



**Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet**

Preddiplomski studij

GEOTEHNIČKO INŽENJERSTVO

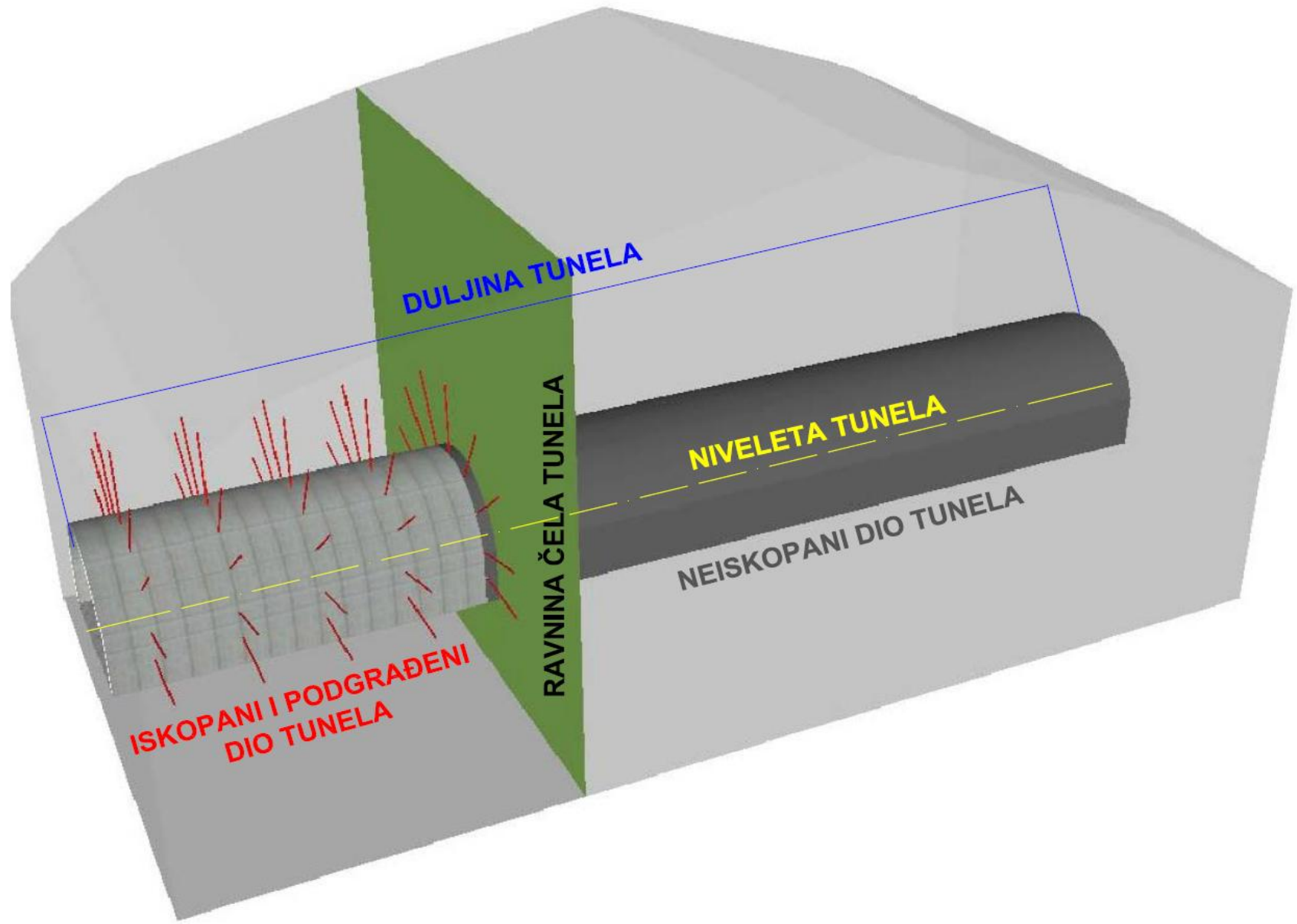
Predavanje 13.

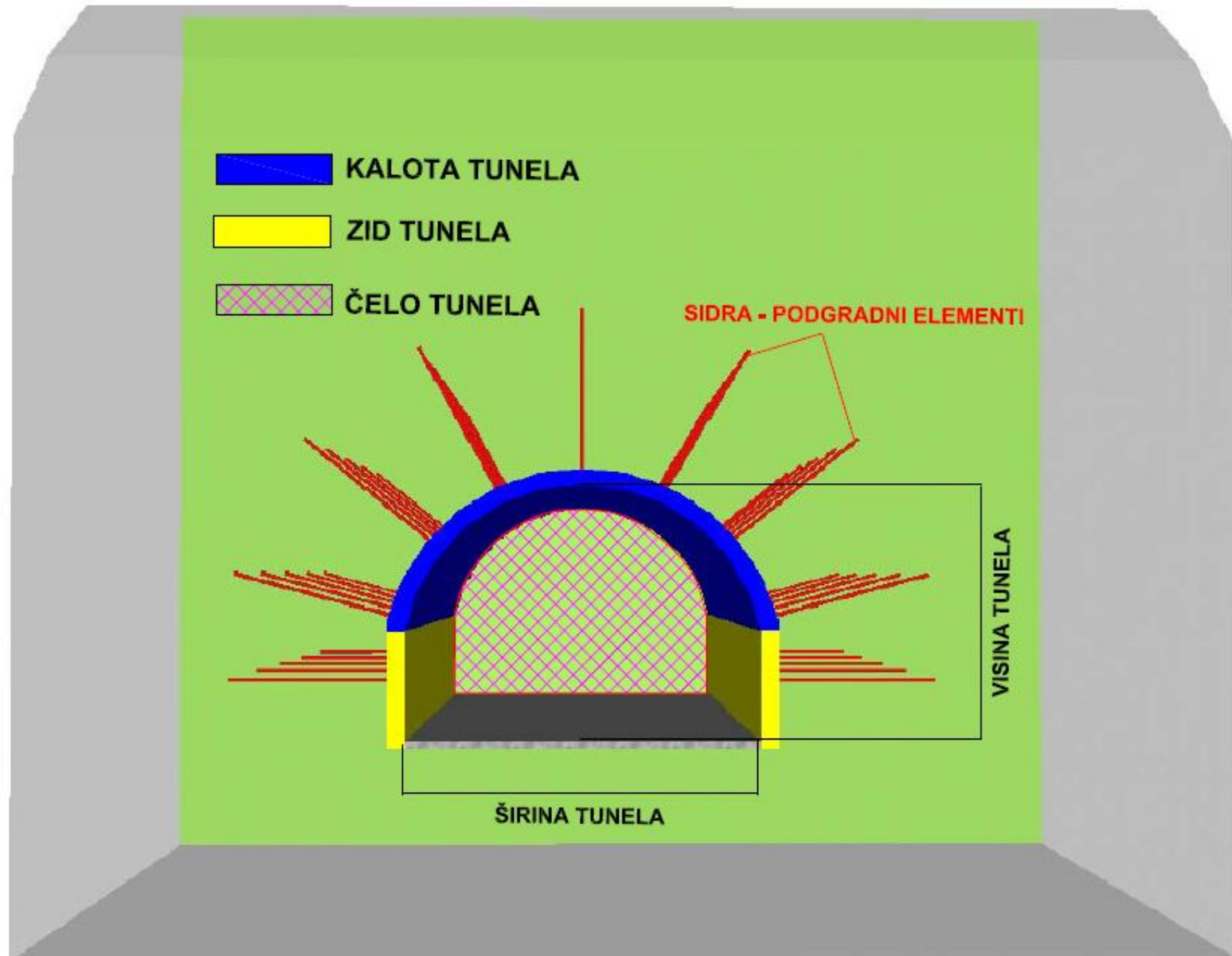
Tunelogradnja

Što je tunel?

- **Tunele u užem smislu možemo definirati kao podzemne prostore za prolaz ili transport ljudi i materijala, izvedene ljudskom djelatnošću, malih dimenzija poprečnog presjeka u odnosu na dužinu, s niveletom koja ne odstupa znatnije od horizontale.**

- **Dominatan razlog za izvođenje tunela u prošlosti i danas je svladavanje terenskih prepreka. Međutim u posljednje vrijeme se postoje novi argumenti za izvođenje tunela:**
 - 1. Nedostatak prostora (u urbanim područjima)**
 - 2. Zaštita okoliša**







1. UVOD

- Od prapovijesti ljudi kopaju podzemne prostorije za potrebe stanovanja, rudarenja, navodnavanja i sl.
- Razvojem društva, pojavila se potreba za tunelima ispod gradova, mora, rijeka i jezera, što je rezultiralo težim uvjetima građenja.
- Inovacije kao što su dinamit i eksplozivi (1867.), električni detonatori (1867.), strojevi za iskop tunela (1881.), špricani mort (1909.), stijenska sidra (1918.), mlazni beton (1942.), tungsten carbide bušaći pribori (1940.), Nova Austrijska Tunelska Metoda (1950.) i hidrauličko udarno bušenje (1971.) zaslužni su za ubrzan razvoj metoda izvođenja podzemnih objekata.
- Također, dolazi do razvoja računala i opreme koja se koristi za praćenje deformacija i naprezanja u stijenskoj masi (**monitoring**).
- Time se u tunelogradnji smanjio rizik od havarija tijekom građenja i ubrzala gradnja.

➤ Podjela tunela s obzirom na namjenu:

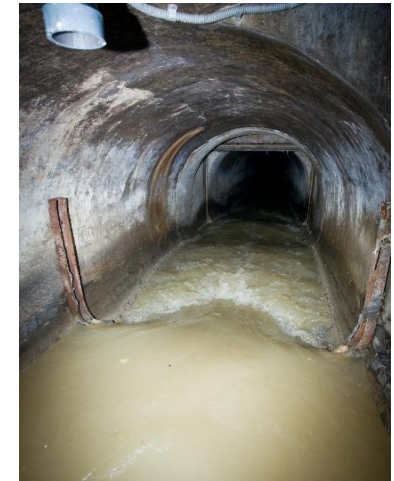
1. PROMETNI TUNELI:

- CESTOVNI
- ŽELJEZNIČKI
- BRODSKI
- PJEŠAČKI
- MJEŠOVITE NAMJENE



2. HIDROTEHNIČKI TUNELI:

- VODOVODNI
- MELIORACIJSKI
- KANALIZACIJSKI
- TUNELI U SKLOPU HIDROCENTRALA



3. KOMUNALNI TUNELI:

- SMJEŠTAJ TELEFONSKIH
VODOVA, ELEKTRIČNIH
VODOVA, TOPLOVODA,
PLINOVODA...

NAJDULJI PROMETNI TUNELI U SVIJETU:

Država	Ime tunela	Dužina tunela	Godina otvaranja
Cestovni tunel			
Norveška	Laerdal	24 510 m	2000.
Podvodni tunel			
Japan	Tokyo Aqua	9 583 m	1997.
Željeznički tunel			
Švicarska	Gotthard Base	57 072 m	2010.
Plovni tunel			
Francuska	Le Rove	7120 m	1911. (zatvoren)



TUNEL 'LAERDAL'

TUNEL
'MALA KAPELA'

NAJDULJI CESTOVNI TUNELI U HRVATSKOJ:

Ime tunela	Dužina tunela	Godina otvaranja
Mala Kapela	5 801 m	2005.
Sveti Rok	5 727 m	2003.
Učka	5 062 m	1981.
Sveti Ilija	4 045 m	-





2. TUNELSKA PODGRADA

**ZAVOD ZA
GEOTEHNIKU**

2.1. PRIMARNA PODGRADA

2.1.1. MLAZNI BETON

2.1.2. ČELIČNE MREŽE I LUKOVI

2.1.3. SIDRA

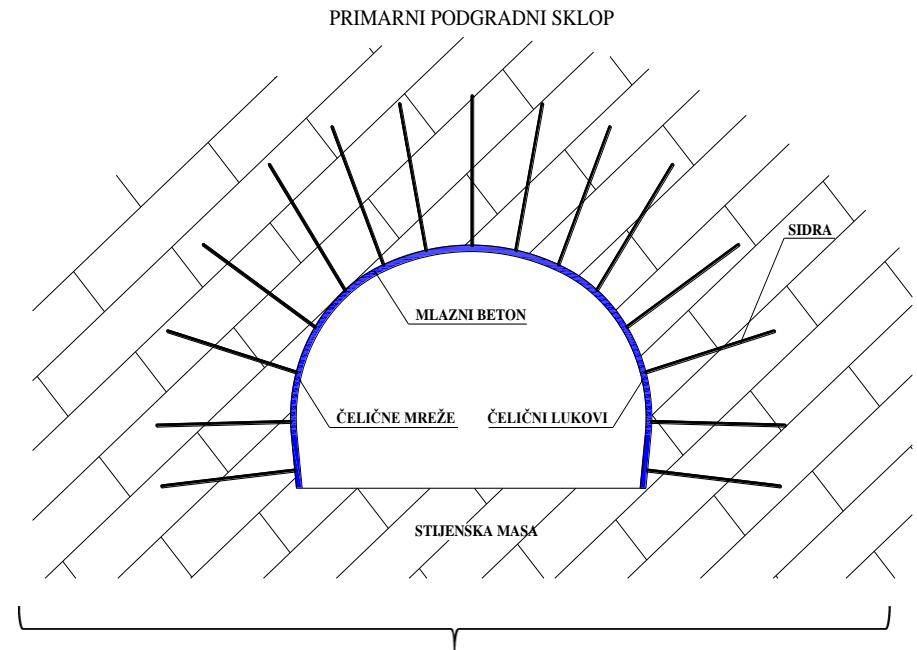
2.2. POSEBNE MJERE PODGRAĐIVANJA

2.3. KARAKTERISTIČNA KRIVULJA STIJENSKE MASE I PODGRADE

2.4. SEKUNDARNA OBLOGA

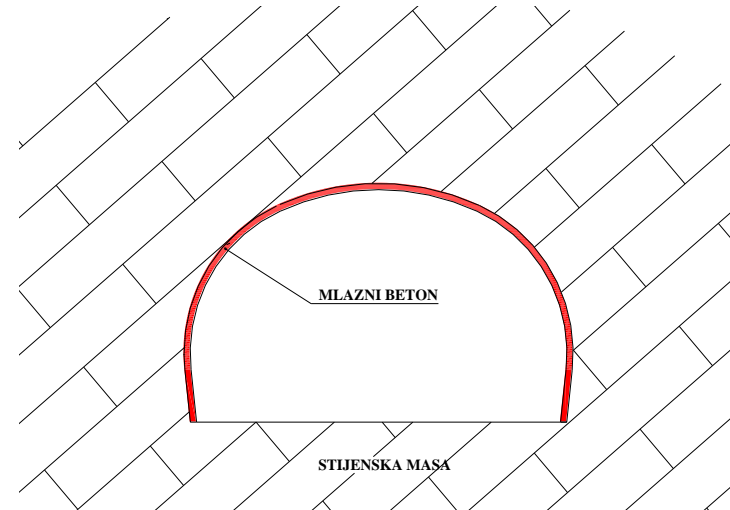
- **Primarna podgrada** primjenjuje se za vrijeme ili odmah nakon iskopa kako bi se osigurali sigurni radni uvjeti tijekom kasnijeg iskopa i inicirao proces mobiliziranja i konzervacije čvrstoće stijenske mase na način da se kontrolira pomak granica iskopa. Svaka dodatna podgrada primjenjena u kasnijoj fazi se naziva sekundarnom.
- Elementi primarne podgrade su:

- 1) **Stijenska masa**
- 2) **Mlazni beton**
- 3) **Čelične mreže**
- 4) **Čelični lukovi**
- 5) **Sidra**



