

INŽENJERSKOGEOLOŠKE ZNAČAJKE TRASE PROMETNICE SOLIN–KLIS (DALMACIJA – HRVATSKA)

Slobodan ŠESTANOVIĆ¹, Karlo BRAUN² i Duško BARČOT³

¹ Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu, Matice Hrvatske bb, 58000 Split, Hrvatska; ² Institut za geološka istraživanja, Sachsova 2, 41000 Zagreb, Hrvatska; ³ Institut građevinarstva Hrvatske – Poslovni centar Split, Matice Hrvatske bb, 58000 Split, Hrvatska

Ključne riječi: Inženjerska geologija, Značajke stijena, Pukotine, Tektonika, Prometnica

Istraživanjima u »intaktnom« terenu, kao i na izvedenim kosinama usjeka i zasjeka, u temeljnim jamama objekata i u tunelima, određene su inženjerskogeološke i osnovne tektonske značajke senonskih vapnenaca, eocenskog fliša, prominskih breča i brečo-konglomerata, te oligocenskih slabo sortiranih breča, na trasi poluautoceste Solin-Klis (Dalmacija, Hrvatska). Laboratorijskim ispitivanjima na velikom broju uzoraka stijena utvrđeni su rasponi njihovih osnovnih fizikalnih i mehaničkih značajki unutar pojedinih inženjerskogeoloških cjelina. Rezultati laboratorijskih ispitivanja uspoređeni su sa svojstvima stijenskih masa u cjelini procijenjenim primjenom RMR-klasifikacije stijena i rezultata mjerenja brzine širenja uzdužnih seizmičkih valova. Ukazano je na moguću istovjetan pristup i kod izrade Osnovne inženjerskogeološke karte Republike Hrvatske.

Key-words: Engineering geology, Rock characteristics, Joints, Tectonics, Road

The research, that has been done both on the »intact« terrain and on the opened cuts and discontinuities, and which has been carried on in the basic caves of the object, as well as in the tunnels; has verified the engineering geological and basic tectonic characteristics of Senonian limestones, Eocene flysch, the Promina breccias and breccia-conglomerates, as well as Oligocene poorly sorted breccias, on the route of semi-highway Solin-Klis (Dalmatia, Croatia). The lab analyses, of the great number of the rock samples, have brought out the parameters of their basic physical and mechanical features within a particular engineering geological unit. The results, thus obtained, have been compared to the qualities of the rock structure block as a whole, and had been previously evaluated by applying RMR-classification of the rocks, and the results of the measured velocities of the longitudinal waves. It has been pointed out that similar procedure may be applied in the publication of General Engineering Geological Map of the Republic of Croatia.

Uvod

Za potrebe projektiranja i izvedbe magistralne prometnice MC-11 od Solina do Klisa, obavljena su detaljna inženjerskogeološka istraživanja. U prvoj fazi, na »intaktnom« terenu, registrirane su sve vidljive geološke značajke koje su poslužile za izradu prognoznih profila tunela, određivanje nagiba i zaštite kosina zasjeka i nasipa, određivanje uvjeta temeljenja objekata i prezentaciju relevantnih inženjerskogeoloških podataka potrebnih za osiguranje zaštite podzemnih voda i okoliša (Garašić i Ortolan, 1987; Šestanović i Barčot, 1988). O složenosti problematike izvođenja ove prometnice dovoljno govori potreba probijanja četiri tunela i izgradnje deset vijadukata (zbog čega je prometnica i nazvana »pola u mraku, pola u zraku«), vođenje trase u području zaštićenog sliva Jadra, u neposrednoj blizini njenog izvora iz kojeg se Split i okolica opskrbljuju vodom.

U drugoj fazi je stalnim praćenjem inženjerskogeoloških i strukturnih značajki na lokacijama zadiranja u stijensku masu geološki okvir popunjava novim podacima, koji su znakovito pridonijeli sigurnosti kod izvođenja, a po potrebi i korekciji pojedinih rješenja iz projekta (Braun, 1991. i Braun et al., 1992)

U ovom se članku opisuju, dokumentiraju i interpretiraju osnovni rezultati provedenih istraživanja.

Litostratigrafska osnova

Područje istraživanja uz trasu prometnice Solin – Klis se na Osnovnoj geološkoj karti Republike Hrvatske nalazi u kontaktnom dijelu listova Split (Marinčić et al., 1971) i Omiš (Marinčić et al., 1975) kod čega se najiscrpniji geološki podaci mogu naći u njima pripadajućim tumačima (Magaš et al., 1973; Marinčić et al., 1977).

Najstarije stijene užeg područja izgradnje ceste pripadaju rudistnim vapnencima senona (gornja kreda – K₂³). Vapnenci su uglavnom gromadasti, ali se nalaze i tanje slojeviti varijeteti s debljinom slojeva između 0,2 i 0,6 m, ili debelo slojeviti s debljinom slojeva i do 3 m. Opći nagib slojeva je prema sjeveroistoku pod kutem od 40° do 80°. Na svježem ravnom i plitkoškoljkastom prijelomu vapnenci su svjetlosive do bijele boje, često s mnoštvom rudista. Količina CaCO₃ analizirana je na 11 uzoraka, a rezultati su iznosili od min. 97,06% do maks. 99,44%.

Od diskontinuiteta najjasnije su izražene tektonske pukotine, rjeđe i slojevitost, sa zijevom od jedan do deset milimetara, najčešće ispunjene crvenicom pomiješanom sa sitnim stijenskim kršjem, ili samo s limonitsko-boksitičnim tvrdim prevlakama. Pukotine koje su paralelne klivažu osne ravnine nagiba su prema jugozapadu pod kutem između 20° i 60°, a pukotine okomite na lokalnu strukturu os su pretežno strme, s nagibima između 60° i 80°. Zijev ovih diskontinuiteta iznosi između 10 i 60 mm. Ispuna

im je također crvenica s više ili manje stijenskog kršja. Mjestimice se zapažaju i pukotine druge geneze, a vjerojatno i starosti, koje su cementirane žilnim kalcitom ili su, podređeno, stisnute.

U površinskom dijelu rudistni vapnenci su intenzivno okršeni, kod čega su, od morfoloških pojava, najviše zastupljene škrape, modelirane pukotine, kaverne i manje špilje. Postanak dviju manjih špilja, koje su zapažene prilikom izvedbe dubokog usjeka za umjetni tunel »Mihovilovići« može se povezati s rasjedima nagnutim pod oko 60° prema zapad-jugozapadu i njihovim presjecištima s pukotinama druge geneze. Špilja na stacionaži km 7 + 800 bila je gotovo u cijelosti ispunjena glinovitim materijalom sa stijenskim kršjem, a druga, na stacionaži km 7 + 880, potpuno prazna, s mnoštvom špiljskog nakita. Njen volumen procijenjen je na oko 2000 m³, a od ulaza duboka je oko 30 m (Rađa, 1991).

Senonski rudistni vapnenci se u području izgradnje prometnice Solin – Klis nalaze od stacionaže km 7 + 680 do kraja trase, odnosno stacionaže km 9 + 004, u ukupnoj duljini od 1.324 m.

Flišne naslage srednjo- do gornjoeocenske starosti (E_{2,3}) izgrađuju veći dio istraživanog terena. Zastupljene su brečama, pješčenjacima i laporima u vertikalnoj izmjeni, uz sporadične pojave čerta. To su dobro slojevite naslage (osim u tektoniziranim zonama) s debljinom slojeva od nekoliko milimetara do oko 50 cm. Znakovito je da su lapori razvijeni u tanjim slojevima, u serijama debljine i do 50 m, a breče i pješčenjaci u nešto debljim slojevima, ali u serijama debljine do 5 m. Kod cjelovite izmjene koja nije rijetkost svi članovi fliša su tankoslojeviti, a serija u kojoj se nalaze ima debljinu veću od 50 m. Kontakt flišnih i drugih naslaga uvijek je tektonski.

Lapori su sivoplave ili sivozelene boje, ako su svježi, odnosno smeđi ili žutosmeđi kada su trošni. Breče su sive, a pješčenjaci svjetlosivi i svjetlosmeđi. Lapori se lome nepravilno, a breče i pješčenjaci plitkoškolkasto do ravno. Rezultati ispitivanja količine CaCO₃ u laporima fliša, na 53 uzorka, pretežito su bili u granicama između 42,73% i 74,81% (lapori i kalcitni lapori), a samo mjestimično utvrđeno je postojanje i laporovitih vapnenaca sa sadržajem CaCO₃ od 75,00% do maksimalno 88,01%.

Naslage su općenito nagnute prema sjever-sjeveroistoku i sjeveroistoku pod kutem koji varira od 10° do 80°, ovisno o položaju u strukturi. Položaj diskontinuiteta koji su paralelni osnoj ravnini varira također ovisno o položaju u regionalnoj strukturi, dok su pukotine okomite na strukturnu os najčešće strme, nagiba uvijek preko 50°. Zijev ovih pukotina iznosi i do 10 milimetara, u laporima su ispunjene glinom, a u brečama glinom i sitnim stijenskim kršjem. U području tunela »Mravinci«, a također u usjeku između dva stijenska bloka koji su izgrađeni od breča, utvrđeni su tektonizirani škriljavi dinamo-metamorfozirani lapori.

