

# Određivanje jednoosne tlačne čvrstoće uzoraka stijene s lokacije LNG terminala u Omišlju

---

**Vučinović, Iva**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2023**

*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:157:045750>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-09**



*Repository / Repozitorij:*

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



**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Iva Vučinović**

**Određivanje jednoosne tlačne čvrstoće uzoraka stijene s lokacije LNG  
terminala u Omišlju**

**Diplomski rad**

**Rijeka, 2023.**

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Sveučilišni diplomski studij građevinarstva  
Urbano inženjerstvo  
Inženjerska mehanika stijena**

**Iva Vučinović  
JMBAG: 0114029765**

**Određivanje jednoosne tlačne čvrstoće uzoraka stijene s lokacije LNG  
terminala u Omišlju**

**Diplomski rad**

**Rijeka, rujan 2023.**

Zavod: **Zavod za hidrotehniku i geotehniku**  
Predmet: **Inženjerska mehanika stijena**  
Grana: **2.05.01 geotehnika**

## **DIPLOMSKI ZADATAK br.**

Pristupnik: **Iva Vučinović (0114029765)**  
Studij: **Građevinarstvo**  
Modul: **Urbano inženjerstvo**

Zadatak: **Određivanje jednoosne tlačne čvrstoće uzoraka stijene s lokacije LNG terminala u Omišlju**

### Opis zadatka:

U radu će se dati pregled najvažnijih svojstava intaktne stijene s posebnim naglaskom na svojstvo jednoosne tlačne čvrstoće. Prokázat će se najčešći postupci koji se koriste u određivanju jednoosne tlačne čvrstoće i dati detaljan postupak određivanja ovog parametra u Point Load Test (PLT) ispitivanju. U konačnici provest će se ispitivanje jednoosne tlačne čvrstoće opterećenjem u točki pomoću uređaja za PLT ispitivanje u Laboratoriju za geotehniku Građevinskog fakulteta u Rijeci. Provest će se dijametralno, aksijalno i ispitivanje nepravilnih uzoraka na uzorcima vapnenaca s lokacije LNG terminala u Omišlju na otoku Krku te prikazati dobivene rezultate u usporedbi s drugim prethodnim ispitivanjima i provedenim istražnim radovima na lokaciji.

Zadatak uručen pristupniku: 6. ožujka 2023.

Rok za predaju rada: 15. rujna 2023.

Mentor: Izv. prof. dr. sc. Sanja Dugonjić  
Jovančević

Komentor: Doc. dr. sc. Josip Peranić

Rijeka, 18 September 2023

## MASTER THESIS ASSIGNMENT No.

Student: **Iva Vučinović (0114029765)**  
Study: Civil Engineering  
Module: Urban Engineering

Title: **Determination of the uniaxial compressive strength of rock samples from the LNG terminal in Omišalj**

### Description:

The thesis will give an overview of the most important properties of intact rock with special emphasis on the property of uniaxial compressive strength. The most common procedures used in determining the uniaxial compressive strength will be demonstrated and a detailed procedure for determining this parameter in the Point Load Test (PLT) test will be given. Ultimately, the uniaxial compressive strength test will be performed by point loading using a PLT test device in the Geotechnical Laboratory of the Faculty of Civil Engineering in Rijeka. Diametral, axial and irregular samples will be tested on limestone samples from the location of the LNG terminal in Omišlja on the island of Krk, and the results obtained will be presented in comparison with other previous tests and investigations works carried out at the location.

Issue date: 6 March 2023  
Submission date: 15 September 2023

Mentor:

mentor:

---

Associate Professor Sanja Dugonjić  
Jovančević, PhD

---

Assistant Professor Josip Peranić, PhD  
(co-mentor)

## **IZJAVA**

Diplomski rad izradila sam samostalno, u suradnji s mentoricom i komentorom, 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.

---

Iva Vučinović

U Rijeci, 18.09.2023.

## **Određivanje jednoosne tlačne čvrstoće uzoraka stijene s lokacije LNG terminala u Omišlju**

### **SAŽETAK**

Jednoosna tlačna čvrstoća je jedno od bazičnih i najvažnijih mehaničkih svojstava stijene u mehanici stijena kao glavni indikator sposobnosti stijene da podnese tlačna opterećenja do trenutka sloma. Poznavanje jednoosne tlačne čvrstoće intaktne stijene može također biti dobar indikator ostalih fizikalnih i mehaničkih svojstava. Procjena se može vršiti *in situ* i u laboratoriju. Terenskim ispitivanjima se podrazumijeva inženjerska procjena te utiskivanje i urezivanje same stijene noktom, palcem ili geološkim čekićem, ali i ispitivanje Schmidtovim čekićem. Pod laboratorijsko ispitivanje spadaju Point load test ispitivanje te jednoosni pokus i pokus tlačnog opterećenja u preši za stijene. U ovome radu će se dati pregled najvažnijih svojstva koja karakteriziraju intaktnu stijenu s fokusom na jednoosnoj tlačnoj čvrstoći intaktne stijene. U konačnici provest će se ispitivanje jednoosne tlačne čvrstoće opterećenjem u točki pomoću uređaja za Point load test ispitivanje u Laboratoriju za geotehniku Građevinskog fakulteta u Rijeci. Provest će se dijametralno, aksijalno i ispitivanje nepravilnih uzoraka na uzorcima vapnenaca sa lokacije LNG terminala u Omišlju na otoku Krku te prikazati dobivene rezultate u usporedbi s drugim prethodno provedenim ispitivanjima.

**KLJUČNE RIJEČI:** jednoosna tlačna čvrstoća, Point load test, Schmidtov čekić, LNG terminal Krk

## **Determination of the Uniaxial Compressive Strength of Rock Samples from the Location of LNG Terminal in Omišalj**

### **ABSTRACT**

Uniaxial compressive strength is the basic and most important mechanical property of rock in rock mechanics and it is also the main indicator of the rock's ability to withstand compressive loads until the moment of failure. Knowing the uniaxial compressive strength of intact rock can also be a good indicator of other physical and mechanical properties. Assessment can be done *in situ* and in the laboratory. *In situ* tests are based on an engineer's assessment, indenting and incising the rock itself with a fingernail, thumb or geological hammer, as well as testing with a Schmidt hammer. Laboratory tests include Point Load Tests and Uniaxial Tests and Compressive Rock Tests in a rock press. This paper will provide an overview of the most important properties that characterize intact rock with a focus on the uniaxial compressive strength of intact rock. Ultimately, the uniaxial compressive strength test will be conducted by a point load test device in the Geotechnical Laboratory of the Faculty of Civil Engineering in Rijeka. Diametrical, axial and irregular samples will be tested on limestone samples from the location of the LNG terminal in Omišalj on the island of Krk and the obtained results will be shown in comparison with other previously conducted tests.

**KEY WORDS:** uniaxial compressive strength, Point Load Test, Schmidt hammer, LNG terminal Krk



# SADRŽAJ

1	UVOD.....	1
2	STIJENA U INŽENJERSTVU.....	2
3	SVOJSTVA INTAKTNE STIJENE.....	6
3.1	Mehanička svojstva.....	7
3.1.1	Čvrstoća.....	7
3.1.2	Deformabilnost.....	8
3.1.3	Tvrdoća.....	10
3.1.4	Trajnost.....	11
3.1.5	Bubrenje.....	12
3.2	Fizikalna svojstva.....	12
3.2.1	Mineralni sastav.....	12
3.2.2	Struktura.....	13
3.2.3	Poroznost.....	13
3.2.4	Zapreminska težina.....	15
4	ISPITIVANJE JEDNOOSNE TLAČNE ČVRSTOĆE INTAKTNE STIJENE.....	16
4.1	Ispitivanje jednoosne tlačne čvrstoće u preši za stijene.....	16
4.2	Point Load Test.....	20
4.2.1	Dijametralni test.....	21
4.2.2	Aksijalni test.....	22
4.2.3	Test na nepravilnim uzorcima i blok test.....	23
4.2.4	Anizotropija.....	26
4.2.5	Proračun nakon provedbe PLT ispitivanja.....	27
4.3	Schmidtov čekić.....	32
4.4	Terenska procjena.....	35
5	ISPITIVANJA VAPNENACA.....	37
5.1	O vapnencima.....	37

5.2	Područje istraživanja i terenska ispitivanja .....	43
5.2.1	Lokacija LNG terminala u Omišlju.....	44
5.3	Provedba PLT ispitivanja i rezultati .....	57
5.3.1	Dijametralno ispitivanje .....	59
5.3.2	Aksijalno ispitivanje.....	62
5.3.3	Ispitivanje nepravilnih uzoraka.....	65
6	ANALIZA DOBIVENIH REZULTATA .....	69
7	ZAKLJUČAK .....	74
	LITERATURA.....	75

## POPIS SLIKA:

Slika 1: Prikaz intaktne stijene, vulkanskog tufa, na makroskopskoj razini [2] .....	2
Slika 2: Načini nastajanja diskontinuiteta [3].....	4
Slika 3: Geološki utjecaji na svojstva stijenske mase i svojstva intaktne stijene, prema [2] .....	6
Slika 4: Mjerilo cjelokupnog zahvata od intaktne stijene do stijenske mase [2] .....	8
Slika 5: Naponsko-deformacijska krivulja [4] .....	9
Slika 6: Razlika u naponsko-deformacijskim krivuljama stijena različitih deformabilnosti [4] .....	10
Slika 7: FORM+TESTs ALPHA 1-2000s preša za stijene u Laboratoriju za geotehniku Građevinskog fakulteta u Rijeci .....	16
Slika 8: Shema uređaja za jednoosno ispitivanje stijena; 1) okvir uređaja, 2) hidraulička preša, 3) podložne pločice, 4) ispitivani uzorak, 5) podložne ploče, 6) mjerilo sile, 7) mjerilo aksijalnog i radijalnog pomaka [4].....	17
Slika 9: Mjerila aksijalnog i radijalnog pomaka pričvršćena za ispitivani uzorak [4] .....	19
Slika 10: Naponsko-deformacijska krivulja sa mehaničkim parametrima [3].....	20
Slika 11: Uređaj za PLT ispitivanje u Laboratoriju za geotehniku Građevinskog fakulteta u Rijeci .....	21
Slika 12: Zahtjevi za oblike uzoraka za: a) dijametralno ispitivanje, b) aksijalno ispitivanje, c) blok ispitivanje i d) ispitivanje na uzorku nepravilnog oblika [9] .....	22
Slika 13: Konusni šiljak PLT uređaja [9].....	24
Slika 14: Mjerilo sile na PLT uređaju .....	25
Slika 15: Primjeri pravilnih lomova (a),(b) i (c) te nepravilnih lomova (d) i (e) [9] .....	26
Slika 16: Smjerovi opterećenja pri ispitivanju anizotropije [10] .....	27

Slika 17: Grafički način određivanja $I_s(50)$ od seta vrijednosti D do De, čije vrijednosti nisu 50 mm [9] .....	29
Slika 18: Dijagram faktora korekcije veličine [9] .....	30
Slika 19: Schmidtov čekić iz Laboratorija za geotehniku Građevinskog fakulteta u Rijeci ....	33
Slika 20: Procjena UCS-a na temelju odskočne tvrdoće [30] .....	35
Slika 21: Lokacija LNG terminala .....	43
Slika 22: Geodetsko iskolčenje točaka na terenu [38] .....	45
Slika 23: Uzorci ispitivane jezgre u sanduku sa oznakama bušotine i dubine [38] .....	50
Slika 24: Uzorci intaktne stijene korišteni pri izradi diplomskog rada, prije njihove pripreme za ispitivanje .....	50
Slika 25: Označavanje i iscrtavanje uzoraka .....	58
Slika 26: Nepravilni lomovi uzoraka u dijametralnom ispitivanju .....	61
Slika 27: Uzorci ispitivani dijametralnim testom nakon loma .....	62
Slika 28: Uzorci ispitivani aksijalnim testom nakon loma .....	65
Slika 29: Uzorci ispitivani testom na nepravilnim uzorcima nakon loma .....	68
Slika 30: Dijagram grafičke korekcije uzoraka - dijametralno ispitivanje .....	69
Slika 31: Dijagram grafičke korekcije uzoraka - aksijalno ispitivanje .....	70
Slika 32: Dijagram grafičke korekcije uzoraka – ispitivanje na nepravilnim uzorcima .....	71

## POPIS TABLICA:

Tablica 1: Svojstva intaktne stijene te načini njihovog ispitivanja [2].....	5
Tablica 2: Mohsova skala tvrdoće [6] .....	11
Tablica 3: Vrijednosti koeficijenta hidrauličke provodljivosti kod intaktnih stijena [2] .....	14
Tablica 4: Prosječne vrijednosti poroznosti i zapreminskih težina određenih vrsta stijena [2]15	
Tablica 5: Empirijski izrazi za vrijednost UCS dobivenu preko indeksa čvrstoće u točki [13] .....	31
Tablica 6: Empirijski izrazi procjene vrijednosti UCS na temelju poznavanja vrijednosti poroznosti [13] .....	32
Tablica 7: Terenska procjena jednoosne tlačne čvrstoće [31].....	36
Tablica 8: Svojstva vapnenaca [32, 33] .....	38
Tablica 9: Vrste vapnenaca [35, 36].....	40
Tablica 10: Podaci o izvedenim istražnim bušotinama [38] .....	46
Tablica 11: Opis ispitivanih uzoraka.....	59
Tablica 12: Rezultati provedenog dijametralnog ispitivanja.....	60
Tablica 13: Provedeni proračun nakon dijametralnog ispitivanja.....	60
Tablica 14: Rezultati provedenog aksijalnog ispitivanja .....	63
Tablica 15: Provedeni proračun nakon aksijalnog ispitivanja .....	64
Tablica 16: Rezultati provedenog ispitivanja na nepravilnim uzorcima .....	66
Tablica 17: Provedeni proračun nakon ispitivanja nepravilnih uzoraka .....	67
Tablica 18: Usporedba vrijednosti $l_{s50}$ - dijametralno ispitivanje.....	70
Tablica 19: Usporedba vrijednosti $l_{s50}$ - aksijalno ispitivanje.....	71

Tablica 20: Usporedba vrijednosti $l_{50}$ – ispitivanje na nepravilnim uzorcima .....	71
Tablica 21; Usporedba vrijednosti UCS - 1 .....	72
Tablica 22: Usporedba vrijednosti UCS - 2 .....	73

# 1 UVOD

Čvrstoća stijenske mase se definira kao sveukupna otpornost pojedine vrste stijene na vlačno, tlačno ili hidrostatsko naprezanje, uključujući sustav pukotina te tlak podzemne vode unutar same stijenske mase, kao i koheziju [1]. Jednoosna tlačna čvrstoća stijene je jedno od bazičnih i najvažnijih mehaničkih svojstava stijene u mehanici stijena. Također je glavni indikator sposobnosti stijene da podnese tlačna opterećenja do trenutka sloma. Poznavanje tlačne čvrstoće određene intaktne stijene može poslužiti kao dobar indikator ostalih fizikalnih i mehaničkih svojstava te se može ustvrditi kriterij sloma stijene. S obzirom na navedeno, važan je postao razvoj metoda utvrđivanja vrijednost tlačne čvrstoće na brz i jednostavan, ali pouzdan način.

Procjena tlačne čvrstoće vrši se u laboratoriju raznim ispitivanjima poput jednoosnih ili troosnih pokusa. Navedeni i slični pokusi su standardizirani normama od strane ISRM-a (International Society for Rock Mechanics) i ASTM-a (American Society for Testing and Materials).

S obzirom na težnju ka bržim, jeftinijim i lakšim izvedbama ispitivanja, koja se može uočiti i u manjim zahtjevima za kriterije koji moraju zadovoljavati uzorci, dolazi do razvoja indeksnih metoda ispitivanja. Jedna od takvih metoda je upravo Point load test ispitivanje, odnosno ispitivanje jednoosne tlačne čvrstoće opterećenjem u točki. Direktni rezultat ispitivanja je vršna sila koja je dovela do sloma stijene s kojom se računa vrijednost vršne čvrstoće u točki, iz koje se može procijeniti vrijednost jednoosne tlačne čvrstoće ispitivanog stijenskog materijala korištenjem empirijskih korelacija za ove vrijednosti. Ispitivanje se može provesti i na terenu i u laboratoriju zbog lako prenosivog aparata za ispitivanje.

U ovome radu će se dati pregled najvažnijih svojstva koja karakteriziraju intaktnu stijenu s fokusom na jednoosnoj tlačnoj čvrstoći intaktne stijene. Opisat će se i razni načini ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće na terenu i u laboratoriju. U konačnici provest će se ispitivanje jednoosne tlačne čvrstoće opterećenjem u točki pomoću uređaja za Point load test ispitivanje u Laboratoriju za geotehniku Građevinskog fakulteta u Rijeci. Provesti će se dijametralno, aksijalno i ispitivanje nepravilnih uzoraka na uzorcima vapnenaca s lokacije LNG terminala u Omišlju na otoku Krku. U završnom dijelu rada će biti predstavljeni rezultati ispitivanja koji će se usporediti međusobno kao i sa rezultatima ispitivanja iz Geotehničkog elaborata istraživanja temeljnog tla uzoraka s LNG terminala na Krku.

## 2 STIJENA U INŽENJERSTVU

U inženjerstvu stijena je sveprisutan materijal - od nje se gradi, u njoj se gradi i na njoj se gradi. Stijenska masa sačinjena je često od mnoštvo diskontinuiteta, odnosno oslabljenja, koji ju čine jedinstvenom s inženjerskog aspekta. Upravo diskontinuiteti čine glavnu razliku između mehanike stijena i mehanike tla te daju stijenskoj masi anizotropni karakter. Dijelovi stijene koji nisu omeđeni diskontinuitetima se nazivaju intaktnom stijenom.

Na mikroskopskoj razini je intaktna stijena, kao i stijenska masa, diskontinuirana, anizotropna i heterogena zbog prisutnosti laminacije, mikropukotina i minerala. U geotehnici se intaktna stijena ipak smatra kontinuiranom i izotropnom, u usporedbi sa stijenskom masom. Na slici 1 može se vidjeti primjerak izotropne i homogene intaktne stijene na makroskopskoj razini [2].



*Slika 1: Prikaz intaktne stijene, vulkanskog tufa, na makroskopskoj razini [2]*

Zbog tehničkih ograničenja i složenosti procesa, ali i visokih troškova mjerenja značajki stijenske mase, razvio se čitav niz metoda kojima se kvantitativno može odrediti kvaliteta stijenske mase. Jedan od najznačajnijih značajki stijenske mase su upravo diskontinuiteti. Oni čine zajednički naziv za većinu tipova pukotina, ploha škrljavosti, ploha slojevitosti, kao i rasjeda i oslabljenih zona [3].



Diskontinuiteti su kroz povijest nastajali na razne načine, prvenstveno prilikom izloženosti stijena raznim vrstama naprezanja koja su premašivala njenu čvrstoću. U tom slučaju, uslijed djelovanja vlačnih ili posmičnih naprezanja, stijena bi pukla i nastao bi diskontinuitet. Postoje dva osnovna tipa diskontinuiteta: pukotine (nastale uslijed vlačnih naprezanja) i rasjedi (nastali uslijed posmičnih naprezanja). Prirodni uzroci ovih pojava su djelovanje tektonskih sila, smanjenja volumena ili čak kontrakcija stijena prilikom hlađenja magme, vlastita težina same stijene na strmijim kosinama, djelovanje temperaturnih promjena, rasterećenja prilikom djelovanja erozije itd. Osim prirodnih uzroka, također treba uzeti u obzir i antropogene, poput miniranja, utjecaja na stanje naprezanja uslijed iskopa i slično [3].

S obzirom na vrijeme postanka, razlikuju se dvije vrste diskontinuiteta [2, 3]:

1) Primarni diskontinuiteti - koji se formiraju prilikom nastanka same stijenske mase pa se zbog toga nazivaju i genetskim diskontinuitetima. Njihov postanak se razlikuje ovisno o tome o kojoj se geološkoj vrsti stijene radi. Kod sedimentnih stijena ova vrsta diskontinuiteta nastaje za vrijeme taloženja sedimenata. Njihova svojstva uvelike ovise o ambijentalnim uvjetima u kojima nastaje pojedina vrsta stijene, a upravo su lučenje, slojevitost i razni oblici folijacije glavni primjeri nastanka primarnih diskontinuiteta.

2) Sekundarni diskontinuiteti - koji nastaju ukoliko je stijena određeni period vremena bila pod utjecajem tektonskih procesa koji su mogli izazvati pojavu novih diskontinuiteta. Pod utjecajem vlačnih naprezanja dolazi do pukotinskih diskontinuiteta, dok posmičnim naprezanjima dolazi do rasjeda, kao što se može vidjeti na slici 2. Prilikom toga se u stijenskoj masi često formiraju tlačne odnosno kompresijske pukotine, vlačne odnosno tenzijske pukotine ili smične odnosno klizne pukotine. Najčešći oblici diskontinuiteta su povezani s nastankom klivaža i slojeva te razni oblici pukotina i lomova, kao i zone smicanja i rasjedi.



Slika 2: Načini nastajanja diskontinuiteta [3]

Glavni cilj mehanike stijena je razumijevanje ponašanja stijena i mogućnosti predviđanja njihovog ponašanja, kao posljedica unutarnjih i vanjskih sila koje djeluju na njih. Sva iskapanja i građenja koja se izvode na stijenskoj masi modificiraju njeno početno stanje i kao rezultat toga stijena se može deformirati ili dovesti do sloma. Na mikroskopskoj razini minerali se mogu dislocirati što u konačnici može dovesti do ploha sloma, kao rezultat novog stanja naprežanja. Deformacije i slomovi se najčešće događaju na plohama diskontinuiteta. Razumijevanjem svih stanja naprežanja i deformacija, kojima stijenska masa može biti izložena pod određenim uvjetima, omogućuje se procjena njezinog mehaničkog ponašanja prilikom projektiranja i planiranja konstrukcijskih radova. Odnos ovih dvaju parametara opisuje ponašanje različitih stanja stijena, što ovisi od svojstava materijala i prevladavajućih prirodnih stanja koja na njih utječu [2, 3].

Čvrstoća i deformacija intaktne stijene su kontrolirane od strane fizičkih svojstava intaktne stijene, poput: mineralnog sastava, zapreminske težine, strukture, poroznosti, propusnosti itd. Ova svojstva uvjetuje sama geneza stijene zajedno sa geološkom situacijom i procesima koji na nju utječu vremenom. Najveći utjecaj na mehanička svojstva imaju geološke karakteristike poput litologije i stratigrafije, geoloških struktura, dijagenetskih diskontinuiteta te *in situ* stanja naprežanja. Način mehaničkog ponašanja ovisi o hidrogeološkim i okolišnim uvjetima, načinu na koji klimatski i meteorološki fenomeni djeluju na procese trošenja stijene, koji mogu modificirati originalna svojstva stijene [2, 3].

