

UTJECAJ STRUKTURNO-GEOLOŠKIH, PETROGRAFSKIH I KLIMATSKIH ČIMBENIKA NA STABILNOST KOSINA U KAMENOLOMU GRADNA

Ivan TOMAŠIĆ¹ i Zoran PEH²

¹⁾ Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 41000 Zagreb, Hrvatska

²⁾ Institut za geološka istraživanja u Zagrebu, Sachsova 2, 41000 Zagreb, Hrvatska

Ključne riječi: Strukturni sklop, Diskontinuiteti, Površinski kop, Stabilnost kosine

U radu su prikazani i analizirani složeni međusobno povezani strukturno-geološki, petrološki i klimatski čimbenici koji znatno utječu na nestabilnost površinskog kopa kamenoloma Gradna kod Samobora u obliku klizanja i obrušavanja stijenske mase. Na temelju duljih povremenih opažanja i istraživanja utvrđena je sprega i utjecaj regionalno geoloških, tektonskih, strukturno-teksturnih, petrografskih, inženjerskogeoloških i fizičko-mehaničkih faktora kao i tehničkih uvjeta eksploatacije stijenske mase, te njihova ovisnost od utjecaja lokalnih hidrogeoloških značajki, klimatskih temperaturnih i oborinskih kolebanja na stabilnost kosina. Strukturni su odnosi višestruko kataklaziranih dolomita pogodni za tvorbu lokalnih nestabilnosti u specifičnim uvjetima djelovanja klimatskih čimbenika, posebice u vrijeme niskotemperaturnih kolebanja koja utječu na akumulaciju podzemnih voda. Ta voda u uvjetima povišenih temperatura zadržava svoj prirodni usporeni tok i ne utječe bitno na tvorbu lokalnih nestabilnosti.

Uvod

Brojni su uzroci obrušavanja i klizanja stijenske mase u površinskom kopu Gradna kod Samobora. U spomenutim procesima postoje dvije grupe čimbenika, a njihovo je djelovanje najčešće usko povezano. S jedne strane naglašeno je djelovanje klimatskih faktora, posebno kolebanje temperature i režim oborina u lokalnim okvirima kao neposrednog dinamičkog činitelja i glavne pokretačke sile. S druge strane nalaze se oporbene sile geološke građe terena i ležišta. Proces koji nastaje u ležištu pri eksploataciji i poslije rezultat je narušene ravnoteže u djelovanju spomenutih sila koje su se primarno odražavale u njegovoj unutarnjoj strukturi. Pod rezistentnim geološkim okvirom misli se na dva temeljna gledišta geološke građe – strukturu i litologiju. Utjecaj tektonike odražava se ne samo na formiranje makrostrukturnog sklopa, danas u uvjetima polaganog, ali postojanog izdizanja cjelokupne tektonske jedinice kojoj pripada ležište, uglavnom pasivnog, nego i na petrografska, fizičko-mehanička i inženjerskogeološka obilježja dolomitnih stijena.

U svezi s dijagenetskim procesima i opetovanim tektonskim pokretima kroz geološku povijest nastala je kvazihomogena stijena sa specifičnim inženjerskogeološkim i hidrogeološkim značajkama. Te su se značajke, a posebice vodopropusnost dolomita, pokazale od bitnog značaja za sigurnost i stabilnost stijenske mase pri eksploataciji. Zbog toga se posebna pažnja poklanja visini i nagibu pojedinih

Key-words: Structure fabrics, Discontinuities, Open cast mines, Stability of slopes

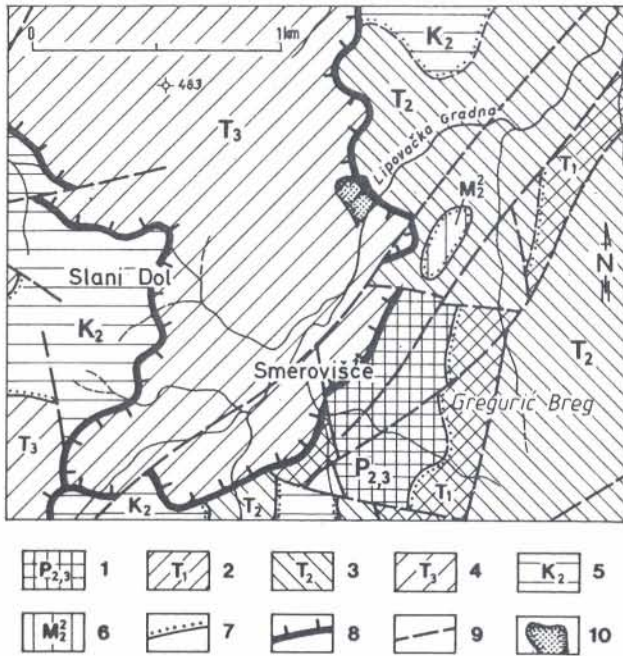
This paper presents an analysis of a complexity of interrelated structural, petrologic and climatic factors that considerably affect the instabilities in the open cast mine of Gradna, near Samobor. The instabilities provoke the slope failures such as slides and slumps of rock material.

During the protracted periodical investigations, the relationship among the factors of regional geology, tectonics, structural geology, petrography, engineering geology, rock mechanics and the rock mining technology was observed in the area. The local control of hydrogeologic properties, as well as climatic fluctuations of temperature and precipitation on the slope stability, was also recognized. It turned out that the structural relationships, characteristic of the manifold cataclased dolomite, stimulated the development of local instabilities, particularly during the period of low temperatures affecting the process of ground-water accumulation. When the temperatures are warm, the ground-water circulation is slow, exerting only the small-scale influence on the local instabilities.

etaža, odnosno geometriji položaja otkopnih fronti te radnih i završnih kosina u ležištu.

