

krigiranom varijancom, a cijeli postupak krigiranjem. To je u stvari matematički problem minimizacije.

Za primjenu toga postupka cijelo se rudno tijelo podijeli na panele ili blokove. Procjenjuje se sadržaj svakog bloka ( $X_{vi}$ ) i računaju se krigirane varijance. Ako je stvarni sadržaj  $i$ -tog bloka  $Z_{vi}$ , potrebno je da bude

$$E[Z_{vi} - X_{vi}]^2 \rightarrow \min, \quad (8)$$

gdje je  $E$  simbol za matematičko očekivanje (v. Statistika). Osim toga, mora biti zadovoljen uvjet koji glasi

$$E(Z_{vi}) = E(X_{vi}) = m, \quad (9)$$

gdje je  $m$  prosječni sadržaj rude u rudnom tijelu. U skladu s relacijom (9) zbroj koeficijenata  $a_i$  u izrazu (6) mora zadovoljiti uvjet

$$\sum a_i = 1. \quad (10)$$

Da bi se odredila krigirana varijanica, potrebno je odrediti minimalnu vrijednost funkcije (7) uz ograničenje (10). U toj su funkciji težinski koeficijenti  $a_i$  nepoznanice. Tako određeni koeficijenti daju najbolju linearnu procjenu sadržaja panela, koju je moguće dobiti iz rezultata istraženih radova. To je veoma važno, jer su istražni radovi vrlo skupi, pa su svako smanjenje rizika u interpretaciji ili ušteda u istražnim radovima vrlo korisni.

Proračun za određivanje krigirane varijance provodi se na elektroničkom računalo.

Nugget-varijanica  $C_0$  (2) u osnovnom variogramu veoma je važna u postupku krigiranja. Visoka vrijednost nugget-varijance upozorava na nestrukturni aspekt varijable, pa dovodi u pitanje opravdanost primjene toga postupka, jer se tada geostatistička interpretacija približava konvencionalnoj statističkoj interpretaciji. Kad je vrijednost nugget-varijance mala, ona stvara zaštitnu zonu oko najbližih vrijednosti u bloku protežirajući njihov utjecaj. S porastom te varijance razbija se zaštitna zona, pa se utjecaj prenosi i na udaljenije vrijednosti varijable.

U tehnici krigiranja poznat je i *efekt sjenjenja*. Temelji se na utjecaju prostorne kovarijance. On regulira utjecaj inicijalnih vrijednosti koje su grozdasto rasporedene, dakle veoma nepovoljno s obzirom na promatrani blok. Pojedine inicijalne vrijednosti zasjenjuju druge sprečavajući ih da svojim nepovoljnim položajem utječu na promatrani blok. Taj efekt ukazuje na prednost regularne istražne mreže.

Velik se utjecaj u tehnici krigiranja pripisuje dometu. Inicijalne vrijednosti rasporedene oko promatranog bloka izvan dometa utječu na blok samo statistički, dok one u dometu bloka utječu i svojom regionaliziranom komponentom. Međutim, bez obzira na domet varijable, ako je vrijednost nugget-varijance velika, postupak krigiranja, kako je već spomenuto, nema opravdanja. Zbog toga je potrebno vrlo pažljivo odrediti funkciju  $\gamma(h)$  za male vrijednosti  $h$ . Katkada se to postiže ekstrapolacijom vrijednosti dobivenih istražnim radovima, ali često gustim uzorkovanjem sadržaja na jednom ili više dijelova ležišta.

**Primjena u praksi.** Geostatistika se mnogo primjenjuje u planiranju istraženih rudarskih radova, interpretaciji rezultata istraživanja i programiranju eventualnih dopunskih istraženih radova. Pri tome je varijanica proširenja (krigirana varijanica) sintetski pokazatelj stupnja istraženosti. Eksperimentalni variogrami daju informacije o postojećim strukturama i elemente za dodatna istraživanja tih struktura.

U principu, svi rudarski problemi koji se odnose na kvalitetu ležišta imaju geostatistička svojstva.

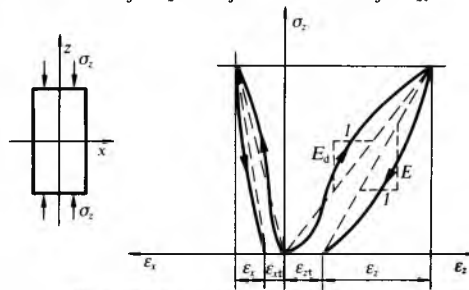
LIT.: G. Matheron, *Traité de géostatistique appliquée*. Editions techniques, Tome 1, Paris 1962; Tome 2, Paris 1963. – V. Serdar, *Udžbenik statistike*. Školska knjiga, Zagreb 1970. – V. Vranić, *Vjerojatnost i statistika*. Tehnička knjiga, Zagreb 1971. – Ž. Pauše, *Vjerojatnost, informacija, stohastički procesi*. Školska knjiga, Zagreb 1974. – M. Guarascio, M. David, Ch. Huibregts (Ed.), *Advanced Geostatistics in the Mining Industry*. Reidel, Dordrecht 1976. – D. G. Krige, *Lognormal-de Wlisan Geostatistics for Ore Evaluation*, S. A. I. M. M., Johannesburg 1978. – M. Perišić, *Primenjena geostatistika*. Rudarski institut, Beograd 1983.

**RUDARSTVO, MEHANIKA STIJENA.** Mehanička stijena dio je mehanike primijenjen na proučavanje mehaničkih svojstava stijena i u njima izgrađenih inženjerskih objekata. Produkti fizikalnog i kemijskog raspadanja stijena koji tvore tla proučavaju se u mehanici tla (v. *Mehanika tla*, TE 8, str. 235). Mehanikom stijena u rudarstvu proučavaju se tri osnovne grupe objekata: podzemni rudarski objekti i njihov utjecaj na površinu, kosine površinskih kopova i odlagališta jalovine, te bušotine pri istraživanju i eksploataciji mineralnih sirovina.

**KARAKTERISTIKE STIJENA I STIJENSKIH MASA**

Pod pojmom stijenske mase razumijevaju se stijene kao sastavni dijelovi litosfere. Stijena je odvojeni dio stijenske mase, no ta dva pojma nisu strogo ograničena i često se zamjenjuju. Stijenske su mase bile u Zemljinoj kori izložene promjenljivim naprezanjima koja su uzrokovala deformacije, promjene položaja, nove strukturne oblike i lomove. Sve su stijenske mase redovito diskontinuirane, nehomogene, anizotropne, nelinearno elastične, plastične i imaju izražena reološka svojstva. Izraženost tih karakteristika ovisi o mehaničkim svojstvima monolita, diskontinuitetu stijenske mase, količini vode u stijeni, te o unutrašnjim naprezanjima.

Mehanička svojstva monolita određena su omjerom između naprezanja i deformacije koji se izražava Hookeovim zakonom (sl. 1) (v. *Nauka o čvrstoći*, TE 9, str. 286). Ukupna deformacija  $\epsilon_u$  u pravcu osi  $z$  pri rasterećenju ima dva dijela: elastičnu deformaciju  $\epsilon_z$  i trajnu deformaciju  $\epsilon_{z1}$ .



Sl. 1. Hookeov zakon za uzorak stijene

Ukupni je modul ili modul deformacije

$$E_d = \frac{\delta_z}{\epsilon_z + \epsilon_{z1}}, \quad (1)$$

gdje je  $\delta_z$  jednoosna čvrstoća uzorka. Poissonov koeficijent može također biti za elastičnu deformaciju  $\nu$  ili za trajnu deformaciju  $\nu_1$ . Ovisnost između naprezanja i deformacija za anizotropne materijale definirana je sa 21 konstantom elastičnosti, za materijale s jednom ravninom simetrije sa 13, za ortotropne materijale (3 ravnine simetrije) sa 9, za transversalno izotropne materijale sa 5 i za izotropne materijale s dvije konstante elastičnosti. Stijene su redovito anizotropne, ali se s dovoljnom točnošću može pretpostaviti da su sedimentne i metamorfne stijene transversalno izotropne ili ortotropne, pa se mjerenjem može utvrditi dovoljno podataka da bi se izračunao broj konstanta elastičnosti. Stijene imaju približno deset puta manju čvrstoću na vlak nego na tlak (tabl. 1).

