

UDK 624.134.001.2

Priljeno 25. 5. 2009.

Projektiranje i izvedba zasjeka u flišnoj stijenskoj masi

Alan Brunčić, Danijela Jurić-Kaćunić, Meho Saša Kovačević

Ključne riječi

flišna stijenska masa, zasjek, projektiranje, stabilnost, istražni radovi, stanje naprezanja i deformacija

Key words

flysch rock mass, side cut, design, stability, investigations, stress/strain state

Mots clés

masse rocheuse de flysch, redan, étude, stabilité, reconnaissances, état de contrainte-déformation

Ключевые слова

масса породы флиша, зарубка, проектирование, стабильность, изыскательные работы, напряжения и деформации

Schlüsselworte

Flyschfelsmassiv, Einschnitt, Entwerfen, Stabilität, Untersuchungsarbeiten, Stand der Festigkeit und Verformbarkeit

A. Brunčić, D. Jurić-Kaćunić, M. S. Kovačević

Pregledni rad

Projektiranje i izvedba zasjeka u flišnoj stijenskoj masi

Opisuje se metodologija projektiranja i izvedbe sustava za osiguranje stabilnosti zasjeka u flišnoj stijenskoj masi na riječkom području. Na temelju rezultata istražnih radova, iskustva tijekom izvedbe zahvata na osiguranju stabilnosti stijenskih zasjeka u naslagama fliša te mjerenja i promatranja tijekom izvođenja i provedbom povratnih analiza o stanju naprezanja i deformacija utvrđene su značajke stijenske mase s opisom realne veličine parametara čvrstoće i deformabilnosti.

A. Brunčić, D. Jurić-Kaćunić, M. S. Kovačević

Subject review

Design and realization of side-cuts in flysch rock mass

The methodology applied in the design and realization of the system used to stabilize side cuts in flysch rock formations in Rijeka area is described. Rock mass properties were determined, and strength and deformability parameters were described, on the basis of investigation results, experience gained during stabilization of side cuts in flysch formations, and using results of measurement and monitoring activities conducted during back analyses of stress/strain properties.

A. Brunčić, D. Jurić-Kaćunić, M. S. Kovačević

Ouvrage de synthèse

Etude et réalisation des redans dans la masse rocheuse de flysch

La méthodologie appliquée dans l'étude et la réalisation du système utilisé pour assurer la stabilité des redans (talus remaniés) dans le flysch rencontré dans la région de Rijeka est décrite. Les propriétés de la masse rocheuse ont été déterminées et les paramètres de résistance et de déformabilité ont été décrits sur la base des reconnaissances, expérience gagnée au cours de stabilisation des redans dans le flysch, et en utilisant les résultats des campagnes de mesure et d'observation conduites pendant les analyses en retour des propriétés contrainte-déformation.

A. Брунчич, Д. Юрич-Качунич, М. С. Ковачевич

Обзорная работа

Проектирование и выполнение зарубок в массе породы флиша

Описывается методология проектирования и выполнения систем для обеспечения стабильности зарубок в массе породы флиша в области города Риеке. На основании результатов изыскательных работ, опыта, полученного при производстве работ по обеспечению стабильности зарубок в породе отложений флиша и измерений и наблюдений, проводимых в процессе выполнения, а также проведения обратного анализа состояния напряжения и деформации установлены характеристики породной массы с описанием реальных величин параметров прочности и подверженности деформации.

A. Brunčić, D. Jurić-Kaćunić, M. S. Kovačević

Übersichtsarbeit

Entwurf und Ausführung eines Einschnitts im Flyschfelsmassiv

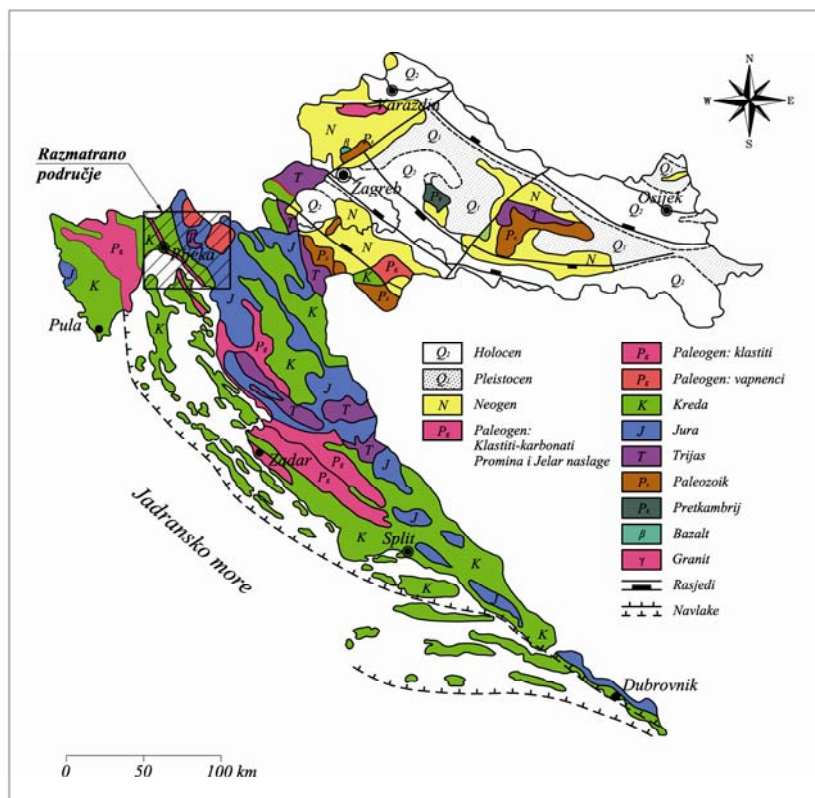
Man beschreibt die Methodologie von Entwerfen und Ausführen eines Systems für die Sicherung der Stabilität des Einschnitts im Flyschfelsmassiv im Gebiet von Rijeka. Auf Grund der Ergebnisse der Untersuchungsarbeiten, der Erfahrungen während der Ausführung der Eingriffe für die Sicherung der Stabilität in den Flyschaufschichtungen, sowie der Messungen und Beobachtungen während der Ausführung und Durchführung der rückbezüglichen Analysen über den Stand der Spannungen und Verformungen, wurden die Kennzeichen des Felsmassivs mit Beschreibung der realen Größe der Parameter für Festigkeit und Verformbarkeit festgelegt.

Autori: Mr. sc. **Alan Brunčić**, dipl. ing. građ., Institut IGH, Zagreb; **Danijela Jurić-Kaćunić**, dipl. ing. građ.; prof. dr. sc. **Meho Saša Kovačević**, dipl. ing. građ., Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Zagreb

1 Uvod

Fliš je opisni termin za kompleks litološki heterogenih klastičnih sedimentnih stijena nastalih turbiditnim tokovima odnosno podmorskim klizanjima sedimenata. Za flišni je kompleks karakteristična sukcesivna izmjena sitnozrnastih sedimenata kao što su šejl, siltit i lapor te pješčenjak. Fliš može sadržavati i breče, konglomerate i vapnence. Flišne naslage paleogenske starosti raspro-

heterogena s izmjenom krupnozrnastih i sitnozrnastih klastičnih stijena. Uglavnom je izgrađena od glinaca, siltita s pješčenjacima i brečokonglomeratima, a ponegdje se mogu na njezinim granicama pronaći i naslage vapnena. Niži dijelovi flišnih depozita izgrađeni su od lapora. Osnovne petrografske karakteristike različitih litoloških članova flišnih stijena mogu se dobiti iz osnovne geološke karte razmatranog područja (slika 1.), ali za analizu geotehničke prikladnosti potrebna je iscrpna analiza.



