

# Ispitivanje mehaničkih svojstava stijena

---

**Kos, Antonia**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2023**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:130:500116>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-04**



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET

ANTONIA KOS

ISPITIVANJE MEHANIČKIH SVOJSTAVA STIJENA

ZAVRŠNI RAD

VARAŽDIN, 2023.

Sazivam članove ispitnog povjerenstva  
za 21. 07. 2023. u 9 sa  
Obranu ovog rada kandidat će vršiti i pred  
ispitnim povjerenstvom u Varaždinu  
Varaždin, 07. 07. 2023.

Predsjednik  
ispitnog povjerenstva:

Prof.dr.sc. Sanja Kovač

**Članovi povjerenstva**

- 1) Izv. prof. dr. sc. Boris Kunur
- 2) Prof. dr. sc. Stjepan Štelec
- 3) Doc. dr. sc. Jasmina Jug

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET

ZAVRŠNI RAD

ISPITIVANJE MEHANIČKIH SVOJSTAVA STIJENA

KANDIDAT:

Antonia Kos



MENTOR:

izv. prof. dr. sc. Boris Kavur

VARAŽDIN, 2023.

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

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

### ISPITIVANJE MEHANIČKIH SVOJSTAVA STIJENA

rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom **izv.prof.dr.sc. Borisa Kavura**.

Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

U Varaždinu, 28.06.2023.

ANTONIA KOS

---

(Ime i prezime)

*Antonia Kos*

---

(Vlastoručni potpis)

**IZJAVA MENTORA O POSTOTKU SLIČNOSTI ZAVRŠNOG RADA S VEĆ  
OBJAVLJENIM RADOVIMA**

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

**ISPITIVANJE MEHANIČKIH SVOJSTAVA STIJENA**

---

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

U Varaždinu, 26. 06. 2023.

Izv. prof. dr. sc. Boris Kavur  
(Mentor)

  
\_\_\_\_\_  
(Vlastoručni potpis)

## **Sažetak**

**Ime i prezime:** Antonia Kos

**Naslov rada:** Ispitivanje mehaničkih svojstava stijena

Stijena je prirodna nakupina minerala sa različitim fizičkim i mehaničkim svojstvima. Ta svojstva određuju se različitim metodama. U ovom radu opisana je geološka podjela stijena s obzirom na način njihovog postanka te metode ispitivanja njihovih mehaničkih svojstava. Njih je potrebno ispitati kako bismo odgovarajućim pristupom mogli rješavati inženjerske zadatke u stijenama. Na primjeru iz prakse obrađeni su i analizirani rezultati ultrazvučnih ispitivanja brzine elastičnih valova, jednoosne tlačne čvrstoće i deformabilnosti dobivenih na uzorcima vapnenca.

**Ključne riječi:** stijena, mehanička svojstva, ispitivanje jednoosne tlačne čvrstoće i deformabilnosti, uzorak

## **Abstract**

**First name and last name:** Antonia Kos

**Title of work:** Examination of the mechanical properties of rock

Rock is a natural accumulation of minerals with different physical and mechanical properties. These properties are determined by different methods. In this paper, the geological division of rocks is described with regard to the manner of their formation as well as the methods of testing their mechanical properties. They need to be examined so that we can solve engineering tasks in rocks by using a right approach. Using an example from practice, the results of ultrasonic tests of elastic wave velocity, uniaxial compressive strength and deformability obtained on limestone samples were processed and analyzed.

**Keywords:** rock, mechanical properties, testing of uniaxial compressive strength and deformability, sample



## Sadržaj

1.UVOD.....	1
2. GEOLOŠKA PODJELA STIJENA.....	2
2.1. MAGMATSKE STIJENE.....	2
2.2. SEDIMENTNE STIJENE.....	4
2.3. METAMORFNE STIJENE.....	8
3. ISPITIVANJA INTAKTNE STIJENE.....	11
3.1. PRIPREMA I KONTROLA ISPITNIH UZORAKA.....	11
3.2. INDEKSNA ISPITIVANJA ČVRSTOĆE U TOČKI.....	11
3.3. ISPITIVANJA TLAČNE ČVRSTOĆE I DEFORMABILNOSTI.....	12
3.4. ISPITIVANJA VLAČNE ČVRSTOĆE.....	16
3.5. ISPITIVANJA BRZINE PROLAZA ELASTIČNIH VALOVA.....	17
3.6. ISPITIVANJE POSTOJANOSTI NA TROŠENJE.....	17
4. PRIMJER IZ PRAKSE.....	20
5. ZAKLJUČAK.....	24
POPIS LITERATURE.....	25
POPIS SLIKA.....	28

## 1.UVOD

Stijena je prirodni materijal, čvrste zemljine kore, koji izgrađuje sklop nazivan stijenskom masom. Prema definiciji, stijenska masa predstavlja prirodnu geološku formaciju stijene koja je ispresijecana brojnim diskontinuitetima ili oslabljenjima. Stijenom, u užem smislu, nazivamo kompaktan intaktni materijal koji ne sadrži fizičke prekide (diskontinuiteti). [1]

Cilj ovog rada je bio prikazati geološku podjelu stijena i načine ispitivanja njihovih mehaničkih svojstava, a kroz primjer iz prakse analizirati rezultate ispitivanja dinamičkih i statičkih parametara intaktnog vapnenca te dobivenim korelacijama omogućiti prognozu značajki takvog materijala.

U drugom poglavlju rada opisuje se ukratko geološka podjela stijena s obzirom na način njihovog postanka. Tu razlikujemo tri glavne skupine: magmatske (eruptivne), sedimentne (taložne) i metamorfne stijene. Sedimentne stijene se najčešće pojavljuju u zoni geotehničkih zahvata te se ova skupina nešto detaljnije obrađuje u pogledu njihove glavne podjele, načina postanka, sistematike, te teksture i strukture.

Treće poglavlje obrađuje ispitivanja mehaničkih svojstava intaktne stijene. Ovo poglavlje uključuje sljedeće dijelove: opis pripreme i kontrole dimenzija i oblika cilindričnih uzoraka za ispitivanje mehaničkih svojstava, indeksna ispitivanja čvrstoće u točki, ispitivanje čvrstoće i deformabilnosti pri jednoosnom i troosnom tlaku, ispitivanje vlačne čvrstoće, ispitivanja brzine prolaza elastičnih valova, te ispitivanja postojanosti na trošenje.

U četvrtom poglavlju rada, na primjeru iz prakse, obrađeni i analizirani su rezultati brojnih ultrazvučnih ispitivanja brzine elastičnih valova te jednoosne tlačne čvrstoće i deformabilnosti dobivenih na intaktnim uzorcima vapnenca koji su prikupljeni u okviru velikog projekta istražnih radova za projektiranje novijih hidroenergetskih objekata u RH.