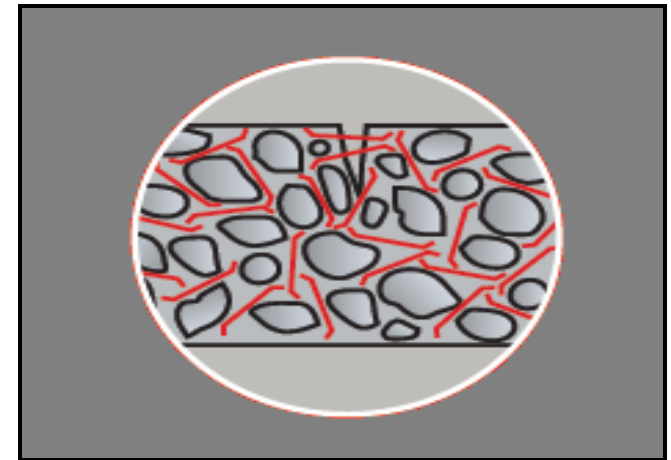
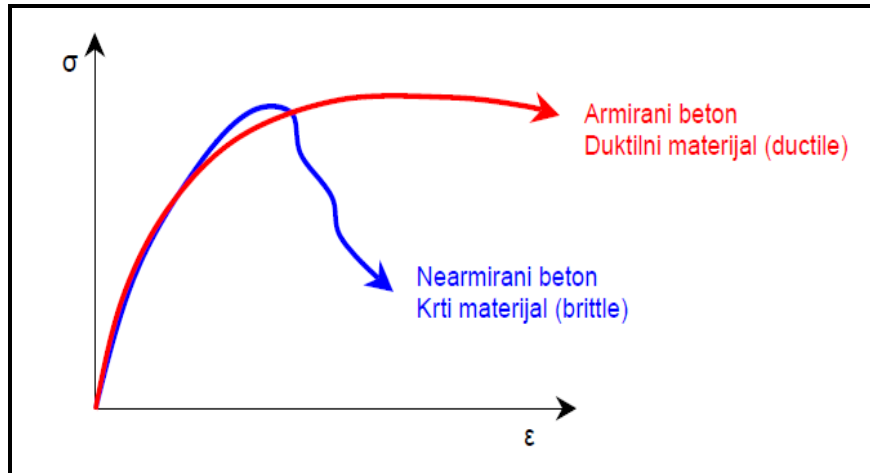
ELEMENTI PRIMARNE PODGRADE TUNELA

- **Mlazni beton** se upotrebljava za sprečavanje rahljenja stijene i kao podgradni element
- Obloga od mlaznog betona zatvara pukotine u stijeni, sprečava ispadanje blokova stijene iz kalote i bokova i time pojavu progresivnog loma
- Vežanjem za stijenu poboljšava mehaničku kvalitetu stijene i sprečava redukciju njezine čvrstoće



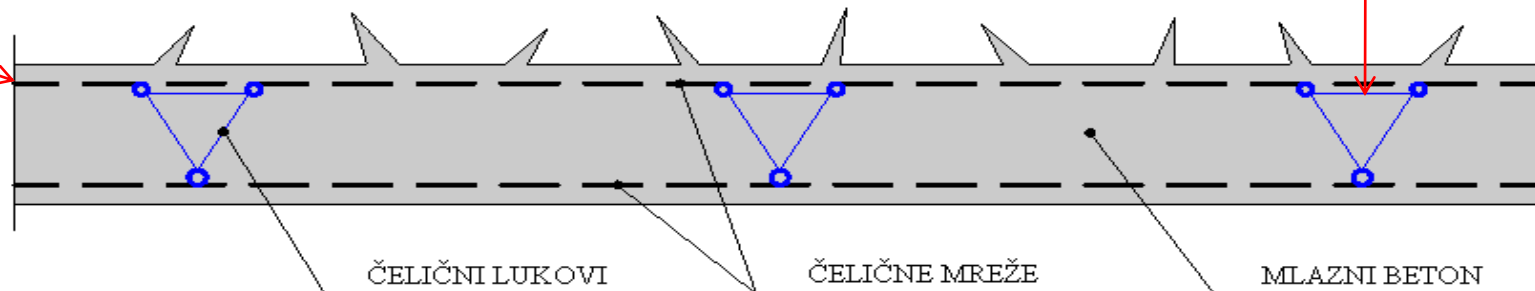
POSTUPAK NANOŠENJA MLAZNOG BETONA

- Za izgradnju primarne podgrade i sekundarne obloge tunela može se umjesto normalnog mlaznog betona primijeniti **mikroarmirani mlazni beton (MAMB)** primjenom čeličnih ili polipropilenskih vlakana propisanih karakteristika.

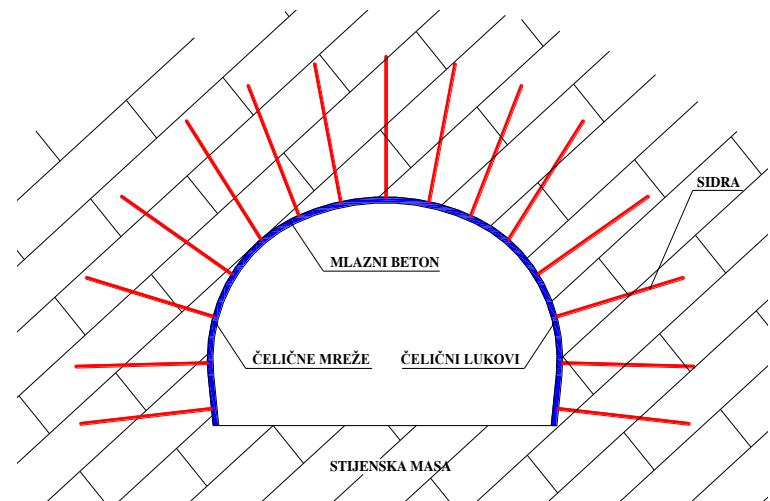


➔ Kod klasičnog nearmiranog betona nema dodatne deformacije nego dolazi do razdvajanja polovica (nastaje krti lom), dok se kod mlaznog betona s čeličnim vlaknima (MAMB) uočava znatna postpukotinska nosivost.

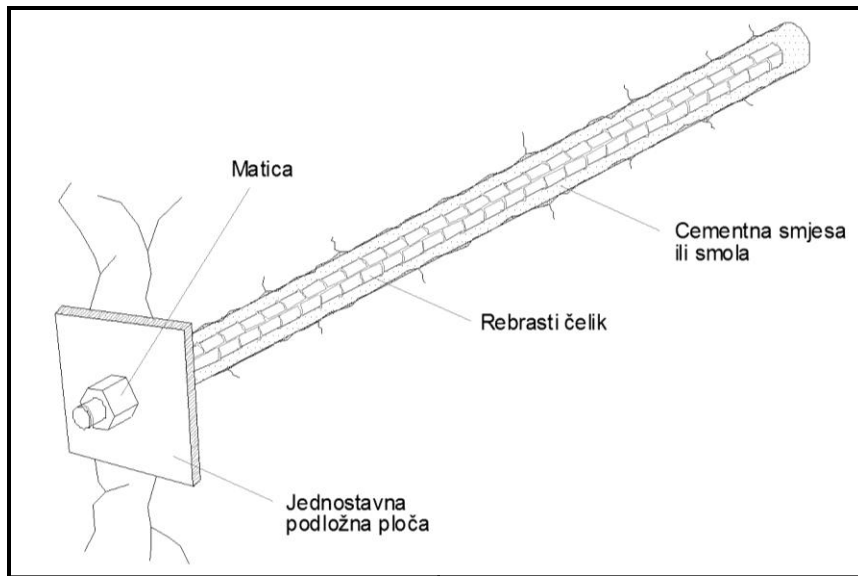
- **Čelične zavarene mreže** upotrebljavaju se u kombinaciji s mlaznim betonom. Uobičajeno se primjenjuju mreže "Q" i "R".
- Kod većih debljina mlaznog betona (> 25 cm) primjenjuje se dvostruka mreža.
- U slaboj stijeni potrebni su **čelični lukovi**. Ti lukovi podupiru iskop zajedno s armiranim mlaznim betonom kao elastična podgrada i sprečavaju rastresanje stijene.
- Postavljaju se neposredno nakon iskopa ako nema izgleda da će lagana podgrada zaustaviti napredovanje deformacija stijene.



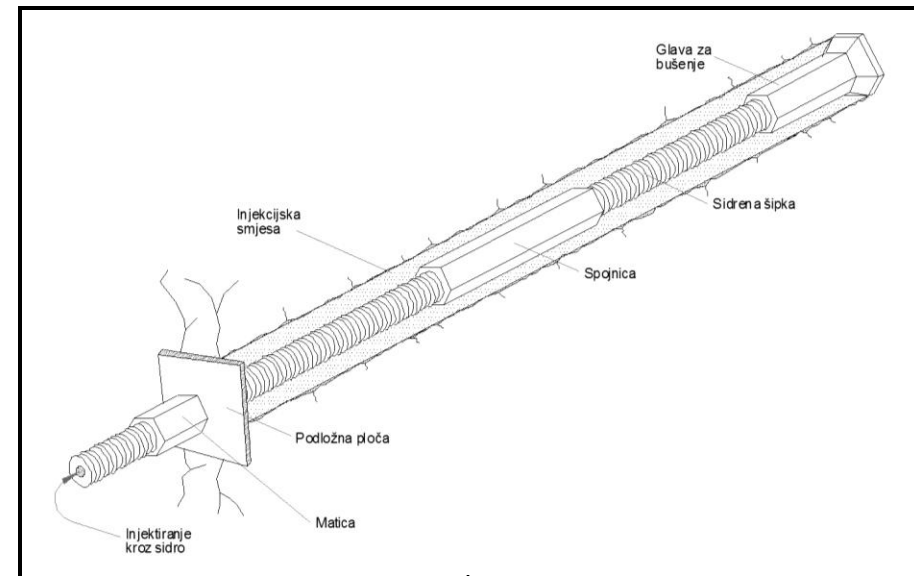
- **Sidra** su osnovni podgradni element s kojim se poboljšavaju fizičke i mehaničke karakteristike stijene oko iskopa.
- Ugrađuju se sustavno kao dio standardnog podgradnog sustava.
- Broj sidara, njihova dužina, nosivost i raspored ovise o kvaliteti stijene, veličini i obliku poprečnog presjeka i dužini napredovanja.
- Detaljnije o sidrima se može pronaći u: *‘Predavanje 9. – Sidra u stijenskoj masi’*



- Uloga **pojedinačnog sidrenja** je da sanira lokalne pojave nestabilnosti i smanjuje mogućnost geoloških odvala stijenske mase.
- Uloga **sistematskog sidrenja** je povećanje ili održavanje čvrstoće stijenske mase i ravnomjerna raspodjela opterećenja oko podzemnog iskopa.



INJEKTIRANO ŠTAPNO SIDRO



SAMOBUŠIVO ŠTAPNO SIDRO

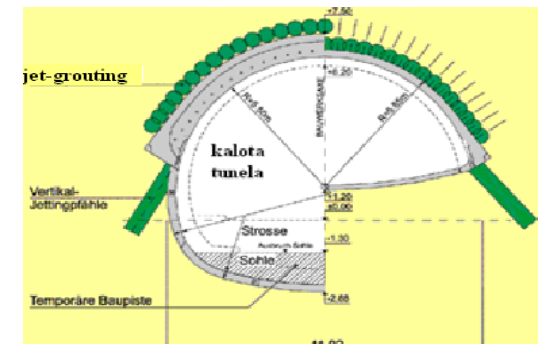
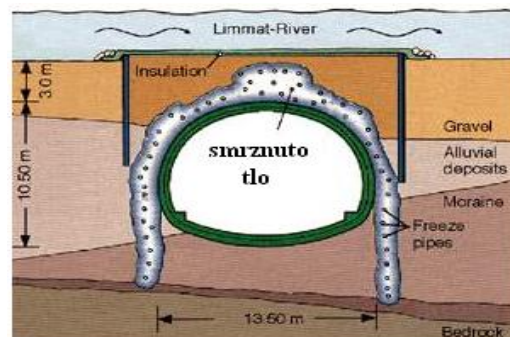
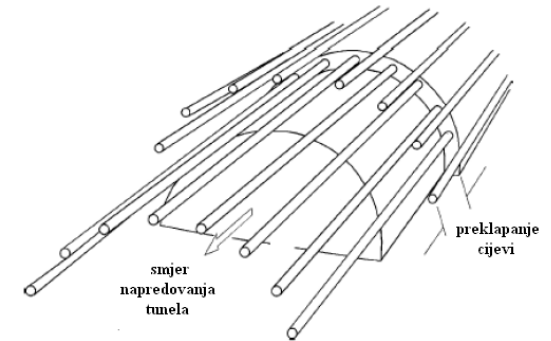


2.1.3. SIDRA

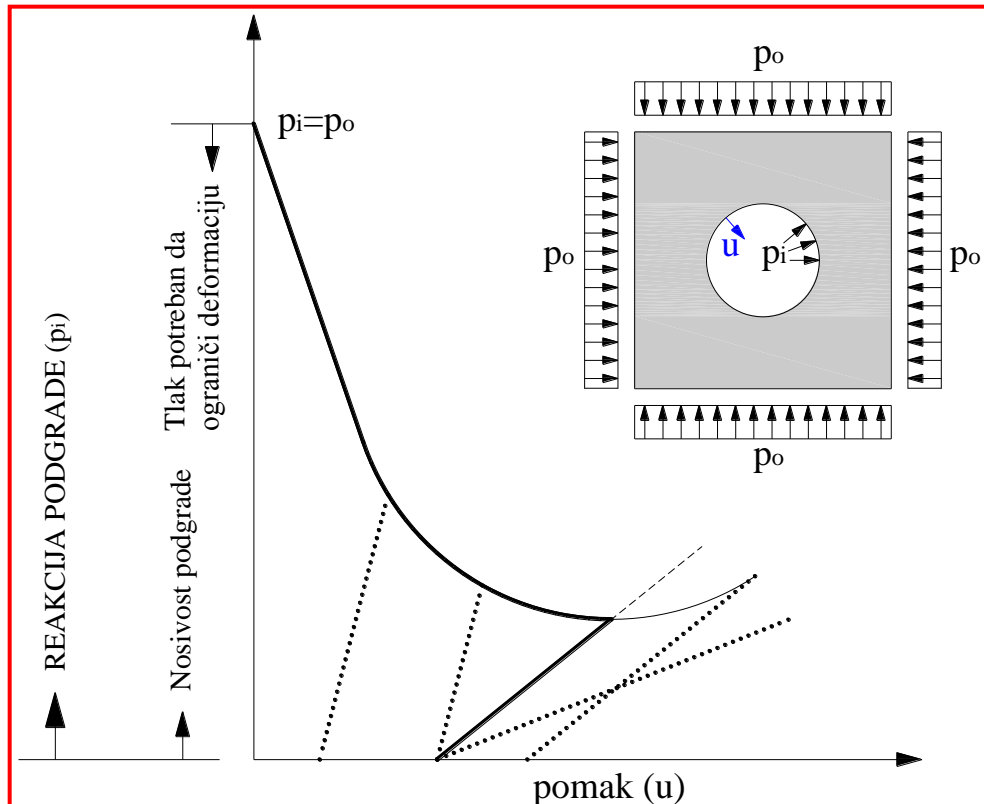
- Djelovanje sidara u stijenskoj masi može se opisati kao:
- 1) Dodatni unutrašnji pritisak na granicu iskopa
 - 2) Poboljšanje karakteristika stijenske mase
 - 3) Pridržanje nestabilnih blokova
 - 4) Povezivanje slojeva uz povećanje posmične čvrstoće u diskontinuitetima
 - 5) Formiranje nosivog svoda od stijene ojačane sidrima

➤ Posebne mjere podgrađivanja tunelskog iskopa su:

1. Čelična koplja
2. Cijevni kišobran (Pipe roof)
3. Mlazno injektiranje (Jet grouting)
4. Iskop pod komprimiranim tlakom
5. Zamrzavanje tla i stijene
6. Odvodnja



- **Karakteristične krivulje stijenske mase i podgrade** predstavljaju odnos između podgradnog pritiska (p_i) potrebnog da se uspostavi ravnoteža na rubu podzemnog otvora pri danom radijalnom pomaku ruba otvora, a prema tom radijalnom pomaku (u_i).



p_i – naprezanje kojim podgrada djeluje na stijensku masu (naprezanje koje podgrada preuzima na sebe)

p_o – prirodno naprezanje u stijenskoj masi na mjestu podzemnog otvora prije iskopa



PRIKAZ TRI PODGRADE RAZLIČITE DEFORMABILNOSTI:

- Krivulja krute podgrade siječe **krivulju stijenske mase** 'prerano' i mobilizirani pritisak je visok
- Krivulja popustljive podgrade siječe **krivulju stijenske mase** kada je već dosegnuta vršna čvrstoća podgrade
- Krivulja mekane podgrade ne siječe **krivulju stijenske mase** ili je siječe 'prekasno' pa su ostvareni pomaci preveliki



2.3. KARAKTERISTIČNE KRIVULJE STIJENSKE MASE I PODGRADE

ZAVOD ZA
GEOTEHNIKU

- **PRETPOSTAVKE:**
- Analizira se kružni otvor polumjera (a).
- Prirodno stanje naprezanja oko otvora je hidrostatsko ($p_{0horizontalno} = p_{0vertikalno}$).
- Stijenska masa u zoni iskopa je homogena i izotropna. U nedirnutom stanju se ponaša idealno elastično, te su joj svojstva opisana modulom elastičnosti E i Poisson-ovim koeficijentom. Nakon prekoračenja čvrstoće stijenska masa se ponaša idealno plastično.
- Podgradni pritisak p_i je jednolik po cijelom unutrašnjem rubu otvora.



