

# Ispitivanje mehaničkih značajki vapnenaca

---

Vračević, Doris

Undergraduate thesis / Završni rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:109312>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-01**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering - FCERI Repository](#)



image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE U RIJECI**  
**GRAĐEVINSKI FAKULTET U RIJECI**

**Doris Vračević**

**Ispitivanje mehaničkih značajki vapnenaca**

**Završni rad**

**Rijeka, 2019.**

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET U RIJECI**

**Preddiplomski sveučilišni studij  
Mehanika tla i stijena**

**Doris Vračević  
JMBAG: 0114029471**

**Ispitivanje mehaničkih značajki vapnenaca**

**Završni rad**

**Rijeka, srpanj 2019.**

Naziv studija: Preddiplomski sveučilišni studij  
Znanstveno područje/područja: Tehničke znanosti  
Znanstveno polje/polja: Građevinarstvo  
Znanstvena grana/grane: Geotehnika

Tema završnog rada

**ODREĐIVANJE MEHANIČKIH ZNAČAJKI VAPNENACA**  
**DETERMINING OF MECHANICAL PROPERTIES OF LIMESTONE**

Kandidat: **DORIS VRAČEVIĆ**  
Kolegij: **Mehanika tla i stijena**  
Završni rad broj: \_\_\_\_\_

**Zadatak:**

U završnom radu prikazani su terenski i laboratorijski postupci ispitivanja, te obrada rezultata ispitivanja kako bi se dobile mehaničke značajke vapnenaca s područja Vinodolske udoline. Na odabranoj lokaciji ispitana je intaktna stijena različitog stupnja trošnosti. Provedena je terenska identifikacija jednoosne tlačne čvrstoće i procjena jednoosne tlačne čvrstoće korištenjem Schmidtovog čekića. U laboratoriju su provedeni Point Load Test i jednoosno tlačno ispitivanje u preši za stijene. Dobivena jednoosna tlačna čvrstoća vapnenaca različitog stupnja trošnosti, uspoređena kroz različita ispitivanja te su doneseni zaključci o razlikama u dobivenim rezultatima i njihovoj pouzdanosti. Iz naponsko deformacijske krivulje određeni su Youngov modul i Poissonov koeficijent. Rad je izrađen u sklopu znanstveno istraživačkog projekta „Analiza stijenske mase i pojava nestabilnosti na kontaktu krša i fliša“. Uzorci su pripremljeni i verificirani u Laboratoriju za geotehniku Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, opremljenom u okviru projekta Razvoj istraživačke infrastrukture na kampusu Sveučilišta u Rijeci.

Tema rada je uručena:

Komentor:

\_\_\_\_\_

Mentor:

\_\_\_\_\_

## **IZJAVA**

Završni rad izradila sam samostalno, u suradnji s mentoricom i uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva u odnosu na ovaj rad.

---

Doris Vračević

U Rijeci, 1.7.2019.

## **IZJAVA**

Završni rad izrađen je u sklopu znanstvenog projekta

### **Analiza stijenske mase i pojava nestabilnosti na kontaktu krša i fliša**

Voditelj projekta      doc. dr. sc. Sanja Dugonjić Jovančević  
Šifra projekta          18.06.2.1.01.  
Financijer projekta    Sveučilište u Rijeci  
Pravna nadležnost     Republika Hrvatska

Završni/Diplomski rad nastao je kao rezultat rada u okviru projekta

### **Razvoj istraživačke infrastrukture na kampusu Sveučilišta u Rijeci**

Voditelj projekta      prof. dr. sc. Nevenka Ožanić  
Šifra projekta          RC.2.2.06-0001  
Financijer projekta    Europski fond za regionalni razvoj (EFRR)  
                                 Ministarstvo znanosti, obrazovanja i sporta RH  
Pravna nadležnost     Republika Hrvatska

U Rijeci, 26. lipnja 2019.

## **SAŽETAK**

U ovom završnom radu opisati će se postupak dobivanja jednoosne tlačne čvrstoće stijenskog materijala na nekoliko različitih metoda. Provest će se terensko i laboratorijsko ispitivanje na uzorcima vapnenca uzetih s područja Vinodolske doline (Primorsko-goranska županija). Terensko ispitivanje provodi se dvjema najčešćim metodama, Schmidt-ovim i geološkim čekićem, dok se laboratorijsko ispitivanje provodi PLT uređajem te prešom za ispitivanje jednoosne tlačne čvrstoće. Cilj ovog završnog rada je različitim metodama ispitivanja dobiti vrijednosti jednoosne tlačne čvrstoće stijenske mase u zasjecima prometnice Vinodolske doline, te usporediti dobivene vrijednosti, a iz naponsko deformacijske krivulje odrediti Youngov modul i Poissonov koeficijent.

## **KLJUČNE RIJEČI**

Vapnenac, jednoosna tlačna čvrstoća, terensko ispitivanje, laboratorijsko ispitivanje, Vinodolska dolina

## **ABSTRACT**

This final paper will describe different procedure of determining uniaxial compressive strength of rock mass by using various methods. Field and laboratory examinations of samples of limestone taken from Vinodol Valley (Primorsko – goranska country) will be performed as a part of this research. The field testing will be conducted by using two of the most commonly used methods, Schmidt hammer and geological hammer, while the laboratory testing will be conducted using the PLT device along with the compression test device. The goal of this final paper is to get values of Uniaxial Compressive Strength of rock mass by different measuring methods in shades of Vinodol Valley, compare obtained values, and determine the Young module and Poisson coefficient from the stress-strain curve.

## **KEYWORDS**

Limestone, Uniaxial Compressive Strength, field testing, laboratory testing, Vinodol valley



## Popis slika

Slika 1: Stijenska masa in-situ.....	1
Slika 2: Dijagram za procjenu GSI indeksa temeljem vizualne ocjene (Hoek & Marinos, 1998.).....	6
Slika 3: Mohr-Coulombov kriterij čvrstoće: kružnica A- nemoguće stanje, kružnica B- stanje sloma, kružnica C- stabilno stanje .....	10
Slika 4: Uvjeti stijenske mase pri kojima se može koristiti Hoek–Brownov kriterij čvrstoće stijenske mase (Hoek, 1994.) .....	10
Slika 5: Kombinacija H-B i M-C kriterija čvrstoće programom Rocscience-RocData.....	12
Slika 6: a) Naponsko-deformacijska krivulja, b) Naponsko-deformacijska krivulja stijena različitih deformacijskih svojstva (Vrkljan, 2013.) .....	14
Slika 7: Geografski položaj i pogled na Vinodolsku udolinu .....	16
Slika 8: Prikaz područja prikupljenih ispitnih uzorka (slika desno gore: lokacija 1, slika desno dolje: lokacija 2) .....	18
Slika 9: Vapnenci s lokacije 1: a) Munsell ljestvica boja za lokaciju 1, b) stijena ispitana na terenu geološkim i Schmidtovim čekićem, c) odlomci vapnenca korišteni u PLT ispitivanju. ....	19
Slika 10: Vapnenci s lokacije 2: a) Munsell ljestvica boja za lokaciju 2, b) stijena na kojoj je provedeno ispitivanje Schmidtovim i geološkim čekićem na terenu, c) odlomci vapnenca korišteni u PLT ispitivanju.....	20
Slika 11: Priprema ispitnog uzorka u laboratoriju: a) bušenje uzorka, b) brušenje uzorka .....	21
Slika 12: Shema rada Schmidt-ovog čekića .....	22
Slika 13: Procjena tlačne čvrstoće stijenki diskontinuiteta temeljem ispitivanja Schmidt-ovim čekićem .....	23
Slika 14: PLT uređaj iz geotehničkog laboratorija Građevinskog fakulteta Rijeka .....	24
Slika 15: Nanošenje sile na uzorak i mjerenje dimenzija uzorka nakon sloma .....	24
Slika 16: Oblik uzorka za: (a) dijametralni pokus, (b) aksijalni pokus, (c) prizmatični pokus, (d) pokus na nepravilnom oblika (ISRM, 1983.) .....	25
Slika 17: Pravilni pokus: (a), (b), (c), nepravilni pokus: (c), (d) (ISRM, 1983.) .....	25
Slika 18: Shema uređaja za jednoosno ispitivanje (Vrkljan, 2013) i hidraulička preša za ispitivanje stijene u geotehničkom laboratoriju Građevinskog fakulteta Rijeka.....	27

Slika 19: Mjerilo radijalnog pomaka i mjerilo aksijalnog (3 mjerila) pomaka, pričvršćeni na uzorak i prikaz deformacije uzorka za jednoosno naprezanje.....	28
Slika 20: Dijagram za određivanje jednoosne tlačne čvrstoće: a) lokacija 1, b) lokacija 2.....	30
Slika 21: Digitalni oblik plohe sloma.....	31
Slika 22: Odabrani uzorci nakon sloma prilikom PLT ispitivanja .....	32
Slika 23: Naponsko deformacijska krivulja pri jednoosnom tlačenju: a) uzorak 1, b) uzorak 2 .....	34
Slika 24: Uzorci 1 i 2 nakon jednoosnog tlačnog ispitivanja u preši.....	34

## Popis tablica

Tablica 1: RMR klasifikacijski parametri i pripadajuće vrijednosti (Bieniawski, 1989.).....	4
Tablica 2: Kategorije stijenske mase prema RMR-u.....	5
Tablica 3: Procjena jednoosne čvrstoće jednostavnim pokusima na terenu (ISRM, 1978) .....	8
Tablica 4: Mohs-ova skala tvrdoće .....	13
Tablica 5: Terenska identifikacija geološkim čekićem.....	29
Tablica 6: Terensko ispitivanje Schmidt-ovim čekićem.....	29
Tablica 7: Obrada podataka dobivenih mjerenjem plohe sloma .....	31
Tablica 8: Obrada podataka dobivenih digitalnim oblikom .....	32
Tablica 9: Rezultati ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće.....	33
Tablica 10: Rezultati ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće.....	35

## Sadržaj

1.	UVOD.....	1
2.	STIJENA KAO INŽENJERSKI MATERIJAL.....	1
3.	KLASIFIKACIJA STIJENSKE MASE .....	3
3.1.	Geomehanička klasifikacija (RMR) .....	3
3.2.	GSI klasifikacija .....	5
4.	MEHANIČKE ZNAČAJKE STIJENE .....	7
3.1.	Čvrstoća.....	7
4.1.1.	Mohr-Coulombov kriterij čvrstoće .....	9
4.1.2.	Hoek-Brownov kriterij čvrstoće.....	10
3.2.	Tvrdoća.....	12
3.3.	Deformabilnost .....	14
3.4.	Krutost.....	14
5.	PODRUČJE ISTRAŽIVANJA.....	16
5.1.	Geografske značajke Vinodolske udoline.....	16
5.2.	Geološke značajke Vinodolske udoline .....	16
6.	OPIS MATERIJALA I METODA .....	17
6.1.	Vapnenci.....	17
6.2.	Prikupljanje i priprema uzoraka .....	17
6.3.	Schmidtov čekić.....	21
6.4.	Čvrstoća u točki- Point load test (PLT) .....	23
6.5.	Jednoosno tlačno ispitivanje .....	26
7.	REZULTATI ISPITIVANJA.....	29
7.1.	Terenska identifikacija.....	29
7.2.	Čvrstoća opterećenjem u točki- Point load test (PLT).....	31
7.3.	Jednoosno tlačno ispitivanje u preši za stijene .....	33
8.	DISKUSIJA I ZAKLJUČAK .....	35
	LITERATURA.....	36

## 1. UVOD

Na samom početku važno je razlikovati pojmove intaktne stijene i stijenske mase. Intaktna stijena je materijal stijenske mase, tipično predstavljen cijelom jezgrom iz bušotine koja ne sadrži guste diskontinuitete, dok je stijenska masa stijena kakvu vidimo u prirodi odnosno in- situ, materijal intaktne stijene zajedno sa svim diskontinuitetima.