## 2. GEOLOŠKA PODJELA STIJENA

Stijene se mogu podijeliti na tri glavne kategorije prema načinu nastanka: sedimentne stijene, magmatske stijene i metamorfne stijene.

1. Sedimentne stijene su nastale taloženjem čestica koje su se odvojile od drugih stijena ili su rezultat fizičkog ili kemijskog razbijanja stijena. Primjeri sedimentnih stijena uključuju pijesak, glinu, šljunak i vapnenac.
2. Magmačke stijene su nastale stvrdnjavanjem magme (užarena tekućina). Primjeri magmačkih stijena uključuju bazalt, granit i diorit.
3. Metamorfne stijene su nastale transformacijom postojećih stijena pod utjecajem visokih temperatura, pritiska i kemijskih procesa. Primjeri metamorfnih stijena uključuju škriljevac, gnajs i mramor.

Ove tri glavne kategorije stijena mogu se podijeliti u daljnje podkategorije, ovisno o specifičnim karakteristikama. Na primjer, sedimentne stijene mogu se podijeliti u klastične, kemijske i biogene stijene, dok se magmačke stijene mogu podijeliti u ekstruzivne i intruzivne stijene. [2]

### 2.1. MAGMATSKE STIJENE

Magmačke stijene su stijene koje nastaju kristalizacijom magme, odnosno rastopljenog stijenja koje se nalazi unutar Zemljine kore. Prema načinu postanka dijelimo ih na primarne i sekundarne. Magmačke stijene mogu biti kategorizirane na osnovu načina na koji su se ohladile.

Iz magme se formiraju dvije vrste stijena: intruzivne i ekstruzivne stijene.

Intruzivne (plutonske) stijene formiraju se duboko unutar Zemljine kore te imaju karakterističnu teksturu koja se naziva plutonskom teksturom. Intruzivne stijene sadrže korisne minerale poput zlata, bakra, željeza i drugih metala. Stoga su važne iz rudarske perspektive. Također su značajne u geološkim istraživanjima jer pružaju uvid u unutrašnju strukturu i evoluciju Zemlje.

Ekstruzivne (vulkanske) stijene formiraju se iz vulkanskog materijala koji izlazi na površinu Zemlje kroz vulkane i raspršuje se u atmosferi ili se taloži na površini. Ove stijene nastale su od lave, vulkanskog pepela i drugih materijala izbacivanih iz vulkana tijekom vulkanske aktivnosti. Ekstruzivne stijene obično imaju sitnu zrnatu strukturu jer se brzo hlade na površini Zemlje. Također pružaju važne informacije o povijesti vulkanskih aktivnosti na određenom području i mogu se koristiti za geološka istraživanja. [3]

Primjeri intruzivnih magmatskih stijena su granit, diorit i gabra, a ekstruzivnih magmatskih stijenu su bazalt, riolit i andezit.

Na Slici 1 prikazana je intruzivna magmatska stijena, a na Slici 2 ekstruzivna magmatska stijena.



**Slika 1. Diorit- intruzivna magmatska stijena [4]**



**Slika 2. Bazalt-ekstruzivna magmatska stijena [5]**

## 2.2 SEDIMENTNE STIJENE

Sedimentne stijene su stijene koje su nastale taloženjem različitih materijala, poput pijeska, mulja, gline i vapnenca, koje se skupljaju na dnu oceana, jezera, rijeka ili drugih tijela vode. Vremenom, ovi materijali se kompaktiraju i stvrdnu u čvrstu stijenu.

Postoje dvije osnovne skupine sedimentnih stijena:

1. Egzogeni ili klastični sedimenti
2. Endogeni ili kemijski i biogeni sedimenti

Između tih osnovnih skupina postoje mješoviti sedimentni i sedimentne stijene.

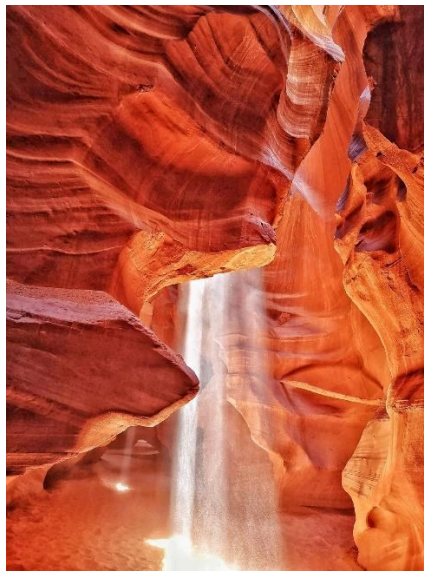
Klastične sedimentne stijene su stijene koje su nastale taloženjem čestica koje su se transportirale vodom, vjetrom ili ledom. [6] Te čestice mogu biti različite veličine i oblika, a mogu uključivati pijesak, mulj, ilovaču, šljunak i kamenje. Postupak stvaranja klastičnih sedimentnih stijena obično uključuje četiri faze: eroziju, transport, taloženje i dijagenezu. Erozija je proces koji uključuje abraziju, udaranje i kemijsko razbijanje stijena kako bi se stvorile čestice. Nakon što se čestice stvore, one se mogu transportirati vodom, vjetrom ili ledom na mjesto taloženja. Taloženje se događa kada se čestice smjeste na dno oceana, jezera, rijeke ili drugih vodenih tijela. Tijekom dijagenetskog procesa čestice se postupno pretvaraju u stijene pod utjecajem temperature, tlaka i kemijskih procesa. Na

primjer, kada se mulj taloži i postane sedimentna stijena, može se pretvoriti u škriljevac pod utjecajem povišene temperature i tlaka. Klastične sedimentne stijene su važan izvor fosila i minerala. Također mogu sadržavati korisne materijale kao što su ugljik, nafta, plin i mineralne rude. [7]

Na slikama 3, 4 i 5 prikazani su primjeri klastičnih sedimentnih stijena.



**Slika 3. Konglomerat [8]**



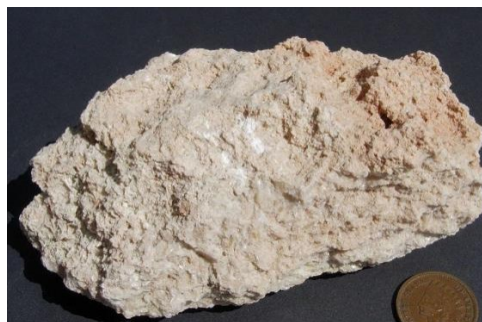
**Slika 4. Pješčenjak [9]**



**Slika 5. Breča [10]**

Kemijske sedimentne stijene su stijene koje nastaju iz taloženja minerala iz otopine. Najčešće vrste kemijskih sedimentnih stijena su halogene stijene i evaporiti. Halogene stijene su stijene koje nastaju taloženjem minerala iz slane vode, a često sadrže halit (kameni sol). Evaporiti su stijene koje nastaju kada slana voda isparava, a često sadrže mineralne kristale poput gipsa i anhidrita. Ove stijene se često nalaze u područjima gdje postoji visoka koncentracija soli u vodi, kao što su jezera, močvare i oceani. Također se mogu formirati u podzemnim špiljama kroz procese poput evapotranspiracije, gdje voda isparava iz tla kroz biljke. [7]

Na slikama 6, 7 i 8 prikazani su primjeri kemijskih sedimentnih stijena.