2.3. KARAKTERISTIČNE KRIVULJE STIJENSKE MASE I PODGRADE

- Uz pretpostavku **linearno elastičnog ponašanja stijenske mase**, radijalni pomak ruba otvora određen je izrazom:

$$u_i = \frac{a \cdot (1 + \nu)}{E} \cdot (p_0 - p_i)$$

- Uz pretpostavku **linearno elastičnog ponašanja podgrade**, osnovni oblik karakteristične krivulje podgrade može se opisati izrazom:

$$u_i = u_{io} \cdot \frac{p_i \cdot a}{K} ; \quad p_i < p_{\max}$$

gdje su:

p_{\max} - nosivost podgradnog sustava

K – krutost podgradnog sustava

u_{io} - početni pomak ruba otvora do trenutka postavljanja podgrade

- Za podgradu od mlaznog betona:

$$K = \frac{E}{(1 + \nu)} \cdot \left[\frac{a^2 - (a - t)^2}{(1 - 2\nu) \cdot a^2 + (a - t)^2} \right]$$

$$p_{\max} = \frac{1}{2} \sigma \cdot \left[1 - \frac{(a - t)^2}{a^2} \right]$$

gdje su:

t – debljina podgrade od mlaznog betona

a – polumjer iskopa tunela

σ - jednoosna tlačna čvrstoća mlaznog betona



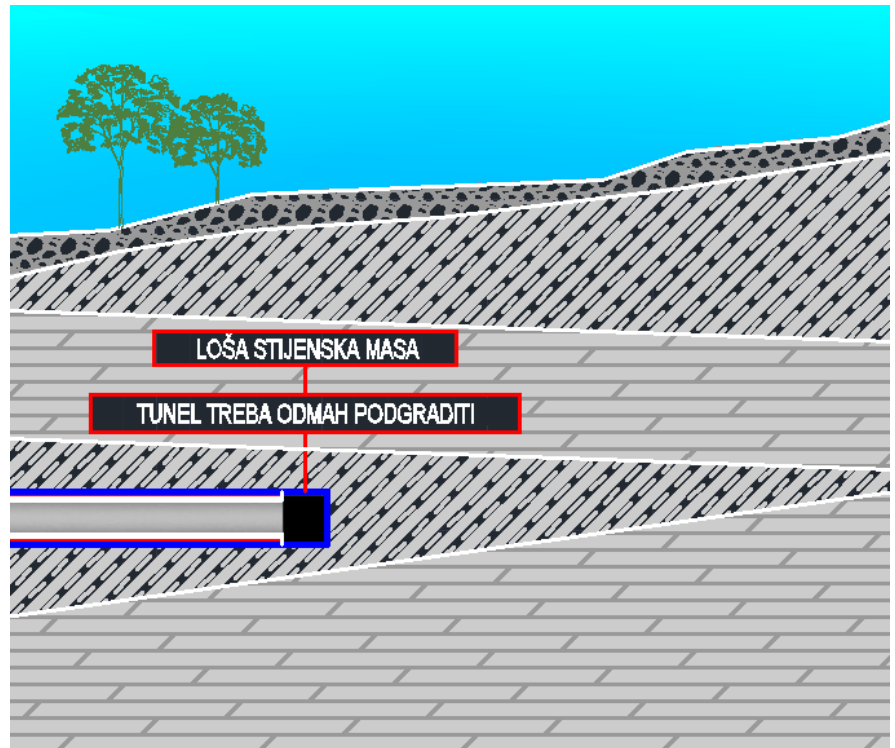
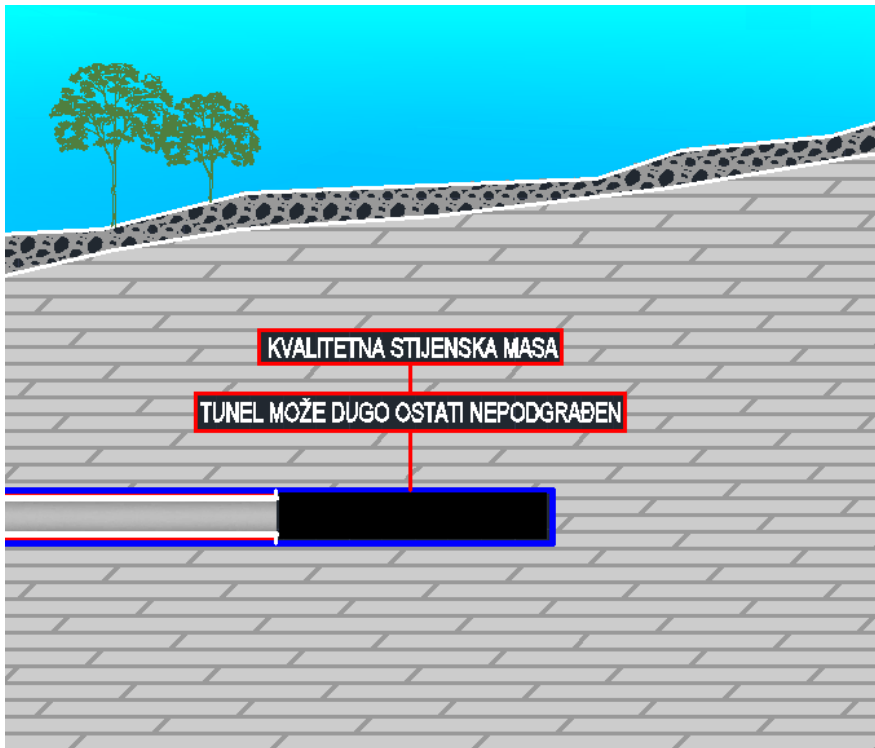
2.3. KARAKTERISTIČNE KRIVULJE STIJENSKE MASE I PODGRADE

ZAVOD ZA
GEOTEHNIKU

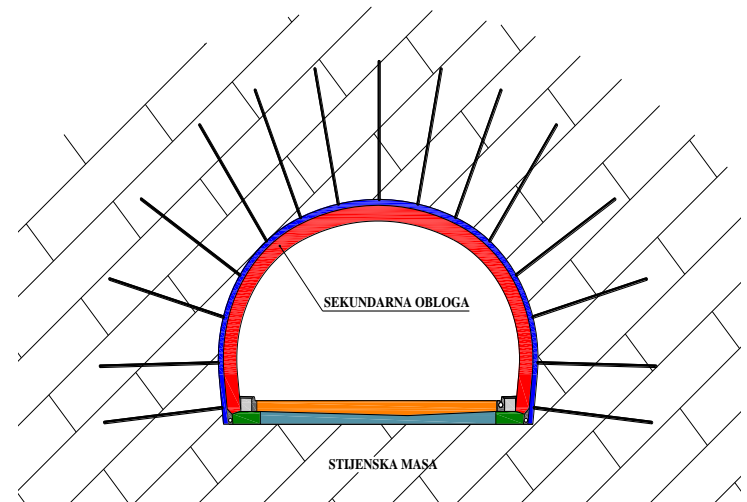
- Karakteristične krivulje stijenske mase i podgrade koriste se za analizu podgrade potrebne za stabilizaciju podzemnog otvora, tj. da bi smo znali odrediti pravo vrijeme ugradnje i dozirati stijenski pritisak.

- Učinkovitost podgrade određena je:
 - A. Početkom postavljanja podgrade
 - B. Krutošću sustava podgrade
 - C. Nosivošću sustava podgrade

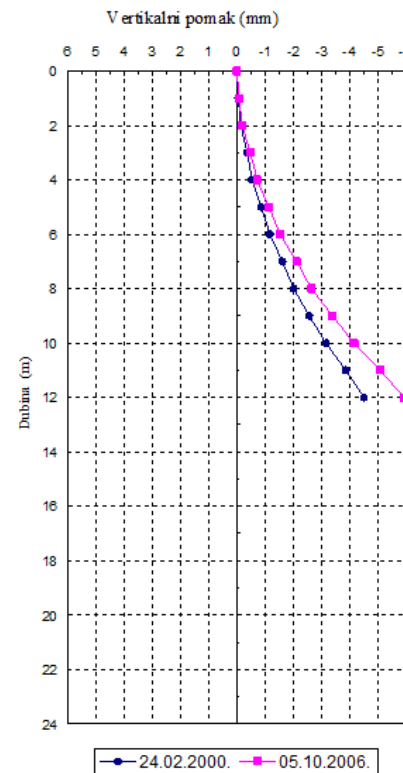
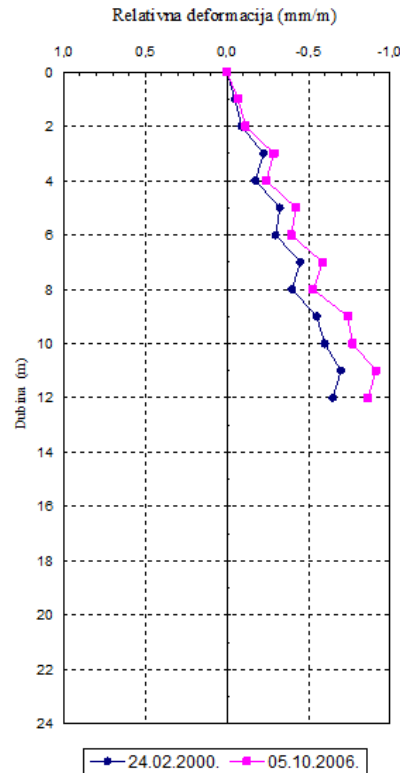
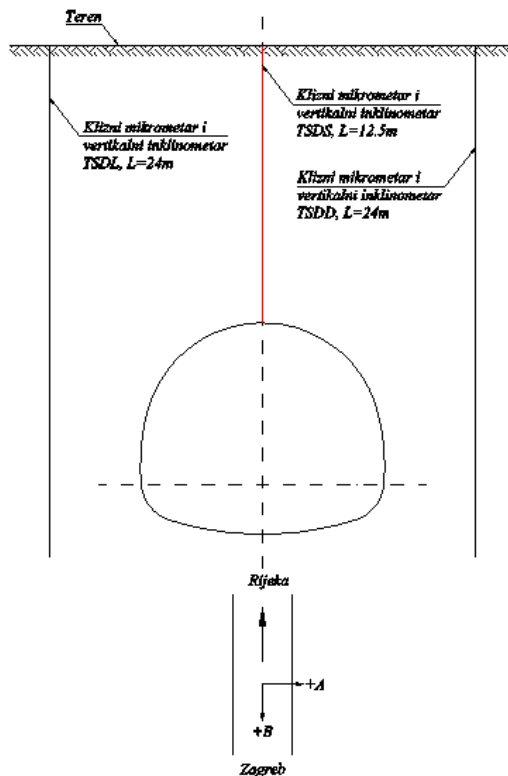
- Odabir naprezanja pri kojem će se postići ravnoteža, odnosno stabilizirati podzemni otvor, ovisi o inženjerskoj prosudbi!



- **Sekundarna tunelska obloga** izvodi se od armiranog betona nakon završetka primarne tunelske podgrade. Između primarne podgrade i sekundarne obloge postavljaju se slojevi **hidroizolacije**.
- Usprkos tome, sekundarna obloga konstruktivno djeluje sa primarnom podgradom kao spregnuta konstrukcija, a njihov spoj se promatra kao kruta veza.
- Prema osnovnim postavkama tunelogradnje primarna tunelska podgrada služi za trajno osiguranje tunelskog profila i u interakciji sa stijenskim masivom mora preuzeti cjelokupno opterećenje.
- U skladu s tim sekundarna tunelska obloga ne preuzima nikakvo značajnije opterećenje.



- Međutim, mjerena deformacija u sekundarnim oblogama izvedenih tunela pokazala su znatne priraste napreznja i deformacija za vrijeme eksploatacije. Stalnim mjerenjem deformacija sekundarne obloge u eksploataciji moguće je baždariti proračunske modele i znatno unaprijediti razumijevanje kompleksnog stanja napreznja i deformacija u kojem se ona nalazi.



**MJERENJA NA
TUNELU
'POD VUGLEŠ'**



2.4. SEKUNDARNA OBLOGA

ZAVOD ZA
GEOTEHNIKU

ANALIZA OPTEREĆENJA NA SEKUNDARNU OBLOGU

- 1) Vlastita težina sekundarne obloge
- 2) Skupljanje i puzanje betona sekundarne obloge
- 3) Injektiranje šupljine u svodu
- 4) Temperaturne promjene u tunelu
- 5) Podizanja razine podzemne vode oko tunela
- 6) Trajnost primarnog podgradnog sustava



2.4. SEKUNDARNA OBLOGA

ZAVOD ZA
GEOTEHNIKU

VLASTITA TEŽINA SEKUNDARNE OBLOGE

- Vlastita težina sekundarne obloge je težina armiranog betona čija debljina može varirati od 10 do 50 i više cm.
- Ovom opterećenju može se pridodati i težina ventilatora ovješanih u svodu tunela.
- Intenzitet opterećenja je u tom slučaju precizno definiran.
- Opterećenje se javlja odmah nakon očvršćavanja betona odnosno prije puštanja bilo kojeg tunela u promet.



2.4. SEKUNDARNA OBLOGA

ZAVOD ZA
GEOTEHNIKU

SKUPLJANJE I PUZANJE BETONA SEKUNDARNE OBLOGE

- Skupljanje i puzanje betona su dugotrajni procesi koji uzrokuju deformacije sekundarne obloge.
- O pouzdanosti mjerenja reoloških i mehaničkih karakteristika ugrađenog betona ovisi preciznost određivanja intenziteta opterećenja.
- Uslijed ovog opterećenja stanje naprezanja i deformacija u sekundarnoj oblozi se mijenja u vremenu, ali ono značajnije ne utječe na stanje naprezanja u primarnom podgradnom sustavu i okolnoj stijeni.



2.4. SEKUNDARNA OBLOGA

ZAVOD ZA
GEOTEHNIKU

INJEKTIRANJE ŠUPLJINA U SVDU

- Deformacije sekundarne obloge izazvane vlastitom težinom i skupljanjem betona mogu uzrokovati pojavu šupljine u svodu tunela između primarne podgrade i sekundarne obloge.
- Da bi se uspostavio ponovni kontakt, nužan za stvaranje cjelovitog konstruktivnog sustava, provodi se kontaktno injektiranje kroz otvore ostavljene u svodu sekundarne obloge.



2.4. SEKUNDARNA OBLOGA

ZAVOD ZA
GEOTEHNIKU

TEMPERATURNE PROMJENE U TUNELU

- Temperaturene promjene u tunelu izazivaju deformacije betona a time i promjenu stanja naprezanja u sekundarnoj oblozi.
- Temperature u tunelu ljeti se mogu povećati do 10°C , a zimi smanjiti do -10°C .
- Intenzitet ovog opterećenja moguće je prilično pouzdano odrediti.
- Ovo opterećenje ne utječe značajnije na stanje naprezanja u primarnoj podgradi i okolnoj stijeni.