Slika 1. Geološka karta Hrvatske (Velić, 1992.)

tranjene su u jadranskom pojasu Hrvatske, a područje istraživanja ovog rada upravo je dio jadranskog pojasa Hrvatske izgrađen od naslaga fliša.

Flišna stijenska masa ima vrlo raznolike fizikalne i mehaničke karakteristike, s obzirom na njihov litološki sastav, ali i stupanj trošenja. S obzirom na izrazitu podložnost trošenju pod djelovanjem atmosferilija, pojedine stijene flišnog kompleksa znatno mijenjaju i fizikalno-mehaničke značajke u relativno kratkom vremenskom intervalu trošenja. Zbog toga je značajno kojem području trošenja pripadaju određene stijenske mase [1]. Mehaničko trošenje pomaže i ubrzava kemijsko trošenje koje je vrlo karakteristično za flišnu stijensku masu [2].

Flišne naslage paleogenske starosti rasprostranjene su u jadranskom pojasu Hrvatske. U ovom se radu posebna pozornost posvećuje flišnim naslagama u području grada Rijeke (slika 1.). Flišna je stijenska masa litološki

2 Čvrstoća i deformabilnost flišne stijenske mase

Određivanje čvrstoće i deformabilnosti stijenske mase jedna je od najvažnijih zadataka pri provođenju numeričkih analiza u stijenskom inženjerstvu. Parametri čvrstoće i modul deformacije stijenske mase nužni su parametri za svaku numeričku analizu stabilnosti i prognozu deformacija geotehničkih konstrukcija. Stijena je redovito razlomljena, heterogena i anizotropna. Laboratorijska ispitivanja na uzorcima jezgre i terenska ispitivanja ne reprezentiraju ponašanje stijenske mase većeg volumena. Kao takva onemogućavaju dobivanje reprezentativnih deformacijskih parametara za proračun. Reprezentativna ispitivanja čvrstoće i deformabilnosti stijenske mase pokusnim opterećenjima rijetko su praktično ili ekonomski moguća [3].

Zbog navedenih ograničenja čvrstoća i deformabilnost stijenske mase određuju se na temelju rezultata klasificiranja stijenske mase od kojih su najzastupljenije

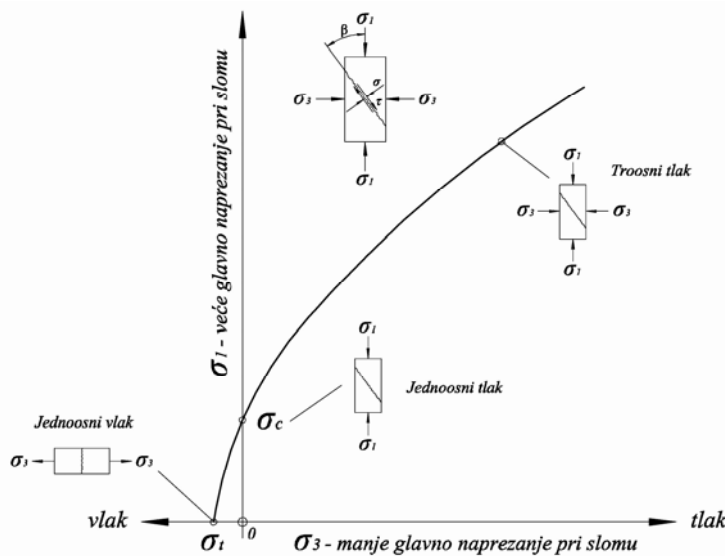
RMR [4], Q [5] i GSI [6] klasifikacija.

Čvrstoća stijenske mase definira se usvajanjem nekog od kriterija čvrstoće i određivanjem pripadnih parametara čvrstoće na temelju rezultata klasificiranja stijenske mase. Najrašireniji kriterij čvrstoće stijenske mase jest empirijski Hoek-Brownov kriterij [7], [8], [9], [10], koji pomoću parametara čvrstoće povezuje glavna naprezanja pri slomu (slika 2.):

$$\sigma'_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_c} + s \right)^a \quad (1)$$

gdje su:

- m_b, s i a - parametri čvrstoće ovisni o karakteristikama stijenske mase
- σ_c - jednoosna tlačna čvrstoća intaktne stijene
- σ_1 - veće glavno naprezanje pri slomu
- σ_3 - manje glavno naprezanje pri slomu



Slika 2. Odnosi glavnih naprezanja pri slomu

Parametri čvrstoće određuju se iz sljedećih izraza:

$$m_b = m_i \cdot e^{\frac{GSI-100}{28-14D}}; \quad s = e^{\frac{GSI-100}{9-3D}}; \quad (2)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right)$$

gdje su:

- GS - rezultat klasificiranja stijenske mase
- m_i - vrijednost koja se određuje iz troosnih pokusa na uzorcima stijene pri različitim naprezanjima ili se procjenjuje prema vrsti stijene
- D - faktor poremećenosti stijenske mase zbog oštećenja nastalih miniranjem i relaksacijom. Vrijednost D varira od 0 za neporemećenu stijensku masu *in situ* do 1 znatno poremećenu stijensku masu.

Deformabilnost, odnosno krutost stijenske mase određuje se također na temelju rezultata klasificiranja stijenske mase [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16] i [17]. Najrašireniji izraz za procjenu modula deformacije jest [9]:

$$E_m = \left(1 - \frac{D}{2} \right) \sqrt{\frac{\sigma_c}{100}} \cdot 10^{\frac{GSI-10}{40}} \quad (3)$$

Znatan doprinos istraživanju ponašanja flišnih stijenskih naslaga pri izvedbi geotekničkih zahvata u Hrvatskoj dali su Arbanas, Mišćević i Jašarević [18], [19], [20], [21], [22], [23] i [24].

