

## 13. Stabilnost podzemnih prostorija

- Veličina, oblik i namjena podzemnih prostorija
- Oblici nestabilnosti kod podzemnih prostorija
- Postupci i metode projektiranja podzemnih prostorija
- Karakteristične metode otkopavanja mineralnih sirovina



### Veličina, oblik i namjena podzemnih prostorija

- Trajne podzemne prostorije
  - Tuneli
  - Podzemne prostorije rudnika
  - Podzemna skladišta i odlagališta
  - Energetske i hidroenergetske podzemne prostorije
  - Ostale podzemne prostorije
- Privremene podzemne prostorije
  - Podzemne prostorije rudnika
  - Ostale podzemne prostorije
- Prirodne podzemne prostorije

### Oblici nestabilnosti kod podzemnih prostorija

- Nestabilnosti podzemnih prostorija
  - Strukturno kontroliran mehanizam loma
  - Nestabilnost uslijed naprezanja koja su veća od čvrstoće stijenske mase u pojedinim dijelovima prostorije
  - Nestabilnost uslijed rastrožbe stijenske mase ili pojave bubrenja
  - Nestabilnost uslijed pritiska podzemne vode
- Nestabilnost podzemnih stupova
  - Strukturno kontroliran mehanizam loma
  - Nestabilnost uslijed naprezanja koja su veća od čvrstoće stijenske mase u pojedinim dijelovima stupa
  - Elastična nestabilnost

## Postupci i metode projektiranja podzemnih prostorija

- Određivanje stanja naprezanja
  - Primarno stanje
  - Sekundarno stanje
- Prognoza loma za uvjete naprezanja, strukturne značajke, stanje stijenske mase te karakteristike podzemnih prostorija
- Projektiranje (dimenzioniranje) podzemnih prostorija i elemenata podgradnog sustava
  - Proračunske metode
  - Empirijske metode
  - Osmatračke metode
  - Integrirana metoda

### Određivanje primarnog i sekundarnog stanja naprezanja

- Analitičke metode proračuna
  - Jednostavni geološki uvjeti
  - Podzemne prostorije jednostavnih oblika
  - Podzemni stupovi
- Numeričke metode proračuna
  - Složeni geološki uvjeti
  - Podzemne prostorije složenih oblika
  - Metode mehanike kontinuuma (MRE, MKE, MKD)
  - Metode mehanike diskontinuuma (MDE)
- "In situ" metode mjerenja

### Proračunske (analitičke) metode projektiranja podzemnih prostorija

- Primarno stanje naprezanja za horizontalno uslojene naslage
$$\sigma_v = \sum_{i=1}^n \rho_i \cdot g \cdot z_i$$
$$\sigma_h = k \cdot \sigma_v = \frac{\nu}{(1-\nu)} \cdot \sigma_v$$
- Sekundarno stanje naprezanja za podzemne prostorije jednostavnih oblika u beskonačnom prostoru
  - Kružni, eliptični i ovalni oblik podzemnih prostorija
  - Uvjeti homogenog, izotropnog i linearne elastičnog materijala
  - Ravninsko stanje deformacija

## Proračunske (analitičke) metode projektiranja podzemnih prostorija

- Rješenja za radijalno, tangencijalno i posmično naprezanje u polarnom koordinatnom sustavu za podzemne prostorije okruglog presjeka (Kirsch)

$$\sigma_r = \frac{1}{2}(\sigma_v + \sigma_h) \cdot \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) - \frac{1}{2}(\sigma_v - \sigma_h) \cdot \left(1 - \frac{4a^2}{r^2} + \frac{3a^4}{r^4}\right) \cdot \cos 2\theta$$

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2}(\sigma_v + \sigma_h) \cdot \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) + \frac{1}{2}(\sigma_v - \sigma_h) \cdot \left(1 + \frac{3a^4}{r^4}\right) \cdot \cos 2\theta$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{1}{2}(\sigma_v - \sigma_h) \cdot \left(1 + \frac{2a^2}{r^2} - \frac{3a^4}{r^4}\right) \cdot \sin 2\theta$$

## Proračunske (analitičke) metode projektiranja podzemnih prostorija

- Proračun glavnih naprezanja i maksimalnih posmičnih naprezanja te kuta djelovanja većeg glavnog normalnog naprezanja

