Istraživanje temeljnog tla u svrhu sanacije tvrđave "MINČETA" u Dubrovniku

Hančić, Luka

Undergraduate thesis / Završni rad

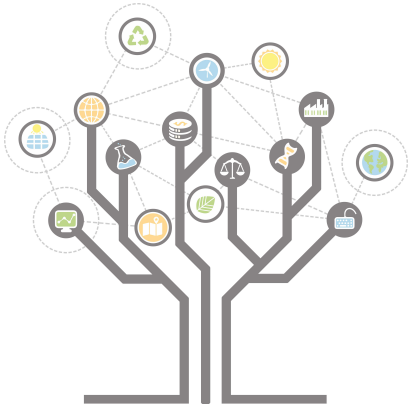
2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:689989

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**



Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations

zir.nsk.hr

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET

LUKA HANČIĆ

ISTRAŽIVANJE TEMELJNOG TLA U SVRHU SANACIJE TVRĐAVE „MINČETA“ U DUBROVNIKU

ZAVRŠNI RAD

VARAŽDIN, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET

ZAVRŠNI RAD

ISTRAŽIVANJE TEMELJNOG TLA U SVRHU SANACIJE TVRĐAVE „MINČETA“ U DUBROVNIKU

KANDIDAT:

LUKA HANČIĆ

MENTOR:

Prof.dr.sc. STJEPAN STRELEC

NEPOSREDNI VODITELJ:

JASMIN JUG, mag.ing.geoing.

VARAŽDIN, 2019.

Sveučilište u Zagrebu
Geotehnički fakultet

ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: LUKA HANČIĆ

Matični broj: 2641 - 2015./2016.

NASLOV ZAVRŠNOG RADA:

ISTRAŽIVANJE TEMELJNOG TLA U SVRHU SANACIJE TVRĐAVE „MINČETA“ U DUBROVNIKU

Rad treba sadržati:
1. Uvod
2. Inženjerskogeološka istraživanja
3. Geofizička istraživanja
4. Rezultati istraživanja
5. Sanacijsko rješenje za poboljšanje temeljnog tla tvrđave Minčeta
6. Zaključak
7. Literatura
8. Prilozi

Pristupnik je dužan predati mentoru jedan uvezen primjerak završnog rada sa sažetkom. Vrijeme izrade završnog rada je od 45 do 90 dana.

Zadatak zadan: 20.03.2019. Rok predaje: 05.09.2019.

Mentor:	Neposredni voditelj:	Predsjednik Odbora za nastavu:
Prof.dr.sc. Stjepan Strelec	Jasmin Jug, mag.ing.geoing.	Izv.prof.dr.sc. Igor Petrović

REPUBLIKA HRVATSKA VARAŽDIN GEOTEHNIČKI FAKULTET SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je završni rad pod naslovom

ISTRAŽIVANJE TEMELJNOG TLA U SVRHU SANACIJE TVRĐAVE „MINČETA“ U DUBROVNIKU

rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom prof.dr.sc. Stjepana Streleca i Jasmina Juga mag.ing.geoing.

Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava.

Izjavljujem također, da nijedan dio rada nije korišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

U Varaždinu, 09. lipnja 2019

LUKA HANČIĆ

(Ime i prezime)

Luka Hančić

(Vlastoručni potpis)

SAŽETAK RADA

IME I PREZIME AUTORA: Luka Hančić

NASLOV RADA: Istraživanje temeljnog tla u svrhu sanacije tvrđave „Minčeta“ u Dubrovniku.

Tema ovog rada je geotehničko istraživanje u svrhu poboljšanja temeljnog tla i sanacije tvrđave „Minčeta“, s obzirom da je tijekom godina doživjela brojna oštećenja. Geotehnička istraživanja i ispitivanja predstavljaju jednu od osnovnih podloga svakog građevinskog projekta a počinju izradom programa istražnih radova. Terenski istražni radovi izvode se primjenom geoloških istraživanja, geofizičkih istraživanja, istražnog bušenja i in-situ metoda geotehničkih istraživanja. Svi geotehnički istražni radovi provode se prema propisanim normama i specifikacijama, pa su u skladu s time izvedena terenska istraživanja za potrebe ovog rada. U svrhu detekcije oštećenja temeljnog tla ispod tvrđave izvedeni su terenski istražni radovi kroz inženjerskogeološka i geofizička istraživanja (geoelektrična tomografija, višekanalna analiza površinskih valova, seizmički down-hole i georadar), pa rad najprije ukratko opisuje teorijske osnove spomenutih metoda istraživanja. U istraživačkom dijelu rada prikazani su rezultati terenskih mjerenja, koji su doveli do prijedloga idejnog rješenja za poboljšanje temeljnog tla na području tvrđave „Minčeta“ primjenom injekcijskih zavjesa, a sve s ciljem sanacije ove dobro poznate povijesne građevine.

KLJUČNE RIJEČI

Tvrđava „Minčeta“, inženjerskogeološka istraživanja, geofizička istraživanja, sanacija povijesnih građevina, injektiranje stijena

Sadržaj

1. Uvod 1
2. Inženjerskogeološka istraživanja 2
3. Geofizička istraživanja 10
3.1. Geoelektrična istraživanja 12
3.1.1. Električna tomografija otpornosti 15
3.2. Seizmička istraživanja 19
3.2.1. Seizmičko ispitivanje niz bušotinu ili Down-hole 23
3.2.2. Višekanalna analiza površinskih valova (MASW) 24
3.3. Elektromagnetne metode 29
3.3.1. Georadar 30
4. Rezultati istraživanja 32
4.1. Inženjerskogeološke značajke 32
4.2. Geofizičke značajke 38
4.2.1. Električna tomografija 38
4.2.2. Višekanalna analiza površinskih valova (MASW) 39
4.2.3. Down-hole 41
4.2.4. Georadarsko profiliranje 43
4.3. Parametri stijenske mase 45
5. Sanacijsko rješenje za poboljšanje temeljnog tla tvrđave Minčeta 50
6. Zaključak 51
7. Literatura 54
8. Prilozi 57

1. Uvod

Grad Dubrovnik nalazi se na jugu Dalmacije te je administrativno središte Dubrovačko-neretvanske županije. Jedan je od svjetskih centara turizma, ponajviše radi arhitekture, mnogih kulturoloških znamenitosti i lijepog mora. Neke od najznačajnijih znamenitosti su gradske zidine, Stradun (glavna ulica u staroj jezgri grada), Katedrala Uznesenja Blažene Djevice Marije, Knežev dvor i dr. Dubrovačke gradske zidine, danas vjerojatno najveća i najprepoznatljivija znamenitost grada, sklop su utvrda koje okružuje grad. Građene su od 12. do 17. stoljeća te su se koristile za obranu od napadača. Duge su 1940 metara a uključuju pet tvrđava , te šesnaest kula i bastiona. Od pet tvrđava, tri su sastavni dio zidina (Minčeta, Bokar i Sv. Ivan), a dvije su samostojeće (Lovijenac i Revelin). Tvrđava Minčeta, čija je sanacija tema ovog rada, najsjevernija je i najviša tvrđava na gradskim zidinama, a ime je dobila po dubrovačkoj obitelji Menčetić. Tlocrtno je kružnog oblika, temeljena na širokom predziđu te predstavlja i najvišu točku Dubrovačkih gradskih zidina. Tijekom vremena na stabilnost tvrđave utjecali su većinom umjetni, ali i prirodni činitelji. Minčetu su zadesila razna ratna oštećenja, zrakoplovna nesreća, i građevinski zahvati u blizini. Posebno se tu može istaknuti iskop usjeka za potrebe izgradnje ulice Iza Grada, kojim je došlo do preraspodjele prirodnih napona u stijenskoj masi. Pri tome je došlo do pomaka na geološki najslabijem elementu, odnosno prisutnom rasjedu u sklopu sinklinale, što je utvrđeno ovim radom. U teorijskom dijelu rada, opisane su same inženjerskogeološke i geofizičke metode istraživanja koje su korištene u Dubrovniku, njihovi principi provedbe, mjerenja te interpretiranje dobivenih podataka. Drugi dio rada posvećen je inženjerskogeološkom opisu temeljnog tla, analiziranju i interpretiranju dobivenih podataka, te na temelju toga izradi prijedloga sanacijskog rješenja za poboljšanje problematičnog temeljnog tla ispod tvrđave Minčeta.

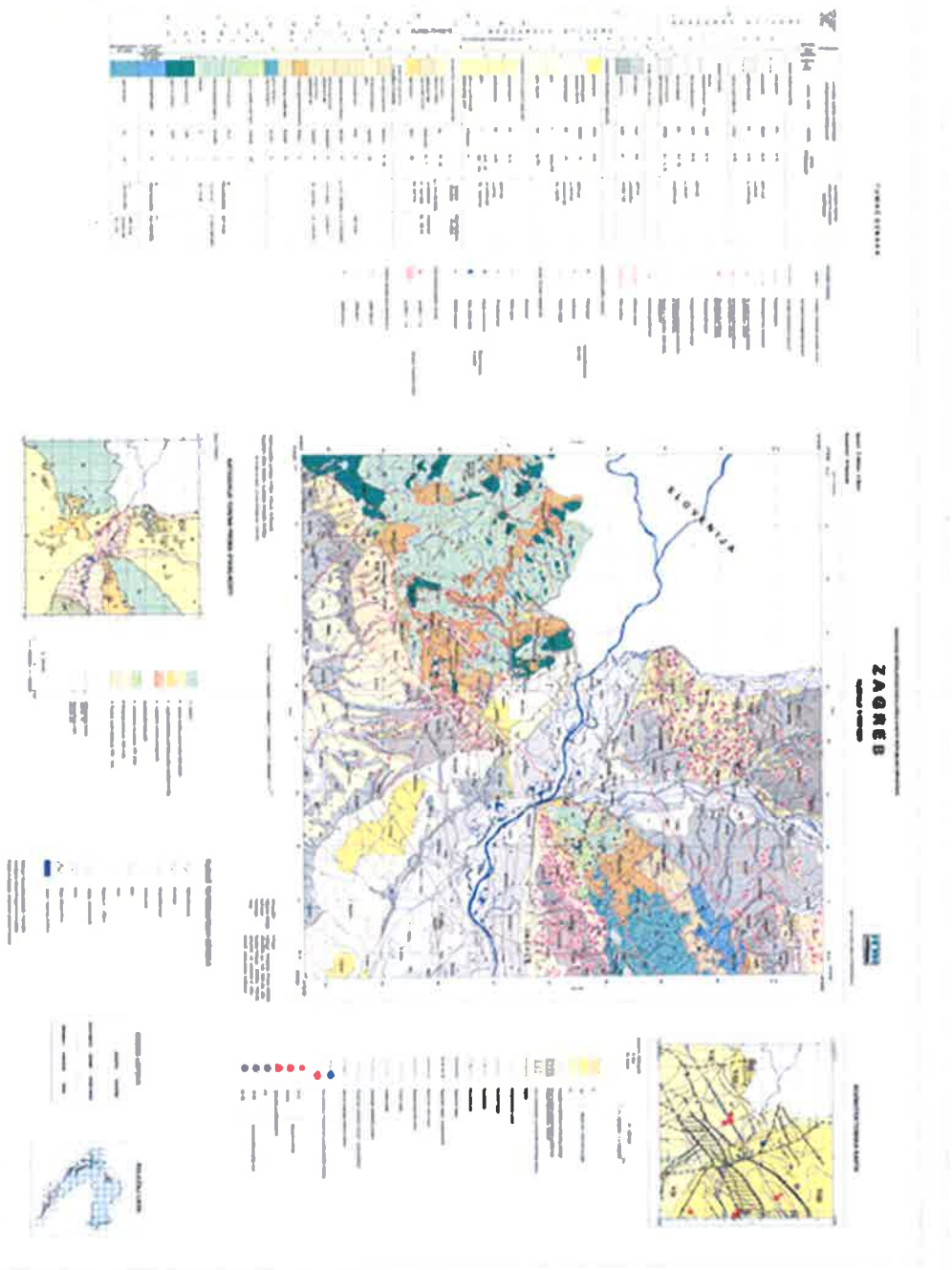
2. Inženjerskogeološka istraživanja

Inženjerskogeološka istraživanja ili IG istraživanja su skup raznovrsnih istraživanja koja se obavljaju prije izgradnje ili sanacije neke građevine. IG istraživanjima definiraju se kvalitativne i kvantitativne značajke stijenske mase koja izgrađuje teren, a započinju inženjerskogeološkim (IG) kartiranjem. To je jedna od faza istraživanja terena, koja prethodi geofizičkim istraživanjima, istražnom bušenju, izradi iskopa i sl., te laboratorijskim ispitivanjima uzoraka tla ili stijena. Kartiranjem se dobivaju podaci o odnosima između različitih litoloških kompleksa, značajkama litoloških jedinica, tekotonici, stanju stjenske mase, pukotinama i pukotinskim sustavima i dr., a prikupljeni podaci prikazuju se u obliku karte (Slika 1). U ovom radu korištene su neke od metoda IG istraživanja kako bi bila određena neka od svojstava stijena koje izgrađuju teren ispod tvrđave Minčeta, a rezultati su detaljnije opisani u istraživačkom dijelu rada.

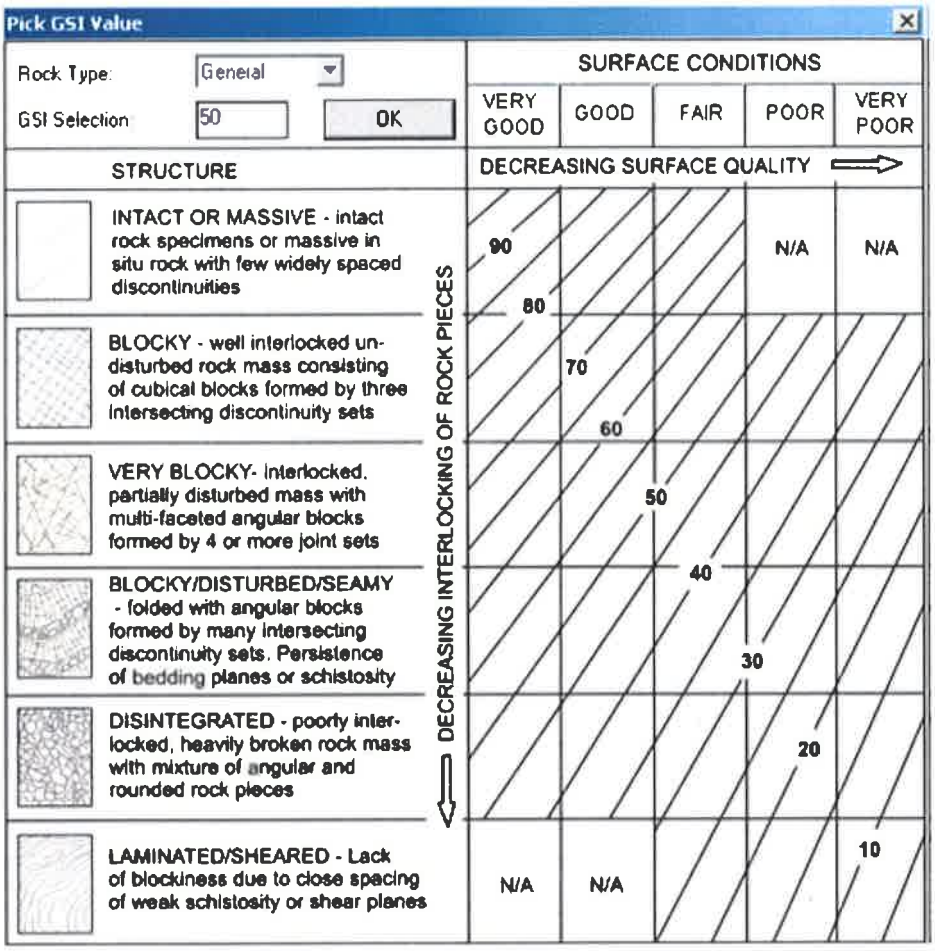
U IG istraživanjima stijene se dijele na čvrsto vezane, slabo vezane i nevezane. Čvrsto vezane stijene su one kod kojih postoji čvrsta veza između zrna i odlomaka koji ih izgrađuju, a još se dijele na dobro i slabo okamenjene. Slabo vezane stijene građene su najvećim dijelom česticama manjim od 0,002 mm, dok se nevezane stijene prema granulometrijskom sastavu dijele se na šljunke, pijeske i prahove, dobro, srednje i rahle zbijenosti.

Mehanička svojstva stijena iskazuju kada je stijena izložena djelovanju sila, a dijele se na statička i dinamička. Većina takvih svojstava, poput čvrstoće, tvrdoće, elastičnosti, plastičnosti, abrazivnosti i dr., ispituje se u laboratorijima za mehaniku stijena. Pri ispitivanju čvrstoće razlikuju se tlačna i vlačna čvrstoća, te čvrstoća savijanja, izvijanja i smicanja. Pri ispitivanju jednoosne tlačne čvrstoće (engl. Uniaxial Compressive Strength, UCS) uzorak tla se stavlja između dva klipa, preše te tlačno opterećuje. Tokom ispitivanja mjeri se skraćenje uzorka, povećanje radijusa baze uzorka i aksijalna sila pri slomu uzorka, u skladu s propisima Međunarodnog društva za mehaniku stijena (ISRM, 1981; 2007). Ispitivanje čvrstoće u točki (engl. Point Load Test, PLT), poznato i kao Franklinov test (Broch and Franklin 1972) je još jedan od pokusa za klasifikaciju stijena prema čvrstoći. Pokus se odvija tako da se uzorak određenih dimenzija opterećuje jednolikim povećanjem sile tako da do sloma dođe u periodu od 10 do 60 sekundi (ISRM, 1985). Pokus služi za procjenu drugih parametara čvrstoće s kojima je u korelaciji (jednoosna tlačna i vlačna čvrstoća). Pri procjeni čvrstoće stijene također se

mogu koristi i razni računalni programi. Jedan od tih programa je RocLab, pomoću kojega se procjenjuje čvrstoća stijene, na temelju Hoek-Brownovog kriterija čvrstoće. Na slici 2 vidljivo je kako se programom RocLab određuju ulazni parametri pomoću GSI (engl. Geological Strenght Index) klasifikacije (Hoek et al., 1998; Marinos and Hoek, 2000) na osnovu kojih je dobiven dijagram nelinearnog odnosa normalnog i posmičnog naprezanja.



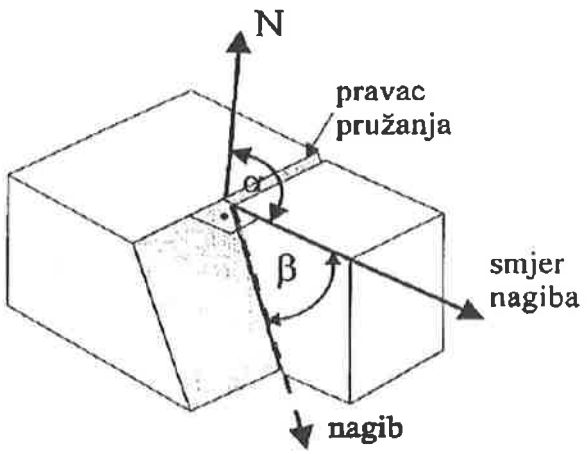
Slika 1. Primjer inženjerskogeološke karte: list Zagreb (Buljan, 2009)



Slika 2. Određivanje geološkog indeksa čvrstoće (GSI) pomoću programa RocLab (Rocscience, 2002)

Inženjerskogeološka svojstva stijenskih masa dijele se načine pojavljivanja, stanje geniteta i tropije, diskontinuiranost i stanje naprezanja. Diskontinuiranost je svojstvo masa da u području pojavljivanja posjeduju odgovarajući sklop diskontinuiteta kojeg stvaraju setovi diskontinuiteta. Diskontinuiteti su oslabljenja u sturkturi stijenske mase, a dijele se na primarne i sekundarne. Osnovni elementi kojima se opisuju diskontinuiteti su ISRM (1981): orijentacija, razmak, neprekinutost ili postojanost, širina (zijev), ispuna i broj grupa diskontinuiteta, zatim hrapavost i čvrstoća stijenki diskontinuiteta, voda u diskontinuitetima, te veličina blokova u stijenskoj masi koje čine diskontinuitet. Orijentacija diskontinuiteta u prostoru određuje se pravcem pružanja te smjerom i kutom nagiba (Slika 3). Pravac pružanja je trag diskontinuiteta koji se vidi na površini, smjer nagiba je kut koji zatvara smjer najvećeg nagiba sa sjeverom, a nagib je najveći

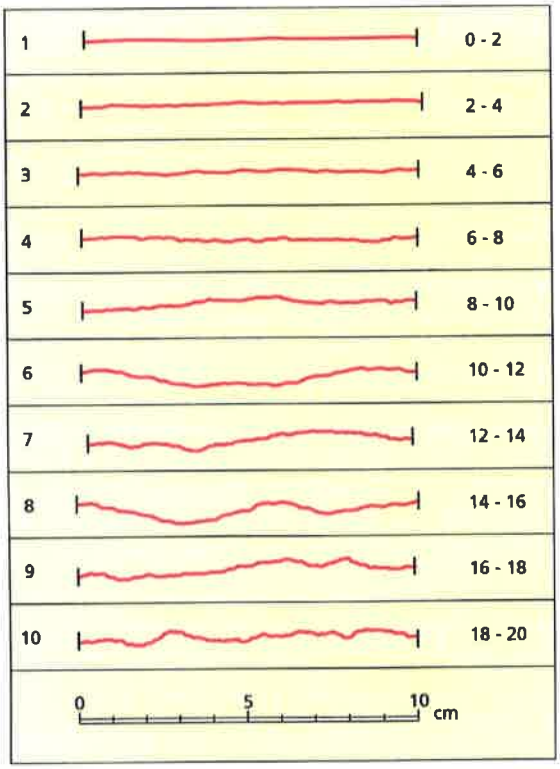
kut koji smjer nagiba zatvara s horizontalnom ravninom. Diskontinuiteti se grafički prikazuju statističkim obradama u obliku rozeta dijagrama i stereografskih projekcija (tragovima ravnina, točkastim i konturnim dijagramima). Konturni dijagrami koriste se za prikaz velikog broja podataka vezanih za dobivene podatke o diskontinuitetima (Meaški, 2017). Razmak diskontinuiteta određuje se kao udaljenost između ravnina diskontinuiteta mjerena okomito na susjedne točke. Mjeri se na izdancima na terenu, te se mjerene vrijednosti preračunavaju ovisno o nagibu diskontinuiteta. Proračunate vrijednosti se statistički obrađuju i razmak se određuje kao srednja vrijednost (ISRM, 1981).