U brečama i pješčenjacima fliša utvrđeni su efekti okršavanja manifestirani pojavama škrapa, modeliranih pukotina i kaverni. Pred ulaznim portalom tunela »Mravinci« otkrivene su dvije veće kaverne koje su nastale na presjecištima diskontinuiteta većeg zijeva.

Flišne naslage se na istraženom terenu nalaze od stacionaže km 0 + 000 do km 3 + 253, od km 3 + 697 do km 4 + 125, od km 4 + 720 do km 5 + 762, od km 6 + 275 do km 6 + 426, od km 6 + 575 do km 6 + 700, od km 7 + 113 do km 7 + 680, odnosno u ukupnoj duljini od 5.466 metara.

Prominske naslage gornjeg eocena (E₃) zastupljene su slabo sortiranim brečama i brečokonglomeratima. Razvijene su kao gromadaste, ali i slojevite naslage s debljinom slojeva od oko 0,60 pa do više od 2 m. Lome se školjkasto ili nepravilno, a na prijelomu su sive boje. Količina CaCO₃ u stijenama ispitana je na 5 uzoraka i iznosila je od minimalno 73,40% do maksimalno 99,76%.

Prominske su naslage općenito nagnute prema sjeveroistoku pod kutem od oko 70° u južnom dijelu područja, odnosno prema jugoistoku pod kutem od 30° do 55° u sjevernom dijelu istraživanog terena. Međuslojne pukotine imaju zijev do 15 milimetara i ispunjene su glinom sa sitnim stijenskim kršjem, no bilo je i otvorenih, bez ispune. Pukotinski sustavi koji se zapažaju u stijenama, a prema orijentaciji i genezi odgovaraju pukotinama paralelnim klivažu osne ravnine i pukotinama koje su okomite na lokalnu strukturnu os su zijeva do 20 milimetara. Uglavnom su otvorene ili ispunjene crvenicom sa sitnim stijenskim kršjem. U rasjednim zonama uočene su i manje pojave tektoniziranih škriljavih sivozelenkastih lapora i čerta kao ulošci i leće unutar breča i brečokonglomerata. Okršavanje se manifestira pojavama manjih kaverni, modeliranih pukotina većeg zijeva i škrapa. Prominske naslage su uz trasu prometnice registrirane od stacionaže km 3 + 280 do km 3 + 310, od km 6 + 426 do km 6 + 575 i od km 6 + 700 do km 7 + 113, u ukupnoj duljini od 592 metra.

Najmlade tercijarne naslage utvrđene na terenu su slabo sortirane vapnenjačke breče oligocena (O₁) s fragmentima vapnenjačkih stijena cementiranih kalcitnim cementom. Sadržaj CaCO₃ određen u tri uzorka varirao je između 98,57% i 99,76%. Najčešće su slojevite, s debljinom slojeva od 0,60 do 2,00 m, samo iznimno tanko slojevite (debljine slojeva od 6 do 20 cm) ili gromadaste. Slojevi su u južnom dijelu istraživanog područja generalno nagnuti prema sjeveroistoku pod kutem od 34° do 70°, a u sjevernom dijelu pod kutem manjim od 10° prema jugoistoku. Međuslojne pukotine su pretežito stisnute, dok su pukotine paralelne klivažu osne ravnine i okomite na strukturnu os otvorene, sa zijevom širine od jednog do 10 mm. Šire pukotine su ispunjene crvenicom i sitnim kršjem, a odvajaju stijenu u blokove veličine i do nekoliko m³. Osim toga, u pripovršinskim dijelovima i ove su naslage zahvaćene procesima okršavanja, kojih je posljedica pojava škrapa, modeliranih pukotina i kaverni.

Oligocenske breče su na istraživanom terenu zastupljene od stacionaže km 3 + 253 do km 3 + 280, od km 3 + 310 do km 3 + 697, od km 4 + 125 do km 4 + 720 i od km 5 + 762 do km 6 + 275, odnosno u ukupnoj duljini od 1522 metra.

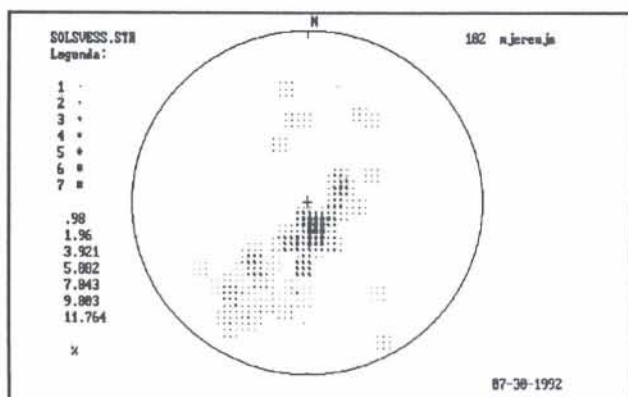
Naslage kvartara su zastupljene prašinstim glinama (Q_e) maksimalne debljine 3 m, nastalim kao produkt trošenja flišnih lapora iz stijenske podloge,

te nevezanim i slabo vezanim siparišnim materijalom (Q_d) čija debljina ne prelazi 3 m. Siparišni materijal između stacionaža km 6 + 700 i km 6 + 820 sadrži uglaste stijenske fragmente veličine od 20 cm do jednog metra, kod čega je siparište nagnuto pod kutem od 30° do 45° . Podinu mu izgrađuju breče i brečokonglomerati s gomoljima čerta (promina naslage – E_3).

Tektonski odnosi

Tektonska građa terena je komplicirana kod čega je recentni strukturni sklop nastao u više faza. Dominantne borane i reversne rasjedne strukture nastale su u pirenejskoj fazi alpske orogeneze. Pružanja su sjeverozapad-jugoistok, kose su, s jugozapadnom vergencijom (Marinčić, 1979). Smjer pritiska uz koji su nastale ove strukture bio je prema jugozapadu, ali su tektonski transport, a time i odstupanja od smjera regionalne strukture, uvjetovale zatečene pretpirenejske starije brahistrukture (Marinčić, 1979). Konačno oblikovanje strukturnog sklopa dosiže do u recentno doba.

Mjereni položaji slojeva svih vidljivih naslaga na istraživanom području imaju statistički maksimum $346/14^\circ$, ali se na izrađenom konturnom dijagramu njihovih polova (slika 1) zapaža da u stvari tvore pojas nastao rotacijom oko regionalne strukturne osi položaja $301/9^\circ$ (pirenejsko boranje, reversno rasijedanje i navlačenje). Lokalna odstupanja od regionalne strukture, jednim su dijelom primarna (Marinčić, 1979), a jednim dijelom uzrokovana rotacijama uz smične rasjede sa subhorizontalnim kretanjima tektonskih blokova (Braun et al., 1992).



Sl. 1 Konturni dijagram svih mjerenih slojevitosti
Fig. 1 Contour diagram of all measured beddings

Položaj osne ravnine strukture također rotira od subvertikalnog do subhorizontalnog, ovisno o položaju tektonskih blokova u regionalnoj strukturi.

Kod promatranja tektonskog sklopa razlikovale su se stijene senona u kojima su deformacije i pretpirenejske i pirenejske, od stijena eocena u kojima su deformacije dominantno pirenejske i stijena oligocena koje su postorogenetske.

Spoznaje o elementima tektonskog sklopa, prvenstveno diskontinuitetima, bitno su utjecale na izbor projektnih rješenja, način izvođenja, osiguranje i

zaštitu kosina zasjeka i usjeka, te na projektiranje tunela, planiranje napredovanja u izvođenju, izbor podgrade i dimenzioniranje obloge. Uz to, tektonski su elementi utjecali i na projektiranje temeljnih konstrukcija vijadukata, način izvođenja iskopa za temelje i osiguranje kosina temeljnih jama. Budući da su tektonske značajke duž trase ceste veoma detaljno istražene i obrađene, izvedenim radovima spriječeni su bilo kakvi efekti koji se, kao posljedica tektonskih odnosa, mogu negativno odraziti na sigurnost objekata i prometala u eksploataciji ceste.

Inženjerskogeološka klasifikacija stijena

U inženjerskogeološkom smislu sve naslage u području trase mogu se prema Uputama za izradu OIGK (1988), klasificirati kao:

- vezane dobro okamenjene sedimentne klastične i neklastične karbonatne stijene,
- vezane slabo okamenjene klastične stijene,
- vezane neokamenjene stijene,
- nevezane stijene.

Među vezanim, dobro okamenjenim sedimentnim klastičnim stijenama razlikuju se srednjozrnaste (pješčenjaci flišnih naslaga) i krupnozrnaste (breče i brečokonglomerati fliša, breče i brečokonglomerati prominskih naslaga i slabosortirane oligocenske breče). Neklastične su karbonatne stijene senona.

Vezane slabo okamenjene stijene su klastične, sitnozrnate (lapori fliša, leće i ulošci lapora u prominskim naslagama i u slabo sortiranim oligocenskim brečama).

Vezane neokamenjene stijene su plastične i tvrde gline koje se nalaze u pukotinama i kavernama, a dijelom i u površinskim dijelovima terena kao crvenica.

