

# Inženjerski aspekti magmatskih, sedimentnih i metamorfnih stijena

---

**Petković, Ivona**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2021**

*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:157:145184>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-04-02**



*Repository / Repozitorij:*

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

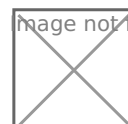


image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Ivona Petković**

**Inženjerski aspekti magmatskih, sedimentnih i metamorfnih stijena**

**Završni rad**

**Rijeka, 2021.**

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Preddiplomski sveučilišni studij  
Primijenjena geologija**

**Ivona Petković  
JMBAG: 0082056701**

**Inženjerski aspekti magmatskih, sedimentnih i metamorfnih stijena**

**Završni rad**

**Rijeka, rujan 2021.**

Naziv studija: **Sveučilišni preddiplomski studij Građevinarstvo**

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Građevinarstvo

Znanstvena grana: Geotehnika

Tema završnog rada

**INŽENJERSKI ASPEKTI MAGMATSKIH, SEDIMENTNIH I METAMORFNIH STIJENA  
ENGINEERING ASPECTS OF IGNEOUS, SEDIMENTARY AND METAMORPHIC ROCKS**

Kandidatkinja: **IVONA PETKOVIĆ**

Kolegij: **PRIMIJENJENA GEOLOGIJA**

Završni rad broj: **21-P-35**

**Zadatak:**

Stijene se prema načinu postanka dijele u tri genetske skupine: magmatske, sedimentne i metamorfne stijene. S obzirom na način postanka, razlikuju se fizička svojstva stijena, o kojima su izravno ovisna i njihova inženjerska svojstva. Primjena stijena u građevinarstvu je široka te je za gotovo svaku namjenu vrlo bitno ispravno predvidjeti inženjersko ponašanje određene vrste stijene. Zadatak studenta je:

- dati pregled genetskih skupina stijena litosfere,
- dati pregled glavnih fizičkih i mehaničkih svojstava stijena,
- dati pregled inženjerskih aspekata stijena prema različitim genetskim skupinama stijena, s naglaskom na mogućnosti izvođenja iskopa u stijenama, temeljenja građevina te primjene materijala stijena za građenje.

**Tema rada je uručena:** 24. veljače 2021.

Komentor:

Mentorica:

doc. dr. sc. Vedran Jagodnik  
dipl. ing. građ.

dr. sc. Petra Jagodnik, v. pred.

## ***IZJAVA***

Završni rad sam izradila 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.

---

Ivona Petković

U Rijeci, 2. rujna 2021.



## **Inženjerski aspekti magmatskih, sedimentnih i metamorfnih stijena**

### **SAŽETAK**

U inženjerskoj geologiji stijene se prema načinu postanka mogu klasificirati na magmatske, sedimentne i metamorfne stijene. U radu su detaljno definirana fizikalna i mehanička svojstva s obzirom na inženjerske aspekte stijenskih masa i intaktnih stijena te su definirane pojedine vrijednosti za određene stijene. Primjena stijena u građevinarstvu je vrlo široka te je pri projektiranju bitno predvidjeti ponašanje stijena na temelju njezinih značajki. Neki od radova koji se mogu izvoditi u stijenama su površinski i podzemni iskopi, temeljenja, brane... Na temelju karakteristika pojedinih vrsta, prikazane su prednosti i nedostaci primjene stijena u građevinarstvu.

**Ključni pojmovi:** magmatske stijene, sedimentne stijene, metamorfne stijene, fizičko-mehanička svojstva stijena, stijene u građevinarstvu

## **Engineering properties of igneous, sedimentary and metamorphic rocks**

### **ABSTRACT**

Engineering geology divides rocks according to their origin into three groups: igneous, sedimentary, and metamorphic rocks. In this paperwork are presented physical and mechanical characteristics through engineering aspects of rock masses and intact rocks. There is also shown range of values for different parameters of specific rock. The application of rocks in civil engineering is very wide. It is very important to know the potential behavior of rocks before performing works such as surface and underground excavations, foundations, dams, etc. Furthermore, there are presented the advantages and disadvantages of rock usage in construction based on the characteristics of the specific rock.

**Keywords:** igneous rocks, sedimentary rocks, metamorphic rocks, physical and mechanical characteristics of rocks

## SADRŽAJ

<b>1. UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2. STIJENE LITOSFERE .....</b>	<b>2</b>
2.1. Magmatske stijene.....	2
2.2. Sedimentne stijene.....	5
2.3. Metamorfne stijene.....	7
<b>3. INŽENJERSKA SVOJSTVA STIJENA .....</b>	<b>8</b>
3.1. Fizička svojstva intaktne stijene.....	10
3.1.1. Poroznost .....	11
3.1.2. Zapreminska težina.....	11
3.1.3. Propusnost .....	12
3.1.4. Trajnost.....	14
3.1.5. Jednoosna tlačna čvrstoća.....	14
3.1.6. Vlačna čvrstoća.....	17
3.1.7. Brzina širenja elastičnih valova .....	17
3.2. Mehanička svojstva stijena.....	18
3.2.1. Trošenje .....	18
3.2.2. Čvrstoća i deformabilnost stijenske mase .....	23
3.2.3. Diskontinuiteti .....	25
3.2.5. Prisustvo vode u stijenama .....	28
<b>4. INŽENJERSKI ASPEKTI MAGMATSKIH STIJENA.....</b>	<b>31</b>



4.1. Inženjerska svojstva magmatskih stijena .....	31
4.2. Magmaške stijene i graditeljstvo.....	31
4.2.1. Podzemni i površinski iskopi.....	31
4.2.2. Temeljenje građevina i brana .....	32
4.2.3. Materijali za građenje .....	33
<b>5. INŽENJERSKI ASPEKTI SEDIMENTNIH STIJENA .....</b>	<b>34</b>
5.1. Inženjerska svojstva sedimentnih stijena .....	34
5.2. Sedimentne stijene i graditeljstvo .....	34
5.2.1. Podzemni i površinski iskopi.....	34
5.2.2. Temeljenje građevina i brana .....	36
5.2.3. Materijali za građenje .....	37
<b>6. INŽENJERSKI ASPEKTI METAMORFNIH STIJENA .....</b>	<b>38</b>
6.1. Inženjerska svojstva metamorfnih stijena .....	38
6.2. Metamorfne stijene i graditeljstvo.....	38
6.2.1. Podzemni i površinski iskopi.....	38
6.2.2. Temeljenje građevina i brana .....	39
6.2.3. Materijali za građenje .....	41
<b>7. DISKUSIJA I ZAKLJUČCI .....</b>	<b>42</b>
<b>8. LITERATURA.....</b>	<b>44</b>

## POPIS SLIKA

Slika 1: Stijenski ciklus [2] .....	2
Slika 2: Izdizanje magme iz unutrašnjosti prema površini Zemlje [4] .....	3
Slika 3: Zastupljenost pojedinih vrsta stijena na površini Zemlje [2] .....	5
Slika 4: Zastupljenost pojedinih vrsta stijena u litosferi [2] .....	5
Slika 5: Proces nastanka sedimentnih stijena [5] .....	6
Slika 6: Prikaz stijenske mase prožete diskontinuitetima [7] .....	8
Slika 7: Primjeri intaktnih stijena (s lijeva na desno): granit, žuti pješčenjak, vapnenac, crni pješčenjak [8] .....	8
Slika 8: Geološki utjecaj na svojstva intaktne stijene i stijenske mase [6] .....	9
Slika 9: Crvenica na vrhovima usjeka Istarskog ipsilona [13] .....	19
Slika 10: Trošni profili sedimentnih, magmatskih i metamorfnih stijena [6] .....	21
Slika 11: Eksfolijacija granitne stijene [15] .....	22
Slika 12: Okršavanje u vapnencima [16] .....	22
Slika 13: Primjer škrljavosti kod gnajsa [17] .....	23
Slika 14: Dijagram tranzicije od intaktne stijene do stijenske mase [6] .....	24
Slika 15: Utjecaj orijentacije diskontinuiteta na inženjerske projekte [6] .....	26
Slika 16: Primjer vertikalnog dajka u sedimentnoj stijeni na Aljasci [18] .....	27
Slika 17: Slojevita struktura sedimentnih stijena u Škotskoj [19] .....	28
Slika 18: Primjer laminarne strukture na travertinu [20] .....	28
Slika 19: Vrijednosti primarne propusnosti intaktnih stijena [6] .....	29
Slika 20: Vrijednosti sekundarne vodopropusnosti stijenskih masa [6] .....	29
Slika 21: Brana Grande Dixenc (Švicarska) [26] .....	40

## 1. UVOD

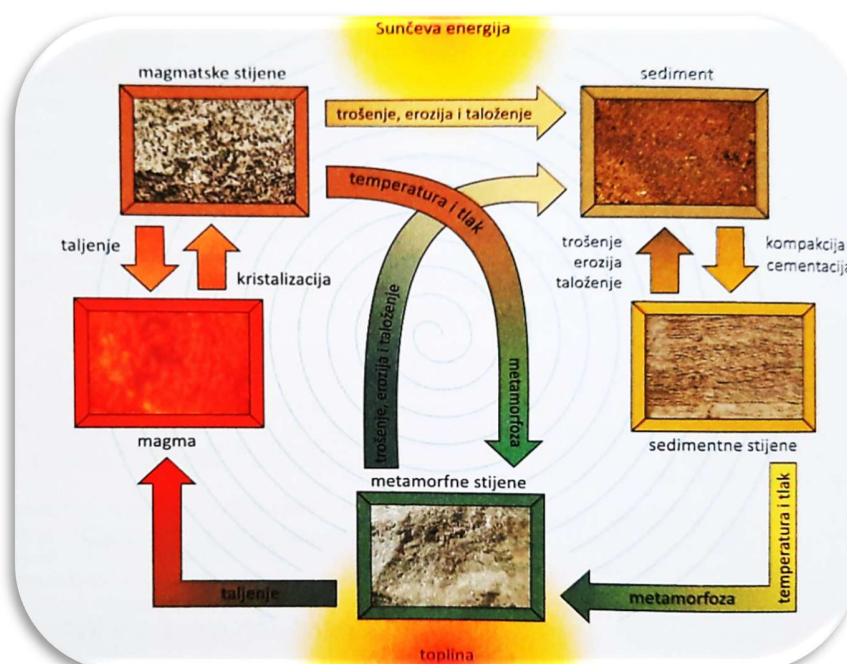
Dijelovi litosfere građeni su od stijena koje su klasificirane na temelju mineralnog sastava, strukture, teksture i geološkog načina postanka. Inženjerska geologija kategorizira stijene na temelju raznih parametara kako bi se mogao dobiti teoretski uvid u njihove karakteristike te fizikalna i mehanička ponašanja. Stijene se prema načinu postanka mogu podijeliti na magmatske, sedimentne i metamorfne stijene. Međutim, vrlo je teško dodijeliti stijenu odgovarajućoj skupini koristeći klasifikaciju na temelju jednostavnih kriterija koji su dostupni na terenu. Zbog toga se u većini slučajeva provode laboratorijska istraživanja kako bi se mogla ustanoviti svojstva same stijene.

U inženjerskoj geologiji promatraju se dva pojma stijene, a to su intaktna stijena i stijenska masa. Stijenska masa sastoji se od blokova intaktnih stijena i diskontinuiteta koji dijele te blokove. Karakteristike intaktne stijene mogu se odrediti na temelju fizikalnih parametara, kao što su: poroznost, zapreminska težina, propusnost, trajnost, jednoosna tlačna čvrstoća, vlačna čvrstoća i brzina širenja elastičnih valova. Na temelju navedenih vrijednosti, intaktna stijena može se lako okarakterizirati, što daljnjim metodama omogućuje ekstrapolaciju i povezivanje sa svojstvima stijenske mase. Fizikalna svojstva su direktno vezana uz mehanička ponašanja stijene, koja ujedno mogu biti određena genezom stijena, utjecaju tektonskih i geoloških procesa te djelovanjima kojima je stijena bila izložena u prirodi.

U građevinarstvu je vrlo bitno poznavanje stijena te razumijevanje njihovih osobina. Pri projektiranju inženjerskih zahvata potrebno je uzeti u obzir dugoročno ponašanje stijena nakon izvedbe radova s obzirom na klimatska i meteorološka djelovanja te prirodu okoline u kojoj se nalazi. U ovom radu definirana su različita fizikalna i mehanička svojstva magmatskih, sedimentnih i metamorfnih stijena. Također su navedene različite primjene određenih vrsta stijena u građevinarstvu te njihove prednosti i nedostaci kod pojedinih radova.

## 2. STIJENE LITOSFERE

Stijene čine dijelove litosfere, a karakterizirane su određenim načinom geološkog postanka, strukturom, teksturom i mineralnim sastavom. Predstavljaju agregate koji mogu biti građeni od jednog minerala (monomineralne stijene, npr. vapnenac, mramor) ili od više njih (polimineralne stijene, npr. pješčenjak, granit). Stijene se mogu definirati po vrsti minerala od kojega su građene, po veličini minerala i njihovom rasporedu ili po načinu postanka [1]. Prema načinu postanka one se dijele na magmatske, sedimentne i metamorfne stijene (Slika 1).

