

Geotehnička karakterizacija stijenske mase za projektiranje temeljnih konstrukcija

Kreč, Hrvoje

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:130:988206>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-10-04**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET

HRVOJE KREČ

GEOTEHNIČKA KARAKTERIZACIJA STIJENSKE MASE ZA PROJEKTIRANJE
TEMELJNIH KONSTRUKCIJA

DIPLOMSKI RAD

VARAŽDIN, 2023.

Sazivam članove ispitnog povjerenstva
za 20.07.2023. u 9 sa
Obranu ovog rada kandidat će vršiti i pred
ispitnim povjerenstvom u Varaždinu
Varaždin, 06.07.2023.

Predsjednik
ispitnog povjerenstva
Prof. dr. sc. Sanja Karčić

Članovi povjerenstva

- 1) Doc. dr. sc. Jasmin Jugo
- 2) Prof. dr. sc. Stjepan Štrelac
- 3) Izv. prof. dr. sc. Boris Kavner

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET

DIPLOMSKI RAD

GEOTEHNIČKA KARAKTERIZACIJA STIJENSKE MASE ZA PROJEKTIRANJE
TEMELJNIH KONSTRUKCIJA

KANDIDAT:

Hrvoje Kreč



MENTOR:

Doc.dr.sc. Jasmin Jug, mag.ing.geoling

VARAŽDIN, 2023.

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je diplomski rad pod naslovom:

GEOTEHNIČKA KARAKTERIZACIJA STIJENSKE MASE ZA PROJEKTIRANJE TEMELJNIH KONSTRUKCIJA

rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom **doc. dr. sc. Jasmin Jug, mag. ing. geoling.**

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 iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

U Varaždinu, 26.06.2023.

Hrvoje Kreč
(Ime i prezime)



(Vlastoručni-potpis)

IZJAVA MENTORA O POSTOTKU SLIČNOSTI DIPLOMSKOG RADA S VEĆ OBJAVLJENIM RADOVIMA

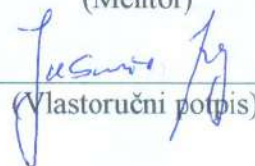
Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je diplomski rad pod naslovom:

**GEOTEHNIČKA KARAKTERIZACIJA STIJENSKE MASE ZA PROJEKTIRANJE TEMELJNIH
KONSTRUKCIJA**

pregledan anti-plagijat programskim paketom PlagScan te da postotak sličnosti cjelovitog diplomskog rada, s već objavljenim radovima, ne prelazi 20%, kao i da pojedinačni postotak sličnosti diplomskog rada sa svakom literaturnom referencom pojedinačno ne prelazi 5%.

U Varaždinu, 26.06.2023.

Doc.dr.sc. Jasmin Jug, mag.ing.geoling.
(Mentor)



(Vlastoručni potpis)

Sažetak:

Pravilna karakterizacija temeljnog tla osigurava dugotrajnost i pouzdanost građevinskih konstrukcija. Ovaj diplomski rad istražuje geotehničku karakterizaciju stijenske mase za potrebe temeljenja građevina. Osim osnovnih principa temeljenja na stijenskoj masi, rad pruža pregled geotehničkih i geofizičkih metoda istraživanja koje se koriste za karakterizaciju stijenske mase. Geotehničke metode, poput istražnog bušenja s uzimanjem uzoraka, omogućuju prikupljanje informacija o fizikalno-mehaničkim svojstvima stijenske mase. S druge strane, geofizičke metode omogućuju neinvazivne načine karakterizacije stijenske mase na temelju fizikalnih svojstava, kao što su brzina seizmičkih valova ili električna otpornost. Kombinacija navedenih metoda istraživanja omogućuje inženjerima donošenje pravilne odluke i biranje odgovarajuće vrste temelja, te prilagodbu konstrukcijskog projekta. Postupci geotehničke karakterizacije prikazani su kroz praktične primjere s istražnih lokacija u gradu Pazinu i na otoku Korčuli. Zaključak rada naglašava važnost geotehničke karakterizacije stijenske mase prije projektiranja temeljnih konstrukcija radi osiguranja stabilnosti i sigurnosti građevinskih objekata.

Ključne riječi: geotehnička karakterizacija, stijenska masa, temeljne konstrukcije, istražno bušenje, geofizičke metode istraživanja.

Abstract:

Accurate characterization of underlying soil ensures the durability and reliability of construction structures. This master's thesis presents geotechnical characterization of rock mass for the purpose of building foundations. In addition to the basic principles of rock foundation, the thesis provides an overview on geotechnical and geophysical investigation methods used for rock mass characterization. Geotechnical methods, such as exploratory drilling with sampling, enable the collection of information on the physical and mechanical properties of rock masses. On the other hand, geophysical methods provide non-invasive ways to characterize rock mass based on physical properties, such as seismic wave velocity or electrical resistivity. The combination of these research methods allows engineers to make right decisions and to select appropriate foundation types as well as to adapt structural design. The procedures for geotechnical characterization are presented on practical examples from survey locations in the town of Pazin and the island of Korčula. The conclusion emphasizes the importance of geotechnical characterization of rock mass prior to designing foundation structures in order to ensure stability and safety of construction projects.

Keywords: geotechnical characterization, rock mass, foundation structures, exploratory drilling, geophysical investigation methods

Sadržaj

| | |
|---|----|
| 1. UVOD..... | 1 |
| 2. OSNOVNI PRINCIPI TEMELJENJA NA STIJENSKOJ MASI | 2 |
| 2.1. PLITKI I DUBOKI TEMELJI | 2 |
| 2.2. OTPORNOST STIJENSKE MASE..... | 4 |
| 2.3. INŽENJERSKO-GEOLOŠKI UVJETI TEMELJENJA | 5 |
| 3. METODE ISTRAŽIVANJA I KLASIFIKACIJE STIJENSKE MASE ZA POTREBE TEMELJENJA | 6 |
| 3.1. INŽENJERSKE KLASIFIKACIJE STIJENSKIH MASA | 6 |
| 3.1.1. RMR klasifikacija..... | 8 |
| 3.1.2. GSI klasifikacija | 11 |
| 3.2. GEOTEHNIČKI ISTRAŽNI RADOVI | 12 |
| 3.2.1. Istražne bušotine..... | 12 |
| 3.2.2. DPL sondiranje..... | 14 |
| 3.2.3. Schmidtov čekić | 15 |
| 3.3. GEOFIZIČKA ISTRAŽIVANJA | 17 |
| 3.3.1. Geoelektrične metode..... | 18 |
| 3.3.2. Seizmičke metode..... | 22 |
| 3.3.3. Georadar | 28 |
| 4. PRIMJERI ISTRAŽIVANJA I KARAKTERIZACIJE STIJENSKE MASE ZA PROJEKTIRANJE TEMELJNIH KONSTRUKCIJA | 31 |
| 4.1. GEOTEHNIČKA ISTRAŽIVANJA ZA POTREBE TEMELJENJA TRGOVAČKOG CENTRA U PAZINU | 31 |
| 4.1.1. Geološki opis lokacije | 31 |
| 4.1.2. Geofizička istraživanja | 33 |
| 4.1.3. Geotehničke značajke tla..... | 36 |
| 4.1.4. Klasifikacija stijenske mase | 38 |
| 4.2. GEOTEHNIČKA ISTRAŽIVANJA ZA POTREBE TEMELJENJA SUPERMARKETA PLODINE NA KORČULI | 40 |
| 4.2.1. Geološki opis lokacije | 40 |
| 4.2.2. Geofizička istraživanja | 41 |
| 4.2.3. Geotehničke značajke tla..... | 44 |
| 4.2.4. Klasifikacija stijenske mase | 44 |
| 5. ZAKLJUČAK..... | 46 |
| LITERATURA | 47 |
| POPIS SLIKA | 49 |
| POPIS TABLICA | 50 |
| POPIS PRILOGA | 50 |
| PRILOZI..... | 51 |

1. UVOD

Karakterizacija stijenske mase za potrebe temeljenja građevine ima ključnu ulogu u osiguravanju stabilnosti i sigurnosti građevinskog objekta. Na temelju rezultata karakterizacije stijenske mase, inženjeri mogu odrediti prikladne metode temeljenja za građevinu. To može uključivati odabir odgovarajuće vrste temelja i prilagodbu konstrukcijskog dizajna kako bi se osigurala stabilnost i sigurnost građevine.

Karakterizacija geomedija za potrebe temeljenja uključuje upotrebu geotehničkih i geofizičkih metoda istraživanja. Geotehničke metode uključuju terenska ispitivanja i laboratorijske analize uzoraka tla ili stijene. Geofizičke metode koriste se za neinvazivno karakteriziranje temeljne podloge posredstvom mjerenja fizikalnih svojstava.

U svrhu karakterizacije stijenske mase za temeljenje građevina, geofizičke i geotehničke metode istraživanja pružaju informacije o svojstvima stijenske mase na terenu. Tako se na temelju izmjerenih fizikalnih veličina, poput brzine seizmičkih valova ili električne otpornosti, interpretira geološka građa i mogu se procijeniti pojedina mehanička svojstva stijenske mase. Često se geofizička istraživanja upotpunjuju geotehničkim istražnim bušenjem, uzorkovanjem i laboratorijskim analizama stijena. Ove metode onda još omogućuju inženjerima da bolje upoznaju geološke formacije, sastav stijenske mase, njezinu poroznost, vodopropusnost, čvrstoću i druge relevantne parametre. Na temelju svih navedenih podataka mogu se izvući zaključci o mehaničkim svojstvima stijenske mase i identificirati potencijalni rizici koji prijete stabilnosti temelja.

Cilj ovog diplomskog rada je pružiti sveobuhvatan pregled metoda karakterizacije stijenske mase za projektiranje temeljnih konstrukcija. Kroz detaljnu analizu geotehničkih i geofizičkih metoda istraživanja, istražiti će se njihova primjena i relevantnost na odabranim lokacijama u gradu Pazinu i na otoku Korčuli.

2. OSNOVNI PRINCIPI TEMELJENJA NA STIJENSKOJ MASI

Zadatak temelja je prijenos opterećenja iz objekta u tlo, tj. u stijensku masu, a da pritom ne uzrokuje slom stijenske mase. Temelji kao dio inženjerske konstrukcije osiguravaju da slijeganja budu podjednaka, odnosno u granicama prihvatljivosti za gornju konstrukciju. Naprezanja na stijenskoj masi uzrokuje sama građevina. Prilikom dimenzioniranja temelja, potrebno je uzeti u obzir međudjelovanje buduće građevine i temeljnog tla.

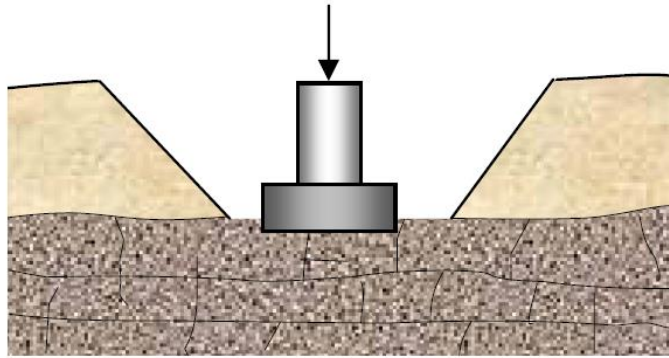
U usporedbi s tlom, stijenska masa je čvršća i manje deformabilna. Prilikom temeljenja lakših konstrukcija, stijenska masa je obično dovoljno nosiva, što znači da su vrijednosti slijeganja zanemarive.

S druge strane, opterećenja koja uzrokuju veće i teže građevine mogu premašiti nosivost same stijenske mase, pa time i slijeganja mogu biti veća [1].

2.1. PLITKI I DUBOKI TEMELJI

Temeljenje općenito dijelimo na plitko i duboko temeljenje. Duboko temeljenje primjenjujemo kada je dobro nosivo tlo, tj. stijenska masa na većim dubinama, te je potrebno korištenje specijalne mehanizacije, alata i strojeva za njegovu primjenu.

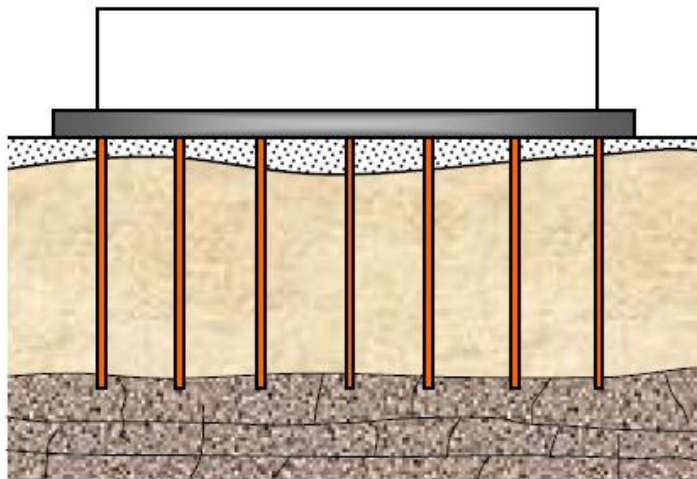
Najčešće korišteni sustav dubokog temeljenja je temeljenje na pilotima. Piloti su vertikalni strukturni elementi koji spadaju u složene geotehničke konstrukcije. Oni svojom duljinom dosežu odgovarajuću dubinu temeljnog tla i prenose proračunska djelovanja [2].



Slika 1. Plitki temelji [3]

Na Slici 1. prikazana je metoda plitkog temeljenja u širokom iskopu, gdje se posebna pozornost obraća na stabilnosti kosina građevne jame. Temelj je ukopan do dubine gdje se nalazi stijenska masa koja je dovoljno nosiva za postojeći objekt.

Na Slici 2. prikazana je metoda dubokog temeljenja, točnije temeljenje na zabijenim ili bušenim pilotima, kako bi se opterećenja mogla prenositi dublje u stijensku masu [3].



Slika 2. Duboko temeljenje [3]

2.2. OTPORNOST STIJENSKE MASE

Prilikom temeljenja građevina koje prenose relativno mala opterećenja u stijensku masu, granična otpornost se procjenjuje iz iskustvenih tablica koje se nazivaju graditeljski kodovi. Spomenuti kodovi pružaju podatke o graničnoj otpornosti ovisno o vrsti stijene i geološkim uvjetima stijenske mase, indeksom RQD ili vrijednosti bodova prema nekim klasičnim sustavima za klasifikaciju stijenskih masa (RMR ili Q) [4].

Kada je riječ o homogenim i kontinuiranim stijenskim masama, slom se ispod plitkog temelja događa zbog dosezanja posmične čvrstoće izotropne stijenske mase. Međutim, ako se radi o diskontinuiranim stijenskim masama, slom može biti uzrokovan strukturom ili položajem diskontinuiteta u odnosu na temelj, što znači da ne postoji jednostavan analitički pristup za izračun granične otpornosti.

Kada se radi o jače razlomljenoj stijenskoj masi, koriste se teorije iz mehanike tla kako bi se procijenila granična otpornost zbog sličnosti mehanizma sloma plitkog temelja i sloma u tlu. U takvim situacijama, granična otpornost se može odrediti korištenjem metoda koje koriste parametre čvrstoće i deformabilnosti stijenske mase ili probnim opterećenjem. Iako je probno opterećenje najpouzdanija, ujedno je i najskuplja metoda određivanja otpornosti temelja na stijenskoj masi.

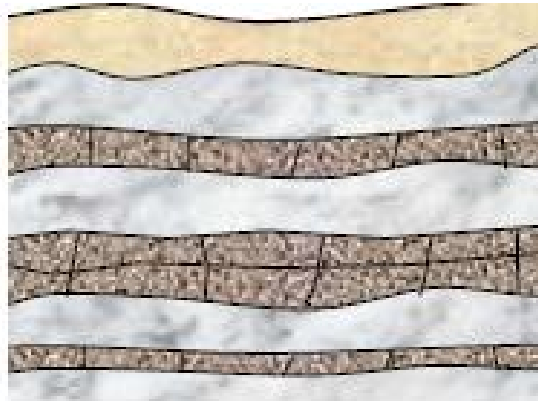
U slučaju slabo cementiranih sedimentnih i poroznih stijena, lom se javlja zbog kolapsa strukture pora. S druge strane, kod čvrstih i lomljivih stijena, mehanizam loma uključuje širenje pukotina koje su najslabija točka tih stijena kada su izložene vlačnom naprezanju.

Prilikom dubokog temeljenja, granična otpornost pilota definira se kao suma dviju otpornosti – otpor trenja koji se javlja na plaštu pilota i otpor bazi pilota. Piloti koji se oslanjaju samo na stijensku masu i prolaze kroz slabo stišljivo tlo ne mogu pružiti dovoljan otpor na plaštu zbog nedovoljne vertikalne deformacije. Stoga se granična otpornost dubokog temelja oslonjenog na stijensku masu računa samo na osnovici pilota [1].

2.3. INŽENJERSKO-GEOLOŠKI UVJETI TEMELJENJA

Idealni uvjeti za temeljenje građevina su osigurani kada tlo pokriva stijensku masu koja je približno ravno, odnosno horizontalno uslojena. Ukoliko površina stijenske mase nije ravna, te je samu površinu stijenske mase teško utvrditi, teže je odrediti dubinu temeljenja. Upravo područja u kršu karakteriziraju vrlo nepravilni oblici površine stijena, nepredvidljive razine podzemnih voda te skrivene šupljine.

Ako se stijenska masa sastoji od izmjenjujućih slojeva čvrstih stijena i slabih stijena, kao što je vidljivo na Slici 3., slojevi čvrste stijene mogu stvarati probleme prilikom izvođenja pilota.



