

GEOTEHNIČKA I GEOFIZIČKA ISTRAŽIVANJA ZA POTREBE IZGRADNJE PROIZVODNOG POGONA CEMENTA U OBROVCU

GEOTECHNICAL AND GEOPHYSICAL INVESTIGATIONS FOR CONSTRUCTION CEMENT PRODUCTION FACILITIES IN OBROVAC

Marko Bradaš^{1*}, Jasmin Jug¹, Stjepan Strelec¹

¹ Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Hallerova aleja 7, 42000 Varaždin, Republika Hrvatska

*E-mail adresa osobe za kontakt / e-mail of corresponding author: marko.bradas@gmail.com

Sažetak: Sastav i fizikalno-mehaničke značajke temeljnog tla su neophodne ulazne informacije potrebne za korektno projektiranje građevina. Istraživanje, obrađeno u radu, provedeno je u dvije faze: prva je bušenje sondažnih bušotina i geofizičko profiliranje metodom seizmičke refrakcije i višekanalne analize površinskih valova, druga je provedba terenskih i laboratorijskih ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće uzoraka stijene iz istražnih bušotina. Tijekom provedbe spomenutih istraživanja vodilo se računa o potencijalnom onečišćenju podzemnih voda tijekom eksploatacije planiranog objekta na način da je posebna pažnja posvećena ispitivanju vodopropusnosti podloge u sondažnim jamama. Vrijednosti geotehničkih parametara temeljnog tla određene su korištenjem RMR i GSI klasifikacija, te direktnim određivanjem jedinične težine, Poisson-ovog koeficijenta, kao i edometarskog, posmičnog i elastičnog modula tla.

Ključne riječi: Geotehnička i geofizička istraživanja, Jednoosna tlačna čvrstoća, RMR klasifikacija, Vodopropusnost, Geotehnički parametri.

Abstract: The composition and physical-mechanical properties of the foundation soil are indispensable inputs for buildings design. Investigations processed in paper was conducted in two phases: first is drilling the probes and geophysical profiling by seismic refraction and multichannel analysis of surface waves, second is field and laboratory testing uniaxial compressive strength rock samples from drilled probes. During the implementation of these investigations, consideration was given to the potential groundwater contamination during the exploitation of the planned facility, so special attention is paid to the testing of the water permeability in investigation pits. Geotechnical parameters of foundation soil were determined using the RMR and GSI classification, and by direct determination of unit weight, Poisson coefficient as well as oedometer, shear and elastic soil module.

Keywords: Geotechnical and geophysical investigations, Uniaxial compressive strength, RMR classification, Water permeability, Geotechnical parameters.

Received: 01.12.2017 / Accepted: 07.12.2017

Published online: 18.12.2017

Stručni rad / Technical paper

1. UVOD

Sastav i geotehničke značajke temeljne podloge predstavljaju ulazne podatke za određivanje načina i dubine temeljenja građevina, prema relevantnim kriterijima graničnih stanja temeljnog tla i konstrukcije. Za potrebe projektiranja, temeljenja i izgradnje proizvodnog pogona cementa u Obrovcu istraživanja su provedena u dvije faze. U idejnoj fazi 2006. godine provedena su preliminarne istraživanja: bušenje 10 istražnih bušotina i laboratorijska ispitivanja neporemećenih uzoraka stijene (jezgra iz bušotina). Glavna (projektna) istraživanja provedena su kombiniranjem geotehničkih i geofizičkih istražnih radova: bušenjem 22-ije istražne bušotine dubine 8 do 20 m, ispitivanjem 19 seizmičkih profila korištenjem plitke seizmičke refrakcije (RF) i višekanalne analize površinskih valova (MASW), te terenskim ispitivanjem jednoosne tlačne čvrstoće.

Općenito u cilju očuvanja kvalitete podzemne vode, u posljednje vrijeme sve se više pažnje posvećuje istraživanju i zaštiti njenih podzemnih zaliha, pogotovo na krškim područjima. Kao jedan od potencijalnih onečišćivača, koji

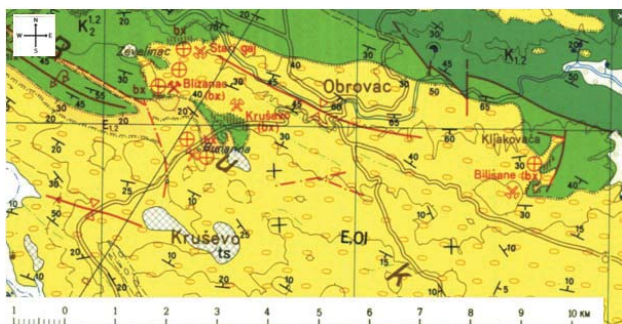
bi mogli imati značajan utjecaj na kakvoću podzemne vode, ističu se industrijska postrojenja, u koja pripadaju i pogoni za proizvodnju građevnog materijala (u ovom slučaju cementa). Iz tog razloga je izvan osnovnog programa istraživanja provedeno ispitivanje vodopropusnosti temeljnog tla/stijene u trima sondažnim jamama, mjerenjem padajuće razine vode kao rezultata procjeđivanja u promatrani medij.

Na temelju rezultata istraživanja izrađena je inženjersko-geološka karta. U razmatranja su uključeni i preliminarni istražni radovi iz 2006. godine. Jezgra iz istražnih bušotina detaljno je kartirana i analizirana prema geomehaničkoj RMR (Rock Mass Rating Sistem), te prema GSI (Geological Strength Index) klasifikaciji. Korelacijama preko brzina seizmičkih valova dobivenih geofizičkim istraživanjima, procijenjene su vrijednosti geomehaničkih parametara tla: jedinična težina, računaska otpornost, koeficijent reakcije. Vrijednost posmičnog modula je dobivena na osnovu izmjerene brzine posmičnih valova. Referencirani izrazi iz područja mehanike stijena iskorišteni su

za određivanje kriterija sloma, modula elastičnosti i granične nosivosti stijenske mase.

2. OPĆI GEOLOŠKI SMJEŠTAJ LOKACIJE

Istraženo područje dio je sjeverne Dalmacije, odnosno Ravnih Kotara, u predjelu između Obrovca i Benkovca. Ono je obuhvaćeno Osnovnom geološkom kartom, List Obrovac (Ivanović et al. 1976), prema kojoj stijene istraženog prostora pripadaju u sedimente iz razdoblja eocen - oligocen (E, Ol) (Slika 1). Istraženi lokalitet pripada konglomeratnoj jedinici Promina naslaga, s tim da se determinirani sedimenti razlikuju u okolišu taloženja. Determinirani konglomerati, kalkareniti i fino-zrnati sedimenti zapravo su aluvijalni sedimenti pridošli tekućicama, koje su tekle iz izdignutih Dinarida i pri tome erodirale sedimente karbonatne platforme, transportirale i odlagale materijal na kopnenom ili marinskom prostoru. Navedeni Promina sedimenti sjeverozapadnog ruba Ravnih Kotara upućuju na to da je sjeverna Dalmacija bila nisko položeno područje u čijoj su se blizini nalazile rane tvorbe Velebita.