Primjerice, pri malim dubinama, diskontinuiteti i procesi trošenja igraju značajnu ulogu kod mehaničkih svojstava i ponašanja stijenske mase. Kod većih dubina, postojeće stanje naprežanja i odgovarajuće magnitude *in situ* naprežanja su najvažniji faktori koji utječu na

mehaničko ponašanje i slom. Diskontinuiteti su na većim dubinama zatvoreni, a time i njihov negativan utjecaj i značaj umanjen.

Da bi moglo bolje predvidjeti određene promjene u svojstvima stijenskih materijala, bitno je provesti odgovarajuća istraživanja. Odabir istraživanja koje je prikladno za određenu vrstu stijene i njena jedinstvena svojstva proizlazi iz geološke i geotehničke struke, kao i iskustvom. Istraživanja se mogu javiti u vidu *in situ* ili laboratorijskih ispitivanja, fizičkih ili matematičkih modela [2, 3].

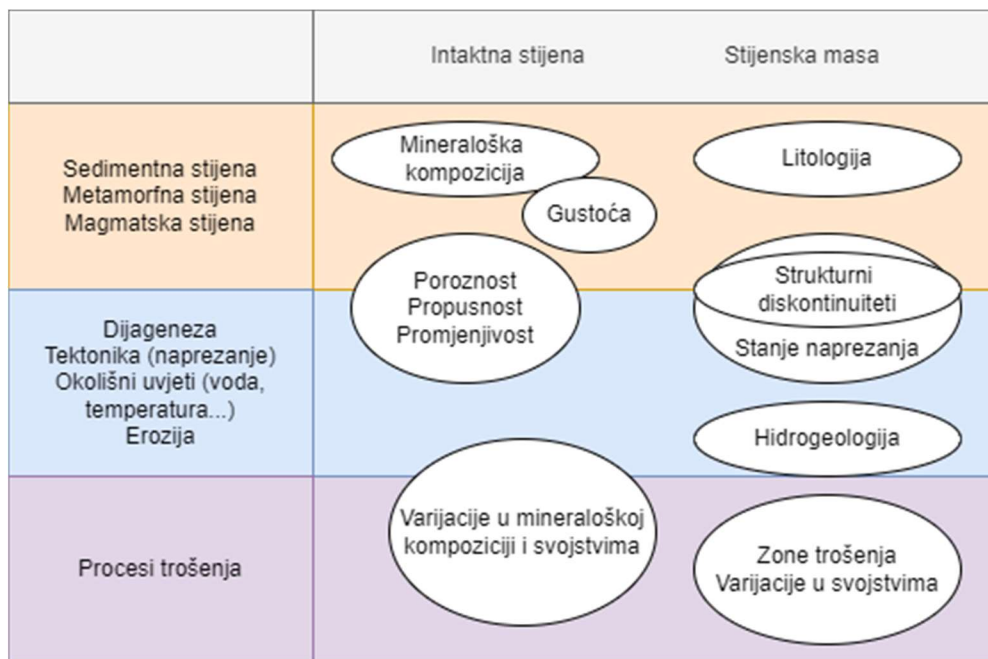
Mehaničko ponašanje stijene ovisi o faktorima poput stupnja trošenja, prisutnosti vode kao i o tipu i orijentaciji diskontinuiteta te veličini blokova. Važnost različitih vrsta diskontinuiteta je skalirana s obzirom na mjerilo reprezentativnog uzorka stijenskog materijala. Ukoliko diskontinuiteti ne utječu u većoj mjeri na ponašanje stijene i nalaze se u malom broju, tada se takva stijena može smatrati kvazihomogenom. Kvazihomogeno ponašanje karakterizira i stijensku masu s izuzetno velikim brojem diskontinuiteta (visokog stupnja ispucanosti) [2, 3]. U tablici 1 mogu se vidjeti identifikacijska i mehanička svojstva stijene te najčešći načini njihovog određivanja.

Tablica 1: Svojstva intaktne stijene te načini njihovog ispitivanja [2]

	Svojstva	Metoda određivanja
Identifikacijska i klasifikacijska svojstva	Mineralni sastav Tekstura Veličina zrna Boja	Vizualno identificiranje Elektronički i optički mikroskop Difrakcija x-zraka
	Poroznost Zapreminska težina Sadržaj vode	Laboratorijske metode
	Propusnost	Ispitivanje propusnosti
	Trajnost	Ispitivanje trajnosti
Mehanička svojstva	Jednoosna tlačna čvrstoća	Laboratorijsko ispitivanje Ispitivanje Schmidovim čekićem
	Vlačna čvrstoća	Direktni i indirektni vlačni testovi
	Brzina zvučnih valova	Laboratorijsko ispitivanje
	Čvrstoća	Triaksijalno ispitivanje
	Deformabilnost	Jednoosno ispitivanje stišljivosti Ispitivanje brzine zvučnih valova

### 3 SVOJSTVA INTAKTNE STIJENE

Prilikom razvoja mehanike stijena veća pažnja je bila usmjerena upravo intaktnoj stijeni naspram drugih elemenata stijenske mase, zbog dobre teorijske pozadine iz mehanike čvrstih materijala. Intaktna stijena je opisivana kao stijena bez gustih strukturnih diskontinuiteta, koja varira veličinom od nekoliko milimetara do nekoliko metara. Da bi se mogla razumjeti inženjerskogeološka svojstva stijena, veoma je bitno odrediti svojstva intaktne stijene kao i svojstva diskontinuiteta. Odabir reprezentativnog uzorka u odnosu na mjerilo cjelokupnog zahvata je veoma važan faktor prilikom određivanja svojstava stijena. Definiranje svojstava intaktne stijene i stijenske mase je kompleksan proces zbog mnogih fizičkih karakteristika i drugih raznih čimbenika. Radi lakšeg poimanja procesa, na slici 3 prikazani su geološki utjecaji na svojstva stijenske mase i intaktne stijene [2, 3].



Slika 3: Geološki utjecaji na svojstva stijenske mase i svojstva intaktne stijene, prema [2]

Važno je također uzeti u obzir i različitosti između geološkog i ljudskog vremena. Za određene prirodne procese u stijenama ponekad su potrebne tisuće godina, dok ih inženjerski radovi mogu izazvati u puno kraćem vremenu. Dolazi do bržeg trošenja stijene, promjene prirodnog stanja te aktiviranja i širenja diskontinuiteta, kao i promjena u protoku podzemnih voda. Svi ti procesi smanjuju čvrstoću stijene u veoma kratkom vremenskom periodu, od par minuta do nekoliko mjeseci. Najznačajnije svojstvo, koje je ovisno o vremenu je trošnost, koja dovodi do dezintegracije i dekompozicije stijenskog materijala. Drugi procesi, poput bubrenja, mogu biti tipični za određene tipove stijene, kao rezultat promjene stanja naprezanja ili određenih kemijskih reakcija, poput pretvorbe anhidrita u gips nakon hidratacije [2].

### 3.1 Mehanička svojstva

U nastavku su opisana najznačajnija mehanička svojstva stijenske mase.

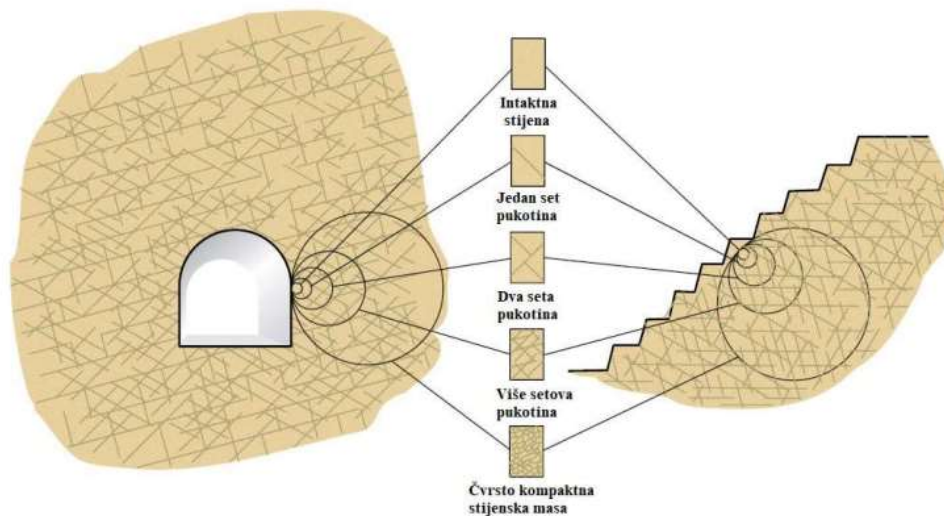
#### 3.1.1 Čvrstoća

Čvrstoća stijenske mase se definira kao sveukupna otpornost pojedine vrste stijene na vlačno, tlačno ili hidrostatsko naprezanje, uključujući sustav pukotina te tlak podzemne vode unutar same stijenske mase, kao i koheziju. Da bi se mogli provesti proračuni inženjerske analize treba najprije definirati parametre čvrstoće poput kuta unutarnjeg trenja i kohezije. Osim navedenih parametara, uzima se u obzir tlak podzemne vode i sustav pukotina unutar stijenske mase. Na ponašanje stijenske mase i parametre čvrstoće utječe upravo stupanj razlomljenosti promatrane stijenske mase. Da bi se odredili parametri čvrstoće, zajedno sa svojstvima, a ujedno i projektirali svi potrebni zahvati u stijenskoj masi, treba međusobno razlučiti elemente stijenske mase te mjerilo cjelokupnog zahvata. Odabrati reprezentativno mjerilo zahvata u odnosu na veličinu svih elemenata strukturne geologije je ključan korak za nastavak ispitivanja [2, 4].

Parametre čvrstoće, zajedno sa ponašanjem stijenske mase, definiraju i određuju sljedeći parametri [2, 4]:

- čvrstoća intaktne stijene
- posmična čvrstoća jednog seta diskontinuiteta
- posmična čvrstoća dva ili više diskontinuiteta
- ukupna čvrstoća stijenske blokovite strukture koja je izotropnog ponašanja

Slika 4 čini grafički prikaz gore navedenih parametara te mjerila zahvata.



Slika 4: Mjerilo cjelokupnog zahvata od intaktne stijene do stijenske mase [2]

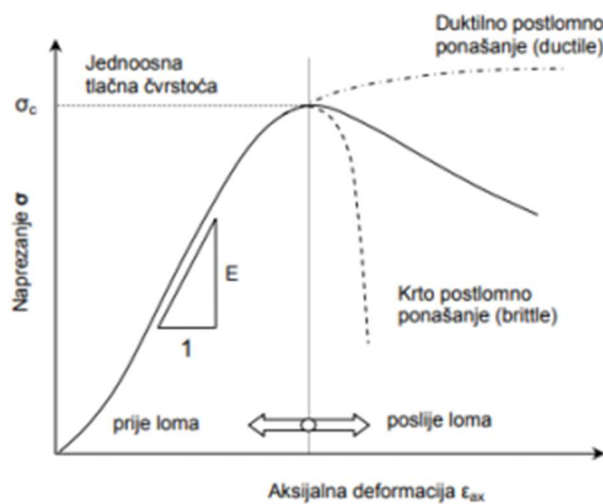
Dimenzije stijenske mase te prirodni uvjeti kojima je ista izložena se ne mogu ostvariti u laboratoriju, kao što ni za procjenjivanje *in situ* čvrstoće nema prigodnih metoda. Upravo iz tog razloga se čvrstoća stijenske mase određuje indirektnim metodama, a parametri čvrstoće stijenske mase se analiziraju pomoću fizičkih modela, matematičkih modela i povratnih analiza, empirijskih metoda utemeljenim na iskustvu i laboratorijskim ispitivanjima te indirektnih metoda utemeljenim na indeksima kvalitete. Od navedenih, najkorištenije su empirijske metode pomoću kojih se određuju kriteriji sloma radi procjene čvrstoće stijenske mase prilikom djelovanja određenih stanja naprezanja. Metode se temelje na podacima poput predviđanja sveukupnog ponašanja stijenske mase, rezultata ponašanja intaktne stijene prilikom različitih stanja naprezanja te predviđanja utjecaja koji diskontinuiteti imaju na ponašanje stijenske mase [2, 4].

### 3.1.2 Deformabilnost

Deformabilnost je svaka promjena oblika stijene, bilo u vidu ekspanzije, sažimanja ili drugog oblika distorzije. Izražava se u jedinicama duljine, najčešće u [m]. Predstavlja odnos promjene duljine elementa u odnosu na njegovu početnu duljinu. Kao svojstvo, ovisi najvećim dijelom o stupnju ispucanosti uzorka te poroznosti. Svaka pukotina i pora su najslabiji, a time i najdeformabilniji elementi intaktne stijene. Deformacija kao takva može biti rezultat djelovanja

opterećenja ili naprezanja, ali također i posljedica bubrenja ili skupljanja tj. promjene temperature ili vlažnosti [2, 3].

Ukupna deformacija stijenske mase sastoji se od elastične (povratne) i plastične (nepovratne) deformacije. Mehaničko se ponašanje stijene može opisati i grafički, pomoću naponsko-deformacijske krivulje pri jednoosnom tlačnom naprezanju. Krivulja može dobro opisati ponašanje stijenske mase, što znači da se iz nje može očitati: vrijednost jednoosne tlačne čvrstoće, Youngov modul elastičnosti ( $E$ ) te krtost, koja se definira nagibom krivulje u dijelu nakon postignute vršne čvrstoće, što se može vidjeti na slici 5.



Slika 5: Naponsko-deformacijska krivulja [4]

Stijenu koja se slabo deformira definira strmi početak krivulje i visoki modul elastičnosti te ju se karakterizira krutom. Stijenu sklonu deformaciji opisuje niski modul elastičnosti zajedno sa blago nagnutim početkom krivulje. Razlike u obliku naponsko-deformacijskih krivulja među stijenama različite deformabilnosti može se vidjeti na slici 6.



Slika 6: Razlika u naponsko-deformacijskim krivuljama stijena različitih deformabilnosti [4]

### 3.1.3 Tvrdoća

Tvrdoća se definira kao otpornost materijala na grebanje i udubljivanje. Postoji više načina na koje se može provesti određivanja tvrdoće. Kod pokusa struganja je rezultat ispitivanja izražen kroz Mohsovu skalu 10 minerala. Prilikom ovog ispitivanja tvrdoća je definirana kao otpornost na grebanje. Najmekši mineral na skali je talk ( $H=1$ ), a najtvrdi dijamant ( $H=10$ ). Princip na kojem funkcioniše ispitivanje je sljedeći: ukoliko uzorak minerala zasad nepoznate tvrdoće može ogrebat referentni mineral pod brojem 5, tada je tvrdoća tog uzorka manja ili jednaka Mohsovoj tvrdoći 5. Ukoliko se ne može ogrebat istoimenim uzorkom, tada je tvrdoća uzorka veća ili jednaka Mohsovoj tvrdoći od 5. Koriste se još i pokusi kojima se određuje abrazivnost, pokus utiskivanje kao i uređaj koji djeluju na principu odskoka poput Schmidtovog čekića. U tablici 2 može se vidjeti Mohsova skala [3, 4, 5].



Tablica 2: Mohsova skala tvrdoće [6]

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

#### 3.1.4 Trajnost

Trajnost je otpornost stijene procesima slabljenja i dezintegracije, koji nastaju pod utjecajem određenih agenasa iz okoliša. Svojstvo trajnosti upravo predstavlja otpor na te mehanizme, odnosno na promjenjivost intaktne stijene u okolnostima koje bi mogle promijeniti njegove komponente ili strukturu. Može se odrediti naizmjeničnim vlaženjem te ponovnim sušenjem uzorka. Bitno je naglasiti da se proces trošenja događa u kratkom vremenskom periodu (vijek trajanja objekta) te ga se ne smije miješati s procesom trošenja stijene u geološkom smislu. Izražava se preko indeksa trajnosti koji se vrednuje u vrijednosti od 0 do 100%. Vrijednost indeksa je promjenjiva s obzirom na hidrataciju, otapanje i oksidaciju. Primjerice magmatska stijena, šejlovi i muljnjaci, koji sadržavaju značajne količine gline, čije izlaganje zraku ili vodi može degradirati čvrstoću stijenskog materijala. Trajnost stijene raste sa rastom gustoće, a pada sa većom količinom vode [2, 3, 4].

### 3.1.5 *Bubrenje*

Bubrenje je svako povećanje volumena prirodne stijene ili tla koje je vremenski ovisno te uzrokovano povećanjem sadržaja vode, promjenom naprezanja ili kombinacijom oba faktora. Sklonost bubrenju se u načelu pretežno odnosi na minerale koji dolaze iz grupe smektita. Sklonost minerala bubrenju dokazuje se određenim identifikacijskim ispitivanjima kojima se istražuje potencijal bubrenja ispitivanog uzorka. Ukoliko je dokazan potencijal bubrenja, dodatno se ispituje iznos bubrenja pomoću raznih terenskih i laboratorijskih ispitivanja. Ovo svojstvo može izazvati mnoge probleme pri temeljenju objekata, kao i u cestogradnji te tunelogradnji jer je sam mehanizam bubrenja stijene nepredvidiv [2, 3].

## 3.2 Fizikalna svojstva

U nastavku su opisana najznačajnija fizikalna svojstva stijenske mase.

### 3.2.1 *Mineralni sastav*

Često prilikom rješavanja inženjerskih problema nije potrebno precizno poznavanje i određivanje mineralnog sastava stijene. Mineralni sastav svake stijene pretežno ovisi o tvrdoći materijala te kao takav uvjetuje sva mehanička ponašanja stijene. Iako je poznato čak 1700 minerala, otprilike 6 mineralnih skupina određuje ponašanje stijenske mase u geotehničkom inženjerstvu. Može se utvrditi golim okom na terenu ili primjerice mikroskopom ili lećom u laboratoriju. Mineralni sastav, ali i stupanj trošenja, se može također uočiti pomoću boja stijene. Koristeći etalon odnosno najčešće Rock Color Chart sa 40 uzoraka, Soil Color Chart s podjelom na 248 uzoraka ili Munsell sustav za identifikaciju boja stijene i ostalih prirodnih materijala. Urezivanjem pomoću džepnog nožića mogu se razlikovati stijene poput kalcita i kvarca, koje na prvi pogled izgledaju vrlo slično, ali je kvarc u konačnici tvrdi od čelika noža, dok je kalcit mekši pa se može udubiti. Svojstva stijene uvelike ovise o tvrdoći minerala od kojih je ona sastavljena, kao i od teksturnih svojstava poput pojave minerala u pločastoj formi što zapravo ukazuje na kalavost stijene [2, 3].

### 3.2.2 *Struktura*

Struktura je obilježje koje je posljedica načina postanka, metamorfih procesa, dijageneze kao i procesa trošenja stijenske mase. Struktura utječe i na fizička i mehanička svojstva stijenske mase što je uočljivo kroz slojevitost, ispucanost, folijaciju ili primjerice brečolikost. Najčešće se može uočiti na primjeru slojevitosti - to je jedna od prvih karakteristika koju je moguće uočiti na terenu. Takvo jasno izdvajanje pojedinih strukturalno, teksturalno ili litološko jedinstvenih članova odmah na prvi pogled karakterizira sedimentnu stijenu [3].

### 3.2.3 *Poroznost*

Poroznost, odnosno propusnost, čini odnos volumena pora i ukupnog volumena stijene ili samog tla, odnosno postotak šupljina u ukupnom volumenu, kao što je vidljivo u izrazu 3.1.

$$n[\%] = \frac{V_v}{V}, \quad (3.1)$$

gdje  $V_v$  čini volumen pora, a  $V$  ukupni volumen stijene ili tla. Rezultat se izražava u postocima.

Ovo je svojstvo koje najviše utječe na čvrstoću i mehanička svojstva. Proporcionalna je deformabilnosti te je obrnuto proporcionalna čvrstoći i gustoći. Poroznost se najčešće smanjuje sa dubinom, ali i starosti stijene. Vrijednost  $n$  varira između 0 i 90 %, sa uobičajenim rasponom od 15 do 30 %. Ovisno o načinu postanka stijene, poroznost kao svojstvo može se podijeliti na primarnu i sekundarnu. Ukoliko je poroznost nastala tijekom samog postanka stijene, onda se radi o primarnoj poroznosti, koja se također još naziva i međuzrnski tip poroznosti. Karakteristična je kod koherentnih i nekoherentnih tala te klastičnih sedimentnih stijena. Ukoliko se poroznost javila kao posljedica deformacije stijene tijekom djelovanja tektonskih kretnji ili prilikom same dijageneze, onda se radi o sekundarnoj poroznosti koja se naziva i pukotinskim tipom poroznosti. Javlja se kod metamorfnih i magmatskih stijena te kod većeg dijela kemijskih i biogenih sedimentnih stijena. Postoji i krški odnosno disolucijski tip poroznosti, gdje su pukotine vidno proširene prilikom okršavanja, a do njega dolazi kod lako topivih stijena, poput karbonatnih ili topivih. Prosječne vrijednosti poroznosti vidljive su u tablici 4.

Poroznost se kod sedimentnih stijena smanjuje nelinearno sa dubinom kao rezultat zbijanja. Svojstvo koje kontrolira zbijanje u ovom procesu je glavni efektivni tlak.

Voda se infiltrira i teče duž pora intaktne stijene, gdje njihova međusobna povezanost, stupanj trošenja, anizotropija i količina naprezanja kojoj je podložan stijenski materijal utječu na konačni iznos propusnosti, koji se mjeri koeficijentom propusnosti ili hidrauličkom provodljivosti  $k$ , izraženom u [m/s], [cm/s] ili [m/dan]. S obzirom na način prihvaćanja i transmitiranja fluida, razlikujemo više vrsta propusnosti:

- 1) vodopropusne stijene – u mogućnosti su i prihvatiti i transmitirati fluid
- 2) polupropusne stijene – u mogućnosti su prihvatiti fluid, ali teško ga dalje transmitiraju
- 3) vodonepropusne stijene – sama transmisija se vrši toliko sporo da je u potpunosti zanemariva [2, 3, 7].

Vrijednosti koeficijenata hidrauličke provodljivosti za različite vrste intaktne stijene su vidljive u tablici 3.

