

Rudarsko-geološko-naftni zbornik	Vol. 16	str. 21-29	Zagreb, 2004.
----------------------------------	---------	------------	---------------

UDK 624.19
UDC 624.19

Originalni znanstveni rad
Original scientific paper

INŽENJERSKOGEOLOŠKE ZNAČAJKE TUNELA “KONJSKO”

IVAN GRABOVAC¹, DUŠKO BARČOT¹, SLOBODAN ŠESTANOVIĆ²,
ANTONIA DEČMAN¹

¹Institut građevinarstva Hrvatske d.d., Poslovni centar Split, Matice hrvatske 15, HR-21000 Split, Hrvatska
²Grđevinsko-arhitektonski fakultet Sveučilišta u Splitu, Matice hrvatske 15, HR-21000 Split, Hrvatska

Ključne riječi: inženjerska geologija, tunel, Konjsko, fliš, vapnenci, navlaka, geološki indeks čvrstoće

Key-words: Engineering geology, Tunnel, Konjsko, Flysch, Limestones, Overthrust, Geological strength indeks

Sažetak

Istraživačkim radovima za potrebe projektiranja tunela «Konjsko» s dvije tunelske cijevi na autocesti Split-Zagreb, dobiveni su svi relevantni podaci o značajkama stijena i terena temeljem kojih su izrađeni prognozni inženjerskogeološki uzdužni profili. Zapadni portali tunela su locirani u naslagama zgnječenih i dijelom dinamički metamorfoziranih lapora eocenskog fliša, a istočni u naslagama senonskih vapnenaca. Kontakt flišnih lapora i vapnenaca je navlačan. Početkom iskopa tunela počelo je i redovito registriranje svih pojava i stanja stijenske mase nakon svakog miniranja, što je rezultiralo stvarnim uzdužnim inženjerskogeološkim profilima i poprečnim profilima čela. Odstupanja od prognoziranog stanja je bilo, a nastala su zbog nemogućnosti posve točnog određivanja nagiba navlačne plohe koja se nalazila plitko ispod nivelete tunela i pojave poprečnih rasjeda koji su raskinuli navlaku i uzdignuli lapore u dio tunelskog profila. Podaci prikupljeni prije i tijekom izvedbe tunela upotpunili su spoznaje o geološkoj građi šireg okoliša i fizičko-mehaničkim značajkama naslaga.

Abstract

Investigation works for the design of the Konjsko tunnel with two pipes, part of the Split-Zagreb motorway, provided relevant data on rock mass and soil properties for construction of the prognose engineering-geological longitudinal sections. West tunnel portals are situated in tectonically deformed and partly dynamically metamorphosed Eocene flysch marls, while east ones are located in Senonian limestones. There is an overthrust contact between flysch marls and limestones. With the beginning of the excavations, rock mass characteristics were regularly registered after each blasting and actual longitudinal engineering-geological cross-sections were constructed as well as cross-sections of the excavation face. There were some differences between prognosticated and registered sections since it was infeasible to accurately determine the dip of the overthrust plane that was at shallow depth below the tunnel grade line and also due to the occurrence of transversal faults that intersected the overthrust. Data collected before and during the tunnel construction complemented the knowledge on geological structure of the surroundings and physical-mechanical characteristics of strata.

Uvod

Za potrebe projektiranja autoceste Split - Zagreb, Institut građevinarstva Hrvatske d.d., Poslovni centar Split, Odjel za geotehniku, obavio je geološka, inženjerskogeološka, hidrogeološka i geotehnička istraživanja na širem području trase sjeverne i južne tunelske cijevi tunela “Konjsko”.

Ulazni - zapadni portal južne tunelske cijevi izveden je na stac. 128+754,30, a istočni portal na stac. 129+863,90 (L=1109,60 m). Debljina nadsloja iznosi od oko 6 m do oko 23 m ispod postojeće ceste za Bročanac. Debljina nadsloja povećava se na maksimalno 125 m u središnjem dijelu tunela.

Ulazni - zapadni portal sjeverne tunelske cijevi izveden je na stac. 128+879,00, a istočni portal na stac. 129+901,80 (L=1326,042 m). Debljina nadsloja iznosi od oko 8 m do oko 25 m ispod ceste za Bročanac te do maksimalno 145 m u središnjem dijelu tunela.

Osim kartiranja terena u širem okolišu tunela u mjerilu 1:5000 te geotehničkih i geofizičkih istraživanja, za dobivanje što točnijih pretpostavki pri izradbi prognoznih inženjerskogeoloških profila korišteni su i rezultati sadržani u pripadajućim osnovnim geološkim kartama i tumačima (Magaš et al., 1973; Marinčić et al., 1971, 1975, 1977), a za spoznaje o seizmičnosti šireg područja korištene su seizmološke karte za povratne periode 200 i 500 godina (Jorgić et al., 1987).

Inženjerskogeološki i geotehnički istraživački radovi provedeni su u cilju utvrđivanja sastava i fizičko-mehaničkih značajki naslaga koje izgrađuju teren na istraženom području, debljine kvartarnih naslaga te kote pojavljivanja naslaga fliša na zapadnom dijelu lokacije. Dakako, pri tomu su registrirani i položaji slojeva vapnenačkih naslaga, kao i karakterističnih diskontinuiteta.

Na odabranim uzorcima lapora i vapnenaca izvedena su laboratorijska ispitivanja u geomehaničkim

laboratorijima IGH d.d. u Splitu i Zagrebu. Petrografske analize uzoraka obavio je Institut za geološka istraživanja Zagreb, a geofizička ispitivanja na terenu IGH d.d. Zagreb - Zavod za geotehniku.

Navedena istraživanja i postignute spoznaje poslužile su projektantima kao osnova za geotehničku kategorizaciju stijenske mase (prema RMR i Q sustavu), projektiranje podgradnog sustava te odabir tehnologije iskopa tunela.