Geološke značajke

Strukturni sklop Gradne posljedica je skokovite diferencijacije stijenskog kompleksa Žumberačkog i Samoborskog gorja koja se različitim intenzitetom odvijala od mezozoika do danas. Pri tome se najveće značenje pripisuje intenzivnoj tektonskoj aktivnosti u okviru Štajerske orogenetske faze koja je označila početak neotektonske etape (g. eocen – početak helveta), a karakterizirala se tangencijalnim pomacima velikih amplituda, kao i pokretima koji su u razdoblju od srednjeg pliocena do kraja pleistocena doveli do konačnog strukturnog i geološkog oblikovanja ovog prostora (Šikić i Basch, 1975; Prelogović, 1970; Prelogović, 1975). U tom se smislu dolomitne stijene Gradne mogu promatrati kao jedinstvena stijenska masa koja pripada strukturi Golog Crnika. Njen položaj u sklopu Žumberačko-medvedničke navlake odaje strukturu ljuske široke oko 1 km, koja je svojim istočnim i južnim dijelom (Draganje Selo, Gregurić Breg) navučena na paleozojske, mezozojske i gornjokredne sedimente autohtona Žuberka (sl. 1), dok zapadnu granicu (Smerovišće) čini čelo gornjotrijaskih dolomita navučeno preko krednog fliša alohotna Japetića (Šikić i Basch, 1975). Zbog snažnih bočnih pritisaka dolomitna masa je potpuno zdrobljena, a interkalirani šejlovi mjestimice su zbog visoke plastičnosti deformirani u obliku vrlo stisnutih malih bora.



Sl. 1. Pregledna geološka karta područja istraživanja (prema Šikić i sur., 1972)

LEGENDA: 1) Srednji i gornji perm – brečokonglomerati, konglomerati, pješčenjaci, šejlovi, siltiti, vapnenci, dolomiti, gips; 2) Donji trijas – pješčenjaci, siltiti, vapnenci, podređeno dolomiti i vapnoviti lapori; 3) Srednji trijas – dolomiti, podređeno vapnenci, lapori, rožnjaci, tufovi i tuffiti; 4) Gornji trijas – dolomiti, podređeno vapnenci, dolomitični vapnenci i šejlovi; 5) Gornja kređa – breče, konglomerati, šejlovi, lapori, karbonatni klastiti, vapnenci, rožnjaci; 6) Gornji torton – organogeni i bioklastični vapnenci, pješčenjaci, vapnenački i glinoviti lapori; 7) Erozijska i tektonsko-erozijska granica; 8) Čelo navlake; 9) Rasjed bez oznake karaktera; 10) lokacija kamenoloma

Fig. 1. Generalized geological map of the study area (modified from Šikić et al., 1972)

EXPLANATION: 1) Middle and Upper Permian – breccias, conglomerates, sandstones, shales, limestones, dolomites, gypsum; 2) Lower Triassic – sandstones, siltstones, and minor dolomites and limestones marls; 3) Middle Triassic – dolomites, and minor limestones, marls, cherts, tuffs and tuffites; 4) Upper Triassic – dolomites, and minor limestones, dolomite limestones and shales; 5) Upper Cretaceous – breccias, conglomerates, shales, marls, carbonate clastites, limestones, cherts; 6) Upper Tortonian – bioclastic limestones, sandstones, limestone and clayey marls; 7) Unconformed geological boundary; 8) Thrust fault; 9) Normal fault, inferred; 10) Quarry

Istraživanja i rezultati detaljnih stratigrafskih analiza utvrdili su razlike u paleokrednoj osnovi kao postojanje različitih nivoa krede (Gušić i Babić, 1970) omogućivši rekonstrukciju geotektonske dinamike u području Žumberka i Samoborskog gorja (Herak, 1986). Karbonatni razvoj jure, vrlo često prisutne na čelu alohtonih jedinica navučenih na flišne naslage gornje krede, ukazuje na mogućnost da se izravni kontakti trijaskih dolomita i krednog fliša ne tumače transgresijom krede na trijasku podlogu, već horizontalnim pokretima stijenskih masa poslije formiranja mezozojske podloge (Herak i Bukovac, 1988).

Dovodeći u vezu rasprostranjenost alohtonih struktura Supradinarika (Herak, 1986) i prisutnost većeg broja izdanaka krednog fliša opkoljenih trijaskim dolomitima, može se zaključiti da debljina navučenih dolomita vjerojatno ne dostiže 600–800 m pretpostavljenih u ranijim radovima (Šikić i Basch, 1975), posebno ne na čelu navlaka. U tom

slučaju položaj Gradne u strukturnom sklopu (sl. 1) nalaze oprez u svezi s mogućim tektonskim kontaktima koji nisu dostupni površinskom opažanju, tim više što se sjeverozapadni rub ležišta nalazi na samom čelu navlake Golog Crnika.

Budući da slojevitost dolomita nije očuvana, pokazateljem intenzivne tektonike u ležištu mogu poslužiti ne samo već spomenute deformacije proslojaka šejlova nego i mjestimična pojava gorskih zrcala koja indiciraju smjerove transporta alohtone mase, a također i pojava tektonskih dolomitnih breča. Šejlovi su primijećeni na sjevernom rubu ležišta, zbog čega je djelomično na tom mjestu i obustavljena eksploatacija dolomita. Otkriveni su u početku eksploatacije neposredno iznad baze kamenoloma na visini 295 m. Kasnije su se tijekom eksploatacije (sl. 2) pojavili novi izdanci čime su dobiveni oskudni podaci za barem približnu rekonstrukciju zone njihovog pružanja Z–I.

Gorska zrcala nalaze se na više mjesta u kamenolomu s dominantnim pružanjem SI–JZ i I–Z, a plohamo nagnutim u smjerovima 104/55, 152/50–60, 185/35 i 152/88.

Stijenska masa je zbog snažnih bočnih potisaka tijekom gibanja višestruko kataklazirana i milonitizirana, zbog čega je velika mikro i makroraspucanost jedna od njenih glavnih osobina. Naknadnim procesima, posebice rekristalizacijom i cementacijom razdrobljene mase nastale su, osobito u jugozapadnom dijelu ležišta, dolomitne breče koje imaju veću čvrstoću od okolne stijenske mase. Diferencijalno kretanje tektonskih blokova odvija se duž rasjeda pravca SI–JZ koji određuje pružanje glavnih dolina i opći izgled erozijske mreže. Ističe se rasjed dolinom Lipovečke Gradne sa spuštenim jugoistočnim krilom (o čemu svjedoči očuvani ostatak tortonskih naslaga sjeverno od Gregurić Brega), kao i niz paralelnih rasjeda sa sjeverne i južne strane ležišta (doline Breganice i Rudarske Gradne). Rasjedi manjeg značaja koji fragmentiraju veće strukturne cjeline poprečnog su pružanja. U zoni ležišta otkrivaju ih jarci orijentirani pravcem I–Z (sl. 2). Iako su manjih dimenzija, njihov utjecaj na stabilnost stijenske mase u uvjetima narušene ravnoteže tijekom eksploatacije može biti znatan.