Slika 3. Orijentacija diskontinuiteta (Meaški, 2017)

Neprekidnost ili postojanost diskontinuiteta predstavlja mjeru rasprostranjenja diskontinuiteta u ravnini. Postojanost po pružanju i padu je jedan od najvažnijih parametara u njihovom opisu, ali i parametar koji je ili nemoguće ili najteže mjeriti. Kako je postojanost teško odrediti, gruba ocjena postojanosti diskontinuiteta najčešće se daje na osnovi poznavanja njihove geneze, a time i morfologije. Uglavnom se sistemi ili familije diskontinuiteta razdvajaju izrazima kao što su postojan, srednje postojan i nepostojan. Također, radi teškog određivanja postojanosti, ona se poistovjećuje s linearnom rasprostranjenosti koja se označava kao dužina diskontinuiteta. Hrapavost stijenki diskontinuiteta označava površinske neravnine u odnosu na srednju ravninu

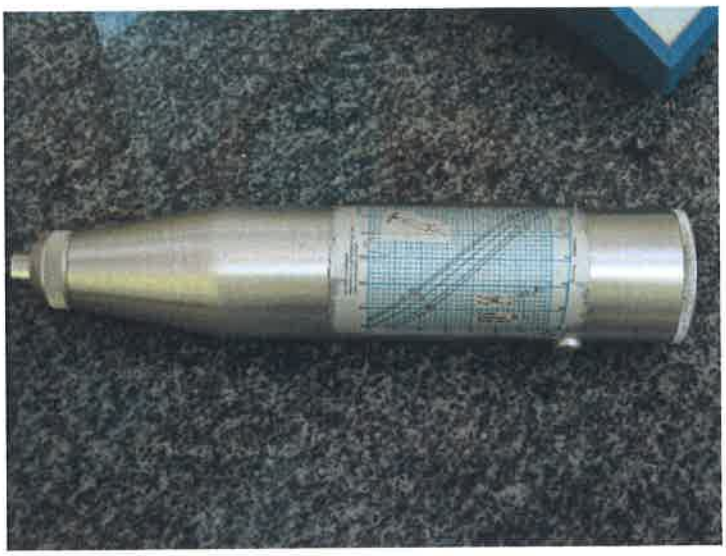
diskontinuiteta. Može se okarakterizirati kao valovitost i kao nejednakost malih dimenzija. Svrha određivanja hrapavosti je procjena ulaznih podataka za proračun čvrstoće diskontinuiteta na smicanje i proračun dilatacije. Za brzo i relativno točno terensko određivanje hrapavosti izražene koeficijentom ili indeksom hrapavosti (JRC) (Meaški, 2017), služe njeni tipizirani oblici odnosno profili koji su prikazani na slici 4. Tipizirani profili odnose se na 10-centimetarsko mjerilo, ali se na odgovarajući način, mogu pretvoriti i u veća mjerila.



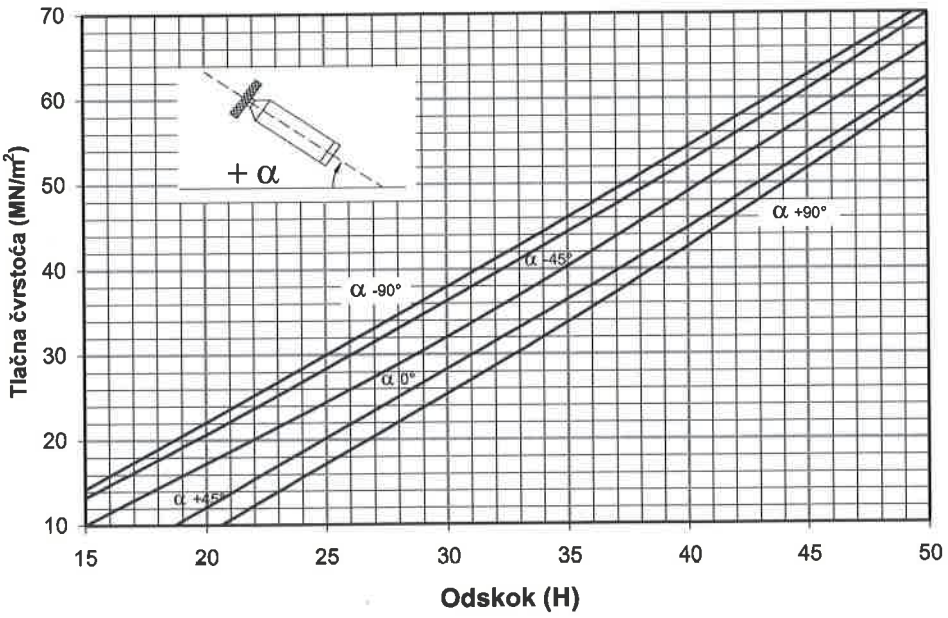
Slika 4. Tipični profili hrapavosti (Strelec et al., 2012a)

Čvrstoća stijenki diskontinuiteta je jedna od vrlo bitnih vrijednosti, utječe na posmičnu čvrstoću i deformabilnost. Tlačna čvrstoća stijenki diskontinuiteta važna je komponenta posmične čvrstoće i deformabilnosti. Ovisi o materijalu koji tvori stijenke i o stupnju trošenja stijenki. Približne vrijednosti jednoosnih tlačnih čvrstoća na terenu se mogu odrediti Schmidtovim čekićem (Slika 5). Mjerenja se zasnivaju na broju i veličini odskoka utega pri udaru na neku ravnu površinu (stijenu). Schmidtov čekić se najčešće primjenjuje u pravcu okomitom na zidove stijene, a može se ispitivati i u drugim pravcima uz korištenje korelacijskih dijagrama odnosa kuta osi čekića i horizontale. Na

temelju izmjerenih odskoka određuje se srednja vrijednost. Preporuka ISRM-a je da se pokus izvodi u skupinama od po 10 ispitivanja po jediničnoj površini, s tim da se eliminira pet najmanjih rezultata, a računa se srednja vrijednost pet najvećih čitanja. Srednja vrijednost odskoka Schmidtova čekića i zapreminska težina stijene koriste se za određivanje čvrstoće zidova diskontinuiteta, pomoću korelacijskog dijagrama prikazanog na slici 6.



Slika 5. Schmidtov čekić (Strelec et al., 2013)



Slika 6. Korelacijski dijagram tlačne čvrstoće prema vrijednostima odskoka Schmidt-ovog čekića (Strelec et al., 2013)

Trošenje stijenki diskontinuiteta može biti kemijsko ili mehaničko. Proces trošenja se uvijek odvija od površine prema dubini mase. Zijev diskontinuiteta je okomiti razmak koji odvaja susjedne zidove otvorenog diskontinuiteta pri čemu je međuprostor ispunjen vodom ili zrakom. Prema zijevu, diskontinuiteti se dijele na otvorene i zatvorene. Ispuna diskontinuiteta je naziv za materijal koji ispunjava prostor između stijenki diskontinuiteta. U pravilu je materijal koji ispunjava zijev slabiji od okolne stijene. Tipični materijali ispune jesu pijesak, prah, glina, breča, kalcit, limonit i dezintegrirana i rastrošena stijena. Voda u diskontinuitetima bitna je kod stijenskih masa gdje je primarna hidraulička propusnost stijene daleko manja od procjeđivanja kroz diskontinuitete. Količina procjeđivanja ovisi o postojanju ispune pukotina, vrsti ispune, pritiscima u stijenskoj masi oko pukotine, otpornosti materijala ispune na unutrašnju eroziju i pritisku vode. Radi kvantitativnog određivanja kvaliteta stijenske mase razvijen je cijeli niz indeksnih veličina. Najčešće korišteni indeksni parametri stijenske mase su kvaliteta stijenske mase (RQD), indeks stijenske mase (RMi), geološki indeks čvrstoće (GSI), težinska gustoća pukotina (wJd) i faktor opterećenja stijenske mase (Terzaghi). Indeks kvalitete stijenske mase (RQD) (Tablica 1) određuje se kao postotak jezgre izvađene prilikom istražnog bušenja, koju čine dijelovi jezgre duži od 10 cm (Izraz 1).

$$RQD = \frac{ukupna\ dužina\ dijelova\ većih\ od\ 10cm}{ukupna\ promatrana\ dužina\ bušenja} * 100\% \quad (1)$$

Geološki indeks čvrstoće razvijen je temeljem opažanja prilikom izrade brojnih inženjerskogeoloških projekata (Hoek et al., 1998; Marinos and Hoek, 2000). Metoda omogućuje procjenu vrijednosti stijenske mase temeljem vizualne procjene geoloških uvjeta. Određuje se iz matrice kao raspon vrijednosti zbog toga jer kvaliteta stijenske mase na većem području nije jednoznačna vrijednost. U određivanju raspona vrijednosti koristi se ocjena strukture stijenske mase (SR) i ocjena stanja površine diskontinuiteta (SCR). Na temelju dobivenih svojstava stijena i indeksa moguće je opisati kvalitetu stijenske mase određenim klasifikacijama ili svrstati stijensku masu u određenu kategoriju određene klasifikacije. Najčešće korištene klasifikacije su RMR, Q, NATM, RSR i SMW. RMR klasifikacija (Bieniawski 1973; 1989) najprihvaćenija je klasifikacija u geotehnici. RMR klasifikacija se temelji na bodovanju određenih šest parametara, a ti parametri su jednoaksijalna tlačna čvrstoća stijenskog materijala, RQD,

razmak diskontinuiteta, svojstva diskontinuiteta, stanje podzemnih voda i orijentacija diskontinuiteta. Dobivene vrijednosti svrstavaju se u pet kvalitativno-kvantitativnih područja prema kojima se boduju (Tablica 2). Suma bodova odabranih parametara predstavlja kvalitetu stijenske mase (Tablica 3).

Tablica 1. Kvaliteta stijenske mase

RQD (%)	Kvaliteta stijenske mase
<25	vrlo slaba
25–50	slaba
50–75	povoljna
75–90	dobra
90–100	odlična

Tablica 2. RMR bodovanje stijenske mase (Strelec et al., 2012b)

PARAMETAR			PODRUČJA VRIJEDNOSTI						
1.	Čvrstoća stijenskog materijala	Indeks čvrstoće s opt. u točci	> 10 MPa	4 – 10 MPa	2 – 4 MPa	1 – 2 MPa	Za ove vrijednosti koristiti jednoosnu čvrstoću		
		Jednoosna tlačna čvrstoća (MPa)	> 250	100 - 250	50 - 100	25 - 50	10 - 25	3 - 10	1 - 3
	Bodovi		15	12	7	4	2	1	0
2.	RQD (%)		90 – 100	75 - 90	50 - 75	25 - 50	< 25		
	Bodovi		20	17	13	8	5		
3.	Razmak diskontinuiteta		> 2 m	0,6 – 2 m	0,2 – 0,6 m	0,06 – 0,6	< 0,06 m		
	Bodovi		20	15	10	8	5		
4.	Stanje pukotina		Vrlo hrapave Prekinute Nerazdvojene Zidovi stijene nerastrošeni	Neznatno hrapave površine Zijev < 1 mm Neznatno rastrošeni zidovi	Neznatno hrapave površine Zijev < 1 mm Vrlo rastrošeni zidovi	Glatka površina ili ispuna < 5 mm ili zijev 1 – 5 mm Neprekinute	Meka ispuna debljine > 5 mm ili zijev > 5 mm Neprekinuta		
	Bodovi		30	25	20	10	0		
5.	Uvjeti stanja podzemne vode	Dotok na 10 m tunela (l/min)	Nikakav	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125		
		Omjer pritiska vode u pukotini i većeg glavnog napreza	0	0 – 0,1	0,1 – 0,2	0,2 – 0,5	> 0,5		
		Opće stanje	Potpuno suho	Vlažno	Mokro	Voda pod malim pritiskom	Ozbiljni problemi s vodom		
	Bodovi		15	10	7	4	0		

Tablica 3. Opis stijenske mase iz zbroja bodova (RMR)

Bodovi	100-81	80-61	60-41	40-21	<20
Kategorija broj	I	II	III	IV	V
Opis stijenske mase:	Vrlo dobra	Dobra	Povoljna	Slaba	Vrlo slaba

3. Geofizička istraživanja

Geofizička istraživanja koriste se u svrhu određivanja sastava i građe terena te rješavanja konkretnih istraživačkih zadataka. Primjenjuju se u istraživanjima čvrstih mineralnih sirovina, podzemnih voda, ugljikovodika, za rješavanje geotehničkih i inžženjerskogeoloških problema, ali se ujedno mogu koristiti i u negeološkim istraživanjima, primjerice arheologiji. Predmet istraživanja je najčešće površinski „sloj" litosfere. Geofizičke metode temelje se na opažanju fizičkih svojstava stijena,

koja su povezana s geološkim i petrološkim svojstvima tih istih stijena. Najčešće rabljena svojstva stijena su: elasticitet, električna otpornost, električna polarizacija, gustoća i dr. Na temelju tih svojstava temelje se određene geofizičke metode pa tako razlikujemo: seizmičke, električne, elektromagnetne, gravimetrijske, magnetometrijske te elektromagnetne metode. U istraživanjima za potrebe ovog rada korištene su samo neke od metoda koje će u nastavku biti detaljnije opisane:

- georadarsko GPR profiliranje
- električno istraživanje geoelektričnom tomografijom
- seizmička istraživanja višekanalnom analizom površinskih valova i „downhole" seizmičko mjerenje na pokosu obloženog usjeka.

Svaka geofizička metoda interpretira podatke u određenoj dimenziji, tako se nekim metodama dobivaju jednodimenzionalni podaci, nekima dvodimenzionalni podaci, dok u novije vrijeme neke metode mogu prikazati čak i trodimenzionalne podatke. Uz određena ograničenja i uvjete spajanjem niza 1D-podataka može se dobiti 2D-model, a spajanjem 2D-podataka može se dobiti 3D-model. Dolaskom novijeg i naprednijeg doba uveden je i pojam 4D-istraživanja kod kojega se kao četvrta dimenzija uzima vrijeme. Nakon određivanja geološkog modela geofizička anomalija može se jednoznačno izračunati. Ujedno, ako se mjeri geofizička anomalija, za tu istu može biti više geoloških modela (višeznačnost interpretacije tj. iznos mogućih rješenja može se ograničiti na temelju prijašnjih znanja o građi terena). Broj mogućih rješenja sužava se na temelju raspoloživih metoda. Do konačnog rješenja najučinkovitije se dolazi kombinacijom više metoda te primjenom metoda kvantitativne interpretacije s korištenjem bušotinskih podataka.

Prilikom geofizičkih istraživanja vrlo često se spominju signal i šum. Signal je interpretiran kao poželjni dio mjernog spektra signala dok je šum interpretiran kao nepoželjan dio koji remeti i prikriva signal. Za različite geofizičke metode određeni su signali te šumovi. Npr. pri izvođenju refrakcijskih mjerenja signal je definiran kao refrektiran val, dok su hodanje, promet i ostali događaju koji uzrokuju titraje definirani kao šumovi. Krajnji rezultati mjerenja ovise o kakvoći mjerenih podataka, ponajviše o razini šuma, te mogućnostima njegovog prepoznavanja i odstranjivanja, ali i dobrim dijelom, ovise i o korištenim instrumentima te metodama obrade podataka. Uz signal i šum pri geofizičkim istraživanjima često se susreće pojam anomalija. Anomalija je

poremećaj nekog normalnog, prirodnog ili pobuđenog fizičkog polja. Ta polja mogu biti električna, gravimetrijska, elektromagnetna, magnetna i dr. Kako se litosfera odlikuje velikom raznolikošću geoloških struktura i stijena, potpuno normalno je da kao posljedicu toga ima velikih nehomogenosti podzemlja sa obzirom na fizička svojstva. Ispitivanjem anomalija dolazi se do saznanja o geološkoj građi i sastavu terena (Šumanovac, 2012).

3.1. Geoelektrična istraživanja

Geoelektrične metode temelje se na mjerenjima električnih svojstava stijena. Električna svojstva ovise o vrsti stijena, te se njihovim određivanjem i interpretacijom mogu dobiti različita saznanja o geološkoj građi i sastavu nekog tla. U električnim istraživanjima koriste se tri osnovna električna svojstva stijena:

- električna otpornost,
- elektrokemijska svojstva stijena s obzirom na elektrolite u podzemlju
- dielektrična konstanta.

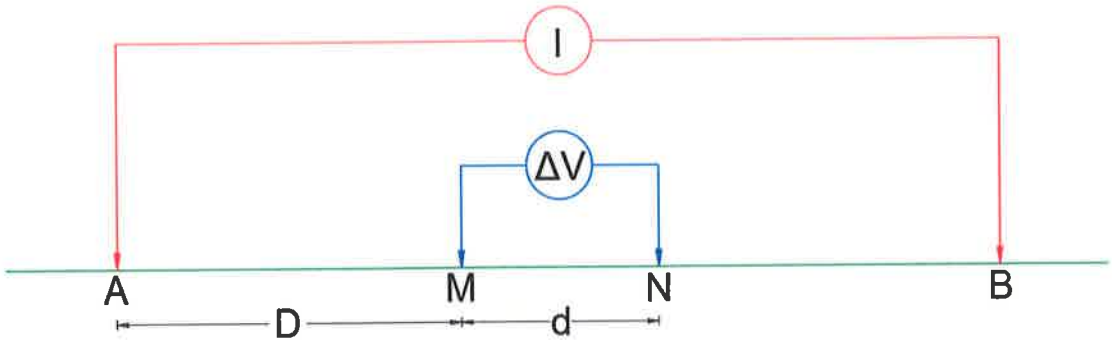
Pri razmatranju električnih svojstava najvažniji je Ohmov zakon koji glasi: $R = \frac{U}{I}$, gdje je je R konstanta zvana otpor između ploha, U razlika potencijala između dviju ploha konstantnog potencijala a U jakost struje. Različite stijene imaju različite otpornosti, pa tako najmanju otpornost imaju gline a najveću metamorfne i magmatske stijene. Ista stijena neke X otpornosti također može imati različite otpornosti u vrlo širokima rasponima, a razlog tomu je količina vode koju stijena sadrži te mineralizacija i temperatura. Ako je podzemlje električki homogeno, tada ćemo mjerenjem dobiti stvarnu otpornost, a ako nije, dobivamo prividnu otpornost. Prividna otpornost ovisi o otpornostima pojedinih stijena te je to zapravo prosječna vrijednost otpornosti zahvaćene mase.

Geoelektrične metode mogu se podijeliti na metode koje opažaju već postojeća, prirodna električna polja,te metode koje opažaju umjetna, izazvana električna polja. Metode prirodnog potencijala ubrajaju se u metode koje opažaju postojeća električna polja. Metoda prirodnog potencijala zasniva se na mjerenjima prirodnog napona na površini. Metode otpornosti temelje se na određivanju raspodjele električnih otpornosti

stijena iz mjerenja na površini. Mjerenja se najčešće izvode četveroelektrodnim rasporedom, što znači da se na jednom paru elektroda mjeri jakost struje koja se uvodi u zemlju, a na drugom paru napon na površini. Ako je razmak elektroda manji, struja prodire pliće te će i prividna otpornost biti bliža otpornosti naslaga blizu površine. Pri većem razmaku elektroda, struja prodire dublje i prividna otpornost bliža je stijenama na većoj dubini. Povećanjem razmaka elektroda, zahvaća se sve veća masa stijena na sve većoj dubini, dok središte sustava ostaje isto. Takva metoda, u kojoj se istražuju vertikalne promjene otpornosti, naziva se električno sondiranje. Ako se razmak elektroda drži konstantnim, a raspored pomiče duž nekog pravca, dubinski zahvat ostaje isti, ali se mijenja središte sustava i točka mjerenja. Ovakva mjerenja nazivaju se električnim profiliranjem i njime se istražuju uzdužne otpornosti.

