

Ispitivanje intaktne stijene u PLT uređaju

Vučinović, Iva

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:157:528503>

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

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



Repository / Repozitorij:

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



image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

Iva Vučinović

Ispitivanje intaktne stijene u PLT uređaju

Završni rad

Rijeka, 2021.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Preddiplomski sveučilišni studij
Građevinarstvo
Mehanika tla i stijena**

**Iva Vučinović
0114029765**

Ispitivanje intaktne stijene u PLT uređaju

Završni rad

Rijeka, srpanj 2021.

Naziv studija: **Sveučilišni preddiplomski studij Građevinarstvo**

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Građevinarstvo

Znanstvena grana: Geotehnika

Tema završnog rada

ISPITIVANJE INTAKTNE STIJENE U PLT UREĐAJU
INTACT ROCK PLT TESTING

Kandidatkinja: **IVA VUČINOVIĆ**

Kolegij: **MEHANIKA TLA I STIJENA**

Završni rad broj: **21-P-53**

Zadatak:

U radu će se dati pregled uvjeta opterećenja intaktne stijene i zakona čvrstoće. Opisat će se normama propisani postupci jednoosnog i troosnog tlačnog ispitivanja uzoraka u preši za stijene te postupci terenske procjene tlačne čvrstoće intaktne stijene. U Laboratoriju za geotehniku provest će se ispitivanja uzoraka vapnenaca u Point Load Test uređaju. Iz dobivenih rezultata prikazat će se odgovarajuće korelacije indeksa čvrstoće u točki i procijenjene tlačne čvrstoće intaktne stijene za ispitane uzorke.

Tema rada je uručena: 24. veljače 2021.

Komentor:

dr. sc. Josip Peranić
dipl. ing. građ.

Mentorica:

izv. prof. dr. sc. Sanja Dugonjić Jovančević
dipl. ing. građ.

IZJAVA

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

Iva Vučinović

U Rijeci, 29. lipnja 2021.

Ispitivanje intaktne stijene u PLT uređaju

SAŽETAK

Tlačna čvrstoća intaktne stijene je jedan od parametara koji je od najvećeg interesa za geotehničku struku. Ispitivanja u laboratoriju su ispitivanja koja daju precizne rezultate i procjene tlačne čvrstoće jer su provedena u skladu s normom koju propisuje ISRM (International Society for Rock Mechanics). U ovome radu provedeno je laboratorijsko ispitivanje 23 uzoraka vapnenca, Poin Load Testom testom. 6 ih je ispitano dijametralnim testom, 4 aksijalnim te 13 testom nepravilnih uzoraka. Dobivene su vrijednosti UCS-a (uniaxial/unconfined compressive strength) te indeksa čvrstoće u točki za svaki od triju provedenih testova.

KLJUČNE RIJEČI:

tlačna čvrstoća, in situ ispitivanje, PLT ispitivanje, ISRM, indeks čvrstoće u točki

Intact rock PLT testing

ABSTRACT

Compressive strength is one of the parameters that is of big interest for geotechnical field of study. Testing in the laboratory is giving more precise results and estimations of compressive strength because the testing is conducted in consideration with the standard that gave the ISRM (International Society for Rock Mechanics). It more affordable and more precise in estimating compressive strength of intact rock, unlike in situ testing. A laboratory testing has been conducted on 23 samples of limestone using the PLT test. 6 of the samples has been used for diametral test, 4 for the axial test and 13 for the irregular lump test. The results that were obtained were UCS (uniaxial/unconfined compressive strength) and also Point Load Strength index for each of the three tests that have been made.

KEY WORDS:

Compressive strength, in situ testing, PLT testing, ISRM, Point Load Test index

SADRŽAJ

1	UVOD	1
1.1	Uvodno o tlačnoj, vlačnoj i posmičnoj čvrstoći	1
1.2	Uvjeti opterećenja intaktne stijene	2
2	KRITERIJ SLOMA	5
2.1	Mohr Coulombov zakon	5
2.2	Hoek-Brownov zakon	8
3	ISPITIVANJE TLAČNE ČVRSTOĆE INTAKTNE STIJENE.....	13
3.1	Jednoosno tlačno ispitivanje	13
3.2	Troosno tlačno ispitivanje	17
3.3	Naponsko-deformacijska krivulja.....	20
4	PROCJENA TLAČNE ČVRSTOĆE INTAKTNE STIJENE	23
4.1	Terenska procjena.....	23
4.2	Schmidtov čekić	24
4.3	Point Load test	26
5	PROVEDENO POINT LOAD TEST ISPITIVANJE	32
5.1	Dijametralni pokus	33
5.2	Aksijalni pokus	38
5.3	Pokus na uzorcima napravljenih uzoraka	39
6	ZAKLJUČAK	43
7	LITERATURA	44

POPIS SLIKA:

Slika 1: Utjecaj veličine uzorka na naponsko-deformacijsku krivulju [5].....	3
Slika 2: Konfiguracije ispitivanja [5]	4
Slika 3: Mohr Coulombov zakon sloma [6]	5
Slika 4: Veza među normalnim i posmičnim naprezanjima na kliznoj plohi za 5 geoloških uvjeta [7]	7
Slika 5: Preša za jednoosno tlačno ispitivanje u Laboratoriju za geotehniku na Građevinskom fakultetu u Rijeci	13
Slika 6: Triaksijalna ćelija u Laboratoriju Građevinskog fakulteta u Rijeci	18
Slika 7: Kompletna naponsko-deformacijska krivulja [15]	20
Slika 8: Dvije vrste krivulja u predjelu nakon sloma [15]	22
Slika 9: Schmidtov čekić iz Laboratorija za geotehniku Građevinskog fakulteta u Rijeci	24
Slika 10: PLT uređaj u Laboratoriju za geotehniku Građevinskog fakulteta u Rijeci	26
Slika 11: Konusni šiljak [21].....	27
Slika 12: Oblik uzoraka za: a) dijametralni test, b) aksijalni test, c) blok test, d) test na uzorku nepravilnog oblika [22]	29
Slika 13: Pripremljeni uzorci za ispitivanje aksijalnim i dijametralnim pokusom	32
Slika 14: Fotografije a), b), c), d), e), f) predstavljaju uzorke dijametralnog pokusa nakon sloma	35
Slika 15: Fotografije a) i b) predstavljaju uzorke aksijalnog pokusa, nakon sloma.....	39
Slika 16: Fotografije a), b), c), d) i e) predstavljaju uzorke pokusa na nepravilnim uzorcima, nakon sloma.....	42

POPIS TABLICA:

Tablica 1: Procjena vrijednosti konstante „a“ te odnosa m_b/m_i na osnovi strukture stijenske mase i kakvoće površine stijenki diskontinuiteta [10]	10
Tablica 2: Procjena jednoosne čvrstoće na terenu [16].....	23
Tablica 3: Ovisnost vrijednosti C o dimenzijama uzorka jezgre [23].....	31
Tablica 4: Dimenzije uzoraka dijametralnog pokusa	33
Tablica 5: Parametri izračuna dijametralnog pokusa	33
Tablica 6: Dimenzije uzoraka aksijalnog pokusa.....	38
Tablica 7: Parametri izračuna aksijalnog pokusa	38
Tablica 8: Dimenzije uzoraka pokusa na nepravilnim uzorcima	40
Tablica 9: Parametri izračuna pokusa na nepravilnim uzorcima	40

1 UVOD

Stijenska masa se sastoji od više blokova, međusobno odvojenih diskontinuitetima, od kojih svaki od njih ima svojstva intaktne stijene. Postoje mnoge bitne razlike u svojstvima između stijenske mase i intaktne stijene, [1] ali s obzirom da je intaktna stijena tema ovog rada, veći će biti fokus na njenim svojstvima, karakteristikama te načinu ispitivanja.

Svojstva intaktne stijene su veoma važna kod primjerice predviđanja brzine i veličine deformacija otvora u stijenama ili pri procjeni čvrstoće stijenske mase [1]. Procjena čvrstoće predstavlja veliki izazov u analizama i projektiranju svih vrsta geotehničkih radova, bilo da se radi o temeljenju mostova, brana, objekata visokogradnje ili stabilnosti kosina. Najveći problem čini usvajanje parametara čvrstoće stijenske mase velikih dimenzija. S obzirom na to kolike su zapravo dimenzije stijenske mase te kakvi su joj parametri čvrstoće odabire se metoda kojom će se odrediti čvrstoća te stijenske mase [2]. Mogu se koristiti i najjednostavnije metode procjene na terenu, poput one pomoću palca, nokta ili uz pomoć geološkog čekića, ali s obzirom na napredovanje tehnologije, a tako i geotehničkih ispitivanja, pouzdanijim su se pokazala ispitivanja poput onog uz pomoć Schmidtovog čekića te pomoću Point Load Testa. PLT metoda se zbog svoje jednostavnosti i male težine samog aparata može koristiti i kod terenskih ispitivanja isto kao i u laboratoriju. Valjkasti uzorci za ovu vrstu ispitivanja dobivaju se pomoću istražne bušotine. One, uz dobivanje uzoraka, daju i mogućnost izvođenja ispitivanja za statičko određivanje deformabilnosti i čvrstoće, ispitivanje vodopropusnosti te geofizička ispitivanja [3].

1.1 Uvodno o tlačnoj, vlačnoj i posmičnoj čvrstoći

Čvrstoća je osnovno inženjersko svojstvo uzorka jedne stijene i odgovara veličini naprezanja u trenutku kada se dogodi slom. S obzirom na to da naprezanje koje se nanosi može biti tlačno, vlačno i posmično, posljedično tome, i čvrstoća može biti tlačna, vlačna i posmična.

Najveća čvrstoća intaktne stijene je tlačna čvrstoća, najčešće se i koristi u inženjerskoj praksi te je najjednostavnije za odrediti. UCS (uniaxial/unconfined compressive strength) tj. jednoosna tlačna čvrstoća je najšire korišten parametar u geotehnici, kada je u pitanju stijenska masa. Iz jednog uzorka se preporučuje dobiti 5 ispitnih uzoraka, kako nehomogenost stijene i njene pukotine ne bi značajno utjecale na krajnji rezultat ispitivanja. Može se ispitivati na dva

načina: ispitivanjem s kontroliranim naprežanjem ili ispitivanjem s kontroliranom deformacijom [3]. Više o ovoj vrsti ispitivanja će biti riječ u jednom od narednih poglavlja.