Inženjerskegeološke, hidrogeološke i petrografske značajke

Da bi se što bolje potkrijepile inženjerskegeološke značajke potrebno je opisati kako se ponaša stijenska masa prilikom masovnih miniranja. Pokazalo se da se obrušena stijenska masa, već nakon miniranja drobi, u prosjeku na veličinu slijedećih granulata: frakcija od 0 do 4 mm u iznosu od 50 do 60%, frakcija od 4 do 8 mm od 20 do 30% i frakcija iznad 8 mm od 20 do 30%. Iz navedenih podataka jasno se može zaključiti da je sklonost ovog dolomita drobljenju jedna od glavnih značajki stijenske mase u ležištu. Drobljivost je prije svega rezultat mikroraspucanosti, odnosno posljedica tektonike i popratnih reverzibilnih dijagenetskih procesa u dolomitu koji su doveli do slabljenja veze između prvobitnih i novonastalih dolomitnih kristala. To je uzrok da je dolomit sklon potpunom drobljenju već kod lakših



Sl. 2. Inženjerskogeološka karta područja klizišta

LEGENDA: 1) Dolomit; 2) Šejl; 3) Obrušena stijenska masa; 4) Ploha sloma; 5) Rasjed; 6) Tragovi erozije; 7) Izvor; 8) Granica eksploatacijskog polja; 9) Položaj profila; 10) Smjer obrušavanja i tečenja; 11) Konture klizanja i obrušavanja

Fig. 2. Engineering-geological map of the landslide area

EXPLANATION: 1) Dolomite; 2) Shale; 3) Slumped rock; 4) Failure plane; 5) Fault; 6) Erosion marks; 7) Spring; 8) Boundary of the open mining field; 9) Cross-section; 10) Direction of flow and slumping; 11) Borders of sliding and slumping

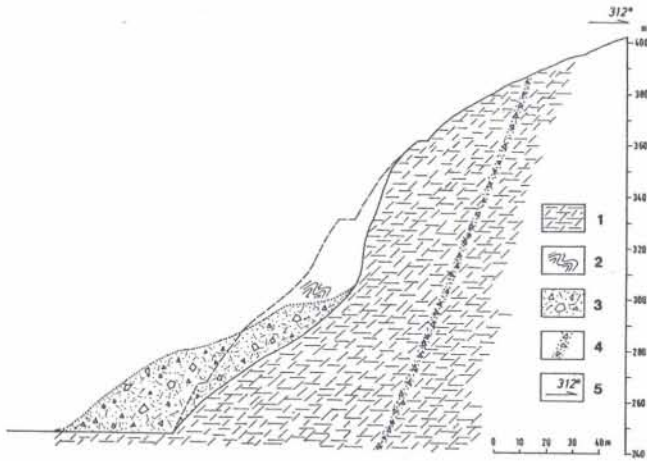
udaraca. Mikroraspucanost uzrokuju sustavi pukotina razmaka do decimetarskih dimenzija koji su bez zijeva i ispune. Poligonalna zrna dolomita zadiru jedna u drugo pa se formiraju nazubljene veze njihovih hrapavih kontakata. Ta je dobra veza vrlo važna u geomehničkom pogledu.

Međutim, s inženjerskogeološkog i geomehaničkog stajališta za stabilnost ležišta najopasnija je makroraspucanost koju čine pukotine metarskih dimenzija sa zijevom i ispunom od kataklaziranog i milonitiziranog dolomitnog grusa i praha. Između susjednih ploha pukotina nema nikakve povezanosti, nazubljenosti ni hrapavosti pa takve pukotine u stijenskoj masi predstavljaju jako oslabljena mjesta.

Geomehaničke karakteristike stijenske mase u ležištu mogu se objasniti i nagibom postojećih kosina, kako u slučaju pojedinih etaža tako i na prirodno stabiliziranim siparima i nasipima. Primjerice, otkopna fronta u sjevernom dijelu kamenoloma (sl. 3) ima položaj 140/50–60° s visinom i do 90 m. Mjestimice se na prvoj etaži mogu uočiti pukotine s nagibom prema radilištu što je vrlo nepovoljno za eksploataciju.

Diskontinuiteti u ležištu jako utječu na stabilnost kosina pa je potrebno poznavati njihovu učestalost i disperziju u kamenolomu kako bi se odredila najpovoljnija orijentacija otkopne fronte. Pri tome je spletu mikrodiskontinuiteta koji su u ležištu najviše

zastupljeni, prožimajući u potpunosti stijensku masu, posvećena manja pažnja. Oni, doduše, u znatnoj mjeri utječu na fizičko-mehanička obilježja stijene, ali su od sekundarnog značaja kad je riječ o geomehaničkim karakteristikama važnim za stabilnost kosine. Stoga je glavna pažnja posvećena diskontinuitetima »m« dimenzija koji su u pravilu ispunjeni dolomitnim grusom i prahom. Njihovim mjerenjem prikupljeni su podaci za grafičku analizu stabilnosti sloma kosine stereografskom projekcijom po metodi Hoeka i Braya (1974) prikazanu na sl. 4. Potrebno je naglasiti da se mjereni i u analizi korišteni diskontinuiteti odnose ne samo na područje obrušavanja, već i na šire područje kamenoloma, kako bi se dobio što veći broj podataka potrebnih za geomehaničku analizu. Pri tome je korišten položaj otkopne fronte 140/55–75° te kutovi unutrašnjeg trenja $\varphi = 24^\circ$ i 32° . Utvrđivanje ovih kuteva započelo je mjerenjem »in situ« tlačne čvrstoće hidrauličkom raspinjačom. Analiza stabilnosti rađena je po metodi Bishopa i Spencera (Prokopović, 1988). Korišteni su podaci $\gamma = 27,7 \text{ kN/m}^3$, $c = 88 \text{ kPa}$ i $\varphi = 36^\circ$, koji je uzimanjem u obzir utjecaja djelovanja dinamičkih sila pri potresu 8–9 stupnjeva MCS skale smanjen na 32° . Kut $\varphi = 25^\circ$ vrijedi za djelomično vodom saturirano stanje. Za južni dio kamenoloma preporučena je radna etaža visine 10 m, nagiba kosina 60 do 70° i širine bermi 1,6 m.