GSI ZA HETEROGENE STIJENSKE MASE KAO ŠTO JE FLIŠ (Marios i Hoek, 2000) Iz opisa litologije i strukture stijenske mase te stanja pukotinskih površina (izabranih u međuslojnim ploham) potrebno je odabrati položaj u dijagramu. Potrebno je odabrati položaj koji odgovara uvjetima diskontinuiteta i procjeni prosječne vrijednosti GSI. Pri tome nije značajno biti previše točan. Procjena vrijednosti između 33 i 37 je realnija od točne vrijednosti GSI=35. Za napomenuti je da Hoek-Brownov kriterij nije primjenjiv na strukturu uvjetovane trošne zone. Kada su prisutni nepovoljno orijentirani kontinuirani diskontinuiteti slabijih značajki, isti prevladavaju ponašanje stijenske mase. Čvrstoća stijenske mase može biti smanjena prisustvom podzemne vode i to mora biti uzeto u obzir pomakom prema dobrim, slabim i vrlo slabim uvjetima stijenske mase. Pomi tlak ne mijenja vrijednost GSI i utječe korištenjem efektivnih napona u geostatičkim analizama.		STANJE DISKONTINUITETA (Dominantne pukotine)	
SASTAV I STRUKTURA		VRLO DOBRO - Vrlo hrapave svježe, nerastrošene površine pukotina	JAKO DOBRO - Hrapave, slabo rastrošene površine pukotina
A. Debelo uslojeni, pješčenjak u velikim blokovima. Efekt premaza ispunje u međuslojnim pukotinama minimaliziran je nepravilnostima površine. U plitkim tunelima i padinama ovi pukotinski sustavi mogu izazvati kontrolirane strukturne nestabilnosti.		DOBRO - Glatke, srednje rastrošene i hrpave površine pukotina	SLABO - Vrlo glatke, često skliske površine s čvrstim premazom ili ispunom s ugljatim odlozima
B. Pješčenjaci s tankim prosljocima silita	C. Pješčenjaci i siliti u pravilnoj izmjeni	VRLO DOBRO - Vrlo hrapave, slabo rastrošene površine pukotina	VRLO DOBRO - Vrlo hrapave, slabo rastrošene površine pukotina
D. Siliti ili silitni šejlovi s pješčenjačkim slojevima	E. Meki siliti ili glinoviti šejlovi s pješčenjačkim slojevima	DOBRO - Glatke, srednje rastrošene i hrpave površine pukotina	DOBRO - Glatke, srednje rastrošene i hrpave površine pukotina
C, D, E i G - mogu biti manje savijeni, ali to ne mijenja čvrstoću. Tektonski pomaci, rasjedi i nedostatak kontinuiteta pomiče ove materijale u kategorije F i H.		VRLO DOBRO - Vrlo hrapave, slabo rastrošene površine pukotina	VRLO DOBRO - Vrlo hrapave, slabo rastrošene površine pukotina
F. Tektonski poremećeni, lako deformirani, izloženi smicanju glinoviti šejlovi ili siliti s deformiranim i slomljenim slojevima pješčenjaka koji izgrađuju uglavnom kaotičnu strukturu.		DOBRO - Glatke, srednje rastrošene i hrpave površine pukotina	DOBRO - Glatke, srednje rastrošene i hrpave površine pukotina
G. Neporemećeni prašnasti ili glinoviti šejlovi sa ili bez tankih pješčenjačkih slojeva.	H. Tektonski poremećeni prašnasti ili glinoviti šejlovi koji formiraju kaotičnu strukturu s džepovima gline. Tanki slojevi pješčenjaka usitnjeni su u male odlomke.	VRLO DOBRO - Vrlo hrapave, slabo rastrošene površine pukotina	VRLO DOBRO - Vrlo hrapave, slabo rastrošene površine pukotina
▷ : Znači deformaciju nakon tektonskog poremećaja		VRLO DOBRO - Vrlo hrapave svježe, nerastrošene površine pukotina	VRLO DOBRO - Vrlo hrapave, slabo rastrošene površine pukotina

Slika 3. Geološki indeks čvrstoće (GSI) za fliš [27]

Arbanas [18] ističe da projektiranje geotehničkih zahvata u heterogenim i vrlo mekim stijenama kao što je flišni stijenski kompleks predstavlja u sadašnjem trenutku glavni izazov geolozima i geotehničarima. Kompleksna struktura ovih materijala koja slijedi iz strukturne i tektonske povijesti nastanka ovih naslaga previše je složena da bi se jednostavno mogla uklopiti u uvjete usvojenih sustava klasifikacija stijenske mase.

Za procjenu čvrstoće i deformabilnosti flišnih naslaga u Hrvatskoj, navedeni autori koristili su se posebno razvijenom metodologijom procjene parametara čvrstoće zasnovane na geološkom indeksu čvrstoće (GSI) prezentiranom u radovima Marinosa i Hoeka [25], [26] [27] [28] [29], (slika 3.).

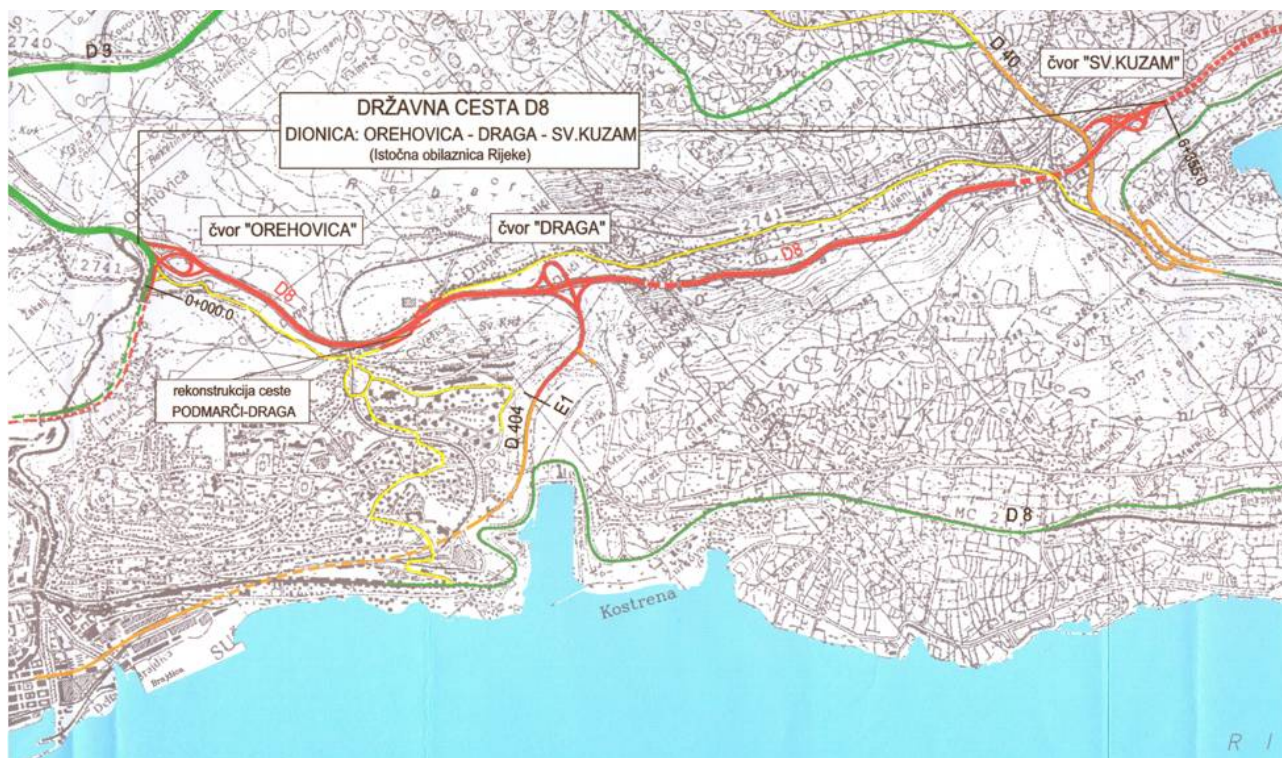
Arbanas [18] zaključuje da sagledavanje ukupnog ponašanja flišne stijenske mase određivanjem konstanti koje određuju Hoek-Brownov kriterij čvrstoće stijenske mase zahtijeva krajnje kritički pristup u svim elementima procjene i današnjim spoznajama o ukupnom ponašanju. Flišna stijenska masa svakako u tom pogledu ima najmanje stečenih iskustava te time i najveće zahtjeve u daljnjim istraživanjima.