Vlačna čvrstoća je, kod svih stijena, najmanja od svih triju vrsta čvrstoće [1]. Ispitivanje vlačne čvrstoće se najčešće provodi neizravnim metodama, a rjeđe izravnim. Upravo iz razloga jer se stijena ni u prirodi ne nalazi u uvjetima direktnog vlaka te je priprema uzoraka, kao i postupak izvođenja, puno jednostavniji [4]. Jedan od načina ispitivanja vlačne čvrstoće je pomoću Brazilskog testa. Princip je takav da se određuje vlačna čvrstoća stijene na način da se stijena podvrgava tlačnom opterećenju. To je moguće iz razloga što većina stijena, kada se nalazi u dvoosnom stanju naprežanja, upravo popušta vlačno u slučaju da je jedno od dva glavna naprežanja vlačno, a drugo tlačno.

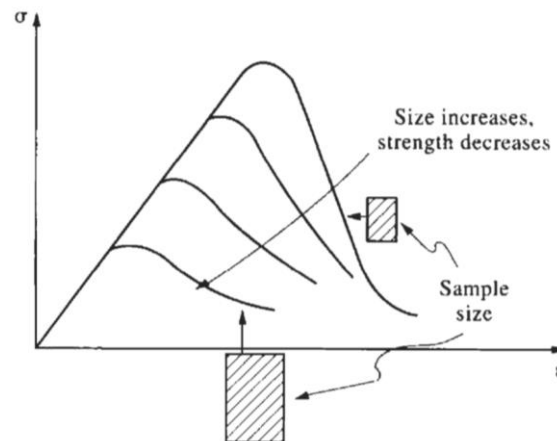
Kod diskontinuiteta su oblik i hrapavost površine diskontinuiteta te stanje trošnosti stijene najveći faktori utjecaja na posmičnu čvrstoću određene stijenske mase. Bitni čimbenici su stanje samih diskontinuiteta te njihov razmak. Kod stijenske mase također na posmičnu čvrstoću utječe i njena tlačna čvrstoća, ali i kut trenja intaktne stijene. Posmična čvrstoća na kliznoj plohi je glavni uzročnik (ne)stabilnosti stijenskih pokosa. Omjer sila otpora te aktivnih sila je izražen faktorom sigurnosti. Da bi faktor sigurnosti bio 1, sile moraju biti u ravnoteži [4]. Ovisno o tome o kakvoj vrsti stijene je riječ, o stanju naprežanja te uvjetima dreniranja, odabire se vrsta testiranja posmične čvrstoće. Može se mjeriti direktno, pomoću direktnog smicanja ili indirektno, jednoosnom ili troosnom kompresijom. Kada se obave navedena ispitivanja, posmična čvrstoća može biti opisana Hoek Brownovim kriterijem čvrstoće ili uz pomoć Mohr-Coulombove anvelope sloma [1]. O Hoek Brownovom te Mohr Coulombovom kriteriju sloma biti će riječ u sljedećim poglavljima.

1.2 Uvjeti opterećenja intaktne stijene

Veoma je važno razumjeti i uočiti u kakvom se okruženju nalazi uzorak, kakvi su uvjeti opterećenja. Iz tog razloga jer se mehanička svojstva i ponašanja stijene trebaju moći predvidjeti zbog toga jer se ista mogu razlikovati od rezultata koji bi se dobili kada bi se ispitivanje provelo u laboratoriju.

Veliki utjecaj na mehanička svojstva stijene imaju oblik te veličina uzorka na kojem se vrši ispitivanje. Veličina uzorka je primjerice obrnuto proporcionalna sa čvrstoćom toga uzorka. Što

znači, ukoliko se radi o manjem uzorku, on će imati veću čvrstoću od uzorka istog oblika (omjer duljine i promjera mora ostati isti), ali većih dimenzija. Utjecaj veličine uzorka na naponsko-deformacijsku krivulju možemo uočiti na slici 1. Isti odnos vrijedi i za lomljivost. Kada se radi o modulu elastičnosti, kod njega ne dolazi do velike promjene. Također, što je uzorak većih dimenzija, veća je vjerojatnost pojave mikropukotina te je veća mogućnost dodatnih nesavršenosti i pukotina.



Slika 1: Utjecaj veličine uzorka na naponsko-deformacijsku krivulju [5]

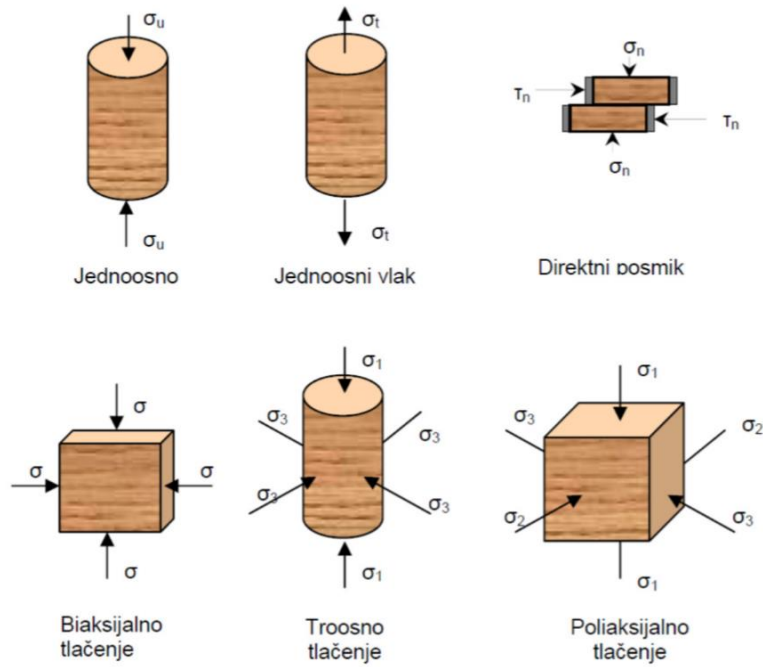
Kada se veličina uzorka pretjerano ne mijenja, ali dolazi do promjene njegovog oblika, modul elastičnosti ne doživljava velike promjene. Čvrstoća i duktilnost su proporcionalni, tj povećavaju se pri svakom povećavanju omjera duljine i promjera. Zaključno tome, utjecaj oblika uzorka ima obrnuti efekt od promjene veličine uzorka.

Vlažnost utječe na oblik naponsko-deformacijske krivulje u smislu deformacije, također i po pitanju tlačne čvrstoće. Vlažnost može dovesti i do drugih pojava, poput raspucavanja (pri sušenju i vlaženju), isušivanja (pojavljuju se negativni porni tlakovi), bubrenja (stijena povećava volumen, dolazi do pojave pornih tlakova što dovodi do efektivnih naprezanja) te smrzavanja porne vode.

Treba uzeti u obzir i efekte koji su vremenski ovisni, kao što su primjerice brzina deformiranja, tečenje, relaksacija te zamore. Ovisni su o tome kako će se kroz vrijeme mijenjati mikropukotine.

Temperatura utječe na svojstva na način da se njenim povećanjem smanjuje modul elastičnosti, tlačna čvrstoća dok se duktilnost povećava u području krivulje nakon sloma [5].

S obzirom na uvjete opterećenja prilikom ispitivanja stijene, može se izdvojiti šest konfiguracija ispitivanja, shematski prikazana na slici 2.:



Slika 2: Konfiguracije ispitivanja [5]

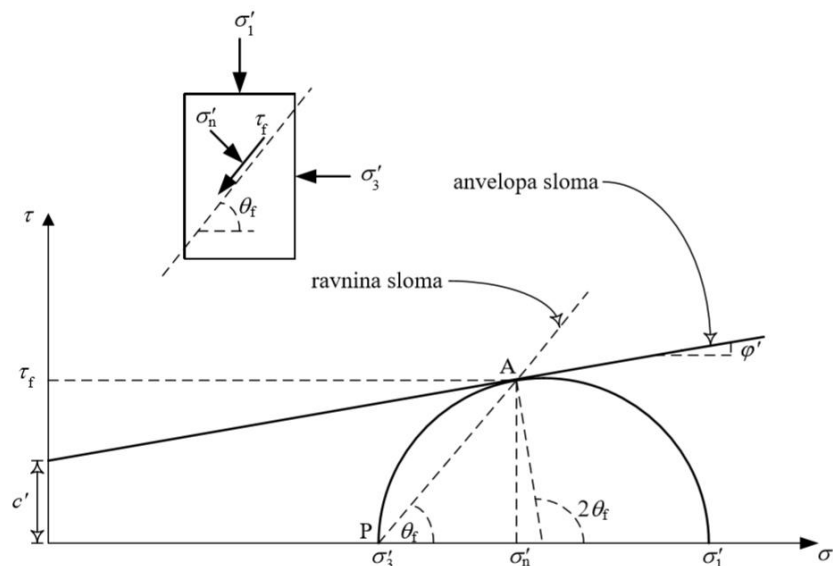
2 KRITERIJ SLOMA

2.1 Mohr Coulombov zakon

Mohr Coulombov zakon objašnjava posmičnu čvrstoću tla τ_f prema sljedećoj formuli:

$$\tau_f = c' + \sigma'_n \tan \varphi' \quad (2.1)$$

Jednadžba 2.1 određuje pravac koji se naziva linearnom anvelopom sloma. c' čini odsječak na ordinati, a φ' mu je nagib u odnosu na apscisu. Upravo je anvelopa bila Coulombov doprinos zakonu sloma. Mohrov doprinos je bila činjenica da se slom u tlu događa u onom trenutku kada tangira Mohrov krug naprezanja, što možemo vidjeti jasnije na slici 3 [6].



Slika 3: Mohr Coulombov zakon sloma [6]

I Mohrova kružnica i linija sloma su simetrične s obzirom na os normalnih naprezanja te upravo iz tog razloga se prikazuje samo gornja polovica kružnice te samo gornji dio linije.

