

## **PUKOTINE**

Pukotine su, kao što je već definisano, površine mehaničkog diskontinuiteta stenske mase, po kojima se smicanje paralelno površini pukotine može u datom području posmatranja zanemariti.

Nemagmatske endokinematske pukotine, kao što su pukotine sušenja u sedimentima, dehidratacione pukotine i sl., nemaju velikog strukturnog značaja i važnije su za sedimentologiju i druge nauke.

### **Terminologija**

Pojedinačna /jednostavna/ - pukotina ima samo jednu površinu diskontinuiteta /termin **površina** je bolji od termina **ravan** pukotine, pošto pukotina ne mora imati geometrijski oblik ravni, nego može biti nepravilna/. Skup paralelnih pukotina čini **sistem** pukotina. Skup pukotina koje su među sobom paralelne, a nisu statistički paralelne jednoj zajedničkoj pravoj, zove se **snop** pukotina /na pr. h0l pukotine/. Osa snopa se označava sa  $\beta$  (beta), bez obzira da li je paralelna strukturnoj osi **b** ili ne.

Pukotine jednog sistema mogu biti u užem smislu **paralelne**, kada su im završeci statistički, na istoj pravoj normalnoj na pružanje pukotine, ili **ešelonirane**, kada je svaka dalja pukotina sistematski pomerena u određenom smeru, u odnosu na predhodnu.

Skup svih pukotina nekog područja, koje mogu pripadati jednom sistemu, nekolicini sistema, nekolicini sistema ili snopova, ili biti vezane drugim zakonitostima, naziva se **pukotinska mreža**.

Složene pukotine imaju veliki broj blisko postavljenih površina diskontinuiteta. To su **pukotinske zone**, koje se u celini obično mogu aproksimirati jednoj površini. One vrlo često pokazuju kretanje blokova, pa prelaze u rasedne zone.

### **Metrički elementi pukotina**

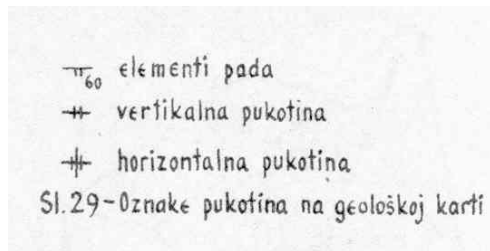
U ovom pogledu je od važnosti prostorni položaj, razmere i gustina pukotina.

Elementi pada pukotina mere se i obeležavaju na isti način kao i kod ostalih geoloških površina. Na geološkim kartama se pukotine prikazuju uslovnim znacima, prema Uputstvu za izradu osnovne geološke karte SFRJ /sl. 29/.

Po veličini se pukotine mogu definisati kao i ostala područja veličina (mm-km). Ona mogu biti svih veličina, kao što pokazuje pažljivo ispitivanje avionskih snimaka dobro otkrivenih terena ili isto tako posmatranje preparata stene.

Pukotine se nikad ne javljaju usamljene. Rastojanja između pukotina jednog sistema mogu biti svega nekoliko mm, ali isto tako i nekoliko cm. Sistem pukotina sa uzajamnim rastojanjem od nekoliko mm do nekoliko cm predstavlja ustvari klivaž ili škrljavost. Genitet stene po međusobnom rastojanju pukotina,

odn. po broju ili ukupnoj površini pukotina u jedinici zapremine važan je za ocenu tektonske oštećenosti stena pri inženjersko-geološkom, eksploatacionim i hidrogeološkim ispitivanjima.



## KLASIFIKACIJA PUKOTINA

Pukotine se mogu klasifikovati **geometrijski /morfološki/ ili genetski**. Prva klasifikacija je lakša za primenu, ali je druga važnija. Ove 2 klasifikacije ne treba mešati među sobom; isto tako nikada ne treba zaboraviti da je klasifikacija prvi i osnovni posao koji mora biti izvršen pre bilo kakvog drugog ispitivanja pukotina.

### **Geometrijska klasifikacija pukotina**

Geometrijski se pukotine mogu klasifikovati prema sledećim kriterijima:

- 1/ po veličini padnog ugla,
- 2/ po pripadnosti određenim sistemima,
- 3/ po gustini,
- 4/ po veličini.