Slika 3. Fliš [3]

Temeljenje je otežano prisutnošću rasjeda koji mogu biti ispunjeni stišljivom ispunom. Razlika u deformacijskim svojstvima između materijala u rasjedu i okolne stijenske mase često uzrokuju velika diferencijalna slijeganja građevine. Ispucanost stijene uzrokuje značajno smanjenje njezine nosivosti, te može dovesti do povećanog slijeganja.

Stijenska masa koja u sebi sadrži nestabilne i bubreive materijale može predstavljati ozbiljne probleme. Potrebno je obratiti pažnju i na slučajeve da stijenska masa može proizvesti spojeve koji mogu štetno djelovati na beton [3].

3. METODE I ISTRAŽIVANJA I KLASIFIKACIJE STIJENSKE MASE ZA POTREBE TEMELJENJA

3.1. INŽENJERSKE KLASIFIKACIJE STIJENSKIH MASA

Kvaliteta stijenske mase ocjenjuje se RQD indeksom, tj. indeksom kvalitete stijene kojeg su 1967. godine razvili Deere i suradnici [5]. RQD indeksom označavamo stupanj pukotina u stijenskoj masi mjeren u postocima, a računa se prema Izrazu 1.:

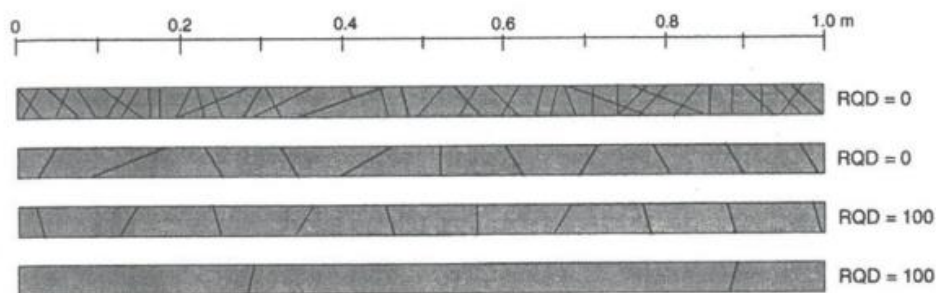
$$RQD = \frac{\sum \text{ukupna dužina dijelova jezgre} > 100\text{mm}}{\text{ukupna dužina jezgre}} \cdot 100\% \quad (1)$$

Ocjene kvalitete stijenske mase RQD indeksom prikazane su u Tablici 1.

Tablica 1. Ocjena kvalitete stijenske mase RQD indeksom [1]

| RQD (%) | KVALITETA STIJENSKE MASE |
|----------|--------------------------|
| < 25 | VRLO LOŠA |
| 25 – 50 | LOŠA |
| 50 – 75 | PRIHVATLJIVA |
| 75 – 90 | DOBRA |
| 90 – 100 | IZVRSNA |

Zbog ovisnosti o smjeru bušenja i činjenice da RQD indeks za različita stanja razlomljenosti stijene daje iste ocjene (Slika 4.), uvedene su nove inženjerske klasifikacije stijenske mase kod koje se može dobiti realnija slika stijenske mase, gdje je RQD indeks samo jedan od promatranih parametara [1].



Slika 4. Iste vrijednosti RQD-a kod različitih stanja jezgre stijenske mase [1]

Različite inženjerske klasifikacije stijenskih masa uključuju nekoliko klasifikacijskih parametara kojima se pridružuje odgovarajuća numerička vrijednost. Konačna ocjena odabrane stijenske mase dobiva se zbrajanjem pridruženih numeričkih vrijednosti za svaki od parametara.

Cilj inženjerskih klasifikacija je objediniti najbitnije parametre i opisati ih numeričkim vrijednostima kako bi inženjeri mogli lakše komunicirati i analizirati ponašanja određenih stijenskih masa.

Klasifikacije koje se baziraju na većem broju parametara daju bolju sliku o proučavanom objektu, no pri stvaranju klasifikacijskog sustava mora se postići balans između broja parametara, kako bi koristili samo one parametre koji imaju najbitniji utjecaj na samo stanje stijenske mase.

Neki od najpoznatijih sustava za klasificiranje stijenske mase su:

- Terzaghijeva klasifikacija, 1946 [6].
- Laufferova klasifikacija, 1958 [7].
- RSR (Rock Structure Rating), Wickeham i dr, 1972 [8].
- Geomehanička klasifikacija (RMR – Rock Mass Rating), Bieniawski, 1973 [4].
- Q klasifikacija (Rock Tunneling Quailty Indeks, Q), Barton, 1974 [9].
- GSI klasifikacija (Geological Strenght Indeks), Hoek & Marinos, 1998 [10].

Prilikom primjene klasifikacijskih sustava potrebno je stijensku masu podijeliti na strukturne regije, gdje se svaka regija klasificira odvojeno. Granice pojedinih zona se podudaraju sa glavnim morfološkim svojstvima stijene (npr. rasjedi ili granice različitih tipova stijena).

3.1.1. RMR klasifikacija

RMR ili geomehaničku klasifikaciju je razvio Bieniawski 1973. godine. Geomehanička klasifikacija je tijekom godina mijenjala vrijednosti određenih parametara, te postoje dvije najbitnije verzije RMR klasifikacije koje se koriste u literaturi.

Najčešće korištena verzija RMR klasifikacije je ona iz 1989. godine, a koristi šest parametara stijenske mase [4]:

- 1) Jednoosnu tlačnu čvrstoću intaktne stijene
- 2) Indeks kvalitete stijenske mase (RQD indeks)
- 3) Razmak diskontinuiteta
- 4) Stanje diskontinuiteta, zadan kao:
 - Duljina diskontinuiteta
 - Odvajanje diskontinuiteta
 - Glatkoća diskontinuiteta
 - Ispuna diskontinuiteta
 - Promjena / trošenje diskontinuiteta
- 5) Stanje podzemnih voda
- 6) Orijehtacija diskontinuiteta

Svi navedeni parametri se mogu mjeriti in situ, tj. mogu se dobiti i iz bušotinskih podataka. Ocjene svakog od ovih parametara se sumiraju kako bi se dobila vrijednost RMR-a.

Stijenska masa na kojoj primjenjujemo RMR klasifikaciju je podijeljena na više zona u kojima su određene geološke značajke više ili manje ujednačene. Svaki od gore navedenih parametara određuje se za svaku podijeljenu zonu stijenske mase [11]. Nakon određivanja klasifikacijskih parametara, ocjene se dodjeljuju svakom pojedinom parametru prema Tablici 2.

Tablica 2. RMR - geomehanička klasifikacija [3]

| Klasifikacijski parametri i njihovi bodovi | | | | | | | | | |
|---|--|---|---|---|---|---|--|----------|----------|
| Parametri | | | Vrijednosti parametara | | | | | | |
| 1 | Čvrstoć a 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 kontinuiran i Zijev = 0 mm Zidovi nisu rastrošeni | Neznatno hrapave površine Zijev < 1 mm Stijena u zidovima neznatno rastrošena | Neznatno hrapave površine Zijev < 1 mm Stijena u zidovima jako rastrošena | Skliski ili ispuna < 5 mm debljine Zijev 1-5 mm Kontinuiran i | Mekana ispuna <5 mm debljine ili Zijev > 5 mm Kontinuiran i | | |
| | Bodovi | | 15 | 10 | 7 | 4 | 0 | | |
| 5 | Podzemna voda | Dotok na 10m duljine tunela (l/m) | nema | <10 | 10-25 | 25-125 | >125 | | |
| | | Odnos tlaka pukotinski e 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 | | |
| Korekcija bodova s obzirom na orijentaciju diskontinuiteta | | | | | | | | | |
| Orijentacija diskontinuiteta | | | Vrlo povoljna | Povoljna | Dobra | Nepovoljna | Vrlo nepovoljna | | |
| Bodovi | Tuneli i rudnici | | 0 | -2 | -5 | -10 | -12 | | |
| | Temelji | | 0 | -2 | -7 | -15 | -25 | | |
| | Kosine | | 0 | -5 | -25 | -50 | -60 | | |

Zbrajanjem bodova dobiva se ukupna ocjena, tj. ukupna RMR vrijednost, koja se korigira s obzirom na orijentaciju diskontinuiteta, gdje se, ukoliko je potrebno, oduzimaju bodovi s obzirom na povoljnost orijentacije diskontinuiteta.

Prema ukupnom broju bodova prikazanom u Tablici 3., stijenska masa se u geomehaničkoj klasifikaciji svrstava u određenu kategoriju. U tablici se nalaze i približne vrijednosti parametara posmične čvrstoće prema Mohr – Coulombovom kriteriju.

Tablica 3. Kategorije stijenske mase prema RMR klasifikaciji [3]

| Ukupni bodovi | Oznaka kategorije | Opis | Približne vrijednosti parametara posmične čvrstoće stijenske mase prema MC kriteriju | |
|---------------|-------------------|------------|--|------------------|
| | | | c (kPa) | $\phi(^{\circ})$ |
| 100-81 | I | VRLO DOBRA | > 400 | > 45 |
| 80-61 | II | DOBRA | 300-400 | 35-45 |
| 60-41 | III | POVOLJNA | 200-300 | 25-35 |
| 40-21 | IV | SLABA | 100-200 | 15-25 |
| <21 | V | VRLO SLABA | <100 | <15 |

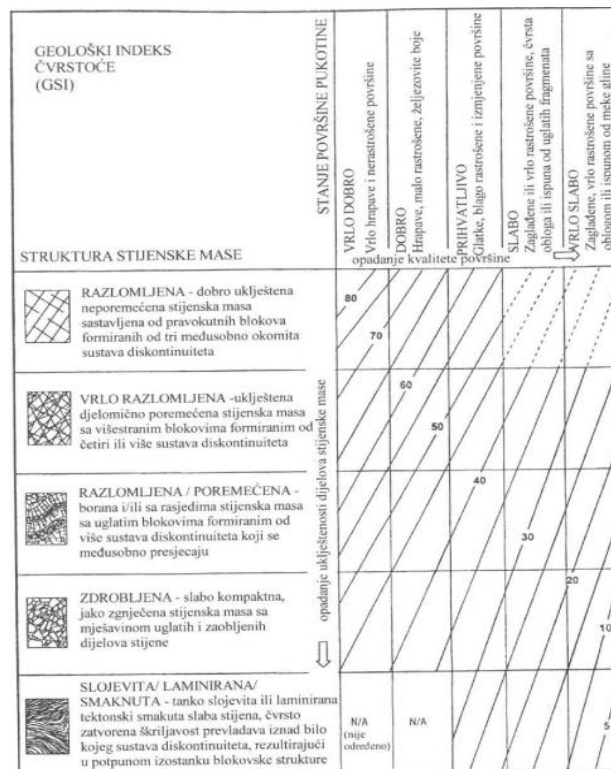
RMR klasifikacija se s vremenom počela koristiti kao polazna točka za određivanje geomehaničkih parametara stijenske mase, te ima široku uporabu u temeljenju, tunelogradnji i rudarstvu [3].

3.1.2. GSI klasifikacija

GSI označava geološki indeks čvrstoće, a samu klasifikaciju predložili su 1994. godine Hoek [12], te Hoek i Brown [13] 1997. godine. No, sama klasifikacija bavila se čvrstim stijenama, te je bila ekvivalentna RMR klasifikaciji. Godinu dana kasnije, 1998. godine, E. Hoek i P. Marinos razvili su GSI sustav koji primjenjujemo i danas. U svoju klasifikaciju su uključili stijenske mase loše kvalitete, te proširili njegovu primjenu na heterogene stijenske mase.

Srž GSI klasifikacije je pažljiv inženjersko-geološki opis stijenske mase, koji je kvalitativan, jer se smatralo da ocjene u RMR i Q klasifikacijama nisu vjerodostojne za slabe, raspucale i heterogene stijenske mase. GSI klasifikacija nije zamjena za RMR ili Q klasifikaciju, već joj je funkcija samo procjena svojstava stijenske mase.

GSI klasifikacija temelji se na procjeni litologije, strukture i stanja diskontinuiranih površina u stijenskoj masi i procjenjuje se vizualnim pregledom stijenske mase [14]. Na Slici 5. može se vidjeti dijagram za procjenu geološkog indeksa čvrstoće.



Slika 5. GSI klasifikacija [1]

3.2. GEOTEHNIČKI ISTRAŽNI RADOVI

Geotehničke metode istraživanja omogućuju dobivanje podataka o tlu ili stijeni koji određuju njihov sastav, kvalitetu, prostiranje, fizikalno – mehanička svojstva i slično. Geotehnički istražni radovi objedinjuju znanja i tehnike istraživanja iz inženjerske geologije, mehanike tla i mehanike stijena.

Inženjersko geološki istražni radovi imaju za cilj izradu geoloških i geotehničkih profila tla u kojima se materijali klasificiraju prema određenom klasifikacijskom sustavu, gdje su istaknuta njihova važna svojstva. Geotehnički profil je model koji prikazuje kako se mehanička svojstva tla i stijena prostorno raspoređuju. Ovi podaci važni su za stabilnost, uporabljivost i ekonomičnost građevine i okolnog prostora tijekom i nakon gradnje građevine. U geotehničkom elaboratu dokumentiraju se rezultati terenskih i laboratorijskih mjerenja.

Geotehnički istražni radovi mogu biti vrlo skupi, pa nastojimo dobiti što više informacija iz prethodnih ispitivanja. Sama geotehnička istraživanja uključuju istražne bušotine, terenska (in situ) istraživanja i laboratorijske analize [15].

3.2.1. Istražne bušotine

Istražne bušotine se koriste u geotehničkim istraživanjima lokacija kao učinkovita metoda uzorkovanja materijala u velikim dubinama, uz minimalan utjecaj na okoliš. Bušotine omogućavaju pristup opremi za geotehničko ispitivanje dublje u tlo, omogućujući mjerenja i praćenja podzemne vode, pornog tlaka, propusnosti, pomaka tla, čvrstoće materijala, in situ naprezanja i slično.

Zajedno s podacima dobivenim drugim metodama, podzemni geološki i geotehnički podaci dobiveni bušenjem bušotina koriste se za izradu geotehničkog modela [16].

Metode bušenja istražnih bušotina kod stijenskih masa može se podijeliti na:

- Rotacijska metoda bušenja
- Udarna metoda bušenja
- Kombinirana (udarno – rotacijska) metoda bušenja.

Rotacijsko bušenje daje najkvalitetnije rezultate, jer se nakon bušenja kompletni alat za bušenje i uzorak stijene izvlače na površinu. Izvađena jezgra stijene se slaže po dubini u sanduke (Slika 6.) radi daljnjeg pregleda i uzimanja uzoraka za ispitivanja u laboratoriju, te izrade elaborata.



Slika 6. Fotodokumentacija istražne bušotine B-3 (0-4 m) za potrebe temeljenja trgovačkog centra u Pazinu

Podaci o geološkoj građi terena, stupnju zbijenosti materijala te razine podzemnih voda na istražnom prostoru dobivaju se iz zbirnih podataka dobivenih istraživanjem u više bušotina.

Ukoliko je potrebno identificirati samo uzorak stijene, tj. dovoljni su nam poremećeni uzorci stijene za klasifikacijska ispitivanja, koristimo metode bušenja bez jezgrovanja koje su znatno brže i jeftinije od bušenja s jezgrovanjem [17].

Raspored i broj istražnih bušotina ovisi o nekoliko faktora, uključujući veličinu i vrstu planirane građevine, troškovima istražnih radova i svojstvima tla na gradilištu. Skup normi EN 1997 Eurokod / za geotehnička projektiranja, knjiga 2, HRN EN 1997-2:2012 pruža primjere i smjernice za razmake i dubinu istraživanja.

Za samostalne temelje ili temeljne trake, dubina istraživanja iznosi između jedne i tri širine temelja ispod temeljne plohe. Međutim, često se istraživanje izvodi i na većim dubinama kako bi se obuhvatili slojevi koji mogu utjecati na slijeganje temelja ili probleme s vodom. U ovom procesu veliku važnost ima izvođenje nekoliko bušotina većih dubina.

Prilikom istraživanja stijenskih masa, ciljevi bušotina su dobivanje uzorak stijenske jezgre dovoljne kvalitete kako bi se procijenilo stanje terena na kojem će se graditi građevina. Istražnim bušotinama možemo dobiti podatke o orijentaciji, vrsti i debljini slojeva, podatke o sustavu pukotina i rasjeda u stijenskoj masi, te podatke o stanju podzemnih voda.

Podaci o podzemnim vodama važni su nam za procjenu međudjelovanja između podzemnih voda, stijene i građevinskog materijala.

3.2.2. DPL sondiranje

Dinamičko prodiranje (DP) je metoda koja se primjenjuje kontinuirano sa definiranom masom udarnog sklopa na određenim razmacima zabijanja. Ovisno o energiji udara, koriste se različiti postupci. Rezultati dinamičkog prodiranja u kombinaciji s uzorcima dobivenim bušenjem koriste se za profiliranje tla. ova metoda se često primjenjuje za utvrđivanje dubine vrlo zbijenih slojeva temeljnog tla i podloge.

Četiri glavna postupka dinamičkog prodiranja su DPL, DPM, DPH, DPSH-A i DPSH-B. Osnovne razlike između ovih postupaka odnose se na visinu pada, masu utega i dimenzije šiljka.

Za mekša tla do dubine od 8 do 10 metara, odabrat će se sonde s manjim specifičnim radom po udarcu, DPL (lagani dinamički penetrometar).