Suprotno očekivanjima, najveća maksimalna posmična (τ_n) ili normalna (σ_n) naprezanja ne dovode do sloma materijala. Posmični slom onih uzoraka koji imaju istu koheziju i kut unutarnjeg trenja dogodit će se pri različitim kombinacijama σ_1 , σ_3 i σ_n , što također znači i različite oblike kružnica koje sve tangira jedinstvena linija sloma.

Vrijednosti poput kohezije c' , kuta unutarnjeg trenja φ' i normalnog naprezanja σ_n se dobivaju putem jednoosnog i/ili troosnog testiranja uzoraka [1].

Glavna efektivna naprezanja pri slomu određuju se na način da se odredi gdje kružnica siječe os x. Na uzorku tla na slici 1 može se uočiti da manje naprezanje je σ_3' i ono djeluje na vertikalnu površinu uzorka, dok je veće naprezanje σ_1' te ono djeluje na horizontalnu površinu uzorka i posmično mu je naprezanje nula. Upravo ovo stanje naprezanja se vidi na Mohrovoj kružnici u točki $\sigma_1', 0$. Kroz tu točku provuče se horizontalni pravac koji je paralelan s ravninom (na koju djeluju ta naprezanja) te se dobije pol Mohrove kružnice, odnosno točka P. Ponovno se provlači pravac pod nagibom Θ_f , u odnosu na horizontalu, kroz tu točku P te točku A u kojoj kružnicu tangira anvelopa sloma. Naprezanja σ_n' i τ_f na slici, definira točka A. τ_f djeluje na ravninu (sloma) pod nagibom Θ_f (formula 2.2) u odnosu na horizontalu [6].

$$2 \Theta_f = 90^\circ + \varphi' \rightarrow \Theta_f = 45^\circ + \frac{\varphi'}{2} \quad (2.2)$$

Postoji više različitih geoloških uvjeta koji se mogu dogoditi na plohi sloma. Mogu se prikazati na na σ/τ dijagramu krivuljom čvrstoće kao na slici 4 (počevši redom odozdo prema gore) [7]:

Krivulja a) pukotina s ispunom koju čini slaba glina. Nizak je kut unutarnjeg trenja te ukoliko je ispuna neporemećena, moguća je kohezija. Ukoliko je ispuna veće čvrstoća onda može postojati i značajna kohezija.

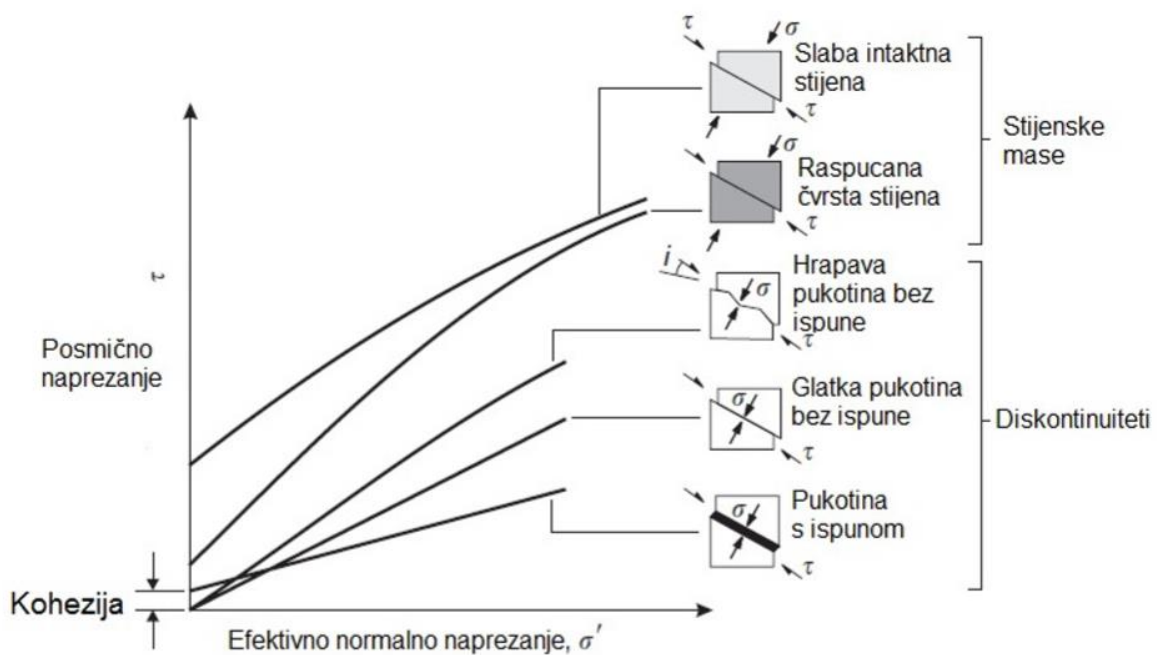
Krivulja b) glatka pukotina bez ispuna, nema koheziju. Kut unutarnjeg trenja ovisi o granulometrijskom sastavu stijene. Ukoliko je materijal od kojeg je stijena građena sitnozrnast – niži je, ukoliko je krupnozrnast onda je viši.

Krivulja c) hrapava pukotina bez ispuna, nema koheziju. Dvije komponente čine kut unutarnjeg trenja i to su kut unutarnjeg trenja stijene i hrapavost podloge. Ako se poveća normalno naprezanje, hrapavost odnosno oštine se smiču, a kao rezultat toga kut unutarnjeg trenja se smanjuje.

Krivulja d) raspucana čvrsta stijena – ukoliko su normalna naprezanja mala, imaju malo ograničenja unutar stijenske mase koja je raspucana te se pojedini dijelovi mogu rotirati i pomicati, kut unutarnjeg trenja je visok, a kohezija mala. Kada su normalna naprezanja viša, počinju se drobiti dijelovi stijene te se smanjuje kut unutarnjeg trenja.

Krivulja e) slaba intaktna stijena – stijenska masa je od sitnozrnastih materijala kod kojih je malen kut unutarnjeg trenja, ali kohezija može biti veća nego kod intaktne stijene koja ima guste pukotine upravo zbog toga jer nema diskontinuiteta.

Iz navedenog se može zaključiti da pri ispitivanju parametara čvrstoće stijenske mase veoma je važno poznavati stijensku masu, njene karakteristike, oblik, ponašanje te geološke uvjete u kojima se nalazi [7].



Slika 4: Veza među normalnim i posmičnim naprezanjima na kliznoj plohi za 5 geoloških uvjeta [7]

2.2 Hoek-Brownov zakon

Hoek-Brownov zakon je zakon koji se danas najčešće primjenjuje za rješavanje određenih inženjerskih problema. Postoje određeni uvjeti koje stijenska masa mora zadovoljiti da bi se na njoj mogao primijeniti ovaj kriterij. Mora biti ili intaktna stijena ili stijenska masa mora biti značajno raspucana, a također moraju biti homogenih i izotropnih karakteristika [2].

Hoek-Brownov kriterij čvrstoće u izvornom obliku iz 1980. godine glasi ovako [8]:

$$\sigma = \sigma_3 + (m \cdot \sigma_c \cdot \sigma_3 + s \cdot \sigma_c^2)^{0.5}, \quad (2.3)$$

gdje je σ_1 veće glavno naprežanje pri slomu, σ_3 manje glavno naprežanje pri slomu, σ_c je jednoosna tlačna čvrstoća intaktne stijene, m i s su konstante koje ovise o tipu intaktne stijene. Parametar s ovisi o razini loma u stijenskoj masi te je najbolji pokazatelj kohezije uzorka. Ukoliko se radi o intaktnoj stijeni vrijedi da je $s=1$, a $m=m_i$; gdje se vrijednost m može dobiti iz troosnog ispitivanja pri raznim naprežanjima. Pri raspucalnoj stijeni vrijedi $0 \leq s < 1$ i $m < m_i$. Vrijednost m određuje se s obzirom na količinu blokiranja čestica u uzorku. Kada se radi o uzorku intaktne stijene ta vrijednost je visoka te se smanjuje kako se količina slomljenosti povećava. Ne postoji strogo pravilo po kojemu se parametar određuje već on zapravo ovisi o tipu stijene i njegovoj kvaliteti [5]. Ukoliko nije moguće odrediti tlačnu čvrstoću u točki ili provesti ispitivanje jednoosne tlačne čvrstoće, Brown predlaže da se jednoosna tlačna čvrstoća terenski procjeni [6].

1988. godine Hoek i Brown predlažu promjenu svog originalnog kriterija starog 8 godina. Unaprijeđen je po tome što su uvedena efektivna naprežanja te nove tehnike određivanja kohezije c i kuta unutarnjeg trenja φ kao i novi način određivanja parametara m i s . Na prijedlog Priesta i Browna dane su navedene korelacije 2.4, 2.5, 2.6 i 2.7, koje razlikuju dvije kategorije stijenske mase – poremećenu (2.4 i 2.5) i neporemećenu (2.6 i 2.7):

$$m = m_i \cdot e^{\frac{RMR-100}{28}}, \quad (2.4)$$

$$s = e^{\frac{RMR-100}{9}}, \quad (2.5)$$

$$m = m_i \cdot e^{\frac{RMR-100}{14}}, \quad (2.6)$$

$$s = e^{\frac{RMR-100}{6}}, \quad (2.7)$$

gdje je m_i vrijednost m intaktne stijene, a RMR vrijednost RMR koja se usvaja na osnovu klasifikacije iz 1976. od strane Bieniawskog [9].





1992. dolazi do ponovne izmjene Hoek-Brownovog kriterija čvrstoće stijenske mase i glasi:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_c \cdot \left(m_b \cdot \frac{\sigma'_3}{\sigma_c} \right)^a, \quad (2.8)$$

gdje je σ'_1 veće glavno naprezanje pri slomu, σ'_3 manje glavno naprezanje pri slomu, σ_c jednoosna tlačna čvrstoća intaktne stijene, a konstanta koja ovisi o tome kakva je raspucana stijenska masa te m_b koji je vrijednost konstante m za raspucanu stijensku masu. Uz uvjet da je vlačna čvrstoća jednaka nuli.