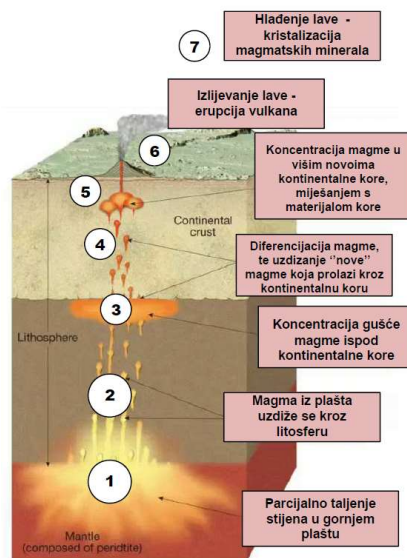


Slika 1: Stijenski ciklus [2]

### 2.1. Magmačke stijene

Magmačke stijene mogu nastati u unutrašnjosti Zemlje ili na njezinoj površini. U Zemljinoj unutrašnjosti na dubinama između 10 i oko 100 km dolazi do magmačke aktivnosti koja uzrokuje prirodno taljenje stijenske mase i njezino kretanje. Rastaljena masa je pretežito silikatne građe te se ujedno naziva i magma. Ima vrlo složen kemijski

sastav čiji udio od 99,25% čine kisik, silicij, željezo, aluminij, kalij, kalcij, magnezij, natrij i titan. Također, sadržava otopljene plinove: sumporovodik, ugljični dioksid, klorovodik i fluorovodik te vodenu paru. Izdizanje taljevine iz unutrašnjosti Zemlje prema površini odvija se zbog razlike u gustoći između nje i okolnih stijena, što dodatno pospješuju duboki lomovi u litosferi (Slika 2). Erupcija magme nastupa pri temperaturama od 900 C do 1300 C, a mogu biti eksplozivne ukoliko je magma viskozna te su plinovi pod visokim tlakom, ili mogu biti tihe i efuzivne ako je magma vrlo fluidna. Postoji kontinuiran raspon intenziteta erupcija između dvije krajnosti te pojedini vulkan može pokazati varijacije jačina između pojedinih erupcija. Silikatna taljevina koja je tijekom erupcije izbačena na Zemljinu površinu naziva se lava. Na samom početku lava je u tekućem stanju te se vrlo brzo kreće hladiti i skrućivati, za razliku od magme koja se u unutrašnjosti hladi vrlo sporo. Stijene nastale kristalizacijom taljevine i polaganim hlađenjem u dubljim dijelovima litosfere nazivaju se dubinske ili intruzivne stijene. Međutim, trošenjem pokrovnih stijena mogu postati izložene i na površini. Nadalje, površinske ili efuzivne stijene očvršćavaju brzim hlađenjem lave na površini litosfere ili blizu površine [1, 2, 3].



Slika 2: Izdizanje magme iz unutrašnjosti prema površini Zemlje [4]

Karakteristike lave, a time ujedno i djelovanje vulkana određeno je viskoznošću lave, tj. kiselosti koja definira težinski postotak  $\text{SiO}_2$ . Također, osim prema mjestu nastanka (dubinske i površinske), magmatske stijene dijelimo i prema udjelu  $\text{SiO}_2$  (Tablica 1). Bazične taljevine pretežito su gabro-bazaltnog sastava te se vrlo lako kreću. Zbog svoje fluidnosti mogu otjecati brzinom i do 50 km/h. Međutim, kisele magme su vrlo viskozne pa im je i kretanje sporo, odnosno nekoliko mm ili cm/h te uglavnom imaju granitno-riolitni sastav [1, 3].

Tablica 1: Podjela magmatskih stijena prema udjelu  $\text{SiO}_2$  [2]

VRSTA MAGMATSKE STIJENE	TEŽINSKI % $\text{SiO}_2$
Kisele	> 63
Neutralne	52 - 63
Bazične	45 - 52
Ultrabazične	< 45

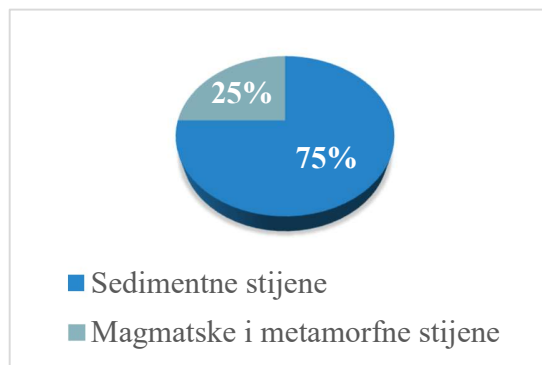
Nadalje, prikazana je klasifikacija nekih od najzastupljenijih magmatskih stijena s obzirom na kriterije mjesta postanka, kiselosti te mineralnog i kemijskog sastava (Tablica 2). Vrlo je bitan proces nastanka stijene (geneza), odnosno njezino mjesto postanka jer ono direktno utječe na strukturu same stijene.

Tablica 2: Klasifikacija magmatskih stijena [2]

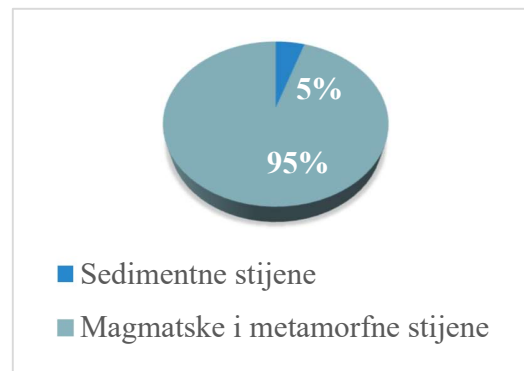
VRSTA STIJENA	KISELE	NEUTRALNE	BAZIČNE	ULTRABAZIČNE
INTRUZIVNE	granit	diorit, sijenit	gabro	peridotit
EFUZIVNE	riolit	andezit, trahit	bazalt	-
ŽIČNE	pegmatit, aplit	vrlo su rijetke	dijabaz	kiberlit
MINERALNI SASTAV	kvarc, feldspat, biotit, muskovit, amfibol, tinjac	piroksen, amfibol, feldspat, plagioklas, tinjac, biotit	plagioklas, piroksen, olivin, augit	olivin, piroksen

## 2.2. Sedimentne stijene

Sedimentne stijene izgrađuju većinu površinskog kopnenog prostora Zemlje (Slika 3), dok u volumnom udjelu sastava litosfere sudjeluje s vrlo malim omjerom u usporedbi s magmatskim i metamorfnim stijenama (Slika 4) [2].

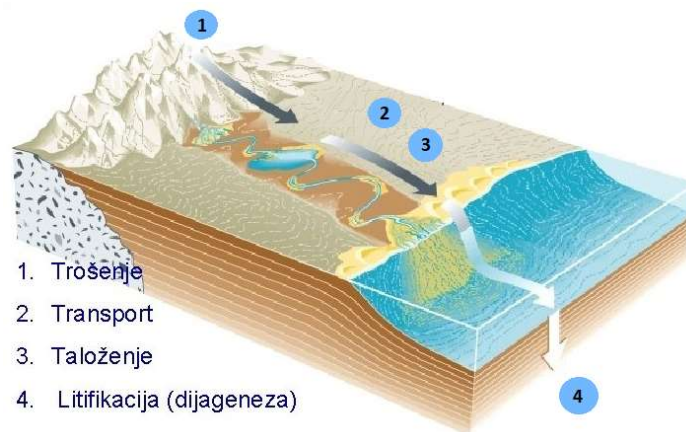


Slika 3: Zastupljenost pojedinih vrsta stijena na površini Zemlje [2]



Slika 4: Zastupljenost pojedinih vrsta stijena u litosferi [2]

Sedimentne stijene mogu nastati na dva načina. Prvi način predstavlja procese gdje su stijene prvo vremenski izložene utjecaju atmosferilija zraka i vode na Zemljinoj površini ili u njezinoj blizini (najčešće do desetak metara dubine). Kao rezultat tome, dolazi do procesa trošenja stijene, odnosno prirodnog raspadanja i izmjene karakteristika same stijene. Novonastale čestice (sediment) se prenosi djelovanjem vode, vjetra ili leda od mjesta svog nastanka. Najčešće se transportiraju pod utjecajem vode koja sortira i selektivno taloži sediment u kopneni i vodeni okoliš. Nadalje, kroz geološko vrijeme (milijuni godina) odvija se proces okamenjivanja sedimenata kojim nastaje sedimentna stijena. Skupina sedimentnih stijena koja nastaje prethodno opisanim procesom se naziva klastične stijene. Izgrađene su od fragmenata (klasta) čiji proces nastanka uključuje kemijsko i fizičko trošenje starijih stijena (magmaatskih, sedimentnih ili metamorfnih), prijenos rastrošenog materijala, taloženje te dijagenezu sedimenata (okamenjivanje i cementacija) (Slika 5) [1, 2, 3].



Slika 5: Proces nastanka sedimentnih stijena [5]

Drugim načinom, minerali se izlučuju izravno iz koncentriranih vodenih otopina (jezera, rijeka, mora, oceana) te se mogu izlučivati kroz dvije vrste procesa (Tablica 3).

Tablica 3: Opis kemijskog i biokemijskog načina nastanka sedimentnih stijena [2, 3]

VRSTA PROCESA	OPIS	PRIMJER
KEMIJSKI (anorganski)	izlučivanje kalcita iz morske vode	vapnenac
	isparavanjem vode nastaju evaporiti	gips, halit
BIOKEMIJSKI (organski)	ugradnja minerala	ugradnja kalcita u ljušturice organizama za vrijeme njihova života
	ugibanjem organizama, njihove se ljušturice s kalcitom talože na dnu oceana te u geološkom vremenu dolazi do njihovog okamenjivanja	vapnenac

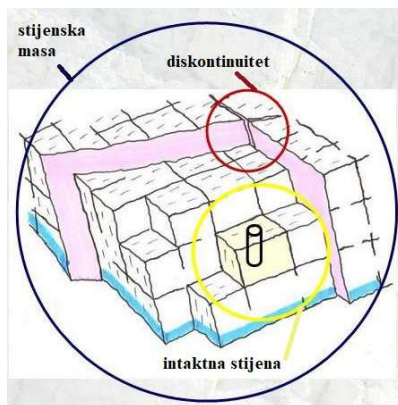


### **2.3. Metamorfne stijene**

Metamorfne stijene nastaju procesom metamorfoze kojom se mijenjaju mineralni sastav i struktura stijene u litosferi pri visokim tlakovima i temperaturama. Takvi režimi najčešće su prisutni kada se tektonskim kretanjima (tektonika ploča) velike mase stijena spuštaju u duboke dijelove litosfere. Budući da u tim uvjetima stijena nema više postignuto ravnotežno stanje s okolinom u kojoj se nalazi, mora proći kroz metamorfozne procese kako bi ponovno postigla stabilnost u novim uvjetima. Odnosno, nastaju nove mineralne vrste koje su u ravnoteži pri uvjetima povišene temperature i tlaka. Bitan čimbenik metamorfoze također je i vrijeme u kojemu će doći do kemijskih reakcija u stijeni zbog promjena fizičko-kemijskih uvjeta. Postoje različite vrste i intenziteti metamorfoze, primjerice procesom rekristalizacije mijenja se struktura, a kemijski sastav ostaje jednak (npr. rekristalizacijom kvarca nastaje kvarcit, a vapnenca mramor), također može doći do promjene mineralnog, ali i kemijskog sastava (npr. pri utjecaju vrućih fluida na stijene, stvaraju se novi minerali). Metamorfne stijene velikim dijelom čine litosferu, a klasificiraju se prema mineralnom i kemijskom sastavu te prema teksturi i strukturi. Nadalje, dio metamorfnih stijena izložen je na Zemljinoj površini kao posljedica tektonike ploča (izdizanja) i erozijskog djelovanja. Proučavanjem takvih stijena, vrše se brojna istraživanja s ciljem dobivanja podataka o temperaturama i tlakovima na velikim dubinama u Zemljinoj kori [1, 3].

### 3. INŽENJERSKA SVOJSTVA STIJENA

Inženjerska geologija definira dva osnovna pojma za razmatranje stijena: intaktna stijena i stijenska masa. Stijenska masa može se promatrati kao čvrsta cjelina koja je diskontinuitetima ili oštećenjima podijeljena na blokove intaktnih stijena (Slika 6) [6].