Nevezane stijene su prašnaste, slabo zbijene, kvartarne naslage, koje se u različitim debljinama kao produkti trošenja nalaze na stijenskoj podlozi ili zajedno sa crvenicom, te kao krupnozrnasto slabo složeno stijensko kršje i blokovi u obliku sipara.

Inženjerskogeološke cjeline i modeli

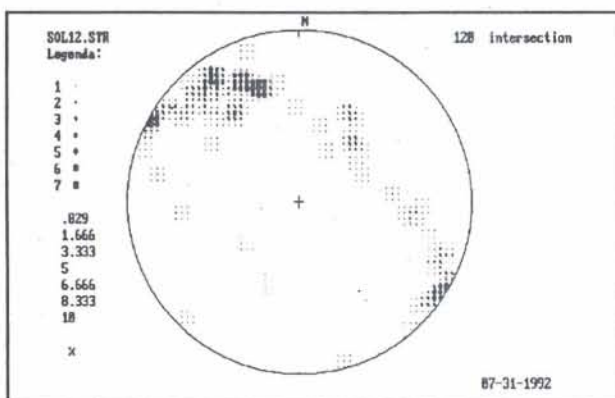
Za formiranje stava o inženjerskogeološkim cjelinama i definiranje inženjerskogeoloških modela poslužili su svi podaci dobiveni istraživačkim radovima, a naročito oni o fizičko-mehaničkim značajkama (tablica 1) i litološkom sastavu naslaga te njihovom strukturnom sklopu.

U krednim je naslagama gustoća diskontinuiteta bila prosječno oko $15/m^3$. Diskontinuiteti su izrazito okršeni i okršavanjem prošireni (modelirane pukotine, kaverne, manje špilje), kod čega je dubina okršavanja veća od 10 m. Stijene se prema RMR-klasifikaciji prilagođenoj tunelogradnji (Bieniawski, 1979) i kosinama (Romana, 1985), uzimajući u obzir, po svom stanju, najnepovoljnije sisteme diskontinuiteta, mogu svrstati u III. kategoriju (umjereni dobre stijene, mjestimice stabilne, s mogućnošću sloma stijenske mase duž pojedinih pukotina ili više presječnica), s prognoziranim kutem trenja od 25° do 35° i kohezijom između 200 kPa i 300 kPa (Stojković, 1991). Na temelju rezultata geo-

| Stacionaža <i>Alignment distances</i> (km) | Litološki sastav <i>Litologic structure</i> | Podaci iz laboratorija - <i>laboratory data</i> | | | | | | Podaci s terena - <i>terrain data</i> | | | |
|--|--|---|-----------------------------------|--|--|---|---|--|--|--|--|
| | | Čvrstoća <i>Strength</i> (MPa) | | Kohezija <i>Cohesion</i> c (kPa) | Kut unutrašnjeg trenja <i>Friction angle</i> φ° | Prostorna težina <i>Spatial weight</i> γ (kN/m ³) | Količina <i>Amount</i> CaCO ₃ (%) | Brzina širenja uzdužnih seizmičkih valova <i>v_p velocity</i> (m/s) | EDIN <i>E_{DYN}</i> (MN/m ²) | Poissonov koeficijent <i>Poisson's factor</i> μ | Modul na smik <i>Shear modulus</i> (MN/m ²) |
| | | $\sigma_{PRESS.}$ σ_{II} | $\sigma_{TENS.}$ σ_{VI} | | | | | | | | |
| 7+533-7+680 7+720-9+004 11 uzoraka 11 samples | Vapnenci <i>Limestones</i> K ₂ | 64.72- 145.65 | 4.85- 18.16 | 19140- 23030 | 53.39- 54.90 | 26.97- 27.48 | 97.06- 99.44 | -razlomljeni damaged: 1700-2800 -kompaktni compact: 4000 | 6920- 51740 | 0.310- 0.266 | 3700- 20450 |
| 0+000-3+253 3+697-4+125 4+720-5+762 6+275-6+426 6+575-6+700 7+113-7+533 7+680-7+720 53 uzorka 53 samples | Fliš <i>flysch</i> (E _{2,3}) -lapori <i>marls</i> -pješčenjaci i breče <i>sandstones and breccias</i> | 6.23- 43.37 | 0.42- 2.20 | 980- 6010 | 36.12- 44.03 | 25.46 | 51.63- 75.00 | 1270-2330 | 1720 | 0.393 | 620 |
| 3+280-3+310 6+426-6+575 6+700-7+113 5 uzoraka 5 samples | Promina naslage <i>Promina deposits</i> (E ₃) | 99.55- 157.63 | 9.05- 13.13 | 18070- 20180 | 50.09- 54.09 | 26.76- 26.94 | 95.06- 99.87 | -razlomljene damaged: 1700-2600 -kompaktne compact: 2800-3450 | 5700- 43050 | 0.385- 0.292 | 1920- 14300 |
| 3+253-3+280 3+310-3+697 4+125-4+720 5+762-6+275 3 uzorka 3 samples | Breče <i>Breccias</i> (O ₁) | 16.27- 23.03 | 0.94- 2.20 | 3640- 18530 | 26.50- 54.90 | 27.10- 27.30 | 98.65- 99.76 | -razlomljene damaged: 1600-2600 -kompaktne compact: 2800-3500 | 5600- 45200 | 0.392- 0.285 | 1830- 16200 |
| | Kvartarne naslage <i>Quaternary deposits</i> (Q) | --- | --- | 0-35 | 21.15- 34.62 | 17.42- 21.63 | 57.69- 88.01 | 300-1180 | 30- 1000 | 0.473- 0.406 | 230- 250 |

fizičkih istraživanja (Mitrović i Krsnik, 1988), a prema literaturnim podacima (Roberts, 1977; Aleksovski i Mirakovski, 1988), kut trenja se može procijeniti na oko 33°, a čvrstoća stijenskog masiva u cjelini na oko 80 MPa. Koeficijent oslabljenja stijenske mase prema Lomtadze (1970) ocjenjuje se između 0,6 i 0,8.

Budući da su kredne naslage dobro okamenjene, karbonatne, na stabilnost kosina u njima utječe samo strukturni sklop, u kojem slojevitost, prikazana konturnim dijagramom njenih polova, ima statistički maksimum položaja 30/43°. Lokalna strukturna os, prema položaju maksimuma na izrađenom konturnom »beta«-dijagramu, rotira iz položaja 300/4° u položaj 343/26°, koji je za te podatke ujedno i statistički maksimum (slika 2).



Sl. 2 »Beta«-dijagram slojevitosti i aksijalnih ravnina mjerених u gornjokrednim vapnencima

Fig. 2 »Beta«-diagram of the measured bedding and axial planes of Upper Cretaceous limestones

Analizom strukturnog sklopa kao osnove za primjenu geometrijske metode određivanja stabilnosti kosina (Hoek i Bray, 1974) moglo se pokazati da postoje svi uvjeti da se kosine kao stabilne održe strmim, nagiba i preko 3:1.

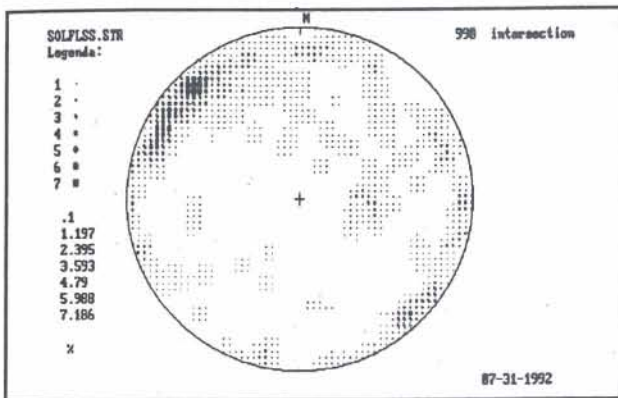
U flišnim naslagama je gustoća diskontinuiteta vrlo varijabilna. U dijelu koji nije dinamički metamorfoziran nalazi se oko 3–10 diskontinuiteta/m³, dok je njihova gustoća u dinamički promijenjenim varijetetima i preko 40 diskontinuiteta/m³.

Uzimajući u obzir, prema svom stanju, najnepovoljnije diskontinuitete, laporovite stijene koje nisu dinamometamorfno promijenjene se prema RMR-klasifikaciji primjenjenoj u tunelogradnji (Bieniawski, 1979) i na kosine (Romana, 1985) mogu uvrstiti u III.–IV. kategoriju s kutem trenja oko 25° i kohezijom između 150 kPa i 250 kPa. Prema određenim brzinama uzdužnih seizmičkih valova kut trenja mogao se procijeniti na oko 33°, a jednoosna čvrstoća stijenske mase u cjelini na oko 20 MPa. Koeficijent oslabljenja stijenske mase (Lomtadze, 1970) je između 0,6 i 0,7.