Do nove izmjene je došlo iz razloga što se daljnjim ispitivanjima zaključilo da originalni kriterij čvrstoće daje zadovoljavajuće vrijednost čvrstoće samo kada glavno naprezanje dosegne veću vrijednost, pri manjim vrijednostima dolazi do prevelikih vrijednosti vlačne te osne tlačne čvrstoće. To se najviše vidi po činjenici da je vrijednost vlačne čvrstoće za raspucanu stijenu ili mala ili iznosi nula. Vrijednost m_i , a te odnos m_b/m_i dobiva se iz tablice 1. koju su predložili Hoek, Wood i Shah 1992. godine..

Tablica 1: Procjena vrijednosti konstante „a“ te odnosa mb/mi na osnovi strukture stijenske mase i kakvoće površine stijenci diskontinuiteta [10]

MODIFICIRANI HOEK-BROWNOV KRITERIJ ČVRSTOĆE			STANJE POVRŠINE DISKONTINUITETA				
			VRLO DOBRO, vrlo hrapavo, površine diskontinuiteta neoštećene	DOBRO, hrapavo, lagano oštećene površine, metalna boja površine	POVOLJNO, glatko, srednje oštećena ili promijenjena površina	LOŠE, ispucala, jako oštećena površina sa zbijenom naslagom ili ispunom koja sadrži uglaste fragmente stijene	VRLO LOŠE, ispucala, jako oštećena površina sa slojem ili ispunom od mekane gline
$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_c} \right)^a$ <p>σ_1' - veći glavni efektivni napon, σ_3' - manji glavni efektivni napon, σ_c - jednoosna tlačna čvrstoća intaktne stijene, m_b, a - konstante koje ovise o sustavu, strukturi i stanju površine stijenske mase</p>			STRUKTURA STIJENSKE MASE				
	BLOKOVI - vrlo dobro ukleštene, neporemećena stijenska masa; veliki blokovi	mb/mi a	0.7 0.3	0.5 0.35	0.3 0.4	0.1 0.45	
	UGLAVNOM BLOKOVI - ukleštene, djelomično poremećena stijenska masa; blokovi srednje veličine	mb/mi a	0.3 0.4	0.2 0.45	0.1 0.5	0.04 0.5	
	BLOKOVI / SLOJEVITO - naborano s rasjedima, ispresjecano s mnogo diskontinuiteta; mali blokovi	mb/mi a		0.08 0.5	0.04 0.5	0.01 0.55	0.004 0.6
	ZDROBLJENO - loše ukleštene, jako zdrobljena stijenska masa; vrlo mali blokovi	mb/mi a		0.03 0.5	0.015 0.55	0.003 0.6	0.001 0.65

Konstante se određuju na temelju četiri klase u koje su podijelili stijensku masu: zdrobljena stijenska masa, sitna blokovska struktura, sitna (borana i raspadnuta) struktura te krupna blokovska struktura [10].

1994. godine Hoek, Bawden i Kaiser predlažu novi oblik Hoek-Brownovog kriterija čvrstoće:

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_c \cdot \left(m_b \cdot \frac{\sigma_3'}{\sigma_c} + s \right)^a \quad (2.9)$$

koji se ne razlikuje mnogo od izraza predloženog u izmjeni dvije godine ranije, ali ovaj put uz dodatak konstante s koja ovisi o karakteristikama stijenske mase. Kada se koristi vrijednost od $a=0.5$ (vrijednost za intaktnu stijenu) gornji izraz poprima oblik originalnog kriterija čvrstoće,

a ukoliko se uvrsti vrijednost $s=0$, tada se dobiva modificirani Hoek-Brownov kriterij. Za vrijednosti m_b , s i a predloženi su izrazi koji ovise o geološkom indeksu čvrstoće (GSI) [10]. Vrijednost je u potpunosti zavisna o vizualnoj procjeni stijenske mase. Indeks se određuje iz matrice veličine 5x5 jer se kvaliteta stijenske mase na određenom većem području ne može jednoznačno odrediti [11]. Treba dodati da se kod pretpostavke indeksa GSI pretpostavlja da je stijenska masa izotropna i da podzemna voda nema nikakvih utjecaja na određivanje tog indeksa. Upravo zbog toga jer u takvim uvjetima nije ni potrebna velika preciznost kod određivanja te korištenja indeksa GSI [12]. Kada je vrijednost $GSI > 25$, radi se o neporemećenju stijenskoj masi te se dolazi do izraza za navedene konstante od:

$$m_b = m_i \cdot e^{\frac{GSI-100}{28}}, \quad (2.10)$$

$$s = e^{\frac{GSI-100}{9}}, \quad (2.11)$$

$$a = 0.5. \quad (2.12)$$

Ukoliko je $GSI < 25$, radi se o poremećenju stijenskoj masi te su vrijednosti konstanti s i a slijedeći:

$$s = 0, \quad (2.13)$$

$$s = 0.65 - \frac{GSI}{200}. \quad (2.14)$$

Vrijednost konstante m se određuje na osnovu rezultata dobivenih iz troosnog ispitivanja stijene.

2002. uvodi se faktor poremećenja D . On ovisi o tome koliki je stupanj poremećenja stijene tijekom relaksacije te miniranja stanja naprezanja. Ukoliko se radi o neporemećenj stijeni faktor D je 0, a ukoliko o vrlo poremećenj, vrijednost je 1. Faktor poremećenja određuje se preko sljedećih izraza:

$$m_b = m_i \cdot e^{\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right)}, \quad (2.15)$$

$$s = e^{\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right)}, \quad (2.16)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \cdot \left(e^{-\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{3}} \right). \quad (2.17)$$

3 ISPITIVANJE TLAČNE ČVRSTOĆE INTAKTNE STIJENE

3.1 Jednoosno tlačno ispitivanje

Jednoosno tlačno ispitivanje je vrsta ispitivanja koja je namijenjena klasifikaciji čvrstoće intaktne stijene te njenoj karakterizaciji. Uređaj u kojemu se provodi ovo ispitivanje zove se preša za stijene i prikazan je na slici 5.



Slika 5: Preša za jednoosno tlačno ispitivanje u Laboratoriju za geotehniku na Građevinskom fakultetu u Rijeci

Glavna namjena mu je dobivanje vrijednosti jednoosne tlačne čvrstoće, ali također se mogu odrediti vrijednosti Poissonovog koeficijenta, Youngovog modula elastičnosti te naponsko deformacijske krivulje.

Ukoliko se mjere vrijednosti poput Poissonovog koeficijenta i Youngovog modula elastičnosti uređaj također treba sadržavati i mjerače naprezanja za električni otpor, optičke uređaje, linearno varijabilne diferencijalne transformatore te ostale uređaje za mjerenje koji mogu biti korisni pri ispitivanju. Njihov dizajn bi trebao biti takav da prosjek dvaju dijametralnih i dvaju uzdužnih deformacijskih mjerenja, jednako udaljenih, može biti utvrđen za svako povećanje opterećenja. Uređaji trebaju biti robusni i stabilni, sa osjetljivošću na deformacije od $5 \cdot 10^{-6}$. I aksijalne i dijametralne deformacije trebaju biti određene s točnošću od 0.2%. Ako se koriste mjerači naprezanja za električni otpor, duljina mjerača, na kojem se određuju aksijalne i dijametralne deformacije, treba biti barem deset promjera zrna u magnitudi i mjerači ne bi trebali zadirati bliže od $D/2$ od kraja uzorka (D je promjer uzorka) [13].

Ukoliko kuglični ležaj svojim dimenzijama ili drugim svojstvima ne odgovara normi ovog testiranja, treba ga izvaditi kompletno iz uređaja ili postaviti u zaključanu poziciju.

Promjer metalnih ploča treba biti u rasponu između D i $D + 2$ mm, gdje D čini promjer uzorka intaktne stijene. Debljina tih ploča mora biti najmanje 15 mm ili $D/3$, a njihova površina glatka, izbrušena i poravnata na više od 0.005 mm. Jedna od dviju metalnih ploča mora imati ukomponirani kuglični ležaj koje treba biti postavljeno na gornjem kraju uzorka. Također treba biti podmazano mineralnim uljem. Metalne ploče, uzorak i kuglični ležaj trebaju biti poravnani u ovisnosti jedan o drugome te o uređaju za opterećivanje. Centar zakrivljenosti površine sferičnog sjedala bi se trebalo poklapati sa centrom gornjeg kraja uzorka [13].

Prikladan odnos visine i promjera je od 2.5 do 3.0 dok promjer uzorka mora sa najvećim zrnom ispitivanog materijala biti minimalno u omjeru 10:1, ali ne bi trebao biti veći od 54 mm. Ravnost plašta uzorka intaktne stijene mora biti manja od 0.3 mm, dok ravnost baze treba biti manja od 0.02 mm. Promjer se dobiva na način da se uzimaju vrijednosti dvaju promjera na nižoj visini uzorka, visini blizu sredine te na višem dijelu uzorka, nakon čega se srednjom vrijednošću dobiva konačni rezultat promjera koji se zaokružuje na najbližih 0.1 mm. Taj podatak u kasnijem izračunu može poslužiti za izračun poprečnog presjeka uzorka. Visina se zaokružuje na najbližih 1 mm [13].

Uzorci se ne smiju držati duže od 30 dana i mora se održati njihova prirodna vlažnost da bi se uzorak mogao testirati u takvom stanju.

Opterećenje se povećava konstantno na način da se slom dogodi u vremenskom razmaku od 5 do 10 minuta od početka testiranja. Povećanje je pretežno u granicama od 0.5 do 1 MPa/s. Maksimalno opterećenje se izražava u N, kN ili mN ovisno o rezultatu i zaokružuje na najbližih 1%. Najmanje 5 uzoraka po ispitivanju [13].

Vlažnost može znatno utjecati na deformaciju određenog uzorka, zbog toga treba sačuvati njihovu prirodnu vlažnost.

Kako bi se dobila naponsko deformacijska krivulja, tijekom opterećivanja uzorka, u pravilnim vremenskim razmacima bi trebalo uzimati vrijednosti uzdužne i obodne deformacije. Najmanje bi trebalo uzeti deset vrijednosti, kako bi nastala vjerodostojna krivulja. Preporučljivo je napraviti više razdoblja opterećivanja i rasterećivanja uzoraka.