2.4. SEKUNDARNA OBLOGA

ZAVOD ZA
GEOTEHNIKU

PODIZANJE RAZINE PODZEMNE VODE OKO TUNELA

- Ovo opterećenje djeluje i na primarni podgradni sustav i na sekundarnu oblogu, a istovremeno i mijenja stanje efektivnih napreznja u okolnoj stijeni. Intenzitet ovog opterećenja je moguće prilično pouzdano odrediti.
- Ako je istražnim radovima utvrđena moguća pojava podzemne vode tada je prema pravilima NATM primarni podgradni sustav dimenzioniran tako da preuzme sva napreznja odnosno deformacije na sebe.
- Obzirom da je do podizanja vode došlo za vrijeme eksploatacije, sekundarna obloga će morati preuzeti dio opterećenja na sebe jer je i ona sada uključena u nosivi konstruktivni sustav.
- Ovo opterećenje može uzrokovati reološke promjene u stijeni i primarnom podgradnom sustavu i time povećati opterećenje na sekundarnu oblogu.



2.4. SEKUNDARNA OBLOGA

ZAVOD ZA
GEOTEHNIKU

TRAJNOST PRIMARNOG PODGRADNOG SUSTAVA

- Gubitak mehaničkih karakteristika primarnog podgradnog sustava predstavlja najveće opterećenje na sekundarnu oblogu i izaziva velike promjene stanja naprezanja i deformacija.
- Opterećenje se javlja u **tri** vida:
 1. Stijenska masa koja je uključena u primarni podgradni sustav izložena je dugotrajnom opterećenju i različitim režimima podzemnih voda. Zbog puzanja, bujanja ili rastrožbe dolazi do povećanog opterećenja na primarnu podgradu te prijenosa opterećenja na sekundarnu oblogu.
 2. Primarna podgrada opterećena iznad polovine svoje čvrstoće imat će znatne viskozne deformacije puzanja, a rezultat toga je uključivanje sekundarne obloge u proces zaustavljanja deformacija stijenskog masiva.



2.4. SEKUNDARNA OBLOGA

3. Čelična geotehnička sidra, naročito ona bez zaštite, nakon većih deformacija izvrgnuta su intenzivnoj koroziji te nakon toga potpuno zakazuju. To dovodi do slabljenja primarnog podgradnog sustava i prijenosa opterećenja na sekundarnu oblogu.
 - Intenzitet ovog opterećenja je veoma teško utvrditi.
 - Pouzdanost procjene opterećenja povećava se razvojem znanosti o trajnosti materijala i konstrukcija.
 - Numeričkim simulacijama moguće je analizirati faktore koji utječu na trajnost primarnog podgradnog sustava tunela i koji mijenjaju stanje naprezanja i deformacija sekundarne obloge.

NATM – New Austrian Tunneling Method

- NATM nije metoda ako pod metodom podrazumijevamo tehnologiju gradnje koja se može prikazati shemom iskopa i nacrtima podgrade.
- NATM nije vezana za neku proceduru iskopa i podgrađivanja.
- NATM je generalni koncept odnosno filozofija tunelogradnje. Ona je postupak gradnje tunela temeljen na znanstveno utvrđenim i u praksi potvrđenim idejama i principima, kako bi se mobiliziranjem kapaciteta stijenske mase ostvarila optimalna sigurnost i ekonomičnost.



3. NATM

- 1944. – Rabcewicz, knjiga ‘Gorski pritisak i tunelogradnja’
- 1948. – Osnovni principi NATM, patent
- 1956. do 1958. prvi tuneli u Venezueli
- 1963. NATM predstavljena na Geomehaničkom kolokviju u Salzburgu
- Nazvana je Nova jer je postojala Stara
- Razvoj traje i danas



3. NATM

- Većina tunela u svijetu (a i u Hrvatskoj) u novije vrijeme je izvedena u skladu s principima NATM.
- Četiri su **osnovna načela** NATM-a:

I. Zadržati čvrstoću stijene

- Izbjeći nepoželjno oslabljivanje (razrahljivanje) stijene pažljivim iskopom i trenutnom primjenom podgrade i očvršćavanja.

II. Zaobljeni oblici presjeka

- Izbjegavati koncentracije naprezanja u kutevima u kojima počinje progresivni lom.

III. Popustljiva tanka podgrada

- Primarna podgrada treba biti fleksibilna da bi se smanjilo momente savijanja i da bi se olakšalo proces preraspodjele naprezanja, a da se podgrada ne izvrgava nepovoljnim unutrašnjim silama (momentima).
- Potrebu dodatnog podgrađivanja ne treba ostvarivati podebljavanjem podgrade nego sidrenjem.
- Podgrada mora biti u potpunom kontaktu sa vidljivom stijenom. Mlazni beton zadovoljava taj zahtjev.

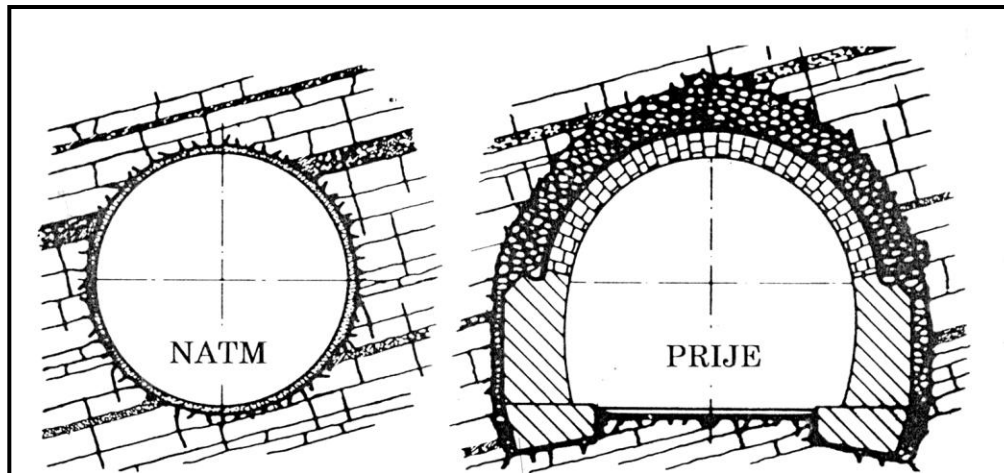


IV. Mjerenja in-situ

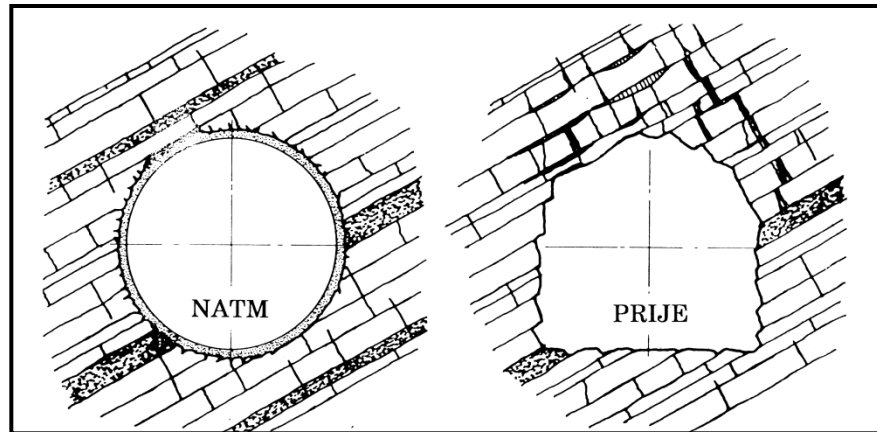
- Opažanje ponašanja tunela za vrijeme gradnje je integralni dio NATM.
- Praćenjem i interpretacijom deformacija i naprezanja može se optimalizirati radne postupke i potrebe podgrađivanja.
- Koncept NATM je kontrola deformacija odnosno procesa preraspodjele naprezanja da bi se zajamčio traženi stupanj sigurnosti.

➤ U nastavku će se prikazati **osnovni principi** NATM-a:

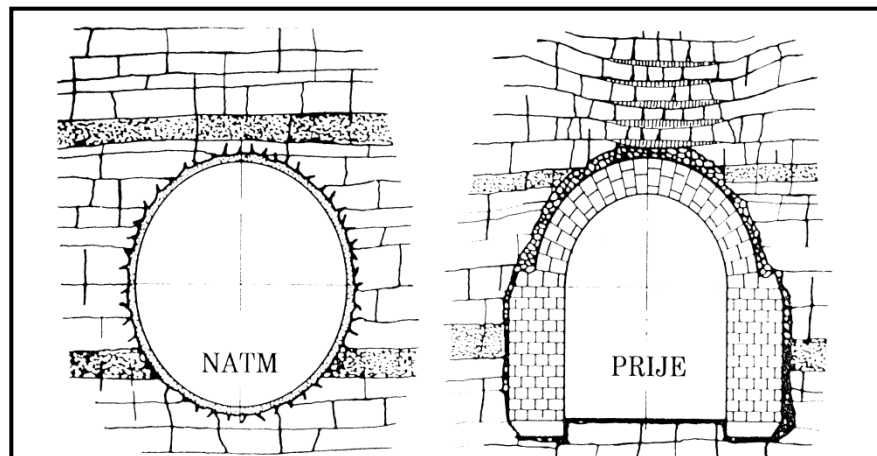
I. Bitni nosivi građevinski materijal tunela je okolni masiv.



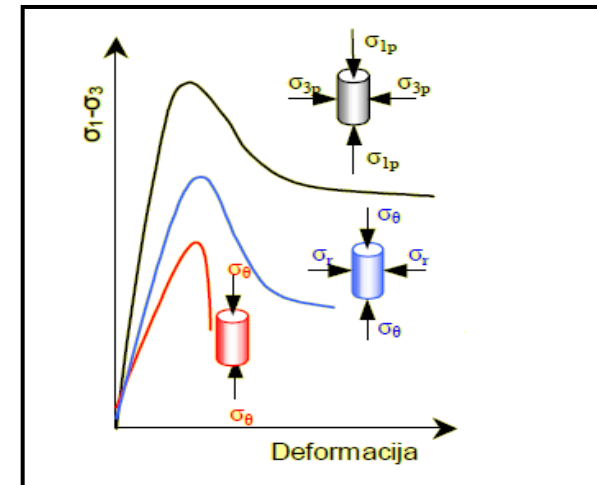
II. Održati prvobitnu čvrstoću masiva.



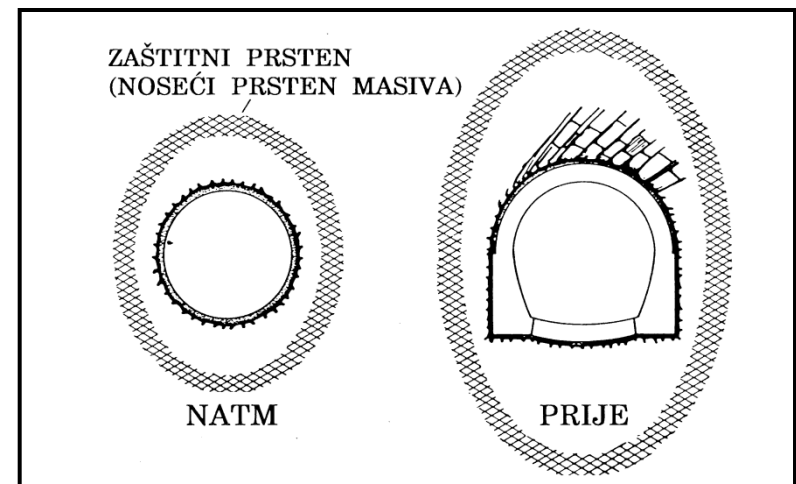
III. Razrahljenje se mora svakako spriječiti jer izaziva gubitak čvrstoće.



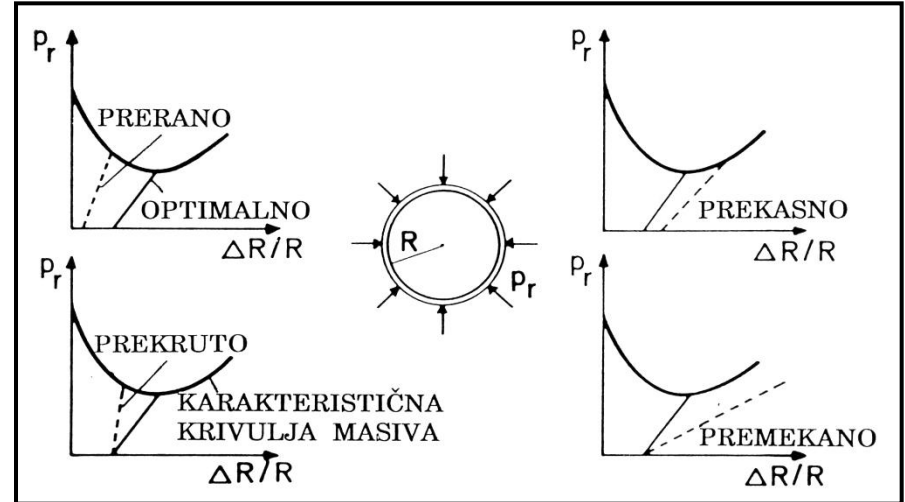
IV. Treba spriječiti jednoosno i dvoosno stanje naprezanja jer ih masiv slabo podnosi.



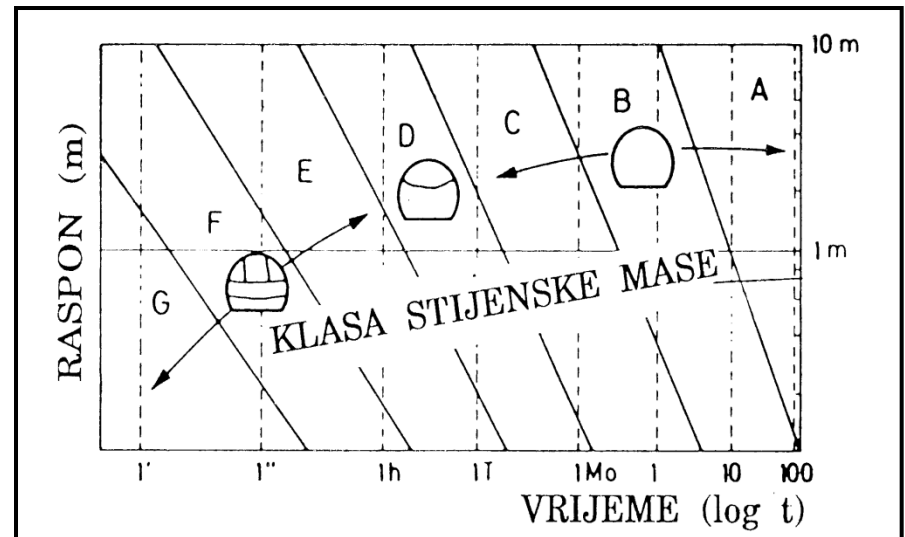
V. Deformacijama masiva treba se tako upravljati da se s jedne strane (pomakom masiva prema otvoru) mobilizira zaštitni prsten, a s druge strane onemogućiti gubitak čvrstoće. Što nam to bolje uspije bit će veća sigurnost i ekonomičnost građenja.



