicajnu čvrstoću i, ako su prednapregnuti, stvaraju v azitrodimenzionalne uslove napona koristeći se unutrašnjim pritiskom.

Dimenzioniranje sidrenih ploča od naročitog je značaja. Ne smeju da budu ni premale ni prevelike. Sidrena ploča treba da rasporedi sidrenu snagu na podgradu ili stenu i mora da upozori kada su sidra preopterećena. U vezi s tim, sidrena ploča treba da se deformiše plastično, bez lomljenja u situacijama kad napetost dolazi do granice loma.

#### Trenjska sidra

Ova sidra se u steni drže pomoću trenja, bilo lokalnog ili svojom cijelom dužinom. Oni nisu usađeni u injektiranu smesu (žbuku), pa im je otpornost na koroziju smanjena. S druge strane, vrše svoju podupiračku ulogu odmah nakon postavljanja i ne smetaju im problemi sa žbukom u slučaju velikog dotoka vode.

#### Sidra sa rascepljenim klinom

Ovaj tip sidara ima rascepljeni klin ili neki sličan deo da bi usmerio vezivne sile u stenu. sidra koji se šire treba da budu odabrani tako da odgovaraju pojedinom tipu stene. Sidro može da bude podvrgnuto teretu i može da bude prenapregnuto odmah nakon ugradnje.

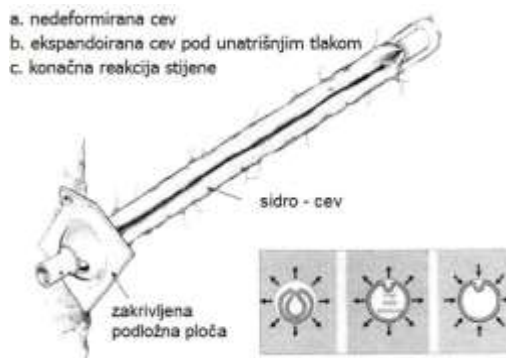
Dužina slobodnog produženja odgovara dužini sidra. Konstanta elastičnosti je značajno manja nego u slučaju potpuno ugniježđenog sidra, što smanjuje njegovu efikasnost.



Sidra dejstvuju samo kao privremeni potporni elementi koji nisu zaštićeni od korozije.

#### Swellex sidra

Swellex sidro sastoji se od mehanički naborane čelične cevi, koja se širi u bušotini usled delovanja vode pod visokim pritiskom. Za vreme procesa bubrenja, swellex sidro prilagođava svoj oblik kako bi popunio sve nepravilnosti u izbušenoj rupi, čime povećava snagu stene dajući potpuni frikcion i mehanički međuspoj duž cele svoje dužine. Njegova jedinstvena fleksibilnost je ono što ga čini prikladnim za razne uslove u tlu, od srednjih pa sve to čvrstih stena.



Glavna prednost swellex sidra nad zalivnim je činjenica da mogu da budu ugrađeni vrlo brzo nakon iskopavanja i da dejstvuju tako da odmah mogu da podnesu teret. Glavno polje njihove primene je lokalna zaštita nestabilnih sekcija ili blokova na mestu iskopavanja.

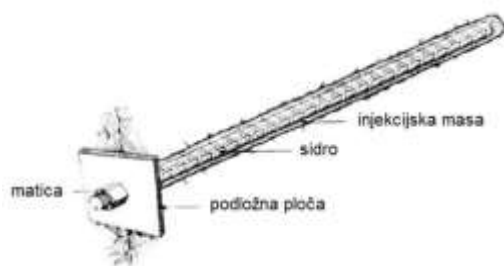
#### Zalivna sidra

S obzirom na svoju dejstvo ova sidra mogu da se podele u neprednapregnuta i prednapregnuta sidra. Kod prednapregnutih sidara u područjima povezivanja treba da se koriste ubrzivačke patrone ili smola. U današnje doba, stenska sidra su prednapregnuta samo kada se koriste u uslovima stena koji variraju od izvrsnih do dobrih. Sile prednaprezanja iznose i do 100 kN ili čak 150 kN. U uslovima koji variraju od

osrednjih do slabih, prednaprezanje nije potrebno s obzirom da se sidra napregnu radijalnim deformacijama podgrade.

#### SN-sidro

Sidro najšire primene je ono SN vrste. (SN zato što je ovaj tip sidara prvi put upotrebljen u projektu hidroelektrane Store Norfors, u Švedskoj). SN sidra su ona koja, kada se smjeste, povezuju se sa stenom/kamenom duž cele svoje dužine pomoću odgovarajuće žbuke. Cela bušotina se pre ugradnje sidra napuni gostom cementnom injektirnom masom (žbokum). Sidro može da bude prednapregnuto ili neprednapregnuto.



Proporcionalni odnos između prečnika SN sidra i prečnika bušotina okvirno iznosi 1 : 1,5-2.

#### Samobušeno sidro IBO injeksiono sidro (injection-bore-bolt)

IBO sidra predstavljaju kombinovani sistem sidra za stene i šipke za bušenje. Za vreme bušenja, šuplje IBO sidro se koristi kao šipka za bušenje. Na kraj sidra stavi se bušeća krona koje može da bude različitih preseka. Šipka i dleto ostaju u bušotini kao stensko sidro. Rupa širokog dijametra unutar IBO šipke omogućava tokom bušenja ispiranje materiala od bušenja a posle bušenja i delotvorno injektiranje.



To se za vreme bušenja koristi kao vod za ispiranje, a kasnije i kao cev za injektovanje. Ovaj sistem pokazuje sve svoje prednosti u slučaju urušavanja bušotine, s obzirom da ne treba da se vadi šipka za bušenje i umeće novo stensko sidro.

#### Injeksiono sidro

Injeksiona sidra su ona sidra koja, kada su na mestu, povezana su sa stenom celom svojom dužinom uz pomoć cementne žbuke, slično SN sidrima, ali je žbuka injektovana u bušotinu nakon nameštanja sidra. Ovi tipovi stenskih sidara se uspešno primenjuju u područjima sa značajnim unutrašnjim dotokom vode, koji se obično pojavljuje u zonama jako naprslih stena, drobljenih stena i u mekom tlu. Zbog činjenice da ubrzavajuće patrone ne mogu da budu korišćene zajedno sa injeksionim sidrima, na njih mora da se računa kao na neprednapregnuta stenska sidra.

U naprsnim, zdrobljenim stenama sa podzemnom vodom, efikasnost uspešno i dobro ugrađenim injeksionih sidara dokazano je veća od običnih, prednapregnutih SN sidara, koji teško da se mogu pravilno injektirati u ovim uslovima. Cementna masa injektovana pod malim pritiskom penetrira i ispunjava pukotine, raspekline i praznine oko stenskog sidra i tako povećava čvrstoću stenske mase što je kompenzacija nedostatka prednaprezanja.



Razlika injeksionog od IBO sidra je uglavnom u tome što je injeksiono sidro potpuna čelična šipka koja ima plastičnu cev spojenu na čeličnu šipku koja deluje kao crevo za injektiranje, dok su IBO sidra šuplja, a taj otvor služi kao crevo za injektiranje.

Proporcionalni odnos između prečnika sidra i prečnika bušotina okvirno iznosi 1 : 2.

#### Geotehnička sidra

U izgradnji tunela geotehnička sidra se uglavnom primenjuju u velikim tunelima i secištima u mekom tlu ili steni. Oni mogu da budu privremena ili trajna potpora.

Geotehnička sidra (kablovska sidra, prednapeto sidro)



Prednapregnuto sidro se sastoji od čeličnih užadi (šipke) za prednaprezanje.

Razmak između užadi i plastične cevi mora da bude dovoljno veliki da obezbedi savršeno postavljanje u cement ili malter ili u trajno plastični materijal za zaštitu od korozije.

Kod trajnih geotehničkima sidara posebna pažnja treba da se posveti zaštiti od korozije strukova užadi u veznoj dužini, slobodnoj dužini, kod područja glave sidra koja i za samu sidrenu glavu.

#### 11.3.2.5.4 Dodatni ili pomoćni potporni elementi

Prilikom gradnje tunela planirani su sledeći elementi:

- koplja (čelične cevi ili armaturne šipke)
- talpe napravljene od debelog čeličnog lima kojima se sprečava urušavanje tavanice i bočnih strana u nevezivim zemljanim materijalima,
- cevni štiti (cevni krov, kišobran, pipe roof)
- mikro šipovi (piloti),
- LSC (popuštajući elementi podgrade).

##### 11.3.2.5.4.1 Koplja (čelične cevi ili armaturne šipke)

Koplja (čelične cevi ili armaturne šipke) se ugrađuju u teme i bok tunela, zbog sprečavanja rušenja u tavanici i boku tunela.

Koplja su privremeni podupirački elementi koji se postavljaju u longitudinalnom smeru tunela pre iskopavanja. Ti elementi smanjuju slobodan raspon nepoduprte površine iskopavanja. Koplja su potporna pomoć kod iskopavanja i nemaju gotovo nikakvu funkciju nakon postavljanja inicijalne obloge (mlazni beton, žičana mreža, stenska sidra).

Uglavnom se koriste čelične cevi i armaturne šipke. Mogu da se zabiju u tlo ili, da se umetnu u prethodno izbušene rupe. Ako su postavljene u ranije izbušene rupe, prostor između potpornih cevi (ili šipki) i stene bušotine treba da se zacementira.

Razmak između koplja zavisi uglavnom od dužine koraka napredovanja, stenskog opterećenja (nadslojem) i geoloških uslova.

Dužina podupiračkih cevi i koplja mora da bude bar 2 do 2 1/2 puta dužina koraka iskopa.

##### 11.3.2.5.4.2 Čelične talpe

Talpe treba upotrebljavati uglavnom na lošem, nekohezivnom terenu, radi sprečavanja obrušavanja materijala u toku i neposredno nakon iskopavanja. Upotreba talpi zahteva postavljanje čeličnih lukova.

Upotrebljavaju se čelične talpe debljine od 4 do 6 mm. Dužina se određuje u skladu sa dužinom iskopavanja i zahtevima koji se odnose na osiguranje iza radnog čela. Dužina čelične talpe iznosi od 1,5 do 2,0 m. Širina lima treba da iznosi između 180 mm i 225 mm.

Postavljanje talpi se izvodi u skladu sa dužinama prikazanim na crtežima. Talpe treba pobiti u teren ispred iskopavanja određene kampade do dubine koja prelazi minimalnu dužinu od 0,8 metara iza radnog čela. Šupljine i otvore iza talpi treba ispuniti mlaznim betonom ili masom za injektiranje od cementnog maltera.

##### 11.3.2.5.4.3 Cevni štiti

Cevni štiti, koji se sastoji od čeličnih cevi, postavlja se u slučaju malog nadsloja (do 2-3 prečnika tunela) ispod kuća i ostalih građevina, kako bi se smanjilo sleganje i povećala stabilnost iskopne površine. Obično se cevni štiti koriste u tlu i vrlo slabim stenama (raspadnute ili potpuno pod uticajem atmosferilija, potpuno odlomljene, napsnute ili stene u obliku milionita).

Cevni štiti nije prikladan za kontrolu podzemnih voda u formacijama koje sadrže vodu. U takvim uslovima, cevni štiti treba da budu kombinovani sa dodatnim merama kontrole podzemnih voda (npr. bunari za snižavanje nivoa podzemnih voda, vukumske cevi, itd.)

U principu postoje dvije metode:

##### Čelične cevi velikoga prečnika

Krov od cevi postavlja se kao kišobran iznad tavanice, ispred čela iskopa tunela. Čelične cevi postavljaju pomoću metoda mikro izgradnje tunela i kasnije se pune betonom.

##### Čelične cevi malog prečnika (slika 11.3.4)



Cevni ščit postavlja se kao kišobran iznad tavanice, ispred čela izkopa tunela. Čelične cevi se buše i kasnije pune cementnom masom. U mekanom terenu ili u tlu, čelične cevi mogu da se koriste kao »manšetne cevi« za injektiranje (injektiranje pod pritiskom) tla između i oko cevi. Generalno se razmaci čeličnih cevi malog prečnika kreću između 20 i 40 cm, u zavisnosti od kohezivnosti tla ili stenske mase. Injektirani cevni štit se uglavnom postavlja u dužinama od 12 do 20 m. Preklapanje može da bude 3 do 4 metra. Prazan prostor između zida bušotine i čeličnih cevi treba da se ispuni cementnom masom.

#### 11.3.2.5.4.4 Mikro šipovi (*Micro-piles*)

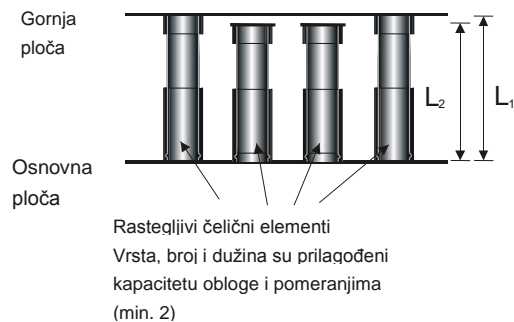
Mikro šipovi moraju da budu ugrađeni u petu kalote u područjima manje natkrivenosti, gde tuneli prolaze ispod naselja. Mikro šipovi moraju da prenose opterećenja sa obloge od mlaznog cementnog betona u okolnu stensku masu. Na ovaj način se smanjuje sleganje u oblozi od mlaznog cementnog betona u kaloti, te opasnost od obrušavanja stenske mase između kalote i privremenog podnožnog svoda. To omogućuje povećanje stabilnosti bočnih strana tokom iskopavanja stepenika.

Mikro šipovi moraju da budu sastavljeni od rebrastih čeličnih cevi, spoljašnjeg prečnika  $\varnothing$  60 mm i debljine najmanje 6 mm. Čelične cevi moraju da budu u potpunosti obložene cementnim malterom. Prečnici bušotina za mikro šipove moraju da iznose najmanje 120 mm.

#### 11.3.2.5.4.5 LSC (*popuštajući elementi podgrade*).

Da bi izdržala velike deformacije koje se javljaju u toku iskopavanja tunela u stenama sa nepovoljnim karakteristikama tunelska obloga se deli na segmente pomoću uzdužnih razmaka. Radi boljeg iskorišćenja nosivosti obloge u deformacione otvore se u kružnom smeru postavljaju stišljivi elementi izrađeni od mekog čelika.

Elementi za kontrolu napona u oblozi se upotrebljavaju za postizanje kontrolisane duktilnosti tunelske obloge. Ograničenjem razvoja normalnih napona sprečeno je preopterećivanje betonske obloge i time osiguran noseći kapacitet podgrade.



### 11.3.3 UNUTRAŠNJA BETONSKA OBLOGA (SEKUNDARNA OBLOGA)

#### 11.3.3.1 Opšte

Iako se stabilnost tunela postiže inicijalnom ili primarnom podgradom, obično se projektuje i sekundarna obloga tj. unutrašnja obloga. Unutrašnja obloga povećava sigurnost sistema obloga tunela i daje jednoliku i glatku unutrašnju površinu. Osim toga, ona omogućava ugrađivanje membranskog sistema obloga kako bi se ostvarila nepropusnost tunela. Glatka unutrašnja površina je važna za ventilacioni sistem tunela kao i za održavanje (pranje tunela), ali i iz estetskih razloga.

Unutrašnja obloga može da se izvede od armiranog ili nearmiranog betona. Stenska masa oko obloga može biti drenirana ili nedrenirana. U zavisnosti od toga obloga nije ili je opterećena vodenim hidrostatičkim tlakom. Odluka o principima izgradnje zavisi od sledećih faktora:

- mogućnost slobodnog, ograničenog ili pumpajućeg pražnjenja podzemnih voda u površinski odvod,
- očekivana količina vode,
- zatečeni pritisci vode,
- uticaji hidrološke okoline, kao što je uticaj bunara, javne i privatne vodovodne mreže, izrada drenaže podzemnih i površinskih voda, troškovi postupka pumpanja, ako je potrebno.

Tuneli koji nisu opterećeni vodenim pritiskom generalno su opremljeni nearmiranom unutrašnjom oblogom. Tuneli koji su opterećeni vodenim pritiskom, uvijek su opremljeni armiranom unutrašnjom oblogom.