Izračun jednoosnog tlačnog naprezanja uzorka σ se računa prema izrazu 3.1:

$$\sigma = \frac{P}{A_0}, \quad (3.1)$$

gdje je P maksimalna tlačna sila koja je dovela do sloma uzorka intaktne stijene, a A_0 površina poprečnog presjeka dobivena prije početka ispitivanja. Sve vrijednosti se uzimaju kao pozitivne.

Aksijalna deformacija ε_a i dijametralna deformacija ε_d se mogu dobiti direktno putem mjerača deformacije na uređaju za mjerenje jednoosne tlačne čvrstoće ili po sljedećim izračunima.

Aksijalna deformaciju dobivamo putem formule 3.2:

$$\varepsilon_{ax} = \frac{\Delta l}{l_0}, \quad (3.2)$$

gdje je l_0 početna uzdužna duljina, a Δl je promjena u noj duljini, koja je uvijek pozitivna vrijednost.

Jedan od načina određivanja dijametralne deformacije može biti praćenjem promjene promjera, tada se koristi formula 3.3:

$$\varepsilon_d = \frac{\Delta d}{d_0}, \quad (3.3)$$

gdje je d_0 početni nedeformirani promjer uzorka, a Δd promjena promjera, koja se uzima kao negativna vrijednost za svako povećanje promjera

Tlačno naprezanje uzorka σ se računa prema izrazu 3.7:

$$\sigma = \frac{P}{A_0}, \quad (3.4)$$

gdje je P maksimalna tlačna sila koja je dovela do sloma uzorka intaktne stijene, a A_0 površina poprečnog presjeka dobivena prije početka ispitivanja. Sve vrijednosti se uzimaju kao pozitivne.

Pomoću ovog ispitivanja možemo odrediti također i Youngov modul elastičnosti. Razlikujemo više vrsta istog, poput srednjeg, tangentsnog i sekantnog modula elastičnosti. Srednji modul elastičnosti E_{av} je omjer razlike naprezanja i odgovarajućih razlika deformacija za odabrano područje u naponsko-deformacijskoj krivulji. Tangentni moduel E_t stavlja u omjer prirast naprezanja i pripadajući prirast deformacija za vrijednost naprezanja od $0,5 \cdot \sigma_c$. Sekantni modul elastičnosti E_s je omjer naprezanja i odgovarajuće deformacije u nekoj određenoj točki na naponsko-deformacijskoj krivulji.

Ovim testiranjem također može se dobiti i Poissonov koeficijent i to preko formule 3.8:

$$\nu = - \frac{E}{\text{nagib dijametralne krivulje}}, \quad (3.5)$$

gdje je E Youngov modul elastičnosti, a nagib se računa na isti način kao i Youngov modul elastičnosti. Vrijednost koja se dobije je pozitivnog predznaka jer je nagib po konvenciji dobiven kao negativna vrijednost [13].

3.2 Troosno tlačno ispitivanje

Ovaj test je namijenjen mjerenju čvrstoće valjkastih uzoraka intaktne stijene koji su podvrgnuti triaksijalnom ispitivanju. Takvim načinom ispitivanja se dobivaju potrebne vrijednosti za određivanje anvelope čvrstoće koja potom može određenim izračunima, koji će se navesti u nastavku, dati vrijednost kuta unutarnjeg trenja φ te prividne kohezije C .

Uzorci intaktne stijene prikladni za ovakvu vrstu ispitivanja moraju biti pravilnog valjkastog oblika, omjera visine i promjera 2-3 te promjera koji ne bi trebao prelaziti vrijednost od 54 mm. Promjer uzorka bi trebao biti u razmjeru 10:1 s obzirom na veličinu najvećeg zrna u uzorku te se dobiva na principu aritmetičke sredine. Mjeri se vrijednost dvaju promjera na tri različita mjesta na uzorku. Najprije na višem dijelu visine, potom približno sredini te u konačnici na najnižoj od sve tri. Njihova prosječna vrijednost daje vrijednost promjera koji mora najprije zadovoljiti gore navedene uvjete te ukoliko je to slučaj, ide dalje u proračun. Vrijednost mu se zaokružuje na najbližih 0.1 mm. Ravnost baze uzorka treba biti manja od 0.02 mm, a plašta do vrijednosti 0.3 mm. Plašt treba biti izveden na način da nema nikakve nepravilnosti te da je čim gladi [14].

Vrlo je bitan način kako se postupa s uzorkom. Od trenutka kada dođe s lokacije u laboratorij pa do trenutka ispitivanja, ne smije proći više od 30 dana. Uzorci se čuvaju u posebnim uvjetima pet do šest dana prije ispitivanja, koji podrazumijevaju okruženje u konstantnoj temperaturi od $\pm 20^\circ$ te u vlazi od $\pm 5\%$. Bit je očuvati prirodnu vlažnost uzorka, koliko je god to moguće, kako bi rezultati ispitivanja bili što vjerodostojniji. Preporučeni broj uzoraka po ispitivanju je minimalno 5, iz istog razloga koji je već naveden, da bi rezultati bili što vjerodostojniji [14].

Uređaj za ovakvu vrstu ispitivanja sastoji se od sljedeća tri dijela:

1) Triaksijalna ćelija

U triaksijalnoj ćeliji uzorci trebaju biti pravilno postavljeni u uređaj, na način da se može nanijeti ograničavajući tlak. Ćelija treba sadržavati otvor za odzračivanje i povezanost za hidraulički vod. S obzirom da triaksijalna ćelija treba biti u potpunosti ispunjena hidrauličnom tekućinom, nepropusna membrana oko tog uzorka treba biti napravljena od pogodnog materijala, da bi spriječila ulazak tekućine u uzorak.

Veoma bitan faktor pri ispitivanju čine metalne ploče preko kojih se vrši opterećivanje uzorka. Promjer metalne ploče bi trebao biti u granicama od D do $D + 2$ mm, gdje D predstavlja promjer

uzorka. Minimalna debljina tih ploča je 15 mm ili $D/3$. Njihovu površinu bi trebalo pobrusiti i poravnati na 0.005 mm. Kuglični ležaj koji je ukomponiran u svaku pojedinu ploču treba biti postavljen na način da njegov centar zakrivljenosti se podudara sa centrom krajeva uzoraka [14]. Na slici 6. vidi se primjer jedne triaksijalne ćelije.



Slika 6: Triaksijalna ćelija u Laboratoriju Građevinskog fakulteta u Rijeci

2) Uređaj za opterećivanje i kontroliranje aksijalnog opterećenja

Ova vrsta uređaja treba imati dovoljan kapacitet te sposobnost nanošenja opterećenja u skladu sa normom. Isto vrijedi i za kuglični ležaj. On mora biti napravljen i postavljen na način da poštuje normu, a ukoliko to nije slučaj, biti će uklonjen ili postavljen u zaključani položaj.

3) Oprema za generiranje i mjerenje ograničavajućeg tlaka

Pod opremu spada pojačivač tlaka, hidraulična pumpa ili neki drugi sustav koji je od dovoljnog kapaciteta i sposobnosti da može održavati konstantni ograničavajući tlak u rasponu od $\pm 2\%$

od njegove potrebne vrijednosti. Uređaj koji mjeri tlak mora biti od visoke preciznosti prilikom mjerenje i promatranja ograničavajućeg tlaka kako bi ovo ispitivanje uspјelo.

Ispitivanje se započinje na način da se uzorak intaktne stijene postavlja u ćeliju, poravna među čeličnim pločama te biva okružen nepropusnom membranom jer je ćelija ispunjena hidrauličnom tekućinom. Uzorak, ploče te kuglični ležaj, podmazan uljem, trebaju također biti poravnani, ali na način da su međusobno koaksijalni. Kada se svi dijelovi uređaja međusobno uklope, ispitivanje može započeti. Djelovanje aksijalnog opterećenja te ograničavajućeg tlaka treba biti konstantno povećavano i to na način da su približno jednaki po vrijednosti sve dok se ne dosege, već unaprijed određena, vrijednost ograničavajućeg tlaka. Također treba pripaziti kod načina povećavanja vrijednosti opterećivanja, ona mora biti takva da se slom dogodi u vremenskom periodu između 5 do 15 minuta, od početka ispitivanja. Kada dođe do sloma, bilježe se vrijednosti ograničavajućeg tlaka i aksijalnog opterećenja te se s tim podacima ulazi u daljnji proračun [14].

Tlačna naprezanje se računa na način da se podijeli maksimalno aksijalnog opterećenje, koje se primijenilo na uzorku, po izvornoj površini presjeka, kao u formuli 3.9. Može se dobiti i krivulja pokusa, na način da se na apscisi nalaze vrijednosti ograničavajućeg tlaka, a na ordinati vrijednosti aksijalne čvrstoće [14].

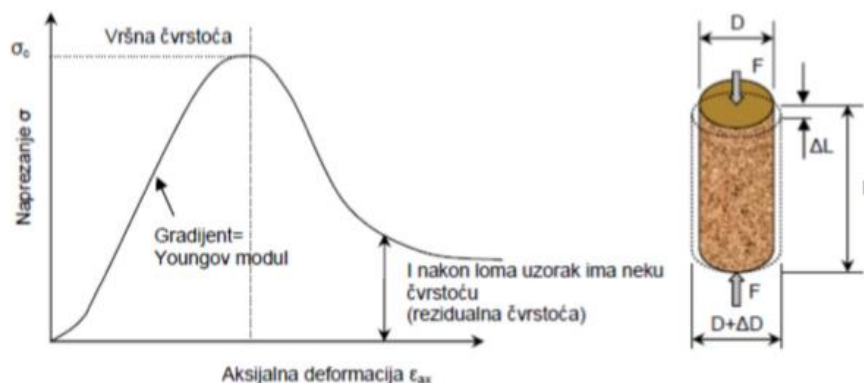
$$\sigma = \frac{P}{A_0} , \quad (3.6)$$

gdje je P maksimalno aksijalno opterećenje koje se primijenilo na uzorku intaktne stijene, a A_0 površina poprečnog presjeka dobivena prije početka ispitivanja. Sve vrijednosti se uzimaju kao pozitivne.

3.3 Naponsko-deformacijska krivulja

1966. godine otkriva se mogućnost dobivanja potpune naponsko-deformacijske krivulje. Ona je tada otkrila do sad nepoznate informacije svojstvima intaktne stijene i to u dijelu nakon šta dosegne vršnu čvrstoću [15].