Lapori koji su dinamometamorfno promijenjeni se prema RMR-klasifikaciji, također u odnosu na najnepovoljnije diskontinuitete, primijenjeno za tunelogradnju (Bieniawski, 1979) i na kosine (Romana, 1985) mogu svrstati u IV. do V. kategoriju (Stojković, 1991) s procijenjenim kutem trenja oko 15° i kohezijom oko 100 kPa (slabe do vrlo slabe stijene, nestabilne do vrlo nestabilne, s mogućnosti pojave velikih ravnih, klinastih ili kružnih lomova). Prema podacima o izmjenjenim vrijednostima brzina seizmičkih uzdužnih valova kut trenja se mogao procijeniti na oko 20°, a jednoosna čvrstoća

na oko 2 MPa. Može se računati da je koeficijent oslabljenja stijenske mase (Lomta dze, 1970) oko 0,3.

Flišne naslage su na istraživanom području naj-snažnije borane, tako da ih nalazimo u položajima u kojima im slojevitost varira od subhorizontalne do subvertikalne. Prema podacima dobivenim izradom »beta«-dijagrama strukturalna os ima statistički maksimum orijentacije 318/10°, kod čega je u pojedinim tektonskim blokovima rotirana od položaja 290/8° do položaja 325/10° (slika 3).



Sl. 3 »Beta«-dijagram slojevitosti i aksijalnih ravnina mjenjen u naslagama eocenskog fliša

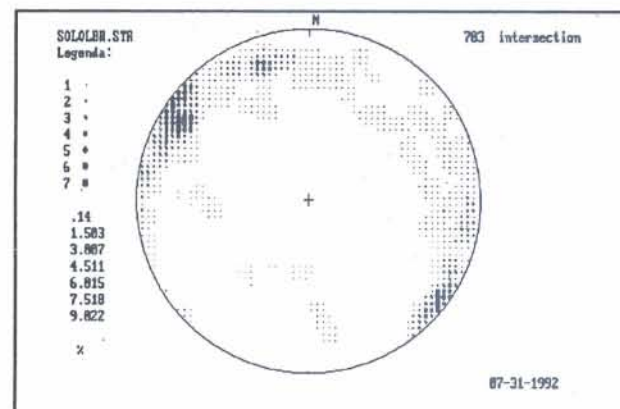
Fig. 3 »Beta«-diagram of the measured bedding and axial planes of Eocene Flysch deposits

Stabilnost kosina u flišnim naslagama ovisi o lito-loškom sastavu naslaga, stupnju dinamometamorfizma koji su pretrpjele, i manjim dijelom, strukturalnom sklopu. Kod toga su najstabilniji lapori koji ne sadrže proslojke ili leće krupnije granuliranih stijena i koji nisu dinamometamorfizirani. U tektonski promijenjenim (dinamometamorfiziranim) laporima razvijen je vrlo gusti međuslojni klivaž i klivaž osne ravnine. Takve stijene su dijelom i vodopropusne, što izrazito negativno utječe na njihovu stabilnost u izvedenim kosinama i tunelima.

U prominskim brečama je gustoća diskontinuiteta varijabilna, ali se u prosjeku može računati s 5 diskontinuiteta/m³. Zijev im dosiže do 20 mm, ali su mjestimice okršavanjem znatno proširene, tako da su zapažene pojave modeliranih pukotina i manjih kaverni.

Uzimajući u obzir, prema njihovom stanju, najnepovoljnije diskontinuitete prema RMR-klasifikaciji primjenjenoj u tunelogradnji (Bieniawski, 1979) i na kosine (Romana, 1985) stijene se mogu uvrstiti u II. do III. kategoriju (dobre do povoljne stijene, stabilne i umjereno stabilne, s mogućnosti pojave ravnih lomova po pojedinim plohama ili klinastih lomova po pojedinačnim presječnicama), s prognoziranom kutem trenja oko 35° i kohezijom oko 300 kPa (Stojković, 1991). Prema rezultatima mjerenja uzdužnih seizmičkih valova može se pokazati da bi, računato na njihovoj osnovi, kut trenja stijenske mase trebao biti od 32° do 35°, a jednoosna čvrstoća stijenske mase u cjelini do 50 MPa. Koeficijent oslabljenja stijenske mase (Lomta dze, 1970) je od 0,4 do 0,6.

Prominske su naslage također intenzivno borane, tako da im nagib slojeva varira od subhorizontalnog do subvertikalnog i prevrnutog, strmog. Prema izrađenom »beta«-dijagramu, os strukture ima generalnu orijentaciju 305/12°, kod čega također postoje tektonski blokovi u kojima je rotirana (slika 4). I u prominskim brečama i brečokonglomeratima stabilnost kosina prvenstveno ovisi o strukturalnom sklopu i manifestacijama koje su s njim u vezi. Analiza stabilnosti kosina (Hoek i Bray, 1974) se morala provesti posebno za jače okršene zone s modeliranim pukotinama s glinovitom ispunom, a posebno za kompaktne stijenske mase sa zatvorenim diskontinuitetima.



Sl. 4 »Beta«-dijagram slojevitosti i aksijalnih ravnina mjenjen u Prominskim naslagama

Fig. 4 »Beta«-diagram of the measured bedding and axial planes of Promina beds

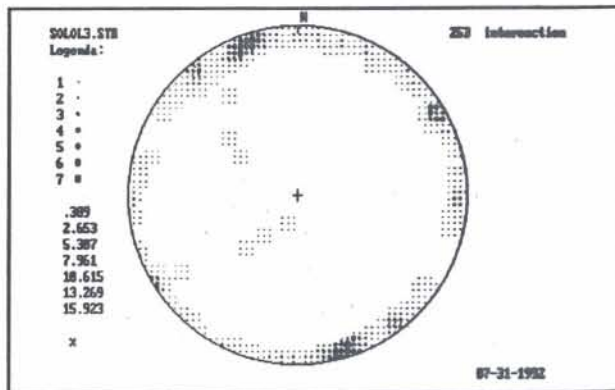
Oligocenske breče i brečokonglomerati su po čvrstoći vrlo varijabilni, što ovisi prvenstveno o čvrstoći veziva između slabo sortiranih čestica starijih stijena. Izmjerene brzine širenja uzdužnih seizmičkih valova, međutim, ukazuju na to da u sastavu oligocenskih breča i brečokonglomerata ima i znatno kompaktnijih varijeteta stijena, iz kojih za analize fizičko-mehaničkih svojstava nisu uzeti odgovarajući uzorci.

Gustoća diskontinuiteta je varijabilna, ali općenito mala, tako da diskontinuiteti odvajaju stijenu u blokove veličine i preko 1 m³. U prosjeku se može računati s 1-3 diskontinuiteta/m³. U pripovršinskim dijelovima stijenskih masa, gdje su pukotine okršavanjem modelirane, zijev dosiže do 10 mm, kod čega su najčešće otvorene, rjeđe s glinovitom ispunom. U dubljim dijelovima stijenske mase, diskontinuiteti su zatvoreni.

Uzimajući u obzir najnepovoljnije diskontinuitete, prema »RMR«-klasifikaciji za tunelogradnju (Bieniawski, 1979) i primijenjeno za kosine (Romana, 1985), oligocenske breče uglavnom odgovaraju III. kategoriji (povoljne stijene, parcijalno stabilne, s mogućnosti sloma stijenske mase duž pojedinih pukotina ili više presječnica), s prognoziranom kutem trenja od 25° do 35° i kohezijom između 200 kPa i 300 kPa (Stojković, 1991). Na osnovi rezultata geofizičkih istraživanja kut trenja bi mogao varirati od 27° do 33°, a čvrstoća stijenskog masiva u cjelini

od 6 MPa do 60 MPa. Koeficijent oslabljenja stijenske mase, prema Lomtatdze (1970), ocjenjuje se između 0,7 i 0,9.

S obzirom na to da su, kao postorogenetske, oligocenske naslage malo borane, to je slojevitost, izuzev dijelova koji su uklješteni u tektonskim zonama, uglavnom malog nagiba. U strukturnom sklopu tektonski mirnijih dijelova terena opći statistički položaj je $352/10^\circ$, dok je strukturna os pravca pružanja $334^\circ-163^\circ$ (slika 5). U tektonskim zonama slojevitost je gotovo vertikalna, a lokalna strukturna os rotirana.