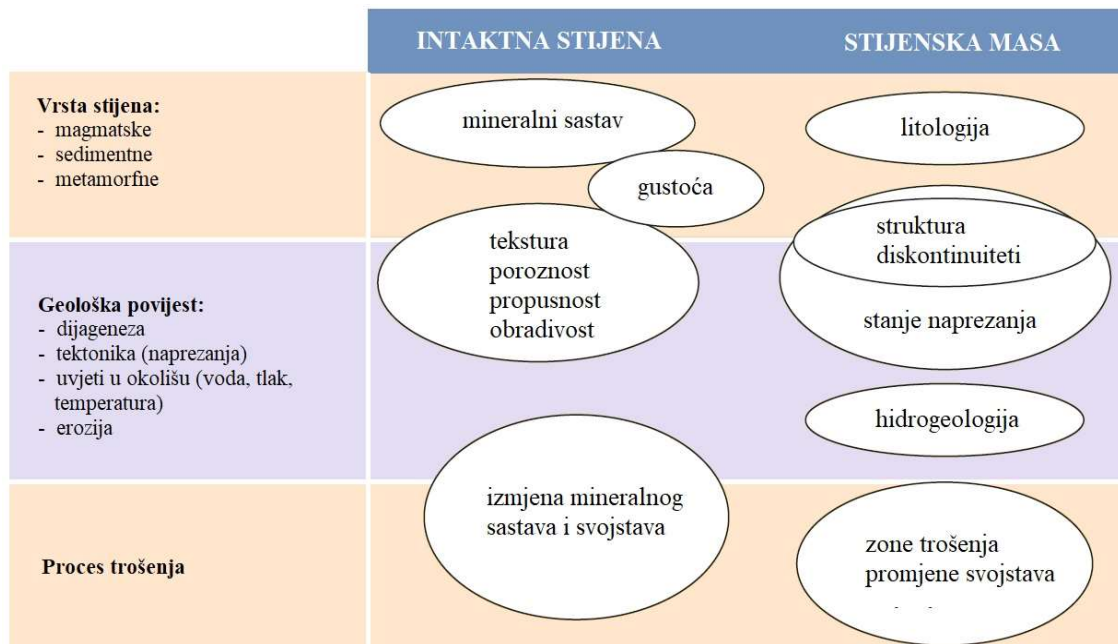
Slika 6: Prikaz stijenske mase prožete diskontinuitetima [7]

Plohe diskontinuiteta direktno utječu na čvrstoću, deformacije, hidrauličke značajke te generalno ponašanje stijenske mase u okolišu. Mehanički gledano diskontinuiranost stijenske mase popraćena je heterogenom i anizotropnom strukturom, što rezultira oslabljenim mehaničkim svojstvima same stijenske mase. Nadalje, intaktna stijena je dio stijenske mase koji ne sadrži diskontinuitete (Slika 7). Međutim, iako se intaktna stijena smatra kontinuumom, njezino ponašanje je heterogeno i anizotropno, ali za razliku od makro-defekata kod stijenske mase, u intaktnoj stijeni su prisutni mikro-diskontinuiteti koji se prožimaju na mikro-razinama teksture i mineralne strukture [6].



Slika 7: Primjeri intaktnih stijena (s lijeva na desno): granit, žuti pješčenjak, vapnenac, crni pješčenjak [8]

Definiranje stijena i stijenskih masa te opisanje njihovog ponašanja je vrlo kompleksan proces zbog utjecaja fizičkih karakteristika i različitih čimbenika na njihova mehanička svojstva. S ciljem pojednostavljenja, na Slici 8 je prikazan geološki utjecaj na fizička i mehanička svojstva intaktne stijene i stijenske mase. Fizička svojstva direktno utječu na čvrstoću i deformabilnost intaktne stijene, a neka od njih su: mineralni sastav, struktura, tekstura, gustoća, poroznost, propusnost, tvrdoća i trajnost. Navedene značajke određene su genezom stijene, tektonskim i geološkim uvjetima te procesima koji su na nju djelovali tijekom vremena. Na mehanička svojstva stijenskih masa utječu dodatne geološke odrednice kao na primjer: tektonski spojevi, litologija, stratigrafija, geološke strukture, dijagenese diskontinuiteta i in situ naprezanja kojima je stijenska masa izložena. Također, na mehaničke karakteristike oba segmenta stijena utječu i drugi parametri: uvjeti okoliša, hidrogeologija te klimatska i meteorološka djelovanja koja nadalje mogu uzrokovati procese trošenja čime se mijenjaju početna svojstva stijena i stijenskih masa [6].



Slika 8: Geološki utjecaj na svojstva intaktne stijene i stijenske mase [6]

### 3.1. Fizička svojstva intaktne stijene

S ciljem identifikacije i opisa svojstava stijena razmatraju se različiti kvantitativni parametri, pomoću kojih se vrši početna geotehnička klasifikacija stijena. Parametri koji se određuju također se nazivaju i indeksna svojstva, koja zajedno s teksturom i mineralnim sastavom određuju mehaničko ponašanje i svojstva intaktne stijene. U Tablici 4 prikazana su prethodno navedena svojstva te način na koji ih se može odrediti [6, 9].

Tablica 4: Svojstva intaktne stijene i način određivanja [6]

	SVOJSTVA	METODA ODREĐIVANJA
IDENTIFIKACIJSKA I KLASIFIKACIJSKA SVOJSTVA	Mineralni sastav	Vizualno identificiranje
	Tekstura	Elektronički i optički mikroskop
	Veličina zrna	Difrakcija X - zraka
	Boja	
	Poroznost	Laboratorijske metode
	Zapreminska težina	
Sadržaj vode		
Propusnost	Ispitivanje propusnosti	
Trajnost	Ispitivanje trajnosti	
MEHANIČKA SVOJSTVA	Jednoosna tlačna čvrstoća	Laboratorijsko ispitivanje Ispitivanje Schmidtovim čekićem
	Vlačna čvrstoća	Direktni i indirektni vlačni testovi
	Brzina zvučnih valova	Laboratorijsko ispitivanje
	Čvrstoća	Triaksijalno ispitivanje
	Deformabilnost	Jednoosno ispitivanje stišljivosti Ispitivanje brzine zvučnih valova

Geološka identifikacija stijene sadrži naziv, mineralni sastav, vrstu cementacije, teksturu i stupanj promjene. Nadalje, na temelju makroskopskih opažanja uzoraka dobivenih mikroskopskim analizama vrši se petrografski opis, odnosno definiraju se: postanak, kompozicija, postojanje mikro-pukotina, tekstura, poroznost i stupanj promjene.

Mehaničko ponašanje stijene pri promjeni vanjskih sila može se pretpostaviti na temelju kristalne strukture, orijentacije minerala i tvrdoće. U nastavku će se detaljnije obraditi najznačajnija svojstva zbog svog direktnog utjecaja na čvrstoću i deformabilnost stijena, a samim time i na mehaničko ponašanje stijena [6].

### ***3.1.1. Poroznost***

Poroznost definira postotak šupljina u ukupnom volumenu stijenske mase ili tla te se uobičajene vrijednosti kreću između 15% i 30%. Prema načinu postanka poroznost se dijeli na primarnu i sekundarnu. Primarna poroznost je u stijeni nastala tijekom njezina postanka te se još naziva i međuzrnski tip poroznosti, a karakteristična je za koherentna i nekoherentna tla te klastične sedimentne stijene. Sekundarna poroznost javlja se kao posljedica deformacija stijena tijekom njezine dijageneze ili prilikom djelovanja tektonskih kretanja koja su u stijeni izazvala pukotinski tip poroznosti. Sekundarni tip javlja se kod magmatskih i metamorfnih stijena te kod većine biogenih i kemijskih sedimentnih stijena. Također, postoji disolucijski ili krški tip poroznosti kod kojeg su pukotine proširene prilikom okršavanja, a razvija se u lako topivim evaporitnim i karbonatnim stijenama. U Tablici 5 su prikazane vrijednosti za određene stijene [6].

### ***3.1.2. Zapreminska težina***

Zapreminska težina stijene predstavlja težinu po jedinici volumena te ovisi o komponentama stijene. Vrijednosti zapreminskih težina stijena variraju u velikim rasponima, za razliku od tala gdje su vrijednosti međusobno približne. U Tablici 5 se nalaze rasponi vrijednosti za pojedine stijene [6].

Tablica 5: Prosječne vrijednosti zapreminskih težina i poroznosti pojedinih vrsta stijena [6]

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

### 3.1.3. Propusnost

Propusnost je sposobnost tla ili stijene da kroz njih teče podzemna voda ili neki drugi fluidi bez oštećenja strukture. Propusnost se definira koeficijentom hidrauličke provodljivosti, koji je vrlo teško pretpostaviti i odrediti. S obzirom na sposobnost primanja i transmitiranja fluida razlikujemo tri vrste propusnosti:

- vodopropusna tla i stijene mogu primiti i transmitirati fluid
- polupropusna tla i stijene imaju sposobnost primanja fluida, ali ga teško dalje transmitiraju
- vodonepropusna tla i stijene vrše transmisiju fluida sporo da se sama transmisija može zanemariti

Većina stijena imaju nisku ili vrlo nisku propusnost. Kroz intaktnu stijenu voda infiltrira i teče kroz pore i pukotine, a propusnost samog tečenja određena je načinom na koji su pore i pukotine međusobno povezane te ostalim čimbenicima poput anizotropnosti, stupnju trošenja tijekom vremena i stanja naprežanja kojemu je materijal izložen. Tablica 6 prikazuje vrijednosti koeficijenata hidrauličke provodljivosti za određene stijene [6].

Tablica 6: Prosječne vrijednosti koeficijenata hidrauličke provodljivosti za određene stijene [6]

STIJENA	HIDRAULIČKI KOEFICIJENT PROVODLJIVOSTI
	[m/s]
Granit	$10^{-9} - 10^{-12}$
Vapnenac i dolomit	$10^{-6} - 10^{-12}$
Metamorfne stijene	$10^{-9} - 10^{-12}$
Muljnjak	$10^{-9} - 10^{-13}$
Sol	$<10^{-11} - 10^{-13}$
Pješčenjak	$10^{-5} - 10^{-10}$
Škriljevac	$10^{-7} - 10^{-8}$
Šejl	$10^{-11} - 10^{-13}$
Vulkanske stijene	$10^{-7} - 10^{-12}$

#### **3.1.4. Trajnost**

Djelovanje agenasa u okolišu uzrokuje kemijsko trošenje, što dovodi do oslabljenja i dezintegracije stijena. Trajnost predstavlja otpornost stijene na te mehanizme, odnosno promjenjivost u okolnostima gdje se mijenjaju komponente ili struktura intaktne stijene. Trajnost stijena povećava se s gustoćom, a smanjuje s većim udjelom vode. Mnogobrojni procesi utječu na mijenjanje svojstava intaktne stijene, kao primjerice: hidratacija, otapanje i oksidacija. Kod stijena koje sadrže znatan udio minerala glina (na primjer: vulkanske stijene, muljnjaci i šejlovi), prisutnost vode ili izloženost zraku uzrokuju smanjenje čvrstoće. Posljedica toga može biti precijenjenost takvih stijena za inženjerske radove, kao što su površinski iskopi, nasipi i tuneli, osim ako se ne pretpostavi njihovo dugoročno ponašanje u kontaktu s atmosferom [6].

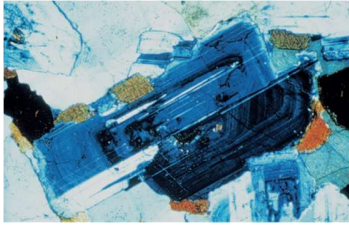

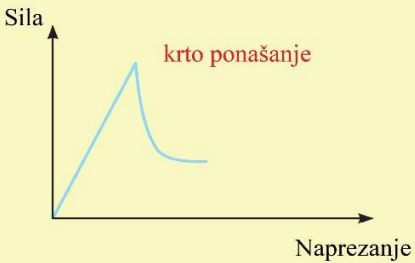
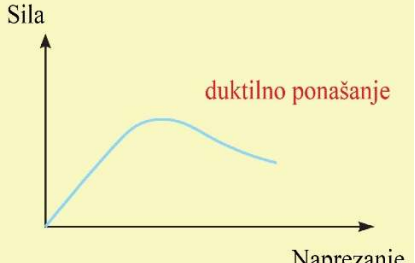
#### **3.1.5. Jednoosna tlačna čvrstoća**

Jednoosna tlačna čvrstoća (UCS) predstavlja najčešće ispitivano svojstvo stijena. Ono definira najveće naprezanje koje stijena može podnijeti pod djelovanjem jednoosnog tlaka. Mjeri se u laboratoriju na uzorku cilindričnog oblika bez bočnog ograničenja. Ovim se ispitivanjem također određuju elastične konstante, odnosno Youngov modul elastičnosti i Poissonov koeficijent te obe konstante ponekad imati vrlo širok raspon parametara zbog raznolikosti fizičkih svojstava (mineralne strukture, poroznosti, cementacije) te anizotropnog karaktera pojedinih stijena (npr. laminacijskih i škriljavih stijena). Čvrstoća ovisi o sili koheziji koja veže minerale čestica u stijeni, kao i o kutu unutarnjeg trenja koji se nalazi između dviju ploha iste stijene, a definira vrijednost minimalnog kuta pri kojem su blokovi istog materijala podvrgnuti procesu klizanja. U većini slučajeva, unutarnji kut trenja iznosi od 25° do 45°. Kod izotropnih i homogenih stijena vrijednosti, vrijednosti kohezije i kuta unutarnjeg trenja mogu varirati s obzirom na stupanj cementacije ili oscilacijama u mineralnom sastavu. Također, svojstvo čvrstoće ovisi i o drugim parametrima kao što su prisustvo vode u porama, veličini graničnih naprezanja te brzini nanošenja opterećenja. Na primjer, ukoliko svježiji granit izložimo



velikim opterećenjima, reagirat će na krto način, dok će muljnjak (primjerice lapor) pokazati svojstva duktilnosti pod srednjim ili malim opterećenjima. U Tablici 7 prikazana je usporedba granita i muljnjaka te grafički rezultati deformacije nakon što su testirani na jednoosno tlačno opterećenje [6].