3 Državna cesta D8, dionica Orehovica-Draga-Sv. Kuzam

Projektiranje i izvedbu zasjeka u flišnoj stijenskoj masi na riječkom području, u skladu s principom interaktivnog projektiranja opisanoga u prethodnom poglavlju, prika-

zat ćemo na primjeru istočne obilaznice grada Rijeke. Dionica Orehovica-Draga-Sv.Kuzam dio je planirane državne ceste D8. Izgradnjom dionice Orehovica-Draga-Sv.Kuzam rasteretit će se Jadranska turistička cesta (D8) čiju ulogu preuzima predmetna dionica. Na početnom će dijelu dionica biti čvorom Orehovica povezana na početak autoceste prema Zagrebu. U čvorištu Draga dionica će biti povezana s državnom cestom D404 kojom se povezuje lučki bazen Brajdica i centar Rijeke, odnosno ostvaruje se glavni istočni ulaz u grad. Kraj dionice bit će u Sv. Kuzmu spojen na državnu cestu D40 koja se priključuje na Jadransku turističku cestu iznad Bakra (slika 4.).

Osiguranje stabilnosti stijenskih zasjeka flišnih naslaga na predmetnoj mikrolokaciji izvedeno je duž trase na različite načine kao što su: klasično zasijecanje „blažih“ nagiba s ugradnjom drenažnih konstrukcija (kopani poprečni drenovi i horizontalni samobušivi drenovi), potporno-obložni zidovi s primarnom podgradom (mlazni beton u slojevima, armaturne mreže, samobušiva sidra raznih nosivosti i duljina te procjednice) i sekundarnom oblogom (armiranobetonski montažni elementi), sidrene armiranobetonske roštiljne konstrukcije u kombinaciji sa samobušivim drenovima i procjednicama, gabionski zidovi (u nožici zasjeka) u kombinaciji s kamenim nasipom i zidom od kamena iznad gabiona, zidovi od kamena (samostalno) i u kombinaciji s djelomičnim kamenim zamjenama materijala iznad zidova od kamena i drenažnim konstrukcijama (kopani poprečni drenovi), te „čavlando tlo“ (nosi-



Slika 4. Trasa dionice Orehovica-Draga-Sv.Kuzam

va trodimenzijska mreža i samobušiva sidra) i iznad nje-ga u kombinaciji sa zidom od kamena te djelomičnim kamenim zamjenama materijala i drenažnim konstrukci-jama (kopani poprečni drenovi) iznad zida. Na niz loka-cija duž trase iznad i unutar samih zasjeka izvedeni su različiti sustavi vanjske odvodnje koji također pridonose povećanju stabilnosti zasjeka.

3.1 Analize stabilnosti projektiranih i izvedenih osiguranja pokosa u flišnim naslagama

U sklopu geotehničkog projekta trase, državna cesta D8, dionica: Orehovica-Draga-Sv.Kuzam izvršene su geo-statičke analize za trasu navedene dionice. Geostatički proračuni provedeni su radi potvrde stabilnosti pojedinih elemenata na trasi: usjeka, zasjeka i nasipa, kao i uvjeta izvođenja radova - geotehničkih zahvata na trasi. Geotehnički radovi obuhvaćali su geotehničku prospek-ciju lokacije, analize inženjersko-geoloških rezultata, procjenu parametara tla te izradu geotehničkih modela.

Geostatičke analize obuhvaćaju definiranje geotehničkih modela karakterističnih profila na pojedinim poddioni-cama trase preko procijenjenih geotehničkih parametara za utvrđene osnovne tipove naslaga, geostatičke analize stabilnosti za potrebe osiguranja zasjeka u flišnim nasla-gama, te prijedloge potrebnih geotehničkih zahvata pri izvođenju radova na trasi.

Za potrebe izrade geotehničkih modela i provođenja analiza stabilnosti duž trase utvrđena su dva osnovna tipa naslaga za koje su usvojeni parametri za analize:

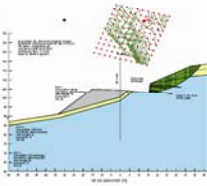






1. pokrivač, glinovite naslage koluvijalnog i deluvijalnog podrijetla. Redovito su to gline visoke plastičnosti (CH), polučvrste do čvrste konzistencije
2. flišna stijenska podloga, siltiti u podlozi.

Za pokrivač su usvojene donje prosječne vrijednosti pa-rametara čvrstoće glinovitih naslaga utvrđene laboratorij-skim ispitivanjem na uzorcima tla provedenim u toku različitih faza istražnih radova za trasu i građevine na trasi. S obzirom na variranje vrijednosti duž trase, slje-deće vrijednosti reprezentiraju parametre pokrivača: kut trenja $\phi = 25^\circ$, kohezija $c = 10 \text{ kN/m}^2$. Te vrijednosti potvrđene su i povratnim analizama stabilnosti nastalih klizanja u Draškoj dolini. U granicama tih vrijednosti su i parametri čvrstoće potpuno raspadnutih naslaga iz fliš-ne podloge.

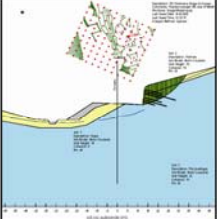


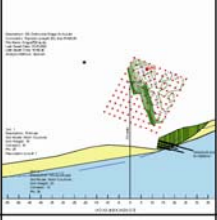




Za naslage fliša, siltite u podlozi, svježe do srednje ras-padnute, prosječni su parametri čvrstoće uobičajeno pri-hvaćeni u literaturi [27]: kut trenja $\phi = 36^\circ$, kohezija $c = 13 \text{ kN/m}^2$.