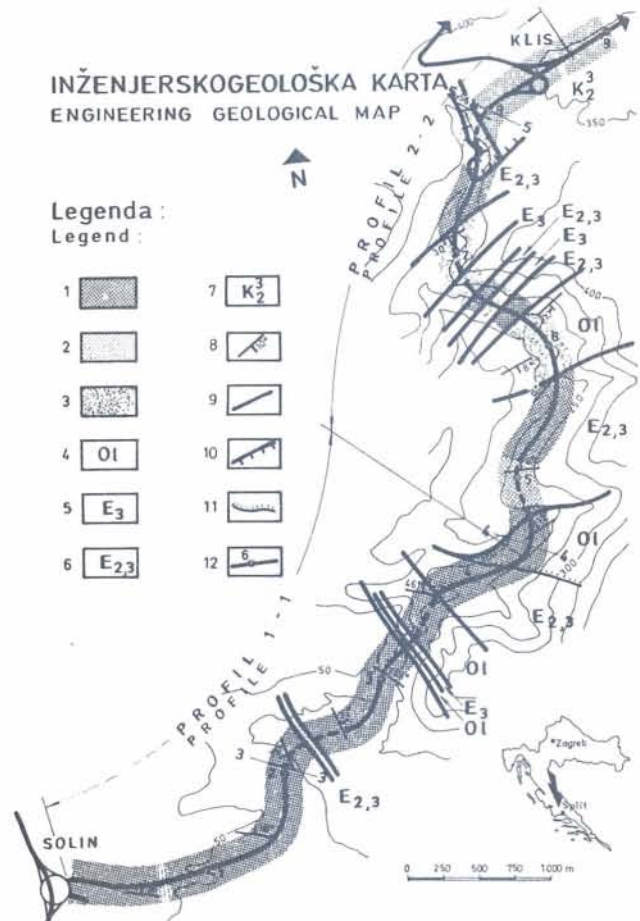
Sl. 5 »Beta«-dijagram slojevitosti i aksijalnih ravnina mjerenih u oligocenskim naslagama

Fig. 5 »Beta«-diagram of the measured bedding and axial planes of Oligocene deposits

Stabilnost kosina manjim dijelom ovisi o litološkim karakteristikama stijena (zone breča i brečokonglomerata sa slabijim vezivom ili većim učešćem čestica lapora u petrografskom sastavu), dok najvećim, ipak, samo o strukturnom sklopu i manifestacijama s njim u vezi (diskontinuiteti zatvoreni ili s glinovitom ispunom). Prema geometrijskoj metodi ocjene stabilnosti (Hoek i Bray, 1974) kosine u stijenskoj masi sa zatvorenim diskontinuitetima stabilne su i uz nagib od preko 3:1. U dijelovima stijenskih masa u kojima su pukotine okršavanjem modelirane mogućnost povoljnog uklještenja blokova ovisi o strukturnom sklopu, odnosno položaju u regionalnoj strukturi.

Dakle, utvrđeno je da se naslage u istraženom području odlikuju različitim inženjerskogeološkim značajkama, ali one grade terene koji se mogu izdvojiti kao cjeline prema stabilnosti u odnosu na prirodno stanje i stanje koje će biti izazvano graditeljskim zahtjevima. Stoga su izdvojeni i na inženjerskogeološkoj karti (slika 6) i profilima 1 i 2 (slika 7) prikazani različitim gustoćom sjenčenja tereni stabilni u prirodnim uvjetima i kod zasijecanja, tereni stabilni u prirodnim uvjetima koji mogu postati nestabilni kod zasijecanja i tereni uvjetno stabilni u prirodnim uvjetima, a nestabilni u slučaju bilo kakvog zasijecanja. Osnovni kriteriji pri kategorizaciji terena prema stabilnosti bili su: razlomljenost stijenske mase, nagib slojeva u zasječnim dijelovima u odnosu na pravac pružanja trase i fizičko-mehaničke značajke naslaga.

Pretežiti dio istraženog terena je stabilan u prirodnim uvjetima i kod zasijecanja. Naslage tektonski



Sl. 6 Inženjerskogeološka karta

Legenda:

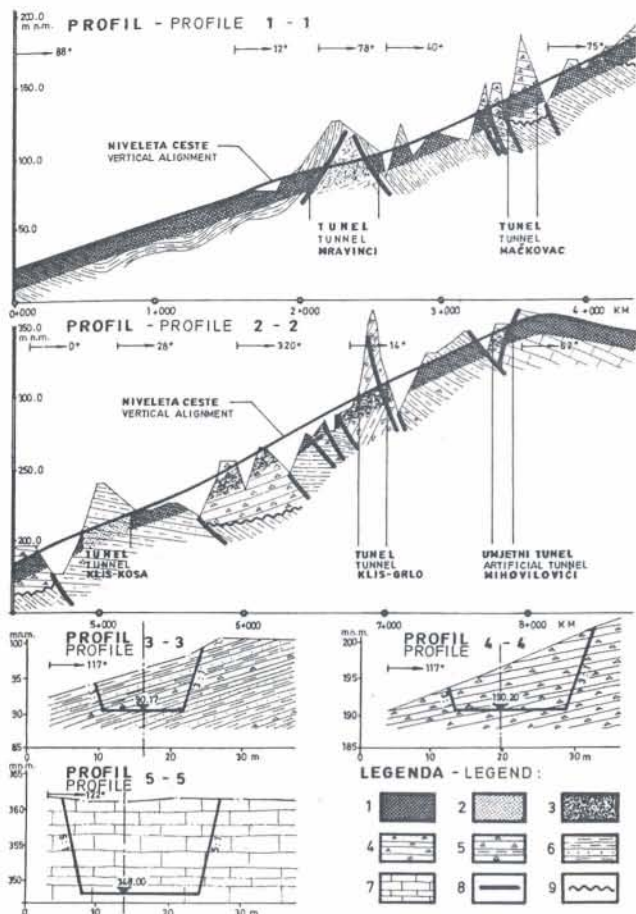
1. Tereni stabilni u prirodnim uvjetima i kod zasijecanja
2. Tereni stabilni u prirodnim uvjetima ali mogu postati nestabilni kod zasijecanja
3. Tereni uvjetno stabilni u prirodnim uvjetima, a nestabilni kod zasijecanja
4. Breče (O1)
5. Breče s rijetkim tankim proslojcima lapora (E₃)
6. Fliš – tankoslojeviti lapori u izmjeni s pješčenjacima i brečama (E_{2,3})
7. Vapnenci (K_{2,3})
8. Položaj sloja
9. Normalni rasjed
10. Reversni rasjed
11. Diskordantna granica
12. Trasa s oznakom udaljenosti (km)

Fig. 6 Engineering geological map

Legend:

1. The terrains being stable under the natural conditions and stable if cut any deeper
2. The terrains being stable under the natural conditions but can become unstable if cut any deeper
3. The terrains being conditionally stable under the natural conditions and unstable if cut any deeper
4. Breccias (O1)
5. Breccias with rare thin - layered marls (E₃)
6. Flysch; thin-layered marls in combination with sandstones and breccias (E_{2,3})
7. Limestones (K_{2,3})
8. Dip of bed
9. Normal fault
10. Reverse fault
11. Unconformed geological boundary
12. Alignment with distances (km)

izmijenjenih i slabo dinamometamorfoziranih flišnih lapora u dijelu tunela Mravinci i između visokih zasjeka »Greda 1« i »Greda 2« (Braun et al., 1992)



Sl. 7 Uzdužni i poprečni profili
 Legenda:
 1. Tereni stabilni u prirodnim uvjetima i kod zasijecanja
 2. Tereni stabilni u prirodnim uvjetima ali mogu postati nestabilni kod zasijecanja
 3. Tereni uvjetno stabilni u prirodnim uvjetima a nestabilni kod zasijecanja
 4. Breče (O1)
 5. Breče s rijetkim tankim proslojcima lapora (E₃)
 6. Fliš – tankoslojeviti lapori u izmjeni s pješčenjacima i brečama (E_{2,3})
 7. Vapnenci (K₂)
 8. Rasjed
 9. Diskordantna granica

Fig. 7 Longitudinal and transversal profiles
 Legend:
 1. The terrains being stable under the natural conditions and stable if cut any deeper
 2. The terrains being stable under the natural conditions but can become unstable if cut any deeper
 3. The terrains being conditionally stable under the natural conditions and unstable if cut any deeper
 4. Breccias (O1)
 5. Breccias with rare thin-layered marls (E₃)
 6. Flysch: thin-layered marls in combination with sandstones and breccias (E_{2,3})
 7. Limestones (K₂)
 8. Fault
 9. Discordant boundary

su stabilne u prirodnim uvjetima, ali postaju nestabilne kod bilo kakvog rada u njima. Toj kategoriji pripadaju i naslage fliša (u kojima se izmjenjuju pretežito tankoslojeviti lapori i pješčenjaci) u terenu u kojemu je izveden tunel Klis-Kosa. U tom je slučaju osnovni kriterij kategorizacije, uz razlomljenost naslaga, bio veoma blagi nagib slojeva. Tereni

uvjetno stabilni u prirodnim uvjetima, a nestabilni kod zasijecanja, izdvojeni su u dijelu oligocenskih i prominskih breča, te u krednim vapnencima zbog intenzivne razlomljenosti i okršenosti naslaga, što je i u prirodnim uvjetima rezultiralo čestim odronjavanjem dijelova stijenske mase niz padinu.

Diskusija i zaključak

Za potrebe projektiranja i izvedbe magistralne prometnice MC-11 od Solina do Klisa obavljena su detaljna inženjerskogeološka istraživanja potrebna za izradu prognoznih profila tunela, određivanje nagiba i zaštite kosina zasjeka i nasipa, određivanje uvjeta temeljenja objekata i prezentaciju relevantnih inženjerskogeoloških podataka potrebnih za osiguranje zaštite podzemnih voda i okoliša (Garašić i Ortolan, 1987; Šestanović i Barčot, 1988). Vodenje trase u području zaštićenog sliva Jadrta u neposrednoj blizini izvora iz kojeg se Split i okolica opskrbljuju vodom, predviđena izgradnja deset vijadukata i probijanje četiri tunela, opravdalo je izvedbu tako detaljnih istraživanja.