Kada se dinamička penetracija izvodi zajedno s istražnom bušotinom, važno je osigurati dovoljan razmak između kako bi se izbjegao mogući utjecaj na rezultate. Proces penetracije se kontinuirano provodi kroz tlo. Proces prodiranja se provodi kontinuirano na duljini od 1 metra po šipki, a nakon toga se dodaje nova šipka kako bi se nastavio proces. Prije pričvršćivanja nove šipke, mjeri se zakretni moment koji proizlazi iz trenja između tla i šiljka, odnosno tla i penetracijskih šipki. Kako bi se mjerio zakretni moment,

koristi se momentni mjerač u obliku zakretnog ključa koji se postavlja na vrhu posljednje šipke u nizu.

Nakon mjerenja na terenu, proučava se broj udaraca potrebnih za prodor šiljka u tlo na određenoj dubini. Analizom rezultata, istražuje se veza između broja udaraca i različitih svojstava tla, kao što su gustoća, konzistencija, modul stišljivosti i slično [15].

3.2.3. Schmidov čekić

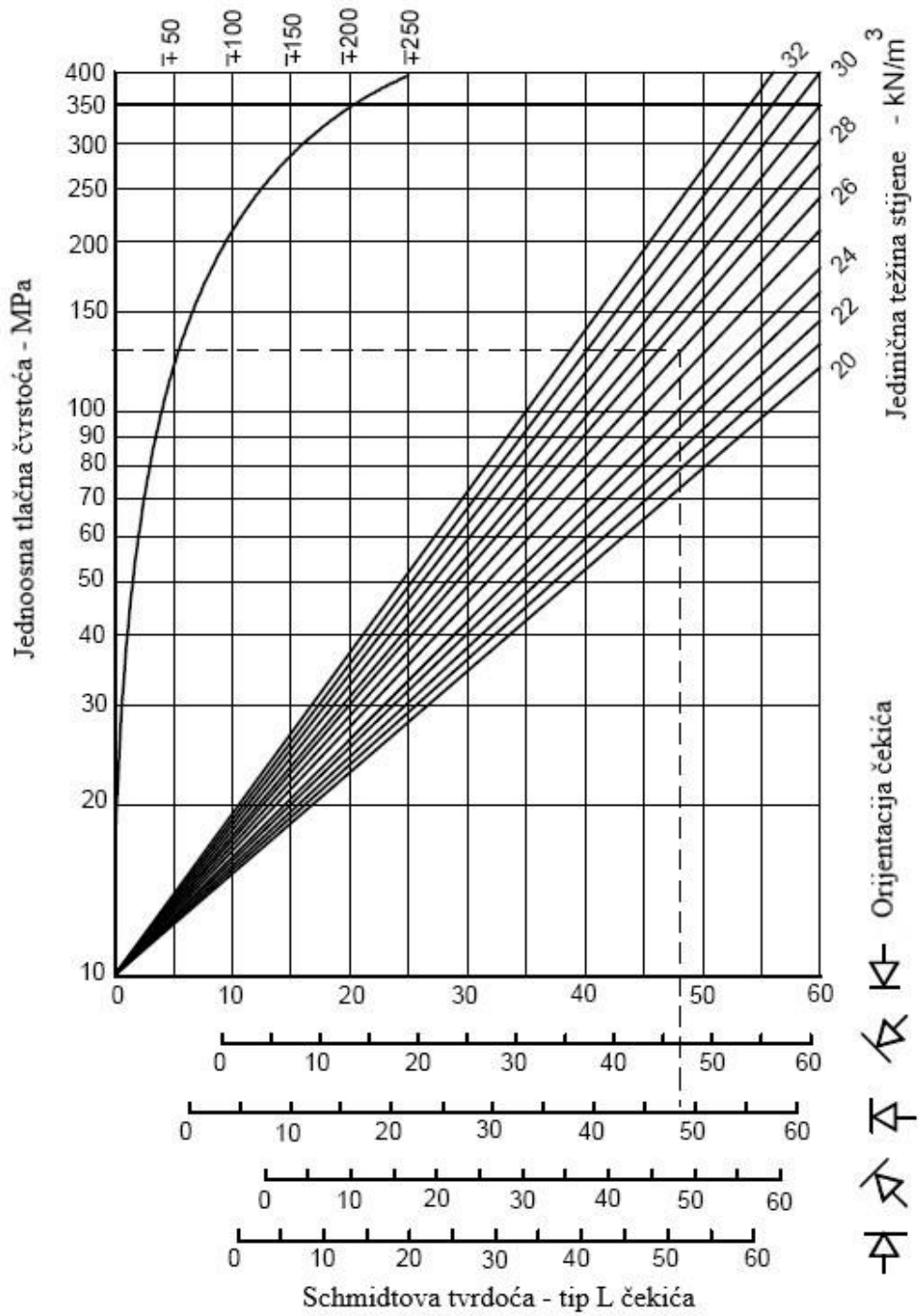
Schmidov čekić razvijen je za nedestruktivno in situ ispitivanje betona. U mehanici stijena koristi se za procjenu jednoosne tlačne čvrstoće i Youngovog modula stijenskih masa.

U praksi se koriste Schmidovi čekići tipa L i N za stvaranje različitih energija udarca. Energija udara kod L tipa Schmidovog čekića iznosi 0,735 Nm, dok kod čekića N tipa iznosi 2,207 Nm.

Schmidov čekić pomoću utega na opruzi udara u čelični klip koji je u dodiru s površinom stijene koju ispitujemo. Tvrdoća materijala predstavlja vrijednost koju uteg nakon udara postigne u odskoku u odnosu na njegov ishodišni položaj. Visina odskoka će biti veća ukoliko je veća tvrdoća same ispitane stijene.

Međunarodno društvo za mehaniku stijena (ISRM) preporuča provođenje pokusa u skupinama od deset ispitivanja po jedinici površine, uz isključenje pet najnižih vrijednosti rezultata i računanje srednje vrijednosti pet najviših vrijednosti očitavanja. Schmidov čekić potrebno je kalibrirati na čeličnom nakovnju prema uputama koji preporuča proizvođač. Kako bi se izračunala konačna vrijednost odskočne tvrdoće, potrebno je pomnožiti mjerodavnu vrijednost odskoka s korekcijskim faktorom. Da bi se dobio korekcijski faktor, potrebno je izračunati omjer vrijednosti odskoka i prosječne vrijednosti dobivene iz 10 ispitivanja na čeličnom nakovnju za kalibraciju. Jednoosnu tlačnu čvrstoću procjenjujemo pomoću dijagrama (Slika 7). Schmidov čekić koristi se za mjerenje i ispitivanja površinskog sloja stijene, do dubine od 30 mm [15].

Srednja disperzija čvrstoće za većinu
stijena - MPa



Slika 7. Dijagram korelacije tlačne čvrstoće i odskoka Schmidtovog čekića [15]

3.3. GEOFIZIČKA ISTRAŽIVANJA

Točna procjena čvrstoće stijenske mase ključna je za uspjeh inženjerskih projekata. Nosivost stijenske mase uglavnom ovisi o heterogenosti stijenske mase i geomehaničkim svojstvima. Točna procjena kvalitete stijenske mase težak je zadatak u geotehničkim istraživanjima.

Glavni parametar u klasifikaciji kvalitete stijenske mase je RQD koji nam ocjenjuje opću stabilnost stijenske mase. Za određivanje mehaničkih parametara stijene koriste se konvencionalni pristupi bušenja. Tehnike bušenja često ne ispunjavaju zahtjeve inženjera, budući da takva ispitivanja mogu pružiti samo informacije u jednoj točki, zahtijevaju više opreme i ne mogu se provoditi u strmim topografskim područjima.

Kako bi smanjili broj skupih bušotina, te pouzdano ocijenili kvalitetu stijenske mase, često se koriste geofizičke metode istraživanja stijenske mase koje su u usporedbi s tradicionalnim geotehničkim istraživanjima jeftinije, brže, jednostavnije i nedestruktivne [18].

Korištenjem geofizičkih metoda u geotehničkoj praksi dobivaju se geofizički parametri, a ne direktno geotehnički parametri. Ove metode oblikuju sliku podzemnog stanja koja se često značajno razlikuje od slike dobivene istražnim bušenjem.

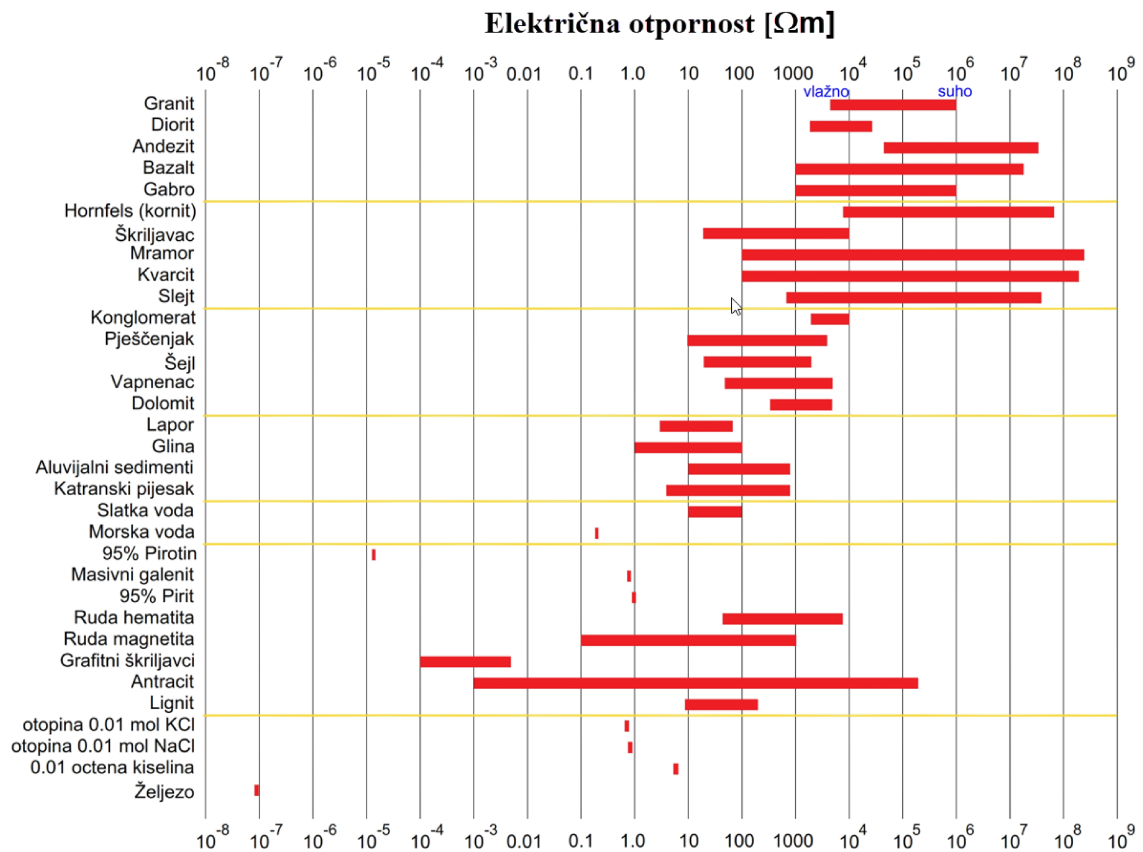
U područjima poput geotehnike, građevinarstva i zaštite okoliša, geofizičke metode koriste se za procjenu dinamičke deformabilnosti tla i stijena. Relevantni podaci odnose se na dubine do nekoliko desetaka metara. Budući da se istražuje relativno plitki dubinski raspon, to ograničava područje istraživanja, ali istovremeno povećava učinkovitost primjene in situ i bušotinskih istraživanja. Npr. geofizičke seizmičke metode temelje se na brzini širenja uzdužnih (P) i posmičnih (S) valova [15].

3.3.1. Geoelektrične metode

Geoelektrične metode primjenjuju se za utvrđivanje raspodjele električne otpornosti potpovršinskog tla. Otpornost tla ovisi o mineralnom sastavu, porozitetu, stupnju saturacije vodom i drugim faktorima. Geoelektrična istraživanja se koriste u plićim istraživanjima u područjima geotehnike, rudarstva, hidrologije i inženjerstva okoliša.

Mjerna jedinica geoelektrične otpornosti ρ je ommetar [Ωm]. Recipročna vrijednost električne otpornosti je električna vodljivost σ , a mjeri se u simensima po metru [S/m]. Električna vodljivost mjeri sposobnost materijala da provodi električnu struju.

Visoke vrijednosti električne otpornosti obično su prisutne u eruptivnim i metamorfnim stijenama, dok su sedimentne stijene obično manje otporne (Slika 8).



Slika 8. Električna otpornost nekih stijena, tla i minerala [15]

U Tablici 4. prikazane su specifične otpornosti i vodljivosti nekih stijena.

Tablica 4. Električna otpornost i vodljivost stijena [15]

| Stijene | Otpornost [Ωm] | Vodljivost [S/m] |
|------------|--------------------------------|---|
| Granit | $5 \cdot 10^3 - 10^6$ | $10^{-6} - 2 \cdot 10^{-4}$ |
| Bazalt | $10^3 - 10^6$ | $10^{-6} - 10^{-3}$ |
| Škriljac | $6 \cdot 10^2 - 4 \cdot 10^7$ | $2,5 \cdot 10^{-8} - 1,7 \cdot 10^{-3}$ |
| Mramor | $10^2 - 2,5 \cdot 10^8$ | $4 \cdot 10^{-9} - 10^{-2}$ |
| Kvarc | $10^2 - 2 \cdot 10^8$ | $5 \cdot 10^{-9} - 10^{-2}$ |
| Pješčenjak | $8 - 4 \cdot 10^3$ | $2,5 \cdot 10^{-4} - 0,125$ |
| Šejl | $20 - 10^3$ | $5 \cdot 10^{-4} - 0,05$ |
| Vapnenac | $50 - 10^2$ | $2,5 \cdot 10^{-3} - 0,02$ |

Geološke sredine su često heterogene, što znači da se materijali razlikuju u svojim električnim svojstvima. Zbog toga će prividni otpor koji se mjeri geoelektričnim ispitivanjima imati neku prosječnu vrijednost unutar zahvaćene dubine. Ova prosječna vrijednost ovisi o otporima materijala i njihovoj raspodijeli po dubini, kao i o razmacima između elektroda koje se koriste u ispitivanju.

Postoje različiti rasporedi elektroda koji se koriste u geoelektričnim ispitivanjima, a neki od njih su:

- Wennerov mjerni raspored
- Schlumbergerov mjerni raspored
- Troelektrodni mjerni raspored
- Peteroelektrodni mjerni raspored
- Pol – pol
- Dipol – dipol
- Pol – dipol

Wennerov raspored elektroda je vrlo jednostavan i u njemu su razmaci između susjednih elektroda jednaki (Slika 9). Ovaj raspored koristi strujne elektrode (C1 i C2) na krajevima (gdje se ubrizgava struja) te potencijalne elektrode (P1 i P2) na sredini rasporeda gdje se bilježi rezultirajući napon. Wennerov mjerni raspored elektroda omogućuje istraživanje srednjih dubina, otprilike polovice razmaka između elektroda (udaljenosti „ d “).

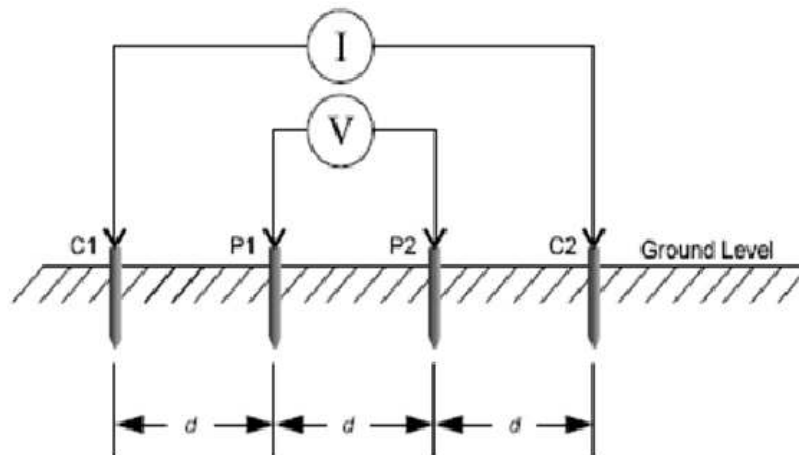
Jačina signala koji se mjeri ovim rasporedom je obrnuto proporcionalna geometrijskoj konstanti K koja se izračunava prema posebnim formulama koje su različite za svaki raspored elektroda.

Geometrijski faktor K za Wennerov raspored računa se prema Izrazu 2.:

$$K = 2 \cdot \pi \cdot d \quad (2)$$

Konstanta K za Wennerov raspored je manja nego za druge rasporede, što znači da je signal pojačan u odnosu na ostale rasporede. To može biti vrlo korisno u područjima s velikim šumovima i smetnjama [15].

Omjer jakosti električne struje I i napona U daje prividni otpor podzemne stijene u Ωm [19].



Slika 9. Wennerov mjerni raspored [20]

3.3.1.1. Geoelektrična tomografija

ERT (*eng. Electrical Resistivity Tomography*) je geoelektrična metoda kojom se istražuju električne otpornosti stijena na površini. Koristi se u složenim podzemnim istraživanjima u situacijama kada standardne električne metode nisu prihvatljive.