**Slika 6. Gips [10]**



**Slika 7. Anhidrit [11]**



**Slika 8. Halit [12]**

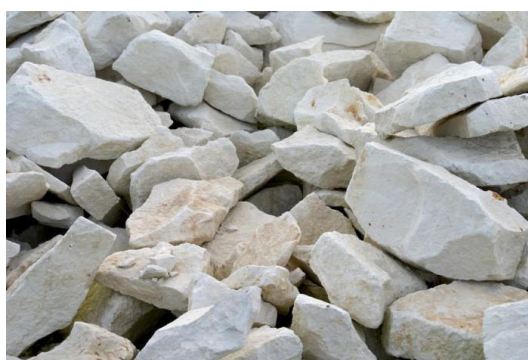
Biogene sedimentne stijene su stijene koje su nastale iz organskih ostataka živih organizama. To su uglavnom stijene koje sadrže ostatke biljaka i životinja, kao što su koralji, školjke, fosili, dijatomeje, alge i druge vrste morskih organizama. Ove stijene nastaju kada se organski materijal nakuplja na morskom dnu ili u sedimentima jezera ili močvara. Vremenom se ovaj materijal komprimira i pretvara u stijene. Primjeri biogenih sedimentnih stijena uključuju vapnenac, krečnjak, kreda, fosforit i ugljen. Ove stijene su vrlo važne za proučavanje geološke prošlosti, jer često sadrže fosile koji nam pomažu da rekonstruiramo životinjske i biljne vrste koje su živjele u prošlosti, kao i okruženje u kojem su živjeli. Također, neke biogene sedimentne stijene, kao što je ugljen, imaju veliku ekonomsku važnost kao izvor fosilnih goriva. [13]

Na slikama 9 i 10 prikazani su primjeri biogenih sedimentnih stijena.





**Slika 9. Ugljen [14]**



**Slika 10. Vapnenac [15]**

Sedimentne stijene su važne jer sadrže fosile i druge tragove prošlog života te su stoga korisne u geološkim istraživanjima i proučavanjima prošlosti Zemlje. Također, važne su za rudarsku industriju jer se u njima često nalaze ležišta ugljena, nafte i plina.

### 2.3. METAMORFNE STIJENE

Metamorfne stijene su vrsta stijena koje su nastale kao rezultat transformacije postojećih stijena pod utjecajem visokih temperatura, pritiska i kemijskih procesa. Ova transformacija može se dogoditi duboko u zemljinoj kori tijekom geološke povijesti ili na površini zemlje u okviru procesa erozije i sedimentacije. [7]

Ove stijene se razlikuju od magmatskih i sedimentnih stijena po svojim karakterističnim strukturama i mineralnom sastavu koji odražavaju uvjete pod kojima su se formirale. Metamorfne stijene mogu se koristiti kao važni izvori građevnog materijala, dragog kamenja, kao i za različite druge industrijske svrhe. One su također važne za geološka istraživanja i razumijevanje procesa koji su oblikovali površinu Zemlje tijekom njenog dugogodišnjeg razvoja. Postoji nekoliko tipova metamornih stijena, uključujući škriljevac, gnajs, mramor, surpentinit i skarn. Svaka od ovih stijena ima karakteristična svojstva koja su rezultat specifičnih uvjeta metamorfoze koju su doživjele. [7]

Primjeri metamornih stijena uključuju kvarcit, gnajs, mramor i mnoge druge kao što je prikazano na slikama 11, 12 i 13.



**Slika 11. Gnajs [16]**



**Slika 12. Mramor [17]**



**Slika 13. Kvarcit [18]**

### 3. ISPITIVANJA INTAKTNE STIJENE

Ispitivanja intaktne stijene su važna za razumijevanje geoloških procesa koji su se odvijali tijekom vremena. Kod ispitivanja važna je priprema i kontrola ispitnih uzoraka. Uzorci moraju biti cilindričnog oblika. [13]

Najčešća ispitivanja uzoraka stijena su: indeksna ispitivanja čvrstoće u točki, ispitivanja tlačne čvrstoće i deformabilnosti, ispitivanja vlačne čvrstoće, ispitivanja brzine prolaza elastičnih valova i ispitivanja postojanosti na trošenje.

Sve ove metode mogu pomoći u određivanju karakteristika stijena i razumijevanju geoloških procesa koji su se odvijali u prošlosti.

#### 3.1. PRIPREMA I KONTROLA ISPITNIH UZORAKA

Ispitivanja mehaničkih svojstava intaktne stijene rade se na cilindričnim uzorcima koji moraju zadovoljiti određene uvjete s obzirom na oblik i dimenzije. Da bi se dobila željena dimenzija i oblik potrebno je provesti neke od ovih radnji: rezanje, bušenje i brušenje. Uzorak stijene mora biti oblikovan tako da zadovolji kriterij okomitosti baza i osi cilindričnog uzorka kao i kriterij ravnosti plašta i baza. Ispitivanja čvrstoće i deformabilnosti u uvjetima jednoosnog i troosnog tlačenja postavljaju iste kriterije za toleranciju oblika i dimenzija. Kod indirektnog ispitivanja vlačne čvrstoće vrijede drugačije tolerancije oblika i dimenzija. Intaktna stijena je vrlo često nehomogena i anizotropna pa za ispitivanje svojstva stijene treba ispitati nekoliko ispitnih uzoraka. Svojstvo stijene koja se ispituje je srednja vrijednost svih ispitanih uzoraka. [13]

#### 3.2. INDEKSNA ISPITIVANJA ČVRSTOĆE U TOČKI

Indeksno ispitivanje čvrstoće u točki je ispitivanje kojim se stijene klasificiraju prema čvrstoći. Pokusom se može procijeniti jednoosna vlačna i tlačna čvrstoća. Pokusom se definira indeks anizotropije i indeks čvrstoće u točki.