Značajnu korist u utvrđivanju parametara stijenske mase pruža korištenje klasifikacija stijenske mase. Klasifikacija je postupak opisivanja kvalitete stijenske mase, koji služi za utvrđivanje njenih značajki i inženjerske pothvate u stijenskoj masi

U mehanici stijena gotovo da nema inženjerskog pothvata u kojem se ne koristiti jedna od najznačajnijih mehaničkih značajki, a to je upravo jednoosna tlačna čvrstoća. Čvrstoću opisujemo kao maksimalno naprezanje koje materijal može podnijeti bez da dođe do sloma. Jednoosna tlačna čvrstoća može se dobiti raznim terenskim i laboratorijskim ispitivanjima propisanim preporučenim metodama od strane Međunarodnog društva za mehaniku stijena (ISRM) ili ASTM normama. Među jednostavnije metode ispitivanja mogle bi se navest one koje ne zahtijevaju posebnu obradu ispitnog uzorka, a to su Schmidt-ov i geološki čekić, te PLT uređaj. Međutim, važno je napomenuti da spomenuta ispitivanja omogućuju tek procjenu vrijednosti jednoosne tlačne čvrstoće. S druge strane imamo mogućnost vrijednost jednoosne tlačne čvrstoće odrediti u preši za stijene. Zahtjevnost ispitivanja tlačne čvrstoće prešom za stijene proizlazi iz česte nemogućnosti dobivanja propisanih dimenzija ispitnog uzorka zbog razlomljenosti stijenske mase, prisutnosti mikropukotina unutar uzorka zbog čega pri obradi puca, te zadovoljenja zahtjeva za okomitošću i ravnosti baze i plašta.

Stijenska masa na kojoj su se u ovom završnom radu provodila ispitivanja je vapnenac. Vapnenac je sastavljen pretežno od kalcita, ali može sadržavati i druge minerale kao što su dolomit, glina, kvarc ili organske tvari. Ovim radom bit će obuhvaćeno ispitivanje čvrstoće stijene, provedena na terenu i u geotehničkom laboratoriju Građevinskog fakulteta Rijeka. Opisat će se svaka od korištenih metoda, te u konačnici usporediti dobiveni rezultati jednoosne tlačne čvrstoće, a iz naponsko deformacijske krivulje odredit će se Youngov modul i Poissonov koeficijent.

## 2. STIJENA KAO INŽENJERSKI MATERIJAL

Stijena kao građevinski materijal ima široku primjenu, te su gotovo svi geotehnički, a i drugi inženjerski radovi, vezani uz nju. Koristimo ju kao materijal od kojeg gradimo, u kojem i na kojem se gradi. Primjena stijene kao materijala od kojeg gradimo predstavlja najlakši inženjerski problem zbog slobode pri biranju materijala (stijene) od kojeg želimo graditi. Daleko veći problem predstavlja korištenje stijene kao materijala na i u kojem gradimo. Kod takvih tipova radova nemamo slobodu izbora stijenskog materijala, već smo prisiljeni prilagoditi se samoj stijeni kakva se nalazi na lokaciji (*in situ*). Tu dolazi do suočavanja sa stanjem stijene kakvo se u prirodi nalazi, odnosno heterogenom, anizotropnom, prirodno napregnutom i ispucalom stijenom (slika 1.). Ispucanost stijene kontrolira stabilnost građevina u blizini površine, a prirodna napregnutost kontrolira stabilnost dubokih građevina.

Kako bi lakše razlikovali strukturne elemente stijenske mase, stijenu nazivamo intaktnom stijenom (*engl. intact rock*), dok diskontinuiteti (*engl. discontinuity*) različitih tipova i geneze opisuju njenu ispucanost. Intaktna stijena je materijal stijenske mase, tipično predstavljen cijelom jezgrom iz bušotine koja ne sadrži strukturne diskontinuitete (ISRM, 1975.). Diskontinuitet je opći naziv za bilo koji mehanički diskontinuitet u stijenskoj masi koji ima malu ili nikakvu vlačnu čvrstoću. Koristi se kao termin za većinu tipova pukotina, ploha slojevitosti, ploha škriljavosti i oslabljenih zona i rasjeda. Grupa paralelnih diskontinuiteta čini set diskontinuiteta (ISRM 1978.).



Slika 1: Stijenska masa in-situ

Ponašanje stijenske mase ovisi o više čimbenika: čvrstoći intaktne stijene, značajkama i gustoći diskontinuiteta i veličini inženjerskog zahvata. Kao inženjeri, prilikom izvođenja bilo kojeg zahvata u stijenskoj masi, moramo odrediti svojstva i prirodno stanje naprezanja koje nije konstantno, već će biti poremećeno inženjerskim zahvatom.

### 3. KLASIFIKACIJA STIJENSKE MASE

Klasifikacija predstavlja postupak koji grupira stijensku masu na osnovi međusobnih odnosa njezinih značajki, pri čemu pruža veliku korist pri utvrđivanju parametra stijenske mase i potrebnih mjera ojačanja ili podgrade. Klasifikacije se mogu podijeliti na geološke i inženjerske klasifikacije. Geološke klasifikacije služe za spoznavanje svojstva stijenske mase, a stijensku masu dijele po nastanku, starosti i dominantnim svojstvima. Poznavanje geološke klasifikacije je osnova za razumijevanje fizikalno-mehaničkih svojstva stijenske mase, dok su inženjerske klasifikacije prilagođene određivanju mehaničkih svojstva koje pružaju odgovor o njenom ponašanju. U današnje vrijeme u upotrebi je širok broj klasifikacija, no glavni nedostatak se pokazao kod njihove primjene. Autori su klasifikacije razvili na osnovi vrste stijene na kojoj su provodili istraživanje, što je rezultiralo time da se prije odabira klasifikacije kojom želimo provoditi istraživanje, mora provjeriti odgovara li naša stijenska masa uvjetima na osnovi kojih je određena klasifikacija razvijena.

Od mnogih postojećih klasifikacija stijenske mase, najčešće korištene klasifikacije su:

- Terzaghijeva klasifikacija (Terzaghi, 1946);
- Laufferova klasifikacija (Lauffer, 1958);
- Rock Quality Designation klasifikacija (RQD) (Deere et al., 1967);
- Rock Structure Rating klasifikacija (RSR) (Wickham et al., 1972);
- Geomehanička klasifikacija (RMR) (Bieniawski, 1973);
- Q klasifikacija (Rock Tunneling Quality Index) (Barton et al., 1974).
- Rock Mass Indeks klasifikacija (RMi) (Palmstrom, 1995.)

U nastavku teksta biti će opisane dvije, među najčešće korištenim klasifikacijama, RMR i GSI.

#### 3.1. Geomehanička klasifikacija (RMR)

Klasifikacija RMR (*engl. Rock mass rating*) razvio je Bieniawski 1973. godine za potrebe projektiranja podgradnih sustava za tunele. Godine 1976. objavljena je prva cjelovita verzija klasifikacije s detaljima primjene (RMR<sub>1976</sub>). Tijekom godina se mijenjala na temelju iskustvenih rezultata i bila prilagođavana međunarodnim standardima i procedurama. Konačnu posljednju promjenu sustava, Bieniawski predlaže 1989. godine (RMR<sub>1989</sub>).

Procedura klasifikacije temelji se na bodovanju sljedećih parametra:

1. Jednoosne čvrstoće stijenskog materijala
2. Indeks kakvoće jezgre RQD (*engl. Rock Quality Designation*)
3. Razmaku diskontinuiteta (pukotina)



4. Stanju diskontinuiteta (pukotina)
5. Orientaciji diskontinuiteta (pukotina)
6. Uvjetima podzemnih voda

Način na koji se prethodno navedenih šest parametra boduje prikazan je tablicom 1. (Bieniawski).

Tablica 1: RMR klasifikacijski parametri i pripadajuće vrijednosti (Bieniawski, 1989.)

PARAMETAR		PODRUČJA VRIJEDNOSTI							
1.	Čvrstoća stijenskog materijala	Indeks čvrstoće s opt. u točki	>10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa	Za ove vrijednosti koristiti jednoosnu čvrstoću		
		Jednoosna tlačna čvrstoća (MPa)	>250	100-250	50-100	25-50	10-25	3-10	1-3
bodovi			15	12	7	4	2	1	0
2.	Indeks kakvoće RQD jezgre		90% - 100 %	75% - 90%	50% - 75%	25% - 50%	< 25%		
	bodovi		20	17	13	8	3		
3.	Razmak diskontinuiteta		> 2 m	0.6 - 2 m	0.2 - 0.6 m	0.06 - 0.2 m	< 0.06 m		
	bodovi		20	15	10	8	5		
4.	Stanje pukotina		Vrlo hrapave Prekinute Nerazdvojene Zidovi stijena neistrošeni	Neznatno hrapave površine Zijev < 1mm Neznatno rastrušeni zidovi	Neznatno hrapave površine Zijev < 1mm Vrlo rastrušeni zidovi	Glatka površina ili ispuna < 5mm ili zijev 1-5mm neprekinute	Meka ispuna debljine > 5mm ili zijev > 5mm Neprekinute		
	bodovi		30	25	20	10	0		
5.	Uvjeti stanja podzemne vode	Dotok na 10m tunela (l/min)	nikakav	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125		
		Omjer pritiska vode u pukotini i većeg glavnog naprezanja	0	0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5		
		Opće stanje	Potpuno suho	vlažno	mokro	Voda pod malim pritiskom	Ozbiljni problemi s vodom		
	bodovi		15	10	7	4	0		

Nakon zbrojenih bodova prethodnih parametra, dodaje se popravak s obzirom na orijentaciju dominantnog pukotinskog sustava i inženjerski problem koji rješava (tunel, temelji, kosine),

time se dobiva vrijednost RMR-a prema kojoj se stijenska masa svrstava u jednu od pet kategorija navedenih u tablici 2.

Tablica 2: Kategorije stijenske mase prema RMR-u

Broj bodova (RMR)	Kategorija stijenske mase		Prosječna vrijednost stabilnosti nepodgrađenog otvora	Približne vrijednosti parametra posmične čvrstoće stijenske mase prema MC kriteriju	
				c (kPa)	$\rho$ (°)
100-81	I	Vrlo dobra	20 god. za raspon 15 m	> 400	> 45
80-61	II	Dobra	1 god. za raspon 10 m	300 - 400	35 - 45
60-41	III	Povoljna	1 tjedan za raspon 5 m	200 - 300	25 - 35
40-21	IV	Slaba	10 sati za raspon 2.5 m	100 - 200	15 - 25
<21	V	Vrlo slaba	30 min. za raspon 1 m	< 100	< 15

Prednost klasifikacije je njena laka primjena, a glavni nedostatak da i male varijacije u kvaliteti stijenske mase imaju značajan utjecaj na promjenu vrijednosti što određuje bitno drugačiji podgradni sustav.

### 3.2. GSI klasifikacija

Geološki indeks čvrstoće (GSI) (*engl. Geological strength indeks*) uveden je od strane Hoek i Browna 1997. godine, te predstavlja pojednostavljen klasifikacijski sustav pri određivanju čvrstoće stijenske mase. Temelji se na vizualnoj procjeni prilikom koje se ocjenjuje stanje diskontinuiteta i struktura stijenske mase. Pri određivanju GSI indeksa koriste se dva osnovna parametra: blokovitost stijenske mase i uvjeti površine diskontinuiteta.

Koncept GSI klasifikacije je jednostavniji od RMR klasifikacije, ali uključuje i novije verzije originalne RMR klasifikacije (Bieniawski, 1976., 1989.), temeljem čega se uspostavlja sljedeći odnos između GSI i RMR (Hoek, 1995.):

Za  $RMR_{76} > 18$  vrijedi:

$$GSI = RMR_{76} \quad (1)$$

Za  $RMR_{89} > 23$  vrijedi:

$$GSI = RMR_{89} - 5 \quad (2)$$

Za obje verzije pretpostavljaju se suhi uvjeti stanja podzemne vode, a utjecaji od orijentacije pukotina se zanemaruju. Temeljna funkcija GSI indeksa je procjena litologije, strukture i uvjeta površine diskontinuiteta u stijenskoj masi. Važno je napomenuti da svrha GSI indeksa nije da zamjeni RMR ili Q klasifikaciju, već da odredi značajke stijenske mase.