Tablica 7: Usporedba fizičkih i mehaničkih karakteristika granita i muljnjaka te grafički prikaz rezultata nakon jednoosnog tlačnog opterećenja [6]

	GRANIT	MULJNJAK
VRSTA	intruzivna kisela magmatska stijena	glinovita klastična sedimentna stijena
TEKSTURA	krupnozrnati kristali bez pravilne orijentacije	pravilni kristali sa trakastom i paralelnom orijentacijom minerala
SASTAV	kvarc, feldspat, biotit, muskovit, amfibol, tinjac	glinoviti minerali (pretežno ilit i kaolinit), kvarc i ostali minerali
SNIMKA NAKON TESTA	 <p>petrološki mikroskop</p>	 <p>elektronski mikroskop</p>
GRAF DEFORMACIJE NAKON TESTA	 <p>Sila</p> <p>krto ponašanje</p> <p>Naprezanje</p>	 <p>Sila</p> <p>duktilno ponašanje</p> <p>Naprezanje</p>

Laboratorijski ispitivanjem utvrđuju se svojstva intaktne stijene, a broj potrebnih testova ovisi o cilju istraživanja i vrsti projekta. Lokacija s koje se uzimaju uzorci, a isto tako i veličina te broj ovise o vrsti geološko inženjerskog problema i financijskim

mogućnostima. Laboratorijskim ispitivanjima ne mogu se direktno definirati karakteristike stijenskih masa, ali se mogu dobiti vrijednosti koje se zatim ekstrapoliraju i povezuju sa svojstvima stijenskih masa. Prednost laboratorijskog istraživanja je jeftiniji i jednostavniji način ispitivanja nego na samoj lokaciji te je moguće ispitati veliki broj uzoraka u različitim uvjetima. Postoje razne metode terenskih procjena, a najčešće provedena se može izvesti na osnovi priručnog identifikacijskog pokusa koji se temelji na metodi Međunarodnog društva za mehaniku stijena uz pomoć priručnih opisa i sredstava (nokat, geološki čekić, nož) [6]. Detaljan prikaz procjene naveden je u Tablici 8.

Tablica 8: Klasifikacija stijene prema vrijednostima jednoosne tlačne čvrstoće, određene pomoću priručnog pokusa [9, 10]

STUPANJ	OPIS	UCS [MPa]	TERENSKA IDENTIFIKACIJA	PRIMJERI STIJENA
R0	Ekstremno slaba	0.25 - 1	Materijal se može grepsti i udubljivati noktom.	svježi bazalt, čert, dijabaz, gnajs, granit, kvarc
R1	Vrlo slaba	1 - 5	Materijal se mrvi uslijed jakog udarca geološkim čekićem, može ga se ljuštiti džepnim nožem.	anfibolit, pješčenjak, bazalt, gabro, gnajs, tuf, grandiorit, peridotit, riolit
R2	Slaba	5 – 25	Materijal se može ljuštiti džepnim nožem, a čvrstim udarcem vrhom geološkog čekića nastaju plitke udubine.	vapnenac, mramor, pješčenjak, škriljavac
R3	Srednje čvrsta	25 – 50	Materijal se ne može zagrepsti ili ljuštiti džepnim nožićem, jedino ga je moguće razlomiti jednim udarcem geološkog čekića.	filit, škriljavac, prahovnjak
R4	Čvrsta	50 – 100	Za lomljenje materijala potrebno je više od jednog udarca geološkim čekićem.	vapnenac, mramor, pješčenjak, škriljavac
R5	Vrlo čvrsta	100–200	Za lomljenje materijala potrebno je mnogo udaraca geološkim čekićem.	anfibolit, pješčenjak, bazalt, gabro, gnajs, tuf, grandiorit, peridotit, riolit
R6	Ekstremno čvrsta	> 250	Komad materijala je moguće otkinuti jedino uz pomoć geološkog čekića.	svježi bazalt, čert, dijabaz, gnajs, granit, kvarc

Stijene koje imaju nisku jednoosnu tlačnu čvrstoću ( $< 25$  MPa), često imaju svojstva visoke erodibilnosti i deformabilnosti. Nadalje, čvrste stijene koje imaju visoku jednoosnu tlačnu čvrstoću ( $> 100$  MPa) većinom su magmatske stijene te se zbog toga često koriste u svrhu tehničko-građevnog kamena [11].

### ***3.1.6. Vlačna čvrstoća***

Vlačna čvrstoća stijene je maksimalna vrijednost naprezanja koju materijal može podnijeti jednoosnim rastezanjem prije nego dođe do loma. Ispitivanja se provode u laboratoriju na cilindričnom uzorku primjenom vlačne sile. Kod intaktnih stijena vlačna čvrstoća iznose između 5% i 10% vrijednosti iznosa jednoosne tlačne čvrstoće. Krte stijene bliže su 10%, dok su mekane stijene oko 5% vrijednosti jednoosne tlačne čvrstoće, a za neke sedimentne stijene ta vrijednost može biti i 14% do 16% [6, 12].

### ***3.1.7. Brzina širenja elastičnih valova***

Brzina kojom elastični valovi prolaze kroz stijenu ovisi o elastičnim svojstvima i gustoći materijala. Određivanjem same brzine mogu se dobiti informacije i o drugim karakteristikama stijene, kao što je na primjer poroznost. Klasifikacijski indeks se određuje se uz pomoć brzine širenja longitudinalnih valova te opisuje kvalitetu intaktne stijene. Indeks je u linearnoj ovisnosti o jednoosnoj tlačnoj čvrstoći. Kod stijena ta se vrijednost brzine kreće između 1000 i 6000 m/s. Za trošne stijene vrijednosti se kreću ispod 900 m/s. Primjerice svježi granit može imati vrijednost brzine i do 6000 m/s, dok će se kod istrošenog granita brzina proporcionalno smanjiti na polovicu ili trećinu početne vrijednosti, a kod vrlo istrošene stijene ta vrijednost može biti i manja od 700-800 m/s. U Tablici 9 definirane su neke vrijednosti brzina širenja longitudinalnih valova. Za mnoge stijene mogu se primijetiti široki rasponi mogućih brzina što je uglavnom posljedica oscilacija gustoće te varijacija u svojstvima poroznosti i mineralnog sastava [6].

Tablica 9: Brzina širenja longitudinalnih valova u stijenama [6]

SVJEŽA STIJENA	BRZINA ŠIRENJA LONGITUDINALNIH VALOVA [m/s]
Bazalt	4,500 – 6,500
Konglomerat	2,500 – 5,000
Dijabaz	5,500 – 7,000
Dolomit	5,000 – 6,000
Granit	4,500 – 6,000
Gabro	4,500 – 6,500
Gnajs	3,100 – 6,000
Gips	3,000 – 4,000
Vapnenac	2,500 – 6,000
Mramor	3,500 – 6,000
Lapor	1,800 – 3,200
Muljnjak	1,400 – 3,000
Kvarc	5,000 – 6,500
Sol	4,500 – 6,000
Pješčenjak	1,400 – 4,200
Škriljevac	4,200 – 4,900
Šejl	3,500 – 5,000

## 3.2. Mehanička svojstva stijena

### 3.2.1. Trošenje

Atmosferiliji, temperaturene promjene, voda i rad organizama mogu biti uzročnici trošenja, odnosno razaranja stijena na samoj površini Zemlje ili na vrlo malim dubinama ispod površine. Procesom trošenja dolazi do dezintegracije i/ili dekompozicije geoloških materijala, što dovodi do izmjene mineralnog sastava stijena, gdje se dio minerala prilagođava, odnosno mijenja u nove minerale čija su svojstva stabilna u novonastalim uvjetima. Nadalje, postoje određeni mehanizma trošenja: kemijsko ili dekompozicijsko, fizičko ili dezintegracijsko i biološko trošenje. Sva tri načina su međusobno povezana, a ovisno o geološkom, klimatskom, kemijskom i fizičkom udjelu prevladava jedan od njih.

Kemijsko trošenje je najintenzivniji tip trošenja te prevladava u vlažnoj i toploj klimi. Uzrokuje raspadanje topivih minerala nakon čega se zatim formiraju novi minerali procesima oksidacije, redukcije i hidratacije. Promjena boje intaktne stijene je vrlo česta posljedica kemijskog trošenja, kao i dekompozicija određenih minerala što je vidljivo kod kemijske razgradnje karbonatnih stijena, nakon čega nastaje crvenica (Slika 9).



Slika 9: Crvenica na vrhovima usjeka Istarskog ipsilona [13]

Nadalje, kemijskim procesom razgradnje stijena bogatih mineralima silikata (najčešće feldspata i tinjaca), nastaju minerali glina. Glinene stijene su najosjetljivije na fizičko trošenje jer utječe na njihove fizičke i mehaničke karakteristike. Međutim, u mineraloškom aspektu ostaju često stabilne i ne reagiraju na kemijsko trošenje iz razloga što su se formirale pri temperaturama i tlakovima sličnima onim na površini, iako neke glinene stijene mogu sadržavati dodatne trošne minerale. Međutim, površinske magmatske i metamorfne stijene zbog velike razlike temperature i tlaka u trenutačnim uvjetima okoliša i uvjetima u kojima je stijena izvorno formirana, mogu biti vrlo nestabilne. Iznimka je mineral kvarca koji se smatra najotpornijim petrogenim mineralom, zbog izvornog formiranja pri temperaturama koje su približne temperaturama okoliša ( $\approx 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Nadalje, fizički proces trošenja uzrokuje oslabljenje strukture stijena te njihovu dezintegraciju, a karakterističan je za suhe i hladne klime. Fizičko trošenje najčešće djeluje odlamanjem „listića“ stijenskog materijala uz duž smjera plohe te pojavom mikro-diskontinuiteta prouzročenih djelovanjem soli i leda. Biološki mehanizam

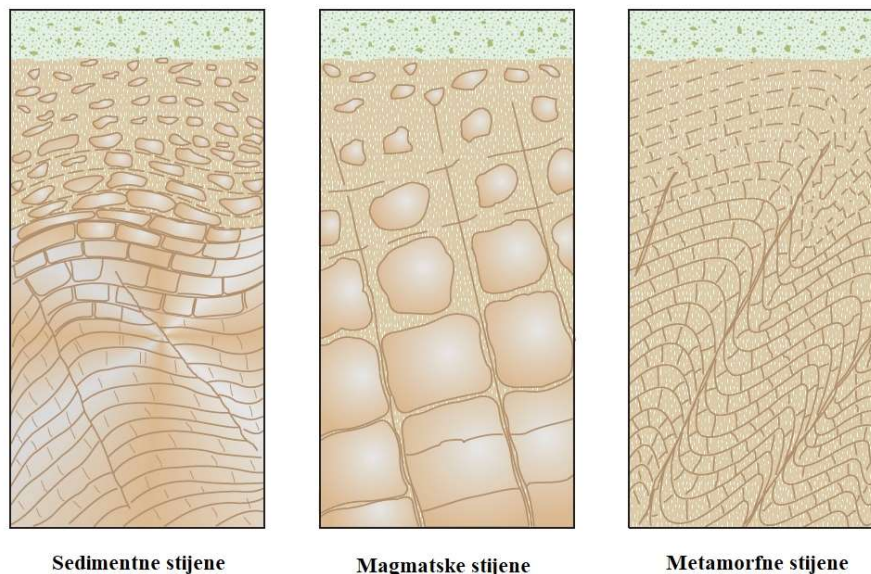
trošenja stijena odvija se zbog otapanja koje je uzrokovano djelovanjem bakterija i huminskih kiselina nastalih truljenjem [6].

Ovisno o vrsti, strukturi i mineralnom sastavu intaktnih stijena može doći do različitih efekata trošenja. Trošenjem se znatno smanjuju fizičko-mehaničke značajke matičnih stijena te je potrebno posvetiti veliku pozornost pri istraživanju lokacija izloženih trošenju kako bi se ustanovio adekvatan pristup pri izvedbi građevinskih radova. Međunarodno udruženje za mehaniku stijena (ISRM) klasificira stupnjeve trošenja gdje tlo predstavlja finalni produkt izazvan trošenjem stijena (Tablica 10). Nadalje, tla koja nastaju trošenjem stijena, ali bez kasnije izloženosti eroziji i transportu, nazivaju se rezidualna tla. Karakteristika rezidualnog tla je graduirana kontaktna zona između stijene i tla, koja je inače jasno izražena. Međutim, većina tala je prenesena nekim prirodnim čimbenikom (gravitacija, voda, vjetar, led) na lokaciju koja je udaljena od mjesta njegovog postanka te se takva tla nazivaju transportirana tla. Po završetku prijenosa, ona se talože u kopneni ili vodeni okoliš te za razliku od rezidualnih tla često imaju izraženu slojevitost [6, 14].