Slika 1. Isječak osnovne geološke karte, list L 33-140 Obrovac (Ivanović et al. 1976)

3. GEOFIZIČKI ISTRAŽNI RADOVI

Razvoj seizmičkih metoda posljednjih desetljeća, osobito višekanalne analize površinskih valova (MASW - Multi-Channel Analysis of Surface Waves) omogućava određivanje brzine posmičnih valova podpovršinskih materijala. Plitkom seizmičkom refrakcijom (RF) mjere se vremena prvih nailazaka, koji se potom očitavaju sa snimljenih seizmograma. Prvi se nailasci odnose na uzdužne P ili poprečne S valove, što ovisi o načinu generiranja seizmičkog poremećaja. "Pikiranje" i korespondencija vremena odgovarajućim refraktorima najosjetljiviji je dio prilikom interpretacije. Princip CAD (computer aided tomography) daje korektnu sliku kad god se uvažavaju relevantni podaci geotehničkog profila. Na spomenuti se način ujedno umanjuje moguća više-smislenosti zbog inverzije brzina po dubini (Strelec 2016). Seizmički dispozitiv kod istraživanja iz ovog rada sastojao se od 24 vertikalna geofona frekvencije 4.5 Hz, koji su bili postavljeni na međusobnom razmaku od 2 m. Pri interpretaciji MASW mjerenja koristio se fundamentalni ili osnovni mod M0. Seizmička istraživanja izvedena su na ukupno 19 profila (na svakom profilu RF i MASW) (Tablica 1), a kao primjer rezultata na Slici 2 nalazi se interpretacija profila F-RF-1 (Grabar et al. 2016).

4. GEOTEHNIČKI ISTRAŽNI RADOVI

Na predmetnoj lokaciji geotehnički istražni radovi provedeni su bušenjem ukupno 32-ije istražne bušotine. Preliminarnim istraživanjem tijekom 2006. godine izbušeno je 10 bušotina, dubine 25 do 30 m. Po završetku bušenja provedena je terenska identifikacija i inženjersko-geološka klasifikacija nabušene jezgre, te su uzeti neporemećeni uzorci za provedbu laboratorijskih ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće. Podaci iz 2006. godine uključeni su u analizu rezultata iz glavne faze istraživanja.

Glavna faza izvedena je tijekom 2016. godine, pri čemu su izbušene 22 istražne bušotine dubine 8 do 20 m (Tablica 1). Bušenje je izvedeno rotacijskom metodom uz kontinuirano jezgrovanje, primjenom dvostrukih jezgrenih cijevi i cirkulacije vode. Za bušenje su korištene krune s dijamantima, srednje-zrnate gradacije. Po završetku bušenja, provedena je terenska identifikacija i inženjersko-geološka klasifikacija nabušene jezgre, te su izvršena terenska ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće na odabranim dijelovima jezgre.

Kao primjer rezultata istraživanja bušenjem u glavnoj fazi na Slici 3 prikazan je litološki profil bušotine BF-22. Na Slici 4 vidljiva je fotodokumentacija nabušene jezgre iz iste bušotine. Tlocrtni smještaj izvedenih bušotina u preliminarnoj i glavnoj fazi istraživanja nalazi se na inženjersko-geološkoj karti (Slika 5).

4.1. Interpretacija geološke građe istraženog područja prema litološkim podacima iz istraženih bušotina

Iz istražno-geoloških bušotina determinirani su konglomerati, kalkareniti i fino-zrnati sedimenti, koji se međusobno izmjenjuju u vertikalnom slijedu. Konglomerati zrnaste potpore, kod kojih prevladava šljunak i nedostatak sitnozrnatog sedimenta, upućuju na prepleteni karakter rijeke. Poluuglati do poluzaobljeni klasti koji se nalaze u konglomeratima transportiranim kratkim tokom, upućuju na blizinu tektonikom kontroliranog izvora sedimenta.

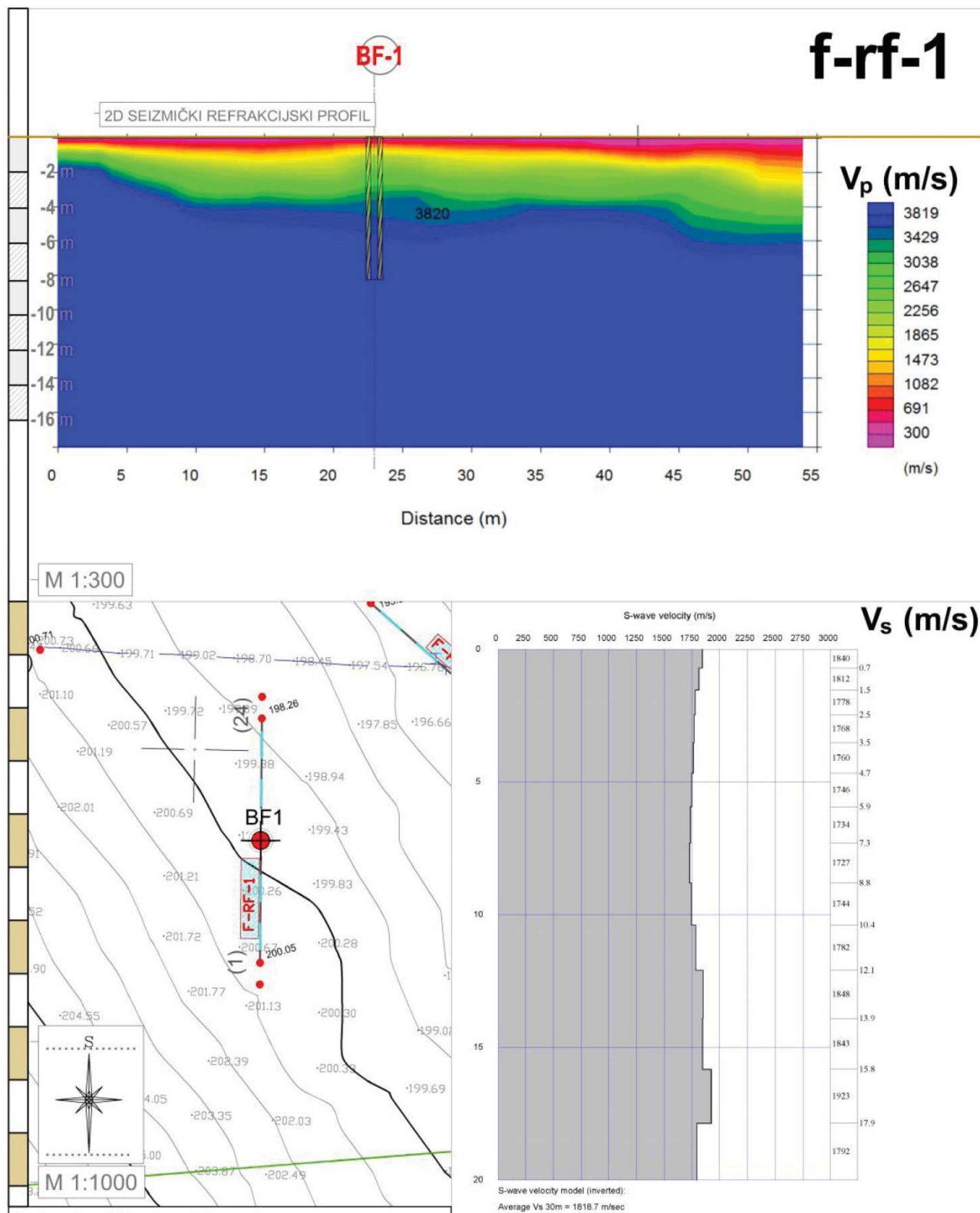
Valutice promjera 64 mm, te blokovi čije dimenzije prelaze dvadesetak centimetara (determinirane u konglomeratima) zapravo su sedimenti prudova i korita. Oni nastaju u riječnim sustavima, koji unutar glavnog imaju više međusobno prepletenih, manjih korita.