U područjima portala, gde su cevi tunela produžene i konstruisane kao „cut and cover“ tuneli, nominalna debljina obloga obično treba da bude povećana. Stoga će se obloga

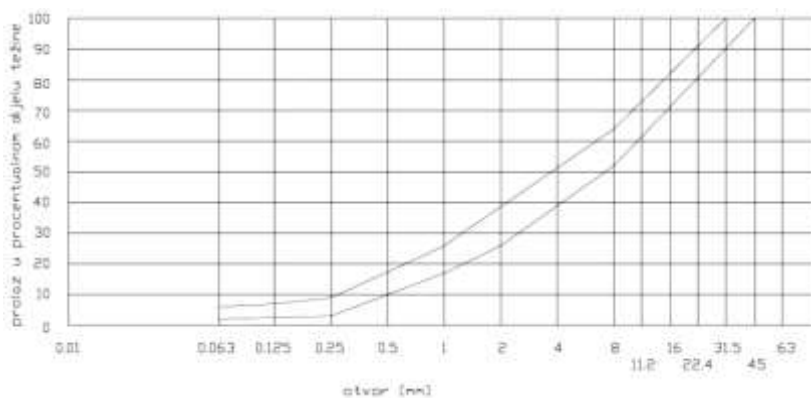
u tim područjima armirati, bez obzira na stanje pritiska vode. Debljina i armatura moraju da zadovoljavaju strukturalne zahteve prema projektovanom zasip – prekrivanje (visina, simetrično ili asimetrično prekrivanje, građevinska oprema za prekrivanje).

Ako je za stabilnost tunela potreban podnožni svod, postavlja se betonski luk. U drumskim tunelima sa dve trake minimalna debljina podnožnog svoda od livenog betona ne sme da bude manja od 50 cm. Povprečni građevinski spojevi glavne obloge moraju da se podudaraju sa građevinskim spojevima podnožnog svoda, međutim, podnožni svod može dodatno da bude podeljen.

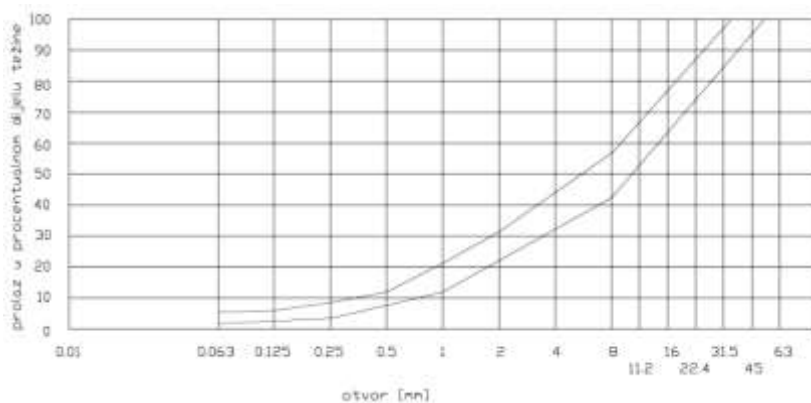
U tunelima sa visokim nadslojem, unutrašnja obloga se lije nakon što se deformacije umire. Deformacije sa brzinom manjom od 4 mm/mesecu generalno se tretiraju kao »one koje će nestati«. Ovo ne važi za bubreća i puzajuća tla. U slučaju deformacija koje su u toku, može da se preduzme jedna od sledećih mera:

- dodatno podupiranje kamene mase da bi se usporilo napredovanje deformacija,

Preporučuju se ove distribucije veličine zrna:



Slika 11.3.6: Distribucija veličine zrna kod armiranih unutrašnjih betonskih obloga



Slika 11.3.7: Distribucija veličine zrna kod nearmiranih unutrašnjih betonskih obloga

- postavljanje membrane koja omogućava dalje deformacije primarne podgrade ili drugih deformacionih elemenata između spoljne i unutrašnje obloge kako bi se dopustile deformacije za vreme nameštanja i otvrdnjavanja unutrašnje betonske obloge, međutim, treba uzeti u obzir dopuštene tolerancije i uslove razmaka,
- mere sadržane u projektu (pojačana čvrstoća betona, žilavost armature).

U plitkim tunelima unutrašnja obloga mora se liti čim je to moguće da bi se smanjila sleganja.

### 11.3.3.2 Projektni zahtevi

Zavisno od debljine unutrašnje obloge, mora se izvršiti odabir distribucije veličine zrna i maksimalne veličine zrna. Kod armiranih unutrašnjih obloga, preporučljiva maksimalna veličina zrna je 32 mm a kod nepojačanih unutrašnjih obloga ona iznosi 45 mm.

Mora da se koristi Portland Cement, sa prosečnom specifičnom površinom (po BLAINE) od 3.500 do 5.000 cm<sup>2</sup>/g.

Za unutrašnje oblaganje tunela treba da se koristi elektrofilterski (EF) pepeo. Kod nearmiranih unutrašnjih obloga, EF pepeo treba da bude 15% to 25% ukupne količine smese cementa i EF pepela. Kod armiranih unutrašnjih obloga udeo EF pepela može da se poveća za 10 %.

Treba da se koriste aditivi kako bi se smanjila ukupna količina vode za betoniranje unutrašnje obloge (maksimalno 170 l/m<sup>3</sup> vode). Uz sve, koriste se i plastifikatori i aeranti.

Iz strukturalnih razloga za unutrašnje obloge treba da se koristi beton klase C 25/30.

Ako klimatski uslovi to traže, moraju da se izrade segmenti otporne unutrašnje betonske obloge na portalima. Dužina obloge određuje se s obzirom na mikroklimatske uslove.

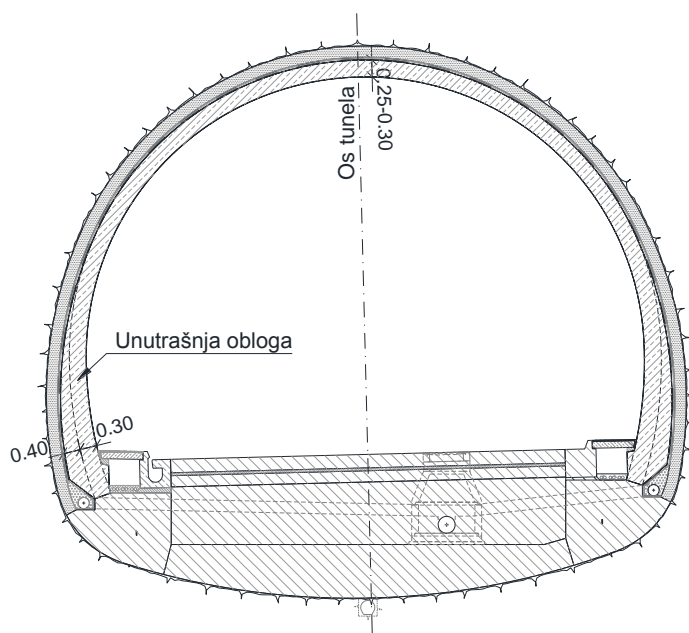
#### 11.3.3.2.1 Minimalni projektni zahtevi za unutrašnju oblogu

Sledeća tabela je preneti iz austrijskih »Uputstava za beton unutrašnje obloge« od Austrijskog betonskog društva. Dole prikazani iznosi važe za površine poprečnih preseka iskopa od 30 do 120 četvornih metara.

Tabela 11.3.1: Projektni zahtevi za unutrašnju oblogu

Kriterijum	Nearmirana obloga		Armirana obloga		Vodonepropusni beton
	Bez	Sa	Bez	Sa	
Membrana	Bez	Sa	Bez	Sa	-
Min. debljina cm	20 <sup>1)</sup>	25 <sup>1)</sup>	30 <sup>1)</sup>	30 <sup>1)</sup>	30 do 40 <sup>2)</sup>
Maks. dužina bloka <sup>3)</sup> (m)	12 <sup>4)</sup>	12 <sup>4)</sup>	12 <sup>4)</sup>	12 <sup>4)</sup>	10
Min. trajanje livenja (h)	8	8	8	8	8 <sup>5)</sup>
Normalno trajanje livenja (h)	10	10	10	10	12
Kontrola loma separacijski sloj	Preporuč. na području ulaza	Preko membrane	Preporuč.	Preko membrane	Potrebno
Armatura	-	-	Min. armatura ili prema potrebi (Eurocode 2)	Min. pojačanje ili prema potrebi (Eurocode 2)	Min. 0,1% poprečnog preseka betona u oba smera i na obema stranama Širina raspukline: < 0,2 mm
Građevinski spojevi	Kontakt	Kontakt	Kontakt	Kontakt	Trake za zaptivanje na radnim i blokovnim kontaktima
Betonski pokrov	-	-	40 mm obe strane	40 mm »vazдушna strana« 30 mm »stenska strana«	40 mm obe strane

- 1) Delovi stena i sidrne glave mogu da dopru najviše 5 cm u presek unutrašnje obloge.
- 2) Ako je na sredini preseka zaptivna traka.
- 3) Ograničenje najveće dužine koraka pre svega služi da onemogući formiranje pukotina i da poboljša kvalitet betona.
- 4) U blizini portalâ i na mestima sa velikim temperaturnim promenama zbog radno-tehničkih uslova je preporučljivo da se najveća dužina koraka prepolovi sečenjem prividnih spojeva. Na rastojanju između niša koje iznosi 50 m, dužina koraka treba da iznosi 12,5 m.
- 5) Važi samo kada se koristi cement koji ne sadrži C<sub>3</sub>A (zbog toplote hidratacije a ne zbog otpornosti na sulfate).



Najmanja klasa betona:  
C 25/30.

Zahtevima za očvršli beton:  
(klasa pritisne čvrstoće, klasa izloženosti, nazivna veličina najvećeg zrna agregata, konsistencija) u skladu s standarda SRPS EN 206-1.

Slika 11.3.8: Poprečni profil u tunelu; projektni zahtevi za unutrašnju betonsku oblogu

### 11.3.3.3 Vodonepropusna unutrašnja betonska obloga

Vodonepropusna unutrašnja obloga je sistem obloge koji treba da bude nepropusan bez korišćenja membranske obloge. Vodonepropusan beton mora da ispuni zahteve projekta iz gornje tabele uz dodatne zahteve koji se tiču tehnologije betoniranja i metoda izvođenja, koji se nalaze u primjenjivim standardima. Dodatni zahtevi navedeni su dole.

Unutrašnje obloge se smatraju vodonepropusnim samo ako se mogu opaziti samo lokalna područja vlažnost na unutrašnjosti obloga. Jaka curenja vode treba da se riješe injektovanjem.

Armaturna mreža sa minimalnom veličinom od 100 mm, treba da se postavi na i vazdušnu stranu obloge. Armatura koja prelazi minimalnu, treba da bude oblika pojedinačnih rebara sa prečnikom manjim od

20 mm. Ako betonsko pukriče na stenskoj strani prelazi 100 mm, mora da se preduzme jedna od sledećih mera:

- dodatni sloj armature,
- projektovana armatura prilagođava se položaju i području poprečnog preseka,
- treba naneti dodatni sloj mlaznog betona pre postavljanja unutrašnje obloge.

### 11.3.3.4 Beton

Zahtevi za beton i postupci provere, specifikacija betona, dostava svežeg betona, kontrola usklađenosti i merila usklađenosti, kontrola proizvodnje i procena usklađenosti moraju da ispunjavaju zahteve standarda SRPS EN 206-1.

Pravilni sastav betona za unutrašnju oblogu zahteva optimizovanje sastojaka kako u pogledu kvaliteta tako i količinski, da bi se za date zahteve postigle najpovoljnije pretpostavke u vezi sa:

- obradivošću sveže mešavine,

- vremenom do uklanjanja oplata i čvrstoće betona prilikom uklanjanja oplata,
- sprečavanja formiranja pukotina, te
- svojstava tokom korišćenja.

Kada se uzmu u obzir zahtevane karakteristike, betoni za unutrašnju oblogu moraju da budu napravljeni od odgovarajuće vrste cementa i od odgovarajućeg dodatka minerala ili bez njega, te od male količine veziva i vode prilikom korišćenja plastifikatora ili aeranta plastifikatora, da bi se temperatura betona i napon usled skupljanja što više smanjili.

Konzistencija betona za unutrašnju oblogu treba da bude prilagođena uslovima prilikom ugrađivanja u oplatu. Po pravilu je konzistencija ovakvog betona unutar klase F3 prema SRPS EN 206-1.

Klasa čvrstoće betona na pritisak određuje se u odnosu na statičke zahteve konstrukcije, mada ne sme da bude niža od C25/30 prema SRPS EN 206-1. Zahtevana klasa čvrstoće ne sme da bude nepotrebno premašena, jer se inače povećava opasnost od nastanka pukotina. Potrebna čvrstoća betona prilikom uklanjanja oplata određuje se statičkim proračunom.

Stepen otpornosti betona unutrašnje obloge od prodiranja vode mora da bude jednak PV-I prema SRPS EN 206-1. Ako se zahteva korišćenje betonâ sa posebnim svojstvima, kao što je otpornost betona na sulfate, otpornost betona na delovanje štetnih tečnosti i vodonepropusna unutrašnja obloga, stepen otpornosti betona na prodiranje vode iznosi PV-III.

U dužini od 1.000 m od tunelskih portala unutrašnja obloga tunela mora da bude napravljena od betona otpornog na mraz. Beton je sa unutrašnje strane otporan na mraz ako pri starosti od 28 dana i posle 100 ciklusa smrzavanja odnosno otapanja ispunjuje zahteve SRPS EN 206-1. Kada se zahteva i otpornost površine betona na mraz odnosno otapanje u prisustvu soli, beton posle 50 ciklusa smrzavanja/otapanja mora da ispunjava zahtev SRPS EN 206-1.

Kada postoji opasnost od delovanja sulfata, treba obezbediti odgovarajuću otpornost betona. Prilikom određivanja odgovarajućeg sastava betona treba uzeti u obzir najnovija saznanja u struci na ovom području.

### 11.3.3.5 Strukturna analiza unutrašnje obloge

#### 11.3.3.5.1 Opterećenje u dubokim tunelima

U dubokim tunelima, kao što definisano u prethodnom poglavlju, unutrašnja obloga treba da bude projektovana za sledeća opterećenja:

- težina same obloge (mrtvi teret),
- vodeni pritisak, zavisano od sistema drenaže,
- opterećenje stene, zavisano od geološkog ponašanja okružujuće stenske mase,
- skupljanje i puzanje betona,
- instalacije kao što su mlazni ventilatori i ventilacijski vodovi,
- opterećenja izazvana korištenjem tunela (saobraćajna opterećenja, sile kočenja),
- opterećenje vatrom.

#### 11.3.3.5.2 Opterećenje u plitkim tunelima

U plitkim tunelima sva navedena opterećenja treba da se primene. Ostala opterećenja u plitkim tunelima su:

- opterećenje površinskog saobraćaja,
- opterećenja zbog eventualne nove izgradnje,
- promene u naprežanju tla izazvane dubokim iskopavanjem blizu tunela,
- opterećenja od zemljotresa.

#### 11.3.3.5.3 Strukturne analize obloga

Strukturne analize obloga u plitkim tunelima u izgrađenim područjima treba da se vrše u skladu sa austrijskim uputama za projektovanje RVS 9.32 (Geschlossene Bauweise im Lokergestein unter Bebauung). Strukturna analiza unutrašnje obloge može da se izvrši pomoću analize uzidanog okvira, analitičke ili numeričke analize. Analiza uzidanog okvira može da se izvrši prema rezultatima numeričke analize koristeći se kontaktnim silama između tla i inicijalne obloge kao opterećenja na unutrašnji oblogu, obično uz redukcionni faktor.

Napredno matematičko modelisanje tla ili stene mase sa primenjuje se samo ako se očekuju značajne promene u stanju okružujućeg tla nakon smeštanja unutrašnje obloge. To može da bude zbog puzanja, opterećenja zbog zemljotresa, promena u nivou podzemnih voda ili izgradnje drugih građevina u blizini.