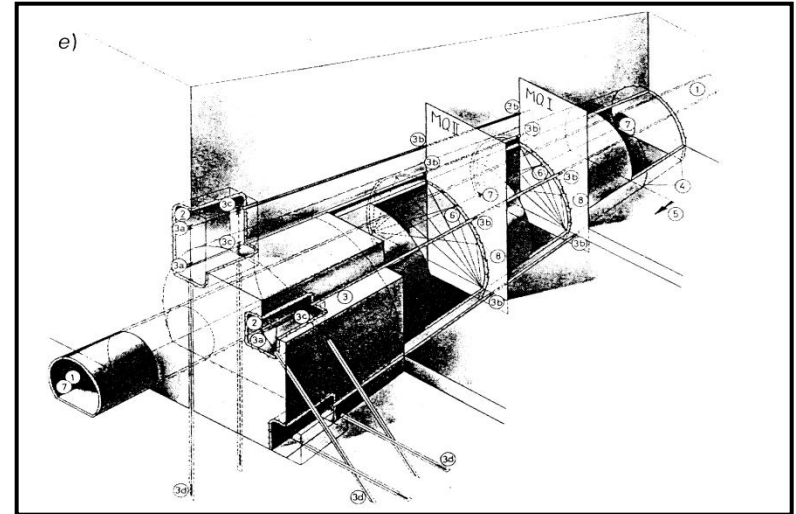
VI. Treba pravovremeno ugraditi podgradu (ne prerano niti prekasno) i odgovarajuće dozirati stijenski pritisak ugradnjom ne prekrute i ne preslabe podgrade (detaljnije u nastavku predavanja).



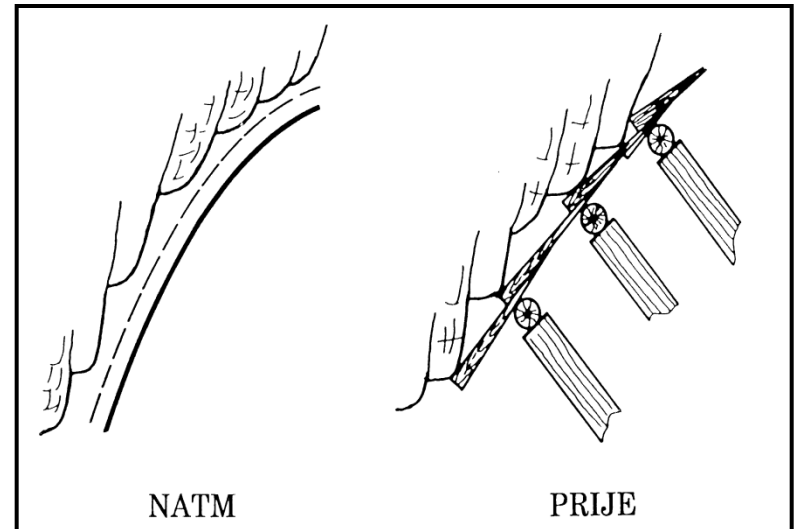
VII. Treba točno procijeniti specifični vremenski čimbenik masiva. U kvalitetnoj stijenskoj masi tunel može duže ostati nepodgrađen. U stijenskoj masi loše kvalitete tunel treba odmah podgraditi.



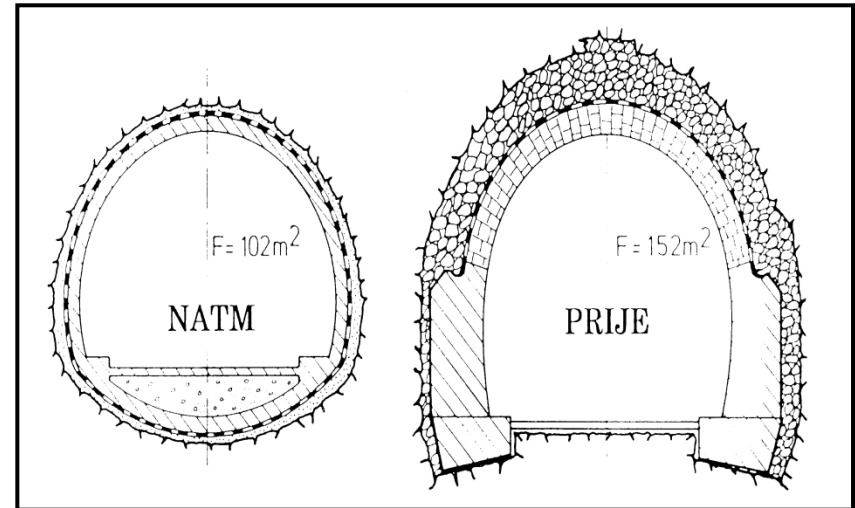
VIII. Procjeni vremenskog čimbenika služe prethodna laboratorijska ispitivanja i prije svega in situ mjerenja pomaka u tunelu. Vrijeme stabilnosti, brzina deformacija i klasificiranje masiva omogućuju predodžbu te najznačajnije utjecajne veličine.



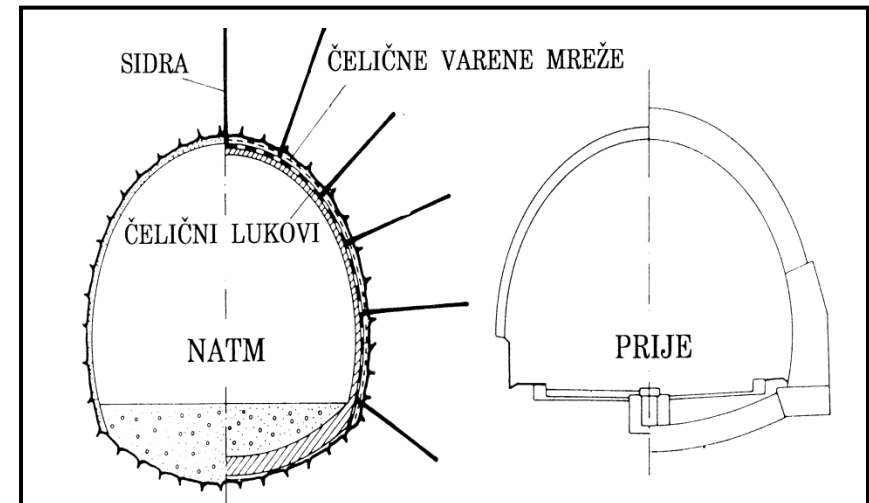
IX. Ukoliko se očekuju veće deformacije ili razrahljenje masiva osiguranje iskopa se najbolje postiže primjenom mlaznog betona.



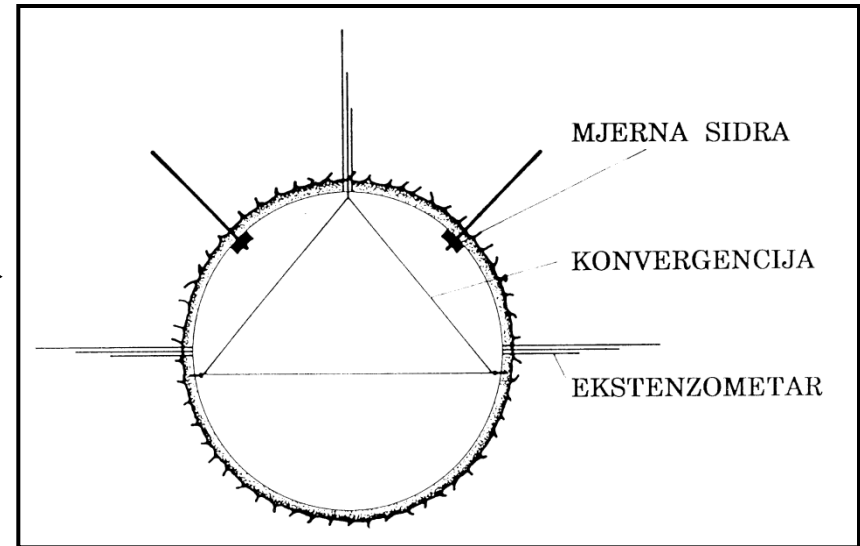
X. Podgrada treba biti tankostijena i radi toga savitljiva, jer se time izbjegava pojava većih momenata savijanja i pojava loma uslijed savijanja.



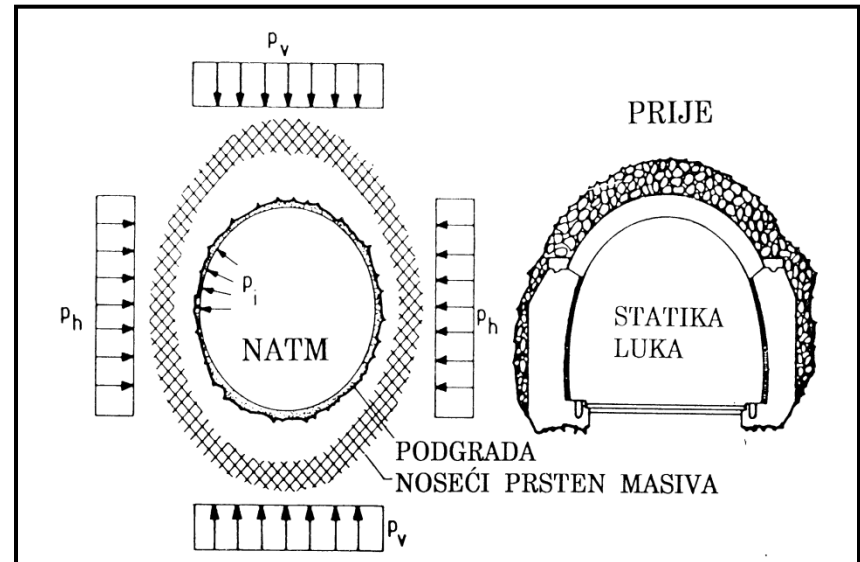
XI. Potrebna pojačanja podgrade ne izvode se u formi podebljanja podgrade nego ugradnjom armaturnih mreža, tunelskih lukova i sidara.



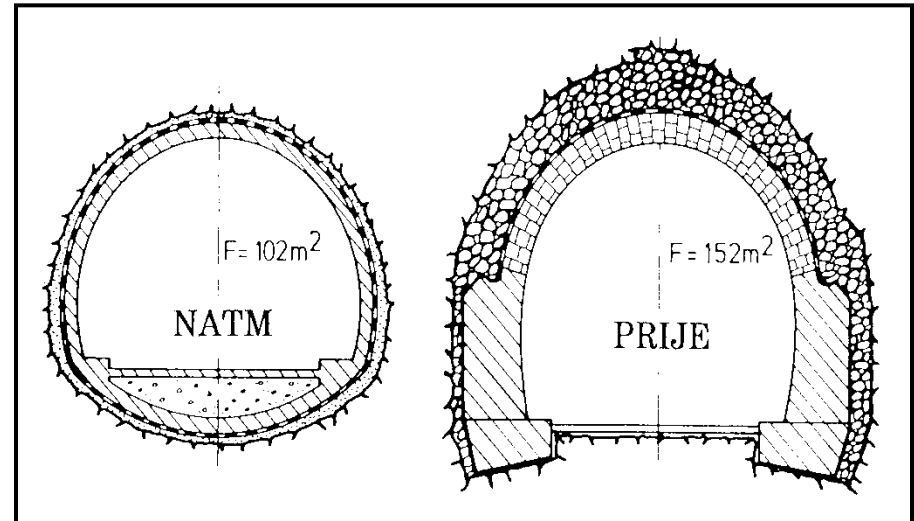
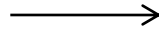
XII. Način i vrijeme ugradnje sekundarne obloge treba se odrediti na temelju mjerenja pomaka konture iskopa tunela.



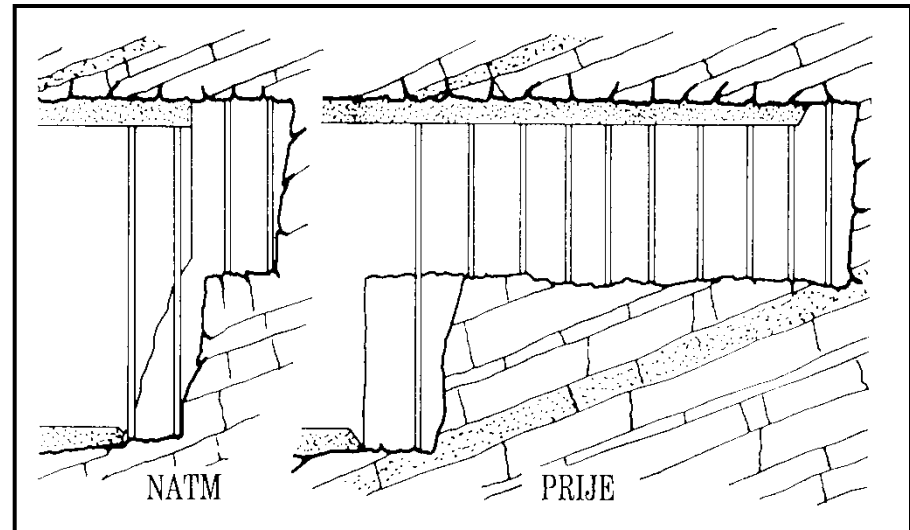
XIII. Statički se tunel razmatra kao (debelostijena) cijev, koja se sastoji od nosećeg prstena masiva i podgrade.



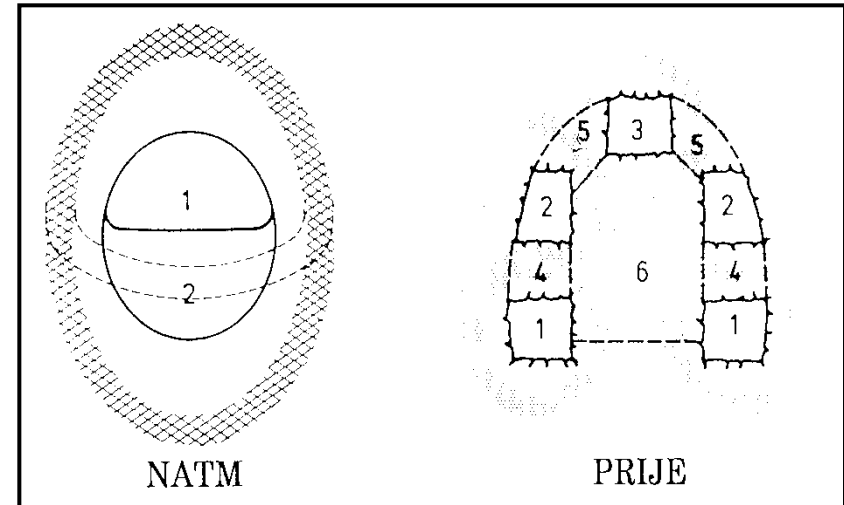
XIV. Kako cijev djeluje statički kao cijev samo ako nije prerezana, zatvaranje prstena ima posebno značenje.



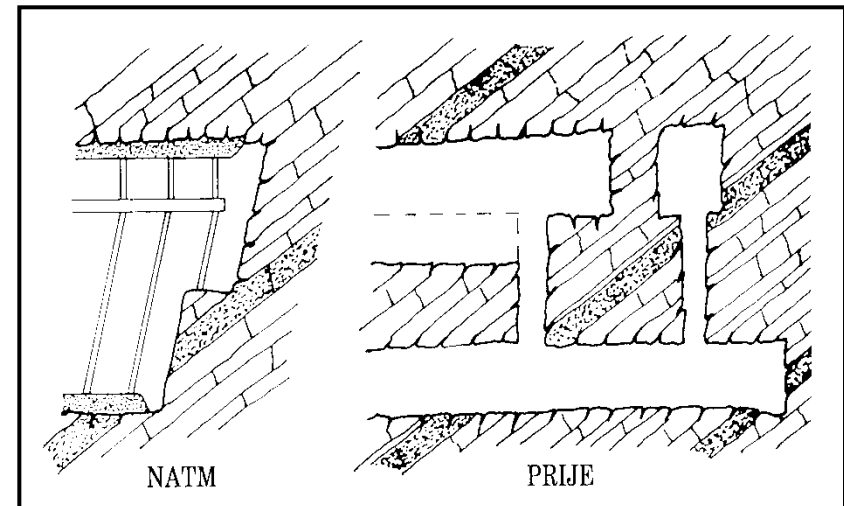
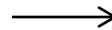
XV. Vrijeme zatvaranja prstena bitno određuje ponašanje masiva. Daleko odmicanje kalote produžuje to vrijeme, izlaže tunelsku poluljuskunepoželjno velikom djelovanju savijanja u smjeru osi tunela, a masiv ispod oslonaca kalote velikim opterećenjima.