U tablici 1. prikazani su prikazani svi relevantni podaci i parametri za izvedena osiguranja zasjeka u flišnim nas-lagama na dionici trase od čvorišta Orehovica do čvoriš-

Tablica 1. Prikaz relevantnih podataka za izvedena osiguranja pokosa zasjeka u flišnim naslagama od čvorišta Orehovica do čvorišta Draga

lokacija	stacionaža	dužina	visina	opis osiguranja zasjeka-sustav zaštite	parametri naslaga za analize	analiza stabilnosti	izvedena primarna podgrada	izvedena sekundarna podgrada
čvorište "Orehovica"	0+700 (0+000 do 1+920)	cca. 400m	do 8m	primarna i sekundarna zaštita pokosa	pokrivač: $c = 10 \text{ kN/m}^2$ $\phi = 25^\circ$ podloga: $c = 13 \text{ kN/m}^2$ $\phi = 36^\circ$			
čvorište "Orehovica" - čvorište "Draga"	2+235 do 2+515	cca. 300m	do 11m	primarna i sekundarna zaštita pokosa	pokrivač: $c = 10 \text{ kN/m}^2$ $\phi = 25^\circ$ podloga: $c = 13 \text{ kN/m}^2$ $\phi = 36^\circ$	ista kao na profilu u km 0+700		
čvorište "Draga"	0+278 do 0+320	cca. 50m	do 9m	primarna i sekundarna zaštita pokosa	pokrivač: $c = 10 \text{ kN/m}^2$ $\phi = 25^\circ$ podloga: $c = 13 \text{ kN/m}^2$ $\phi = 36^\circ$	ista kao na profilu u km 0+700		

Tablica 2. Prikaz relevantnih podataka za projektirana i započeta osiguranja pokosa usjeka i zasjeka u flišnim naslagama od tunela Draga do tunela Sv. Kuzam

lokacija	stacionaža	predviđena dužina	predviđena visina	opis osiguranja zasjeka-predviđeni sustav zaštite	parametri naslaga za analize	analiza stabilnosti	izvedena primarna podgrada-djelomično, lokalne nestabilnosti prije početka izvođenja primarne podgrade	odroni materijala i izvedene primarne podgrade, klizanja materijala na pokosu iznad predviđenog potporno-obložnog zida
zasjek od profila 193 do 207	3+940	cca. 280m	do 10m	primarna i sekundarna zaštita pokosa	pokrivač: $c = 10$ kN/m^2 $\varphi = 25^\circ$ podloga: $c = 13$ kN/m^2 $\varphi = 36^\circ$			
zasjek od profila 246 do 259	5+020	cca. 700m	do 8m	primarna i sekundarna zaštita pokosa	pokrivač: $c = 10$ kN/m^2 $\varphi = 25^\circ$ podloga: $c = 13$ kN/m^2 $\varphi = 36^\circ$			
usjek od profila 261 do 268	5+260	cca. 350m (lijevo i desno)	do 12m	primarna i sekundarna zaštita pokosa	pokrivač: $c = 10$ kN/m^2 $\varphi = 25^\circ$ podloga: $c = 13$ kN/m^2 $\varphi = 36^\circ$	ista kao na profilu u km 3+940		

ta Draga (od km 0+000 do km oko 3+000), i to sidrenim podgradnim sklopom, izradom primarne zaštite (sustavom slojeva mlaznog betona armiranog armaturnim mrežama i izvedbom u redovima samobušivih sidara i procjednica) te sekundarnom podgradom obložnim armiranobetonskim elementima.

U tablici 2. prikazani su svi relevantni podaci i parametri za projektirana i započeta osiguranja usjeka i zasjeka u flišnim naslagama na dionici trase od tunela Draga do tunela Sv. Kuzam (od km 3+120 do km 5+360), i to sidrenim podgradnim sklopom, započetim djelomičnim izvođenjem primarne zaštite (sustavom slojeva mlaznog betona armiranog armaturnim mrežama i izvedbom u redovima samobušivih sidara i procjednica).

Na pojedinim lokacijama trase (poddionica trase između tunela Draga i tunela Sv.Kuzam) u fazama početka izvođenja iskopa zasjeka na pokosima iznad predviđenih sustava primarnih i sekundarnih podgrada osiguranja stabilnosti zasjeka ili u fazama izvođenja kompletnih primarnih podgradnih sustava, uočene su pojave formiranja lokalnih i globalnih nestabilnosti navedenih zasjeka. Unatoč velikim nastojanjima, trudu i pokušaju da se ipak zadrže i izvedu do kraja kompletno prvo definirani podgradni sustavi, sve prethodno navedeno upućivalo je

na potrebu kompletno novog projektnoga rješenja u navedenim područjima uočenih nestabilnosti zasjeka, a o kojima će se iscrpnije izlagati u nastavku rada.

Za potrebe sanacije nastalih nestabilnosti tijekom izgradnje su provedeni dodatni geotehnički istražni radovi koji su se sastojali od istražnog bušenja, laboratorijskih ispitivanja uzoraka tla, inženjersko-geološkog kartiranja otvorenih pokosa, sondažnih jama i tla, te geodetskih radova snimanja postojećeg stanja nakon izvedenoga iskopa i nastalih klizanja. Istražne bušotine iskorištene su za ugradnju piezometara i inklinometara.

Za prethodno navedene "kritične" lokacije na trasi uočenih pojava nestabilnosti, prije početka i tijekom izvođenja osiguranja zasjeka sidreno podgradnim sklopom, u skladu s principima interaktivnog projektiranja, napravljen je sustavni odabir geotehničkih parametara za utvrđene tipove naslaga dodatnim istražnim radovima i povratnim numeričkim analizama radi potvrde stabilnosti predmetnih osiguranja zasjeka na trasi u svim fazama izvođenja radova za novousvojene sustave osiguranja zasjeka.

Ustanovljeno je da geološka građa općenito odgovara pretpostavkama iz prethodno provedenih istražnih radova, ali postoje znatna odstupanja u debljini pojedinih

naslaga koja se događaju duž trase uz česte promjene na vrlo kratkim potezima.

Provedenim inženjersko-geološkim radovima utvrđeno je da se inženjersko-geološki profil na predmetnom potezu sastoji od dva osnovna člana, i to pokrivača i flišne stijenske podloge. Pokrivač izgrađuju glinovito prašinate deluvijalne naslage. Flišnu stijensku podlogu izgrađuju naslage siltita, rjeđe s ulošcima pješčenjaka. S obzirom na stupanj trošenja moguće je razdvojiti rastrošenu flišnu podlogu različitog stupnja i nerastrošenu flišnu podlogu.

Parametri čvrstoće za sloj pokrivača utvrđeni su laboratorijskim radovima provedenim na ovom dijelu trase te posebno na profilima nastalih nestabilnosti. Na osnovi rezultata laboratorijskih ispitivanja mogu se usvojiti sljede-

ći parametri čvrstoće za sloj pokrivača: kut trenja $\phi = 16,5^\circ$ do $27,5^\circ$, kohezija $c = 6$ do 32 kN/m^2 .

Parametri čvrstoće za sloj pokrivača na kliznoj plohi utvrđeni su povratnim analizama na profilima nastalih nestabilnosti za procijenjeni geometrijski oblik kliznog tijela. Na osnovi rezultata povratnih analiza usvojeni su sljedeći parametri čvrstoće za sloj pokrivača: kut trenja $\phi = 17,5^\circ$ do 23° , kohezija $c = 1$ do 3 kN/m^2 . Parametri čvrstoće utvrđeni su uz krajnje konzervativnu pretpostavku da se slom dogodio uz nepostojanje pornih tlakova na kliznoj plohi, odnosno da je razina podzemne vode u trenutku sloma bila ispod klizne plohe.