Tablica 1  
OSNOVNI MEHANIČKI PODACI ZA NEKE VRSTE STIJENA

Vrsta stijene	Čvrstoća $\sigma$ MPa		Modul elastičnosti $E$ GPa	Poissonov koeficijent $\nu$	Gustoća $\rho$ kg/dm <sup>3</sup>
	vlak	tlak			
Granit	6...35	60...300	10...75	0,1...0,3	2,6...2,7
Dijabaz	15...50	110...320	70...110	0,1...0,3	2,8...3,2
Andezit	7...20	70...200	20...60	0,1...0,3	2,2...2,6
Pješčenjak	2...20	30...200	5...70	0,1...0,4	2,1...2,8
Mramor	5...30	50...280	20...100	0,1...0,4	2,6...2,9
Vapnenac	2...20	20...220	10...80	0,1...0,35	1,9...2,8
Dolomit	3...15	30...150	20...100	0,1...0,35	2,4...2,9
Sol	1...10	20...100	-	0,1...0,3	2,1...2,9
Ugljen	0,4...7	5...70	-	0,1...0,45	-

**Lom stijena.** U mehanici stijena za kriterij loma najčešće se primjenjuju Coulombova i Mohrova teorija (v. *Nauka o čvrstoći*, TE 9, str. 282). Kriterij bi trebao biti izražen veličinama koje se za stijene mogu utvrditi ispitivanjem.

Prema Coulombu materijal se lomi kad maksimalno naprezanje na smicanje  $\tau_{\max}$  postigne vrijednost čvrstoće materijala na smicanje  $S$ :

$$S = \tau_{\max} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3). \quad (2)$$

Pritom bi ravnina loma raspolovljavala kut između najvećeg i najmanjeg glavnog napreznja. To se slaže s eksperimentalnim rezultatima, jer je kut loma najčešće manji od  $45^\circ$  s obzirom na pravac većega glavnog napreznja.

Coulombovu teoriju dopunio je Navier utvrdivši funkcionalnu vezu između čvrstoće na smicanje  $S$  i normalnog napreznja  $\sigma_\theta$  na plohi loma prema izrazu

$$|\tau_\theta| = S - \mu\sigma_\theta, \quad (3)$$

gdje je  $\sigma_\theta$  normalno i  $\tau_\theta$  tangencijalno napreznje na plohi loma, a  $\mu$  je koeficijent unutrašnjeg trenja.

Normalna i tangencijalna napreznja na plohi loma iznose:

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\vartheta, \quad (4)$$

$$\tau_\theta = -\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\vartheta. \quad (5)$$

Iz jednadžbi (3), (4) i (5) nakon određivanja maksimuma s obzirom na kut  $\vartheta$  dobiva se

$$S = \frac{\sigma_1}{2} \left[ \mu + (\mu^2 + 1) \right] + \frac{\sigma_3}{2} \left[ \mu - (\mu^2 + 1) \right], \quad (6)$$

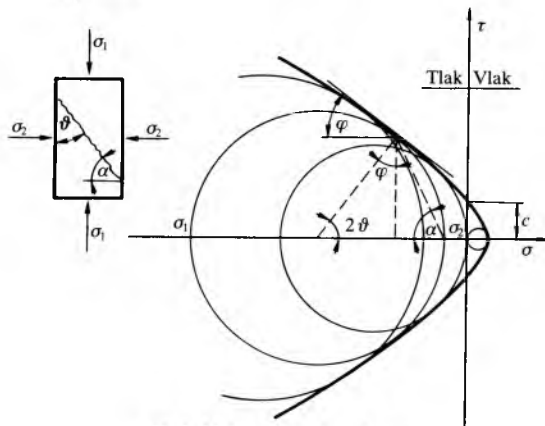
jer je  $\tan 2\vartheta = \frac{1}{\mu}$ .

Pokazuje se da je kut  $\vartheta < \frac{\pi}{4}$ , što se slaže s eksperimentima. S promjenom odnosa glavnih napreznja znatno se mijenja i kut  $\vartheta$ . Uz konstantnu vrijednost  $\mu$  jednadžbom (6) određen je pravac, što vrijedi za eruptivne i čvrste metamorfne stijene.

Prema Mohrovoj teoriji materijal se lomi kad se u  $\tau, \sigma$ -dijagramu postigne granična krivulja koja zavisi od vrste materijala. Oblik krivulje  $\tau = f(\sigma)$  određuje se ispitivanjem (sl. 2). Kut  $\varphi$  naziva se kutom unutrašnjeg trenja, a veličina  $c$  predstavlja koheziju. Kad se Mohrova anvelopa može aproksimirati pravcem, dobiva se

$$\tau = c - \sigma \tan \varphi, \quad (7)$$

pa jednadžbe (3) i (7) postaju identične. Tada je  $\tan \varphi = \cot 2\vartheta = \mu$  i  $c = S$ .



Sl. 2. Mohrova anvelopa loma

**Diskontinuitet stijena.** Stijene i stijenske mase diskontinuirani su i nehomogeni materijal izgrađen od niza minerala, najčešće anizotropnih i različitih gustoća. U mineralima se

nalaze umeci, uklopci, plohe kalavosti, pore i druga slaba mjesta, pa su to lokalni diskontinuiteti. U mikrodiskontinuitete spadaju i šupljine na rubovima mineralnih zrna i u stijenskoj teksturi koje utječu na poroznost stijenske mase. U mehanici stijena u pojam diskontinuiteta spadaju i tektonske pukotine, slojne plohe, rasjedi i drugi strukturni defekti u stijenama. Istraživanjima se utvrđuje njihov prostorni položaj, gustoća razmještaja, ispunjena i smicanje na plohi diskontinuiteta. Podaci o prostornom položaju prikazuju se blok-dijagramima i sfernom projekcijom. Gustoća se izražava kao omjer broja diskontinuiteta i duljine profila, ili kao omjer broja diskontinuiteta i površine, odnosno kao funkcija veličine i broja blokova u volumenu. Ispunu diskontinuiteta čini zdrobljeni materijal istovrsne stijene ili drugog materijala. Smicanje na plohama diskontinuiteta od svih utjecajnih veličina najviše utječe na mehanička svojstva stijena. Zbog hrapavosti su površine smicanja samo djelomično u dodiru. Omjer između napreznja normalnog  $\sigma$  i tangencijalnog  $\tau$  pri smicanju može se izraziti relacijom

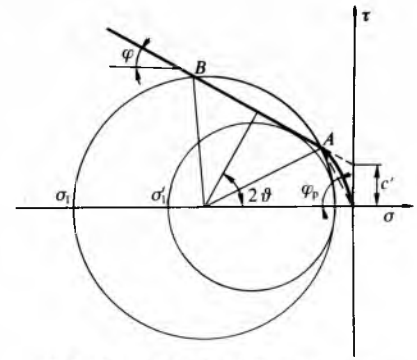
$$\tau = \sigma \tan \varphi_p, \quad (8a)$$

gdje je  $\varphi_p$  kut trenja u početku smicanja. Relacija (8a) vrijedi od točke A (sl. 3), a nakon toga se kut  $\varphi_p$  smanjuje na vrijednost  $\varphi$  pa izraz (8a) prelazi u oblik

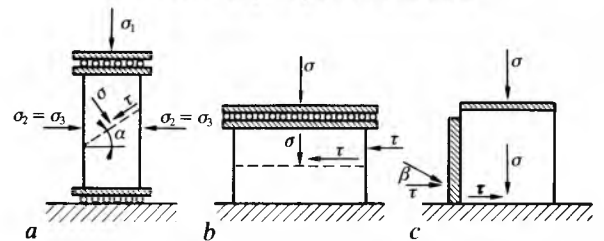
$$\tau = c' - \sigma \tan \varphi. \quad (8b)$$

Vrijednost  $c'$  je prividna kohezija i posljedica je smicanja vrhova hrapave površine.

Ako je kut  $\vartheta$  tolik da kut  $2\vartheta$  (sl. 3) padne između točaka A i B, nastaje smicanje na plohi diskontinuiteta. Pri lomu stijena u prirodi zbivanja su kompleksnija jer ima više porodica diskontinuiteta, a stvaraju se i novi diskontinuiteti.



Sl. 3. Smicanje na plohi diskontinuiteta



Sl. 4. Ispitivanje diskontinuiteta smicanjem. a) troosno ispitivanje, b) direktno smicanje uzorka, c) direktno smicanje in situ

Ispitivanje diskontinuiteta smicanjem provodi se troosnim ispitivanjem, izravnim smicanjem na uzorcima i in situ (sl. 4). Pri troosnom ispitivanju diskontinuiteta smicanjem treba aparat biti konstruiran tako da se i nakon početnih deformacija osigura potpun kontakt na plohi diskontinuiteta.

Izravno smicanje u laboratoriju provodi se na uzorcima s površinom diskontinuiteta od  $0,003 \dots 0,3 \text{ m}^2$ , dok se izravno smicanje in situ obavlja na blokovima s površinom smicanja od  $1 \dots 2 \text{ m}^2$ . Pri ispitivanju in situ nanosi se tangencijalno opterećenje na blok pod kutom  $\beta = 5 \dots 20^\circ$ , da bi se izbjegla vlačna napreznja.

