

GRAFIČKA METODA ANALIZE NAJPOVOLJNIJEG POLOŽAJA OTKOPNE FRONTE U ODNOSU NA TEKTONSKI SKLOP I STABILNOST STIJENSKE MASE

Ivan TOMAŠIĆ

Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, YU — 41000 Zagreb

Ključne riječi: Grafička metoda, Tektonski sklop, Diskontinuiteti, Stabilnost, Položaj otkopne fronte

Key-words: Graphical method, Tectonic fabric, Discontinuities, Stability, Excavation front position

Diskontinuiranost stijenske mase kao jedno od osnovnih obilježja tektonskog sklopa obrađena je grafičkom metodom analize najpovoljnijeg položaja otkopne fronte u odnosu na stabilnost stijenske mase.

Metoda rješava osnovne elemente važne za projektiranje položaja i nagiba kosina otkopnih fronti kod čvrstih raspucalih stijena.

The rock mass discontinuity, being one of the basic tectonic fabric characteristics, has been elaborated with graphical determination in relation to rock mass stability.

The method enables solution of the basic elements which are important for rock slope design and determination of excavation front position in hard fractured rocks.

Uvod

Metoda grafičke analize najpovoljnijeg položaja otkopne fronte pogodna je kod detaljnih istraživanja stabilnosti, kao preliminarna, ali i u toku praćenja razvoja eksploatacije kod nestabilnih stijenskih masiva. Temelji se na procjeni tektonskog sklopa stijenske mase. Koristi se na ležištima mineralnih sirovina koja se eksploatiraju površinskim kopovima, a kod kojih se primjenjuje etažni sistem otvaranja i eksploatacije. Također se može primijeniti i kod ostalih rudarsko-građevinskih zahvata u čvrstim stijenama kod kojih postoji potencijalna opasnost od nekontroliranog obrušavanja stijenske mase u toku masovnih miniranja i poslije.

U tom pogledu obavljena su istraživanja na površinskim kopovima-kamenolomima dolomita, vapnenca i lapora, a primjeri analize prikazani u ovom radu odnose se na kamenolom dolomita Dolje kraj Zagreba. Analiza je rađena prema Hoek-u i Bray-u (1974), koji su pored većeg broja autora najdetaljnije razradili način primjene ove metode.

Nekontrolirana obrušavanja duž kosina na dijelovima etaža tehničko-ekonomski vrlo nepovoljno utječu na plan i program eksploatacije nekog ležišta, odnosno na rudarsko-građevinske zahvate. Projektiranje i izvođenje strmijih etaža vodi k ekonomičnijem radu, jer se kod eksploatacije mineralnih sirovina otkopava manje površinske jalovine. Kod izrade raznih usjeka i zasjeka time se također smanjuje količina otkopanog materijala, što povoljno

utječe na troškove izvedenih radova. Međutim, kod strmijih radnih kosina etaža postoji stalna opasnost od loma i obrušavanja stijenske mase. Prema tome, geometrija projektiranih radnih i završnih kosina etaža direktno utječe na ekonomičnost i sigurnost kod spomenutih radova.

Istraživanje stabilnosti kosina je kompleksan posao, jer obuhvaća poznavanje više različitih disciplina, tako da rad na terenu i u laboratoriju zahtijeva:

- izdvajanje potencijalnih mjesta sloma i obrušavanja,
- utvrđivanje tipa nestabilnosti, tj. da li je to lokalni slom na jednoj etaži niz dva diskontinuiteta, ili pak preko nekoliko etaža, te da li je u pitanju tektonski jače raspucana zona ili su to rasjedi i pukotine,
- utvrđivanje kontinuiteta i širine određene strukture,
- utvrđivanje prosječne orijentacije spomenutih struktura,
- utvrđivanje njihovog minimalnog i maksimalnog upada,
- utvrđivanje foliacije, zona smicanja, milionitskih prevlaka, ispune, hrapavosti dodirnih odnosno kontaktnih površina,
- crtanje i prikazivanje stereografskih projekcija struktura,
- poznavanje petrografskih svojstava stijena,
- poznavanje i utvrđivanje geomehaničkih svojstava stijena,
- izradu studija sloma kosina i stabilnosti,

- istraživanje i poznavanje hidrogeoloških i inženjersko-geoloških svojstava stijena,
- poznavanje seizmičnosti terena i seizmičnosti kod miniranja,
- poznavanje geološke građe i regionalnih struktura terena.

Osnovni elementi metode

To su prvenstveno sva oslabljena mjesta, odnosno prekidi u stijenskoj masi, tj. diskontinuiteti i to pukotine, slojevitost, rasjedi i tektonski razdrobljene zone. Glavni diskontinuiteti, odnosno strukturni planarni elementi koji utječu na ponašanje pojedinih kosina okarakterizirani su preferiranom orijentacijom i upadom. Kontinuitet spomenutih elemenata ima utjecaj na veličinu potencijalne zone obrušavanja, te na propusnost, odnosno hidrauličku povezanost stijenske mase. Ispuna spomenutih zona može biti materijal iz rastopina ili je posljedica kemijskog trošenja sa znatnim, prvenstveno negativnim utjecajem na otpornost na smicanje. Kontaktne površine duž zona mogu biti glatke, odnosno različito hrapave, zupčaste, te nazubljene i zrnate. Od posebnog je značenja pružanje i nagib radnih kosina postojećih etaža. Pri tome treba razlikovati nagib radne kosine postojeće etaže u izvedbi od nagiba radne kosine projektirane etaže, te njihov utjecaj na projektirane i izvedene nagibe završnih kosina svih etaža. Kod toga je potrebno koristiti kut unutrašnjeg trenja (φ) koji se dobiva geomehaničkim istraživanjima, a služi kod stereografske projekcije za konstrukciju kruga unutrašnjeg trenja kao granične vrijednosti nagiba kosine.

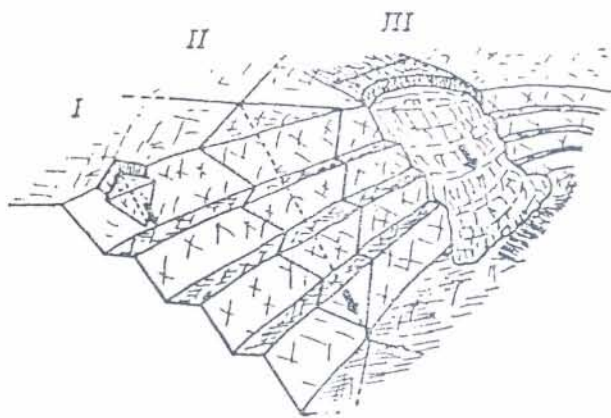
Osnovni tipovi nestabilnosti kosina

Različite tipove nestabilnosti kosina moguće je najbolje uočiti na otvorenim površinskim kopovima. Njihov utjecaj očituje se s različitim efektima na projektiranje oblika i razvoja kopova. Prema Patton-u i Deer-u (1970) osnovni tipovi nestabilnosti mogu se podijeliti u tri kategorije (sl. 1):

- I. — lokalni slom samo preko jedne etaže,
- II. — široki klinasti slom preko više etaža,
- III. — slom uslijed smicanja i premještanja stijenske mase preko nekoliko etaža.