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_\theta + \sigma_r}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{2}\right)^2 + \tau_{r\theta}^2}$$

$$\tau_{1,2} = \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{2}\right)^2 + \tau_{r\theta}^2}$$

$$\tan 2\alpha_0 = \frac{2\tau_{r\theta}}{\sigma_\theta - \sigma_r}$$

## Proračunske (analitičke) metode projektiranja podzemnih prostorija

- Izračun maksimalnog naprezanja kojeg materijal može podnijeti u određenoj točci

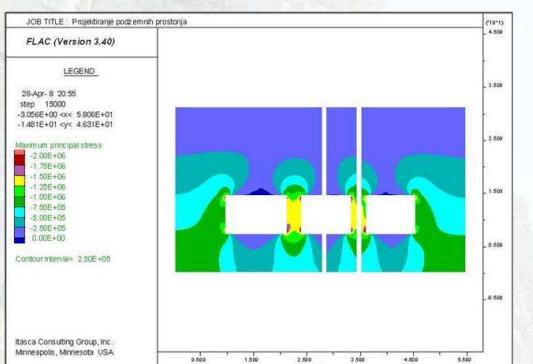
$$\sigma_1' = \sigma_2' + \sigma_{cl} \left( m_b \frac{\sigma_2'}{\sigma_{cl}} + s \right)^a$$

- Izračun omjera čvrstoće materijala i naprezanja u određenoj točci

$$F_{ss} = \frac{\sigma_1'}{\sigma_1}$$

## Proračunske (numeričke) metode projektiranja podzemnih prostorija

- Rješenje za stanje naprezanja



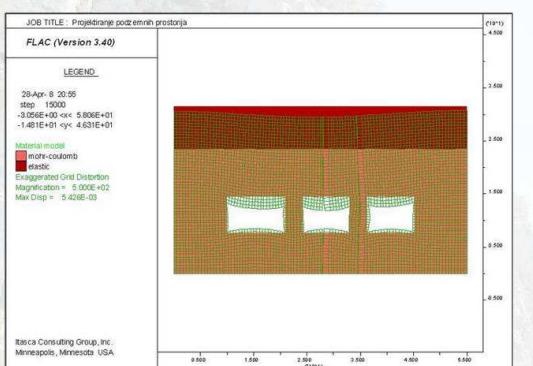
P. Hrženjak

Mehanika stijena

10

## Proračunske (numeričke) metode projektiranja podzemnih prostorija

- Rješenje za pomake i deformacije materijala



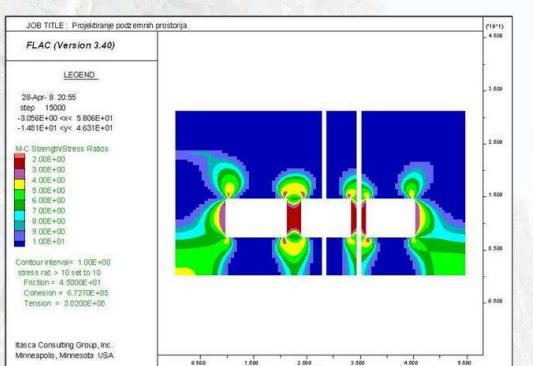
P. Hrženjak

Mehanika stijena

11

## Proračunske (numeričke) metode projektiranja podzemnih prostorija

- Rješenje za omjer čvrstoće i naprezanja



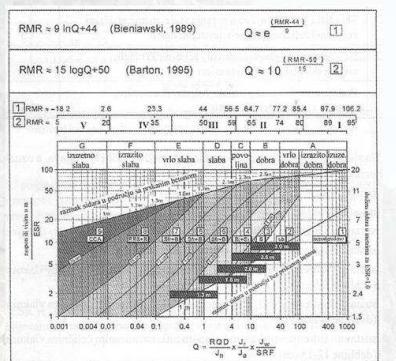
P. Hrženjak

Mehanika stijena

12

## Empirijske metode projektiranja podzemnih prostorija

- Primjena klasifikacijskih sustava RMR, Q, NATM
- Q klasifikacija stijenske mase (Barton, 2002)
  - Kategorija stijenske mase Q ili RMR
  - Ekvivalentna dimenzija iskopa  $D_e$