GSI klasifikacija nije primjenjiva u stijenskoj masi kod koje je jasno definirana dominantna strukturalna orijentacija. Slikom 2. prikazana je nadopunjena verzija dijagrama za procjenu vrijednosti GSI indeksa, s obzirom na izvorni prijedlog Hoek i Brown-a.



Slika 2: Dijagram za procjenu GSI indeksa temeljem vizualne ocjene (Hoek & Marinos, 1998.)

## 4. MEHANIČKE ZNAČAJKE STIJENE

### 3.1. Čvrstoća

Čvrstoća (*engl. strength*) je maksimalno naprezanje koje materijal može podnijeti bez loma za bilo koji tip opterećenja. Uzevši u obzir da je vlačna i posmična čvrstoća diskontinuiteta značajno manja od čvrstoće same stijene, zaključujemo da važnu ulogu u čvrstoći stijenske mase predstavljaju sami diskontinuiteti (pukotine). Pod utjecajem primijenjenih sila (npr. gravitacijska sila) ili promjenom stanja naprezanja (najčešće zbog anizotropnog utjecaja; opterećenje stijenske mase ili iskop) dolazi do nestabilnosti stijenske mase što podrazumijeva ispadanje ili klizanje blokova po diskontinuitetima. Takvi tipovi nestabilnosti nastaju kada se prekorači čvrstoća na smicanje po diskontinuitetima. Slom nastaje kada naprezanja na stijeni (intaktnoj ili ispunjenoj diskontinuitetima) prekorače vrijednost jednog ili više oblika čvrstoće (vlačne, tlačne ili posmične). Slom se pojavljuje u različitim oblicima koji ovise o više faktora: o položaju pukotina u odnosu na pravac nanošenja opterećenja, posmičnoj čvrstoći ili razmaku pukotina, jednoosnoj tlačnoj, vlačnoj i posmičnoj čvrstoći intaktne stijene. U stijenskoj masi može se dogoditi kao smicanje na plohi sloma, direktni vlačni slom, slom savijanjem, slom kompresijom ili urušavanje.

Čvrstoća stijene se vrlo točno može odrediti u laboratoriju ili procijeniti nekim od jednostavnih pokusa kao što su pokus čvrstoće u točki, udaranje stijene geološkim čekićem ili guljenjem stijene nožem. Tablica 3. prikazuje klasifikaciju ISRM (1978.) gdje se za identifikaciju koriste šaka, palac, geološki čekić i džepni nožić. Granicu između tla i stijene predstavlja vrijednost jednoosne tlačne čvrstoće od 1 MPa.

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

Klasa	Opis	Terenska identifikacija	Približna vrijednost jednoosne tlačne čvrstoće (MPa)	
S1	Vrlo mekana glina	Pesnica se lagano utiskuje nekoliko centimetara	< 0.025	Tlo
S2	Mekana glina	Palac se lagano utiskuje nekoliko centimetara	0.025 – 0.05	
S3	Čvrsta glina	Palac se utiskuje nekoliko centimetara sa srednjim naporom	0.05 – 0.10	
S4	Kruta glina	Palac ostavlja udubinu ali penetrira samo uz visoki napon	0.10 – 0.25	
S5	Vrlo kruta glina	Nokat palca ostavlja udubinu	0.25 – 0.50	
S6	Tvrda glina	Nokat palca teško ostavlja udubinu	> 0.50	
R0	Ekstremno slaba stijena	Nokat palca ostavlja udubinu	0.25 – 0.10	Stijena
R1	Vrlo slaba stijena	Mrvi se pod udarcima šiljaka geološkog čekića, guli se džepnim nožićem	1.0 – 5.0	
R2	Slaba stijena	Može se guliti džepnim nožićem uz poteškoće, plitko udubljenje može se napraviti udarcem šiljaka geološkog čekića	5.0 – 25	
R3	Srednje čvrsta stijena	Ne može se parati ili guliti džepnim nožićem, uzorak se može lomiti sa jednim udarcem geološkog čekića	25 – 50	
R4	Čvrsta stijena	Za lomljenje uzorka potrebno je više od jednog udaraca geološkim čekićem	50 – 100	
R5	Vrlo čvrsta stijena	Za lomljenje uzorka potrebno je mnogo udaraca geološkim čekićem	100 – 250	
R6	Ekstremno čvrsta stijena	Uzorak se može okrhnuti geološkim čekićem	> 250	

Problem kod određivanja kriterija kojim će se opisati čvrstoća stijene je što još nema prihvaćenog oblika kriterija koji bi zadovoljavao sve oblike sloma do kojih može doći u stijeni. Stoga, prilikom rješavanja inženjerskog problema pojednostavljujemo postupak prilagođavanjem obliku loma. Temeljem iskustva pokazalo se da je najčešći oblik loma posmični lom, na osnovu toga, najčešće se koriste kriteriji koji opisuju posmičnu čvrstoću. No ipak, treba imati na umu da posmični lom nije jedini oblik sloma u stijeni.

Kriterij čvrstoće opisan je kao izraz kojim provjeravamo je li stanje naprezanja prihvatljivo ili je doseglo razinu pojave lokalnog ili globalnog sloma. Postoji više kriterija čvrstoće kojima možemo opisati ponašanje stijenske mase, od kojih su u nastavku opisana dva.

#### 4.1.1. Mohr-Coulombov kriterij čvrstoće

Mohr-Coulombov (M-C) kriterij izražava posmičnu čvrstoću intaktne stijene preko parametra kohezije ( $c$ ) i kuta unutarnjeg trenja ( $\theta$ ). Kao linearan kriterij čvrstoće ne opisuje najbolje ponašanje stijenske mase. Prikazuje se pravcem koji tangira Mohrove krugove koji predstavljaju kritičnu kombinaciju glavnih naprezanja  $\sigma_1$  i  $\sigma_3$ . Tako predstavljen pravac čvrstoće izražen je Mohr-Coulombovim zakonom:

$$\tau = c + \sigma \tan \theta \quad (3)$$

Gdje je:

$\tau$ -posmično naprezanje u trenutku sloma ( $\text{kN/m}^2$ )

$c$ - kohezija (posmična čvrstoća kada su normalna naprezanja jednaka nuli) ( $\text{kN/m}^2$ )

$\sigma$ -normalno naprezanje u trenutku sloma ( $\text{kN/m}^2$ )

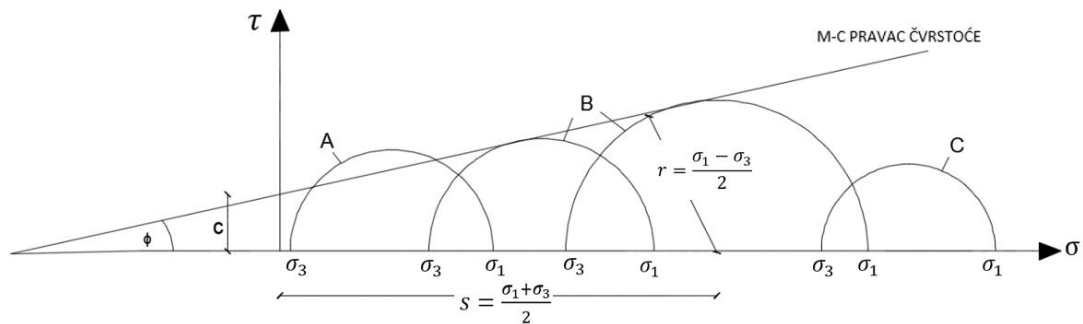
$\theta$ -kut unutarnjeg trenja materijala ( $^\circ$ )

Kohezija je posljedica veze između čestica; značajna je u glinama (i drugim koherentnim tlima), a ne postoji u šljuncima i pijescima (nekoherentnim tlima). Kut unutarnjeg trenja nastaje kao posljedica trenja između čestica; viši je u šljuncima i pijescima u odnosu na gline i prah. Prethodno navedeni parametri čvrstoće (kut unutarnjeg trenja i kohezija) nisu konstantni nego ovise o više čimbenika: vrsti materijala, njegovom stanju (raspucanosti), veličini naprezanja i brzini nanošenja opterećenja. Kriterij čvrstoće (3) spada u linearne kriterije čvrstoće, te se njegovi parametri određuju pomoću izravnog smicanja ili troosnim smicanjem na stijenskim uzorcima.

Sve kombinacije normalnih i posmičnih naprezanja koje se nalaze ispod kriterija čvrstoće (tj. kada Mohrov krug ne tangira pravac čvrstoće), predstavljaju stabilno stanje, pri kojem neće doći do sloma. U suprotnom, ako pravac čvrstoće tangira Mohr-ov krug dolazi do sloma materijala (slika 3.).

Radijus kružnice ( $r$ ) predstavlja najveće posmično naprezanje:

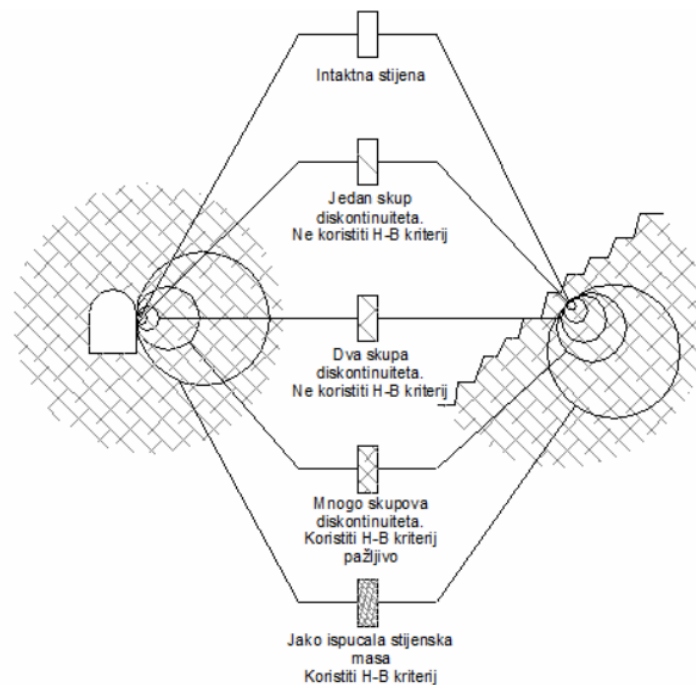
$$r = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (2)$$



Slika 3: Mohr-Coulombov kriterij čvrstoće: kružnica A- nemoguće stanje, kružnica B- stanje sloma, kružnica C- stabilno stanje

#### 4.1.2. Hoek-Brownov kriterij čvrstoće

Hoek- Brownov (H-B) kriterij čvrstoće stijenske mase predstavlja empirijski kriterij čiji su podaci dobiveni troosnim ispitivanjem stijenske mase. Kriterij je primjenjiv u intaktnoj (čvrsta stijenska masa) ili u stijenskoj masi koja sadrži dovoljan broj gusto raspoređenih diskontinuiteta (pretpostavlja se izotropno ponašanje s uključenim lomovima po diskontinuitetima). Kriterij nije primjenjiv kada je diskontinuitet iste veličine kao i građevina koja se promatra (dominantan je jedan ili dva seta diskontinuiteta) ili kada je jedan od setova diskontinuiteta znatno slabiji od drugih (slika 4.).



Slika 4: Uvjeti stijenske mase pri kojima se može koristiti Hoek–Brownov kriterij čvrstoće stijenske mase (Hoek, 1994.)

Kriterij je objavljen 1980.godine, a u literaturi češće poznat kao originalni Hoek-Brownov kriterij. Ako uzememo u obzir činjenicu da teško ispucala stijenska masa nema vlačnu čvrstoću, uvodi se modificiran kriterij. Kao rezultat spajanja originalnog i modificiranog kriterija nastaje opći oblik Hoek-Brownovog kriterija.