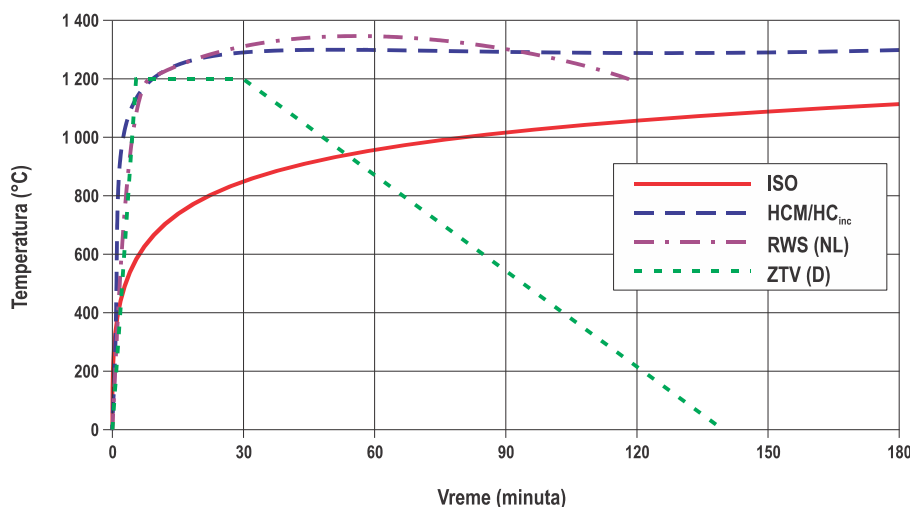
Za armirane unutrašnje betonske obloge, izračunavanje potrebne čelične armature će se vršiti u skladu sa lokalnim pravilima.

Da bi se obezbedila odgovarajuća požarna otpornost unutrašnje obloge, dimenzije poprečnog preseka i potrebna armatura unutrašnje obloge se određuju u skladu sa propisima o mehaničkoj otpornosti i stabilnosti objekata.

Da bi se sprečilo ljuštenje betona prilikom požara, preporučljivo je dodavanje betonu polipropilenska vlakna, kojima se povećava količina kapilarnih pora u kojima se para može razširiti i time parni tlak zbog povišane temperature i da bude armiran i kompizirati zaštitni sloj unutrašnje betonske obloge.

#### 11.3.3.5.4 Otpornost struktura na požar

Otpornost struktura na požar opisana je u odnosu na različite krive zavisnosti temperature od vremena. Slika 11.3.9 prikazuje krivu u skladu sa ISO 834, krivu holandskog RWS, krivu nemačkog ZTV i francusku „povećanu“ krivu ugljovodonika, HCinc, u kojoj su temperature umnožene faktorom 1330/1100 u odnosu na osnovnu krivu ugljovodonika (HC) iz pravila Eurocode 1 deo 2-2.



Slika 11.3.9: Vremenska temperaturna krivulja (krivulja požara) se uzima po ISO 834, HCM / HC<sub>inc</sub>, RWS in ZTV standardu

Kriterijumi za projektovanja otpornosti na požar u tunelima usaglašeni su između PIARC i ITA, kao što je izloženo u članku o maršrutama / putevima „PIARC Design Criteria for Resistance to Fire for Road Tunnelling Structures (PIARC kriterijumi za projektovanje otpornosti na požar struktura drumskih tunela) (2004)“ i objavljeno kao preporuka organizacije PIARC u poglavlju 7 „Design criteria for Structure Resistance to Fire (kriterijumi za projektovanje otpornosti

struktura na požar)“ tehničkog izveštaja 2007.05.16.B. Pregled predloga je prikazan u tabeli 11.3.2.

Osnova za određivanje nivoa zaštite prema kriterijumima organizacije PIARC je tabela koja predviđa različite scenarije požara za različite tipove tunela.

Tabela 11.3.2: Preporuke i uputstvo za putne tunele po PIARC i ITA

Vrsta saobraćaja	Primarna podgrada (glavna struktura)				Sekundarna struktura (4) (unutrašnja obloga)			
	Podvodno ili ispod/unutar superstrukture	Tunel u nestabilnom tlu	Tunel u stabilnom tlu	Sa pokrivenim usekom	Kanali za vazduh (5)	Izlazi u slučaju opasnosti ka otvorenom prostoru	Izlazi u slučaju opasnosti ka drugim cevima	Skloništa (6)
Automobili / laka komercijalna vozila	ISO 60 min	ISO 60 min	Pogledati napomenu (2)	Pogledati napomenu (2)	ISO 60 min	ISO 30 min	ISO 60 min	ISO 60 min
Teretna vozila / cisterne	RWS / HC <sub>inc</sub> 120 min (1)	RWS / HC <sub>inc</sub> 120 min (1)	Pogledati napomenu (3)	Pogledati napomenu (3)	ISO 120 min	ISO 30 min	RWS / HC <sub>inc</sub> 120 min	RWS / HC <sub>inc</sub> 120 min (7)

## Napomene:

- (1) Može da se zahteva 180 min za veoma veliko saobraćajno opterećenje teretnim vozilima koja prevoze zapaljivu robu.
- (2) Bezbednost nije kriterijum i ne zahteva bilo kakvu otpornost na požar (osim izbegavanje progresivnog kolapsa). Uzimanje u obzir ostalih ciljeva može da dovede do sledećih zahteva:
  - ISO 60 min u većini slučajeva;
  - bez ikakve zaštite ako bi strukturalna zaštita bila veoma skupa u poređenju sa troškovima i nepogodnostima izvođenja radova pri popravci nakon požara (npr. poklopci rasvete za zaštitu od buke).
- (3) Bezbednost nije kriterijum i ne zahteva bilo kakvu otpornost na požar (osim izbegavanje progresivnog kolapsa). Uzimanje u obzir ostalih ciljeva može da dovede do sledećih zahteva:
  - RWS / HC<sub>inc</sub> 120 min ako se jaka zaštita zahteva zbog imovine (npr. tunel ispod zgrade) ili velikog uticaja na mrežu puteva;
  - ISO 120 min u većini slučajeva, ako ovo obezbeđuje relativno jeftin način da se ograniči oštećenje imovine;
  - bez ikakve zaštite ako bi strukturalna zaštita bila veoma skupa u poređenju sa troškovima i nepogodnostima izvođenja radova pri popravci nakon požara (npr. poklopci rasvete za zaštitu od buke).
- (4) Ostale sekundarne strukture: treba da bude definisano na bazi projektnih zahteva.
- (5) U slučaju transverzalne ventilacije.
- (6) Skloništa treba da budu povezana sa otvorenim prostorom.
- (7) Može da se razmotri duže vreme ako postoji veoma intenzivan saobraćaj teretnih vozila koja prevoze zapaljivu robu i evakuacija iz skloništa nije moguća za 120 min.

### 11.3.4 HIDROIZOLACIJA - MEMBRANSKA OBLOGA

#### 11.3.4.1 Opšte

Za sve podzemne strukture treba da se projektuje vodonepropusni sistem kako bi se sprečilo uticanje podzemnih voda u tunele i kako bi se unutrašnja betonska obloga zaštitila od štetnog hemijskog uticaja.

Površina primarne podgrade treba da se srauna i zgladi finalnim mlazom betona. Tamo gde su protoci vode vidljivi postavlja se drenažna folija, koja se proteže do visine sloja drenažnog betona koji okružuje postraničnu drenažnu cev.

Vodonepropusni sistem sastoji se od dva sloja, spoljašnjeg kojeg sastavlja filc od geotekstila i unutrašnjeg koji je vodonepropusna membrana. Filc štiti membranu od oštećenja prilikom kontakta sa površinom mlaznog betona i služi za

odvođenje stenske vode. Membrana koja je smeštena između spoljašnje obloge (inicialna podgrada tunela ili segmentirana obloga) i in-situ betonske obloge sprečava curenje u tunel.

#### 11.3.4.2 Hidroizolacija u klasičnoj gradnji tunela

Namena hidroizolacije je da spreči doticanje vode iz stene u tunel. Nezavisno od veličine navedenog doticanja, hidroizolacija mora da bude planirana za sve drumske tunele tako da se trajno spreči natapanje i proceđivanje vode iz stene u unutrašnju betonsku oblogu, i da se obezbedi da ova obloga ne bude izložena štetnim hemijskim uticajima koji mogu da budu povezani sa agresivnim jedinjenjima u vodi iz stene.

Pre nego što se počne sa ugradnjom hidroizolacije, površina primarne obloge od mlaznog cementnog betona mora da bude glatka, da se hidroizolacija ne bi oštetila.

Hidroizolacija je sastavljena od dva sloja:

- od sloja zaštitnog geotekstilnog filca koji je položen na oblogu od mlaznog cementnog betona i sprečava oštećenja unutrašnjeg vodonepropusnog sloja i
- od vodonepropusne geomembrane

#### 11.3.4.3 Hidroizolacija u gradnji tunela u otvorenoj građevinskoj jami

Kod tunela u otvorenoj građevinskoj jami hidroizolacija se izvodi slično kao i u tunelskoj gradnji, pri čemu odozgo nadole slede naredni slojevi:

- zasip od stenskog materijala,
- drenažni sloj koji omogućava oticanje vode iznad tavanice tunela, koja zato mora da bude napravljena u najmanjem poprečnom nagibu 2,5 posto,
- zaštita zaptivnog sloja (geosintetički materijali ili sloj betona),
- vodonepropusna geomembrana,
- zaštitni geosintetik,
- noseća konstrukcija pokrivenog ukopa.

Hidroizolacija za izvođenje u otvorenom objašnjena je u Tehničkim uslovima za

građenje puteva u republici srbiji, Poglavlje 2.6 Zanatski radovi, Poglavlje 2.6.5 Hidroizolacije.

#### 11.3.4.4 Alternativno izvođenje hidroizolacije

Varenim bitumenskim trakama koje takođe moraju da budu zaštićene na odgovarajući način od oštećenja slojem geosintetika ili betona, te prekrivene drenažnim slojem, po sistemu „belih kada“, što se uzima u obzir pre svega kod kraćih tunela (podvožnjaka, podzemnih prolaza) koji se grade ispod postojećih saobraćajnica.

### 11.3.5 PORTALI TUNELA

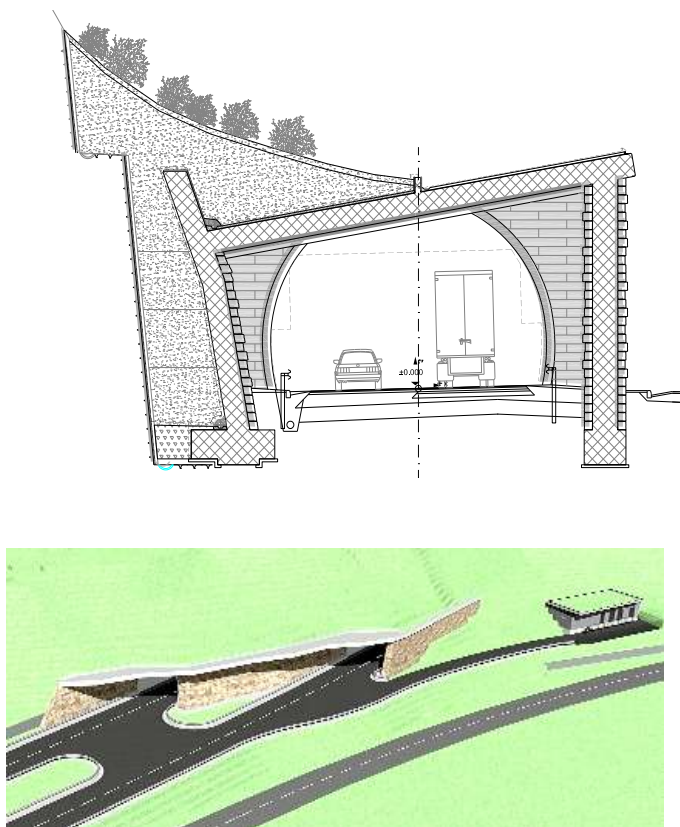
#### 11.3.5.1 Opšte

Projektant tunela prilikom oblikovanja portala, prostora pored puta i drugih objekata na otvorenom obavezno mora da saraduje sa pejzažnim arhitektom i arhitektom koji učestvuje u izradi projektne dokumentacije za glavni put.

Generalno, tehnička rešenja konstrukcije portala tunela treba da budu konstrukciono jednostavna i geotehnički pogodna, moraju da obezbeđuju trajne konstrukcione aspekte i nesmetan prelaz iz otvorene trase u tunel.

Još uvek postojeće klasično zasečene čeone konstrukcije portala tunela ne opterećuju postojeći pejzaž u koji se neprimetno uklapaju u najvećoj mogućoj meri. Venci na portalu se ne završavaju na mestu gde se sastaju obronci kosine u kojoj se nalazi portal, već se portal na odgovarajući način produžava sa ciljem zaštite od erozije ili raspadanja kosine oko portala i završava se pravougaono u odnosu na osu tunela. I radovi održavanja ili obnavljanja su manji kod klasičnih portala nego kod zahtevnih prostorno raščlanjenih galerijskih konstrukcija.





Slika 11.3.10: Koncept portala podređen arhitektonskim dizajnerskim vrednostima

Kod dugačkih putnih tunela se zbog sistema provetravanja i obezbeđivanja odvojenih požarnih sektora, te lokacije pogonskih centrala ne mogu da se izbegnu zahtevne galerijske konstrukcije portala, kao što je npr. portal tunela Karavanke. U ovom slučaju je dizajn portalâ podređen arhitektonskim dizajnerskim vrednostima i lokalnom ambijentu prostora, i oni se obično koncipiraju u skladu sa arhitektonskim smernicama prethodno izvedenog javnog konkursa i dizajnirani su u skladu sa prvonaagrađenim rešenjem pomenutog konkursa.

#### 11.3.5.2 Obezbeđivanje stabilnosti kosina na mestu otkopavanja

Trasa kolovoza, pa time i trasa tunela treba da se usavrši tokom rane faze i da bude utemeljena na rezultatima istraživanja terena i topografskih uslova. S obzirom da većina portala tunela zahteva useke ispred portala i useke za portale moraju da se pažljivo istraže geološki i hidrogeološki uslovi u tim područjima. Pažnja treba da se posveti lokalnim tektonskim strukturama (rasedi, zone smicanja), puzanju ili pomičućim

obroncima, aktivno ili umrtvljeno pomicanje tla itd.

Glavni principi koji se primenjuju za projektovanje portala su:

- oblik lateralnih useka kosina treba da se nastavi u neposrednim područjima iza portala,
- maksimalno moguće smanjenje trajnih otvorenih useka, naročito u nestabilnim područjima portala (urušavanje kosina, odlomci stena, puzajuće kosine). Produživanje cevi tunela sistemom »cut and cover«,
- veličina privremenih rezova treba da se smanji korišćenjem primerenih potpornih kombinacija.