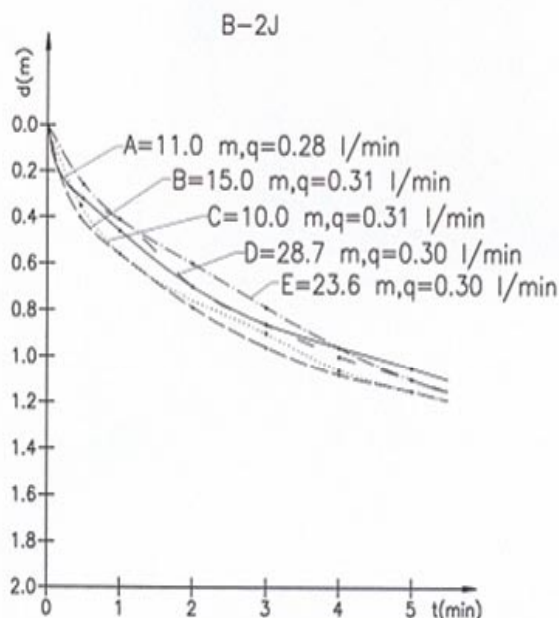
Praćenjem iskopa i kartiranjem čela, bokova i kalote tunela nakon svakog miniranja, dobiveni su vrlo vrijedni podaci koji, uz izračunani geološki indeks čvrstoće za različite vrste naslaga, upotpunjuju i detaljiziraju geološke značajke terena u širem okolišu tunela.

Terenska istraživanja

Istraživačko bušenje izvedeno je na ukupno osam pozicija. Na osi tunelskih cijevi izvedene su po tri bušotine na zapadnom dijelu i po jedna na istočnim portalima. Više bušotina nije bilo moguće izvesti zbog nemogućnosti pristupa.

Od geofizičkih istraživanja izvedena su seizmička down-hole mjerenja u tri bušotine, geoelektrična mjerenja LIS tehnikom, seizmička plitka refleksija te refrakcijsko i geoelektrično sondiranje.

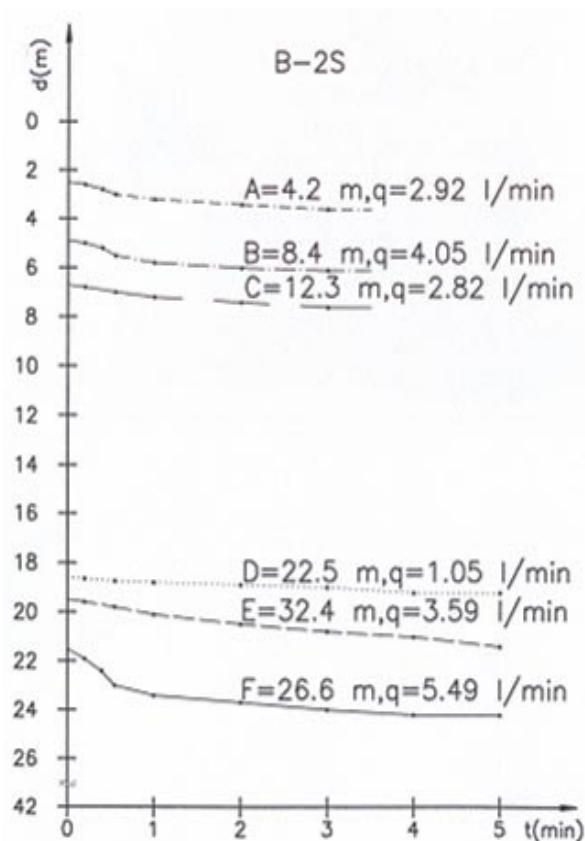
Prilikom determinacije jezgre određivan je i postotak razlomljenosti stijenske mase (RQD), nagib karakterističnih diskontinuiteta i njihova svojstva (kontinuiranost, hrapavost, veličina zijeva, vrsta ispune i sl.).



Sl. 1 Rezultati WLT u laporima fliša u bušotini B-2J. Legenda: A, B, C, D, E – krivulje gubitaka vode (l/min) na intervalima ispitivanja d (m); d – dubina od ušća bušotine do razine vode, t – vrijeme

Fig. 1 WLT results in flysch marls from the borehole B-2J. Legend: A, B, C, D, E – water loss curves (l/min) for test intervals d (m); d – depth from the borehole collar to water level, t – time

Paralelno s bušenjem izvodilo se ispitivanje vodopropusnosti stijenske mase metodom nalijevanja (WLT – test gubitka vode), na određenim intervalima bušotine. Na temelju dobivenih rezultata izrađeni su karakteristični dijagrami gubitaka vode u funkciji vremena (sl. 1 i 2).



Sl. 2 Rezultati WLT u senonskim vapnencima u bušotini B-2S. Legenda: A, B, C, D, E, F – krivulje gubitaka vode (l/min) na intervalima ispitivanja d (m); d – dubina od ušća bušotine do razine vode, t – vrijeme

Fig. 2 WLT results in Senonian limestones from the borehole B-2S. Legend: A, B, C, D, E, F – water loss curves (l/min) for test intervals d (m); d – depth from the borehole collar to water level, t – time

Iz prikazanih dijagrama vidljivo je da su gubici vode u laporima fliša ujednačeni i da neovisno o dubini ispitivanja u bušotini B – 2J iznose u prosjeku 0,30 l/min. U senonskim razlomljenim vapnencima gubici vode su puno veći ($q_{\min}=1,05$ l/min, $q_{\max}=5,49$ l/min) nego u laporima i vrlo su različiti na različitim dubinama. Postignuti rezultati upućuju na zaključak da se sporo procjeđivanje u laporima fliša događa kroz pukotine vrlo malog zijeva, a u razlomljenim senonskim vapnencima, ovisno o stupnju razlomljenosti, zijev pukotina je veći uz moguće postojanje kaverni. Na kaverne ili prazne pukotine zijeva većeg od 10 cm u senonskim vapnencima upućuje podatak o ispitivanju u bušotini B – 2S na dubini 17,50 m, gdje se voda u bušotini niti na trenutak nije zadržala.

Rezultati svih obavljenih istraživanja i ispitivanja omogućili su izradbu geološke i inženjerskogeološke karte užeg područja tunela M 1: 5000 i dva prognozna uzdužna inženjerskogeološka profila po osima tunelskih cijevi M 1:1000. Praćenjem miniranja izrađeno je oko 450 inženjerskogeoloških poprečnih profila u mjerilu 1: 50 za područje obje tunelske cijevi, od kojih je šest znakovitih prikazano u ovom radu.

Rezultati prethodnih terenskih istraživanja dopunjavani su tijekom izvođenja u tunelu, stalnim praćenjem i registriranjem promjena.

Litostratigrafski odnosi

Kartiranjem terena i korištenjem literaturnih podataka, u širem okolišu tunelskih cijevi izdvojene su vapnenačke naslage gornje krede i eocena te klastične naslage eocenskog fliša.