Determinirani sitnozrnati i pješčani matriks koji se nalazi u većini konglomerata nije mogao biti taložen zajedno s velikim klastima, nego je infiltriran, odnosno upućuju na razdoblje taloženja iz polaganih struja u napuštenim koritima. U te je kanale povremeno donošen pijesak ili sitnozrnati šljunak. Proslojci kalkarenita unutar konglomerata zapravo su erozijski ostaci pijesaka kakvi se talože na raznim šljunčanim formama za vrijeme niskih voda (Babić & Zupanić 1988).

Finozrnati sedimenti dokumentiraju razdoblje taloženja mulja iz polaganih struja. On je taložen u zaštićenim depresijama ili različitim napuštenim kanalima u koje je povremeno donošen sitnozrnati šljunak ili pijesak. Ta područja bila su duže vrijeme pod vodom, te se slični sedimenti nalaze i na poplavnoj ravnici.

Pravilna izmjena konglomerata i kalkarenita, te kalkarenita i finozrnatog sedimenta upućuju na neprestano obnavljanje izvora tog detritusa. Tako velika količina sedimenta morala je dolaziti jakim planinskim rijekama iz neposredne blizine, osim jakih planinskih rijeka, u tom taložnom okolišu nalazile su se strme i stjenovite planinske padine i sipari.

Na to nam ukazuje konglomerat koji sadrži uglate do poluzaobljene klaste, koji su vrlo kratkim tokom bili transportirani od sipara do mjesta taloženja (Grabar et al. 2016). Inženjersko-geološka karta nastala predmetnim istraživanjem nalazi se na Slici 5.



Slika 2. Prikaz rezultata i interpretacije seizmičkog profila F-RF-1 (Grabar et al. 2016)

Apsolutna visina / dubina (m)	Oznaka	OPIS SLOJEVA	Dubina (m)	CR (%)	RQD (%)	FF (br/m)	Odskok skleromet. / Schmidt (H)	JRC10 (0-20)	Stupanj tvrdice (R0-R6)	Stupanj trošnosti	RIPV	UZDRAK	LABORATORIJSKI REZULTATI - tlačna čvrstoća UCS (MPa)	RMR / GSI
0		Površina terena	0											
189.3		<p>Nasip</p> <p>Nasuti teren od kamena iz iskopa, oštrobridni fragmenti širokog raspona dimenzija, ispunjena od gline i pjeskovitog praha.</p>	100	-	-	-								
	1		100	-	-	-								
	2		100	-	-	-								
3			3											
186.3		šupljina	20	-	-	-								
185.5		<p>Nasip</p>	100	-	-	-								
5.8			100	70	34	-								
183.5			6											
6.7		<p>Konglomerat</p> <p>Izuzetno trošni i raspućali konglomerat, loše sortiran, raspada se pod pritiskom ruke.</p> <p>Prisutna potpora matriksa koja je izuzetno trošna. Rubovi zrna su trošni, oštri.</p> <p>Od 5,8-6,0 vertikalna pukotina ispunjena sekundarnim kalcitom, okršavanje.</p> <p>Od 6,0-6,7 nekoliko pukotina pod 45°.</p>	100	56	19	44	8 ÷ 10					65,00	19/14	
182.6			7	100	100	5	42	12 ÷ 14				(35)		
		<p>Konglomerat</p> <p>Izuzetno loše sortirani konglomerat. Većinom zrske potpore. U pojedinim intervalima razmrvičen i ispućale pukotine su ispunjene glinovitim komponentama crvene boje.</p> <p>U intervalu 7,4 i na 8,6 pukotine su pod 45°.</p> <p>Od 9,4-9,5 vertikalne pukotine u kojoj je razmrvičeni trošni materijal.</p>	8	100	92	8	44	12 ÷ 14	R3	III		(36)	34/29	
10.3			9	100	78	13	32	12 ÷ 14				(37)	81,08	
179			10	100	62	21	34							
		<p>Trošna zona</p> <p>Trošna zona s fragmentima konglomerata duljine do 30-ak cm. U toj zoni je konglomerat izuzetno trošan, rasut, raspućali, pod pritiskom ruke se drobi i mirvi.</p> <p>Pukotine pod 45°: 10,6-10,7 ; 12,3-12,4 ; 14,5 m</p> <p>Pod 90°: 11,1-11,2 ; 13,4-14,0 ; 14,8-15 m</p>	11	100	49	9	-							
			12	100	54	12	42	-	-	V				
			13	100	30	16	-							
15			14	100	-	18	-							
174.3		Kraj bušotine	15											

Slika 3. Sondažni prikaz istražne bušotine BF-22 (Grabar et al. 2016)

Tablica 1. Prikaz izvedenih radova u glavnoj fazi istraživanja, u ovisnosti o pojedinim objektima pogona

OBJEKT		BUŠOTINE	DUBINA BUŠOTINE (m)	UKUPNO BUŠENJA (m)	GEOFIZIČKI PROFILI L=55 m
G-01 P2	Spremište vapnenca	BF - 1	8.0	32.0	F-RF-1
		BF - 2	8.0		F-RF-2
		BF - 3	8.0		F-RF-3
		BF - 4	8.0		F-RF-4
G-01 P3	Spremište gline	BF - 5	8.0	8.0	F-RF-5
G-01 P4	Spremište gipsa i aditiva	BF - 6	8.0	8.0	F-RF-6
G-01 P5	Spremište ugljena	BF - 7	15.0	23.0	F-RF-7
		BF - 8	8.0		F-RF-8
G-01 P7	Doziranje sirovina	BF - 9	15.0	15.	F-RF-9
G-01 P8	Drobljenje sirovina u vertikalnom mlinu	BF - 10	8.0	8.0	F-RF-10
G-01 P9	Silos sirovinskog brašna s transporterom	BF - 11	15.0	15.0	F-RF-11
G-01 P10	Predgrijač	BF - 12	15.0	35.0	F-RF-12
		BF - 13	20.		F-RF-13
G-01 P15	Mlin za mljevenje i transport ugljena	BF - 14	8.0	8.0	-
					F-RF-14
G-01 P16	Transport i skladištenje klinkera	BF - 15	8.0	51.0	F-RF-15
		BF - 16	15.0		F-RF-16
		BF - 17	20.0		-
		BF - 18	8.0		-
G-01 P18	Mljevenje cementa i doziranje sastojaka	BF - 19	8.0	8.0	F-RF-17
G-01 P20	Transport i skladištenje cementa	BF - 20	15.0	50.0	F-RF-18
		BF - 21	20.0		F-RF-19
		BF - 22	15.0		-
UKUPNO ISPITIVANJA		22 BUŠOTINE		261.0m	19 PROFILA

4.2. Geomehanička klasifikacija jezgre iz istražnih bušotina (RMR)

Prilikom determinacije jezgre iz bušotina, uz detaljan inženjersko-geološki opis, korištena je geomehanička klasifikacija poznata pod nazivom RMR sustav (Rock Mass Rating Sistem), koju je 1973. godine razvio Bieniawski. Posljednje promjene u RMR sustavu nastale su 1989. godine (RMR89) (Bieniawski 1989), te je u takvom obliku korištena prilikom istraživanja iz ovog rada. Klasifikacija je bila pogodna jer prvenstveno namijenjena rješavanju inženjerskih problema u mehanici stijena, a temelji se na pridavanju bodova, odnosno bezdimenzionalnih koeficijenta za stanje stijenske mase. Prilikom postupka klasificiranja, boduje se sljedećih šest parametara (Tablica 2) (Bieniawski 1989):

1. Jednoosna tlačna čvrstoća (intaktne stijene),
2. Indeks kvalitete jezgre (RQD),
3. Razmak diskontinuiteta (učestalost),
4. Stanje pukotina (svojstva),
5. Stanje podzemne vode,
6. Orijentacija pukotina u odnosu na objekt.