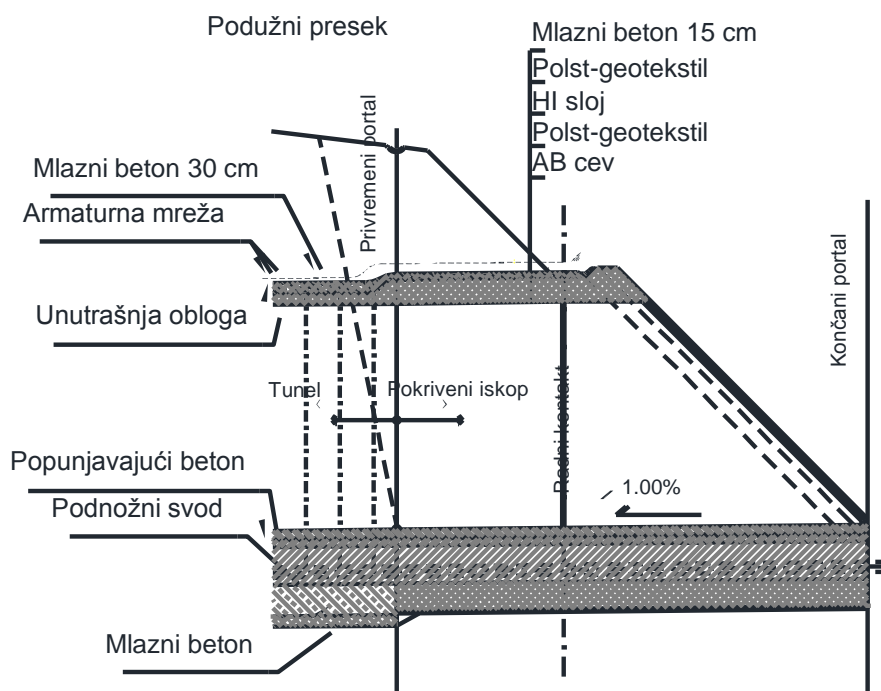
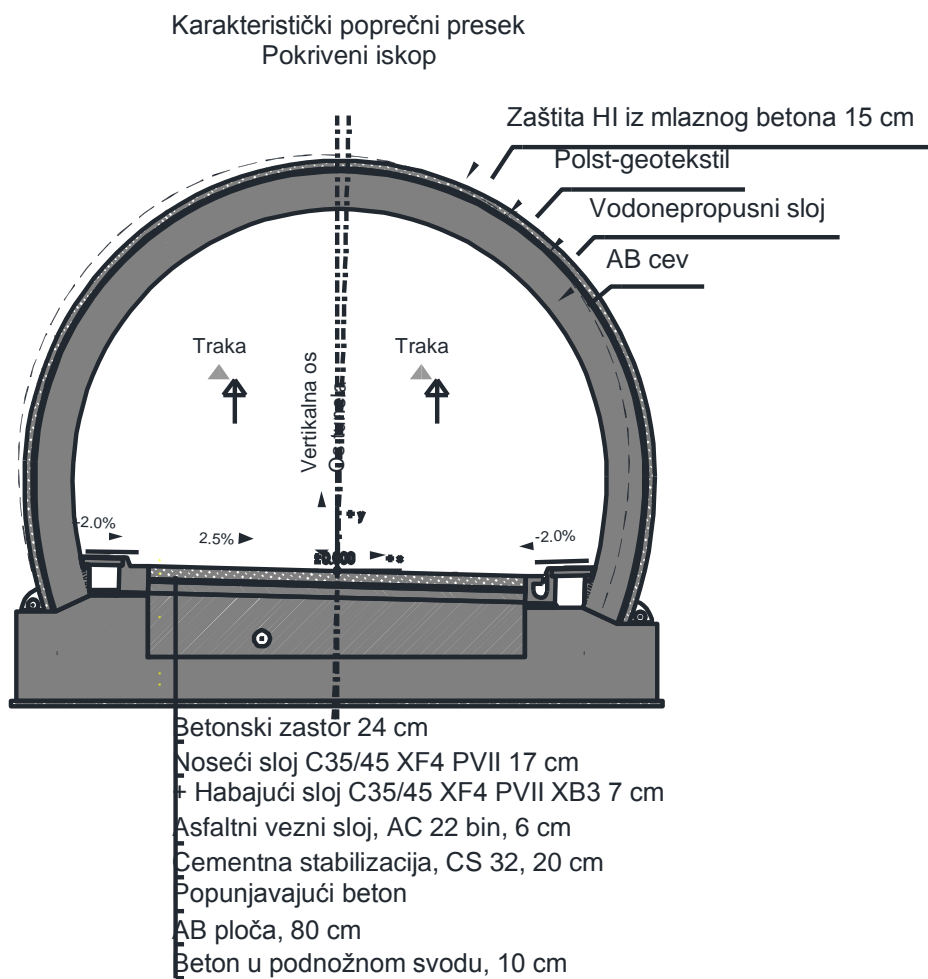
Za vreme projektovanja tendera za izvođenje radova na portalu tunela, različiti geometrijski oblici vrata tunela trebaju da se uzmu u obzir i analiziraju sa stanovišta lokalnih geoloških uslova koji su zatečeni u područjima portala. U slučaju kada su stvarni uslovi zatečeni tokom iskopavanja ulaza različiti od parametara pretpostavljenih u fazi projektovanja ponude za izvođenje radova, u skladu s tim treba da se prilagodi projekat mera stabilisanja kosina.

Kosine rezova na portalima moraju da se uključe u program praćenja. Ako je moguće, rezultati merenja moraju da se koriste za završni projekat kosina useka i podupirućih struktura.

### 11.3.5.3 Koncept portala

Portali tunela su jedinstvene, neponovljive konstrukcije. Njihov koncept mora da uzme u obzir:

- morfologiju terena,
- geološki sastav i karakteristike tla na širem području uticaja portala,
- geometrijske elemente trase puta,
- dizajnerski aspekt i
- pejzažne i druge specifičnosti.



Slika 11.3.11: Koncept portala klasično zasečene čeone konstrukcije portala tunela

Portali mogu da se izvedu na sledeće načine:

- čeon portal se primenjuje kod bazičnih ili vršnih tunela, ako je kosina iznad portala stabilna. potrebna je zaštita od pada sa visine, protiverozivna zaštita i zaštita od odrona snega,
- istureni portal se koristi kod bazičnih i vršnih tunela, ako je kosina iznad portala podvrgnuta snažnijoj eroziji ili je povećana opasnost od lavina. Potrebna je zaštita od pada sa visine,
- portal sa isturenim uzdužnim zidom koristi se kod padinskih i depresijskih tunela bez obzira na to kako je portal izveden. Potrebna je zaštita od pada sa visine.

Prilikom pozicioniranja tunela u prostoru, gde god je to moguće, uvažavaju se sledeći zahtevi:

- portali tunela su na stabilnoj padini,
- predusek portala je što kraći,
- osa puta na području portala treba da ima što veći odklon od smera izohipsi terena.

#### 11.3.5.4 Granica između otvorene trase i tunela

U smislu projektovanja i izvođenja po pravilu se granica između tunela i trase puta nalazi ispred iskopa za portal, a iskop za portal sa svim zaštitnim merama je deo projekta tunela.

Zbog mogućeg odstupanja položaja portala, produžavanja tunela i zahtevnog načina projektovanja na području portala, granica treba da bude usklađena u svakom slučaju posebno.

#### 11.3.5.5 Tehnički zahtevi za planiranje portala

Primarni zahtev za područje portala je njihova stabilnost. Ona mora da bude obezbeđena tokom gradnje portala (privremeni portal), ali i u konačnom stanju. Preporučljivo je da se trajne padine izvode u konačnom obliku, što obezbeđuje racionalnu gradnju. Na labilnim područjima i na područjima koja su potencijalno sklona odronima koja su višestruko stepenasta i zbog toga manje pogodna za pozicioniranje početka gradnje tunela, treba obezbediti bezuslovnu trajnu stabilnost kosina u konačnom stanju, što se postiže na sledeće načine:

- gradnjom pokrivenog ukopa koji obezbeđuje trajnu stabilnost, tokom

gradnje treba osigurati privremene kosine odgovarajućim merama podupiranja,

- potpornim konstrukcijama ili drugim tehničkim merama koje obezbeđuju propisanu zaštitu od urušavanja privremenih i trajnih kosina.

Stabilnost prostora u kome se nalazi portal mora da se proveri analizama stabilnosti u karakterističnim presecima za sve faze gradnje i korišćenja prostora portala.

Područja u kome se nalaze portali tunela moraju da budu naročito precizno ispitana u odnosu na geološki sastav tla, tektoniku, hidrogeološke uslove i karakteristike tla. Posebna pažnja treba da bude posvećena svim oblicima nestabilnosti terena i posledicama lokalne tektonike (tektonske zone i zone smicanja).

Ako su područja portala osigurana potpornim konstrukcijama, treba predvideti odgovarajuću drenažu njihovog zaleđa. Pri tom treba uzeti u obzir položaj i izdašnost vodonosnih slojeva.

Sve nabrojane parametre treba precizno pratiti tokom gradnje preduseka portala i po potrebi prilagoditi planirane mere podupiranja.

Tokom gradnje i kasnije geodetskim i geotehničkim merenjima je potrebno pratiti eventualna pomeranja kosina i potpornih konstrukcija, te druge relevantne parametre.

U odnosu na karakteristike portala tunela, prilikom projektovanja portala tunela treba predvideti i:

- zaštitu od erozije padina,
- zaštitu od odrona zemlje i snega,
- odvodnjavanje površinski voda,
- zaštitu vozača od uticaja ometanja neposredne sunčeve svetlosti na izlazu iz tunela.

Na području portala tunela mora da bude predviđena i signalna sigurnosna oprema iz priručnika 11.5 Oprema tunela.

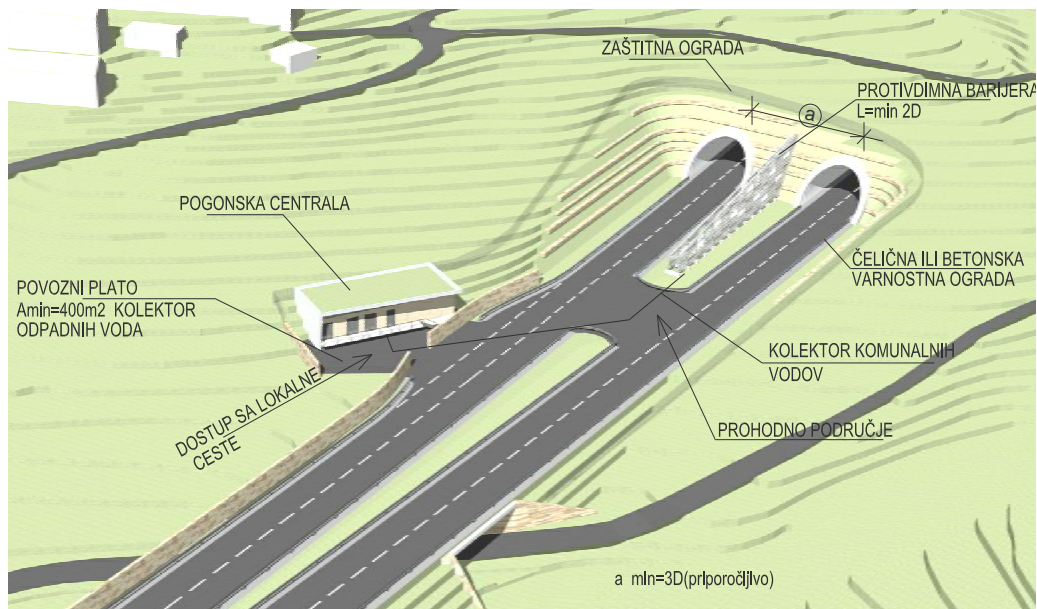
#### 11.3.5.6 Infrastrukturno područje portala

Prilikom prostornog planiranja portala treba uzeti u obzir da:

- područje portala tokom gradnje služi potrebnoj građevinskoj infrastrukturi, da je ispred i iza tunela potreban prostor za zaustavljanje (dužine 40 m i širine

- najmanje 2,5 m, a na autoputevima i brzim putevima najmanje 3,0 m),
- je zbog povremenih zatvaranja pojedinačnih cevi kod dvocevnih tunela potrebno obezbediti putnu vezu između kolovoznih traka,

- se kod tunela kojima je potrebna pogonska centrala za nju predvidi prikladna lokacija na području portala,
- se kod tunela sa povećanim rizikom omogućiti sletanje helikopteru.



Slika 11.3.12: Koncept Infrastrukturno područje portala

#### 11.3.5.7 Tehnički zahtevi za projektovanje portala tunela »cut and cover« - pokriveni useci

Preporučuje se, da se tunel produži kratkim delovima »cut and cover« tamo gde je to potrebno radi poboljšanja uslova stabilnosti kosina. Ako je moguće, delovi »cut and cover« treba da imaju iste poprečne preseke kao i unutarašnje obloge cevi tunela. U slučaju da tunel nije »cut and cover«, prvi

segment unutrašnje betonske obloge (približne dužine 10 do 12 m) mora da se izradi od armiranoga betona. Betonske strukture »cut and cover« treba da budu pokrivene vodonepropusnim geomembranama koje su istog kvaliteta kao i u tunelu. Pre stavljanja zasipa usjeka, geomembrana treba da se pokrije zaštitnim geotekstilom i slojem zaštitnog betona.



Slika 11.3.13: Portal tunela; izvođenje „cut and cover“ - pokrivenog usjeka

### 11.3.6 SPOLJNI OBJEKTI (POGONSKE CENTRALE)

#### 11.3.6.1 Opšte

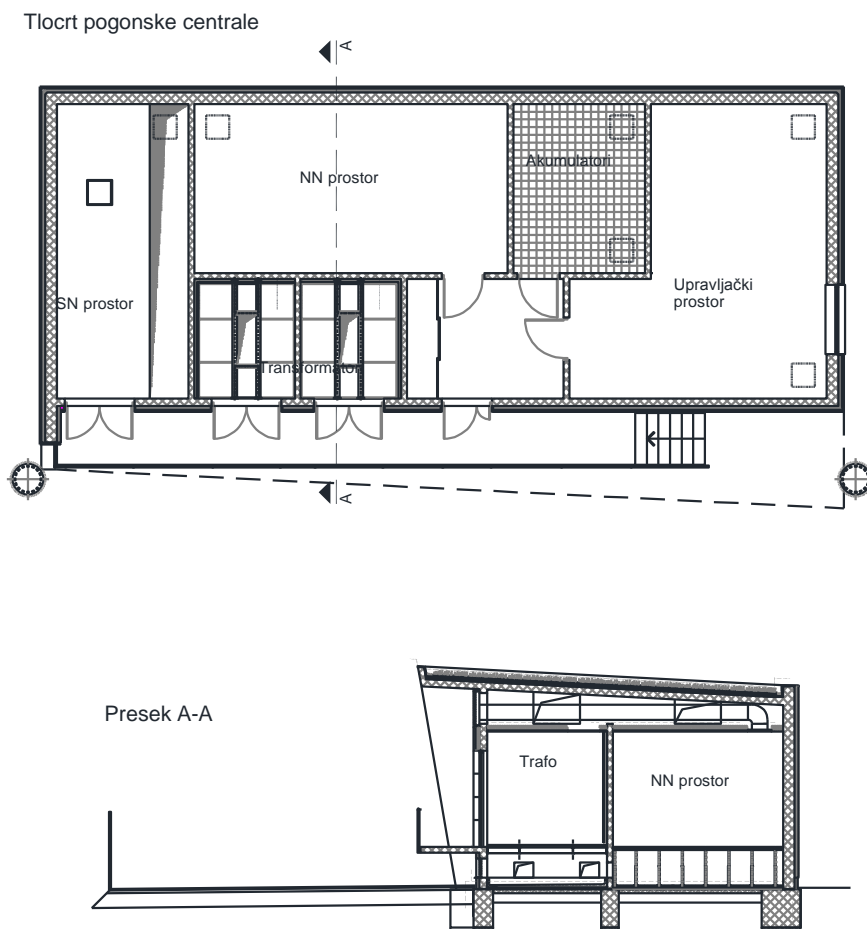
Pogonske centrale su tehnološki infrastrukturni objekti u kojima se nalaze svi uređaji i oprema koji omogućavaju normalno funkcionisanje tunela. U ovim objektima su obično raspoređeni: prostor srednjeg napona, transformator, prostor niskog napona, prostor za akumulatore (UPS) i kontrolna soba.

Osim funkcionalnih zahteva, pogonske centrale treba da ispune i estetske zahteve.

#### 11.3.6.2 Pozicioniranje pogonskih centrala u prostoru

Sa stanovišta ekonomičnosti, pogonske centrale kod kraćih tunela se postavljaju samo sa jedne strane tunela, a kod dužih sa

obe strane. Po pravilu se pogonske centrale zbog saobraćajno-tehničkih razloga postavljaju sa desne strane desne kolovozne trake na ulaznom portalu. U slučaju lokalnih ograničenja odn. nesrazmernih troškova pri takvom postavljanju, pogonsku centralu je moguće izmestiti na izlazni portal. Zbog bezbednijeg prilaza pogonskim centralama kako radnicima održavanja tako i ekipama za zaštitu i spasavanje u vanrednim događajima, kada je to moguće jednostavno postići, ima smisla da se pogonskim centralama obezbedi i sporedni prilaz. Manipulacioni prostor uz pogonsku centralu mora da omogući bezbedan ulazak i izlazak vozila, kao i okretanje vozila (manji teretno vozilo sa prenosnim dizelskim agregatom). Ulaz u manipulacioni prostor ima smisla zaprečiti automatskom rampom.