Ispitivanja na modelima pokazuju da normalna i tangencijalna napreznja nisu ravnomjerno raspodijeljena po plohi smicanja.

**Voda u stijenama.** Voda znatno utječe na stabilnost stijenskih masa. Ona u stijenskoj masi protječe kroz monolite i kroz diskontinuitete. Ukupna poroznost  $n$  stijene određena je omjerom volumena pora  $V_p$  i cijelog volumena stijene  $V_u$

$$n = \frac{V_p}{V_u} = \frac{\rho_c - \rho_s}{\rho_c}, \quad (9)$$

gdje je  $\rho_c$  gustoća čvrstog dijela stijene bez pora, a  $\rho_s$  gustoća suhe stijene s porama. Pore pritom mogu biti otvorene, tj. povezane među sobom i s vanjskim površinama, i zatvorene unutar stijene. S gledišta vodopropusnosti važne su samo otvorene pore, pa je to prirodna poroznost stijene.

Volumen otvorenih pora  $V_{op}$  utvrđuje se određivanjem mase sušenog uzorka stijene  $m_s$ , mase uzorka zasićenog vodom  $m_{sat}$  i gustoće vode  $\rho_v$ :

$$V_{op} = \frac{m_{sat} - m_s}{\rho_v}. \quad (10)$$

Porozimetri za utvrđivanje volumena pora rade ili na principu smanjenog tlaka (isisavanjem zraka iz pora), ili povećanog tlaka (utiskivanjem fluida u pore pod tlakom). U ugljenim stijenama, gdje su pore promjera do nekoliko nanometara, teško se dobiva jednoznačan rezultat mjerenja.

Poroznost vapnena i dolomita iznosi 0,2...4%, pješčenjaka do 25%, glinenih škriljavaca do 50%, eruptivnih stijena 0...4%, bazalta do 22%, metamornih stijena 0,5...4%, a neke vrste škriljavaca i do 30%.

Udio vlage u stijeni određuje se relacijom

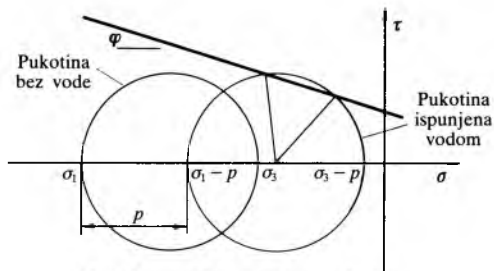
$$u = \frac{m_{vs} - m_s}{m_s}, \quad (11)$$

gdje je  $m_{vs}$  masa uzorka s vodom, a  $m_s$  masa suhog uzorka (nakon sušenja na 105 °C.).

Za utvrđivanje maksimalnog udjela vlage u uzorku potrebno je uzorak zasiti vodom. To se postiže tako da se suhi uzorak stavi u vakuumsku komoru, gdje se isiše zrak iz pora, a zatim se u komoru pusti voda. Zasićivanje uzoraka stijena traje od nekoliko sati do nekoliko dana, već prema vrsti stijene.

Postojanje otvorenih pora u stijeni uzrokuje hidrauličku propusnost stijene. Koeficijent hidrauličke propusnosti u laboratorijskim uvjetima iznosi  $K = 10^{-5} \dots 10^{-12} \text{ ms}^{-1}$ . Za diskontinuirane stijenske mase protjecanje je zbog poroznosti najčešće zanemarivo prema protjecanju zbog diskontinuiteta. Ali u dubljim rudnicima kad su otvorene velike površine, procjeđivanje zbog poroznosti može biti znatno.

Koeficijent hidrauličke propusnosti za zasićenu stijensku masu određuje se bušenjem bunara i piezometrima te pokusnim crpljenjem, a za nezasićene stijene utiskivanjem vode u bušotine. Voda u stijenskim porama teče laminarno, a u diskontinuitetima često teče i turbulentno. Voda unutar diskontinuiteta smanjuje stabilnost objekata u stijeni. Ona mijenja koeficijente trenja, a pri postojećim ispunama redovito smanjuje čvrstoću na smicanje. Tlak vode  $p$  smanjuje naprezanje  $\sigma$  na vrijednost efektivnog naprezanja  $\sigma - p$  (sl. 5).



Sl. 5. Utjecaj tlaka  $p$  vode u pukotini

**Naprezanja u stijenama.** U stijenskim masama u prirodi, zbog težine gornjih naslaga i niza drugih utjecaja, postoji primarno naprezanje, za razliku od sekundarnih naprezanja oko izgrađenih objekata u stijenskoj masi. Naprezanje se zbog sile teže može izraziti u pravcu vertikalne osi

$$\sigma_z = \rho g z, \quad (12)$$

gdje je  $\rho$  gustoća stijene,  $g$  gravitacijsko ubrzanje, a  $z$  dubina.

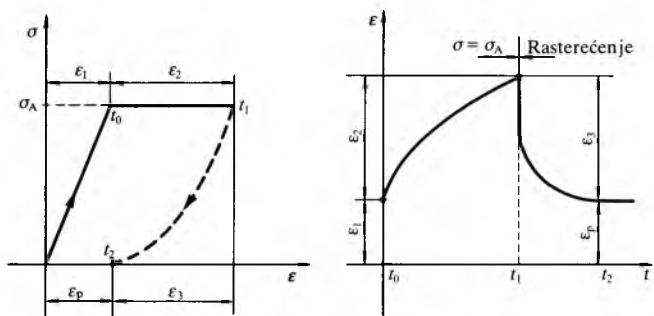
Horizontalna naprezanja  $\sigma_x = \sigma_y$  mogu se odrediti na osnovi pretpostavke da su deformacije  $\epsilon_x = \epsilon_y = 0$ , pa je

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{\nu}{1 - \nu} \sigma_z, \quad (13)$$

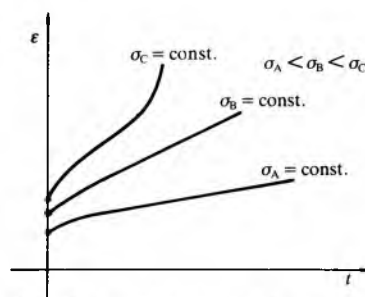
gdje je  $\nu$  Poissonov koeficijent. Taj koeficijent za stijene iznosi  $\nu = 0,10 \dots 0,40$ , što znači da horizontalna naprezanja iznose  $\sigma_x = \sigma_y = (0,1 \dots 0,7) \sigma_z$ . Mjerenja na više mjesta u stijenama nisu pokazala suglasnost s očekivanjem, jer su horizontalna naprezanja bila jednaka ili veća od vertikalnih. To se tumači prije svega pojavom dodatnih naprezanja tektonskim pokretima u Zemljinoj kori, što uzrokuje lomove i potrese. Stijene su tektonskim pokretima djelovanjem vulkana i erozije prošle kroz promjenljiva naprezanja od kojih je ostao jedan dio. Voda u stijenama i promjene temperature također utječu na promjene naprezanja. Sekundarna naprezanja ovise o rasporedu primarnih naprezanja, zatim o obliku i veličini kosina, površinskih kopova, te podzemnih rudarskih objekata. Kad se izrađuju podzemni rudarski objekti više stotina metara duboko, sekundarna naprezanja mogu biti šest i više puta veća od primarnih naprezanja, što u stijenama s visokim modulom elastičnosti uzrokuje gorske udare.

**Reološka svojstva stijena.** U mehanici stijena u posljednje se vrijeme pod reološkim svojstvima stijena razumijeva odnos naprezanja i deformacija u ovisnosti o vremenu i temperaturi, tj. reološka se svojstva odnose na područje plastičnih deformacija, puzanja i loma stijena. Elastične stijene pri povećanoj temperaturi i naprezanju postaju plastične. Tečenje je pomicanje čestica tijela s trajnim mijenjanjem oblika, puzanje je lagano tečenje, a lom je nestanak kohezije u materijalu. Svrha je reoloških istraživanja u mehanici stijena određivanje konstitutivnih jednadžbi koje izražavaju odnos tenzora naprezanja  $\sigma_{ij}$  i tenzora deformacije  $\epsilon_{ij}$  u ovisnosti o vremenu.

Na sl. 6 prikazani su dijagrami  $\sigma, \epsilon$  i  $\epsilon, t$  za uzorak stijene jednoosno opterećene neko vrijeme konstantnim opterećenjem  $\sigma_A$ , a na sl. 7 dijagram za različite vrijednosti konstantnog opterećenja.