*Tablica 3: Vrijednosti koeficijenata hidrauličke provodljivosti kod intaktnih stijena [2]*

Vrsta stijene	Hidraulički koeficijent provodljivosti, $k$ [m/s]
Granit	$10^{-9} - 10^{-12}$
Vapnenac i dolomit	$10^{-6} - 10^{-12}$
Metamorfna stijena	$10^{-9} - 10^{-12}$
Muljnjak	$10^{-9} - 10^{-13}$
Sol	$<10^{-11} - 10^{-13}$
Pješčenjak	$10^{-5} - 10^{-10}$
Škriljevac	$10^{-7} - 10^{-8}$
Šejl	$10^{-11} - 10^{-13}$
Vulkanska stijena	$10^{-7} - 10^{-12}$

### 3.2.4 Zapreminska težina

Zapreminska težina ovisi o komponentama stijene, a predstavlja ju težina po jedinici volumena materijala. Kod različitih vrsta stijena vrijednosti zapreminskih težina veoma variraju, za razliku od raznih vrsta tala gdje su vrijednosti približne svim vrstama [2, 3]. Vrijednosti zapreminske težine za različite vrste stijena su vidljive u tablici 4.

Tablica 4: Prosječne vrijednosti poroznosti i zapreminskih težina određenih vrsta stijena [2]

Stijena	Zapreminska težina [kN/m <sup>3</sup> ]	Poroznost [%]
Andezit	22-23.5	10-15
Amfibolit	29-30	-
Bazalt	27-29	0.1-2
Kreda	17-23	30
Ugljen	10-20	10
Dijabaz	29	0.1
Diorit	27-28.5	-
Dolomit	25-26	0.5-10
Gabro	30-31	0.1-0.2
Gnajs	27-30	0.5-1.5
Granit	26-27	0.5-1.5 (0.9)
Gips	23	5
Vapnenac	23-26	5-20 (11)
Mramor	26-28	0.3-2 (0.6)
Muljnjak	22-26	2-15
Kvarcit	26-27	0.1-0.5
Riolit	24-26	4-6
Sol	21-22	5
Pješčenjak	23-26	5-25 (16)
Škriljevac	25-28	3
Šejl	25-27	0.1-1
Tuf	19-23	14-40

## 4 ISPITIVANJE JEDNOOSNE TLAČNE ČVRSTOĆE INTAKTNE STIJENE

Kako je već ranije navedeno, jednoosna tlačna čvrstoća intaktne stijene može se odrediti na više načina. U nastavku će se opisati postupci spomenutih ispitivanja.

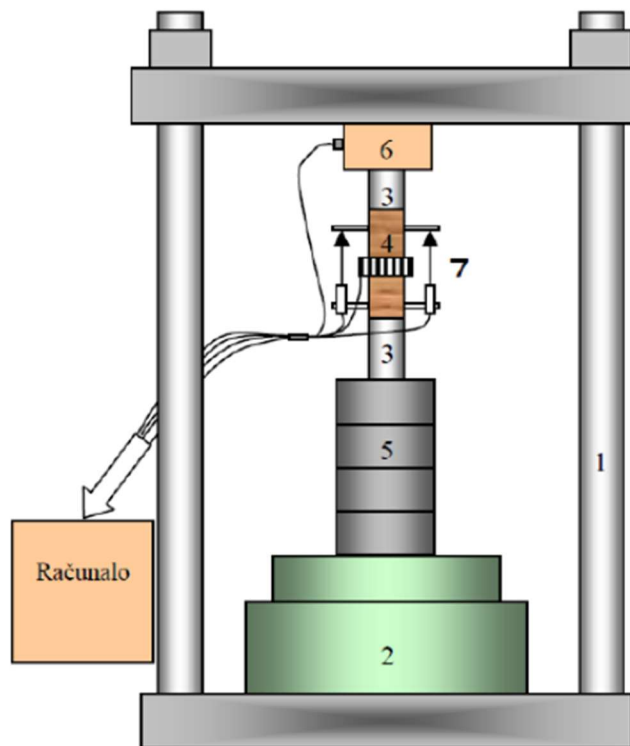
### 4.1 Ispitivanje jednoosne tlačne čvrstoće u preši za stijene

Primarna namjena ovog ispitivanja je karakteriziranje intaktne stijene te klasificiranje čvrstoće. Osim toga, iz naponsko deformacijske krivulje se mogu odrediti vrijednosti Youngovog modula elastičnosti i Poissonovog koeficijenta te drugih elemenata koji opisuju ponašanje stijene. Na slici 7 može se vidjeti uređaj za ispitivanje jednoosne tlačne čvrstoće intaktne stijene u Laboratoriju za geotehniku na Građevinskom fakultetu u Rijeci.



*Slika 7: FORM+TESTS ALPHA 1-2000s preša za stijene u Laboratoriju za geotehniku Građevinskog fakulteta u Rijeci*

Uzorak prije ispitivanja treba pripremiti i obraditi bušenjem, rezanjem i finom obradom. Uzorci moraju zadovoljavati zahtjeve propisane normom [8] kako bi se dobili reprezentativni mehanički parametri stijenskog materijala koji se ispituje. Potrebno je da je promjer uzorka manji od NX, odnosno otprilike 54 mm te da je visina veća od promjera 2.5-3 puta [8]. Promjer se mjeri na način da se duž uzorka izmjere barem dva promjera, od kojih se uzima prosječna vrijednost. Odnos promjera i najvećeg zrna stijene u materijalu treba biti u minimalnom odnosu od 10:1. Površine trebaju biti glatke i ravne tj. ravnost baze uzorka treba biti manja od 0.02 mm, a ravnost plašta manja od 0.5 mm. Na slici 8 mogu se na shematskom prikazu vidjeti svi dijelovi uređaja za ispitivanje tlačne čvrstoće [8].



*Slika 8: Shema uređaja za jednoosno ispitivanje stijena;  
1) okvir uređaja, 2) hidraulička preša, 3) podložne pločice, 4) ispitivani uzorak, 5) podložne ploče, 6) mjerilo sile, 7) mjerilo aksijalnog i radijalnog pomaka [4]*

Minimalna tvrdoća čelika od kojih su građene ploče treba biti 58 po Rockwellu (C skala). Promjer ploča treba biti između  $D$  i  $D + 2$  mm, a debljina minimalno 15 mm ili  $D/3$ . Ravnoća ploča ne bi smjela odstupati više od 0.005 mm. Jedna od dvije ploče treba imati ukomponiran kuglični ležaj, koji bi trebao biti smješten na gornjem rubu uzorka. Potrebno ga je podmazati mineralnim uljem. Uzorak, ploče i kuglični ležaj trebaju biti prikladno centrirani. Centar zakrivljenosti ležaja bi se trebao poklapati sa centrom gornjeg rubnog dijela uzorka. U dodiru sa pločom koja prenosi opterećenje se na krajevima uzorka javlja trenje, s obzirom na to samo je sredina uzorka u stanju jednoosnog naprezanja. Ploče trebaju biti održavane da dopuste varijaciju od 0.025 mm kako ne bi kontaktne površine odstupale od ravnine za više od 0.015 mm [8].

Uzorci trebaju biti čuvani maksimalno 30 dana te očuvani na način da zadrže prirodni sadržaj vode u uzorku. Tako oblikovan uzorak se postavlja u uređaj te kreće ispitivanje.

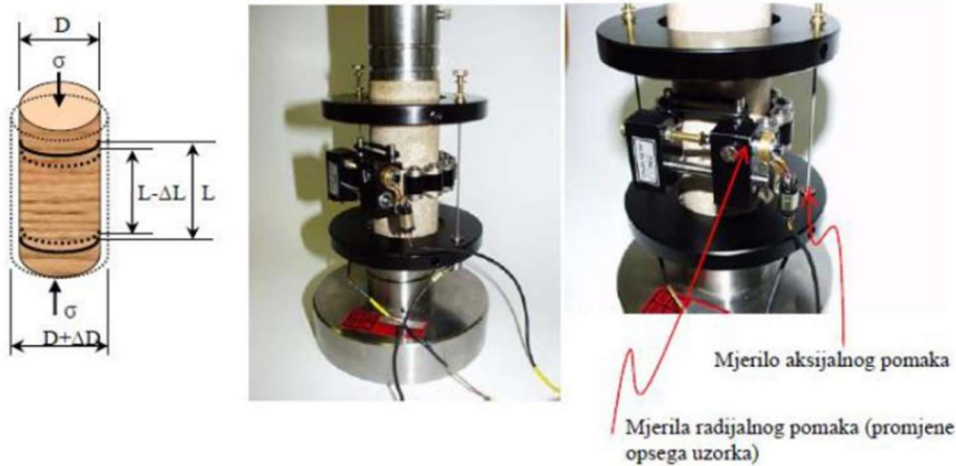
Opterećuje se uzorak pomoću uzdužne sile, kontinuirano, na način da do sloma dođe unutar 5-10 minuta od početka ispitivanja i to silom od 0.5-1.0 MPa/s. Potrebno je ispitati minimalno 5 uzoraka, po testiranju, za mjerodavne rezultate.

Postoje dva načina provedbe ispitivanja - kontinuiranim prirastom pomaka (deformacije) ili kontinuiranim prirastom sile (naprezanja). Ispitivanje sa kontroliranom deformacijom se temelji na tome da je deformacija (pomak) neovisna varijabla, a naprezanje (sila) ovisna. Unaprijed je određen prirast deformacije u vremenu tj. brzina skraćivanja visine ispitivanog uzorka (mm/min). Kada je u pitanju pokus sa kontroliranim naprežanjem, onda je naprežanje (sila) neovisna varijabla, dok deformacija (pomak) čini ovisnu varijablu. Prilikom obadvije vrste provedbe, slom se treba ostvariti u vremenu od 2 do 15 minuta [8].

Kontinuiranim mjerenjem duž trajanja ispitivanja se u pravilnim vremenskim razmacima dobivaju vrijednosti uzdužne i dijametralne deformacije. Na uzorak se pričvrste nosači senzora koji potom mjere pomake, odnosno uzdužnu deformaciju  $\Delta l$ . Razmak među nosačima je početna visina  $l$ . Treba postaviti minimalno dva senzora na uzorak, a konačni rezultat daje srednja vrijednost svih izmjerenih pomaka. Prati se također i dijametralna deformacija uzorka, odnosno promjena promjera uzorka  $\Delta d$ . Promjena se prati na način da se pričvrste senzori za mjerenje promjene opsega uzorka, gdje se u konačnici za rezultat uzima prosječna vrijednost svih pomaka promjera ispitivanog uzorka. Deformacije su vrlo male stoga mjerni senzori moraju biti vrlo precizni - deformacije se mjere sa rezolucijom od minimalno  $25 \cdot 10^{-6}$  i



preciznošću od 2%, ukoliko su deformacije veće od  $250 \cdot 10^6$ , a rezolucijom od  $5 \cdot 10^6$  za sve deformacije manje od  $250 \cdot 10^6$ . Mjerila aksijalnog i radijalnog pomaka mogu se vidjeti na slici 9 [8].



Slika 9: Mjerila aksijalnog i radijalnog pomaka pričvršćena za ispitivani uzorak [4]

Preporuča se mjerenje obaviti sa više razdoblja opterećivanja i rasterećivanja uzoraka. Osim mjerenjem, vrijednosti aksijalne i dijametralne deformacije mogu se dobiti putem sljedećih izraza.

Aksijalna deformacija se dobiva putem formule 4.1:

$$\varepsilon_{ax} = \frac{\Delta l}{l_0}, \quad (4.1)$$

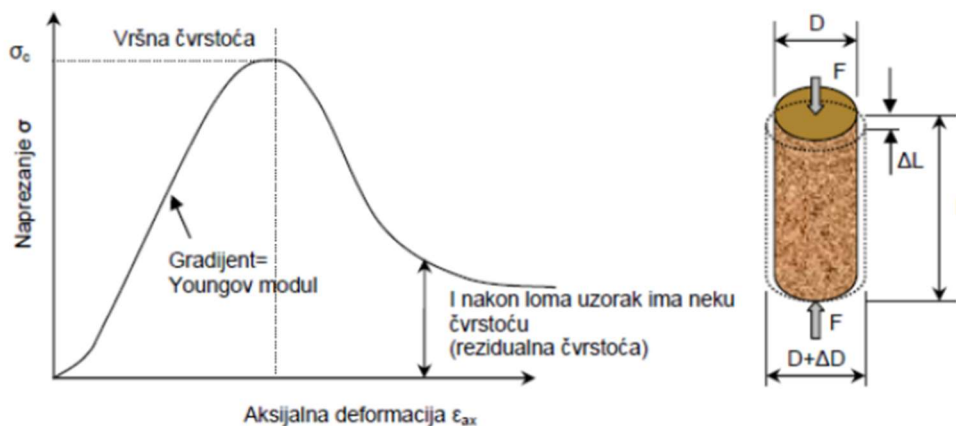
gdje  $l_0$  čini početnu uzdužnu duljinu, a  $\Delta l$  promjenu duljine, koja uvijek čini pozitivnu vrijednost.

Dijametralna deformacija se određuje prema sljedećoj formuli 4.2:

$$\varepsilon_d = \frac{\Delta d}{d_0}, \quad (4.2)$$

gdje  $d_0$  čini početni (nedeformirani) promjer uzorka, a  $\Delta d$  je promjena promjera, koja se prilikom povećanja promjera zapisuje kao negativna vrijednost.

Krajnji rezultat dobivenih rezultata je naponsko-deformacijska krivulja, koju čini minimalno deset vrijednosti te se može vidjeti na slici 10. Krivulja u samom početku raste konkavno prema gore, poprimivši oblik suprotan od karakterističnog za ponašanja tla. Razlog može biti premala pripremljenost uzorka prije testiranja (očituje se u neparalelnosti baza) ili zatvaranje mikropukotina. Krivulja potom raste linearno, slično idealno elastičnoj stijeni, sve do mjesta sloma. Tu se očitava vrijednost vršne čvrstoće odnosno vrijednost jednoosne tlačne čvrstoće. Oblik krivulje u dijelu nakon mjesta sloma više nije značajan za daljnje izračune jer je nepredvidiv. Na apscisi krivulje se nalaze vrijednosti deformacije, a na ordinati naprežanja [8].



Slika 10: Naponsko-deformacijska krivulja sa mehaničkim parametrima [3]

## 4.2 Point Load Test

Point Load Test (PLT), odnosno pokus određivanja čvrstoće pri opterećenju u točki, je indeksno ispitivanje koje klasificira stijenu prema iznosu tlačne čvrstoće. Osim navedenog, može služiti i kao procjena ostalih veličina koje opisuju intaktnu stijenu, kao što su jednoosna tlačna i vlačna čvrstoća. Upravo ta činjenica je i popularizirala daljnju upotrebu te razvitak ove metode. S obzirom na malu težinu uređaja, koji se koristi prilikom ispitivanja, ono može biti provedeno i na terenu i u laboratoriju [9]. Na slici 11 je vidljiv uređaj na kojemu se provodi PLT ispitivanje.

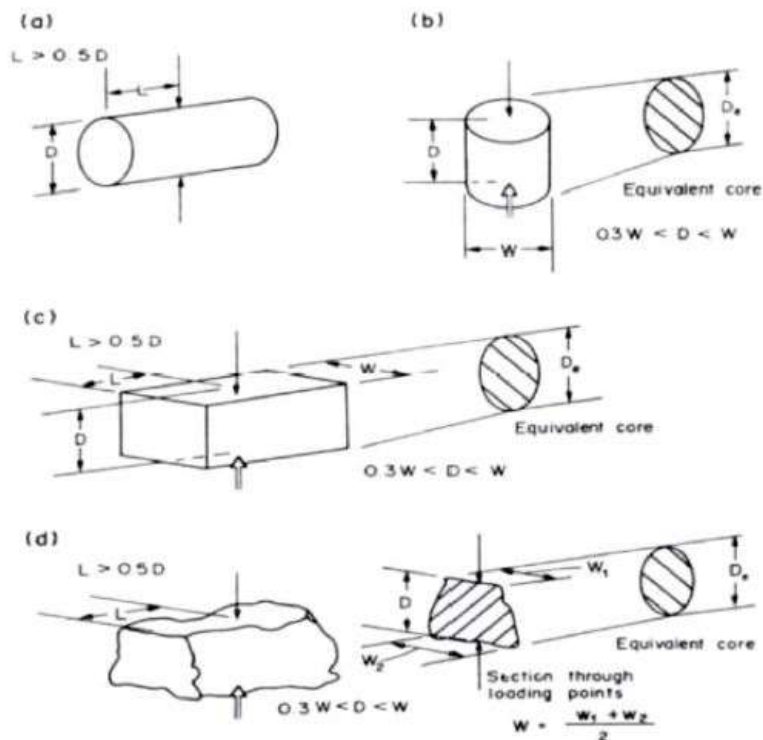


*Slika 11: Uređaj za PLT ispitivanje u Laboratoriju za geotehniku Građevinskog fakulteta u Rijeci*

Prema obliku uzorka koji se ispituje, razlikuju se četiri vrste ispitivanja [9]:

#### *4.2.1 Dijametralni test*

Za ovu vrstu ispitivanja pogoduju uzorci jezgre sa omjerom dužine i širine većim od 1. Uzorak se umetne u stroj za ispitivanje, a kontaktne šiljke se približe na način da stvore kontakt duž promjera same jezgre. Udaljenost među dodirnim točkama uzorka i kontaktnih šiljaka mora biti minimalno polovica radijusa jezgre. Udaljenost  $D$  među šiljcima je potrebno izmjeriti sa točnošću od 2%. Potom se nanosi sila do trenutka sloma ispitivanog uzorka za koji je potrebno 10 do 60 sekundi. Kada nastupi slom bilježi se maksimalna sila  $P$ . Treba provesti minimalno 10 ispitivanja po uzorku, čak i više ukoliko je uzorak heterogen ili anizotropan. Ispitivanje treba odbaciti ukoliko ploha sloma ne prolazi kroz obje točke opterećenja. Zahtjevi za oblik uzorka vidljivi su na slici 12.



Slika 12: Zahtjevi za oblike uzoraka za: a) dijametralno ispitivanje, b) aksijalno ispitivanje, c) blok ispitivanje i d) ispitivanje na uzorku nepravilnog oblika [9]

#### 4.2.2 Aksijalni test

Za ovakvu vrstu ispitivanja prikladni su uzorci jezgre čiji je omjer dužine i širine od 0.3 do 1. Prije nego što su uzorci prikladnih dimenzija za ovaj test moguće je na dužim jezgrama provesti dijametralno ispitivanje, što će samo po sebi dati uzorke prikladne dužine. Naravno, potrebno je proučiti uzorke nakon dijametralnog ispitivanja da nije došlo do oštećenja i oslabljenja. Ako se neće odviti dijametralni test prije provedbe aksijalnog ispitivanja, onda je potrebno veće dužine uzoraka piliti ili odvajati dijetlom. Po uzorku je potrebno izvršiti 10 testova, a najčešće i više. Uzorak se umetne u aparat za ispitivanje, a šiljci se primaknu na način da rade kontakt duž linije okomite na krajnju površinu jezgre. Širina  $W$  je okomita na smjer nanošenja opterećenja sa preciznošću od 5%, dok se udaljenost  $D$  bilježi sa preciznošću od 2%. Potom kreće nanošenje sile do konačnog sloma uzorka, koji nastupa 10 do 60 sekundi nakon početka nanošenja sile. Potrebno je zabilježiti maksimalnu silu  $P$  u trenutku sloma. Zahtjevi za dimenzije uzorka prikazani su na slici 12.

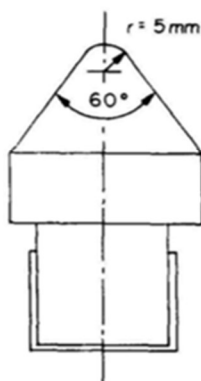
#### 4.2.3 Test na nepravilnim uzorcima i blok test

Uzorci poput komada stijene ili u obliku blokova dimenzija  $50 \pm 35$  mm najviše pogoduju ovoj vrsti ispitivanja. Omjer dužine  $D$  i širine  $W$  mora biti između 0.3 i 1.0, a najviše pogoduju vrijednosti bliže 1.0 (slika 12). Udaljenost  $L$  bi trebala biti minimalno  $0.5 W$ . Treba izvršiti minimalno 10 ispitivanja po uzorku, a po mogućnosti i više ukoliko je stijena po svojim svojstvima anizotropna i heterogena. Uzorak se postavi u uređaj za ispitivanja, šiljci se međusobno primaknu ka uzorku, tvoreći kontakt s najmanjom dimenzijom uzorka, ali na način da to nije u blizini rubova. Bilježe se vrijednosti širine  $W$ , sa preciznošću od 5%, kao i udaljenost  $D$  sa preciznošću od 2%. Nakon mjerenja se kreće sa nanošenjem sile do trenutka konačnog sloma uzorka koji nastupa otprilike 10 do 60 sekundi. Nakon loma se bilježi iznos maksimalno dosegnute sile [9].

Uređaj upotrebljavan prilikom ispitivanja uzoraka ovom metodom sastoji se od sljedećih dijelova [9]:

##### 1) Sklopa za opterećivanje uzoraka

Aparat se sastoji od okvira, hidraulične pumpe, potpisnog cilindra i konusnih šiljaka napravljenih od tvrdog metala. Šiljak je bitno izvesti od prikladno tvrdog materijala zbog njegovog direktnog kontakta s ispitnim uzorkom, koji može dovesti do oštećenja. Primjereni materijali bi bili kaljeni čelik ili volframov karbid jer se neće oštetiti prilikom mnogobrojnih provedenih testiranja. Bitno je dobro dizajnirati i konstruirati ovaj dio aparata kako se ne bi krivio prilikom kontinuiranog primjenjivanja maksimalnog opterećenja. Standardizirani razmak među dvama šiljcima iznosi 15-100 mm, prilagodljiv s obzirom na veličinu uzoraka. Kontaktni šiljci služe prijenosu opterećenja na ispitivani uzorak te su oblika krnjeg stošca koji je izveden pod kutom od 60 stupnjeva te radijusom zakrivljenosti od 5 mm, na samom vrhu, što se može vidjeti na slici 13. Važna je stavka održavanja centriranosti vrha. Potreban je takav kapacitet opterećenja da izazove slom čak i najčvršćih te najvećih uzoraka.



*Slika 13: Konusni šiljak PLT uređaja [9]*

## 2) Mjerila duljine

Najbolji primjer mjerila duljine je vaga koja izravno očitava duljinu. Uređaj se koristi u trenutku početka testiranja uzorka te služi za mjerenje udaljenosti dodirnih točaka šiljka i uzorka. Rezultat je važeći ako su odstupanja manja od  $\pm 2\%$ , nevezano o veličini uzorka. Za svako ispitivanje, osim dijametralnog, koristi se i dodatni mjerni instrument (poput čeličnog ravnala) radi određivanja širine uzorka  $W$ . Uređaj mora biti otporan na vibracije kao i hidraulička opterećenja. Osim toga, potrebna je provjera vrijednosti nultog pomaka u trenutku kad su šiljci u međusobnom kontaktu.

