

# Klasifikacija stijenske mase za potrebe iskopa na dijelu vodoopskrbne mreže otoka Hvara

---

Heček, Mihael

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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:130:410574>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-27**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET

MIHAEL HEČEK

KLASIFIKACIJA STIJENSKE MASE ZA POTREBE ISKOPA NA DIJELU  
VODOOPSKRBNNE MREŽE OTOKA HVARA

DIPLOMSKI RAD

VARAŽDIN, 2022.

Sazivam članove ispitnog povjerenstva  
za 14. 07. 2022. u 9 sa  
Obranu ovog rada kandidat će vršiti i pred  
ispitnim povjerenstvom u Varaždinu  
Varaždin, 30. 06. 2022.

Predsjednik  
ispitnog povjerenstva

120. prof. dr. sc. Sanja Karoć

### Članovi povjerenstva

- 1) Doc. dr. sc. Jasmin Jug
- 2) Doc. dr. sc. Nikola Kravčić
- 3) Prof. dr. sc. Stjepan Štelec

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEOTEHNIČKI FAKULTET

DIPLOMSKI RAD

KLASIFIKACIJA STIJENSKE MASE ZA POTREBE ISKOPA NA DIJELU  
VODOOPSKRBNNE MREŽE OTOKA HVARA

KANDIDAT:

Mihael Heček



MENTOR:

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

DRUGI MENTOR:

Doc.dr.sc. Nikola Kranjčić,

mag.ing.geod.et geoinf

VARAŽDIN, 2022.

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

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

### KLASIFIKACIJA STIJENSKE MASE ZA POTREBE ISKOPA NA DIJELU VODOOPSKRBNNE MREŽE OTOKA HVARA

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. i komentorstvom doc.dr.sc. Nikola Kranjčić, mag.ing.geod et geoinf.**

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, 27.06.2022.

Mihael Heček  
(Ime i prezime)

  
\_\_\_\_\_  
(Vlastoručni potpis)

## **IZJAVA MENTORA O POSTOTKU SLIČNOSTI DIPLOMSKOG RADA S VEĆ OBJAVLJENIM RADOVIMA**

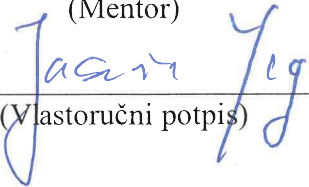
Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je diplomski rad pod naslovom:

**KLASIFIKACIJA STIJENSKE MASE ZA POTREBE ISKOPA NA DIJELU  
VODOOPSKRBNE MREŽE OTOKA HVARA**

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, 27.06.2022.

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

  
\_\_\_\_\_  
(Vlastoručni potpis)

## Sažetak:

Odabir tehnologije otkopavanja predstavlja jedan od vrlo važnih i zahtjevnih zadataka prilikom planiranja iskopa u čvrstim stijinama, bilo na površinskom kopu ili građevnoj jami. Raznolikost značajki stijenske mase ima velik utjecaj na učinkovitost primjene određene tehnike i tehnologije otkopavanja. Što je stijenska masa raspucanija, lakše će se otkopavati. Diskontinuiranost je dobro poznata karakteristika stijenskih masa, pogotovo sedimentnih, a ta se značajka vrlo uspješno istražuje primjenom neinvazivnih, brzih i relativno jeftinih seizmičkih geofizičkih metoda. Rezultat seizmičkih istraživanja su brzine kompresijskih ili primarnih P-valova, te posmičnih ili sekundarnih S-valova. Neke od metoda iz literature kao glavni pokazatelj za procjenu mogućnosti otkopavanja stijene koriste navedene brzine seizmičkih valova. U ovom diplomskom radu obrađena je klasifikacija stijenske mase za potrebe iskopa na dijelu vodoopskrbne mreže otoka Hvara. Predloženo je i primijenjeno nekoliko klasifikacija ili metoda koje se mogu koristiti za potrebe određivanja načina iskopa. Svrha određivanja najoptimalnije metode iskopa je smanjenje samih troškova izvedbe iskopa i ušteda vremena. Prilikom terenskih mjerenja korištene su geotehničke i geofizičke metode istraživanja, poput plitke refrakcijske seizmike (SRS), višekanalne analize površinskih valova (MASW) i Schmidtovog čekića, dok su za pozicioniranje na terenu korištena osnovna geodetska znanja i globalni navigacijski satelitski sustavi (GNSS). Na temelju izmjerenih brzina seizmičkih valova i procijenjene jednoosne tlačne čvrstoće na izdancima, stijenska masa na istraživanoj trasi je sukladno korištenim metodama klasifikacije kategorizirana u dvije grupe, ovisno o zahtjevnosti iskopa. Tako je više od 90% iskopa potrebno izvesti miniranjem, dok se manje količine stijenskog materijala mogu strojno iskopati.

**Ključne riječi:** Otok Hvar, otkopavanje stijenske mase, klasifikacija materijala za iskop, brzina seizmičkih valova, geofizičke seizmičke metode, GNSS

## Abstract:

The selection of an excavation technology is a very important and demanding task when planning excavation in solid rocks, whether on a surface mine or a construction pit. The variety of rock mass characteristics greatly influences the application efficiency of a particular excavation technique and technology. Discontinuous rock mass is easier to excavate in comparison to solid rock mass. Discontinuity is a well-known characteristic of rock masses, especially sedimentary ones, and this feature is very successfully investigated by using non-invasive, fast and relatively inexpensive seismic geophysical methods. The results of seismic investigations are the velocity of compression or primary P-waves and shear or secondary S-waves. Some of the methods from the literature use the mentioned seismic wave velocity as the primary indicator for assessing the possibility of rock excavation. This master thesis presents the classification of rock mass for the purposes of excavation on the part of a water supply network on the island of Hvar. Several classifications or methods that can be used to determine an excavation technology have been proposed and applied. The purpose of determining the most optimal excavation method is to reduce the excavation costs and save time. Geotechnical and geophysical investigation methods, such as shallow refractive seismic (SRS), multichannel analysis of surface waves (MASW) and Schmidt's hammer were used in field measurements, while basic geodetic knowledge and global navigation satellite system (GNSS) were used for field positioning. Based on the measured seismic wave velocities and the estimated uniaxial compressive strength on the outcrops the rock mass on the investigated route was categorized into two groups according to the classification methods which were used, depending on the complexity of an excavation. It was concluded that more than 90% of excavations need to be carried out by blasting, while smaller amounts of rock material can be excavated by using a machine.

## Key words:

The island of Hvar, rock mass excavation, classification of excavation material, seismic waves

velocity, geophysical seismic methods, GNSS



# Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Klasifikacija stijenske mase za potrebe iskopa.....	3
2.1 Weaverova metoda klasifikacije.....	3
2.2 Klasifikacija materijala za potrebe iskopa (IGH, 2001).....	5
2.3 Primjena brzina posmičnih seizmičkih valova pri klasifikaciji sedimentnih stijenskih masa za potrebe iskopa.....	7
3. Metode istraživanja stijenske mase.....	9
3.1 Geofizička seizmička istraživanja.....	9
3.1.1. Tipovi seizmičkih valova.....	10
3.1.2. Plitka seizmička refrakcija (SRS).....	13
3.1.3. Višekanalna analiza površinskih valova (MASW).....	15
3.2. Primjena Schmidtovog čekića za procjenu tlačne čvrstoće stijene.....	20
3.3 Geodetska snimanja primjenom globalnih navigacijskih satelitskih sustava (GNSS).....	23
3.3.1 GNSS sustav.....	23
3.3.2 CROPOS (engl. CROatian POsitioning System).....	27
4. Klasifikacija stijenske mase za potrebe iskopa na dijelu vodoopskrbne mreže otoka Hvara.....	29
4.1 Geofizička istraživanja.....	31
4.2 Geotehničke značajke tla.....	35
5. Klasifikacija stijenske mase.....	37
5.1. Litološki sastav tla.....	37
5.1.1. Zona 1: Površinski sloj.....	37
5.1.2. Zona 2: Stijena V. i VI. kategorije (Novosel i dr., 1980).....	37
5.1.3. Zona 3: Stijena III. i IV. kategorije (Novosel i dr., 1980).....	38
5.1.4. Zona 4: Stijena I. i II. kategorije (Novosel i dr., 1980).....	38
5.2. Kategorizacija stijenske mase za potrebe iskopa.....	38
6. Zaključak.....	40
Literatura.....	
Popis slika.....	
Popis tablica.....	
Prilozi.....	

# 1. Uvod

U prirodi su prisutne stijenske mase različitih svojstava pa ih je zato potrebno klasificirati. Zbog svojih svojstava stijenska masa se može otkopavati na razne načine. Više je mogućih metoda otkopavanja, poput miniranja eksplozivom, te rivanja, razbijanja i kopanja upotrebom strojeva. To je također jedan od razloga klasifikacije stijenske mase s ciljem određivanja najprikladnije tehnologije i tehnike otkopavanja.

Unatrag pedesetak godina, razni autori su počeli predlagati različite metode i klasifikacije za procjenu mogućnosti otkopavanja stijenske mase. Mnoge od njih temelje se na empirijskim sustavima ocjenjivanja, a postoje i grafičke metode, dok neki autori predlažu korištenje brzina seizmičkih valova kao direktni pokazatelj podatljivosti stijenske mase otkopavanju. Metode se dijele na indirektnu i direktnu. Direktne metode zasnivaju se na konkretnim mjerenjima prilikom iskopa, dok se u ovom radu naglasak stavlja na indirektnu metodu. Indirektnu metodu zasnivaju se na mjerenju i istraživanju različitih geomehaničkih parametara (npr. RQD indeks, stanje trošnosti stijene, stanje diskontinuiteta...), a onda se na temelju dobivenih vrijednosti stijenska masa klasificira za potrebe iskopa. Tako su na primjer Abdullatif i Cruden (1983) koristili tri parametra: indeks opterećenja u točki (PLTi), razmak između diskontinuiteta u stijenskoj masi i RMR indeks (engl. Rock Mass Rating) kao rezultat geomehaničke klasifikacije istraživane stijenske mase. U svojem radu pokazali su kako se upotrebom navedenih parametara može odrediti metoda otkopavanja. S vremenom su klasifikacije unapredovale, te se uzimalo sve više podataka u obzir s ciljem što preciznijeg odabira metode iskopa. Tako je na primjer Smith (1986) predložio klasifikaciju za procjenu mogućnosti rivanja stijenske mase, a njegov naglasak je bio na uzimanju širokog spektra parametara stijenske mase. Preporučio je sustavno korištenje šest parametara stijenske mase: brzinu primarnih seizmičkih valova ( $V_P$ ), jednoosnu tlačnu čvrstoću intaktne stijene, stupanj trošnosti stijenske mase, razmak diskontinuiteta, postojanost diskontinuiteta i broj setova pukotina u stijenskoj masi.

Na području Hrvatske je u prošlosti bila zastupljena Građevinska norma (GN 200, 1978). Ta je norma zastarjela pa je zamijenjena kategorizacijom materijala za potrebe iskopa iz Pravilnika o „Općim tehničkim uvjetima za radove na cestama“ (IGH, 2001).

Korištenje brzina seizmičkih valova kao direktnog pokazatelja podatljivosti stijenske mase otkopavanju ima više prednosti poput brzine izvođenja, neinvazivnosti i male cijene koštanja. Često investitorima nisu prihvatljiva duga i skupa istraživanja, što je bio dobar poticaj da se i kod ovog istraživanja i klasifikacije stijenske mase primjene upravo takve metode. Za potrebe klasifikacije prikupljane su informacije na trasi buduće vodoopskrbne mreže otoka Hvara. Ulazni podaci za potrebe klasifikacije prikupljeni su korištenjem geofizičkih seizmičkih metoda. Za dobivanje relevantnih informacija i rezultata korištene su višekanalna analiza površinskih valova (MASW) i plitka seizmička refrakcija (SRS) . Osim navedenih geofizičkih metoda, provedena su ispitivanja Schmidtovim čekićem na izdancima stijena s ciljem procjene jednoosne tlačne čvrstoće intaktne stijene.

## 2. Klasifikacija stijenske mase za potrebe iskopa

### 2.1 Weaverova metoda klasifikacije

Weaver-ova klasifikacija za ocjenu mogućnosti rijanja temelji se na RMR klasifikaciji koju je predložio Bieniawski (1973), a prikazana je u Tablici 1. Weaver je preuzeo pojedine parametre RMR klasifikacije. Prikaz parametara je u tablici 1. dok su ocjene za određivanje kvalitete stijenske mase u tablici 2. Parametre poput vrijednosti RQD-a i stanja podzemne vode je zamijenio komponentom seizmičke brzine, osim toga mijenjao je i način ocjenjivanja orijentacije diskontinuiteta. Razlog je što je orijentacija diskontinuiteta u RMR sustavu klasifikacije predodređena potrebama osiguranja stabilnosti stijenske mase, a isto je onda bilo nepovoljno za ocjenu mogućnosti rijanja (Jug, 2020).

Modificirana Weaver-ova klasifikacija prikazana je u tablici 3. Stijenska masa se klasificira u pet kategorija, u rasponu od vrlo dobre do vrlo loše. Kategorija se određuje na temelju brzine P-valova i sljedećih geoloških parametara: *DS* - razmak diskontinuiteta, *Hd* - tvrdoća stijene, *RMW* - stupanj trošnosti stijenske mase, *JP* - postojanosti diskontinuiteta i *JO* - orijentacije diskontinuiteta). Svaka ocjena u tablici popraćena je i tekstualnim opisom stijene. Ukupna ocjena dobiva se zbrajanjem ocjena dobivenih za svaki pojedini parametar, a govori nam koji tip dozera s rijačem se može primijeniti s obzirom na mogućnosti rijanja. Npr. ako je ukupna ocjena *100 – 90* rijanje nije opće moguće, a stijenska masa se može kopati samo miniranjem. To vrijedi za I. klasu stijenske mase ili vrlo dobru stijensku masu. Ostale klase je moguće rijati.

Tablica 1. RMR klasifikacija stijena ( prema Bieniawski, 1973).

Parametri		Klasifikacijski broj i opis				
		I Vrlo dobra	II Dobra	III Zadovoljavajuća	IV Loša	V Vrlo loša
1	RQD (%)	90 - 100 16	75 - 90 14	50 - 75 12	25 - 50 7	< 25 3
2	RMW	Svježa 9	Djelomično 7	Srednje 5	Jako 3	Potpuno 1
3	Jednoosna tlačna čvrstoća (MPa)	> 200 10	100 - 200 5	50 - 100 2	25 - 50 1	< 25 0
4	Razmak diskontinuiteta	> 3 m 30	1 - 3 m 25	0.3 - 1.0 m 20	50-300mm 10	< 50 mm
5	Zijev	< 0.1 mm 5	< 0.1 mm 5	0.1 – 1.0 mm 4	1 – 5 mm 3	> mm 1
6	Postojanost diskontinuiteta	Nepostojane 5	Djelomično postojane 5	Postojane, neotvorene 3	Postojane, malo otvorene 0	Postojane, otvorene 0
7	Protok podzemne vode	Nepostojan 10	Nepostojan 10	Neznatan 8	Umjeren 5	Obilan 2
8	Orijentacija diskontinuiteta Temelji tunela	Jako povoljno 15 15	Povoljno 13 13	Dovoljan 10 10	Nepovoljan 5 0	Jako nepovoljan 3 -10

Tablica 2. Ukupne ocjene za klasifikaciju stijenske mase (prema Bieniawski,1973)

Broj klase	1	2	2	4	5
Opis stijene	Vrlo dobra	Dobra	Zadovoljavajuća	Loša	Vrlo loša
Ukupna ocjena	90 - 100	70 - 90	50 - 70	25 - 50	< 25

Tablica 3. Weaver-ov sustav bodovanja ripabilnosti stijena (Jug i dr, 2020)

Klasa stijene	I	II	III	IV	V
Opis	Vrlo dobra	Dobra	Zadovoljavajuća	Loša	Vrlo loša
V <sub>P</sub> [m/s]	> 2150	2150 – 1850	1850 – 1500	1500 – 1200	1200 – 450
Ocjena	26	24	20	12	5
Hd	Ekstremna	Vrlo tvrda	Tvrda	Mekana	Vrlo mekana
Ocjena	10	5	2	1	0
RMW	Svježa	Djelomično	Srednje	Jako	Potpuno
Ocjena	9	7	5	3	1
DS [mm]	> 3000	3000 – 1000	1000 – 300	300 – 50	< 50
Ocjena	30	25	20	10	5
JP	Nepostojane	Djelomično postojane	Postojane, neotvorene	Postojane, malo otvorene	Postojane, otvorene
Ocjena	5	5	3	0	0
JS	Neotvorene	Malo otvorene	Otvorenost < 1 mm	Otvorenost, zijev < 5 mm	Otvorenost, zijev > 5 mm
Ocjena	5	5	4	3	1
Smjer i kut nagiba pukotina*	Vrlo nepovoljan	Nepovoljan	Djelomično nepovoljan	Povoljan	Vrlo povoljan
Ocjena	15	13	10	5	3
Ukupna ocjena	100 – 90	90 – 70**	70 – 50	50 – 25	< 25
Mogućnost rijanja	Nemoguće rijanje, samo miniranje	Ekstremno teško rijanje ili miniranje	Vrlo teško rijanje	Teško rijanje	Lako rijanje
Odabir dozera	–	CAT DD9/D9 G	CAT D9/D8	CAT D8/D7	CAT D7
Snaga dozera	–	770 – 385 KS 575 – 290 kW	385 – 270 KS 290 – 200 kW	270 – 180 KS 200 – 135 kW	180 KS 135 kW

## 2.2 Klasifikacija materijala za potrebe iskopa (IGH, 2001)

Prema „Općim tehničkim uvjetima za radove na cestama“ u knjizi II propisana kategorizacija stijenske mase za potrebe iskopa. Opis kategorizacije detaljnije je obrađen u poglavlju vezanom za široke iskope. Široki iskopi su u projektima definirani kao: iskopi usjeka, zasjeka, pozajmišta, iskopi radi korekcija vodotoka i regulacija rijeka, iskopi kod devijacija cesta i prilaznih putova, kao i široki iskopi pri gradnji objekta (IGH, 2001). Iskop se obavlja

prema normama koje su predviđene za iskop i one ovise o vrsti tla, tehnologiji i upotrijebljenoj mehanizaciji koja ima mogućnost obavljanja iskopa.