Sl. 6. Dijagrami  $\sigma, \epsilon$  i  $\epsilon, t$

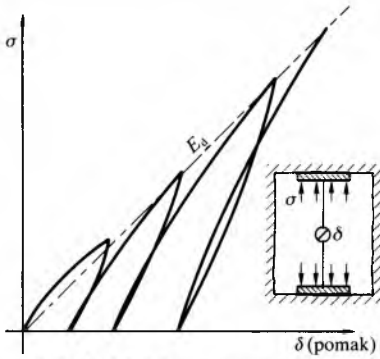


Sl. 7. Dijagrami  $\epsilon, t$  za različita naprezanja

Kad se ispituje tokom dužeg vremena i s manjim naprezanjima, pojavljuje se puzanje stijena, pa se uz elastične pojavljuju i nepovratne deformacije.

Reološka svojstva uzoraka stijena i stijenske mase ovise o iznosu i načinu opterećenja, temperaturi, vlazi i strukturi stijena.

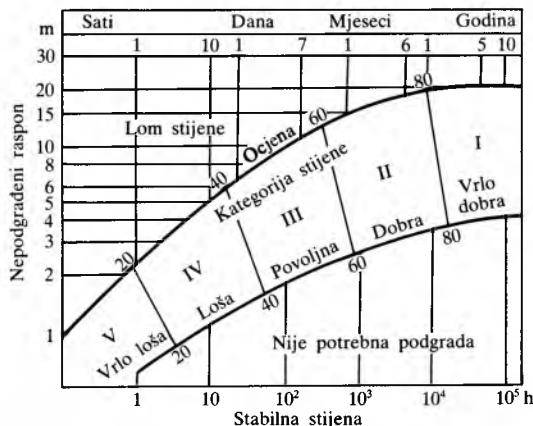
**Mjerenja u mehanici stijena.** Mjerenjima u mehanici stijena utvrđuju se mehanička svojstva stijena in situ i na stijenskim uzorcima, i to nakon obavljenih rudarskih istražnih radova. Ispitivanjem in situ određuju se vrijednosti unutrašnjeg trenja na plohama diskontinuiteta, i to smicanjem blokova uz različita normalna naprezanja. Na uzorcima stijena, postupcima sličnim kao i za druge materijale, određuju se gustoća, poroznost, sadržaj vlage, tvrdoća, abrazivnost i neka druga fizikalna svojstva.



Sl. 8. Modul deformacije stijenske mase

Deformacijske karakteristike utvrđuju se tlačenjem stijenske mase pločom, tlačnim jastukom, a u bušotinama dilatometrom. Dijagram  $\sigma, \delta$  definira modul deformacije stijene (sl. 8). Kontrole pomaka stijenske mase registriraju se jednostrukim ili višestrukim ekstenzometrima u bušotinama kroz određeno razdoblje, već prema vrsti objekta i pomaku. U posljednje vrijeme razvijeno je više uređaja za kontrolu otvorenih jamskih prostorija u eksploataciji mineralnih sirovina koji emitiraju zvučne ili svjetlosne signale pri prekoračenju dopuštenih pomaka stijenske mase. Takvi uređaji mjere konvergenciju u rudničkim prostorijama ili pomake krovine.

**Klasifikacija stijenske mase.** Stoljećima su se u rudarstvu pri opisivanju kvalitete stijena, osobito s gledišta stabilnosti rudarskih radova, upotrebljavali pojmovi *loša krovina*, *dobra podina* i slično. Danas je na osnovi kvantitativnih podataka o stijenskoj masi načinjeno više egzaktnijih klasifikacija stijena, od najjednostavnijih (K. Terzaghi, 1946; L. Rabcewicz, 1957), koje za ocjenu stijenske mase uzimaju u obzir malo podataka, do detaljnih (Z. T. Bieniawski, 1973; N. Barton, 1974, i dr.). Ipak za opis stijena u rudarskim podzemnim radovima nijedna od tih klasifikacija ne odgovara u potpunosti, jer su rađene na osnovi opažanja stabilnosti tunela, no s uspjehom se počinje primjenjivati klasifikacija prema Bieniawskom. Ta je klasifikacija izražena na osnovi sljedećih podataka o stijeni: jednoosne tlačne čvrstoće, kvalitete jezgre pri bušenju, gustoće diskontinuiteta, podataka o podzemnoj vodi i orijentacije diskontinuiteta. Svaki od



Sl. 9. Klasifikacija stijena prema Bieniawskom

nabrojanih podataka ocjenjuje se nekom ocjenom tako da suma ocjena iznosi najviše 100. U rasponu 0...100 sve su stijene svrstane u pet razreda. Za pojedine razrede određeni su maksimalni rasponi jamskih prostorija za koje nije potrebna podgrada (sl. 9).

### PODZEMNE (JAMSKE) RUDARSKE PROSTORIJE

Zadatak je mehanike stijena pri proučavanju uvjeta gradnje podzemnih rudarskih objekata utvrđivanje rasporeda naprezanja i deformacija u okolišu otvorenih prostorija, na osnovi čega se utvrđuje potreba podgrađivanja, te proračun podgrada. Uz to se proučavaju stupovi kao zaštita od rušenja pri otkopavanju ili kao zaštita rudarskih i površinskih objekata, te slijeganje terena zbog otkopavanja i pojava gorskih udara. Rješenja se dobivaju na osnovi empirijskih podataka, matematičkih rješenja ili fizikalnih modela.

Empirijski se postupak sastoji u izvođenju niza pokusa za različite uvjete i utjecajne veličine. Takvo je rješavanje redovito vrlo skupo, a često i tehnički neizvodljivo. Matematička rješenja rasporeda naprezanja i deformacija oko podzemnih prostorija postoje za malo slučajeva (okrugli, eliptični otvori i sl.) uz ograničene uvjete (izotropni nediskontinuirani materijal). Razvoj računalna omogućio je široku primjenu matematičkih modela. Osnovne su teškoće pritom konstrukcije takvih modela koji bi prema svojim svojstvima što bolje odgovarali zbivanju u prirodi, te određivanje konstanta koje opisuju svojstva stijenske mase.

U praksi se rabe i fizikalni modeli koji predstavljaju prirodno stanje u nekom mjerilu, te se na njima izvode pokusi i opažaju tražene veličine. Primjena fizikalnih modela najčešće se nadomješta matematičkim modelima.

Najbolje rezultate u rješavanju problema podzemnih rudarskih prostorija s tehničkog i ekonomskog gledišta daje kombinacija matematičkih modela i pokusa u prirodi. Projektiranje podzemnih rudarskih prostorija zahtijeva poznavanje rasporeda naprezanja i deformacija u funkciji vremena, tj. potrebno je poznavati zakone tečenja, što je za stijenske mase rijetko poznato. Rudarske prostorije za transport i otkopi nekih mineralnih sirovina imaju nepravilne poprečne presjeka, ali zadovoljavaju uvjete ravninskih problema, dok je dio podzemnih rudarskih prostorija takva oblika da je za njih potrebna trodimenzijska analiza.

Metoda je konačnih elemenata razvijena tako da pri formiranju matematičkih modela omogućuje primjenu nelinearnih veza naprezanja i deformacija u funkciji vremena, te analizu u ravnini i u prostoru. Analiza u ravnini može se primijeniti kad se promjena presjeka podzemne prostorije i naprezanja u pravcu okomitom na presjek može zanemariti na udaljenosti nekoliko puta većoj od najvećeg otvora.

**Prostorije otvaranja ležišta.** Toj grupi podzemnih prostorija pripadaju: okna, hodnici, prekopci i niskopi, redovito na tolikom međusobnom razmaku da ne utječu jedni na druge s obzirom na raspored sekundarnih naprezanja.