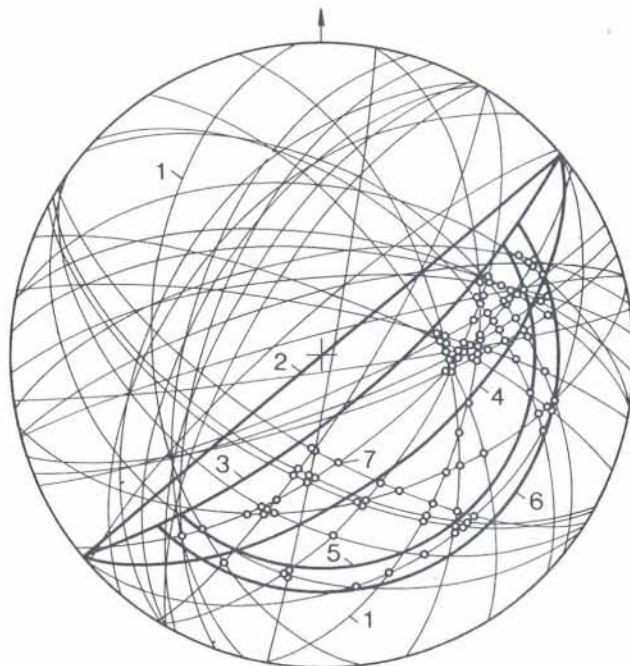
Sl. 3. Presjek otkopne fronte i klizišta

LEGENDA: 1) Dolomitna stijenska masa; 2) Šejl; 3) Stijenska masa nakon klizanja; 4) Zdrobljeni dolomit duž rasjeda; 5) Orijentacija profila

Fig. 3. Section through the excavation front and landslide
EXPLANATION: 1) Dolomitic rock; 2) Shale; 3) Slided dolomite rock; 4) Fractured dolomite along the fault; 5) Azimuth

Cijela je visina kamenoloma (180 m) podijeljena u tri sekcije od po 60 m s nagibom od 44° , a generalno 32° .

Prikazani rezultati ukazuju na veliku disperziju u orijentaciji tj. pružanju i nagibu pukotina. Nema izrazitih sustava i grupiranja podataka pa to ukazuje na prividnu homogenost strukturnog sklopa. U području krugova trenja nalazi se veliki broj kritičnih



Sl. 4. Grafička analiza povoljnosti orijentacije otkopne fronte
LEGENDA: 1) Diskontinuiteti; 2) Pružanje otkopne fronte; 3) Otkopna fronta nagiba 75° ; 4) Otkopna fronta nagiba 55° ; 5) Krug trenja 32° ; 6) Krug trenja 25° ; 7) Kritična presjecišta

Fig. 4. Graphical analysis of the most favourable orientation of the excavation front
EXPLANATION: 1) Discontinuities; 2) Strike of the working slope; 3) Dip of the working slope 75° ; 4) Dip of the working slope 55° ; 5) Friction circle 32° ; 6) Friction circle 25° ; 7) Critical intersections

presjecišta koja upućuju na blokove različitih oblika, pretežno klinove oblika tetraedra, kod kojih presječnica između ravnina ima veći nagib od kuta unutar-njeg trenja, što može imati za posljedicu obrušavanje stijenske mase. Grafički prikaz diskontinuiteta pokazuje da se raspucanost stijenske mase odlikuje tolikom disperzijom da se niti zakretanjem otkopne fronte u neki drugi položaj ne mogu izbjeći kritična presjecišta. Tome je uzrok već spomenuto višestruko djelovanje tektonskih procesa naknadno praćenih dijagenetskim procesima koji su od stijenske mase stvorili velik broj manjih tektonskih jedinica ili cjelina s posebnim karakteristikama. Stoga ih nije moguće odvojeno analizirati niti odvojeno otkopavati uzimajući, u odnosu na strukturni sklop ležišta, svaki puta u obzir druge elemente otkopavanja.

Tektonika i dijagenetske značajke dolomita znatno utječu i na režim hidrogeoloških procesa u ležištu. Zbog sklonosti kataklaziranih i djelomično rekristaliziranih dolomita drobljenju, usitnjavanju i raspadanju u grus koji ispunjava pukotine, u dolomitima nisu uočene neke značajnije zone s bržim kretanjem vode. Voda se u dolomitima kreće mnogo sporije nego u nekim drugim stijenama s karakterističnim pukotinskim makro i mikro porozitetom, primjerice vapnencima. Stoga dolomit u kamenolomu posjeduje sekundarnu poroznost te neujednačenu i površinski slabu vodopropusnost. Karakteristična su cijedna izvorišta silaznog tipa, a veći vodni rezervoari ne postoje, jer je stijenska masa sklona drobljenju i urušavanju te ponovnom ispunjavanju većeg dijela pukotinskog poroziteta. Maloj vodopropusnosti doprinosi i slaba topivost dolomita.

Karakterističan sekundarni porozitet u dolomitima razvio se kao interkristalni, pukotinski i nastao izluživanjem. Pri tome treba istaknuti da je interkristalni porozitet kao posljedica dolomitizacije značajka kasnodijagenetskih dolomita.

Prema strukturnim značajkama to su makrokristalasti kasnodijagenetski dolomiti. Struktura tih dolomita odlikuje se jednoličnim rasporedom različito orijentiranih hipidiomorfnih do alotriomorfnih kristala promjera od 0,1 do 0,2 mm. Homogenitet opisanih strukturnih značajki narušen je vrlo tankim tektonskim pukotinama duž kojih je cirkulirala voda. Voda je djelomice oksidirala organsku supstanciju u dolomitnim kristalima duž stijenkli pukotina. Takva su mjesta vrlo jasna markacija mehaničkih diskontinuiteta u stijeni. Uzduž takvih pukotina i razdrobljenih zona mjestimice je došlo do rekristalizacije okolnog mikrokristalastog dolomita. Rekristalizirani neodolomitni agregat koncentriran je u obliku nepravilnih gnijezda i zona. Kontakti prvobitnih i rekristaliziranih dolomita posebice kad su ravni, kao i kad je razlika u njihovoj veličini znatna, smanjuju homogenost stijene. Takvi su dijelovi bjeličaste boje i često su u izmjeni s partijama sivih nijansi zbog čega mnogi uzorci dolomita makroskopski izgledaju brečasto. Uočljiv je i niz novih i starih pukotina različitih generacija, gdje mlađe presijecaju starije. Pojedini uzorci iz tektonskih zona određeni su kao kataklastične dolomitne mikrobečje nastale drobljenjem i cementacijom kasnodijagenetskog dolomita. Na pojave nehomogenosti ukazuju i zrna polikristal-

nog dolomita, kada se unutar većih zrna mogu uočiti tragovi i konture prijašnjih manjih zrna odnosno predhodnih reliktnih struktura. Polisintetske sraslačke lamele mjestimice su deformirane. Duž zone kataklaziranja tokovi pornih voda prouzročili su procese rekristalizacije i dedolomitizacije, a na presjecištima novonastalih žilica, pukotina i gnijezda nastalo je vrlo mnogo dobro uočljivog šupljikavog ili »vug« poroziteta kao posljedica korozije mineralnih zrna.