**Po veličini padnog ugla** pukotine se klasifikuju na isti način kao i sve ostale geološke planare /horizontalne, blagog pada, srednjeg pada, strmog pada, vertikalne/. Za pukotine koje nisu strogo horizontalne ili vertikalne upotrebljavaju se često termini „subhorizontalne“ i „subvertikalne“ iako jezički čistunci ove izraze odbacuju.

**Po pripadnosti određenim sistemima**, pukotine mogu klasifikovati tek posle statističke analize /rozete i Šmitovi dijagrami/. Tada klasifikacija pukotina ukazuje na pripadnost određenim sistemima koji imaju zajednička pružanja, zajedničke srednje elemente pada ili zajedničke ose zone.

**Po veličini** klasifikacija može biti relativna ili metrička. Kod relativne klasifikacije se veličine pukotina porede među sobom; u jednom području mogu postojati „velike“ pukotine ili „pukotine I reda“, praćene pukotinama „srednje veličine“ ili „pukotinama II reda“ itd. Ova klasifikacija daje samo uzajamni red veličina, i sama za sebe ne daje nikakve podatke za korelaciju veličina sa drugim područjima, pa je bez potrebe ne treba koristiti. Metrička klasifikacija pokazuje metrički red veličina površine pukotine (mm-cm-dm-m-...) i daje podatke koji se mogu korelisati sa drugim područjima.

**Klasifikacija po gustini** pokazuje red veličina uzajamnih rastojanja pojedinačnih pukotina jednog sistema, i veoma je važna za opis. Obično se gustina prikazuje metričkim redovima veličina (na pr. pukotine sa dm-rastojanjima) ili statističkim srednjim vrednostima rastojanja.

### **Genetska klasifikacija pukotina**

Među genetskim klasifikacijama, koje mogu uglavnom biti **dinamičke i kinematske**, najznačajnija je kinematska klasifikacija.

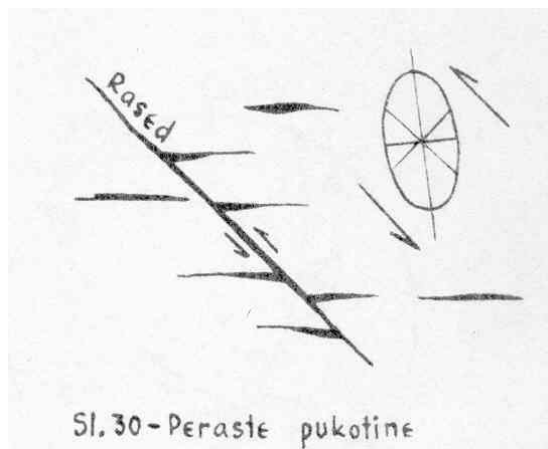
Posmatranje elipsoida naprezanja pokazuje da postoje tri glavna položaja ravni u kojima naprezanja mogu dovesti do kidanja. To je ravan **/bc/** na koju deluje maksimalna tenzija, ravan **/ab/** na koju deluje maksimalna kompresija i ravni snopa **/h0l/** po kojima leže kružni preseki elipsoida i u kojima deluje spreg. Na taj način se izdvajaju tri najvažnije grupe pukotina, i to:

- tenziona pukotina
- „kompresiona“ pukotina i
- pukotina smicanja.

### **Tenziona pukotina**

Pojavljaju se normalno na pravac maksimalne tenzije, dakle  $\perp \mathbf{a}$ . Zbog svog odnosa prema silama obično su **otvorene** /zjapeće/; zbog toga su u magmatskim masivima ili u njihovoj okolini najčešće ispunjene žičnim stenama. U rastvorljivim stenama su veoma često zapunjene produktima kristalizacije iz cirkulišućih voda (beli kalcit u krečnjacima), a u područjima cirkulacije toplih voda pretvaraju se u žična rudna tela. Površina tenzionih pukotina je često nepravilna i neravna.

Veoma karakteristično pojavljivanje tenzionih pukotina vezano je za okolinu većih raseda u krutim stenama. Kao što pokazuje sl.30, u takvim slučajevima spreg nastao kretanjem blokova deformiše zamišljenu loptu u elipsoid čiji **bc**-presek ima prema rasednoj površini zakonit položaj određen smerom kretanja blokova.