Kategorizacija se dijeli u tri skupine, kako je prikazano u tablici 4., a to su materijali kategorije A, B i C. U kategoriju A klasificiraju se svi materijali koji su čvrsti i potrebno je miniranje kod cijelog iskopa. To su svi čvrsti materijali i veoma čvrsta kamena tla kompaktnih stijena (eruptivna, metamorfna i sedimentne), zdravog stanja, manji rastresiti slojevi materijala na površini ili mjestimičnim gnijezdima ilovače i lokalnim trošnim ili zdrobljenim stijenama. Da bi materijal za iskop pripadao u tu kategoriju nužno je da 50% samaca bude veće od  $0.5 m^3$  (IGH, 2001). Za iskop materijala kategorije A potrebno je miniranje i važne su informacije o fizikalno - mehaničkim svojstvima stijenske mase, kao i geološke značajke poput smjera pružanja i pada slojeva.

Kategorija B obuhvaća materijale koji spadaju u polučvrsta kamenita tla, za iskop koji je potrebno djelomično miniranje, a većina iskopa obavlja se predviđenim strojem. Materijali koji spadaju pod kategoriju B su: flišni materijali, rastresiti materijali, homogeni lapori, trošni pješčenjaci i mješavine lapora i pješčenjaka, većina dolomita (osim vrlo kompaktnih), raspadnute stijene na površini u debljim slojevima miješanim raspadnutim zonama, jako zdrobljeni vapnenac, sve vrste škriljevca, neki konglomerati i slični materijali (IGH, 2001).

Kategorija C obuhvaća sve materijale koje nije potrebno minirati i mogu se izravno kopati mehanizacijom. Kopanje se izvodi pogodnim strojevima koji su predviđeni POG-om (Projekt organizacije građenja). Strojevi kojima se obavlja iskop su dozeri, bageri ili skreperi. Materijali navedeni u kategoriji C mogu se i rijati, a to se izvodi s ciljem povećanja učinka stroja koji izvodi iskop. Vrste materijala koje spadaju u ovu kategoriju su: sitnozrna vezana (koherentna) tla kao što su gline, prašine, prašinaste gline (ilovače), pjeskovite prašine i les. U istu kategoriju pripadaju i krupnozrna nevezana tla kao što su pijesak, šljunak odnosno njihove mješavine, prirodne kamene drobine – siparišni ili slični materijali, te mješovita tla, odnosno mješavine krupnozrnih nevezanih i sitnozrnih vezanih tala (IGH, 2001).

Tablica 4. Klasifikacija stijenske mase (prema IGH, 2001)

Kategorija	Opis	Način iskopa
A	Sve vrste čvrstih i vrlo čvrstih, kompaktnih stijena (eruptivnih, metamorfnih i sedimentnih) u zdravom stanju, uključujući i moguće tanje slojeve rastresitog materijala na površini ili takve stijene s mjestimičnim gnijezdima ilovače i lokalnim trošnim ili zdrobljenim zonama.	Miniranje kod cijelog iskopa.
B	Polučvrsta kamenita tla, flišne naslage, uključujući i rastresita tla, homogeni lapori, trošni pješčenjaci i mješavine lapora i pješčenjaka, većina dolomita (osim vrlo kompaktnih), raspadnute stijene na površini u debljim slojevima s miješanim raspadnutim zonama, jako zdrobljeni vapnenac, sve vrste škriljaca, neki konglomerati i slična tla.	Djelomično miniranje, ostali dio iskopa obavlja se strojem.
C	Sitnozrna vezana (koherentna) tla kao što su gline, prašine, prašinate gline (ilovače), pjeskovite prašine i les. Krupnozrna nevezana (nekoherentna) tla kao što su pijesak, šljunak odnosno njihove mješavine, prirodne kamene drobine – siparišna ili slična tla. Mješovita tla koja su mješavina krupnozrnih nevezanih i sitnozrnih vezanih tala.	Mogu se kopati bez miniranje, uz upotrebu pogodnih strojeva – dozer, jaružalo ili skreper.

### 2.3 Primjena brzina posmičnih seizmičkih valova pri klasifikaciji sedimentnih stijenskih masa za potrebe iskopa

U nastavku je prikazan pristup za klasifikaciju sedimentnih stijenskih masa za potrebe površinskih iskopa pomoću izmjerenih seizmičkih brzina S-valova (Jug *i dr*, 2020). Klasifikacija sedimentne stijenske mase za potrebe iskopa temelji se na seizmičkim brzinama S-valova koji su određene primjenom geofizičke seizmičke metode višekanalne analize površinskih valova (MASW).



Jug je sa svojim suradnicima (2020) predložio klasifikaciju sedimentnih stijena za potrebe iskopa. Primjenom geofizičkih istraživanja, točnije MASW metodom, dolazi se do izmjerenih brzina S-valova prema kojima je predložena klasifikacija u četiri kategorije, kako je prikazano u tablici 5. U prvu kategoriju spadaju sve sedimentne stijene s brzinama S-valova većim od  $1200 \text{ m/s}$  i predlaže se metoda otkopavanja pomoću miniranja. Druga kategorija je između  $1000 - 1200 \text{ m/s}$  i metoda koja se predlaže za otkopavanje je razbijanje hidrauličnim čekićem. Treća kategorija je od  $600 - 1000 \text{ m/s}$ , a rijačanje je predložena metoda otkopavanja. U posljednju, četvrtu kategoriju pripadaju materijali izmjerene  $V_s$  brzine manje od  $600 \text{ m/s}$ , a takvi materijali se mogu kopati primjenom hidrauličnih bagera s korpom.

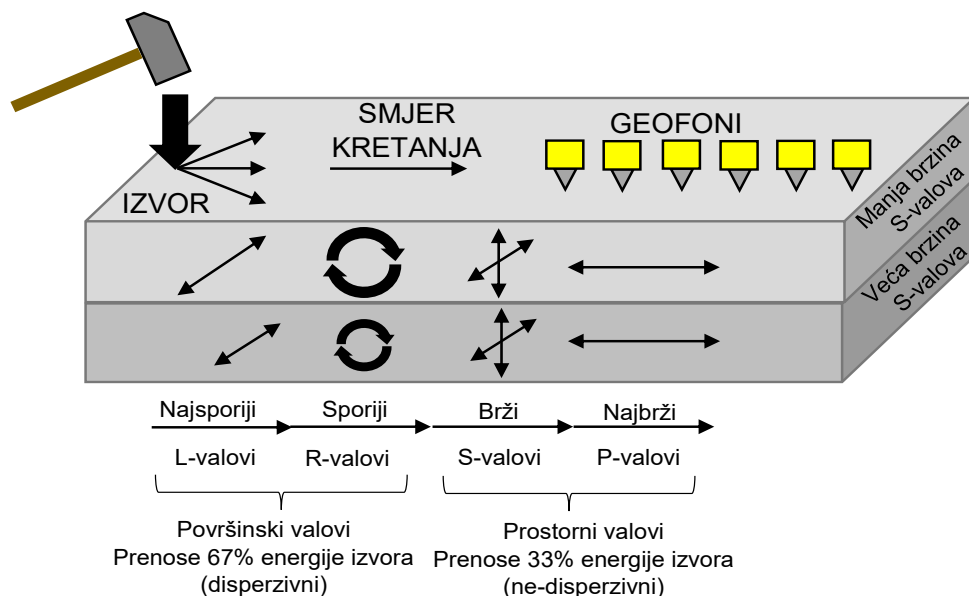
Tablica 5. Klasifikacije sedimentne stijenske mase za potrebe iskopa (Jug *i dr.*, 2020)

KATEGORIJA SEDIMENTNE STIJENSKE MASE	IZMJERENA $V_s$ (m/s)	PRIKLADNA METODA OTKOPAVANJA
I	$> 1200$	Miniranje (minske bušotine i eksploziv)
II	$1000 - 1200$	Razbijanje (hidraulični čekić)
III	$600 - 1000$	Rijačanje (dozerski rijač)
IV	$< 600$	Kopanje (bager s korpom)

## 3. Metode istraživanja stijenske mase

### 3.1 Geofizička seizmička istraživanja

Djelovanjem vanjske sile na površinu tijela javljaju se naprezanja unutar tijela koja su proporcionalna vanjskoj sili. Naprezanje se može podijeliti na dvije komponente: normalno naprezanje koje djeluje pod pravim kutom na površinu i posmično naprezanje koje djeluje u ravnini površine. Naprezanje je unutarnja sila raspodijeljena po jedinici površine nekoga čvrstog tijela koja se javlja kao reakcija na djelovanje vanjskih sila. Zbog unutarnjih sila javljaju se u tijelu deformacije s kojima su naprezanja vezana preko Hookeova zakona. Taj zakon govori o tome kako su naprezanje i deformacija linearno ovisni i tijelo se ponaša elastično sve do granice popuštanja. Ako se tijelo napregne ispod granice elastičnosti, nakon naprezanja će se vratiti u prvobitni oblik, odnosno ponašati će se elastično. No, ako se napregne iznad granice elastičnosti, tijelo se ponaša plastično ili duktilno, te nastaju trajna oštećenja. Ako se nastavi s naprezanjima doći će do sloma materijala. U slučaju istraživačke seizmologije do sloma dolazi za vrijeme potresa, kada je otpušteno toliko energije da tijelo to ne može apsorbirati i dolazi do sloma. Međutim, kada je riječ o seizmičkim mjerenjima za potrebe geotehničkih istraživanja, količina naprezanja i deformacija su male i odgovaraju elastičnom ponašanju prirodnih materijala definiranim različitim modulima elastičnosti. Prilikom geofizičkih seizmičkih istraživanja seizmička energija širi se od seizmičkog izvora u svim smjerovima, u obliku seizmičkih valova. Četiri su glavna tipa seizmičkih valova, a svaki je okarakteriziran specifičnim gibanjem čestica (Slika 1.)



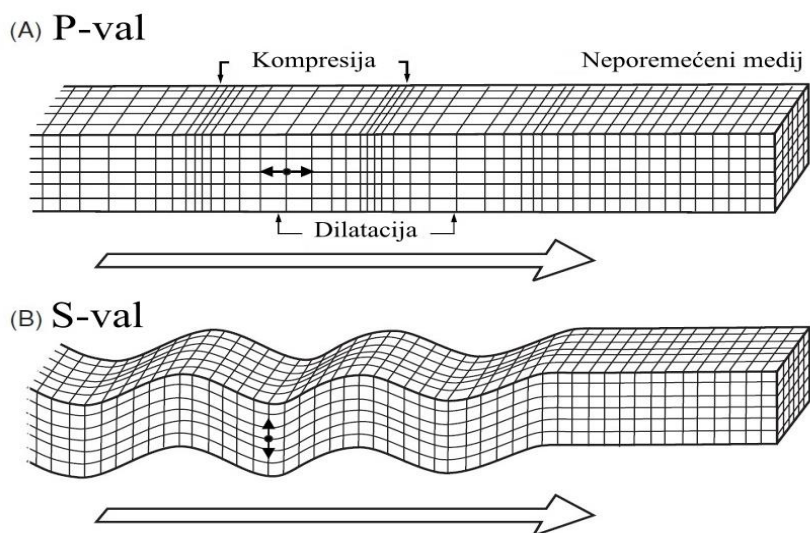
Slika 1. Interpretacija dešavanja u mediju nakon izazivanja seizmičkih valova udarom čekića (Jug *i dr.*, 2020)

### 3.1.1. Tipovi seizmičkih valova

Seizmički valovi su impulsi energije elastičnog naprezanja, putuju od bilo kojeg seizmičkog izvora brzinama koje određuju moduli elastičnosti i gustoće medija kroz koje prolaze. Postoje dvije glavne vrste seizmičkih valova površinski valovi (R-Rayleighovi valovi i L-Loweovi valovi) i prostorni valovi (P-uzdužni i S-transverzalni).

Dvije vrste valova mogu putovati kroz elastični medij. To su uzdužni P-valovi i transverzalni S-valovi (Slika 2.). Za seizmološka istraživanja najbrži valovi su P-valovi, još poznati kao longitudinalni, primarni, kompresijski valovi. Čestice materijala osciliraju oko fiksnih točaka u smjeru širenja vala kompresijskim ili dilatacijskim naprežanjem, isto kao i zvučni val. Zbog mogućnosti kompresije i dilatacije P-val ima nedostatak što se može zbog tih svojstava kretati kroz čvrste medije, ali i fluide. Problem je što  $V_P$  raste zbog prisutnosti podzemnih voda. Prividni dojam koji se dobiva je da se radi o stijenskoj masi veće kvalitete, a riječ je o stijenskoj masi koja je saturirana vodom (Jug *i dr.*, 2020). Druga vrsta valova su S-valovi, poznati još pod nazivom posmični valovi, sekundarni ili poprečni valovi. Gibanje čestica je pod pravim kutom u odnosu na smjer širenja valova i događa se čistom posmičnom deformacijom. Sporiji su od P-valova i kreću se samo kroz čvrste medije.

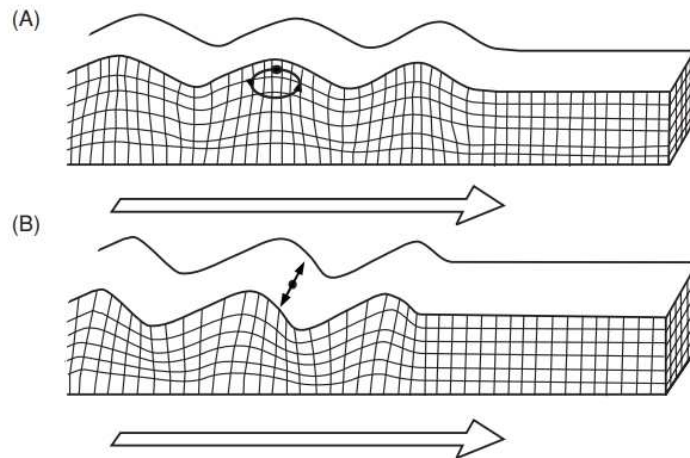
Određene frekvencije sadržane u P i S valovima koje putuju kroz određeni medij ovise o modulu elastičnosti i gustoći medija kroz koji prolaze.



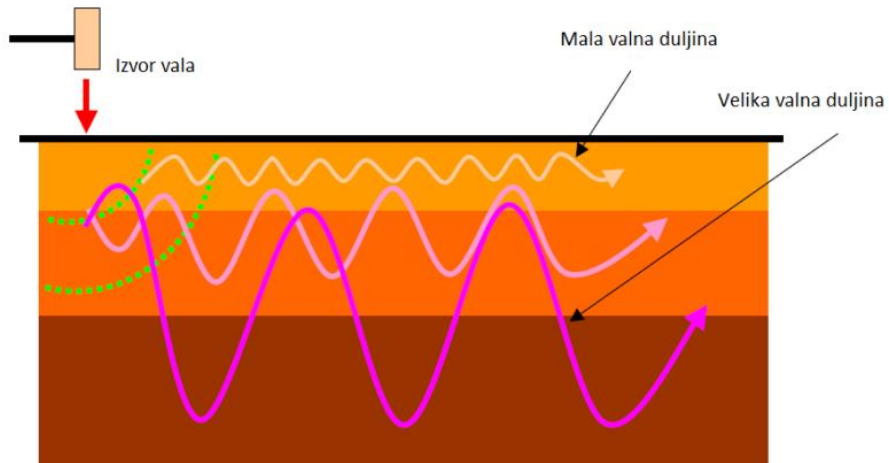
Slika 2. Transverzalni val i (B) longitudinalni val (prerađeno prema Reynolds, 2011)

Rayleighevi i Loveovi valovi ne prodiru duboko u niže slojeve tla i poznati su pod nazivom površinski valovi (Slika 3.). Rayleighevi valovi se gibaju eliptično kroz medij, amplituda im pada s dubinom, a zbog specifičnosti njihovog kretanja u tlu nazivaju se još i „valjanje tla“ (engl. Ground roll) (Slika 3A). Specifičnost Rayleighevih valova je to što se mogu gibati samo kroz čvrsti medij. Smjer gibanja čestica kod Loveovih valova je paralelan s površinom tla. Javljaju se samo u slučaju kada su prisutni mediji s manjom brzinom *S-valova* preko kojeg ide sloj s većim brzinama *S-valova*. (Reynolds, 2011). Amplituda bočnog gibanja Loveovih valova pada s dubinom.

Najvažnije 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 (Jug, 2020). Disperzija površinskih valova je prikazana na slici 4. Generiranje disperzije krivulje jedan je od najkritičnijih koraka za generiranje točnog profila brzine *S-vala* (Gibbens, 2014). Fazna brzina je brzina pri pojedinoj frekvenciji. Valovi velike valne duljine (niske frekvencije) šire se brže, a valovi male valne duljine (visoke frekvencije) šire se sporije (Jug, 2020). Disperzijska krivulja prikazuje ovisnosti fazne brzine o frekvenciji. Ovo svojstvo imaju samo površinski valovi, prostorni nemaju.