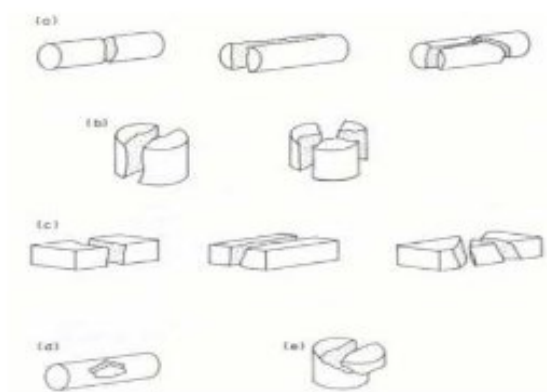
S obzirom na oblik uzorka koji se ispituje pokus se dijeli na:

- Dijametralni pokus
- Aksijalni pokus
- Prizmatični pokus
- Pokus na uzorku nepravilnog oblika

Orijentacija uzoraka za vrijeme ispitivanja anizotropnih stijena s obzirom na pravac naprezanja može biti:

- Okomita na plohe oslabljenja
- Paralelna plohamo oslabljenja

Za ispitivanje nije potrebna priprema uzoraka. Ispituju se uzorci nepravilnih oblika izvađeni iz bušotine. Uređaj kojim se ispituje uzorak sastoji se od mjerila sile i sklopa za opterećivanje uzoraka . Pokus se provodi na način da uzorak opteretimo jednakim povećanjem sile tako da se lom dogodi u vremenu od 10 do 60 sekundi. Postoje slučajevi gdje se pokus smatra nevažecim. Takav slučaj je pojava nepravilnog sloma zbog nehomogenosti uzorka. Slika 14 prikazuje pravilne i nepravilne oblike loma uzorka. [13]



Slika 14. Pravilni pokusi (a,b i c) i nepravilni pokusu (d i e) [13]

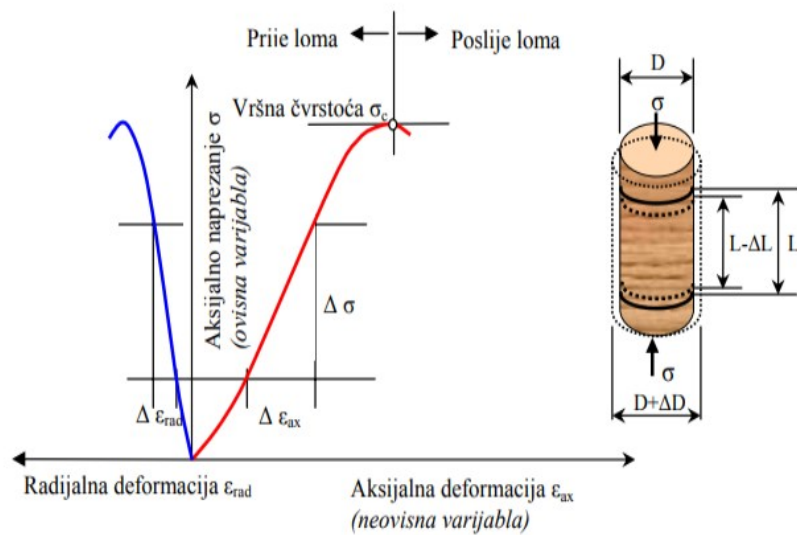
### 3.3. ISPITIVANJA TLAČNE ČVRSTOĆE I DEFORMABILNOSTI

Osnovni parametri za klasifikaciju i opis stijene su čvrstoća i deformabilnost intaktne stijene. Čvrstoća stijene i deformabilnost se pri jednoosnom tlaku danas

ispituju na dva načina u dvije metode koje je opisalo Međunarodno društvo za mehaniku stijena, a to su:

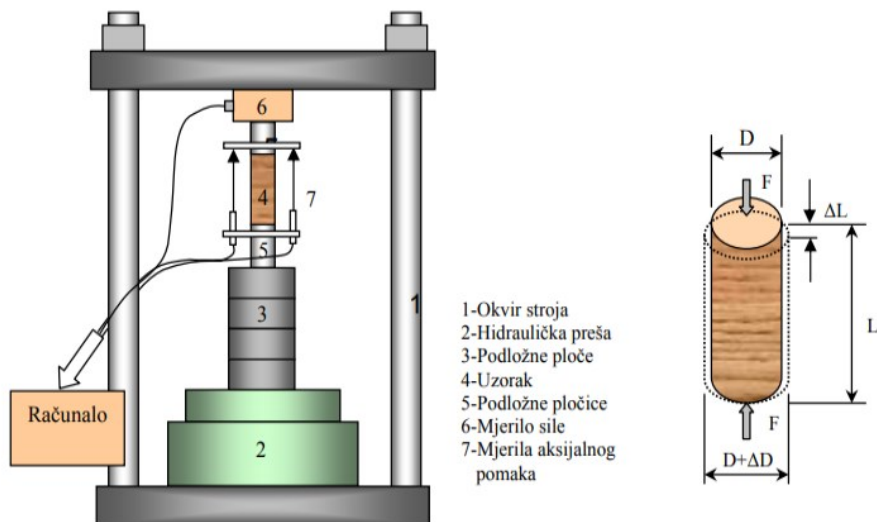
- Tehnike kojima se ne može dobiti naponsko-deformacijska krivulja u postlomnom području (ISRM, 1979).
- Tehnike kojima se može dobiti kompletna naponsko-deformacijska krivulja (ISRM 1999). [13]

Na slici 15 prikazani su grafovi aksijalne i radijalne deformacije koji se mogu dobiti u uvjetima jednoosne ili troosne kompresije uzorka stijene.



**Slika 15. Kompletna naponsko-deformacijska krivulja pri jednoosnom tlaku [13]**

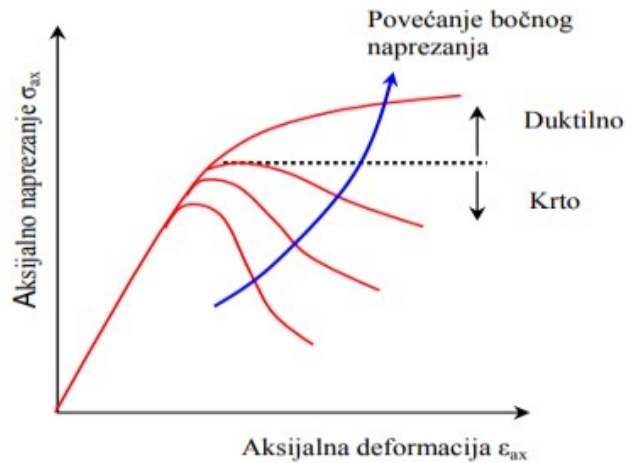
Na slici 16 dat je shematski prikaz opreme za provedbu pokusa jednoosne kompresije s mjerenjem aksijalne deformacije na uzorku stijene.