Sl. 30 - Peraste pukotine

Tako nastaju tenziona pukotine koje se perasto vezuju /„peraste pukotine“/ za rasednu površinu. One pokazuju smer kretanja krila a često su zapunjene i mineralnim materijama.

U nabranim terenima tenziona pukotine nisu karakteristične, osim u posebnim malim područjima. Takva su na pr. područja šarnira antiklinala. U njima je pravac tektonskog transporta materijala savijanog sloja paralelan sloju i  $\perp b$ ; tenzija u ovom području ima prema tome generalni smer kompresije posmatrane oblasti. Tu nastaju kratke tenziona pukotine, koje mogu usloviti pojačano dejstvo erozije i stvaranje inverznog reljefa. Ove pukotine nisu tako česte kao što bi se moglo teoretski očekivati, jer se pri nabiranju stene većinom ponašaju dovoljno plastično i ne dolazi do pucanja.

Kod neplanarnih deformacija dolazi do kretanja //b. Ova kretanja mogu izazvati stvaranje sistema tenzionih pukotina  $\perp b$ , koje tada imaju međusobna rastojanja /ekstenziona pukotine/. Ove pojave su u linearno nabranim područjima dosta česte što pokazuje da su planarne deformacije relativno retke.

### **„Kompresiona“ pukotine**

U ravni **ab** zapaža se u mnogim slučajevima sistem zatvorenih bliskih pukotina koje se u visokom stepenu približavaju ravnima po obliku. Pošto su upravne na pravac maksimalne kompresije, obično se nazivaju „kompresionim“ pukotinama. Kompresija ne može izazvati pukotine, pa ovi mehanički diskontinuiteti nisu u stvari nastali kompresijom. Njihova pojava se objašnjava time, što posle faze intenzivne kompresije može prestati dejstvo sila; tada dolazi do relaksacije, odmora stene. Ona pokušava da kompenzuje elastične deformacije nastale kompresijom, i pri povratku prema prvobitnom stanju /dakle pri širenju!/ dolazi do stvaranja pukotina upravno na pravac tog širenja. Ovo pokazuje da nastale pukotine u stvari postaju tenzijom, a ne kompresijom. Nazivamo ih obično **relaksacionim pukotinama**.

Do stvaranja relaksacionih pukotina ne mora doći samo u ravni **ab**, nego su one moguće u bilo kojoj drugoj ravni u kojoj prvo deluje kompresija koja zatim prestaje. U orogenu to može biti i ravan  $\perp b$ , ako //b prvo dolazi do suženja /zbog kompresije u tom pravcu/ pa zatim do njegovog prestanka. To su već ranije pomenute tenziona pukotine  $\perp b$ .

Poseban tip relaksacionih pukotina može se zapaziti u kamenolomima masivnih stena. One su grubo paralelne površini reljefa, a postanak im se objašnjava „odmorom“ stene posle prestanka opterećenja pokrivačem, odnosno erozijom. One su u suštini tenziona „relaksaciona pukotina“, a od ostalih se razlikuju po svom pravilnom odnosu prema topografiji.

U kristalnim škriljcima sa foliacijom //ss, naročito ako nisu, jako ubrani, međuslojne pukotine mogu predstavljati ove relaksacione pukotine. To ne mora biti uvek slučaj, jer ima i drugih uzroka nastanka ovakvih pukotina (slojni klivaž na primer).

## **Pukotine smicanja**

U deformacionom elipsoidu pukotine smicanja nastaju po površinama u kojima naprezanje menja znak, tako da im sa jedne strane vlada tenzija, a sa druge kompresija. Kod teoretski zamišljenih planarnih deformacija ove ravni leže u (h0l)-snopu, i odlikuju se sledećim osobinama:

- U toku naprezanja i deformacija ove ravni interno rotiraju oko ose **b** (=B), te stvaraju snop koji u Šmitovom dijagramu obrazuje nepotpun pojas  $\perp B$ ;
- Dva sistema konjugovanih pukotina smicanja zaklapaju sa osom **c** (osom maksimalnog stresa) ugao nešto manji od  $45^\circ$  ( $30-40^\circ$ )
- Kretanje po dva konjugovana sistema pukotina smicanja je sistematsko - u kvadrantu ose **c** ono je ka centru, a u kvadrantu ose **a** ono je od centra.