Slika 3. Elastične deformacije površinskih valova: (A) Reyleighevi valovi (B) Loweovi valovi (Reynolds, 2011)

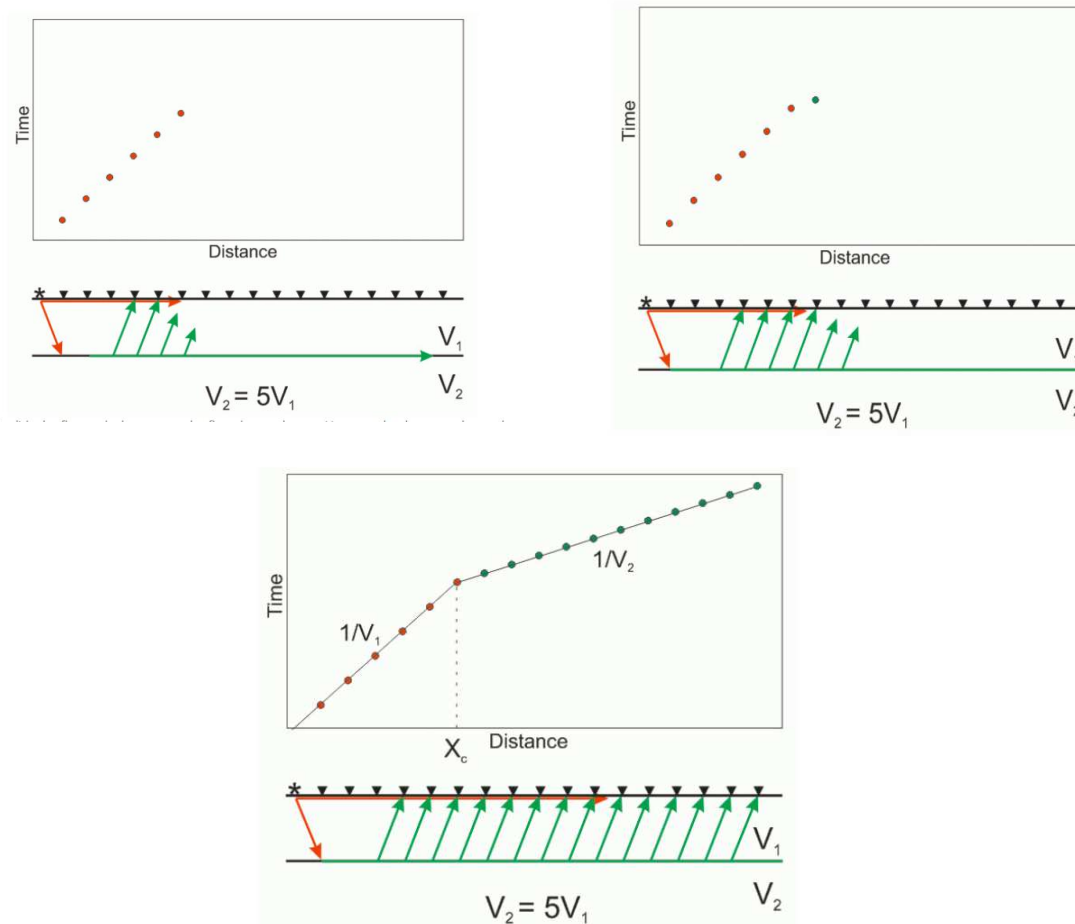


Slika 4. Prikaz disperzije površinskih valova (prerađeno prema Hayashi, 2003)

### 3.1.2. Plitka seizmička refrakcija (SRS)

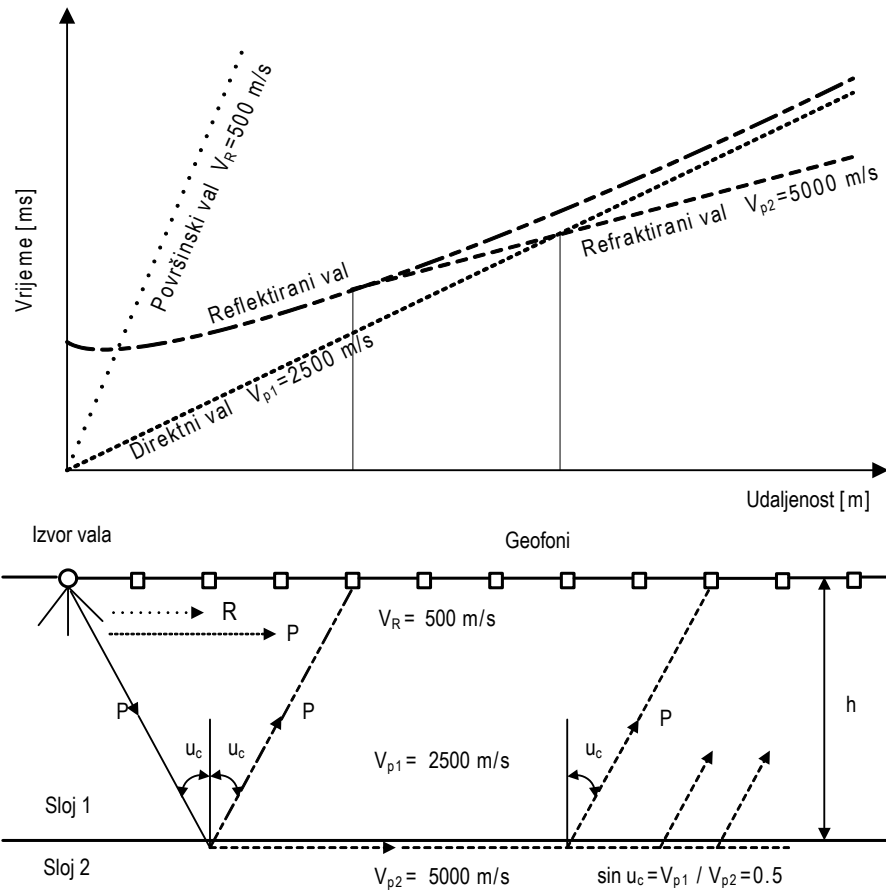
Seizmička refrakcija je metoda koja se često koristi kod terenskih istraživanja dinamičkog ponašanja tla i stijena. Glavna primjena metode seizmičke refrakcije nalazi se u postupku za određivanje brzina elastičnih valova u uslojenom tlu i stijeni po dubini (Strelec, 2012). Parametar koji se dobiva pomoću ove metode je seizmička brzina slojeva tla. Pomoću tih parametara mogu se dobiti važni podaci koji pomažu kod projektiranja i izvedbe geotehničkih radova. Primjeri primjene seizmičkih brzina su: procjena čvrstoće stijene, procjena rijavosti te potencijalni sadržaji vode u slojevima tla. Uz uobičajene inženjerske primjene geotehničkog istraživanja za temeljenje brana, velikih građevina, seizmička refrakcija se sve više počela koristiti u hidrogeološkim istraživanjima za određivanje debljine zasićenog vodonosnika, zona rasjeda, itd. (Reynolds, 2011).

Metoda seizmičke refrakcije temelji se na principu loma seizmičkih valova (P-i/ili S-vala). Do loma seizmičkog vala dolazi kada val nailazi na granicu različitih medija, kod kojih postoji razlika u brzini. Smjer kretanja vala se mijenja, jer se lomi pri ulasku u novi medij. Veličina promjene smjera regulirana je razlikom u seizmičkoj brzini između dva medija, a definirana je Snellovim zakonom (Reynolds, 2011). Dobiveni rezultati odnose se na vrijeme putovanja vala, veličinu pomaka i brzine u podzemnim slojevima. Podaci dobiveni iz rezultata koriste se za određivanje debljine slojeva ispod površine. Seizmički signal se u tlo unaša preko dinamičkog izvora. Kao izvor može se koristiti eksploziv, ali i razni alati i uređaji, kao na primjer udarac čekića, ispuštanje utega ili generator elastičnih valova. Nastala energija može putovati izravno kroz površinski sloj (izravni nailasci) ili putuje kroz različite slojeve prije nego se vrati na površinu (refraktirani nailasci). Nailasci valova detektiraju se na površini pomoću niza prijemnika ili geofona koji su pravilno raspoređeni po istraživačkom profilu. Na određenoj udaljenosti od izvora, gdje energija kritično refraktiranog vala pretječe energiju direktnog vala, nalazi se točka poznata pod nazivom „*crossover distance*“ (Anomohanran, 2013). Ona se detektira kao prvi nailazak, a vidljiva je na slici 5.



Slika 5. Prikaz prvih nailazaka (Preuzeto sa: [www.geometrics.com](http://www.geometrics.com))

Kompresijski valovi (P-valovi) koji daju potrebne informacije o dubini slojeva i valovi posmični (S-valovi) koji pružaju dodatne podatke o inženjerskim svojstvima promatranog podzemnog medija mogu biti korišteni u metodi seizmičke refrakcije (Anomohanran, 2013). Metoda seizmičke refrakcije se oslanja na tendenciju povećavanja brzine kompresijskih valova s dubinom, samim time je ova metoda neosjetljiva za slojeve s manjom brzinom ispod slojeva veće brzine, pogotovo ako su male debljine. Na temelju podataka dobivenih analizom terenskih istraživanja, geofizičar interpretira profile koji prikazuju debljine slojeva i sastav tla te odnose u podzemlju koje se nalazi na istražnoj lokaciji.



Slika 6. Princip geofizičkog istraživanja seizmičkim valovima (Gazdek, 2003)

### 3.1.3. Višekanalna analiza površinskih valova (MASW)

Metodu višekanalne analize površinskih valova (MASW- Multichannel Analysis of Surface Waves) uveli su Park i sur. (1999). MASW istraživanja se mogu općenito podijeliti na pasivna i aktivna istraživanja, ovisno o izvoru valova koji se koriste pri istraživanju. U aktivnoj metodi se površinski valovi generiraju impulsnim ili vibrirajućim izvorima, dok pasivna MASW metoda koristi površinske valove generirane iz prirodnih izvora ili nekih antropogenih aktivnosti, npr. promet. MASW metoda je razvijena da bi se prevladali neki nedostaci od SASW metode. SASW (spektralna analiza površinskih valova) je metoda koja koristi karakteristike disperzije Rayleigh-evih valova u višeslojnom mediju za procjenu brzine posmičnih valova. Valovi se generiraju impulzivnim izvorom i detektiraju ih geofoni. Prikupljeni podaci analiziraju se u frekvencijskoj domeni da bi se odredila krivulja disperzije.



Disperzijska krivulja se tada koristi kao osnova za izračun profila brzine posmičnog vala kao funkcije dubine za istražno mjesto. Neke prednosti MASW metode u odnosu na SASW metodu:

- Za prikupljanje podataka na terenu potrebno je mnogo manje vremena nego kod SASW metode.
- Analiza disperzije u MASW-u je brža i lakša za automatizaciju. Podaci svih prijavnika određuje se odjednom, umjesto ponovljenih izračuna za više parova prijavnika u SASW metodi.
- Izvore buke je lakše identificirati i ukloniti nego kod SASW metode. Smanjenjem buke dolazi do povećanja točnosti u analizi disperzije i u konačnici do preciznijeg profila brzine posmičnog vala.
- MASW metoda pruža veće dubine istraživanja od SASW metode, s obzirom na isto udarno opterećenje. Dubine koje se mogu postići korištenjem (aktivne) MASW metode općenito je oko 30 m, ali s time da površinske valove stvara seizmički izvor, npr. malj. Pasivna MASW istraživanja rezultiraju većom dubinom istraživanja nego aktivna istraživanja.
- MASW se može koristiti za analizu pasivno generiranih površinskih valova. Pasivni izvori koji generiraju površinske valove imaju niže frekvencije (duže valne duljine) od valova generiranih udarnim (aktivnim) opterećenjem. Upotreba pasivno generiranih valova može znatno povećati dubinu istraživanja.

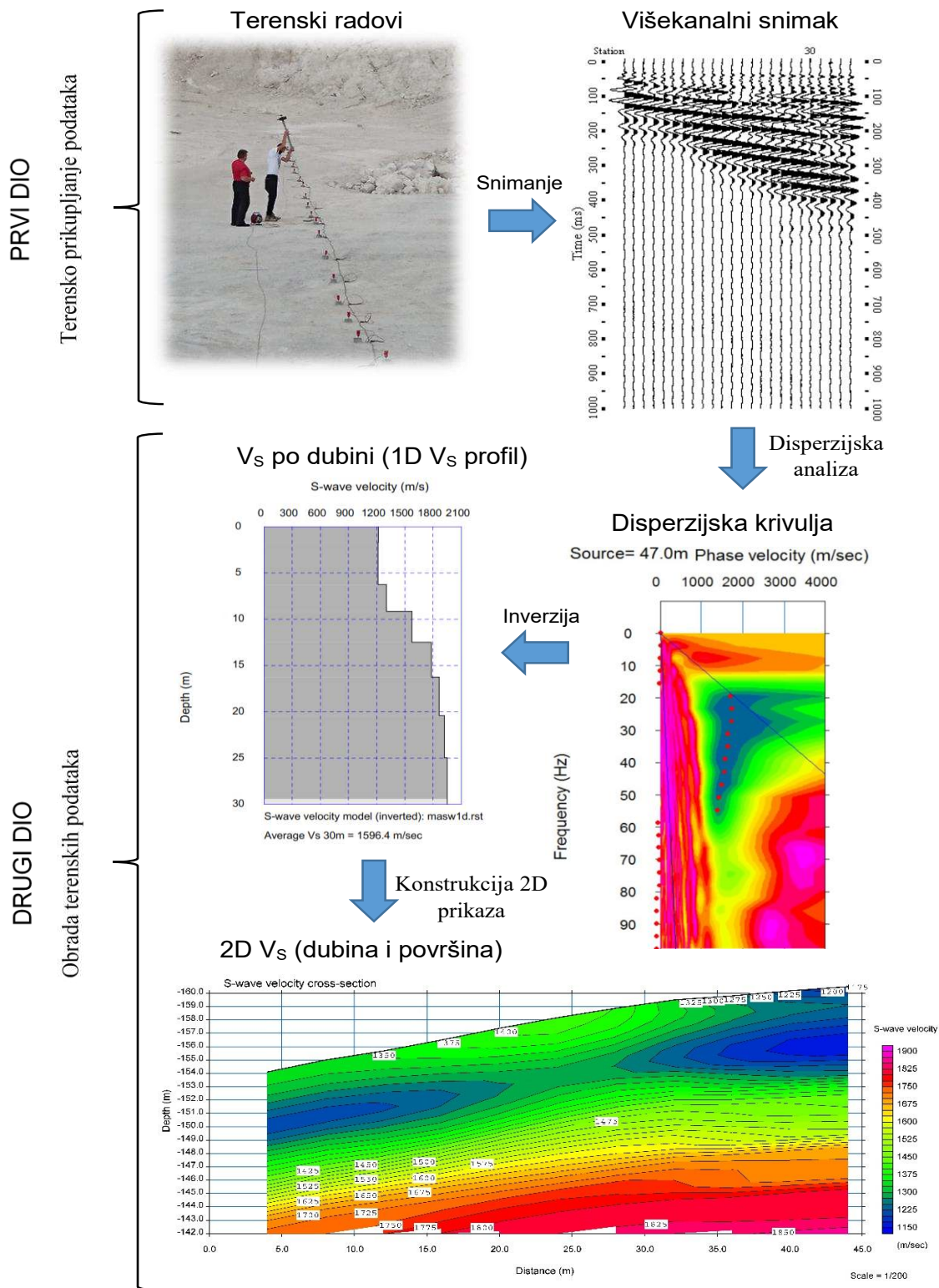
Seizmički pristupi koji su se do pojave MASW-a koristili za plitka površinska seizmička istraživanja obično su bili seizmička refleksija visoke razlučivosti ili refrakcijska seizmika, a te metode istraživanja daju informacije do dubine i nekoliko stotina metara. Frekvencije Seizmičkih signala iz spomenutih istraživanja kreću se većinom oko  $50 \text{ Hz}$ . Dok metoda višekanalne analize površinskih valova (MASW) koristi niže frekvencije (npr.  $3\text{-}30 \text{ Hz}$ ), te se primjenjuje za mnogo manje dubine istraživanja, do nekoliko desetaka metara.

Dubina uzorkovanja određene frekvencijske komponente površinskih valova izravno je proporcionalna njegovoj valnoj duljini, a to svojstvo čini brzinu površinskog vala ovisnom o frekvenciji (Park, 2007). Metoda višekanalne analize površinskih valova (MASW) nastoji

iskoristiti svojstvo disperzije površinskih valova u svrhu  $V_S$  profiliranja u 1D (po dubini) ili 2D (po dubini i širini) formatu. Za snimanje se koristi višekanalni sustav s nizom prijemnika (geofona) raspoređenih na jednakim udaljenostima po profilu. Može imati 24 ili više kanala.

Modul smicanja jedan je od važnijih inženjerskih parametara, pogotovo u geotehnici, a izravno je povezan s krutošću materijala. S druge strane, brzina posmičnog vala ( $V_S$ ) je najbolji pokazatelj krutosti materijala.

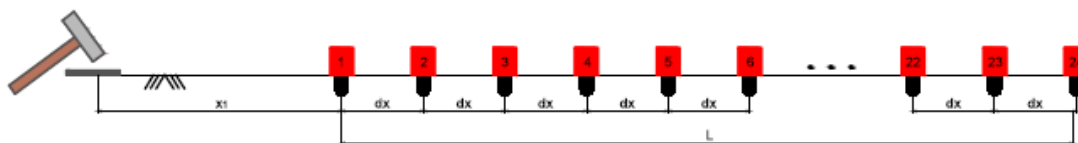
Procedura provođenja MASW istraživanja može se podijeliti na dva glavna dijela (slika 7). Prvi dio je terensko prikupljanje podataka, odnosno višekanalnih seizmičkih snimaka. Drugi dio odnosi se na obradu i interpretaciju terenskih podataka, a može se podijeliti u tri koraka (Jug, 2020). Prvi korak obrade podataka je disperzijska analiza, kojom se za svaku terensku snimku dobiva disperzijska krivulja. Disperzijska krivulja ili krivulja fazne brzine prezentira odnos između fazne brzine i frekvencije, gdje je fazna brzina zapravo brzina širenja R-valova na svakoj pojedinoj frekvenciji. Drugi korak obrade podataka je inverzija ili povratna analiza, kojom se dobivaju varijacije  $V_S$  brzine po dubini (1D  $V_S$  profili), a to su zapravo teorijske disperzijske krivulje najbliže izmjenjenim krivuljama. 2D (dubina i površina) prikazi  $V_S$  konstruiraju se interpolacijom između 1D profila, koji su na istraživanoj površini smješteni na sredine geofonskih rasporeda (Jug, 2020).