Slika 16. Shematski prikaz opreme za jednoosno ispitivanje stijena [13]

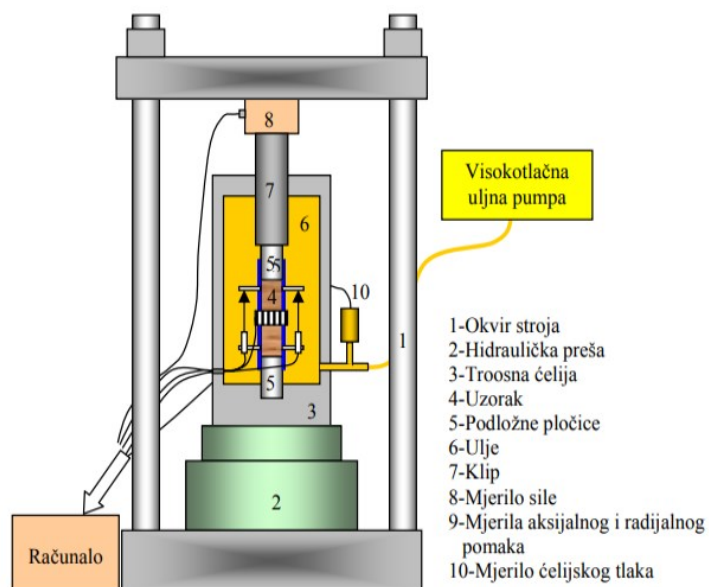
Određivanje deformabilnosti u troosnim uvjetima se bitno razlikuje od određivanja pri jednoosnom tlaku. U troosnim uvjetima ne može doći do eksplozivnog loma uzorka i ne postoji opasnost od oštećenja mjerila pomaka. Iz tog razloga se kod ovog pokusa određuje vršna čvrstoća, a može se dobiti i rezidualna čvrstoća ukoliko se koristi stroj sa kontroliranom deformacijom. [13]

Na slici 17 prikazana je kompletna naponsko-deformacijska krivulja koju je moguće odrediti ispitivanjem stijene u uvjetima troosne kompresije kada se pri ispitivanju koristi stroj sa kontroliranom deformacijom.



Slika 17. Kompletna naponsko-deformacijska krivulja pri troosnom tlaku [13]

Na slici 18 dat je shematski prikaz opreme za ispitivanje stijene u uvjetima troosne kompresije s mjerenjem aksijalnih i radijalnih deformacija na ispitnom uzorku.



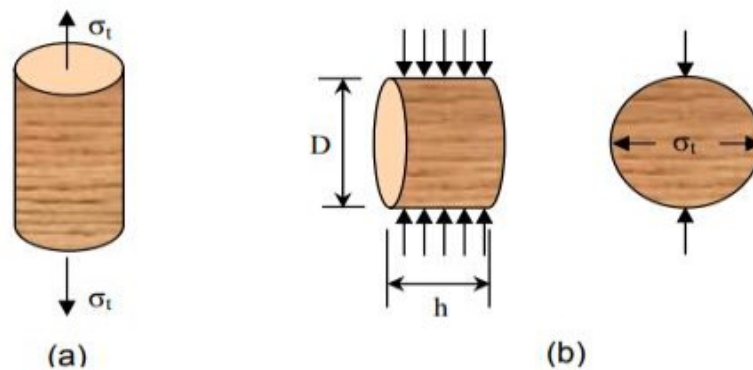
Slika 18. Shematski prikaz opreme za troosna ispitivanja stijena [13]



### 3.4. ISPITIVANJA VLAČNE ČVRSTOĆE

Vlačna čvrstoća se određuje na dva načina:

- Direktan
- Indirektan



Slika 19. Direktan (a) i indirektan (b) način ispitivanja vlačne čvrstoće [13]

Direktan način se vrlo rijetko koristi za određivanje vlačne čvrstoće u inženjerskoj praksi, a razlog tome su: poteškoće pripreme i prihvata uzorka i to što stijena na terenu nije u uvjetima direktnog vlaka. Iz tog razloga se za ispitivanje vlačne čvrstoće upotrebljavaju indirektnne metode. Vlačna naprezanja se u indirektnim metodama generiraju tlačnim naprezanjima. To je moguće iz razloga što stijena ima puno manju vlačnu čvrstoću s obzirom na tlačnu. Za ispitivanje uzorka koriste se čeljusti koje moraju imati polumjer zakrivljenosti 1,5 puta veći od polumjera uzorka. Pokus se provodi na cilindričnom uzorku čiji promjer ne smije biti manji od 54 mm, a visina mora biti približna polumjeru uzorka. Lom nastaje između 15 i 30 sekundi. [19]

### 3.5. ISPITIVANJA BRZINE PROLAZA ELASTIČNIH VALOVA

Brzina prolaza elastičnih valova kroz uzorak određuje se ultrazvučnim ispitivanjem stijena.

Razlikujemo tri načina ispitivanja:

- Visokofrekventna ultrazvučna metoda
- Niskofrekventna ultrazvučna metoda
- Rezonantna metoda

Ovim ispitivanjem se određuju dinamički parametri intaktnog stijenskog materijala: Youngov modul elastičnosti ( $E_{din}$ ), modul smicanja ( $G_{din}$ ) i Poissonov koeficijent ( $\nu_{din}$ ). [20]

Uzorci koji se ispituju su u obliku prizme ili valjka te moraju sadržavati prirodnu vlažnost. Da bi došlo do prijenosa elastičnih valova uzorak i pretvornici moraju biti u kontaktu. Kako bismo osigurali zadovoljavajući prijenos elastičnih valova baze uzorka trebaju biti dobro obrađene. Prijenos valova možemo ubrzati tako da uzorak premažemo uljem, glicerinom ili mastima. [21]

### 3.6. ISPITIVANJE POSTOJANOSTI NA TROŠENJE

Ispitivanje postojanosti stijena na trošenje se obično provodi u geološkim istraživanjima, a koristi se za procjenu otpornosti stijena na procese trošenja. Slabe stijene su sklone trošenju pri sušenju i vlaženju.

Slika 20 prikazuje opremu za ispitivanje postojanosti na trošenje.



**Slika 20. Uređaj za ispitivanje trajnosti stijene [22]**

Uzorak koji se ispituje sadrži deset neporemećenih fragmenata stijene težine od 40 do 60g. Ako ih u prirodi ne pronađemo u odgovarajućem obliku možemo ih razlomiti čekićem. Ukupni uzorak treba biti težak od 450 do 550g. Jako je važno da se taj uzorak transportira i skladišti na ispravan način kako bismo osigurali da uzorak zadrži prirodnu vlažnost. [13]

Postupak ispitivanja trajnosti stijene:

1. vlaženje i sušenje uzorka uz mehanički poremećaj
2. uzorci se stavljaju u bubanj, a zatim suše na temperaturi od 105 °C
3. nakon sušenja bubanj sa uzorkom se djelomično potapa vodom, zatim uređaj rotira bubanj sa fragmentima stijene oko 10 minuta
4. uzorak se suši i ponovno važe
5. ciklus sušenja i vlaženja se može ponoviti nekoliko puta

Indeks postojanosti stijene:

$$I_{dn} = \frac{m_n}{m_0} * 100 [\%]$$

$m_0$ - masa uzorka na početku ciklusa

$m_n$ - masa uzorka nakon n-tog ciklusa

$n$ - broj ciklusa

#### 4. PRIMJER IZ PRAKSE

U sklopu obimnih geotehničkih istražnih radova koji su obavljani za potrebe projektiranja i izgradnje hidroenergetskog sustava Kosinj u Lici, koji podrazumijeva izgradnju velike akumulacije, obavljena su bušenja brojnih istražnih bušotina kako bi se čim bolje upoznale geološke, hidrogeološke i geotehničke značajke stijenske mase.