U inženjerskogeološkom smislu sve naslage u području trase klasificirane su kao:

- vezane dobro okamenjene sedimentne klastične i neklastične karbonatne stijene,
- vezane slabo okamenjene klastične stijene,
- vezane neokamenjene stijene,
- nevezane stijene.

Od egzodinamičkih najzastupljeniji su procesi spiranja i selektivnog erodiranja u naslagama fliša te odronjavanja u neklastičnim i klastičnim dobro okamenjenim stijenama.

Od geomorfoloških pojava naročito je izražena okršenost svih dobro okamenjenih stijena s proširenim i modeliranim diskontinuitetima, škrapama, kavernama, a lokalno i manjim špiljama.

Endodinamički procesi mogu rezultirati potresima maksimalnog intenziteta od 8° MSK-64 ljestvice te recentnim pomacima duž jačih tektonskih linija (Šestanović i Barčot, 1988).

Izneseni podaci su rezultat istraživanja koja su provedena u »intaktnom« terenu, ali i tijekom stalnog praćenja radova na lokacijama zadiranja u stijensku masu. Stoga je i bilo moguće dovoljno detaljno odrediti inženjerskogeološke značajke stijena i terena kao inženjerskogeoloških cjelina, te kategorizirati terene prema stabilnosti u odnosu na prirodno stanje i stanje koje će biti izazvano gradnjom ceste. Istraživanja su provedena za potrebe projektiranja trase ceste Solin-Klis, čija je izvedba u završnoj fazi. Sličan pristup istraživanju, a dijelom i način iznošenja dobivenih rezultata, mogao bi se primijeniti i kod izrade Osnovne inženjerskogeološke karte Republike Hrvatske.

Jednostavnim metodama mogle bi se, uz relativno mali broj laboratorijskih analiza, odrediti i kvantificirati prosječne karakteristike cjelina čvrstih stijena i statistički odrediti rasponi unutar kojih, u odgovarajućoj distribuciji i uz određenu vjerojatnost, mogu varirati pojedina fizičko-mehanička svojstva (inženjerskogeološko modeliranje). Jasno je da se kod toga isključuju anomalne pojave, kao što su tekton-

ske zone i slično, unutar kojih su svojstva stijena različita i specifična.

Stoga se može preporučiti, da se tijekom izrade Osnovne inženjerskegeološke karte Republike Hrvatske u pojedinim inženjerskegeološkim cjelinama provede istraživanje strukturnog sklopa, odredi stanje diskontinuiteta i utjecaj podzemne vode, provede mjerenje veličine fragmenata koji su prirodno odijeljeni diskontinuitetima i statistički obrade dobiveni rezultati. To bi, uz istraživanje primjenom metoda refrakcijske seizmike i potrebnih laboratorijskih analiza omogućilo, da se na osnovi dobivenih rezultata definiraju postojeći inženjerskegeološki modeli i daju osnovni ulazni podaci koji bi se, kod rješavanja konkretnih zadataka na nivou idejnih rješenja i studija utjecaja na okolinu objekata, mogli koristiti za preliminarnu ocjenu kvalitete stijenskih masa. Kod toga se napominje da su za sada za ocjenu kvalitete stijenskih masa najaktualnije RMR-klasifikacija (Bieniawski, 1979; Romana, 1985) i Q-sistem (Barton et al., 1974).

Općenito, metodologiju inženjerskegeološke klasifikacije i opis karakteristika čvrstih stijena trebalo bi uskladiti s metodama koje se primjenjuju u mehanici stijena, a koje su, i kao terenske i kao laboratorijske, vrlo detaljno razrađene u odgovarajućim metodološkim uputama ISRM (International Society for Rock Mechanics).

Primljeno: 25. I. 1993.

Prihvaćeno: 27. V. 1993.

LITERATURA

- Aleksovski, D., Mirakovski, G. (1988): Mogućnost korišćenja seizmičkih brzina za određivanje parametara deformabilnosti, otpornosti i čvrstoće stenskih masa. I. jugoslavenski simpozij o tunelima, knjiga 1, 7-16, Brioni
- Braun, K. (1991): Mišljenje o potrebnoj sanaciji zasjeke »GREDA-1« i »GREDA-2« na trasi autoceste Solin-Klis. Arhiva IGH-Poslovni centar, Split
- Braun, K., Šestanović, S., Barčot, D., Samardžija, I. (1992): Inženjerskegeološke i strukturološke značajke u funkciji dokazivanja stabilnosti visokih zasjeke u čvrstim stijenama na primjeru dionice poluautoceste MC-11, Solin-Klis. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, 4, 59-66, Zagreb
- Garašić, M., Ortolan, Ž. (1987): Izvještaj o inženjerskegeološkom kartiranju trase ceste Solin-Klis. Građevinski institut, FGZ Zagreb, RN/2230-2-245626/87. Arhiva IGH-Poslovni centar, Split
- Hoek, E., Bray, J. (1974): *Rock Slope Engineering*. Institution of Mining and Metallurgy, Gresham press, 309 pp., London
- Lomtdze, V., D. (1970): *Inženjerna geologija – Inženjerna petrologija*. Izd-vo »Njedra«, Lenjingradskoe otdelenie, 516 pp., Lenjingrad
- Magaš, N., Marinčić, S., Borović, I. (1973): Tumač za Osnovnu geološku kartu SFRJ, listovi Split i Primošten, K 33-21, K 33-20, Institut za geološka istraživanja Zagreb i Savezni geološki zavod, Beograd
- Marinčić, S. (1977): Uzroci odstupanja linearnih bora od Dinarskog pravca pružanja. *Geol. vjesnik* 31, 105-112, Zagreb
- Marinčić, S., Magaš, N., Borović, I., Blašković, I., Majcen, Ž., Raffaelli, P., Magdalenić, Z. (1971): Osnovna geološka karta SFRJ, list Split, K 33-21, 1:100.000, Institut za geološka istraživanja Zagreb i Savezni geološki zavod, Beograd
- Marinčić, S., Korolija, B., Majcen, Ž., Borović, I., Brkić, M., Hreljić, D., Magaš, N., Benček, D., Grmani, I. (1975): Osnovna geološka karta SFRJ, list Omiš, K33-22, 1:100.000, Institut za geološka istraživanja Zagreb i Savezni geološki zavod, Beograd
- Marinčić, S., Korolija, B., Mamuzić, P., Magaš, N., Majcen, Ž., Brkić, M., Benček, D. (1977): Tumač za Osnovnu geološku kartu SFRJ, list Omiš, K 33-22, Institut za geološka istraživanja Zagreb i Savezni geološki zavod Beograd
- Mitrović, G., Krsnik, M. (1988): Geofizička istraživanja za magistralnu cestu Solin-Klis. Građevinski institut, FGZ Zagreb, RN 2212-2-247270. Arhiva IGH-Poslovni centar, Split
- Rada, T. (1991): Kaverna u umjetnom tunelu »Mihovilovići«. Arhiva IGH-Poslovni centar, Split
- Roberts, A. (1977): *Geotechnology*. Pergamon press 347 pp., Oxford, New York, Toronto
- Romana, M. (1985): New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes. Proc. Int. Symp. Rock Mech. Excav. Min. Civ. works, 59-68, ISRM, Mexico City
- Stojković, B. (1991): Stabilizacija podzemnih iskopa u tunelogradnji – empirijski pristup. Znanstveni projekt br. 2-11-098 – Stabilnost geotehničkih objekata, Institut građevinarstva Hrvatske, Zavod za geotehniku, Zagreb
- Šestanović, S., Barčot, D. (1988): Osnovne inženjerskegeološke značajke terena. U: Geotehnički istražni radovi za magistralnu cestu MC-11, dionice Solin (Bilice)-Klis (Grlo), knjiga I – trasa, mali mostovi i podvožnjaci, GT 1. RN 3910-1-133019-46 (1)/87. Arhiva IGH-Poslovni centar, Split
- (1978): Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. International society for rock mechanics. Commission on standardization of laboratory and field tests. Pergamon press, London
- (1988): Upute za izradu Osnovne inženjerskegeološke karte SFRJ, M 1:100000, drugo izmijenjeno i dopunjeno izdanje, Savezni geološki zavod, Beograd

Engineering Geological Characteristics of the Road Solin – Klis (Dalmatia, Croatia)

S. Šestanović, K. Braun and D. Barčot

The thorough engineering geological research has been carried out needed for the design and construction of the road MC-11, Solin-Klis route, especially for the parts of the road where the prospective tunnels, dips and the protecting of the cut slopes and embankment have been designed; and for the defining of the conditions concerning the ground site preparations; and for the presentation of the relevant engineering geological data needed to ensure the safeguard of the subterranean waters and of the environment (Garašić & Ortolan, 1987; Šestanović & Barčot, 1988). Tracing the road in the area of the protected basin of the river Jadro, in the close vicinity of its mouth from which the town of Split and its surroundings are supplied with water; as well as the prospective construction of ten viaducts and the cutting of four tunnels, have justified this thorough research.