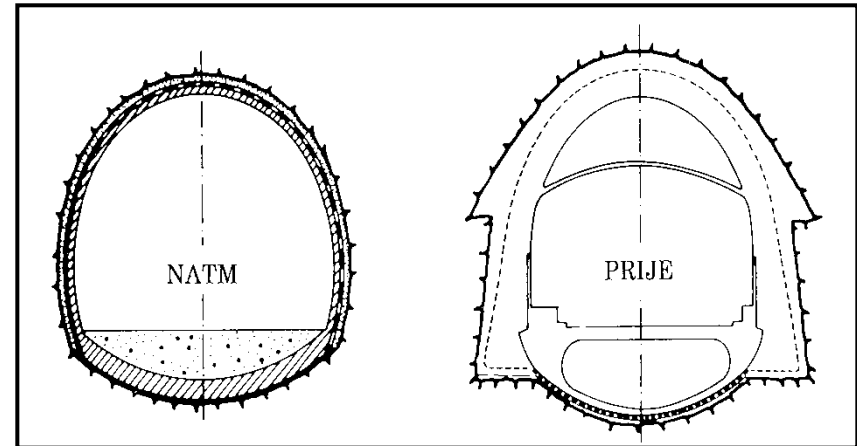
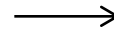
XVI. Iz razloga promjene napreznja oko iskopa posebno korisno biti će napredovanje u punom profilu. Napredovanje razradom iskopa komplicira i umnogostručuje promjene napreznja i oštećuje masiv.



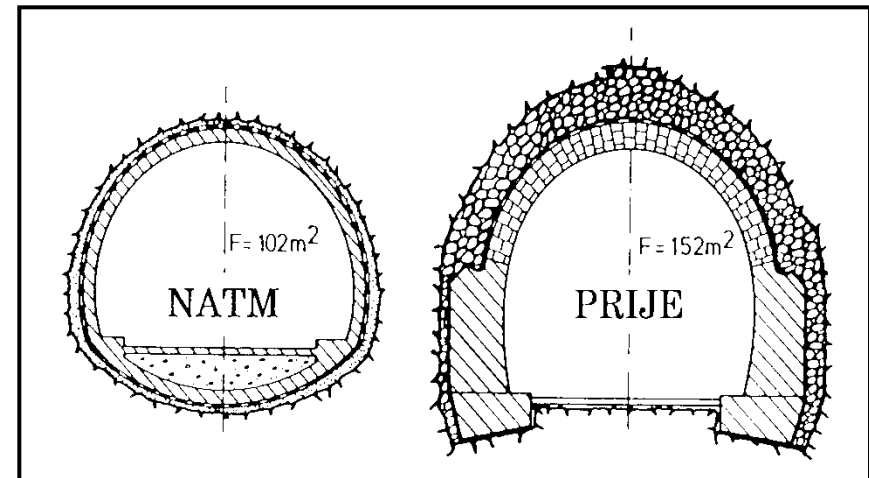
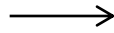
XVII. Način napredovanja može biti presudan za sigurnost građevine. Mijenjanje dužine napredovanja, vremena podgrađivanja, vremena zatvaranja prstena, dužine kalote i stijenskog pritiska sustavno se koristi za upravljanje procesom stabilizacije sustava masiv - podgrada.



XVIII. Za sprečavanje koncentracije naprezanja, što razara masiv, trebaju se izbjegavati kutovi na profilu i težiti zaobljenim formama poprečnih presjeka.

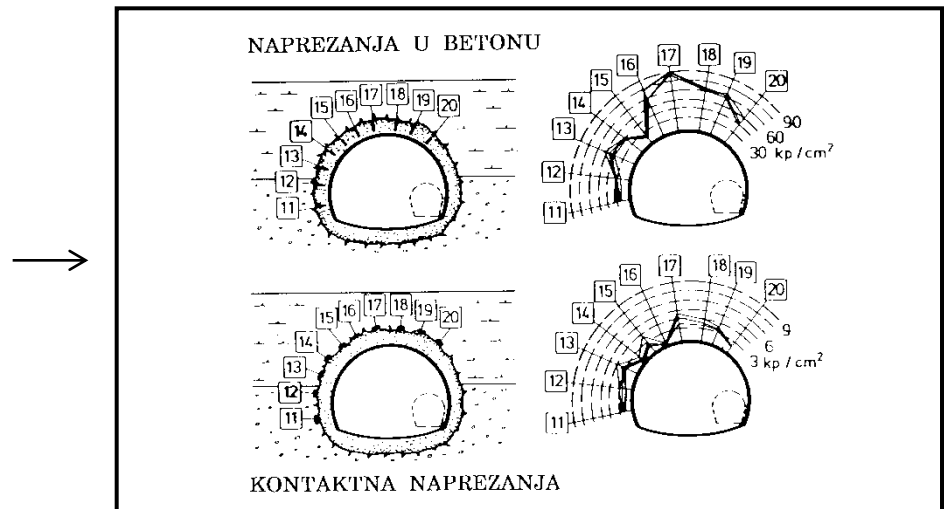
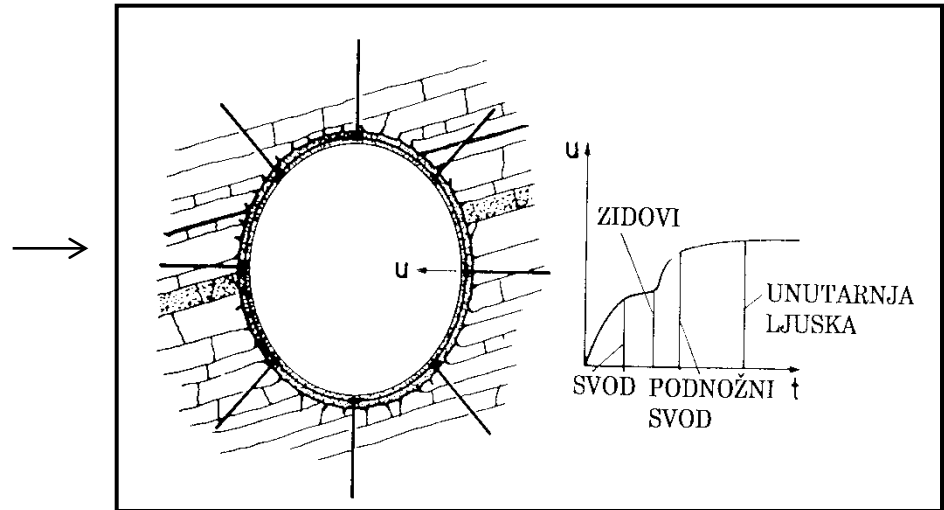


XIX. Sekundarna obloga također treba biti tanka. Nije poželjno da se sile između primarne podgrade i sekundarne obloge prenose trenjem.

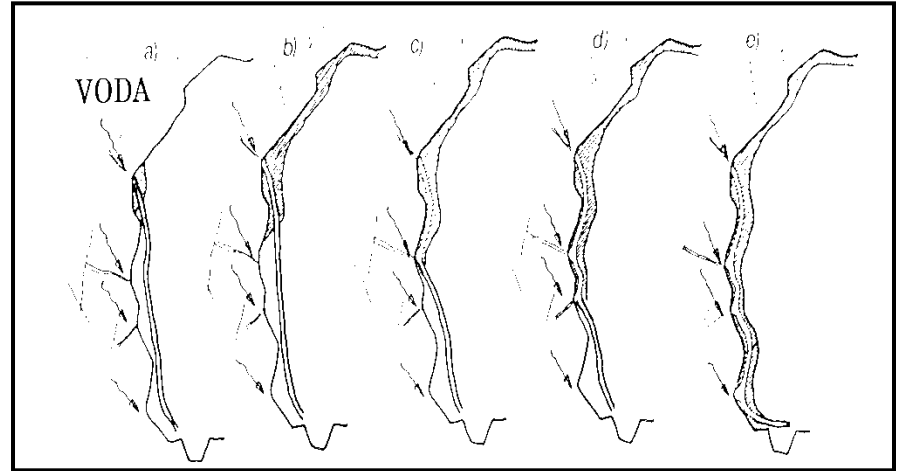
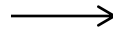


XX. Masiv mora već sa privremenom podgradom biti bitno stabiliziran. Sekundarna obloga služi povećanju sigurnosti. Sidra su razmatrana kao trajni dio sustava samo ako su određenim mjerama zaštićena protiv korozije.

XXI. Dimenzioniranje i kontrola stabilnosti primarne i sekundarne podgrade vršo se opažanjima tijekom građenja i eksploatacije tunela. Opažanja obuhvaćaju mjerenja naprezanja u primarnoj i sekundarnoj podgradi, na njihovom kontaktu, te mjerenje pomaka konture iskopa i pomaka unutar stijenske mase.



XXII. Strujni tlak u masivu kao i statički pritisak vode na podgradu rasterećuje se pomoću drenaža. Stijensku masu treba drenirati omogućavajući vodi dotoku tunel.



**DRENIRANJE
VODE –
TUNEL SV.
ROK**





4. POSTUPAK PROJEKTIRANJA

ZAVOD ZA
GEOTEHNIKU

- Projektiranje tunela zahtijeva prisustvo minimum sljedećih disciplina:
 - a. **Geotehnike**
 - b. **Geologije**
 - c. **Tehnike iskopa i napredovanja**
 - d. **Građevinskog konstrukterstva**
 - e. **Osnova ugovaranja i pravnih odnosa**

- Projektant geotehničkih konstrukcija u podzemnoj gradnji **nema mogućnost izbora osnovnog strukturnog materijala**, jer je osnovni strukturni materijal stijenska masa ili tlo, odnosno prirodni materijal koji se nalazi u zoni trase tunela (za razliku od ostalih grana graditeljstva gdje su strukturni materijali opeka, armirani beton...)



4. POSTUPAK PROJEKTIRANJA

ZAVOD ZA
GEOTEHNIKU

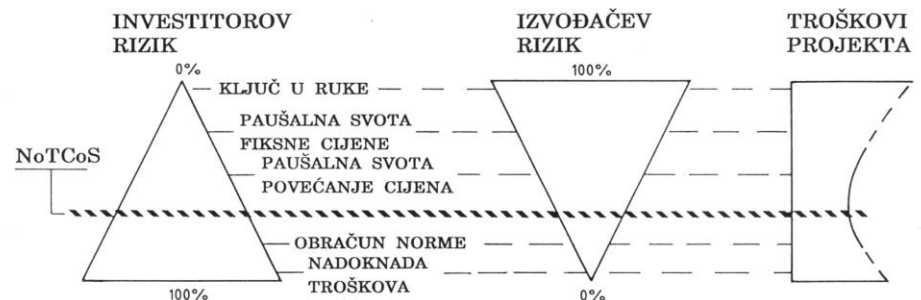
- Projektiranje tunela zahtijeva drugačiji pristup ne samo u odnosu na uobičajene konstrukcije u graditeljstvu, nego i u odnosu na ostale geotehničke konstrukcije, te se projektiranje ne može završiti u projektom uredu na temelju rezultata provedenih geotehničkih istražnih radova.
- **Istražni radovi u cilju definiranja karakteristika i stanja tla i projektiranje trebaju nastaviti tijekom izvođenja.**
- Međutim, tuneli su linijske građevine, malih dimenzija poprečnog presjeka u odnosu na duljinu, te je neracionalno i uglavnom nemoguće provesti takav obim geotehničkih istražnih radova koji bi nam omogućio pouzdano definiranje karakteristika i stanja osnovnog strukturnog materijala, koji mogu značajno varirati duž trase tunela ovisno o složenosti geoloških formacija.

- Tunelogradnja je uvijek povezana s visokim rizikom, u prvom redu **humanim** i **financijskim**.
- Najveći zadatak tunelograditelja je upravo u određivanju rizika povezanim s **uvjetima u stijeni**.

Posebno se to odnosi na dugačke tunele i tunele s visokim nadslojem, jer povećanjem ova dva elementa troškovi istražnih radova enormno rastu!

- Uobičajena je praksa da rizike na sebe preuzimaju investitori i izvođači u različitim omjerima. Dobar primjer za to je **Norveški sustav ugovaranja tunela, tzv. NoTCoS**.

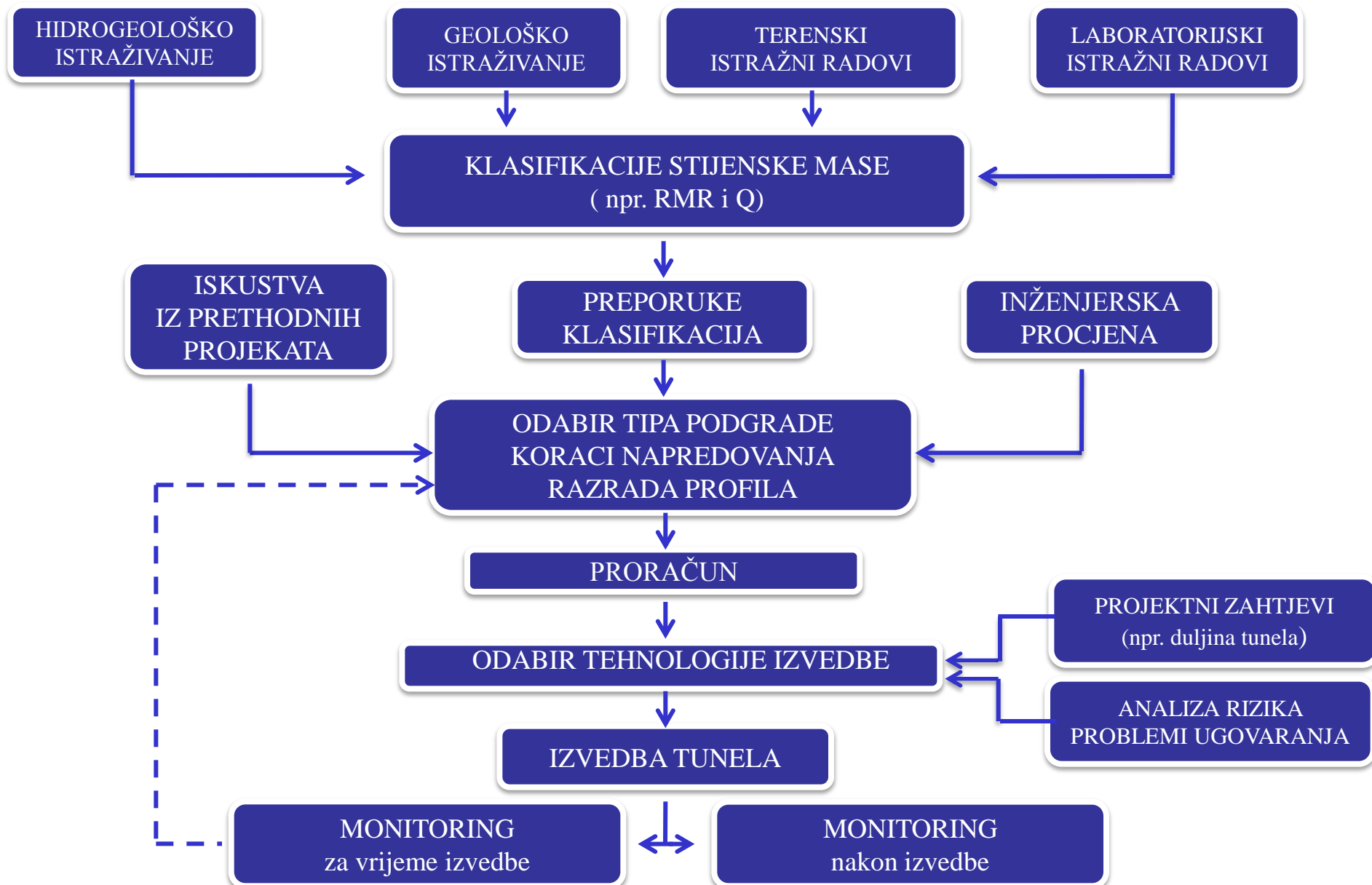
↓
sustav je temeljen na podjeli rizika, te dobroj suradnji investitora, izvođača i konzultanta što rezultira smanjenjem troškova projekta.