Svi ovi parametri dobiveni su na terenu izravnim motrenjem i pregledom jezgre. Jednoosna tlačna čvrstoća mjerena je pomoću Schmitovog čekića, uz korištenje **Tablice 3** koja je korisna kod terenske procjene jednoosne tlačne čvrstoće, jer zahtijeva jednostavne pokuse na terenu.

Kod bodovanja u RMR sustavu primijenjena je korekcija bodova, pošto se bodovanje koristilo za potrebe temeljenja (svakom rezultatu dobivenom RMR89 klasifikacijom oduzeto je 15 bodova) (Grabar et al. 2016).

Koncept GSI (Geological Strength Indeks) klasifikacije je jednostavniji od RMR klasifikacije. Tim se numeričkim indeksom procjenjuje veličina redukcije jednoosne tlačne čvrstoće stijenske mase u različitim geološkim uvjetima. GSI klasifikacija uključuje novije verzije originalne RMR klasifikacije (Bieniawski 1976, 1989), te je na osnovu toga uspostavljen odnos između GSI i RMR (Hoek et al. 1995), koji vrijedi za stijenske mase s ocjenom $RMR89 > 23$. Prema tom odnosu GSI vrijednost dobiva se oduzimanjem vrijednosti 5 od dobivene RMR89 ocjene. Primjer kalkulacije RMR, odnosno GSI indeksa prikazan je u **Tablici 4**.



Slika 4. Prikaz jezgre istražne bušotine BF-22 (Grabar et al. 2016)

5. ISPITIVANJE VODOPROPUSNOSTI TERENA

Krš dinarskog područja ima specifična hidrogeološka obilježja: mnoštvo krških geomorfoloških oblika, nepostojanje zaštitnih pokrovnih naslaga, koncentrirano poniranje površinskih vodnih tokova, velike brzine tečenja kroz kanale i pukotine u podzemlju što podrazumijeva kratko vrijeme zadržavanja tijekom njihova poniranja. Sve to pogoduje preživljavanju mikroorganizama i omogućuje širenje potencijalnog onečišćenja s površine u kratkom vremenu na velike udaljenosti, a otopljene otpadne tvari ne mogu se pročistiti na prirodan način (Biondić B. & Biondić R. 2014). Navedene spoznaje uzete su u obzir prilikom glavnih istražnih radova 2016. godine, pošto se industrijska postrojenja, u koja pripadaju i pogoni za proizvodnju građevnog materijala (u ovom slučaju cementa), ubrajaju u potencijalne onečišćivače koji bi mogli imati značajan utjecaj na kakvoću podzemne vode. Zato je uz osnovni program istraživanja provedeno i ispitivanje vodopropusnosti terena u sondažnim jamama, mjerenjem padajuće razine vode kao rezultata procjeđivanja u tlo, odnosno stijensku masu.

Vodopropusnost terena ispitana je u tri sondažne jame (SJ-1, SJ-2 i SJ-3) na sjevernom dijelu istražnog prostora. Lokacije su odabrane od strane investitora, a odgovaraju prostoru koji je tehnološki predviđen za obradu otpadnih industrijskih voda. Položaj SJ-3 (Slika 6) pokazao je veliku vodopropusnost s izmjerenom upojnošću od 8757 l/h (Slika 8), što je nepovoljno s aspekta zaštite podzemnih vodonosnika. S druge strane lokacije SJ-1 i SJ-2 (Slika 7)

imaju zanemarivu vodopropusnost (izmjerena vodoupojnost na SJ-2 iznosi 75 l/h, Slika 9).

Prema rezultatima ispitivanja vodoupojnosti može se reći kako se sondažne jame SJ-1 i SJ-2 položajno nalaze na prostoru debelog glinovitog pokrivača. Na lokaciji SJ-1 u podini je determiniran i karbonatni prah (silt), koji je gotovo vodonepropustan. Na ovom prostoru je i formirano jezerce, a sve zbog položaja nepropusnog pokrivača. Na lokaciji SJ-3 otkrivena je značajna vodopropusnost, što upućuje na nepostojanje nepropusnog pokrivača iznad raspucane sedimentne stijene (Slika 6). Zbog toga je preporučeno da se postrojenje za obradu otpadnih voda ne smješta na prostoru SJ-3.

6. GEOTEHNIČKE ZNAČAJKE TEMELJNE PODLOGE

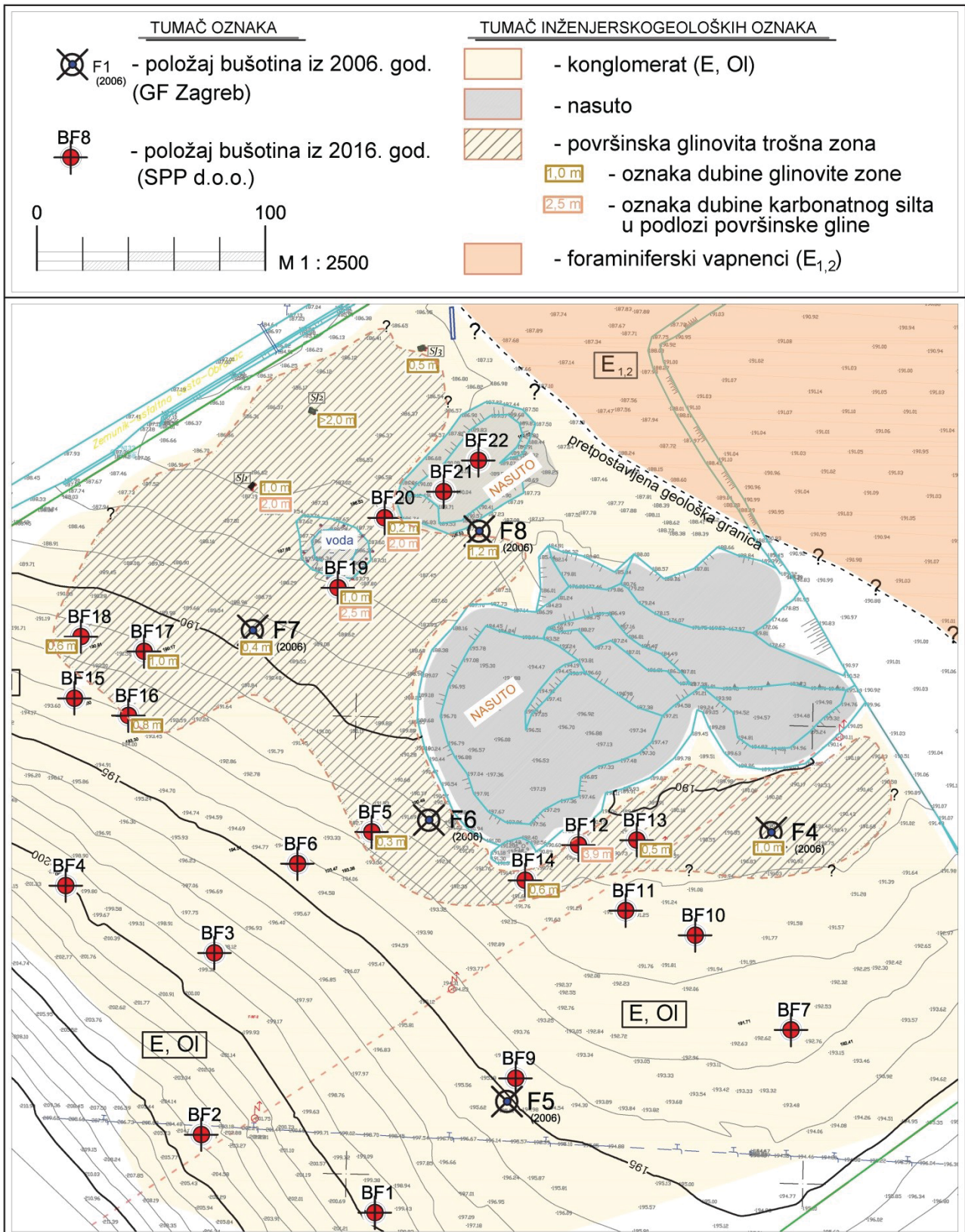
Analizom podataka dobivenih istražnim bušenjem, klasifikacijom stijenske mase (RMR89 i GSI) i seizmičkim istraživanjem, za izradu geostatičkih proračuna utvrđeni su litološki članovi, te su usvojeni njihovi geomehanički parametri, mjerodavni za predmetnu istražnu lokaciju.