The research area along the road MC-11, Solin-Klis has been placed on the contact part of the pages of Split-Primošten (Marinčić et al., 1971) and Omiš (Marinčić et al., 1975) on the General geological map of the Republic of Croatia, while its most thorough geological data can be found in their relating keys (Magaš et al., 1973; Marinčić et al., 1977).

The geological structure of the researched area is represented by the rocks of Upper Cretaceous: Senonian (K_2^3), Middle to Upper Eocene ($E_{2,3}$), Upper Eocene (E_3), Oligocene (O_1) and Quaternary (Q_e & Q_d) (figures 1 and 2).

Tectonic structure of the ground is rather complicated as the recent structural features have gradually appeared in several stages. The dominant folds and reverse faults were formed in the Pyrenees stage of the Alpine orogeny (figure 3). Fault-strike, taking northwest-southeast direction, is oblique, verging towards southwest (Marinčić, 1979). The strike-slip movement of this fault plane was supposed to have southwest direction, but the tectonic transport and the displacement from the direction of the regional structure, have caused the recorded pre-Pyrenees older brachy-structures (Marinčić, 1979). The final formation of the structure block has reached the recent time.

The oldest rocks of the narrow part in the construction of the road are rudist limestones of Senonian (Upper Cretaceous – K_2^3). Limestones are essentially massive, but there are thin-layered beddings and their thickness varies approximately from 0,2 to 0,6 m as well as thick-layered ones that can reach the thickness up to 3 m. The colour of the limestones, on the fresh, flat and shallow-shelly faults, ranges from the pale grey to the white often containing a lot of rudist.

Eleven samples have been analysed to determine the quantity of $CaCO_3$, and the results have measured from the minimum of 97,06% to the maximum of 99,44%.

The axial compressive strength, examined on these samples, ranged over 145 MPa. The mechanical parameters, determined by lab analyses of the rock samples from the Cretaceous layers, are shown among the others in the table 1.

The discontinuities have been most clearly observable as tectonic fractures, which occur as layers to a lesser extent, their width ranging from one to ten millimetres, most often filled with terra rossa, mixed with tiny rock fragments; less often with limonite-bauxite hard film. The stratification statistically reaches the maximum angle of 30/43°. The local structural axis, according to its maximum position on the obtained »beta«-diagram (figure 4), rotates from the position 300/4° to the position 343/26°, which is the statistically obtained maximum of the data. The fractures parallel to the axial plane cleavage are tilted from 20° to 60° angle towards the southwest, and the fractures vertical to the axial plane cleavage are virtually steep declining from 60° to 80°. The opening of these discontinuities is from 10 to 60 mm wide. They are filled with terra rossa containing rock fragments to some extent. Occasionally, the fractures of different origin have been observed and, probably, of different age, thus being cemented by veined calcite and, subordinately, pressed.

The density of the discontinuities in the Cretaceous layers reaches the average of 15/m³. The discontinuities are distinctly karstified and widened (crevices, modeled fractures, cavities and smaller caves), while the depth of the discontinuity karstification is over 10 m. The origin of two smaller caves, discovered when the deep penetration for the artificial tunnel »Mihovilovići« has been cut, can be related to the faults tilted at 60° angle in the direction of the west-southwest and with their intersections containing fractures of different origin. The cave, having been station-

ned km 7 + 800, has been entirely filled with clay material mixed with rock fragments, and the other one, having been stationed km 7 + 880, has been completely empty, containing plenty of cave ornaments. Its volume has been estimated approximately to 2000 m³, and its depth is approx. 30 m at the entrance gate (Rađa, 1991).

The rocks, according to RMR-classification, adapted for the tunnel construction (Bieniawski, 1979) and for the slopes (Romana, 1985), taking in consideration the least favourable systems of discontinuities regarding their condition, can be classified in 3. category (moderately good rocks, partially stable, with possible fractures breaking along the particular fissures or at the number of intersections), with the predicted angle of friction from 25° to 35°, and with the cohesion from 200 kPa to 300 kPa (Stojković, 1991). Considering the results obtained by the geological research (Mitrović & Krsnik, 1988) and the reference data (Roberts, 1977; Aleksovski & Mirakovski, 1988), the angle of friction can be approximately estimated to 33°, and the strength of the rock structure block as a whole to 80 MPa. The coefficient of weakening of the rock structure block, according to Lomtatdze (1970), has been estimated from 0,6 to 0,8.

Due to the fossilization and the carbonisation of the Cretaceous rocks, the structure block itself influences the stability of the slopes; while its analysis, which is the basis for the application of geometrical method of determining the stability of the slopes, has showed the prospects of maintaining the stable slopes steep at an angle of over 3:1.

The structure of the greater part of the researched terrain has been composed of flysch layers of the Middle and Upper Eocene age ($E_{2,3}$) (figures 1 and 2). Breccias, sandstones and marls are vertically interlayered with chert occurrences on some places. The layers are well stratified (with an exception in the tectonic zones) and their thickness can vary from few millimeters to approximately 50 cm. It is significant that the marls have developed in thin layers, in the series ranging up to 50 m in thickness, while breccias and sandstones have developed in considerably thicker layers, but the thickness of the series does not exceed 5 m. When the transformation is complete, which is often the case, all the flysch segments are thin-layered beddings which exceed 50 m. The contact between the flysch and other layers is always tectonic.

The marls, if they are fresh, are greyish-blue or greyish-green in colour; or, if they are dilapidated, they are brown or ochre in colour. The breccias are grey, while the sandstones are light grey and light brown. The marls show irregular fractures, while the breccias and the sandstones show shallow-shelly or flat fractures. The results, obtained by analysing 53 samples of flysch marls, have discovered that the amount of $CaCO_3$ was limited from 42,73% to 74,81% (marls and limestone marls), with rare occurrences of marly limestones, where the amount of $CaCO_3$ varies from 75,00% to the maximum of 88,01%.

The axial compressive strength of the flysch layers has been defined, and it shows a wide range from 40 MPa in weakly determined layers to 6 MPa in dynamometamorphic varieties. Other mechanical measurable parameters of the rocks are shown in table 1.

The flysch beds of the researched area are folds varying from subhorizontal to subvertical type. According to the data obtained in »beta«-diagram (figure 5), structural axis has statistically shown the maximum course of 318/10°, while in some tectonic blocks, it rotates from 290/8° to 325/10°.

The position of the discontinuities, parallel to the axial plane, varies, which is determined by their position in the regional structure; while the fractures, vertical to the structural axis, are most often steep dipped over 50°. The fractures can be over 10 millimetres wide, in the marl beds are filled with clay, while in the breccias are filled with clay and tiny rock fragments. The research in the area of tunnel »Mravinci« and in the cut between two breccia conglomerates (Braun et al., 1992) has shown the presence of tectonic slaty marls in the dynamometamorphic varieties.

The density of the discontinuities of the flysch layers considerably varies. It is 3–10 discontinuity/m³ in the part where dynamometamorphism is not evident; while their density exceeds 40 discontinuity/m³ in the dynamically changed varieties of marl.

Considering the least favourable discontinuities, and, according to RMR-classification applied in tunnel construction (Bieniański, 1979) and on the slopes (Romana, 1985), the marls which have not undergone dynamometamorphosis, can be classified in 3. and 4. category, with the friction angle of about 25° and with cohesion ranging from 150 kPa to 250 kPa. According to the projected velocities of longitudinal waves, the friction angle could be estimated to approximately 33° and the axial strength of the whole structure block to approximately 20 MPa. The coefficient of the weakening of the structure block (Lomtaǰe, 1970) varies from 0,6 to 0,7.

The marls, having undergone dynamometamorphosis, according to RMR-classification, applied on tunnel construction (Bieniański, 1979) and on the slopes (Romana, 1985), and considering the least favourable discontinuities, can be as well classified in 4. and 5. category (Stojković, 1991) with the estimated friction angle of approx. 15° and with cohesion of approx. 100 kPa (weak to very weak rocks, unstable to very unstable; possible occurrence of big, flat, wedge-shaped or circular fractures). According to the measured values of the velocities of longitudinal waves, the friction angle could be estimated to approx. 20° while the axial strength measures approx. 2 MPa. The coefficient of the weakening of the structure block can be estimated to approx. 0,3 (Lomtaǰe, 1970).

The effects of karstification have been found in breccias and flysch sandstones and they have appeared in the form of crevices, modeled fractures and cavities. Two smaller caves have been discovered at the main gate of the tunnel »Mravinci« just at the intersections of the discontinuities of a wide opening.

The stability of the slopes in the flysch layers depends on the lithologic structure of the beds; on the degree of dynamometamorphosis they have undergone; and to a small extent, on the structure block. It has been observed that the most stable marls do not contain interlayers of lensshaped of heavily-grained rocks and that they have not been dynamometamorphosed. The tectonically changed marls contain very dense interlayered cleavage and axial-plane cleavage. The boudinage beddings are partly permeable. The strong tectonic porosity of the rocks and their partial permeability have got considerably negative influence on the stability of the beds on the slopes, and in the tunnels.

The Upper Eocene (E₃) beds contain badly sorted breccias and breccia conglomerates. They have developed as massive, but stratified layers with thickness ranging from approx. 0,60 to over 2 m. They have irregular shelly fractures in grey colour. The results, obtained by analysing 5 samples, showed that the amount of CaCO₃ varied from the minimum of 73,40% to the maximum of 99,76%.