*Tablica 10: Klasifikacija prema stupnju trošenja stijenske mase [14]*

STUPANJ TROŠENJA	POJAM	OZNAKA
I	Svježa stijena	F
II	Neznatno raspadnuta stijena	SW
III	Srednje raspadnuta stijena	MW
IV	Vrlo raspadnuta stijena	HW
V	Potpuno raspadnuta stijena	CW
VI	Rezidualno tlo	RS

Proces trošenja različito utječe na određene stijene i u različitoj mjeri, odnosno intenzitet se povećava s duljom izloženošću vremenskim utjecajima tj. agensima. Na Slici 10 je prikazan odnos stupnja trošenja i dubine kod stijena različitog geološkog nastanka.



**Sedimentne stijene**

**Magmatske stijene**

**Metamorfne stijene**

Slika 10: Trošni profili sedimentnih, magmatskih i metamorfnih stijena [6]

Nadalje, dubina izloženosti stijene trošenju ovisi primarno o vrsti stijene, vremenskom periodu izloženosti stijene trošenju i klimi. Slabi vapnenci, glinovite stijene i porozni pješčenjaci su često trošni do znatno većih dubina nego stijene granita ili metamorfne stijene. Proces trošenja značajno olakšava eroziju, nakon koje slijedi proces taloženja.

Kod magmatskih stijena (granita, diorita) često dolazi do eksfolijacije, tj. procesa trošenja kojim se s ogoljele površine sukcesivno odlamaju, odnosno otkidaju dijelove stijena u slojevima, koncentričnim ljuskama ili u pločicama čija debljina može biti manja od jednog centimetra pa sve do nekoliko metara (Slika 11). Posljedica toga je oslobađanje pritiska pokrovnog sloja materijala, čime se uzrokuju diferencijalna naprezanja u stijeni zbog djelovanja kemijskih i fizičkih sila. Nastanak samih sila može biti zbog oslobađanja naprezanja, odnosno ekspanzije minerala kod stijena koje su zbog erodiranja nadslojeva doprle na površinu. Stijene koje su bile izložene eksfolijaciji često imaju zaobljene izdanke ili su u obliku kupolastog brežuljka [6, 11].



Slika 11: Eksfolijacija granitne stijene [15]

Karakteristika karbonatnih stijenskih masa je proces okršavanja, odnosno korozivno djelovanje podzemnih i površinskih voda u topivim stijenama, a posebno vapnencima (Slika 12). Voda koja sadrži ugljične kiseline pretvara kalcit u kalcijev hidrogen karbonat, koji se kod promjene uvjeta opet izlučuje iz vode kao kalcit [11].



Slika 12: Okršavanje u vapnencima [16]

Karbonatne stijene često su trošne na površini, ali mogu biti izložene trošenju i duž pukotina koje se protežu u unutrašnjosti stijenske mase, kao i slojnih ploha stvarajući



pritom oblike šupljina i dodatnih pukotina karakterističnih za krš. Neki od krških oblika su ponikve, škrape, uvale, krške zaravni i polja, dok su u podzemlju prisutne špilje i kaverne čiji su dijelovi vidljivi na površini u formama jama, estavela i ponora. Krška područja su vrlo propusna što rezultira brzim prodiranjem površinskih voda do krškog vodonosnika. Iz tog razloga su krška područja bogata podzemnim vodama, a oskudijevaju površinskim [6].

Većinu metamornih stijena manifestira škriljava tekstura kroz paralelno slaganje lističastih (tinjci) i štapićastih (amfiboli) minerala. Kod nekih tipova stijena škriljavost je vidljiva po trakastoj formi svijetlih i tamnih te sitnozrnatih ili krupnozrnatih minerala. Gnajs je primjer škriljavca čija trakasta struktura može sadržavati minerale koji su podložni kemijskom trošenju, a iverasto trošenje duž ploha škriljavosti rezultira oslabljenjem stijenske mase (Slika 13). Slejt i filit također imaju izraženu škriljavu teksturu zbog koje se mogu lako cijepati na tanke ploče te se koristiti u svrhu tehničko-građevnog kamena [6, 11].



Slika 13: Primjer škriljavosti kod gnajsa [17]

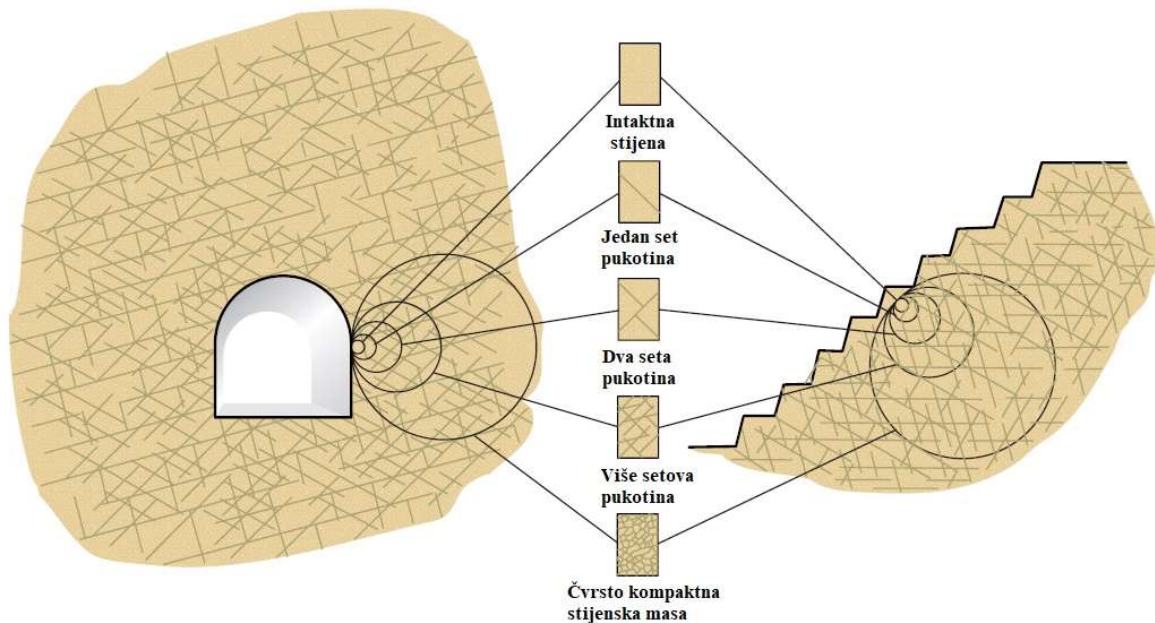
### ***3.2.2. Čvrstoća i deformabilnost stijenske mase***

Čvrstoća stijenske mase se može definirati kao ukupna otpornost određene vrste stijene na tlačno, vlačno ili hidrostatsko naprezanje u određenim uvjetima. Za proračune inženjerskih analiza potrebno je definirati parametre čvrstoće, kao što su kohezija i kut unutarnjeg trenja te je također potrebno uzeti u obzir sustav pukotina i tlak podzemne

vode koji djeluje unutar stijenske mase. Stupanj razlomljenosti stijenske mase utječe na ponašanje stijenske mase i parametre čvrstoće koji se mogu odrediti pomoću:

- čvrstoće intaktne stijene
- posmične čvrstoće jednog seta diskontinuiteta
- posmične čvrstoće dva ili tri diskontinuiteta reprezentativnih za stijensku masu
- ukupne čvrstoće stijenske blokovite strukture s izotropnim ponašanjem

Na Slici 14 je prikazan prijelaz između različitih segmenata koji su prethodno navedeni.



Slika 14: Dijagram tranzicije od intaktne stijene do stijenske mase [6]

Kod građevinskih radova plitkog i dubokog iskopa, mehaničko ponašanje i stabilnost su direktno povezani s prisutnošću diskontinuiteta i čvrstoćom stijena. Dimenzije stijenskih masa, kao ujedno i prirodni uvjeti kojima je izložena ne mogu se ostvariti u laboratoriju te za procjenjivanje in situ čvrstoće također nema odgovarajućih metoda.

Iz tog razloga se čvrstoća stijenskih masa određuje indirektnim metodama, a elementi koji određuju čvrstoću stijenske mase mogu se analizirati pomoću :

- empirijskih metoda koje se temelje na laboratorijskim ispitivanjima i iskustvu
- indirektnih metoda koje se temelje na indeksima kvalitete (geomehanička klasifikacija)
- matematičkih modela i povratnih analiza
- fizičkih modela

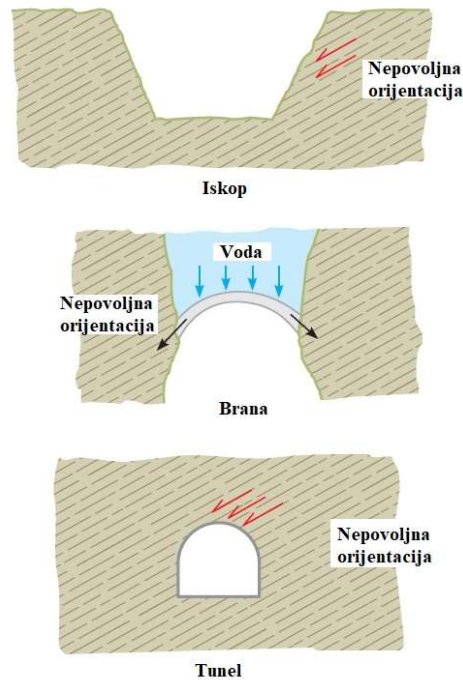
Najčešće su korištene empirijske metode kojima se određuju kriteriji sloma ili snage u svrhu procjene čvrstoće stijenske mase pri određenim naprezanjima i svojstvima materijala te se temelje na podacima kao što su:

- rezultati ponašanja intaktne stijene pri različitim naprezanjima
- predviđeni utjecaji diskontinuiteta na ponašanje stijenske mase
- predviđanje cjelokupnog ponašanja stijenske mase

### ***3.2.3. Diskontinuiteti***

Diskontinuiteti su sve ravnine mehaničkog ili sedimentnog podrijetla koje razdvajaju i izoliraju blokove intaktnih stijena unutar stijenske mase. Vlačna čvrstoća ploha diskontinuiteta u stijenama je vrlo niska, dok u nekim slučajevima iznosi i nula. Stijenske mase prožete diskontinuitetima imaju takozvanu blokovitu strukturu s anizotropnim ponašanjem, koje je rezultat brojnih setova diskontinuiteta s različitim orijentacijama. Čvrstoće kod diskontinuiteta različitih orijentacija, primjerice: slojevite stijenske mase, ploha paralelnih sa slojevima ili okomitima na njih, mogu biti značajno različite. Pomoću orijentacije diskontinuiteta može se odrediti stabilnost tla pri izvođenju građevinskih radova iskopa ili temeljenja (Slika 15). Na primjer, kod lučnih lukobrana prisutnost diskontinuiteta koji su paralelni sa smjerom resultantne sile težina lukobrana i vode,

moгу izazvati probleme u stabilnosti, kao i diskontinuiteti s izraženim udubljenjima i prožimanjima paralelnim s osi tunela. Prisutnost različitih setova diskontinuiteta s različitim orijentacijama određuje plohe loma u stijenskoj masi kao i oblik te veličinu blokova intaktnih stijena [6].



Slika 15: Utjecaj orijentacije diskontinuiteta na inženjerske projekte [6]

Svojstva stijenskog materijala te vrsta, broj i karakteristike diskontinuiteta direktno utječu na ponašanje intaktne stijene u stijenskoj masi. U stijenskim masama, blokovi intaktnih stijena visoke čvrstoće jasno su definirana diskontinuitetima te na tim područjima dolazi do pojave loma, dok recimo u kompaktnim stijenskim masama formiranih od intaktnih stijena slabe čvrstoće, razlike između krutosti diskontinuiteta i čvrstoće stijena nisu toliko relevantne. Granit i kvarcit predstavljaju stijene kod kojih je čvrstoća intaktnih stijenskih blokova mnogo jača od čvrstoće diskontinuiteta koji ih razdvajaju. Međutim, u mekanim stijenama kao što su lapor, muljnjak i škriljevac, razlika između čvrstoća obje komponente nije velika te kod takvih slučajeva ponašanje ukupne stijenske mase može

biti određeno svojstvima intaktne stijene. Iz tog razloga se kod inženjerskog projektiranja dimenzije projekta moraju uzeti u obzir, zajedno sa strukturom stijenske mase i značajkama diskontinuiteta. Također, za potrebe analiziranja građevinskog projekta potrebno je mjerljivim parametrima opisati strukturu stijenske mase. Opis mora biti detaljan kako bi mogao poslužiti za kvalitetnu klasifikaciju stijenske mase. Neke od karakteristika diskontinuiteta su: orijentacija, zije, razmak, hrapavost stijenki, postojanost, ispuna, čvrstoća stijenki, prisustvo vode, veličina blokova u stijenskoj masi te broj sustava diskontinuiteta. Vrlo bitnu ulogu ima ispuna materijala između susjednih ploha diskontinuiteta čija posmična čvrstoća te čvrstoća samog materijala utječu na mehaničko ponašanje. Neke od ispuna mogu biti gline, breče s različitim udjelima gline ili kristalizirani materijali (npr. kalcit i gips). Zbog velike raznolikosti materijala, ispune imaju vrlo široko područje fizikalnih karakteristika vezanih uz deformabilnost, posmičnu čvrstoću i propusnost. Kontaktne plohe različitih litoloških vrsta stijena također mogu imati vrlo važan utjecaj na ponašanje stijenskih masa, a posebno kod dajkova koji predstavljaju pločasta tijela magmatskih stijena nastalih prodiranjem magme te presijecanjem sedimentnih stijena pod određenim kutom (Slika 16) [6].