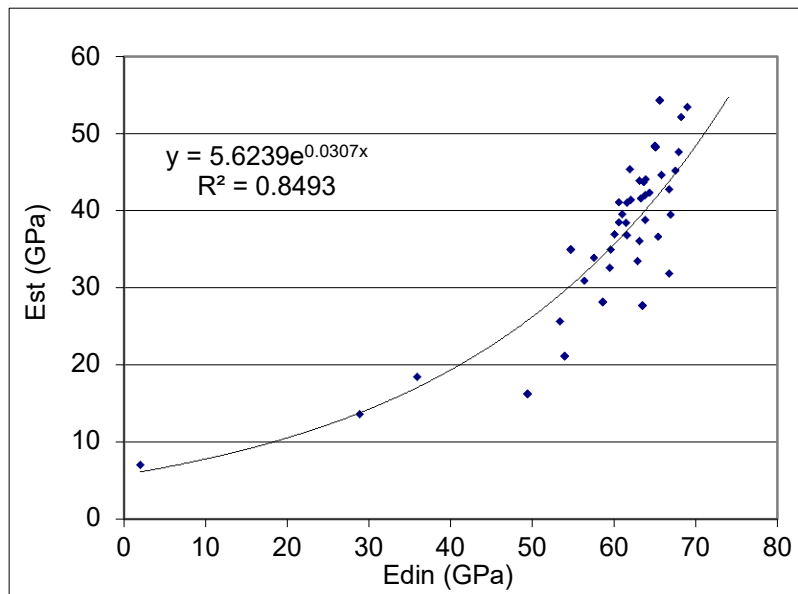
Na uzetim intaktnim uzorcima stijena (vapnenci) obavljena su prvo ultrazvučna ispitivanja brzine elastičnih valova, a zatim i ispitivanja jednoosne i troosne tlačne čvrstoće i deformabilnosti intaktnog materijala.

Ispitivanja brzine ultrazvučnih valova omogućila su određivanje dinamičkih parametara intaktnog materijala: modula elastičnosti ( $E_{din}$ ) i modula posmika ( $G_{din}$ ). Na temelju mjerenja deformacija uzorka u uvjetima jednoosne kompresije određen je statički modul elastičnosti ( $E_{st}$ ). Tlačenje uzorka u ispitnoj hidrauličkoj preši se obavlja do njegovog fizičkog sloma radi određivanja jednoosne tlačne čvrstoće ( $\sigma_c$  ili UCS).

Ispitivanja tlačne čvrstoće se često u praksi obavljaju bez mjerenja deformacija uzorka, te se u tom slučaju modul elastičnosti obično procjenjuje linearnom korelacijom na temelju rezultata jednoosne tlačne čvrstoće ( $E_{st}(MPa) = \alpha * \sigma_c$  (MPa)), gdje se  $\alpha$  kreće u vrlo širokom rasponu, od približno 250 pa sve do 1000.

S obzirom da su nam u ovom primjeru, na istim uzorcima stijena, poznate dinamičke i statičke konstante stijenskog materijala istražiti će se postojanje korelacije među njima što nam može eventualno omogućiti da na temelju poznavanja dinamičkih konstanti materijala predviđamo vrijednosti statičkih konstanti čije je laboratorijsko određivanje tehnički, financijski i vremenski znatno zahtjevnije.

Na slici 21 prikazan je odnos vrijednosti dinamičkog i statičkog modula elastičnosti, te je nelinearnom regresijom prikazana njihova međusobna veza preko eksponencijalne funkcije.

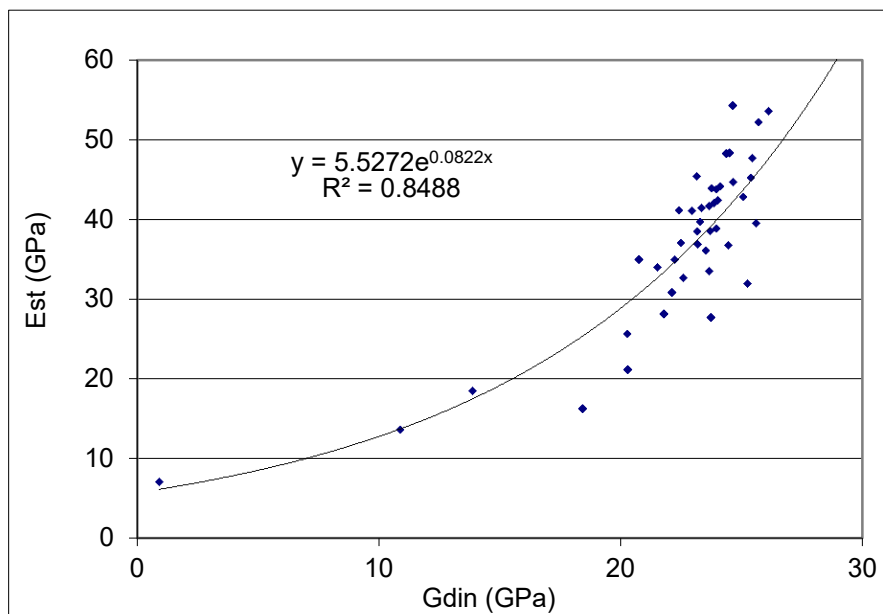


**Slika 21. Odnos dinamičkog (Edin) i statičkog modula elastičnosti (Est) na temelju provedenih ispitivanja.**

Koeficijent determinacije ( $R^2$ ) je pokazatelj reprezentativnosti regresije i kreće se u rasponu od nula do 1. Regresija je reprezentativnija što je koeficijent determinacije bliži jedinici. Prema tzv. Chadock-ovoj ljestvici koriste se sljedeći termini za ocjenu povezanosti varijabli putem koeficijenta determinacije ( $R^2$ ):