Površinska litološka jedinica u obliku pokrivača sastoji se od visokoplastične gline s kršjem stijene, a mjestimice je to i zaglinjeno kršje. Ovaj materijal uglavnom će se uklanjati kod pripreme i uređenja temeljnog tla.

Površinska litološka jedinica u obliku pokrivača sastoji se od visokoplastične gline s kršjem stijene, a mjestimice je to i zaglinjeno kršje. Ovaj materijal uglavnom će se uklanjati kod pripreme i uređenja temeljnog tla.

Konglomerat je glavna stijena istražnog prostora. Isti je izrazito nesortiran i promjenjive trošnosti, pa se jednoosna tlačna čvrstoća uzoraka kreće u širokim granicama. Ispitana je tlačna čvrstoća na ukupno 41 intaktnom uzorku jezgre iz bušotina. Maksimalna izmjerena tlačna čvrstoća iznosi $\sigma_c = 116$ MPa, dok je minimalna čvrstoća na sitnozrnatom uzorku (karbonatni pješčenjak do silt) $\sigma_c = 15$ MPa, no to su vrijednosti koje predstavljaju ekstreme. Prosječna tlačna čvrstoća stijene konglomerata može se usvojiti $\sigma_c = 50-55$ MPa za kompaktnu stijenu na većim dubinama, odnosno $\sigma_c = 20-25$ MPa za pliće trošne dijelove stijene.

Kvaliteta stijenske mase klasificirana je sukladno RMR i GSI sustavu, za svaki interval jezgre iz bušotina. Postupkom klasificiranja koji je opisan u poglavlju 4.2. dobivene su maksimalne vrijednosti, prema kojima je najveći dobiveni RMR indeks jednak 36, iz čega slijedi da je GSI = 31. S druge strane, minimalne dobivene vrijednosti su 10 za RMR, odnosno 5 za GSI. Prosječna kvaliteta kompaktnog dijela stijene ocijenjena je sa RMR / GSI = 29 / 24, a trošnog dijela stijene iznosi RMR / GSI = 17 / 12.



Slika 5. Inženjersko-geološka karta istraživanog područja (Grabar et al. 2016)

Tablica 2. Sistem bodovanja kod RMR klasifikacije (Bieniawski 1989)

Parametri			Vrijednosti parametra						
1	Čvrstoća intaktne stijene (MPa)	Indeks čvrstoće u točki	>10	4-10	2-4	1-2	Preporuča se ispitati jednoosnu tlačnu čvrstoću		
		Jednoosna tlačna čvrstoća	250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	<1
	Bodovi	15	12	7	4	2	1	0	
2	RQD (%)		90-100	75-90	50-75	25-50	<25		
	Bodovi		20	17	13	8	3		
3	Razmak diskontinuiteta		>2 m	0,6-2 m	200-600 mm	60-200 mm	<60 mm		
	Bodovi		20	15	10	8	5		
4	Stanje diskontinuiteta		Vrlo hrapave površine Nisu kontinuirani Zijev=0 mm Zidovi nisu rastrošni	Neznatno hrapave površine Zijev <1 mm Stijena u zidovima neznatno rastrošna	Neznatno hrapave površine Zijev <1 mm Stijena u zidovima jako rastrošna	Skliski ili ispuna <5 mm debljine Zijev 1-5 mm Kontinuirani	Mekana ispuna > 5mm debljine ili Zijev >5 mm Kontinuirani		
	Bodovi		30	22	13	6	0		
5	Podzemna voda	Dotok na 10 m duljine tunela (l/m)	nema	<10	10-25	25-125	>125		
		Odnos tlaka pukotinske vode i većeg glavnog naprezanja	0	<0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	>0,5		
		Općeniti uvjeti	kompletno suho	vlažno	mokro	kapanje	tečenje		
	Bodovi		15	10	7	4	0		



Slika 6. Sondažna jama SJ-3



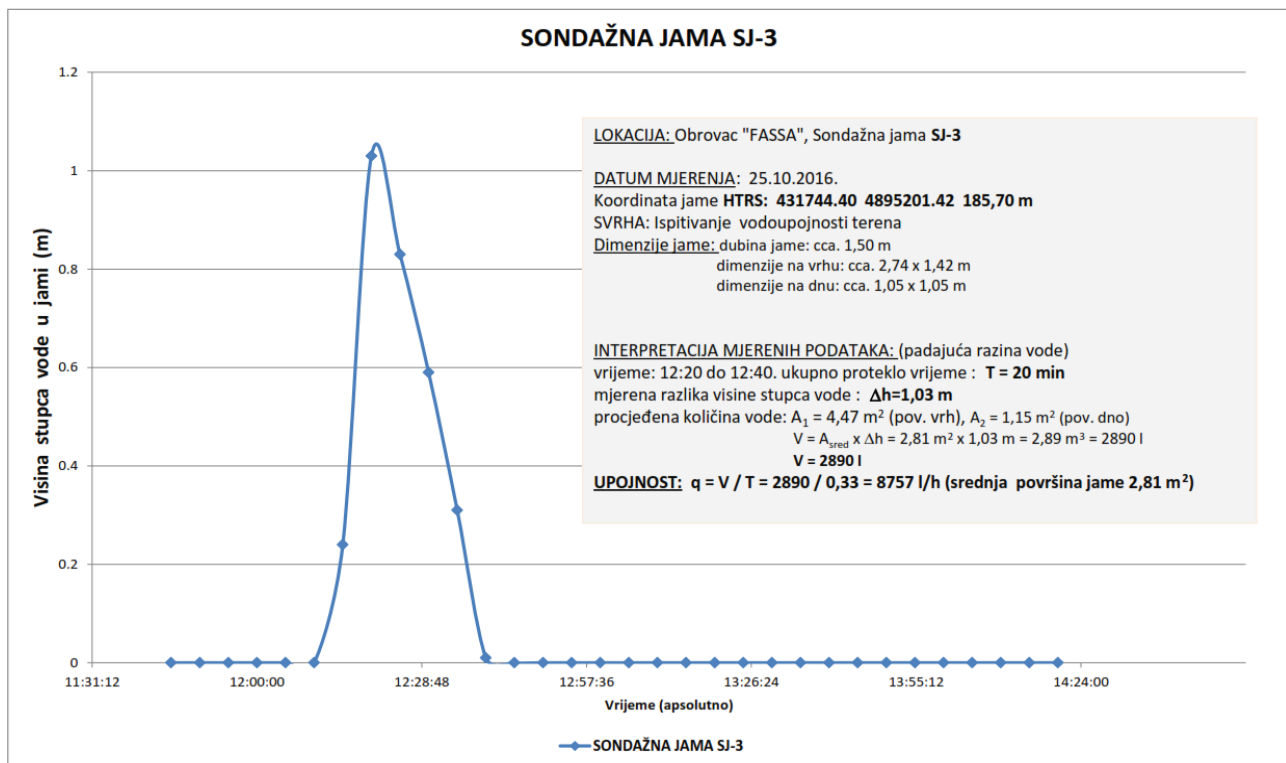
Slika 7. Sondažna jama SJ-2

Tablica 3. Procjena jednoosne čvrstoće jednostavnim pokusima na terenu (ISRM 1978)