Slika 11.3.14: Osnovni prostori pogonske centrale

### 11.3.6.3 Tehnički zahtevi za planiranje

- Prostor srednjeg napona i prostor za transformator moraju da budu odvojeni od ostalih prostora odgovarajućom protivpožarnom pregradom.
- Ulaz u pomenute prostore treba da bude obezbeđen preko utovarno-istovarne rampe.
- Transformatorski prostor istovremeno mora da bude uređen za zadržavanje eventualnog razlivanja transformatorskog ulja.
- Prostor srednjeg napona, akumulatorski prostor, prostor niskog napona i kontrolnu sobu treba da imaju i sistem za prinudno provetranje.
- Pomenuti prostori, osim akumulatorskog prostora, imaju dupli pod zbog lakšeg razvođenja.
- Akumulatorski prostor mora da bude obložen oblogama koje štite od uticaja

kiselina. U okviru izvođenja zaštite od kiselina u ovom prostoru mora da bude izvedeno i prinudno provetranje.

- Upravljački prostor mora da bude klimatizovan na odgovarajući način.
- Uvođenje i raspoređivanje električnih instalacija u tunelu vrši se razvodnim cevima sa umetnutim šahtovima ili putem instalacionih odvodnih šahtova. Umetnuti električni šahtovi moraju da budu napravljeni tako da ne propuštaju vodu, mada i njihovo odvodnjavanje ima smisla. Posebnu pažnju uvek treba posvetiti zaštiti od glodara.

### 11.3.7 INSTRUMENTACIJA I PRAĆENJE

#### 11.3.7.1 Opšte

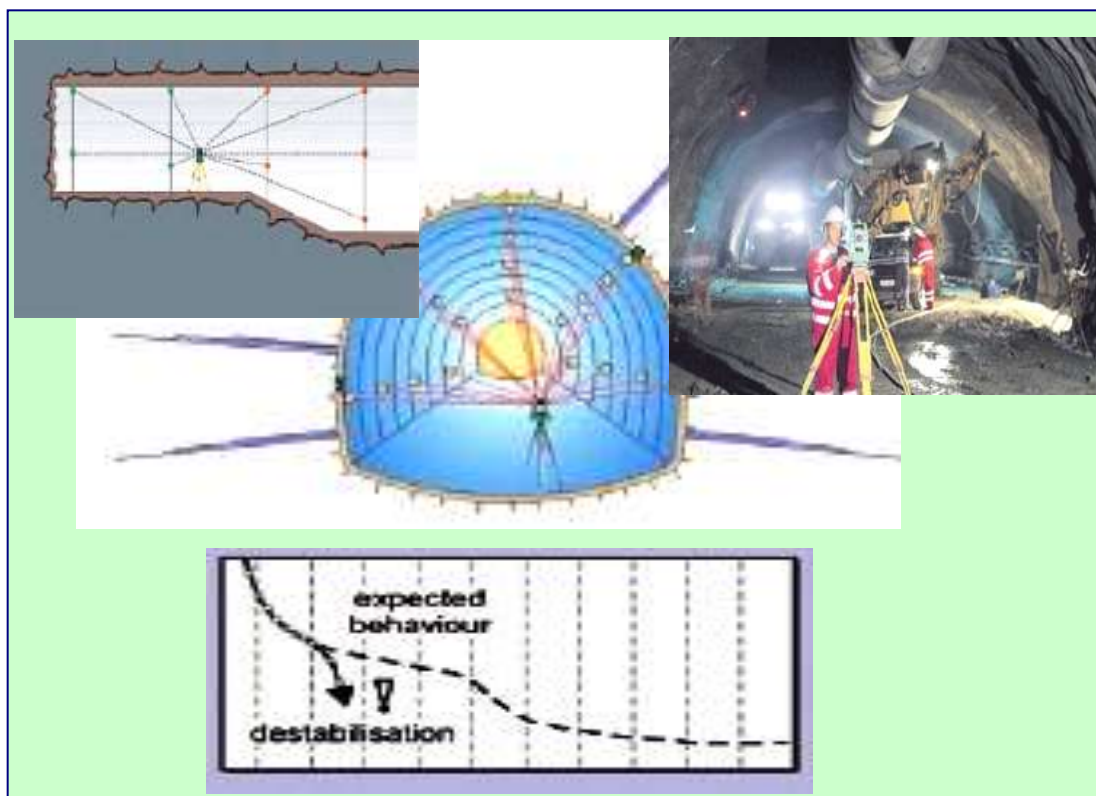
Programi instrumentacije i praćenja su integralni deo moderne izgradnje tunela, posebno konvencionalnih metoda izgradnje tunela.

Program sistematskog osmatranja u svrhu određivanja pogodnosti tipa i broja podgradnih sklopova i kontrole stabilnosti je važno obeležje konvencionalne metode. Stvarno ponašanje sistema se poredi sa prognozom i kriterijumima datim u geotehničkom projektu putem praćenja ponašanja u podgrađenom području koristeći vizuelnu inspekciju i analizu geotehničkih merenja. U okviru verifikacije ponašanja sistema analiziraju se odstupanja između

očekivanog i uočenog ponašanja. Razlozi za odstupanje stvarnog ponašanja sistema od prognoziranog mogu se odnositi na neočekivane geološke elemente, krivo određene tipove tla ili neodgovarajući izbor tehnologije izkopa i podporne tipove.

Ciljevi merenja su sledeći:

- verifikacija projektnih pretpostavki uključujući parametre modela i projekta,
- prilagođavanje metoda gradnje, potpornih sistema i dodatnih mera postojećim zahtevima i uslovima u tlu,
- verifikacija stabilnosti iskopanih konstrukcija,
- minimizacija opasnosti pri gradnji i
- sprečavanje štetnog uticaja na okolinu



Slika 11.3.15: Pristup monitoringu

#### 11.3.7.2 Parametri za praćenje

U skladu sa specifičnim zahtevima i fazama gradnje potrebno je uzeti u obzir sledeće parametre:

- podzemne vode,
- deformacije tla,

- interakcija tla i konstrukcije,
- praćenje okoline (susedne građevine i konstrukcije), uglavnom u blizini ulaznih područja i u slučaju plitkih tunela,
- praćenje napredovanja



### 11.3.7.2.1 Podzemne vode

U skladu sa specifičnim zahtevima i fazama gradnje potrebno je uzeti u obzir sledeće parametre:

- praćenje nivoa podzemnih voda, pritiska vode, hemije podzemnih voda i temperatura pre i za vreme gradnje,
- praćenje infiltracije vode kroz oblogu tunela i u radnu zonu iskopa,
- beženje zapremine i vremena ispuštanja vode, ako se vrši isušivanje.

### 11.3.7.2.2 Deformacije tla

U skladu sa specifičnim zahtevima i fazama gradnje potrebno je uzeti u obzir sledeće parametre:

- površinska sleganja i sleganja ispod površine,
- deformacije i naprezanja tla oko tunela,
- pomeranje kosina na portalu tunela (inklinometri, ekstenzometri, itd.).

### 11.3.7.2.3 Interakcija tla i konstrukcije

U skladu sa specifičnim zahtevima i fazama gradnje potrebno je uzeti u obzir sledeće parametre:

- opterećenja sidara,
- distorzija obloge tunela,
- moguće podizanje podnožnog svoda,
- proširenje zone relaksacije oko tunela,
- merenje radialnih i tangencijalnih naprezanja obloge,
- pritisak vode na oblogu.

### 11.3.7.2.4 Praćenje okoline (susedne građevine i konstrukcije), uglavnom u blizini ulaznih područja i u slučaju plitkih tunela

U skladu sa specifičnim zahtevima i fazama gradnje potrebno je uzeti u obzir sledeće parametre:

- istraživanje uslova za gradnju pre njenog početka,
- merenje ulegnuća i izdignuća,
- merenja nagiba,
- vibracioni poremećaji zbog miniranja.

### 11.3.7.2.5 Praćenje napredovanja

Radi pravilne intepretacije različitih podataka praćenja, potrebna su informacije o relevantnim fazama gradnje. Zato za vreme gradnje treba pratiti i bežiti sledeće informacije:

- predviđeni i zatečeni uslovi u tlu,
- navedeni tipovi stenske mase,
- metoda bušenja i brzina napredovanja,
- potporni elementi za svaku etapu iskopavanja,

- privremene mere i bilo kakvo dodatno ojačavanje tla,
- položaj različitih radnih zona iskopavanja
- vanredni događaji

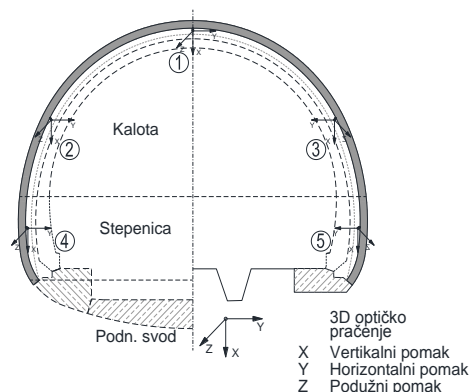
### 11.3.7.3 Sekcije praćenja

Položaj sekcija praćenja mora da se odabere tako da omogući optimalnu interpretaciju podataka. To se najbolje vrši razmeštanjem nekoliko različitih sredstava za praćenje u jednom poprečnom preseku praćenja. Treba da postoji dva do tri razreda (tipova) sekcija praćenja, koji se rangiraju prema broju postavljenih sredstava i posmatranih parametara (npr. A: obična, B: umerena, C: glavna sekcija praćenja).

U običnoj sekciji praćenja, beleže se samo deformacije obloge. To može da se vrši:

- merenjem konvergencije pomoću konvergentnih traka i sidara (šiljcima), koji su fiksirani u oblogu tunela.
- optičkim 3-D praćenjem deformacija, koje se sprovodi trigonometrijskim metodom i korišćenjem reflektora smeštenim na sidra koja su slična konvergentnim šiljcima

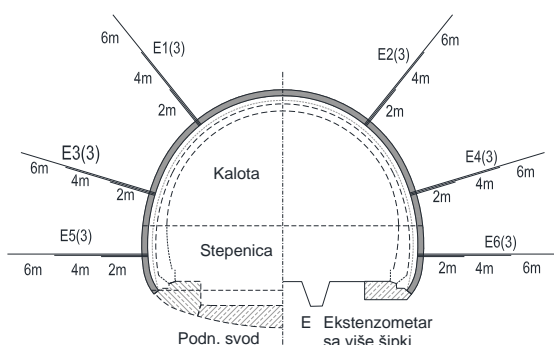
Poželjno je optičko 3-D praćenje deformacija, jer daje apsolutne vrednosti deformacije za svaku od tačaka, koje su stoga geotehnički verodostojnije.



Kod plitkih tunela se ova merenja kombinuju sa merenjima sleganja na površini tla. Informacije koje daju ta merenja vrlo su značajna za procenu celokupne performanse metode gradnje. Obične sekcije praćenja moraju da budu razmeštene pravilno duž trase.

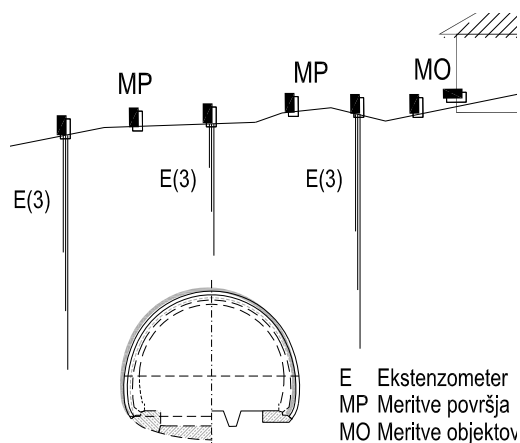
U glavnoj sekciji praćenja treba da se prate svi parametri. To znači da u kamenim tunelima uz instrumente običnih sekcija treba da se koriste i ekstenzometar, ćelija za merenje cirkularnih i radialnih napona i

merna sidra. Čelije se postavljaju u pravilnom rasporedu po obodu tunela.



Glavna sekcija praćenja treba da se postavi na početak bušenja tunela da bi se procenio odabrani metod bušenja i potporni sistem; a treba da postavi i na lokacije od posebnog značaja zbog uslova u tlu, razmeštaja konstrukcije ili gradnje na površini.

U plitkim tunelima na površini i ispred bušenja tunela treba da se postave i ekstenzometri ili ekvivalentni instrumenti zajedno sa inklinometrima i piezometrima.



Za pilot tunele, pristupne šahtove, prilaze ili dvostrane galerije mogu da se postave određene instrumente i u bušotine ispred glavne cevi tunela.

#### 11.3.7.4 Merna oprema

Razvijeni su brojni instrumenti i sistemi beleženja, od jednostavnih metoda istraživanja do vrlo naprednih uređaja za merenje pritiska i deformacija. Osnovni preduslovi za svaki instrument su pouzdanost, jednostavnost, brzo i lako postavljanje, funkcionisanje i kalibrisanje. Instrumenti treba da budu izdržljivi i da nisu skloni oštećenjima za vreme i nakon postavljanja.

Neki od posebnih mernih instrumenata navedeni su u daljem tekstu. S obzirom na gore navedene merne parametre, očigledno je da može da se koristi nekoliko instrumenata za praćenje različitih parametara.

##### 11.3.7.4.1 Deformacije

###### 11.3.7.4.1.1 Merenje konvergencije pomoću trakastog ekstenzometra

Primena:

Merenje konvergencije daje uvid u relativne dislokacije tačaka na oblozi tunela. Nisu prikladni za procenu stvarnog kretanja tačke, ali su vrlo osetljiv alat za analizu stabilnosti.

Princip dejstva:

Prenosivi instrument meri dislokaciju između parova referentnih sidara zalivenih u plitke bušotine ili betoniranih zajedno sa oblogom.

Prednosti i ograničenja:

Jednostavni, pouzdani i lagani za očitavanje uz pozitivno naprežanje trake. U mnogim slučajevima može da ga koristi samo jedan operater i može da se očitava samo sa jedne strane.

Merenja od 1 m do 20 m:

- Namenjen je samo za relativna merenja,
- na preciznost utiče promena temperature,
- merenja ometa se sama izgradnja,
- mlazni beton i pin-mort moraju da se stvrdnu pre nego što može da izvrši nultu očitavanje.

Karakteristike u radu:

Ukupna merna preciznost je 0,1 mm ako ga koristi iskusni operater. Trakasti ekstenzometar je robustan i otporan na mehaničko oštećenje pri razumnim uslovima na terenu. Prosečno očitavanje traje samo 2 - 3 minuta od strane jednog korisnika.

###### 11.3.7.4.1.2 Optičko 3-D praćenje deformacija pomoću trigonometrijske opreme

Primena:

Optičko praćenje deformacija pokazuje apsolutne pomeraje odabranih tačaka na oblozi u tri koordinatna smeru (po poprečnom preseku i longitudinalno).

Princip dejstva:

Reflektivne mete su smeštene na oblozi. Njihove apsolutne pozicije određuje se preciznim teodolitom koji može da meri koaksijalna rastojanja – totalnom stanicom. Mete su obično birefleksnog (bireflex) tipa,

obe strane mete su pokrivene reflektivnom površinom. Kod vrlo kratkih ili vrlo dugačkih udaljenosti posmatranja, koriste se prizmične mete. Može da se postigne preciznost od +/- 1 mm.

#### 11.3.7.4.1.3 Merenja napona u oblogi

Obično se vrše zajedno sa geodetskim merenjima tunela kao merenja visoke preciznosti.

U najvećem broju slučajeva nadgledaju se tačke tavanice i dna kalote, no ponekad se uključuju i nivoi podnožnog svoda.

#### *Merenja naprezanja u oblozi tunela, Hidraulična ćelija za merenje pritiska*

Primena:

Za merenje raspodele naprezanja u oblozi tunela koriste se dve kombinacije: jedna za određivanje pritiska koji deluju u radialnom smeru između stene i betonske obloge, a drugi za merenje pritiska u betonskoj oblozi koji deluju u cirkularnom smeru.