Originalni i modificirani oblik H-B kriterija moguće je prikazati jednačom:

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_c \left( m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_c} + s \right)^a \quad (3)$$

Gdje je:

$\sigma_1'$ -najveće efektivno naprezanje u trenutku sloma

$\sigma_3'$ -najmanje efektivno naprezanje u trenutku sloma

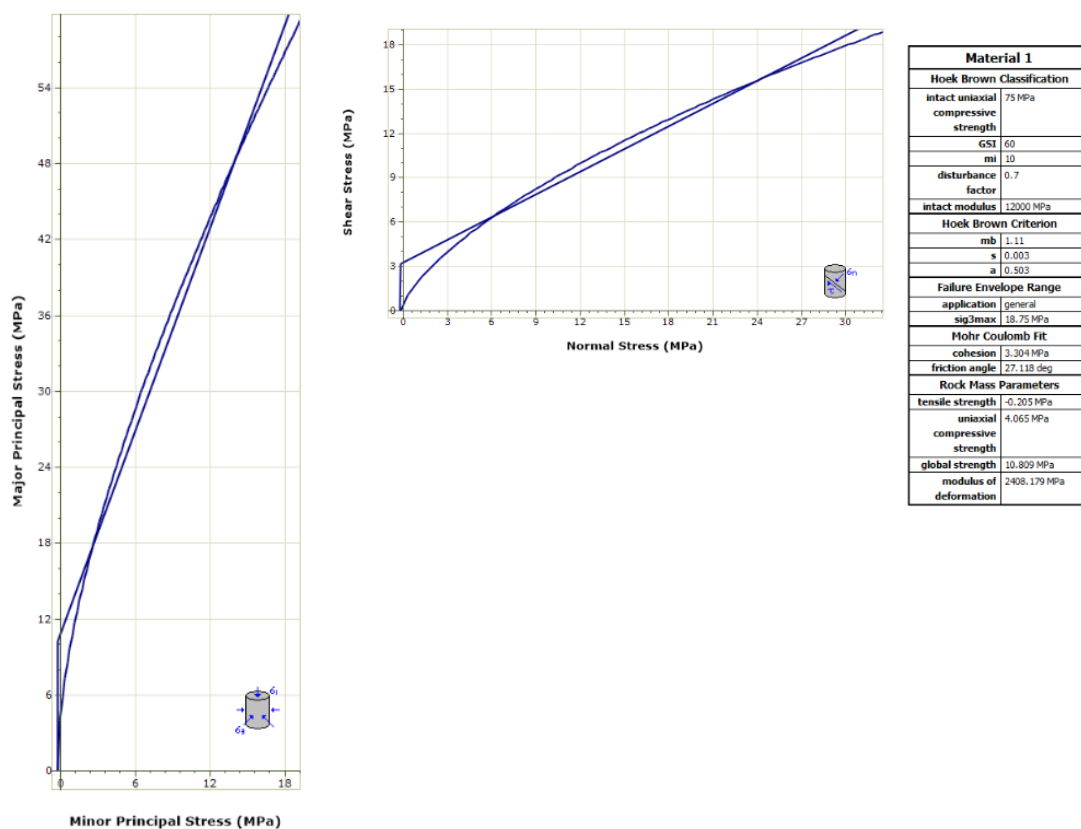
$\sigma_c$ -jednoosna tlačna čvrstoća intaktne stijene

$m_b$ -vrijednost H-B konstante ( $m$ ) za stijensku masu

$s, a$ -konstante ovise o karakteristikama stijenske mase

Slika 5. prikazuje kombinaciju Hoek- Brownovog i Mohr-Coulombovog kriterija čvrstoće na vapnenačkoj stijeni dobivenu programom Rocscience-RocData. Ulazni podaci za određivanje parametra čvrstoće prikazani su zajedno s rezultatima u tablici (s desne strane). Stijena je blokovita s dobrim stanjem diskontinuiteta, te je miniranjem malo poremećena. Kao rezultat Hoek-Brownovog kriterija dobiven je nelinearan odnos između posmičnog i normalnog naprezanja (što puno bolje opisuje ponašanje stijenske mase od M-C kriterija). Iz Mohr-Coulombovog kriterija očitamo vrijednosti za koheziju i kut unutarnjeg trenja.















Slika 5: Kombinacija H-B i M-C kriterija čvrstoće programom Rocscience-RocData

Prednost ovog kriterija je mogućnost da se procjeni čvrstoća stijenske mase na temelju parametra kojim se težinski ocjenjuju svojstva strukture stijenske mase i stanja diskontinuiteta.

### 3.2. Tvrdća

Tvrdoća je također jedno od važnijih svojstva stijena, a predstavlja otpornost materijala na udubljanje i grebanje (ISRM, 1975.). Opisuje svojstvo koje imaju čvrste tvari, za razliku od tekućina i plinova. Za određivanje tvrdoće najčešće se koristi pokus struganja (*engl. scratch pokus*) gdje se rezultati prikazuju na Mosh-ovoj skali. Mohs-ova skala sadrži 10 minerala poredanih po tvrdoći od najmekšeg (talk) prema najtvrdem (dijamant) (tablica 4.). Mohs-ova skala je preživjela test vremena i u svijetu je u širokoj upotrebi zadnjih 200 godina, ponajviše zato što je jeftina i laka za korištenje.

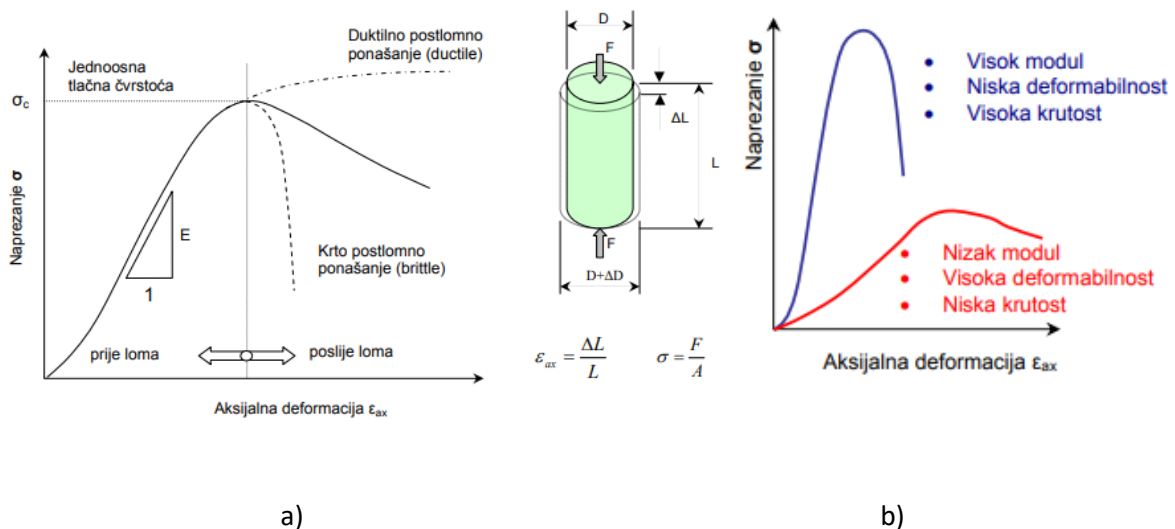
Tablica 4: Mohs-ova skala tvrdoće

Minerali	Mohsova tvrdoća	Slika
Talk	1	
Gips	2	
Kalcit	3	
Fluorit	4	
Apatit	5	
Ortoklas	6	
Kvarc	7	
Topaz	8	
Korund	9	
Dijamant	10	

Također, za utvrđivanje tvrdoće možemo koristiti i pokus utiskivanja (*engl. indentation test*) koji se izvodi utiskivanjem kugle, piramide ili stošca u površinu uzorka. Koriste se tehnike Brinell-a, Vickers-a, Knoop-a i Rockwell-a koje su razvijene u metalurgiji. Tvrdoća se može odrediti i uređajima koji rade na principu odskoka kao što su Schmidov čekić i skleroskop, te pokusima kojima se određuje abrazivnost.

### 3.3. Deformabilnost

Deformacija (*engl. deformation*) se definira kao promjena oblika koja se obično događa kao odgovor na djelovanje opterećenja ili naprezanja, a također može biti i posljedica promjene temperature ili vlažnosti (bubrenje i skupljanje (*engl. swelling or shrinkage*)). Slično kao i čvrstoća, uglavnom ovisi o poroznosti i stupnju ispucanosti uzorka. Najslabije i najdeformabilnije elemente stijena čine pore i pukotine. Ukupna deformacija stijene sastoji se od povratne (elastične) i nepovratne (plastične) deformacije. Lakoća kojom se stijena može deformirati opisuje se kao deformabilnost (*engl deformability*). Mehaničko ponašanje intaktne stijene može se opisati naponsko-deformacijskom krivuljom pri jednoosnom tlačnom naprezanju. Na krivulji očitamo podatke vezane za ponašanje stijene: vrijednost jednoosne tlačne čvrstoće, modul elastičnosti ( $E$ ) (poznat kao i Youngov modul), te krtoost koja je definirana nagibom krivulje u postlomnom dijelu. (slika 6.a). Krutost (*engl. stiffness*) opisujemo kao otpor pri deformiranju. Slabo deformiranu stijenu opisuje visok modul elastičnosti i strmi početni dio krivulje, te se za njih smatra da su krte. Suprotno tome, jako deformabilne stijene imaju niski modul i blago nagnut početni dio krivulje. (slika 6.b).



Slika 6: a) Naponsko-deformacijska krivulja, b) Naponsko-deformacijska krivulja stijena različitih deformacijskih svojstva (Vrkljan, 2013.)

### 3.4. Krutost

Jedna među najvažnijim zadaćama u stijenskom inženjerstvu za provođenje numeričkih analiza je određivanje krutosti. Krutost se opisuje kao omjer naprezanja i deformacija. Za svaku numeričku analizu i predviđanje deformacija geotehničkih konstrukcija, modul elastičnosti ( $E$ ) stijenske mase neophodan je parametar. Poznato je da stijena nije homogena

i kompaktna već razlomljena, heterogena, anizotropna i raspucana. Iz tih razloga, na krutost stijenske mase uvelike utječe upravo prisutnost diskontinuiteta, njihova krutost, broj i raspored. Takva, raspucala stijenska masa karakterizirana je većom deformabilnosti, što utječe na manju krutost stijenske mase od krutosti intaktne stijene.

Krutost određujemo laboratorijskim i terenskim ispitivanjima te pomoću klasifikacije stijenske mase i povratnim numeričkim ispitivanjima.

## 5. PODRUČJE ISTRAŽIVANJA

### 5.1. Geografske značajke Vinodolske udoline

Vinodolska udolina (Vinodol) smještena je u zapadnom dijelu Republike Hrvatske, u Primorsko-goranskoj županiji (slika 7.). Prostire se od Kvarnerskog zaljeva na sjeverozapadu sve do Novog Vinodolskog na jugoistoku, na duljini od približno 20 km. Na području Vinodola smještena su i manja, kulturno i povijesno značajnija naselja; na sjeverozapadnom dijelu Križišće, Drivenik i Tribalj, u središnjem dijelu Grižane i Belgrad, te naposljetku na jugoistočnom dijelu Bribir koji je ujedno i sjedište općine Vinodol. Naselja su međusobno dobro povezana zahvaljujući relativno gustoj mreži prometnica koju čine tri županijske ceste, niz lokalnih cesta i nerazvrstanih puteva.



Slika 7: Geografski položaj i pogled na Vinodolsku udolinu

### 5.2. Geološke značajke Vinodolske udoline

S geološkog stajališta, Vinodolska dolina predstavlja sinklinalnu strukturu koja je izgrađena od paleogenskih flišnih naslaga smještenih u središnjem djelu, te krila sinklinale izgrađenih od karbonatne stijenske mase starijeg paleogena i gornje krede. Krila sinklinale karakterizira rasjedni kontakt između karbonatnih i flišnih naslaga. Matične stijene fliša sastoje se pretežno od silita i pješčenjaka s podređenim udjelom lapora, brečokonglomerata i vapnenaca. Osnovna stijena fliša, samo je mjestimice vidljiva na površini terena. Na većem dijelu područja istraživanja uglavnom je pokrivena zonom fizičko-kemijskog trošenja kao i koluvijalno-deluvijalnim padinskim tvorevinama (siparne breče, krupnozrnasti sipari i prašinsto-glinovite deluvijalne tvorevine). Navedeni litogenetskih tipovi pokrivača razlikuju se u pogledu stabilnosti. Zbog male propusnosti terena, upojnost je mala, a koeficijent otjecanja velik. Posljedica površinskog ispiranja, te jaružanja je izražena erozija na padinama udoline.