## 3) Mjerila sile

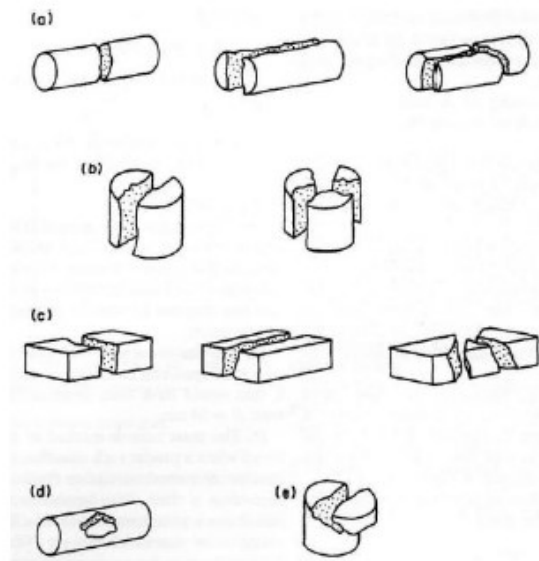
Za mjerenje sile koriste se uređaji poput hidrauličkog manometra, mjerne ćelije ili pretvarača spojenog na okvir, a jedan od njih se može vidjeti na slici 14. Na ovom dijelu aparata možemo očitati veličinu vršnog opterećenja, koja ne smije odstupati više od 5%, što vrijedi za sve veličine i čvrstoće uzoraka. Uređaj mora biti otporan na vibracije kao i hidraulička opterećenja na način da opetovano nanošenje opterećenja ne utječe na točnost očitavanja vršne sile. U tome upravo i leži važnost ovog uređaja. Lom se često dogodi iznenada te je preciznost rezultata u tom trenutku od velike važnosti [9].



*Slika 14: Mjerilo sile na PLT uređaju*

Opremu za ispitivanje je potrebno s vremena na vrijeme kalibrirati koristeći neovisnu certificiranu mjernu ćeliju i set blokova pomaka, provjeravajući silu  $P$  i udaljenost  $D$  u cijelom rasponu opterećenja i pomaka relevantnih za ispitivanje

Valjanost pokusa očituje se u obliku sloma uzorka koji se ispituje. U određenim slučajevima dolazi do nepravilnog loma uslijed nehomogenosti uzorka pa se tada taj uzorak izbacuje iz daljnjeg ispitivanja, odnosno smatra se nevažecim. Na slici 15 prikazani su oblici pravilnih i nepravilnih slomova uzorka. Pokus se smatra važecim ukoliko je došlo do pravilnog sloma uzorka kao pod a), b) i c) te nevažecim ukoliko je došlo do nepravilnog sloma kao pod d) i e).

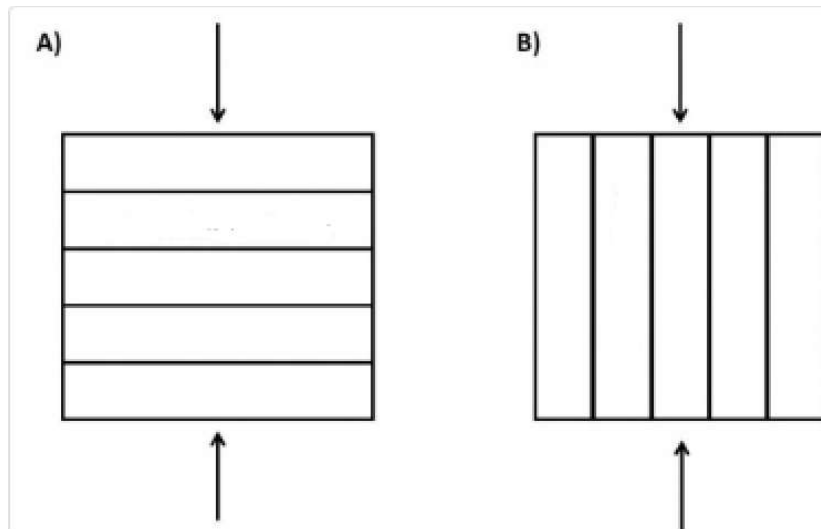


Slika 15: Primjeri pravilnih lomova (a),(b) i (c) te nepravilnih lomova (d) i (e) [9]

#### 4.2.4 Anizotropija

Stijenski materijal se smatra anizotropnim kad se njegova mehanička svojstva mijenjaju ovisno o smjeru opterećenja. Ovo svojstvo je prisutno kod velikog broja stijena te se zbog toga drugačije pristupa ispitivanju uslojenih ili škriljastih stijena. Uzorak je potrebno ispitati u smjeru koji će dati najveću vrijednost čvrstoće, kao i u onom koji će dati najmanje vrijednosti. Ukoliko se sam uzorak sastoji od jezgre koja je bušena kroz ravninu sloma, potrebno je najprije izvršiti niz dijametralnih ispitivanja nakon kojih će se dobiti niz uzoraka na kojima se mogu provoditi aksijalna ispitivanja. Najbolja solucija je da os jezgre bude okomita na ravninu sloma jer tako bušen uzorak daje najtočnije rezultate. Za to je potreban kut manji od 30 stupnjeva među osima okomice ravnine sloma i jezgre. Važno je pripaziti prilikom mjerenja vrijednosti indeksa čvrstoće u onom pravcu koji ima najmanju čvrstoću, upravo na to da opterećenje bude prisutno samo duž jedne ravnine slome. Dok je prilikom mjerenja u pravcu koji ima najveću čvrstoću opterećenje treba biti raspoređeno okomito na ravnine sloma [10]. Na slici 16 mogu se vidjeti smjerovi ispitivanja anizotropije.





Slika 16: Smjerovi opterećenja pri ispitivanju anizotropije [10]

#### 4.2.5 Proračun nakon provedbe PLT ispitivanja

Nakon izvršenog PLT ispitivanja, krajnji rezultat čine vrijednosti poput: dimenzije ispitivanog uzorka te opterećenje  $P$  [kN] koje je dovelo do sloma istog uzorka. S tim podacima ulazi se u daljnji proračun. Prvo je potrebno odrediti vrijednost ekvivalentnog promjera jezgre  $D_e$ . Kod dijametralnog ispitivanja vrijednost  $D_e$  jednaka je vrijednosti  $D$ , dok kod ostalih vrsta ispitivanja ona iznosi kao u izrazu:

$$D_e = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}}, \quad (4.3)$$

gdje  $A$  čini minimalni presjek ravnine kroz kontaktne točke i računa se prema izrazu:

$$A = W \cdot D. \quad (4.4)$$

Zatim je potrebno proračunati nekorrigiranu čvrstoću pri opterećenju u točki,  $I_s$ , prema izrazu 4.5:

$$I_s = \frac{P}{D_e^2} \quad (4.5)$$

gdje P čini maksimalnu silu (silu koja je dovela do sloma), a  $D_e$  ekvivalentni promjer jezgre.

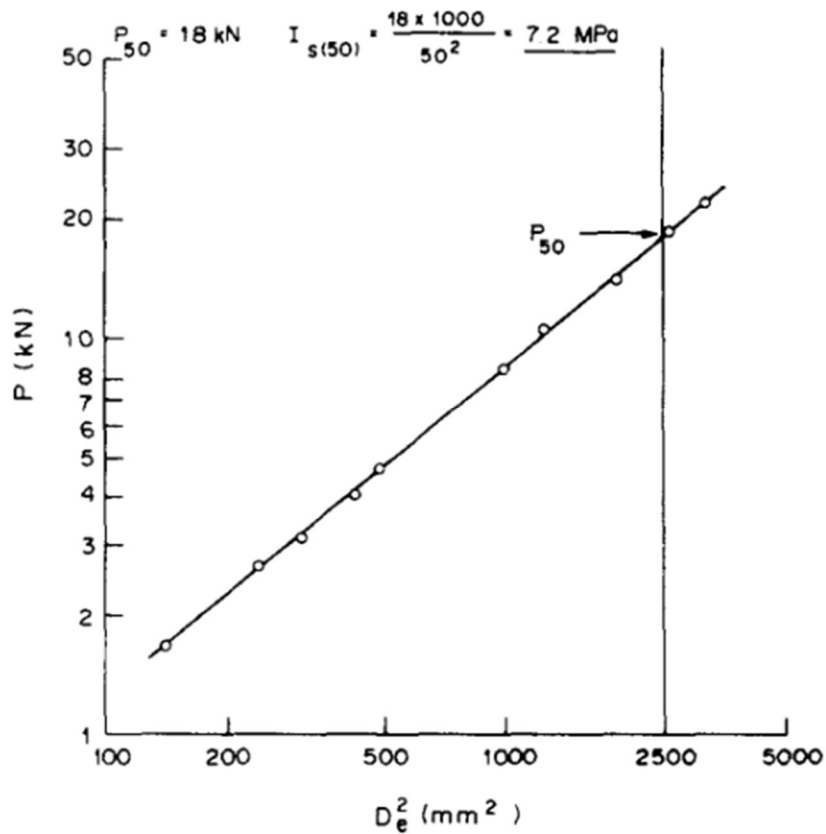
Da bi se dobila unificirana vrijednost PLT-a potrebno je izvršiti korekciju, u odnosu na dimenzije ispitivanih uzoraka, iz razloga što vrijednosti nekorrigirane čvrstoće pri opterećenju u točki  $I_s$  variraju kao funkcija od promjera D (u dijametralnom ispitivanju), ali i kao funkcija od ekvivalentnog promjera jezgre  $D_e$  (u aksijalnom ispitivanju, ispitivanju nepravilnih uzoraka ili blok ispitivanju). U konačnici se dobiva vrijednost indeksa čvrstoće u točki  $I_{s(50)}$ , pomoću izraza 4.6 te indeksa anizotropije  $I_{a(50)}$ . Indeks anizotropije se dobiva kao omjer srednjih vrijednosti najmanjih i najvećih vrijednosti indeksa PLT-a. Vrijednost indeksa blizu 1.0 karakterizira kvazi izotropne stijene, dok se veće vrijednosti dobivaju kod anizotropne stijene [9].

$$I_{s(50)} = F \cdot I_s, \quad (4.6)$$

gdje F čini korekcijski faktor koji se dobiva po izrazu 4.7:

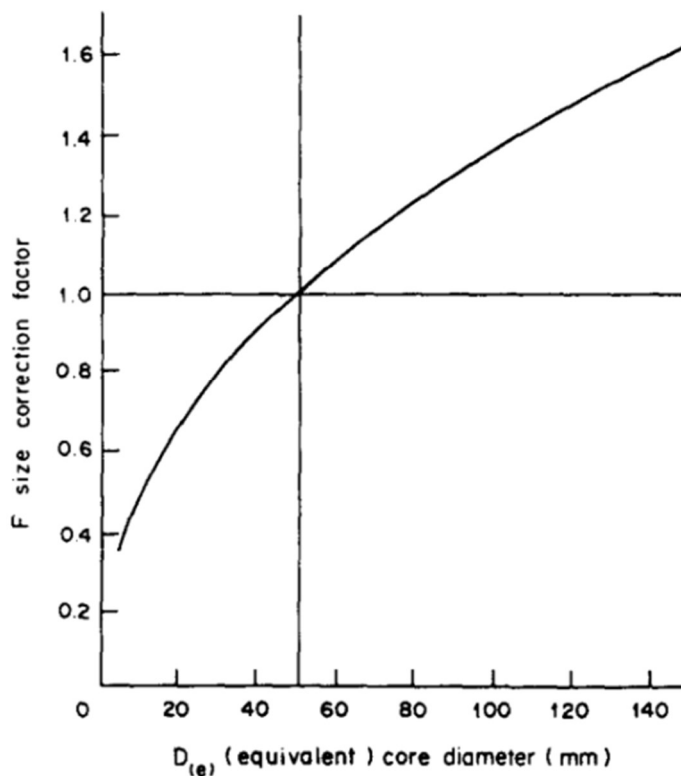
$$F = \left(\frac{D_e}{50}\right)^{0.45} \quad (4.7)$$

Najpouzdaniji način korekcije uzoraka je testiranje uzoraka na vrijednosti od D do  $D_e$  te potom prikazati grafički relacije između P i  $D_e^2$ . Ukoliko se koristi logaritamsko mjerilo na obje osi, rezultat je ravna linija, što se može vidjeti na slici 17. Vrijednosti koje značajno odskaku od linije se odbacuju. Vrijednost  $P_{50}$  koja odgovara  $D_e^2 = 2500 \text{ mm}^2$  ( $D_e=50 \text{ mm}$ ) može se dobiti interpolacijom ili ekstrapolacijom [9].



Slika 17: Grafički način određivanja  $I_{s(50)}$  od seta vrijednosti  $D$  do  $D_e$ , čije vrijednosti nisu 50 mm [9]

Ukoliko prošli načini korekcije nisu praktični, primjerice prilikom testiranja jezgre jedne veličine promjera (različitog od 50 mm) ili u slučaju da je dostupno samo nekoliko manjih komada, gdje se vrijednost  $F$  može dobiti na dva moguća načina: grafički (vidljivo na slici 18) ili empirijski.



Slika 18: Dijagram faktora korekcije veličine [9]

Sve navedene korekcije veličine primjenjive su također na stijenske materijale sa svim stupnjevima anizotropije i smjerovima opterećenja.

Za dobivanje srednje vrijednosti  $I_{s(50)}$ , od ukupnog broja ispitivanja se odbacuju dvije najmanje i najveće vrijednosti te ostatak rezultata ulazi u željeni proračun srednje vrijednosti. Ukoliko se radi o manjem broju pokusa, odbacuju se samo jedne najveća i najmanja vrijednost.

Na temelju poznatog indeksa čvrstoće u točki, može se procijeniti i jednoosna tlačna čvrstoće stijenskog materijala ispitivanih uzoraka. Standardno se uzima da je ona prosječno, ovisno o vrsti stijene, 20 do 25 puta veća od indeksa čvrstoće u točki. Ispitujući razne vrste intaktne stijene taj raspon se povećao na 15 do 50 puta veću vrijednost od indeksa čvrstoće u točki, pogotovo kod anizotropnih stijena [9, 11].

S obzirom na činjenicu da je jednoosna tlačna čvrstoća jedno od svojstava intaktne stijene koje se koristi u većini proračuna, vremenom je nastala potreba za određivanjem međuovisnosti između mehaničkih i fizikalnih svojstava materijala kako bi se jedna značajka mogla procijeniti na temelju vrijednosti druge značajke. Mnogi znanstvenici su se bavili mogućnošću procjene vrijednosti UCS na temelju vrijednosti drugih svojstava intaktne stijene, u početku pomoću jednostavnijih izraza, a u novije doba i sve kompliciranijim metodama procjene. Dobar primjer navedene metode su upravo jednadžbe jednostruke regresije. U navedene jednadžbe se ubrajaju relacije koje služe procjeni vrijednosti UCS, kao zavisne varijable, na osnovi ispitane vrijednosti drugog svojstva koje predstavlja nezavisnu varijablu. U tablici 5 su prikazane jednadžbe jednostruke regresije različitih autora koje procjenjuju vrijednost UCS na temelju poznate vrijednosti indeksa čvrstoće u točki [13].

Tablica 5: Empirijski izrazi za vrijednost UCS dobivenu preko indeksa čvrstoće u točki [13]

Jednadžba	Vrsta stijene	Autori
$UCS = 15,3 I_{s(50)} + 16,3$	sve stijene	[14]
$UCS = 16 I_{s(50)}$	sedimentne stijene	[15]
$UCS = (20 \text{ do } 25) I_{s(50)}$	sve stijene	[9]
$UCS = (\text{od } 14,5 \text{ do } 27) I_{s(50)}$	vapnenac	[16]
$UCS = 24,4 I_{s(50)}$	čvrste stijene	[17]
$UCS = 3,86 I_{s(50)}^2 + 5,65 I_{s(50)}$	slabe stijene	[18]
$UCS = 7,3 I_{s(50)}^{1,71}$	vapnenac, lapor, pješčenjak	[19]
$UCS = 24,8 I_{s(50)} - 39,6$	stijene s $n < 1\%$	[20]
$UCS = 10,2 I_{s(50)} + 23,4$	stijene s $n > 1\%$	[20]
$UCS = 10,58 I_{s(50)}^{1,14}$	sve stijene	[21]
$UCS = 10,46 I_{s(50)}^{1,12}$	sedimentne stijene	[21]
$UCS = 6,65 I_{s(50)}^{1,34}$	magmatske stijene	[21]
$UCS = 18,15 I_{s(50)}$	metamorfne stijene	[21]

Osim preko indeksa čvrstoće u točki, poznati su i empirijski izrazi za vrijednost UCS dobivenu preko poznate vrijednosti poroznosti (tablica 6.)

Tablica 6: Empirijski izrazi procjene vrijednosti UCS na temelju poznavanja vrijednosti poroznosti [13]

Jednadžba	Vrsta stijene	Autori
$UCS = 183 - 16,55 n$	granit	[22]
$UCS = 74,4 * e^{-0,04n}$	pješčenjak	[23]
$UCS = 210,1 * e^{-0,821 n}$	šejl, prahovnjak, glinjak	[24]
$UCS = 273,1 * e^{-0,076 n}$	porozna kreda	[25]
$UCS = 195,0 * e^{-0,21 n}$	pješčenjak	[26]

Osim procjene jednoosne tlačne čvrstoće, može se procijeniti i jednoosna vlačna čvrstoća, po izrazu [12]:

$$\sigma_T = 0.8 \cdot I_{S(50)} \quad (4.8)$$

### 4.3 Schmidtov čekić

Schmidtov čekić, drugog naziva sklerometar, je originalno konstruiran 1948. godine kao aparat za nerazorno ispitivanje čvrstoće betona i to na mjestu njegove ugradnje. Jedna je od najčešćih metoda upotrebljivanih u ovu svrhu, koja se provodi prema normi HRN-EN-12504-2. Na slici 19 se može vidjeti primjerak Schmidtovog čekića.



*Slika 19: Schmidov čekić iz Laboratorija za geotehniku Građevinskog fakulteta u Rijeci*

Ovom metodom moguće je ispitivanje i vertikalnih i horizontalnih ploča, a također i onih nagnutih pod određenim kutom [27].

Miller 1965. daje korelaciju (izraz 4.10) među vrijednostima tvrdoće, koja se dobije ispitivanjem Schmidovim čekićem te ispitivanjem tlačne čvrstoće stijenskog materijala. Time je utvrđeno da se dobiju bolje korelacije u slučaju da se vrijednost odskočne tvrdoće pomnoži s gustoćom materijala.

$$\log_{10} JCS = 0.00088(\gamma)(R) + 1.01, \quad (4.10)$$

gdje je R odskočni broj, JCS tlačna čvrstoća uzorka, a  $\gamma$  jedinica težine intaktne stijene [ $\text{kN/m}^3$ ] [28, 29].

Od tada se metoda popularizirala i u drugim područjima, kod ispitivanja drugih materijala (poput ugljena ili drugih vrsti stijenskog materijala). Čekić se sastoji od utega kod kojeg je u opruzi akumulirana energija. On udara u čelični klip koji treba biti u kontaktu s površinom materijala koji se ispituje. Mjeri se odskočna tvrdoća materijala na način da se prati vrijednost odskoka samog utega nakon udara i to u odnosu na njegovu startnu poziciju [30].

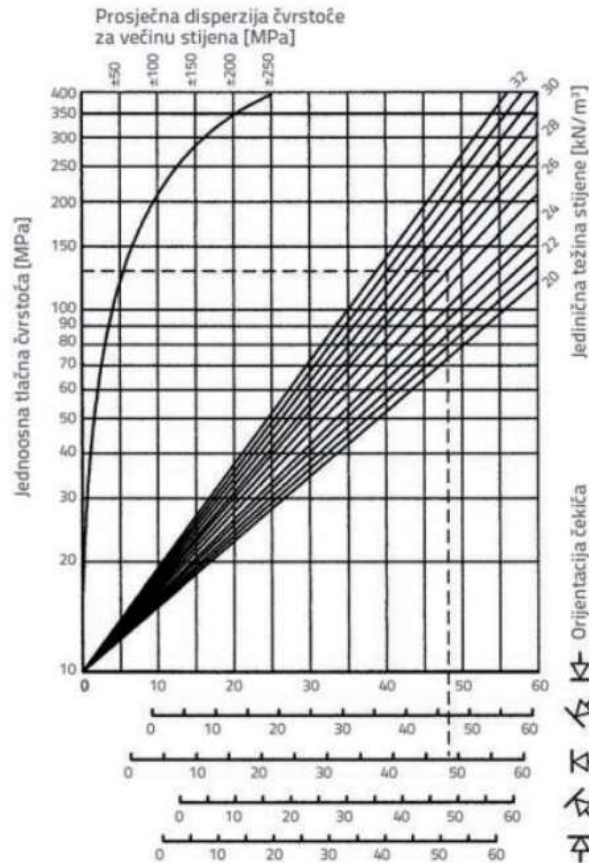
Više je vrsti Schmidovog čekića, a najčešće se koristi L-tip koji ima energiju udara od 0.735 Nm kao i N-tip sa svojim energijom udara od 2.207 Nm.

Testiranje započinje provjerom ispravnosti čekića na metalnom kalibratoru. Površine za ispitivanje moraju biti čiste, suhe i ravne, a ukoliko ih nema, potrebno je čišćenjem, sušenjem i brušenjem dovesti ih u takvo stanje. Ispitivani uzorci se trebaju potom pričvrstiti na kruto postolje da bi se zaštitili od bilo kakvih pomaka i vibracija prilikom provedbe testiranja.

Od svih odskoka odredi se njihova srednja vrijednost te se od tako dobivenog skupa odbacuju odskoci koji od te vrijednosti odudaraju za više od 4 jedinice [30]. Ukoliko se dogodi da broj odskoka koji su odbačeni prelazi 30%, od sveukupnog broja odskoka, ispitivanje se odbacuje. Vrijednosti odskoka mogu varirati u rasponu između 10 i 60. Manje vrijednosti odgovaraju slaboj stijeni, dok povećanjem vrijednosti raste i čvrstoća same stijene.

Korekcijski faktor se dobije na temelju vrijednosti odskoka te dobivene srednje vrijednosti od ukupno 10 ispitivanja na čeličnom nakovnju, koji služi za kalibraciju. Potrebno je napraviti barem 20 ispitivanja na svakom odabranom uzorku materijala. Važno je pripaziti da se prilikom provođenja testiranja pomiče mjesto udara čekićem, minimalno za vrijednost dijametra čeličnog klipa. Da bi se u konačnici dobila vrijednost odskočne tvrdoće ispitivanog materijala, potrebno je uzeti srednju vrijednost od 10 većih dobivenih vrijednosti, koja se potom množi s korekcijskim faktorom. Pomoću dobivene vrijednosti i dijagrama (slika 20) dobiva se vrijednost jednoosne tlačne čvrstoće [MPa] [28, 30].