Prvi tip može uzrokovati zastoje u radovima od nekoliko dana. Nastaje niz jedan ili više diskontinuiteta. Smanjenje lokalnih lomova postiže se pravilnim oblikovanjem kosina etaža.

Drugi tip nastaje kada postoje dva ili više jače izraženih diskontinuiteta, primjerice, jako izražena slojna ploha ili kombinacija pukotine s rasjedom. Slom se neće dogoditi tako dugo dok eksploatacijom presjek pukotine i rasjeda ne izbije na kosini nešto iznad najdonje etaže.



Sl. 1 Osnovni tipovi nestabilnosti kosina (prema Pattonu i Deeru, 1970)

Fig. 1 Basic types of unstable slopes (after Patton and Deer, 1970)

Ovaj tip nestabilnosti može prouzročiti zastoje od mjesec i više dana.

Treći tip nastaje kada postoji široka jako raspucana tektonska zona sklonu smicanju i obrušavanju bez nekih određenih pravilnosti.

Prvi i drugi tip nestabilnosti kosina pogodni su za analizu grafičkim metodama razvijenim u sklopu mehanike stijena, dok je treći tip moguće obrađivati uobičajenim metodama na osnovu primjene mehanike stijena.

Potrebno je još istaknuti i četvrti tip nestabilnih klinova koji je dosta čest u nekim našim kamenolomima. Ovaj je tip prikazan na slici 2, a karakterističan je za stijenske masive kod kojih slojevitost pada u smjeru nagiba otkopne fronte. Po intenzitetu odgovara prvom i drugom tipu.

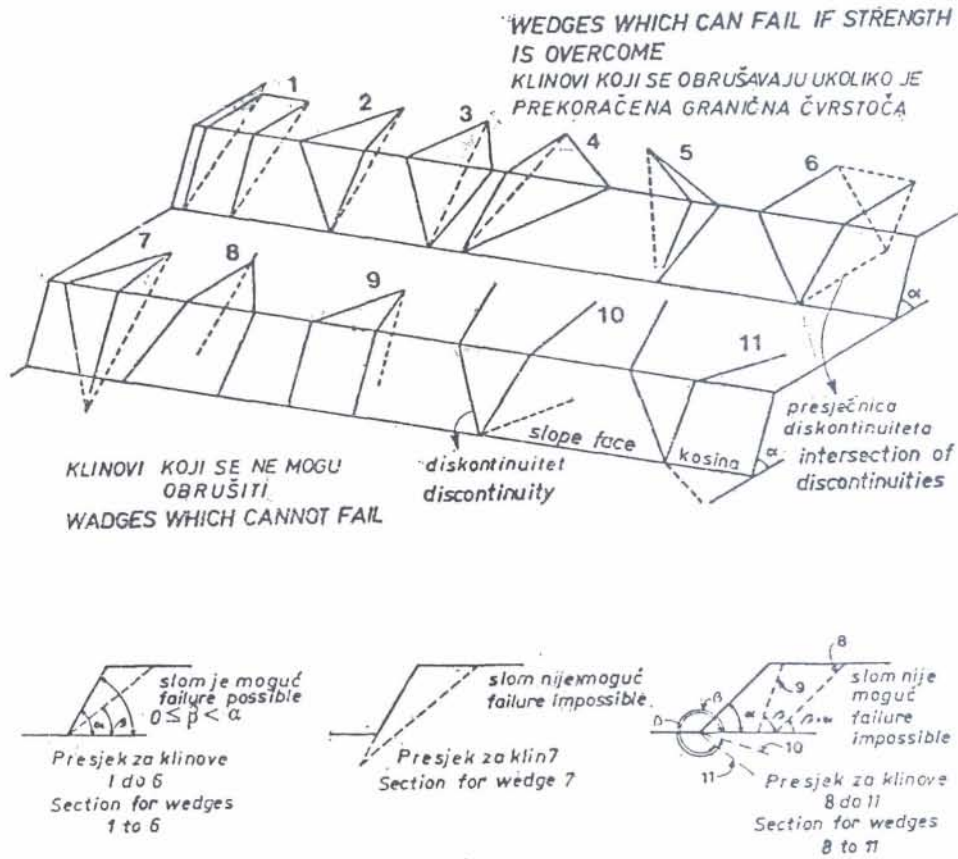
Između spomenutih tipova klinova sklonih obrušavanju mogući su razni prijelazi i kombinacije.

Stvarni broj potencijalnih i obrušavanju sklonih mjesta u obliku klinova može se izraziti različitim parovima diskontinuiteta. Potpuni broj mogućih kombinacija je $n(n-1)/2$ ako



Sl. 2 Tip klinova kada slojevi padaju u smjeru kosine

Fig. 2 Type of sliding wedges when the layers dip in direction of the slope face



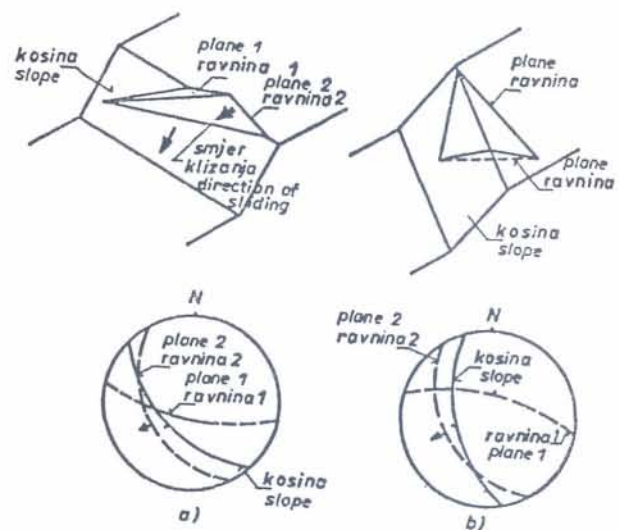
Sl. 3 Tipovi klinova (prema Pentz u, 1970)
 Fig. 3 Types of wedges (after Pentz, 1970)

je »n« broj diskontinuiteta. Ukoliko imamo 50 mjerenja upada i pružanja diskontinuiteta, tada imamo 1225 mogućih kombinacija. Srećom, toliki broj klinova ne može klizati pojedinačno s obzirom na vlastitu geometriju i njen položaj u stijenskoj masi u odnosu na kosinu etaže.

Prema Pentz-u (1971) na slici 3 prikazani su razni tipovi klinova koji mogu, odnosno ne mogu, klizati duž kosine nakon što je prekoračena granična čvrstoća stabilnosti. Klinovi oznaka od 1—6 na slici 3 skloni su obrušavanju ukoliko je prekoračena granična čvrstoća stijene, uz uvjet da je $0 \leq \beta \leq \alpha$ (pri čemu je β nagib presječnosti, a α nagib radne kosine etaže). Kod klina oznake 7 slom nije moguć jer presječnica ne izlazi na kosini etaže. Isto važi za klinove oznaka od 8—11 kod kojih slom i obrušavanje nije moguće, jer je nagib presječnosti veći od radne kosine etaže.