Slika 7. Prikaz cjelokupnog postupka istraživanja MASW metodom (Jug *i dr.*, 2020)

Aktivna višekanalna analiza površinskih valova uvedena je u geofizička istraživanja 1999. godine. Najčešći rezultat istraživanja koji se može dobiti je dvodimenzionalni  $V_S$  profil. Uobičajeni način snimanja je pomoću aktivnog seizmičnog izvora (npr. čekića) i linearnog niza prijelnika (Slika 8). Za mjerenje se koriste površinski valovi koji se šire vodoravno, duž površine od točke udara do točke prijelnika, daju  $V_S$  brzine u jednodimenzionalnom ili dvodimenzionalnom formatu na brz i jeftin način. Dubina tla koja se može istraživati je u rasponu od 3 do 30 m, a varira ovisno o lokaciji istraživanja i vrsti izvora valova koji se koristi za vrijeme istraživanja. Što je veća snaga udarca veće su valne duljine, a samim time i dubine prodiranja. Izvori udarca koji proizvode veliku energiju mogu generirati velike valne duljine, ali problem je što su neekonomični i nisu prikladni za rad na terenu. Zato se koriste kontrolirani seizmički izvori kao što je čekić. Za prijenos energije u tlo se konvencionalno koriste metalne ploče. Za istraživanja u geotehnici preporučuju se vertikalni, niskofrekventni  $<4,5$  Hz geofoni (Deyi dr., 2012).

Važno je da geofoni budu postavljeni okomito na tlo jer registriraju samo okomita kretanja. Spojeni su na centralnu jedinicu za prikupljanje podataka i računalo opremljeno posebnim računalnim programom.



Slika 8. Prikaz MASW profila za mjerenje, linija od 24 geofona koji su na udaljenosti od  $d_x$ , izvor udaljen za  $x_1$  (Ólafsdóttir, E. A., 2014)

Frekvencija snimanja koja se najčešće koristi kod MASW metode je  $1000$  Hz. To odgovara intervalu uzorkovanja od  $1$  ms. Kod impulsnih seizmičkih izvora za MASW istraživanja ukupno vrijeme snimanja obično je oko  $1$  sekunde. Dok je veći razmak prijelnika ili se očekuju vrlo niske brzine posmičnog vala vrijeme snimanja je dulje, npr  $2$  sekunde.

Maksimalna dubina je određena najdužom valnom duljinom koja se dobije za vrijeme prikupljanja podataka. Empirijski kriterij po kojem se dobiva maksimalna dubina:

$$Z_{max} \approx 0.5 L_{max}$$

### 3.2. Primjena Schmidtovog čekića za procjenu tlačne čvrstoće stijene

Ernst Schmidt je švicarski inženjer koji je 1948. razvio uređaj za ispitivanje tlačne čvrstoće betona na temelju veličine odskoka. Dodatnim razvojem i preinakama, Schmidtov čekić se počeo koristiti i za procjenu mehaničkih svojstava stijena. Time je dobivena brza i jeftina metoda za procjenu jednoosne tlačne čvrstoće intaktne stijene, s prihvatljivom točnošću i pouzdanošću. Schmidtov čekić (engl. Schmidt Hammer, SH) može se koristiti u laboratoriju za mehaniku stijena, no još je važnije da se testovi mogu izvoditi na terenu, npr. na izdancima stijena, istražnim jamama i sl. Ispitivanje jednoosne tlačne čvrstoće (engl. Uniaxial Compressive Strength, UCS) je jednostavno, brzo i ne destruktivno, a kasnije su mogućnosti ispitivanja proširene i na procjenu tvrdoće stijene.

Mehanizam rada čekića je relativno jednostavan: uteg otpušten oprugom neizravno udara o površinu stijene posredstvom klipa, a vrijednost odskoka utega se zatim očitava izravno na numeričkoj skali u rasponu od 10 do 100 (Torabi i dr, 2011). Veličina odskoka utega čekića koja se dobiva udarom u stijenu preko klipa i pod silom opruge, pokazuje odskočnu tvrdoću ispitivanog uzorka stijene. Što je tvrdoća uzorka veća, veća je i veličina odskoka.

Postoje različiti tipovi izvedbe Schmidtovog čekića s obzirom na razinu energije udara, ali se obično za određivanje svojstava stijene koriste L i N tip Schmidtovog čekića. ISRM (engl. International Society for Rock Mechanics, ISRM) je prvotno predložio samo upotrebu L-tipa SH. No zbog svoga promjera vrha klipa i polumjera zakrivljenosti SH ima široki raspon primjenjivosti. Zbog toga treba obratiti pozornost kod odabira SH, npr. standardni čekići tipa L i N imaju odgovarajuću energiju udarca od 0,735 i 2,207 Nm. Kad je USC materijala ili stijenske diskontinuiteta izvan raspona od 20-150 MPa, osjetljivost čekića se smanjuje, a raspršivanje dobivenih rezultata se povećava (Aydin, 2009). Čekić tipa N je manje osjetljiv

na površinske nepravilnost i treba ga preferirati na terenu, dok čekić tipa L ima veću osjetljivost u nižim rasponima i dale bolje rezultate kod poroznih stijena manje čvrstoće i tvrdoće.

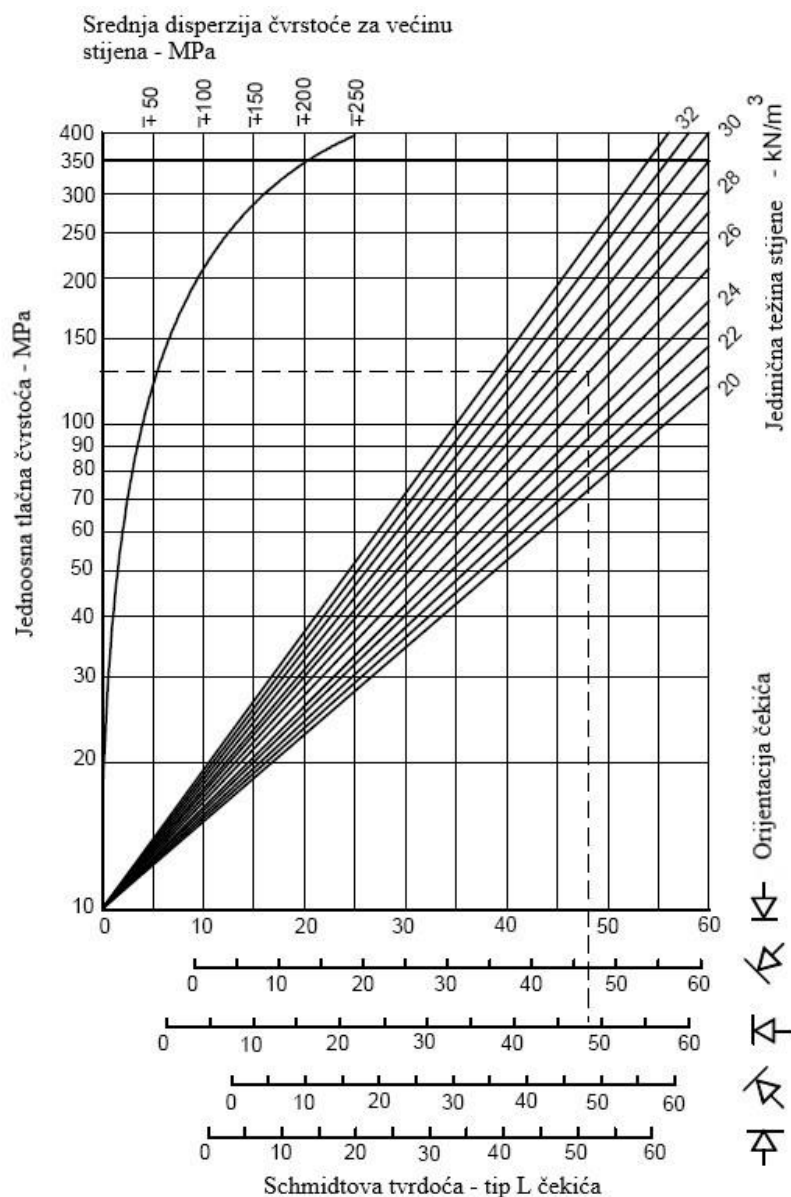


Slika 9. Prikaz Schmidtovog čekića (Jug, 2019)

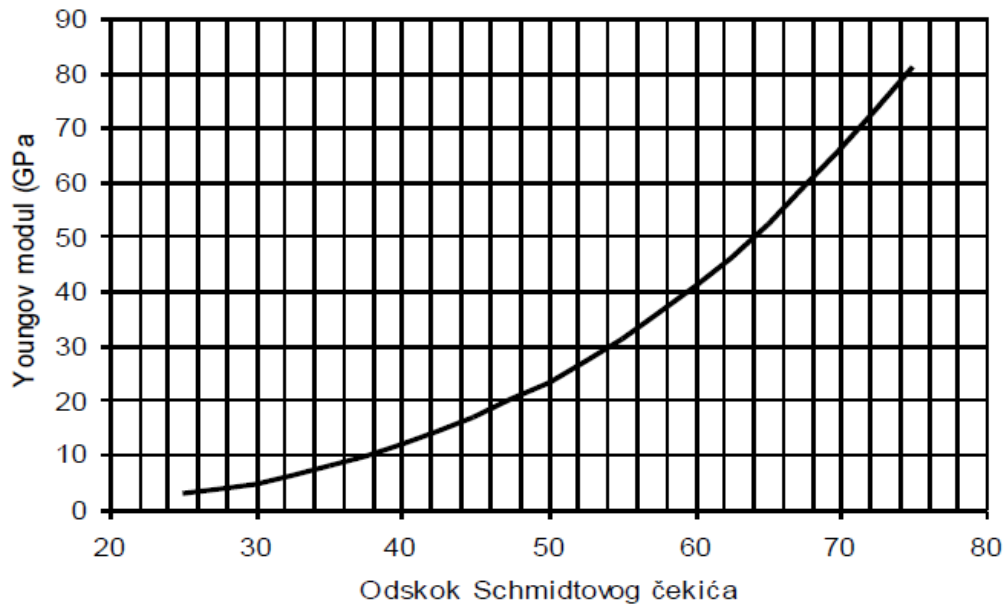
Prije početka korištenja Schmidtovog čekića potrebno je odraditi kalibraciju na čeličnom nakovnju za kalibraciju koji je izrađen od strane proizvođača SH. Nakon 10 ispitivanja na spomenutom nakovnju, dobiva se kalibracijski faktor koji je omjer vrijednosti odskoka i prosječne vrijednosti 10 ispitivanja (Jug, 2019). Kod laboratorijskih ispitivanja uzorci bi trebali biti točno propisanih oblika i dimenzija od strane ISRM-a, kako bi rezultati bili usporedivi s onima koji su dobiveni na terenu. Tako za primjenu L- tipa čekića promjer valjkastog uzorka ne smije biti manji od  $54,7 \text{ mm}$ , a kod primjene N-tipa  $84 \text{ mm}$ . Uzorci kvadratnog oblika ne smiju imati debljinu manju od  $100 \text{ mm}$  (Jug, 2019).

Prije izvedbe testiranja na podlozi ne smiju biti prisutne nečistoće, a podloga se mora ispitivati u vlažnom stanju. Izvedba testa se odvija po skupinama od po deset ispitivanja, pri čemu se pet najlošijih rezultata odbacuje. Vrijednost odskoka usvaja na temelju izračuna aritmetičke sredine pet najvećih očitavanja odskoka. Jednoosna tlačna čvrstoća uzorka stijene

procjenjuje se pomoću korelacijskog dijagrama prikazanog na slici 10, a na temelju zapreminske težine stijene i srednje vrijednosti odskoka Schmidt-ovog čekića. Na slici 11 je prikazan korelacijski dijagram za procjenu vrijednosti Youngovog modula stijene, također na temelju vrijednosti odskoka SH.



Slika 10. Prikaz korelacijskog dijagrama tlačne čvrstoće prema odskoku SH



Slika 11. Korelacijski dijagram Young-ovog modula

### 3.3 Geodetska snimanja primjenom globalnih navigacijskih satelitskih sustava (GNSS)

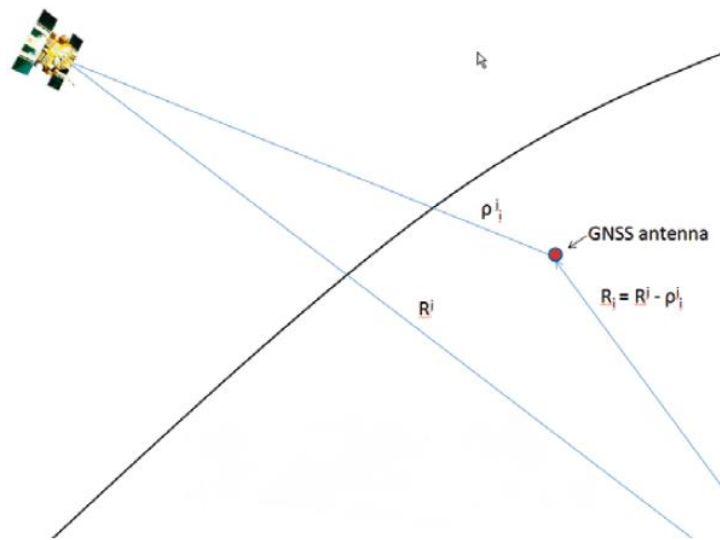
#### 3.3.1 GNSS sustav

Globalni navigacijski satelitski sustavi (GNSS) razvijeni su ranih sedamdesetih zbog poboljšanja globalnog pozicioniranja i navigacije iz svemira. Trenutno su u funkciji dva globalna navigacijska satelitska sustava: američki (GPS) i ruski globalni navigacijski satelitski sustav (GLONASS). Treći sustav koji je u razvitku je Galileo i trenutno je u razvoju u Europi. Galileo će pružati širok raspon signala i usluga za pozicioniranje, uključujući visoke pouzdanosti koje zahtijevaju aplikacije koje su ključne za sigurnost života. Sva tri sustava bit će međusobno interoperabilna, odnosno moći će razmjenjivati usluge radi



učinkovitosti i boljeg međusobnog djelovanja. Kombinirano korištenje Galilea i GPS-a omogućit će povećanje pozicioniranja.

Sateliti iz bilo kojeg od globalnih navigacijskih satelitskih sustava (GNSS) mogu se koristiti za precizno pozicioniranje nepokretnih ili pokretnih objekata. Taj pristup se još naziva satelitsko pozicioniranje. Osnovna ideja je odrediti položaj antene spojene na GNSS prijamnik gdje bi antena mogla biti iznad geodetskog markera, na avionu ili brodu ili čak biti dio GNSS referentne mreže. Budući da se položaji svih satelita u konstelaciji mogu izračunati u bilo kojem trenutku  $t$ , a domet između bilo kojeg vidljivog satelita i antene mjeri GNSS prijamnik, jedina preostala nepoznanica je vektor položaja od ishodišta zajedničkog koordinatnog sustava do antene koja se pozicionira. Slika 12 prikazuje osnovni koncept satelitskog pozicioniranja pomoću jednog satelita i referentnog okvira Earth Centered Earth Fixed (ECEF). Međutim u praksi je pozicioniranje kompleksnije. (Weston i dr.,2010)



Slika 12. Satelitsko pozicioniranje pomoću referentnog okvira ECEF-a.  $R_j$ -pozicija vektora od GNSS antene,  $R^i$ -pozicija vektora satelita  $j$ ,  $\rho_i^j$ -udaljenost između GNSS antene i satelita ( Prerađeno prema: (Weston i dr., 2010))

„Global Positioning System“ (GPS) ili još znan pod drugim imenom kao NAVSTAR (Navigation Satellite Timing and Ranging) je bio prvi sustav koji je lansirao operativni prototip satelita u veljači 1978. Sve od satelitskog praćenja do procjene položaja i brzine izračunava se automatski u stvarnom vremenu (Weston i dr., 2010). GPS se sastoji od 24 satelita. GPS financira i kontrolira ministarstvo obrane SAD-a i izvorno je bio namijenjen za

vojnu uporabu, ali osamdesetih godina prošlog stoljeća vlada je GPS sustav učinila dostupnim za civilnu uporabu. Različite komponente GPS sustava dijele se u tri glavne skupine. Prvi je poznat kao SPACE segment i sastoji se od 24 operativna satelita. Četiri atomska sata na svakom satelitu kontinuirano računaju i prenose točno vrijeme (GPS vrijeme) i položaj satelita u digitalnom signalu. Sateliti su također smješteni, u jednakom broju, u šest orbitalnih ravnina, svaka nagnuta pod kutom od  $55^\circ$  u odnosu na Zemljin ekvator. Nagib orbite i velika visina ( $\sim 20\,000$  km) GPS satelita omogućuju da se više vidi istovremeno s gotovo bilo kojeg mjesta na Zemlji. Druga glavna komponenta GPS sustava je CONTROL segment. Ovo se trenutno sastoji od jedanaest nadzornih postaja gdje svaka stanica prati i akumulira domet do svakog vidljivog satelita prije nego što prosljeđuje informacije glavnoj kontrolnoj stanici (MCS) na AFB Schriever u Coloradu. MCS je odgovoran za izračunavanje orbite svakog satelita i ažuriranje navigacijske ili emitirane poruke parametrima koji opisuju orbitu svakog satelita. Emitirana poruka se zatim šalje svakom satelitu putem up-linka s jedne od tri zemaljske antene koje se nalaze na otoku Ascension, Diego Garcia i Kwajalein. Treća komponenta GPS sustava je USER segment. To se prvenstveno sastoji od GPS antena i prijemnika koji korisnicima pružaju informacije o položaju, navigaciji i vremenu. Jedna od glavnih značajki dizajna svih GPS satelita je korištenje ugrađenih atomskih satova za generiranje prijenosa signala s osnovne frekvencije od  $10,23$  MHz. Dva početna signala na svim GPS satelitima poznata su kao L1 i L2 nositelji i višekratnici su osnovne frekvencije. L1 nosilac je 154 puta veći od osnovne frekvencije,  $f_1 = 1575,42$  MHz, dok je L2 nosač 120 puta veći od osnovne frekvencije,  $f_2 = 1227,60$  MHz.