Slika 20: Procjena UCS-a na temelju odskočne tvrdoće [30]

Dobra strana ove metode je u njenoj brzini izvođenja kao i u nerazornom načinu ispitivanja. Također, Schmidov čekić je uređaj malih dimenzija te je lako prenosiv, što mu daje mogućnost i laboratorijskih, ali i *in situ* ispitivanja. Najveća mana ovakve metode bi bila to što su dobiveni rezultati dobar pokazatelj samo stanja površinskog sloja, do cca 30 mm dubine, ne daju podatke o dubinskim slojevima stijenskog materijala [28, 30].

#### 4.4 Terenska procjena

Jednoosna tlačna čvrstoća može se odrediti na terenu i pomoću alata kao što su džepni nožić ili geološki čekić, a kod mekih stijena i glina čak i noktom ili palcem. Klasifikacija, s obzirom na lakoću prodiranja i urezivanja površine stijene, se može vidjeti u tablici 7.

Iako je metoda jednostavna, jeftina i brza, u prevelikoj mjeri se oslanja na subjektivnost, iskustvo i geotehnička znanja ispitivača. Druge već opisane metode poput Point load testa ili Schmidtovog čekića su se kroz vrijeme pokazale pouzdanijim za korištenje.

Tablica 7: Terenska procjena jednoosne tlačne čvrstoće [31]

Grupa	Opis	Terenska identifikacija	Jednoosna tlačna čvrstoća (MPa)	
tlo	S1	vrlo meka glina	lako prodiranje od nekoliko inča rukom	<0,025
	S2	meka glina	lako prodiranje od nekoliko inča palcem	0,025-0,05
	S3	čvrsta glina	može se prodrijeti nekoliko inča palcem sa srednjim naporom	0,05-0,10
	S4	kruta glina	lako urezivanje palcem, ali prodiranje samo uz veliki napor	0,10-0,25
	S5	vrlo kruta glina	lako urezivanje noktom	0,25-0,50
	S6	tvrdna glina	poteškoće prilikom urezivanja noktom	>0,50
stijena	R0	ekstremno slaba stijena	urezivanje noktom	0,25-1,0
	R1	vrlo slaba stijena	drobljenje uslijed jakog udarca geološkim čekićem, može se guliti džepnim nožićem	1,0-5,0
	R2	slaba stijena	poteškoće prilikom guljenja džepnim nožićem, plitka urezivanja sačinjena jakim udarcima geološkim čekićem	5,0-25
	R3	srednje čvrsta	stijena ne može se zagrebat i guliti džepnim nožićem, uzorak se raspucava uslijed jednog jakog udarca geološkim čekićem	25-50
	R4	čvrsta stijena	potreban više nego jedan udarac geološkog čekića da bi se uzorak raspuknuo	50-100
	R5	vrlo čvrsta stijena	potrebni mnogi udarci geološkog čekića da bi se uzorak raspuknuo	100-250
R6	ekstremno čvrsta stijena	uzorak je moguće otkinuti jedino pomoću geološkog čekića	>250	

## 5 ISPITIVANJA VAPNENACA

### 5.1 O vapnencima

Vapnenci čine sedimentnu skupinu stijena. Sedimentne stijene pokrivaju više od 50% Zemljine površine što im daje na temeljnoj važnosti u raznim aspektima svakodnevnog života, od agrokulture do temelja građevine. Sedimentne stijene nastaju procesima taloženja, na dva načina. Jedan od načina je trošenjem stijena te taloženjem klasta u moru ili na kopnu, nakon čega dolazi do procesa litifikacije u kojem nastaju čvrste sedimentne stijene iz nevezanih sedimenata. Drugi način nastajanja sedimentih stijena je tako da se izlučuju minerali direktno iz vodene otopine (jezera, mora, rijeka itd.), što se može odviti organskim ili anorganskim procesima [28, 6].

Vapnenac je jedna od vrsta karbonatne sedimentne stijene koja se sastoji od minimalno 50% minerala kalcita, odnosno kalcijevog karbonata ( $\text{CaCO}_3$ ), uz primjese poput gline, kremenca, turmalina, hematita, limonita i mnogih drugih. Može nastati na jedan od dva načina: izlučivanjem kalcita (direktno iz morske vode) ili biogenim procesima (sami organizmi u moru ugrađuju kalcit u skelete). Vrste vapnenaca se međusobno razlikuju po načinu postanka. Stijenu najčešće karakterizira izražena slojevitost [28, 6].

Obično se sastoji od fosila te fragmenata školjaka, koji često budu vidljivi golim okom. Vremenom, tijekom većih geoloških događaja, se naslage vapnenaca mogu podvrgnuti metamorfozi koja rezultira rekristalizacijom u mramor. U tablici 8 su vidljiva prosječna mehanička, fizikalna i termalna svojstva vapnenca kao stijene.

Tablica 8: Svojstva vapnenaca [32, 33]

Svojstvo	Opis svojstva	
Fizikalna svojstva	Boja	Pretežno svijetlije boje, od nijansi sive do žućkaste. Čisti vapnenac je bijele boje, kemijske primjese i atmosferilije mogu to promijeniti vremenom. Minerali željeza daju žućkastu do crvenkaste boje, a ugljevite tvari od sive do crne.
	Tekstura	Klastičan ili neklastičan
	Veličina zrna	Varijabilno, klasti dolaze u raznim veličinama.
	Gustoća	1,29-2,92 g/cm <sup>3</sup>
	Proširenje pod utjecajem vlage	0,0028 %
	Poroznost	2,6-20 %
	Propusnost	10 <sup>-10</sup> - 10 <sup>-3</sup> [m/s]
Mehanička svojstva	Tvrdoća (Shore H)	10 - 60
	Tvrdoća (Mohs)	2 - 5
	Abrazivna tvrdoća	2 - 24
	Vlačna čvrstoća	5 - 25 MPa
	Modul elastičnosti	10 - 80 GPa
	Modul loma	0,00340 - 0,0359 GPa
	Posmična čvrstoća	3 - 36 MPa
	Tlačna čvrstoća	13,8 - 255 MPa
Termalna svojstva	Specifični toplinski kapacitet	0,5 - 1,86 J/g °C
	Toplinska vodljivost	0,8 - 3,3 W/m K



Vapnenci, koji čine geološku građu Republike Hrvatske, su nastali kroz geološko vrijeme od više od sto milijuna godina, iz toplog praocenana Tethys. Kroz geološku prošlost organizmi su u svoje skelete ugrađivali  $\text{CaCO}_3$  dobiven iz zasićene morske vode. Ugibanjem organizama su se njihovi skeleti, izgrađeni od kalcita, taložili i akumulirali na morskome dnu. Te naslage su kroz godine postajale karbonatni muljevi. Taloženjem većeg broja novih naslaga i dijagenozom su se, kroz geološko vrijeme, karbonatni muljevi počeli pretvarati u karbonatnu stijenu tj. vapnenac. Takvi biogeni vapnenci u sebi sadrže mnoštvo fosila poput skeleta i ljušturica izumrlih organizama. Najpoznatiji vapnenci bogati fosilima u Hrvatskoj su foraminiferski vapnenci. Većina stijena ima granuliranu teksturu, sastavna zrna se kreću veličinom od 0.001 mm do okom vidljivih čestica [34, 6].

Vremenske prilike, a pogotovo atmosferilije, dovode do degradacije izgleda, strukture i čvrstoće vapnenca. Kiša, snijeg, vjetar, promjene niske i visoke temperature te atmosferski zagađivači djeluju i pojedinačno, ali najčešće u kombinaciji jedan s drugim. Kišnica, pogotovo u kombinaciji s atmosferskim plinovima koji mogu rezultirati kiselom kišom, dovodi do otapanja vapnenca te ulaska veće količine soli u dublje strukturne dijelove stijene. Temperatura utječe na stopu propadanja i na migraciju stijena, kao i na obrasce migracije same soli unutar stijene. Budući da je karbonatna stijena, vapnenac poprilično dobro upija vodu te je vrlo reaktivan pri izloženosti kiselinama pa čak i blagoj kiseloj kišnici.

Erozija kod vapnenaca može biti rezultat već opisivanih načina trošenja stijene ili može biti lokalizirani problem prilikom određene izloženosti ili rukovanja. Vjetar može istrošiti određene dijelove stijene, ovisno o smjeru puhanja. Jedna od rijetkih učinkovitih načina za rješavanje ovog problema je uređenja krajolika biljkama.

Neke od najčešćih vrsta vapnenaca su vidljive u tablici 9 zajedno sa njihovim karakteristikama.

Tablica 9: Vrste vapnenaca [35, 36]

Naziv	Opis	Slika
Kreda	<p>Jedna od vrsta vapnenca što nastaje od nakupina fosilskih vapnenačkih ostataka ljuštura organizama iz mora, npr. foraminifera. Također, može nastati od ostataka morskih algi. Kreda čini trošnu vrstu vapnenca. Ima finu teksturu, poprilično se lako drobi i mrvi te je najčešće bijele ili sive boje.</p>	
Kristalni vapnenac (mramor)	<p>Proces nastanka mramora počinje tako da se vapnenac podvrgne toplini ili kemijskoj reakciji, gdje se kalcit u stijeni se počinje transformirati. Kalcijev karbonat se u stijeni počinje tada kristalizirati u fino zrnate kristale kalcita. Vremenom, kristali kalcita se povećavaju i postaju dovoljno veliki da budu vidljivi golim okom. Upravo to daje karakteristični izgled mramoru.</p>	

## Dolomit

Stijena koja je sastavljena pretežno od kalcita, ali se dio tog kalcita pretvara u dolomit u procesu dolomitizacije.


Dolomit nastaje tako da se kalcit ( $\text{CaCO}_3$ ) u karbonatnim sedimentima ili vapnencu modificira podzemnom vodom bogatom magnezijem. Upravo magnezij dozvoljava pretvorbu iz kalcita u dolomit ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ). Ta kemijska reakcija mijenja u potpunosti vapnenac u dolomiti ili samo djelomično, na način da tvori dolomitni vapnenac.



## Fosilni vapnenac

Vrsta vapnenca koja sadrži fosile vidljive golim okom. Čine ih beskrležnjaci poput mekušaca, puževa, koralja, krinoida... To su fosili od školjaka i kostura koji se i inače pretežno nalaze u mnogim vrstama vapnenaca. Upravo zbog toga su posebno zanimljivi paleontolozima, pomoću kojih oni mogu ispitati fosile i odrediti geološku starost stijene.



<p>Litografski vapnenac</p>	<p>Litografski vapnenac je vrsta vapnenca koja čini gustu stijenu ujednačene i vrlo fine veličine zrna. Javlja se u tankim slojevima, gdje se lako odvajaju i tvore vrlo glatku površinu.</p>	
<p>Oolitski vapnenac</p>	<p>Ooliti čine manje klaste kalcijevog karbonata veličine pijeska, jajastog ili sferičnog oblika. Nastaju koncentričnim nakupljanjem slojeva kalcijevog karbonata oko jezgre, koju može činiti zrno pijeska, fragment školjke ili fragment koralja.</p>	
<p>Travertin</p>	<p>Travertin nastaje na mjestima gdje termalna alkalna voda, napunjena otopljenim plinovima i mineralima, izlazi na površinu.</p>	

Vapnenac je stijena s veoma raznolikom upotrebom. Naspram drugih vrsta, jedna je od najsvestranijih i najviše upotrebljivanih vrsta stijene. Intenzivno se koristi u cestogradnji te kao materijal u agregatu i cementu. Vapnenac je izvor vapna, odnosno kalcijevog oksida, koji se koristi u proizvodnji čelika, papira, plastike i stakla, rudarstvu, obradi i pročišćavanju vode... Peče se u peći sa zdrobljenim škriljavcem i pijeskom te melje u prah koji će se stvrdnuti i tvoriti cement, kada se pomiješa s vodom i stvrdne. Ako se kalcijev karbonat zagrije na visokoj temperaturi u peći, kao proizvod će nastati plin ugljični dioksid (koji se ispušta u atmosferu) te



kalcijev oksid (CaO). Kalcijev oksid služi za neutralizaciju kiseline te se u tu svrhu i koristi u kemijskoj industriji, ali još i kao sredstvo za obradu tla u poljoprivredi [34, 6].

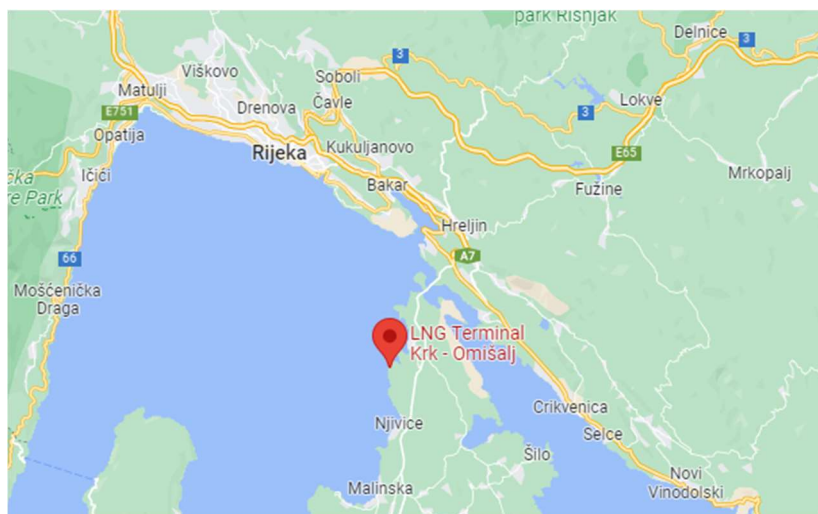
Određene vrste vapnenaca se dobro ponašaju u ovim slučajevima jer su guste i čvrste stijene s malom količinom pora. Upravo ta svojstva im omogućuju otpornost na abraziju te smrzavanje i odmrzavanje. Vapnenac često nema sva ta svojstva te bi u njegovu zamjenu bolje uskočila tvrđa silikatna stijena, ali njega je lakše iskopavati, ne zahtjeva istu količinu opreme, drobilica, vozila za transport itd. Vapnenac je također veoma rasprostranjena vrsta stijene, dok su druge čvršće stijene često predaleko od gradilišta, što nije ekonomski isplativo.

Ova sedimentna stijena je veoma zanimljiva i paleontolozima jer je bogata fosilnim sadržajem, što im daje informacije o zemljinom razvoju i geološkom postanku stijene.

Naširoka mu je primjena u arhitekturi kao ukrasna obloga, podne pločice, gazište za stepenice, prozorske klupice itd. Nije naročito popularan materijal u kiparstvu zbog svoje poroznosti i mekoće [34, 6].

## 5.2 Područje istraživanja i terenska ispitivanja

Uzorci stijene uzeti su na lokaciji spremnika za ukapljeni prirodni plin, na otoku Krku u administrativnoj jedinici općine Omišalj, u sklopu bivšeg postrojenja „DINA Omišalj“. Omišalj se nalazi na sjeverozapadnom dijelu otoka Krka, na području gdje se sami otok najviše približava kopnu, kao što se može vidjeti na slici 21. Naselje se izdiže nad okolnim prostorom Kvarnera, na strmoj stijeni.



Slika 21: Lokacija LNG terminala

Geološku građu kvarnerskog područja pretežno čine vapnenci donje krede, gornjokredni vapnenci, prijelazne kredne karbonatne breče, gornjokredni rudistni vapnenci te dolomiti. Od paleogenskih naslaga zastupljene su siliciklastične naslage (fliš), karbonatne breče te foraminiferski vapnenci. Dominiraju karbonatne stijene, a ograničena je rasprostranjenost siliciklastičnih stijena. Cijelo područje Kvarnera je imalo je kroz povijest veoma buran i dinamičan geološki razvoj. Upravo to je uzrok nastanku složenog sklopa čija se svojstva i značajke često veoma razlikuju čak i na malim udaljenostima. Proces rasjedanja i boranja stijenske mase stvorili su različite sustave genetskih sustava pukotina čija veličina dijeli karbonatnu stijenu na monolite centimetarskih, pa čak i metarskih razmjera. Stijenske mase su jače zdrobljene uslijed velikih smičućih rasjeda te tektonskih zona koje su izraženije i pretežno navlačne. Kod karbonatnih stijene, pretežno kod vapnenaca, javljaju se zone crvenice. Fliške stijenske mase su podložne ubrzanim procesima trošenja, stoga su uglavnom prekrivene glinovitim eluvijalnim tvorevinama. Trenutni oblik stjenovitih obala od karbonata je posljedica potopljenog krškog reljefa nastalog zbog rasta razine mora. U Kvarnerskom zaljevu vjetrovi su pretežno umjereni i promjenjivog smjera te je njihovo djelovanje na geološku građu kroz vrijeme slabo izraženo. U toj činjenici se očituje rezistentnost litološkog sastava te stupnja oštećenosti i okršenosti u tektonskom smislu. Najrezistentniji su se pokazali čisti vapnenci te nešto manje dolomitični vapnenci, a potom i karbonatne breče, dok je najmanje rezistentan fliš. Današnji stjenoviti oblik karbonatne obale je direktna posljedica potopljenog krškog reljefa nastalog pri rastu razine mora [37].

### *5.2.1 Lokacija LNG terminala u Omišlju*

Uzorci korišteni u PLT ispitivanju rezultat su provedenih istraživanja temeljnog tla prilikom gradnje LNG terminala u Omišlju. Istraživanja su imala za cilj ispitati stanje temeljnog tla, njegovu geološku građu, ustvrditi mehanička i fizikalna svojstva stijenske mase u onim predjelima gdje se očekuje utjecaj same izgradnje planiranih građevina. Područje zahvata se nalazi na seizmotektonski aktivnoj zoni. Temeljno tlo čini strukturno složen tektonski sklop, dok je karbonatna stijenska masa okršena čak i nekoliko desetaka metara ispod površine terena. Istraživanja su imala za cilj odrediti nepovoljne zone te stijenske mase.

U sklopu ispitivanja temeljnog tla, također su provedena i seizmološka istraživanja, koja su činila sljedeći radovi: proračun maksimalne akceleracije (za osnovnu stijenu), proračun intenziteta potresa, procjena pojave tsunamija, procjena amplifikacijskih svojstava uz određivanja i opis prostornih, vremenskih i energetskih značajki lokalne seizmičke aktivnosti [38].

Na kopnenom dijelu LNG terminala, tijekom i nakon izvedbi istraživačkih bušotina, provedena su sljedeća istraživanja: inženjerskogeološka determinacija jezgre s proračunom geološkog indeksa čvrstoće, fotografiranje same jezgre, odabir uzoraka za provedbu laboratorijskih ispitivanja te izrada geotehničkog profila svih bušotina.

Prema dobivenim koordinatama bušotina i piezometra izvršeno je geodetsko iskolčenje točaka na terenu, prema važećem državnom koordinatnom sustavu HTRS96/TM (E,N,H), kao što se može vidjeti na slici 22 [38].



*Slika 22: Geodetsko iskolčenje točaka na terenu [38]*

Istražno bušenje je provedeno u razdoblju od 01.12.2015. do 09.02.2016. Izvedene su sveukupno 23 istražne bušotine (11 na svakom spremniku) i jedan piezometar između spremnika. Dubina bušotina je 35,9 do 60 metara, dok je ukupno izvedeno 1035,6 metara bušenja. Za bušenje u osnovnoj stijeni korištene su vodene isplake, dok je izvedba bušenja u pokrivaču, odnosno nasipu, provedena na suho, uz korištenje zaštitnih čeličnih kolona.

Prilikom bušenja korišten je wire-line pribor: HQ;  $\Phi$  96/63,5 mm s dijamantnom krunom i PQ;  $\Phi$  122,6/85 mm s dijamantnom krunom. Kod takve vrste bušenja bušaće cijevi također služe i za zacjevljenje bušotine. Pomoću specijaliziranog pribora, čelične sajle i vitla se jezgrena cijev vadi i umeće u bušotinu kroz bušaće cijevi. Prilikom toga nije potrebno vaditi sav pribor. Wire-line tehnologija bušenja je osigurala bolju kvalitetu te veću brzinu bušenja od klasično korištene metode. Prilikom klasičnog bušenja korišten je pribor: jednostruke jezgrene cijevi s vidija i dijamantnom krunom promjera  $\Phi$  146 mm, 131 mm, 116 mm i 101 mm i dvostruke jezgrene cijevi s vidija i dijamantnom krunom promjera  $\Phi$  131 mm, 116 mm i 101 mm [38].

U tablici 10 mogu se vidjeti podaci o svim istražnim bušotinama. Plavom bojom označene su bušotine čiji određeni uzorci su odabrani za laboratorijsko ispitivanje u ovome radu.

Tablica 10: Podaci o izvedenim istražnim bušotinama [38]

Oznaka bušotine	Datum početka bušenja	Datum završetka bušenja	Koordinata „E“	Koordinata „N“	Kota ušća (m n.m.)	Dubina (m)
B-12-01	01.12.15.	11.12.15.	346254,84	5008275,47	9,17	40,0
B-12-02	08.12.15.	15.12.15.	346240,74	5008343,41	9,29	40,0
B-12-03	14.12.15.	28.12.15.	346214,67	5008329,29	9,45	35,9
B-12-04	22.01.16.	28.01.16.	346266,79	5008357,56	9,44	40,0
B-12-05	24.01.16.	27.01.16.	346295,04	5008305,46	9,06	40,0
B-12-06	29.12.15.	18.01.16.	346268,99	5008291,34	9,35	40,0
B-12-07	11.12.15.	17.12.15.	346228,84	5008303,24	9,45	40,0
B-12-08	28.12.15.	30.12.15.	346280,92	5008331,50	9,44	40,0
B-12-09	01.02.16.	09.02.16.	346246,09	5008312,60	9,43	60,0
B-12-10	05.01.16.	13.01.16.	346254,88	5008317,37	9,46	58,0
B-12-11	17.12.15.	28.12.16.	346263,67	5008322,14	9,38	60,0
B-12-12	22.01.16.	26.01.16.	346359,45	5008186,77	9,61	40,0
B-12-13	01.12.15.	04.12.16.	346319,25	5008156,78	9,41	50,0
B-12-14	04.12.15.	11.12.15.	346305,15	5008224,72	9,27	40,0
B-12-15	04.12.15.	09.12.15.	346333,39	5008172,64	9,46	41,7
B-12-16	29.12.15.	13.01.16.	346279,08	5008210,60	9,10	40,0
B-12-17	14.01.16.	21.01.16.	346325,51	5008235,11	9,08	40,0
B-12-18	12.12.15.	17.12.15.	346293,24	5008184,55	9,25	40,0
B-12-19	26.01.16.	29.01.16.	346337,72	5008208,21	9,39	40,0
B-12-20	17.12.15.	30.12.15.	346310,50	5008193,91	9,37	60,0
B-12-21	30.01.16.	09.02.16.	346319,28	5008198,68	9,37	60,0
B-12-22	21.01.16.	26.01.16.	346328,07	5008203,45	9,26	60,0
P-12-01 (piezometar)	20.01.16.	23.01.16.	346287,06	5008258,04	9,31	30,0
Ukupno						1035,6

Izbušena se jezgra deponirala u prikladne sanduke dužine od 1 metra, na način da duljina jezgre također čini 1 metar. Uzorci jezgre su slagani u sanduk redom kako su vađeni, s lijeva na desno te odozgo prema dolje, uz prikladno označavanje jezgre nazivom bušotine i dubinom (slika 23) [38].