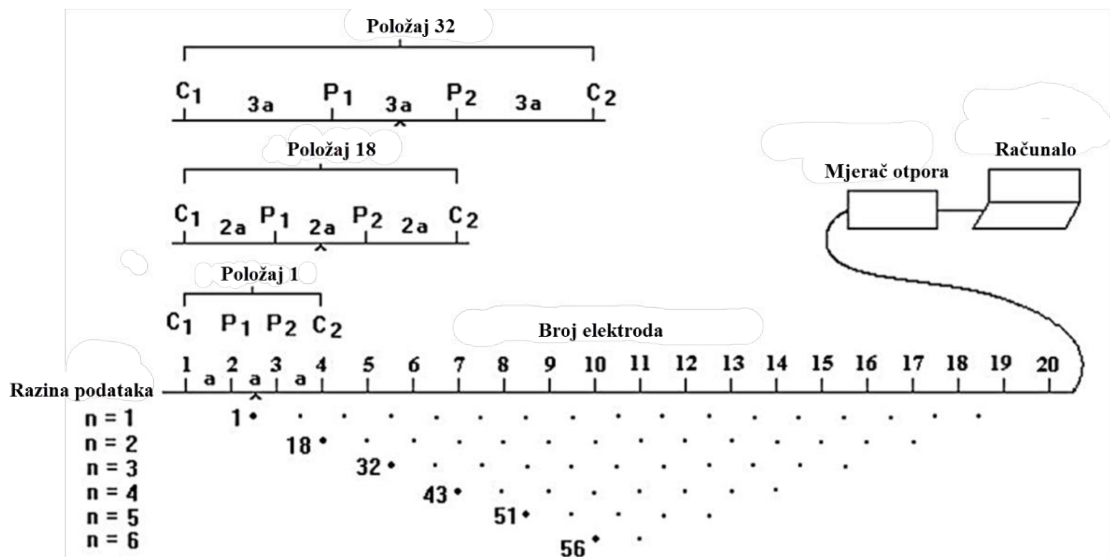
Mjerenja se automatski provode uzduž profila s jednako udaljenim elektrodama, što omogućuje visoku prostornu rezoluciju. Vršiti se više mjerenja otpora duž cijelog profila, a na svakom mjerenju se povećava razmak elektroda. 2-D električna tomografija temelji se na mjerenju jakosti struje koja teče kroz tlo između strujnih elektroda. Na taj način dobiva se dvodimenzionalna raspodjela otpora, koja pokazuje izmjerene vrijednosti u odnosu na razmak elektroda.

Kako bi se vrijednostima pripisala dubina, primjenjuje se tomografska inverzija, koja pretvara izmjerene (prividne) otpore u prave otpore i povezuje ih s dubinom.

Rezultat je dvodimenzionalni profil otpora, koji predstavlja aproksimaciju prave raspodjele otpora u tlu. Tumačenje tomograma obično se potkrepljuje bušotinama [19].

2-D geoelektrična istraživanja uzimaju u obzir vertikalne i horizontalne promjene otpornosti te su preciznija od 1-D istraživanja. 3-D istraživanja pružaju najdetaljniji i najprecizniji prikaz podzemlja, no ona su vrlo skupa i zahtijevaju posebnu opremu i veliki broj mjerenja za koje treba više vremena.

Slika 10. prikazuje postupak mjerenja Wennerovim rasporedom s 20 elektroda koje su međusobno udaljene za 1a. postupak počinje provođenjem mjerenja pomoću elektroda 1, 2, 3 i 4. Točka mjerenja nalazi se na sredini između elektrode 2 i 4. Iduće mjerenje provodi se pomoću elektroda 2, 3, 4 i 5, te se postupak ponavlja za svaku sljedeću elektrodu u nizu. U drugom koraku se provode mjerenja pomoću elektroda koje su međusobno udaljene 2a, a postupak se ponavlja za svaku sljedeću grupu elektroda koje su međusobno udaljene 3a, 4a, 5a i 6a. Mjerenja se izvode automatski i podaci se pohranjuju u memoriju računala [15].



Slika 10. 2-D geoelektrična tomografija (Wennerov raspored elektroda) [15]

3.3.2. Seizmičke metode

Seizmičke metode su učinkoviti način istraživanja podzemlja i stijena te se koriste u različitim područjima inženjerstva, uključujući geotehniku, geologiju, rudarstvo, građevinarstvo i inženjerstvo okoliša.

Osnovno načelo svih seizmičkih metoda je kontrolirano generiranje elastičnih valova od strane seizmičkog izvora kako bi se dobila slika podzemlja. Seizmički valovi (Slika 11) su impulsi deformacijske energije koji se šire u čvrstim tijelima i tekućinama. Seizmički izvori energije (bilo na Zemljinoj površini ili u plitkim bušotinama) proizvode valove poznate kao:

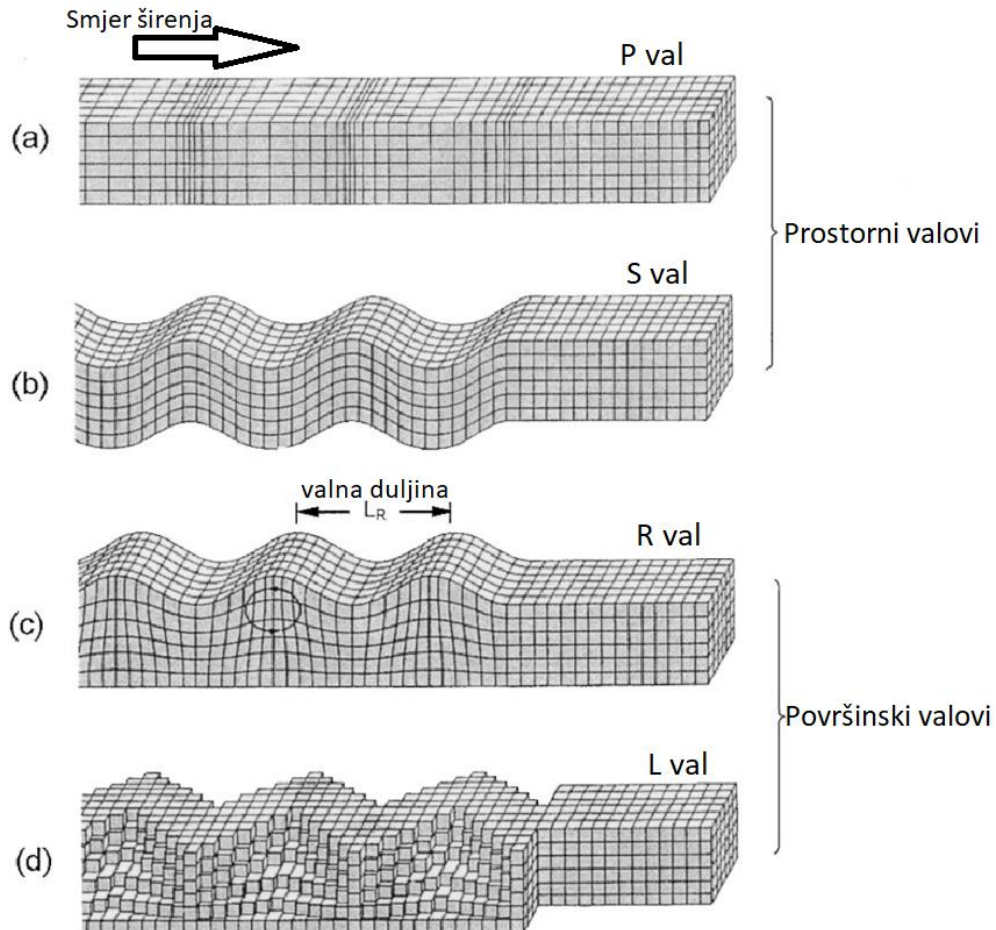
- prostorni: P i S valovi (primarni i sekundarni valovi), gdje je prijenos energije u svim smjerovima
- površinski: L i R valovi (Loweovi i Rayleighovi valovi), gdje energija putuje duž ili blizu površine

U plitkoj seizmici su od najvećeg interesa dvije vrste tjelesnih valova:

- P – valovi (primarni, longitudinalni valovi ili kompresijski) s gibanjem čestica paralelno sa smjerom širenja

- S – valovi (sekundarni, posmični ili transverzalni valovi) s gibanjem čestica okomito na smjer širenja. S valovi važni su za čvrste geomedije

Površinski valovi, koji se često smatraju izvorom buke, sadrže vrijedne informacije o svojstvima materijala plitkog tla. Njihova uporaba je u porastu u inženjerskim studijima.



Slika 11. Vrste seizmičkih valova [21]

Brzina seizmičkih valova najosnovniji je parametar u seizmičkim metodama. Ovisi o elastičnim svojstvima kao i nasipnoj gustoći medija i varira s mineralnim sadržajem, litologijom, poroznošću, zasićenošću tekućinom u porama i stupnjem zbijenosti.

P – valovi uglavnom imaju veću brzinu od S – valova. S – valovi se ne mogu širiti u tekućinama jer tekućine ne podnose smično naprezanje.

Tijekom širenja u podzemlju, seizmički valovi se reflektiraju, lome ili difragiraju kada se pojave elastični kontrasti na granicama između slojeva i stijenskih masa različitih svojstava stijena (seizmičke brzine ili zapreminske gustoće) ili na preprekama koje je napravio čovjek.

Snimanje seizmičkih valova koji se vraćaju iz podzemlja na površinu omogućuje donošenje zaključaka o strukturama i litološkom sastavu podzemlja. Mjerenjem vremena putovanja seizmičkih valova i određivanjem njihovih specifičnih brzina za materijal, može se konstruirati geološki model podzemlja.

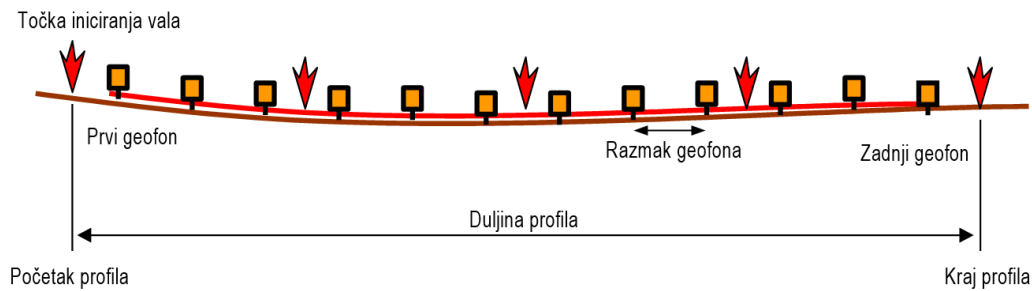
Seizmički odziv istovremeno bilježi više prijamnika (geofona). Geofoni su postavljeni duž ravnih linija profila (2-D seizmika) ili preko područja u 3-D seizmičkom istraživanju. Geofoni su povezani seizmografom koji bilježi signale pojedinačnih ili skupine geofona [22].

Postoji nekoliko vrsta seizmičkih metoda, a to su seizmička refrakcija i refleksija koje su neinvazivne metode, MASW i SASW metode snimanja površinskih valova i UP HOLE, DOWN HOLE i CROSS HOLE – invazivne metode koje se obavljaju kroz bušotine.

3.3.2.1. Seizmička refrakcija

Metoda seizmičke refrakcije jedna je od seizmičkih geofizičkih metoda koja se koristi za određivanje karakteristika tla i stijena. Seizmička refrakcija nalazi primjenu u određivanju svojstava stijena za inženjersku primjenu kao što su dubina do temeljne stijene, istraživanja podzemnih voda, čvrstoće i litologije tla.

Seizmička refrakcija temelji se na mjerenju vremena putovanja seizmičkih valova lomljenih na sučeljima između podzemnih slojeva. Na terenu, postupak seizmičke refrakcije započinje odabirom linije na kojoj će se postaviti seizmički izvori i receptori. Seizmički izvor poput čekića koji udara na čeličnu ploču postavlja se na određenoj udaljenosti od geofona koji bilježe seizmičke valove koji putuju kroz tlo. Geofoni pretvaraju vibracije tla u električne signale, koji se snimaju, a zatim obrađuju i analiziraju kako bi se izračunale brzine širenja seizmičkih valova kroz različite slojeve tla. Na Slici 12. može se vidjeti skicu postavljenog profila seizmičke refrakcije.



Slika 12. Skica postavljenog profila seizmičke refrakcije [15]

Ova metoda omogućuje određivanje brzina elastičnih valova u uslojenom tlu i stijeni kao funkciju dubine, što omogućuje jasno definiranje kontura geoloških formacija i dubine do kontakata materijala s različitim mehaničkim svojstvima. Metoda precizno mjeri vrijeme seizmičkih valova koji putuju od izvora do sloja različite gustoće. Seizmički val putuje po tom sloju i vraća se na površinu do geofona koji su raspoređeni duž refrakcijskog profila [15, 23].

Snellov zakon opisuje kako se zrake P i S valova ponašaju pri prolazu kroz granicu između dva sloja različitih seizmičkih brzina.

Odnos između kutova upadnih, reflektiranih i refraktiranih zraka i njihovih brzina možemo prikazati Izrazom 3.:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{V_1}{V_2} \quad (3)$$

gdje je:

i – upadni val [°]

r – reflektirani/refraktirani val [°]

Seizmička refrakcija može se podijeliti u nekoliko tipova, a odabir tipa ovisi o specifičnim ciljevima istraživanja. Najčešće se koristi tip koji se temelji na analizi prvih nailazaka P – valova, no mogu se analizirati i prvi nailasci S – valova.

Prilikom detekcije poremećaja na nizu geofona, pažnja se usmjerava samo na direktan ili refraktirani val. Zbog toga je u seizmičkim istraživanjima refrakcije glavni naglasak na detekciji prvih poremećaja na geofonima, a udaljenost između izvora i geofona, te vremena nailaska koristimo za interpretaciju dubine refrakcijskih slojeva.

Seizmički valovi imaju veće brzine u stijenama nego u tlu, no podzemna voda kod nekoherentnih tla uzrokuje porast brzine P – valova. Prosječne brzine P i S valova prikazane su u Tablici 5.

Tablica 5. Prosječne brzine P i S valova i gustoće određenih geomedija [15]

| Vrsta geomedija | Vp | Vs | Gustoća [Mg/m ³] |
|--------------------------|-------------|-------------|---------------------------------|
| | [m/s] | [m/s] | |
| Zrak | 330 | – | – |
| Čista voda | 1450 – 1510 | – | 1 |
| Riječna i jezerska voda | 1430 – 1680 | – | – |
| Morska voda | 1460 – 1530 | – | – |
| Površinski materijal | 300 – 600 | – | – |
| Granit | 4000 – 6100 | 2150 – 3350 | 2,67 |
| Gabro | 6550 | 3450 | 2,98 |
| Bazalt | 5600 | 3050 | 3 |
| Dijabaz | 5500 – 7000 | 3000 – 4500 | 3 |
| Pješčenjak | 1800 – 4000 | 915 – 3000 | 2,45 |
| Šejl | 2500 – 4250 | 1000 – 3000 | 2,6 |
| Vapnenac | 2000 – 6100 | 1800 – 3800 | 2,65 |
| Glina | 1100 – 2500 | 580 | 1,4 |
| Pijesak, šljunak | 300 – 800 | 100 – 500 | 1,7 |
| Pijesak, šljunak (mokri) | 1500 – 2700 | 900 – 1600 | 1,93 |
| Lapori | 1800 – 3900 | 1050 – 2300 | 2,35 |

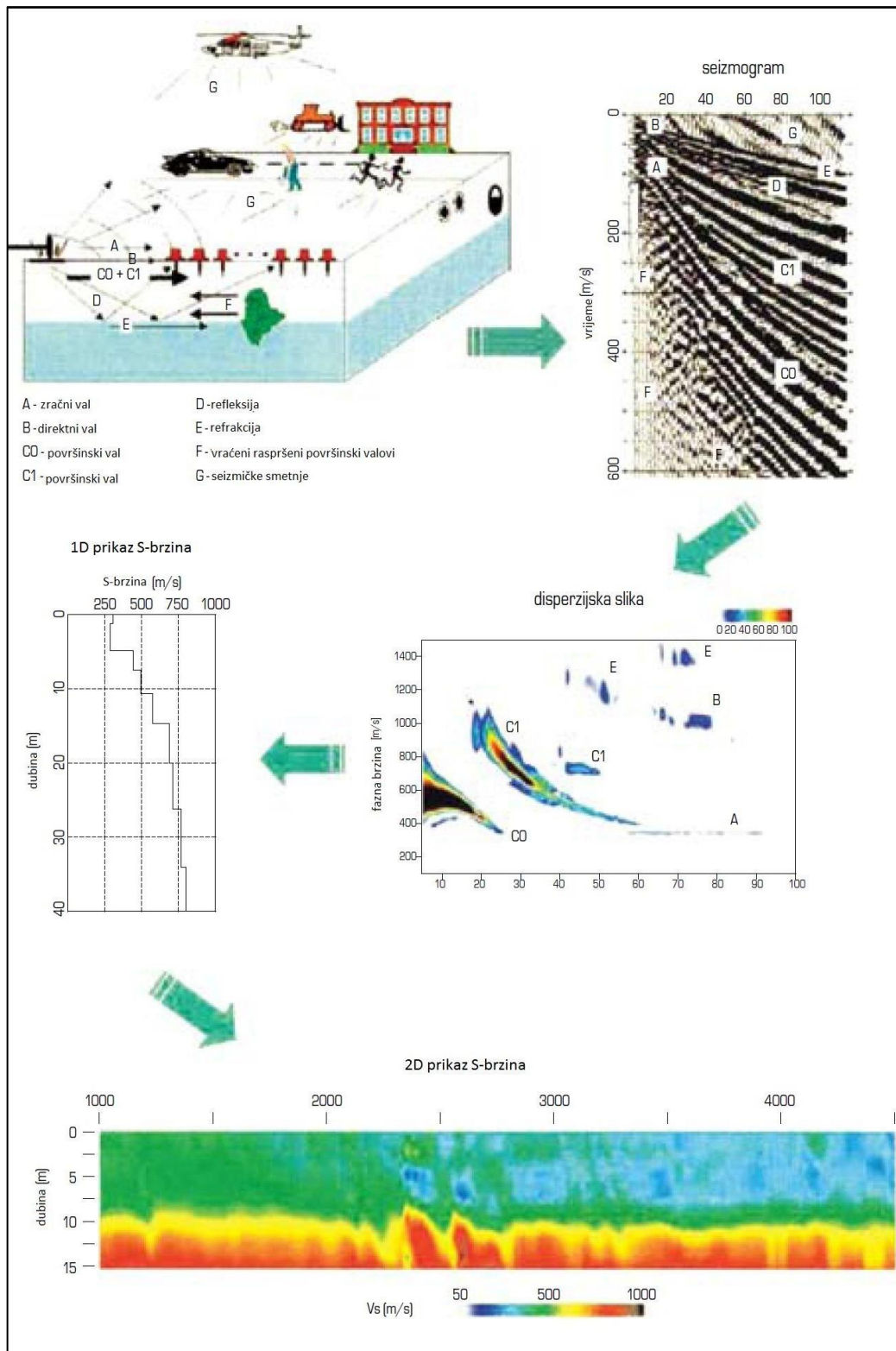
3.3.2.2. MASW metoda

Konvencionalni seizmički pristupi za istraživanje blizu površine obično su bila refleksijska ili refrakcijska istraživanja visoke rezolucije koja se bave rasponom dubina od nekoliko desetaka do nekoliko stotina metara. Seizmički signali ovih istraživanja sastoje se od valova sa frekvencijama višim od 50 Hz.