P. Hrženjak

Mehanika stijena

13

## Empirijske metode projektiranja podzemnih prostorija

- Ekvivalentna dimenzija iskopa  $D_e$

$$D_e = \frac{\text{Raspon, promjer, vis. iskopa}}{\text{ESR}} \quad [m]$$

- Indeks podgrade ESR

Kategorija	Opis kategorije iskopa	ESR
A	Privremene rudarske prostorije	3 - 5
B	Stalne rudarske prostorije, hidrotehnički tuneli, pilot tuneli, mali tuneli i iskopi koji se rade prije velikih iskopa	1,6
C	Skladišta, postrojenja za obradu vode, manje značajni cestovni i željeznički tuneli, pristupni tuneli	1,3
D	Hidroelektrane, glavni cestovni i željeznički tuneli, civilna skloništa, portalni dijelovi	1,0
E	Podzemne nuklearne centrale, željezničke stanice, sportski i javni objekti, tvornice	0,8

P. Hrženjak

Mehanika stijena

14

## Empirijske metode projektiranja podzemnih prostorija

- Oznake i karakteristike podgradnog sustava
  - [1] – bez podgrade
  - [2] – mjestimično sidrenje
  - [3] – sustavno sidrenje
  - [4] – sustavno sidrenje s prskanim betonom debljine 4-5 cm
  - [5] – sustavno sidrenje s prskanim betonom mikroarmiranim čeličnim vlaknima debljine 5-9 cm
  - [6] – sustavno sidrenje s prskanim betonom mikroarmiranim čeličnim vlaknima debljine 9-12 cm
  - [7] – sustavno sidrenje s prskanim betonom mikroarmiranim čeličnim vlaknima debljine 12-15 cm
  - [8] – sustavno sidrenje s čeličnim lukovima u prskanom betonu debljine 15-25 cm
  - [9] – armirano betonska obloga

P. Hrženjak

Mehanika stijena

15

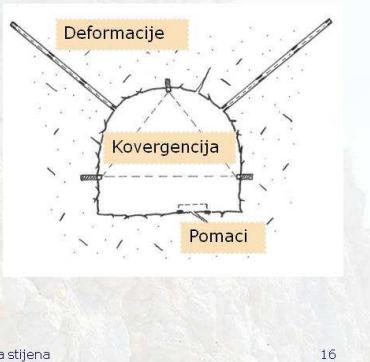
## Osmatračke metode dimenzioniranja podzemnih prostorija

### Metode mjeranja

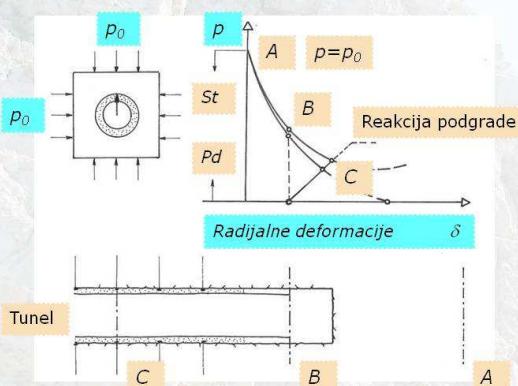
- Konvergencije prostorija
- Deformacije materijala
- Pomaci na karakterističnim pukotinama ili rasjedima

### Kontinuirano praćenje tijekom određenog vremena

### Po potrebi djelovanje ugradnjom dodatnih elemenata podgradnog sustava do ustabiljenja



## Raspodjela opterećenja između stijene i podgradnog sustava



## Karakteristične metode otkopavanja mineralnih sirovina

### Metode otkopavanja s ostavljanjem nosećih stupova

- Komorno stupne metode otkopavanja
- Metode podetažnog otkopavanja s otvorenim otkopima

### Metode otkopavanja s podgrađivanjem (zasipavanjem) otkopanih prostora

- Komorno stupna metoda sa zasipavanjem
- Metoda natkopnog otkopavanja
- Metoda krovnog otkopavanja na zasipu
- Širokočelna metoda otkopavanja sa zasipavanjem

### Metode otkopavanja bez podgrađivanja sa zarušavanjem otkopanih prostora

- Širokočelna metoda otkopavanja sa zarušavanjem
- Metoda podetažnog otkopavanja sa zarušavanjem