Na temelju većeg broja kemijskih analiza (18 kompletnih i 90 djelomičnih, Erić, 1981) utvrđen je sadržaj CaCO_3 u granicama od 52,02 do 58,20% (srednja vrijednost 54,13%) te sadržaj MgCO_3 u granicama od 39,92 do 45,67% (srednja vrijednost 43,69%). Prema tome na temelju srednjih vrijednosti u stijeni je ukupno 97,82% dolomita. Glede određenog sadržaja dolomita $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ u stijenskoj masi ležišta ovaj porozitet i nije tako velik, jer su zbog naknadne rekristalizacije pore u pravilu slabo povezane i ispunjene rekristaliziranim dolomitom. S druge strane, porozitet nastao uslijed tektonike i izluživanja uglavnom je zbog rekristalizacije sklon samoispunjavanju zdrobljenim dolomitnim materijalom u obliku pijeska i praha. Stoga se može pretpostaviti da se u ovim dolomitima ne nalaze veće količine vode u statičkom obliku. Izuzetak je situacija u kojoj se zbog niskih temperatura zamrzava površina kroz koju se procjeđuje voda. Budući da je vodi onemogućeno normalno istjecanje, mogu se ispod smrznute površine kroz dulji vremenski period nakupiti veće količine vode.

Analize uzoraka kamena upućuju na zaključak da su dolomiti u kamenolomu Gradna primarno vodonepropusne stijene s dosta rijetkim pojavama koncentriranih izvora silaznog tipa i malog kapaciteta.

Poseban utjecaj imaju šejlovi u sjevernom dijelu kamenoloma koji u hidrogeološkom smislu predstavljaju potpunu barijeru. Šejlovi su dugim i sporim nakupljanjem vode omogućili na kontaktu s dolomitom razvoj manjeg izvora preljevno tipa malog kapaciteta (ispod 0,1 l/sec). Teško je utvrditi njihov kontinuitet prema dubljim dijelovima stijenske mase, a time i mogući utjecaj na hidrogeološke značajke cijelog područja predviđenog za eksploataciju.

Uzorak šejla analiziran je rendgenskom difrakcijom. Pomoć pri tim istraživanjima pružio je kolega Dragutin Slovenec te mu na tome najtoplije zahvaljujemo. Prema rezultatima difrakcijskih slika uzoraka praha šejla u sastavu pretežu tinjčasti minerali s 35% mas. %, kvarc s 30% mas. %, uz prisustvo klorita (znatno), smektita (malo), kalcita (vrlo malo) i dolomita (vrlo malo).

Analiza uzroka nestabilnosti u ležištu Gradna

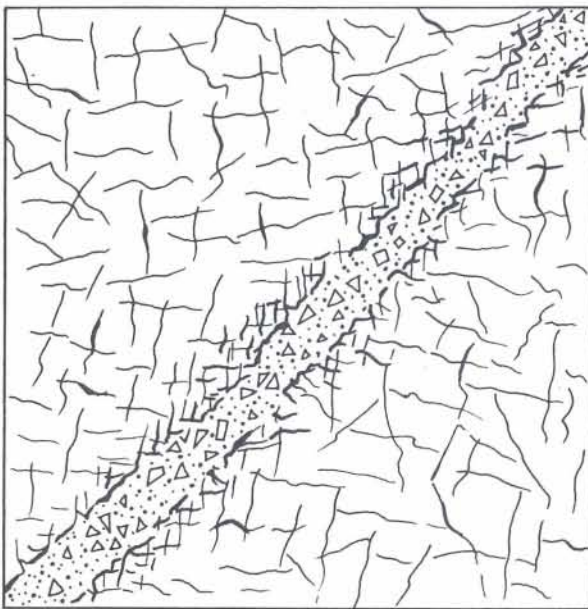
Brojni čimbenici obrušavanja mase obuhvaćeni analizom ukazuju na međusobnu vrlo usku povezanost. Strukturno-geloška i petrografska građa ležišta ukazuje na postojanje značajnih preduvjeta za klizanje i obrušavanje stijenske mase. Terenskim i petrografskim istraživanjima te analizom diskontinuiteta, utvrđeno je da je stijenska masa u potpunosti do najsitnijih dijelova raspucana. U tom pogledu ona je gotovo izotropna, odnosno kvazihomogena. Naj-

opasniji diskontinuiteti ispunjeni su kataklaziranim i milonitiziranim dolomitom. Zbog toga je faktor nazubljenosti između dviju dodirnih ploha diskontinuiteta gotovo zanemariv. Njihova orijentacija i nagibi zastupljeni su gotovo u svim smjerovima. No ipak, cijela je stijenska masa u ležištu raskomadana u blokove koji su jasno markirani jarcima (sl. 2). Ti su jarci predisponirani najmlađim, neotektonskim rasjedima. Na površini u jarcima teren je intenzivno vlažan, a u jednom od njih, prvom iza klizišta, postoji izvor tijekom cijele godine na visini od 315 m (oko 70 m iznad osnovne etaže koja se nalazi na 245 m). Stoga je strukturni sklop, posebno u sjevernom dijelu neposredno uz obrušavanje odigrao značajnu ulogu na postanak klizišta. Serija gotovo paralelnih rasjeda (sl. 2), od kojih je onaj prvi položaja 185/70, upućuje na snažne lokalne dislokacije stijenske mase s već opisanim posljedicama u formiranju diskontinuiteta istog položaja i sa zdrobljenom dolomitnom ispunom. Klizna ploha položaja 185/80 uglavnom je u gornjem vidljivom središnjem dijelu ravna i gotovo paralelna s prethodno spomenutim rasjedom položaja 185/70 od kojeg je udaljena 40–tak metara. Tijelo odrona, ploha sloma i stijenska masa od spomenutog rasjeda čine stoga blok povremeno jako saturiran vodom, a koja se prema podacima o spomenutom izvoru nalazi vrlo visoko. Voda je prethodno, ovisno o intenzitetu oborina i vremenskim prilikama, povremeno registrirana u toku eksploatacije ovog dijela ležišta na raznim nivoima. Kao primjer može se spomenuti vlaženje i cijedenje vode iz minskih bušotina bušenih u prvoj etaži, s osnovne etaže koso prema gore. U nižim dijelovima ležišta voda je otežavala bušenje. Tu je mnogo češće registrirana negoli na drugoj etaži.