Slika 16: Primjer vertikalnog dajka u sedimentnoj stijeni na Aljasci [18]

Većina sedimentnih stijena ima slojeviti tip tekture formirane od niza paralelnih površina slojeva čija debljina može iznositi nekoliko centimetara pa do nekoliko metara.

Najčešće je to posljedica naglog prekida taloženja te promjene vrste minerala ili veličine zrna (Slika 17).



Slika 17: Slojevita struktura sedimentnih stijena u Škotskoj [19]

Kod laminacijskog tipa unutarnje slojevitosti svaki pojedini sloj može imati debljinu između 1 i 10 mm te jednak petrografski i granulometrijski sastav (Slika 18).

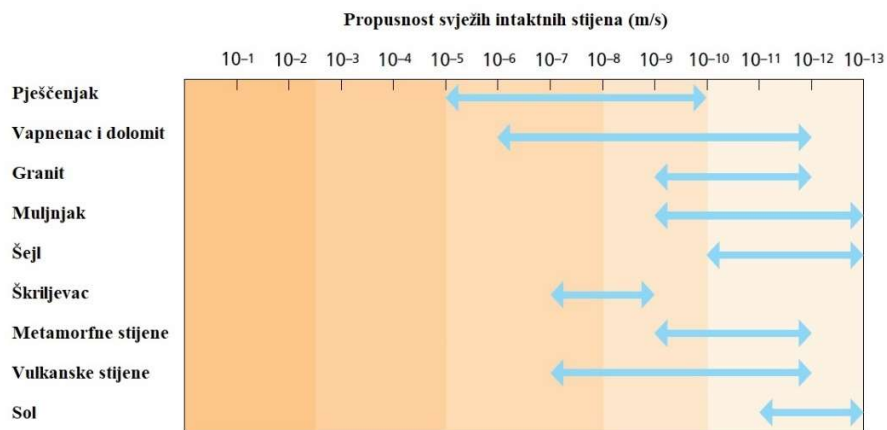


Slika 18: Primjer laminarne strukture na travertinu [20]

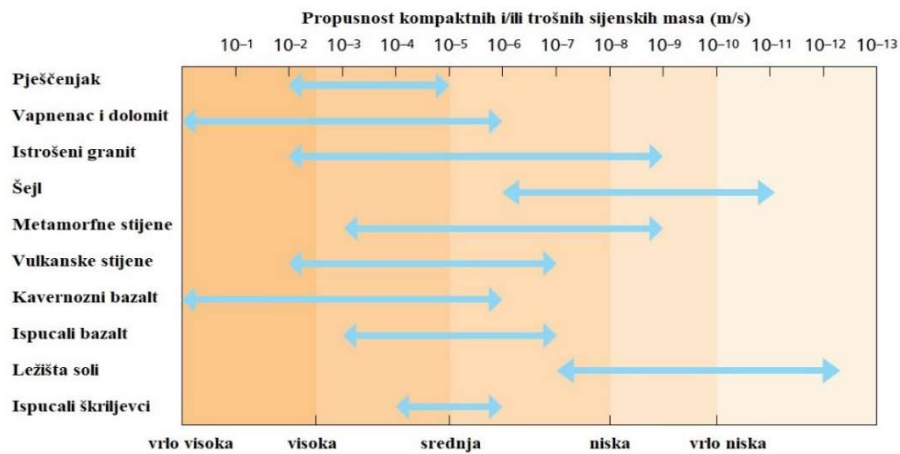
### ***3.2.5. Prisustvo vode u stijenama***

U pojedinim inženjerskim zahvatima potrebna je određena brzina kojom voda teče kroz stijenu. Ovisno o poroznosti i spojenosti tih pora, stijene se mogu definirati kao propusne ili kao nepropusne. Propusnost predstavlja sposobnost protoka vode kroz međusobno povezane pore u stijeni, a izražava se koeficijentom propusnost, odnosno mjernom jedinicom brzine. Za stijene prosječne vrijednosti iznose od 1 m/dan do 1 m/godinu.

Kod intaktne stijene voda teče kroz mikro-pukotine i spojene pore te se to naziva primarna propusnost i mjeri se u laboratoriju. Dok stijenske masa karakterizira sekundarna propusnost, odnosno tečenje vode duž diskontinuiteta te se ona određuje in situ ispitivanjima bušotina. Intaktne stijene imaju zanemarivu propusnost u odnosu na stijenske mase, osim kod pješčenjaka i drugih poroznih stijena kroz čiji intaktni element voda može teći (Slike 19 i 20) [6].



Slika 19: Vrijednosti primarne propusnosti intaktnih stijena [6]



Slika 20: Vrijednosti sekundarne vodopropusnosti stijenskih masa [6]

U propusnim stijenskim masama međusobno povezane pore i/ili diskontinuiteti koji se nalaze ispod nivoa podzemne vode ili vodnog lica, ispunjeni su vodom. Zbog promjena u litologiji i topografiji, vodno lice može na određenim mjestima dosegnuti razinu površine terena. Na tim područjima moguća je oscilacija razine podzemne vode zbog primjerice dugotrajnih kiša, crpljenja ili sušnog perioda. Kišnica koja infiltrira u podzemlje u većini slučajeva iznosi mali postotak, a tek neznatan dio toga dođe do podzemne vode.

Broj i otvorenost diskontinuiteta, njihova međusobna povezanost te vertikalna naprezanja koja rastu s dubinom, direktno utječu na protok vode u kompaktnim stijenskim masama. U teoriji ispod određene razine diskontinuiteti su zatvoreni ili ne postoje, stoga je propusnost stijenske mase u tim područjima jednaka primarnoj propusnosti, odnosno propusnosti intaktne stijene. Kod nekih stijenskih masa podzemna voda smanjuje čvrstoću unutarnjim erodiranjem mekanih i glinovitih materijala, na način da ispire fini materijal i stvara pore u strukturi stijenske mase. U mekanim glinovitim ili glinovito-pjeskovitim stijenama, prisutnost vode smanjuje silu kohezije, kao i kut unutarnjeg trenja, čime se povećava deformabilnost stijena. Topivi materijali kao što su gips i karbonati, podložni su procesima otapanja koji uzrokuju formiranje diskontinuiteta i stvaranja špilja, ponora i jama [6].



## **4. INŽENJERSKI ASPEKTI MAGMATSKIH STIJENA**

### **4.1. Inženjerska svojstva magmatskih stijena**

Primjena magmatskih stijena u građevinarstvu ovisi o njihovim fizikalnim i mehaničkim karakteristikama, koje su posljedica načina postanka stijena. Intruzivne stijene imaju homogenu strukturu, izotropna svojstva i masivnu teksturu, što ih čini znatno povoljnijima od efuzivnih stijena. Budući da se razvijaju polaganom i potpunom kristalizacijom rastaljene magme, poroznost i propusnost su prilično niske. Tereni koji su izgrađeni od svježih intruzivnih stijena su vrlo pogodni za izvođenje podzemnih objekata većih dimenzija, primjerice tunela. Također, daju prirodan građevinski materijal koji se može upotrijebiti kao tehnički i arhitektonsko-građevni kamen.

Efuzivne magmatske stijene imaju izraženu veću razliku u teksturi i strukturi što izravno utječe na njihova fizikalna i mehanička svojstva. Vrijednosti poroznosti se kreću u širokom rasponu kao posljedica vezikularne teksture, odnosno pukotina koje su nastale naglim hlađenjem. Njihova primjena je slična primjeni intruzivnih stijena, ali se zbog teškoće poliranja češće rabe kao tehnički kamen. Zbog podložnosti hidrotermalnim izmjenama, efuzivne stijene su često različitog mineralnog sastava u odnosu na primarno nastale stijene te sadrže brojne sekundarne minerale, što uzrokuje oslabljena fizikalna i mehanička svojstva. Nadalje, zbog podložnosti terena efuziva eroziji, u zonama trošenja i raspadanja mogu se pojaviti klizišta te procesi jaružanja. Sve magmatske stijene nisu vodopropusne, već se voda zadržava samo u pukotinama i zonama raspadanja [21, 22].

### **4.2. Magmačke stijene i graditeljstvo**

#### ***4.2.1. Podzemni i površinski iskopi***

U intruzivnim stijenama prožetost pukotinama i utjecaj procesa trošenja koncentrirani su do 60 metara dubine ispod površine tla. Ispod te dubine svojstva stijena su gotovo idealna za izvedbu podzemnih radova. Miniranje je vrlo ekonomičan pristup kod granitnih stijena jer na velikom dijelu dionice nije potrebno izvoditi podgrađivanje. Međutim, stijene koje

su izložene velikim naprezanjima mogu uslijed rasterećenja formirati pločaste pukotine koje su paralelne sa stijenkama tunela, a posljedica takvih pukotina može biti ispadanje stijenskih blokova.

U Skandinavskim zemljama podzemne prostorije koriste se kao bazeni, hokej igrališta, kazališta, proizvodni pogone, industrijski objekti i objekti za različitu namjenu. Razlog tome je pleistocenska glacijacija koja je veći dio Skandinavskog štita zahvatila erozivnim procesom, a posljedica toga je prisustvo svježih stijena koje se nalaze neposredno ispod površine. Svojstva granita pri iskopima su vrlo povoljna zato što uzrokuju znatno manje troškove podzemnih radova.

Tekstura neistrošenog bazalta i andezita je uobičajeno prečvrsta za iskop pomoću tunnelskih strojeva te se najčešće provodi miniranje. Dugački tuneli u efuzivnim stijenama trebaju stalnu zaštitu od pada kamenih blokova (npr. nanosom mlaznog betona) zbog značajno dugačkih pukotina te je također vrlo bitno uzeti u obzir utjecaj podzemne vode. Kod prisustva vertikalnih dajkova onemogućava se horizontalno kretanje podzemne vode te pri izvođenju iskopa u takvim stijenama može doći do prodora vode na čelo tunela. Nadalje, piroklastični slojevi su vrlo mladi te mogu biti u potpunosti necementirani što uzrokuje često istjecanje kroz tunel zajedno s dotocima vode. Nadalje, tuneli koji se nalaze u područjima reaktivnih ili aktivnih vulkana, mogu biti vrlo opasni jer može doći do oslobađanja toksičnih plinova te naglih izvora vruće vode (gejzira) [21, 22].

#### ***4.2.2. Temeljenje građevina i brana***

Granit se smatra kao odličan temelj betonskih brana te se veliki broj brana temelji na granitnim stijenama. Granitne stijene često sadrže tri ili više seta diskontinuiteta i pukotina koje dijele stijensku masu na blokove. Gotovo sve granitne stijene imaju pukotine koje se spajaju te pojedina područja koja su podložna trošenju. Kada dođe to tečenja vode u tim pukotinama, stvara se pritisak koji uzrokuje pomicanje blokova stijene. Kod djelomično trošnih stijena pukotine su uobičajeno ispunjene materijalom koji je sklon erodiranju te ih je zbog toga potrebno očistiti i u njih injektirati beton. Ako

ispunom nije moguće ostvariti nepropusnost, potrebno je izvršiti produbljivanje iskopa do kvalitetnije stijenske mase. Kod akumulacija građenih od svježeg granita potrebno je zacementirati sve otvorene pukotine kako bi se spriječilo procjeđivanje vode iz samih akumulacija. Zemljane i nasute brane mogu se izvoditi na potpuno trošnoj stijeni, ali moraju se uzeti u obzir karakteristike materijala kao što su podložnost eroziji, propusnost, poroznost i sl. [21, 22, 23].

#### ***4.2.3. Materijali za građenje***

Efuzivne magmatske stijene se često koriste kao inženjerski materijal, primjerice u ulogama: agregata za portland cement i asfaltnog betona, ispune za brane i lukobrane, materijala za izgradnju tračničke kolničke konstrukcije i temelja autocesta te tehničko-građevnog kamena. Nakon što se odabranom materijalu uklone piroklastični i šupljikavi dijelovi, preostali dio spreman je za građevinsku uporabu. Međutim, postoje i iznimke. Efuzivne stijene sadrže vulkansko staklo kao primarni sastojak koji reagira s lužinama tijekom vezivanja portland cementa, uzrokujući pucanje i značajno oštećenje strukture. Neke granitne stijene unatoč kemijskoj stabilnosti mogu pridonijeti lošoj trajnosti betona. Primjerice, zbog loše međusobne povezanosti tekstura, zrnca se mogu odlomiti i pri umjerenom procesu trošenja, smanjujući time čvrstoću, trajnost i elastičnost stijene [21, 22].