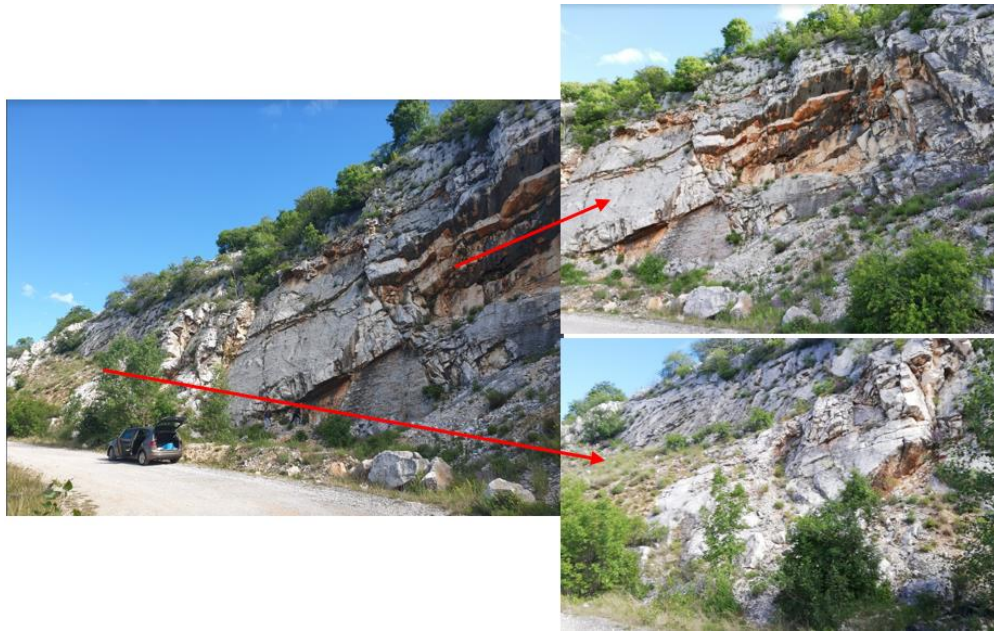
## **6. OPIS MATERIJALA I METODA**

### **6.1. Vapnenci**

Vapnenac je sedimentna karbonatna stijena sastavljena od kalcita i drugih minerala, kao što su dolomit (dolomitski vapnenac), kvarc (kvarcni vapnenac), glina (laporovit vapnenac) ili organske tvari (bituminozni vapnenac). Nastaje kao posljedica taloženja vapnenačkih kućica i skeleta davno izumrlih organizama u vodenom okolišu (većinom u moru, a rjeđe u jezerima i rijekama). Najvažniji čimbenici koji reguliraju taloženje vapnenaca su temperatura, salinitet, sedimentacija terigenih siciklastita i dubina vode. Vapnenci mogu biti bijele boje, i tada govorimo o čistim vapnencima, ili se kretati u rasponu boja od crvenkastih do žućkastih zbog oksida i hidroksida željeza. Sivi vapnenci postaju zbog primjesa ugljenite tvari, a zbog primjesa bitumena su smeđi. Vapnenačke stijene su veoma zastupljene u Hrvatskoj i važan su izvor građevinskog materijala. U građevinskom smislu, preradom vapnenačke stijene dobivamo vapno koje služi kao vezivni materijal. Gledano u ekonomskom smislu, vapnenci su važni jer sadrže približno polovicu svjetskih rezervi nafte (rezervoarski kapacitet), te su u njima smještene neka sulfidna ležišta olova i cinka, a koriste se i u razne kemijske i industrijske svrhe (Predavanje iz Primjenjene geologije 2, Geotehnički fakultet Varaždin).

### **6.2. Prikupljanje i priprema uzoraka**

Blokovi za ispitivanje prikupljeni su na dvije lokacije na mjestu zasjeka lokalne prometnice u naselju Križišće (slika 8.). Kod odabira ispitnog bloka za jednoosnu tlačnu čvrstoću, pazilo se da nema izraženijih diskontinuiteta, te da je što pravilniji s dovoljno velikim volumenom kako bi se prilikom bušenja moglo dobiti što više uzorka. Uzorci za PLT ispitivanje ne prolaze obradu stoga je poželjno da budu što pravilniji, preporučenih odnosa dimenzija za ispitivanje nepravilnih uzoraka L i W.



Slika 8: Prikaz područja prikupljenih ispitnih uzorka (slika desno gore: lokacija 1, slika desno dolje: lokacija 2)

Vapnenac na lokaciji 1 predstavlja trošnju stijensku masu svjetlo smeđe boje s umjereno žuto-smeđom bojom (light brown, moderate yellowish brown) prema Munsell ljestvici boja za stijensku masu (slika 9.). Na lokaciji 1 bilo je prisutno puno više blokova koji su odlomljeni od matične stijene, a koji su se mogli uzeti za dobivanje uzoraka za ispitivanje u preši za stijene.



a)



b)

c)

Slika 9: Vapnenci s lokacije 1: a) Munsell ljestvica boja za lokaciju 1, b) stijena ispitana na terenu geološkim i Schmidtovim čekićem, c) odlomci vapnenca korišteni u PLT ispitivanju.

Vapnenac na lokaciji 2 predstavlja manje trošnu (svježiju) stijensku masu ružičasto-sive boje s površinski mjestimičnom sivkasto narančastom bojom (pinkish gray, grayish orange) prema Munsell ljestvici boja za stijensku masu (slika 10.). Iako je stijenska masa na ovoj lokaciji manje trošna, ispresijecana je brojnim diskontinuitetima. Na lokaciji 2 bilo je nešto teže pronaći blokove koji su odvojeni od stijenske mase i nalaze se u podnožju pokosa.



a)





b)

c)

Slika 10: Vapnenci s lokacije 2: a) Munsell ljestvica boja za lokaciju 2, b) stijena na kojoj je provedeno ispitivanje Schmidtovim i geološkim čekićem na terenu, c) odlomci vapnenca korišteni u PLT ispitivanju

Ispitni uzorci dopremaju se u laboratorij, te prolaze faze obrade, odnosno pripreme za postupak ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće. Kako bi se dobio željeni uzorak, treba provesti bušenje, ako je uzorak nakon bušenja predugačak provodi se piljenje (u ovom slučaju ovaj korak nije bilo potrebno provesti) i na kraju brušenje, odnosno završnu obradu (slika 11.).



a)



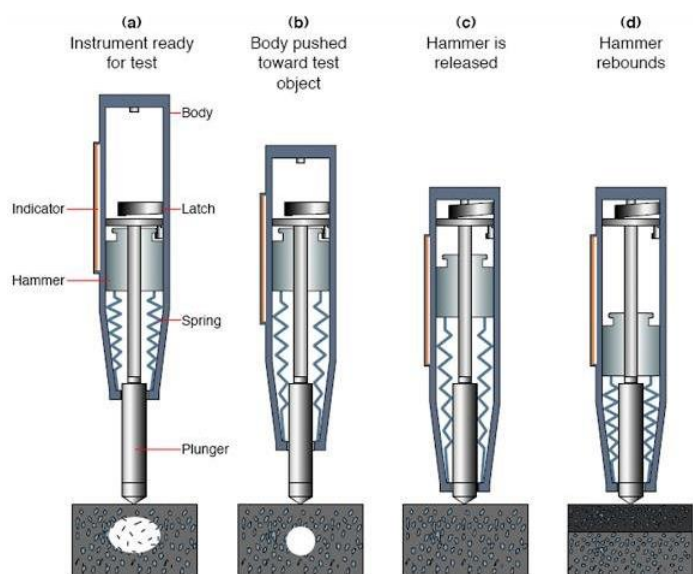
b)

Slika 11: Priprema ispitnog uzorka u laboratoriju: a) bušenje uzorka, b) brušenje uzorka

### 6.3.Schmidtov čekić

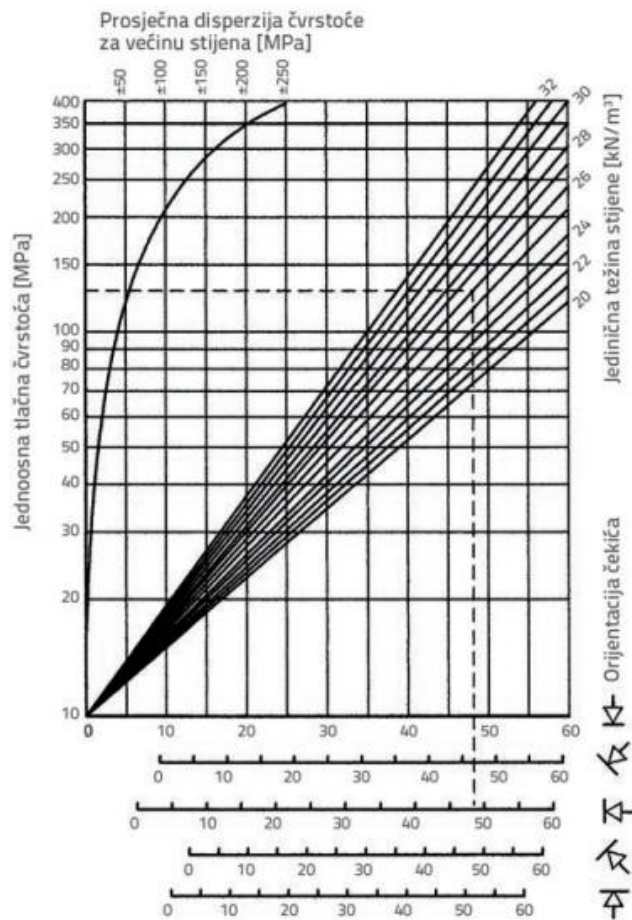
Schmidtov čekić je uređaj koji se koristi za određivanje čvrstoće stijenske mase *in situ*. Glavni dio uređaja je čelični udarni klip, koji se nakon udara u stijenu odbija i vraća u određen položaj (slika 12.). Vrijednost odskoka nakon udara s obzirom na njegov ishodišni položaj prije udara je mjera odskočne tvrdoće ispitivanog materijala. Uzorci se moraju

ispitivati na krutoj podlozi kako ne bi došlo do pomicanja prilikom udarca klipa u stijenu. Odkoci se mjere u rasponu od 10 do 60 MPa, ali postoje i iznimke.



Slika 12: Shema rada Schmidt-ovog čekića (<http://www.engineersdaily.com/2011/04/rebound-hammer-test.html>)

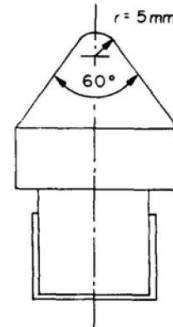
Potrebno je napraviti najmanje 20 ispitivanja po svakom uzorku materijala, pri čemu se svako novo mjesto udara pomakne najmanje za vrijednost promjera čeličnog udarnog klipa. Ako se sumnja na varijacije u rezultatima zbog geometrijske nepravilnosti, deset nižih očitavanja se odbaci, a za ostalih deset rezultata se odredi prosječna vrijednost čime dobivamo Schmidt-ovu čvrstoću. S tom vrijednošću ulazimo u dijagram jednoosna tlačna čvrstoća-jedinična težina stijene, i dobivamo vrijednost tlačne čvrstoće diskontinuiteta (slika 13.). Prednost ovog uređaja je što je prenosiv pa ga možemo koristiti na terenu i u laboratoriju, te u vrlo kratkom roku možemo izvesti veći broj ispitivanja. Međutim, dobiveni rezultati se odnose samo na površinski sloj (do 30 mm dubine), te je test dosta nepouzdan.