Postoji niz različitih rasporeda elektroda od kojih najčešće koristimo Schlumergerov, Wennerov, dipolni, dvoelektrodni, troelektordni i gradijentni. Schlumbergerov raspored najčešće se koristi za električno sondiranje. Osnovna vrlina mu je vrlo mali razmak potencijalnih elektroda MN u odnosu na razmak strujnih elektroda AB (Slika 7).

Od metoda otpornosti koje pružaju umjetna električna polja razlikuju se: električno profiliranje, električno sondiranje i električnu tomografiju.



Slika 7. Schlumbergerov raspored elektroda (prema Šumanovac, 2012)

Električno sondiranje je geoelektrična metoda kod koje se uzastopnim razmicanjem elektroda zahvaća sve veća masa stijena i time se prodire u veće dubine. U električnom sondiranju mjerenja se izvode na standardnim udaljenostima strujnih elektroda, a mjereni podaci se unose u dvostruko logaritamsko mjerilo, zbog smanjivanja rezolucije

s dubinom i velikih raspona otpornosti stijena (Šumanovac, 2012). Na temelju točkastih podataka crta se graf električnog sondiranja kojeg moramo interpretirati kako bismo dobili otpornost i debljine slojeva. Kako podzemlje može biti homogeno, dvoslojno, troslojno i dr., tako i za svaki tip ćemo dobiti različit graf.

Električno profiliranje je geoelektrična metoda kod koje se duž određenih pravaca istražuju uzdužne promjene otpornosti, uvijek istim dubinskim zahvatom. Koriste se elektrodni rasporedi kao i kod električnog sondiranja, a primjena određenog rasporeda ovisi o zadatku. Električni rasporedi u svrhu električnog profiliranja mogu se podijeliti u dvije grupe:

- simetrični rasporedi – Schlumbergerov, Wennerov i dipolni
- asimetrični rasporedi – dvoelektrodni, troelektrodni i gradijentni.

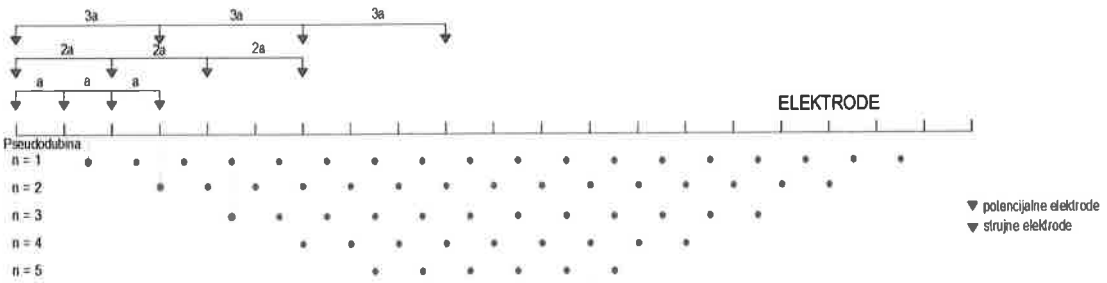
Prilikom mjerenja pomoću simetričnih rasporeda potrebno je pomicati sve četiri elektrode, što uzrokuje jače lomove krivulja. Svakim prelaskom elektroda preko strmih kontakata i površinskih nehomogenosti, na krivulji se prikazuje kao lom. Na površinske nehomogenosti posebno je osjetljiv Schlubergerov raspored (Šumanovac, 2012). Kod asimetričnih rasporeda neke elektrode su stalno uzemljene, a neke se pomiču. U odnosu na simetrični raspored, potrebno je premještati manji broj elektroda, što može biti iznimno važno na terenima sa velikim otporima uzemljenja i promjenjivim prirodnim strujama, kao što su krški tereni. Profiliranje se najčešće izvodi s dvama ili više različitih dubinskih zahvata. Različiti geološki odnosi stijena mogu dati slične prividne otpornosti pa mjerenje s drugom dubinskim zahvatom može pomoći u interpretaciji. Posebna vrsta profiliranja je kružno profiliranje. Točka mjerenja i raspored elektroda ostaju nepromijenjeni, a mijenja se samo usmjerenje elektrodnog rasporeda. Ovi postupkom određuju se pravac raspucanosti, okršavanja ili škriljavosti.

U električnim mjerenjima, kako bi se mogla provesti mjerenja metodama otpornosti, koristi se slijedeća oprema (Šumanovac, 2012):

- instrumenti za mjerenje – precizni miliampermetar i milivoltmetar
- izvori struje – baterije, akumulatori ili agregati
- kolutovi s kabelima
- potencijalne i strujne elektrode
- čekić, uređaji za vezu i ostala pomoćna oprema.

3.1.1. Električna tomografija otpornosti

Električna tomografija otpornosti (engl. Electric Resistivity Tomography, ERT) jedna je od metoda koja se u posljednjim desetljećima naglo razvila. Metoda se koristi za kontinuirano istraživanje podzemlja u dvodimenzionalnom (2D), i u trodimenzionalnom (3D) prostoru. 2D-električna tomografija se standardno primjenjuje u hidrogeološkim, geotehničkim i drugim plitkim istraživanjima, te je tako korištena i u ovome istraživanju. Osnovne prednosti metode su mogućnost kartiranja područja sa složenim geološkim odnosima, te dobri rezultati u istraživanjima krških terena. Mjerenja se uglavnom sastoje od niza električnih profiliranja izvedenih za različite dubinske zahvate. Elektrode su uzemljene duž nekog profila, te su spojene odgovarajućim kabelima i prijelaznim uređajima na instrument za mjerenje otpornosti. Danas postoje mnogobrojni višeelektrodni sustavi. Svi ti sustavi se temelje na sličnim geometrijama snimanja. Geometrija sustava mjerenja definirana je jediničnim razmakom elektroda i brojem dubinskih zahvata. Time se određuje vertikalna i horizontalna rezolucija, a ona ovisi o geološkom modelu i ciljnoj dubini istraživanja. U snimanjima najčešći elektrodni rasporedi koji se koriste su: Wennerov, kombinirani Wenner-Schlumbergerov, dipolni i dvoelektrodni raspored. Primjer geometrije snimanja Wennerovim rasporedom prikazan je na slici 8, s vidljivim istim razmakom između svih elektroda, a sastoji se od 21 elektrode. Najplići dubinski zahvat definiran je jediničnim razmakom elektroda *a*. Za prvi dubinski zahvat (n=1), razmak elektroda je *a* te se elektrodni raspored pomiče za udaljenost *a* duž profila. Kod drugog dubinskog zahvata (n=2), udaljenost između elektroda je *2a*, ali pomicanje duž profila iznosi *a*. Daljnji dubinski zahvati postižu se na opisani način, sve dok se ne postigne konačan dubinski zahvat.

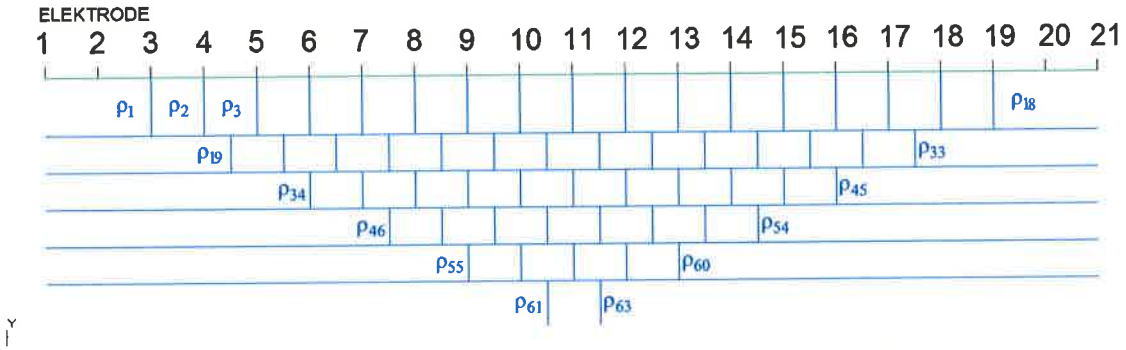


Slika 8. Geometrija mjerenja 2D električnom tomografijom uporabom Wennerova rasporeda elektroda s jednako udaljenim elektrodama, za slučaj s 21 elektrodom i 5 dubinskih zahvata (prema Šumanovac, 2007)

Mjerenjem prividnih otpornosti, podaci se prikazuju u obliku „pseudosekcije", koja istraživaču daje pogled na raspodjelu otpornosti u podzemlju (Šumanovac, 2007). Mjerene prividne otpornosti najviše se poklapaju sa stvarnim otpornostima kod dipolnog i Wennerova rasporeda elektroda. Različitim elektrodnim rasporedima dobivaju se različite pseudosekcije. To je posljedica utjecaja samog elektrodnog rasporeda na mjerene vrijednosti, što znači da će se za isti model tla različitim elektrodnim rasporedima dobiti različite pseudosekcije. Kako bi se dobila preciznija slika raspodjele otpornosti, čini se postupak inverzije na mjerenim podacima. Razlikuju se osnovna pristupa: jednodimenzionalna inverzija i dvodimenzionalna ili trodimenzionalna inverzija. Jednodimenzionalna inverzija temelji se na automatskoj interpretaciji krivulja električnog sondiranja. Prilikom interpretacije pretpostavlja se da je broj slojeva jednak broju mjerenih podataka u krivulji električnog sondiranja, a interpretacija se izvodi automatskim iterativnim postupkom. Nakon automatske interpretacije svake krivulje, podaci se povezuju te se dobiva kvazi-dvodimenzionalni model. Ova tehnika je korisna u uslojenom tlu čije granice su približno usporedne s površinom terena. U složenim geološkim odnosima ova tehnika koristi se za dobivanje opće slike o odnosima otpornosti u podzemlju. Drugi pristup koristi dvodimenzionalnu inverziju mjerenih podataka. Najširu primjenu ima metoda najmanjih kvadrata, koja je vrlo korisna u složenim geološkim modelima. Inverzija se provodi i metodom modeliranja, kod koje se za model izračunaju prividne otpornosti, te se uspoređuju sa mjerenim prividnim otpornostima. Razlike računatih i mjerenih otpornosti ne smiju biti veće od zadanih kriterija (RMS-greške, korijen srednjeg kvadrata odstupanja). Ako su

greške veće od zadanih kriterija, inicijalni model se mijenja i ponovo se računaju prividne otpornosti te uspoređuju s mjerenim prividnim otpornostima. Ovaj postupak ponavlja se dok se ne dobije zadovoljavajuće slaganje izračunatih i mjerenih prividnih otpornosti. Model otpornosti koji koristimo prilikom inverzije, podijeljen je na dvodimenzionalne pravokutne blokove konstantnih otpornosti (Slika 9). Broj blokova odgovara broju mjerenih podataka u pseudosekciji, te su raspoređeni na sličan način. Mogu se izdvojiti tri varijacije metode najmanjih kvadrata koje se najčešće koriste:

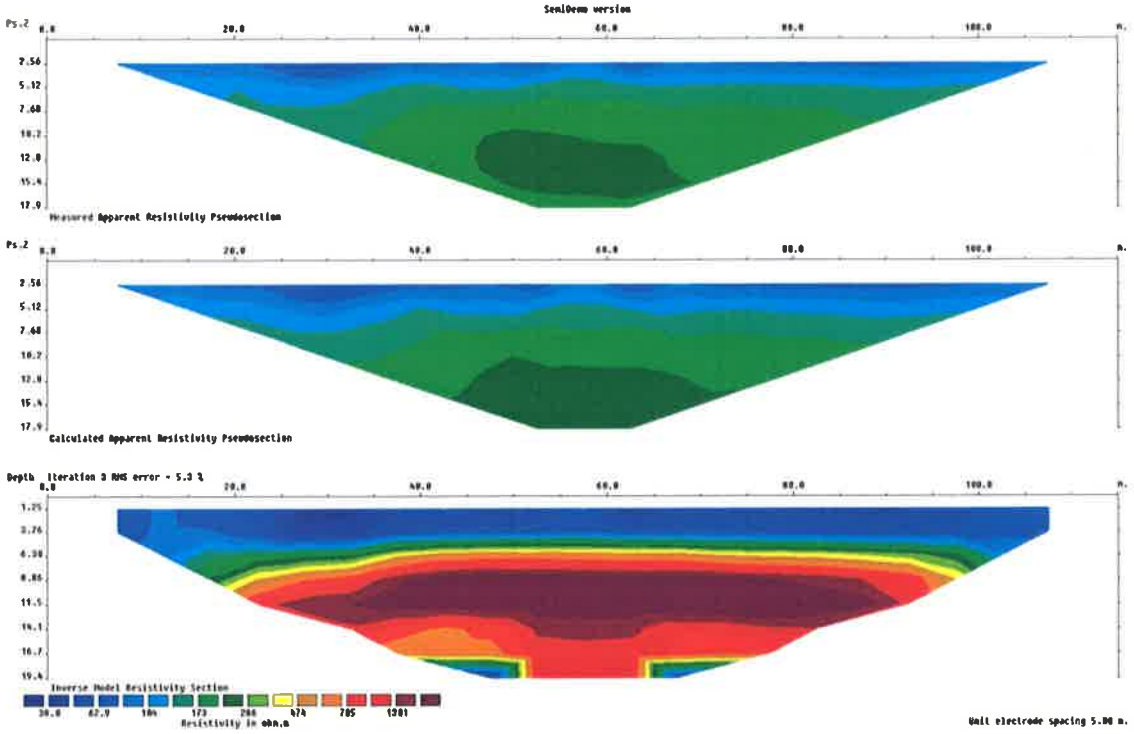
- Gauss-Newtonova metoda
- kvazi-Newtonova metoda
- kombinirana Gauss-Newtonova i kvazi-Newtonova metoda.



Slika 9. Raspored blokova za računanje 2D-modela (prema Šumanovac, 2007)

Postupak inverzije može se podijeliti u tri koraka. Prvi korak sadrži računanje prividnih otpornosti za zadani model, u kojem se koriste metode konačnih razlika ili metoda konačnih elemenata. Drugi korak je računanje Jacobijeve matrice parcijalnih derivacija. Pri izračunu Jacobijeve matrice, moraju se izračunati parcijalne derivacije za svaki blok 2D-modela za sve moguće kombinacije elektroda. Treći korak je rješavanje sustava linearnih jednadžbi nekom od gore nabrojenih numeričkih metoda. Kako su računanja zahtijevala puno vremena i u nekim slučajevima snažna računala, uvedena je brza inverzija metodom najmanjih kvadrata. U brzoj metodi najmanjih kvarata uvode se pojednostavnjenja u rješavanju Jacobijeve matrice parcijalnih derivacija. Vrijednosti parcijalnih derivacija za pravokutni blok ovise o odnosu x i z vrijednosti vrhova bloka te o razmaku elektroda. Ako se uzme konstantan razmak elektroda te isti raspored blokova u inverznom modelu, odnos ostaje isti s obzirom na korišteni razmak elektroda.

Zbog toga je vrijednosti parcijalnih derivacija potrebno računati samo jednom, a podaci se pohranjuju na disk te se nakon toga mogu samo pročitati njihove vrijednosti čime se uvelike smanjuje vrijeme računanja. Metoda nije osjetljiva na šumove, te daje inverzni model koji se može smatrati ulaznim modelom, koji se dalje poboljšava standardni iterativnim metodama. Postupak inverzije ove metode se također može podijeliti u tri koraka. Primjer pseudosekcija i interpretiranog profila dobivenog 2D električnom tomografijom prikazan je na slici 10.



Slika 10. Gornje dvije slike prikazuju pseudosekcije (izmjerenu i proračunatu), a najdonja model otpornosti tla (do dubine cca 4-5 m prevladavaju glinovito-prašinasti materijali, a dublje su šljunkovito-pjeskoviti materijali)

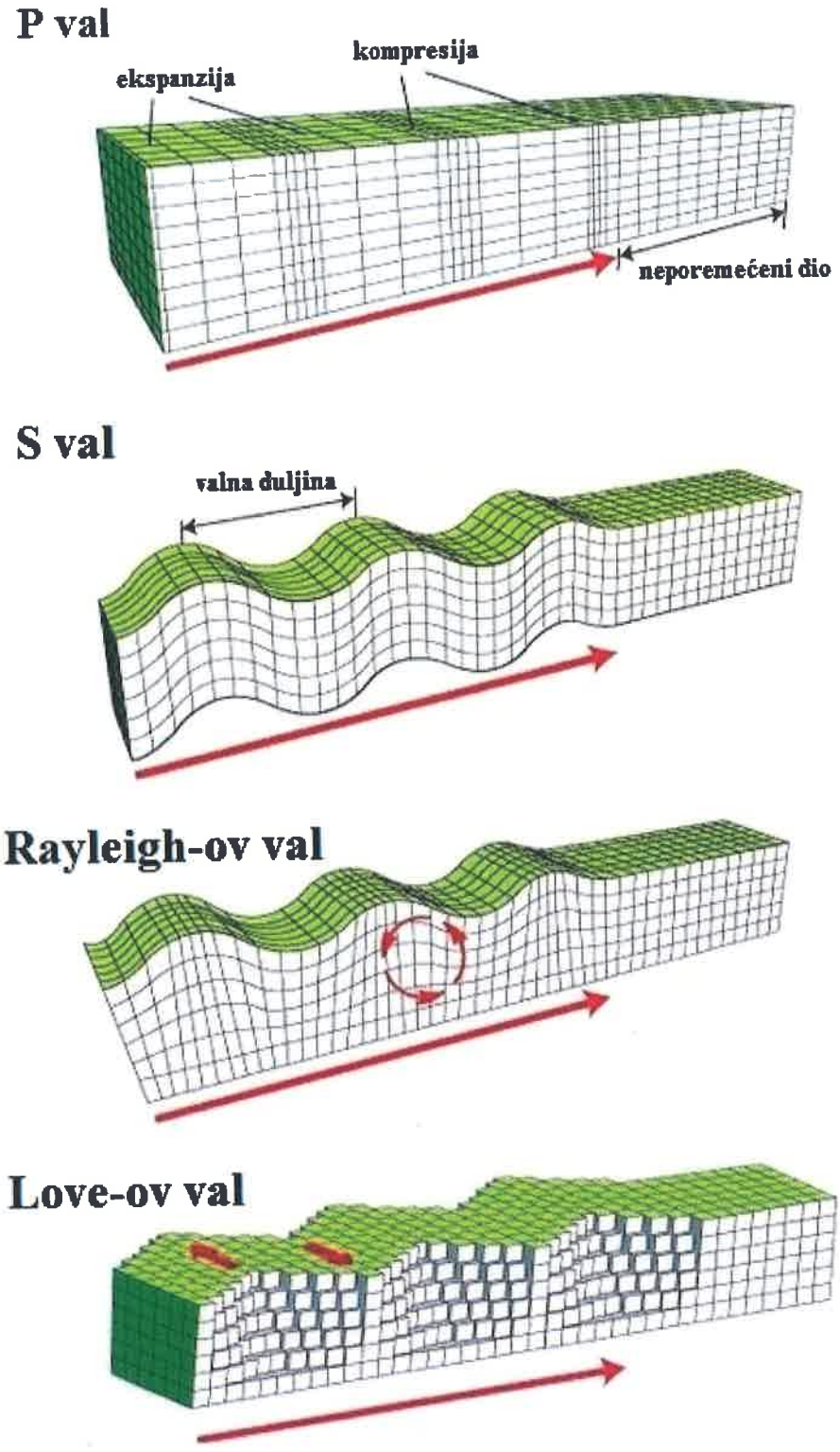
U istraživanjima geoloških modela električna tomografija je posebno učinkovita u određivanju granica karbonatnih i klastičnih naslaga, određivanju granica razmjerno kompaktnih magmatskih stijena i klastičnih naslaga i u određivanju rasjednih i pukotinskih zona, te stupnja razlomljenosti u čvrstim stijenama. Zbog velikih razlika u otpornostima kojima se odlikuju karbonati-klastiti ili graniti-klastiti, dobivaju se vrlo oštre granice na dodirima tih stijena (Šumanovac, 2007).

3.2. Seizmička istraživanja

Seizmička istraživanja su istraživanja koja se temelje na izazivanju elastičnih titraja blizu površine, koji se rasprostiru kroz stijene i stižu do točaka na površini, gdje se njihov nailazak bilježi seizmometrima ili geofonima. Elastična svojstva opisana su elastičnim konstantama, koje određuju odnos naprezanja i deformacija kao promjene oblika i dimenzija tijela. Naprezanje je definirano kao sila po jedinici površina, te može djelovati okomito na površinu i tangencijalno na površinu. Najčešće korištene elastične konstante su volumni modul, modul smicanja, Youngov modul i Poissonov koeficijent. Pri seizmičkim mjerenjima do deformacija koja prelaze elastičnu granicu, dolazi samo u blizini točke izvora vala. Na razmjernoj udaljenosti od izvora, ulazi se u elastične granice tako da u okviru seizmičkih istraživanja vrijedi Hookeov zakon. Uz Hookeov zakon, u seizmičkim istraživanjima vrlo je važan i Huygnesov princip, koji kaže da svaka točka na fronti vala postaje izvor novog vala (Šumanovac, 2012). Seizmička istraživanja mogu se podijeliti na refrakcijsku seizmiku i refleksijsku seizmiku.