## **5. INŽENJERSKI ASPEKTI SEDIMENTNIH STIJENA**

### **5.1. Inženjerska svojstva sedimentnih stijena**

Svojstva sedimentnih stijena ovise o sastavu i načinu trošenja određene vrste stijena. Mehaničkim trošenjem stijena dolazi do pucanja i usitnjavanja stijena, čime se povećava reaktivnost stijene za izlaganje bržim i intenzivnijim kemijskim promjenama. Kao što je prethodno navedeno, postoje dvije osnovne skupine sedimentnih stijena: klastične i neklastične (nastale kemijskim i biokemijskim procesima). Fizikalna i mehanička svojstva sedimentnih stijena se veoma razlikuju pa čak i u različitim varijacijama iste skupine stijena, a posebno u vrijednostima poroznosti i tlačne čvrstoće. Primarna poroznost karakteristična je za klastične sedimentne stijene, dok je sekundarna zastupljena kod većine kemijskih i biogenih sedimentnih stijena. Također, krški tip poroznosti razvija se u karbonatnim i lako topivim evaporitnim stijenama zbog procesa okršavanja. Zone trošenja kod slabih vapnenaca, glinovitih stijena i poroznih pješčenjaka dopiru do znatno većih dubina nego kao kod granitnih i metamorfnih stijena.

### **5.2. Sedimentne stijene i graditeljstvo**

#### ***5.2.1. Podzemni i površinski iskopi***

Podzemne prostorije i tuneli se vrlo uspješno izvode u vapnencima i dolomitima jer redovito imaju dobru stabilnost i visoku nosivost. Neki od potencijalnih problema koji se mogu javiti u vapnencima zbog okršenosti su urušavanja u raspucanoj zoni, iznenadni prodori vode ili klizanje blokova po plohama slojevitosti. Izvođenje podzemnih radova može biti relativno jednostavno zbog dobre stabilnosti i lakog bušenja što omogućuje brzo napredovanje bez potrebe za podgrađivanjem. Općenito su vapnenci i dolomiti najzahvalnije stijene za izvedbu podzemnih objekata i tunela, osim u područjima jače razlomljenosti. Također, iznimka su i siparišta zbog niske stabilnosti. Kod evaporita uvjeti za iskop su također vrlo povoljni, osim kod gipsa niske čvrstoće koja je rezultat prisustva mnogo šupljina, poremećene slojevitosti i zona breča. Hidrotehnički tuneli

izvedeni u gipsu moraju biti zaštićeni od procjeđivanja jer bi inače otapanjem stijena mogle nastati kaverne koje mogu uništiti tunel.

Prilikom izgradnje prometnica u krškim terenima, vrlo je veliki problem održati stabilnosti kosina usjeka i zasjeka zbog zona razlomljenosti s pukotinama različitog zijeva u svim smjerovima koje mogu biti prazne ili ispunjene crvenicom. Ukoliko dođe do nestabilnosti dijelova stijenske mase, može doći do odrona i slijevanja vode na prometnice, noseći pri tome nanose kršja i crvenice. Iz tog razloga je vrlo važno uzeti u obzir vodoodrživost objekta pri projektiranju.

U pješčenjacima se podzemni iskopi i tuneli u većini slučajeva izvode uspješno, tek su manji inženjerski problemi prisutni kod mekih, slabo cementiranih te kvarcom bogatih i dobro cementiranih pješčenjaka. Kod izvedbe tunela u trošnim pješčenjacima i rasjednim zonama, postoji mogućnost prodora vode na čelo tunela. Nadalje, ukoliko se radovi iskopa uspore u takvoj zoni može doći do urušavanja. U dobro cementiranim kvarcnim pješčenjacima radovi iskopa iziskuju znatne financijske troškove zbog jačeg trošenja bušaćeg pribora. Također, bušenje u pješčenjacima koji sadrže visok udio kvarca može stvoriti teške zdravstvene probleme rudarima zbog udisanja silicijske prašine koja je vrlo otrovna.

Površinski iskopi u pješčenjacima se klasificiraju prema ripanju. Masivni pješčenjaci debelih slojeva ne mogu se ripati, dok se ispucani pješčenjaci tankih slojeva vrlo lako ripaju što smanjuje troškove eksploatacije te ujedno i štetna djelovanja uslijed miniranja. Također, mekani pješčenjaci su vrlo podložni eroziji uslijed djelovanja atmosferilija. Pri površinskom iskopu u konglomeratima, može se naići na blokove velikih dimenzija čiji promjer iznosi tri ili više metara. Zbog otežanog transporta, takve blokove je potrebno minirati ili usitniti.

U kompaktnim muljnjacima koji imaju visok udio minerala montmorilonita pri izvođenju dubokih iskopa može doći do bubrenja ukoliko se odmah nakon iskopa ne nanese

opterećenje kao na primjer ispuna ili građevina. Prisutnost vode može uzrokovati bubrenje, koje se može nastaviti i nakon postavljanja opterećenja. U tom slučaju je potrebno promijeniti težinu samog opterećenja i površinski dio stijene usidriti za čvrstu stijenu [21, 22].

### ***5.2.2. Temeljenje građevina i brana***

Temeljenje na vapnencima i dolomitima je vrlo povoljno zbog velike nosivosti. Međutim, iako temeljenje u kršu često može biti uspješno, vrlo je bitno obratiti pozornost na potencijalne probleme i istraživanja kako bi se oni spriječili. U krškim terenima trebali bi se ispitati pukotinski sustavi i odrediti je li se u dubini do koje se manifestira projektirani tlak na stijenu pojavljuju veće pukotine ili kaverne čiji bi svod pod pritiskom tlaka mogao popustiti i na taj način uzrokovati slijeganje i utonuće objekta. Ukoliko se istraživanjima potvrde takva područja, potrebno je prelocirati objekt ili poboljšati svojstva stijenske mase da bi se objekt mogao izvesti bez ugrožavanja njegove funkcionalnosti. Nadalje, pri izvođenju dubinskog temeljenja na više pilota potrebno je izvesti bušotine ispod pilota na kritičnim lokacijama, kako bi se otklonila opasnost od postojanja kaverni u tim točkama. Temeljenje na gipsu nije poželjno jer se struktura gipsa u doticaju s vodom značajno narušava i može doći do slijeganja temelja.

Tereni koji su izgrađeni od čvrstih, vezanih klastičnih sedimentnih stijena kao što su pješčenjaci, konglomerati, breča i lapor, čine stabilnu podlogu za izvođenje radova i temeljenja na njima. Temelji koji su izvedeni u pješčenjacima podložnim trošenju moraju biti zaštićeni od djelovanja podzemne vode kako ne bi došlo do ispiranja čestica i naposljetku konsolidacije temelja. Nadalje, zbog nepovoljnog utjecaja atmosferilija, slabo cementirani pješčenjaci gube postojanost tijekom uporabnog vijeka inženjerskog objekta te ih je iz tog razloga potrebno zaštititi određenom vrstom obloge. Također, porozni i trošni pješčenjaci imaju češću uporabu pri izgradnji zemljanih (nasutih) brana, nego pri gradnji betonskih gravitacijskih brana. Materijali koji se koriste za zemljane brane imaju veću deformabilnost od betona, a s obzirom da brane u kanjonima često imaju

promjenjivu visinu vodostaja, postoji opasnost od diferencijalnog slijeganja te naposljetku sloma brane.

Šejlovi se mogu primijeniti u izvođenju drenažnih ili injekcijskih zavjesa ispod same brane, pod uvjetom da nisu skloni trošenju, bubrenju i cijepanju. Ovisno o udjelu montmorilonita ili neke druge vrste gline koja je sklona bubrenju, može doći do smanjenja posmične čvrstoće nasipa, odnosno sloma pokosa nasipa [11, 21, 22, 25].

### **5.2.3. Materijali za građenje**

Vapnenci i dolomiti često su korišteni kao agregat za proizvodnju portland cementa. Potreban oblik i graduiranost stijene dobiva se drobljenjem stijena te ukoliko agregat sadrži više od 15% sitnozrnatih materijala, narušava se sama kvaliteta agregata. Gips nepovoljno utječe na vezanje cementa te se iz tog razloga ne koristi kao agregat. Evaporitne stijene sadrže podzemnu vodu bogatu sulfatima koja može oštetiti beton. Potrebno je koristiti cement koji sadrži visok udio željeza kako ne bi došlo do reakcije sa sulfatom. Nadalje, dolomitni agregat se preporučuje za izgradnju kanalizacijskih kanala jer je otporan na koroziju. Mramor i neke vrste vapnenaca upotrebljavaju se kao dekorativni kamen na fasadama objekata pod uvjetom da se ploče ne režu pretanko kako ne bi došlo do pucanja ploča pri deformaciji zgrade.

Primjena pješčenjaka u graditeljskoj praksi je vrlo široka, kao na primjer za stupove mostova, nogostupe, potporne zidove, izradu stubišta i slično. Dobro cementirani pješčenjaci mogu se koristiti za nasipe, dok porozni pješčenjaci nisu prikladni u svrhu agregata za beton zbog tendencije upijanja vode što može uzrokovati promjene značajki. Kvarcni pješčenjaci se zbog različitih lijepih boja često upotrebljavaju kao prirodni kamen pri oblaganju interijera. Nadalje, konglomerati su pogodni za eksploataciju u određenim uvjetima, a mogu se također primijeniti kao tehnički i arhitektonsko-građevni kamen. Međutim, njegova uporaba u građevinarstvu je ograničena zbog značajno teže obradivosti [21, 22, 25].

## **6. INŽENJERSKI ASPEKTI METAMORFNIH STIJENA**

### **6.1. Inženjerska svojstva metamorfnih stijena**

Rekristalizacija je najčešći način postanka metamorfnih stijena te direktno utječe na promjenu fizikalnih i mehaničkih svojstava. Tereni koji su građeni od metamorfnih stijena imaju veliku razlomljenost i trošnost, što ih čini vrlo nepovoljnima za izvedbu građevinskih radova. Međutim, tereni građeni od kvarcita, mramora i škriljavaca koji imaju viši stupanj metamorfizma, imaju znatno povoljnija svojstva za temeljenje objekata i podzemne radove. Nadalje, samo nekoliko metamorfnih stijena ima praktičnu primjenu [21, 22].

### **6.2. Metamorfne stijene i graditeljstvo**

#### ***6.2.1. Podzemni i površinski iskopi***

Masivne stijene gnajseva koje nemaju svojstvo folijacije predstavljaju izvrsne uvjete za izvedbu iskopa većih podzemnih prostorija. Ukoliko je kod stijena folijacija značajno izražena pri podzemnim iskopima može doći do problema sa stabilnošću. Primjerice kod stijena kojima se pruža folijacija orijentacije sličnoj orijentaciji tunela, trenje ima nisku vrijednost između ploha folijacije što uzrokuje skretanje krune svrdla, čime se os tunela odmiče s predviđenog pravca. Kako bi se spriječili značajni pomaci, potrebno je nakon svake faze iskopa ispraviti otklon. Takvim načinom dodatno se produljuje trasa tunela i pojavljuju se gubitci vremena te povećanje troškova. Bušenjem iskopa u kvarcitu i kvarcnom gnajsu uzrokuje se povećano trošenje bušačih krana, dok izvođenje iskopa s TBM-om (eng. Tunnel Boring Machine; hrvatski je naziv krtica) nije moguće jer je kvarcitet tvrda abrazivna stijena. Nadalje, ako je tunel izveden u tinjčevim ili kloritnim škriljavcima, postoji vjerojatnost da će doći do stiskanja tunela te je za stijenska okna koja imaju strm nagib škriljavosti, potrebno izvesti posebne građevinske radove kojima će se kontinuirano podupirati klinovi tijekom iskopa. Čak i kod tunela manje veličine koji



se izvode u filitu i trošnom škriljavcu, može doći do odloma i ispadanja blokova s površine.

Izvođenje iskopa u trošnim zonama posebno je opasno jer se čvrstoća stijene prilikom trošenja smanjuje te postoji opasnost od klizanja po folijaciji. Kod metamorfnih stijena moguća je pojava četiri ili više setova diskontinuiteta, što može uzrokovati ispadanje stijenskih blokova prilikom iskopa.

Također, jedna vrsta blokova mogu biti klinovi omeđeni s površinom iskapanja i dvije ravnine diskontinuiteta. U državi Montani (SAD) iznad brane Libby nalazilo se nekoliko klinova u metamorfnoj stijeni. S obzirom na to da je stijena bila izrazito trošna, postojala je moguća opasnost da jedan od većih klinova klizne u akumulacijsko jezero te time izazove destruktivan val. Kako bi se spriječila potencijalna šteta, postavljen je sustav kojim su se pratili pomaci klina kako bi se na vrijeme reagiralo ukoliko bi došlo do njegovog klizanja [11, 21, 22].