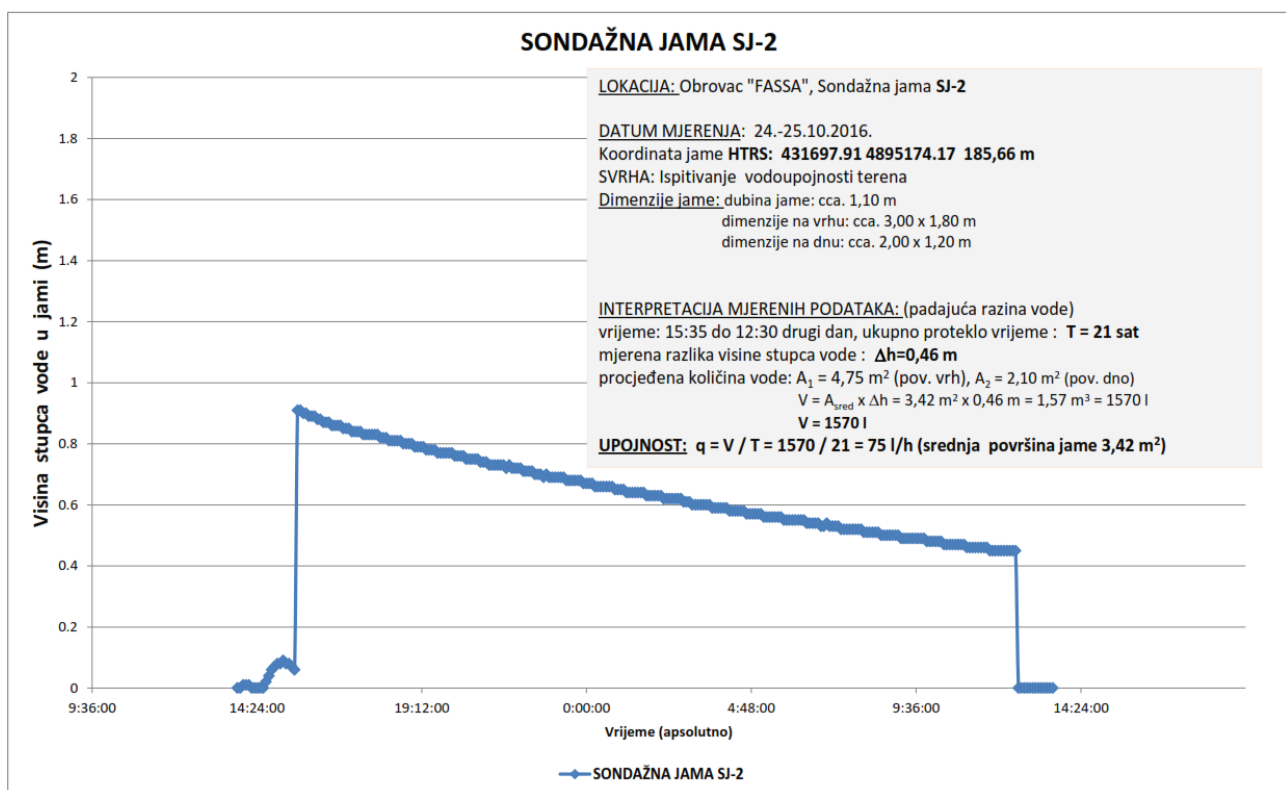
Opis	Terenska identifikacija	Stupanj tvrdoće	Aproks. Područje čvrst. Na pritisak (mpa)
Ekstremno slaba stijena	Para se noktom	R0	0,25 - 1,0
Vrlo slaba stijena	Mrvi se pri jačem udarcu geološkim čekićem, može se rezati nožićem	R1	1,0 - 5,0
Slaba stijena	Može se rezati nožićem	R2	5,0 - 25,0
Srednje čvrsta stijena	Ne može se rezati nožićem, uzorak se može razbiti udarcem geološkog čekića	R3	25,0 - 50,0
Čvrsta stijena	Uzorak zahtjeva više od jednog udarca geološkim čekićem	R4	50,0 - 100,0
Vrlo čvrsta stijena	Uzorak zahtjeva mnogo udaraca geološkim čekićem da bi bio razbijen	R5	100,0 - 250,0
Ekstremno čvrsta stijena	Uzorak se može samo odlamati pomoću geološkog čekića	R6	>250

Tablica 4. Primjer kalkulacije u RMR klasifikacijskom sustavu

	Vrijednosti parametara	Dodijeljeni bodovi
Jednoosna tlačna čvrstoća (MPa)	0,2,4,7,12,15	4
Indeks kvalitete jezgre (RQD)	3,8,13,17,20	13
Razmak diskontinuiteta (m)	5,8,10,15,20	8
Duljina diskontinuiteta (m)	0,1,2,4,6	0
Zijev diskontinuiteta (mm)	0,1,4,5,6	1
Hrapavost diskontinuiteta	0,1,3,5,6	5
Ispuna diskontinuiteta	0,2,2,4,6	6
Rastrošnost zidova	0,1,2,4,6	2
Korekcija bodova - temelji	-15	-15
UKUPNO RMR		24
OZNAKA KATEGORIJE	I-V	IV
KOHEZIJA (kPa)	<100-400>	
KUT TRENJA (stupnjevi)	<15-45>	
GSV VRIJEDNOSTI		19



Slika 8. Mjerenje vodopropusnosti terena SJ-3 (Grabar et al. 2016)



Slika 9. Mjerenje vodopropusnosti terena SJ-2 (Grabar et al. 2016)

6.1. Karakteristike temeljne podloge iz seizmičkih istraživanja

Jedinična težina (γ) dobivena je **Izrazom 1**, računaska otpornost temeljnog tla (q_a) **Izrazom 2**, koeficijent reakcije tla (k_s) **Izrazom 3**, a radi se o korelacijskim izrazima iz literature (Tezcan et al. 2009). Na temelju rezultata provedenih seizmičkih geofizičkih istraživanja (**Slika 2**) usvojene su vrijednosti brzina primarnih ($v_p = 2000 - 4200$ m/s) i posmičnih valova ($v_s = 700-2200$ m/s).

$$\gamma = 18 + 0,002 * v_p \quad (1)$$

$$q_a = 0,1 * \gamma * v_s * \frac{1}{n} \quad (2)$$

$$k_s = 4 * \gamma * v_s \quad (3)$$

Posmični modul (G_0) dobiven je na osnovi brzine posmičnih valova prema **Izrazu 4**, u kojem alfa koeficijent (α) kvadra odnosa brzine primarnih i posmičnih valova prema **Izrazu 5**. Poisson-ov koeficijent tla (ϑ) također je dobiven pomoću alfa koeficijenta (**Izraz 6**). Edometarski modul tla (E_{oed}) dobiven je **Izrazom 8**, iz veze s posmičnim modulom prema **Izrazu 7**. Modul elastičnosti tla (E) proračunat je na temelju dobivenih vrijednosti Poisson-ovog koeficijenta i edometarskog modula, prema **Izrazu 9**. Proračunate vrijednosti prikazane su u **Tablici 5**.