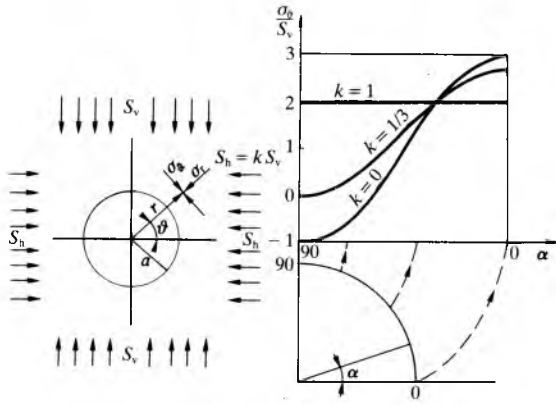
Za okrugao otvor, uz pretpostavku homogene, izotropne i linearno elastične stijene te uz zanemarenje utjecaja vlastite težine materijala neposredno uz otvore, može se primijeniti rješenje iz teorije elastičnosti (G. Kirsch, 1898). Komponente naprezanja izražene u polarnim koordinatama definiraju se izrazima:

$$\sigma_r = \frac{S_h + S_v}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) + \frac{S_h - S_v}{2} \left(1 - \frac{4a^2}{r^2} + \frac{3a^4}{r^4}\right) \cos 2\vartheta,$$

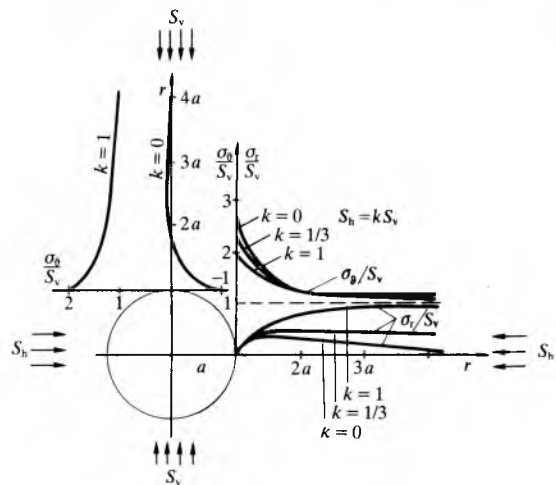
$$\sigma_\vartheta = \frac{S_h + S_v}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) - \frac{S_h - S_v}{2} \left(1 + \frac{3a^4}{r^4}\right) \cos 2\vartheta, \quad (14)$$

$$\tau_{r\vartheta} = \frac{S_v - S_h}{2} \left(1 + \frac{2a^2}{r^2} - \frac{3a^4}{r^4}\right) \sin 2\vartheta.$$

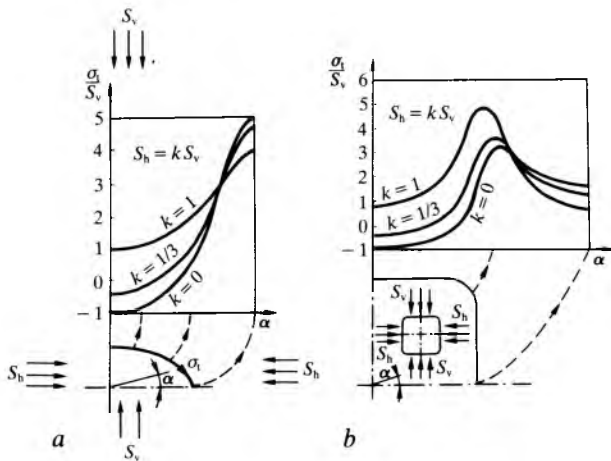
Omjer sekundarnog i primarnog naprezanja na konturi okruglog otvora prikazan je na sl. 10 kada je  $S_h = k S_v$ , te kada je  $S_h = 0$ . Za osi  $\vartheta = 0^\circ$  i  $\vartheta = 90^\circ$  raspored naprezanja prikazan je na sl. 11.



Sl. 10. Raspored naprezanja na konturi okruglog otvora



Sl. 11. Raspored naprezanja oko okruglog otvora



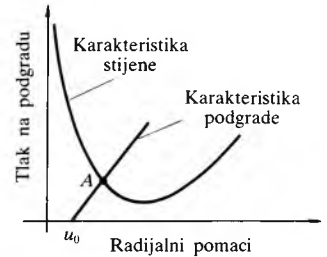
Sl. 12. Raspored naprezanja na konturi eliptičnog (a) i okruglog otvora (b)

Slika 12 prikazuje raspored naprezanja za homogenu, izotropnu i linearno elastičnu stijenu na konturi eliptičnih i četverokutnih otvora prema M. Greenspanu.

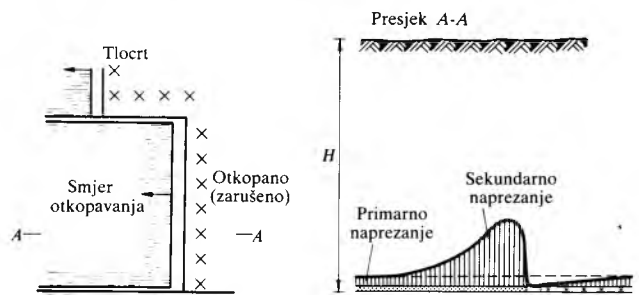
Iz izraza za raspored naprezanja izvode se izrazi za deformacije. Deformacije se mjere mjeracem pomaka ugrađenim u bušotine (ekstenzometri) ili mjerenjem konvergencije između pojedinih točaka profila. Mjerenja u praksi pokazuju da su konvergencije pri izradbi podzemnih prostorija više-struko veće od onih koje se dobivaju na osnovi teorije elastičnosti. Uzrok su diskontinuitet i reološko vladanje stijenske mase. Prema vrsti stijene, konvergencije prestaju na udaljenosti jednakoj nekoliko promjera prostorije od čela radilišta nakon nekoliko dana, ili se pojavljuju na udaljenosti

i više stotina metara od čela i nakon više godina. U glinovitim stijena male propusnosti, osim utjecaja reoloških svojstava, pojavljuje se i utjecaj zbog promjene pornog tlaka. Na raspored naprezanja utječu i procesi bubrenja nekih glina u dodiru s vodom. Najrealističnije vrijednosti raspodjele naprezanja za pravilne i nepravilne oblike podzemnih prostorija, nepodgrađenih i podgrađenih, dobivaju se primjenom metode konačnih elemenata (v. *Numeričke metode u mehanici*, TE 9, str. 559), osobito ako se uzmu u obzir i reološka svojstva stijena i podgrade. Taj postupak daje i najbolje vrijednosti konvergencije u funkciji vremena. Konačna je svrha tih ispitivanja da se za svaku vrstu stijene utvrde deformacije pri kojima stijenu treba podgraditi da ne bi nastao lom zbog prevelikih deformacija, tj. zbog prekasnog podgrađivanja, ni lom podgrade zbog nepravovremenog podgrađivanja. Na tom je principu u tunelogradnji razvijena tzv. nova austrijska metoda, koja se s uspjehom počela primjenjivati pri izradbi podzemnih prostorija u rudarstvu. Prema toj metodi teorija podgrađivanja može se objasniti dvjema karakterističnim krivuljama (sl. 13). Jedna krivulja predstavlja karakteristiku stijene, tj. odnos radijalnog tlaka na stijenu (potrebno za sprečavanje deformacije) i deformacije promatrane točke, a druga krivulja karakteristiku podgrade, tj. odnos tlaka podgrade na stijenu i deformacije podgrade. Ravnotežno stanje nastaje na presjecištu tih krivulja.

Sl. 13. Idealizirana karakteristika stijene i podgrade (prema Fairhurstu). A ravnotežno stanje,  $u_0$  konvergencija pri ugrađnji podgrade



**Otkopi.** Za otkopavanje slojevitih ležišta mineralnih sirovina najčešće se primjenjuju širokočelna i stupno-komorna otkopna metoda (v. *Rudarstvo, Otkopavanje mineralnih sirovina*). Široko čelo je podzemna prostorija dugačka od nekoliko desetaka do nekoliko stotina metara, redovito po padu sloja, a široka nekoliko metara. Čelo prostorije pomiče se brzinom do nekoliko metara na dan u pravcu pružanja sloja. Raspored je sekundarnog naprezanja i deformacija oko širokog čela vrlo složen, ali je, zahvaljujući opsežnim terenskim mjerenjima, fizikalnim i matematičkim dvodimenzijskim i trodimenzijskim modelima, temeljito proučen za mnoge slučajeve. Iako se, zbog mnogo utjecajnih veličina, raspored naprezanja ne može generalizirati, ipak se može konstatirati da je sekundarno naprezanje na čelu radilišta (sl. 14) nekoliko puta veće od primarnog naprezanja.



Sl. 14. Raspored naprezanja pri širokočelnom otkopavanju horizontalnog sloja

Osnovne utjecajne veličine za raspored naprezanja i deformacija širokog čela jesu: dubina eksploatacije, mehanička svojstva popratnih naslaga, dimenzije širokog čela, svojstva podgrade, brzina napredovanja čela i postupak s otkopanim prostorom. U područjima sa slojevima visokih vrijednosti modula elastičnosti i na velikim dubinama moguća je pojava gorskih udara, tj. trenutačnih lomova na većem

prostranstvu. Od niza zaštitnih postupaka protiv gorskih udara najuspješniji su: natapanje slojeva vodom pod tlakom do 10 MPa, rastresanje sloja minama u dubini od nekoliko metara i otkopavanje uz što manje koncentracije naprezanja.