U seizmičkim istraživanjima da bi se mjerila elastična svojstva stijena, izazivaju se valovi, najčešće eksplozijama i udarcima, čiji izvor nazivamo točka paljenja. Valovi se mogu definirati kao poremećaji koji putuju kroz medij i prenose energiju tog poremećaja. Vrste valova koji se razlikuju su (Slika 11):

- uzdužni val (P-val)
- poprečni val (S-val)
- Loveov val (L-val)
- Rayleighov (Rajlijev) val (R-val)



Slika 11. Vrste valova

Uzdužni valovi (P) uzrokuju promjenu volumena medija. Imaju najveću brzinu širenja i značajni su za seizmička istraživanja.

Poprečni valovi (S) mijenjaju oblik strukture medija kroz koji se šire djelujući okomito na pravac rasprostiranja vala.

Loveovi valovi (L) javljaju se pri površini ispitivanja kao transverzalni valovi. Javljaju se kada medij manje brzine prekriva medij u kojem elastični valovi imaju veće brzine.

Rayleigh-ovi (R) valovi su valovi koji se kreću površinom zemlje. Sastoje se od longitudinalnog i transverzalnog kretanja. Tijekom prolaska vala, čestica prelazi eliptičku putanju kojoj je velika poluos vertikalna. Često se nazivaju i valjanje tla (ground roll) radi geometrije njihova kretanja.

Metode refleksijske seizmike snimaju seizmičke valove reflektirane od slojnih granica nakon njihovog povratka iz podzemlja. Svojstva tih valova izmijenjena su zbog utjecaja elastičnih svojstava stijena, te analiza nastalih promjena omogućuje određivanje strukturno-tektonskih odnosa, poroznosti, propusnosti, kompakciji stijena te sadržaju i vrsti fluida u njima. Mjerenja se najčešće izvode duž profila na kojima se postavljaju geofoni i izvori valova, a njihovim pomicanjem pokriva se cijeli profil. Geofonski rasporedi dijele se na simetrične i asimetrične.

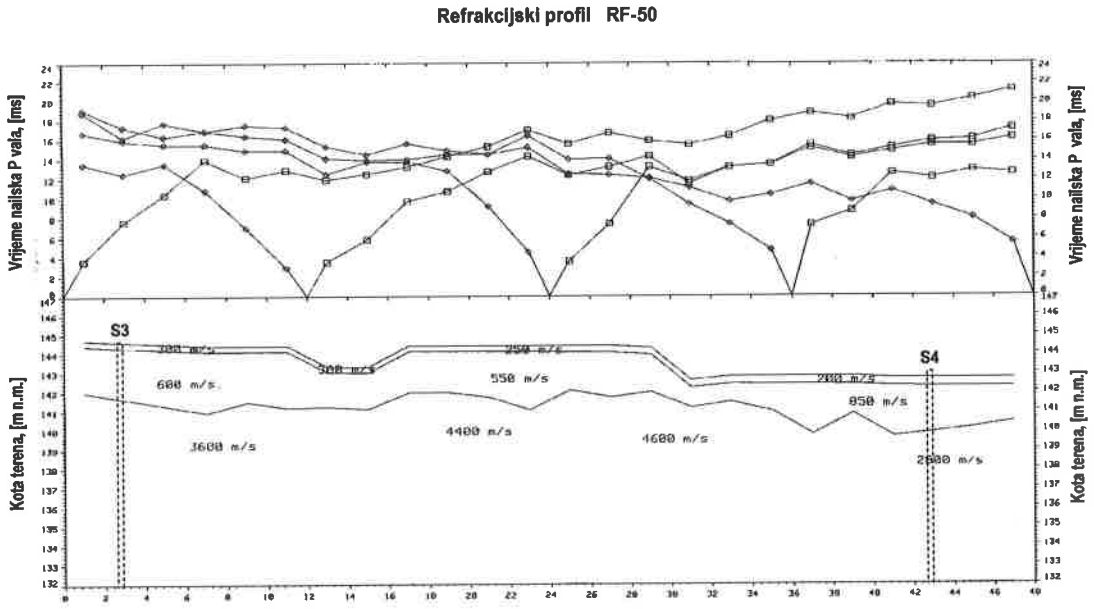
Interpretaciju seizmičkih podataka moguće je razdvojiti na tri faze. Prva se od njih odnosi na označavanje i kartiranje strukturnih oblika pojedinih seizmičkih obzora, pretvorbu dvostrukih seizmičkih vremena u dubine na temelju analize brzina izmjerenih u dubokim bušotinama ili izravno određenih na temelju analize snimljenih seizmičkih podataka, te izradu dubinskogeoloških karata. U drugoj fazi, na temelju analize svojstava snimljenih seizmičkih nailazaka, izdvajaju se podatci o stratigrafskim odnosima, izrađuje taložni model i prognozira litološki sastav radi otkrića novih i točnijeg lociranja. Predmet treće faze interpretacije je određivanje akustičkih i elastičnih parametara slojeva putem statističke analize svojstava seizmičkih valova te litološkog sastava i petrofizikalnih svojstava istraživanog podzemlja (Šumanovac, 2012).

Metode refrakcijske seizmike temelje se na snimanju prvih nailazaka seizmičke energije radi određivanja dubine istraživane podzemne slojne granice i brzine širenja prvih nailazaka seizmičkih valova. Refrakcijska mjerenja primjenjuju se kod istraživanja lokacija na kojima brzina P-valova raste sa dubinom, a takve lokacije su obično građene od stijenskog materijala.

Refrakcijska mjerenja najčešće se izvode duž profila sa različitim rasporedom geofona. Kako bi se pokrio cijeli profil, grupe geofona se pomiču duž zadanog profila. Snimanja se najčešće sastoje od pet točaka izvora valova za svaki geofonski raspored. Nakon očitanja prvih nailazaka, konstruira se graf vrijeme nailaska-udaljenost *(t-x)*, povlače se pravci koji najbolje zadovoljavaju točkaste vrijednosti te se tako konstruiran graf koristi za interpretaciju podataka mjerenja.

Interpretacija dobivenih podataka može se izvoditi različitim metodama. Najjednostavnije metode polaze od pretpostavke o vodoravno uslojenom podzemlju ili ravnim nagnutim granicama. U slučaju usporednih granica seizmičkih brzina u podzemlju, paljenje se može izvoditi samo s jedne strane rasporeda geofona. Kod nagnutih i nepravilnih granica, paljenje je potrebno izvesti s obje strane rasporeda geofona i izvesti povratno pokrivanje granice (Šumanovac, 2012). Prilikom interpretacije određuju se dubine geoloških granica i seizmičke brzine u stijenama, na temelju kojih se dobivaju informacije o geološkoj građi. U interpretaciji moguće je koristiti niz različitih metoda, a jedna od najčešće korištenih metoda interpretacije u novije vrijeme je GRM-metoda (engl. Generalised Reciprocal Method).

GRM-metoda je postupak obrade i interpretacije dobivenih podataka mjerenjem uzduž profila paljenjem s obiju strana geofonskog rasporeda. Ovom metodom određuju se dubine do nepravilne plohe refraktora ispod svakog geofona, brzine u pojedinom refraktoru i uzdužne promjene brzina unutar refraktora. Jedan od osnovnih preduvjeta za uspješnu primjenu metode je razmjerno mali razmak između geofona te veći broj točaka paljenja. Time se dobiva više podataka u odnosu na neke druge metode ali se i mjerenje poskupljuje. Iako se mjerenje poskupljuje, primjena ove metode je uvelike isplativa jer se dobivaju precizniji podaci za razliku od nekih drugih metoda. Slika 12 prikazuje primjer mjerenja i interpretaciju refrakcijskog profila snimljenog na temeljnoj stijeni strojarnice HE Tihaljina.

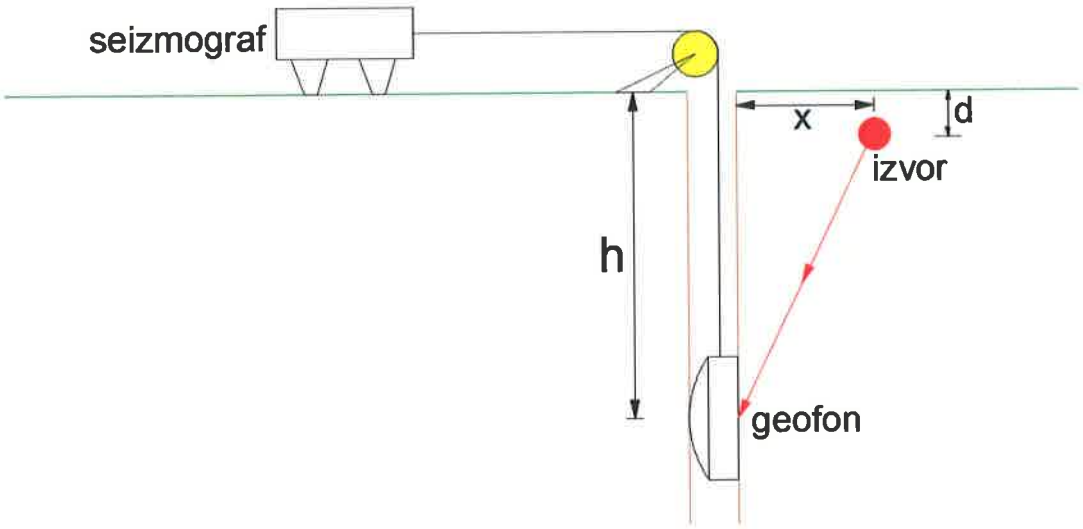


Slika 12. Mjerenje i interpretacija refrakcijskog profila RF-50 (Gazdek, 2003)

3.2.1. Seizmičko ispitivanje niz bušotinu ili Down-hole

Posebna vrsta refrakcijske seizmike su mjerenja brzina seizmičkih valova niz bušotinu. Metode su slične metodama mjerenja brzina seizmičkih valova paljenjem kraj bušotine. Mjerenje duž bušotine može se izvoditi kao mjerenje brzine P i S valova (dijeli se na Down-hole, Up-hole i Cross-hole metodu), mjerenja brzine P i S-valova u suspenziji, te zvučna karotaža (visoko-frekventna metoda za puno detaljniji prikaz profila brzina P-valova). U metodi niz bušotinu (Down-hole), impulsni izvor generira poremećaj s površine na određenoj udaljenosti od ušća bušotine, u kojoj je smješten jedan ili niz više geofona (Slika 13). Metoda uz bušotinu (Up-hole) predstavlja inverziju Down-hole metode, jer je izvor seizmičkog vala smješten u bušotini, a na površini je najčešće postavljen niz geofona. Za primjenu Cross-hole metode neophodne su najmanje dvije bušotine, pri čemu je u jednoj smješten izvor impulsa, a u drugoj su postavljeni geofoni. Mjerenje P i S valova u bušotini ispunjenoj suspenzijom se primjenjuje pomoću izvora seizmičkog vala i dva geofona koji su integrirani na cijevni nosač koji se spušta u bušotinu ispunjenu suspenzijom (Jug, 2016). Oprema za izvođenje Down-hole metode sastoji se od izvora seizmičkih valova koji se smješta na površini terena (najčešće čekić), prijemnika (geofona) koji se smještaju u bušotinu, upravljačke jedinice sa mogućnošću

pohrane podataka, te spojnih kablova. Da bi se prilikom mjerenja dobili jasni prvi nailasci, važno je da su geofoni čvrsto vezani za zidove bušotine. Pričvršćivanje geofona izvodi se pomoću odgovarajućih opruga ili napuhavanjem balona. U situacijama kada geofon nije pričvršćen uza zid bušotine, mogu se propustiti prvi, te dohvatiti tek kasniji nailasci valova čime se bilježe pogrešni podaci (Šumanovac, 2007).



Slika 13. Mjerenje seizmičkih brzina u bušotini (prema Šumanovac, 2012)

3.2.2. Višekanalna analiza površinskih valova (MASW)

U zadnja tri desetljeća intenzivno se razvila nova geofizička seizmička metoda imena višekanalna analiza površinskih valova (engl. Multi-Channel Analysis of Surface Waves, MASW) koja pri utvrđivanju raspodjele brzine posmičnih valova ima mnogo prednosti s obzirom na ustaljenu metodu refrakcijske seizmike ili mjerenjem u bušotinama (Park et al., 1999). Ova metoda je uvedena u geofizička istraživanja u kasnim devedesetim godinama prošlog stoljeća (Park et al., 1999) i od tada je postala predmet istraživanja mnogih geofizičara i drugih znanstvenika, te je našla primjenu u mnogim granama znanosti. Upotreba rezultata višekanalne analize može se i iskoristiti u području seizmologije. Seizmička mikrorajonizacija je područje u kojemu se najviše koriste brzine posmičnih valova do nekoliko desetina metara dubine. U Europi je, u seizmičkoj mikro rajonizaciji, prihvaćen europski standard za klasifikaciju tla Eurokod

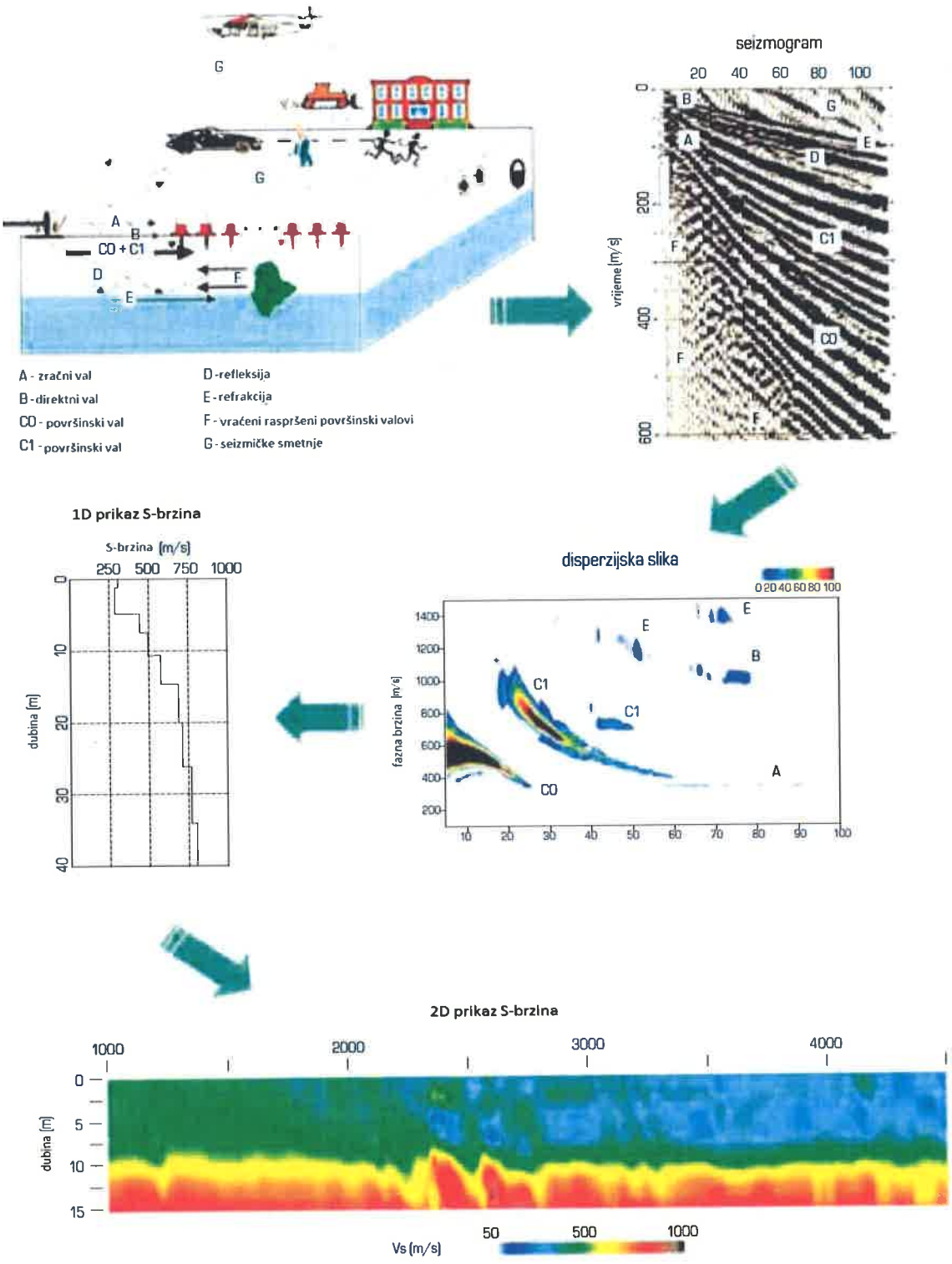
8 (EC8) – projektiranje konstrukcija otpornih na potres (CEN, 2004.). Prema njemu se tla klasificiraju u sedam tipova koji su opisani stratigrafskim profilom i sa tri parametra: srednjom brzinom posmičnih valova na gornjih 30 metara tla ($V_{s,30}$), brojem udaraca standardnog penetracijskog pokusa (N_{SPT}) i nedreniranom posmičnom čvrstoćom (c_u). Brzina posmičnih valova ($V_{s,30}$) je najvažniji parametar. Upotreba standarda Eurokoda 8 u početku je bila ograničena nedostatkom geofizičkih podataka o brzini posmičnih valova.

Rezultati MASW-a omogućuju procjenu krutosti tla, a ista je direktno povezana s posmičnim modulom, koji je jedan od najvažnijih inženjerskih parametara.Može se koristiti u jednoj dimenziji (1D), dvije dimenzije (2D) i tri dimenzije (3D), ovisno o geotehničkom problemu. Višekanalnom analizom opažaju se površinski R-valovi te se na temelju toga određuje brzina posmičnih valova (V_S) (www.masw.com, 2019).

Bitno svojstvo koje imaju površinski valovi naziva se disperzija. Disperzija znači da valovi različite valne duljine imaju različitu dubinu prodiranja i prema tome različitu brzinu širenja (www.masw.com , 2019). Brzina pri pojedinoj frekvenciji se naziva fazna brzina. Valovi velike valne duljine (male frekvencije) se šire brže a valovi male valne duljine (velike frekvencije) se šire sporije. Brzina Rayleigh-evih valova najviše ovisi o brzini posmičnih valovaa a malo je manja od brzine posmičnih valova. Njihov odnos ovisi o Poissonovom koeficijentu (v). Npr. kada je v = 0.25 tada je brzina R-valova 92% brzine S-valova. Za cijeli raspon Poissonovog koeficijenta, odnos posmičnih i Rayleigh-evih valova se mijenja od 0.88 do 0.95.

Proces generiranja profila brzina posmičnih valova (V_s) se sastoji do tri glavna koraka (Slika 14) :

- Prikupljanje podataka površinskih valova na terenu.
- Obrada podataka da se dobije disperzijska krivulja (dijagram odnosa frekvencije i fazne brzine).
- Inverzija ili izračun brzine širenja posmičnih valova iz Rayleigh-ovih valova.



Slika 14. Ilustracija cjelokupnog postupka i glavne prednosti MASW metode. Složena priroda seizmičkih valova prenosi se u mjerenje (višekanalni zapis). Zatim se disperzivna priroda različitih vrsta valova precizno oslikava kroz transformaciju 2D valnog polja. Tijekom transformacije određena valna polja (šumovi, smetnje, buka) se automatski filtriraju. Zatim se vrši inverzija dobivenih disperzijskih krivulja, što rezultira 1D V_S profilima. Na temelju većeg broja 1D profila, može se pripremiti 2D V_S prikaz (Prema Park et al, 2007)

Metode višekanalne analize površinskih valova (MASW) dijele se na aktivnu i pasivnu. Razlika ove dvije metode je prikupljanje podataka na terenu. Prva od razvijenih metoda je bila aktivna metoda. Kod aktivne metode kao izvor seizmičkog vala koristi se neki izvor (www.masw.com, 2019). Maksimalna dubina istraživanja ovisi o vrsti izvora seizmičkog vala, te se kreće u rasponu od 10–30 m. Pasivnom metodom valovi se dobe djelovanjem valova ili prometa u blizini područja istraživanja (www.masw.com, 2019).

Nakon prikupljanja podataka radi se disperzijska analiza u kojoj se najčešće koristi metoda inverzije koja se bazira na osnovnome modu (M0). Tom metodom inverzije dobije se disperzijska krivulja kao odnos frekvencija i faznih brzina i disperzijska krivulja M0, čiji se podaci koriste kasnije u inverziji. Ključni dio obrade podataka sa terena je čim točnije određivanje disperzijske krivulje M0. Glavni princip u obradi podataka površinskih valova metodom inverzije koja se bazira na M0 je da se traži teorijska krivulja M0, a sa time i struktura brzina posmičnih valova u tlu, koja najbolje odgovara konstruiranoj (eksperimentalnoj ili izmjerenoj) krivulji M0. Teorijske krivulje osnovnog moda mogu se izračunati za različite modele tla sa nekom od metoda modeliranja (www.masw.com, 2019). Ova metoda je najčešće korištena metoda inverzije u MASW metodi, ali se koriste i druge metode koje istražuju i koriste druge vrste podataka, a one su:

- multimodalna inverzija
- inverzija dispezijske slike
- inverzija neobrađenih podataka
- 2D V_s inverzija.

Dobivenim rezultatima višekanalne analize površinskih valova određuju se konstante elastičnosti stijene te se klasificira istraživano tlo prema Eurokodu 8. . Upotreba standarda Eurokoda 8 u početku je bila ograničena nedostatkom geofizičkih podataka o brzini posmičnih valova, no posljednjih godina sve je više u upotrebi. Eurokod 8 razlikuje 7 tipova tla: A, B, C, D, E, S_1 i S_2 (Tablica 4), a prema EC8 tipovi tla opisani su stratigrafskim profilom i tri parametra.