Klinovi koji se formiraju na rubovima kosina i etaža najčešće imaju oblik tetraedra. Prema Hocking-u (1976) može se razlikovati jednostruko i dvostruko klizanje klinova u obliku tetraedra. Na slici 4 prikazana su oba spomenuta tipa. Ako smjer upada jednog od diskontinuiteta, ravnine 1 ili 2, leži između smjera upada kosine i linije presjeka ravnina 1 ili 2, onda će se klizanje izvršiti duž ravnine

1 ili 2, odnosno u ovom slučaju duž ravnine 2 (sl. 4a). U protivnom, ako ovi uvjeti nisu zadovoljeni, klizanje će se odvijati duž linije presjeka ravnina 1 i 2 (sl. 4b).



Sl. 4 Jednostruko i dvostruko klizanje (prema Hocking-u, 1976)
 Fig. 4 Single and double plane sliding (after Hocking, 1976)

Geološke i ostale karakteristike stijenskog masiva

Ležište dolomita Dolje nalazi se u naslagama srednjeg i gornjeg trijasa ($T_{2,3}$) koje se protežu kao zona široka 500 do 600 m, pravcem jug—sjever, kao dva morfološki izražena grebena između kojih je jarak (Šikić, Basch i Šimunić, 1979). Oba su grebena zasječena eksploatacijom duž otkopne fronte kamenoloma pružanja zapad—istok. U zapadnom bloku površinskog kopa jasno se uočava da se u ležištu izmjenjuju slojevi svjetlije i tamnije sive boje. Slojevi su subvertikalni, vertikalni, mjestimice blaže položeni a mjestimice prebačeni. Pružanje im je istok—zapad a upadaju na jug. Dolomit je u ležištu mjestimice tektonski vrlo poremećen.

Prema spomenutim autorima i Prelogoviću (1970) na širem području kamenoloma dominiraju rasjedi pružanja SZ—JI i SSZ—JJI. Može se pretpostaviti da su ostali glavni rasjedi duž doline potoka Dolje, te duž jaraka između dva grebena i istočno od zapadnog grebena (Srednjaka).

Ležište je sedimentnog postanka. Kamena masa sastoji se isključivo od kasnodijagenetskog dolomita slojevite građe, debljine slojeva od mikroslojevitosti do slojeva debljine 45 cm. Duž mikroslojevitosti ne dolazi do odvajanja. Te plohe ne predstavljaju prirodne plohe diskontinuiteta. Do odvajanja u pretežnom dijelu ležišta dolazi duž slojnica koje su međusobno udaljene od 3 cm na više. Dolomit je mjestimice prošaran karakterističnim spletom finih pukotinica vezanim uz njegovu strukturnu građu, duž kojih dolazi do paralelopipednog raspada od milimetarskih dimenzija do nekoliko centimetara. Raspadnuti komadići imaju oblik romboedara oštarih bridova.

Stijensku masu u ležištu Dolje karakterizira pukotinski mikroporozitet. Zbog sklonosti dolomita drobljenju, usitnjavanju i raspadanju u grus, u dolomitu nisu uočene neke značajnije zone karakteristične za brže kretanje vode kao u vapnencima. Voda se u dolomitu kreće ali sporije nego u nekim drugim stijenama s karakterističnim pukotinskim porozitetom. Pukotinska je poroznost izraženija duž slojevitosti.

Pukotinski sistemi, rasjedanja i rasjedne zone često markirane limonitnom supstancijom, te upadanje slojeva prema jugu od 62° do 75° (mjestimice 54°), glavna su karakteristika dijela ležišta koje se sada eksploatira.

U ležištu možemo razlikovati mikro i makro raspucanost. Mikro raspucanost je vezana za već spomenute milimetarske i centimetarske dimenzije uz pretpostavku da je nastala zbog strukturne karakteristike dolomita, prije svega njegove romboedarske kalavosti. Ova se raspucanost uočava vrlo često, međutim, ne može

se usvojiti pravilo da se uvijek podudara s jako izraženim pukotinskim sistemima u ležištu, odnosno s makro raspucalošću.

Od najvažnijih inženjerskogeoloških karakteristika u ležištu treba spomenuti da zbog nagiba slojnih ploha (sl. 5), koji je trenutno manji od nagiba radnih kosina etaža (70°), na lijevoj i desnoj strani kamenoloma, u odnosu na središnji jarak, dolazi do nekontroliranog obrušavanja i klizanja stijenske mase prilikom masovnih miniranja, a i poslije. Dok je kut nagiba slojeva bio veći od 70° kosine su bile stabilne. Sada kad nagib slojeva iznosi 62° do 67° (mjestimice 54°), u ležištu dolazi do klizanja pločastih klinova ukoliko slojnica izlazi na kosinu etaže. Pružanje slojeva i kosina gotovo se potpuno podudara. Takav je slučaj zaista rijedak na površinskim kopovima, jer je poznato da je nagib slojeva najnepovoljniji kada upada prema radilištu (sl. 3).

Na istočnom dijelu desne strane (sl. 6) može se uočiti da su kosine mjestimice stabilne i kod tako nepovoljnih nagiba slojeva. U tim je dijelovima ležišta zbog usmjerenih pritisaka došlo do utiskivanja dolomita iz jednog sloja u drugi sloj (približno okomito na slojevitost). Kod većeg broja slojeva takvo nepravilno utiskivanje dovelo je do neutralizacije slojnih ploha i sprečavanja klizanja. Za takve je zone karakteristična jaka mikroraspucanost.

Kod istraživanja stabilnosti kosina potrebno je uzeti u obzir seizmičnost terena i šireg područja ležišta. U slučaju potresa nedovoljno sigurne i nestabilne kosine mogle bi se u većem obimu nekontrolirano obrušavati i klizati, čime bi se normalan rad u kamenolomu prekinuo za duži period. U području ležišta očekuje se jačina potresa VIII stupnja MCS ljestvice prema opažanim potresima (Prelogović et al., 1986) odnosno prognoznih 6° Richterove ljestvice (VIII—IX^o MCS).

Posebnu pažnju potrebno je posvetiti karakteristikama stijenske mase s obzirom na seizmičko djelovanje miniranja. Nepravilnim miniranjem moguće je pokrenuti stijensku masu neodgovarajućeg granulata ali i izazvati nekontrolirano obrušavanje pojedinih dijelova etaža. U tom pogledu intenzitet potresa može se smanjiti primjenom milisekundnog otpucavanja mina uz povoljan interval vremenskog usporjenja.

Iz navedenih razloga potrebno je punu pažnju posvetiti odgovarajućim mjerama radi sprečavanja obrušavanja.