Gornjokredni vapnenci senona (K_2^3) bogati rudistnom faunom su svijetlosive do bijele boje s rijetkim prosljocima dolomitičnih vapnenaca i pojavom gomolja rožnjaka. Na istočnom i zapadnom dijelu lokacije vapnenci su slojeviti, a u središnjem dijelu gromadasti. Slojevi su uglavnom bankoviti, debljine od 60 cm do 2 m, a mjestimično i više. Tanji slojevi su debljine od 20 cm do 60 cm. Registrirana su dva glavna pukotinska sustava (uglavnom subvertikalna do vertikalna), okomita i kosa na pružanje slojeva, koji, zajedno s međuslojnim diskontinuitetima stijensku masu izdvajaju u blokove. Svi uočeni diskontinuiteti su uglavnom ravni, neznatno hrapave do hrapave površine. Nagib slojeva na zapadnom dijelu lokacije je prema sjeveru pod blagim kutom (pretežito od 20° do 30°, a mjestimično i 10°).

Foraminiferski vapnenci donjeg do srednjeg eocena ($E_{1,2}$) bogati su fosilnim ostacima miliolida, alveolina i numulita. Boje su bijele do svijetle smeđožute. Registrirani su s južne strane izvan područja tunelskih cijevi Nagnuti su prema sjeverozapadu pod kutom od 40°. Na istočnom dijelu su u rasjednom kontaktu s klastičnim naslagama eocenskog fliša.

Srednjoeocenski laporoviti glaukonitni gomoljasti vapnenci (E_2) su registrirani u uskom pojasu na istočnom dijelu lokacije (izvan područja tunela), gdje su u rasjednom kontaktu s naslagama fliša i naslagama gornjokrednih vapnenaca. Boje su sivosmeđe. Nagnuti su prema sjever-sjeverozapadu pod kutom od 20° do 30° stupnjeva.

Klastične naslage eocenskog fliša ($E_{2,3}$) registrirane su na zapadnom dijelu lokacije, gdje su u zoni tunelskih cijevi podvučene pod senonske gornjokredne vapnenca (K_2), ali i na istočnom dijelu lokacije, izvan tunela. Izgrađuju ih tektonizirani, zgnječeni lapori sive do sivoplave boje s prosljocima glinovitih lapora. Generalno su nagnute prema sjever-sjeveroistoku. Na terenu su ove naslage većinom prekrivene deluvijem i eluvijalnim tvorevinama, a njihovi izdanci uočavaju se samo mjestimično.

Kvartarne eluvijalne tvorevine (Q_{el}) zastupljene su glinovitim prahom svijetlo žute boje, limonitiziranim, s tragovima otopljenog kalcita, polučvrste konzistencije. Povećanjem dubine ove naslage poprimaju karakteristike trošnih lapora. Debljina im iznosi od 60 cm do najviše 3,5 m.

Kvartarne deluvijalne naslage (Q_d) zastupljene su prašinastim glinama smeđe boje, u površini humuziranim, nisko do srednje plastičnim, teško gnječive konzistencije s nejednolikim učešćem stijenskog kršja. Debljina im iznosi od 1,10 m do najviše 2,20 m.

Kvartarne siparišne naslage (Q_s) zastupljene su vapnenačkim kršjem i manjim blokovima vapnenca, a registrirane su uglavnom uz navlačni kontakt kod zaseoka Seravići. Njihova debljina procijenjena je na od oko 1 m izvan zone navlačnog kontakta do oko 5 m uz navlačni kontakt.

Ljudskom aktivnošću izgrađeni su suhozidi visine uglavnom od 1 do 1,5 m, a samo mjestimično 2 do 3 m i nasut je materijal sastavljenim od blokova vapnenca i vapnenačkog kršja koji potječe iz zasjeka na dijelu postojeće asfaltno prometnice (AF). Debljina nasipa iznosi do 5,5 m.

Tektonski odnosi

U sklopu inženjerskogeološkog kartiranja terena snimljeni su uočeni položaji slojeva, pukotinski sustavi i rasjedi.

Prema Marinčić et al., (1971), istraženo područje se nalazi unutar tektonske jedinice Dalmatinska zagora, koja zahvaća područje sjeveroistočno od Kozjačkog rasjedanavlake, čije je čelo natisnuto na eocenske naslage fliša.

Sa sjeverne strane ove navlake nalazi se navlaka Konjsko-Vučevica-Radošić, dominantna struktura u zoni tunela. Njezino je opće pružanje u smjeru zapad - istok, uz mjestimična povijanja. Prema rezultatima istraživačkog bušenja i inženjerskogeološkog kartiranja, nagib navlačne plohe je prema sjeveru pod kutom od 20° do 30°.

Od većeg broja dijagonalnih lomova, najvažniji se pruža potezom Klis - Konjsko (sjeverozapad - jugoistok), duž kojeg je došlo do spuštanja naslaga na sjeveroistočnom krilu i skretanja od Dinarskog pravca pružanja u pružanje istok - zapad. Ovaj rasjed je izvan područja tunela.

Osim navedenih, zapaženi su na terenu i rasjedi s južne strane tunelskih cijevi, općeg pružanja sjeverozapad - jugoistok, uz mjestimična povijanja. Na zapadnom dijelu lokacije tunele presijeca rasjed pružanja također sjeverozapad - jugoistok. S južne strane navlake registrirani su rasjedi pružanja istok - zapad, s povijanjem prema sjeverozapadu pri istočnom kraju lokacije.

Intezivna tektonska aktivnost rezultirala je brojnim pukotinama u stijenskoj masi, duž kojih se procjeđuje oborinska voda u podzemlje. Erozijska i korozivna akti-

vnost podzemne vode je u vapnenačkim naslagama širila pukotine i modelirala njihove stijenske te stvarala kaverne. Na okršenoj površini terena uočene su brojne male vrtače, a na otvorenim izdancima vapnenačkih stijena škrape.

Kod analize tektonskog sklopa zaključeno je da su u stijenama senonske starosti deformacije nastale u pretpirenejskoj i pirenejskoj orogenetskoj fazi, a u stijenama eocena dominantno u pirenejskoj. Naime, izmjereni elementi svih položaja slojeva imaju statistički maksimum $348/15^\circ$, ali se na konturnom dijagramu njihovih polova uočava kako u suštini čine pojas nastao rotacijom oko regionalne strukturne osi položaja $301/9^\circ$, kao rezultat pirenejskog boranja, rasjedanja i navlačenja. Lokalna odstupanja od regionalne strukture dijelom su primarna (Marinčić, 1979), a dijelom su posljedica rotacija uz smične rasjede sa subhorizontalnim kretanjem tektonskih blokova (Braun et al., 1992).