Slika 13: Procjena tlačne čvrstoće stijenci diskontinuiteta temeljem ispitivanja Schmidt-ovim čekićem

#### 6.4. Čvrstoća u točki- Point load test (PLT)

Pokus opterećenja u točki (PLT), kao i Schmidt-ov test, indeksni je pokus za klasificiranje stijena prema čvrstoći, a može poslužiti i za procjenu ostalih veličina s kojima je u koleraciji, npr. jednoosna tlačna i vlačna čvrstoća. Uređaj se sastoji od dijela za nanošenje opterećenja, koji se sastoji od dva konusna šiljaka (pod kutem od 60°), te uređaja za mjerenje sile pri kojoj se dogodio slom (slika 14.).



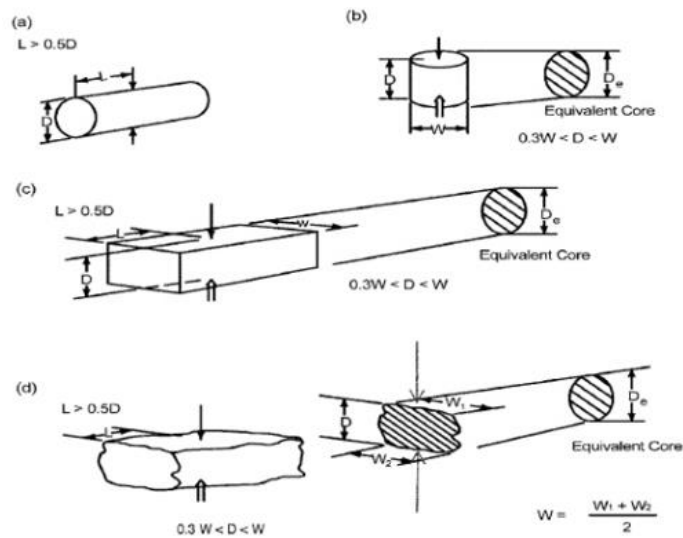
Slika 14: PLT uređaj iz geotehničkog laboratorija Građevinskog fakulteta Rijeka

Test se provodi na uzorcima pravilnih ili nepravilnih oblika, uz minimalnu pripremu istih. Prije ispitivanja potrebno je provjeriti jesu li dimenzije uzorka zadovoljavajuće za provođenje testa. Raspon dimenzija nepravilnih uzorka trebao bi biti od 50 mm do  $\pm 85$  mm, a najpoželjnije 50 mm. Dimenzija L uzorka (duljina) trebala bi biti barem  $0.5W$  (visina). Uzorak stijene se tlači između konusnih čeličnih ploča koje preko šiljaka prenose opterećenje na uzorak. Do sloma bi trebalo doći u periodu od 10 - 60 sekundi. U tom trenutku se očita sila pod kojom se slom dogodio i zabilježe se dimenzije uzorka (slika 15.). Prethodno je bitno dobro centrirati uzorak kako ne bi iskliznuo tijekom nanošenja opterećenja.



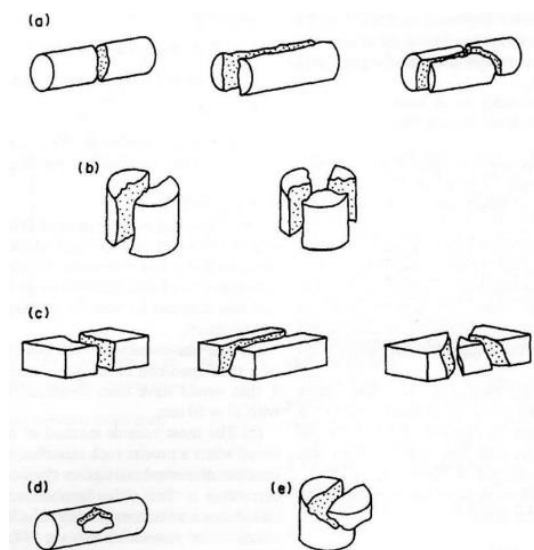
Slika 15: Nanošenje sile na uzorak i mjerenje dimenzija uzorka nakon sloma

Ispitivanjem se određuje indeks čvrstoće  $I_{s(50)}$  i indeks anizotropije  $I_{a(50)}$  stijenskog materijala. Prema obliku ispitnog uzorka, pokus može biti: dijametralni, aksijalni, prizmatični te pokus na uzorku nepravilnog oblika (slika 16.).



Slika 16: Oblik uzorka za: (a) dijametralni pokus, (b) aksijalni pokus, (c) prizmatični pokus, (d) pokus na nepravilnom oblika (ISRM, 1983.)

Valjanost pokusa se ocjenjuje na temelju oblika sloma uzorka. U nekim slučajevima zbog nehomogenosti uzorka može doći do nepravilnog loma, te se taj uzorak smatra nevažecim. Slika 17. prikazuje oblike pravilnog i nepravilnog sloma uzorka. Ako je do sloma došlo na način: (a) za poprečno ispitivanje valjkastog uzorka, (b) za osno ispitivanje valjkastog uzorka, (c) za ispitivanje na blokovima, pokus se smatra važecim. Ako se uzorak slomio na način: (d) slom dijela jezgre, (e) slom za osno ispitivanje, pokus se smatra nevažecim te se odbacuje.



Slika 17: Pravilni pokus: (a), (b), (c), nepravilni pokus: (c), (d) (ISRM, 1983.)

Nekorigirana čvrstoća u točki računa se prema izrazu:

$$I_S = \frac{P}{D_e^2} \text{ [MPa]} \quad (4)$$

Gdje je:

P- sila sloma [N]

$D_e$ - ekvivalentan promjer jezge [mm], pri čemu vrijedi:

$D_e^2 = D^2$  [mm<sup>2</sup>]- za dijametralni test

$D_e^2 = \frac{4 \cdot A}{\pi}$  [mm<sup>2</sup>]- za aksijalni test

A=W\*D- minimalna površina poprečnog presjeka u ravnini kroz kontaktne točke šiljaka

Ako se ispitivanje provodi na uzorcima čiji efektivni promjeri ne iznose 50 mm, uvodi se korekcijski faktor F prema formuli:

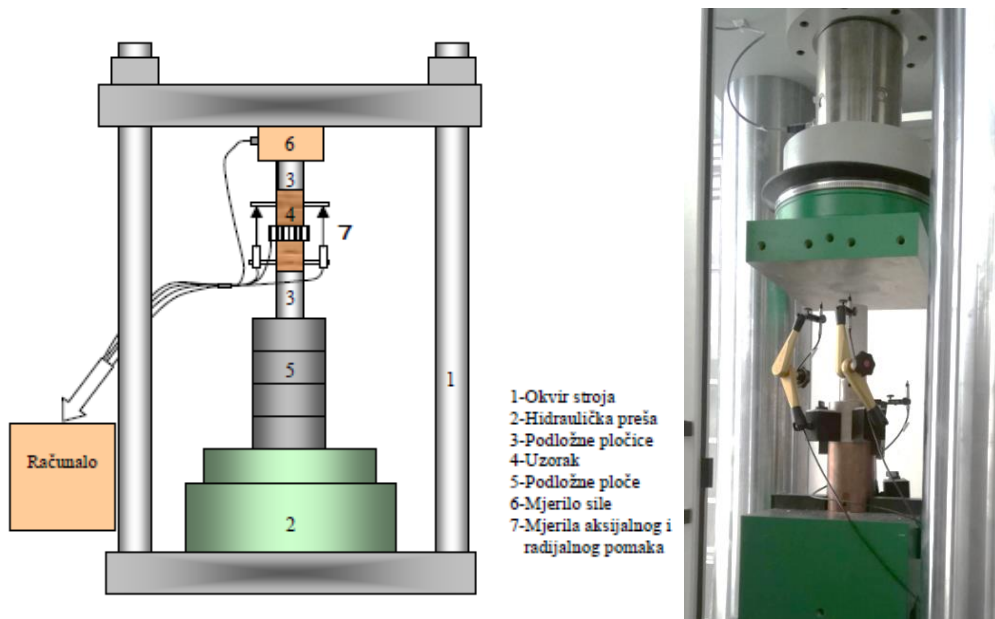
$$F = \left(\frac{D_e}{50}\right)^{0,45} \quad (5)$$

Jednoosna tlačna čvrstoća se određuje iz izraza:

$$\sigma = 22 * I_{s(50)} \text{ [MPa]} \quad (6)$$

### 6.5. Jednoosno tlačno ispitivanje

Jednoosno tlačno ispitivanje namijenjeno je mjerenju aksijalne tlačne čvrstoće stijene na pravilnom geometrijskom uzorku, a koristi za klasifikaciju čvrstoće i karakterizaciju intaktne stijene. Ispitivanje se provodi na uzorcima cilindričnog oblika, preporučenog omjera visina/ promjer između 2,5 – 3 (ISRM, 1977.). Zbog postizanja ravnomjerne raspodjele opterećenja postoje visoki zahtjevi za ravnost površine uzorka. Kako bi se sačuvala prirodna vlažnost, uzorci ne bi trebali biti stariji od 30 dana. Shema uređaja za ispitivanje prikazan je slikom 18. Komunikacija s kontrolnom jedinicom vrši se pomoću posebnog softera na računalu spojenog na kontroler.



Slika 18: Shema uređaja za jednoosno ispitivanje (Vrkljan, 2013) i hidraulička preša za ispitivanje stijene u geotehničkom laboratoriju Građevinskog fakulteta Rijeka

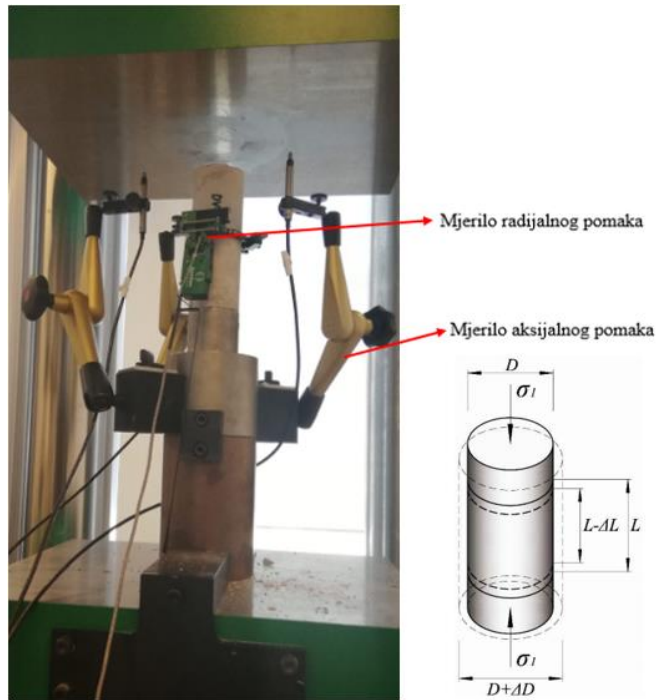
Pokus se može provoditi na dva načina:

1. Pokus s kontroliranom deformacijom
  - Unaprijed definiramo brzinu prirasta deformacije (pomaka) u vremenu, a mjerimo naprezanje (silu).
2. Pokus s kontroliranim naprezanjem
  - Unaprijed definiramo brzinu prirasta naprezanja (silu), a mjerimo prirast deformacija (pomaka) u vremenu.

Prirast deformacije i naprezanja trebao bi biti konstantan, tako da do sloma uzorka dođe unutar 5 do 10 minuta. Norme za određivanje jednoosne tlačne čvrstoće intaktnih uzoraka stijena (ASTM, ISRM) definiraju prirast naprezanja u rasponu od 0,5 do 1 MPa/s.

Skraćenje visine uzorka ( $\Delta L$ ) mjereno je korištenjem tri mjerila aksijalnih pomaka. Aksijalna deformacija dobivena je iz srednje vrijednosti pomaka zabilježenih pomaka tijekom pokusa. Nosači mjere promjenu duljine mjerene baze, a ne promjenu visine uzorka. Radijalna deformacija, odnosno promjena promjera uzorka ( $\Delta D$ ), mjeri se na polovici visine uzorka mjerilom radijalnog pomaka (slika 19.).