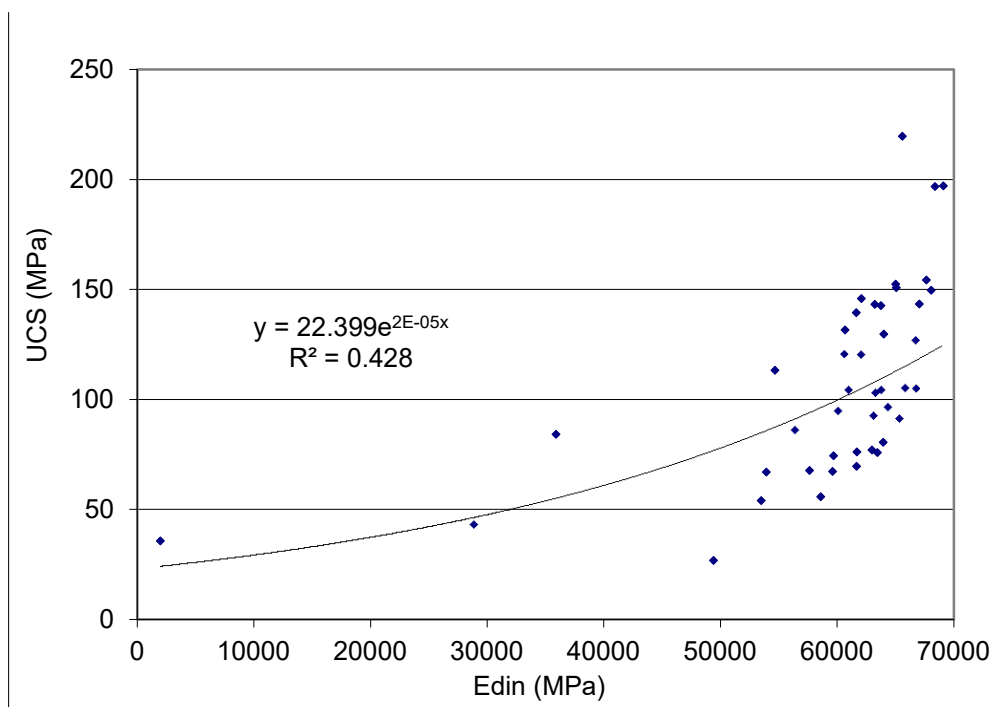
= 0,00	odsutnost veze
od 0,00 do 0,25	slaba veza
od 0,25 do 0,64	srednje jaka veza
od 0,64 do 1,00	čvrsta veza
= 1,00	potpuna veza

Na slici 22 prikazan je odnos vrijednosti dinamičkog modula posmika ( $G_{din}$ ) i statičkog modula elastičnosti, te je nelinearnom regresijom prikazana njihova međusobna veza preko eksponencijalne funkcije.



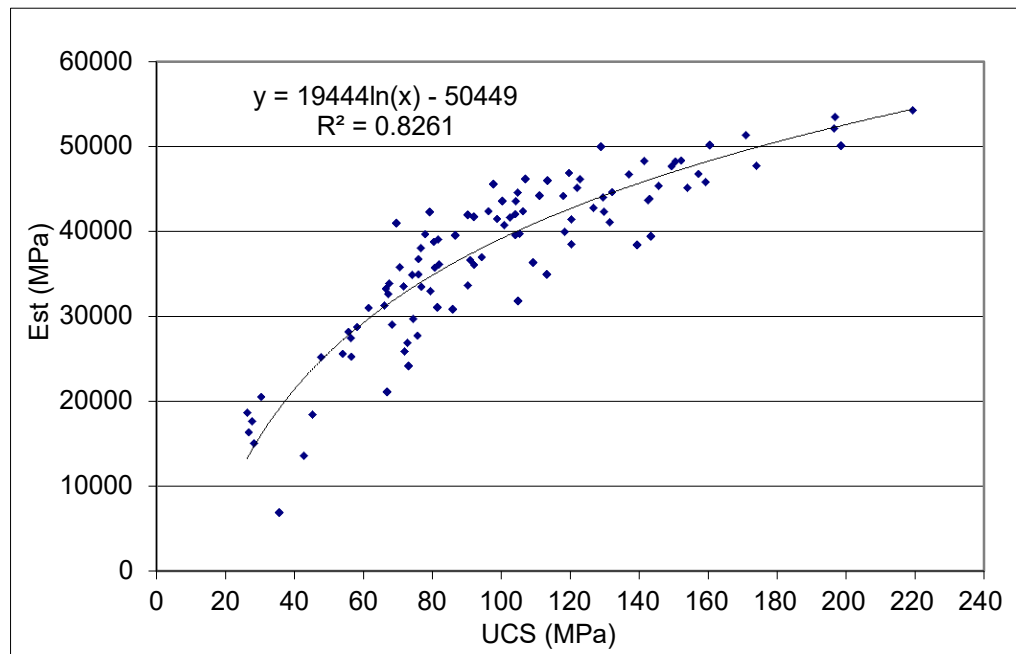
Slika 22. Odnos dinamičkog modula posmika ( $G_{din}$ ) i statičkog modula elastičnosti ( $E_{st}$ ) na temelju provedenih ispitivanja.

Na slici 23 prikazan je odnos vrijednosti dinamičkog modula elastičnosti ( $E_{din}$ ) i jednoosne tlačne čvrstoće (UCS), te je nelinearnom regresijom prikazana njihova međusobna veza preko eksponencijalne funkcije.



Slika 23. Odnos dinamičkog modula elastičnosti ( $E_{din}$ ) i jednoosne tlačne čvrstoće (UCS) na temelju provedenih ispitivanja.

Na slici 24 prikazan je odnos vrijednosti jednoosne tlačne čvrstoće (UCS) i statičkog modula elastičnosti ( $E_{st}$ ), te je nelinearnom regresijom prikazana njihova međusobna veza preko logaritamske funkcije.



**Slika 24. Odnos jednoosne tlačne čvrstoće (UCS) i statičkog modula elastičnosti ( $E_{st}$ ) na temelju provedenih ispitivanja.**



## 5. ZAKLJUČAK

Stijena je kompaktan intaktni materijal koji izgrađuje stijensku masu. Prema načinu postanka dijelimo ih na: sedimentne, magmatske i metamorfne. Svaka vrsta se razlikuje po svojim svojstvima i upotrebi.

S obzirom da se stijene razlikuju prema svojstvima, važno je ispitati ta svojstva kako bismo bili sigurni da će stijena služiti u svrhu za koju se namjerava koristiti. U ovom radu fokus je bio na ispitivanju mehaničkih svojstava, stoga je u trećem poglavlju opisano i objašnjeno nekoliko načina ispitivanja. A to su: indeksna ispitivanja čvrstoće u točki, ispitivanja tlačne čvrstoće i deformabilnosti u uvjetima jednoosne i troosne kompresije, ispitivanja vlačne čvrstoće, ispitivanja brzine prolaza elastičnih valova i ispitivanja postojanosti na trošenje.

U četvrtom poglavlju, na primjeru iz prakse, odnosno većoj količini obrađenih rezultata dinamičkih i statičkih parametara vapnenca predložene su dvije korelacije:

- 1) Korelacija 1 (slika 21): za procjenu statičkog modula elastičnosti ( $E_{st}$ ) na osnovi dinamičkog ( $E_{din}$ );
- 2) Korelacija 2 (slika 24): za procjenu statičkog modula elastičnosti ( $E_{st}$ ) na temelju rezultata jednoosne tlačne čvrstoće stijene (UCS).