4. POSTUPAK PROJEKTIRANJA

ZAVOD ZA
GEOTEHNIKU





4. POSTUPAK PROJEKTIRANJA

ZAVOD ZA
GEOTEHNIKU

- Detaljnije o laboratorijskim istražnim radovima u:

'3. predavanje – Laboratorijski istražni radovi'

- Detaljnije o terenskim istražnim radovima u:

'4. predavanje – Terenski istražni radovi'

- Detaljnije o klasifikacijama stijenskih masa u:

'5. predavanje – Klasifikacije stijenskih masa'

PREPORUKE

RMR

KLASIFIKACIJE:

○ *Za iskop:*

- Puni profil ili razrada profila

- Koraci napredovanja

- Vrijeme podgrađivanja

○ *Za podgradu:*

- Sidra

- Mlazni beton

- Čelični lukovi

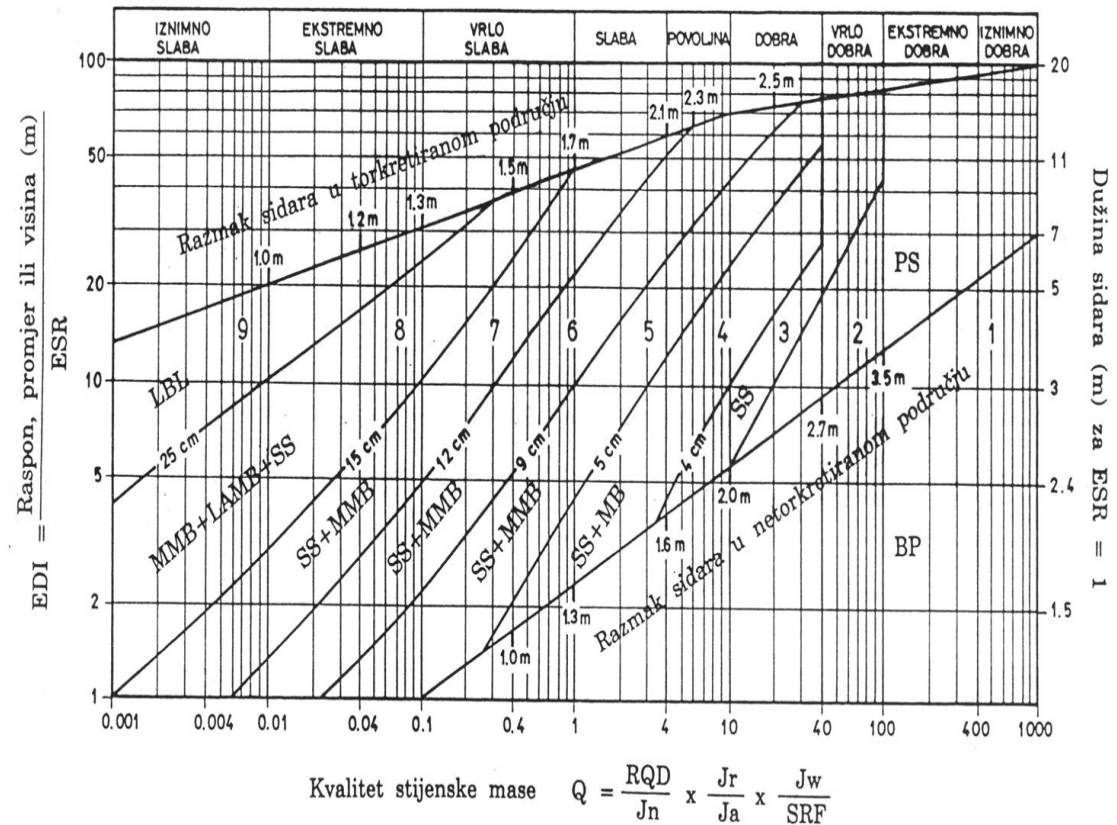
Kategorija stijenske mase	Iskop	Sidra (promjer 20 mm, adheziona)	Mlazni beton	Čelični lukovi
I-Vrlo dobra stijenska masa RMR: 81-100	Puni profil, napredovanje 3 m	Općenito nije potrebna podgrada osim mjestimičnog sidrenja		
II-Dobra stijenska masa RMR: 61-80	Puni profil, napredovanje 1-1,5 m. Kompletna podgrada 20 m od čela iskopa	Mjestimično sidrenje svoda. Sidra duljine 3 m na razmaku 2,5 m. Mjestimično čelična mreža.	50 mm u krovu po potrebi	Nepotrebno
III-Povoljna stijenska masa RMR: 41-60	Iskop u dvije faze. Napredovanje u svodu 1-3 m. Započeti podgrađivanje nakon svakog miniranja. Kompletna podgrada 10 m od čela iskopa	Sistematsko sidrenje u svodu i zidovima. Sidra duljine 4 m na razmaku 1,5-2 m. Čelična mreža u svodu.	50-100 mm u krovu i 30 mm na zidovima	Nepotrebno
IV-Slaba stijenska masa RMR: 21-40	Iskop u dvije faze. Napredovanje u svodu 1-1,5 m. Započeti podgrađivanje nakon svakog miniranja. Kompletna podgrada 10 m od čela iskopa	Sistematsko sidrenje u svodu i zidovima. Sidra duljine 4-5 m na razmaku 1-1,5 m. Čelična mreža u svodu i zidovima	100-150 mm u krovu i 100 mm na zidovima	Lagani do srednji lukovi na razmaku 1,5 m po potrebi
IV-Vrlo slaba stijenska masa RMR: <20	Razrada profila, napredovanje u svodu 0,5-1,5 m. Podgrađivanje uporedo s iskopom. Nanošenje mlaznog betona odmah nakon iskopa	Sistematsko sidrenje u svodu i zidovima. Sidra duljine 5-6 m na razmaku 1-1,5 m u krovu i zidovima. Čelična mreža u svodu i zidovima. Sidrenje podnožnog svoda.	150-200 mm u krovu, 150 mm na zidovima i 50 mm na čelu	Srednje teški do teški lukovi na razmaku 0,75 m s čeličnim platicama i predbijanjem po potrebi. Zatvaranje podnožnog svoda.

PREPORUKE

Q

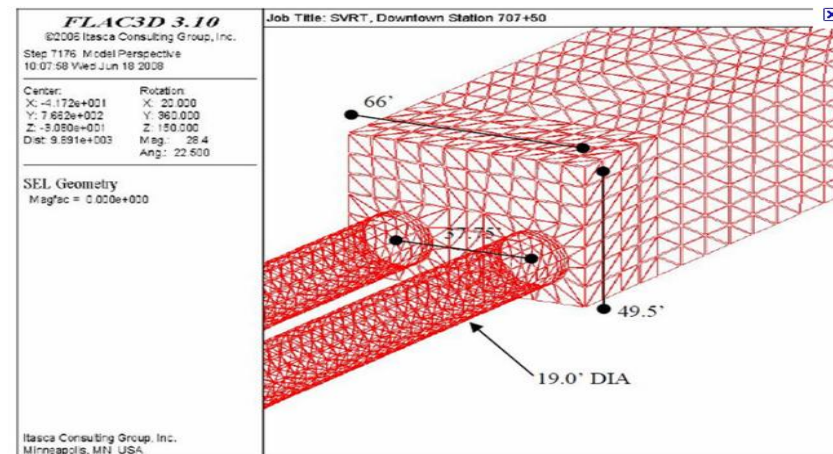
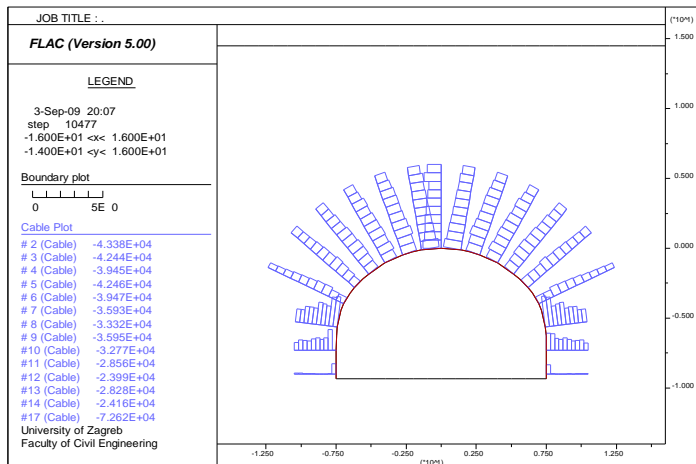
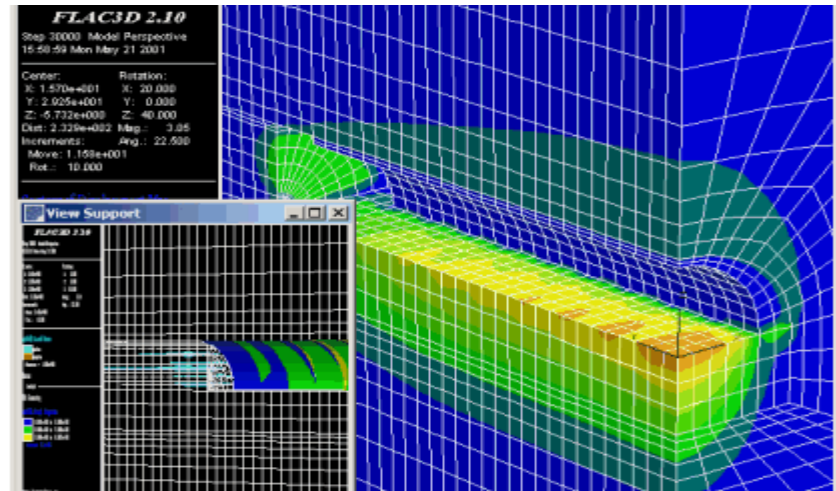
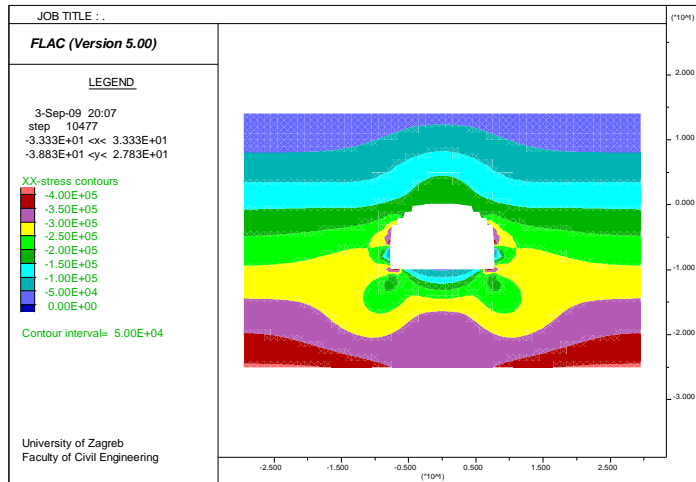
KLASIFIKACIJE:

- Ljevani betonski lukovi (**LBL**)
- Mikroarmirani mlazni beton, lukovi od armiranog mlaznog betona, sistematsko sidrenje (**MMB+LAMB+SS**)
- Sistematsko sidrenje i mikroarmirani mlazni beton (**SS+MMB**)
- Sistematsko sidrenje i mlazni beton (**SS+MB**)
- Mikroarmirani mlazni beton (**MMB**)
- Mlazni beton (**MB**)
- Sistematsko sidrenje (**SS**)
- Pojedinačno sidrenje (**PS**)
- Bez podgrade (**BP**)

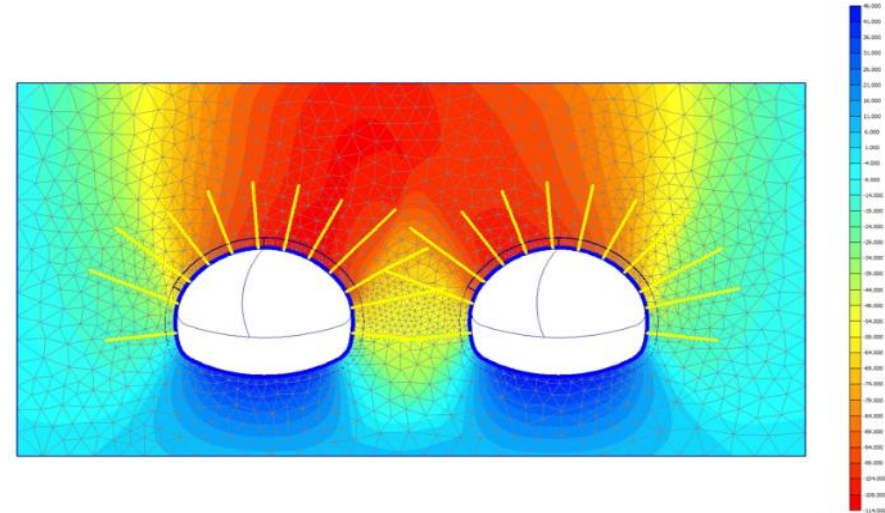
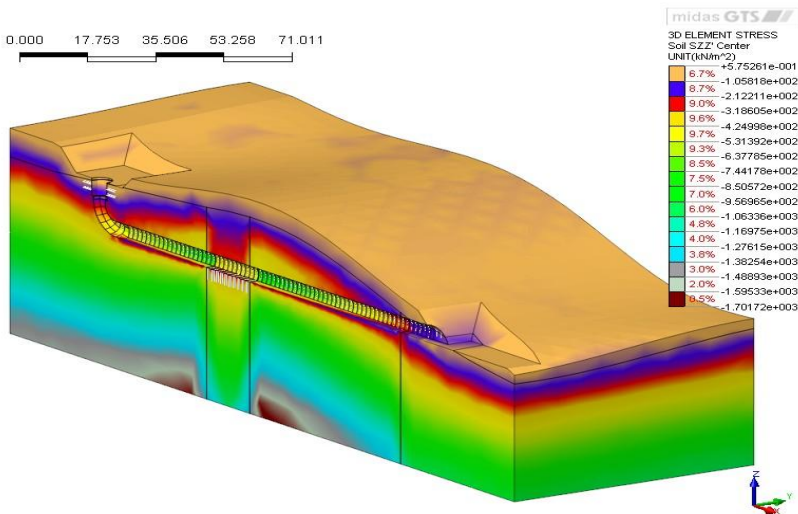


➤ Proračuni tunela se vrše računalnim programima koji se koriste jednom od navedenih metoda:

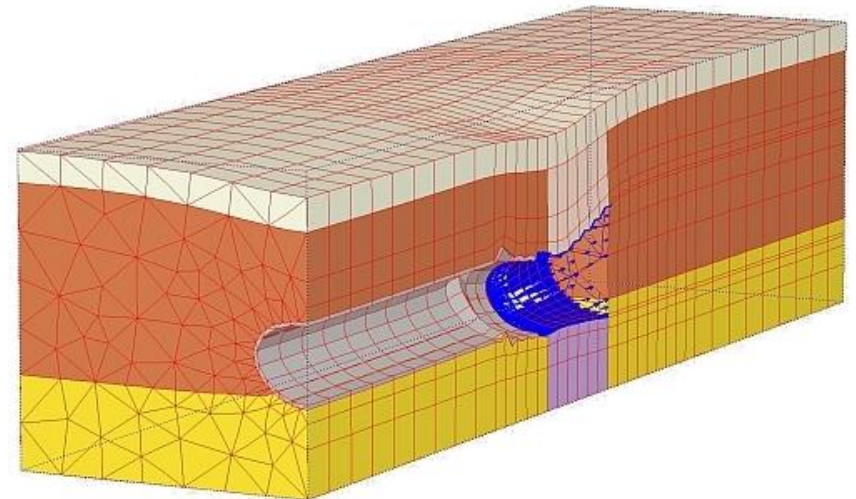
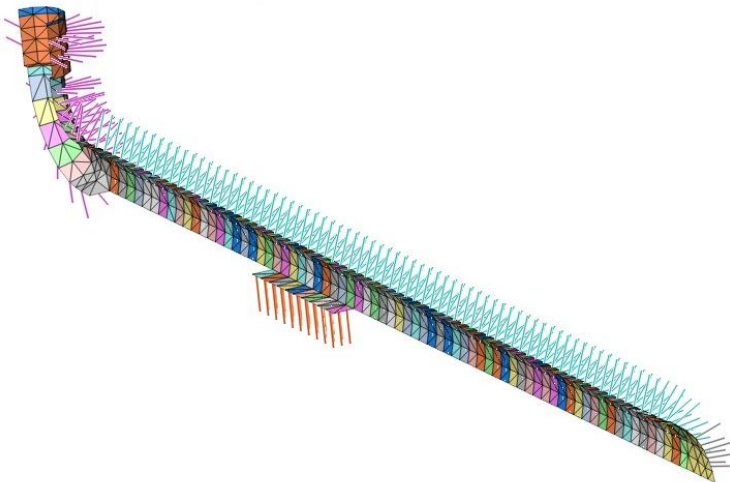
a) metodom konačnih razlika (npr. program *FLAC Itasca*)



b) metodom konačnih elemenata (npr. program *MIDAS GTS* ili *PLAXIS*)