Princip dejstva:

Hidraulična ćelija se sastoji od hidrauličkog jastuka, koji se postavlja u površinu stene ili u mlazni beton, tako da povećana naprezanja betona mogu da deluju na hidraulički jastuk. Čest tip je „Glötzlova ćelija“, koja se sastoji od pljosnate ćelije koja je spojena na komoru za merenje pritiska. Dijafragma odvaja hidraulični sistem ćelije od sistema mernog uređaja. Pritisak u ćeliji se određuje njegovim balansiranjem sa pritiskom ulja na drugoj strani dijafragme. Zatim se taj pritisak može očitati na preciznom manometru.

#### 11.3.7.4.1.4 Merači naprezanja mlaznog betona

Primena:

Merenje naprezanja mlaznog betona koje dejstvuje u tangencijalnom smjeru. Naponi mogu da se izračunaju iz naprezanja na osnovu istorije opterećenja, debljine obloge, puzanja i starosti mlaznog betona. Uređaji mogu da se koriste i za merenja napona u betonskim oblogama.

Merači naprezanja mlaznog betona (npr. SSM-1) su projektovani tako da odgovaraju specijalnim zahtevima materialnih karakteristika mladog mlaznog betona i postupku opterećenja unutar betonske obloge tokom gradnje tunela.

Princip dejstva merača SSM-1

SSM-1 merač napona mlaznog betona sastoji se od dva paralelna rebra koja su, nakon postavljanja, potpuno uronjena u beton, i od središnje cevi sa malom ekstenzionom krutošću. Deformacija mlaznog betona uzrokuje relativno pomeranje dva rebra uz odgovarajuću deformaciju središnje cevi. Ova deformacija se meri pomoću merača naprezanja koju su zalepljeni na središnju cev u konfiguraciji potpuno temperaturno kompenzovanog mosta.

Kablovi za očitavanje nekoliko instrumenata spojeni su na središnju distribucionu kutiju koja je smeštena u drvenu kutiju. Da bi se smanjile zastoje u procesu gradnje, finalno postavljanje kablova za očitavanje može da se izvrši kao posebna operacija.

Nulto očitavanje može da se izvrši odmah nakon što se nanese mlazni beton ili nakon uklanjanja oplata. Nova očitavanja mogu da se vrše onoliko često koliko je to potrebno, bez ometanja radnih procesa.

Vrednovanje:

Očitavanja se beleže u odgovarajuće (specijalne) formulare. Na taj način odmah mogu da se identifikuju razlike u odnosu na predhodna očitavanja, kao i kumulativni rezultati. Belježenje rezultata pomoću dijagrama vreme-deformacija omogućava brzu procenu postojećeg stanja napona u posmatranoj konstrukciji. Ovo uključuje trenutno prepoznavanje sledećih elemenata:

- tipa i veličinu napona (pritisak, sabijanje savijanje),
- raspodele napona duž obodnice tunela.

Izračunavanje napona iz izmerenih napona zahteva i dodatne laboratorijska ispitivanja, posebno kada se radi o mlaznom betonu. Ovim ispitivanjima može da se primetiti specifična veza između napona i naprezanja u mlaznom betonu koji je nanesen na gradilištu. Ispitivanja takođe uzimaju u obzir otpušanje i puzanje.

Dostupan je specijalni softver za izračunavanje napona na osnovu istorije napona, a u vezi sa rezultatima ispitivanja. Softver uključuje i izračunavanje momenata savijanja i normalnih sila.

Prednosti i ograničenja:

Merač naprezanja mlaznog betona je izvrstan alat za beleženje ponašanja opterećenja mlaznog betona tokom vremenskog intervala. Ima brojne prednosti:

- brzo očitavanje,

- nulto očitavanje sledi odmah nakon nanošenja mlaznog betona ili ulivanja betona,
- veća preciznost i pouzdanost mernih rezultata,
- instrument može da beleži i specifične deformacije koje stvaraju sile istezanja i sabijanja.

Zato je vredan alat za procenu stanja napona u oblozi tunela, a posebno jer omogućava da se mere naponi savijanja upotrebom prikladnih položaja merača napona (dvostruka instalacija).

Kao što je gore spomenuto, izračunavanje napona u oblozi moguće je samo u kombinaciji sa laboratorijskim ispitivanjima puzanja.

### 11.3.7.5 Merenja napona na čeličnim lukovima

Primena:

Merači napona koji su spojeni direktno na čelične lukove mogu da se koriste za izračunavanje napona, momenata savijanja i normalnih sila u čeličnim lukovima.

Postoji nekoliko načina postavljanja merača napona što zavisi od tipa čeličnih rebara koja se koriste.

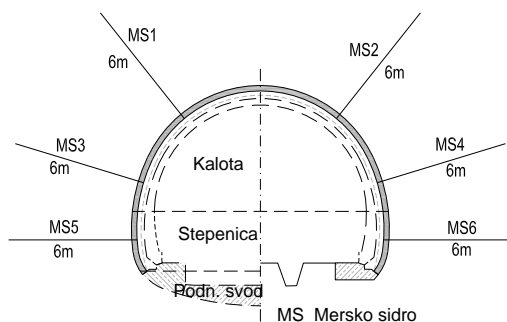
Merenja napona na čeličnim setovima uglavnom se koriste kada se primenjuje „metod američke čelične podpore“.

### 11.3.7.6 Sile u sidrima

#### 11.3.7.6.1 Merno sidro

Primena:

Instrumentalizovano sidro je kombinacija sidra i ekstenzometra. Njegov zadatak je da odredi opsege dubine na kojima se preuzima opterećenje usled efekta otpuštanja stena. Zato je pogodan za određivanje najprikladnijih dužina sidra.



Princip dejstva:

Mehaničko merno sidro sastoji se od šupljeg sidrenog tela, sekcijskog područja i materijala koji je u skladu sa odgovarajućom vrstom sistema za sidrenje. U unutrašnjosti tela merne šipke mogu da se postave u četiri raspoložive tačke. Minijaturne merne šipke vode do glave sidra. Pomoću mehaničkog merača sa kazaljkom, mogu da se odrede promene dužine usled istezanja ili sabijanja između pojedinih tačaka sidrišta.

Konstrukciona dužina treba da odgovara dužini sistemskih sidara. Moguć je bilo koji ugao između horizontalnog i vertikalnog postavljanja. Merno sidro je zaliveno celom dužinom na isti način kao i sistemska sidra.

Tačnost očitavanja merača sa kazaljkom je 0,01 mm.

Prednosti:

- zamenjuje sistemsko sidro,
- nije potrebna posebna bušotina, može da se koristi standardna oprema za bušenje,
- jednostavno mehaničko očitavanje.

#### 11.3.7.6.2 Čelija za merenje opterećenja

Primene:

Merenje i kontrola opterećenja stenskim sidrima i napona u kabelskim sidrima.

Princip dejstva:

Čelije sa rupom u sredini imaju robustno čelično telo napunjeno ili uljem (hidraulične čelije) ili sa čeličnim oprugama (mehaničke čelije). Sile se izračunavaju na osnovu merenja deformacije čelije za merenje opterećenja. Potrebno je da se svaka čelija za merenje opterećenja kalibriše pre korišćenja.

Prednosti i ograničenja:

- jednostavna, robustna i pouzdana,
- idealna za daljinsko očitavanje, skeniranje i beleženje podataka.

Izvedba:

Na raspolaganju su čelije za velika opterećenja koje mere i do nekoliko hiljada KN.

### 11.3.7.7 Deformacija tla

#### 11.3.7.7.1 Ekstenzometar

Primena:

Određivanje pomeraja da bi se odredili izvor i stvarna vrednost kretanja tačke obloge tunela

(za kombinovanje sa očitavanjima konvergencija). Procena napona u okolini tunela uključujući i fenomen puzanja i otpuštanja.

Princip dejstva:

Ekstenzometri sa jednom šipkom imaju šipku koja je usidrena na jednom kraju bušotine i koja prelazi u referentnu cev smeštenu u centralnoj manžetni rupi. Relativna pomeranja između glave sidra i referentne cevi mere se ili meračem sa kazaljkom ili električnim pretvaračem koji je ubačen kroz referentnu cev i da daje zapis na slobodnom kraju šipke.

Ekstenzometri sa više šipki se postavljaju za nadgledanje pomeranja na različitim delovima u istoj rupi. Svaka šipka je posebno izolovana usko postavljenim plastičnim rukavcem. Ekstenzometri su pouzdani, tačni, jednostavni za postavljanje i očitavanje. Preciznost očitavanja je 0,01 mm.

Izračunavanje napona u tlu:

Naponi se izračunavaju iz razlike u pomeranja određenog odjeljka u koji je postavljen ekstenzometar uzduž svakog odjeljka.

#### 11.3.7.2 Inklinometar

Primena:

Merenje lateralnih pomeranja duž ose bušotine.

Princip dejstva:

Pristupna cev sa četiri unutrašnja utora zalivena je u bušotinu. Sonda inklinometra, koja je potpuno vodootporna, putuje duž cevi na svojim točkicama koji su smešteni u jedan par utora u zavisnosti od potrebnog smera merenja. Senzor koji je unutar sonde reaguje na promene u položaju cevi. Očitavanja pomeranja mogu da se izvrše u intervalima od 0,5 m ili 1 m duž cevi i da se prikažu na prenosnom digitalnom ekranu.

Prednosti i ograničenja:

- pouzdan, jednostavan za postavljanje i očitavanje,
- kalibracija sonde može da se proveriti u bilo koje doba,
- jedna sonda očitava na mnogo lokacija, ali su pristupne cevi trajno postavljene u tlo,
- daje profil pomeranja duž cele dužine pristupne cijevi, pokreti se otkrivaju gdegod da se pojave,
- meri u dva ortogonalna smera,
- delovi pristupne cevi mogu da se uklone ili dodaju za vreme izgradnje,

- nije prikladan za neprekidna ili daljinska očitavanja.

Karakteristike:

Pristupna cev treba da bude postavljena vertikalno +/- 30° ili horizontalno +/- 30° o. Mogu da se koriste dužine do 200 m. Osetljivost: 0,01° = 0,175 mm/m.

#### 11.3.7.8 Podzemne vode

##### 11.3.7.8.1 Merenja podzemnih voda tokom operacija bušenja

Merenja podzemnih voda treba da se vrše svakog radnog dana pre početka radova bušenja. Nakon instalacije treba da se izvrše istraživanja uspravnih cevi i piezometara (koordinate, izdignutost). Merenja podzemnih voda kasnije treba da se vrše barem godinu dana (bolje je dve ili tri godine) u nedeljnim intervalima da bi se istražio režim prirodnih podzemnih voda u sušnim i kišovitim razdobljima.

##### 11.3.7.8.2 Uspravne cijevi / Piezometri

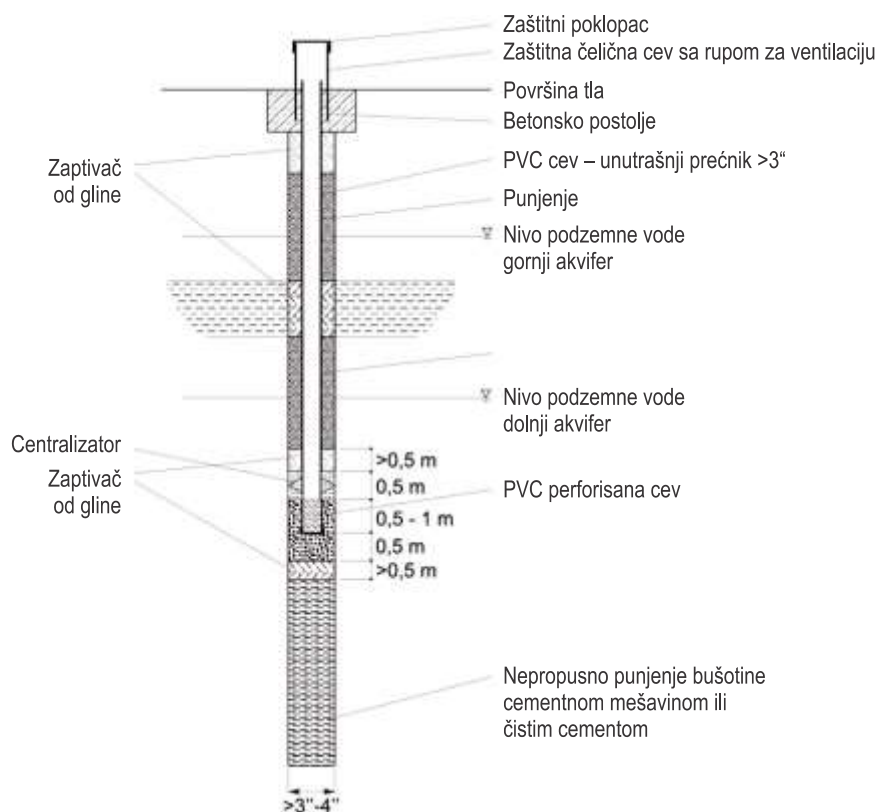
Opšte

Uspravne cevi ili piezometri treba da se postave za merenje nivoa vode ili pritiska u zavisnosti od permeabilnosti vodonosnog sloja. Tip i detalji instalacije, kao što su dubina i dužina perforirane cevi (sito), distribucija veličine zrna filtera, primena glinenih zaptivki između različitih vodonosnih slojeva itd., treba da budu preporučeni od strane terenskog geologa nakon iskopavanja bušotine. Nakon instalacije, uspravne cevi i piezometri treba da se puste u rad uklanjanjem prečišćivača, npr. pumpanjem ili primenom vazduha pod pritiskom. Dalje funkcionisanje treba kontrolisati testovima propuštanja kao što je gore opisano.

Ako se za vreme bušenja uoče različiti vodonosni slojevi (razdvojeni slojevima male permeabilnosti), u donji vodonosni sloj mora da se postavi piezometar i treba da se razmotri mogućnost dodatne bušotine za postavljanje istog u gornji vodonosni sloj.

U slabo propusnom tlu (npr. mulj u glinastom mulju) i u čvrstim stenama, piezometri sa otvorenom hidraulikom treba da se postave u skladu sa slikom 11.3.16. Piezometar se sastoji od urezane cevi unutrašnjeg prečnika od 25,4 mm do 38,1 mm, stoga prečnik bušotine mora da bude minimalno 76,2 do 101,6 mm. Dužina sita treba da bude 0,5 - 1 m. Sito je okruženo paketom filter peska, koji

je ograničen gornjim i donjim bentonitskom zaptivkom minimalne visine od 0,5 m.



Slika 11.3.16: Piezometar

### 11.3.7.9 Pomeranja građevina i konstrukcija

#### 11.3.7.9.1 Merenja sleganja

Primena:

Merenja sleganja zgrada, konstrukcija i građevina, obično se vrše nivelisanjem visinskih tačaka - repera pomoću optičkih instrumenata. Za referencu treba da se postave referentne tačke na određenom rastojanju od zone praćenja.

Princip dejstva:

Regularna merenja svih stanica treba da se vrše pre, za vreme i nakon izgradnje. Intervali mogu da budu od jedne nedelje do jednog meseca, što zavisi od faze izgradnje. Češća merenja, jednom ili dvaput na dan, treba da se vrše u kritičnim fazama izgradnje, npr. kada je radna zona tunela unutar rastojanja od 10 metara od merne stanice ili konstrukcije.

Nivelisanje pomoću standardnih instrumenata može da se izvrši brzo i bez

posebne veštine. Lako je postići preciznost manju od 5 mm; iskusan geometar je može da meri i sa preciznošću od 1 - 2 mm. Instrumentima visoke preciznosti moguće je meriti i do preciznosti od 0,1 mm.

Merne stanice:

Merne stanice su visinske tačke - reperi sidra na čvrsti površini. One moraju da budu postavljene tako da ne dođe do promena u izdizanju usled lošeg postavljanja ili pomeranja, koje je izazvano drugim uzrocima osim osim gradnjom. Važni su i slobodan pogled i lak pristup. S obzirom da se postavljanje obično vrši pre gradnje, treba da se uzmu u obzir i promene u okolini, koje mogu da se dogode tokom gradnje ili usled mogućeg skretanja saobraćaja.