Postignute spoznaje o tektonskom sklopu, poglavito o diskontinuitetima, poslužile su za određivanje kategorizacije stijenskih masa, izbor projektnih rješenja iskopa, tehnologiju izvođenja, planiranje napredovanja u izvođenju te izbor podgrade, osiguranja i zaštite u fazi iskopa, ali i za dimenzioniranje konačne obloge. S obzirom da su tektonske značajke veoma detaljno istražene i opisane u elaboratima o istraživačkim radovima, njihovo uvažavanje rezultiralo je nesmetanim kontinuiranim radovima bez iznenadnih i neočekivanih efekata koji su se, kao posljedica tektonskih odnosa, mogli negativno odraziti na sigurnost prilikom izvođenja radova, a u konačnosti su mogli rezultirati prekoračenjem ugovorenog roka završetka.

Kartiranjem tijekom iskopa tunela uočen je veći broj poprečnih mlađih rasjeda koji su raskinuli navlačnu plohu i rezultirali mjestimičnim pojavama lapora u tunelu na mjestima gdje oni, prema prognoznim inženjerskogeološkim profilima, nisu bili očekivani.

Detaljnim kartiranjem čela nakon svakoga miniranja, prikupljen je veliki broj informacija korisnih za izbor zaštite i daljnje napredovanje iskopa.

Na slici 3 prikazana je geološka karta šireg područja Konjskog, a na sl. 4 inženjerskogeološka karta područja uz tunelske cijevi prema geološkom indeksu čvrstoće naslaga (Hoek, 1994, Hoek & Brown, 1997, Hoek et al., 1995, 1998; Marinos & Hoek, 2001). Osnova je bila OGC List Split (Marinčić et al., 1971), a dopunjena je rasjedima koji su uočeni detaljnim istraživanjima tijekom izvođenja tunela. Na slici 5 prikazan je geološki profil kroz Konjsko polje.

Hidrogeološki odnosi

Hidrogeološki odnosi su, dakako, posljedica litološkog sastava i tektonskih odnosa na terenu. Kvartarne

prašnasto-glinovite naslage male debljine i s nejednolikim učešćem kršja na zapadnom dijelu lokacije odlikuju se međuzrnskom poroznošću. Za fliš je karakteristična pukotinska poroznost, a za vapnenačke naslage pukotinska i kavernoza.

Kvartarne naslage imaju promjenljive značajke vodopropusnosti koje ovise o udjelu glinovite komponente u njima. Vapnenačke naslage su dobro vodopropusne, lapori slabo vodopropusni, a glinoviti lapori praktično vodonepropusni.

Oborinska voda se kroz pukotine i kaverne u vapnenačkim naslagama procjeđuje relativno brzo prema hipsometrijski nižim zonama do navlačnog kontakta s flišom, a potom sporije kroz uske pukotine u tektoniziranim laporima fliša. Glinoviti lapori su vodonepropusni.



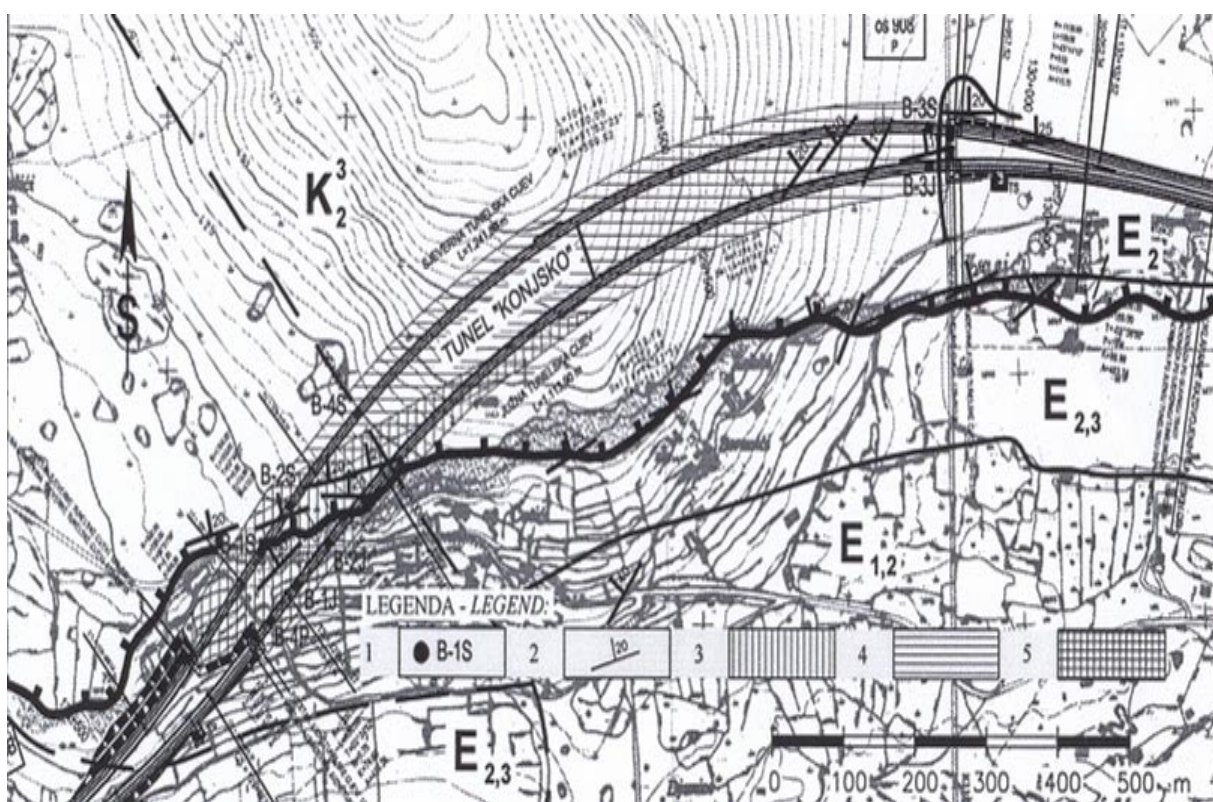
Sl. 3. Geološka karta šireg područja Konjskog (bez površinskog pokrivača). Legenda: 1- lapori eocenskog fliša, 2- glaukonitni laporoviti vapnenci, 3- foraminiferski vapnenci, 4- rudistni vapnenci, 5- položaj sloja, 6- navlaka, 7- pretpostavljeni rasjed, 8- normalna litološka granica, 9- diskordantna granica, 10- profil

Fig. 3. Geological map of the broader area of Konjsko (surface cover excluded). Legend: 1- Eocene flysch marls, 2- glauconitic marly limestones, 3- foraminiferous limestones, 4- rudist limestones, 5- layer, 6- overthrust, 7- inferred fault, 8- conformable lithological contact, 9- discordant lithological contact, 10- cross section

Stalnih ili povremenih površinskih tokova na užem dijelu istraživane lokacije nema. Za vrijeme kišnih razdoblja polje s južne strane tunela biva poplavljeno (kota dna polja je na oko 330 m nad morem).