Tablica 4. Klasifikacija tla po Eurokodu 8 (prema CEN, 2004)

Tip tla	**Opis stratigrafskog profila**	**$V_{s,30}$ [m/s]**	**N_{spt} [udarci/30 cm]**	**c_u [kPa]**
A	Stijena ili njoj slične geološke formacije, uključujući najviše 5 m slabijeg materijala na površini	>800	-	-
B	Slojevi vrlo zbijenog pijeska, šljunka ili vrlo čvrste gline, debljine najmanje nekoliko desetina metara, karakterizirani stupnjevitim povećanjem mehaničkih svojstava sa dubinom	360–800	> 50	>250
C	Slojevi zbijenog ili srednje zbijenog pijeska, šljunka ili čvrste gline, debljine od nekoliko desetina do više stotina metara	180–360	15–50	70-250
D	Rastresiti do srednje zbijeni nevezani sedimenti (sa ili bez mekanih kohezivnih slojeva) ili predominantno mekano do čvrsto kohezivno tlo	<180	<15	<70
E	Tlo se na površini sastoji od aluvijalnih nanosa sa vrijednosti $v_{s,30}$ prema tipu C ili D i debljinom između 5 i 20 m, ispod kojeg je kruć materijal sa $v_{s,30}$ > 800 m/s			
S_1	Tlo sadrži najmanje 10 m debeo sloj mekane gline sa visokim plastičnim indeksom (PI>40) i viskom sadržajem vode	<100 (indikativni pokazatelj)	-	10-20
S_2	Tlo podložno likvefakciji sa osjetljivim glinama ili bilo koji drugi profil tla koji nije uključen u kategorije A-E ili S_1			

Kao najpouzdaniji referentni podatak za određivanje kategorije tla prema seizmičnosti iz tablice 3 smatra se podatak o brzini posmičnih valova na gornjih 30 metara tla ($V_{s,30}$), a ukoliko on nije dostupan uzima se podatak dinamičkog sondiranja $N_{SPT(30)}$. Tek u nedostatku prethodna dva kriterija može se odrediti kategorija prema rezultatu nedrenirane posmične čvrstoće tla c_u. $V_{s,30}$ računa se pomoću izraza 2, u kojem je h_i debljina i-toga sloja i v_i brzina i-toga od N slojeva koji se nalaze u gornjih 30 metara.

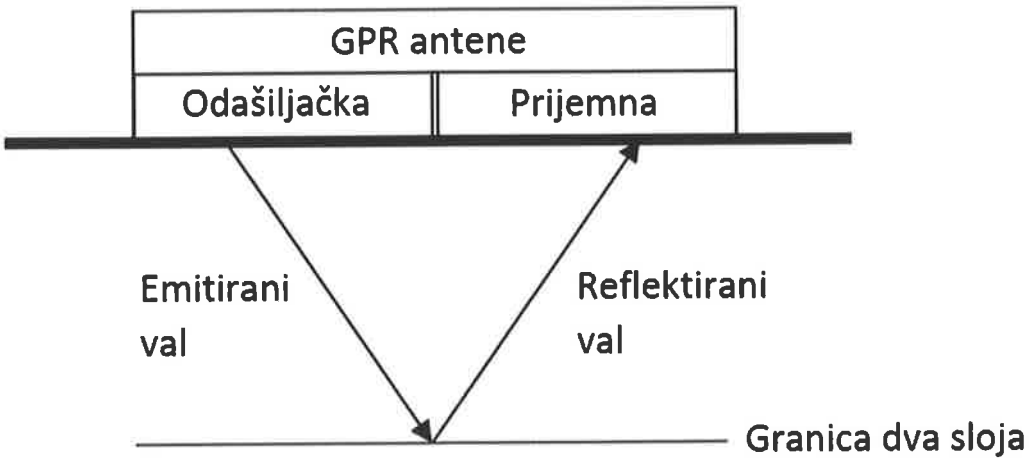
$$V_{s,30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_i}} \qquad (2)$$

3.3. Elektromagnetne metode

Elektromagnetne metode su metode koje se najčešće koriste u istraživanjima podzemnih voda i drugim plitkim istraživanjima. Neke od metoda koje se najčešće koriste su metoda s pomičnim odašiljačem, VLF-metoda, magnetnotelurska metoda i georadar. Metoda s pomičnim odašiljačem je metoda koja se primjenjuje za istraživanja dobrih vodiča na vrlo malim dubinama. Mjere se realne i imaginarne komponente elektromagnetnog polja. VLF-metoda koristi se magnetnom komponentom elektromagnetnog polja izazvanog vojnim radio odašiljačima velike snage, namijenjenih vezama na velikim udaljenostima. VLF-metoda se koristi niskim frekvencijama radio valova. VLF-metoda je namijenjena za otkrivanje izduženih i strmo nagnutih tijela malih otpornosti. U istraživanjima koristi se antena koja se sastoji od uspravnog kabela dugog nekoliko stotina metara, koja odašilje vodoravno magnetno polje s linijama polja u obliku koncentričnih kružnica. VLF instrumenti mogu mjeriti nagib glavne osi, zakrivljenost elipse polarizacije te vertikalnu i horizontalnu komponentu elektromagnetnog polja. Magnetotelurska metoda (MT-metoda) je metoda koja se najčešće koristi pri dubokim električnim istraživanjima. Vrlo slična je metodi električnog sondiranja, ali jedna od prednosti je postizanje velike dubine prodiranja, bez dugačkih razvlačenja kabela i terenskih poteškoća koje su s tim povezane. MT-metoda se temelji na mjerenju omjera vodoravnih komponenti prirodnog električnog polja i magnetnog polja na površini. U novije vrijeme MT-metoda se primjenjuje i u obliku tomografskih mjerenja, po uzoru na metodu električne tomografije (Šumanovac 2007).

3.3.1. Georadar

Georadar (engl. Ground Penetrating Radar, GPR) je elektromagnetski uređaj s visokom rezolucijom za istraživanje podzemlja. Georadarska mjerenja se svrstavaju u elektromagnetne metode. GPR šalje kratke impulse elektromagnetskih valova u tlo koristeći antene za prijem i odašiljanje. Elektromagnetski valovi se odbijaju od anomalija u tlu i vraćaju se u prijemnu antenu (Slika 15). Promjene u dielektričnim svojstvima reflektiraju relativne promjene u tlu. Elektromagnetska frekvencija i električna vodljivost tla određuju dubinu georadarskih ispitivanja. Prema načinu mjerenja i obradi podataka, georadar je sličan refleksijskoj seizmici. Razlikuju se dvije vrste terenskih mjerenja, to su georadarsko profiliranje i georadarsko sondiranje.



Slika 15. Grafički prikaz površinskog georadarskog istraživanja

Kod metode georadarskog profiliranja, odašiljač i prijamnik se nalaze na istoj međusobnoj udaljenosti, te se pomiču od točke do točke po profilu, a antene su najčešće stavljene na određena kolica radi bržeg i jednostavnijeg mjerenja. (Šumanovac, 2007)

Kod metode georadarskog sondiranja, odašiljač se uvijek nalazi na istom mjestu, a prijemnik se postavlja ne sve veće i veće udaljenosti od odašiljača, čime se dobije snimak kao i kod refleksijske seizmike. (Šumanovac, 2007).

Georadar se koristi za otkrivanje anomalija kod ograničenih dubinskih zahvata i u području vidljive rezolucije. Od svih geofizičkih istraživanja, georadarom se postižu najveće rezolucije. Dubina prodiranja ovisna je o otpornosti stijena i primijenjenoj frekvenciji. U suhim stijenama mogu se postići dubine mjerenja do 60 m, ali u vlažnim stijenama dubina se smanjuje, te se može postići dubina do svega nekoliko metara. Georadar najbolje rezultate daje u primjeni za kartiranje reljefa, otkrivanje pukotinskih i rasjednih zona u karbonatima i granitima, kartiranje pojedinačnih pukotina u krškim terenima, kartiranje razine podzemne vode u pjeskovito-šljunčanim naslagama, otkrivanje podzemnih šupljina, istraživanja u okviru zaštite okoliša, arheološka i forenzička istraživanja, istraživanja građevinskih konstrukcija, određivanje debljine leda, određivanje dubine vode i dr. (Šumanovac, 2007).

Mjerenje georadarskim uređajem omogućava brzi pregled slike podzemlja koji može poslužiti za determiniranje različitih slojeva tla, podzemnih tankova, cijevi, kablova i arheoloških nalazišta.

4. Rezultati istraživanja

4.1. Inženjerskogeološke značajke

U istraživanju temelja kule Minčeta osnovnu značajku stijenske mase bazirana je na mjerenju parametara diskontinuiteta, pa su izdvojena tri osnovna seta diskontinuiteta (Slika 16).

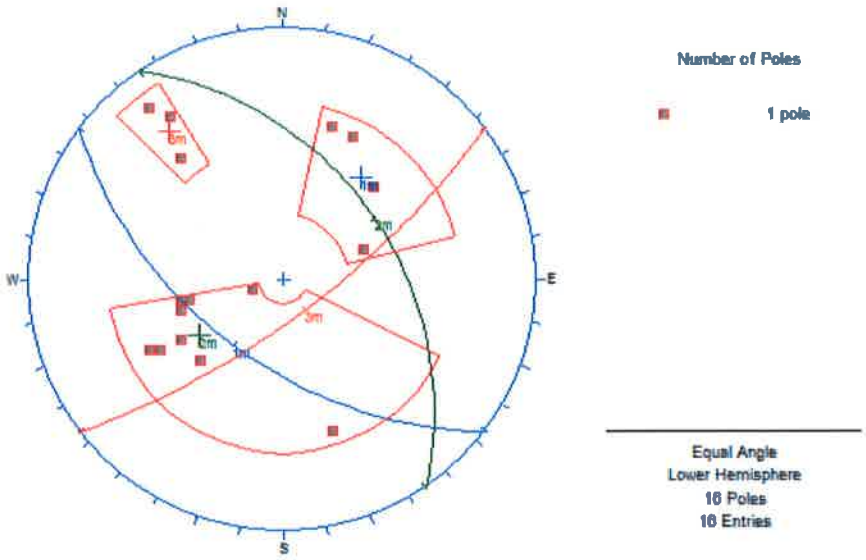
To je napravljeno osnovom podataka inženjerskogeološkog kartiranja, te geofizičkih mjerenja uz same temelje kule Minčeta. Konzultirani su geofizički električni profili ERT-1 i ERT-2, GPR mjerenje i "downhole" na pokosu zida kule. Nadalje, određene su tri zone stijenske mase:

- TROŠNA STIJENA PODLOGE: stijena je malo do srednje trošna (MW – HW), širokog zijeva pukotina, bez ispune, debljina ovih naslaga sukladno je geofizičkom profilu ER-T 1 i ERT-2 debljine je od 0,0 m do 6 m.
- STIJENA PODLOGE: stijena je srednje trošna (MW), zijev pukotina ~ 1-5 mm, glinovita ispuna, sa kalcitom ili bez.Za ovaj strukturno-tektonski blok dane su karakteristične vrijednosti, inženjeskogeoloških elemenata stijenske mase. Njihovo pružanje je nepravilno jer su i sami procesi okršavanja i trošenja u karbonatima vrlo nepravilnog rasprostiranja u vertikalnom i lateralnom smislu.
- RASJEDNA ZONA: stijena je uglavnom jako trošna (HW) više od pola materijala stijene je raspadnuto, zijev pukotina je >5 mm, zaglinjene su ili ispunjene sitnim fragmentima osnovne stijene, te bez ispune, moguće su kaverne. Ova zona lako prihvaća i otpušta vodu.

Temelji tvrđave Minčeta većim dijelom su položeni na stijensku podlogu, dio zida temeljen je u rasjednoj zoni koja se sastoji od manjih i većih dijelova osnovne stijene, prahovitog materijala i veoma malo gline. Podno tvrđave Minčeta iskopom prometnice (Ulica iza Grada) došlo je do relaksacije cijele stijenske mase. Relaksacija se očituje otvaranjem zjapečih pukotina u osnovnoj stijeni te na zidovima tvrđave.

Uočeni rasjed vidljiv je u usjeku ulice. Unutar vapnenjačke serije, rasjed je dijagonalni na smjer ceste-ulice, a dijelom je ispod Minčete. Nestabilnosti u zoni rasjeda sanirane su

kamenom oblogom. Kamena obloga – zid načinjen je tako da je omogućeno dreniranje podzemne vode u zaleđu obloge – zida (na zidu su vidljivi tragovi vode). Površinskih vodnih pojava nema. Ulazni podaci za GSI klasifikaciju stijene podloge, odnosno značajke registriranih diskontinuiteta osnovnog strukturnog sklopa prikazane su tablicom 5 (Strelec et al., 2013).



Slika 16. Kumulativni dijagram trasa ravnina pukotina i rasjeda mjeren u zoni Kule Minčeta jedinice, ***slojni diskontinuiteti*** *- zeleno,* ***osna ravnina*** *– plavo,* ***okomito na os „b“*** *- crveno. (Grabar et al., 2016)*

Tablica 5. Značajke diskontinuiteta osnovnog strukturnog sklopa stijene (Strelec et al., 2013)

<table>
<tr><td colspan="2">Jednoosna čvrstoća (MPa)</td><td colspan="2">Point Load Test (MPa)</td></tr>
<tr><td colspan="2">56-100</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td colspan="2">R.Q.D. indeks (%)</td><td colspan="2">F.F. indeks (br/m')</td></tr>
<tr><td>Iz bušotine:

Izračunati:</td><td>

70-80</td><td colspan="2">4-6</td></tr>
<tr><td colspan="2">Razmak diskontinuiteta (cm)</td><td colspan="2">Dužina (postojanost) diskontinuiteta (m)</td></tr>
<tr><td>SS 1,2

OR</td><td>20 (sr. vrijednost 32,5);45

13 (sr. vrijednost 19);25</td><td>SS 1,2

OR</td><td>1-3

<1</td></tr>
<tr><td colspan="2">Zijev diskontinuiteta</td><td colspan="2">Ispuna diskontinuiteta</td></tr>
<tr><td>SS 1,2

OR</td><td>>5

1-5</td><td>SS 1,2

OR</td><td>bez

kalcit, glina</td></tr>
<tr><td colspan="2">Hrapavost stijenki diskontinuiteta</td><td colspan="2">Hrapavost stijenki prema JRC10</td></tr>
<tr><td>SS 1,2

OR</td><td>Valovito hrapavi

Valovito hrapavi</td><td>SS 1,2

OR</td><td>4-6

6-8</td></tr>
<tr><td colspan="2">Rastrošenost stijenki diskontinuiteta</td><td colspan="2">Čvrstoća stijenki diskontinuiteta JCS</td></tr>
<tr><td>SS 1,2

OR</td><td>Umjereno do jako trošna (MW-HW)
Umjereno trošna (MW)</td><td>SS 1,2

OR</td><td>48-60

43-48</td></tr>
<tr><td colspan="2">Smjer i nagib diskontinuiteta</td><td colspan="2">Strukturni dijagram</td></tr>
<tr><td>SS1

SS2

OR

OR

Ob

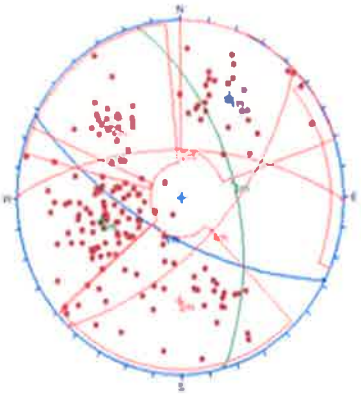
Ob</td><td>63/60

80/43

225/55

250/38

140/65

170/45</td><td colspan="2"></td></tr>
</table>

Inženjerskogeološki modeli terena:

- TROŠNA STIJENA PODLOGE

  Zona debljine od 0,0 – 2.5 m

  Vapnenci, umjereno do jako trošni (MW-HW), zijeva pukotina 1-5 mm, bez ispune, okršeni.

  RQD = 70 %.

  GSI = 51-52 (Tablica 5)

- STIJENA PODLOGE

  Vapnenac, trošan (MW), zijeva pukotina 0.1 – 1.0 i 1.0 – 5.0 mm, bez ispune, ili kalcit. Moguća je pojava kaverni u zoni rasjeda te povremeno procjeđivanje u rasjednoj zoni.

  RQD = 80 %, osim u rasjedoj zoni.

  Ostali parametri dani su u tablici 3.

  GSI = 56-66 (Tablica 5)

  Na temelju značajki diskontinuiteta i stijenske mase izvršeno je bodovanje po GSI klasifikaciji za trošnu stijenu i stijenu podloge (rezultati prikazani u tablici 3).

- RASJEDNA ZONA

  Zona šire od 4 – 5 m

  Kršje vapnenaca, jako trošni (HW), zijeva pukotina >5 mm, bez ispune, okršeni.

  RQD = 20 %.

  GSI = 37 (Tablica 5)

Provedena ispitivanja fizičko-mehaničkih značajki stijenske mase u cilju su dobivanja parametara potrebnih za određivanje čvrstoće za smicanje (kohezija i kut unutrašnjeg trenja) potrebnih za račun stabilnosti. Ispitivanje tlačne čvrstoće izvedeno je na izdancima stijene na površini terena Schmidtovim čekićem (Strelec et al., 2013). Rezultati su prikazani u tablici 6.

Tablica 6. Odskok Schmidtovog čekića za lokaciju temeljna stijena "Minčeta", sa tlačnim čvrstoćama (Strelec et al., 2013)

pločasto uslojen vapnenac gornjo kredne starosti, mikritno-zrnaste strukture						
uzorak broj	Lokacija	Otklon čekića (°)	Izmjerene vrijednosti odskoka (H)	Srednja vrijednost odskoka (H_{sr})	Tlačna čvrstoća (MN/m^2)	Youngov modul (GPa) intaktnog uzorka
1	uzorak sa površine terena	-90	47 42 35 36 31 40 40 40 42 40	39,3	53,12	10,0
2	uzorak sa površine terena	-90	44 45 44 52 48 48 42 44 46 46	45,9	64,15	16,0
3	uzorak sa površine terena	-90	42 48 45 38 40 42 40 26 25 25	37,1	49,49	10,0
4	uzorak sa površine terena	-90	38 40 42 45 45 36 36 40 42 42	40,6	55,28	10,0

Mjerenjem na terenu određeni su ulazni podaci za klasifikaciju stijenskih masa prema odgovarajućim dijelovima "RMR" i "Q" klasifikacije do razine određivanja Geološkog indeksa čvrstoće stijenske mase (GSI). Rezultati su prikazani u tablici 7.

Tablica 7. Vrijednosti (bodovi) Geološkog indeksa čvrstoće, GSI za trošnu stijenu, stijenu podloge i rasjednu zonu (GSI = RMR89 –5)

	Stijena podloge			Trošna stijena podloge	Rasjedna zona
Kula Minčeta	SS 1,2	OR	OB		
JEDNOOSNA TLAČNA ČVRSTOĆA	9	7-8	7-8	6	6
INDEKS KVALITETE JEZGRE (RQD)	16	14-16	15	14	5
RAZMAK DISKONTINUITETA	8-11	8-11	7-8	7-8	6
STANJE PODZEMNE VODE	15	15	15	15	15
UKUPNO STANJE STIJENSKE MASE	48-51	44-50	44-46	42-43	32
STANJE DISKONTINUITETA					
DUŽINA DISKONTINUITETA	4	6	6	4	6
ZIJEV	0	1	1	0	0
HRAPAVOST	3	3	3	3	1
ISPUNA	6	6	4	4	2
RASTROŠENOST	3-5	3-5	3-5	3	1
UKUPNO STANJE DISKONTINUITETA	16-18	19-21	17-19	14	10
SVEUKUPNO	64-69	63-71	61-65	56-57	42
ZA GSI	-5	-5	-5	-5	-5
GSI	59-64	58-66	56-60	51-52	37

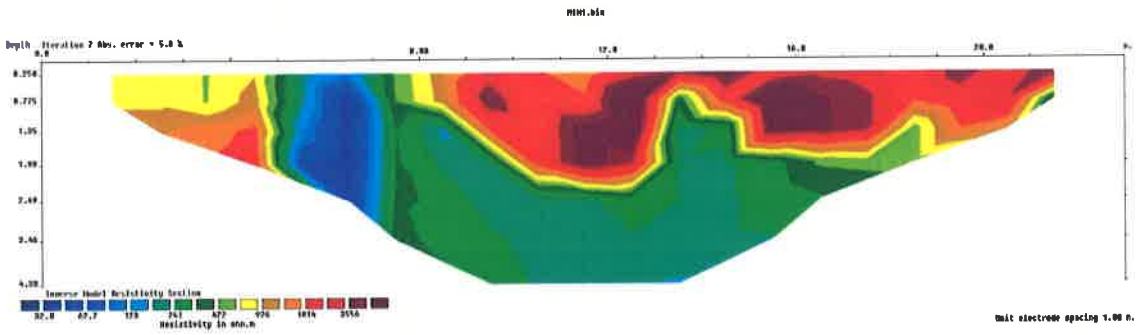
4.2. Geofizičke značajke

4.2.1. Električna tomografija

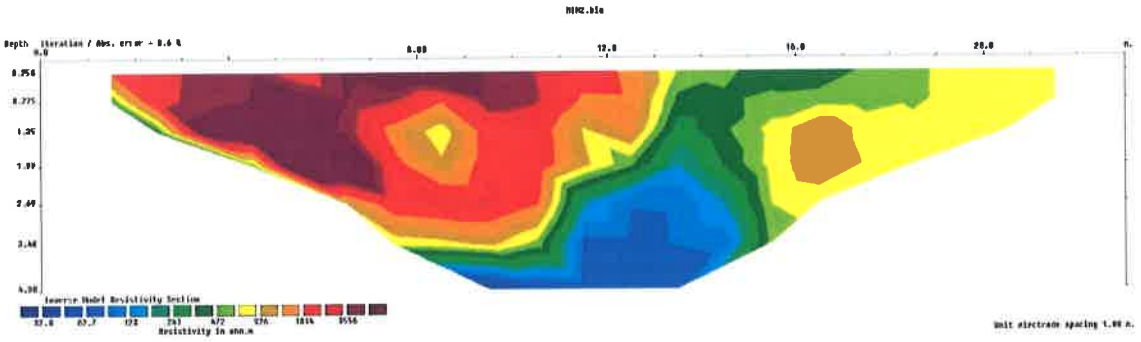
Na temelju mjerenih podataka, interpretirane su geološke sredine u geoelektričnom profilu ERT-1 i ERT-2. Za profiliranje je korišten Wenner-ov raspored sa 24, odnosno 32 elektrode. Primijenjeni elektrodni razmak bio je u rasponu od 1,0 m do 1,5 m a ostvarene intepretacijske dubine do 8,0 m. Duljina električnih profila iznosila je od 24 do 40 m.