Gotovo sva voda iz površinskih dijelova stijenske mase, a iznad osnovne etaže, izlazila je u okoliš evapotranspiracijom na koju su najviše djelovale razne komponente zračenja kao što su temperatura kamena i zraka, vlaga u zraku i brzina vjetera. Ovaj se proces može zapaziti gotovo svakog dana na otvorenim kamenim površinama otkopnih fronti (Tomašić, 1988), a razlike su posebno vidljive pri porastu temperature i brzine vjetera, posebice između jutarnjih i podnevnih sati. Vlažna stijenska masa postaje stoga u gornjim dijelovima ležišta suha i svjetlija u podnevnim satima. Na temelju ovih zapažanja može se zaključiti da postoji površinski, vodom saturirani dio stijenske mase u gornjim dijelovima ležišta, koji se u donjem dijelu ležišta proširuje i spaja s konstantno ali sporo pritječućom vodom iz dubljih dijelova, tj. zaleđa eksploatiranog bloka. Samo nakon jakih kiša voda se vrlo kratkotrajno cijedi koncentrirano iz sekundarnih pukotina koje izlaze direktno na površinu stijenske mase u kamenolomu.

Takvi se dolomiti u hidrogeološkom pogledu smatraju vrlo slabo propusnim, pa i čak gotovo nepropusnim. Dugotrajnim zamrzavanjem površinskog dijela značajno je porastao nivo vodnog lica između površinskog i dubinskog dijela stijenske mase, koji je vodom saturiran preko rasjeda u zaleđu otkopne fronte (sl. 2 i 3). Ispunjavanje stijenske mase i diskontinuiteta vodom ovisilo je najviše o jesenskim

oborinama, ali i od duljine trajanja zamrzavanja nakon čega je došlo do snažnog porasta pornog tlaka, koji je prouzročio translatorno i rotaciono pomicanje velike mase kamena preko stabilne podloge. Povećanje djelovanja pritiska porne vode u stijeni (Hoek, 1970), posebice u vlačnim pukotinama »tension cracks« u ovom slučaju (sl. 5) te su pukotine ispunjene vodom te kataklaziranim i milonitiziranim dolomitom. To izaziva smanjenje normalnih sila koje djeluju na površinu sloma, što uzrokuje smanjenje oporbenih sila koje nastoje smanjiti otpor klizanja i kuta unutrašnjeg trenja.



Sl. 5. Karakteristični presjek diskontinuiteta
LEGENDA: 1) Kataklazirani i milonitizirani dolomit male do srednje propusnosti i vrlo male čvrstoće; 2) Raspucani (kataklazirani) dolomit vrlo male propusnosti i male do srednje čvrstoće

Fig. 5. Typical cross-section of composite discontinuities
EXPLANATION: 1) Cataclased and mylonitised dolomite of low to moderate permeability and very low strength zone; 2) Fractured (cataclased) dolomite of very low permeability and low to moderate strength zone

Računski je utvrđeno da je 15. 1. 1989. godine nekontrolirano obrušeno približno 119.000 m³ dolomita u rastresitom stanju.

U međuvremenu su oko područja obrušavanja obavljena mnoga opažanja od kojih je najznačajnije bilo 15. 3. 1991. godine, nekoliko dana nakon razdoblja niskih temperatura. To je razdoblje bilo znatno kraće od onog za vrijeme obrušavanja. Iz stijenske mase na raznim je nivoima izbijala voda u obliku niza izvora koji su kasnije prvo presušili na visini od oko 300 m, zatim na 250 m, da bi se na kraju još samo privremeno održali izvori na 245 i 239 m. Nakon nekoliko dana i oni su presušili. Obrušena kamena masa (sl. 3) propusnija je od stijenske mase u ležištu pa je nakon porasta temperature došlo do njezinog naglog istjecanja, što je jedan od glavnih dokaza značajnog utjecaja mraza na porast nivoa podzemne vode u dolomitnom stijen-

skom masivu ležišta Gradna i potencijalnih opasnosti koje iz toga slijede. Stoga su, na tvorbu povoljnih uvjeta za obrušavanje stijenske mase, značajan utjecaj imali klimatski uvjeti, odnosno količina oborina i zimska minimalna temperaturna kolebanja, a također i morfologija terena. Klimatske prilike Samoborskog gorja u kojem se nalazi kamenolom Gradna pripadaju umjerenoj kontinentalnoj klimi s gotovo ravnomjerno raspoređenim oborinama tokom cijele godine (više od 1097 mm godišnje) s oborinskim maksimumom u listopadu, te na prijelazu proljeće-ljeto.

Prema podacima Republičkog hidrometeorološkog zavoda (stanica Samobor) izračunate su prosječna maksimalna dnevna temperatura od +4,2°C i prosječna minimalna dnevna temperatura od -2,7°C za vremenski period od 46 dana prije obrušavanja stijenske mase u kamenolomu Gradna. Pretpostavlja se, međutim, da su prosječna minimalna i maksimalna dnevna temperatura u prosjeku niže za gotovo 3°C, ako se uzme u obzir planinsko okružje kamenoloma i njegova udaljenost 6 km od mjerne stanice u Samoboru. Ovu pretpostavku potkrijepljuju opažanja tijekom cijele godine, a posebice u zimskom periodu. 46-dnevni period niskih temperatura potrebno je posebno istaknuti. U tom su periodu bili zamrznuti svi površinski dijelovi stijenske mase, a također i rubni dijelovi prekriveni tankim humusnim pokrovom (10–20 cm). Temperature su posebno bile niske dvadesetak dana prije obrušavanja. Zbog toga je porast nivoa podzemne vode u dolomitima iza površine radne kosine otkopne fronte, odnosno odgovarajuće završne kosine, ovisio najviše o dubini zamrzavanja te intenzitetu i trajanju oborina i kasnijeg razdoblja niskih temperatura na tom području.

U trenutku obrušavanja, rotacija i translacija stijenske mase pospješene su tlakom porne vode, te se prema obliku (sl. 2 i 3) i kretanju stijenske mase može konstatirati i djelomično tečenje. Obrušena stijenska masa bila je na dan obrušavanja 15. 1. 1989. trenutno zamrznuta u površinskom dijelu zbog vrlo niske temperature od -6°C.