Grafička analiza najpovoljnijeg položaja otkopne fronte

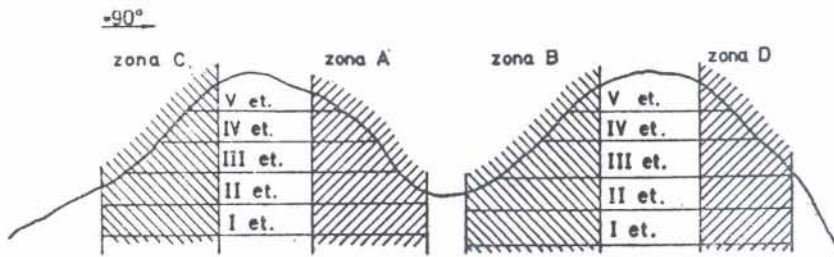
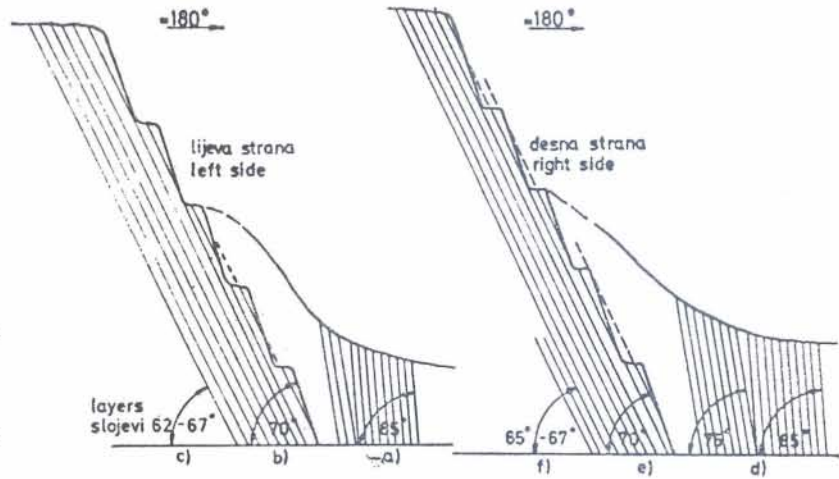
U ležištu dolomitnog kamena Dolje izvršeno je mjerenje diskontinuiteta, tj. slojevitosti i pukotina, te položaja otkopnih fronti. Ležište je podijeljeno u četiri zone: A, B, C i D (sl. 6).

Sl. 5

Shematski prikaz profila etaža u kamenolomu

Fig. 5

Schematic display of a benches cross-section in a quarry



Sl. 6

Shema etaža lijeve i desne strane u kamenolomu

Fig. 6

Scheme of benches of the left and right side in the quarry

Zone obuhvaćaju rubne dijelove lijeve i desne strane u kamenolomu. Eksploatacija se u kamenolomu odvija na četiri pravilne etaže, a petu čini zaobljeni vrh na obim stranama. Pojedinačna klizanja i obrušavanja uočena su na gotovo svim etažama. U zoni A uočeno je klizanje I i II etaže zajedno, te II i III etaže zajedno. U zonama B i C klizanja su uglavnom pojedinačnog karaktera. Zona D zbog svojih prethodno navedenih karakteristika (utiskivanje sloja u sloj) nema tipičnih pojava klizanja, iako bi ih prema geometrijskim pokazateljima (nagib slojeva i radne kosine) trebalo biti.

U zoni A, od I do IV etaže, izmjerene su pukotine: 61/65 (x 5), 332/71 (x 8), 55/62 (x 8), 53/55 (x 11), 50/58 (x 7), 35/55 (x 3), 17/76 (x 2), 72/87 (x 4), 48/67 (x 6), te slojevitost 179/63 i položaj otkopne fronte 180/70.

U zoni B, od I do V etaže, izmjerene su pukotine: 45/50 (x 3), 87/45 (x 3), 66/53 (x 4), 76/54 (x 10), 275/80 (x 4), 75/72 (x 5), 100/88 (x 6), 260/72 (x 7), 56/58 (x 4), 62/65 (x 6), 65/45 (x 4), te slojevitost 180/65 i položaj otkopne fronte 180/70.

U zoni C, od I do V etaže, izmjerene su pukotine: 38/49 (x 1), 49/64 (x 4), 312/64 (x 1), 29/42 (x 3), 72/38 (x 3), 110/46 (x 1), 124/75 (x 7), 60/60 (x 4), 82/65 (x 1), 92/40 (x 1), te slojevitost 179/56 i položaj otkopne fronte 179/70.

U zoni D, od I do V etaže, izmjerene su pukotine: 52/36 (x 2), 42/64 (x 4), 50/80 (x 1), 100/80 (x 6), 29/36 (x 3), 36/70 (x 3), 183/85 (x 11),

te slojevitost 177/60 i položaj otkopne fronte 177/70.

Analizirani su i razrađeni primjeri po metodi Hoek-a i Bray-a (1974) na stereografskim projekcijama (slike 7, 8, 9 i 10).

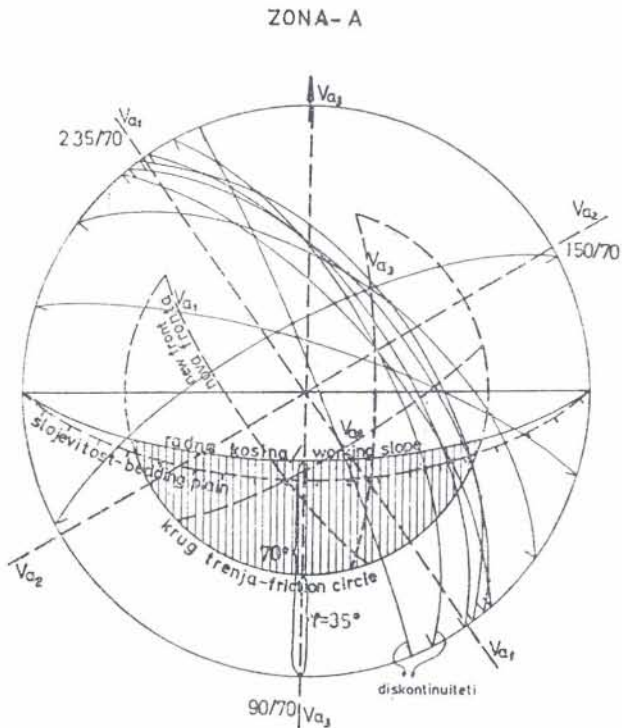
Sve ravnine koje imaju padni kut jednak kutu unutrašnjeg trenja, a prolaze kroz središte položajne kugle, tvore stožac koji siječe omotač položajne kugle po kružnici. Na dijagramu se ta kružnica projicira opet u kružnicu koja je od periferije dijagrama udaljena za φ stupnjeva (sl. 7). Polumjer te kružnice je, dakle, $(90 - \varphi)$ stupnjeva, a nazvana je krug trenja, jer predstavlja polove padnih pravaca svih ravnina s padnim kutem jednakim kutu unutrašnjeg trenja.

Ako je ostvaren kontakt između ploha dva diskontinuiteta, klizanje može nastati samo uzduž njihove presječne, pa se zbog toga ona mora pojaviti na čelu otkopne fronte. Drugim riječima, uvjeti za klizanje mogu nastati kad je pad presječne (ψ_i) manji od prividnog pada kosine otkopne fronte (ψ_f) a veći od kuta unutrašnjeg trenja (φ), tj.:

$$\psi_f > \psi_i > \varphi,$$

pri čemu napadna sila postaje veća od otporne, pa je kosina potencijalno nestabilna.

Uvjet granične ravnoteže je ostvaren kada je padni kut klizne plohe, odnosno, u ovom slučaju, presječne dvaju diskontinuiteta ψ_i duž



Sl. 7 Grafička analiza povoljnosti orijentacije otkopnih fronti

Fig. 7 Graphical analysis of the most favourable orientation of the excavation front

koje se može odvijati klizanje, jednak kutu unutrašnjeg trenja φ .