Kompleksni uglovi oblikovanja jednog orogenog prostora čine mogućnosti stvaranja sličnih pukotina daleko komplikovanijim.

U terminologiji H.Cloos-a pukotine se označavaju sledećim oznakama:

Q-pukotine - poprečne pukotine; upravne na pravac maksimalne tenzije ili na pravac osa nabora

L-pukotine - uzdužne pukotine, paralelne osama nabora

D-pukotine - dijagonalne pukotine, pod uglom prema osi nabiranja.

## **Terenska ispitivanja pukotina**

Metodika ispitivanja pukotina na terenu, kao i kasnije statističke obrade merenja, zavisi pre svega od cilja ispitivanja i njegove veze sa ostalim geološkim radovima. Uglavnom se razlikuju ispitivanja vezana za detaljne radove (inženjerska geologija, geologija ležišta mineralnih sirovina, eksploatacija kamena) i ispitivanja vezana za regionale radove (izrada geološke karte i sl.). Bez obzira na cilj ispitivanja, pri terenskim merenjima se mora obratiti pažnja na sledeće:

- Merenja moraju biti dovoljno brojna, da bi se mogli statistički obrađivati. Za jedan dijagram je potrebno obično nekoliko desetaka do nekoliko stotina merenja.

- Pukotine moraju pre merenja biti genetski razdvojene i ispitane; poželjno je razdvajanje i po drugim kriterijama. Posebnim znacima se na dijagramima prikazuju pukotine tri osnovna tipa, pa zatim /prema cilju ispitivanja/ na pr. otvorene i nezaceljene pukotine, pukotine sa kalcitom, pukotine oko kojih je stena hidrotermalno izmenjena, planarne pukotine, pukotine neravne površine itd. Merenje pukotina bez ikakvog razdvajanja ne vodi ničemu.

Uz pukotine moraju biti izmerene i druge planare i lineare sklopa /slojevitost ili foliacija, rasedi, ose nabora, a-lineacija i sl./, da bi se mogao povezati položaj sistema i snopova pukotine sa osama sklopa.

## **Detaljna ispitivanja**

Po pravilu se odvijaju na manjim područjima i vezane su za rešavanje specijalnih problema.

Područje se podeli na manja poručja prema homogenosti koja se može očitati sa geološke karte /karta mora obavezno biti izrađena pre ispitivanja pukotina/. Pri tome se odvoje različiti litološki članovi i različiti delovi većih nabora, uža područja raseda itd. Za svako ovakvo područje izrađuje se poseban dijagram ispitivanjem jednog većeg izdanka, ili nekolicine manjih, međusobno bliskih izdanaka; na području svakog dijagrama izmere se i padovi slojeva, raseda i lineara /naročito B/ i označe posebnim oznakama na dijagramu.

## **Regionalna ispitivanja**

Regionalna slika o pukotinskoj tektonici može se dobiti na dva načina: ispitivanjem izbornih malih područja, rasejanih u celom regionu ili merenjem reprezentativnih pukotina raznih sistema po celoj oblasti.

U prvom slučaju se u ispitivanoj oblasti odabere niz malih područja, koja su pogodno postavljena u odnosu na krupne strukture /na pr. u šarnirima i na krilima velikih nabora, uz velike rasede, u stenama raznih strukturnih spratova/, imaju dovoljno izdanaka i mogu se smatrati relativno homogenim u strukturnom pogledu. U tim područjima /to mogu biti veće ogoline, kamenolomi i sl./ sistematski se ispituju i izmere pukotine zajedno sa drugim tektonski važnim planarama i linearama.

U drugom slučaju se pri kartiranju na svim pogodnim izdancima zapažaju sistemi pukotina i mere reprezentativni predstavnici ovih sistema. Da bi se i pri ovakvom merenju mogle zapaziti sve zakonitosti pukotinskog sklopa, na pogodnim izdancima treba izvršiti i statistička merenja /ređe nego u prvom slučaju/.

Dobra otkrivenost terena omogućava kombinovanje fotogeoloških i terenskih merenja pukotina. Pravci pružanja, ređe i elementi pada pukotina mogu se očitati na aerosnimcima; ispitivanje se kombinuje sa statističkom analizom i merenjima na pojedinim pogodnim izdancima.

