

7. Analiza stabilnosti 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
- 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 dimenzioniranja 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 oblik podzemnih prostorija
 - Uvjeti homogenog, izotropnog i linearno elastičnog materijala
 - Ravninsko stanje deformacija

Proračunske (analitičke) metode dimenzioniranja podzemnih prostorija

- Rješenja za radijalno, tangencijalno i posmično naprezanje u polarnom koordinatnom sustavu za podzemne prostorije okruglog presjeka (Kirsch, 1898)

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

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

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

Proračunske (analitičke) metode dimenzioniranja podzemnih prostorija

- Rješenja za radijalne i tangencijalne pomake točaka u polarnom koordinatnom sustavu za podzemne prostorije okruglog presjeka (Kirsch, 1898)

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

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

Proračunske (analitičke) metode dimenzioniranja 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 dimenzioniranja podzemnih prostorija

- Izračun maksimalnog napreznja kojeg materijal može podnijeti u određenoj točki

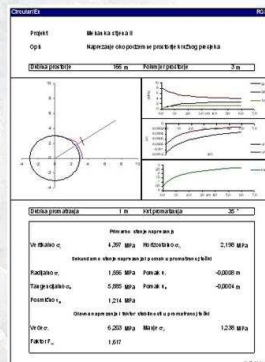
$$\sigma_1' = \sigma_2' + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_2'}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

- Izračun faktora stabilnosti u određenoj točki (omjer čvrstoće materijala i napreznja)

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

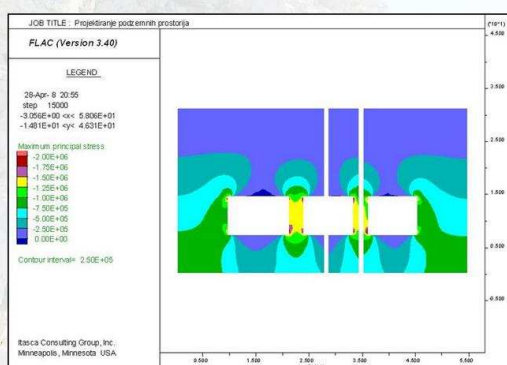
Proračunske (analitičke) metode dimenzioniranja podzemnih prostorija

- Primjer izračuna stanja napreznja, pomaka i faktora stabilnosti promatrane točke u stijenskoj masi oko podzemne prostorije kružnog presjeka pomoću aplikacije Circular/Ex



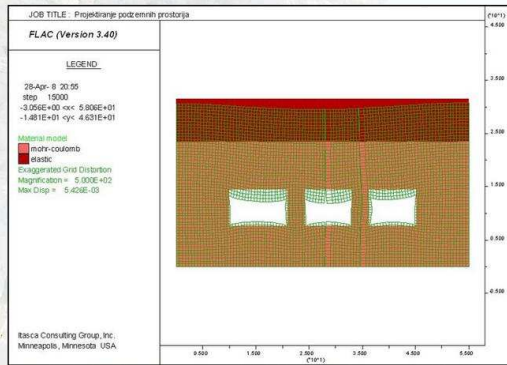
Proračunske (numeričke) metode dimenzioniranja podzemnih prostorija

- Rješenje za stanje napreznja



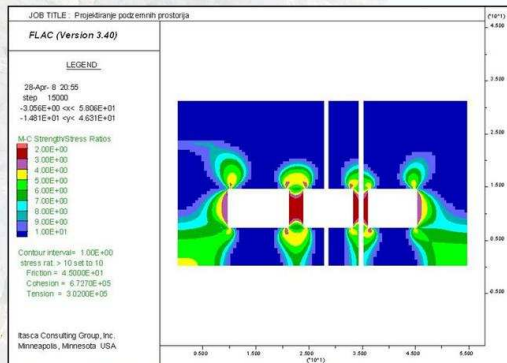
Proračunske (numeričke) metode dimenzioniranja podzemnih prostorija

- Rješenje za pomake i deformacije materijala



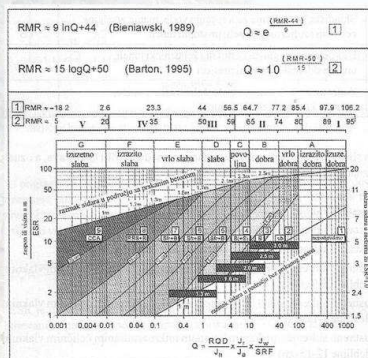
Proračunske (numeričke) metode dimenzioniranja podzemnih prostorija

- Rješenje za faktor stabilnosti (omjer čvrstoće i napreznja)



Empirijske metode dimenzioniranja 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



Empirijske metode dimenzioniranja podzemnih prostorija

- Ekvivalentna dimenzija iskopa D_e

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

- 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	Hydroelektrane, glavni cestovni i željeznički tuneli, civilna skloništa, portalni dijelovi	1,0
E	Podzemne nuklearne centrale, željezničke stanice, sportski i javni objekti, tvornice	0,8

Empirijske metode dimenzioniranja 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