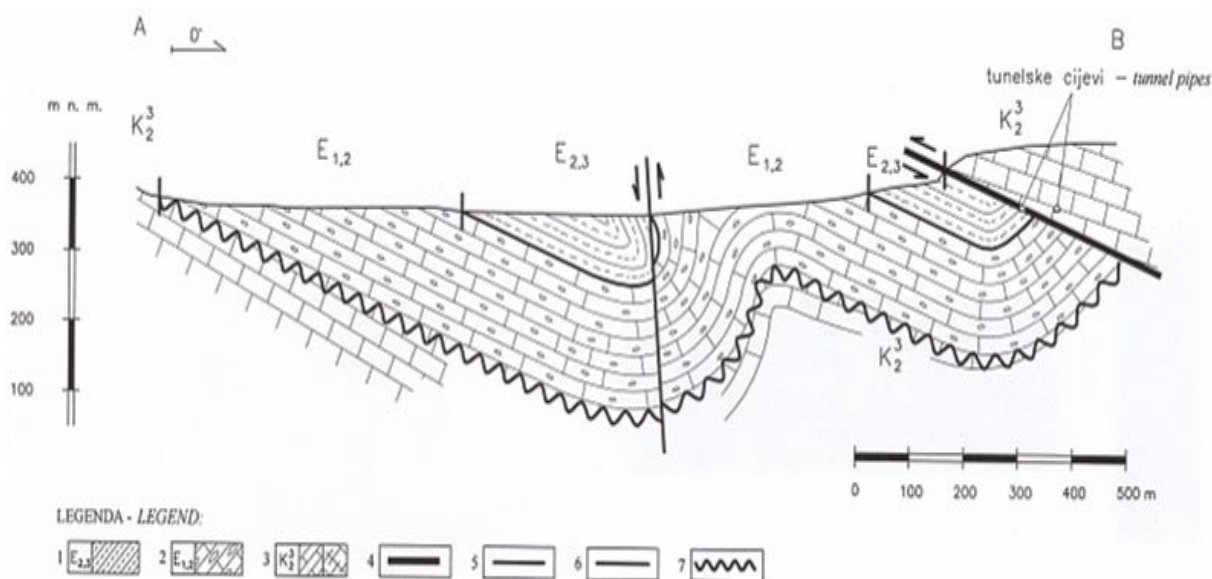
Prilikom istraživačkog bušenja registrirana je podzemna voda bez povezanog vodnog lica na zapadnom dijelu tunela u flišnim naslagama, kao i uz navlačni kontakt. Razina oscilira u ovisnosti o količini oborina. Na istočnom kraju tunela (bušotine u vapnencima), nije registrirana podzemna voda do dubine bušenja.

Tijekom iskopa tunela u flišu bilo je manjih dotoka podzemne vode, povezanih s količinom oborina i blizinom navlake. Na dijelovima tunela koji prolaze uz navlačnu zonu bilo je većih dotoka vode (naročito za vrijeme kišnih razdoblja), jer naslage zgnječnog fliša čine hidrogeološku barijeru u odnosu na razlomljene vapnenačke naslage s kojima su u kontaktu, a koje su hidrogeološki kolektor. Pojave vlaženja i koncentriranih procjeđivanja oborinske vode u naslagama vapnenaca za vrijeme kišnih razdoblja bile su redovite, posebno u zoni istočnih portala s malim nadslojem.



Sl. 4 Inženjerskogeološka karta područja uz tunelske cijevi. Legenda: 1-istraživačka bušotina, 2- položaj sloja, 3- GSI=40-60, 4-GSI=20-40, 5-GSI=15-25

Fig. 4 Engineering geological map of the tunnel area (surface cover excluded). Legend: 1- exploration borehole, 2-layer, 3-GSI=40-60, 4-GSI=20-40, 5-GSI=15-25



Sl. 5. Geološki profil Konjskog polja. Legenda: 1-lapori eocenskog fliša, 2-foraminiferski vapnenci, 3-rudistni vapnenci, 4-navlaka, 5-rasjed, 6-normalna litološka granica, 7-diskordantna granica

Fig. 5. Geological cross-section of Konjsko polje. Legend: 1- Eocene flysch marls, 2- foraminiferal limestones, 3- rudist limestones, 4- overthrust, 5- fault, 6- conformable lithological contact, 7- unconformity

Inženjerskogeološke značajke stijena i terena

Na istočnom dijelu istraženog područja, vapnenačke naslage su u površinskoj zoni veoma razlomljene i okršene. U njima su registrirane kaverne i jame, posebno u zoni navlačenja. Pukotine su u pravilu široke i do desetak centimetara, ispunjene crvenicom i kršjem ili bez ispune.

Prema rezultatima geofizičkih istraživanja (Andrić & Mitrović, 2002) pri istočnim portalima, ukupna debljina površinske jako razlomljene zone u vapnencima iznosi do oko 8 m. Brzina uzdužnih seizmičnih valova u toj zoni je manja od 1000 m/s. Ispod nje registrirana je zona prosječne debljine oko 10 m s brzinama uzdužnih seizmičnih valova od 1000 do 2800 m/s. Sukladno postignutim rezultatima, stijensku masu u toj zoni označujemo kao jako do srednje razlomljenu i okršenu s pukotinama ispunjenima glinom. U blizini rasjeda ova zona je debljine do 15 m. Brzine uzdužnih seizmičnih valova veće od 2800 m/s označuju uglavnom kompaktnu vapnenačku stijenu koja se nalazi u dubljim dijelovima terena.

Indeks kakvoće jezgre (RQD) u površinskoj zoni rijetko prelazi 25%, u zoni s boljim fizičko-mehaničkim značajkama iznosi između 50 i 75%, a u dubljim dijelovima nerijetko seže i do 100%. U zoni navlačnog kontakta, u kojoj je stijenska masa izrazito razlomljena, RQD ima vrijednosti manje od 25%.

Vrijednosti jednoosnih čvrstoća na tlak na uzorcima vapnenca većinom su u rasponu od 30 do 60 MN/m², dok je udjel CaCO₃ od 83 do 95 %.

Stijenke pukotina su ravne i hrapave, povećanjem dubine stisnute i bez ispune, a u gornjim zonama su šire, ispunjene crvenicom.