Naziv  
bušotine

Dubina [m]

Fotografija sanduka za jezgru

a)

B-12-05 25,30 – 25,55



b)

B-12-06 35,64 – 36,00



c)

B-12-08 32,70 – 33,00



d)

B-12-09 47,10 – 47,31



e)

B-12-10 27,20 – 27,50



f)

B-12-11 41,27 – 41,54



g)

B-12-12 38,20



h)

B-12-16 16,00 – 16,35



i)

B-12-19 20,30 – 20,60



j)

B-12-20 30,20 – 30,46



k)

B-12-21 38,10 – 38,30



Slika 23: Uzorci ispitivane jezgre u sanduku sa oznakama bušotine i dubine [38]

Gore navedene uzorke moguće je vidjeti izdvojene, prije pripreme za ispitivanje, u Laboratoriju za geotehniku Građevinskog fakulteta u Rijeci, na slici 24.



Slika 24: Uzorci intaktne stijene korišteni pri izradi diplomskog rada, prije njihove pripreme za ispitivanje



U nastavku se mogu vidjeti opisi stijenskih materijala i karakteristične značajke svake od bušotina čiji su uzorci uzeti za laboratorijsko ispitivanje [38].

#### B-12-05

- Nasip (pokrivač antropogeni) - heterogeni nasip od blokova i kršja čija matična stijena je sitnokristalasti vapnenac sive boje, sačinjen od različitih omjera krupnozrnatih (87,19%) i sitnozrnatih (12,81%) materijala.
- Površinska zona trošenja stijenske podloge – sitnokristalasti vapnenac sive boje razlomljen na fragmente veličine od nekoliko milimetara do više od  $\Phi$  bušenja.
- Stijena podloge – u gornjim slojevima ju čini sitnokristalasti vapnenac sive boje, a u donjim sitnokristalasti brečasti vapnenac sive boje. Prožeti su mjestimično kalcitnim žilima koje se povećavaju dubinom (2-5 mm). Sadrži 4 različita seta diskontinuiteta sa različitim nagibima te zijeovima širine 0,1-1 mm, a stijenske pukotina su pretežno hrapave i umjereno rastrošene.
- Trošna stijena podloge – u gornjim slojevima ju čini sitnokristalasti vapnenac sive boje, a u donjim sitnokristalasti brečasti vapnenac sive boje. Razlomljena je na fragmente veličine od nekoliko milimetara do više od  $\Phi$  bušenja. Fragmenti su tupobridni s mjestimičnim prevlakama od gline (gline iste boje, crvenkastosmeđe kalcitizirane, žućkastosmeđe kalcitizirane), ali i oštrobridni.

#### B-12-06

- Nasip (pokrivač antropogeni) - heterogeni nasip od blokova i kršja čija matična stijena je sitnokristalasti brečasti vapnenac sivosmeđe i sive boje, sačinjen od različitih omjera krupnozrnatih (79,86%) i sitnozrnatih (20,14%) materijala.
- Površinska zona trošenja stijenske podloge – klastpotporna breča sive do sivoroze boje razlomljena na fragmente veličine od 1 cm do više od  $\Phi$  bušenja. Fragmenti su tupobridni s mjestimičnim prevlakama od crvenkastosmeđe kalcitizirane gline, ali i oštrobridni.
- Stijena podloge – sitnokristalasti brečasti vapnenac sive boje prožet mjestimično kalcitnim žilima koje se povećavaju dubinom (3-5 mm). Sadrži 3 različita seta

diskontinuiteta sa različitim nagibima te zijevara širine 0,1-1 mm, a stijenske pukotina su pretežno hrapave i umjereno rastrošene.

- Trošna stijena podloge – brečasti vapnenac sivosmeđe i sive boje. Razlomljena je na fragmente veličine od 0,5 cm do više od  $\Phi$  bušenja. Fragmenti su tupobridni s mjestimičnim prevlakama od crvenkasto smeđe gline.

#### B-12-08

- Nasip (pokrivač antropogeni) - heterogeni nasip od blokova i kršja čija matična stijena je sitnokristalasti vapnenac sive boje, sačinjen od različitih omjera krupnozrnatih (87,03%) i sitnozrnatih (12,97%) materijala.
- Površinska zona trošenja stijenske podloge – sitnokristalast vapnenac sive boje razlomljen na fragmente veličine od 1 cm do više od  $\Phi$  bušenja. Fragmenti su tupobridni s mjestimičnim prevlakama od crvenkastosmeđe kalcitizirane gline, ali i oštrobriđni.
- Stijena podloge – sitnokristalasti vapnenac sive boje prožet mjestimično kalcitnim žilima koje se povećavaju dubinom (3-5 mm) i mjestimično mikritičan. Sadrži 3 različita seta diskontinuiteta sa različitim nagibima te zijevara prosječne širine 1-5 mm, a stijenske pukotina su pretežno neznatno hrapave i umjereno rastrošene.
- Trošna stijena podloge – sitno kristalasti vapnenac sive boje. Razlomljena je na fragmente veličine od 3 cm do više od 15 cm bušenja. Fragmenti su tupobridni s mjestimičnim prevlakama od crvenkasto smeđe gline.

#### B-12-09

- Nasip (pokrivač antropogeni) - heterogeni nasip od blokova i kršja čija matična stijena je sitnokristalasti vapnenac sive boje, sačinjen od različitih omjera krupnozrnatih (89,67%) i sitnozrnatih (10,33%) materijala.
- Površinska zona trošenja stijenske podloge – sitnokristalasti brečasti vapnenac tamnosive boje razlomljen na fragmente veličine od 1 cm do 7 cm. Fragmenti su oštrobriđni s mjestimičnim prevlakama od crvenkastosmeđe kalcitizirane gline.
- Stijena podloge – sitnokristalasti brečasti vapnenac tamnosive boje prožet kalcitnim žilima koje se povećavaju dubinom (1-8 mm) te klastpotporna i matrikspotporna breča čija je matična stijena vapnenac svijetlosive i tamnosive boje. Sadrži 3 različita seta diskontinuiteta sa različitim nagibima te zijevara prosječne širine 0,1-1 mm ili <0,1 mm, a stijenske pukotina su pretežno neznatno hrapave i neznatno rastrošene.

- Trošna stijena podloge – sitnokristalasti brečasti vapnenac razlomljen na fragmente veličine od nekoliko cm do više od  $\Phi$  bušenja te breča koja je razlomljena na fragmente veličine 1-9 cm. Fragmenti su tupobridni s mjestimičnim prevlakama od crvenkasto smeđe gline, ali i oštrobriđni.
- Na otprilike 13 m dubine nađena je i kaverna bez ispune, a na otprilike 24 m i 52,70 m dubine moguće kaverne s ispunom od gline i kršja, kao posljedica tehnologije bušenja dolazi do ispiranja jezgre.

#### B-12-10

- Nasip (pokrivač antropogeni) - heterogeni nasip od blokova i kršja čija matična stijena je sitnokristalasti vapnenac sive boje, sačinjen od različitih omjera krupnozrnatih (93,68%) i sitnozrnatih (6,32%) materijala.
- Stijena podloge – sitnokristalasti brečasti vapnenac do vapnenačka breča sivosmeđe boje prožeta kalcitnim žilima koje se povećavaju dubinom (0,5-1 cm) te klastpotporna i matrikspotporna breča čija je matična stijena vapnenac svijetlosive i tamnosive boje. Sadrži do 3 različita seta diskontinuiteta sa različitim nagibima te zijeovima prosječne širine 1-5 mm te 0,1-1 mm, a stijenke pukotina su pretežno hrapave i umjereno rastrošene.
- Trošna stijena podloge – breča razlomljena na fragmente veličine od 1 cm do više od  $\Phi$  bušenja te brečasti vapnenac razlomljen na fragmente veličine od 2 cm do više od  $\Phi$  bušenja. Fragmenti su tupobridni s mjestimičnim prevlakama od crvenkastosmeđe gline te gline iste boje, ali i oštrobriđni.
- Na 57,7 m dubine nađena je i moguća kaverna s ispunom od gline koja je crvenkastosmeđe boje, žitke konzistencije i visoke plastičnosti.

#### B-12-11

- Nasip (pokrivač antropogeni) - heterogeni nasip od blokova i kršja čija matična stijena je sitnokristalasti vapnenac sive boje, sačinjen od različitih omjera krupnozrnatih (86,63%) i sitnozrnatih (13,37%) materijala.
- Površinska zona trošenja stijenske podloge – sitnokristalasti vapnenac sive boje razlomljen na fragmente veličine od 1 cm do više od  $\Phi$  bušenja. Fragmenti su oštrobriđni s mjestimičnim prevlakama od crvenkastosmeđe kalcitizirane gline.

- Stijena podloge – ovisno o dubini: sitnokristalasti vapnenac sivosmeđe boje prožet mjestimično kalcitnim žilama koje se povećavaju dubinom (3-5 mm), sitnokristalasti brečasti vapnenac sivosmeđe boje prožet kalcitnim žilama koje su široke do 10 mm te klastpotporna vapnenačka breča koja je krupnozrnata sa matičnom stijenom od vapnenca tamnosive, sivobijele i sivoroze boje sa zrnom veličine od 0,2 do 10 cm. Sadrži do 3 različita seta diskontinuiteta sa različitim nagibima te zijevima prosječne širine 0,1-1 mm, a stijenske pukotina su neznatno hrapave i umjereno rastrošene.
- Trošna stijena podloge – sitnokristalast vapnenac sive boje razlomljen na fragmente veličine od 2 mm do više od  $\Phi$  bušenja te klastpotporna breča sivosmeđe boje sa zrnom veličine 0,5 do 3 cm, razlomljena na fragmente veličine od 2 cm do više od  $\Phi$  bušenja. Fragmenti su tupobridni s mjestimičnim prevlakama od crvenkastosmeđe gline te gline iste boje, ali i oštrobriđni.
- Na 21 m dubine nađena i kaverna bez ispune

#### B-12-12

- Nasip (pokrivač antropogeni) - heterogeni nasip od blokova i kršja čija matična stijena je sitnokristalasti vapnenac sive boje, sačinjen od različitih omjera krupnozrnatih (78,04%) i sitnozrnatih (21,96%) materijala.
- Površinska zona trošenja stijenske podloge – breča do brečasti vapnenac razlomljen na fragmente veličine od 2 cm do više od  $\Phi$  bušenja. Fragmenti su oštrobriđni s mjestimičnim prevlakama od crvenkastosmeđe kalcitizirane gline i gline iste boje.
- Stijena podloge – ovisno o dubini: krupnozrnata vapnenačka breča, klastpotporna s matičnom stijenom od vapnenca koji je sivobijele, tamnosive i roze boje sa zrnom veličine od 1 do 5 cm, sitnokristalasti vapnenac sive boje prožet mjestimično s kalcitnim žilama. Sadrži do 4 različita seta diskontinuiteta sa različitim nagibima te zijevima prosječne širine 0,1-1 mm, a stijenske pukotina su pretežno neznatno hrapave i neznatno rastrošene.
- Trošna stijena podloge – ovisno o dubini: breča do brečasti vapnenac, razlomljena sa fragmentima od 1 cm do više od  $\Phi$  bušenja, sitnokristalast vapnenac sive boje, razlomljen, sa fregmentima od 1 cm do više od  $\Phi$  bušenja. Fragmenti su tupobridni s mjestimičnim prevlakama od crvenkastosmeđe gline te gline iste boje, ali i oštrobriđni.

## B-12-16

- Nasip (pokrivač antropogeni) - heterogeni nasip od blokova i kršja čija matična stijena je sitnokristalasti brečasti vapnenac sive boje, sačinjen od različitih omjera krupnozrnatih (85,39%) i sitnozrnatih (14,61%) materijala.
- Površinska zona trošenja stijenske podloge – sitnokristalast brečasti vapnenac sive boje razlomljen na fragmente veličine od 2 cm do više od  $\Phi$  bušenja te prožet kalcitnim žilama do 3 mm. Fragmenti su oštrobriđni s mjestimičnim prevlakama od crvenkastosmeđe kalcitizirane gline.
- Stijena podloge – ovisno o dubini: sitnokristalast brečasti vapnenac sive boje, prožet mjestimično kalcitnim žilama do 5 mm, krupnozrnata vapnenačka breča, klastpotporna s matičnom stijenom klasta od vapnenca koji je sive, tamnosive i roze boje s veličinom zrna od 1 do 12 cm. Sadrži do 3 različita seta diskontinuiteta sa različitim nagibima te zijevima prosječne širine 0,1-1 mm, a stijenke pukotina su pretežno neznatno hrapave i rastrošene.
- Trošna stijena podloge – ovisno o dubini: sitnokristalasti brečasti vapnenac sivosmeđe boje s prožetim kalcitnim žilama do 3 mm, razlomljen sa fragmentima od nekoliko mm do više od  $\Phi$  bušenja, sitnokristalast vapnenac sive boje, razlomljen, sa fragmentima od 1 cm do više od  $\Phi$  bušenja, krupnozrnata vapnenačka breča, klastpotporna te prožeta kalcitnim žilama te razlomljena sa fragmentima od 4 cm do više od  $\Phi$  bušenja. Fragmenti su tupobriđni s mjestimičnim prevlakama od crvenkastosmeđe gline te gline iste boje, ali i oštrobriđni.
- Na 11,30 m dubine nađena i kaverna s ispunom od gline i kršja, a kao posljedica tehnologije bušenja je došlo do ispiranja jezgre te na 32,70 m moguća kaverna s ispunom od gline i kršja, a kao posljedica tehnologije bušenja je došlo do ispiranja jezgre

## B-12-19

- 1.nasip (pokrivač antropogeni) – crvenkastosmeđa visokoplastična glina, krutoplastične konzistencije. Udio krupnozrnate frakcije je 3,9%, praha 26,20% te gline 69,90%.
- 2.nasip (pokrivač antropogeni) - heterogeni nasip od blokova i kršja čija matična stijena je sitnokristalasti vapnenac sive boje, sačinjen od različitih omjera krupnozrnatih (79%) i sitnozrnatih (21%) materijala.

- Stijena podloge – sitnokristalast vapnenac sive boje, prožet mjestimično kalcitnim žilama od 3 do 5 mm. Sadrži do 3 različita seta diskontinuiteta sa različitim nagibima te zijeovima prosječne širine 0,1-1 mm, a stijenke pukotina su pretežno neznatno hrapave i umjereno rastrošene.
- Trošna stijena podloge – sitnokristalasti vapnenac sive boje, razlomljen sa fragmentima od nekoliko mm do više od  $\Phi$  bušenja. Fragmenti su oštroidni s mjestimičnim prevlakama od crvenkastosmeđe gline te sivobijele kalcitizirane gline.

#### B-12-20

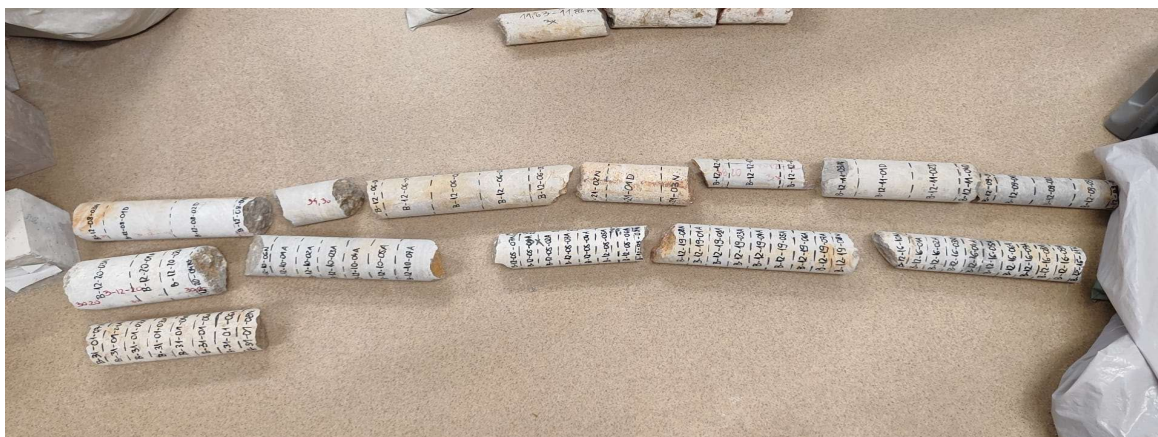
- Nasip (pokrivač antropogeni) - heterogeni nasip od blokova i kršja čija matična stijena je sitnokristalasti vapnenac sive boje, sačinjen od različitih omjera krupnozrnatih (85,17%) i sitnozrnatih (14,83%) materijala.
- Površinska zona trošenja stijenske podloge – sitnokristalast vapnenac sive boje razlomljen na fragmente veličine od 2 cm do više od  $\Phi$  bušenja te prožet kalcitnim žilama do 3 mm. Fragmenti su oštroidni s mjestimičnim prevlakama od crvenkastosmeđe kalcitizirane gline.
- Stijena podloge – ovisno o dubini: sitno do srednje kristalast vapnenac sive boje, prožet mjestimično kalcitnim žilama do 5 mm, brečasti vapnenac sive boje, sitnokristalast i prožet kalcitnim žilama do 5 mm, vapnenačka breča koja je klastopotporna i razlomljena na fragmente veličine od nekoliko cm do više od  $\Phi$  bušenja sa mjestimično prožetim kalcitnim žilama od 5 mm. Sadrži do 3 različita seta diskontinuiteta sa različitim nagibima te zijeovima prosječne širine 0,1-1 mm, a stijenke pukotina su pretežno hrapave i umjereno rastrošene.
- Trošna stijena podloge – ovisno o dubini: sitnokristalasti vapnenac svijetlosive do sive boje, razlomljen s fragmentima od nekoliko mm do više od  $\Phi$  bušenja, sitnokristalasti brečasti vapnenac, prožet kalcitnim žilama te razlomljen na fragmente od 2 cm do više od  $\Phi$  bušenja, vapnenačka breča, klastopotporne i razlomljena na fragmente od nekoliko cm do više od  $\Phi$  bušenja. Fragmenti su oštroidni s mjestimičnim prevlakama od crvenkastosmeđe gline, pomiješani mjestimično s 10-20% visokoplastične gline.

B-12-21

- Nasip (pokrivač antropogeni) - heterogeni nasip od blokova i kršja čija matična stijena je sitnokristalasti vapnenac sive boje, sačinjen od različitih omjera krupnozrnatih (71,07%) i sitnozrnatih (28,93%) materijala.
- Površinska zona trošenja stijenske podloge – sitnokristalast vapnenac sive boje razlomljen na fragmente veličine od nekoliko cm do više od  $\Phi$  bušenja. Fragmenti su oštrobridni i tupobridni s mjestimičnim prevlakama od crvenkastosmeđe kalcitizirane gline.
- Stijena podloge – ovisno o dubini: srednjekristalast vapnenac sive boje, prožet mjestimično kalcitnim žilama do 2 mm., brečasti vapnenac koji je sitnokristalast, tamnosive boje i prožet kalcitnim žilama do 5 mm širine. Sadrži do 3 različita seta diskontinuiteta sa različitim nagibima te zijeovima prosječne širine 0,1-1 mm, a stijenske pukotina su pretežno hrapave i umjereno rastrošene.
- Trošna stijena podloge – sitno do srednjekristalasti vapnenac sive boje, razlomljen s fragmentima od nekoliko mm do više od  $\Phi$  bušenja, sitnokristalasti brečasti vapnenac, prožet kalcitnim žilama te razlomljen na fragmente od 2 cm do više od  $\Phi$  bušenja, vapnenačka breča, klastpotporne i razlomljena na fragmente od nekoliko cm do više od  $\Phi$  bušenja. Fragmenti su oštrobridni s mjestimičnim prevlakama od crvenkastosmeđe gline, pomiješani mjestimično s 10-20% visokoplastične gline.
- Na dubinama od 12,50 m, 15 m, 25,30 m, 28,40 m nađene su moguće kaverne s ispunom od gline i kršja, a kao posljedica tehnologije bušenja je došlo do ispiranja jezgri

### **5.3 Provedba PLT ispitivanja i rezultati**

U Laboratoriju za geotehniku Građevinskog fakulteta u Rijeci provedena su ispitivanja na uzorcima stijene, dobivenih sa lokacije LNG terminala u Omišlju. Uzorke za ispitivanje u PLT uređaju trebalo je pripremiti iz jezgrenog materijala, tako da svojim dimenzijama udovoljavaju zahtjevima norme opisanim u podpoglavlju 4.2. Prvotno su se uzorci mjerili te prikladno označavali i iscertavali, kao priprema za daljnju njihovu obradu (slika 25).



*Slika 25: Označavanje i iscertavanje uzoraka*

Uzorci su se pilom rezali na potrebnu visinu, nakon čega su se po potrebi dodatno brusili kako bi se ostvarila ravnost baze. Iz vapnenačke stijene su vađeni uzorci jezgre čije dubine i oznake mogu biti vidljive u tablici 11.



Tablica 11: Opis ispitivanih uzoraka

Oznaka bušotine	Dubina [m]	Promjer [mm]
B-31-01	9,42 – 9,68	82,5
B-12-16	16,00 – 16,35	74,2
B-12-19	20,30 – 20,60	83,8
B-12-05	25,30 – 25,55	73,74
B-12-10	27,20 – 27,50	84,42
B-12-20	30,20 – 30,46	101,99
B-12-08	32,70 – 33,00	84,36
B-12-06	35,64 – 36,00	84,47
B-12-21	38,10 – 38,30	84,90
B-12-12	38,20	63,09
B-12-11	41,27 - 41,54	84,16
B-12-09	47,10 - 47,31	63,09

Od laboratorijskih ispitivanja provedeno je određivanje indeksa čvrstoće pomoću opterećenja u točki, odnosno Point load test ispitivanje, koje se provodi na istoimenom uređaju. Testiranje se provodi prema ISRM normi iz 1985. godine [8].