Iz ova dva razmotrena granična stanja proizlazi da su kritične presječnosti diskontinuiteta samo one čiji se polovi nalaze unutar područja omeđenog tragom ravnine otkopne fronte i krugom trenja na dijagramu.

Spomenuti i opisani kriteriji korišteni su za izbor optimalnog položaja otkopne fronte, a taj se nalazi u području stereografske projekcije u kojem ima najmanje kritičnih presjecišta unutar površine omeđene tragom ravnine otkopne fronte i kruga trenja, prilikom čega je ove zadnje potrebno postupno rotirati.

Kod analiziranih primjera u obzir je uzet kut unutrašnjeg trenja $\varphi = 35^\circ$. Ovaj kut odgovara rasponu vrijednosti od 35° do 45° prema Hoek-u i Bray-u (1974), a vrijedi za stijenske masive koji sadrže potpuno jasne uglate i tvrde fragmente i blokove koji međusobno zupčasto zadiru jedni u druge. U navedenim zonama u kojima se pretpostavlja da će započeti promjene u orijentaciji otkopnih fronti u kamenolomu izmjereni su nagibi postojećih kosina etaža, a koji su manji od projektiranog nagiba kosine (70°). Ovaj kut jednak je u svim analiziranim primjerima.

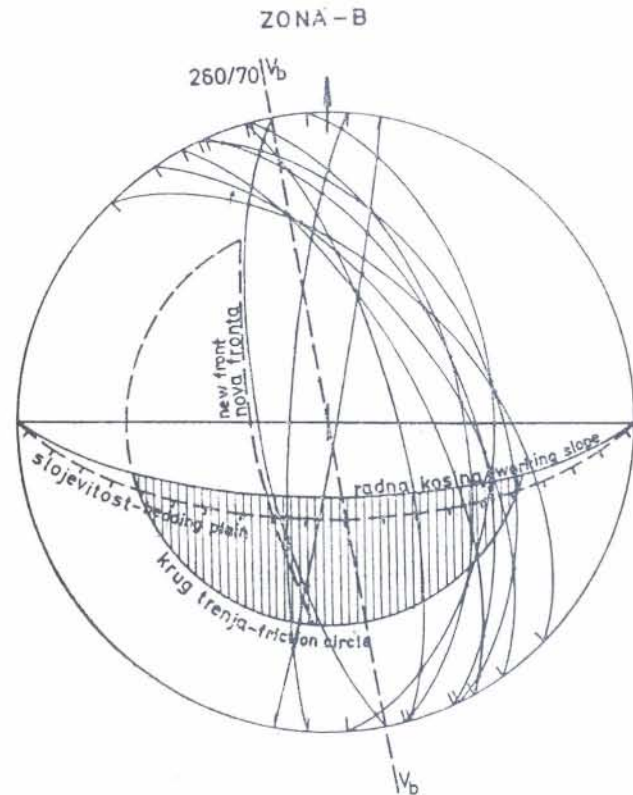
U zoni A analizom je utvrđeno da je sadašnji postojeći položaj otkopne fronte 180/70 nepovoljan, jer položaj slojevitosti iznosi 180/64. To

je ujedno glavni razlog klizanja pločastih klinova. Presjecišta postojećih, tj. registriranih diskontinuiteta (pukotina) pružanja SSZ—JJI sa slojevitostu unutar kruga trenja su nepovoljna jer omogućavaju parcijalno odvajanje i obrušavanje pločastih klinova.

Najpovoljnija orijentacija, odnosno položaj fronte u zoni A bio bi prema varijanti V_{a1} (sl. 7) s položajem 235/70. Ova varijanta nije prihvatljiva zbog potrebe izrade usjeka i potrebe napredovanja eksploatacije u smjeru istok—sjeveroistok. Predlažu se, stoga varijante V_{a2} i V_{a3} . Kod obe ove varijante može se očekivati pojavljivanje klinova koji izlaze na kosini pojedinih etaža. U tom je pogledu varijanta V_{a3} nešto povoljnija, jer daje klinove koji su izduženi u pravcu masiv-fronte, a nastaju presjecanjem između slojevitosti i pukotina, pri čemu su presječnice većeg nagiba od kuta unutrašnjeg trenja φ , što je nepovoljno. Stoga se ove varijante ipak odbacuju.

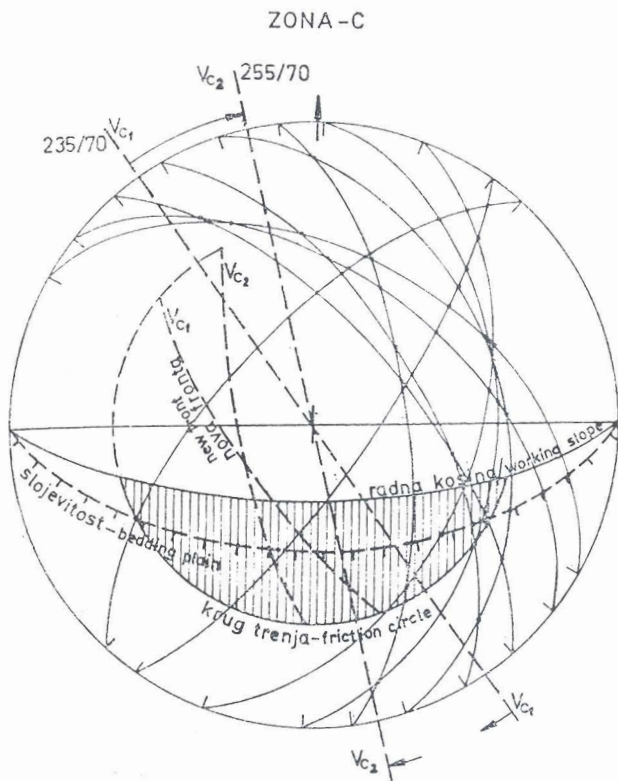
U zoni B (sl. 8) u analizi su uzeti u obzir isti elementi položaja projektirane otkopne radne fronte (180/70) i slojevitost (180/64). Ovdje bi položaj nove fronte odgovarao prema varijanti V_b (260/79) kod koje u potpunosti ne bi bilo kritičnih presjecišta u krugu trenja.