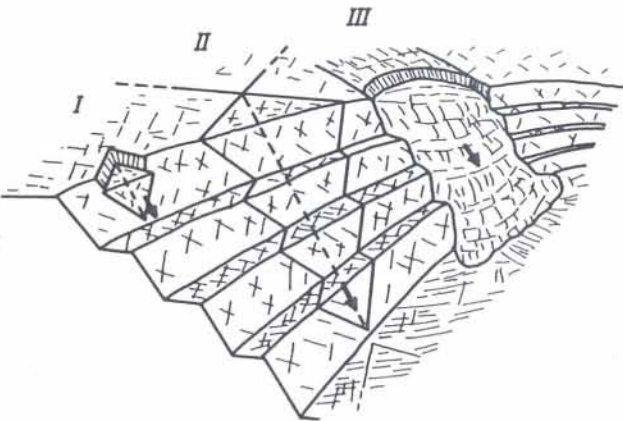
Nije u potpunosti jasan utjecaj mikroboranih šejlova utvrđenih na površini od 3 do 4 m² u središnjem dijelu tijela klizišta nakon otkidanja stijenske mase. U toku eksploatacije ovi su šejlovi bili otkriveni na različitim mjestima, na temelju čega se može zaključiti da je položaj njihove aksijalne ravnine bio približno zapad-istok s nagibom prema sjeveru. Obzirom na njihovu nepropusnost i malu zastupljenost, može se pretpostaviti da nisu presudno utjecali na obrušavanje. Zasad se može pretpostaviti da se ne pružaju kontinuirano prema dubini. Po svom sastavu, zbog sadržaja tinjčastih minerala te klorita i smektita, oni su u inženjerskogeološkom i hidrogeološkom pogledu vrlo nepovoljni.

Pojava obrušavanja posljedica je i načina eksploatacije te geometrije otkopnih fronti radne i završne kosine. U analiziranom slučaju završne kosine nisu izvedene kako bi trebalo, s previše strmim nagibima. Na mjestu obrušavanja nagib završne kosine mjestimice je bio od 55° do 75° stupnjeva. Etaže s odgovarajućom širinom bermi nisu ostavljene. Njihove se konture (sl. 3) jedva naziru. Ukupna visina završne

kosine sa spomenutim značajkama iznosi u srednjem dijelu klizišta do 110 m.

U kamenolomu je razvijen visinski, odnosno alpski tip eksploatacije. Takav sistem eksploatacije sastoji se u tome da se izvede strmi nagib radne kosine. Izrađuje se, zbog operativnosti, što je moguće manji broj etaža, zbog čega su one visoke i vrlo male širine bermi (radne površine etaža). Na taj se način postiže veća koncentracija radova.

Lepezastim načinom miniranja od nožice etaže prema gore također se omogućuje da kosine budu strmije. Zbog velike kataklaziranosti koriste se relativno male količine eksploziva, a kameni materijal se ipak jako usitni (granulacije ispod 10 cm). Povećanjem visina etaža i suženjem bermi smanjuju se troškovi bušenja, miniranja i transporta (guranje buldožerom). Na taj se način štedi, jer se postiže veća koncentracija radova, pojednostavljuje organizacija i upotreba mehanizacije. Zbog takvog načina eksploatacije moguće su češće pojave raznih tipova nestabilnosti, a završetkom radova potrebno je izvesti mnogo blaže završne kosine. Stoga rezultat dobiven geomehaničkim »in situ« mjerenjima za generalni nagib kosine 32° (Prokopović, 1988) dovoljno pokazuje o kakvim se karakteristikama stijenske mase radi u kamenolomu Gradna.



Sl. 6. Tri glavna tipa klizišta (prema Pattonu i Deeru, 1970) I. – lokalni slom, II. – široki klinasti slom, III. – slom uslijed smicanja i raspadanja

Fig. 6. Three principal types of slope failures in open pit mines (after Patton and Deer, 1970)

I. – local slope failure, II. – large-scale wedge failure, III. – failure in sheared and decomposed rock mass

Mnogi elementi upućuju na zaključak da bi, prema Patton-u i Deere-u (1970.) nestabilnost otkopne fronte u kamenolomu Gradna mogli svrstati u treći tip nestabilnih kosina sa značajkama široke tektonske zone, no i s nekim elementima drugog tipa (sl. 6) s obzirom da postoje kritični diskontinuiteti te da je čitava stijenska masa intenzivno kataklazirana, tektonizirana i stoga sklona smicanju i obrušavanju bez nekih određenih pravilnosti.

Zaključak

Analizirani su i prikazani brojni međusobno usko povezani i složeni čimbenici koji znatno negativno utječu na stabilnost kosine kamenoloma dolomita Gradna kod Samobora, a u obliku klizanja i obrušavanja stijenske mase.

Istražnim radovima i dugotrajnim opažanjima utvrđena je sprega regionalno geoloških, tektonskih, strukturalno-teksturnih, petrografskih, inženjersko-geoloških, geomehaničkih i fizičko-mehaničkih faktora stijenske mase kao i tehničkih uvjeta eksploatacije u ovisnosti od utjecaja lokalnih hidrogeoloških značajki te klimatskih temperaturnih i oborinskih kolebanja.

Eksploatabilna stijenska masa sastoji se od mikrokristalastih kasnodijagenetskih dolomita gornjeg trijasa koji su bili tektonskim pokretima višestruko kataklazirani i rekristalizirani.

Dijelovi mikroraspucanih dolomita sklonih drobljenju međusobno su odvojeni različito orijentiranim pukotinama velikih dimenzija prostiranja, koje zbog svoje ispunjenosti kataklaziranim i milonitiziranim dolomitom znatno smanjuju koheziju i kut unutrašnjeg trenja u stijenskoj masi ležišta te imaju znatan utjecaj na pojavu lokalnih nestabilnosti.

Utvrđeno je da su strukturni odnosi u ležištu pogodni za stvaranje lokalnih nestabilnosti u specifičnim uvjetima djelovanja klimatskih faktora, posebice u vrijeme niskih temperaturnih kolebanja koja utječu na akumulaciju podzemnih voda. Ta voda u normalnim uvjetima zadržava svoj prirodni usporeni tok i ne utječe bitno na nestabilnost. U razdoblju niskih temperatura smrznut je površinski dio otkopne fronte, čime je spriječen izlaz i procjeđivanje vode iz dolomita, posebice evapotranspiracijom.