Broj postavljenih mernih stanica zavisi od dimenzija i konstrukcionog sistema građevine. Kako su oštećenja građevina posledica razlike u sleganju, četiri merne stanice (po jedna na svakom uglu) smatraju se minimalnim brojem. Za detaljniju procenu

diferencijalnih sleganja potrebne su barem tri stanice u jednom smeru.

#### *Merač nagiba - tiltmetar*

Primena:

Merači nagiba, koji mere nagib (rotaciju) konstrukcije, su dodatni alat za procenu diferencijalnih ulegnuća građevine ili konstrukcije. Oni se postavljaju na zid ili ploču na jednom ili više spratova u zgradi.

Princip dejstva:

Oprema uključuje nagibni tanjir (keramički ili mesingani), koji je ubetoniran u površinu, prenosni senzor merača nagiba i indikator. Tanjir sadrži klinove koji su referentne tačke za postavljanje senzora koji detektuje promenu u nagibu (ugaona defleksija) tanjira. Merač nagiba mora da bude sposoban da izvodi dvoosna merenja. Kod dugotrajnih neprestanih posmatranja, senzor može da se postavi trajno.

### **11.3.7.10 Vibracije zbog miniranja**

#### 11.3.7.10.1 Seizmograf

Primena:

Najčešći tip oštećenja zbog miniranja je uzrokovan vibracijama u tlu. Eksplozija eksploziva u rupi generiše intenzivno prostiranje udarnih talasa u steni. Vibracije zbog miniranja i efekti takvih vibracija mogu da postanu opasni ako tunel prolazi kroz naseljeno područje ili je blizu građevina ili građevinskih konstrukcija. Intenzitet seizmičkog kretanja koji može da se toleriše raznim tipovima konstrukcija mora da bude ustanovljen da bi se odredili prihvatljive količine punjenja na raznim udaljenostima od konstrukcije (ili objekta). Izračunavanja vibracionih uticaja mogu da budu samo teoretska i zato treba biti veoma obrazriv kada se iznose kao tvrdnje. U takvim slučajevima za vreme gradnje treba da se izvrše in-situ merenja vibracija. Ova merenja mogu da budu korišćena i za poboljšanje sistema miniranja i iskopavanja.

U zavisnosti od stvarnih uslova postavlja se nekoliko stanica za praćenje. Neke treba da budu smeštene direktno na građevini ili konstrukciji na kojoj se meri efekat, a neke bliže tački miniranja. Uglavnom stanice za beleženje treba da budu smeštene na razdaljini do 500 m. Radi izmena u sistemu iskopavanja i miniranja, blizu tačke miniranja u nišama tunela mogu da se postave i seizmografi.

Princip dejstva:

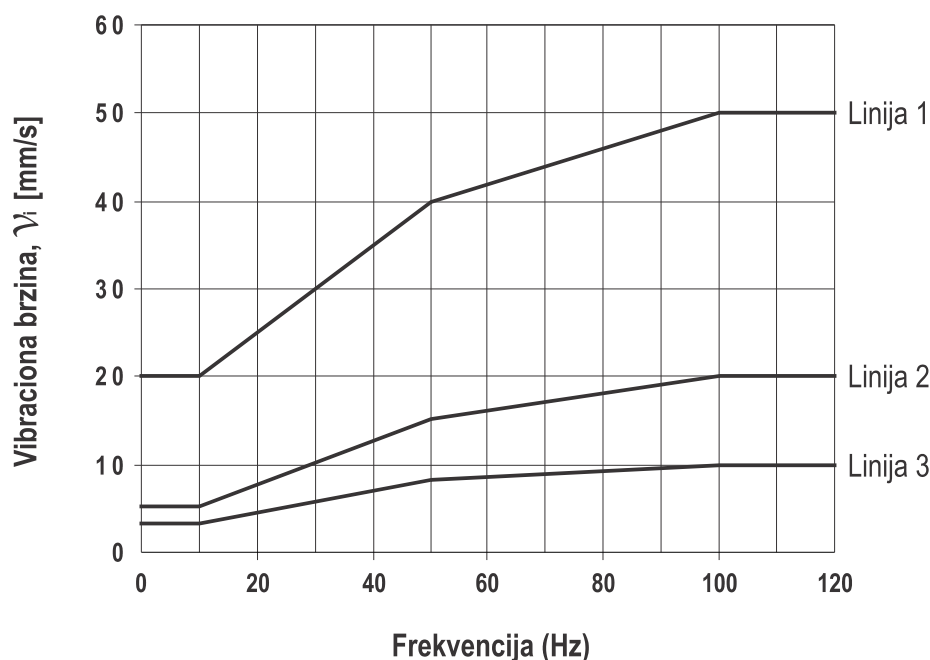
Kretanje čestica zbog seizmičkih talasa može da se izmeri pomoću seizmografa. U principu instrument čini uvećani zapis o pomeranju baze na kojoj stoji, a koja je vezana na inercioni član ili veliku masu koja se u osnovi ne miče. Seizmograf beleži pomeranja u tri smera, dva horizontalna na desnim uglovima i jedan vertikalni.

Seizmografi brzine, koji mere promenu amplitude talasa u jedinici vremena, široko se koriste za merenje pokretanja tla zbog miniranja. Ostali tipovi su seizmografi pomeranja i seizmografi ubrzanja.

Važno je da aparat za praćenje bude u punom kontaktu sa svojom bazom. Svi kablovi za povezivanje treba da su postavljeni tako da se obezbedi vodootpornost.

Dopuštena brzina vibracija:

Nivo pomeranja koji je potreban da dođe do oštećenja građevine zavisi od njene konstrukcije. U nastavku su dati podaci o standardnima dopuštene vibracione brzine koja ne dovodi do nikakvih oštećenja na građevinama u skladu sa nemačkim standardom DIN 4150. Interval linije 1 važi za spomeničke i posebno zaštićene objekte, interval linije 2 za objekte za stanovanje i interval linije 3 za industrijske i posebne objekte.



Slika 11.3.17: Grafički prikaz dozvoljene vibracione brzine koja ne dovodi do nikakvih oštećenja na građevinama u skladu sa njemačkim standardom DIN 4150. Interval linije 1 važi za spomeničke i posebno zaštićene objekte, interval linije 2 za objekte za stanovanje i interval linije 3 za industrijske i posebne objekte.

### 11.3.7.11 Unos podataka

#### 11.3.7.11.1 Opšte

Geotehnička i geodetska merenja rezultiraju velikom količinom podataka. Dok obrada tih podataka u malim projektima može da bude ručna, veliki projekti zahtevaju obradu podataka pomoću računara.

Unos mernih podataka i obrada uključuju sledeće zadatke:

- unos «sirovih» podataka jasnim redosledom,
- izračunavanje rezultata potrebnih za interpretaciju,
- grafička prezentacija rezultata.

#### 11.3.7.11.2 Ručni unos podataka

U slučajevim kada se podaci o praćenju ne beleže automatski, najčešće ih upisuje merni tehničar odmah nakon izvršenih očitavanja. Dobro je imati zapise ranijih očitavanja pri ruci kada se vrše nova, jer tako mogu da se izbegnu uobičajene greške u fazi očitavanja.

Sirovi podaci se zatim prebacuju u standardizovane obrasce za podatke. Postoje obrasci za svaki tip instrumenta. Pokazne obrasce obično daju proizvođači instrumenta. Numerički podaci iz obrazaca se

zatim unose u grafikon zavisnosti od vremena. U današnje vreme teško je koristiti samo ručne postupke za unos podataka. «Ručni» unosi zato obično koriste obrasce za unos, izračunavanje i iscrtavanje na računaru.

#### 11.3.7.11.3 Kompjutorizovani unos podataka

U velikim projektima kompjuterizovan unos podataka je jedini način da se postigne dobar pregled rezultata praćenja. Čak i u malim projektima kompjuterizovan unos je u prednosti, s obzirom da rezultati odmah mogu da se unesu u grafikon i to u različitim rasponima i kombinacijama. Ovo štedi vreme i olakšava zadatak interpretacije.

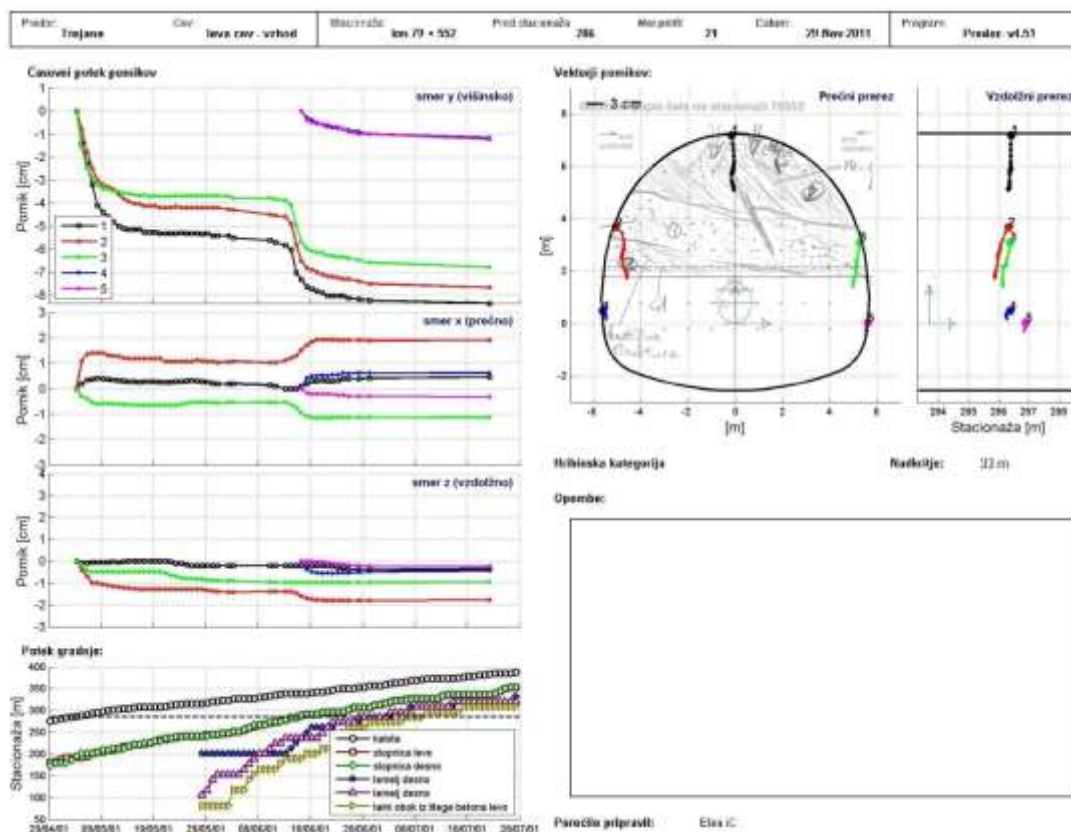
Rezultati praćenja koji su izmereni ručno unose se u bazu podataka, a elektronski sakupljeni podaci obično mogu da se prenesu direktno iz instrumenta ili putem medijuma za skladištenje podataka. U slučaju beskontaktnog praćenja deformacija, što je praktično standard za merenja otklona obloga, podaci se prenose direktno iz teodolita u računar, gde evaluacioni program izvodi potrebna matematička izračunavanja i potom prenosi podatke o deformacijama u bazu podataka.



Računarski program za unos i prikaz rezultata praćenja treba da ima barem sledeće funkcije:

- organizovanje baze podataka,
- mogućnost skladištenja podataka iz svih instrumenata koji su korišćeni na terenu, kao što su ekstenzometri, piezometri, inklinometri, merači konvergencije, beskontaktno praćenje, itd.,
- mogućnost skladištenja događaja vezanih za gradnju, kao što je brzina gradnje, zastoji u radovima, posebne pojave,
- procena sirovih rezultata (izračunavanje napona u stenski masi iz očitavanja pomoću ekstenzometra, primena temperaturne korekcije na očitavanja konvergencije, uključujući i kalibracione vrednosti,

- ako je potrebna produžena obrada sirovih rezultata od strane drugog programa, softver za unos treba da ima direktni interfejs na izlazu tog programa ili u najmanju ruku neutralni interfejs, koji mogu da koriste oba programa,
- iscrtavanje podataka na ekranu i na svim uobičajenim izlaznim uređajima (ploteri i printeri) i u datoteku radi dodavanja u izvještaje,
- iscrtavanje podataka u zavisnosti od vremena, unutar poprečnog preseka i uzduž longitudinalnih sekcija tunela



Slika 11.3.18: Kompjuterski prikaz rezultata praćenja

#### 11.3.7.11.4 Interpretacija mernih podataka

##### Opšte

Interpretacija mernih podataka u vezi sa tunelom ima sledeće zadatke:

- analiza stabilnosti kompletne konstrukcije tunela,

- analiza mehaničkog ponašanja stene zajedno sa redistribucijom napona i otpuštanjem tla,
- analiza opterećenja potpornih elemenata, npr. stenskih sidara, mlaznog betona, čeličnih lukova, itd.,
- procena rizika za svaku građevinu ili konstrukciju u blizini tunela.

**Relevantnost metoda praćenja**

Prikladnost raznih metoda praćenja varira u zavisnosti od zadatka. Različitim merenjima stvara se baza za interpretaciju:

**Beskontaktno praćenje deformacije**

Spoznaja o apsolutnim pomeranjima nekoliko tačaka na obodu obloge tunela najbolja je baza za temeljnu interpretaciju. Ovaj je metod veoma informativan s obzirom da se specifični geološki uslovi održavaju kroz merenja, pa može da se izvede vrlo osetljivo prilagođavanje potpore.

**Konvergencije**

Čitači konvergencija su vrlo osetljiv alat za procenu opšte stabilnosti. Konvergencije ne daju podatke o apsolutnim pomeranjima zato što utvrđuju samo relativna pomeranja. No, s obzirom da su svi elementi koji doprinose konstrukciji tunela sumirani u rezultat konvergencije, stabilisanje konvergencija znači i stabilisanje cele strukture.

Zbog vremenski zavisnih karakteristika stene i podgrade može da postoji privremena stabilnost, no značajne deformacije mogu da se pojave u koracima bez očiglednog uticaja aktivnosti gradnje tunela.

**Nivelisanje**

Nivelisanje iskazuje neophodne informacije zajedno sa konvergencijama. U nekim uslovima (npr. plitki tunel u slabom tlu), kada je najkritičnije sleganje kalote, nivelisanje tavanice i nivelisanje primarne podgrade su prvi izbori za analizu stabilnosti. Relativno sleganje krune i podpore je indikacija za tip mehaničkog ponašanja stena, (prenos tereta, područja otpuštanja i plastifikacije).

**Bušotinski ekstenzometri**

Bušotinski ekstenzometri daju informacije o deformacijama unutar tla/stene. Količina i distribucija tih deformacija duž ekstenzometra omogućavaju kvalitativnu procenu stanja opterećenja zemljišta. Rezultat procene zavisi od broja sidara unutar bušotine. Što je kraća relativna udaljenost sidara to su rezultati precizniji. Bušotinski ekstenzometri često omogućavaju određivanje dubine područja plastifikacije oko tunela. Ovo je važno pri odlučivanju o dužini stenskih sidara, s obzirom da su ona obično projektovana da pređu zonu plastifikacije.

**Merna sidra**

Očitavanja daju relativno pomeranje fiksnih tačaka duž stenskog sidra. U elastičnim uslovima prosečna sila može da se izračuna iz prosečnih napona. Ponekad napon prelazi

zadatu čvrstoću. U tom slučaju Hukov zakon više ne važi. Sila tada odgovara korisnoj sili. Deformacija potpuno zalivenog stenskog sidra pri bušenju tunela u steni je vrlo promenljiva duž njegove dužine. U tom slučaju izračunata sila je samo grubo pojednostavljene.

**Merenja napona**

Opterećivanje betonske obloge uglavnom se uvodi tokom prvih nekoliko dana ili čak sati nakon njenog nanošenja. Tokom tog perioda obično se dostigne najkritičniji stepen primene betonske obloge. Zato je utvrđivanje ranog opterećenja od najveće važnosti za procenu lokalne i celokupne stabilnosti i privremene potpore.