Rezultati mjerenja prikazani su 2D profilima (Slika 17 i 18) u boji. Otpornosti u profilu nalaze se u rasponu od 32 Ωm do 10 000 Ωm. Interpretacija je izvedena računalnom aplikacijom Res2Dinv, Geotomo Software, Malaysia.

Uz spomenute rezultate, u tablici 8 prikazane su kategorije tla prema električnim otpornostima.



Slika 17. Rezultat geoelektrične tomografije u profilu ERT-1 (Grabar et al., 2016)



Slika 18. Rezultat geoelektrične tomografije u profilu ERT-2 (Grabar et al., 2016)

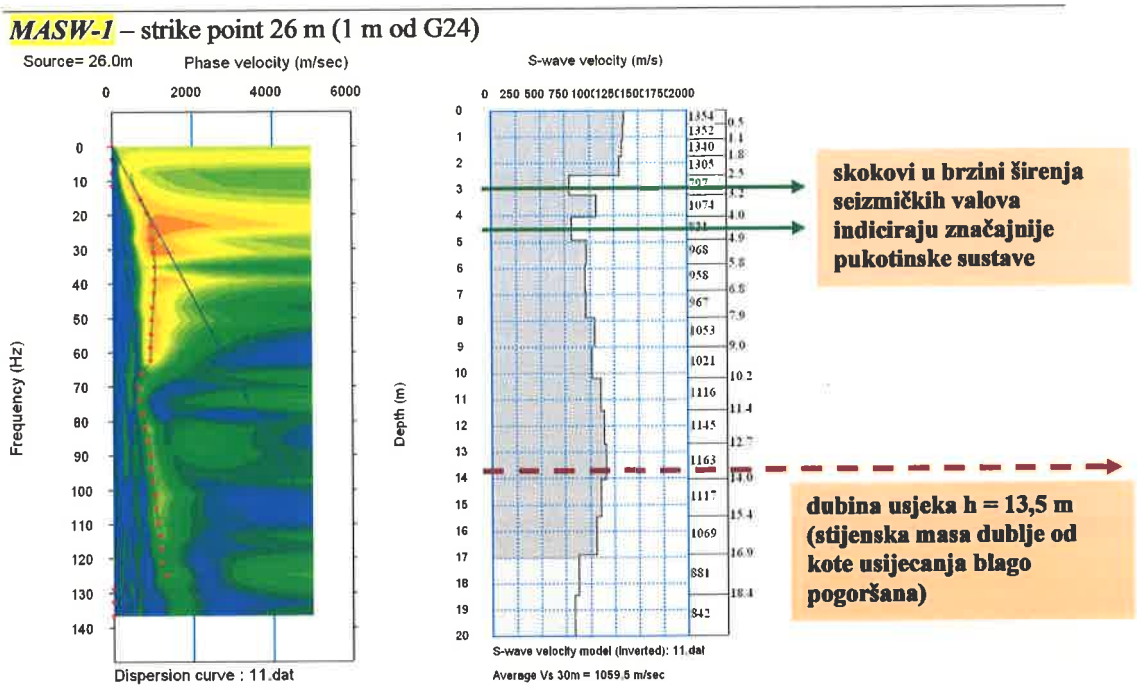
Tablica 8. Kategorije tla prema električnim otpornostima, Tvrđava Minčeta, Dubrovnik (Grabar et al., 2016)

ELEKTRIČNA OTPORNOST	KLASIFIKACIJA TLA		
< 150 Ωm	zavodnjeni dio stijenske mase (rasjedna zona)		
250 - 1800 Ωm	stijena podloge (manja otpornost > veća trošnost)		
> 1800 Ωm	dezintegrirana, okršena stijena podloge		

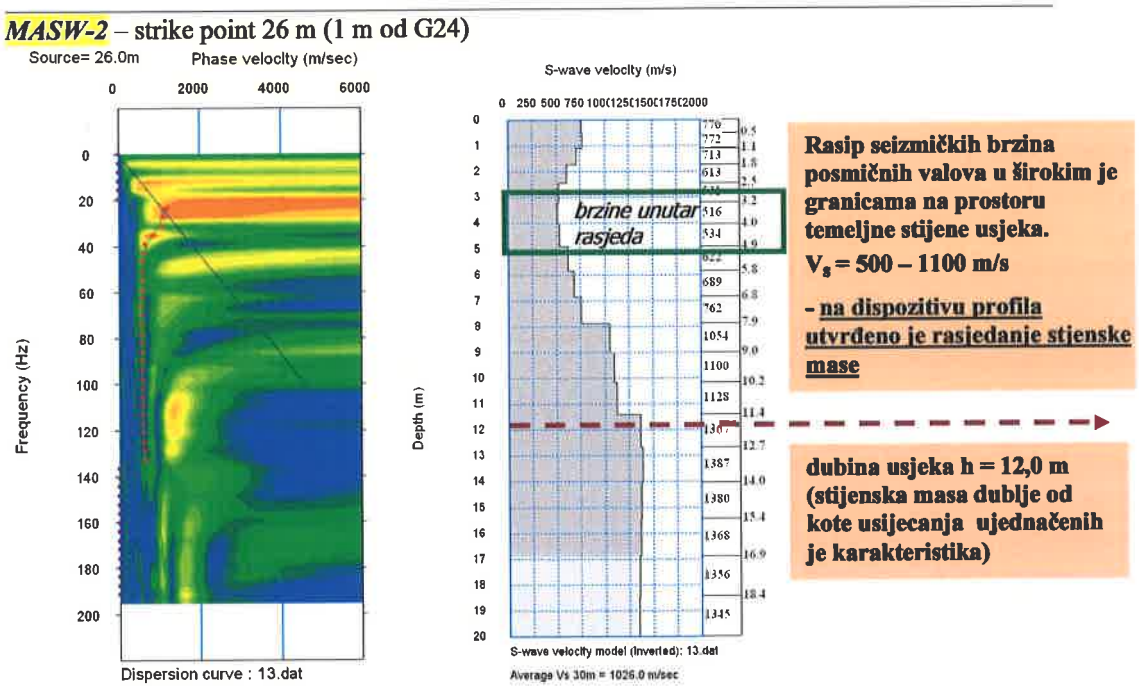
4.2.2. Višekanalna analiza površinskih valova (MASW)

MASW dispozitiv sastojao se od 24 vertikalna geofona frekvencije 4,5 Hz, postavljena na međusobnom razmaku od 1,0 m. Pri interpretaciji MASW mjerenja koristi se osnovni mod MO. Rezultati brzina V_S seizmičkih valova iz snimaka MASW profila prikazani su na slikama 19 do 21.

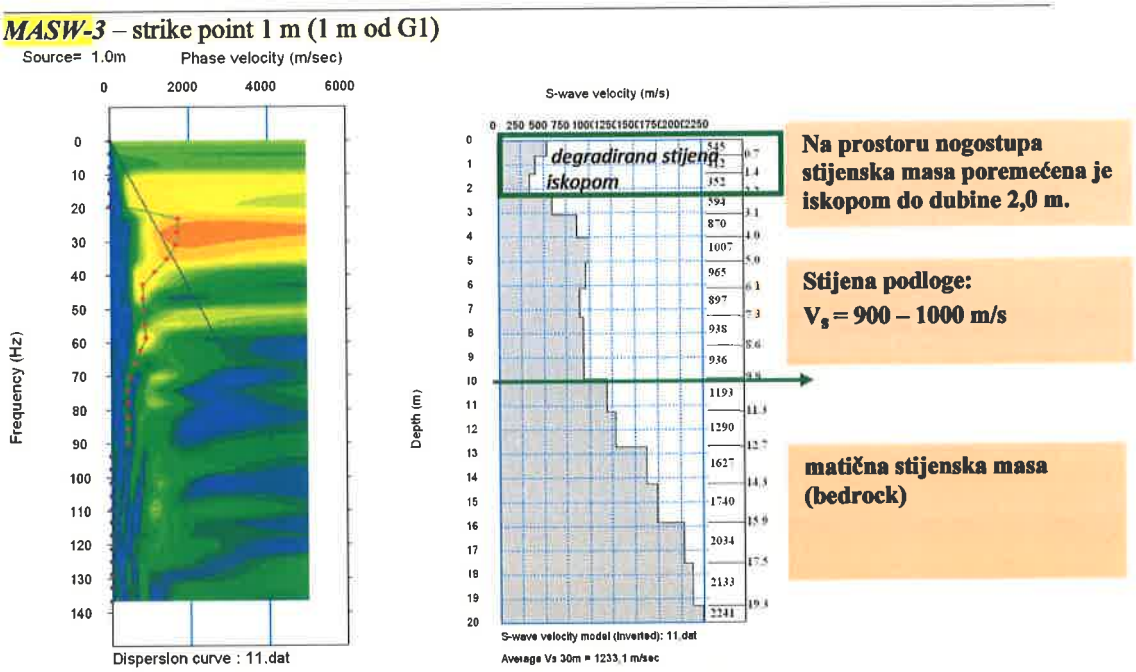
Interpretacija mjerene krivulje disperzije na lokaciji dispozitiva temelja Tvrđave Minčeta, provedena je računalnom aplikacijom SeisIMAGER 4.0.1.6., OYO Corporation 2004-2009 (Strelec et al., 2013).



Slika 19. Rezultati brzina Vs seizmičkih valova iz snimaka MASW-1 profila (Strelec et al., 2013)



Slika 20. Rezultati brzina Vs seizmičkih valova iz snimaka MASW-2 profila (Strelec et al., 2013)

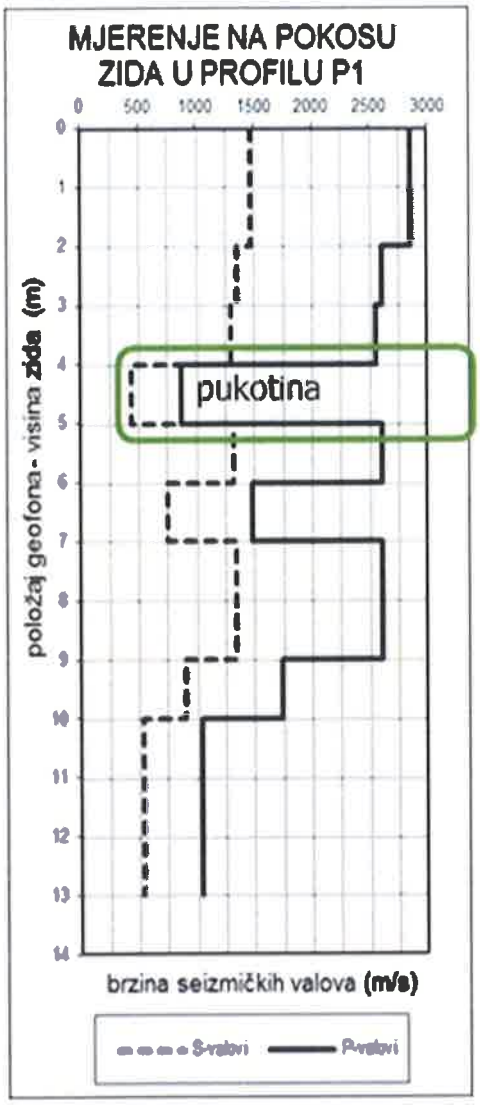


Slika 21. Rezultati brzina Vs seizmičkih valova iz snimaka MASW-3 profila (Strelec et al., 2013)

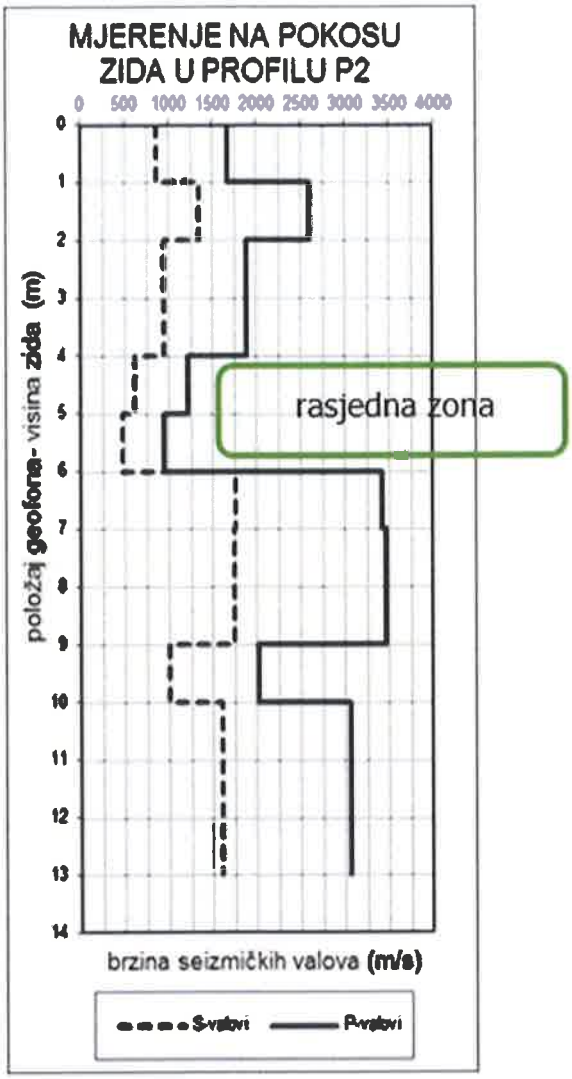
4.2.3. Down-hole

U ovome istraživanju korištena je improvizirana Down-hole metoda. Zbog nemogućnosti bušenja bušotine u zidinama, niz geofona, frekvencije 4,5 i 10 Hz, spuštao se rubom zidina a kao uteg su se koristile vreće pijeska. Korišteni geofonski razmak iznosio je od 1,0 m do 2,0 m te je dužina dispozitiva osiguravala intepretacijsku dubinu do 10 m dok se izvor seizmičkih valova, čekić mase 10 kg, nalazio se na vrhu zidina.

Rezultati mjerenja prikazani su 2D profilima (Slika 22 i 23) a interpretacija je izvedena računalnim aplikacijama SurfSeis 3.0, Kansas Geological Survey i SeisImager, OYO Corporation, Japan. Kompletni rezultati prikazani su na prilogu 3.



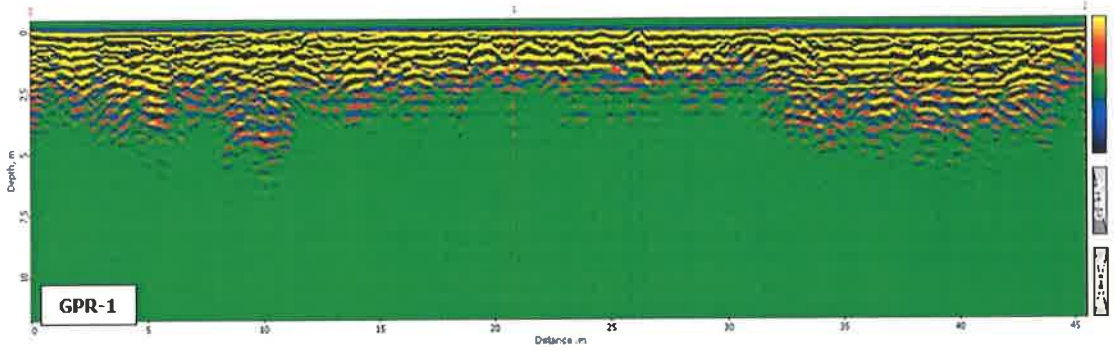
Slika 22. Rezultat brzina Vp i Vs seizmičkih valova iz "downhole" snimaka na pokosu usjeka za profil P1 (Strelec et al., 2013)



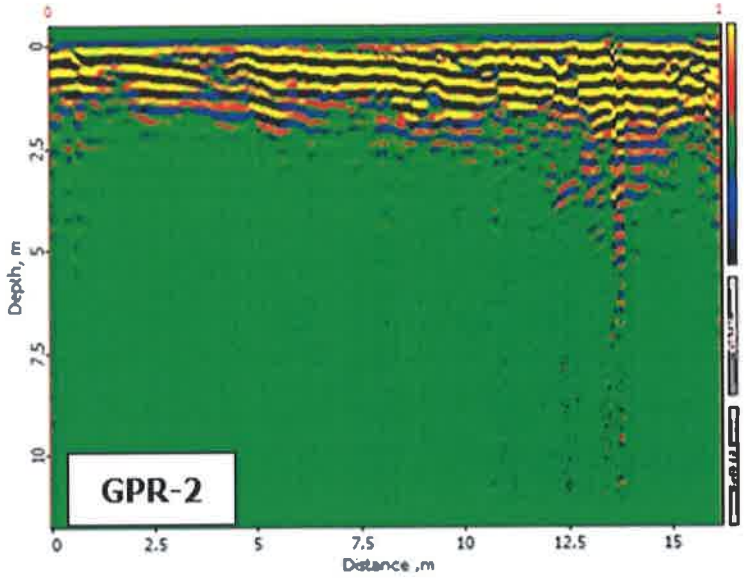
Slika 23. Rezultat brzina Vp i Vs seizmičkih valova iz "downhole" snimaka na pokosu usjeka za profil P2 (Strelec et al., 2013)

4.2.4. Georadarsko profiliranje

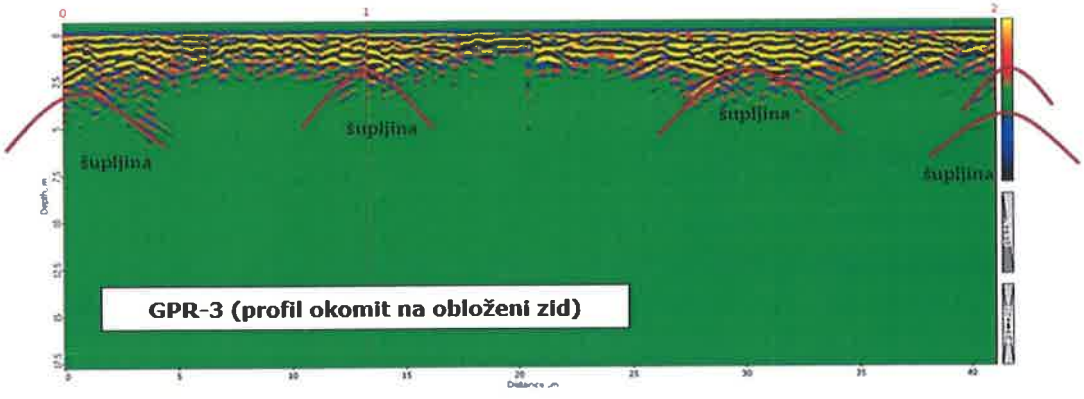
Georadarsko profiliranje izvedeno je primjenom 300 i 500 MHz antene te služi kao dopuna seizmičkih dobivenih podataka, odnosno kako bi se ostvario uvid u stanje trošnosti i pukotinskih sistema stijenske mase za potrebe inženjerskogeološkog modela temeljne stijene. Rezultati georadarskog profiliranja prikazani su na slikama 24, 25, 26 i 27.