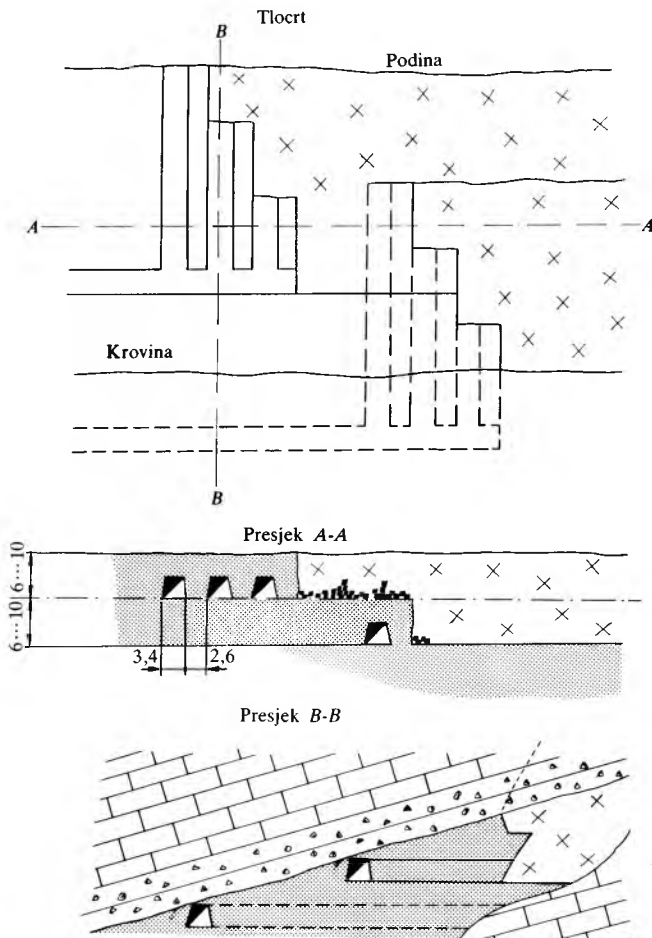
Kad se otkopava stupno-komornom metodom, osnovni je zadatak dimenzioniranje stupova i raspona komora. Raspodjela naprezanja unutar stupova utvrđuje se jednostavnim metodama uz pretpostavku ravnomjerno raspoređenog naprezanja po čitavoj površini stupa, ili uz primjenu metode konačnih elemenata, odnosno drugih matematičkih postupaka. Čvrstoća stupova ovisi o mehaničkim svojstvima stijene, te o rasporedu naprezanja u stupu. Raspored naprezanja u stupu ovisi o omjeru širine i visine stupa te o materijalu na kontaktu stupa i krovine. Mnogi su pokusi u rudnicima pokazali da je čvrstoću stupova najbolje određivati prema eksperimentalnim formulama. Čvrstoća stupa iznosi

$$\sigma_s = Ch^\alpha w^\beta, \quad (15)$$

gdje je  $C$  jednoosna čvrstoća stijene stupa,  $h$  visina stupa,  $w$  širina stupa, a vrijednosti su eksponenata  $\alpha = -0,66 \dots 1$  i  $\beta = 0,46 \dots 0,50$ . Faktor  $F$  sigurnosti stupa izražava se omjerom prosječnih vrijednosti čvrstoće  $\sigma_s$  i naprezanja  $\sigma_n$ :

$$F = \frac{\sigma_s}{\sigma_n}. \quad (16)$$

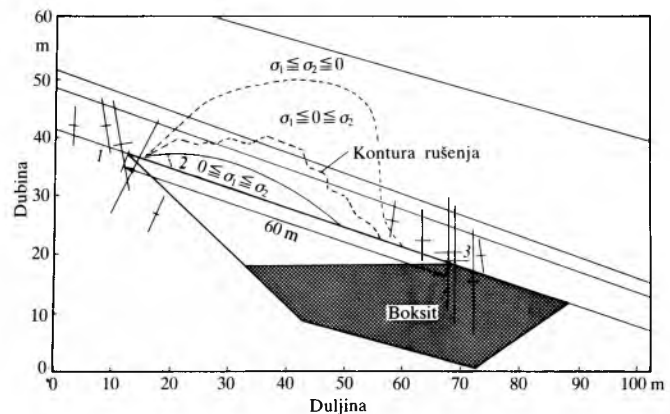
Raspon komora za stupno-komornu metodu otkopavanja ovisi o vrsti stijena u krovini, diskontinuitetu krovine, uključujući debljinu slojeva, te o udjelu vode. Rad je u komorama cikličan i sastoji se od dobivanja i utovara rude, privremenog podgrađivanja i stalnog podgrađivanja. Pokazalo se da se oko polovice svih nepredviđenih rušenja krovine događa u vrijeme prvog ciklusa (nepodgrađena krovina), a ostala rušenja u drugoj fazi ciklusa. Geotehnička klasifikacija stijena pokazala je dobre rezultate u praktičnom određivanju stabilnosti krovine u komorama.



Sl. 15. Podetažna metoda otkopavanja

Rasponi komora utvrđuju se fizikalnim ili matematičkim modelima, uzimajući u obzir utjecaj reoloških svojstava krovine.

Od niza otkopnih metoda koje se u nas primjenjuju za podzemno otkopavanje sirovina treba spomenuti podetažnu otkopnu metodu za boksitna rudna ležišta. Otkopavanje se tom metodom provodi podjelom ležišta na horizontalne ploče debljine 6...12 m. Ploče se otkopavaju odozgo naniže (sl. 15). Krovina boksita zarušava se neposredno nakon otkopavanja kad su stijene čvrste, ispucale i tanko uslojene, ili kad su male čvrstoće. Kad su u krovini debelo uslojeni vapnenci i breče s rijetkom mrežom ili bez pukotina, nakon otkopavanja ostaju prazni prostori tloctne površine i do 3000 m<sup>2</sup>. Istraživanja uvjeta rušenja opažanjem in situ i na matematičkim modelima uz primjenu metode konačnih elemenata utvrđeni su za različite raspone, dubine i materijale te za različit raspored naprezanja i deformacija (sl. 16). Dobiveni podaci omogućili su utvrđivanje raspona pri kojemu se krovina ruši, utvrđivanje oblika zona rušenja, pa i uvođenje novih metoda otkopavanja.



Sl. 16. Raspored naprezanja pri podetažnom otkopavanju boksita

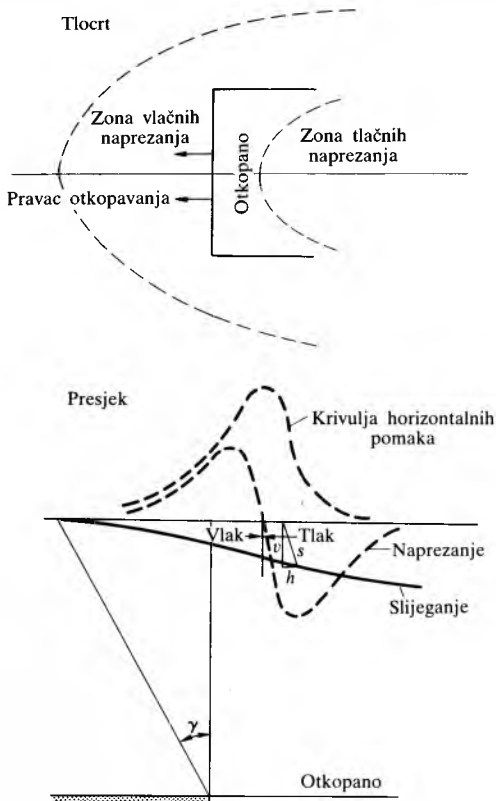
**Slijeganje površine zbog otkopavanja.** Osnovne utjecajne veličine za slijeganje površine pri podzemnoj eksploataciji jesu: geološki uvjeti te dimenzije i dubina otkopnog prostora. Pri otkopavanju nepravilnih rudnih ležišta pojavljuju se neravnomjerna slijeganja površine, dok je slijeganje površine nakon otkopavanja slojevitih ležišta ravnomjerno. Posljedica su slijeganja oštećenja objekata na površini, razmjerna veličini slijeganja. Osnovna zaštita od slijeganja površine i oštećenja objekata jest: ostavljanje zaštitnih neotkopanih stupova i upotreba posebnih otkopnih metoda uz zapunjavanje otkopanih prostora drugim materijalima. Ostavljanjem zaštitnih stupova gube se velike količine mineralne supstancije, dok se primjenom posebnih otkopnih metoda veoma povisuju troškovi eksploatacije.

Osnovne su značajke pri slijeganju površine kad se otkopava horizontalni ugljeni sloj širokočelnom otkopnom metodom (sl. 17): površina slijeganja veća je od površine otkopavanja; pojedine točke površine pri slijeganju osim vertikalnih, imaju i horizontalne pomake prema otkopnoj površini, što uzrokuje naprezanja na površini; na mjestima vlačnih naprezanja redovito se pojavljuju vlačne pukotine.