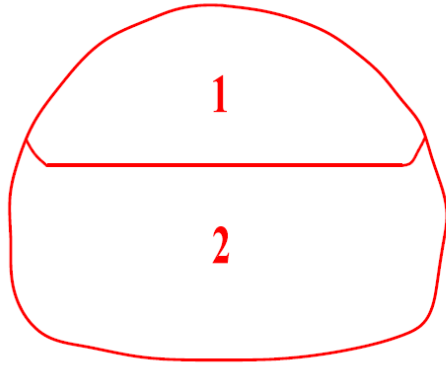
[UNIT] kN , m
[DATA] CSNL: proracun , Soil SZZ' Center , CS95-Step 001(1)



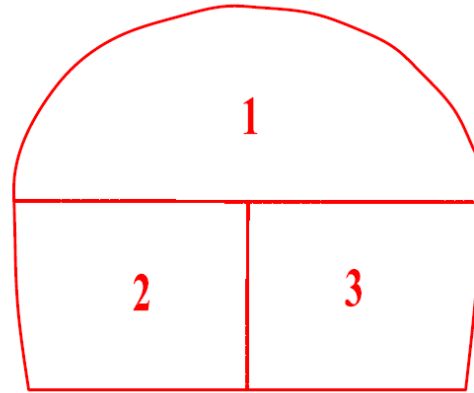


6. RAZRADA PROFILA

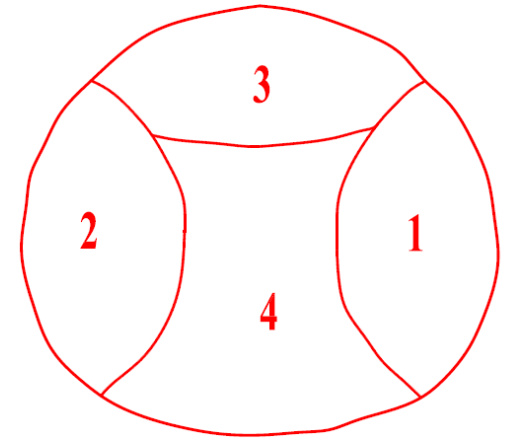
- Ako je stijenska masa loše kvalitete, pristupa se iskopu u više faza.
- Kod višefaznog iskopa zadani profil tunela se kopa u više faza na način da se čelo iskopa podijeli na više dijelova.
- Kod toga je bitno osigurati da su sva iskopana čela stabilna prije iskopa sljedećeg.



(a)



(b)

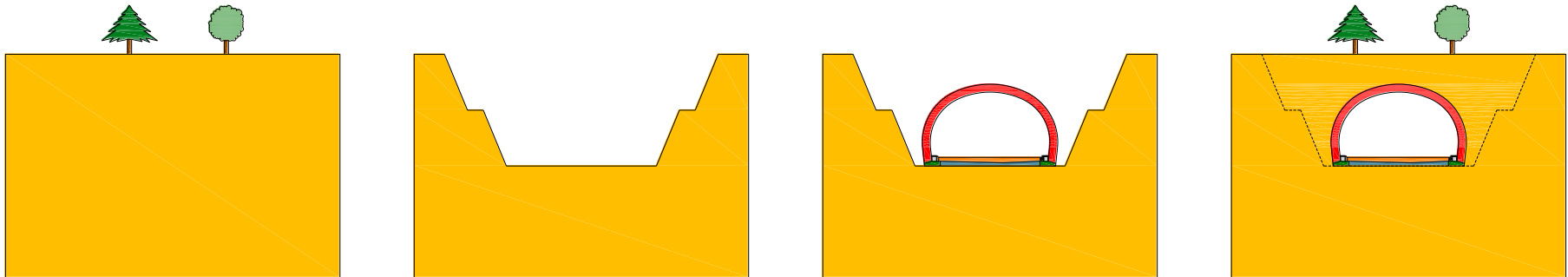


(c)

Primjeri višefaznog iskopa; u 2 faze (a), u 3 faze (b), u 4 faze (c)

- I. **Metoda iskopa i zatrpanja tzv. 'cut and cover'** je metoda tunelogradnje koja se sastoji od iskopa građevne jame s površine terena, izvedbe tunelske konstrukcije u jami te zatrpanja izvedene konstrukcije tlom iz iskopa. Primjenjuje se u zonama malog nadsloja.

"CUT AND COVER" METODA TUNELOGRADNJE

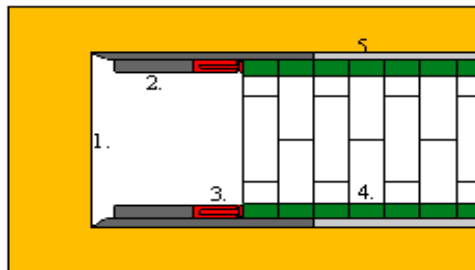


IZVEDBA
LONDONSKOG
METROA 'CUT AND
COVER' METODOM,
1861. godina

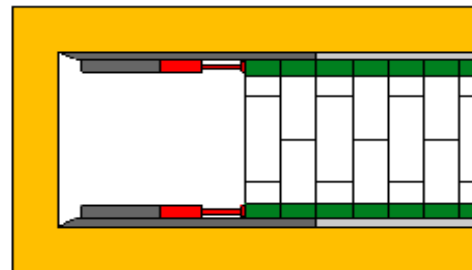


II. Metoda tunelogradnje u mekim tlima (soft ground tunnelling) gdje ne postoji nikakva inicijalna stabilnost podzemnog iskopa te se trenutno podgrađivanje mora osigurati krutim oblogama. Za izvođenje tunela se primjenjuju metode štita pod čijom zaštitom se obavlja iskop i izrada obloge od prefabriciranih elemenata (beton, lijevano željezo). Okolni medij ne sudjeluje aktivno u stabilizaciji podzemnog iskopa.

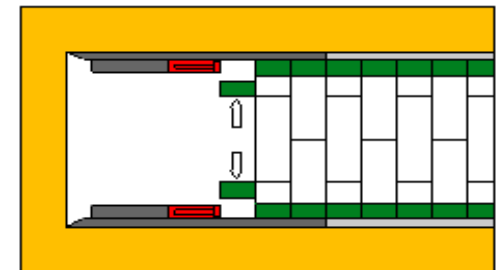
"SOFT GROUND TUNNELLING" METODA TUNELOGRADNJE U MEKIM TLIMA



1. Čelo iskopa
2. Štit
3. Potiskivanje štita putem hidraulike
4. Betonški segmenti
5. Injektiranje



Napredovanje iskopa prati klizanje štita za širinu jednog betonškog segmenta. Štit se potiskuje hidrauličkim prešama koje se nalaze između konstrukcije štita i betonske obloge.

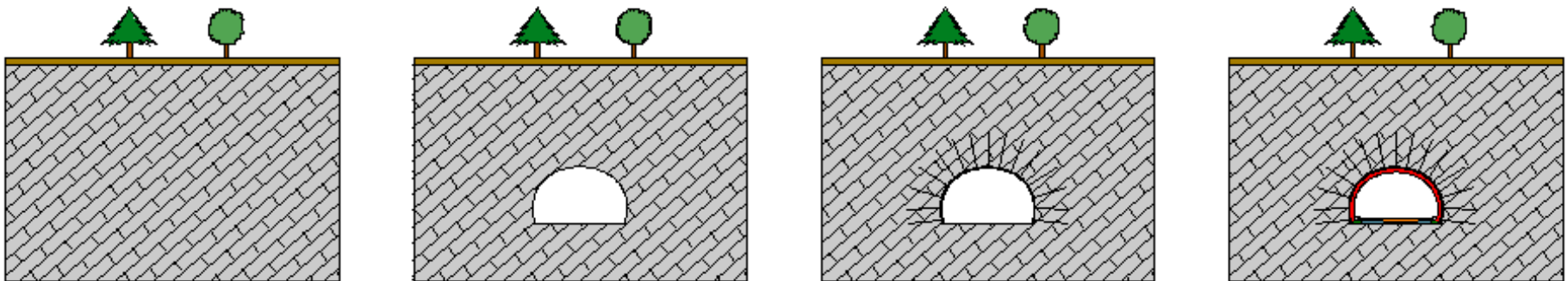


Nakon što preše oslobode prostor ugrađuje se betonski segmenti obloge.

III. Metoda tunelogradnje u mediju dovoljne čvrstoće da aktivno sudjeluje u stabilizaciji podzemnog iskopa.

Medij u kojem je moguća primjena metode kreće se od više kohezivnih tala (glina) do najkvalitetnijih stijenskih masa. Bitni strukturni element kod ove metode tunelogradnje je okolni medij. Za izvođenje se danas najviše primjenjuje Nova austrijska metoda tunelogradnje (NATM) i Norveška metoda tunelogradnje (NMT).

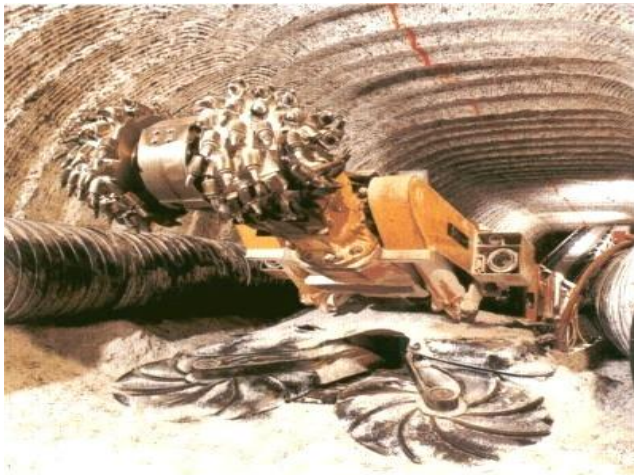
METODA TUNELOGRADNJE U MEDIJU DOVOLJNE ČVRSTOĆE DA AKTIVNO
SUDJELUJE U STABILIZACIJI PODZEMNOG ISKOPA



- U odnosu na kvalitetu stijenske mase i stanje naprezanja u njoj, potrebno je među više različitih tehnika iskopa odabrati najpraktičniju.
- Osnovna podjela se vrši na:

A. miniranje (za tvrde stijenske mase, grublji iskop)

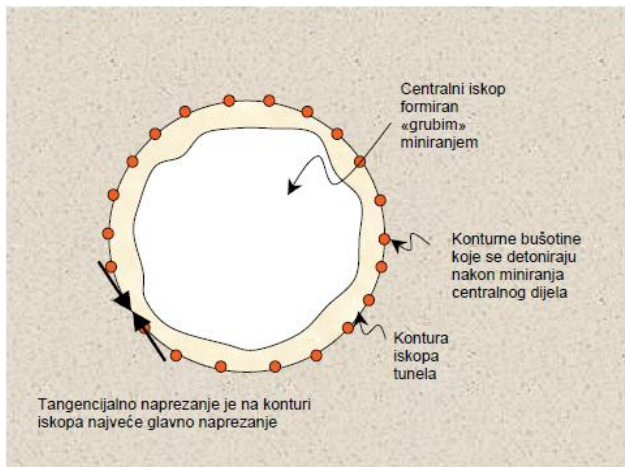
B. strojni iskop (za širok raspon tla i stijena, precizniji iskop)



A. MINIRANJE

- Pri miniranju, eksploziv se postavlja u predviđene bušotine, povezuje i detonira. Eksplozije moraju biti kontrolirane jer treba posvetiti pažnju na očuvanje kvalitete okolne stijenske mase.
- koriste se dvije tehnike miniranja:
 - a. **presplitting (pre-split) metoda**
 - b. **metoda glatkog miniranja (smooth-wall blasting)**
(češće se koristi u podzemnoj gradnji od prve tehnike)

METODE
'KONTURNOG MINIRANJA'
(CONTOUR BLASTING)



TEHNIKA IZVEDBE
'KONTURNIM'
MINIRANJEM



POSTAVLJANJE
EKSPLOZIVA U
BUŠOTINE



B. STROJNI ISKOP

➤ BAGERI

Bagerima se tradicionalno vrši iskop mekših stijena i tvrdih tala.



➤ ISKOP REZANJEM STIJENE

Iskop vršen ovim strojevima je precizan i s vrlo malo poremećenja stijenske mase, a može se primjenjivati i kod srednje tvrdih stijena.



➤ STROJEVI S POKRETNOM GLAVOM:

- Kod ovih strojeva, alat za rezanje se nalazi na pokretnoj glavi koja se može proizvoljno kretati po tunelu, te je s njim lakše postići željeni oblik poprečnog presjeka.
- Strojevi su relativno maleni i jeftini, te fleksibilni.

a. GLODAČI

b. STROJEVI S DISKOVIMA



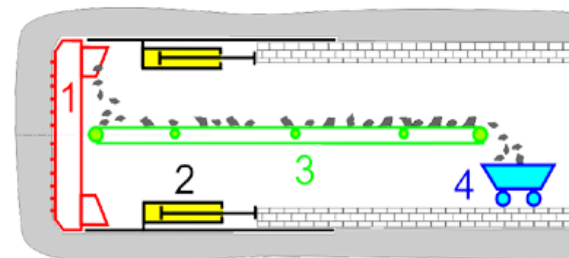
a.



b.

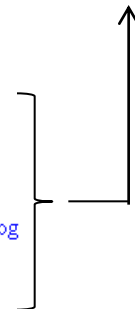
➤ STROJEVI ZA ISKOP U PUNOM PROFILU, tzv. 'KRTICE' (*TBM – TUNNEL BORING MACHINES*)

- Strojevi za iskop u punom profilu su među najsuvremenijim strojevima za podzemni iskop. Na njihovom čelu nalazi se rotirajuća rezna glava koja vrši iskop. Reakcija potisnoj sili ostvaruje se preko razupirača koji se opiru o bokove tunela.



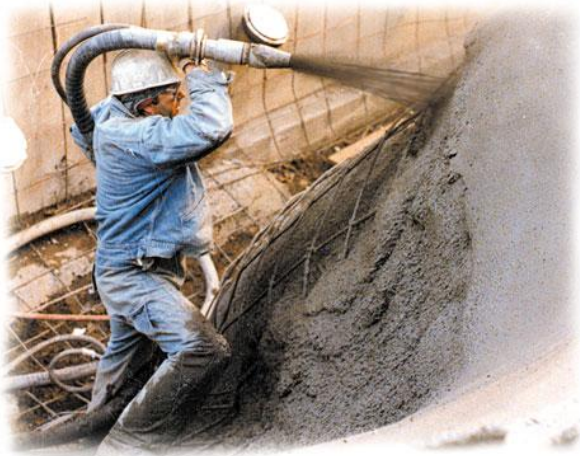
1. Rezna glava
2. Štit
3. Pokretna traka
4. Odvoz iskopanog materijala

**PRINCIP
RADA
'KRTICE'**



➤ Dvije su osnovne tehnike ugradnje mlaznog betona:

- a. **Suhi postupak** – suha mješavina cementa i agregata dovodi se na mlaznicu zračnim transportom gdje joj se dodaju voda i aditivi.
- b. **Mokri postupak** – mješavina agregata, cementa i vode napravi se u mješalici za beton i gumenim se cijevima dovodi na mlaznicu zračnim transportom ili pumpama za beton.



← RUČNO I
STROJNO →
NANOŠENJE
MLAZNOG
BETONA



Tunel Sv. Ilija