Metoda višekanalne analize površinskih valova (MASW) bavi se površinskim valovima na nižim frekvencijama (npr. 1-30 Hz) i koristi mnogo manji dubinski raspon istraživanja (do nekoliko desetaka metara). Ova metoda se primjenjuje u istraživanju različitih geotehničkih problema, a može se koristiti u obliku sondiranja (1-D), tomografije (2-D) ili modeliranje stvarnosti (3-D).

Aktivna MASW metoda aktivno generira površinske valove kroz izvor udara kao što je malj, dok pasivna metoda koristi površinske valove generirane pasivno kulturnim (npr. promet) ili prirodnim (npr. grmljavina) aktivnostima. Dubina istraživanja kod aktivne

metode obično je manja od 30 m , dok kod pasivne može doseći nekoliko stotina metara. Na Slici 13. može se vidjeti prikaz mjerenja i analize podataka pomoću aktivne MASW metode.



Slika 13. Primjer mjerenja i analize podataka pomoću aktivne MASW metode [15]

Kod MASW metode, izvor generira mehaničke vibracije koje se prenose kroz tlo kao površinski valovi. Tijekom mjerenja geofoni snimaju podatke. Da bi se dobila dodatna informacija o brzinama površinskih valova s dubinom, seizmički izvor se pomiče na druge pozicije duž geofonske linije. Postupak snimanja završava se nakon što su snimljeni svi potrebni podaci na terenu.

Kod snimljenih podataka prvo se otklanjaju šumovi i neželjene smetnje. Disperzijskom analizom podataka dobiva se disperzijska krivulja, koja prikazuje brzine površinskih valova u ovisnosti o frekvenciji. Na temelju disperzijske krivulje modeliraju se brzine površinskih valova u različitim dubinama. To omogućuje stvaranje modela podzemne strukture koja nam služi za interpretaciju rezultata.

Glavna prednost MASW-a je njegova sposobnost da u potpunosti uzme u obzir kompliciranu prirodu seizmičkih valova koji uvijek sadrže valove šuma kao što su neželjeni viši oblici površinskih, prostornih, raspršenih i prometnih valova. Seizmička refrakcija je osjetljiva na buku i bučna područja što rezultira potrebom za duljim vremenom prikupljanja podataka i detaljnijom obradom u usporedbi s MASW metodom[15, 24].

3.3.3. Georadar

GPR (*eng. Ground Penetrating Radar*) ili georadar (Slika 14.) je metoda podzemnog snimanja koja daje informacije visoke razlučivosti do dubine obično od 0 do 10 m, iako su u nekim geološkim okruženjima moguće dubine do 40 m. Tehnika je nedestruktivna i neinvazivna, koristi elektromagnetske valove male snage s frekvencijama u rasponu od 10 MHz do 4 GHz.



Slika 14. Georadar i princip istraživanja metodom georadara [15]

Georadar se može primijeniti za širok raspon zadataka inspekcije, na primjer za otkrivanje ukopanih priključaka (cijevi, kabeli), za inspekciju slojeva na cestama i željeznicama, za detaljno mapiranje čelične armature u betonskim konstrukcijama, a u novije doba dolazi i do primjene GPR uređaja u građevinarstvu i geotehnici za određivanje debljine slojeva geomedija itd. [25].

Metoda georadara omogućuje dobivanje informacija putem refleksije elektromagnetskih valova na granici dviju sredina s različitim električnim svojstvima. Georadar koristi antene za prijem i odašiljanje kratkih elektromagnetskih impulsa u tlo. Antene se sastoje od odašiljača i prijammika, a mnogi georadari dolaze s više setova antena kako bi se mogle ispitivati različite dubine tla i vrste geomedija. Postupak prikupljanja podataka i njihova obrada slični su seizmičkim metodama, ali se razlikuju u izvoru, fizikalnoj prirodi i frekvenciji valova. Dobiveni rezultati prikazuju se kao radargram, na kojem se na x osi prikazuje udaljenost duž profila, a na y osi dubina. Hiperbola na radargramu nam ukazuje na pojavu anomalija u tlu, koje se mogu razlikovati po obliku.

Mjerenje na terenu započinje pritiskom gumba za snimanje, što rezultira emitiranjem valova u geomedij. Antena prima odraze (refleksije) tih impulsa od različitih slojeva i objekata unutar tla. Tijekom mjerenja sustav generira elektromagnetsku energiju, a rezultat je radargram. Podaci se pohranjuju u memoriju na računalu, kako bi se kasnije mogli analizirati. Analiza podataka može uključivati filtriranje šuma, prikazivanje podataka u obliku profila te izradu modela podzemne strukture.

Brzina i prigušenje elektromagnetskih valova, koji su ključni faktori za opisivanje njihova širenja, ovise o dielektričnim svojstvima i otporu geomedija. U tlu ili stijenama brzina širenja elektromagnetskih valova računa se prema Izrazu 4.:

$$c_m = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (4)$$

gdje je:

c_m – brzina širenja EM valova

c – brzina EM valova u vakuumu (30 cm/ns)

ϵ_r – dielektrična konstanta

Dielektrična konstanta je fizikalna veličina koja opisuje sposobnost materijala da polarizira svoje atome u prisutnosti električnog polja. Odnosno, dielektrična konstanta

mjeri koliko se električni potencijal u materijalu mijenja u odnosu na vanjsko električno polje koje na njega djeluje. Različiti materijali imaju različite vrijednosti dielektrične konstante. U Tablici 6 prikazane su tipične vrijednosti dielektričnih konstanti za pojedine materijale kod 100 MHz odašiljačke antene.

Tablica 6. Vrijednosti dielektričnih konstanti, električne vodljivosti, brzina EM valova i prigušenja za pojedine materijale kod 100 MHz odašiljačke antene [15]

| Materijal | ϵ | G (mS/m) | C_m (m/ns) | A (dB/m) |
|--------------------|------------|----------|--------------|------------|
| Zrak | 1 | 0 | 0,3 | 0 |
| Destilirana voda | 81 | 0,01 | 0,033 | 0,002 |
| Slatka voda | 81 | 0,5 | 0,033 | 0,1 |
| Morska voda | 80 | 30 000 | 0,01 | 1000 |
| Suhi pijesak | 3 – 5 | 0,001 | 0,15 | 0,01 |
| Saturirani pijesak | 20 – 30 | 0,1–1 | 0,06 | 0,03 – 0,3 |
| Škriljevac | 5 – 15 | 1 – 100 | 0,09 | 1 – 100 |
| Prah | 5 – 30 | 1 – 100 | 0,07 | 1 – 100 |
| Glina | 5 – 40 | 2 – 1000 | 0,06 | 1 – 300 |
| Granit | 4 – 6 | 0,01 – 1 | 0,13 | 0,01 – 1 |
| Suha sol | 5 – 6 | 0,01 – 1 | 0,13 | 0,01 – 1 |
| Vapnenac | 4 – 8 | 0,5 – 2 | 0,12 | 0,4 – 1 |
| Led | 3 – 4 | 0,01 | 0,16 | 0,01 |

Manja frekvencija georadara ima veću dubinu prodiranja, ali manju rezoluciju. Tla s manjom vodljivošću su povoljnija za istraživanja georadarom od tla koja imaju visoku vodljivost [15].

4. PRIMJERI ISTRAŽIVANJA I KARAKTERIZACIJE STIJENSKE MASE ZA PROJEKTIRANJE TEMELJNIH KONSTRUKCIJA

4.1. GEOTEHNIČKA ISTRAŽIVANJA ZA POTREBE TEMELJENJA TRGOVAČKOG CENTRA U PAZINU

Za potrebe temeljenja trgovačkog centra s trafostanicom u Pazinu izvedeni su geotehnički istražni radovi. Cilj istraživanja bio je dobiti uvid u sastav i geotehničke karakteristike tla.

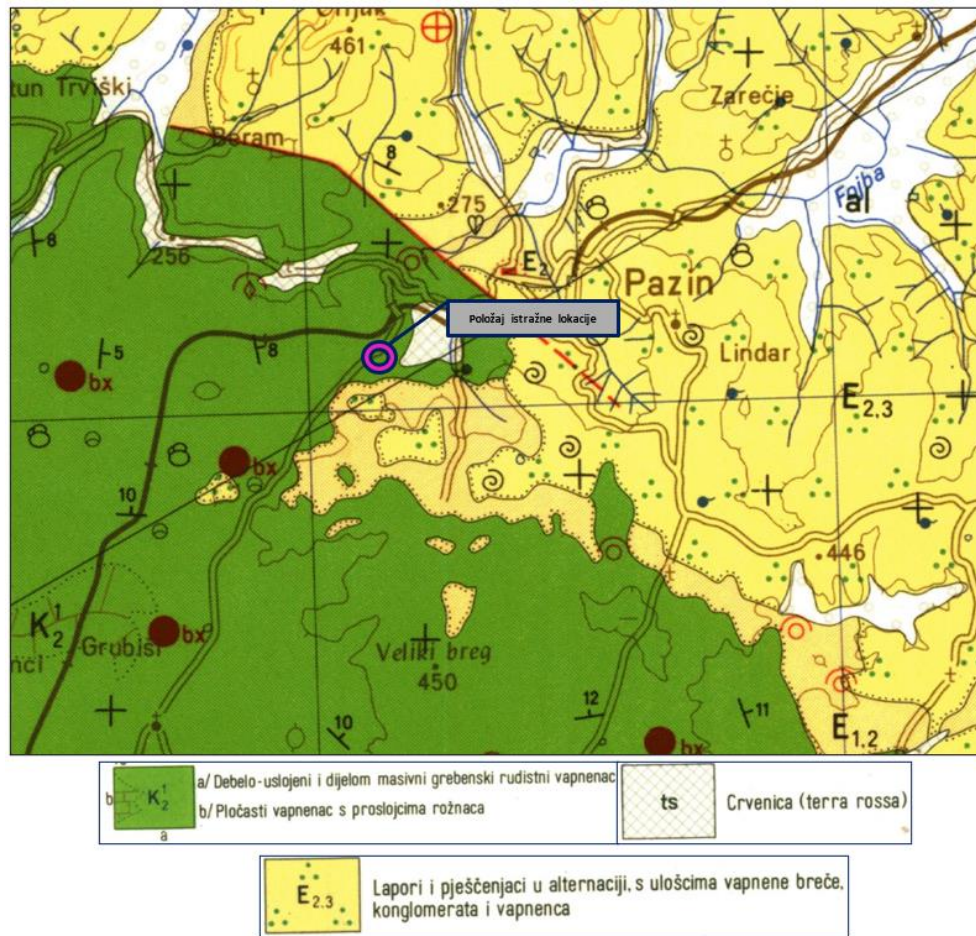
Na temelju programa istraživanja izvedene su četiri istražne bušotine (B-1, B-2, B-3, B-4), jedno snimanje električnom tomografijom (ERT-1), tri seizmička MASW profila (MASW-1, MASW-2, MASW-3), tri georadarska snimanja (GPR-1, GPR-2, GPR-3) i tri testiranja lakom udarnom sondom (DPL-1, DPL-2, DPL-3). Lokacije istražnih radova prikazane su u Prilogu 1.

4.1.1. Geološki opis lokacije

Cenomanske naslage (nastale prije približno 94 mil. godina) dolaze u ovo područje sa južnog susjednog područja Pule, gdje u području Glavana formiraju pojas širok 5 do 6 kilometara. Zatim se protežu približno u smjeru sjevera prema područjima Škrobotići, Katun, Pazin i Čubanići, gdje tonu pod paleogenske sedimente Pazinskog bazena. U tom području, cenomanske naslage se javljaju samo u uskim zonama u dubokim dolinama, kao što su potoci Martijanček i Morfini. Taj pojas se ponovo pojavljuje na površini ispod paleogena kod Karojbe i nastavlja se preko Vižinade sve do doline rijeke Mirne. Postoje određene razlike u litofacijalnom razvoju cenomanskih naslaga između područja južno od Žminja i područja Žminj – Pazin – Vižinada – Mirna.

U području južno od Žminja, najnoviji dio cenomanskih naslaga sastoji se od svijetlo smeđeg do bijelog brašnatog vapnenca, koji je tanko slojevit. Veći dio ove formacije zauzimaju debelo slojeviti rudistni vapnenci koji su svijetlosivi do bijele boje.

Debljina slojeva obično iznosi između 1 i 2 metra, a rijetko se pojavljuje masivni rudistni vapnenac.



Slika 15. Položaj istražene lokacije

4.1.2. Geofizička istraživanja

Pomoću P-valova izvršena je plitka seizmička refrakcija. Seizmički uređaj je bio sastavljen od 24 vertikalna geofona s frekvencijom od 4,5 Hz za snimanje P-valova, s razmakom između geofona od 2,0 i 3,0 m. Refrakcijska metoda ima ograničenja u smislu porasta brzine seizmičkih valova s dubinom, što znači da nije moguće razlučiti slojeve s nižom brzinom ispod slojeva s višom brzinom. Konačni rezultat se prikazuje kao grafikon brzina seizmičkih valova koji rastu s dubinom.

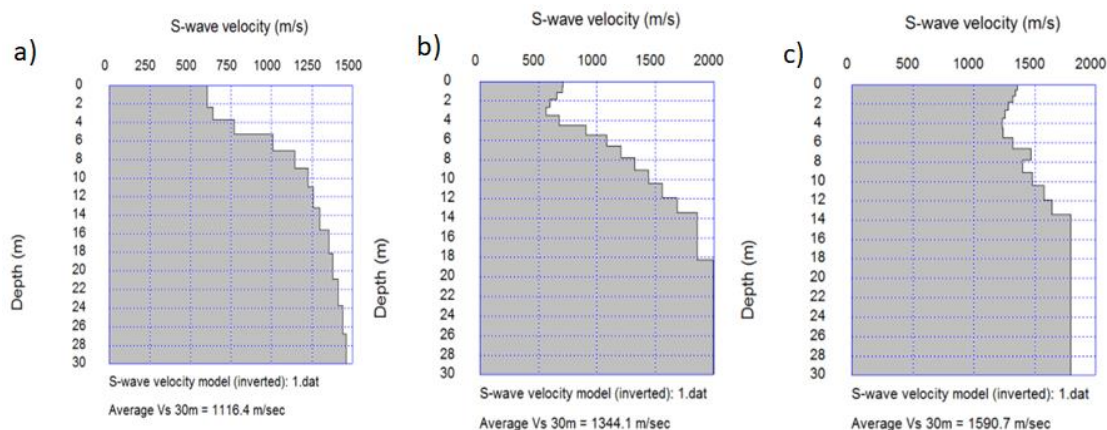
Za procjenu dinamičkih svojstava tla (V_s , $V_{s,30}$) korištena je MASW metoda. Seizmički se valovi u beskonačnom, homogenom i izotropnom mediju mogu širiti kao P i S prostorni valovi. Međutim, kada se približavaju granici polu-beskonačnog prostora, ovi valovi se transformiraju u površinske valove. Kada se za generiranje seizmičkih valova koriste vertikalni izvori poput čekića ili pada utega, nastaju površinski Rayleigh valovi (R-valovi) koji apsorbiraju većinu seizmičke energije izvora (R-valovi: 67%, S-valovi: 26%, P-valovi: 7%).

Najvažnije svojstvo R valova je disperzija, što znači da se valovi niže frekvencije (i veće valne duljine) šire dublje u geomediju od valova visoke frekvencije (i manje valne duljine). Fazna brzina određenog vala ovisi o frekvenciji i predstavlja brzinu kojom se ta frekvencija širi kroz medij. Krivulja koja prikazuje vezu između faze brzine i frekvencije naziva se krivulja faze brzine ili disperzijska krivulja. Za razliku od R-valova, prostorni P i S valovi nemaju disperzivno svojstvo.

Za snimanje MASW mjerenja korišten je dispozitiv koji se sastojao od 24 vertikalna geofona frekvencije 4,5 Hz, postavljenih na međusobnom razmaku od 1,0 m. Ovaj dispozitiv isti je kao i onaj koji se koristio za snimanje plitke seizmičke refrakcije. Pri interpretaciji MASW mjerenja koristi se osnovni, tj. fundamentalni mod.

Mjerene krivulje disperzije na mjestu gdje je postavljen dispozitiv za MASW profil interpretirane su pomoću računalne aplikacije Surf Imager. Na slikama su prikazani rezultati interpretacije MASW mjerenja, odnosno brzina posmičnih valova v_s po dubini sondiranog tla.