Odabir parametara čvrstoće nerastrošene (FR) flišne stijenske podloge proveden je prema nelinearnom Hoek-

Tablica 3. Prikaz relevantnih podataka za izvedena osiguranja nestabilnih zasjeka u flišnim naslagama od tunela Draga do tunela Sv. Kuzam

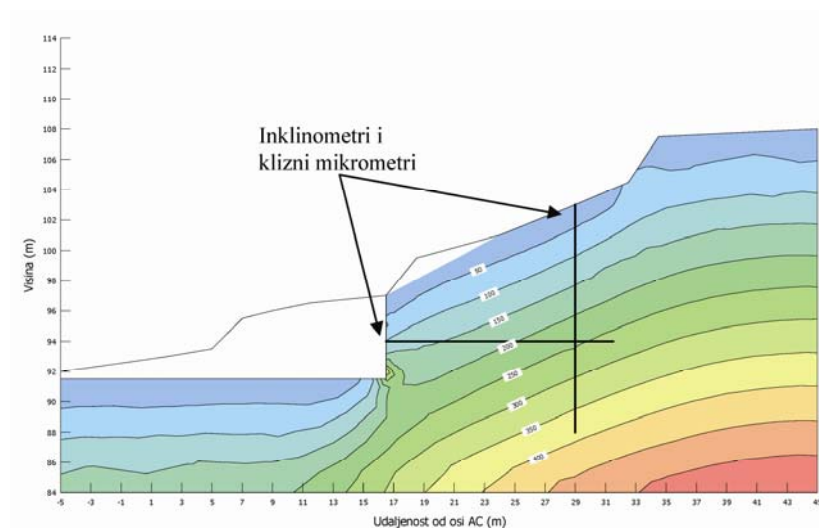
lokacija	stacionaža	dužina	visina	opis osiguranja zasjeka-sustav zaštite	parametri naslaga za analize	analiza stabilnosti	izvedba zida od kamenog materijala i gabionskog zida, zida od lomljenog kamena, i konstrukcije „čavlanog tla“	izvedeno kompletno osiguranje zasjeka
potporni zid od 3+898,70 do 4+065,23	3+940	cca. 250m	od 4m do 5m	potporni zid od gabiona sa zidom od kamena	pokrivač: $c = 5 \text{ kN/m}^2$ $\phi = 25^\circ$ podloga: zakon čvrstoće			
sanacija klizišta od profila 245 do 257	4+960	cca. 100m	do 8m	zid od lomljenog kamena	pokrivač: $c = 1 \text{ kN/m}^2$ $\phi = 22^\circ$ podloga: zakon čvrstoće			
sanacija klizišta od profila 258 do 269	5+280	cca. 40m	do 12m	konstrukcija „čavlanog tla“, drenova i zida od kamena	pokrivač: $c = 1 \text{ kN/m}^2$ $\phi = 17,5^\circ$ podloga: zakon čvrstoće			

Brownovu kriteriju čvrstoće. Neporemećena flišna stijenska masa pripada grupama C, D i E (slika 3.) ocijenjene u rasponu GSI od 40 do 20. Konzervativno je za proračun uzeta prosječna vrijednost $GSI = 25$. Za odabir jednoosne tlačne čvrstoće jedina je pouzdana vrijednost vrijednost dobivena PLT ispitivanjem neporemećene flišne stijenske mase. Vrijednost $Is(50)$ iznosi od 1,7 do 2,93 MPa što odgovara jednoosnoj tlačnoj čvrstoći stijenske mase od 25 – 75 MPa. Za proračun je uzeta vrijednost $\sigma_c = 10$ MPa. Parametar m odabran je $m = 9$, što odgovara siltitima. Na osnovi navedenog dobiven je zakon čvrstoće u siltitima.

U tablici 3. pregledno su prikazani svi relevantni podaci i parametri za izvedena osiguranja nestabilnih zasjeka u flišnim naslagama na dionici trase od tunela Draga do tunela Sv.Kuzam, i to za načine: a) izvedenoga potpornog zida od gabionskih koševa, a iznad njega zid od kamenog materijala s uzdužnom drenažnom konstrukcijom međusobno spojenih nasipnim kamenim materijalom i b) izvedenih osiguranja pokosa zidovima od lomljenog kamena sa zamjenama materijala iznad krune zidova i drenažnim konstrukcijama u zaleđu zidova od kamena, te konstrukcijom „čavlanog tla“ (nosiva mreža i samobušiva sidra) i horizontalno bušenih drenova na zadnjem dijelu predmetne lokacije (zadnjih otprilike 200 m ispred tunela Sv. Kuzam).

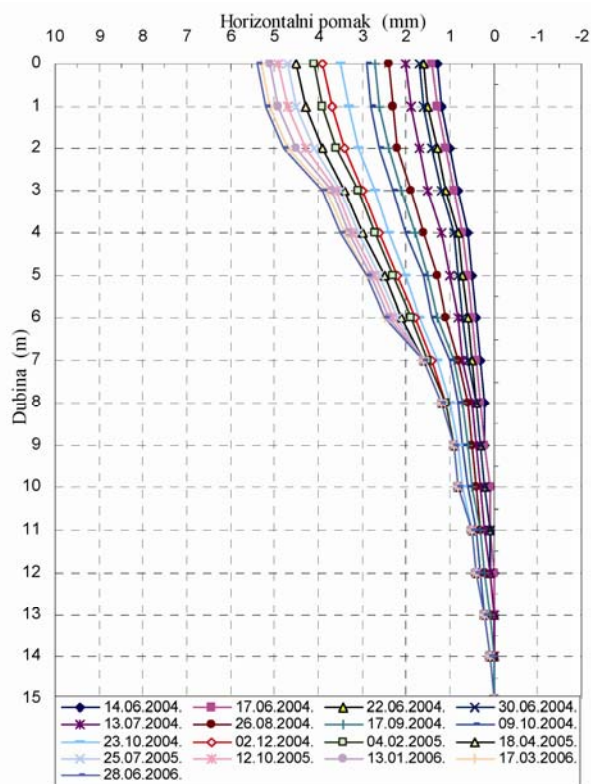
3.2 Geotehnička mjerenja

Interaktivno geotehničko projektiranje omogućava da se projekt modificira tijekom izvođenja radova na temelju rezultata geotehničkih mjerenja, koja daju podatke o realnom ponašanju materijala u kojem se izvode radovi i o ponašanju konstrukcije, radi osiguranja stabilnosti, sigurnosti i ekonomičnosti projektirane građevine [30] i [31].



Slika 5. Pozicije ugrađene mjerne opreme na stac. 2 + 380

Rezultati mjerenja rabe se za povratne analize napreznja i deformacija. Geotehnička mjerenja u kombinaciji s povratnim numeričkim analizama temeljni su dio koncepta inetarktivnog projektiranja [32].



Slika 6. Izmjereni horizontalni pomaci u svim fazama izvedbe na stac. 2 + 380

Program geotehničkih mjerenja obuhvatio je geodetska opažanja repernih točaka, mjerenja horizontalnih pomaka stijenske mase inklinometrima te mjerenja horizontalnih i vertikalnih pomaka stijenske mase kliznim mikrometrima. Mjerenja su se provodila u fazama radova u skladu s izvršenim iskopima po pojedinim etažama – proračunskim fazama iskopa.

Na slici 5. prikazane su pozicije ugrađene mjerne opreme na stac. 2+380.

Na slici 6. prikazani su rezultati mjerenja horizontalnih pomaka po dubini vertikalnim inklinometrom na stac. 2+380 u svim fazama izvedbe. Vidljive su promjene materijala po dubini i veličina pomaka realizirana u svakom od tri pretpostavljena sloja: pokrivaču, rastrošenoj i nerastrošenoj flišnoj zoni.