U zoni C (sl. 9), s obzirom na dominaciju diskontinuiteta sličnog položaja kao u zoni A, pre-



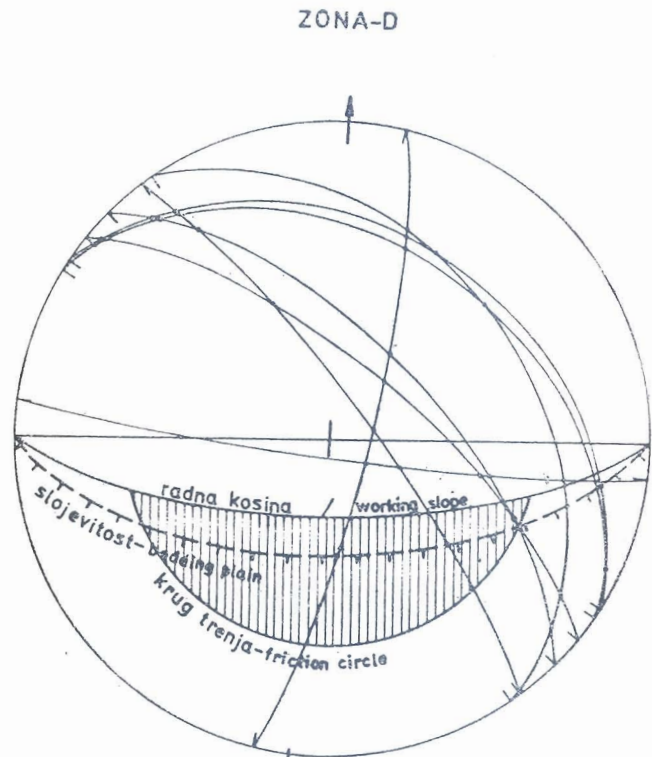
Sl. 8 Grafička analiza povoljnosti orijentacije otkopnih fronti

Fig. 8 Graphical analysis of the most favourable orientation of the excavation front



Sl. 9 Grafička analiza povoljnosti orijentacije otkopnih fronti

Fig. 9 Graphical analysis of the most favourable orientation of the excavation front



Sl. 10 Grafička analiza povoljnosti orijentacije otkopnih fronti

Fig. 10 Graphical analysis of the most favourable orientation of the excavation front

poruča se nova fronta prema varijanti V_{c1} (235/70) ili V_{c2} (255/70). Najpovoljnije bi bilo kad bi se zone C i A eksploatirale od zone C prema zoni A varijantom V_{c1} ili V_{a1} (isti položaj). I u ovom dijelu kopa trenutna fronta kamenoloma ima položaj 180/70 do 178/70. Projektirani nagib od 70° ne može se ni ovdje zadržati zbog smanjenja nagiba slojeva. Upad slojevitosti u ovom dijelu ležišta (zapadni dio lijeve strane) iznosi čak 54° na IV i V etaži, s time da je na nižim etažama nešto strmiji. Položaj slojeva 178/54 i projektirane fronte 178—180/70 po pružanju se potpuno podudaraju.

S obzirom na nemogućnost definiranja zone D (sl. 10) preporuča se da položaj radne fronte bude prema varijanti V_b iz zone B za čitavo područje, odnosno desnu stranu kamenoloma.

Rezultati istraživanja i analiza prikazani su na shematskoj situacijskoj karti kamenoloma Dolje (sl. 11). Pored zona istraživanja na karti su prikazani najpovoljniji položaji otkopnih fronti u odnosu na tektonski sklop i stabilnost stijenske mase u pojedinim dijelovima ležišta.

Diskusija

Na osnovi istraživanja, opažanja i mjerenja, te provedenih analiza na većem broju stijenskih masiva u kamenolomima, može se konsta-

tirati da postoji nekoliko graničnih primjera odnosa između pružanja otkopnih fronti i tektonskog sklopa stijenske mase.

Razni primjeri spomenutih odnosa mogu se svrstati u tri osnovna granična tipa:

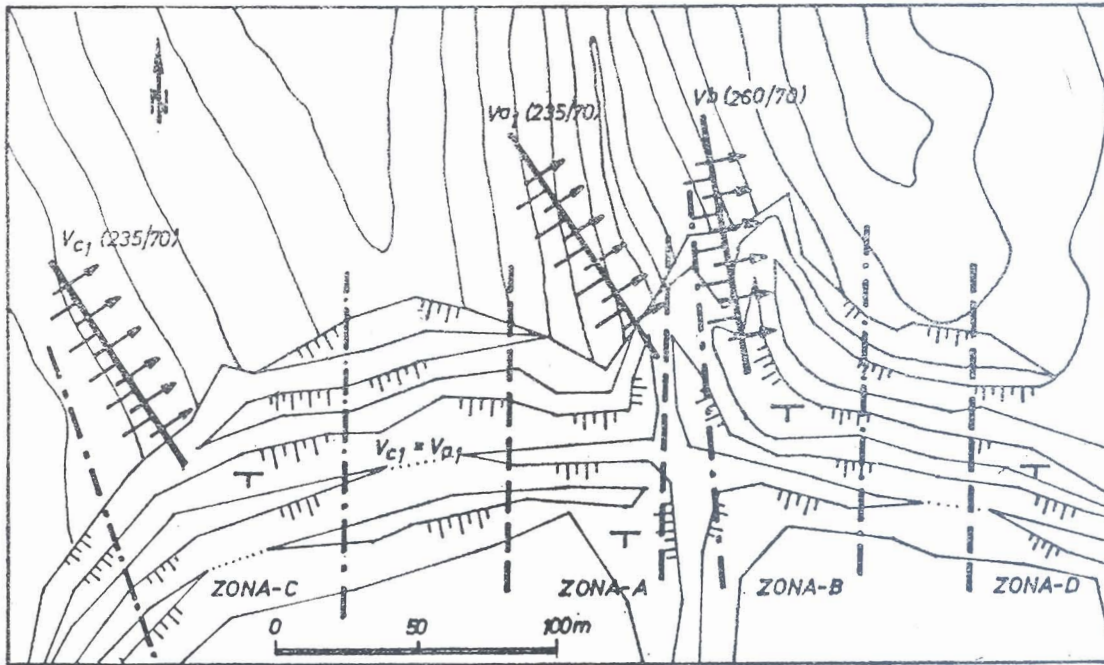
I. — otkopna fronta kamenoloma paralelna je s pružanjem slojeva koji upadaju prema radilištu,

II. — otkopna fronta kamenoloma paralelna je s pružanjem slojeva koji upadaju od radilišta u brdo, odnosno stijenski masiv,

III. — otkopna fronta kamenoloma okomita je na pružanje naslaga.

Ta tri tipa prvenstveno vrijede za karbonatne, pretežno izrazito slojevite naslage.

Prva dva tipa veoma su učestala u praksi. Prvi tip (sl. 12) otvaranja i razrade veoma je nepovoljan u praksi iz više razloga. Slojevi koji upadaju prema radilištu uzrok su čestih nekontroliranih klizanja i obrušavanja manjih ili većih kamenih masa u toku i poslije miniranja. To prije svega ovisi o veličini upada slojeva i karakteru ostalih geomehaničkih parametara (kohezija i kut unutrašnjeg trenja). Kod masovnih miniranja i tako nagnutih slojeva, a u ovisnosti od karaktera izraženosti slojnih ploha i zbog smanjenja otpora u smjeru upada slo-



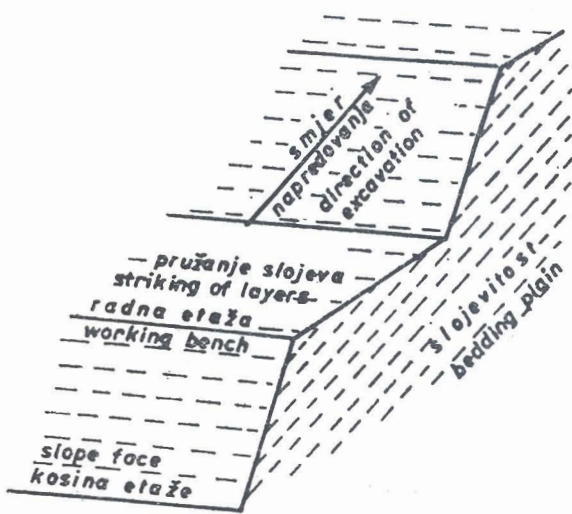
Legenda - Legend

Najpovoljniji smjer napredovanja i položaja otkopne fronte - The most favourable direction of excavation and position of excavation front.