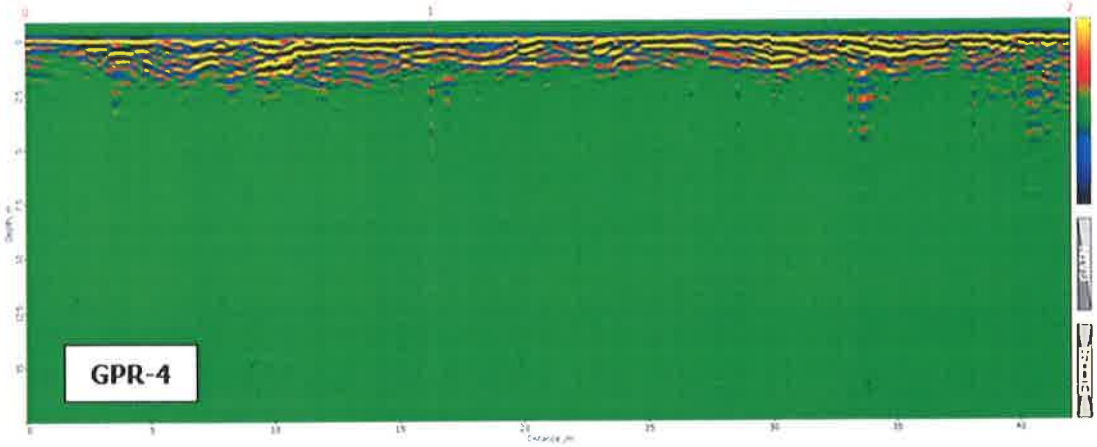
Slika 24. Rezultat georadarskog profiliranja profila GPR-1 (Strelec et al., 2013)



Slika 25. Rezultat georadarskog profiliranja profila GPR-2 (Strelec et al., 2013)



Slika 26. Rezultat georadarskog profiliranja profila GPR-3 (Strelec et al., 2013)



Slika 27. Rezultat georadarskog profiliranja profila GPR-4 (Strelec et al., 2013)

4.3. Parametri stijenske mase

Programom RocLab određeni su ulazni parametri prema Hoek-Brownovoj klasifikaciji na osnovu kojih je dobiven dijagram nelinearnog odnosa normalnog i posmičnog naprezanja prema Hoek-Brownovom kriteriju čvrstoće.

Na slikama 28, 29 i 30 dat je prikaz nelinearnog odnosa prema Hoek-Brownovom kriteriju čvrstoće. Polaganjem pravca teorijom najmanjih kvadrata na dobivenu krivulju dobivene su Mohr-Coulombove veličine, odnosno parametri čvrstoće stijenske mase. Prema dobivenim rezultatima prosječni prividni kut trenja stijenske mase iznosi $\phi = 37 - 40°$, a prosječna prividna kohezija c = 240 - 430 kN/m^2 za stijenu podloge (Tablice 9 i 10). Rasjedna zona odstupa u parametrima čvrstoće od srasle stijene, a parametri iznose: kut trenja $\phi = 26°$, a prosječna prividna kohezija c = 140 kN/m^2 (Tablica 11). Dobivene Mohr-Colombove veličine čvrstoće stijenske mase prikazane su također na slikama 28, 29 i 30.

Ulazni parametri za modeliranje usvojeni su iz terenskih radova. Kriterija sloma stijenske mase definiran je generaliziranim Hoek-Brown-ovim kriterijem čvrstoće:

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_c} + s \right)^a$$

gdje su:

- σ_c – jednoosna tlačna čvrstoća homogenog uzorka stijene

- σ'_1 i σ'_3 – veće i manje efektivno glavno naprezanje

- m_b, a, s – iskustveni parametri stijenske mase definirani izrazima:

$$m_b = m_i \cdot e^{\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right)} \quad ; \quad s = e^{\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right)} \quad ; \quad a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6}\left(e^{-\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{3}}\right)$$

gdje je:

- D – faktor poremećenosti stijenske mase

- m_i – parametar ovisan o vrsti stijene

- GSI – geološki indeks čvrstoće

Usvojene su vrijednosti parametra (Strelec et al., 2013):

- σ_c = 46 - 50 MN/m^2 (sklerometar, Schmidt-ov čekić)

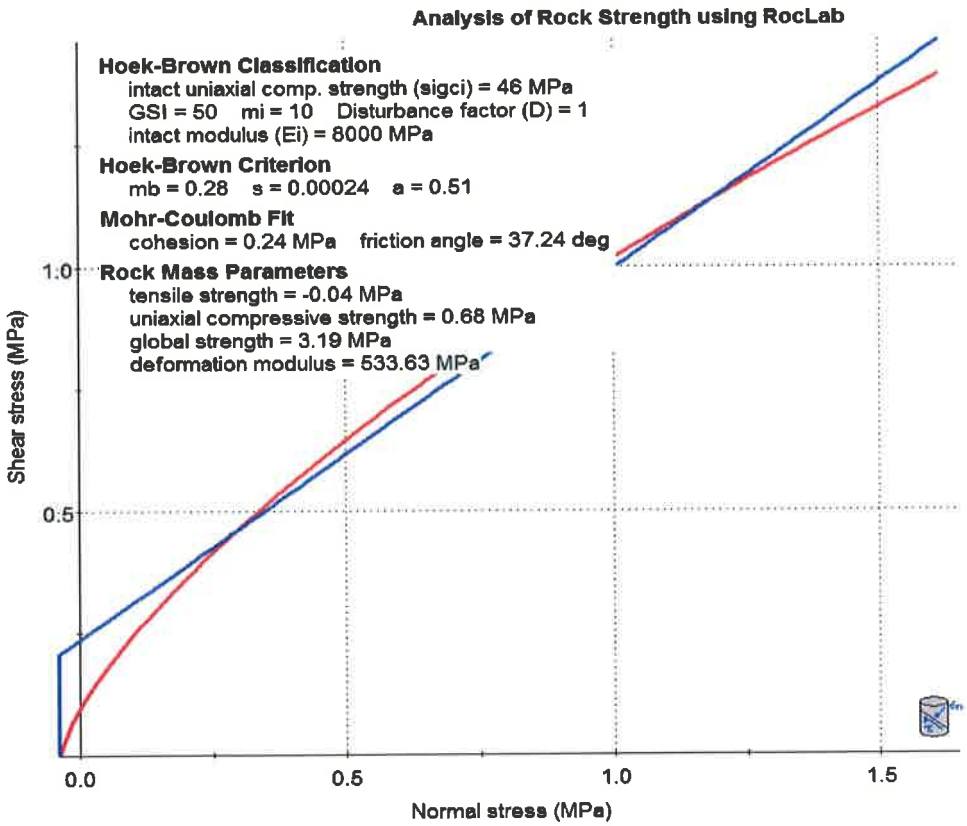
- GSI = 37 (rasjedna zona) - 50 - 60 (srasla stijena / adekvatna trošnost)

- m_i = 7-10

- D = 0,8 - 1,0.

Tablica 9. karakteristike temeljnog tla: trošna stijena podloge (Strelec et al., 2013)

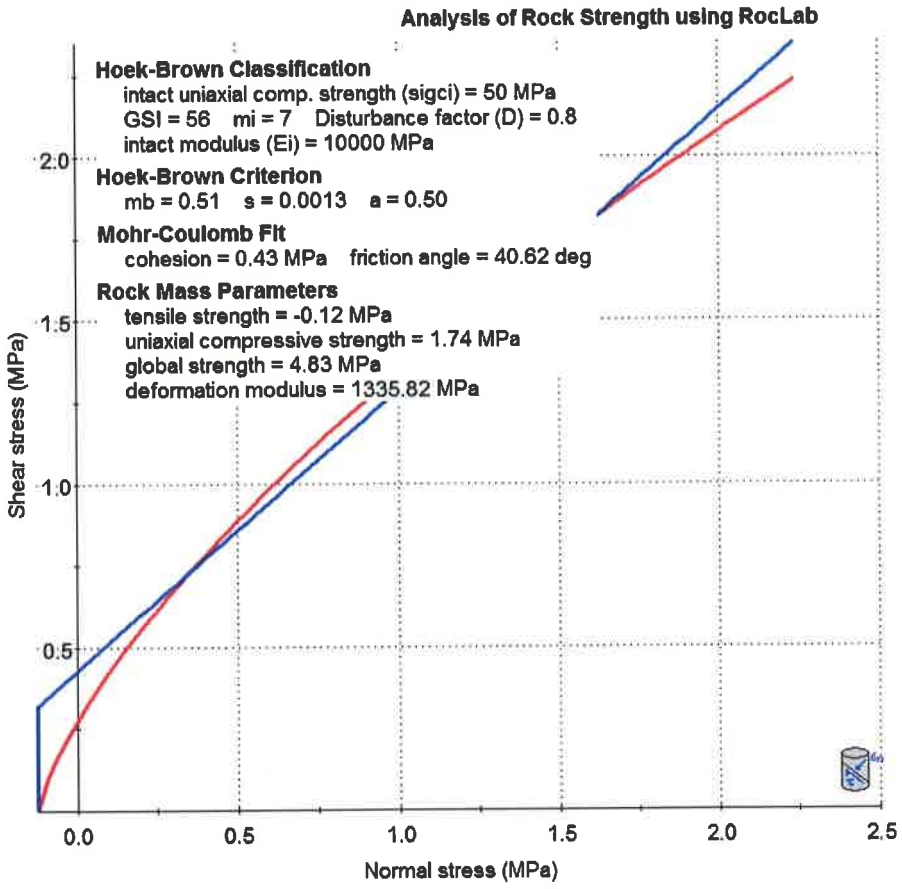
karakteristike temeljnog tla: ***TROŠNA STIJENA PODLOGE***				
umjereno do jako trošna stijena, MH - HW		jednoaksijalna čvrstoća intaktnog uzorka	geološki indeks čvrstoće	
		σ_c = 46 MPa	GSI = 50	
gustoća [ρ]	početni posmični modul [G_0]		deformacijski modul [E]	
2,5 g/cm³	1500 MN/m²		320 MN/m²	
prividna kohezija [c]	kut unutrašnjeg trenja [φ]			
240 kN/m²	37°			



Slika 28. Prikaz nelinearnog odnosa prema Hoek-Brownovom kriteriju čvrstoće (Strelec et al., 2013)

Tablica 10. Karakteristike temeljnog tla: stijena podloge (Strelec et al., 2013)

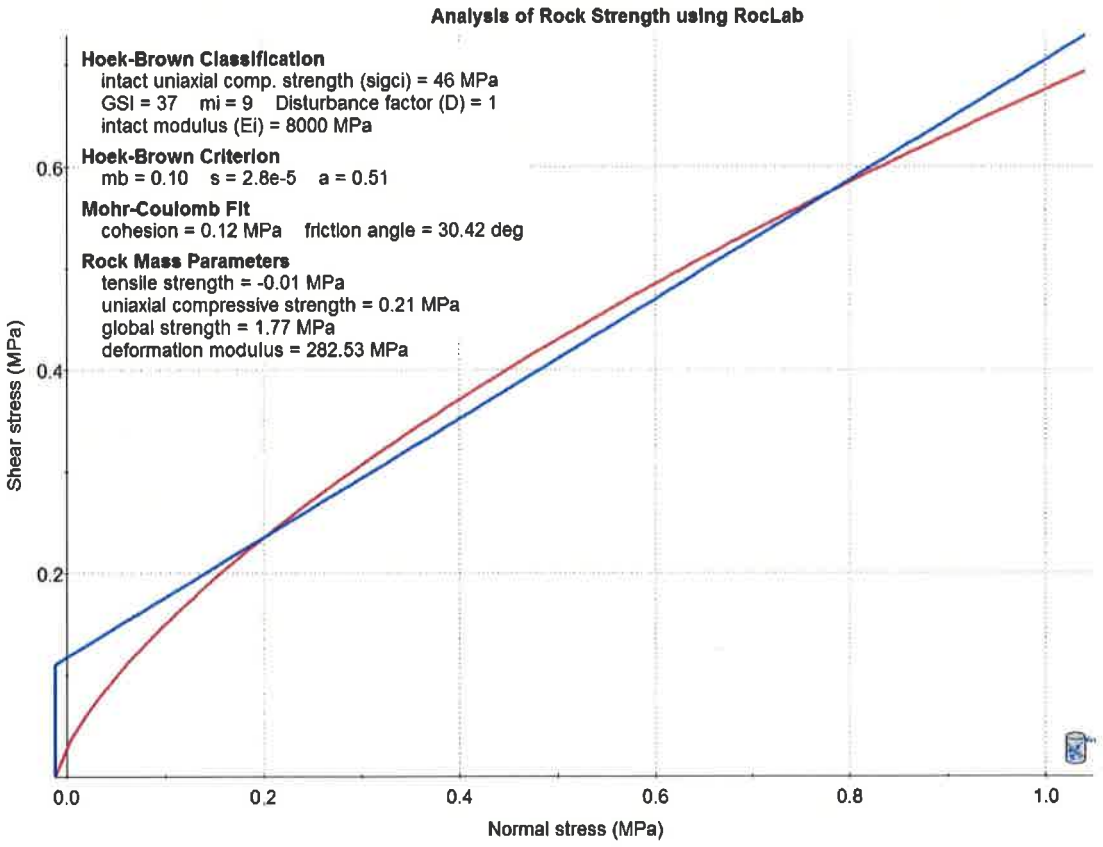
karakteristike temeljnog tla: ***STIJENA PODLOGE***				
trošna, MW, zijev 1 do 5 mm bez ispune		jednoaksijalna čvrstoća intaktnog uzorka	geološki indeks čvrstoće	
		σ_c = 50 MPa	GSI = 60	
gustoća [ρ]	početni posmični modul [G_0]		deformacijski modul [E]	
2,5 g/cm^3	4000 MN/m^2		920 MN/m^2	
prividna kohezija [c]	kut unutrašnjeg trenja [φ]			
430 kN/m^2	40°			



Slika 29. Prikaz nelinearnog odnosa prema Hoek-Brownovom kriteriju čvrstoće (Strelec et al., 2013)

Tablica 11. Karakteristike temeljnog tla: rasjedna zona (Strelec et al., 2013)

karakteristike temeljnog tla: ***RASJEDNA ZONA***				
jako trošan, HW, zijev > 5 mm bez ispune, okršeni		jednoaksijalna čvrstoća intaktnog uzorka	geološki indeks čvrstoće	
		σ_c = 46 MPa	GSI = 37	
gustoća [ρ]	početni posmični modul [G_0]		deformacijski modul [E]	
2,2 g/cm^3	600 MN/m^2		120 MN/m^2	
prividna kohezija [c]	kut unutrašnjeg trenja [φ]			
120 kN/m^2	30°			



Slika 30. Prikaz nelinearnog odnosa prema Hoek-Brownovom kriteriju čvrstoće (rasjedna zona) (Strelec et al., 2013)

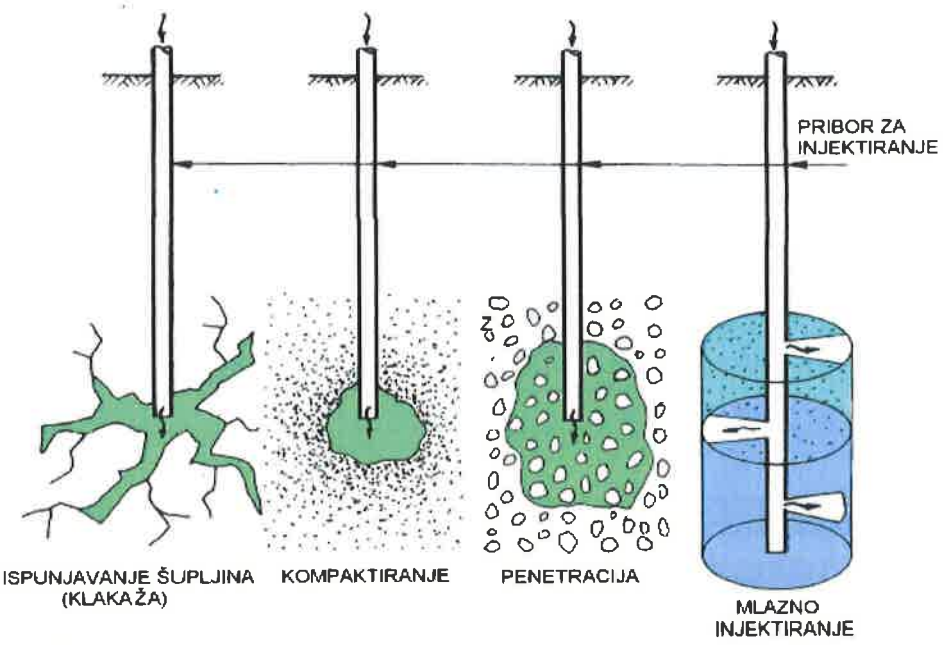
5. Sanacijsko rješenje za poboljšanje temeljnog tla tvrđave Minčeta

Poboljšanja tla se provode radi povećanja mehaničkih svojstava slabo nosivog prirodnog temeljnog tla ili radi postizanja povoljnih lokalnih hidrauličkih uvjeta u temeljnom tlu. Jedan od načina poboljšanja tla je injektiranje. Injektiranje je kontrolirano ubrizgavanje tekućih ili žitkih sredstava pod tlakom u šupljine i pore tla ili građevine s ciljem poboljšanja mehaničkih i fizikalnih karakteristika te postizanja vodonepropusnosti, učvršćivanja, konsolidacije ili homogenizacije. Prema tehnikama, proces injektiranja se dijeli na:

- stijensko injektiranje
- permeacijsko injektiranje
- injektiranje hidrofrakturiranjem
- mlazno injektiranje.

Ovisno o svojstvima terena ili konstrukcije, veličini pora i prslina koje treba zapuniti, te odabranoj tehnici injektiranja, postoje razne injekcijske mase i materijali koji čine te injekcijske mase . Također, i prilikom odabira tipa injekcijske mase treba voditi računa o njenim svojstvima kao što su reološka svojstva i penetrabilnost, vrijeme vezanja, otpornost na razrjeđenje i ispiranje u uvjetima bržeg toka, podzemne vode, toksičnost, čvrstoća očvrsle injekcije ili injektiranog terena, stabilnost i trajnost injekcije i injektiranog terena te vodotijesnost injektiranog terena.

Za sanaciju Tvrđave Minčeta preporučuje se višeredno injektiranje rasjedne zone u „cik-cak“ rasporedu, kako bi se zaštitila građevina tvrđave od daljnje degradacije. Položaj injekcijske zavjese trebao bi biti okomit na smjer rasjeda dubine barem 1 m ispod kote Ulice Iza Grada (+22,00). Injektiranje je preporučeno provesti vertikalno sa platoa uz same zidove tvrđave (+35,44), sa bušotinama u tri reda, te inklinacijama prema slici 32.



Slika 31. Shematski prikaz vrsta injektiranja (Kovačević Zelić, 2006)

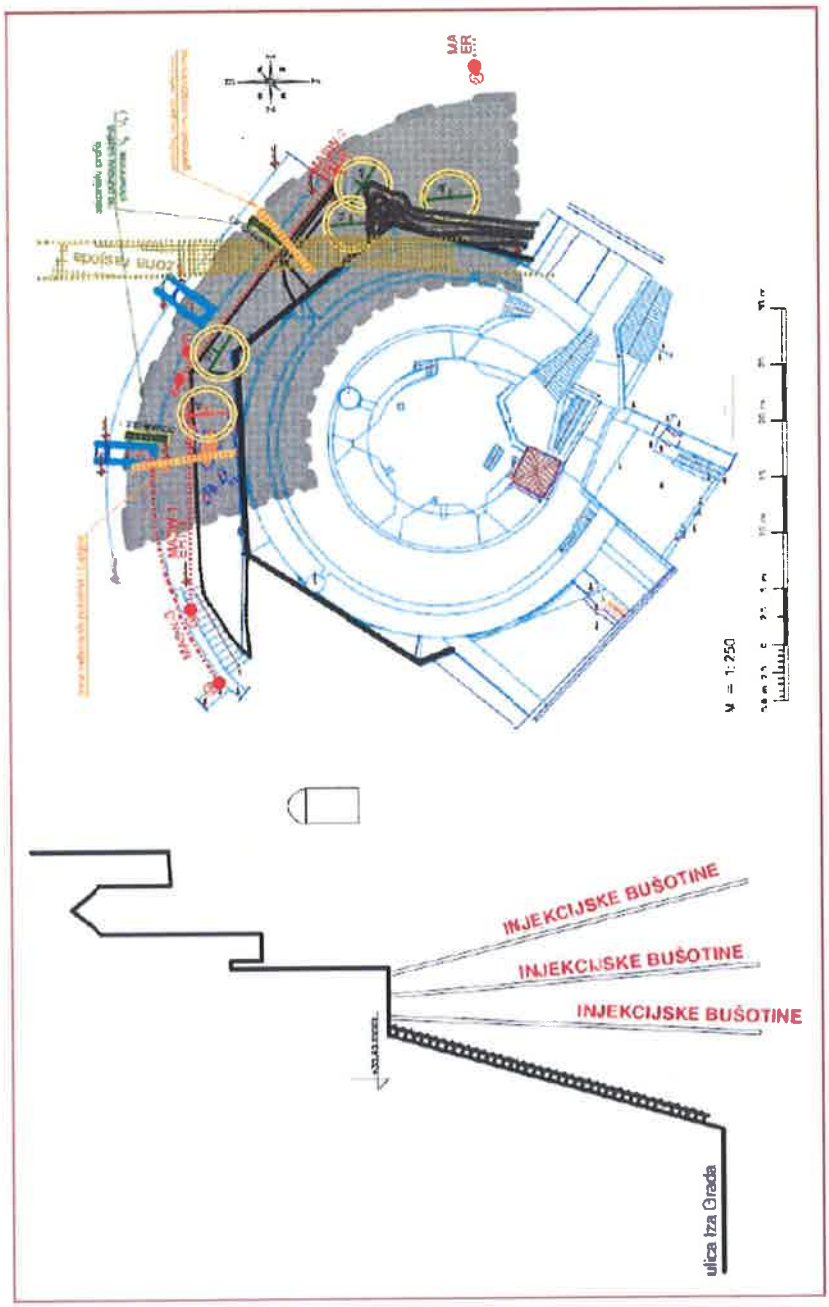
6. Zaključak

Cilj ovog rada je bio evidentiranje oštećenja na građevini, karakterizacija temeljnog tla tvrđave „Minčeta", te predlaganje mjera sanacije. U svrhu toga provedena je geotehnička karakterizacija temeljne stijenske mase na kojoj se temelji Tvrđava Minčeta. Osnovna stijena je inženjerskogeološki kartirana, a fizikalno-mehanička svojstva izdvojenih jedinica određena su geofizičkim istraživanjima.