Određivanje napona u betonu pomoću ćelija za pritisak nije zadovoljavajuća metoda zato što relativno kruta ćelija ometa slab mlazni beton kao i zbog slabog ugniježđenja prouzrokovanog promenama temperature. Merač napona u mlaznom betonu je razvijen da bi se omogućila bolje procena opterećenja tokom prvih nekoliko dana. Ako se merenja napona kombinuju sa interpretacijom deformacija obloge, ekstenzometarskim očitavanjima itd., može da se postigne gotovo potpuno razumevanje strukturnog ponašanja kombinovanog sistema tla i potpornog sistema.

**11.3.7.12 Iscrtavanje podataka**

Grafički prikaz podataka je od posebne važnosti za interpretaciju. U dodatku grafikona sa podacima u zavisnosti od vremena treba da se prikaže i lokacija iskopanih faza (kalota, stepenica i podnožni svod). Procena deformacije pre nultog očitavanja je od važnosti da bi se vrednovalo celokupno pomeranje.

Za podatke o pomeranjima korisni su sledeći grafikoni:

- merenja u zavisnosti od vremena,
- merenja u zavisnosti od tunelskog poprečnog preseka i vremena,
- merenja u zavisnosti od deonice i vremena,
- merenja u zavisnosti od rastojanja do čela iskopa,
- prikaz geotehničkih tendencija (npr. očitavanja 15 m iza čela iskopa).

Za glavno praćenje, poprečni presek koji sadrži merna sidra, bušotinske ekstenzometre i ostale uređaje, podaci merenja obično se iscrtavaju i za poprečni presek tunela.

### 11.3.7.13 Merenja za vreme radova

U posebnim područjima (zone velikih raseda, područja sa bubrenjem, itd.) u pravilnim intervalima treba da se izvrše sledeća merenja:

- naponi u unutrašnjoj oblozi,
- deformacije obloge (npr. izdizanje podnožnog svoda).

### 11.3.7.14 Geotehnički nadzorni organ

Pojedine vrste merenja mogu da izvode različiti izvođači. Međutim, za celovito i usklađeno tumačenje rezultata svih izvršenih merenja imenuje se samo jedan geotehnički nadzorni organ koji mora da bude nezavisan od izvođača.

Zadaci geotehničkog nadzornog organa su:

- nadzor nad redovnim i kvalitetnim obavljanjem svih projektom predviđenih geotehničkih merenja i posmatranja,
- usklađeno tumačenje svih izvršenih merenja u periodičnim izveštajima, sa komentarima i predlozima za nastavak radova,
- tekuće obaveštavanje izvođača, projektanta i naručioca, odnosno službe nadzora o rezultatima merenja,
- tekuće obaveštavanje izvođača pojedinih geotehničkih merenja i posmatranja o eventualnim neusaglašenostima i potrebnim izmenama i dopunama merenja.

U projektu mora da bude određena učestalost periodičnog izveštavanja od strane geotehničkog nadzornog organa. Bez obzira na projektom propisanu učestalost izveštavanja, geotehnički nadzorni organ je dužan da izveštaj izradi i dostavi odmah kada izmerene vrednosti ukazuju na ponašanje izvan predviđenog ili kad se geološkim praćenjem utvrdi značajna promena u sastavu, odnosno karakteristikama tla.

Geotehnički nadzorni organ mora rezultate merenja da prikaže u adekvatnom tabelarnom ili grafičkom obliku. Prema vrstama merenja rezultati moraju da se prikažu:

- u osnovi (u situaciji),
- u poprečnim, odnosno podužnim profilima,
- kao vremenski dijagram,
- kao dijagram međusobne zavisnosti pojedinačnih količina.

Geotehnički nadzorni organ je zadužen za tumačenje svih izvršenih merenja.

Tumačenje treba da vrši:

- simultano za sva izvršena merenja na pojedinačnom objektu ili zoni uticaja gradnje, uzimajući u obzir geološkim praćenjem utvrđenu strukturu tla,
- u skladu sa najnovijim saznanjima u struci,
- grafičkim prikazima merenih količina u osnovi, poprečnim i podužnim profilima, i dijagramom vremenske zavisnosti merenih količina ili međusobne zavisnosti različitih merenih količina,
- po objektivnim metodama i simulacijom pomoću numeričkih modela.

Ako rezultati pojedinačnog merenja ili merenja na više mesta ukazuju na ponašanje izvan očekivanog (zelenog) područja, potrebno je da se na osnovu utvrđene geološke strukture i karakteristika tla, izmerenih vrednosti, građevinskih aktivnosti i drugih faktora uticaja takvo događanje objasni:

- adekvatnim povratnim analizama,
- kontrolnim merenjima,
- dodatnim istraživanjima,

a prema rezultatima tih analiza treba da se:

- način gradnje prilagodi utvrđenim uslovima,
- ponovo odrede granične vrednosti merenja koje razgraničavaju prihvatljivo (zeleno), granično (žuto) i nedozvoljeno (crveno) ponašanje tla, odnosno konstrukcija.

Kada se radovi na iskopavanju završe, geotehnički nadzorni organ mora da sastavi završni izveštaj koji predstavlja deo projekta izvedenih radova i u pisanom, tabelarnom i grafičkom obliku sadrži:

- opis i prikaz geoloških uslova u zoni uticaja tunela, sa svim specifičnostima i geološko uslovljenim pojavama,
- opis i prikaz hidrogeoloških uslova,
- tumačenje rezultata svih merenja.

Uz konačni izveštaj treba da se prilože svi dnevni ili periodični rezultati izvršenih merenja i geoloških praćenja.

## 11.3.8 GEODETSKI RADOVI

### 11.3.8.1 Geodetska koordinatna osnova

Koordinatnu osnovu predstavlja trodimenzionalni koordinatni sistem, odnosno trodimenzionalni položaji tačaka koje određuju taj koordinatni sistem. Položaji

tačkaka mogu da budu određeni na osnovu klasičnih – terestričkih metoda određivanja položaja tačkaka, ali i metodama satelitske geodezije, npr. GPS tehnologijom (Global Positioning System).

Geodetsku koordinatnu osnovu predstavljaju položaji (koordinate) tačkaka. Osim samih metoda merenja i obrade podataka, koje omogućavaju postizanje potrebne preciznosti položaja tačkaka koordinatne osnove, potrebno je obezbediti i stabilnost tačkaka koordinatne osnove. Zato je potrebno izvršiti izbor odgovarajućih lokacija i adekvatnu stabilizaciju tačkaka. Stabilnost tačkaka koordinatne osnove obezbeđuje se periodičnim merenjima. Ako se ustanovi da neka od tačkaka nije stabilna, neophodno je pouzdano utvrditi njeno pomeranje.

Koordinatna osnova mora da bude takvog kvaliteta (preciznosti) da omogućava izvođenje geodetskih radova pre, tokom i nakon gradnje tunela i drugih objekata na posmatranoj deonici puta:

- ucrtavanje portala i konstrukcija u području portala,
- usmeravanje ose tunela,
- praćenje pomeranja (deformacija) u području uticaja tunela,
- praćenje konvergencija u tunelu
- praćenje pomeranja nakon gradnje tunela.

Pri izboru položaja tačkaka mora da učestvuje i geolog, odnosno geotehničar, ocenom globalne i lokalne stabilnosti područja na kojem je predviđeno postavljanje tačkaka primarne koordinatne osnove.

### 11.3.8.2 Uspostavljanje koordinatne osnove terestričkim metodama

Terestrička metoda, koja omogućava dobijanje horizontalnih položaja tačkaka adekvatnog kvaliteta, predstavlja triangulaciju zajedno sa trilateracijom. Horizontalni deo koordinatne osnove mora da bude uspostavljen kao državna trigonometrijska mreža najvišeg reda. Posmatranja moraju da budu izvedena baždarenim i servisiranim instrumentima najvišeg kvaliteta, korektno obrađena i ujednačena.

Visinski deo koordinatne osnove mora da bude uspostavljen pomoću instrumenata, procedurom i obradom posmatranja kao u nivelmanu visoke preciznosti.

Uspostavljanje koordinatne osnove u slučaju terestričkih metoda mora da bude izvedeno u

skladu sa međunarodnim standardom ISO 4463.

Rezultat su koordinate tačkaka u državnoj kartografskoj projekciji i visine tačkaka u državnom vertikalnom referentnom sistemu.

### 11.3.8.3 Uspostavljanje koordinatne osnove pomoću GPS tehnologije

Pri uspostavljanju koordinatne osnove na temelju GPS posmatranja, posmatranja je potrebno izvesti pomoću GPS prijemnika adekvatnog kvaliteta (geodetski GPS prijemnici), uz adekvatnu dužinu trajanja posmatranja i njihovu korektnu obradu. Pritom je potrebno izvršiti povezivanje posmatranja sa globalnim terestričkim koordinatnim sistemom visoke preciznosti, npr. ETRS 89 i upotrebiti precizne efemeride GPS satelita, npr. CODE ili IGS efemeride.

Pri određivanju položaja metodom satelitske geodezije, koordinatnu osnovu predstavlja prostorni položaj tačkaka, određen u globalnom terestričkom referentnom koordinatnom sistemu. Za upotrebu tih položaja u koordinatnom sistemu u kojem je objekat projektovan, pre svega zbog povezivanja sa terestričkim mernim postupcima, potrebno je uspostaviti vezu između sistema.

Pri uspostavljanju koordinatne osnove metodama satelitske geodezije, ona mora biti izrađena svrsishodnim ispunjavanjem međunarodnog standarda ISO 4463. Takođe preporučuje se poštovanje pravila geodetskih merenja GPS tehnologijom.

Federal Geodetic Control Comitee, 1988. Geometric Geodetic Accuracy Standards and Specifications for Using GPS Relative Positioning Techniques, Ver. 5.0, Federal Geodetic Control Committee, SAD.

Rezultat su koordinate tačkaka u državnoj kartografskoj projekciji i visine tačkaka u državnom vertikalnom referentnom sistemu.

### 11.3.8.4 Preciznost koordinatne osnove

Uspostavljanje geodetske koordinatne osnove mora da bude izvedeno preciznošću koju zahtevaju pojedini zadaci čije izvršavanje treba da omogući i obezbedi geodetska osnova . To su:

- zahtevana preciznost ucrtavanja ose tunela i drugih objekata,

- zahtevana preciznost praćenja eventualnih pomeranja u području uticaja gradnje,
- zahtevana preciznost praćenja konvergencija,
- zahtevana preciznost određivanja pomeranja tačaka nakon gradnje tunela.

Potrebnu preciznost ucrtavanja objekta, kao i očekivanu veličinu pomeranja i (konvergencija) daje projektant tunela.

### 11.3.9 TOLERANCIJE

#### 11.3.9.1 Opšte

Prilikom praktične konstrukcije tunela, neizbežan je određeni stepen nepreciznosti. Projekat tunela treba da uzme u obzir te nepreciznosti predviđanjem adekvatnih geometrijskih tolerancija za početne i završne obloge tunela.

Moderna projektna praksa ima tendenciju da uključi tolerancije u sve nacрте, a naročito za završne obloge.

Druga mogućnost je da se tolerancije izostave iz nacрте pa se njihovo definisanje ostavlja izvođaču ili predstavnicima vlasnika na terenu. U svakom slučaju, nacрте moraju bez dileme da pokažu da li njihove dimenzije uključuju tolerancije ili ne.

#### 11.3.9.2 Tolerancija za početne obloge (primarne podgrade)

Konstrukcija početnih obloga je operacija kojoj se pripisuje nekoliko izvora nepreciznosti. Kako je niže navedeno, mnoge od njih u velikoj meri su povezane sa uslovima na gradilištu, odnosno sa promenama tokom konstrukcije. Stoga ponekad može da bude bolje da se tolerancije ne uključe u nacрте za početne obloge, već da se definišu na gradilištu. S druge strane, već gotovi delovi, kao što su čelični lukovi i rešetkasti nosači, treba da budu izrađeni u skladu sa odgovarajućim tolerancijama.

Tolerancije za početne obloge možemo da podelimo u četiri kategorije:

- geodetske tolerancije,
- tolerancije izvođenja (konstrukcijska tolerancija),
- tolerancije zbog deformacija,
- neizbežni prekoprofilski izkop.

#### 11.3.9.2.1 Geodetske tolerancije:

Na tolerancije istraživanja najviše deluje opšta topografska karta. Preciznosti istraživanja raste značajno ako su geodetske mreže zatvorene, npr. ako postoji pilotni potkop.

Geodetska tolerancija takođe zavisi od kvaliteta instrumenata, vidljivosti u tunelu, mogućnosti iznalaženja dobrih stajališta i vidnih linija, kao i od opštih operativnih uslova merenja. Dakle, geodetske tolerancije su snažno povezane sa uslovima na gradilištu. Projektant će možda morati da modifikuje geodetske tolerancije ako izvođač izvede merenja značajno bolje ili lošije od očekivanog u fazi projektovanja.

#### 11.3.9.2.2 Tolerance izvođenja (Konstrukcijske tolerancije)

Tolerancije konstrukcije uključuju sve teškoće povezane sa geometrijski tačnim iskopavanjem i potpornim instalacijama.

Tolerancije konstrukcije su jako uslovljene uslovima zemljišta, oblikom i veličinom tunela, složenošću trenutnih faza izvođenja, konstrukcijskom opremom i kvalitetom prefabrikovanih delova (npr. čelični lukovi).

Veoma nepovoljni uslovi zemljišta, kao što je jako ulaženje vode, mogu štetno da utiču na tolerancije.

Konstrukcijske tolerancije su veoma povezane sa uslovima na gradilištu pa će možda biti potrebno da se prilagode pojedinim uslovima na gradilištu.

#### 11.3.9.2.3 Neizbežno prekoprofilski izkop tunela:

Neizbežno iskopavanje preko profila puta nije tolerancija u striktnom smislu reči. Međutim, ono ima vrlo važan efekat na projekt, pa mora da bude uključeno u projektovanje.

Neizbežno lomljenje ne povećava se nužno sa pogoršanjem uslova stene, upotreba ponih lukova i podupiračkih elemenata u takvom kamenim uslovima smanjuje količinu lomljenja.

#### 11.3.9.3 Tolerancije finalnog obloga

Izgradnja finalnih obloga zahteva uže tolerancije nego što zahteva izgradnja inicijalnih obloga. S obzirom da se konstrukcija finalnih obloga vrši pod manje

stisnutim i teškim operativnim uslovima, takve se tolerancije obično mogu održati.

Postoje tri glavna izvora nepreciznosti u izgradnji finalnih obloga:

- geodetske tolerancije,
- tolerancije kalupa,
- učinak zavoja.

#### 11.3.9.3.1 Geodetske tolerancije:

Izvori nepreciznosti istraživanja za izgradnju finalnih obloga slični su onima kod izgradnje inicijalnih obloga.

Mogu se definisati dve klase tolerancija: Zatvorena geodetska mreža i otvorena geodetska mreža. Na preciznost istraživačke mreže veoma veoma utiče dužina tunela.

#### 11.3.9.3.2 Tolerancije kalupa:

Na ovaj razred tolerancija utiču tri glavna faktora:

- proizvodna tolerancija kalupa,
- nepreciznosti tokom smještanja kalupa,
- deformacija kalupa tokom betoniranja.

#### 11.3.9.3.3 Uticaj zavoja:

S obzirom da je kalup tunela ravan, zavijen tunel zapravo ima oblik poligona. Stoga će da dođe do devijacije od teoretskog oblika uz maksimum na centru betoniranog bloka. »Tolerancija zavoja C« se može izračunati prema formuli:

$$C = R + \frac{B}{2} - \sqrt{\left(R + \frac{B}{2}\right)^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2} \quad (\text{mm})$$

- L dužine bloka
- B širine područja odmaka
- R radijus tunelske trase

#### 11.3.9.4 Ostale tolerancije

Niše, okna za održavanje i ostale instalacije treba da budu pozicionirane uz preciznost od +/- 5 cm. Veličina niša treba da bude precizna do +/- 1 cm.

Prefabrikovani delovi, instalacioni kanal i ostale instalacije treba da budu smeštene uz preciznost od +/- 1 cm.