Na početku rasta krivulje, ona ima oblik konkavan prema gore (kao što možemo vidjeti na slici 7), što je upravo suprotno od uobičajenog ponašanja tla. To je zbog dva razloga, prvi je premala pripremljenost uzorka za testiranje koja se najviše očituje u tome da baze valjka nisu paralelne. Drugi razlog je zatvaranje mikropukotina u samoj intaktnoj stijeni. Nakon tog početnog dijela, sljedeći dio krivulje je poprilično linearan, čak i sličan idealno elastičnoj stijeni. Iz tog dijela krivulje iščitava se Youngov modul elastičnosti na dva načina. Prvi je taj da se uzme nagib linije koja povezuje dvije zadane točke i to u linearnom dijelu krivulje, a drugi da se u bilo kojoj danoj točki uzme nagib krivulje. Ta dva nagiba su tangenti i sekantni modul. Tangentni modul je gradijent krivulje sa čvrstoćom koja odgovara veličini od 50% vršne čvrstoće, dok se sekantni modul može odrediti na bilo kojem mjestu linearnog dijela krivulje. Oba modula su samo aproksimacija pravog načina ponašanja stijene. Vršna čvrstoća je vrijednost jednoosne tlačne čvrstoće stijene. Dio krivulje nakon dosegnete vršne čvrstoće nazivamo mjestom sloma, gdje tangentni modul dobiva negativni predznak i nije više značajan za daljnje izračune. Zbog toga je sekantni modul praktičniji, može se dobiti tako da se krivulja opterećuje i rasterećuje u bilo kojoj točki krivulje [5]. Kraj krivulje, odnosno njezin silazni dio, je jako teško za predvidjeti upravo iz razloga jer se naprezanje uvijek pretpostavlja uzrokom deformacije. Drugim riječima, smanjenje naprezanja uzrokuje povećanje deformacije.



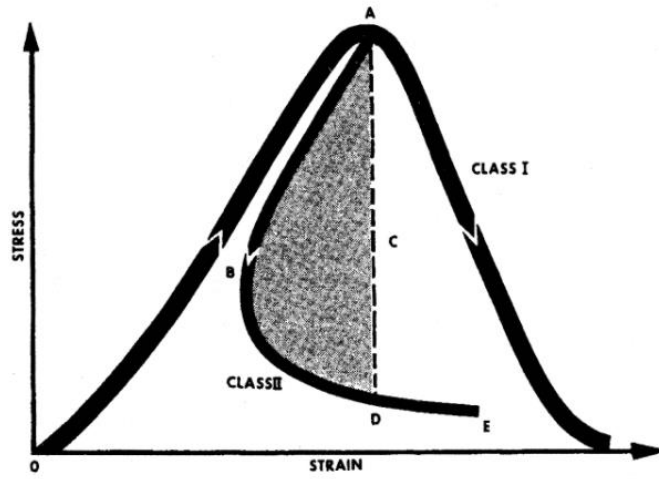
Slika 7: Kompletna naponsko-deformacijska krivulja [15]

Naponsko-deformacijska krivulja na svojoj apscisi ima vrijednost deformacije, dok na ordinati vrijednost naprezanja i to iz razloga jer se pri ovakvim i sličnim krivuljama, nezavisna varijabla stavlja na x os, dok ona zavisna tj. ona koju mjerimo se postavlja na y os [15].

Vlažnost utječe na oblik naponsko-deformacijske krivulje tako da utječe na deformaciju, tlačnu silu i ponašanje krivulje u dijelu nakon vršne čvrstoće. Kod stijene sa visokim udjelom gline može doći do isušivanja. Pojedini uzorak može pri in situ ispitivanju biti stabilan pri svojoj prirodnoj velikoj vlažnosti, ali nakon isušivanja može postat rastresit pri nanošenju sile. Čak može doći i do bubrenja stijene pri promjeni količine vlažnosti uzorka. Ukoliko su pore nekog uzorka spojene i tekućina u njima je pod tlakom, taj tlak ili barem njegov dio se može maknuti iz svih komponenti normalnog naprezanja. To dovodi do efektivnog naprezanja.

Povećanje temperature smanjuje modul elastičnosti i tlačnu čvrstoću dok povećava duktilnost u predjelu krivulje nakon sloma. Velike temperature mogu dovesti i do oštećenja mikrostrukture [5].

Postoje dvije vrste krivulje u dijelu nakon vršne čvrstoće (u dijelu rezidualne čvrstoće) – prva je takva da krivulja se monotono povećava u naprezanju, a druga da se ne povećava, kao što se vidi na slici 8. Class 1 će u daljnjem tekstu biti krivulja 1, a class 2 krivulja 2. Oni valjkasti uzorci koji daju krivulju pod 1 su duktilniji u slučaju kada su opterećeni aksijalno. Oni koji daju krivulju pod 2 su češće krhki ukoliko se na njih djeluje aksijalno. Test proveden u aksijalnom naprezanju je generalno dovoljan za dobivanje kompletne naponsko deformacijske krivulje uzorka pod 1. Druge mjere praćenja kontrole izvedbe ispitivanja su potrebne kada se ispituje uzorak koji daje krivulju pod 2 jer se krivulja ne povećava monotono u naprezanju i dio krivulje ABDCA bi imao višak energije koji bi došao od strane krutog uređaja za ispitivanje.



Slika 8; Dvije vrste krivulja u predjelu nakon sloma [15]

4 PROCJENA TLAČNE ČVRSTOĆE INTAKTNE STIJENE

4.1 Terenska procjena

Do jednoosne tlačne čvrstoće intaktne stijene može se doći i njenim određivanjem na terenu pomoću palca i nokta, pa čak i džepnog nožića ili geološkog čekića. Takav način klasifikacije vidimo u tablici 2. Iako je terenska procjena mogući način određivanja čvrstoće, oslanja se na subjektivnost i upućenost ispitivača. Stoga je pouzdanije koristiti metode poput ispitivanja Schmidtovim čekićem ili Point Load Testa, o kojima će se više govoriti u sljedećim poglavljima.

Tablica 2: Procjena jednoosne čvrstoće na terenu [16]

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

4.2 Schmidtov čekić

Test Schmidtovim čekićem (prikazanog na slici 9), također poznat i pod nazivom odskočni čekić, je nerazorna metoda ispitivanja [17] koja se u mehanici stijena počinje koristiti ranih 60-ih godina prošlog stoljeća u svrhu testiranja jednoosne tlačne čvrstoće (UCS) te Youngovog modula elastičnosti (Et) intaktne stijene [18]. S obzirom da je nerazorna metoda ispitivanja, ekonomičnija je metoda, od primjerice PLT testa, jer se ispitivanje može iznova ponavljati na istom uzorku. Čak se isti uzorak može ispitivati u različitim vremenskim razdobljima te se rezultati takvog ispitivanja zapisuju i naknadno uspoređuju u svrhu praćenja promjene svojstava intaktne stijene u vremenu. Osim ispitivanja istog uzorka uzastopno istom metodom, može se ispitivati i različitim metodama kako bi se dobio kompletniji uvid u sva strukturalna svojstva intaktne stijene [19].



Slika 9: Schmidtov čekić iz Laboratorija za geotehniku Građevinskog fakulteta u Rijeci

Postoje različiti tipovi Schmidtovog čekića poput primjerice L-tipa čekića koji udara energijom od 0,735 kN te se on najčešće koristi. Također može se koristiti i N-tip čekića koji ima energiju udara od 2,207 Nm. Odskočna tvrdoća se definira kao odnos vrijednosti odskoka utega nakon udara te njegovog početnog položaja prije početka ispitivanja [20]. Prema preporuci ISRM-a i

ASTM-a N-tip čekića bi se trebao koristiti kod intaktne stijene koja ima vrijednost UCS-a veću od 20 MPa. Također, u homogenoj slabijoj stijeni, gdje je UCS < 10 MPa, se nikakav odskok ne bi trebao pojavljivati zbog jake plastičnosti, dok kod ekstremno jakih stijena kojima je UCS > 300 MPa bi se povećanje odskočnog broja trebalo usporiti [18].

Mjesto na uzorku na kojemu se ispituje ovom metodom bi trebalo biti udaljeno od granica samog uzorka da bi se izbjegle abnormalno male vrijednosti koje se dobiju zbog disipacije udarne energije. Prema ISMR-u (1978a) mjesto ispitivanja ne bi trebalo biti bliže rubu od 6 cm. Obje norme nalažu da bi jezgra uzorka trebala biti manja od NX promjera odnosno 54.7 mm. Površina uzorka na kojem se testira bi trebala imati čim manje pukotina većih od 6 cm iz razloga što bi ih udarni val mogao produbiti. Uzorci bi trebali biti čim većih dimenzija kako bi se smanjila disipacija energije koliko god je to moguće.

Ispitivanje započinje tako da uteg, koji se nalazi u Schmidtovom čekiću, udara u čelični klip pomoću opruge u kojoj je akumulirana energija. Klip je u kontaktu s površinom materijala koji se ispituje [18]. Može se dobiti i mjera odskočne tvrdoće tog materijala, na način da se stavi u odnos vrijednost kojom odskoči uteg nakon što udari u klip i njegov početni položaj (prije udara). Zovemo ju odskočnim brojem R, a on se može pretvoriti u tlačnu čvrstoću koristeći Millerovu korelaciju:

$$\log_{10} JCS = 0.00088(\gamma)(R) + 1.01, \quad (4.1)$$

gdje je JCS tlačna čvrstoća diskontinuiteta (engl. joint compressive strength), a γ jedinica za težinu intaktne stijene [kN/m³] [19].

Dobivene vrijednosti nakon ispitivanja je potrebno korigirati pomoću normalizacijskih funkcija zbog položaja čekića u odnosu na horizontalu. Minimalni broj provedenih ispitivanja po pojedinačnom uzorku intaktne stijene je 20. Pri svakom sljedećem udarcu se mijenja mjesto udarca i to minimalno za onu udaljenost koliki je promjer čeličnog klipa [20]. Od dobivenih rezultata se odbacuje 50% najnižih vrijednosti te se od onog što preostane eliminira svaki uzorak koji ima nesavršenosti, odnosno pukotine [18]. Od dobivenih vrijednosti se računa aritmetička sredina te ta vrijednost daje rezultat testiranja.