### **6.2.2. Temeljenje građevina i brana**

Kod trošnih metamorfnih stijena često se pojavljuju prahovita i pjeskovita tla pa je potrebno izvoditi duboke temelje s ciljem dosizanja nosivosti slojeva koji imaju malu deformabilnost ili kako bi se na tlo mogle prenijeti velike horizontalne sile. Izvođenje bušotina velikih promjera kako bi se mogli postaviti piloti za temeljenje može biti otežano ukoliko se na području bušenja nalaze kvarcni blokovi. Kao druga varijanta mogu se postaviti piloti kojima se sile u tlo prenose trenjem preko vrha i plašta stupa, ili se mogu koristiti temeljne ploče. Na mjestima gdje je planirano izvođenje temelja građevine potrebno je izvršiti istraživačke bušotine kako bi se ustanovile potencijalne klizne plohe. Nadalje, u uvjetima vrućih i suhih mjeseci, potrebno je beton izliti u tankom sloju pri iskopu kako ne bi došlo do isušivanja te se nakon toga izvodi temeljenje.

Kod folijacije koja je orijentirana tako da izvire na površinu terena gdje je predviđeno izvođenje temelja, mora se odabrati jedno od navedenih rješenja:

- temelji se moraju postaviti na većoj dubini kako bi se izbjegla mogućnost nastajanja klizne plohe po folijaciji;
- sidra se moraju postaviti tako da se učvrsti okolna stijena;
- temelji se moraju pomaknuti na drugu lokaciju.

Ukoliko se u trošnoj zoni nalazi izdanak kvarcita, može se s krivom pretpostavkom o kvaliteti stijenske mase ići u izvođenje radova temeljenja brane. Na granici Zimbabvea i Zambije planirana je izgradnja brane Kariba. Prilikom istražnih radova, ustanovljeno je kako se desna strana brane nalazi na kvarcitu ispod kojeg se nalazi zona gnajsa. Obje stijene su procijenjene kao pogodne za temeljenje dvostruke lučne brane visine 128 m. Pri izvođenju radova je ustanovljena jaka razlomljenost kvarcita i velika trošnost gnajsa, nakon čega su dijelovi stijenske mase djelomično uklonjeni te zamijenjeni slojem betona koji je izveden na čvrstom gnajsu.

Temeljenje velikih brana nije preporučeno na škriljevcima zbog potencijalnog formiranja klizišta na bokovima brane, padinama oko akumulacijskog jezera i pristupnim cestama. Brane St. Francis i Malpasset su primjeri brana koje su izgrađene na škriljevcima te kod kojih je došlo do formiranja sloma. Međutim, postoje brane temeljene na škriljevcima kod kojih nije došlo do pojave sloma. Jedan od primjera je brana Grande Dixenc u Švicarskoj visine 285 m, koja je istodobno jedna od najviših gravitacijskih brana na svijetu (Slika 21) [21, 22].



Slika 21: Brana Grande Dixenc (Švicarska) [26]

### ***6.2.3. Materijali za građenje***

Slejt je metamorfna stijena nastala iz sitnozrnastih sedimentnih stijena te ima vrlo izraženu škriljavu teksturu. Lako se cijepa na tanke ploče te se iz tog razloga koristi kao tehničko-građevni kamen za pokrivanje krovova. Međutim, ostale metamorfne stijene nisu najpogodniji stijenski materijal jer ih je vrlo teško eksploatirati zbog promjenjive kvalitete stijenske mase koja utječe na pojavu ispadanja stijenskih blokova. Također, vrlo je bitno ispitati fizičko-mehanička svojstva prije korištenja metamorfnih stijena kao agregat za beton, jer škriljevce karakterizira oštar oblik i pucanje tinjaca što onemogućuje kontroliranje graduiranosti samog agregata [11, 22].

## 7. DISKUSIJA I ZAKLJUČCI

Inženjerska geologija opisuje dijelove litosfere s obzirom na stijenu koja ju izgrađuje. Klasifikacija stijena provodi se na temelju brojnih osobina, a neke od njih su struktura, tekstura, mineralni sastav i način geološkog postanka stijena. Prema načinu postanka stijene se mogu podijeliti na magmatske, sedimentne i metamorfne stijene. Svaka stijena se klasificira na temelju parametara koji opisuju njezina fizikalna i mehanička svojstva. S aspekta inženjerske geologije, stijenska masa se definira kao masa velikih razmjera koja je diskontinuitetima podijeljena na blokove intaktnih stijena. U inženjerskom pogledu intaktna stijena može biti opisana na temelju raznih fizikalnih vrijednosti, kao na primjer: poroznost, zapreminska težina, propusnost, trajnost, jednoosna tlačna čvrstoća, vlačna čvrstoća i brzina širenja elastičnih valova. U ovom radu, detaljno su definirane prethodno navedene karakteristike te su istaknute vrijednosti pojedinih parametara za određene vrste magmatskih, sedimentnih i metamorfnih stijena. Također, provedena je analiza utjecaja pojedinih parametara na mehanička svojstva stijena.

Magmačke stijene mogu se podijeliti s obzirom na stupanj kiselosti, mineralni i kemijski sastav te mjesto postanka koje direktno utječe na strukturu same stijene. S obzirom na mjesto postanka, mogu se podijeliti na intruzivne i efuzivne stijene. Intruzivne stijene karakterizira izotropna i masivna struktura, s prilično niskom poroznosti i propusnosti, dok je kod efuzivnih stijena izražena veća razlika u teksturi i strukturi, što rezultira širokim rasponom poroznosti. Zbog prednosti svojih svojstava, intruzivne stijene se često koriste za izvedbu građevinskih radova, kao što su podzemni iskopi te temeljenja građevina i brana. Jedna od glavnih prednosti je mogućnost miniranja bez potrebe za podgrađivanjem na većem dijelu trase, što čini radove znatno ekonomičnijima. Efuzivne stijene se primjenjuju za slične radove kao i intruzivne, ali se često pojavljuju u ulogama agregata za portland cement, ispune za brane i lukobrane, temelja autocesta i ostalog inženjerskog materijala.

Ponašanje i svojstva sedimentnih stijena ovise o načinu trošenja kojim su nastale te o samom sastavu stijena. Što utječe na veliku međusobnu razliku fizikalnih i mehaničkih svojstva, a posebice tlačnih čvrstoća i poroznosti. Sedimentnim stijenama zone trošenja kod glinovitih stijena, slabih vapnenaca i poroznih pješčenjaka, dopiru do znatno većih dubina nego kod magmatskih i metamornih stijena. Stoga je potrebno vrlo dobro ispitati teren prije izvedbe radova u njima. Primjena sedimentnih stijena u građevinarstvu je vrlo velika. Podzemne prostorije i tuneli su općenito vrlo uspješno izvedeni u vapnencima i dolomitima zbog dobre stabilnosti i visoke nosivosti. Dok je primjena pješčenjaka moguća za stupove mostova, izvedbu potpornih zidova, nogostupa, itd. Nadalje, agregati dolomita se primjenjuju kod izgradnje kanalizacijskih kanala zbog njihove otpornosti na koroziju.

Metamorfne stijene karakterizira škrljava struktura koja značajno utječe na njihova svojstva. Tereni građeni od metamornih stijena imaju znatno izraženu trošnost i veliku razlomljenost, što može uzrokovati pojavu ispadanja stijenskih blokova. Zbog teške eksploatacije, metamorfne stijene u većini slučajeva nisu najpogodniji stijenski materijal. Međutim, masivne stijene gnajseva kod kojih svojstvo folijacije nije izraženo, mogu predstavljati vrlo dobre uvjete za iskope podzemnih prostorija. Također, stijene slejta i filita se zbog svoje škrljave teksture mogu vrlo lako cijepati na tanke ploče koje se mogu primijeniti kao tehničko-građevni kamen.

Primjena znanja i iskustva iz inženjerske geologije u građevinarstvu je od neizmjerne važnosti. Vrlo je bitno poznavati fizikalna i mehanička svojstva te vrijednosti parametara stijene na kojima se predviđa izvođenje radova. S obzirom na geološke procese kojima je stijena izložena, inženjerski radovi u vrlo kratkom vremenu mijenjaju stanje naprezanja kojima je stijenska masa bila izložena, što može dovesti do rasterećenja i preraspodjele naprezanja u terenu. Na temelju terenskih i laboratorijskih istraživanja potrebno je provesti detaljne analize kako bi se izvedba građevinskih radova uspješno provela.

## 8. LITERATURA

- [1] A. van der Pluijm, B., Marshak, S., Earth Structure (An Introduction to Structural Geology and Tectonics), International Student Edition, 2004.
- [2] Vlahović, T., Geologija za građevinare, Sveučilište u Splitu, 2010.
- [3] Clarke, F. W. i Washington, H. S., The composition of the Earth's Crust, 1924.
- [4] Jagodnik, P., Interna prezentacija "Minerali", kolegij Primjenjena geologija, Sveučilište u Rijeci, 2019.
- [5] Jagodnik, P., Interna prezentacija "Stijene", kolegij Primjenjena geologija, Sveučilište u Rijeci, 2019.
- [6] Gonzalez de Vallejo, L.I., Ferrer, M., Geological Engineering, CRC Press, 2011.
- [7] Jagodnik, P., Interna prezentacija "Stijenska masa", kolegij Primjenjena geologija, Sveučilište u Rijeci, 2019.
- [8] Rock Mechanics and Rock Engineering [Online], 2019 (citirano 2021, Kolovoz 10.), Dostupno na: [https://www.researchgate.net/figure/Photographs-of-rock-specimens-left-to-right-Qingshan-granite-Yellow-sandstone\\_fig1\\_333291331](https://www.researchgate.net/figure/Photographs-of-rock-specimens-left-to-right-Qingshan-granite-Yellow-sandstone_fig1_333291331)
- [9] Briševac, Z., Hrženjak, P., Buljan, R., Modeli za procjenu jednoosne tlačne čvrstoće i modula elastičnosti, Građevinar 68, 2016.
- [10] Marinos, P., Hoek, E.: Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2001.
- [11] Benac, Č., Rječnik pojmova u općoj i primijenjenoj geologiji. Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, 2016.

- [12] Duncan, C.W., Foundations on rock 2nd edition, CRC Press, 1999.
- [13] Istarski ipsilon: Bina Istra [Online], 2011. (citirano 2021, Kolovoz 10.), Dostupno na: <https://www.vecernji.hr/vijesti/istarski-ipsilon-bina-istri-drzava-dala-13-milijarde-kuna-252131>
- [14] Dugonjić Jovančević, S., Interna prezentacija "Klasifikacije stijenske mase", kolegij Mehanika tla i stijena, Sveučilište u Rijeci, 2019.
- [15] Exfoliation of granite dome rock [Online], 2014. (citirano 2021, Kolovoz 12.), Dostupno na: [https://www.researchgate.net/figure/Exfoliation-of-granite-dome-rock-in-the-enchanted-rock-state-natural-area-Texas-USA\\_fig5\\_264118646](https://www.researchgate.net/figure/Exfoliation-of-granite-dome-rock-in-the-enchanted-rock-state-natural-area-Texas-USA_fig5_264118646)
- [16] Limestone fissures [Online], 2008. (citirano 2021, Kolovoz 12.), Dostupno na: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Limestone\\_fissures\\_-\\_panoramio.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Limestone_fissures_-_panoramio.jpg)
- [17] Foliation [Online], 2018. (citirano 2021, Kolovoz 12.), Dostupno na: <https://www.britannica.com/science/foliation-geology>
- [18] Magmatic Dikes [Online], (citirano 2021, Kolovoz 12.), Dostupno na: <https://courses.lumenlearning.com/geo/chapter/reading-dikes-and-sills/>
- [19] Bedding planes in sedimentary rocks [Online], 2019. (citirano 2021, Kolovoz 12.), Dostupno na: <https://www.alamy.com/bedding-planes-in-sedimentary-rocks-on-the-se-tip-of-south-ronaldsay-orkneys-scotland-uk-image260280811.html>
- [20] Lamination [Online], 2006. (citirano 2021, Kolovoz 12.), Dostupno na: [https://en.wikipedia.org/wiki/Lamination\\_\(geology\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Lamination_(geology))
- [21] Šestanović., Š, Osnove inženjerske geologije (primjena u graditeljstvu), Sveučilište u Splitu, 1993.
- [22] Goodman, R.E., Engineering Geology: Rock in Engineering Construction, 1993.

[23] Goodman R.E., Karaca, M., Hatzor, Y., Rock Structure in Relation to Concrete Dams on Granite, ASCE Library, (citirano 2021, Kolovoz 14.), Dostupno na: <https://cedb.asce.org/CEDBsearch/record.jsp?dockey=0081169>

[24] Wenworth, C.K., A scale of grade and class term for classifying sediments, The Journal of Geology, 1922.

[25] Bell, F.G., Engineering Geology (Second Edition), 2007.

[26] The Grande-Dixence dam [Online], 2016. (citirano 2021, Kolovoz 12.), Dostupno na: <https://www.dixence-resort.ch/en/actualites/history/>