Veličina slijeganja procjenjuje se na osnovi praktičnih opažanja ili primjenom matematičkih modela. Mnogi rudarski bazeni u svijetu imaju, na osnovi iskustvenih podataka, konstruirane dijagrame za faktor slijeganja  $F = S/m$ , gdje je  $S$  maksimalno slijeganje, a  $m$  debljina sloja koji se otkopava u funkciji dubine otkopavanja i širine otkopa.

U nekim regijama dobiveni su zadovoljavajući podaci na osnovi matematičkih modela. S obzirom na kompleksnost zadataka i nepoznate rubne uvjete za formiranje matematičkih modela, opća su rješenja slijeganja primjenom numeričkih metoda još u fazi istraživanja.

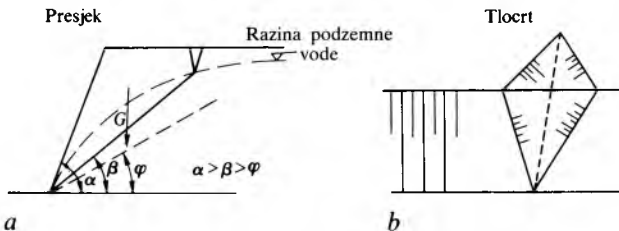
Opazanje veličine i vremena slijeganja u pojedinim rudarskim bazenima još je najsigurniji način prikupljanja podataka za konkretne geološke uvjete.



Sl. 17. Slijeganje površine pri otkopavanju ugljena širokim čelom

**STABILNOST KOSINA POVRŠINSKIH KOPOVA**

Opažanja u prirodi pokazuju da pojedine vrlo strme ili gotovo vertikalne kosine u stijenama mogu iznositi i nekoliko stotina metara. Jednaki rezultati dobivaju se proračunom stabilnosti, uzmu li se kao podaci vrijednosti dobivene ispitivanjem monolitnih uzoraka stijene. Proučavanjem klizanja utvrđeni su osnovni i najčešći oblici kliznih ploha ili kombinacije više takvih ploha. Najkompliciranije klizanje nastaje u raznovrsnim i izrazito ispućalim stijenama koje imaju zakrivljene klizne plohe zbog klizanja po više lomnih ploha. Klizne su plohe zapravo plohe diskontinuiteta u stijenama, a samo iznimno klizna ploha ili njen dio predstavljaju klizanje po lomu monolitne stijene. Sile koje uzrokuju klizanje unutar stijene jesu težina materijala i sile uzrokovane tlakom vode u pukotinama, te vanjska oštećenja na kosini. Sile koje sprečavaju klizanje jesu kohezija i trenje na kliznim ploham. To je sigurno najjednostavnija shema klizanja u stijenama (sl. 18a). Tako jednostavan slučaj približnog poklapanja smjera pružanja klizne plohe i čela kosine, a uz zanemarenje zbivanja na rubovima klizišta, može se tretirati kao prostorno klizanje po dvije ili više ploha (sl. 18b).



Sl. 18. Osnovni oblici loma kosina u stijenama

U kompliciranijim slučajevima u kosini nastaje progresivan lom stijene u vezi s reološkim efektima.

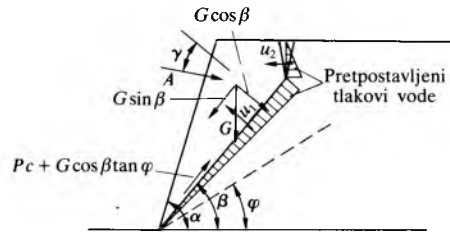
Osim lomova smicanjem i klizanjem materijala, u praksi se pojavljuju i drugi oblici nestabilnosti kosina: rušenje materijala prevrtanjem i kotrljanje stijena niz padinu.

**Analiza stabilnosti kosina.** Na području postojećih ili budućih kosina prvo se, na osnovi detaljnih geoloških podataka i uz eventualnu pomoć aerofotogrametrije, utvrđuju vjerojatne zone nestabilnosti i mogući pravci kliznih ploha. U tako izdvojenim zonama snimaju se i grafički doraduju diskontinuiteti, utvrđuju se podaci o podzemnim vodama i ispituje čvrstoća stijene in situ i u laboratoriju. U proračunima se primjenjuju različite metode, od metoda granične ravnoteže za ravni problem, preko dvodimenzijskih fizikalnih modela, trodimenzijskih grafičkih i analitičkih metoda granične ravnoteže, trodimenzijskih fizikalnih i matematičkih modela do računa vjerojatnosti.

**Metoda granične ravnoteže** temelji se na komparaciji svih sila  $S_k$  koje uzrokuju klizanje stijenske mase na kosini i sila koje se opiru klizanju  $S_s$ . Masa neće kliziti ako je  $S_s > S_k$ . Omjer tih sila definira faktor sigurnosti  $F = S_s/S_k$ . Najjednostavnije je klizanje niz jednu plohu diskontinuiteta (sl. 19). Pritom, ako je pravac diskontinuiteta približno jednak pravcu kosine, klizanje se može promatrati kao dvodimenzijski problem. Zanimaruju se zbivanja na bokovima klizne plohe i utjecaj protjecanja vode kroz stijenu, a uzima se u obzir stvarno utvrđeni tlak vode u diskontinuitetu ili pojednostavnjena raspodjela tlaka. Pretpostavlja se da momenata nema ili se i oni zanemaruju. Faktor sigurnosti iznosi:

$$F = \frac{Pc + (G \cos \beta - u_1 - u_2 \sin \beta + A \cos \gamma) \tan \varphi}{G \sin \beta + u_2 \cos \beta - A \sin \gamma} \quad (17)$$

gdje je  $G$  težina materijala,  $u_1$  i  $u_2$  sile zbog tlaka vode,  $c$  kohezija,  $P$  površina klizanja,  $A$  vanjske sile (sidra),  $\varphi$  kut unutrašnjeg trenja, a  $\alpha$ ,  $\beta$  i  $\gamma$  kutovi prema sl. 19.



Sl. 19. Raspored sila pri ravnom lomu kosine.  $G$  težina materijala,  $u_1$  i  $u_2$  sile zbog tlaka vode,  $c$  kohezija,  $A$  vanjske sile (sidra),  $P$  površina klizanja

Modelnim se ispitivanjem nastoje reproducirati i simulirati napreznja i deformacije na objektu.

Unatoč mnogim riješenim problemima matematičkim modeliranjem i simuliranjem loma kosina ostalo je još dosta neriješenih pitanja: utjecaj primarnog stanja napreznja, uvođenje reoloških elemenata i utjecaj vode na stabilnost. Ipak simuliranje stvarnog stanja stijenske mase matematičkim modelom za proračun stabilnosti bit će još važnije u budućnosti.

**Praćenje stabilnosti kosina in situ.** Na kosinama s početnim klizanjem, što se zapaža nastankom vlačnih pukotina, pomicanja se mogu mjeriti na površini ili u dubini. Za to postoje različiti mehanički i električni mjerni instrumenti. Pomicanje mase na kosini prati se nizom repera razmještenih na pogodnim profilima za geodetsko mjerenje. Pojedine točke unutar kosine prate se ekstenzometrima.

**Stabilizacija kosina.** Već prema namjeni i potrebnoj vremenu stabilnosti kosine primjenjuje se više postupaka za stabilizaciju kosine: izradba kosine konturnim miniranjem, primjena sidara i potpornih zidova, dreniranje, promjena kuta nagiba i pružanja, te zaštita kosina od padanja blokova.

Konturno miniranje često je u građevinarstvu i rudarstvu, a sastoji se u tome da se na liniji završne kosine kamenoloma, usjeka ili površinskog kopa u zdravoj stijeni izbuši red minskih bušotina s razmakom 0,5...2,0 m, već prema promjeru bušotine. Miniranjem po liniji završne kosine stvara se pukotina koja štiti završnu kosinu od oštećenja prilikom kasnijeg proizvodnog miniranja. Tako se minira i nakon proizvodnog miniranja, kao posljednji red, čime se dobiva glatka kosina koja nije ispućala od masivnog proizvodnog

miniranja. Ta vrsta zaštite ne sprečava klizanje kosine po postojećim diskontinuitetima.

Miniranjem i potresima nastaju vibracije koje mogu utjecati na stabilnost kosina, ali se na veličinu vibracija može utjecati količinom i načinom paljenja eksploziva. Iz iskustva se zna da pri brzini gibanja čestica od 0,6 m/s stijene pucaju, a pri brzinama većim od 2,5 m/s stijene se na kosinama i padinama ruše.