Globalnim navigacijskim satelitskim sustavom (GLONASS – GLObal'naya Navigacionnaya Sputnikovaya Sistema) upravljaju Ruske svemirske snage za Vladu Ruske Federacije. Svim operativnim komponentama GLONASS sustava upravlja Koordinacijski znanstveno-informacijski centar (KNIT) koji je u sastavu Ministarstva obrane Ruske Federacije. Početni razvoj GLONASS-a započeo je 1976. u bivšem Sovjetskom Savezu i bio je dizajniran da bude alternativa GPS sustavu koji nude Sjedinjene Države. Trenutno su dva satelita u GLONASS sustavu poznata kao GLONASS-M i GLONASSK, imaju procijenjeni radni vijek od 7 odnosno 12 godina. Svi sateliti imaju atomske satove i omogućuju određivanje

položaja i brzine u stvarnom vremenu. Svemirski segment GLONASS-a je udaljen 19,100 km i orbitalne ravnine razdvojene za  $120^\circ$  i nagnute pod  $64,8^\circ$  u odnosu na ekvator. Prostorni raspored satelita u tri ravnine je takav da samo jedan prelazi ekvator odjednom i stoga se najmanje pet može vidjeti u bilo kojem trenutku, s bilo kojeg mjesta na Zemlji. Kontrolni segment GLONASS-a ima dvije primarne podjele. Prvi je zemaljski kontrolni centar koji se nalazi u Moskvi, a drugi su stanice za praćenje koje se nalaze u Sankt Peterburgu, Enisejsku, Ternopolju i Komsomolsku na Amureu. Od studenog 2013., GLONASS sustav se sastoji od 24 operativna satelita s tri dodatna satelita (GLONASS-M) koja su navedena kao rezervni i jednim satelitom GLONASS-K u testiranju leta. Postoje dvije vrste signala koji se prenose sa GLONASS satelita. Prvi je signal standardne preciznosti (SP) koji se prenosi između  $316-500\text{ W}$  u stošcu od  $38^\circ$  koristeći desnu kružnu polarizaciju. Svaki satelit prenosi SP signal na istom kodu, ali koristi drugu frekvenciju. L1 pojas koristi se tehnikom poznatom kao višestruki pristup s frekvencijskom podjelom (FDMA) za dodjelu različitih frekvencija u središtu oko  $1602,0\text{ MHz}$  na 15 kanala.

Galileo je službeno poznat kao Europski program civilne satelitske navigacije, a njegov početak može se pratiti u ožujku 2002. godine kada je Europsko vijeće izglasalo da se program proglasi službenim pothvatom.

Sustav Galileo se projektira s nekoliko glavnih operativnih segmenata. Prvi ili globalni segment sadržavat će 30 satelita srednje orbite Zemlje (MEO), 27 operativnih i tri rezervna, u tri orbitalne ravnine nagnute na  $56^\circ$ . Sateliti u ravnini bit će pozicionirani u intervalima od  $40^\circ$ , imati visinu od 23 222 km. Orbite su također odabrane kako bi se smanjile gravitacijske rezonancije i osigurala visoka vidljivost satelita. Svaki satelit će odašiljati do 10 navigacijskih vremenskih i podatkovnih signala, od kojih će neki sadržavati informacije o satu i efemeridama kako bi se omogućile usluge pozicioniranja, navigacije, mjerenja vremena i praćenja integriteta diljem svijeta. Segment zemaljske kontrole sastojat će se od pet up-link stanica koje se nalaze diljem svijeta i bit će odgovorne za zadatke telemetrije, praćenja i zapovijedanja (TTC) za redovitu komunikaciju sa satelitima. Dva dodatna kontrolna centra smještena u Njemačkoj i Italiji bit će odgovorna za analizu i pokretanje upravljačkih funkcija svemirskih letjelica putem pet TTC stanica. Aktivnosti održavanja orbite i nadzora sustava također će se obavljati u dva europska kontrolna centra.

Svaki satelit u zvijezdu Galileo koristit će CDMA tehnologiju za prijenos kružno polariziranih signala u frekvencijskim rasponima *1164–592 MHz*. Svakom signalu dodaje se određeni kod ili ključ kako bi prijemnici mogli identificirati s kojeg satelita signali dolazi i koliko je dugo trajao prijenos. Što je kod složeniji, prijemnik troši više vremena na identifikaciju kanala koji će dodijeliti signalu. Satelitski identifikacijski kodovi također dolaze u dva formata. Dugi kod teže je registrirati, ali poboljšava mogućnosti praćenja kada su signali vrlo slabi dok kratki kodovi omogućuju vrlo brzu registraciju.

### 3.3.2 CROPOS (engl. CROatian POsitioning System)

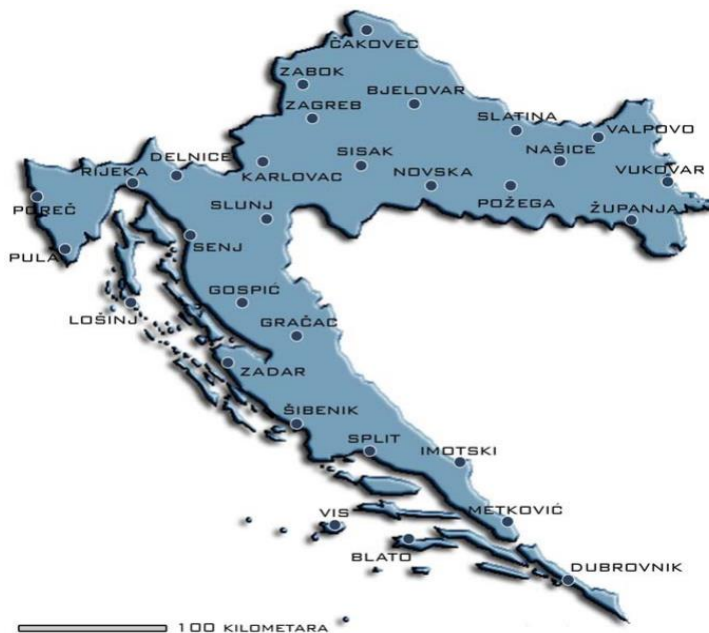
Tijekom 2008. godine državna geodetska uprava formirala je CROPOS. Sustav je formiran prema najnaprednijim tehnološkim rješenjima GNSS-a (Bačić, Marjanović i Bosiljevac, 2009). CROPOS je pokrenut 9. prosinca 2008. godine i već je uvelike korišten u stručnim geodetskim krugovima i šire. Sustav posjeduje 30 stalnih GNSS postaja i 2 kontrolne stanice koje pokrivaju cijelo područje Hrvatske s mrežom koja nudi tri usluge i jamči visoku točnost i pouzdanost snimanja. Važnost CROPOSA je u tome što se 2004 godine usvojio novi referentni sustav u Republici Hrvatskoj (RH).

CROPOS je državna mreža referentnih GNSS postaja. Sustav omogućuje korisnicima određivanje položaja u tzv. realnom vremenu s točnošću većom od  $\pm 2$  cm na cijelom području RH. Sama usluga je namijenjena svim korisnicima geodetskog i katastarskog sustava RH, tijelima državne uprave, jedinicama lokalne samouprave i drugim gospodarskim subjektima i ljubiteljima raznih sportskih aktivnosti. Najbitnija stavka koju je donio CROPOS je to što se za potrebe geodetske djelatnosti može dobiti veća točnost i pouzdanost u određivanju položaja uz minimalne materijalne troškove. Koncept koji to omogućuje sastoji se od 30 referentnih GNSS postaja koji su raspoređeni diljem RH. Mrežni sustav referentnih GNSS stanica omogućuje kontinuirano GNSS snimanje koje se kompjuterski obrađuje u kontrolnom centru, a preko bežičnog interneta rezultati se plasiraju korisnicima. CROPOS-ove pogodnosti u odnosu na današnju primjenu GNSS mjerenja su :

- smanjenje ulaganja u potrebnu opremu za cca 50%
- smanjenje vremena i ljudskih resursa tijekom anketiranja (za 50%)

- povećanje točnosti, pouzdanosti i homogenosti dobivenih rezultata mjerenja
- i usluga dostupna 24/7/365 (Bačić, Marjanović i Bosiljevac, 2009).

Udaljenost između CROPOS stanica je cca. 70 km. Radi lakšeg održavanja i komunikacije nalaze se na zgradama područnih i katastarskih ureda (Slika 13).



Slika 13. Prikaz referentnih GNSS stanica u RH.

CROPOS nudi tri vrste usluga koje se međusobno razlikuju prema načinima rješenja, prijenosa podataka, točnosti i formatu podataka. To su DSP (engl. Differential positioning service) kao usluga za pozicioniranje u stvarnom vremenu i ima točnost od 0,5m. Može se koristiti za geo-informacijske sustave, navigacija, zaštita okoliša, poljoprivreda i šumarstvo. VPSS (engl. High-precision positioning service) je usluga pozicioniranja visoke preciznosti u stvarnom vremenu točnost je u cm i namijenjena je za provedbu državne izmjere, katastra, inženjerske geodezije, državne granice, hidrologije. Posljednja je GPSS (engl. Geodetic precision positioning service) usluga geodetskog preciznog pozicioniranja, subcentimetarske točnosti. Koristi se za provedbu temeljnih geodetskih mreža i znanstvena i geodinamčka istraživanja. Korištenjem CROPOSa na terenu su se odredile točne lokacije za potrebe istraživanja i kasnije se koristio za izradu priloga 1 i 2.

## 4. Klasifikacija stijenske mase za potrebe iskopa na dijelu vodoopskrbne mreže otoka Hvara

Istražni radovi su se izvodili u dijelu općine Jelsa. Općina Jelsa smještena je u središnji dio otoka Hvara, sve od sjeverne do južne obale, te spada u otočnu mikroregiju Splitsko-dalmatinske županije. Prostornu cjelinu „Otok Hvar“, uz Općinu Jelsa, još čine gradovi Hvar i Stari Grad, te općina Sućuraj.

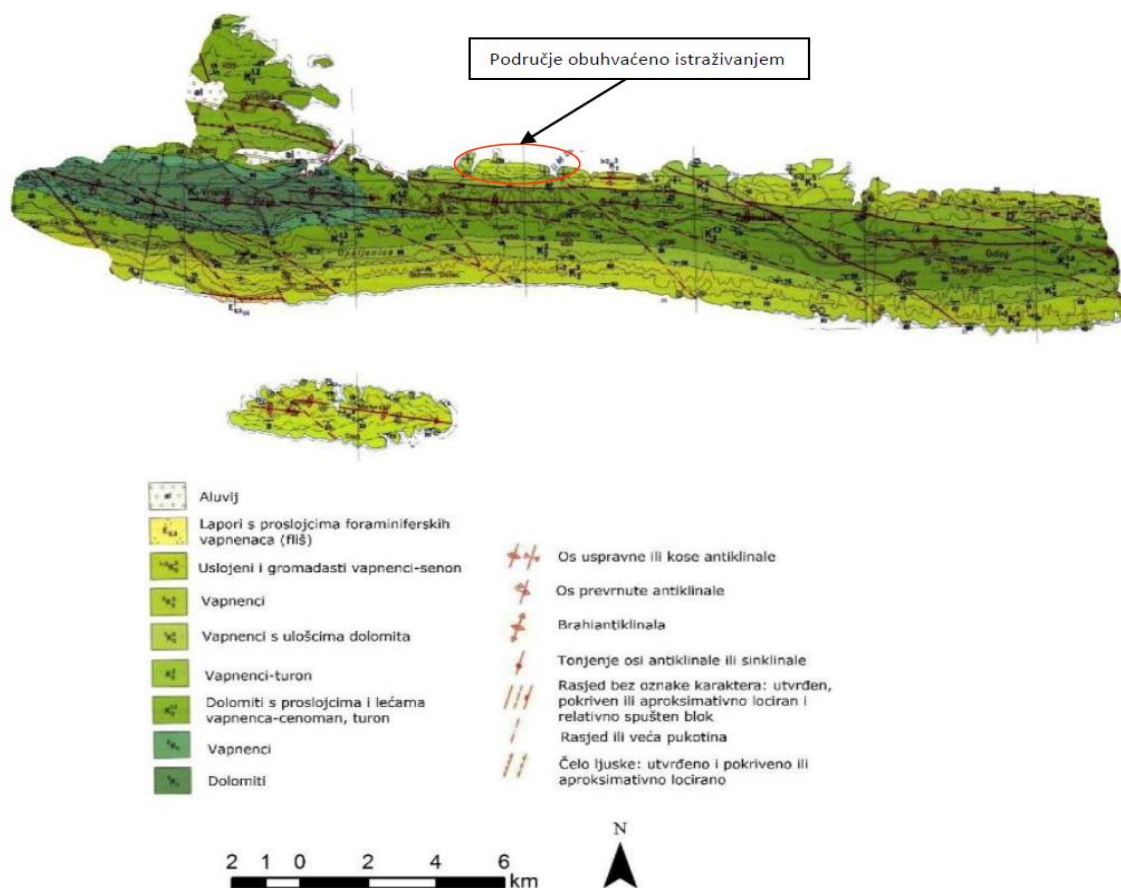
Reljefna obilježja otoka Hvara rezultat su pozicije otoka, kao dijela jedinstvene tektonske jedinice srednjodalmatinskih otoka, koji ulaze u okvire vanjskih Dinarida. Reljef samog otoka pretežno sadrži brdske osobine. U reljefnoj strukturi jasno se izdvajaju tri dijela: hrbat, polje i pobrđe. Istraživano područje pripada niskom vapnenačkom pobrđu koje čini sjeverni dio zapadne polovice otoka. Specifičan tip reljefa predstavljaju obale, oblikovane abrazijskim procesima mlata valova i akumulacijskim aktivnostima mora. Na istraživanom području najrasprostranjenije su niske stjenovite obale nastale pod jakim utjecajem abrazije i korozije na monoklinalne vapnenačke obale.

Prema paleogeografskoj i strukturalnoj podjeli krškog područja Dinarida, Općina Jelsa nalazi se na strukturalnom kompleksu Jadranske karbonatne platforme (Adriatik). Prostor Općine dio je jedinstvene tektonske cjeline Srednjodalmatinski otoci unutar koje se izdvaja tektonska jedinica Hvar. Tektonska jedinica Hvar strukturalno ima ljuskavu građu s glavnom antiklinalom Brusje – Sućuraj, nagnutu prema jugu i duž reversnog rasjeda natisnutu na kredno tercijarnu sinklinalu, koja je vezana na antiklinalu Pakleni otoci – Šćedro. Najstarija kartirana jedinica na području Općine predstavlja donjokredne dolomite ( $^1K_1$ ) te izgrađuje jezgru antiklinale s ostalim donjokrednim sedimentima (Borović i dr., 1977).

Kao što je vidljivo na slici 11, na istraživanom području najrasprostranjenije su gornjokredne naslage ( $^{1,2,3}K_2^3$ ) koje su kontinuirano taložene na donjoj kredi. Riječ je o naslagama svijetlosmeđih do bijelih, gromadastih do dobro uslojenih biokalkarenita i biokalcilitita koje se rasprostiru uz sjeverni obalni pojas otoka Hvara (Borović i dr., 1977).

Na prostoru općine prevladavaju karbonatne naslage na kojima je razvijen krški morfogenetski tip reljefa. Značajke tog reljefa su podzemna otjecanja voda i nepostojanje

površinske hidrografske mreže. Ne postoji stalni površinski vodeni tok, nego se javljaju povremeni površinski vodotoci. Na istraživanoj trasi cjevovoda je utvrđeno da postoji površinski humusni sloj debljine do desetak centimetara. Ispod humusa stijena je srednje do jako okršena, blokovi su srednje veličine ili mjestimice mali, učestalost pukotina je srednja do velika, pukotine su djelomično ispunjene glinom ili mješavinom fragmenata stijene i gline. Na pojedinim dijelovima istraživane dionice pojavljuje se stijena koja je vrlo jako do ekstremno okršena, prevladavaju mali blokovi, površina pukotina je vrlo mala, pukotine su velike širine te su ispunjene glinom i fragmentima stijene. Na dubinama većim od 2 metra stijena je uglavnom slabo okršena, blokovi su srednji do veliki, učestalost pukotina je srednja do mala i rijetko su po plohama presvučene filmom gline. Zabilježena fotodokumentacija nalazi se u prilogu 2.