$$G_0 = \rho * V_s^2 \quad (4)$$

$$\alpha = \left(\frac{v_p}{v_s}\right)^2 \quad (5)$$

$$\vartheta = \frac{\alpha - 2}{2(\alpha - 1)} \quad (6)$$

$$E_0 = \frac{(3\alpha - 4) * G_0}{\alpha - 1} \quad (7)$$

$$E_{oed} = \frac{\alpha * E_0}{2 * (3\alpha - 4)} \quad (8)$$

$$E = \frac{E_{oed} * (1 + \vartheta) * (1 - 2\vartheta)}{(1 - \vartheta)} \quad (9)$$

Tablica 5. Geomehanički parametri temeljne podloge dobiveni korelacijama iz rezultata seizmičkih istraživanja

Karakteristike tla iz seizmičkih istraživanja	min.	maks.
Jedinična težina	22 [kN/m ³]	26 [kN/m ³]
Računska otpornost	380 [kPa]	2045 [kPa]
Koeficijent reakcije	61600 [kN/m ³]	232300 [kN/m ³]
Alfa koeficijent	2	3.64
Poisson-ov koeficijent	0.31	0.38
Posmični modul	1176000 [kN/m ²]	11616000 [kN/m ²]
Edometarski modul	530 [kN/m ²]	2650 [kN/m ²]
Modul elastičnosti	384 [kN/m ²]	1915 [kN/m ²]

6.2. Karakteristike temeljne podloge iz klasifikacijskih analiza

Modul elastičnosti stijenske mase u temeljnoj podlozi proračunat je korištenjem **Izraza 10** (Hoek & Diederich 2006), pri čemu je za proračun usvojena jednoaksijalna tlačna čvrstoća za trošnu stijenu 25 MPa, a za kompaktnu 50 MPa. Za proračun je usvojena vrijednost 0 za faktor poremećenosti stijenske mase (D) (Hoek & Brown 1980). Modul elastičnosti za prosječne vrijednosti mjerenih vrijednosti kvalitete stijenske mase prikazan je u **Tablici 6**.

$$E_m = 100000 * \left(\frac{1 - D/2}{1 + e^{\left(\frac{(75 + 25 * D - GSI)}{11} \right)}} \right) \quad (10)$$

Tablica 6. Moduli elastičnosti temeljne podloge dobiveni na temelju rezultata klasifikacijskih analiza

			E_m (MPa)
RMR	29	Kompaktna stijena	960
GSI	24		
RMR	17	Trošna stijena	330
GSI	12		

Kriterij sloma stijenske mase definiran je generaliziranim Hoek-Brown-ovim kriterijem čvrstoće prema **Izrazu 11** (Hoek et al. 2002).

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_c * \left(m_b * \frac{\sigma'_3}{\sigma_c} + s \right)^a \quad (11)$$

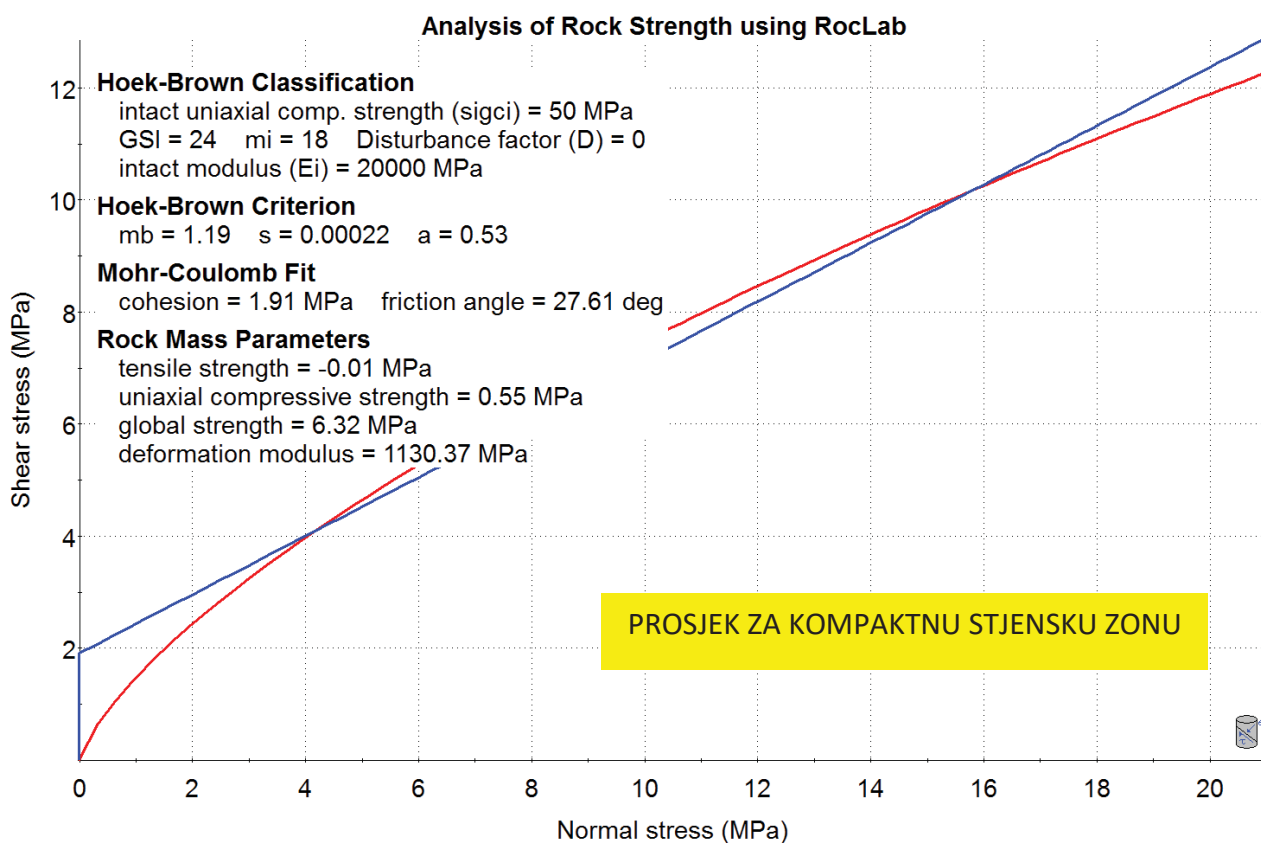
gdje su:

σ_c – jednoosna tlačna čvrstoća homogenog uzorka stijene
 σ'_1 i σ'_3 – veće i manje efektivno naprezanje
 m_b , a , s – iskustveni parametri stijenske mase definirani prema Hoek et al. 2002.