Primjena sidrenja pri gradnji prometnica i drugih inženjerskih objekata u brdovitim terenima često je jedino racionalno rješenje za osiguranje stabilnosti kosina. Pri površinskoj eksploataciji mogu se postići znatni ekonomski efekti povećanjem kuta završnih kosina kopa primjenom sidara. Utjecaj sidara na klizanje po ravnoj plohi definiran je jednadžbom (17). Na osnovi te jednadžbe najpogodniji kut nagiba sidra prema kliznoj plohi jednak je kutu unutrašnjeg trenja.

U praksi se upotrebljavaju različite konstrukcije sidara s prednapretnjem ili bez njega. Teorijski temelji djelovanja sidra nisu u potpunosti razjašnjeni. Djelovanje kohezije, trenja, podzemne vode i sila zatezanja sidra nije sinkrono i nije određeno s jednakom preciznošću. Zato treba uzeti u obzir i različite faktore sigurnosti, pa jednadžba (17) ima oblik:

$$GF_1 \sin \beta + u_2 F_2 \cos \beta - A \sin \gamma = \\ = \frac{Pc}{F_3} + (GF_1 \cos \beta - u_1 F_4 - u_2 F_4 \sin \beta + \\ + A \cos \gamma) \frac{\tan \varphi}{F_2}, \quad (18)$$

gdje su  $F_1 \dots F_4$  faktori sigurnosti za težinu, kut unutrašnjeg trenja, koheziju i tlak vode. Pritom je obično, s obzirom na preciznost utvrđivanja pojedinih podataka,  $F_4 \cong F_3 \cong \cong F_2 \cong F_1 \cong 1$ .

Iz jednadžbe (18) može se dobiti izraz za potrebnu silu sidra po duljini kosine

$$A = \frac{GF_1 \left( \sin \beta - \cos \beta \frac{\tan \varphi}{F_2} \right)}{\sin \gamma - \cos \gamma \frac{\tan \varphi}{F_2}} + \\ + \frac{u_2 F_4 \cos \beta + (u_1 + u_2 \sin \beta) \frac{F_4}{F_2} \tan \varphi - \frac{Pc}{F_3}}{\sin \gamma - \cos \gamma \frac{\tan \varphi}{F_2}}. \quad (19)$$

Ukupna potrebna sila sidrenja dijeli se na pojedinačna sidra na kosini. Sidrenje mora biti provedeno dosta duboko iza klizne plohe, da se ne bi stvorila nova klizna ploha.

**Dreniranje kosina.** Voda unutar diskontinuiteta smanjuje normalno naprezanje na plohi, a tako i čvrstoću smicanja. Uz to voda u vlačnim pukotinama povećava silu smicanja niz kosinu. Taj utjecaj može biti velik i opravdava kontrolu vodenog lica te utvrđivanje pornog tlaka u diskontinuitetima. Osim toga zimi, pri temperaturama nižim od 0 °C, može se porni tlak povećati zbog stvaranja ledene barijere na kosini. Kosina se drenira bušenjem blago nagnutih bušotina pri dnu kosine. Ponekad se uspješno primjenjuju horizontalni rovovi za odvodnjavanje, a ponekad u kombinaciji s bušenjem. Vertikalni bušeni bunari primjenjuju se samo kad ima mnogo vode u kosini.

Osobito je važno sprečavanje dotjecanja vode u slivnom području površinskih kopova. Odvođenje vode iz područja kopa može se osigurati izradbom kanala izvan dometa mogućih vlačnih pukotina. Ako, međutim, nastanu takve pukotine, one se ispunjavaju glinom, kako bi se spriječilo da se voda slijeva u njih u većim količinama.

Promjena kuta nagiba jedna je od mogućnosti stabilizacije kosine. Ta promjena ovisi o raspoloživom vremenu, tehničkim mogućnostima i financijskim efektima. Ako se masa na kosini već pokrenula, što se može zapaziti snimanjem ili po pojavi vlačnih pukotina, u praksi se često rasterećuje kosina

skidanjem dijela mase s kosine, pa se tako zapravo mijenja kut nagiba kosine, da bi se usporilo ili zaustavilo kretanje mase.

Konačno, u eksploataciji mineralnih sirovina stalni problemi sa stabilnošću radnih etaža vrlo se često mogu riješiti pogodnim okretanjem etaža s obzirom na smjer pada diskontinuiteta.

LIT.: J. Sinclair, Ground Movement and Control at Collieries. Pittman, London 1963. – L. Obert, W. J. Duvall, Rock Mechanics and the Design of Structures in Rock. J. Wiley and Sons, New York 1967. – H. Kastner, Statik des Tunnel- und Stollenbaues. Springer-Verlag, Berlin 1971. – F. G. Bell, Site Investigations in Areas of Mining Subsidence. Newnes-Butterworths, London 1975. – J. C. Jaeger, N. G. W. Cook, Fundamentals of Rock Mechanics. Chapman and Hall, London 1976. – E. Hoek, J. Bray, Rock Slope Engineering. The Institution of Mining and Metallurgy, London 1977. – A. Jummikis, Rock Mechanics, Trans Tech. S. A. CH-4711, Aedermannsdorf 1979.

S. Vujec

**RUDARSTVO, OTKOPAVANJE MINERALNIH SIROVINA,** eksploatacija nalazišta mineralnih sirovina. Način eksploatacije zavisi od položaja nalazišta u Zemljinoj kori, pa se razlikuju površinsko i podzemno otkopavanje. Površinsko se otkopavanje provodi površinskim kopovima, a podzemno otkopavanje zavisi od slajevitosti nalazišta, pa se razlikuju metode otkopavanja neslojevitih i slajevitih nalazišta.

#### POVRŠINSKI KOP

Površinski kop, tehnički objekt i sistem rudarskih radova i mašina kojima se mineralne sirovine površinski eksploatišu otkrivanjem i dobivanjem kao dvama međuzavisnim proizvodnim procesima, odnosno podsistemima.

Površinska eksploatacija mineralnih sirovina, iako poznata od prvih dana rudarenja, širu primjenu dobiva tek u XX. vijeku zahvaljujući usavršavanju parne mašine, otkriću motora s unutrašnjim sagorijevanjem i motora naizmjenične struje.

Osnovni je kriterijum za ocjenu tehničke i ekonomske opravdanosti otvaranja i eksploatacije površinskog kopa omjer između količine otkrivke i količine korisne sirovine, tzv. *koeficijent otkrivke*. Taj koeficijent treba da bude što manji, ali zahvaljujući efikasnosti modernih sredstava za otkopavanje, u prvom redu rotornih bagera (v. *Bagerovanje*, TE 1, str. 639), danas dostiže vrijednost od 10 pa i više. Tako proizvodni kapaciteti najvećih svjetskih površinskih kopova, naročito pri eksploataciji uglja, iznose već i 50 · 10<sup>6</sup> t/god. korisne sirovine uz 300 · 10<sup>6</sup> t/god. otkrivke.

Takav je razvoj postignut u relativno kratkom vremenu od devedesetak godina, tj. od kraja prošlog vijeka. Tada se u prvim nemehanizovanim površinskim kopovima, s konjskom vučom, postizavala maksimalna proizvodnja od 800 · 10<sup>3</sup> · 900 · 10<sup>3</sup> t/god. iz kopova na dubini do 3 m. To je otprilike i dubina postignuta u mlade kameno doba, u jednom od najstarijih poznatih površinskih kopova, rudniku kremenjača u Maueru kod Beča; tamo se kopalo do dubine od 2,5 m.

Od početka našeg vijeka do sredine dvadesetih godina upotrebljavali su se parni bageri, a za transport parne lokomotive. Prvi bageri vedričari uvode se sredinom dvadesetih godina, pa se postiču i učinci do 15 t uglja po nadnici. Dubine još ne premašuju 120 m. One dostižu 300 m u periodu između polovine pedesetih i sedamdesetih godina našeg vijeka. Maksimalni kapaciteti na površinskim kopovima uglja penju se na 30 · 10<sup>6</sup> t/god., uz učinke od 75 t po nadnici.

Od 1975. traje najnoviji period, s primjenom rotornih bagera kapaciteta i do 240 · 10<sup>3</sup> t/d koji omogućuju učinke od 125 t uglja po nadnici. Radi se već i na dubinama od 300 · 400 m, a predviđaju se dubine i do 800 m.

Računa se da se danas oko 3/4 ukupne svjetske proizvodnje mineralnih sirovina dobiva površinskim kopovima s tendencijom porasta.

**Klasifikacija površinskih kopova.** Površinski kopovi mogu se klasifikovati prema različitim kriterijumima, npr. prema vrsti i kvalitetu sirovine, obliku, položaju, padu, debljini i mineraloškoj strukturi (homogenosti) ležišta, reljefu površine, dominantnim stijenama. Kako je raznolikost ležišta mineralnih sirovina veoma velika, svako od njih ima svoje karakteri-