Slika 14. Detalj s OSNOVNE GEOLOŠKE KARTE R. HRVATSKE 1:100.000, List Jelsa L33–34 (Marinčić i Majcen, 1976)

## 4.1 Geofizička istraživanja

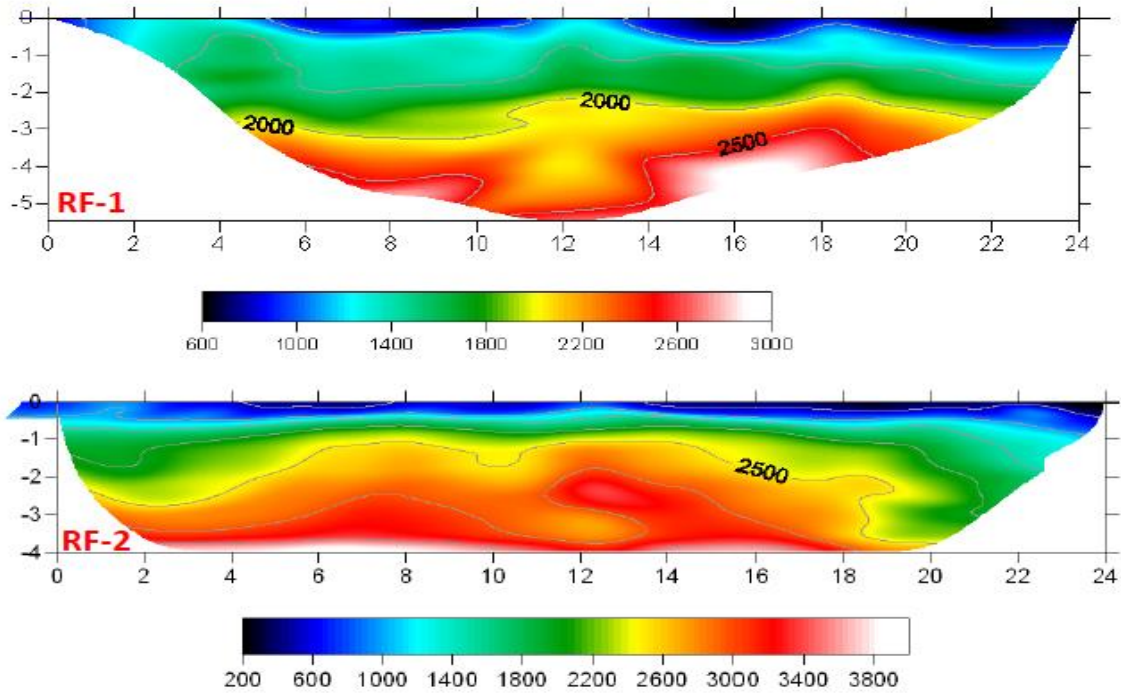
Duž trase cjevovoda odabrane su četiri lokacije na kojima su izvedena geofizička istraživanja. Od geofizičkih istraživanja izvodile su se plitka seizmička refrakcija (SRS) i višekanalna analiza površinskih valova (MASW), na istovjetnim istraživačkim geofizičkim linijama .

Seizmička refrakcija provedena je P-valovima, za snimanje P-valova postavljeno je bilo 12 vertikalnih geofona frekvencije  $4.5\text{ Hz}$ . Razmak između geofona je bio 2,0 m. Interpretacija rezultata izvodila se aplikacijom „Rayfract i SeisIMAGER 4.0.1.6., OYO Corporation 2004-2009“ (Geometrics i OYO, 2009).

Odrađena su ispitivanja na 4 profila seizmičke refrakcije. Na slici 15 prikazana je interpretacija prva dva izmjerena profila, s oznakama RF - 1 i RF - 2. Na prvom profilu RF-1 vidljivi su površinski uslojeni geološki materijali brzina P - valova od  $600$  do  $2000\text{ m/s}$ . Na dubini između 2 i 3 m brzine počinju rasti, te na dubini od 5 m postižu vrijednosti do  $3000\text{ m/s}$ . Prisutne brzine na samoj površini do dubine 1 m su između  $600$  i  $1200\text{ m/s}$ . Takvi rezultati prikazuju da je riječ o trošnom i razdrobljenom stijenskom materijalu zbog radova na izvedbi kanala i izgradnje nasipa ceste. Međutim, između prvog i drugog geofona, šestog i sedmog geofona, te devetog i desetog geofona, javljaju se brzine P-valova između  $1200$  i  $2000\text{ m/s}$  odmah na površini. Brzine vrijednosti iznad  $2000\text{ m/s}$  indikator su čvrste stijenske mase.

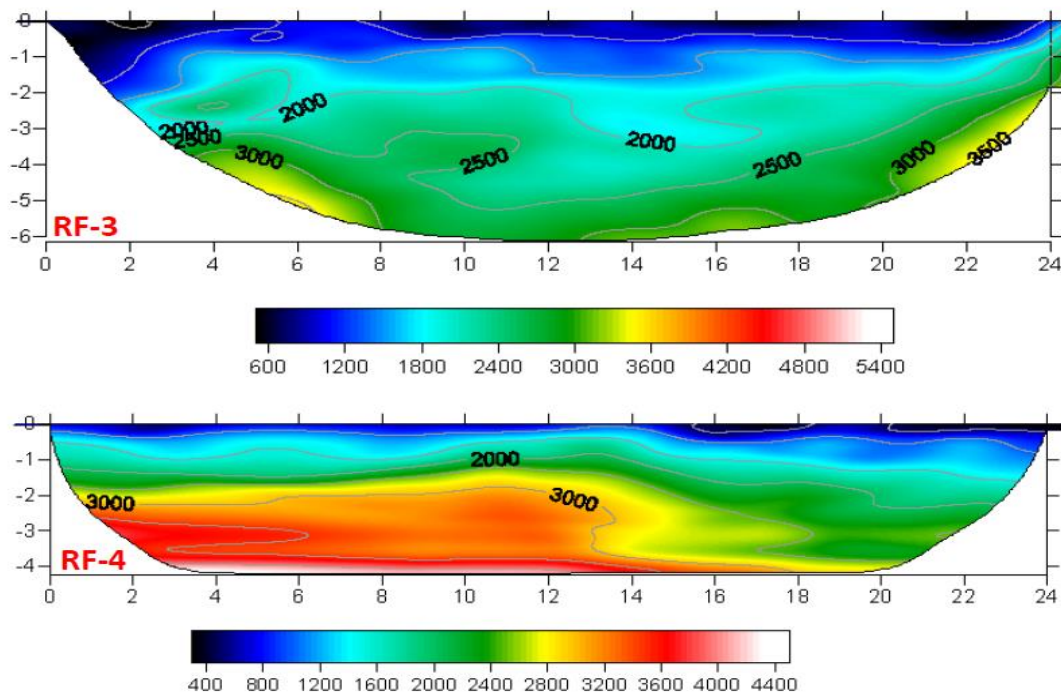
Na profilu RF - 2 vidljive su površinske brzine između  $200$  i  $1000\text{ m/s}$ . No, već na dubini oko 1 m brzine prelaze  $2000\text{ m/s}$ , detektirajući čvrstu stijensku masu.





Slika 15. Prikaz rezultata mjerenja i interpretacije profila seizmičke refrakcije RF - 1 i RF - 2.

Dobiveni rezultati mjerenja i interpretacije na druga dva profila oznaka RF-3 i RF-4 prikazani su na slici 16. Na profilu RF - 3 prisutnost razdrobljene stijenske mase je do dubine od 1 m, u nekim dijelovima do 2 m. Nakon prolaska dubine od 2 metra dolazi čvrsta stijenska masa brzina iznad  $1800\text{ m/s}$ . RF - 4 prikazuje svojevrsnu rasjednu zonu između sedmog i osmog geofona. Tako se na lijevoj strani profila do 2 m dubine vidi razdrobljena stijenska masa brzina ispod  $2000\text{ m/s}$ . Na većim dubinama od ta dva metra brzina naglo raste na  $3000\text{ m/s}$ . Na desnoj strani profila RF - 4 nešto je trošnja stijena pa se brzine od  $3000\text{ m/s}$  postižu tek na dubini od 4 m.



Slika 16. Prikaz rezultata mjerenja i interpretacije profila seizmičke refrakcije RF - 3 i RF - 4.

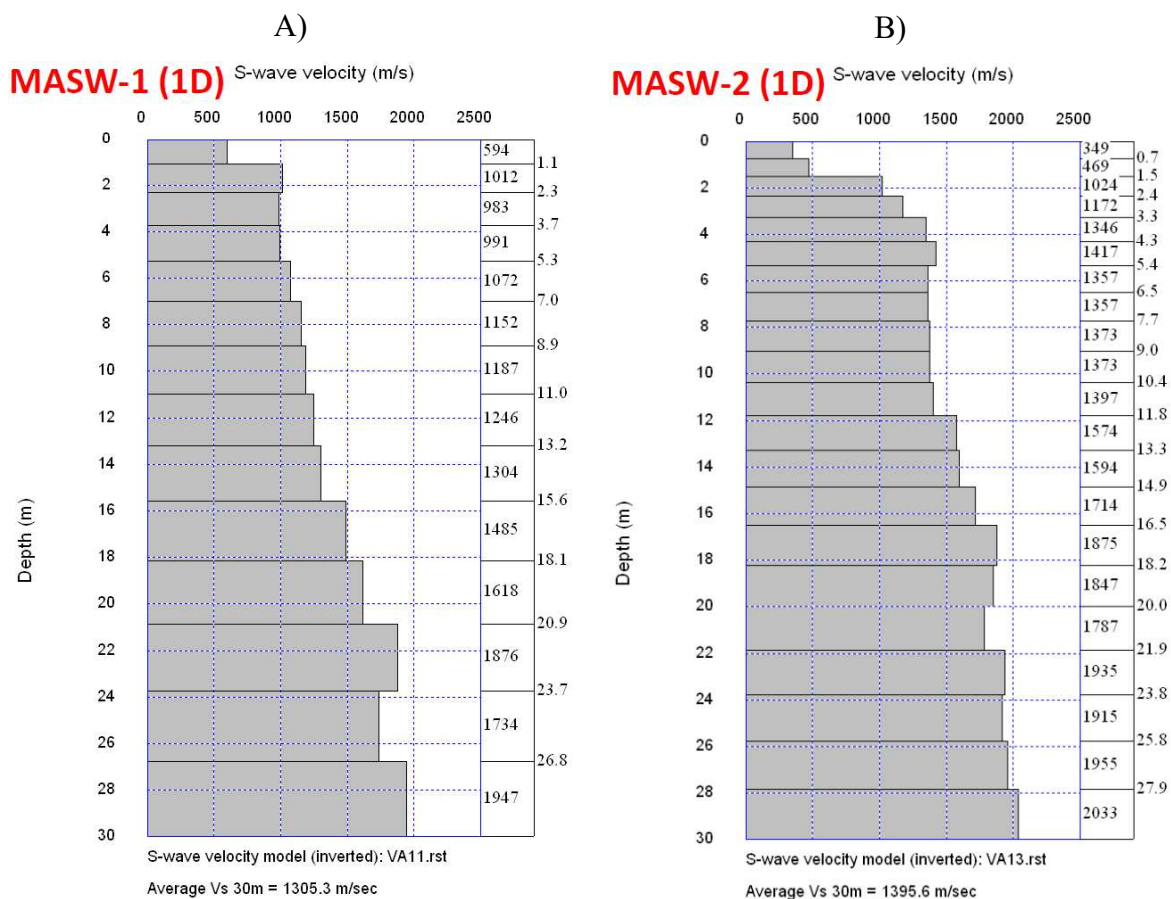
Kako je u poglavlju 3.1.2. opisano ograničenje koje dosta sputava seizmičku refrakciju, a riječ je o pretpostavci da se s dubinom brzine slojeva tla povećavaju pa zbog toga postoji nemogućnost prikazivanja sloja niže brzine ispod sloja više brzine, dodatno su provedena istraživanja MSAW metodom, na presjecima položajno istovjetnim SRS ispitivanjima.

MASW metoda provedena je pomoću 12 vertikalnih geofona frekvencije 4.5 Hz, s razmakom 2 m, istovjetno SRS ispitivanjima. Mjerile su se brzine S-valova po dubini. Osnovni mod je korišten kod interpretacije. Računalna aplikacija koja se koristila za prikaz mjernih krivulja disperzije MASW dispozitiva ista je kao i kod obrade i interpretacije seizmičke refrakcije.

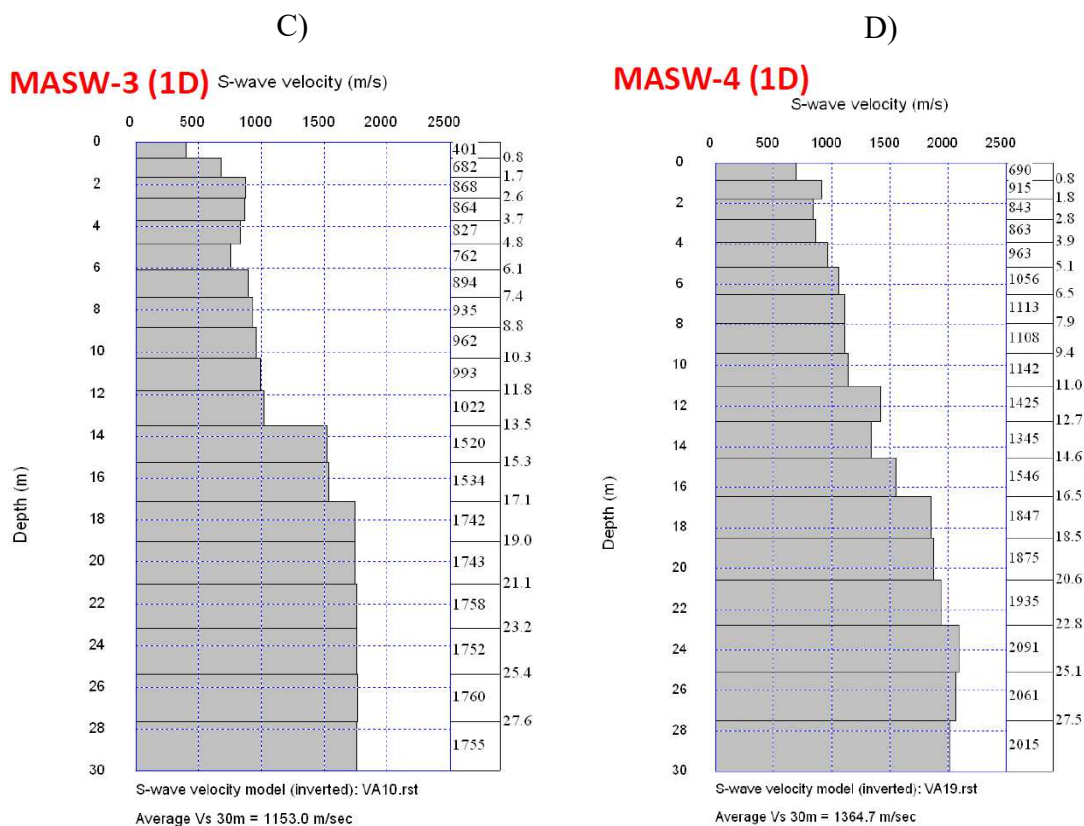
Rezultati interpretacije MASW istraživanja prikazani su na slici 17. Odrađena su četiri ispitivanja i prikazana u 1D obliku, seizmičke brzine S-valova po dubini.

Iz interpretacije rezultata MASW snimanja vidljivo je da brzine posmičnih valova  $V_s$  u površinskom dijelu do dubine 1,0 - 2,0 m iznose  $V_s = 400 - 1000 \text{ m/s}$  te odgovaraju karbonatnoj stijeni IV. kategorije. Dublji dio pokrivača, te prijelazne zone trošenja stijene,

seizmičke brzine odgovaraju karbonatnoj stijeni III. kat. odnosno  $V_s > 1000$  m/s. Klasifikacija stijene prema izmjerenim brzinama posmičnih valova provedena je prema Klasifikaciji karbonatnih stijena (Novosel i dr., 1980), prikazanoj u Prilogu 3. Najlošija kvaliteta stijene dobivena ja na profilu MASW - 3 što je u skladu s rezultatima dobivenima profilom RF - 3.



Slika 17. Prikaz rezultata 1D MASW ispitivanja: A) MASW-1; B) MASW-2; C)



Slika 18. Prikaz rezultata 1D MASW ispitivanja: C) MASW-3; D) MASW-4

## 4.2 Geotehničke značajke tla

Mehaničke karakteristike stijenske podloge dobivene su procjenom jednoaksijalne čvrstoće stijene, primjenom Schmidtovog čekića (poglavlje 3.2.).

U tablici 6 prikazani su rezultati ispitivanja. Ispitivana su tri uzorka sa površine terena, a na svakom po 10 ispitivanju. Otklon čekića je bio - 90°. Srednje vrijednosti odskoka  $H_{sr}$  koje su dobivene za svaki od uzoraka su iznosile 41.8 za uzorak 1, 41.0 za uzorak 2, te 40.9 za uzorak 3. Srednja prosječna vrijednost tlačne čvrstoće za sva tri uzorka izračunata je 56.33 [MN/m<sup>2</sup>].

Tablica 6. Prikaz dobivenih rezultata mjerenja za istražnu lokaciju

Broj uzoraka	Lokacija	Otklon čekića [°]	Izmjerene vrijednosti odskoka [H]	Srednja vrijednost odskoka [H <sub>sr</sub> ]	Tlačna čvrstoća [MN/m <sup>2</sup> ]
1	Uzorak sa površine terena	- 90	44 45 42 40 39 44 42 42 40 40	41,8	57,28
2	Uzorak sa površine terena	- 90	43 42 37 40 39 41 42 45 40 41	41,0	55,94
3	Uzorak sa površine terena	- 90	39 40 38 44 44 37 44 43 41 39	40,9	55,75
				Srednja vrijednost:	56,33

## 5. Klasifikacija stijenske mase

Na osnovu provedenih istražnih radova na za potrebe klasifikacije stijenske mase na dijelu vodoopskrbne mreže otoka Hvara, i to na dionici Jelsa-Sučuraj, poddionici Jelsa-Poljica, od uvale Prapatna (stacionaža 3+500) do uvale Mala Stiniva (stacionaža 7+713) litološki sastav tla podijeljen je u četiri zone.

### 5.1. Litološki sastav tla

Na osnovu provedenih ispitivanja fizikalno-mehaničkih značajki stijenske mase na istražnoj dionici, u vidu procjene tlačne čvrstoće intaktnih uzoraka stijene Schmidt-ovim čekićem, stijenu možemo svrstati u III. kategoriju (Novosel i dr., 1980) sa sljedećim karakteristikama:  $UCS = 56,33 \text{ MPa}$ , brzine P vala  $2000 - 3000 \text{ m/s}$  i brzine S vala  $1000 - 1600 \text{ m/s}$ .