U zaleđu otkopne fronte, u razdoblju duljem od 46 dana nakupljala se voda, zbog čega je došlo do porasta nivoa podzemne vode u sekundarnom porozitetu, porasta pornog tlaka, te obrušavanja. Samo obrušavanje dogodilo se za vrlo niskih temperatura, čime se isključuje poznata konstatacija da se kamen u kamenolomima obično obrušava nakon porasta temperature, odnosno razdoblja odmrzavanja stijenske mase u površinskom dijelu.

Značajke morfologije terena i strukturnog sklopa užeg i šireg područja odraz su blizine čelu navlake, te brojnih rasjeda različitih dimenzija, koji su posebice u zoni kamenoloma, markirani jarcima orijentiranim pravcem I-Z, fragmentirajući veće strukturne cjeline. U uvjetima nepovoljne tehnologije eksploatacije, strme radne i završne kosine paralelene sa spomenutim strukturama, još su jedan u nizu nepovoljnih čimbenika nestabilnosti.

Analiza diskontinuiteta prema Hoek-u i Bray-u (1974) ukazuje da nije moguće sve probleme stabilnosti riješiti promjenom orijentacije otkopne fronte u odnosu na nepovoljne i različito orijentirane diskontinuitete, već treba održavati radne i završne kosine povoljnijeg nagiba te omogućiti procjeđivanje vode u nepovoljnim klimatskim vremenskim odsjecima.

Na temelju prethodno analiziranih čimbenika zaključujemo, da je klizanje i obrušavanje u opisanim uvjetima moguće u znatnoj mjeri izbjeći izradom odgovarajućeg sustava horizontalnih ili blago nagnutih bušotina na raznim visinama, čime bi se u razdoblju cijele godine omogućilo cijedenje vode iz stijenskog masiva.

Primljeno: 8. I. 1992.

Prihvaćeno: 9. VI. 1992.

LITERATURA

Objavljeno:

- Gušić, I. i Babić, Lj. (1970): Neke biostratigrafske i litogenetske osobine južnog Žumberka. *Geol. vjesnik*, 23, 39–54, Zagreb.
- Herak, M. (1986): A new concept of geotectonics of Dinarides. *Acta geologica*, 16, 1–42, Zagreb.
- Herak, M. i Bukovac, J. (1988): Tektonsko okno Duralije u Žumberku. *Geol. vjesnik*, 41, 231–236, Zagreb.
- Hoek, E. (1970): Estimating the stability of excavated slopes in opencast mines. Institution of Mining and Metallurgy, A109–A131, London.
- Hoek, E. and Bray, J. (1974): Rock slope Engineering. The Institution of Mining and Metallurgy, p. 402, London.
- Patton, F.D. and Deere 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).
- Prelogović, E. (1970): Neotektonska kretanja područja između Orlice, Samoborske gore i Medvednice. *Geol. vjesnik*, 23, 151–162, Zagreb.
- Prelogović, E. (1975): Neotektonska karta SR Hrvatske. *Geol. vjesnik*, 28, 97–108, Zagreb.
- Šikić, K. i Basch, O. (1975): Geološka zbivanja od paleozoika do kvartara u zapadnom dijelu Zagrebačke gore (Geological events from Paleozoic to Quaternary in the western part of Zagreb area). 2. god. znan. skup Šekcija za primj. geol., geof., geokem., Znan. Savjeta za naftu Jugosl. akad. znan. i umjetn., 87–96, Zagreb.

Neobjavljeno:

- Erić, D. (1981): Elaborat o klasifikaciji i kategorizaciji rezervi dolomita u ležištu – kamenolomu »Gradna« u Smerovišću kod Samobora. Arhiv Ind. građ. materijala »Samoborka«, Samobor.
- Prokopović, S. (1988): Analiza stabilnosti kamenoloma dolomita Gradna kod Smerovišća. Arhiv Geoeksperta, 22 str., Zagreb.
- Tomašić, I. (1988): Studija tektonskog sklopa stijenske mase u kamenolomu Gradna kod Samobora. Arhiv RGN fakulteta, 20 str., Zagreb.

The Impact of Structural, Petrographic and Climatic Factors on the Slope Stability in the Open Cast Mine of Gradna

I. Tomašić & Z. Peh

This paper presents an analysis of a complexity of interrelated factors that appear in the quarry of Gradna, near Samobor, and badly affect the stability of slopes, causing the rock material to slide and slump irregularly.

The research work and prolonged observations revealed the well established relationship between various factors of regional geology, tectonics, structural geology, engineering geology, rock mechanics and the rock mining technology on the one side, and the local control imposed by hydrogeological properties and climatic variations of temperature and precipitation on the other.

Exploitable part of the stone deposit belongs to Upper Triassic, which is represented by the microcrystalline, laterdiagenetic dolomite that had undergone cataclasis and recrystallization on several occasions due to strong tectonic displacements.

The microfractured dolomites form tectonic blocks mutually separated by the differently oriented large-scale fractures, filled with the cataclased and mylonitised dolomitic material that considerably decrease the rock cohesion and the friction angle, causing the local instabilities to arise.

It is proved of the structural relations in the deposit to give rise to the appearance of local instabilities under specific weather conditions, particularly during the periods of low temperatures that affect the process of ground-water accumulation. Under the normal temperature conditions the accumulation of ground-water is usually slow, without major influence on the slope stability. During the period of low temperatures, the surface part of the excavation front is frozen, preventing water from leaving the pores, especially by evapotranspiration.

During the 46-day period water was accumulating behind the excavation front, causing the water-table to rise slowly. Consequently, the pore pressure crossed over some critical threshold, causing the slumps in the rock mass. The process occurred in the period of very low temperatures, ruling out the well accepted opinion that the rock mass usually slumps as temperatures begin to rise, that is, after the period of thawing in the rock near the surface.

The characteristics of the terrain morphology and the structure fabrics of the area reflect vicinity of the nappe complex, with the couple of faults of different strikes and amount of displacement. The faults are marked by the gullies heading in the E–W direction, particularly within the mining area, which is thus divided into several minor tectonic blocks. The steep working and final slopes, running parallel to these structures, add to the series of ill-conditioned stability factors.

The analysis of discontinuities after Hoek and Bray (1974) points out that all the problems cannot be avoided simply shifting the azimuth of the excavation front in relation to variously oriented discontinuities. The working and final slopes must be kept gentle to allow ground-water to seep naturally out of the dolomite massif during the periods of unfavourable weather conditions.

The process of sliding and slumping, under conditions described, can be prevented to a great extent using a system of horizontal or gently dipping boreholes at various altitudes. Their purpose is to stabilize the ground-water discharge from the dolomite rock mass during the year.