### 5.3.1 Dijametralno ispitivanje

Uzorci B-12-08, B-12-06, B-12-21, B-12-12, B-12-11, B-12-09 određeni su za izradu manjih uzoraka, prikladnih za dijametralno ispitivanje. Uzorci su oblikovani u oblik valjka odgovarajućih dimenzija po gore navedenoj normi. Kod ove vrste ispitivanja nije potrebno izričito paziti na paralelnost baza zbog same pozicije u kojoj uzorak ulazi u aparat te smjera u kojem se nanosi sila. Ukupno je ispitano 12 uzoraka, koji su bili opterećivani okomito na položaj jezgre, tako da razmak između kontaktnih šiljaka bude jednak kao promjer uzorka koji

se ispituje. U nastavku u tablici 12 se mogu vidjeti ulazni podaci za provedbu proračuna, dobiveni nakon provedbe ispitivanja.

Tablica 12: Rezultati provedenog dijametralnog ispitivanja

Broj uzorka	Širina [mm]	Visina [mm]	Sila pri lomu [kN]
B-12-06-01D	101.85	75.84	18.78
B-12-06-02D	nepravilni lom		
B-12-06-03D	100.85	80.71	20.07
B-12-09-01D	nepravilni lom		
B-12-09-02D	69.04	62.09	18.28
B-12-09-03D	63.10	60.51	13.07
B-12-21-01D	85.90	79.08	26.11
B-12-11-01D	84.93	80.42	40.14
B-12-11-02D	nepravilni lom		
B-12-08-01D	85.40	81.02	22.02
B-12-08-02D	86.06	79.53	19.66
B-12-12-01D	72.26	60.59	09.61

Nakon provedenog proračuna prema podpodpoglavlju 4.2.5., dobivene su sljedeće vrijednosti vidljive u tablici 13.

Tablica 13: Provedeni proračun nakon dijametralnog ispitivanja

Broj uzorka	L [mm]	D [mm]	P [kN]	De <sup>2</sup> [mm <sup>2</sup> ]	De [mm]	Is [MPa]	F	Is <sub>50</sub> [MPa]	C	UCS [MPa]
B-12-06-01D	101.85	75.84	18.78	5751.71	75.84	3.27	1.21	3.94	24.00	94.52
B-12-06-02D	nepravilni lom									
B-12-06-03D	100.85	80.71	20.07	6514.10	80.71	3.08	1.24	3.82	24.00	91.72
B-12-09-01D	nepravilni lom									
B-12-09-02D	69.04	62.09	18.28	3855.17	62.09	4.74	1.10	5.23	24.00	125.45
B-12-09-03D	63.1	60.51	13.07	3661.46	60.51	3.57	1.09	3.89	24.00	93.35
B-12-21-01D	85.9	79.08	26.11	6253.65	79.08	4.18	1.23	5.13	24.00	123.16
B-12-11-01D	84.93	80.42	40.14	6467.38	80.42	6.21	1.24	7.69	24.00	184.48
B-12-11-02D	nepravilni lom									
B-12-08-01D	85.4	81.02	22.02	6564.24	81.02	3.35	1.24	4.17	24.00	100.04
B-12-08-02D	86.06	79.53	19.66	6325.02	79.53	3.11	1.23	3.83	24.00	91.93
B-12-12-01D	72.26	60.59	9.61	3671.15	60.59	2.62	1.09	2.85	24.00	68.50

S obzirom na pucanje uzoraka nepravilnim lomom, iz daljnjeg proračuna se odbacuju uzorci B-12-06-02D, B-12-09-01D te B-12-11-02D. Slike lomova navedenih uzoraka, neprikladnih za daljnji izračun, može se vidjeti na slici 26.



*Slika 26: Nepravilni lomovi uzoraka u dijametralnom ispitivanju*

Tada preostaje 9 uzoraka te se u tom slučaju odbacuje i uzorak B-12-12-01D zbog dobivene najmanje vrijednosti  $I_{s50}$  od 2,85 te uzorak B-12-11-01D zbog dobivene najveće vrijednosti  $I_{s50}$  od 7,69.

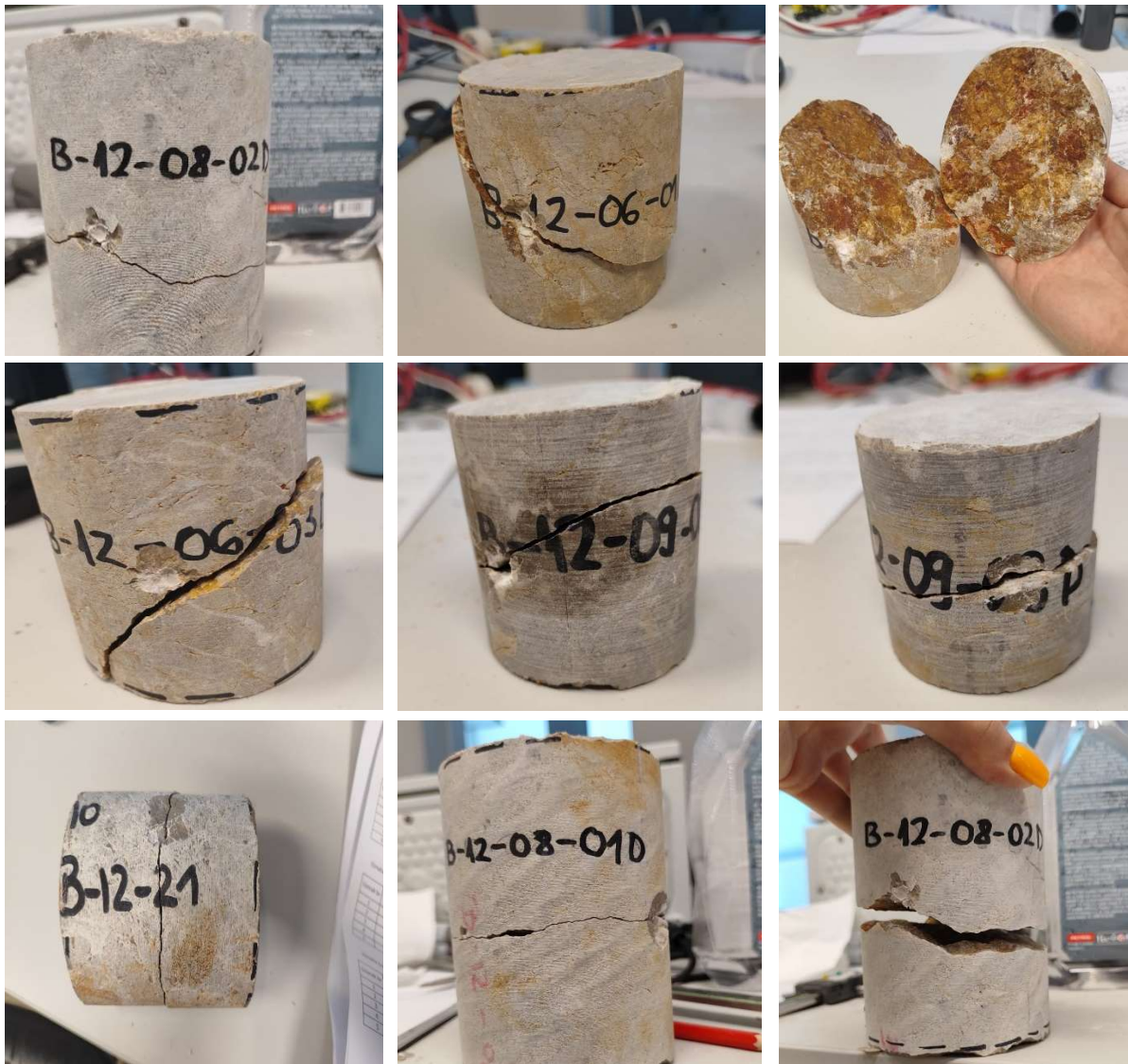
Od preostalih 7 uzoraka dobiva se konačna vrijednost  $I_{s50}$  od:

$$I_{s50} = 3,61 \text{ [MPa]},$$

kao i konačna vrijednost UCS od:

$$UCS = 102,88 \text{ [MPa]}$$

Uzorci ispitivani u ovom testu se mogu vidjeti na slici 27.



*Slika 27: Uzorci ispitivani dijametralnim testom nakon loma*

### *5.3.2 Aksijalno ispitivanje*

Uzorci B-12-20, B-12-10, B-12-05, B-12-19, B-12-16, B-31-01 određeni su za izradu manjih uzoraka namijenjenih aksijalnom ispitivanju. Manji uzorci trebaju biti valjkastog oblika te dimenzija unaprijed određenih normom. Potrebno je i brusiti uzorka kako bi paralelnost baza bila osigurana, zbog dobivanja reprezentativnijih rezultata. Ukupno je ispitano 36 uzoraka. Ispitivani su tako da se uzorak smjestio između kontaktnih šiljaka na način da opterećenje djeluje paralelno u odnosu na položaj jezgre. U nastavku u tablici 14 se mogu vidjeti ulazni podaci za provedbu proračuna, dobiveni nakon završetka ispitivanja.

Tablica 14: Rezultati provedenog aksijalnog ispitivanja

Broj uzorka	W [mm]	D [mm]	P [kN]
B-12-19-01A	86.81	39.57	14.23
B-12-19-02A	84.31	33.72	12.19
B-12-19-03A	84.27	30.86	12.06
B-12-19-04A	84.21	32.41	11.74
B-12-19-05A	82.67	33.33	15.63
B-12-19-06A	82.82	31.11	10.46
B-12-19-07A	86.42	36.94	13.86
B-31-01-01A	82.56	30.09	15.19
B-31-01-02A	84.32	31.48	14.57
B-31-01-03A	83.48	30.52	11.35
B-31-01-04A	83.98	31.75	11.10
B-31-01-05A	82.47	27.66	13.73
B-31-01-06A	82.49	37.06	14.86
B-12-05-01A	nepravilan lom		8.67
B-12-05-02A	76.26	30.41	9.46
B-12-05-03A	75.18	26.28	11.99
B-12-05-04A	74.49	24.47	8.36
B-12-05-05A	74.07	35.56	11.21
B-12-05-06A	76.48	26.84	9.15
B-12-05-07A	77.24	39.11	12.11
B-12-10-01A	nepravilan lom		13.63
B-12-10-02A	84.28	36.04	13.96
B-12-10-03A	82.74	39.74	18.53
B-12-10-04A	84.41	40.90	15.59
B-12-10-05A	84.09	40.07	9.18
B-12-16-01A	74.16	33.23	6.86
B-12-16-02A	74.08	27.82	5.08
B-12-16-03A	73.58	27.78	8.67
B-12-16-04A	72.44	27.05	8.90
B-12-16-05A	72.36	28.69	11.28
B-12-16-06A	74.44	27.54	9.46
B-12-16-07A	74.11	27.24	8.18
B-12-16-08A	72.91	25.44	8.63
B-12-16-09A	65.01	35.92	13.42
B-12-20-01A	87.97	43.71	19.14
B-12-20-02A	101.01	48.60	22.79

Nakon provedenog proračuna prema podpodpoglavlju 4.2.5., dobivene su sljedeće vrijednosti vidljive u tablici 15.

Tablica 15: Provedeni proračun nakon aksijalnog ispitivanja

Broj uzorka	W [mm]	D [mm]	P [kN]	De <sup>2</sup> [mm <sup>2</sup> ]	De [mm]	Is [MPa]	F	Is50 [MPa]	C	UCS [MPa]
B-12-19-01A	86.81	39.57	14.23	4373.67	66.13	3.25	1.13	3.69	24	88.56
B-12-19-02A	84.31	33.72	12.19	3619.73	60.16	3.37	1.09	3.66	24	87.84
B-12-19-03A	84.27	30.86	12.06	3311.15	57.54	3.64	1.07	3.88	24	93.12
B-12-19-04A	84.21	32.41	11.74	3474.98	58.95	3.38	1.08	3.64	24	87.32
B-12-19-05A	82.67	33.33	15.63	3508.27	59.23	4.46	1.08	4.81	24	115.39
B-12-19-06A	82.82	31.11	10.46	3280.54	57.28	3.19	1.06	3.39	24	81.35
B-12-19-07A	86.42	36.94	13.86	4064.63	63.75	3.41	1.12	3.80	24	91.29
<b>B-31-01-01A</b>	<b>82.56</b>	<b>30.09</b>	<b>15.19</b>	<b>3163.02</b>	<b>56.24</b>	<b>4.80</b>	<b>1.05</b>	<b>5.06</b>	<b>24</b>	<b>121.52</b>
B-31-01-02A	84.32	31.48	14.57	3379.68	58.14	4.31	1.07	4.61	24	110.73
B-31-01-03A	83.48	30.52	11.35	3243.97	56.96	3.50	1.06	3.71	24	89.04
B-31-01-04A	83.98	31.75	11.10	3394.92	58.27	3.27	1.07	3.50	24	84.06
B-31-01-05A	82.47	27.66	13.73	2904.41	53.89	4.73	1.03	4.89	24	117.35
B-31-01-06A	82.49	37.06	14.86	3892.39	62.39	3.82	1.10	4.22	24	101.22
<b>B-12-05-01A</b>	<b>nepravilan lom</b>									
B-12-05-02A	76.26	30.41	9.46	2952.73	54.34	3.20	1.04	3.33	24	79.83
B-12-05-03A	75.18	26.28	11.99	2515.58	50.16	4.77	1.00	4.77	24	114.55
B-12-05-04A	74.49	24.47	8.36	2320.82	48.17	3.60	0.98	3.54	24	85.02
B-12-05-05A	74.07	35.56	11.21	3353.62	57.91	3.34	1.07	3.57	24	85.71
B-12-05-06A	76.48	26.84	9.15	2613.61	51.12	3.50	1.01	3.54	24	84.87
B-12-05-07A	77.24	39.11	12.11	3846.27	62.02	3.15	1.10	3.47	24	83.26
<b>B-12-10-01A</b>	<b>nepravilan lom</b>									
B-12-10-02A	84.28	36.04	13.96	3867.40	62.19	3.61	1.10	3.98	24	95.57
<b>B-12-10-03A</b>	<b>82.74</b>	<b>39.74</b>	<b>18.53</b>	<b>4186.52</b>	<b>64.70</b>	<b>4.43</b>	<b>1.12</b>	<b>4.97</b>	<b>24</b>	<b>119.29</b>
B-12-10-04A	84.41	40.9	15.59	4395.69	66.30	3.55	1.14	4.03	24	96.64
B-12-10-05A	84.09	40.07	9.18	4290.16	65.50	2.14	1.13	2.42	24	57.99
<b>B-12-16-01A</b>	<b>74.16</b>	<b>33.23</b>	<b>6.86</b>	<b>3137.69</b>	<b>56.02</b>	<b>2.19</b>	<b>1.05</b>	<b>2.30</b>	<b>24</b>	<b>55.22</b>
<b>B-12-16-02A</b>	<b>74.08</b>	<b>27.82</b>	<b>5.08</b>	<b>2624.03</b>	<b>51.23</b>	<b>1.94</b>	<b>1.01</b>	<b>1.96</b>	<b>24</b>	<b>46.97</b>
B-12-16-03A	73.58	27.78	8.67	2602.57	51.02	3.33	1.01	3.36	24	80.68
B-12-16-04A	72.44	27.05	8.90	2494.92	49.95	3.57	1.00	3.57	24	85.57
B-12-16-05A	72.36	28.69	11.28	2643.26	51.41	4.27	1.01	4.32	24	103.71
B-12-16-06A	74.44	27.54	9.46	2610.24	51.09	3.62	1.01	3.66	24	87.83
B-12-16-07A	74.11	27.24	8.18	2570.36	50.70	3.18	1.01	3.20	24	76.86
B-12-16-08A	72.91	25.44	8.63	2361.64	48.60	3.65	0.99	3.61	24	86.59
B-12-16-09A	65.01	35.92	13.42	2973.22	54.53	4.51	1.04	4.69	24	112.64
B-12-20-01A	87.97	43.71	19.14	4895.82	69.97	3.91	1.16	4.55	24	109.14
B-12-20-02A	101.01	48.6	22.79	6250.44	79.06	3.65	1.23	4.48	24	107.54

S obzirom na pucanje uzoraka nepravilnim lomom, iz daljnjeg proračuna se odbacuju uzorci B-12-10-01A i B-12-05-01A. Tada preostaje 34 uzoraka te se u tom slučaju odbacuju i uzorci B-12-16-01A i B-12-16-02A zbog dobivenih najmanjih vrijednosti  $I_{s50}$  od 1,96 i 2,30. Odbacuju se također i uzorci B-12-10-03A i B-31-01-01A zbog dobivene najveće vrijednosti  $I_{s50}$  od 5,06 i 4,97.

Od preostalih 30 uzoraka dobiva se konačna vrijednost  $I_{s50}$  od:

$$I_{s50} = 3,86 \text{ [MPa]}$$

kao i konačna vrijednost UCS od:

$$UCS = 92,71 \text{ [MPa]}$$

Uzorci ispitivani u ovom testu se mogu vidjeti na slici 28.



*Slika 28: Uzorci ispitivani aksijalnim testom nakon loma*

### 5.3.3 Ispitivanje nepravilnih uzoraka

Rubni dijelovi uzoraka, neprikladni za izradu pravilnih uzoraka, poslužili su za ispitivanje nepravilnih uzoraka, oni se dalje ne oblikuju već ostaju u svom izvornom obliku. U ovom ispitivanju to su sljedeći uzorci: B-12-05-07N, B-12-06-04N, B-12-06-05N, B-12-12-02N, B-12-12-03N, B-12-11-03N, B-12-11-04N, B-12-08-03N, B-12-08-04N, B-12-20-03N, B-12-20-04N, B-12-19-08N, B-12-21-02N, B-12-21-03N, B-31-01-07N, B-31-01-08N. Ukupno je ispitano 16 uzoraka koji su smješteni među konusne šiljke na mjestu njihovih najmanjih dimenzija, ali čim dalje od samih rubova uzoraka. U nastavku u tablici 16 se mogu vidjeti ulazni podaci za provedbu proračuna, dobiveni nakon završetka ispitivanja.

Tablica 16: Rezultati provedenog ispitivanja na nepravilnim uzorcima

Broj uzorka	W [mm]	D [mm]	Sila pri lomu [kN]
B-12-05-07N	77.24	39.11	12.11
B-12-06-04N	84.20	21.42	40.23
B-12-06-05N	84.75	36.91	9.32
B-12-12-02N	62.77	37.81	8.53
B-12-12-03N	59.32	34.17	4.98
B-12-11-03N	79.38	44.96	25.61
B-12-11-04N	84.57	29.41	17.07
B-12-08-03N	65.09	33.93	13.90
B-12-08-04N	84.36	23.41	5.40
B-12-20-03N	102.56	96.55	11.08
B-12-20-04N	73.87	23.71	10.26
B-12-19-08N	84.46	38.37	11.01
B-12-21-02N	84.05	45.30	18.94
B-12-21-03N	84.53	58.50	21.43
B-31-01-07N	57.97	19.48	6.23
B-31-01-08N	81.47	17.13	5.98

Nakon provedenog proračuna prema podpoglavlju 4.2.5., dobivene su sljedeće vrijednosti vidljive u tablici 17.



Tablica 17: Provedeni proračun nakon ispitivanja nepravilnih uzoraka

Broj uzorka	W [mm]	D [mm]	P [kN]	De <sup>2</sup> [mm <sup>2</sup> ]	De [mm]	Is [MPa]	F	Is50 [MPa]	C	UCS [MPa]
B-12-05-07N	77.24	39.11	12.11	3846.27	62.02	3.15	1.10	3.47	24.00	83.26
B-12-06-04N	84.20	21.42	40.23	2296.37	47.92	17.52	0.98	17.19	24.00	412.49
B-12-06-05N	84.75	36.91	9.32	3982.85	63.11	2.34	1.11	2.60	24.00	62.36
B-12-12-02N	62.77	37.81	8.53	3021.82	54.97	2.82	1.04	2.95	24.00	70.70
B-12-12-03N	59.32	34.17	4.98	2580.81	50.80	1.93	1.01	1.94	24.00	46.64
B-12-11-03N	79.38	44.96	25.61	4544.10	67.41	5.64	1.14	6.45	24.00	154.73
B-12-11-04N	84.57	29.41	17.07	3166.81	56.27	5.39	1.05	5.68	24.00	136.44
B-12-08-03N	65.09	33.93	13.9	2811.95	53.03	4.94	1.03	5.08	24.00	121.82
B-12-08-04N	84.36	23.41	5.4	2514.48	50.14	2.15	1.00	2.15	24.00	51.61
B-12-20-03N	102.56	96.55	11.08	12607.83	112.28	0.88	1.44	1.26	24.00	30.35
B-12-20-04N	73.87	23.71	10.26	2230.03	47.22	4.60	0.97	4.48	24.00	107.62
B-12-19-08N	84.46	38.37	11.01	4126.23	64.24	2.67	1.12	2.99	24.00	71.68
B-12-21-02N	84.05	45.3	18.94	4847.82	69.63	3.91	1.16	4.53	24.00	108.83
B-12-21-03N	84.53	58.5	21.43	6296.18	79.35	3.40	1.23	4.19	24.00	100.56
B-31-01-07N	57.97	19.48	6.23	1437.81	37.92	4.33	0.88	3.83	24.00	91.82
B-31-01-08N	81.47	17.13	5.98	1776.91	42.15	3.37	0.93	3.12	24.00	74.80

Kod ispitivanja uzorka nepravilnog oblika nije došlo do pucanja stijene nepravilnim lomom, stoga nema odbacivanja takve vrste uzoraka. Od ukupno 16 uzoraka odbacuju se uzorci B-12-20-03N i B-12-12-03N zbog dobivenih najmanjih vrijednosti  $I_{S50}$  od 1,26 i 1,94. Također, odbacuju se i uzorci B-12-06-04N i B-12-11-03N zbog dobivenih najvećih vrijednosti  $I_{S50}$  od 17,19 i 6,45.

Od preostalih 12 uzoraka dobiva se konačna vrijednost  $I_{s50}$  od:

$$I_{s50} = 3,76 \text{ [MPa]}$$

kao i konačna vrijednost UCS od:

$$UCS = 90,12 \text{ [MPa]}$$

Uzorci ispitivani u ovom testu se mogu vidjeti na slici 29.