#### 5.1.1. Zona 1: Površinski sloj

U prvoj zoni prisutan je humusni sloj koji se sastojao od sloja gline ili mješavine gline i fragmenata stijena debljine uglavnom do desetak centimetara.

#### 5.1.2. Zona 2: Stijena V. i VI. kategorije (Novosel i dr., 1980)

Prema Novoselu i suradnicima (1980) i dr. (Prilog 3) stijena u zoni dva pripada u kategorije V. i VI. Zona dva se mjestimice pojavljuje na istražnoj dionici. Mjesta tih mikrolokacija prikazana su u prilogu 1 gdje su označene slovom „B“ i brojevima 3, 8, 9, 12, 13, 20, 22, 26 i 27. Fotodokumentacija s navedenih mjesta opažanja nalazi se u prilogu 2. Karakteristike stijenske mase na promatranom području su jako do ekstremno okršena, prevladavaju mali blokovi, površina pukotina je vrlo mala, pukotine su velike širine i ispunjene glinom i fragmentima stijene. Na „MO 20“ izvedena su seizmička ispitivanja (RF - 3/MASW - 3) dobiveni rezultati prikazuju da do dubine od cca 2 m prisutne su brzine kompresijskih valova ( $V_P$ ) od  $600$  do  $1800 \text{ m/s}$ , brzine posmičnih valova ( $V_S$ ) su zabilježene od  $400$  do  $700 \text{ m/s}$ . Od

ukupne duljine koja je iznosila 4213 m trase, ovakve karakteristike su bile prisutne na 389 m.

#### 5.1.3. Zona 3: Stijena III. i IV. kategorije (Novosel i dr., 1980)

Zona tri prema Novoselu i suradnicima (1980) spada u kategorije III. i IV. Riječ je o srednje do jako okršenoj stijeni, blokovi su srednje veličine ili mjestimice mali, učestalost pukotina je srednja do velika, pukotine su djelomično ispunjene glinom ili mješavinom fragmenata stijene i gline. Prema rezultatima geofizičkih istraživanja ova zona je prisutna od dubine 0,5 m do dubine 2-3 m. Rađena istraživanja su opisana oznakama (RF - 2 / MASW - 2 i RF - 4 / MASW - 4). Prisutne brzine kompresijskih valova na tim dubinama ( $V_P$ ) su od 1400 do 3000 m/s, a brzine posmičnih valova ( $V_S$ ) iznose 700 do 1200 m/s.

#### 5.1.4. Zona 4: Stijena I. i II. kategorije (Novosel i dr., 1980)

Zona četiri je II. kategorije (Novosel i dr., 1980) i prisutna ispod zone tri. Riječ je o stijeni koja je slabo okršena, blokovi su veliki i učestalost pukotina je mala, pukotine su rijetke i velike, a širina im je mala, te su rijeko po plohama presvučene filmom gline. Brzine kompresijskih seizmičkih valova ( $V_P$ ) iznose od 3000 m/s do 4000 m/s, a brzine posmičnih valova ( $V_S$ ) iznose 1200 do 2000 m/s.

### 5.2. Kategorizacija stijenske mase za potrebe iskopa

Rezultati seizmičkih geofizičkih istraživanja na istražnoj lokaciji na otoku Hvaru pokazuju kako su brzine kompresijskih ili primarnih P-valova dobivene primjenom plitke refrakcijske seizmike već u pripovršinskim slojevima stijene veće od 2000 m/s i imaju trend rasta s dubinom. Također, brzine posmičnih ili sekundarnih S-valova dobivene primjenom višekanalne analize površinskih valova (MASW) također rastu s dubinom (Jug, 2020). Tako

u pripovršinskim slojevima stijenskog materijala brzina  $V_S$  ima vrijednosti blizu  $1000\text{ m/s}$ , dok na dubini oko 5 metara preko  $1400\text{ m/s}$ . Povezujući tako dobivene rezultate terenskih istraživanja s problematikom kategorizacije stijenske mase za potrebe iskopa, može se zaključiti sljedeće:

- a) Prema Weaver-ovoj klasifikaciji stijenska masa na 90,8% duljine istraživane dionice pripada u I i II klasu stijene za iskop (Tablica 3) jer  $V_P$  prelaze  $2000\text{ m/s}$ , pa je potrebno djelomično miniranje s obzirom da je rijanje ekstremno teško. Prema Weaver-ovoj klasifikaciji na 9,2% duljine istraživane dionice materijal pripada u III klasu tla za iskop i moguće ga je rijati buldozerom tipa npr. CAT D8/D9.
- b) Prema OTU stijenska masa na 90,8% duljine istraživane dionice pripada u kategoriju A tla za iskop (Tablica 4) i cijeli iskop trebao se izvesti miniranjem. Materijal (raspadnute stijene na površini u debljim slojevima s miješanim raspadnutim zonama) na samo 9,2% duljine istraživane dionice pripada u kategoriju B tla za iskop, te se iskop mogao izvršiti izravnim strojnim radom uz povremeno miniranje.
- c) Prema najnovijoj klasifikaciji (Jug i dr., 2020) stijenska masa na 90,8% duljine istraživane dionice pripada u I i II kategoriju stijene za iskop s obzirom da  $V_S$  brzine prelaze  $1000\text{ m/s}$  (Tablica 5), te je za iskop iste potrebno razbijanje hidrauličkim čekićem ili miniranje uz primjenu minskih bušotina i eksploziva. Na 9,2% duljine istraživane dionice materijal pripada u III i IV kategoriju tla za iskop ( $V_S = 400 - 1000\text{ m/s}$ ) i moguće ga je rijati buldozerom ili kopati bagerom s korpom.



## 6. Zaključak

Odabir najprikladnije tehnologije otkopavanja stijenske mase uvelike ovisi o značajkama stijenske mase koju se planira kopati. Tehnologije otkopavanja, prema glavnom mehanizmu rada, dijele se u dvije osnovne grupe: 1) Miniranje i 2) Mehaničko (strojno) otkopavanje. Dugoročna i skupa istraživanja za procjenu primjenjivosti tehnologija otkopavanja često nisu prihvatljiva investitorima, pogotovo pri manjim građevinskim iskopima. Zato su u takvim slučajevima metode koje koriste brzine seizmičkih valova za procjenu podatljivosti stijenske mase otkopavanju prihvatljivije, jer su neinvazivne, brže i jeftinije. Istraživanja koja su korištena u ovom radu za procjenu brzina seizmičkih valova su plitka seizmička refrakcija u kombinaciji s P-valovima, te višekanalna analiza površinskih valova u kombinaciji sa S-valovima i izvedena su istraživanja Schmidtovim čekićem da bi dobili parametre UCS stijene. MASW metoda koja koristi brzine S-valova za klasifikaciju pouzdanija je od seizmičke metode i P-valova. P-valovi imaju mogućnost prolaska kroz fluide, dok S-valovi nisu osjetljivi na fluide i prikazuju pouzdanije rezultate, detektiraju slojeve veće brzine ispod sloja manje brzine.

Weaver-ova klasifikacija se temelji na parametrima P-valova, P-valove koristi za određivanje mogućnosti ripabilnosti ili miniranja stijenske mase, osim P-valova koriste se i geološki parametri dobiveni na terenu. Ukupna ocjena diktira metodu iskopavanja. Weaver-ova klasifikacija daje mogućnosti klasifikacije stijenske mase prema više parametara. Zbog povećanja brzine kod SRS metode s dubinom. Predložena je nova metoda Juga i dr. koja se temelji na brzinama S-valova. Brzine se dobivaju na temelju mjerenja provedenih MASW metodom i klasificira se stijenska masa u četiri kategorije prema dobivenim brzinama. Zbog povećanja brzine kod SRS metode s dubinom radi provjere se može koristiti MASW metoda. Prednosti klasifikacije prema Jugu i dr. s obzirom na Weaver-ovu klasifikaciju je ta što Jug i dr. imaju dodanu jednu metodu više za otkopavanje stijenske mase. Klasifikacije prema OTU koristi parametre dobivene prema UCS-u i seizmičkim brzinama prema čemu se klasificira stijenska mase, koja se određuje prema Novoselu i dr. OTU klasifikacija jednostavnija je za primjenu jer obuhvaća samo 3 kategorije materijala za iskop.

Klasifikacija stijenske mase za potrebe iskopa za izgradnju vodoopskrbne mreže na otoku Hvaru prema odrađenim istraživanjima klasificirana je u 4 različite zone. Prva zona obuhvaća površinski sloj, druga zona spada u kategoriju stijena V. i VI., treća u III. i IV i četvrta u I. i II. kategoriju prema Novoselu i dr. (Novosel i dr., 1980) Klasifikacija stijenske mase za potrebe iskopa određena je prema geofizičkim istraživanjima. Dobiveni rezultati su kategorizirani su prema Weaver-u , Jugu i dr. i OTU. Prema tim klasifikacijama mogućnost iskopa pomoću mehaničkih strojeva može se obaviti na samo 9,2 % trase, dok ostali dio trase iskopavanje se mora odraditi pomoću potpunog ili djelomičnog miniranja.

Na praktičnom primjeru ovaj rad je prikazao da se stijenska masa može klasificirati za potrebe iskopa na brz, jeftin i jednostavan način. Takva klasifikacija omogućena je postojećim metodama koje su upotpunjene novijom metodom za potrebe klasifikacije. Svim tim mehanizmima projektantu se olakšava odluka kod odabira metode za otkopavanje.

## Literatura

Anomohanran, O. (2013) „Seismic refraction method: A technique for determining the thickness of stratified substratum“, *American Journal of Applied Sciences*, 10(8), str. 857–862.

Aydin, A. (2009) „ISRM Suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness: Revised version“, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(3), str. 627–634.

Bačić, Ž., Marjanović, M. i Bosiljevac, M. (2009) „CROPOS – Croatian Positioning System CROPOS“, *FIG Working Week 2009 - Surveyors Key Role in Accelerated Development*, (May). doi: 10.13140/2.1.2574.7200.

Dey, T. and, Taipodia, J. i Dey, A. (2012) „A Review of Active and Passive MASW Techniques“, *Egcege*, (October 2016).

Gibbens, C. A. (2014) „The Use of the Multi-channel Analysis of Surface Waves ( MASW ) Method as an Initial Estimator of Liquefaction Susceptibility in Greymouth , New Zealand“.

IGH (2001) *Opći tehnički uvjeti za radove na cestama (knjiga 1 i 2)*. Zagreb: Institut građevinarstva Hrvatske.

Jug, J. (2019) *Mehanika stijena u geoinženjerstvu okoliša*. Varaždin.

Jug, J. (2020) „Model za procjenu primjenjivosti tehnologija otkopavanja u odnosu na značajke stjenske mase“. Zagreb, Hrvatska.

Jug, J. i dr. (2020) „New approach in the application of seismic methods for assessing surface excavatability of sedimentary rocks“, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79(7), str. 3797–3813. doi: 10.1007/s10064-020-01802-1.

Park, Choon B., Miller, Richard D., Xia, Jianghai, and Ivanov, J. (2007) „The conventional seismic“, *The Leading Edge*.

Reynolds, J. M. (2011) *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. 2nd editio. A John Wiley & Sons, Ltd., Publication.

Strelec, S. (2012) „Podpovršinski istražni radovi Interna skripta“.

Strelec, S. (2021) *Gotehnički elaborat za potrebe kategorizacije stijenske mase na dijelu vodoopskrbne mreže otoka Hvara*. Varaždin.

Torabi, S. R., Ataei, M. i Javanshir, M. (2011) „Application of Schmidt rebound number for estimating rock strength under specific geological conditions“, *Journal of Mining and Environment*, 1(2), str. 1–8.

Weston, D. N. D. and i Dr. Volker Schwieger (2010) *Cost Effective GNSS Positioning Techniques Cost Effective GNSS Positioning Techniques*.

What is the crossover distance, Datum preuzimanja: 19.04.2022., Preuzeto : <https://www.geometrics.com/support/crossover-distance/>

## Popis slika

Slika 1. Interpretacija dešavanja u mediju nakon izazivanja seizmičkih valova udarom čekića (Jug i dr, 2020).....	11
Slika 2. Transverzalni val i (B) longitudinalni val (prerađeno prema Reynolds, 2011).....	13
Slika 3. Elastične deformacije površinskih valova: (A) Reyleighevi valovi (B) Loweovi valovi (Reynolds, 2011).....	13
Slika 4. Prikaz disperzije površinskih valova (prerađeno prema Hayashi, 2003).....	13
Slika 5. Prikaz prvih nailazaka (Preuzeto sa: <a href="http://www.geometrics.com">www.geometrics.com</a> ).....	15
Slika 6. Princip geofizičkog istraživanja seizmičkim valovima (Gazdek, 2003).....	16
Slika 7. Prikaz cjelokupnog postupka istraživanja MASW metodom (Jug i dr., 2020).....	19
Slika 8. Prikaz MASW profila za mjerenje, linija od 24 geofona koji su na udaljenosti od $d_x$ izvor udaljen za $x_l$ .....	20
Slika 9. Prikaz Schmidtovog čekića (Jug, 2019).....	22
Slika 10. Prikaz korelacijskog dijagrama tlačne čvrstoće prema odskoku SH .....	23
Slika 11. Korelacijski dijagram Young-ovog modula .....	24

Slika 12. Satelitsko pozicioniranje pomoću referentnog okvira ECEF-a. $R_i$ -pozicija vektora od GNSS antene, $R^i$ -pozicija vektora satelita $j$ , $p^i_j$ -udaljenost između GNSS antene i satelita ( Prerađeno prema: (Weston i dr., 2010)).....	25
Slika 13. Prikaz referentnih GNSS stanica u RH.....	29
Slika 14. Detalj s OSNOVNE GEOLOŠKE KARTE R. HRVATSKE 1:100.000, List Jelsa L33–34.....	33
Slika 15. Prikaz rezultata mjerenja i interpretacije profila seizmičke refrakcije RF-1 i RF-2.....	34
Slika 16. Prikaz rezultata mjerenja i interpretacije profila seizmičke refrakcije RF-3 i RF-4.....	35
Slika 17. Prikaz rezultata 1D MASW ispitivanja: A) MASW-1; B) MASW-2.....	37
Slika 18. Prikaz rezultata 1D MASW ispitivanja: C) MASW-3; D) MASW-4.....	38

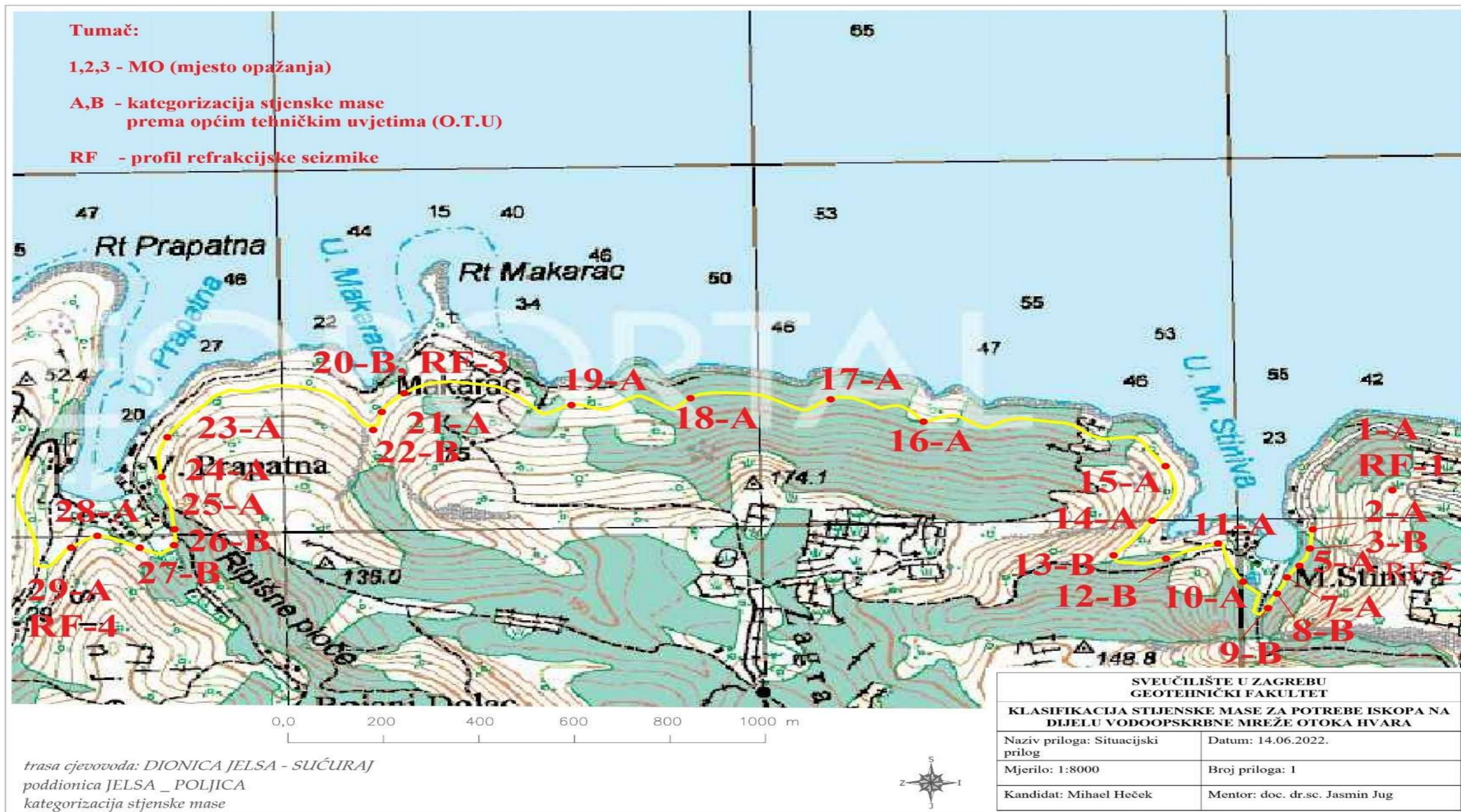
## Popis tablica

Tablica 1. RMR klasifikacija stijena ( prema Bieniawski, 1973). .....	4
Tablica 2. Ukupne ocjene za klasifikaciju stijenske mase (prema Bieniawski,1973).....	4
Tablica 3. Weaver-ov sustav bodovanja ripabilnosti stijena (Jug <i>i dr</i> , 2020).....	6
Tablica 4. Klasifikacija stijenske mase (prema IGH, 2001).....	8
Tablica 5. Klasifikacije sedimentne stijenske mase za potrebe iskopa (Jug <i>i dr</i> , 2020)....	9
Tablica 6. Prikaz dobivenih rezultata mjerenja za istražnu lokaciju .....	39

## Prilozi

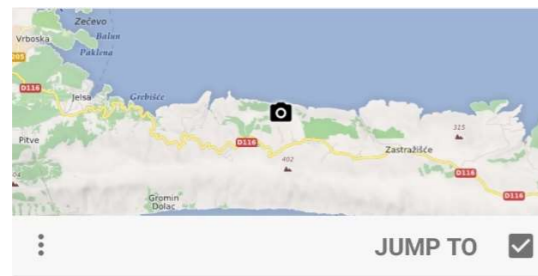
Prilog .1 Situacijski plan istražnih radova	
Prilog .2 Fotodokumentacija	
Prilog .3 Kategorizacija karbonatnih stijenskih masa (prema T. Novosel i dr.)	