3.3 Iskustva i spoznaje stečene interaktivnim projektiranjem i izvedbom osiguranja pokosa u flišnim naslagama

Na temelju rezultata istražnih radova, stečenog iskustva tijekom izvedbe zahvata na osiguranju stabilnosti stijenskih zasjeka u naslagama fliša, rezultata mjerenja i promatranja na ugrađenoj mjernoj opremi tijekom izvođenja i provedbom povratnih analiza naprezanja i deformacije, utvrđene su značajke nerastrošene flišne stijenske mase koje opisuju realne veličine parametra čvrstoće i deformabilnosti. Točnije je određeno područje rasprostiranja klasifikacijskih vrijednosti lokalne flišne stijenske mase unutar postojećih klasifikacijskih sustava za heterogenu stijensku masu kao što je fliš.

Određenim područjem klasifikacijskih vrijednosti za flišnu stijensku masu ocijenjenim u rasponu GSI od 20 do 40 mogu se povratno, poznatim izrazom Hoek, Carranza-Torres i Corkum (3), odrediti moduli deformacije i usporediti s utvrđenim vrijednostima modula deformacije za flišnu stijensku masu provedenim povratnim analizama naprezanja i deformacije duž trase.

Dakle, za $GSI = 20$ do 40 ($GSI = RMR_{89} - 5$) $\rightarrow RMR_{89} = 25$ do 45 i usvojenu jednoosnu tlačnu čvrstoću $\sigma_{ci} = 10$ MPa dobiven je raspon modula deformacije E_m $GSI=20$ do $40 = 562,34$ do $1778,27$ MPa. Faktor poremećenosti stijenske mase zbog izvedbe radova uzet je $D = 0$ za neporemećenu stijensku masu jer je nakon iskopa stanje fliša na licu zasjeka tretirano kao neporemećeno.

Dobivene vrijednosti modula deformacije izrazom Hoek, Carranza-Torres i Corkum (3), povratno preko utvrđenih klasifikacijskih vrijednosti za takvu flišnu stijensku masu, bitno odstupaju od utvrđenih vrijednosti modula deformacije za flišnu stijensku masu na razmatranom području dobivenih na temelju provedenih povratnih analiza naprezanja i deformacije na izrađenim numeričkim modelima metodom konačnih elemenata, uspoređujući pomake dobivene mjerenjem na terenu s pomacima dobivenim numeričkim modelima.

Usporedbom rezultata numeričkih analiza i korelacije bazirane na klasifikacijskim karakteristikama flišne stijenske mase, jasno se vidi da su vrijednosti modula deformacije bazirane na korelacijama s klasifikacijskim karakteristikama znatno veće nego one utvrđene na temelju provedenih numeričkih analiza. Navedena korelacija bazirana na klasifikacijskim karakteristikama flišne stijenske mase znatno podcjenjuje vrijednosti deformacije.

Predlaže se primjena izraza (3) za modul deformacije baziranog na korelaciji s klasifikacijskim karakteristikama (GSI), ali koristeći se faktorom $A < 1$ da bi se sma-

njile vrijednosti modula deformacije baziranog na korelaciji sa GSI. Faktor A kreće se u rasponu od 0,048 do 0,089, s prosječnom vrijednošću od 0,0685.

Dakle, predlaže se modificirani izraz (3) za modul deformacije:

$$E_m(GPa) = A \cdot \left(1 - \frac{D}{2}\right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} 10^{\frac{GSI-10}{40}} \quad (4)$$

Predloženi modificirani izraz za modul deformacije baziran na korelaciji s klasifikacijskim karakteristikama (GSI) vrijedi za flišnu stijensku masu na razmatranom području.

Važno je naglasiti da su u povratnim numeričkim analizama mijenjani, odnosno smanjivani samo moduli nerastrošene flišne zone. Moduli pokrivača i rastrošene flišne zone, dobiveni dodatnim terenskim i laboratorijskim istražnim radovima, držani su konstantnima. Deformacijske karakteristike pokrivača i trošne zone fliša mogu znatno utjecati na oblik i veličinu pomaka u tim zonama. Zbog toga su za povratne numeričke analize upotrijebljeni rezultati mjerenja horizontalnoga kliznog mikrometra koji se nalazi u nerastrošenoj zoni. Parametarskim analizama ustanovljeno je da krutost gornjih slojeva nema inženjerski značajan utjecaj na horizontalne deformacije na mjestu kliznog mikrometra. Ipak, rezultate ovih analiza i iznesene zaključke treba uzeti i primjenjivati s rezervom.

4 Zaključak

Flišna stijenska masa jest heterogena stijenska masa s vrlo čestim vertikalnim i lateralnim promjenama i geološke kompozicije i fizikalno-mehaničkih karakteristika. Sukladno tome, odgovarajući kriteriji čvrstoće i deformabilnosti flišne stijenske mase ne mogu se generalizirati, te je svaka istražena lokacija zasebna i potrebno je odgovarajuće pridruživanje značajki postojećim klasifikacijskim sustavima (RMR i GSI), pri čemu se kriteriji čvrstoće i deformabilnosti ne mogu jednoznačno odrediti, već se u skladu s postojećim klasifikacijskim sustavima mogu odrediti samo područja zastupljenosti. Pri tome treba posebnu važnost pridodati stanju trošnosti flišne stijenske mase, što može biti presudno u ukupnom ponašanju inženjerskih kosina u flišnoj stijenskoj masi.

Istraživanja provedena u Hrvatskoj pokazala su da sadašnje prihvaćene spoznaje o ponašanju heterogenih stijenskih masa kao što je fliš samo općenito opisuju ponašanja, a svaki pojedinačni element flišnih naslaga pokazuje specifično ponašanje i zahtijeva određivanje posebne zakonitosti ponašanja (na primjer siltiti i pješčenjaci unutar flišnog paketa). Ponašanje svakog elementa flišnog paketa u okviru inženjerske konstrukcije ovisi o

karakteru i režimu trošenja pod djelovanjem atmosferilija, nakon uklanjanja geostatičkih opterećenja i izlaganja atmosferilijama. Daljnjim istraživanjima potrebno je utvrditi zakonitosti vremenskog ponašanja elemenata flišnih naslaga ovisno o procesima vremenskog trošenja ovih materijala. S obzirom na ukazani nedostatak podataka, posebnu pozornost trebalo bi posvetiti i uzorkovanju unutar flišnih materijala.

Ako se pri projektiranju i izvedbi zasjeka radi o relativno tankim naslagama pokrivača i tankim rastrošenim dijelom flišne podloge, te se pri iskopu brzo ulazi u flišnu stijensku podlogu (prethodno pomno okarakteriziranu) s relativno slabim režimima podzemnih voda u zaleđu padina, moguće su vitke konstrukcije tipa sidreno podgradnog sklopa koje se relativno brzo, kvalitetno i sigurno izvode u takvim vrstama flišnih naslaga.