Zaključujem da je ispitivanje mehaničkih svojstava stijena važno provoditi na ispravan način kako bismo dobili valjane rezultate. Ponekad je potrebno ispitivanje provoditi na nekoliko uzoraka s obzirom na nehomogenost stijene.

## POPIS LITERATURE

- [1] Kavur, B., Geotehnički istražni radovi. Nastavni materijali za kolegij: Geotehničko-ekološki zahvati. Geotehnički fakultet u Varaždinu, ak. god. 2022/23.
- [2] Hrvatska tehnička enciklopedija. *Leksikografski zavod Miroslav Krleža*, 2022. Preuzeto sa: <https://tehnika.lzmk.hr/stijene/> , (Pristupljeno 15.04.2023.)
- [3] Šestanović, S. (1986.) : Osnove geologije i petrografije. Školska knjiga, Zagreb
- [4] Geologia.fi. Diorit. Preuzeto sa: <https://www.geologia.fi/sv/2022/05/12/diorit/> ,(Pristupljeno: 15.04.2023.)
- [5] Korak u prostor. Bazalt. Preuzeto sa: <https://korak.com.hr/bazalt/> , (Pristupljeno: 15.04.2023.)
- [6] Proleksis enciklopedija. Klastične stijene (klastiti). Preuzeto sa: <https://proleksis.lzmk.hr/31328/> ,(Pristupljeno 17.04.2023.)
- [7] Marić, L. (1951.) : Sistematska petrografija. Školska knjiga, Zagreb
- [8] Docplayer. Klastične sedimentne stijene. Preuzeto sa: <https://docplayer.rs/201706586-Klasti%C4%8Dne-sedimentne-stijene.html> , (Pristupljeno: 16.04.2023.)
- [9] Turismo de observacion. Antelope Canyon. Preuzeto sa: <https://www.turismodeobservacion.com/foto/antelope-canyon-costa-oeste-page-eeuu/72498/> ,(Pristupljeno: 16.04.2023. )
- [10] Eferit. Popis 25 vrsta sedimentnih stijena. Preuzeto sa: <https://hr.eferit.com/popis-25-vrsta-sedimentnih-stijena/> ,(Pristupljeno: 16.04.2023. )
- [11] Enciklopedija kristala. Anhidrit. Preuzeto sa: <http://enciklopedijakristala.blogspot.com/2011/12/anhidrit.html> ,(Pristupljeno: 17.04.2023.)

- [12] Mineral Expo. Halit. Preuzeto sa: <https://mineralexpo.hr/halit> ,(Pristupljeno: 17.04.2023. )
- [13] Vrkljan, I., Inženjerska mehanika stijena. Prof. emeritus Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci. Rijeka, 2013.
- [14] Linzhang Tianfu Drvna industrija Co. Ugljen. Preuzeto sa: <https://hr.tf-charcoal.com/charcoal/wood-for-charcoal.html> ,( Pristupljeno: 18.04.2023. )
- [15] Punto mariner. Vapnenačka ruševina: svojstva, frakcije i primjena. Preuzeto sa: <https://hr.puntomariner.com/limestone-rubble-characteristics-fractions-and/> ,(Pristupljeno: 21.04.2023. )
- [16] Metamorfne stijene ili Kako toplina i tlak transformiraju stijene . Preuzeto sa:  
[https://opzs.unipu.hr/download/repository/FG\\_6\\_2020\\_Metamorfne\\_stijene.pdf](https://opzs.unipu.hr/download/repository/FG_6_2020_Metamorfne_stijene.pdf) , (Pristupljeno: 24.04.2023.)
- [17] Minikar. Mramor je kamen harmonije i topline u odnosima. Preuzeto sa:  
<https://minikar.ru/hr/zdorove/mramor-kamen-garmonii-i-tepla-v-otnosheniyah-mramor-fizicheskie-svoistva/>, (Pristupljeno: 25.04.2023. )
- [18] Gem rock auctions. Kvarcitni dragi kamen:svojstva, značenja, vrijednost i više. Preuzeto sa: <https://www.gemrockauctions.com/hr/learn/a-z-of-gemstones/quartzite>, (Pristupljeno: 28.04.2023. )
- [19] Bočkaj, T (2020.): Fizikalna i mehanička svojstva stijenskog materijala; završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet
- [20] Hrženjak, P., Briševac, Z., 2009. Upute i predlošci za laboratorijske vježbe i programe iz mehanike stijena. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet
- Preuzeto sa:  
<https://rudar.rgn.hr/~phrzen/UputeIPredlosciZaLaboratorijskeVjezbeIPrograme.pdf> ,(Pristupljeno 24.04.2023.)
- [21] Strelec, S. (2012.): Mehanika stijena; Interna skripta, Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet

[22] Ele international. Slake Durability Apparatus. Preuzeto sa:  
<https://www.ele.com/product/slake-durability-apparatus->, (Pristupljeno:  
3.05.2023. )

## POPIS SLIKA

Slika 1. Diorit- intruzivna magmatska stijena [4] .....	3
Slika 2. Bazalt-ekstruzivna magmatska stijena [5] .....	4
Slika 3. Konglomerat [8] .....	5
Slika 4. Pješčenjak [9] .....	5
Slika 5. Breča [10].....	6
Slika 6. Gips [10].....	6
Slika 7. Anhidrit [11].....	7
Slika 8. Halit [12] .....	7
Slika 9. Ugljen [14].....	8
Slika 10. Vapnenac [15].....	8
Slika 11. Gnajs [16].....	9
Slika 12. Mramor [17].....	9
Slika 13. Kvarcit [18].....	10
Slika 14. Pravilni pokusi (a,b i c) i nepravilni pokusu (d i e) [13] .....	12
Slika 15. Kompletna naponsko-deformacijska krivulja pri jednoosnom tlaku [13].....	13
Slika 16. Shematski prikaz opreme za jednoosno ispitivanje stijena [13].....	14
Slika 17. Kompletna naponsko-deformacijska krivulja pri troosnom tlaku [13].....	15
Slika 18. Shematski prikaz opreme za troosna ispitivanja stijena [13] .....	15
Slika 19. Direktna (a) i indirektna (b) način ispitivanja vlačne čvrstoće [13].....	16
Slika 20. Uređaj za ispitivanje trajnosti stijene [22].....	18
Slika 21. Odnos dinamičkog (Edin) i statičkog modula elastičnosti (Est) na temelju provedenih ispitivanja. ....	21
Slika 22. Odnos dinamičkog modula posmika (Gdin) i statičkog modula elastičnosti (Est) na temelju provedenih ispitivanja. ....	22
Slika 23. Odnos dinamičkog modula elastičnosti (Edin) i jednoosne tlačne čvrstoće (UCS) na temelju provedenih ispitivanja. ....	22
Slika 24. Odnos jednoosne tlačne čvrstoće (UCS) i statičkog modula elastičnosti (Est) na temelju provedenih ispitivanja.....	23