Zona - Zone A Zona istraživanja - Zone of investigation

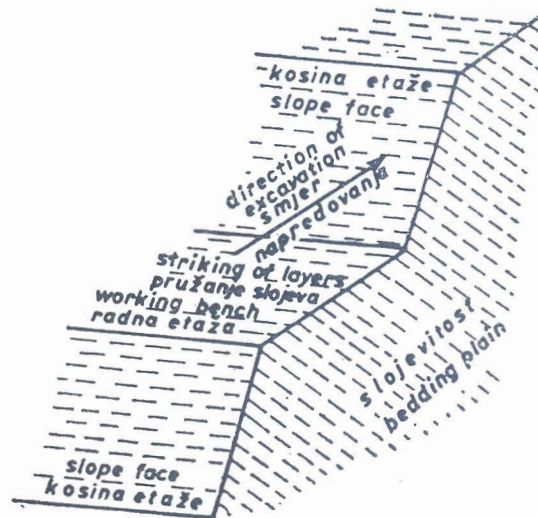
Sl. 11 Shematska situacijska karta, kamenolom Dolje

Fig. 11 Schematic location map, quarry Dolje



Sl. 12 Slojevi upadaju prema radilištu (otkopna fronta paralelna je s pružanjem slojeva)

Fig. 12 Layers dip in direction to excavation site (excavation front is parallel with striking of layers)

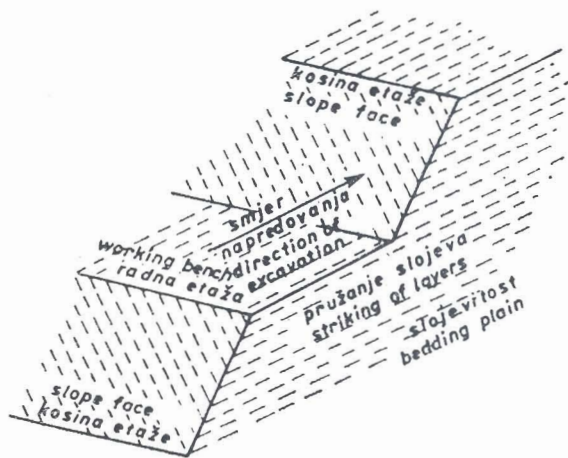


Sl. 13 Slojevi upadaju u stijenski masiv (otkopna fronta paralelna je s pružanjem slojeva)

Fig. 13 Layers dip in to the rock mass (excavation front is parallel with striking of layers)

jeva dolazi do lakšeg klizanja i obrušavanja blokova većih dimenzija, koje je nakon toga potrebno dodatno tj. sekundarno minirati. Takve pojave prekidaju kontinuitet radova, a zbog čišćenja i formiranja novih etaža ove pojave znatno poskupljuju eksploataciju, odnosno druge zahvate u čvrstim stijenama.

Drugi tip (sl. 13) kod otvaranja kamenoloma odnosno raznih drugih zahvata, mnogo je povoljniji za stabilnost kosina i često se preporuča u praksi. U ovom slučaju je moguće izvesti više i strmije radne kosine, te kod masovnih miniranja znatnije utjecati na veličinu dobivenog granulata. Kod tog tipa na klizanje i obrušavanje prvenstveno utječe prostorni položaj tektonskih diskontinuiteta u odnosu na radnu kosinu.



Sl. 14 Otkopna fronta okomita je na pružanje slojeva

Fig. 14 Excavation front is vertical to the striking of layers

Treći tip (sl. 14) postoji kada je radna kosina etaže, odnosno otkopna fronta okomita na pružanje slojeva. Ovaj tip formiranja radilišta u odnosu na tektonski sklop, prije svega na pružanje naslaga, pokazuje izuzetno povoljne značajke u odnosu na stabilnost stijenske mase. Radne kosine najčešće su vrlo strme, ravne, bez nepravilnih ispupčenja i udubljenja saostalim tragovima minskih bušotina na kosini poslije miniranja, davajući uz to kod istih parametara miniranja u istom ležištu, ali na različitim otkopnim frontama u odnosu na pružanje naslaga, najbolji granulata.

Može se pretpostaviti da su na izbor odgovarajućeg tipa otvaranja i formiranja otkopne fronte u toku eksploatacije, odnosno građevinskog zahvata, a u odnosu na tektonski sklop, u većoj ili manjoj mjeri više utjecali prirodni faktori, morfologija terena i pristupačnost stijenskoj masi unutar različitih geoloških članova, a mnogo manje planirani i odgovarajućom analizom utvrđeni pristup u rješavanju izbora jednog od spomenuta tri tipa.

Opisana tri tipa položaja radne fronte samo su izraziti primjeri za njihovu lakšu podjelu i definiranje. Između njih postoji čitav niz raznih prijelaza kod kojih je radna kosina etaže različito orijentirana u odnosu na pružanje naslaga.

Analizirani primjeri ukazuju da je najpovoljniji treći tip otvaranja i eksploatacije kamenoloma, tj. orijentacije otkopnih fronti približno okomito na pružanje naslaga. Međutim, to ne znači da je za rješavanje bilo kojeg problema u vezi sa stabilnošću radnih kosina dovoljno samo zaokrenuti frontu iz položaja nestabilnosti.

Rezultati istraživanja pokazuju da se pravi položaj otkopne fronte može dobiti samo analizom tektonskog sklopa pomoću grafičke metode (Tomašić, 1986). S obzirom da radna kosina može imati nagib na dvije suprotne strane, kod orijentacije otkopne fronte približno okomito na pružanje naslaga, analize pokazuju da je najčešće samo jedna od obiju mogućnosti ona prava, kod koje stijenska masa ostaje stabilna.

Nagib radnih kosina etaže drugi je element kojim se može utjecati na stabilnost kosina, kako bi se izbjegla kritična presjecišta u krugu trenja. Nagib kosina pojedinih etaža u mnogim je kamenolomima vrlo strm, često i preko 80° . U zadnje se vrijeme preporuča da bude 70° .

Jedan od važnih elemenata za stabilnost stijenske mase je hrapavost dodirnih površina raznih diskontinuiteta.

Tako je na primjer potrebno istaknuti da u nekim ležištima dolomita postoji fenomen vrlo strmih kosina od 80° do 90° . Ovaj se fenomen vjerojatno može objasniti kao posljedica intenzivne tektonike. Uslijed tektonike došlo je do utiskivanja dolomitičnih, oštrobričnih romboedara na kontaktnim površinama diskontinuiteta. Hrapavost ovih dodirnih površina može se vrlo jednostavno utvrditi pregledom otvorene površine minirane stijenske mase. Površine su većim dijelom nazubljene i vrlo hrapave. Hrapavost pri tome znatno povećava kut unutrašnjeg trenja φ . Ovaj je kut u ovom slučaju veći nego onaj koji bi se dobio laboratorijskim putem.