4.3 Point Load test

Point Load Test ispitivanje ili indeks čvrstoće u točki je ispitivanje koje je namijenjeno klasifikaciji intaktne stijene. Njome se mogu dobiti i ostale veličine koje opisuju stijenu, poput jednoosne tlačne čvrstoće te vlačne čvrstoće. Ta činjenica je najviše doprinijela populariziranju ove metode u mehanici stijena [20].

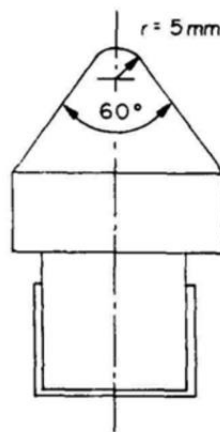


Slika 10: PLT uređaj u Laboratoriju za geotehniku Građevinskog fakulteta u Rijeci

Uređaj (slika 10) kojim se ispituju uzorci intaktne stijene u ovoj metodi sastoji se od:

1) Sklopa za opterećivanje uzoraka

Treba postojati razmak između dvaju šiljaka dovoljan da je moguće ispitivati razne veličine uzoraka, a standardizirani razmak je 15 – 100 mm. Bitno je da ovaj dio aparata bude posebno dobro dizajniran i konstruiran da se ne bi iskrivio prilikom kontinuiranog apliciranja maksimalnog opterećenja. Kontaktni šiljci služe za prijenos opterećenja na uzorak. Oblika su krnjeg stošca izvedenog pod kutom od 60 stupnjeva te polumjerom zakrivljenosti 5 mm na samom vrhu, kao što možemo vidjeti na slici 11. Također treba pripaziti pri odabiru materijala za izradu šiljka. Primjereni materijal je tvrdi materijal, poput volframovog karbida ili kaljenog čelika. Takav šiljak se neće oštetiti prilikom daljnjih testiranja [21].



Slika 11: Konusni šiljak [21]

2) Uređaja za mjerenje sile

Takav uređaj može biti primjerice mjerna ćelija, hidraulički manometar ili pretvarač spojen na okvir. Na ovom dijelu aparata možemo očitati vršno opterećenje koje je bilo potrebno da bi došlo do sloma u uzorku. Lom je često iznenađan i bitno je da ovaj uređaj može silu loma zadržati i očitati nakon svakog ispitivanja. Vršno opterećenje je veoma bitan podatak u daljnjem izračunu stoga je potrebno da taj uređaj bude precizan, s maksimalnim odstupanjima od $\pm 5\%$ bez obzira na veličinu i čvrstoću uzorka [21].

3) Uređaja za mjerenje duljine

Mjerilo duljine služi za izmjeru razdaljine dodirnih točaka uzorka i šiljka u trenutku početka testiranja određenog uzorka. Za to koristimo primjerice vagu koja direktno očitava duljinu, a rezultat se smatra važećim ukoliko je u odstupanjima manjim od $\pm 2\%$ bez obzira na dimenzije uzorka. Uz ovakav aparat potreban je i mjerni instrument poput čeličnog ravnala da bi se odredila širina uzorka W i to za svaki test osim dijametralnog [21].

Uzorci bi prilikom testiranja trebali biti pripremljeni na način da su ili u potpunosti zasićeni vodom ili da sadržavaju samo onu količinu vlage koju imaju u prirodnom stanju. Opterećujemo odabrani uzorak silom koja se povećava konstantno jednakim intenzitetom na način da do sloma dođe u vremenskom razmaku između 10 i 60 sekundi. Test se smatra nevažećim ukoliko ploha sloma prolazi kroz samo jednu dodirnu točku šiljka i uzorka. S obzirom na njihovu veličinu te oblik, koristimo različite vrste testiranja uzoraka:

1) Dijametralni test

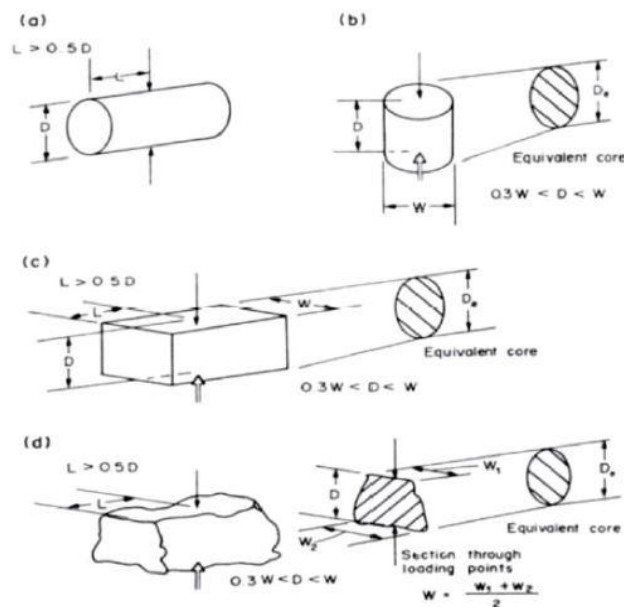
Ovakva vrsta testa provodi se na uzorcima valjkastog oblika. Uvjeti koji svaki uzorak mora zadovoljavati su da je omjer duljine i širine veći od 1. Također, duljina između slobodnog kraja i mjesta kontakta šiljka i uzorka mora biti dulja od pola vrijednosti promjera jezgre, odnosno: $L > 0.5 \cdot D$. Uzorak se opterećuje okomito na svoju jezgru tako da razmak među šiljcima bude jednak promjeru. Taj razmak se bilježi te se potom može početi opterećivati uzorak do sloma. Shema je prikazana na slici 12 [21].

2) Aksijalni test

Za aksijalni test također su prikladni valjkasti uzorci, ali s omjerom duljine i širine u rasponu od 0,3 do 1,0. Najčešće se koriste upravo oni valjkasti uzorci koji nisu oslabili u prethodnom dijametralnom testiranju. U krajnjem slučaju uzorak čak može biti i oblikovan određenim alatima (kao npr. pilama itd.) da bi bio oblikom prikladniji za testiranje. Uzorak se smješta među šiljcima na način da mu je jezgra paralelna sa smjerom na koji se nanosi opterećenje. Slika 12 prikazuje shemu ovog testa.

3) 4) Blok test i Test na uzorku nepravilnog oblika

Blok test i test na uzorku napravnog oblika provode se na veoma sličan način, stoga će biti opisani u istom odlomku. Uzorci koji se koriste pri ovakvoj vrsti testiranja su oni dimenzija 50 ± 35 mm te oblika prikazanog na slici 12. Omjer duljine i širine mora biti u granicama između 0,3 i 1,0, a najprigodnije je da on bude čim bliže 1. Duljina L mora biti veća od $0,5 \cdot W$. Uzorak se smješta u aparat na mjestu najmanjih dimenzija, ali dalje od krajeva. Ako se ne može odrediti jedna širina uzorka zbog nepravilnosti oblika, W se aproksimira na način da se odredi gornja širina uzorka W_1 i donja širina uzorka W_2 te se odredi njihova aritmetička sredina [21].



Slika 12: Oblik uzoraka za: a) dijametralni test, b) aksijalni test, c) blok test, d) test na uzorku nepravilnog oblika [22]

Pri završetku testiranja dobivaju se dvije vrijednosti – dimenzije uzorka te opterećenje P [kN]. S tim podacima ulazimo u proračun. Potrebno je dobiti vrijednost D_e , a to će dobiti na način da kod dijametralnog testa se ustvrdi vrijednost $D = D_e$, a kod ostalih načina testiranja ona iznosi:

$$D_e = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}}, \quad (4.2)$$

gdje je A minimalni presjek ravnine kroz kontaktne točke te se računa prema izrazu:

$$A = W \cdot D. \quad (4.3)$$

Potom, nekorigitiranu čvrstoću pri opterećenju u točki prema sljedećoj formuli:

$$I_s = \frac{P}{D_e^2} \quad (4.4)$$

gdje je P maksimalna sila u trenutku sloma, a D_e ekvivalentni promjer jezgre.

Potrebno je izračunati korigiranu vrijednost PLT-a jer vrijednost nekorigitirane čvrstoće pri opterećenju u točki (I_s) varira kao funkcija od promjera D u dijametralnom testu te kao funkcija od ekvivalentnog promjera jezgre D_e u aksijalnom testu, odnosno testu nepravilnih uzoraka ili blok testu. Upravo zato se vrši korekcija u odnosu na dimenzije uzoraka da bi u konačnici dobili unificirane vrijednosti PLT-a. Konačno, korigirana vrijednost je vrijednost čvrstoće uzorka dobivena u dijametralnom testu na ispitivanom uzorku koji ima promjer 50 mm te se označava na način koji je opisan u formuli 4.5. Ovim pokusom u konačnici dobivamo vrijednosti indeksa čvrstoće u točki ($I_{s(50)}$), po formuli 4.5, te indeksa anizotropije ($I_{a(50)}$).

$$I_{s(50)} = F \cdot I_s, \quad (4.5)$$

gdje je F korekcijski faktor, koji se računa po formuli 4.6:

$$F = \left(\frac{D_e}{50} \right)^{0.45} \quad (4.6)$$

Za klasifikaciju stijena prema PLT-u, dvije najveće i dvije najmanje vrijednosti se odbacuju, ako je izvršeno 10 ili više testova kao što je uobičajena praksa, te se dobiva srednja vrijednost $I_{s(50)}$.