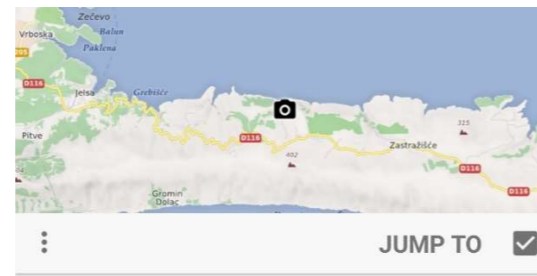


Prilog 2. Fotodokumentacija



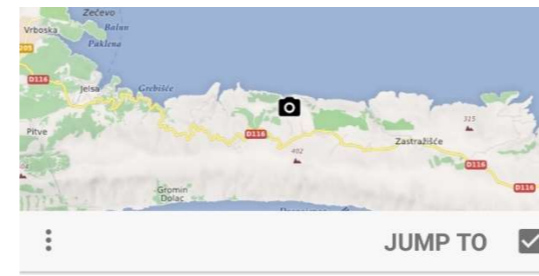
LOCATION

Coordinates **522737 E 4779784 N**  
 Elevation **↑ 25 m** GPS: 66 m, DEM: 18 m  
 Accuracy **±6 m**  
 Date **23. 02. 2021. 09:56:13**  
 Declin. **+4.2°** 47308 nT  
 Grid north **+0.2°**



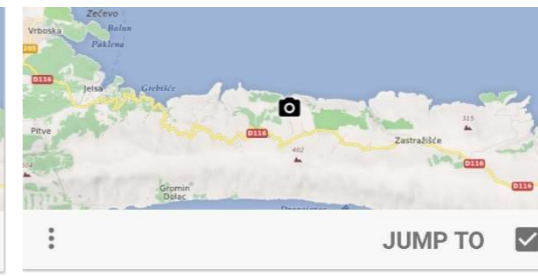
LOCATION

Coordinates **522731 E 4779731 N**  
 Elevation **↑ 23 m** GPS: 63 m, DEM: 25 m  
 Accuracy **±6 m**  
 Date **23. 02. 2021. 10:00:52**  
 Declin. **+4.2°** 47308 nT  
 Grid north **+0.2°**



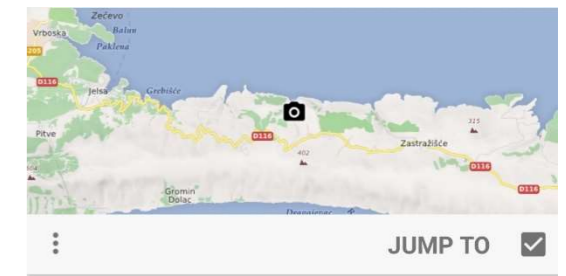
LOCATION

Coordinates **522709 E 4779683 N**  
 Elevation **↑ 11 m** GPS: 51 m, DEM: 27 m  
 Accuracy **±6 m**  
 Date **23. 02. 2021. 10:06:33**  
 Declin. **+4.2°** 47308 nT  
 Grid north **+0.2°**



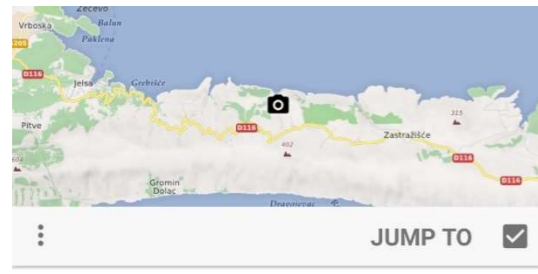
LOCATION

Coordinates **522683 E 4779651 N**  
 Elevation **↑ 13 m** GPS: 53 m, DEM: 17 m  
 Accuracy **±4 m**  
 Date **23. 02. 2021. 10:29:29**  
 Declin. **+4.2°** 47308 nT  
 Grid north **+0.2°**



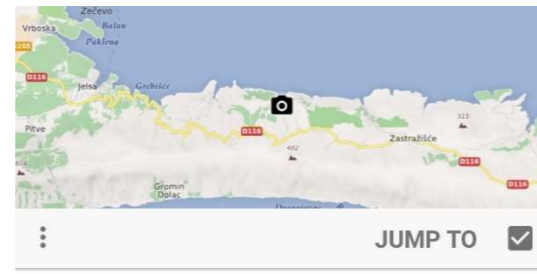
LOCATION

Coordinates **522662 E 4779606 N**  
 Elevation **↑ 13 m** GPS: 54 m, DEM: 19 m  
 Accuracy **±4 m**  
 Date **23. 02. 2021. 10:32:39**  
 Declin. **+4.2°** 47307 nT  
 Grid north **+0.2°**



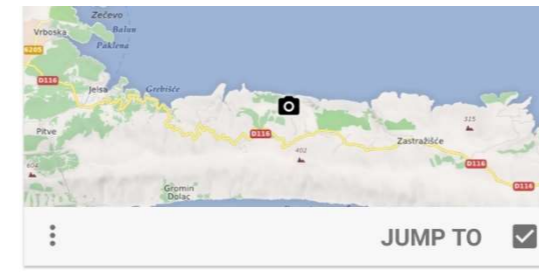
LOCATION

Coordinates **522643 E 4779566 N**  
 Elevation **↑ 14 m** GPS: 54 m, DEM: 27 m  
 Accuracy **±4 m**  
 Date **23. 02. 2021. 10:33:38**  
 Declin. **+4.2°** 47307 nT  
 Grid north **+0.2°**



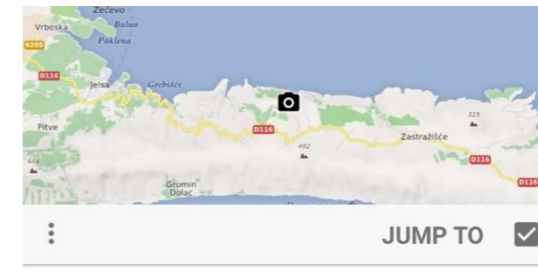
LOCATION

Coordinates **522591 E 4779639 N**  
 Elevation **↑ 19 m** GPS: 59 m, DEM: 23 m  
 Accuracy **±4 m**  
 Date **23. 02. 2021. 10:36:19**  
 Declin. **+4.2°** 47307 nT  
 Grid north **+0.2°**



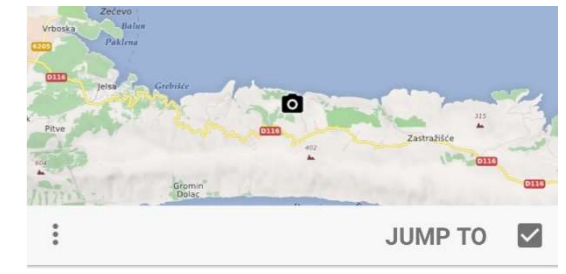
LOCATION

Coordinates **522538 E 4779745 N**  
 Elevation **↑ 32 m** GPS: 73 m, DEM: 24 m  
 Accuracy **±6 m**  
 Date **23. 02. 2021. 10:38:53**  
 Declin. **+4.2°** 47307 nT  
 Grid north **+0.2°**



LOCATION

Coordinates **522429 E 4779703 N**  
 Elevation **↑ 32 m** GPS: 72 m, DEM: 34 m  
 Accuracy **±6 m**  
 Date **23. 02. 2021. 10:41:05**  
 Declin. **+4.2°** 47307 nT  
 Grid north **+0.2°**



LOCATION

Coordinates **522319 E 4779712 N**  
 Elevation **↑ 34 m** GPS: 75 m, DEM: 49 m  
 Accuracy **±6 m**  
 Date **23. 02. 2021. 10:45:54**  
 Declin. **+4.2°** 47307 nT  
 Grid north **+0.2°**







JUMP TO ✓

LOCATION

Coordinates **522400 E 4779808 N**  
Elevation **↑ 34 m** GPS: 74 m, DEM: 33 m  
Accuracy **±4 m**  
Date **23. 02. 2021. 10:47:43**  
Declin. **+4.2°** 47307 nT  
Grid north **+0.2°**



JUMP TO ✓

LOCATION

Coordinates **522428 E 4779959 N**  
Elevation **↑ 33 m** GPS: 74 m, DEM: 30 m  
Accuracy **±6 m**  
Date **23. 02. 2021. 10:50:12**  
Declin. **+4.2°** 47308 nT  
Grid north **+0.2°**



JUMP TO ✓

LOCATION

Coordinates **521920 E 4780082 N**  
Elevation **↑ 34 m** GPS: 75 m, DEM: 41 m  
Accuracy **±6 m**  
Date **23. 02. 2021. 10:56:35**  
Declin. **+4.2°** 47308 nT  
Grid north **+0.2°**



JUMP TO ✓

LOCATION

Coordinates **521725 E 4780144 N**  
Elevation **↑ 37 m** GPS: 78 m, DEM: 30 m  
Accuracy **±6 m**  
Date **23. 02. 2021. 10:59:55**  
Declin. **+4.2°** 47308 nT  
Grid north **+0.2°**



JUMP TO ✓

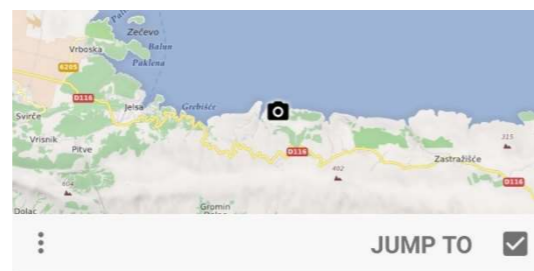
LOCATION

Coordinates **521431 E 4780147 N**  
Elevation **↑ 34 m** GPS: 74 m, DEM: 33 m  
Accuracy **±6 m**  
Date **23. 02. 2021. 11:03:03**  
Declin. **+4.2°** 47307 nT  
Grid north **+0.2°**



LOCATION

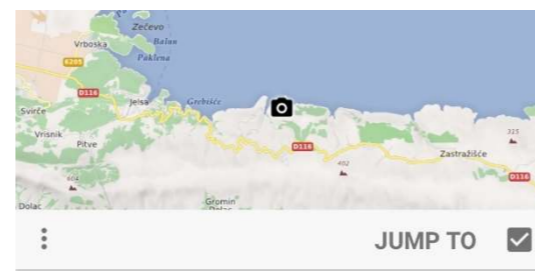
Coordinates **521181 E 4780128 N**  
Elevation **↑ 31 m** GPS: 72 m, DEM: 29 m  
Accuracy **±4 m**  
Date **23. 02. 2021. 11:06:17**  
Declin. **+4.2°** 47307 nT  
Grid north **+0.2°**



JUMP TO ✓

LOCATION

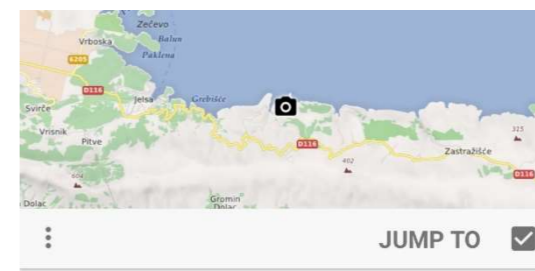
Coordinates **520830 E 4780161 N**  
Elevation **↑ 30 m** GPS: 71 m, DEM: 28 m  
Accuracy **±4 m**  
Date **23. 02. 2021. 11:10:30**  
Declin. **+4.2°** 47307 nT  
Grid north **+0.2°**



JUMP TO ✓

LOCATION

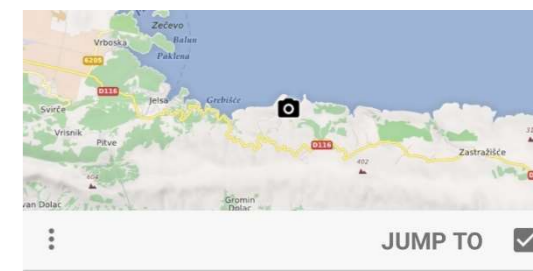
Coordinates **520783 E 4780109 N**  
Elevation **↑ 26 m** GPS: 67 m, DEM: 24 m  
Accuracy **±4 m**  
Date **23. 02. 2021. 11:31:14**  
Declin. **+4.2°** 47307 nT  
Grid north **+0.2°**



JUMP TO ✓

LOCATION

Coordinates **520765 E 4780059 N**  
Elevation **↑ 24 m** GPS: 65 m, DEM: 29 m  
Accuracy **±64 m**  
Date **23. 02. 2021. 11:32:30**  
Declin. **+4.2°** 47307 nT  
Grid north **+0.2°**



JUMP TO ✓

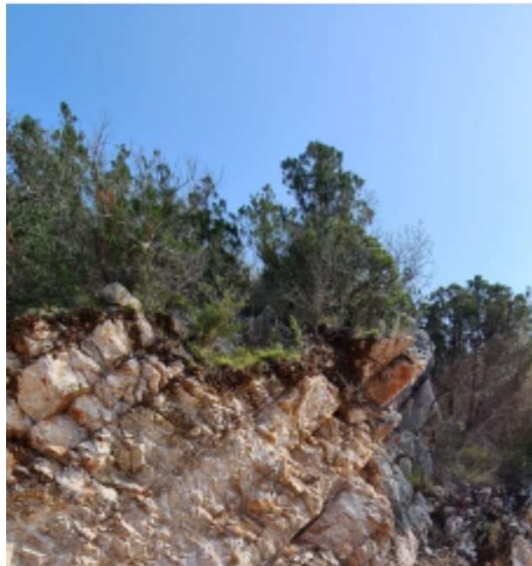
LOCATION

Coordinates **520333 E 4780039 N**  
Elevation **↑ 35 m** GPS: 75 m, DEM: 28 m  
Accuracy **±4 m**  
Date **23. 02. 2021. 11:38:13**  
Declin. **+4.2°** 47306 nT  
Grid north **+0.2°**





Coordinates **520321 E 4779929 N**  
Elevation **↑ 42 m** GPS: 83 m, DEM: 32 m  
Accuracy **±4 m**  
Date **23. 02. 2021. 11:41:56**  
Declin. **+4.2°** 47305 nT  
Grid north **+0.2°**



JUMP TO

LOCATION

Coordinates **520348 E 4779784 N**  
Elevation **↑ 34 m** GPS: 75 m, DEM: 28 m  
Accuracy **±6 m**  
Date **23. 02. 2021. 11:45:08**  
Declin. **+4.2°** 47305 nT  
Grid north **+0.2°**



JUMP TO

LOCATION

Coordinates **520347 E 4779740 N**  
Elevation **↑ 15 m** GPS: 55 m, DEM: 22 m  
Accuracy **±6 m**  
Date **23. 02. 2021. 11:46:54**  
Declin. **+4.2°** 47306 nT  
Grid north **+0.2°**



Coordinates **520275 E 4779733 N**  
Elevation **↑ 22 m** GPS: 63 m, DEM: 25 m  
Accuracy **±4 m**  
Date **23. 02. 2021. 11:49:44**  
Declin. **+4.2°** 47305 nT  
Grid north **+0.2°**



JUMP TO

LOCATION

Coordinates **520186 E 4779766 N**  
Elevation **↑ 34 m** GPS: 75 m, DEM: 30 m  
Accuracy **±4 m**  
Date **23. 02. 2021. 11:52:09**  
Declin. **+4.2°** 47305 nT  
Grid north **+0.2°**



JUMP TO

LOCATION

Coordinates **520131 E 4779733 N**  
Elevation **↑ 22 m** GPS: 62 m, DEM: 22 m  
Accuracy **±4 m**  
Date **23. 02. 2021. 11:54:57**  
Declin. **+4.2°** 47305 nT  
Grid north **+0.2°**



Prilog 3. **Kategorizacija karbonatnih 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 [ Ω.m]				Kut unutr. trenja	Kohezija [ kPa]
		uzdužni	poprečni						
<b>I</b>	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 ispunjene kristaliziranim supstancam.	>4300	>2200	>1000	F	90 - 100	>100	>45	>500
<b>II</b>	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
<b>III</b>	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
<b>IV</b>	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
<b>V</b>	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
<b>VI</b>	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 ispunjene glinom i fragmentima stijene te poluvezanim brečama.	600 - 900	250 - 400	150 - 300	B	0 - 10	3 - 10	<30	100 - 150
<b>VII</b>	Džepovi i vrtače ispunjene glinom ili mješavinom gline i fragmenata stijena.	300 -600	150 - 250	35 - 200	A	0	0	<30	<100