Uvažavajući dobivene rezultate, vapnenačke naslage se prema RMR klasifikaciji prilagođenoj tunelogradnji (Bieniawski, 1989) i kosinama (Romana, 1985), uzimajući u obzir najnepovoljnije stanje, svrstavaju u II., III. i IV. kategoriju, a u zoni navlačenja i pri istočnim portalima u V.

Na zapadnom dijelu u laporima fliša prekrivenim deluvijalnim naslagama i eluvijalnim tvorevinama, geofizičkim istraživanjima također su prognozirane tri zone. U prvoj, površinskoj trošnoj zoni debljine oko 3 m, brzina uzdužnih seizmičkih valova iznosi manje od 800 m/s. Ovu zonu terena izgrađuju uglavnom prašnaste gline. Drugu zonu debljine oko 10 m (do 15 m u rasjednim zonama), izgrađuju naslage degradiranog i trošnog zgnječenog fliša, s brzinama uzdužnih valova od 800-3000 m/s. Treću, najdublju zonu izgrađuju naslage kompaktnijih i tektonikom manje oštećenih lapora fliša, s brzinama uzdužnih seizmičkih valova preko 3000 m/s.

Ispitivanjem udjela CaCO₃ na uzorcima lapora utvrđen je pretežiti raspon od 30 do 60 %.

Pukotine u laporima su stisnute, zijeve manjeg od 1 mm i uglavnom glatke. RQD u gornjem dijelu iznosi uglavnom manje od 25 %, a u dubljim dijelovima i do 80 %. Dinamički Poissonov koeficijent je između 0,43 i 0,46.

Vrijednosti jednoosnih tlačnih čvrstoća su veoma male i iznose na velikom broju ispitanih uzoraka prosječno od 0,30 MN/m² do 5,30 MN/m².

U laporima fliša je gustoća diskontinuiteta promjenljiva. U područjima koja nisu dinamički metamorfzirana ima 3 - 10 diskontinuiteta/m³, a u promijenjenim varijetetima i više od 40 diskontinuiteta/m³ pa se primjenom RMR klasifikacije (Bieniawski, 1989), oni svrstavaju većinom u V. kategoriju stijenskih masa (na početku zapadnog dijela u južnoj tunelskoj cijevi bilo je svega 4,50 m lapora IV. kategorije, a svi ostali i oni u sjevernoj tunelskoj cijevi bili su V. kategorije).

Uvažavajući sve relevantne parametre postignute istraživačkim radovima, izračunani GSI za razlomljene vapnenačke naslage (Hoek et al., 1995. i Hoek & Brown, 1997) u širem okolišu je u rasponu 40-60 (povoljne stijenske mase), a u zoni navlake i istočnih portala 20-40 (slabe stijenske mase).

GSI u laporima fliša (Hoek et al., 1998. i Marinos & Hoek, 2001) u širem istraženom području iznosi od 20 do 40 (slabe stijenske mase), a u zoni tunela, poglavito u zoni navlake, 15-25 (vrlo slabe i slabe stijenske mase).

Usporedbom brzina seizmičkih valova i vrijednosti GSI, uočeno je da manjim brzinama odgovara manji GSI (i obrnuto).. Jednak rezultat dobije se i usporedbom brzina i vrijednosti RQD, odnosno usporedbom GSI i RQD.

Prema Jorgić et al., (1978), područje tunela se nalazi u zoni za koju se predviđa uz 63 % vjerovatnosti za povratni period od 200 godina maksimalni intenzitet potresa 7°, a za povratni period od 500 godina 8° MSK - 64 ljestvice.

Rasprava i zaključak

Za potrebe projektiranja i izvedbe tunela „Konjsko“ na autocesti Split – Zagreb (popularno nazvanoj Dalmatina), obavljena su detaljna inženjerskogeološka istraživanja koja su rezultirala izradbom inženjerskogeološke karte temeljene na podacima o geološkom indeksu čvrstoće (Hoek. 1994., Hoek & Brown, 1997., Hoek et al., 1995. i 1998. i Marinos & Hoek, 2001) i inženjerskogeoloških profila za obje tunelske cijevi. Iskop tunela je svakodnevno praćen uz detaljno kartiranje čela, bokova i kalote nakon svakog miniranja, što je u konačnici rezultiralo brojnim poprečnim profilima čela tunela. Stvarni inženjerskogeološki uzdužni profili u detaljima se razlikuju od prognoznih.

Na slici 6 prikazani su stvarni inženjerskogeološki uzdužni profili, a na slici 7 šest znakovitih poprečnih profila čela iskopa nakon miniranja. Profili na stacionažama 128+915,00 (sjeverna tunelska cijev) i 129+118,00 te 129+137,50 (južna tunelska cijev) prikazuju čela u zoni navlake. Ilustrativan je profil na stacionaži 129+118,00 koji otkriva kako je navlačna ploha raskinuta poprečnim mlađim rasjedom, što nije bilo moguće prognozirati.

Zgnječeni i dijelom dinamički metamorfzirani lapori fliša u punom profilu su registrirani u obje tunelske cijevi u nešto većoj duljini od prognozirane zbog blažeg nagiba navlačne plohe od pretpostavljenog.

Nakon što se punim profilom ušlo u vapnence, ponovno su se pojavili lapori, ali samo u donjim dijelovima profila. Duljina njihovog pojavljivanja iznosila je oko 200 m u južnoj tunelskoj cijevi, a oko 50 m u sjevernoj. Razlog toj pojavi, koja nije bila prognozirana, objašnjen je poprečnim rasjedima koji su raskinuli navlačnu plohu i izdigli lapore u dio tunelskog profila.

Mjestimični prekoprofilski iskop nastao je zbog ispadanja dijelova stijenske mase po izraženim diskontinuitetima, a bio je u granicama predviđenim projektom i prognoznim profilima.

Od egzogeodinamičkih procesa, najzastupljeniji su procesi spiranja i selektivnog erodiranja u naslagama fliša te odronjavanja i osipanja u vapnencima, poglavito na vanjskom vidljivom navlačnom kontaktu.