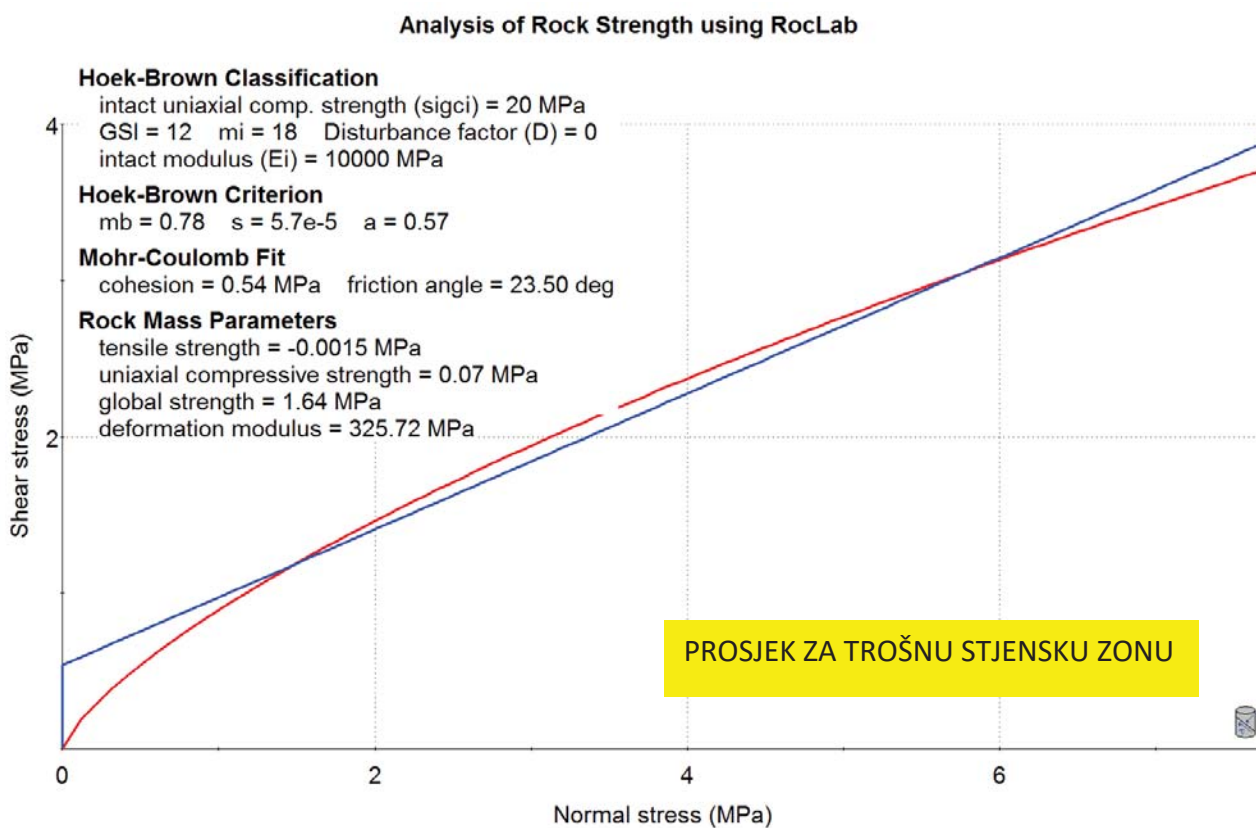
Analiza čvrstoća stijenske mase prema Hoek-Brown-ovom kriteriju za prosječnu kompaktnu zonu i prosječnu trošnu zonu izvedena je računalnim programom RocLab (Rocscience Inc. 2005) i prikazana na **Slikama 10** i **11**.

Granična nosivost stijenske mase za prethodno odabrane čvrstoće stijenske mase prema Hoek-Brown-ovom kriteriju određena je prema **Izrazu 12** (Mišević 2004). Tako je proračunato kako je minimalna vrijednost nosivosti temeljne podloge 810 kPa, a maksimalna 4990 kPa.

$$q_{ult} = \left[m_b * \sigma_c * \left(s * \sigma_c^{1/a} \right)^a + s * \sigma_c^{1/a} \right]^a + \left(s * \sigma_c^{1/a} \right)^a \quad (12)$$



Slika 10. Čvrstoća kompaktne stijenske mase prema Hoek-Brown-ovom kriteriju



Slika 11. Čvrstoća trošne stijenske mase prema Hoek-Brown-ovom kriteriju

7. ZAKLJUČAK

Ovaj rad daje prikaz praktičnog povezivanja rezultata geofizičkih seizmičkih istraživanja sa znanjima i zakonitostima iz geotehničkog inženjerstva i mehanike stijena. Koristjenjem korelacijskih izraza, preko izmjerenih brzina primarnih i posmičnih seizmičkih valova, procijenjene su vrijednosti posmičnog modula, Poisson-ovog koeficijenta, modula elastičnosti i dr.

Detaljno kartiranje i analiziranje jezgre iz istražnih bušotina, te laboratorijsko i terensko ispitivanje odabranih uzoraka poslužilo je za svrstavanje istraživanog medija u neki od važećih klasifikacijskih sustava, kao i izradu inženjersko-geološke karte. Iz rezultata klasifikacijskih analiza moguće je također odrediti geomehaničke parametre stijenske mase u temeljnoj podlozi.

Već u fazi istraživanja nekog područja namijenjenog za gradnju moguće je provesti ispitivanja čiji je cilj zaštita okoliša. To je pokazano u ovom radu, tako što su ispitivanjem vodopropusnosti u sondažnim jamama određene zone visoke vodoupojnosti, koje su potencijalna mjesta ulaska onečišćivača u podzemne vodonosnike, što bi u konačnici moglo imati značajan utjecaj na kvalitetu podzemne vode.

Dobiveni rezultati istraživanja, prikazani u ovom radu predstavljaju korektnu podlogu za izradu tehničke dokumentacije - glavni projekt, odnosno dimenzioniranje temelja. Prikazani program istražnih radova u radu može poslužiti kao ogledni obrazac za izradu programa istraživanja kod budućih projekata sličnih relevantnih karakteristika.

8. LITERATURA

Bieniawski, Z.T. (1976): Rock Mass Classification in Rock Engineering, In: Exploration for Rock Engineering, Proc. of the Symp.

Bieniawski, Z.T. (1989): Engineering Rock Mass Classification, New York: John Wiley & Sons.

Biondić, B., Biondić, R. (2014): Hidrogeologija dinarskog krša u Hrvatskoj. Sveučilište u Zagrebu Geotehnički fakultet, Varaždin.

Hoek, E. and Brown, E.T. (1980): Empirical strength criterion for rock masses.

Hoek E., Kaiser P.K., Bawden W.F. (1995): Support of Underground Excavations in Hard Rock, Rotterdam: A.A. Balkema.

Hoek, E.; Carranza-Torres, C.T.; Corkum, B. (2002): Hoek-Brown failure criterion - 2002 edition. In: Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symp., Toronto, Canada, 2002: 1: 267-73.

Hoek & Diederich (2006): International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.

Grabar, K.; Gizdavec, Pažur, I.; Filipović, A.; Samolec, I.; Marićuš, M. (2016): Geotehnički elaborat za potrebe izgradnje proizvodnog pogona Fass u Obrovcu. SPP d.o.o., Varaždin.

ISRM (1978): Quantitative description of discontinuities in rock masses, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical Abstract.

Ivanović, A., Sakač, K., Sokač, B., Vrsalović – Carević, I. & Zupanić, J. (1976 b) : Tumač za list Obrovac, Osnovna geološka karta, 1:100 000, Savezni geološki institut, Beograd.

Miščević, P. (2004): Uvod u inženjersku mehaniku stijena.

Nonveiller, E. (1979): Mehanika tla i temeljenje građevina, Školska knjiga, Zagreb.

Strelec, S.; Stanko, D.; Gazdek, M. (2016): Empirical correlation between the shear-wave velocity and the dynamic probing heavy test : case study Varaždin, Croatia, Acta Geotechnica Slovenica, volume 13, number 1, 2016.

Rocscience Inc. (2005): RocLab 1.0, Rock Mass Strength Analysis.

Tezcan, S.S., Ozdemir, Z., Kececi, A. (2009): Seismic technique to Determine the Allowable Bearing Pressure for Shallow Foundation in Soils and Rock, Acta Geophysica, volume 57, Number 2, June 2009.