Slika 16. prikazuje rezultati interpretacije 1-D MASW profila, tj. 1-D prikaz brzina posmičnih V_s valova.



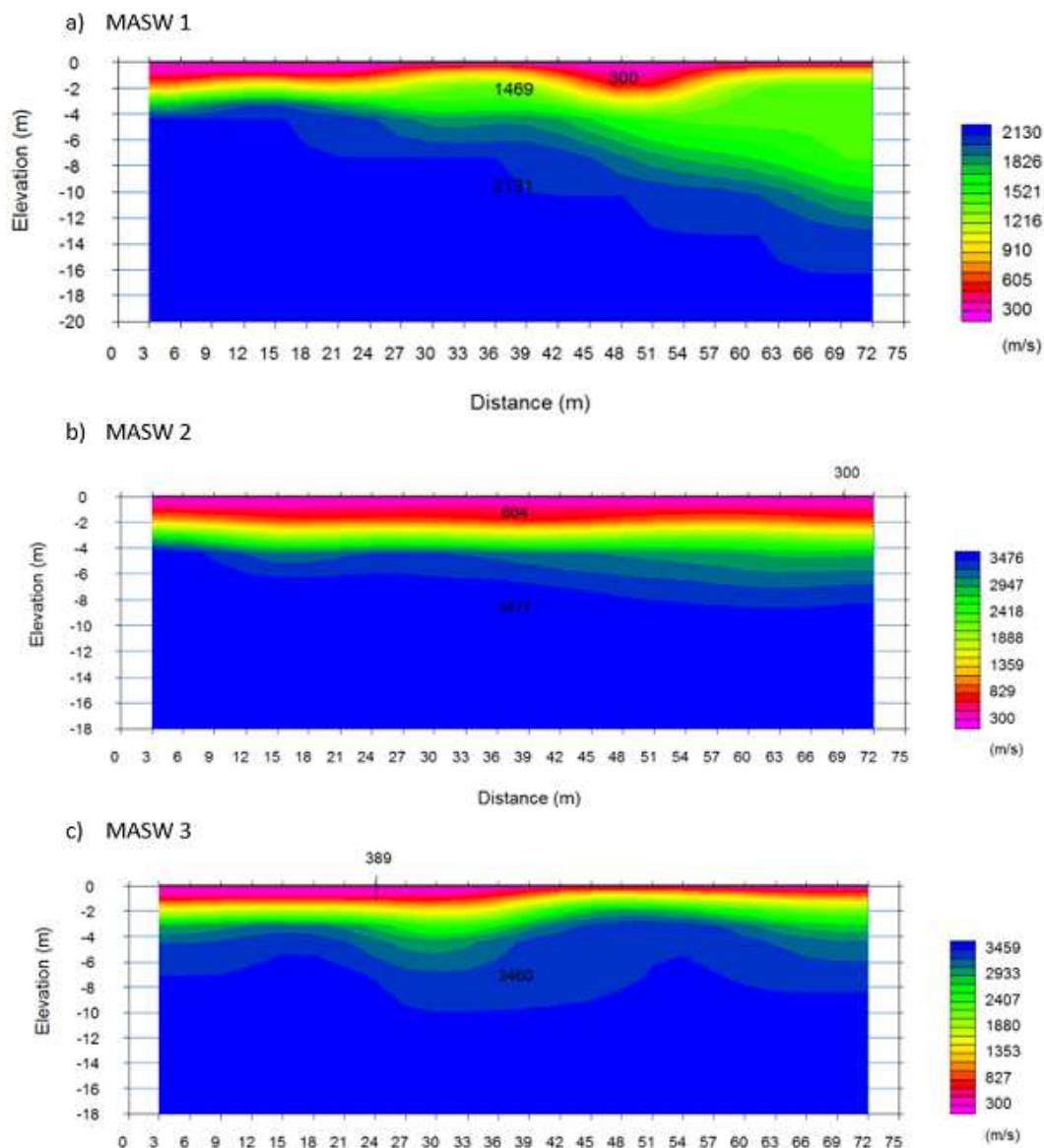
Slika 16. 1-D prikaz brzina posmičnih v_s valova, Pazin: a) MASW-1, b) MASW-2, c) MASW-3

Klasifikacija stijenske mase sukladno kategorizaciji tla prema seizmičnosti (Eurocode 8, HRN EN 1998-1:2008 en) pripada „A“ kategoriji tla prema seizmičnosti (Tablica 7.) [26].

Tablica 7. Kategorizacija tla prema seizmičnosti [26]

| Kat. tla | Opis profila tla | Parametri | | |
|----------|---|------------------|----------------------|-------------|
| | | $V_{s,30}$ (m/s) | NSPT (udaraca/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 krući materijal sa $v_{s,30}>800$ m/s | | | |

Na Slici 17. možemo vidjeti 2-D analize dobivene MASW metodom.

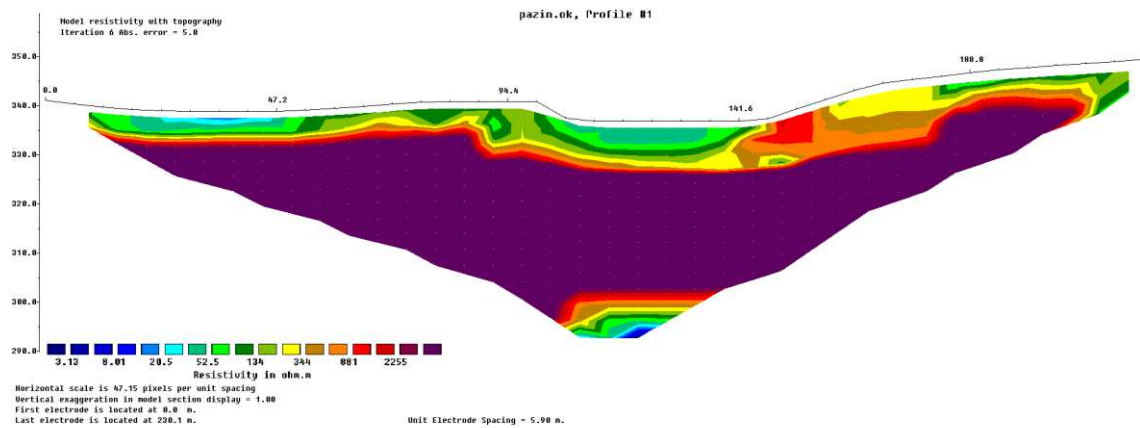


Slika 17. prikaz 2-D MASW profila – brzine v_p valova, Pazin: a) MASW 1 b) MASW 2 c) MASW 3

Iz prikaza 2-D MASW profila sa slike i očitanih brzina P-valova moguće je vidjeti i odrediti granice između mekanog tla i čvrste stijenske mase. Na temelju varijacija u brzinama posmičnih valova u različitim dubinama, moguće je identificirati granice između različitih slojeva u tlu. Prema Tablici 5. možemo pretpostaviti da se uglavnom na dubinama većim od 4 m, gdje brzine V_p prelaze 2100 m/s (plava boja) može pojaviti čvrsta stijena.

Rezultati 2-D geoelektrične tomografije prikazani su na Slici 18. Na temelju iskustvenih podataka i podataka iz sličnih geoelektričnih sredina, interpretirani su podaci geološke sredine u geoelektričnom profilu ERT-1.

Geoelektrična otpornosti ρ između 6 - 150 Ωm predstavlja glinoviti materijal, dok ρ u granicama od 500 – 3000 Ωm predstavlja stijenski materijal.



Slika 18. Prikaz geoelektrične tomografije, Pazin

4.1.3. Geotehničke značajke tla

Izvedene su četiri istražne bušotine: B – 1, B – 2, B – 3, B – 4. Bušotine B – 1 i B – 2 bušene su do dubine od 10 metara, bušotina B – 3 bušena je do dubine od 4 metara, a bušotina B – 4 do dubine od 12,5 metara. Na Slici 19. može se vidjeti fotodokumentaciju istraženih bušotina B – 2 i B – 4, dok je jezgra bušotine B-3 ranije prikazana na Slici 6. kao primjer.

Kod bušotine B – 2, na dubini do 1,3 metara nalazi se glina visoke plastičnosti, kruto plastične konzistencije crvene boje. Do dubine od 5 metara nabušena je jako okršena vapnenačka stijena, a pukotine su ispunjene glinom. RQD indeks između dubine 1,3 metara i 5 metara iznosi između 25% i 40%. Na dubini između 5 i 6 metara identificirana je srednje okršena vapnenačka stijena, a RQD indeks iznosi 90%. Između 6 i 8 metara nalazi se jako okršena vapnenačka stijena, pukotine su ispunjene glinom i iznos RQD indeksa je 25 – 40%. Na dubini između 8 i 10 metara zaliježe srednje okršena vapnenačka stijena gdje RQD indeks iznosi 70 – 90%.

Na lokaciji bušotine B – 4 glina visoke plastičnosti, kruto plastične konzistencije, crvene boje nalazi se do 1,7 metara dubine. Između dubine od 1,7 metara i 11,3 metara nabušena

je glina vrlo visoke plastičnosti, kruto plastične konzistencije crvene do žuto-crvene boje. Mjestimice sadrži veće odlomke stijene. Pri dnu intervala materijal je klasificiran kao prah vrlo visoke plastičnosti. Od dubine 11,3 metara pa sve do kraja bušotine (dubina 12,5 metara) nalazi se jako okršena stijena, gdje su pukotine ispunjene glinom. RQD iznosi između 25% i 40%.



Slika 19. Fotodokumentacija istražne bušotine B-2 (0-10 m) i istražne bušotine B-4 (0-12 m)

Na intaktnim uzorcima stijene izvršeno je ispitivanje tlačne čvrstoće pomoću Schmidtova čekića. Srednja vrijednost odskoka na Schmidtovom čekiću je iznosila 28. Prema Izrazu 5. kojeg su predstavili Kilic i Teymen 2008. godine [27], UCS iznosi:

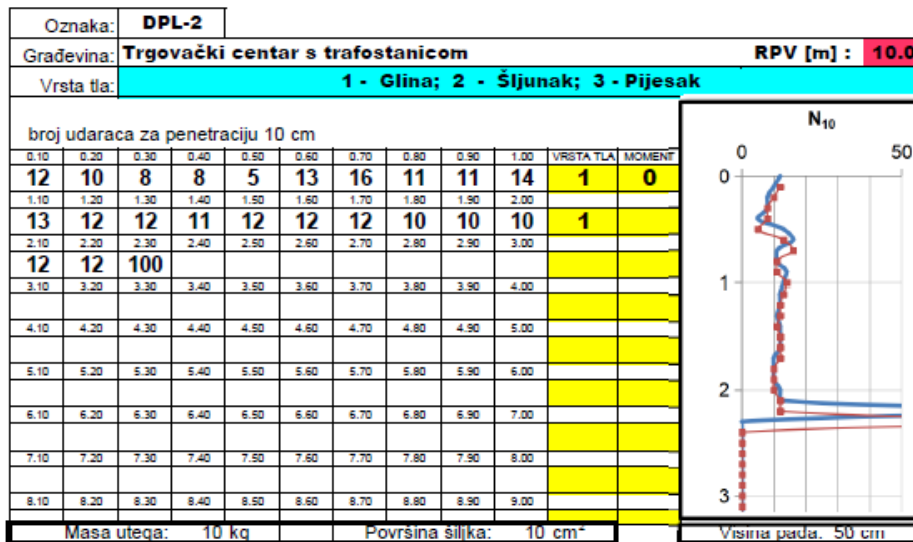
$$UCS = 0,0137 \cdot N^{2,2721} \quad (5)$$

Prema tome, $UCS = 0,0137 \cdot 28^{2,2721} = 27 \text{ MPa}$.

Na osnovi dijagrama sa Slike 7. procijenjena je jednoosna tlačna čvrstoća:

$$UCS = 50 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$$

Na Slici 20. vidljivi su rezultati DPL-2 dinamičke penetracije. Sa slike je vidljivo da na dubini od 2,30 m nije više moguće izvesti proces dinamičkog prodiranja, jer se na većim dubinama nalazi stijenska masa.



Slika 20. Rezultati DPL-2, lake udarne sonde

4.1.4. Klasifikacija stijenske mase

Istražnim radovima utvrđene su četiri karakteristične geotehničke zone, koje možemo vidjeti u geotehničkom profilu tla – Prilog 2.

1. Zona 1: Glina (CIH – glina visoke plastičnosti, crveno – smeđe boje, teško gnječiva, dubina 0 – 2/3 m)

Sloj se pojavljuje ispod površine terena, debljina sloja je od 3 m.

2. Zona 2: Glina (CIV – glina vrlo visoke plastičnosti, lakše gnječiva, dubina 2/3 – 8/11,3 m)

Sloj se pojavljuje ispod zone 1, debljina sloja do 8 m.

3. Zona 3: Vapnenac, Stijena IV. kategorije (dubina 2/3 – 8 m)

Stijena je jako do srednje okršena, s blokovima malih do srednjih veličina. Učestalost pukotina je velika do srednja, a širina pukotina je srednja. Pukotine su djelomično ispunjene glinom i fragmentima stijene. Geološki indeks stijene (GSI) iznosi 33, dok se RQD kreće u rasponu od 25% do 45%. Jednoaksijalna tlačna čvrstoća (UCS) stijene kreće se u rasponu od 40 MPa do 50 MPa, a jedinična težina materijala (γ) iznosi 24 kN/m³. Brzina posmičnih valova (V_s) kreće se u rasponu od 750 m/s od 1200 m/s, dok se brzina primarnih valova (V_p) kreće u rasponu od 2100 m/s do 2500 m/s.

4. Zona 4: Vapnenac, Stijena III. kategorije (dubina > 8 m)

Stijena je srednje okršena i sastavljena od brečastih vapnenaca. Blokovi su srednjih veličina, a učestalost pukotina i širina pukotina su srednje. Pukotine su djelomično ispunjene glinom. Geološki indeks stijene (GSI) iznosi 52, a RQD se kreće u rasponu od 80% do 90%. Jednoaksijalna tlačna čvrstoća (UCS) stijene kreće se u rasponu od 40 MPa do 50 MPa, a jedinična težina materijala (γ) iznosi 25 kN/m³. Brzina posmičnih valova (V_s) kreće se u rasponu od 1250 m/s do 1500 m/s, dok brzina primarnih valova (V_p) iznosi 3500 m/s.

Temeljna konstrukcija treba biti ukopana na dubinu od 80 – 100 cm obzirom na minimalnu očekivanu temperaturu tijekom 50-godišnjeg razdoblja ($T_{min,50} = - 25$ °C), prema HRN EN 1997-1:2016 / NA. Predviđeno je da se objekat temelji plitko. Dio temelja izvesti će se u geotehničkoj zoni 1 ili 2 (glina, CIH, CIV), a na jednom dijelu objekta temelji se nalaze iznad postojećeg terena. Na takvim dijelovima biti će potrebno izvesti nasip ili spustiti temelje u sraslo tlo.

Sumirani podaci sa zonama i parametrima za svaku zonu prikazani su u Tablici 8.

Tablica 8. sumirani podaci sa zonama i parametrima za svaku zonu, Pazin

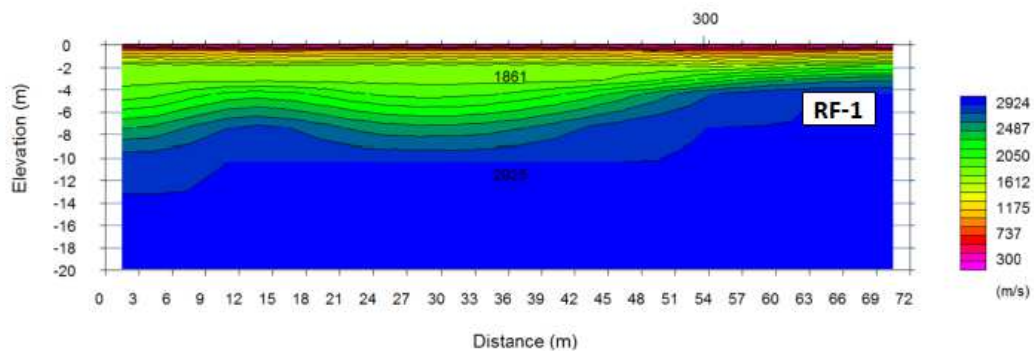
| | |
|---|------------------------------------|
| zona 1: Glina (CIH) 0,0 - 2/3 m | |
| kohezija | ck = 16 kPa |
| kut trenja tla | $\Phi_k = 26-28^\circ$ |
| jedinična težina tla | $\gamma = 14/18$ kN/m ³ |
| nedrenirana posmična čvrstoća | cu = 100 - 130 kPa |
| stupanj prekonsolidacije | OCR = 6 - 10 |
| zona 2: Glina (CIV) 2/3 - 8/11,3 | |
| kohezija | ck = 10 - 15 kPa |
| kut trenja tla | $\Phi_k = 24-25^\circ$ |
| jedinična težina tla | $\gamma = 14/18$ kN/m ³ |
| nedrenirana posmična čvrstoća | cu = 75 - 100 kPa |
| stupanj prekonsolidacije | OCR = 1 - 3 |
| zona 3: Vapnenac 2/3 - 8 m | |
| brzina primarnih valova | vp = 2100-2500 m/s |
| brzina posmičnih valova | vs = 750 - 1200 m/s |
| jedinična težina tla | $\gamma = 24$ kN/m ³ |
| RQD indeks | RQD = 25 - 45% |
| geološki indeks stijenske mase (GSI) | GSI = 33 |
| jednoaksijalna tlačna čvrstoća (UCS) | UCS = 40 - 50 MPa |
| zona 4: Vapnenac 2/3 - 8 m | |
| brzina primarnih valova | vp = 3500 m/s |
| brzina posmičnih valova | vs = 1250 - 1500 m/s |
| jedinična težina tla | $\gamma = 25$ kN/m ³ |
| RQD indeks | RQD = 80 - 90% |
| geološki indeks stijenske mase (GSI) | GSI = 52 |
| jednoaksijalna tlačna čvrstoća (UCS) | UCS = 40 - 50 MPa |

4.2.2. Geofizička istraživanja

Pri interpretaciji rezultata mjerenja uvažene su postojeće spoznaje o sastavu i građi terena.