Geofizička mjerenja ostvarena su postavljanjem geofizičkih profila na platoima neposredno uz temelj kule, seizmičkim mjerenjima na zidu, te u razini same ulice (Prilog 1). Rezultati geofizičkih istraživanja ukazali su na dvije zone s identificiranim anomalijama. Prva zona poklapa se sa inženjerskogeološki osmatranom rasjednom zonom, dok druga zona otkriva značajnije pukotine i kavernozne forme na prostoru prve razupore (Prilog 2).

Unutar samog rasjeda, kvaliteta stijenske mase je lošijih mehaničkih karakteristika u odnosu na sraslu temeljnu stijenu. Prilikom i nakon iskopa usjeka za potrebe izgradnje ulice Iza Grada, došlo je do preraspodjele prirodnih napona u stijenskoj masi koji su prouzročili pomake na prisutnom rasjedu. Također, problem stijenskih diskontinuiteta je

i trošenje unutar samog rasjeda koje uzrokovano radom vode. Na obje geofizički utvrđene anomalije zabilježena je prisutnost vode (plave nijanse boje na električnim profilima), koje su utvrđene i vizualno na pokosu zida. Voda sa površine prihvaća se u rasjednoj zoni te otpušta duž rasjeda što uzrokuje ispiranje glinovite ispune i sitnije frakcije uz rasjed. Ispiranjem ispune i sitnije frakcije uz rasjed dolazi do slijeganja terena što se odražava i na zid tvrđave.



Slika 32. Profil Tvrđave Minčeta i prijedlog inklinacije injekcijskih bušotina i položajna skica s područjem nestabilnog dijela temelja (sivo) (Grabar et al., 2016)

Važno obilježje daje rasjed pružanja (sjever-jug). Rasjed prolazi ispod kule Minčeta na istočnom dijelu kule te su na sjecištima tog rasjeda i usjeka ceste vidljive su mikro bore, zalijeganje slojeva i pukotina, te rasjedna rastrošena zona. Temeljem dobivenih ulaznih parametara za trošnu stijenu, stijenu podloge i rasjednu zonu može se zaključiti da od tri kategorije, dvije kategorije pripadaju povoljnoj stijenskoj masi, a stijena u rasjednoj zoni pripada slaboj kategoriji.

Ukupna stabilnost temeljna Kule Minčeta nije upitna, ali može biti u slučajnu djelovanja potresa. Za sanaciju se preporučuje višeredno injektiranje rasjedne zone u „cik-cak" rasporedu, kako bi se zaštitila građevina tvrđave od daljnje degradacije. Položaj injekcijske zavjese trebao bi biti okomit na smjer rasjeda dubine te je injektiranje preporučeno provesti vertikalno sa platoa uz same zidove tvrđave, sa bušotinama u tri reda, te inklinacijama prema skici na slici 32.

7. Literatura

KNJIGE I PRIRUČNICI:

Bieniawski, Z.T. (1989). Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering. John Wiley & Sons Inc. A Wiley-Interscience publication, New York, U.S.A., p 251.

CEN - European Committee for Standardization (2004). Eurocode 8 – Design of structures for earthquake resistance, Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, European standard, EN 1998-1: 2004 (E), Stage 64, European Committee for Standardization, Brussels.

International Society for Rock Mechanics ISRM (2007). The Blue Book: "The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring:1974-2006", Edited by R. Ulusay and J.A. Hudson.

Šumanovac, F. (2007). Geofizička istraživanja podzemnih voda. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Pauk Cerna.

Šumanovac, F. (2012). Osnove geofizičkih istraživanja. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Pauk Cerna.

ČLANCI:

Bieniawski, Z.T. (1973). Engineering classification of jointed rock masses. Trans S. Afr. Inst. Civ. Engrs, 15:335-344.

Broch, E., Franklin, J.A. (1972). The Point Load Strength Test. Int. Journal Rock Mech. Min. Sci 9:669-697.

Buljan, R. (2009). Osnovna inženjerskogeološka karta Rrepublike Hrvatske 1:100.000. Pikija, M., Halamić, J. (ur.). Hrvatski geološki institut 1909.-2009. Sto godina u službi domovine. Hrvatski geološki institut, 158-160, Zagreb.

Grabar, K., Miklin, Ž., Strelec, S. (2016). Geotehnička istraživanja na tvrđavi "Minčeta", Dubrovnik, Hrvatska. Inženjerstvo okoliša. Geotehnički fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Varaždin. 3(2). 63-72.

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 Environ, 57:151–160.

International Society for Rock Mechanics, ISRM (1985). Point load test, suggested method for determining point load strength. Int J Rock Mech Min Sci and Geomech Abstr 22:51–60.

International Society for Rock Mechanics, ISRM (1981). Rock characterization, testing and monitoring. In: Brown ET (ed) ISRM suggested methods. Pergamon Press, Oxford, p 211.

Marinos, P., Hoek, E. (2000). GSI: A geologically friendly tool for rock mass strength estimation. Proceedings of GeoEng 2000 Conference, Melbourne, 1:1422–1446.

Park, C.B., Miller, R.D., Xia, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves. Geophysics, 64, 3, 800-808.

Park, C. B., Miller, R.D., Ryden, N., Xia, J., Ivanov, J. (2007). Multichannel analysis of surface waves (MASW) - active and passive methods. The Leading Edge, 26, 1, 60-64.

STRUČNI RADOVI:

Strelec, S., Miklin, Ž., Grabar, K., Špiranec, M., Pažur, I. (2013). Geotehnička istraživanja na tvrđavi "Minčeta", Dubrovnik, Hrvatska. SPP d.o.o., Varaždin,. Hrvatski geološki institut, Zagreb, Hrvatska. Geotehnički fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Hrvatska.

DISERTACIJE, MAGISTARSKI RADOVI, ZAVRŠNI RADOVI, SEMINARSKI RADOVI I SKRIPTE:

Gazdek, M. (2003). Primjena seizmičkih metoda u geotehnici. Magistarski rad. Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet.

Jug, J. (2016). Metode geofizičkih istraživanja primjenjive u mehanici stijena. Seminarski rad. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

Kovačević Zelić, B. (2006). Poboljšanje svojstava tla i stijena. Interna skripta. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb.

Meaški, H. (2017). „Predavanja iz inženjerske geologije". Predavanja. Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Varaždin.

Strelec, S., Jug, J., Smrečki, D. (2012a). Mehanika stijena. Interna skripta. Geotehnički fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Varaždin.

Strelec, S., Jug, J., Smrečki, D. (2012b). Podpovršinski istražni radovi. Interna skripta. Geotehnički fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Varaždin.

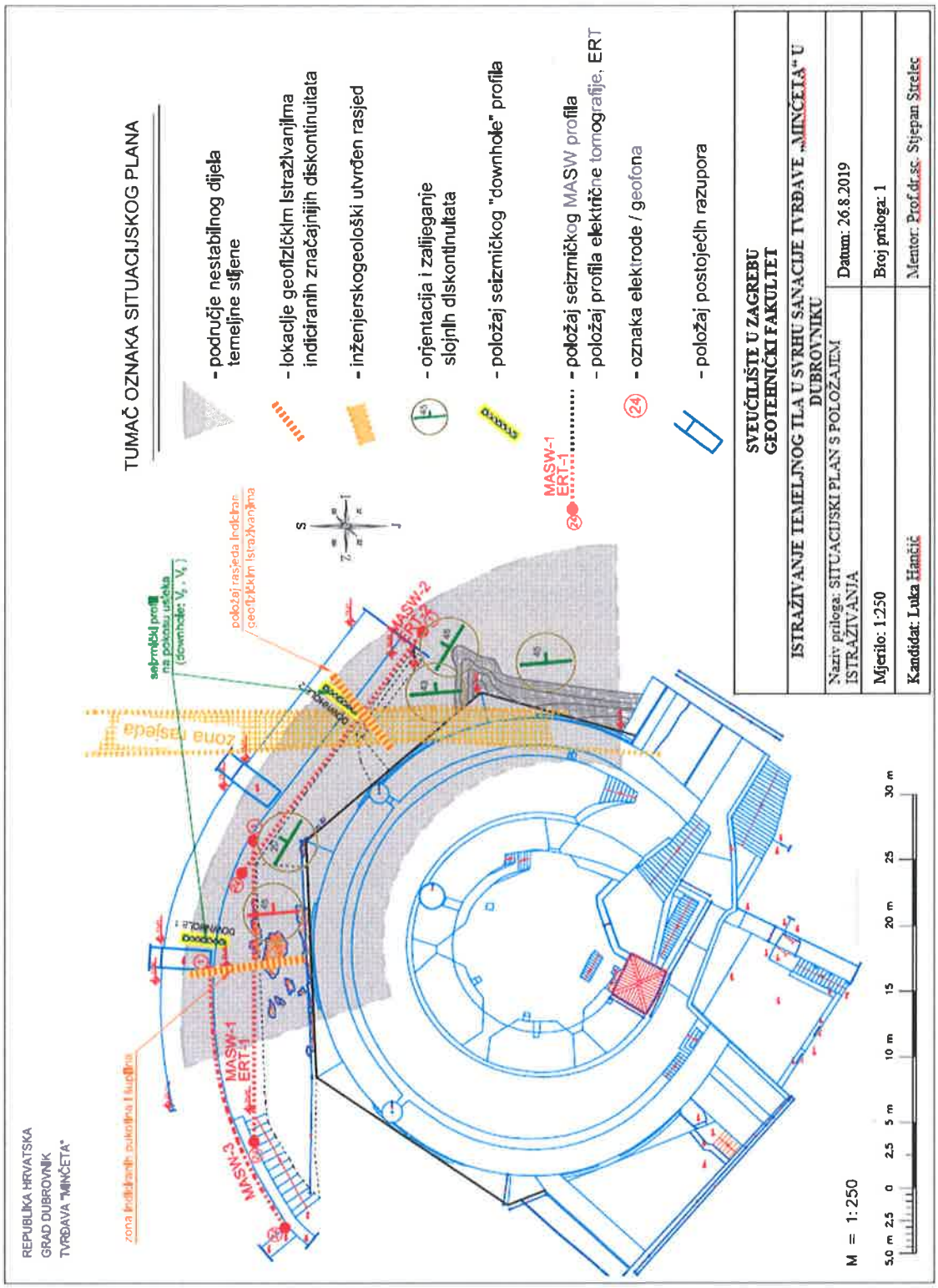
STRANICE NA INTERNETU:

Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW). What is MASW?, Apllications, Hardware, Software, Data Acquisition, Types, Passive, Dispersion Analysis, Inversion Analysis. (Online). Dostupno na: http://www.masw.com/index.html (24.7.2019)

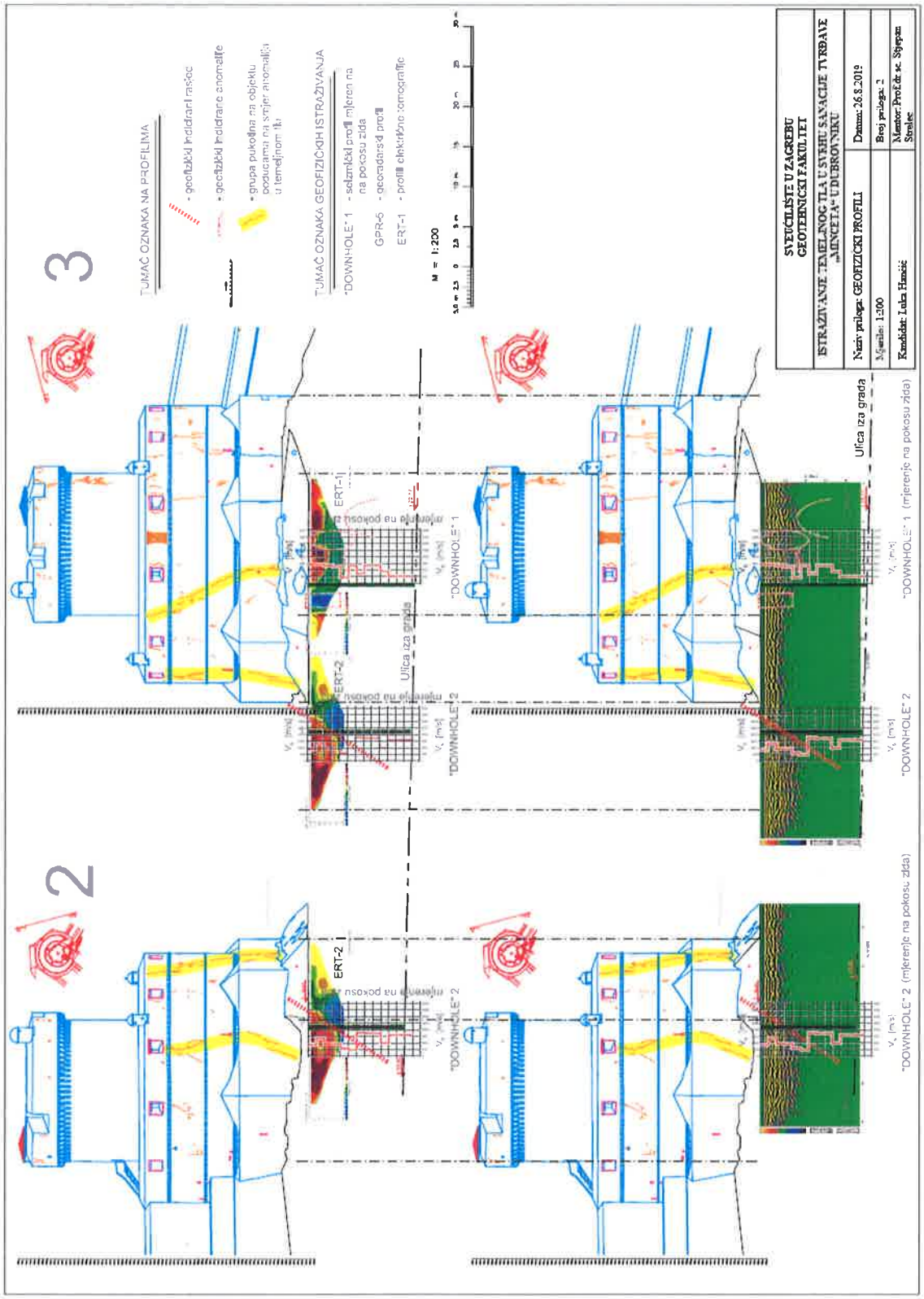
Rocscience Inc. (2002). RocLab-Overview-Features-FAQs. (Online). Dostupno na: https://www.rocscience.com/documents/pdfs/rocnews/june2002/RocLab-Overview-Features-FAQs.pdf (25.7.2019.)

8. Prilozi

PRILOG BR. 1 - SITUACIJSKI PLAN S POLOŽAJEM LOKACIJE



PRILOG BR. 2 - REZULTATI GEOFIZIČKIH ISTRAŽIVANJA PREKLOPLJENI NA PRESJECIMA TVRĐAVE MINČETA



PRILOG BR. 3 – REZULTATI SEIZMIČKIH ISTRAŽIVANJA „DOWN-HOLE“ METODOM

DOWN - HOLE MJERENJE NA POKOSU ZIDA - PROFIL P1

Kut nagiba zida u odnosu na horizontalu: 75.0 °

Udaljenost pobudne točke (PT) od krune zida (m) = 2.80

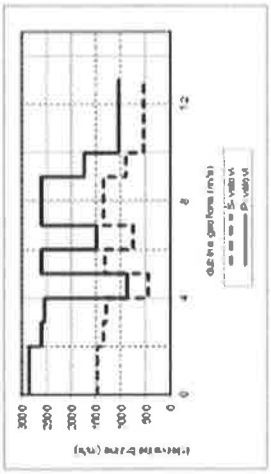
Položaj geofona (m)	P - VAL			S - VAL			Gustoća	Dinamičke intervalne konstante elastičnosti				
	Nailazak (ms)	Brzina (m/s)	Intervalna brzina (m/s)	Nailazak (ms)	Brzina (m/s)	Intervalna brzina (m/s)	ρ (t/m³)	Poissonov koeficijent ν_{dyn} (-)	Youngov modul E_{dyn} (MPa)	Modul posmika G_{dyn} (MPa)	Mod. obuj. elastičn. B_{dyn} (MPa)
			2856			1469	1.9	0.320	10829	4101	10034
2	1.344	2856		2.342	1469						
			2604			1355	1.9	0.314	9170	3489	8234
3	1.728	2664		3.080	1332						
			2551			1295	1.9	0.326	8456	3188	8114
4	2.120	2568		3.852	1268						
			874			444	1.9	0.326	995	375	951
5	3.284	1940		6.102	939						
			2604			1325	1.9	0.326	8836	3333	8441
7	4.032	2030		7.612	990						
			1488			751	1.9	0.329	2851	1073	2777
9	5.376	1878		10.274	917						
			2604			1348	1.9	0.317	9091	3451	8284
10	5.760	1920		11.016	943						
			1736			900	1.9	0.316	4052	1539	3674
11	6.336	1899		12.127	936						
			1042			536	1.9	0.320	1440	545	1334
13	8.256	1694		15.860	838						

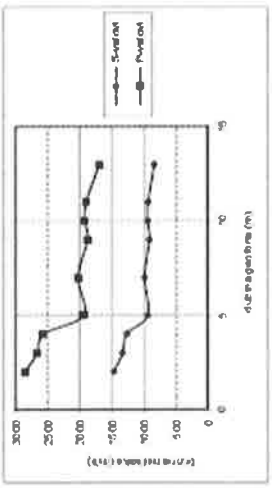
$$\nu_{dyn.} = \frac{((V_p/V_s)^2 \cdot 0.5) - 1}{(V_p/V_s)^2 - 1}$$

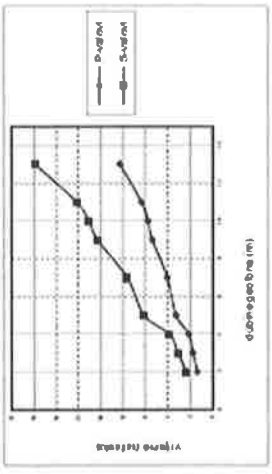
$$E_{dyn.} = 2 \cdot (1 + \nu_{dyn.}) \cdot \rho \cdot V_s^2$$

$$G_{dyn.} = \frac{E_{dyn.}}{2 \cdot (1 + \nu_{dyn.})}$$

$$B_{dyn.} = \frac{E_{dyn.}}{3 \cdot (1 - 2 \cdot \nu_{dyn.})}$$







DOWN - HOLE MJERENJE NA POKOSU ZIDA - **PROFIL P2**

Kut nagiba zida u odnosu na horizontalu: 75,0 °

Udaljenost pobudne točke (PT) od krune zida (m) = 1,12

	P - VAL			S - VAL			Gustoća	Dinamičke intervalne konstante elastičnost			
								Poissonov koeficijent	Youngov modul	Modul posmika	Mod. obuj. elastičn.
Položaj geofona (m)	Nailazak (ms)	Brzina (m/s)	Intervalna brzina (m/s)	Nailazak (ms)	Brzina (m/s)	Intervalna brzina (m/s)	ρ (t/m³)	$\nu_{dyn.}$ (-)	$E_{dyn.}$ (MPa)	$G_{dyn.}$ (MPa)	$B_{dyn.}$ (MPa)
			1670			**862**	1.9	0.318	3726	1413	3416
1	1.008	1670		1.741	862						
			2604			**1342**	1.9	0.319	9031	3423	8321
2	1.392	1819		2.486	922						
			1894			**951**	1.9	0.331	4580	1720	4522
4	2.448	1807		4.588	905						
			1225			**619**	1.9	0.329	1936	728	1882
5	3.264	1654		6.203	826						
			947			**479**	1.9	0.328	1159	436	1122
6	4.320	1477		8.290	736						
			3425			**1770**	1.9	0.318	15687	5952	14348
7	4.612	1598		8.855	801						
			3466			**1742**	1.9	0.331	15351	5767	15139
9	5.189	1802		10.003	907						
			2024			**1009**	1.9	0.335	5164	1935	5206
10	5.683	1821		10.994	915						
			3063			**1600**	1.9	0.312	12766	4864	11338
12	6.336	1947		12.244	984						

$$\nu_{dyn.} = \frac{((V_p/V_s)^2 \cdot 0.5) - 1}{(V_p/V_s)^2 - 1}$$

$$E_{dyn.} = 2 \cdot (1 + \nu_{dyn.}) \cdot \rho \cdot V_s^2$$

$$G_{dyn.} = \frac{E_{dyn.}}{2 \cdot (1 + \nu_{dyn.})}$$

$$B_{dyn.} = \frac{E_{dyn.}}{3 \cdot (1 - 2 \cdot \nu_{dyn.})}$$