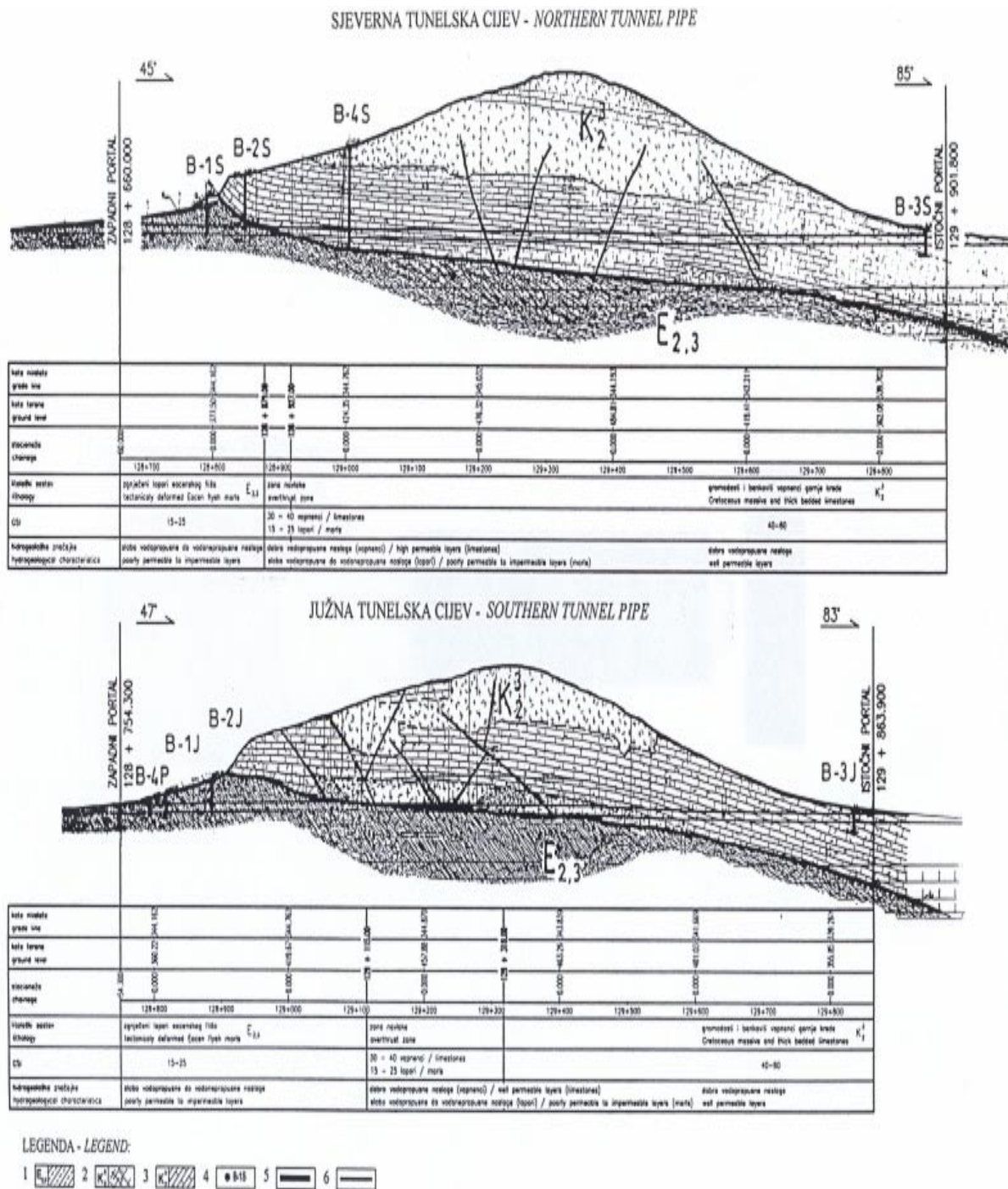
Od geomorfoloških pojava uočena je izražena okršenost vapnenačkih naslaga s proširenim i modeliranim diskontinuitetima i škrapama na površini te kavernama, a lokalno i manjim špiljama u dubini.

Endogeodinamički procesi u području tunela mogu rezultirati potresima maksimalnog intenziteta 8° MSK-64 ljestvice na površini, te recentnim pomacima duž navlačne plohe i poprečnih i dijagonalnih rasjeda.

Postignute spoznaje su rezultat istraživanja koja su provedena prije iskopa tunela, ali i tijekom stalnog praćenja napredovanja nakon svakoga miniranja. 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 promijenjeno miniranjem. Pristup istraživanju, a dijelom i način iznošenja dobivenih rezultata, temelji se na postavkama i preporukama iz Legende za izradu Osnovne inženjerskogeološke karte Republike Hrvatske (Braun, 1998). Tako su se, primjerice, relativno jednostavnim metodama odredile i kvantificirale prosječne značajke stijenskih masa i tektonske zone unutar kojih su svojstva stijena različita i specifična.

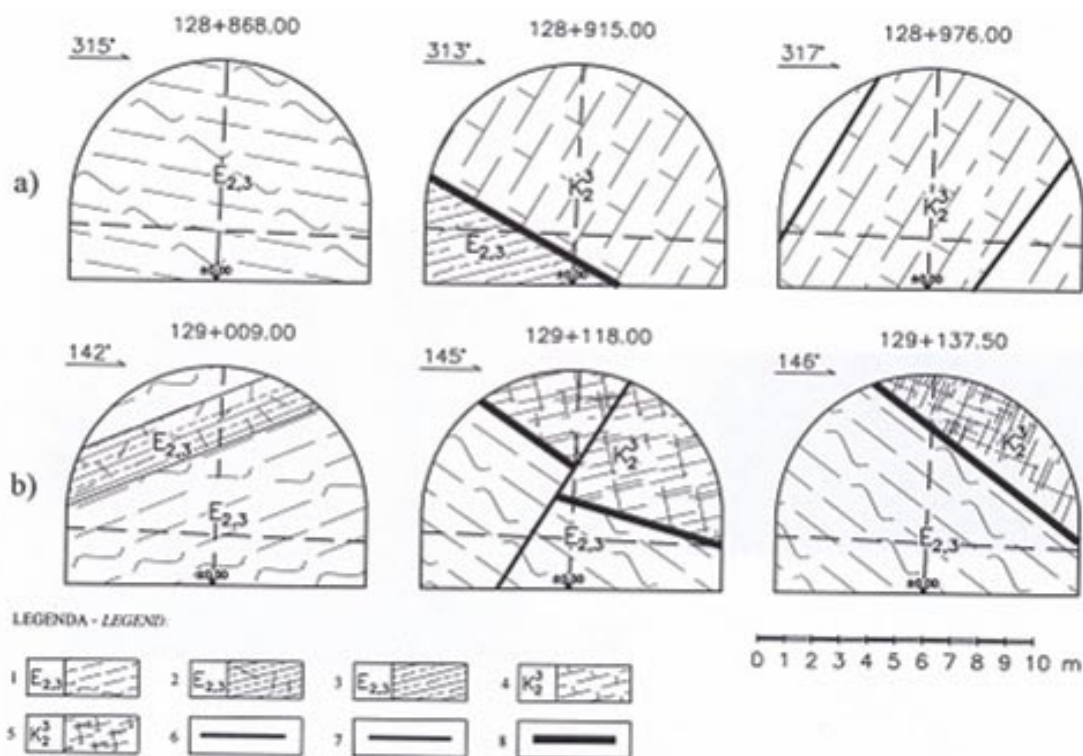
Iskustva na ovom i sličnim poslovima (Braun et al., 1992, Šestanović et al., 1993) opravdavaju preporuku da se tijekom izrade Osnovne inženjerskogeološke karte Republike Hrvatske u pojedinim inženjerskogeološkim cjelinama provedu istraživanja strukturnog sklopa, odredi stanje diskontinuiteta i utjecaj podzemne vode, provede mjerenje veličine fragmenata koji su prirodno odijeljeni diskontinuitetima i statistički obrade dobiveni rezultati. To bi, uz ostala istraživanja (poglavito ona koje daje refrakcijska seizmika i laboratorijske analize) omogućilo određivanje inženjerskogeoloških modela i osnovnih ulaznih parametara za rješavanje konkretnih zadaća na razini idejnih rješenja u svim slučajevima rada u stijeni, ali i prilikom izradbe studija utjecaja na okoliš. Ovdje je bitno napomenuti da su za ocjenu kvalitete stijenskih masa aktualne RMR klasifikacija (Bieniawski, 1989) i Q-sustav (Barton et al., 1974) te GSI (Hoek. 1994., Hoek & Brown, 1997., Hoek et al., 1995. i 1998. i Marinos & Hoek, 2001).