Za snimanje P-valova koristila se metoda plitke seizmičke refrakcije provedene seizmičkim uređajem sa 24 vertikalna geofona frekvencije 4,5 Hz. Razmak između geofona iznosio je 3,0 m. Podaci mjerenja su interpretirani pomoću aplikacije SeisIMAGER 4.0.1.6., OYO Corporation 2004-2009.

Ograničenje refrakcijske metode je porast brzine seizmičkih valova s dubinom, stoga nije moguće interpretirati sloj niže brzine ispod sloja veće brzine. Rezultat je 2-D profil na kojem brzine seizmičkih valova rastu s dubinom (Slika 22).

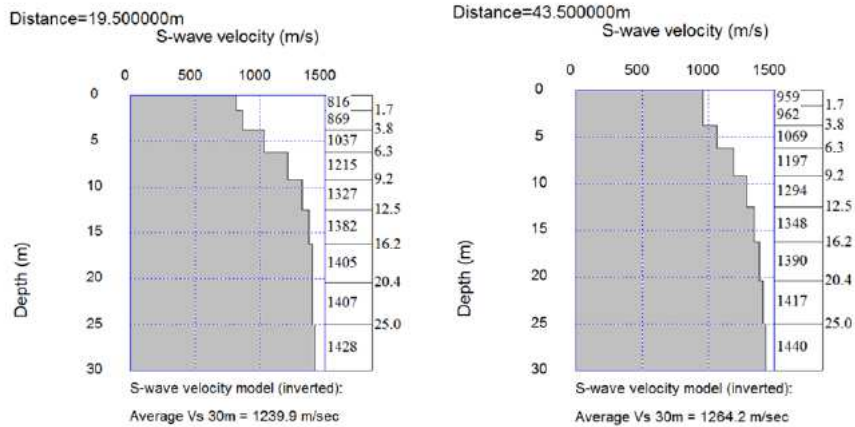


Slika 22. 2-D profil brzina seizmičkih valova izmjeren na RF-1, Korčula

Prema kategorizaciji T. Novosel i dr. (Prilog 4.), vidljivo je da do dubine 8,0 m prevladava stijena odgovarajuća IV. kategoriji, dok se dublje nalazi stijena III. kategorije.

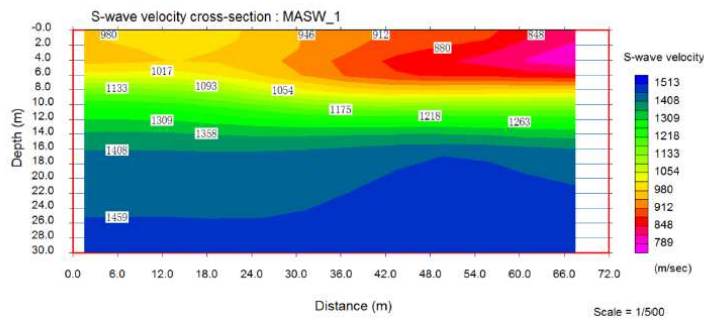
Analiza površinskih valova provedena je MASW metodom. Dispozitiv za MASW sastojao se od 24 vertikalna geofona frekvencije 4,5 Hz, postavljenih na međusobnom razmaku od 3,0 m. Ovaj dispozitiv identičan je onome koji se koristi za snimanje plitke seizmičke refrakcije. Pri interpretaciji MASW mjerenja koristi se fundamentalni ili osnovni mod, odnosno analizira se osnovni mod površinskih valova. Podaci mjerenja također su interpretirani pomoću aplikacije SeisIMAGER 4.0.1.6., OYO Corporation 2004-2009.

Na Slici 23. prikazana je 1-D MASW interpretacija, dok na Slici 24. možemo vidjeti 2-D MASW interpretaciju.

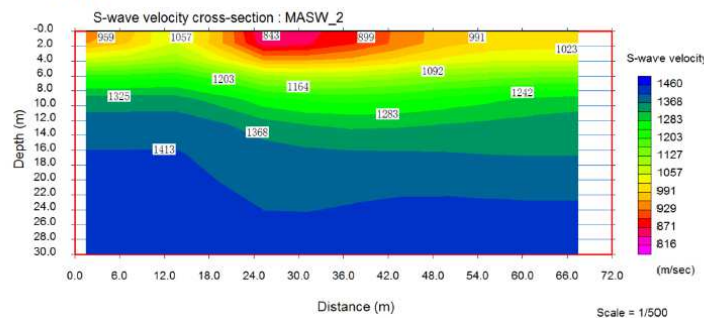


Slika 23. 1-D MASW profili, Korčula

a) MASW-1 (2D)



b) MASW-2 (2D)

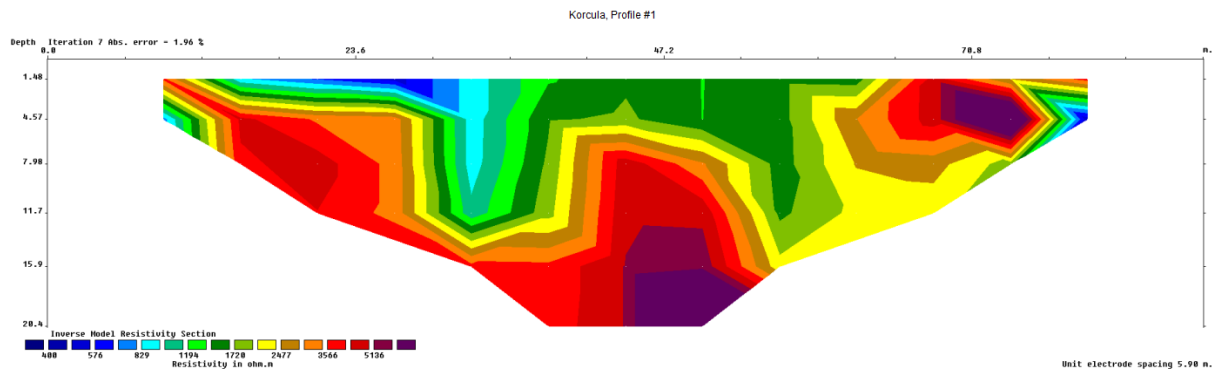


Slika 24. 2-D MASW profili, Korčula

Interpretacija rezultata snimanja MASW pokazuje da brzine posmičnih valova (V_s) u površinskom dijelu tla iznose od 700 do 1200 m/s do dubine od 10,0 m, što odgovara karbonatnoj stijeni IV. kategorije. Dublje u tlu, u pokrivaču i prijelaznim zonama trošenja stijene, seizmičke brzine odgovaraju karbonatnoj stijeni III. kategorije, odnosno iznose od 1000 do 1700 m/s. Klasifikacija stijene prema izmjenjenim brzinama provedena je prema klasifikaciji karbonatnih stijena, prema T. Novosel i suradnicima.

Vrijednosti otpornosti u profilu ERT (2-D električne tomografije) nalaze se u rasponu od 400 Ω m do preko 4000 Ω m. Uz podatke iz literature o specifičnom električnom otporu nekih materijala, interpretirane su geološke sredine o geoelektričnom profilu ERT-1

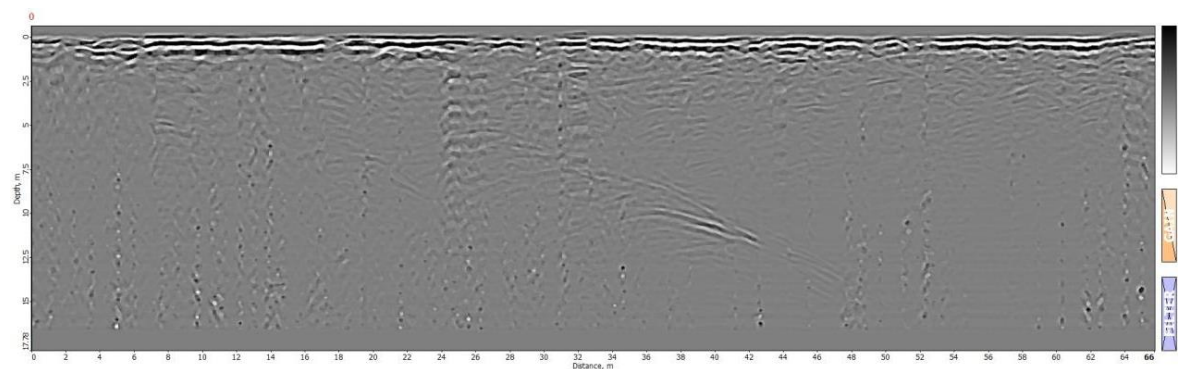
(Slika 25.) i ERT-2. Kod električne otpornosti u rasponu između 400 Ωm i 1000 Ωm radi se o stijenama IV. kategorije, a otpornosti više od 1000 Ωm pripadaju stijenama III. kategorije prema T. Novosel i dr.



Slika 25. Rezultat geoelektrične tomografije u profilu ERT-1

Provedeno je profiliranje georadarom primjenom oklopljene antene frekvencije 300 MHz i uređaja ZOND12e proizvođača Radar System, Inc. Uzeta je vrijednost dielektrične permeabilnosti $\mu r = 6$ koja odgovara geološkoj sredini na toj lokaciji, odnosno vapnencima.

Na georadarskim snimkama uočeni su sustavi pukotina ili kaverni, te su primjećeni pukotinski sustavi i na površini terena. Na Slici 26 prikazan je georadarski profil tla – GPR – 1. Vidljivo je da se na površini terena nalazi jako raspucala stijenska masa, dok se u dubljim dijelovima nalazi kompaktnija stijenska masa. Sa snimke je vidljivo da postoje i manji pukotinski sustavi.



Slika 26. Georadarski profil tla - GPR - 1

4.2.3. Geotehničke značajke tla

Schmidtovim čekićem izvedeno je ispitivanje tlačne čvrstoće na intaktnim uzorcima stijene. Čekić se primjenjuje okomito na površinu stijene. Pri tome se koriste korelacijski dijagrami koji omogućuju određivanje kuta osi čekića u odnosu na horizontalu. Ispitivanje se provodilo na vlažnoj površini stijene, a odgovarajućim alatom za uklanjanje sitnih raspadnutih čestica stijene osigurala se čistoća površine.

Prema preporuci (ISRM1978) izvedeno je po 10 ispitivanja po jediničnoj površini. Pri tome je eliminirano pet najmanjih rezultata, a računa se srednja vrijednost pet najvećih očitavanja.

Izmjerene vrijednosti odskoka Schmidtovog čekića iznosile su: 40, 40, 41, 39, 36, 44, 34, 44, 41 i 42. Srednja vrijednost odskoka iznosila je 40,1. Uz pomoć korelacijskih dijagrama izračunata je tlačna čvrstoća koja je iznosila 54,45 MN/m².

4.2.4. Klasifikacija stijenske mase

Istražnim radovima utvrđene su dvije karakteristične geotehničke zone (prema T. Novosel i dr.):

1. Zona 1: Stijena IV. kategorije

Ova zona proteže se od površine tla do maksimalne dubine od 8,0 m. U području građevine, zona obuhvaća dubinu od otprilike 8,0 m. Kategorija iskopa tla u ovoj zoni je A. Stijena u ovoj zoni je jako okršena, s malim blokovima, visokom učestalošću pukotina, uglavnom malom površinom pukotina i srednjom širinom pukotina. Pukotine su djelomično ispunjene, a često se javljaju srednje velike pukotine koje su ispunjene mješavinom fragmenata stijene, gline ili povezanih breča. Ova zona u potpunosti se uklanja.

2. Zona 2: Stijena III. kategorije

Ispod prve zone nalazi se stijena III. kategorije. Stijena je srednje okršena, s blokovima srednje veličine. Učestalost pukotina je srednja, površina pukotina je

srednje veličine, a širina pukotina je također srednja. Pukotine su djelomično ispunjene glinom.

U Tablici 9 prikazani su sumirani podaci sa zonama i parametrima za svaku zonu.

Tablica 9. sumirani podaci sa zonama i parametrima za svaku zonu, Korčula

| zona 1: Vapnenačka stijena IV. kategorije 0,0 - 8,0 m | |
|--|---------------------------------|
| brzina primarnih valova | $v_p = 300 - 1800 \text{ m/s}$ |
| brzina posmičnih valova | $v_s = 700 - 1100 \text{ m/s}$ |
| zona 2: Vapnenačka stijena III. kategorije > 8,0 m | |
| brzina primarnih valova | $v_p = 3000 \text{ m/s}$ |
| brzina posmičnih valova | $v_s = 1100 - 1400 \text{ m/s}$ |
| jedinična težina tla | $\gamma = 24,0 \text{ kN/m}^3$ |
| indeks kvalitete stijenske mase (Q) | $Q = 0,23$ |
| klasifikacija stijenske mase (RMR) | $RMR = 42$ |
| geološki indeks stijenske mase (GSI) | $GSI = 37$ |

5. ZAKLJUČAK

Geotehnička karakterizacija stijenske mase ima ključnu ulogu u projektiranju temeljnih konstrukcija. Ove metode istraživanja omogućuju inženjerima da prikupe relevantne informacije o svojstvima stijenske mase i tla kako bi procijenili nosivost, stabilnost i sigurnost građevinskih objekata.

Geotehnička karakterizacija uključuje terenska ispitivanja, sondiranje tla, bušenje tla i laboratorijsku analizu uzoraka. Ovi postupci omogućuju određivanje geološke strukture, fizičkih svojstava tla i mehaničkih parametara, kao što su čvrstoća, gustoća i granulometrijski sastav. Na temelju tih podataka, može se odabrati odgovarajući tip temelja i prilagoditi konstrukcijski dizajn kako bi osigurali stabilnost i sigurnost građevine. Kroz istražne bušotine koje su obrađene u primjeru geotehničkih istraživanja za potrebe temeljenja trgovačkog centra u Pazinu uočene su različite slojevite strukture stijenske mase, a samim time i varijabilnost karakteristika stijenske mase s dubinom.

Geofizička karakterizacija koristi neinvazivne metode mjerenja kako bi se dobio uvid u fizikalna svojstva stijenske mase. Metode poput georadara, seizmičke refrakcije i električne otpornosti omogućuju identifikaciju strukturnih nepravilnosti, pukotina, rasjeda i drugih geoloških formacija. Prilikom istraživanja za temeljenje supermarketa na Korčuli, primjenom georadara otkriven je sustav pukotina u stijenskoj masi. Dodatno, primjena metoda poput MASW-a (Multi-channel Analysis of Surface Waves) i seizmičke refrakcije omogućila je precizno određivanje granica tla i stijenske mase. Ti podaci pružaju dodatne informacije o stabilnosti i homogenosti stijenske mase, pomažući inženjerima da donesu valjane odluke pri projektiranju temelja.

U kombinaciji, geotehnička i geofizička karakterizacija stijenske mase omogućuje da se pravilno procijene nosivost tla, identificiraju potencijalni problemi i rizici te odaberu odgovarajuće metode temeljenja. Ovi postupci osiguravaju sigurno i stabilno temeljenje građevinskih objekata, što je ključno za dugotrajnost i pouzdanost konstrukcija.

Ukratko, geotehničke i geofizičke metode istraživanja stijenske mase predstavljaju neophodan korak u projektiranju temeljnih konstrukcija. To omogućuje inženjerima da pravilno procijene svojstva tla, identificiraju potencijalne rizike i donesu pravilne odluke kako bi osigurali stabilnost i sigurnost građevinskih objekata.