LITERATURA

- [1] ISRM, Commission on Standardization of Laboratory and Field Test: ISRM Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses, Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., (1978) Vol. 15, No. 6, pp. 319-368.
- [2] Attewell, P. B.; Farmer, I. W.: *Principles of Engineering Geology*, New York: John Wiley & Sons (1979) pp. 30-42.
- [3] Palmstrom, A.; Singh, R.: *The Deformation Modulus of Rock Masses – Comparisons between In Situ Tests and Indirect Estimates*, Tunnelling and Underground Space Technology (2001) Vol. 16, pp. 115-131.
- [4] Bieniawski, Z. T.: *Engineering Rock Mass Classification*, New York: John Wiley & Sons, 251 p, 1989.
- [5] Barton, N. R.: *Some New Q-Value Correlations to Assist in Site Characterisation and Tunnel Design*, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. (2002) Vol. 39, No. 2, pp. 185-216.
- [6] Hoek, E.: *Strength of Rock and Rock Masses*, ISRM News Journal (1994) Vol. 2 (2), pp. 4-16.
- [7] Hoek, E.; Brown, E. T.: *Empirical Strength Criterion for Rock Masses*, Jour. Geotech. Engng. Div., ASCE (1980) 106, (GT9), pp. 1013-1035.
- [8] Hoek, E.; Brown, E. T.: *The Hoek-Brown Failure Criterion – A 1988 Update*, Proceedings of 15th Canadian Rock Mech. Symp., Toronto, Canada, (Ed. Curran J.C.), Dept. Civ. Engineering, University of Toronto (1988) pp. 31-38.
- [9] Hoek, E.; Brown, E. T.: *Practical Estimates of Rock Strength*, Int. J. Rock Mech. & Mining Sci. & Geomechanics Abstracts (1997) Vol. 34 (8), pp. 1165-1187.
- [10] Hoek, E.; Carranza-Torres, Corkum, B.: *Hoek-Brown Failure Criterion-2002 Edition*, Proceedings of 5th North American Rock Mech. Symp., Toronto, Canada, Dept. Civ. Engineering, University of Toronto (2002) pp. 267-273.
- [11] Bieniawski, Z. T.: *The Geomechanics Classification in Rock Engineering Applications*, Proc. 4th Congr. Int. Soc. Rock Mech., Montreux 2 (1979) pp. 41-48.
- [12] Serafim, J. L.; Pereira, J. P.: *Consideration of the Geomechanical Classification of Bieniawski*, Proc. Int. Symp. on engineering Geology and Underground Construction, Lisbon (1983) Vol. 1, pp. II.33-II.42.
- [13] Nicholson, G. A.; Bieniawski, Z. T.: *A Nonlinear Deformation Modulus Based on Rock Mass Classification*, Int. Jour. Min. Geol. Eng. (1990) No. 8., pp. 181-202.
- [14] Grimstad, E.; Barton, N.: *Updating the Q-system for NMT*, Proc. Int. Symp. on Sprayed Concrete-Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support, Fagernes, Eds. Kompen, Opsahl and Berg, Oslo: Norwegian Concrete Association, 1993.
- [15] Palmstrom, A.: *Recent Developments in Rock Support Estimates by the RMI*, Journal of Rock Mechanics and Tunnelling Technology (2000) Vol. 6, No. 1, pp. 1-19.
- [16] Read, S. A. L.; Richards, L. R.; Perrin, N. D.: *Applicability of the Hoek-Brown Failure Criterion to New Zealand Greywacke Rocks*, Proceeding 9th International Society for Rock Mechanics Congress, Paris (1999) Vol. 2, pp. 655-660.
- [17] Barton, N. R.: *TBM Tunneling in Jointed and Faulted Rock*. Rotterdam: Balkema, 2000.
- [18] Arbanas, Ž.: *Predviđanje ponašanja ojačane stijenske mase analizama rezultata mjerenja izvedenih građevina*, doktorski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 271 p, 2004.
- [19] Arbanas, Ž.; Grošić, M.; Dugonjić, S.: *Behaviour of the reinforced cuts in flysch rock mass*, Proc. of 1. Int. Conf. On Transportation Geotechnics, Nottingham, UK, Taylor and Francis Group, Balkema, London UK (2008) pp. 283-291.
- [20] Arbanas, Ž.; Grošić, M.; Briški G.: *Behaviour of Engineered Slopes in Flysch Rock Mass*, Proc. 1st Southern Hemisphere Int. Rock Mechanics Symp. Perth, Australia, Australian Centre for Geomechanics, Perth, Vol. 1, Mining and Civil (2008) pp. 493-504.
- [21] Mišćević, P.: *The investigation of weathering process in Eocene flysch*, Proc. Second Int. Sym. on hard soils-soft rocks, Naples, Italy, Balkema, Rotterdam (1998) 267-272.
- [22] Mišćević, P.; Roje Bonnaci, T.: *Uvjeti uporabe lapora za izradu nasipa*, Građevinar, 53 (2001) 1, 9-16.
- [23] Mišćević, P.; Števančić, D.: *Granična nosivost plitkih temelja na stijenskoj masi*, Građevinar, 58 (2006) 5, 367-377.
- [24] Jašarević, I.; Lebo, Ž.: *A contribution to geotechnical engineering in HSSR of Adriatic coast area*, The Geotechnics of Hard Soils-Soft Rocks, Rotterdam, Brookfield: A.A. Balkema (1998) 217-229.

- [25] Hoek, E.; Marinos, P.; Benissi, M.: *Applicability of the Geological Strength Index (GSI) Classification for Very Weak and Sheared Rock Masses*. The Case of the Athens Shist Formation. Bull. Eng. Geol. Env., No. 57 (1998) pp.151-160.
- [26] Marinos, P.; Hoek, E.: *GSI-A Geologically Friendly Tool for Rock Mass Strength Estimation*, Proc. GeoEng 2000 Conference, Melbourne (2000).
- [27] Marinos, P.; Hoek, E.: *Estimating the Geotechnical Properties of Heterogeneous Rock Masses such as Flysch*, Bull. Eng. Geol. Env. 60 (2001) pp 85-92.
- [28] Marinos, P.: *Rock Mass Characterisation in Engineering Practice*. Razprave IV. Posvetovanja Slovenskih geoteknikov, SLOGED, Rogaška Slatina, (2004) pp.339-343.
- [29] Marinos, V.; Marinos, P.; Hoek, E.: *The geological strength index: applications and limitations*, Bull. Eng. Geol. Env., 64 (2005) 55-65.
- [30] Arbanas, Ž.; Jardas, B.; Kovačević, M. S.: *Excavation of Open Pit Zagrad in Rijeka, Croatia-A case history*, Proc. 5th Int. Conf. on Case Histories in Geotech. Eng., New York, NY, USA, (2004).
- [31] Arbanas, Ž., Kovačević, M.S., Szavits-Nossan, V.: *Interactive design for deep excavations*. XIII. Danube-European Conference on Geotechnical Engineering, Ljubljana, Slovenija (2005) 411-416.
- [32] Kovačević, M. S.: *The Observational Method and the Use of Geotechnical Measurements*. Geotechnical problems with man-made and man influenced grounds; Proc. 13th Europ. Conf. on Soil Mech. and Geotech. Eng., Prague, Czech Republic, (2003) Vol. 3, pp. 575-582.
-
-