Slika 19: Mjerilo radijalnog pomaka i mjerilo aksijalnog (3 mjerila) pomaka, pričvršćeni na uzorak i prikaz deformacije uzorka za jednoosno naprezanje

Aksijalna deformacija računa se prema izrazu:

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (4)$$

Gdje je:

$\Delta L$ - promjena mjenog aksijalnog pomaka (definirano pozitivno za smanjenje duljine uzorka)

$L_0$ - početna aksijalna duljina (visina) uzorka

Radijalna deformacija određena je izrazom:

$$\varepsilon_d = \frac{\Delta D}{D_0} \quad (5)$$

Gdje je:

$\Delta D$ - promjena promjera uzorka (promjena radijalnog pomaka)

$D_0$ - početni promjer uzorka

Tlačno naprezanje uzorka dobiva se dijeljenjem tlačne sile  $F$  na uzorak, s početnom površinom poprečnog presjeka uzorka  $A_0$ :

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (6)$$

## 7. REZULTATI ISPITIVANJA

### 7.1. Terenska identifikacija

Terenska identifikacija provodila se geološkim i Schmidt-ovim čekićem na dvije lokacije vapnenca različite trošnosti, prethodno prikazane slikom 8. Rezultati ispitivanja geološkim čekićem prikazani su tablicom 5. Na obje lokacije stijena se opisuje kao čvrsta stijena, kojoj je potreban više nego jedan udarac geološkoga čekića da bi se uzorak raspuknuo.

Tablica 5: Terenska identifikacija geološkim čekićem

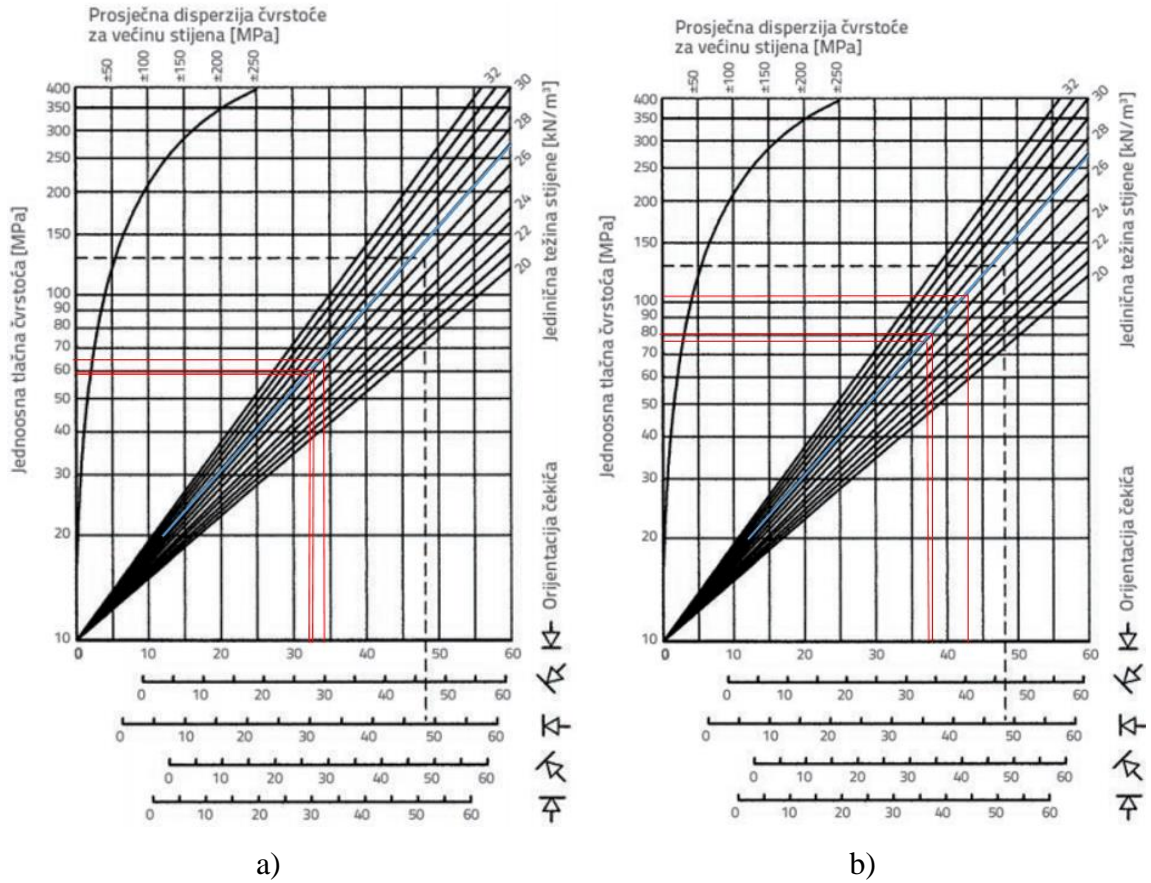
Grupa	Opis	Terenska identifikacija	Jednoosna tlačna čvrstoća (MPa)
R4	Čvrsta stijena	Potreban više nego jedan udarac geološkoga čekića da bi se uzorak raspuknuo	50-100

Rezultati Schmidt-ovim čekićem prikazani su tablicom 6. Za lokaciju 1 mjerenje se provodilo na pokosu, odlomljenom većem bloku, te na bloku uzetom za ispitivanje jednoosne tlačne čvrstoće. Za lokaciju 2 mjerenje se provodilo na odlomljenom većem bloku, jako raspucalom dijelu pokosa, te na bloku uzetom za provođenje ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće.

Tablica 6: Terensko ispitivanje Schmidt-ovim čekićem

Lokacija 1												
MJESTO ISPITIVANJA	OČITANJE SCHMIDT-OVIM ČEKIĆEM										PROSJEČNA VRIJEDNOST	JEDNOOSNA TLAČNA ČVRSTOĆA (MPa)
Blok	30	30	31	32	32	32	32	34	36	36	32,5	60
Pokos	28	28	30	32	32	34	34	40	42	42	34,2	65
Uzorak	28	28	30	30	32	32	33	33	36	38	32	59,5
Prosječna vrijednost jednoosne tlačne čvrstoće												61,5
Lokacija 2												
MJESTO ISPITIVANJA	OČITANJE SCHMIDT-OVIM ČEKIĆEM										PROSJEČNA VRIJEDNOST	JEDNOOSNA TLAČNA ČVRSTOĆA (MPa)
Blok	32	36	36	36	38	38	38	40	42	42	37,8	80
Znatno raspucali pokos	28	30	30	30	36	38	40	42	44	48	36,6	78,5
Uzorak	38	40	42	42	42	42	44	46	47	50	43,3	105
Prosječna vrijednost jednoosne tlačne čvrstoće												87,83

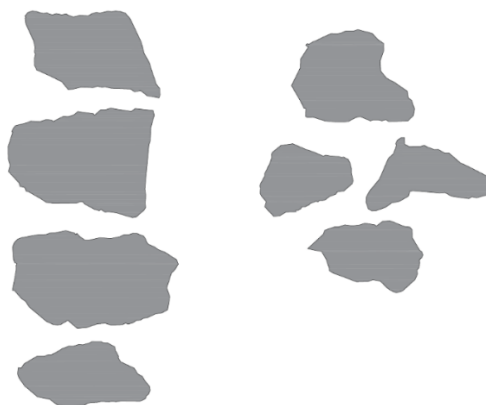
Uzimajući u obzir jediničnu težinu stijene od  $27 \text{ kN/m}^3$  i prethodno dobivenih prosječnih vrijednosti, očitamo vrijednost jednoosne tlačne čvrstoće dobivene Schmid-tovim čekićem (slika 20.).



Slika 20: Dijagram za određivanje jednoosne tlačne čvrstoće: a) lokacija 1, b) lokacija 2

## 7.2. Čvrstoća opterećenjem u točki- Point load test (PLT)

Laboratorijsko određivanje jednoosne tlačne čvrstoće provedeno je pokusom opterećenjem u točki (PLT) i jednoosnim tlačnim ispitivanjem u preši. Kako bi odredili realnije vrijednosti čvrstoće za PLT test, provedene su dvije obrade podataka. Prva je dobivena mjerenjem dimenzija uzorka (prosječne duljine i visine uzorka) i približnim izračunom površine presjeka nakon sloma (tablica 7.), a druga, koja daje točne rezultate površine sloma uzorka (tablica 8.), dobivena je crtanjem plohe sloma na papiru te skeniranjem i prebacivanjem u digitalni oblik (slika 21.).



Slika 21: Digitalni oblik plohe sloma

Tablica 7: Obrada podataka dobivenih mjerenjem plohe sloma

W (mm)	D (mm)	A (mm <sup>2</sup> )	P (N)	De <sup>2</sup> (mm <sup>2</sup> )	De (mm)	Is (MPa)	F	Is(50)	σ (MPa)	
57,64	47,71	2750,00	10090	3501,41	59,17	2,88	1,08	3,11	68,39	1. LOKACIJA
95,54	45,33	4330,83	13240	5514,18	74,26	2,40	1,19	2,87	63,11	
49,15	45,85	2253,53	9800	2869,28	53,57	3,42	1,03	3,52	77,51	
65,16	61,51	4007,99	13720	5103,13	71,44	2,69	1,17	3,16	69,45	
104,15	39,77	4142,05	14220	5273,82	72,62	2,70	1,18	3,19	70,17	
63,49	49,02	3112,28	7330	3962,68	62,95	1,85	1,11	2,05	45,14	
84,71	76,44	6475,23	15380	8244,52	90,80	1,87	1,31	2,44	53,68	
59,79	49,2	2941,67	6460	3745,45	61,20	1,72	1,10	1,89	41,56	
50,93	59,36	3023,20	11960	3849,26	62,04	3,11	1,10	3,42	75,33	
79,79	62,21	4963,74	2380	6320,02	79,50	0,38	1,23	0,46	10,21	
98,52	53,77	5297,42	1000	6744,89	82,13	0,15	1,25	0,19	4,08	
166,08	56,3	9350,30	20200	11905,18	109,11	1,70	1,42	2,41	53,03	2. LOKACIJA
98,42	40,45	3981,09	8750	5068,88	71,20	1,73	1,17	2,02	44,52	
61,04	41,68	2544,15	12310	3239,31	56,91	3,80	1,06	4,03	88,62	
104,24	54,39	5669,61	2820	7218,78	84,96	0,39	1,27	0,50	10,91	
115,69	58,78	6800,26	6960	8658,36	93,05	0,80	1,32	1,06	23,39	
44,22	39,82	1760,84	7840	2241,97	47,35	3,50	0,98	3,41	75,07	
76,78	48,94	3757,61	14020	4784,34	69,17	2,93	1,16	3,39	74,61	
96,74	64,2	6210,71	16980	7907,72	88,93	2,15	1,30	2,78	61,21	
107,82	58,74	6333,35	21760	8063,87	89,80	2,70	1,30	3,51	77,26	
88,45	40,83	3611,41	12570	4598,19	67,81	2,73	1,15	3,14	68,98	
67,09	49,18	3299,49	13500	4201,04	64,82	3,21	1,12	3,61	79,45	
96,57	66,65	6436,39	18330	8195,07	90,53	2,24	1,31	2,92	64,28	

Tablica 8: Obrada podataka dobivenih digitalnim oblikom

A (mm <sup>2</sup> )	P (N)	De <sup>2</sup> (mm <sup>2</sup> )	De (mm)	I <sub>s</sub> (MPa)	F	I <sub>s(50)</sub>	σ (MPa)	
2300	10090	2928,45	54,12	3,45	1,04	3,57	78,55	1. LOKACIJA
4300	13240	5474,93	73,99	2,42	1,19	2,88	63,46	
2400	9800	3055,77	55,28	3,21	1,05	3,36	73,81	
3700	13720	4710,99	68,64	2,91	1,15	3,36	73,89	
4300	14220	5474,93	73,99	2,60	1,19	3,10	68,16	
2500	7330	3183,10	56,42	2,30	1,06	2,43	53,49	
4700	15380	5984,23	77,36	2,57	1,22	3,13	68,81	
2800	6460	3565,07	59,71	1,81	1,08	1,96	43,18	
4000	11960	5092,96	71,36	2,35	1,17	2,76	60,63	
4700	2380	5984,23	77,36	0,40	1,22	0,48	10,65	
6400	1000	8148,73	90,27	0,12	1,30	0,16	3,52	
10400	20200	13241,69	115,07	1,53	1,46	2,22	48,84	
3300	8750	4201,69	64,82	2,08	1,12	2,34	51,49	2. LOKACIJA
2900	12310	3692,39	60,77	3,33	1,09	3,64	80,07	
4300	2820	5474,93	73,99	0,52	1,19	0,61	13,52	
4900	6960	6238,87	78,99	1,12	1,23	1,37	30,15	
1800	7840	2291,83	47,87	3,42	0,98	3,35	73,80	
3800	14020	4838,31	69,56	2,90	1,16	3,36	73,96	
5700	16980	7257,47	85,19	2,34	1,27	2,97	65,42	
5900	21760	7512,11	86,67	2,90	1,28	3,71	81,63	
2800	12570	3565,07	59,71	3,53	1,08	3,82	84,02	
2600	13500	3310,42	57,54	4,08	1,07	4,34	95,57	
4600	18330	5856,90	76,53	3,13	1,21	3,79	83,39	

Prilikom izračuna jednoosne tlačne čvrstoće, najmanja i najveća vrijednost se odbace, a za preostale se računa prosječna vrijednost čvrstoće.