LITERATURA

- [1] B. Kavur: Mehanika stijena, interna skripta
- [2] T. Roje-Bonacci (2008): Duboko temeljenje i poboljšanje temeljnog tla, Građevinsko-arhitektonski fakultet, Sveučilište u Splitu, Split
- [3] I. Vrkljan: Inženjerska mehanika stijena
- [4] Z. T. Bieniawski, 1989: Engineering Rock Mass Classifications – A Complete Manual For Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering- Wiley-Interscience
- [5] D.U. Deere and D.W. Miller (1967): The Rock Quality Designation (RQD) Index in Practice, Classification Systems for Engineering Purposes. ASTM STP, American Society for Testing and Materials, Philadelphia
- [6] K. Terzaghi (1946): Rock Tunneling with Steel Supports
- [7] H. Lauffer (1958): Geologie und Bauwesen
- [8] Wickeham i dr. (1972): RSR (Rock Structure Rating)
- [9] N.R. Barton, R. Lien, J. Lunde (1974): Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mechanics and Rock Engineering, 6/4, 189–236.
- [10] E. Hoek, P. Marinos, and M. Benissi (1998): Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athens Schist Formation. Bull. Engg. Geol. Env. 57(2), 151-160.
- [11] Palmström A. (2014), Short on RMR-System, dostupno na:
http://www.rockmass.net/files/short_on_RMR-system.pdf
- [12] E. Hoek (1994): Strength of rock and rock masses. ISRM News Journal, 2(2), 4-16.
- [13] E. Hoek, and E.T. Brown, (1997): Practical estimates of rock mass strength. Int. J. Rock Mech. & Mining Sci. & Geomechanics Abstracts. 34(8), 1165-1186.
- [14] V. Marinos, P. Marinos, E. Hoek, (2004): The geological strength indeks: applications and limitations

- [15] S. Strelec, J. Jug, K. Grabar, (2022): Geotehnička i geofizička terenska istraživanja, Geotehnički fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Varaždin
- [16] Geotechnical Borehole Logging, (2016): Department of Transport and Main Roads
- [17] J. Jug (2019): Mehanika stijena u geoinženjerstvu okoliša, interna skripta, Varaždin
- [18] M. Hasan, Y. Shang, P. Shao, X. Yi, H. Meng (2021): Geophysical Research on Rock Mass Quality Evaluation for Infrastructure Design, dostupno na: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2021EA002017>
- [19] K. Wellbrock et.al. (2018): The Water Management of Tayma and Other Ancient Oasis Settlements in the North-Western Arabian Peninsula – A Preliminary Synthesis
- [20] S. C. Malanda, I. E. Davidson, E. Buraimoh (2018): Analysis of Soil Resistivity and its Impact on Grounding Systems Design, Depth. Of Electrical Power Engineering, Durban University, South Africa
- [21] G. A. Athanasopoulos, P. C. Pelekis, G.A. (2000): Department of Civil Engineering, University of Patras, Greece
- [22] K. Knödel, G. Lange, H-J. Voigt (2007): Environmental Geology, Handbook of Field Methods and Case Studies
- [23] O. Anomohanran (2013): Seismic Refraction Method: A Technique for Determining the Thickness of Stratified Substratum, Department of Physics, Faculty of Science, Delta State University, Nigeria, dostupno na: <https://thescipub.com/pdf/ajassp.2013.857.862.pdf>
- [24] C.B. Park, R.D. Miller, J. Xia, J. Ivanov (2007): Multichannel analysis of surface waves (MASW) – active and passive methods. The Leading Edge
- [25] R. J. Yelf (2007), Application of Ground Penetrating Radar to Civil and Geotechnical Engineering
- [26] Eurokod 8 (EN 1998-1:2004): Projektiranje konstrukcija otpornih na potres - 1. dio: Opća pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade
- [27] A. Kilic, A. Teymen (2008), Determination of mechanical properties of rocks using simple methods

POPIS SLIKA

| | |
|---|--|
| Slika 1. Plitki temelji [3]..... | 3 |
| Slika 2. Duboko temeljenje [3] | 3 |
| Slika 3. Fliš [3]..... | 5 |
| Slika 4. Iste vrijednosti RQD-a kod različitih stanja jezgre stijenske mase [1]..... | 6 |
| Slika 5. GSI klasifikacija [1]..... | Pogreška! Knjižna oznaka nije definirana. |
| Slika 6. Fotodokumentacija istražne bušotine B-3 (0-4 m) za potrebe temeljenja trgovačkog centra u Pazinu..... | 13 |
| Slika 7. Dijagram korelacije tlačne čvrstoće i odskoka Schmidtovog čekića [15]..... | 16 |
| Slika 8. Električna otpornost nekih stijena, tla i minerala [15]..... | 18 |
| Slika 9. Wennerov mjerni raspored [20]..... | 20 |
| Slika 10. 2-D geoelektrična tomografija (Wennerov raspored elektroda) [15] | 22 |
| Slika 11. Vrste seizmičkih valova [21]..... | 23 |
| Slika 12. Skica postavljenog profila seizmičke refrakcije [15] | 25 |
| Slika 13. Primjer mjerenja i analize podataka pomoću aktivne MASW metode [15].... | 27 |
| Slika 14. Georadar i princip istraživanja metodom georadara [15]..... | 28 |
| Slika 15. Položaj istražene lokacije | 32 |
| Slika 16. 1-D prikaz brzina posmičnih v_s valova, Pazin: a) MASW-1, b) MASW-2, c) MASW-3..... | 34 |
| Slika 17. prikaz 2-D MASW profila – brzine v_p valova, Pazin: a) MASW 1 b) MASW 2 c) MASW 3 | 35 |
| Slika 18. Prikaz geoelektrične tomografije, Pazin..... | 36 |
| Slika 19. Fotodokumentacija istražne bušotine B-2 (0-10 m) i istražne bušotine B-4 (0- 12 m)..... | 37 |
| Slika 20. Rezultati DPL-2, lake udarne sonde | 38 |
| Slika 21. Detalj sa Osnovne geološke karte OGK Korčula, L33-47 | 40 |
| Slika 22. 2-D profil brzina seizmičkih valova izmjeren na RF-1, Korčula | 41 |
| Slika 23. 1-D MASW profili, Korčula..... | 42 |
| Slika 24. 2-D MASW profili, Korčula..... | 42 |
| Slika 25. Rezultat geoelektrične tomografije u profilu ERT-1 | 43 |
| Slika 26. Georadarski profil tla - GPR - 1 | 43 |

POPIS TABLICA

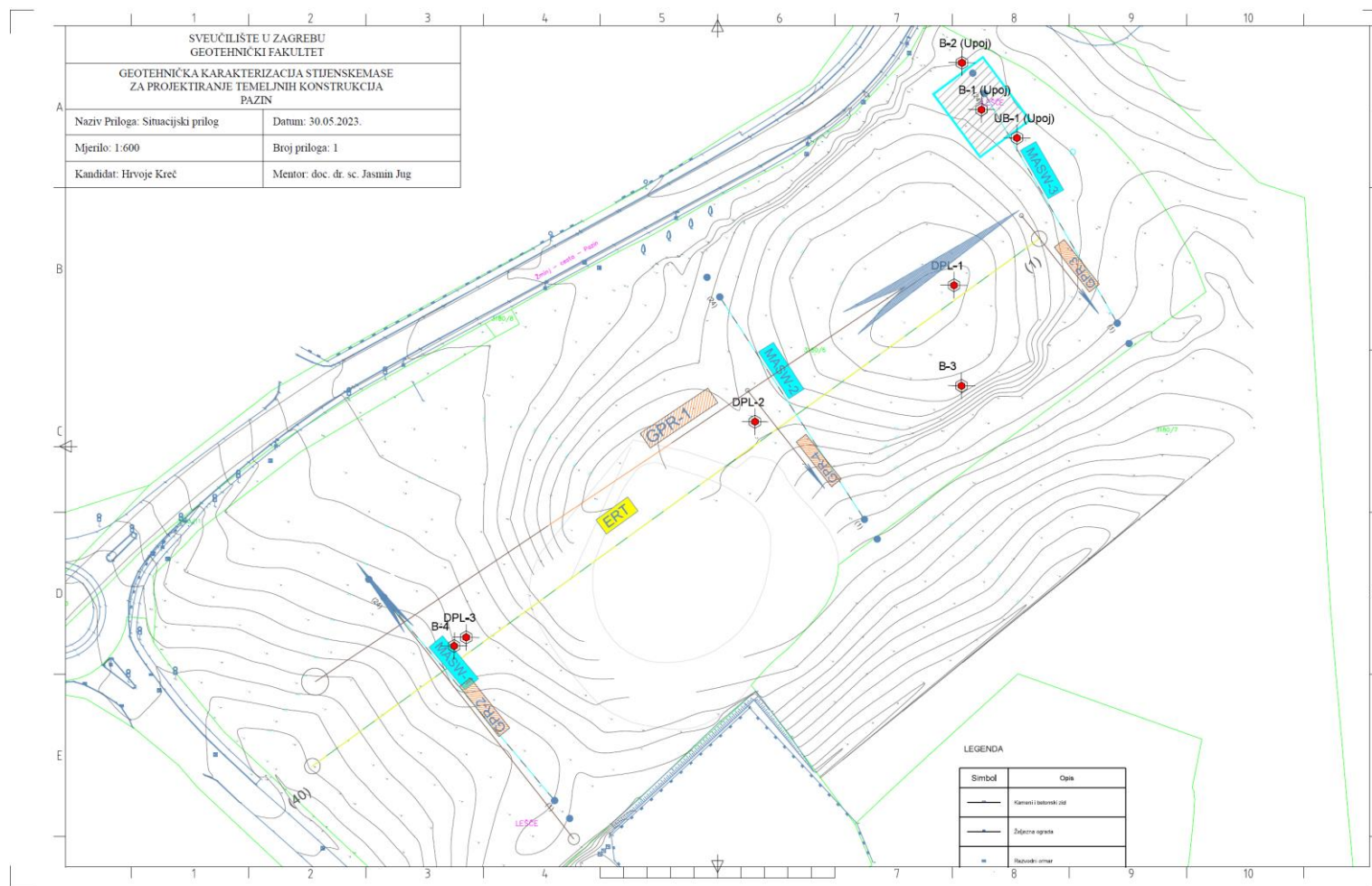
| | |
|--|----|
| Tablica 1. Ocjena kvalitete stijenske mase RQD indeksom [1] | 6 |
| Tablica 2. RMR - geomehanička klasifikacija (Bieniawski 1989) [3] | 9 |
| Tablica 3. Kategorije stijenske mase prema RMR klasifikaciji [3] | 10 |
| Tablica 4. Električna otpornost i vodljivost stijena [15]..... | 19 |
| Tablica 5. Prosječne brzine P i S valova i gustoće određenih geomedija [15] | 26 |
| Tablica 6. Vrijednosti dielektričnih konstanti, električne vodljivosti, brzina EM valova i prigušenja za pojedine materijale kod 100 MHz odašiljačke antene [15] | 30 |
| Tablica 7. Kategorizacija tla prema seizmičnosti [26] | 34 |
| Tablica 8. sumirani podaci sa zonama i parametrima za svaku zonu, Pazin | 39 |
| Tablica 9. sumirani podaci sa zonama i parametrima za svaku zonu, Korčula | 45 |

POPIS PRILOGA

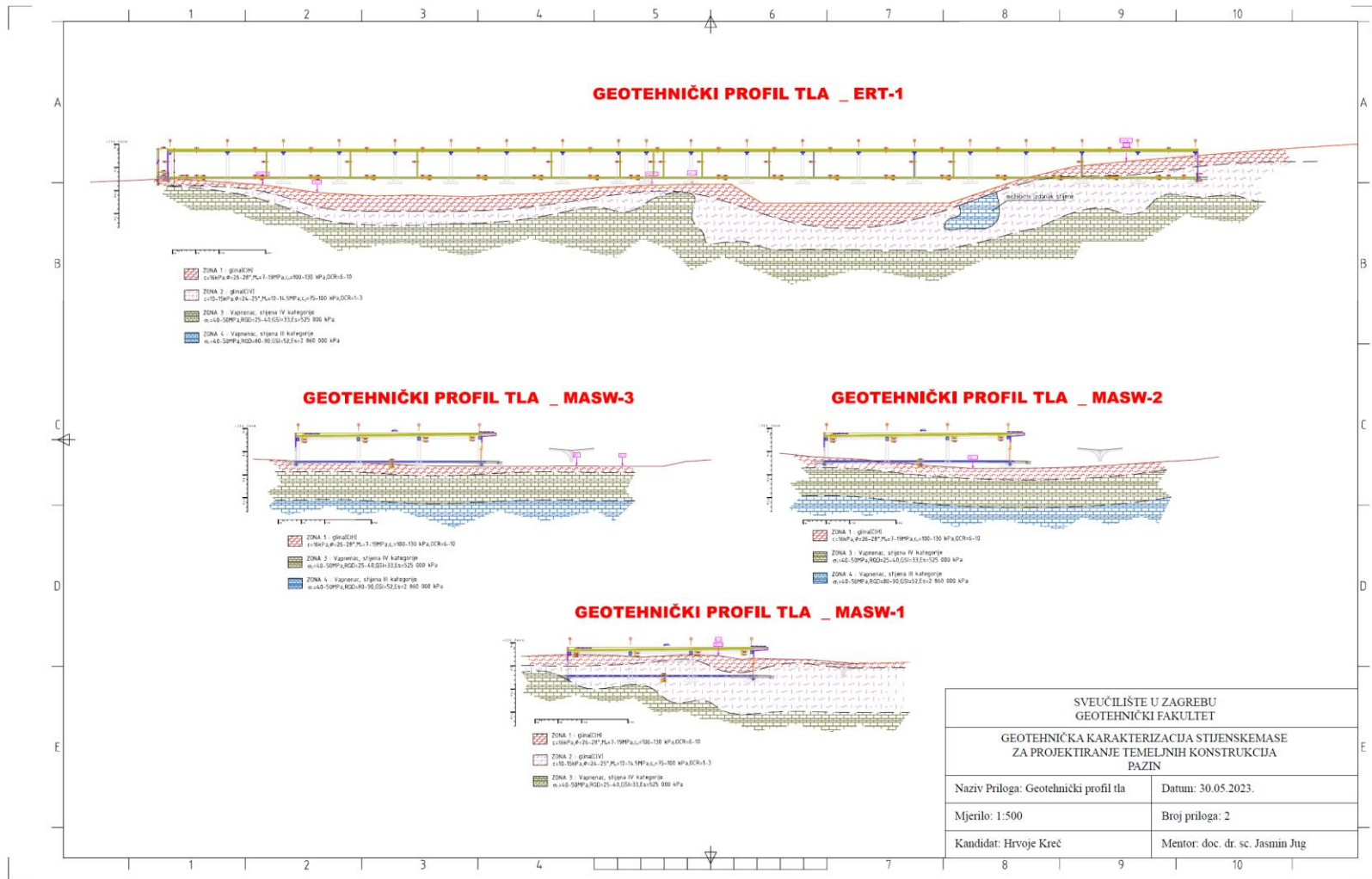
| | |
|--|----|
| Prilog 1. Situacijski prilog – Pazin | 51 |
| Prilog 2. Geotehnički profil tla - Pazin | 52 |
| Prilog 3. Situacijski prilog – Korčula | 53 |
| Prilog 4. Karakterizacija stijena prema Novosel i dr. | 54 |

PRILOZI

Prilog 1. Situacijski prilog – Pazin



Prilog 2. Geotehnički profil tla - Pazin



| | |
|---|---------------------------------|
| SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GEOTEHNIČKI FAKULTET | |
| GEOTEHNIČKA KARAKTERIZACIJA STIJENSKEMASE ZA PROJEKTIRANJE TEMELJNIH KONSTRUKCIJA PAZIN | |
| Naziv priloga: Geotehnički profil tla | Datum: 30.05.2023. |
| Mjerilo: 1:500 | Broj priloga: 2 |
| Kandidat: Hrvoje Kreč | Mentor: doc. dr. sc. Jasmin Jug |

Prilog 4. Karakterizacija stijena prema Novosel i dr.

| Broj kategorije | OPIS INŽINJERSKO-GEOLOŠKIH OBILJEŽJA | GEOFIZIČKA SVOJSTVA | | | TIP PRESIO METARSKJE KRIVULJE | RQD [%] | AKSIJALNA ČVRSTOĆA [MPa] | PARAMETRI ČVRSTOĆE ZA SMICANJE | |
|-----------------|--|--------------------------------|-------------|----------------|-------------------------------|----------|--------------------------|--------------------------------|----------------|
| | | Brzina seizmičkih valova [m/s] | | Otpornost [Ωm] | | | | Kut unutr. trenja | Kohezija [kPa] |
| | | uzdužni | poprečni | | | | | | |
| I | Stijena je neokršena, blokovi su masivni, učestalost pukotina je vrlo mala, ako postoje plohe pukotina su vrlo velike, a širina pukotina je vrlo mala, pukotine su bez ispune ili su ispunjene kristaliziranom supstancom. | >4300 | >2200 | >1000 | F | 90 - 100 | >100 | >45 | >500 |
| II | Stijena je slabo okršena, blokovi su veliki, učestalost pukotina je mala, pukotina su rijetke i velike, a širina im je mala, pukotine su rijetko po plohama presvučene filmom gline. | 3000- 4300 | 1600 - 2200 | >1000 | F | 75 - 90 | 75 - 100 | >45 | >500 |
| III | Stijena je srednje okršena, blokovi su srednje veličine, učestalost pukotina je srednja, površina pukotina je srednje veličine, a širina pukotina je srednja, pukotine su djelomično ispunjeneglinom. | 2000 -3000 | 1000 - 1600 | 300 - 1000 | E | 50 - 75 | 50 - 75 | 40 - 45 | 300 - 500 |
| IV | Stijena je jako okršena, blokovi su mali, učestalost pukotina je velika, površina pukotina je uglavnom mala, a širina pukotina je srednja, pukotine su djelomično ispunjene, pojava srednje velikih pukotina je učestala, a pukotine su ispunjene mješavinom fragmenata stijene i gline ili povezanim brečama. | 1400 - 2000 | 650 - 1000 | 300 - 1000 | D | 25 - 50 | 25 - 50 | 35 - 40 | 200 - 300 |
| V | Stijena je vrlo jako okršena, učestala je pojava malih blokova, površina pukotina je vrlo mala uočavaju se milonitizirane zone, javljaju se pukotine velike širine ispunjene glinom i fragmentima stijene ili povezanim brečama. | 900 - 1400 | 400 - 650 | 150 - 300 | C | 10 - 25 | 10 - 25 | 30 - 35 | 150 - 200 |
| VI | Stijena je ekstremno okršena, prevladavaju ekstremno mali blokovi i milonitizirane zone, površina pukotina je ekstremno mala, a učestalost pukotina je ekstremno velika, uočavaju se pukotine ekstremne širine ispujene glinom i fragmentima stijene te poluvezanim brečama. | 600 - 900 | 250 - 400 | 150 - 300 | B | 0 - 10 | 3 - 10 | <30 | 100 - 150 |
| VII | Džepovi i vrtače ispunjene glinom ili mješavinom gline i fragmenata stijena. | 300 -600 | 150 - 250 | 35 - 200 | A | 0 | 0 | <30 | <100 |