Kod svih statističkih ispitivanja izdanaka potrebno je merenje nekoliko desetaka, bolje nekoliko stotina pukotina.

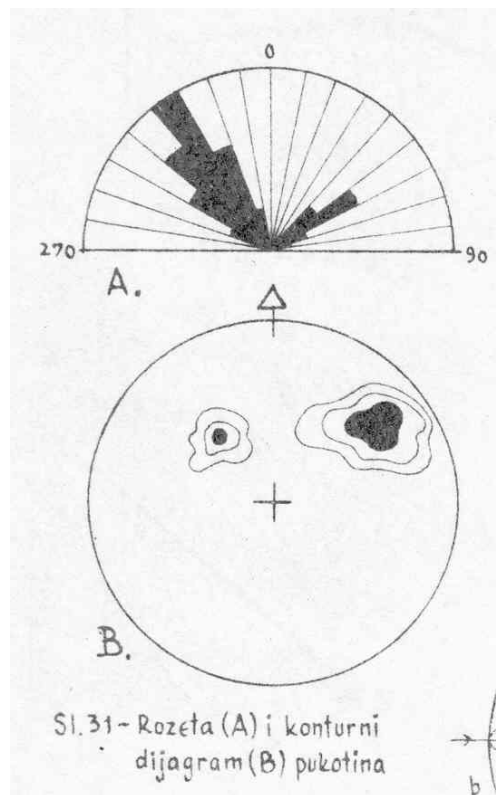
Pri tome treba paziti da se podjednako mere pukotine svih sistema - nijčešće se na izdanku relativno zanemaruju pukotine paralelne površini izdanka, koje su manje upadljive i manje brojne od ostalih.

## Statističko prikazivanje pukotina

Pukotine se prikazuju rozetama, dijagramima u polarnom koordinatnom sistemu, projekcijama položajne lopte i blokdiagramima.

**Rozete** predstavljaju dvodimenzijalne prikaze, pa se njima može prikazati samo pružanje ili samo pravac pada ili samo padni ugao pukotina. Najčešće se upotrebljavaju za prikazivanje pružanja pukotina.

Pružanja pukotina se podele na klase od po  $10^\circ$ , i izbroji koliko pukotina pripada svakoj klasi. Odabere se pogodna razmera za dužinu koja na dijagramu odgovara jednoj pukotini, pa se po azimutu koji odgovara sredini svake klase pružanja nanese broj pukotina svake klase /sl. 31a/.



Rozete mogu imati različite oblike /zrakasta rozeta, rozeta sa nanošenjem od centra, rozeta sa nanošenjem od periferije/. Pošto su dve polovine kruga rozete /kod prikaza pružanja/ obrnuto simetrične, obično se prikazuje samo jedna /severna/ polovina kruga - polurozeta.

Pošto predstavljaju dvodimenzijalni prikaz, rozete ne mogu uspešno prikazati prostorni položaj pukotinskih sistema, osim u slučaju ako su oni vertikalni.

**Tačkasti dijagram** raznih vrsta predstavljaju prikaze pukotina u polarnim koordinatnim sistemima. To su krugovi podeljeni po periferiji prema azimutina, a

po prečniku prema padnim uglovima pukotina. Svaka pukotina se prikazuje tačkom, koja se nalazi na poluprečniku čiji azimut odgovara azimutu pada pukotine, a udaljena je od centra ili periferije /prema izboru/ za iznos padnog ugla u razmeri dijagrama. Poluprečnici su podeljeni obično na devet jednakih delova. Tačkasti dijagrami su pogodni za prikazivanje manjeg broja pukotina, i upotrebljavaju se u inženjerskoj geologiji.

**Projekcija položajne lopte** /tačkasti i konturni dijagrami/ predstavlja najbolji način prikazivanja pukotina, i upotrebljava se u svim geološkim radovima za prikazivanje položaja pukotina.

**Blokdijagrami** se koriste za prostorni prikaz položaja sistema i snopova pukotina. Obično se pukotine prikazuju na paralelopipedinom bloku date geografske orijentacije, i to trasama na površinama bloka. Ovakvi blokdijagrami se prilažu uz „oleate izdanka“ /dijagrame koji prikazuju položaj lineara i planara na jednom izdanku/ radi bolje preglednosti.