Prosječna vrijednost jednoosne tlačne čvrstoće za lokaciju 1 temeljem ručnog mjerenja dimenzija plohe sloma iznosi 45,18 MPa, dok putem digitalne obrade i izračuna površine dobiva se vrijednost od 46,92 MPa. Za lokaciju 2 jednoosna tlačna čvrstoća ručnim mjerenjem iznosi 51,82 MPa, dok digitalna obrada daje vrijednost od 56,06 MPa.



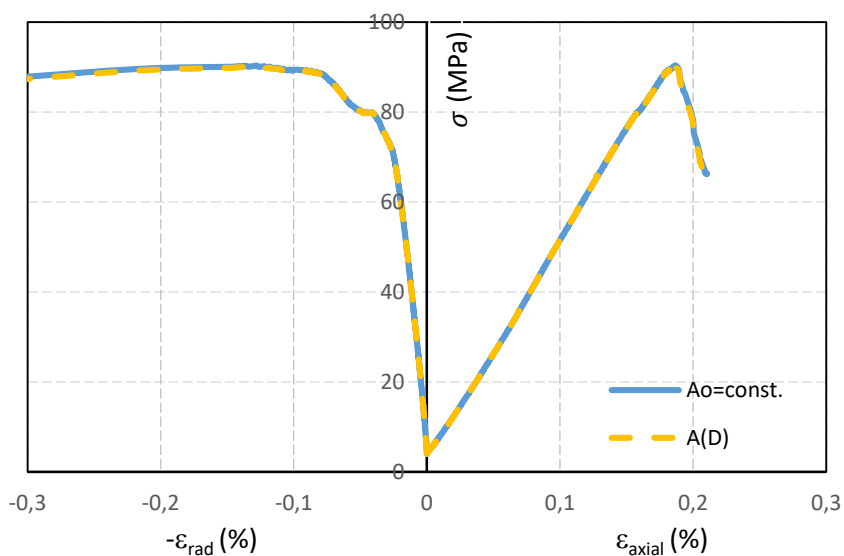
Slika 22: Odabrani uzorci nakon sloma prilikom PLT ispitivanja

### 7.3. Jednoosno tlačno ispitivanje u preši za stijene

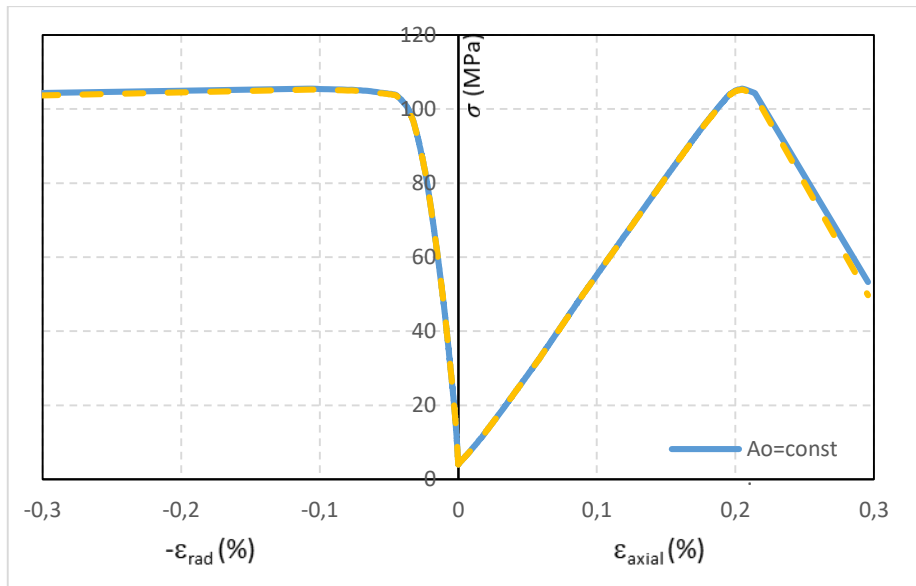
Jednoosno tlačno ispitivanje provedeno je na dva uzorka vapnenca s lokacije 2. Za lokaciju 1 (trošnji vapnenac), nije provedeno ispitivanje. Tablicom 9. i slikom 23. i prikazani su rezultati ispitivanja sa ( $A(D)$ ) i bez ( $A_0=const.$ ) uzimanja u obzir promjene površine uzorka tijekom pokusa. Slika 24. prikazuje uzorke 1 i 2 nakon ispitivanja u preši.

Tablica 9: Rezultati ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće

Uzorak	Promjer	Visina	Površina	Vršno naprezanje ( $A_0=const.$ )	Vršno naprezanje ( $A(D)$ )	Modul elastičnosti (MPa)	Poissonov koeficijent
1	56,2	153	2477,7	90,37	90,14	50,2	0,19
2	56,3	153	2486,5	105,49	105,27	53,5	0,16
Prosječna vrijednost vršnog naprezanja ( $A_0=const.$ )				97,93			
Prosječna vrijednost vršnog naprezanja ( $A(D)$ )				97,70			
Prosječna vrijednost modula elastičnosti						51,85	
Prosječna vrijednost Poissonovog koeficijent						0,18	



a)



b)

Slika 23: Naponsko deformacijska krivulja pri jednoosnom tlačenju: a) uzorak 1, b) uzorak 2



Slika 24: Uzorci 1 i 2 nakon jednoosnog tlačnog ispitivanja u preši

## 8. DISKUSIJA I ZAKLJUČAK

Nakon provedenih ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće na uzorcima vapnenaca s lokacije Križišće (Vinodolska dolina), tablicom 10. su prikazane prosječne vrijednosti jednoosne tlačne čvrstoće za svako pojedino ispitivanje.

Tablica 10: Rezultati ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće

Vrsta ispitivanja		Jednoosna tlačna čvrstoća (MPa)
Geološki čekić	Lokacija 1	50-100
	Lokacija 2	
Schmidt-ov čekić	Lokacija 1	61,5
	Lokacija 2	87,83
PLT test	Lokacija 1	46,92
	Lokacija 2	56,06
Preša za stijene	Lokacija 1	Nije provedeno ispitivanje
	Lokacija 2	97,70

Ako usporedimo rezultate ispitivanja, vrijednosti jednoosne tlačne čvrstoće za pojedine lokacije i metode su približno slične. Prednost ispitivanja Schmidt-ovim čekićem je u njegovoj jednostavnosti za rukovanje i brzom načinu ispitivanja, no podaci nisu toliko pouzdani zbog toga što ovise o kutu pod kojim se ispituje, osobnom iskustvu prilikom ispitivanja, te se rezultati odnose samo na površinski sloj ( $< 30$  mm dubine). Provođenje PLT testa također je jednostavno, no i tu veliku ulogu ima razina osobnog iskustva prilikom nanošenja brzine opterećenja. Iz više razloga ispitivanje jednoosne tlačne čvrstoće prešom za stijene je najpouzdanije. Uzorak je unaprijed obrađen, te se sustavu zada konstantno jednako nanošenje opterećenja. Jedna od prednosti ispitivanja u preši je i mogućnost dobivanja modula deformabilnosti (elastičnosti) i Poissonovog koeficijenta u odnosu na ostale indeksne pokuse. No, skupa oprema, duže trajanja ispitivanja, potrebna priprema uzorka i potreba za kvalificiranim osobljem čine ovo ispitivanje skupim te se treba opravdat njegovo provođenje.

Zanimljivo je usporediti dva načina obrade podataka kod PLT testa i preše za stijene.

PLT test na temelju ručnog mjerenja plohe sloma pokazao je manje vrijednosti jednoosne tlačne (razlika do 5 MPa) čvrstoće u usporedbi s digitalnom obradom podataka. Ustanovljena je zanemariva razlika u rezultatima čvrstoće dobivenih u preši sa i bez korekcije površine iz mjerenih radijalnih pomaka (manja od 1 MPa), što sugerira da je pri obradi podataka dovoljno koristiti odnos sile i početne površine uzorka ( $A_0$ ).



## LITERATURA

- Arbanas, Ž., *Opservacijske metode pri projektiranju i izvođenju građevnih jama u stijenskoj masi u urbanim sredinama*, Geotehnika, Društvo za geotehniku u Bosni i Hercegovini, 2015.
- ASTM, *Standard test method for determination of the point load strength index of rock*, Designation: D 5731-95.
- Bieniawski Z. T., *Engineering rock mechanics classifications*, John Wiley & Sons, p.251. 1989.
- Briševac Z., Hrženjak P., Buljan R, *Modeli za procjenu jednoosne tlačne čvrstoće i modula elastičnosti*, Građevinar, 2016.
- Čedomir B., *Izmjene i dopune plana prostornog uređenja općine Vinodolske*, Rijeka, 2008.
- Dugonjić Jovančević S., *Skripta Inženjerska mehanika stijena*, Građevinski fakultet, Rijeka 2017.
- Gašparović, D.: *Osnovne značajke Vinodola (1)*, <http://www.crikva.hr/osnovne-znacajke-vinodola-1/630> ožujak, 2019.
- Harrison, J.P. & Hudson, J.A. *Engineering rock mechanics*, Pergamon, Kidlington, 2000.
- Hoek E., *Strength of rock and rock masses*, News Journal ISRM, 1994. <file:///C:/Users/ZG/Downloads/Jointedrockmass.pdf>, ožujak 2019.
- Horbat, M. King i dr., *Mohs hardness scale*, <https://geology.com/minerals/mohs-hardness-scale.shtml>, ožujak, 2019.
- ISRM, Co-ordinators: Fairhurst C.E., Hudson J.A., *Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials*, International journal of rock mechanics and mining science, 36, 279-289, Pergamon.
- Kovačević, I. i dr, *Određivanje modula deformacije karbonatnih stijena u hrvatskom kršu*, Građevinar, 2010.
- Laboratorijski istražni radovi*, Predavanja iz kolegija Geotehničko inženjerstvo, Građevinski fakultet sveučilišta u Zagrebu.
- Miščević, P. *Inženjerska mehanika stijena*, Sveučilište u Splitu, Split, 2015.
- Mohr-Coulomb plasticity*, <https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAEMATRefMap/simamat-c-mohrcoulomb.htm>, ožujak, 2019.
- Mohs hardness scale*, <http://www.geologypage.com/2016/04/mohs-hardness-scale.html>, ožujak, 2019.

*Sedimenti*, file:///H:/3.GODINA/sedimenti[5].pdf, travanj, 2019.

Vrkljan I., Skripta *Inženjerska mehanika stijena*, Građevinski fakultet, Rijeka, 2013.