Vrijedne upute za opis diskontinuiteta stijenskih masa i za određivanje deformabilneta stijena geofizičkim metodama primijenjene su u skladu s odgovarajućim metodološkim uputama ISRM (1977. i 1978).



Sl. 6. Stvarni inženjerskogeološki uzdužni profili. Legenda: 1-lapori eocenskog fliša, 2-gromadasti rudistni vapnenci, 3-slojeviti rudistni vapnenci, 4-istraživačka bušotina, 5-navlaka, 6-rasjed

Fig. 6. Actual engineering-geological longitudinal cross-sections. Legend: 1- Eocene flysch marls 2-massive rudist limestones, 3-bedded rudist limestones, 4-exploration borehole, 5-overthrust, 6-fault



Sl. 7. Znakoviti poprečni profili čela kartirani nakon miniranja. Legenda: a)-sjeverna tunelska cijev, b)-južna tunelska cijev, 1-zdrobljeni lapori eocenskog fliša, 2-razlomljeni lapori eocenskog fliša, 3- razlomljeni glinoviti lapori eocenskog fliša, 4-razlomljeni rudistni vapnenci, 5-zdrobljeni rudistni vapnenci, 6-pukotina, 7-rasjed, 8-navlaka

Fig. 7. Characteristic cross-sections of the excavation face after blasting. Legend: a)-northern tunnel pipe, b)-southern tunnel pipe, 1- crushed Eocene flysch marls, 2-fractured Eocene flysch marls, 3- fractured clayey Eocene flysch marls, 4-fractured rudist limestones, 5-fractured limestones, 6-joint, 7-fault, 8-overthrust

Literatura

- Andrić, M. & Mitrović, G (2002): Elaborat o geofizičkim istraživanjima tunela Konjsko. IGH d.d. Zagreb, Zavod za geotehniku, Zagreb.
- Barton, N. R., Lien, R. & Lunde, J. (1974): Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support. Rock Mech. 6 (4), Springer, 189-239, Heidelberg.
- Bieniawski, Z. T. (1989): Engineering rock mass classification: A complete manual for engineers and geologists in mining, civil and petroleum engineering. Wiley, 272 pp, New York.
- Braun, K. (1998): Legenda za izradu Osnovne inženjerskogeološke karte Republike Hrvatske mjerila 1:100.000. Institut za geološka istraživanja, Zavod za hidrogeologiju i inženjersku geologiju, str. 35, Zagreb.
- Braun, K., Šestanović, S., Barčot, D. & Samardžija, I. (1992): Inženjerskogeološke i strukturološke značajke u funkciji dokazivanja stabilnosti visokih zasjeka u čvrstim stijencama na primjeru dionice poluautoceste MC-11, Solin-Klis. Rudarsko-geološko-naftni zbornik, vol. 4, 59-66, Zagreb.
- Hoek, E. (1994): Strength of rock and rock masses. ISRM News Journal, Springer, 2 (2), 4-16, Heidelberg.
- Hoek, E., Kaiser, P. K. & Bawden, W. F. (1995): Support of underground excavation in hard rock. A. A. Balkema, 300 pp, Rotterdam.
- Hoek, E. & Brown, E. T. (1997): Practical estimates of rock mass strength. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 34 (8), Springer, 1165-1186, Heidelberg.
- Hoek, E., Marinos, P. & Benissi, M. (1998): Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athens Schist Formation. Bull. Eng. Geol. Env., 57 (2), 151-160, Springer, Berlin.
- ISRM (1977): 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.
- ISRM (1978): Suggested methods for determining in-situ deformability of rock. Commission on standardization of laboratory and field tests. Pergamon press, London.
- Jorgić, M., Šupić, V., Kuk, V., Hadžijevski, D., Pekevski, V., Ribarić, V. & Vukašinović, M. (1987): Seizmološka karta SFRJ za povratne periode. Zajednica za seizmologiju SFRJ, Beograd.
- 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. (1979): 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., Hrelčić, D., Magaš, N., Benček, Đ. & Grimani, I. (1975): Osnovna geološka karta SFRJ, list Omiš, K 33-22, 1:100.000, Institut za geološka istraživanja Zagreb i Savezni geološki zavod, Beograd.
- Marinčić, S., Korolija, B., Mamučić, P., Magaš, N., Majcen, Ž., Brkić, M. & Benček, Đ. (1977): Tumač za Osnovnu geološku kartu SFRJ, list Omiš, K 33-22, Institut za geološka istraživanja Zagreb i Savezni geološki zavod Beograd.
- Marinos, P. & Hoek, E. (2001): Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch. Bull. Eng. Geol. Env., 60 (2), 85-92, Springer, Berlin
- 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.
- Šestanović, S., Braun, K. & Barčot, D. (1993): Inženjerskogeološke značajke trase prometnice Solin - Klis (Dalmacija, Hrvatska). RGN zbornik 5, 87-97, Zagreb