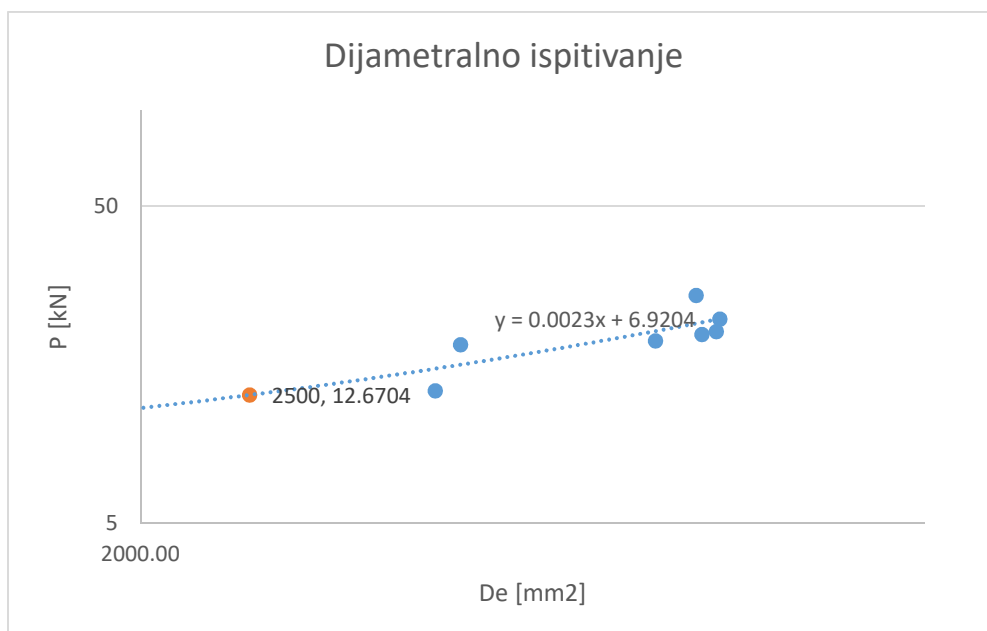
*Slika 29: Uzorci ispitivani testom na nepravilnim uzorcima nakon loma*

## 6 ANALIZA DOBIVENIH REZULTATA

U ovom diplomskom radu provedeno je određivanje čvrstoće pri opterećenju u točki, pomoću PLT uređaja, na ukupno 64 uzoraka vapnenaca sa lokacije LNG terminala u Omišlju na otoku Krku. Ispitivanje je provedeno u laboratoriju za geotehniku Građevinskog fakulteta u Rijeci prema normi danoj od strane ISRM-a 1985. godine [9]. Uzorci iz bušotina navedenih u tablici 13. dobiveni su kao rezultat provedenih istraživanja temeljnog tla prilikom gradnje LNG terminala u Omišlju. Vapnenci na kojima su provedena ispitivanja nisu prethodno zaštićeni od gubitka vlage. Uzorci koji su prilikom ispitivanja pukli nepravilnim lomom su izostavljeni i iz proračuna, kao i iz dijagrama.

Najpouzdanija metoda korekcije veličine uzoraka, prema normi [9], je testiranje uzoraka na vrijednosti od  $D$  do  $D_e$ , gdje se postavljaju grafičke relacije između  $P$  i  $D_e^2$ . Koristi se logaritamsko mjerilo na obje osi te se aproksimira krivulja koja će dati najbolje rezultate. Svaka vrijednost koja značajno odskaače od linije se odbacuje. Vrijednost  $P_{50}$  koja odgovara  $D_e^2 = 2500 \text{ mm}^2$  ( $D_e=50 \text{ mm}$ ) može se dobiti interpolacijom ili ekstrapolacijom.

Stavljajući u odnos vrijednosti  $D_e$  [mm] i  $P$  [kN], grafički je za vrijednost  $D_e = 2500 \text{ mm}$  dobivena vrijednost  $P_{50}$  od 12,67 kN, kao na slici 30.



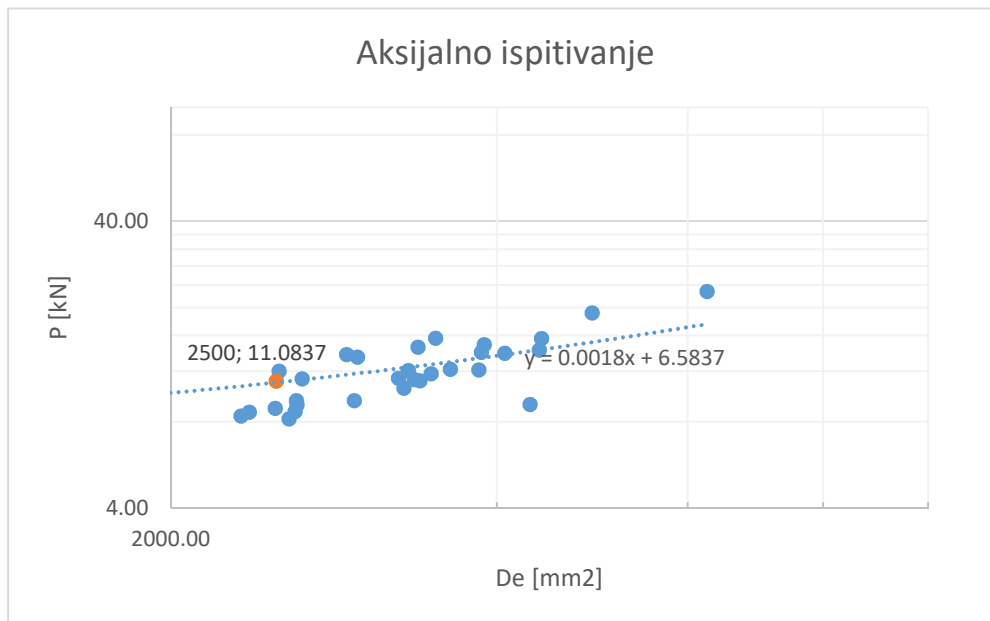
Slika 30: Dijagram grafičke korekcije uzoraka - dijametralno ispitivanje

Uspoređujući s vrijednoću UCS dobivenom kao prosječnu vrijednost svih dijametralnih ispitivanja u ovome radu, dobiju se podaci u tablici 18.

Tablica 18: Usporedba vrijednosti  $I_{S50}$  - dijametralno ispitivanje

Vrijednost nakon provedenog ispitivanja	Vrijednost nakon grafičkog određivanja
$I_{S50} = 3,61$ [MPa],	$I_{S50} = \frac{12.67 \cdot 1000}{50^2} = 5.07$ MPa

Stavljajući u odnos vrijednosti  $D_e$  [mm] i  $P$  [kN], grafički je za vrijednost  $D_e = 2500$  mm dobivena vrijednost  $P_{50}$  od 11,08 kN, kao na slici 31.



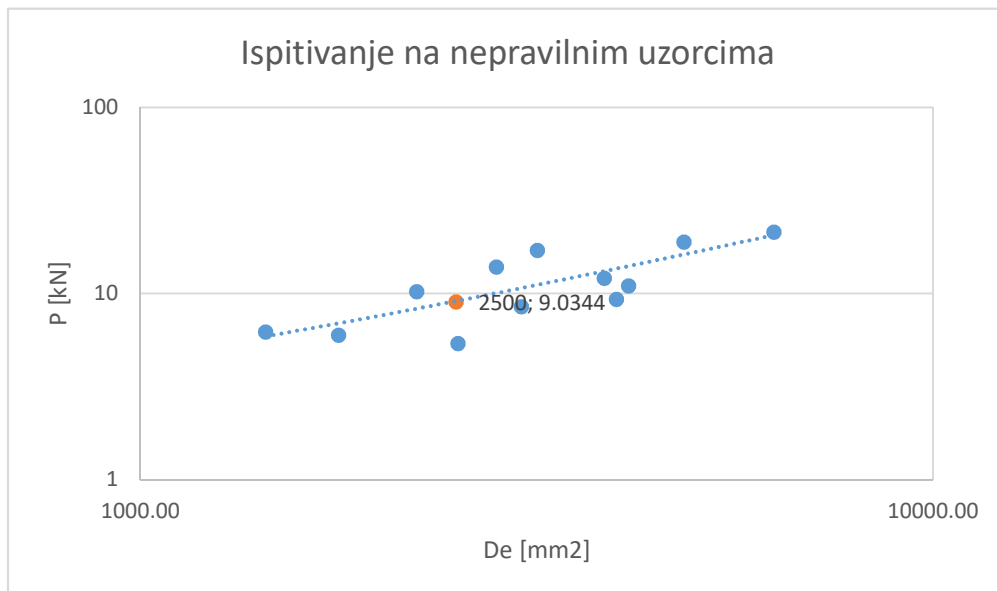
Slika 31: Dijagram grafičke korekcije uzoraka - aksijalno ispitivanje

Uspoređujući s vrijednoću UCS dobivenom kao prosječnu vrijednost svih aksijalnih ispitivanja u ovome radu, dobiju se podaci u tablici 19.

Tablica 19: Usporedba vrijednosti  $I_{S50}$  - aksijalno ispitivanje

Vrijednost nakon provedenog ispitivanja	Vrijednost nakon grafičkog određivanja
$I_{S50} = 3,86$ [MPa]	$I_{S50} = \frac{11.08 \cdot 1000}{50^2} = 4.43$ MPa

Stavljajući u odnos vrijednosti  $De$  [mm] i  $P$  [kN], grafički je za vrijednost  $De = 2500$  mm dobivena vrijednost  $P_{50}$  od 9,03 kN, kao na slici 32.



Slika 32: Dijagram grafičke korekcije uzoraka – ispitivanje na nepravilnim uzorcima

Uspoređujući s vrijednoću UCS dobivenom kao prosječnu vrijednost svih ispitivanja na nepravilnim uzorcima u ovome radu, dobiju se podaci u tablici 20.

Tablica 20: Usporedba vrijednosti  $I_{S50}$  – ispitivanje na nepravilnim uzorcima

Vrijednost nakon provedenog ispitivanja	Vrijednost nakon grafičkog određivanja
$I_{S50} = 3,76$ [MPa]	$I_{S50} = \frac{9.03 \cdot 1000}{50^2} = 3.61$ MPa

Provedba PLT ispitivanja u ovome radu daje kao rezultat prosječnu vrijednost  $I_{s(50)}$ , za svako od tri provedenih ispitivanja, pomoću kojih vrijednosti se procjenjuje i vrijednost UCS-a. Uspoređujući tu vrijednost UCS-a, sa vrijednošću UCS-a dobivenom pomoću  $I_{s(50)}$ , dobivenim grafičkom korekcijom uzoraka, dobivaju se vrijednosti navedene u tablici 21.

*Tablica 21; Usporedba vrijednosti UCS - 1*

	UCS – prosječna vrijednost	UCS – grafička korekcija uzoraka
Dijametralno ispitivanje	UCS = 102,88 [MPa]	UCS = 121,68 [MPa]
Aksijalno ispitivanje	UCS = 92,71 [MPa]	UCS = 106,32 [MPa]
Ispitivanje na nepravilnim uzorcima	UCS = 90,12 [MPa]	UCS = 86,64 [MPa]

Uspoređujući vrijednosti  $I_{s50}$  te UCS, dobivene kao prosječne vrijednosti nakon provedenih ispitivanja i vrijednosti dobivene nakon grafičke korekcije uzoraka, za ista ispitivanja, zaključeno je da je najbližnja vrijednost dobivena za ispitivanje na uzorcima nepravilnog oblika. Iako, niti vrijednosti kod aksijalnog i dijametralnog ispitivanja ne odstupaju značajno.

Nakon usporedbe gore navedenih rezultata, slijedi usporedba rezultata dobivenih PLT ispitivanjima provedenim za potrebe projekta izgradnje LNG terminala u Omišlju te prikazanim u geotehničkom elaboratu [38] sa uzorcima ispitivanim u ovom radu. Nisu uspoređivani isti podaci kao prethodno, već samo uzorci koji su međusobno dovoljno slični – ispitivani istim pokusom, nalazili se na sličnoj dubini, u istoj zoni te u konačnici i čim sličnijih karakteristika (tablica 22).

Tablica 22: Usporedba vrijednosti UCS - 2

		PLT ispitivanje (u radu)	PLT ispitivanje (elaborat)
Dijametralno ispitivanje	Uzorci	B-12-09-02D B-12-09-03D	B-12-20 160322plt1 160322plt2
	Dubina [m]	47,10 – 47,31	48,25 – 48,60
	Opis stijene	Zona stijene podloge, breča, klastpotporna, matrikspotporna	Zona stijene podloge, vapnenačka vreća, klastpotporna
	Prosječna vrijednost UCS	<b>109,40</b>	<b>80,14</b>
Aksijalno ispitivanje	Uzorci	B-12-10-02A B-12-10-04A B-12-10-05A	B-12-18 160007plt2 160007plt3 160007plt4
	Dubina [m]	27,20 – 27,50	24,30 – 24,60
	Opis stijena	Zona stijene podloge, brečasti vapnenac do vapnenačka breča, sitnokristalast, sivosmeđe boje	Zona stijene podloge, brečasti vapnenac, sitnokristalast, tamnosive i sive boje
	Prosječna vrijednost UCS	<b>83,40</b>	<b>67,80</b>
Ispitivanje na nepravilnim uzorcima	Uzorci	B-12-05-07N	B-12-15
	Dubina [m]	25,30 – 25,55	24,00 – 24,20
	Opis stijena	Zona stijene podloge, vapnenac, sitnokristalast, sive boje	Zona stijene podloge, vapnenac, sitnokristalast, sive boje
	Prosječna vrijednost UCS	<b>83,06</b>	<b>66,92</b>

Uspoređujući vrijednosti UCS-a iz tablice 22 zaključeno je da su vrijednosti UCS dobivene iz elaborata [38] manje za svako provedeno ispitivanje. Vrijednost UCS-a u radu je 27% veća od vrijednosti UCS-a u elaboratu, za dijametralno ispitivanje. Kod aksijalnog ispitivanja veća je za 19%, a kod ispitivanja na nepravilnim uzorcima za 23%. S obzirom na količinu utjecaja koju ima inženjersko iskustvo prilikom izračunavanja površine presjeka te nanošenja opterećenja, ne iznenađuje da rezultati dobiveni u ovome radu daju nešto veće vrijednosti. Također, ne uspoređuju se uzorci istog materijala iz istih bušotina, što na kraju krajeva također igra ulogu.

## 7 ZAKLJUČAK

Jednoosna tlačna čvrstoća, kao jedno od najvažnijih svojstava u mehanici stijena, se često ispituje jer je dobar indikator ostalih svojstava stijene. Također je i veličina potrebna za definiranje kriterija čvrstoće stijene, što je ključno za sva daljnja ispitivanja i projektiranja na toj istoj stijeni. U svakom slučaju, čim preciznija procjena vrijednosti ovog svojstva svakako košta, uvelike u tome što je uzorak potrebno dobro pripremiti prije samog ispitivanja, u vidu dimenzija i očuvanja vlage. Upravo je ta činjenica popularizirala korištenje Point load test ispitivanja. PLT ispitivanje je svakako danas jedna od pouzdanijih metoda procjene jednoosne tlačne čvrstoće. Najviše se koristi kod klasifikacije i karakterizacije stijena. Razumijevanje i poznavanje jednog i drugog omogućuje povećanje učinkovitosti kod istražnih geotehničkih radova, kao i u konačnici uštedu novca.

Najveća vrijednost UCS-a u ovome radu dobivena je u dijametralnom ispitivanju te iznosi 102,88 MPa. Ta vrijednost je za 12% veća od vrijednosti UCS-a kod ispitivanja nepravilnih uzoraka te za 9,9% posto veća od vrijednosti kod aksijalnog ispitivanja. Razlog može biti neovisnost dijametralnog ispitivanja o paralelnosti baza, koju imaju uzorci aksijalnih ispitivanja. Uzorci, pogotovo vapnenaca, se lako truse i oštećuju, što otežava proces dobivanja strogo paralelnih baza. Osim navedenog, uzorci ispitivani dijametralnim ispitivanjem su većinski dobiveni sa većih dubina od onih ispitivanih aksijalnim ispitivanjem, što je svakako utjecalo na konačne iznose UCS-a.

Svakako je dobro provesti čim više laboratorijskih i *in situ* ispitivanja uzoraka, kako bi konačna procjena UCS-a bila čim preciznija. U slučajevima kada je potrebna najpreciznija metoda određivanja vrijednosti  $I_s(50)$ , treba provesti aksijalno ili dijametralno ispitivanje na uzorcima gdje je  $D = 50$  mm. U tom slučaju nije potrebna korekcija uzoraka ili je ona minimalna. Iako, treba uzeti u obzir i anizotropiju same stijene. Treba se imati u vidu da uzorci u nijednom od ispitivanja čije se vrijednosti uspoređuju nisu očuvani od vlage, niti je zadržana njihova početna vlažnost.



## LITERATURA

- [1] Benac, Č., Rječnik pojmova u općoj i primijenjenoj geologiji. Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, 2016.
- [2] Gonzalez de Vallejo, L.I., Ferrer, M., Geological Engineering, CRC Press, 2011.
- [3] S. Dugonjić Jovančević: Inženjerska mehanika stijena; kolegij: Inženjerska mehanika stijena, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, interna skripta, 2019.
- [4] Vrkljan I., skripta Inženjerska mehanika stijena, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, 2013.
- [5] <https://geology.com/minerals/mohs-hardness-scale.shtml> (pristup: 13.07.2023.)
- [6] Whitney, D.L.; Fayon, A.K.; Broz, M.E., Cook, R.F.: Exploring the Relationship of Scratch Resistance, Hardness, and other Physical Properties of Minerals using Mohs Scale Minerals. Journal of Geoscience Education, v. 55, n. 1, January, 2007, p. 56-61
- [7] Schon, J.H.: Physical Properties of Rocks, Handbook of petroleum exploration and production vol. 8., Elsevier
- [8] International Society for Rock Mechanics: Suggested Methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials, 1979.
- [9] Suggested Methods for Determining Point Load Strength, International Society for Rock Mechanics Commission on Testing Methods, Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. and Geomechanical Abstr., Vol 22, No. 2, 1985, pp. 51–60
- [10] <https://www.geoengineer.org/education/laboratory-testing/point-load-test> (pristup 15.07.2023.)
- [11] Istražni radovi, <https://www.geotech.hr/laboratorijska-ispitivanja-cvrstoce-stijenske-mase/>, pristup: 15.07.2023.

- [12] ASTM D5731-16, Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Indeks of Rock and Application to Rock Strength Classifications, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, [www.astm.org](http://www.astm.org)
- [13] Briševac, Z.; Hrženjak, P.; Buljan, R.: Modeli za procjenu jednoosne tlačne čvrstoće i modula elastičnosti, GRAĐEVINAR 68 (2016) 1, 19-28
- [14] D'Andrea, D.V., Fisher, R.L., Fogelson, D.E.: Prediction of compression strength from other rock properties, Colorado School of Mines Quarterly, 59 4b (1964), pp. 623 – 640.
- [15] Read, J.R.L., Thornton, P.N., Regan, W.M.: A rational approach to the point load test, Proc. 3rd Australian-New Zealand Geomechanics Conference 2, pp. 35-39, 1980.
- [16] Romana, M.: Correlation between uniaxial compressive and pointload (Franklin test) strengths for different rock classes, 9th ISRM Congress, Paris, pp. 673-676, 1999.
- [17] Quane, S.L., Russel, J.K.: Rock strength as a metric of welding intensity in pyroclastic deposits, European Journal of Mineralogy, 15 (2003), pp. 855-64, <http://dx.doi.org/10.1127/0935-1221/2003/0015-0855>
- [18] Tsiambaos, G., Sabatakakis, N.: Considerations on strength of intact sedimentary rocks. Engineering Geology, 72 (2004), pp. 261- 273, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2003.10.001>
- [19] Kahraman, S., Gunaydin, O., Fener, M.: The effect of porosity on the relation between uniaxial compressive strength and point load indeks, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 42 (2005), pp. 584-589, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmms.2005.02.004>
- [20] Tziallas, G.P., Tsiambaos, G., Saroglou, H.: Determination of rock strength and deformability of intact rocks, Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 14 G (2009), pp 1-12.
- [21] Turgrul, A., Zarif, I.H.: Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey, Engineering Geology 51 (1999), pp 303-317, [http://dx.doi.org/10.1016/S0013-7952\(98\)00071-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0013-7952(98)00071-4)
- [22] Palchik, V.: Influence of porosity and elastic modulus on uniaxial compressive strength in softbrittle porous sandstones, Rock Mechanics and Rock Engineering, 32 (1999), pp 303–309, [http:// dx.doi.org/10.1007/s006030050050](http://dx.doi.org/10.1007/s006030050050)

- [23] Leite, M.H., Ferland, F.: Determination of Unconfined Compressive Strength and Young's Modulus of Porous Materials by Indentation Tests, *Engineering Geology*, 59 (2001) 3-4, pp. 267-280.
- [24] Lashkaripour, G.R.: Predicting mechanical properties of mudrock from index parameters, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 61 (2002), pp. 73-77, <http://dx.doi.org/10.1007/s100640100116>
- [25] Palchik, V., Hatzor, Y.H.: Influence of porosity on tensile and compressive strength of porous chalks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 37 (2004), pp. 331-341, <http://dx.doi.org/10.1007/s00603-003-0020-1>
- [26] Tugrul, A.: The effect of weathering on pore geometry and compressive strength of selected rock types from Turkey, *Engineering Geology*, 75 (2004), pp. 215–227, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.05.008>
- [27] Banjad Pečur, I. (2013.) Primjena nerazornih ispitivanja u građevinarstvu, *HDKBR INFO Magazin*, 3 (1), 2-9.
- [28] Dobrilović I., Gulam V., Hrženjak P.: Primjena indeksnih metoda ispitivanja u određivanju mehaničkih značajki intaktnog stijenskog materijala , Zagreb 2010.
- [29] Nazir R., Momeni E., Armaghani D. J. i drugi: Prediction of Unconfined Compressive Strength of Limestone Rock Samples Using L-Type Schmidt Hammer, 2013.
- [30] Laboratorijski istražni radovi, skripta, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, [https://www.grad.unizg.hr/download/repository/GI\\_3.predavanje\\_Laboratorijski\\_istrazni\\_radovi.pdf](https://www.grad.unizg.hr/download/repository/GI_3.predavanje_Laboratorijski_istrazni_radovi.pdf), pristup: 25. 6. 2023.
- [31] ISRM; Commission on standardization of laboratory and field tests (1978a) Suggested methods for determining hardness and abrasiveness of rocks, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*, 15, 89-97
- [32] [Limestone \(matweb.com\)](https://www.matweb.com) (pristup: 10. 8. 2023.)
- [33] [Limestone | Types, Properties, Composition, Formation, Uses \(geologyscience.com\)](https://www.geologyscience.com) (pristup: 10. 8. 2023.)

[34] Jagodnik, P., Interna prezentacija "Stijene", kolegij Primjenjena geologija, Sveučilište u Rijeci, 2018.

[35] [Limestone: Characteristics, Uses And Problem | GSA](#) (pristup: 10. 8. 2023.)

[36] [Limestone: Rock Uses, Formation, Composition, Pictures \(geology.com\)](#)  
(pristup: 10. 8. 2023.)

[37] Benac, Č.; Ružić, I.; Žic, Elvis: Ranjivost obala u području Kvarnera, Znanstveni rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, 2006.

[38] Geotehnički elaborat istraživanja temeljnog tla na kopnenom dijelu prostora LNG terminala Krk gdje su smješteni spremnici UPP (LNG); (LOT1-T1-1), 2016.