Takva razmatranja upućuju kod nekih kamenoloma na mogućnost zadržavanja orijentacije i nagiba otkopnih fronti i u nepovoljnim slučajevima, s obzirom na tektonsku poremećenost i na položaj diskontinuiteta u stijenskoj masi.

Zaključak

Rezultati provedenih istraživanja i analiziranih primjera u zonama A, B, C i D ukazuju da je situacija u vezi sa stabilnošću stijenske mase u kamenolomu dolomita dosta kritična, s

tendencijom da će u budućnosti uz dosadašnji obim i način eksploatacije biti još teža.

Uglavnom su dva razloga takvoj situaciji u ležištu dolomita Dolje.

Prvi razlog je znatno smanjenje kuta nagiba slojeva (do 54° na IV i V etaži, lijeva strana) u svim dijelovima kamenoloma prema sjeveru u smjeru napredovanja eksploatacije.

Drugi razlog je pružanje i nagib slojeva prema radilištu, a koje se gotovo potpuno podudara s pružanjem otkopne fronte u kamenolomu. Zbog toga se u ležištu mogu očekivati obrušavanja i klizanja stijenske mase u većem obimu.

Sve dok je nagib slojeva bio veći od 70° (projektirani nagib kosina etaža) klizanje i obrušavanje duž slojevitosti nije bilo moguće. Ovo je zaista rijedak slučaj da u ležištu slojevi upadaju prema radilištu, te da im je nagib manji od nagiba radnih kosina pojedinih etaža, a veći od kuta unutrašnjeg trenja φ .

Trenutno se u ležištu u toku masovnih miniranja, a i poslije, obrušavaju široki pločasti klinovi i blokovi niz pojedine etaže pojedinačno ili rjeđe istovremeno niz dvije etaže.

Provedena istraživanja i analize u zonama A, B, C i D (sl. 7, 8, 9 i 10) ukazuju da je u kamenolomu potrebno izvršiti promjene u načinu eksploatacije, prvenstveno u pogledu orijentacije otkopnih fronti u odnosu na postojeći tektonski sklop i stabilnost stijenske mase.

Primljeno 9. I. 1989.

Prihvaćeno: 6. II. 1989.

Prema provedenim analizama za stabilnost stijenske mase na lijevoj strani kamenoloma u zoni C-A utvrđen je najpovoljniji položaj otkopnih fronti prema varijantama V_{c1} i V_{c2} s položajem 235/70. Ovaj položaj otkopnih fronti dobiven je prema analizi varijanti na slikama 9 i 7 (u zonama C i A). Položaj V_{c2} (zona C) otpada, jer nije istovjetan s onim u zoni A.

U zonama B-D (desna strana kamenoloma), prema analizi u zoni B (sl. 8), utvrđen je najpovoljniji položaj otkopne fronte prema varijanti V_b (260/70).

Tako su na osnovi grafičke metode analize tektonskog sklopa ležišta dolomita Dolje u odnosu na stabilnost kosina, definirani najpovoljniji položaji otkopnih fronti i smjerovi eksploatacije posebno za lijevu i desnu stranu u kamenolomu. Rezultati dobivenih analiza prikazani su na shematskoj situacionoj karti (sl. 11).

Pri budućem otkopavanju treba se pridržavati navedenih smjerova eksploatacije i položaja otkopnih fronti, jer će se na taj način izbjeći nekontrolirano klizanje i rušenje stijenske mase, te time postići maksimalna sigurnost rada pri otkopavanju.

Zbog eventualnih promjena u tektonskom sklopu stijenske mase, a koje bi se mogle pojaviti napredovanjem eksploatacije, potrebno je od strane geologa vršiti kontrolu jednom do dva puta godišnje.

LITERATURA

a) Objavljeno:

- Hocking, G. (1976): A Method for Distinguishing between Single and Double Plane Sliding of Tetrahedral Wedges. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 13, 225—226. Pergamon Press, Oxford.
- Hoek, E. and Bray, J. (1974): *Rock Slope Engineering*. The Institution of Mining and Metallurgy, p. 402, London.
- Patton, F. D. and Deer, D. U. (1971): Geologic Factors Controlling Slope Stability in Open Pit Mines, *Stability in Open Pit Mining*, pp. 23—47, New York (Proceeding of the First International Conference on Stability in Open Pit Mining — Vancouver, 1970).
- Pentz, D. L. (1971): Method of Analysis of Stability of Rock Slopes, *Stability in Open Pit Mining*, pp. 110—141, New York (Proceedings of the Inter-

national Conference on Stability in Open Pit Mining — Vancouver, 1970).

Prelogović, E. (1970): Neotektonska kretanja u području između Orlice, Samoborske gore i Medvednice. *Geol. vjesnik*, 23, 151—161, Zagreb.

Šikić, K., Basch, O. i Šimunić, A. (1979): Tumač OGK SFRJ za list Zagreb (1:100 000). Savezni geološki zavod, 81 str., Beograd.

Tomašić, I. (1986): Analiza tektonskog sklopa u svrhu razrade i eksploatacije ležišta mineralnih sirovina. Doktorska disertacija, 190 str., Sveučilište, Zagreb.

b) Neobjavljeno:

Prelogović, E. et al., (1986): HE PODSUSED — Seizmološka, neotektonska, seizmotektonska i inženjersko-seizmološka istraživanja. Arhiv RGN-fakulteta, Zagreb.

Graphical Determination of the most Favourable Front Position of Excavation in Relation to Tectonic Fabric Characteristics and Rock Mass Stability

I. Tomašić

This paper describes an approach to the slope stability problem including field structural geology studies.

Rock discontinuities e.g. faults, joints, bedding planes, fractures and fissures, play an important role in the exploitation and economics of open pit mines.

One of the most important aspects of rock slope analysis is the systematic collection and presentation of geological data in such a way, that it can easily be evaluated and incorporated into stability analysis.

The research described in this article is based on the graphical method by Hoek and Bray (1974).

Different types of slope failure (figs. 1, 2, 3 and 4) are associated with different geological structures and it is important, that the slope designer is able to recognise potential stability problems during the early stages of a project.

It is very important to determine the points of intersection of all planes (figs. 7, 8, 9 and 10).

A friction angle of 35° is assumed for this analysis.

The great circle represents the slope face and the little one the friction circle. This overlay over the contoured stereonet and both are rotated together

over the stereonet to find circles passing through the pole of concentrations.

Sliding under these conditions occurs when the dip of the plane exceeds the angle of friction φ and hence, the first approximation of the wedge stability is obtained by considering whether the dip of the intersection line exceeds the friction angle for the rock surfaces on the slope. The slope is potentially unstable, when the point defining the intersection line of the two planes falls within the area included between the great circle defining the slope face and the circle defining an infinite series of planes all dipping at the angle of friction φ .

This preliminary method of the analysis of unstable rock masses is very convenient for definition of the most favourable front position of excavation or strike in relation to tectonic fabric characteristics and rock mass stability.

Orientation of excavation fronts and their stabilities depend on direction of excavation in relation to tectonic fabric characteristics (figs. 11, 12 and 13).

The research works are based upon observations and a large number of discontinuity measurements in technical dolomite stone deposits Dolje near Zagreb.