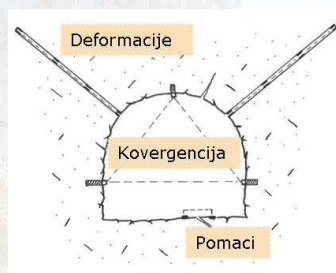
Osmatračke metode dimenzioniranja podzemnih prostorija

- Metode mjerenja

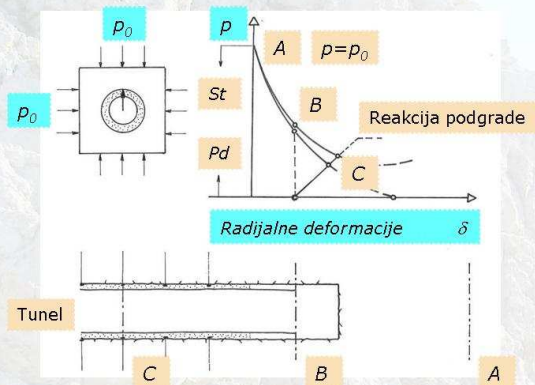
- Konvergencije prostorija
- Deformacije materijala
- Pomaci na karakterističnim pukotinama ili rasjedima

- Kontinuirano praćenje tijekom određenog vremena

- Po potrebi djelovanje ugradnjom dodatnih elemenata podgradnog sustava do ustabiljenja



Raspodjela opterećenja između stijene i podgradnog sustava

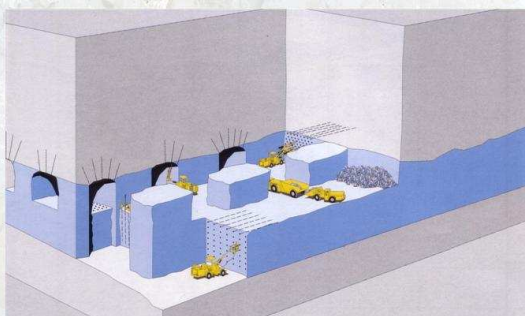


Karakteristične metode otkopavanja mineralnih sirovina

- 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

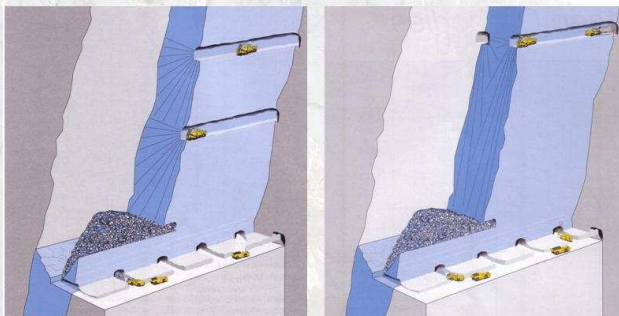
Karakteristične metode otkopavanja mineralnih sirovina

- Komorno stupne metode otkopavanja



Karakteristične metode otkopavanja mineralnih sirovina

- Metode podetažnog otkopavanja s otvorenim otkopima



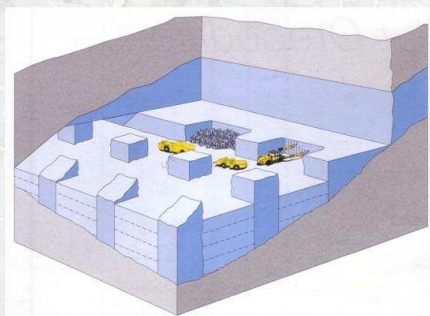
P. Hrženjak

Mehanika stijena II

22

Karakteristične metode otkopavanja mineralnih sirovina

- Komorno stupna metoda otkopavanja sa zasipavanjem otkopanih prostora



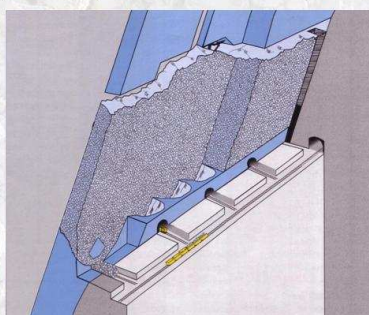
P. Hrženjak

Mehanika stijena II

23

Karakteristične metode otkopavanja mineralnih sirovina

- Metoda natkopnog otkopavanja i metoda krovnog otkopavanja na zasipu



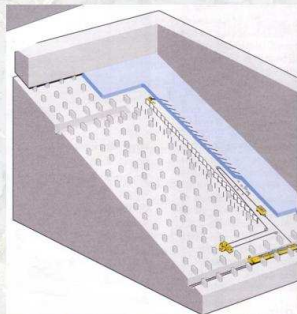
P. Hrženjak

Mehanika stijena II

24

Karakteristične metode otkopavanja mineralnih sirovina

- Širokočelne metode otkopavanja sa zasipavanjem ili zarušavanjem



Karakteristične metode otkopavanja mineralnih sirovina

- Metoda podetažnog otkopavanja sa zarušavanjem