The Promina breccias and breccia-conglomerates are characterised by high singular axial strength, which, defined by the samples of the rocks, varies from 99 MPa to 157 MPa, what distinctly indicates well fossilized hard rocks. Other mechanical features of the Promina breccias and breccia-conglomerates are shown in table 1.

The Promina beds contain intensive folds, so that their dip varies from subhorizontal to subvertical ones, and to the overturned (reverse) or tight ones (figure 6). According to the drawn »beta«-diagram, the structural axis generally orients to 350/12°, but there are tectonic blocks where the axis rotates (figure 6). The stratification and interlayered fractures can be up to 15 mm wide, and they are filled with clay mixed with tiny rock fragments, but some opened ones, the unfilled fractures can occur as well. The fracture systems in the rocks, according to their orientation and origin, correspond to the pattern of fractures parallel to the axialplane cleavage, and to the fractures vertical to the local structural axis, and they can be up to 20 mm wide, mainly opened ones or those filled with terra rossa mixed with tiny rock fragments. The fault zones have revealed, to a lesser extent, the tectonic schistose grey-greenish marls, as well as chert, which are lens-shaped insertions among breccias and breccia-conglomerates.

The karstification has been evident in the form of small cavities, modeled fractures of wider openings, as well as crevices.

The density of the discontinuities varies, but on average, it is approximately 5 discontinuities/m³.

Considering the least favourable discontinuities, and, according to RMR-classification, applied in tunnel construction (Bieniański, 1979) and on the slopes (Romana, 1985), these rocks can be classified as 2. and 3. category (good to favourable rocks; stable and moderately stable with possible flat fractures on particular areas or wedge-shaped fractures on particular intersections), with estimated friction angle of approx. 35° and with cohesion of approx. 300 kPa (Stojković, 1991). The obtained

results of longitudinal waves, measured on their bases, can show that the friction angle of the structure block should be from 32° to 35° and the axial compressive strength of the whole structural block can reach 50 MPa. The coefficient of the weakening of the structure block (Lomtaǰe, 1970) varies from 0,4 to 0,6.

The stability of the slopes of the Promina breccias and breccia-conglomerates primarily depends on the structural block and its manifestations. The analysis of the stability of the slopes had to be done separately for the heavier karstified zones, containing modeled fractures filled with clay; and, separately for the compact rocks with closed discontinuities.

The youngest Tertiary beds discovered on the terrain are badly sorted Oligocene breccias (Ol) containing fragments of limestone rocks, cemented with Calcite. The amount of CaCO₃, analyzed on three samples, has varied from 98,57% to 99,76%.

The Oligocene breccias and breccia-conglomerates considerably vary in their strength, which depends how strong the connective tissue of the weakly sorted particles of the older rocks is. The results obtained in the analyses of the axial compressive strength are limited from 16 MPa to 23 MPa. The measured velocities of the longitudinal waves-spreading; however, indicate the appearance of considerably more compact varieties of the rocks among Oligocene breccias and breccia-conglomerates, but their samples, most probably, have not been taken for analysis of the physical-mechanical features. The obtained results of the carried out analyses are shown in table 1. These rocks are most often interlayered; whereas the thickness of the beds ranges from 0,60 to 2,00 m; and they are occasionally thin-layered (the thickness of the layers ranging from 6 to 20 cm) or they can be massive as well.

The dips of the beds on the southern part of the researched area are generally tilted towards the northeast at an angle from 34° to 70°, and in the northern part, at an angle lesser than 10° towards the southeast, with the structural axis generally oriented 163° to 343° (figure 7). The interlayered fractures are tight, at a greater extent, whereas the fractures, parallel to the axial-plane cleavage and vertical to the structural axis, can be opened from one to ten millimetres. The wider openings are filled with terra rossa and tiny rock fragments, and they are cut in the rock mass that can have the volume of several m³. Besides, the process of karstification has been observed on the surface parts of these beds and it has also resulted in the appearance of crevices, modeled fractures and cavities. The discontinuities are closed, in the deeper parts of the rock massive.

The density of the discontinuities is variable, but, in general, it is very low; its average value can be estimated to 1–3 discontinuities/m³.

Considering the least favourable discontinuities, and, according to RMR-classification, applied in tunnel construction (Bieniański, 1979) and on the slopes (Romana, 1985), the Oligocene breccias can be classified as 3. category (favourable rocks, partially stable, with possible breaking along the particular fractures or along few intersections), with estimated angle of friction varying from 25° to 35° and with cohesion ranging from 200 kPa to 300 kPa (Stojković, 1991). The obtained results of geophysical research show that the angle of friction can vary from 27° to 33° and the strength of the structure block as a whole from 6 MPa to 60 MPa. The coefficient of weakening of the structure block, according to Lomtaǰe (1970) has been estimated from 0,7 to 0,9.

The stability of the slopes, to a lesser extent, depends on lithological characteristics of the rocks (the breccia zones and breccia-conglomerates with weaker connective tissue or containing considerable amount of marl particles in petrographic structure); whereas, to the greatest extent, however, it depends only on the structure block and its relating manifestations (the closed discontinuities or filled with clay). According to the geometrical method of the stability evaluation, the slopes, in the rock mass with closed discontinuities, are stable with a dip exceeding 3:1. In the parts of the rock mass, where the fractures had been formed by karstification, the possible compression of the blocks depends on the dip, for the stability of the slopes of referring discontinuities.

The Quaternary beds contain the sandy clay (Q₂), its maximum thickness can reach approx. 3 m, and have been created by crumbling of the flysch marl out of the rock mass. They also contain loose or poorly connected crumbling material (Q₄), its maximum thickness does not exceed 3 m as well. This crumbling material stationed between km 6+700 and km 6+820 contains angular rock fragments ranging from 20 cm to 1 m in size, while its crumbling bed is dipped at an angle ranging from 30° to 45°. Its foundation is built of breccias and breccia-conglomerates with modules of chert (The Promina beds – E₃).

These layers are unstable on the slopes and they had to be removed during the construction of the road.

All the beds, on the line marked out for the construction, in its engineering geological sense, are classified as:

- coherent well fossilized sedimentary clastic and nonclastic carbonate rocks,
- coherent poorly fossilized clastic rocks
- coherent non-fossilized rocks
- incoherent rocks

Among coherent, well fossilized sedimentary rocks we can distinguish nonclastic, carbonates (limestones of Senonian) and clastic medium-granular (sandstone of the flysch) and coarsely granular (breccias and breccia-conglomerates of the flysch, breccias and breccia-conglomerates of the Promina beds and poorly sorted Oligocene breccias).

Coherent poorly fossilized rocks are clastic, finely granular (flysch marls, lens-shaped and interlayered marls of the Promina beds, and in poorly sorted Oligocene breccias).

Coherent fossilized rocks are clastic and hard clay and can be found in the fractures, crevices and cavities and partly on the surface in the shape of terra rossa.

Incoherent rocks are powdery, shattery, the Quaternary beds which can be found in various amounts on the foundation of the rock as the result of its crumbling, or in terra rossa, or they can be as well coarsely granular, disarranged in the rock fragments or in the crumbling blocks.

These data have been the result of the research done on the »intact« terrain, and of the continuous observance of the construction works on the field, as well. Therefore, it has been possible to define engineering geological features of the rocks and the rock massive, as well as the whole engineering geological complex. This research has been carried out for the need of designing and tracing the road MC 11 Solin – Klis, which has come to its final stage.

However, we would like to point out that the similar method of research and partly the way of presenting the results, could

be applied in producing the General Engineering Geological Map of the Republic of Croatia.

By the use of relatively simple methods, along with relatively small number of lab analyses, the average characteristics of the hard structure blocks could be defined and numbered, while the varieties of individual physical-mechanical characteristics (engineering geological modelling) could be statistically evaluated (in particular distribution and with certain probability). It is obvious that anomalies have to be rejected, such as tectonic zones and similar zones that contain specific qualities of the rocks.

Bearing all this in mind, we could recommend the researching of the structure block in the particular engineering geological units, during the production of the General Engineering Geological Map of the Republic of Croatia, in order to define the position of discontinuities and the influence of the subterranean water; to measure the size of the fragments which are naturally detached by discontinuities; and to evaluate the statistical data. By doing it, it would, by the refractonal seismic research, and by the help of the lab analyses, be possible to define the existing engineering geological models on the basis of the obtained results. It would also provide the basic input data, which could be useful in preliminary evaluation of the quality of the structure block, when the solutions have to be found, in order to make a preliminary design or a survey on its influence on the environments of the object. We must point out that so far RMR-classification (Bieniawski, 1979; Romana, 1985) and »Q«-system (Barton et al., 1974), have been the most actual parametres for the preliminary evaluation of the quality of the structure block.

Broadly speaking, we can suggest, that, the methodology of engineering geological classification of the hard rocks, needed for the production and the publication of General Engineering Geological Map of the Republic of Croatia, should be co-ordinated with the methods applied in the rock mechanics and which are, in the field, as well as in the lab, very elaborated concerning methodological instructions ISRM (International Society for Rock Mechanics).