Može se napraviti i procjena jednoosne tlačne čvrstoće na temelju toga što je poznat indeks čvrstoće u točki. Uobičajeno se uzima da je ona 20 do 25 puta veća od indeksa čvrstoće u točki odnosno [22]:

$$UCS = C \cdot I_{s(50)} , \quad (4.7)$$

gdje je univerzalna vrijednost C u odnosu na dimenzije uzorka jezgre:

Tablica 3: Ovisnost vrijednosti C o dimenzijama uzorka jezgre [23]

Uzorak jezgre [mm]	Univerzalna vrijednost C
20	17.5
30	19
40	21
50	23
54	24
60	24.5

Također, radi se i procjena jednoosne vlačne čvrstoće koja iznosi [22]:

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

5 PROVEDENO POINT LOAD TEST ISPITIVANJE

PLT ispitivanje provedeno je u Laboratoriju za geotehniku Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci. Uzorci intaktne stijene su vapnenci koji čine geološku građu riječke regije, odnosno Velog vrha. Rađene su tri vrste PLT ispitivanja (aksijalni i dijametralni pokus te pokus na nepravilnim uzorcima) na 23 uzorka. Neki od ispitanih uzoraka mogu se vidjeti na slici 13. Za potrebe aksijalnog i dijametralnog ispitivanja uzorci su oblikovani u oblik valjka bušenjem iz blokova većih dimenzija pomoću istiskivača uzoraka. Paralelnost baza je osigurana i dobivena brusilicom za stjenovite uzorke. Uzorci pokusa nepravilnih uzorka su ostali u svom prvobitnom obliku.



Slika 13: Pripremljeni uzorci za ispitivanje aksijalnim i dijametralnim pokusom

5.1 Dijametralni pokus

Za potrebe ovog pokusa korišteni su uzorci oblika valjka prosječnog promjera od 56 mm. Ispitano je 6 uzoraka. Opterećivali su se okomito na položaj svoje jezgre, na način da razmak među kontaktnim šiljcima bude jednak promjeru ispitivanog uzorka.

Tablica 4: Dimenzije uzoraka dijametralnog pokusa

Uzorak	Dimenzije			Provjera
	W [mm]	D [mm]	De ² [mm]	W/D (>0.5)
1	45.65	56.1	3147.21	0.8
2	34.55	56.1	3147.21	0.6
3	34.92	56.2	3158.44	0.6
4	40.8	56.1	3147.21	0.7
5	37.15	56.2	3158.44	0.7
6	46.3	56.2	3158.44	0.8

Tablica 5: Parametri izračuna dijametralnog pokusa

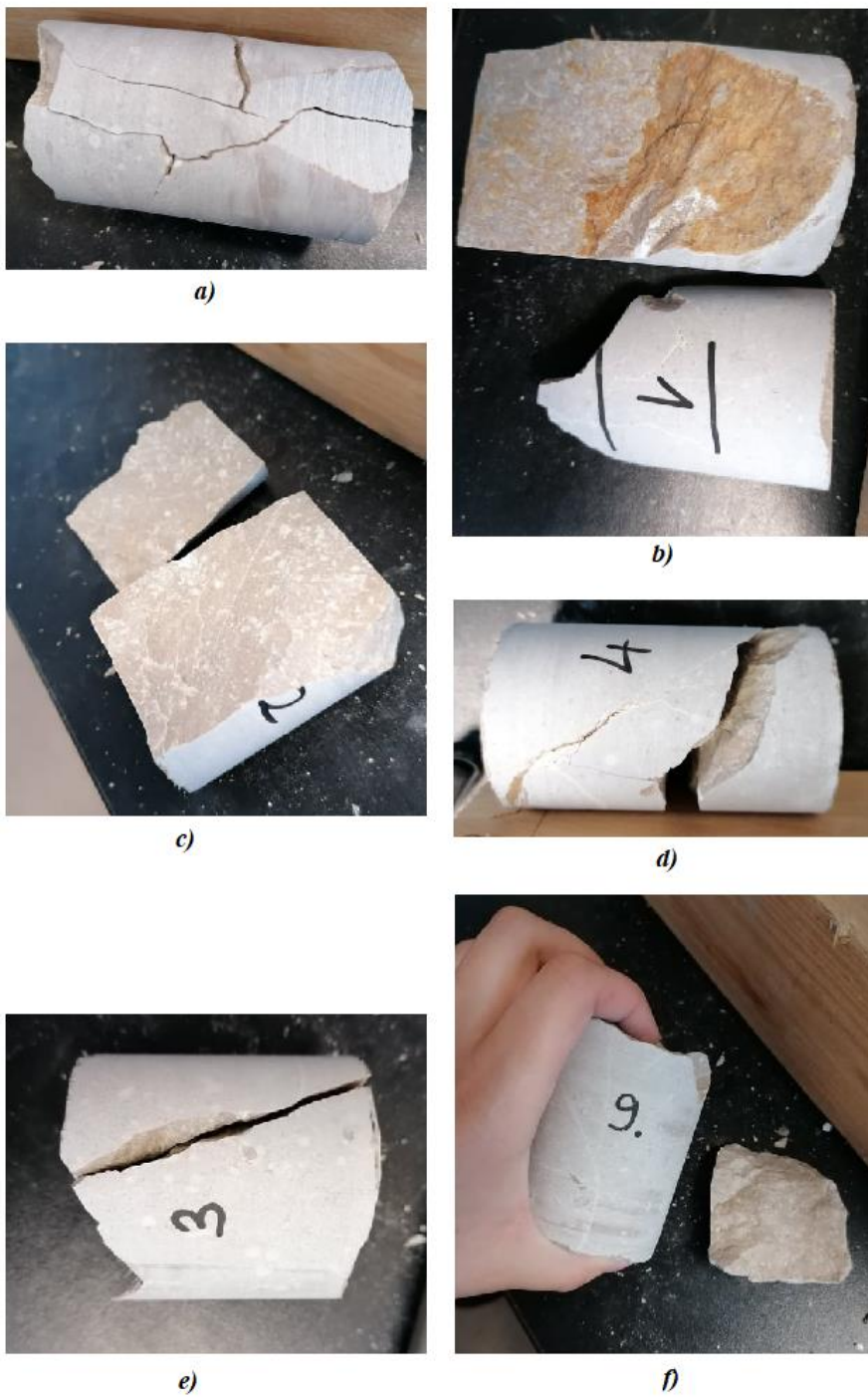
Uzorak	Parametri izračuna						
	P [kN]	Is [MPa]	F	Is ₅₀ [MP]	C	UCS	Lom
1	6.38	2.03	1.05	2.13	24	51.24	Nepravilan
2	6.00	1.91	1.05	2.01	24	48.19	Pravilan
3	3.63	1.15	1.05	1.21	24	29.07	Pravilan
4	9.71	3.09	1.05	3.25	24	77.98	Pravilan
5	5.00	1.58	1.05	1.67	24	40.05	Nepravilan
6	6.96	2.2	1.05	2.32	24	55.74	Pravilan

Zaključak: Uzorci 1 i 5 su puknuli nepravilnim lomovima, stoga ih odbacujemo iz daljnjih izračuna. Također se odbacuje i uzorak 3. zbog najniže vrijednosti I_{s50} te uzorak 4 zbog najviše vrijednosti I_{s50} . Preostali rezultati za daljnji izračun konačnih vrijednosti su rezultati uzoraka 2 i 6 te daju sljedeće vrijednosti:

$$UCS = \frac{48.19 + 55.74}{2} = 51.97 [MPa]$$

$$I_{s(50)} = \frac{2.01 + 2.32}{2} = 2.17 [MPa]$$

Na slici 14 nalaze se svi uzorci ispitivani ovom metodom.



Slika 14: Fotografije a), b), c), d), e), f) predstavljaju uzorke dijametralnog pokusa nakon sloma

5.2 Aksijalni pokus

Za potrebe ovog pokusa korišteni su uzorci oblika valjka prosječne duljine od 56 mm. Ispitano je 4 uzorka. Ispitivani su na način da se uzorak smjestio među kontaktnim šiljcima te opterećivao na način da stoji paralelno u odnosu na položaj svoje jezgre.

Tablica 6: Dimenzije uzoraka aksijalnog pokusa

Uzorak	Dimenzije			Provjera
	L [mm]	D [mm]	De ² [mm]	L/D (>0.5)
1	56.2	53.4	3821.09	1.05
2	56.2	54.1	3871.18	1.04
3	56.1	35.1	2507.15	1.60
4	56.1	32.2	47.96	1.74

Tablica 7: Parametri izračuna aksijalnog pokusa

Uzorak	Parametri izračuna						
	P [kN]	Is [MPa]	F	Is ₅₀ [MP]	C	UCS	Lom
1	11.8	3.09	1.10	3.40	24	81.54	Pravilan
2	6.75	1.74	1.10	1.92	24	46.17	Pravilan
3	9.26	3.69	1.00	3.70	24	88.70	Pravilan
4	7.71	3.35	0.98	3.29	24	78.96	Pravilan

Zaključak: Svi uzorci ispitivani aksijalnim testom su puknuli pravilnim lomom. Odbacuje se uzorak 2 zbog najniže vrijednosti Is₅₀ te uzorak 3 zbog najviše vrijednosti Is₅₀. Preostali rezultati za daljnji izračun konačnih vrijednosti su rezultati uzoraka 1 i 4 te daju sljedeće vrijednosti:

$$UCS = \frac{81.54 + 78.96}{2} = 80.25 \text{ [MPa]}$$

$$I_{s(50)} = \frac{3.40 + 3.29}{2} = 3.35 \text{ [MPa]}$$

Na slici 15. nalaze se uzorci 1 i 2, ispitivani ovom metodom.



Slika 15: Fotografije a) i b) predstavljaju uzorke aksijalnog pokusa, nakon sloma

5.3 Pokus na uzorcima napravljenih uzoraka

Za potrebe ovog pokusa korišteni su nepravilni uzorci, u svom prirodnom obliku, bez naknadnog prerađivanja. Ispitivano je 13 uzoraka te se uzorak smještao u aparat na mjestu najmanjih dimenzija, ali ne blizu krajeva.

Tablica 8: Dimenzije uzoraka pokusa na nepravilnim uzorcima

Uzorak	Dimenzije					Provjera
	W1	W2	W [mm]	D [mm]	De ² [mm]	W/D (>0.5)
1	46.4	57.2	51.8	33.1	2183.07	1.56
2	46.2	69.1	57.65	33.6	2466.32	1.73
3	73.1	43.6	58.35	44	3268.92	1.33
4	78.2	79.9	79.05	32.2	3240.92	2.45
5	38.8	59	48.95	53	3299.85	0.92
6	79.5	56.2	67.85	38.2	3300.07	1.78
7	53.1	44.2	48.65	50.3	3115.74	0.97
8	63.9	58.6	61.25	42.6	3322.20	1.44
9	66.6	63.8	65.2	54.7	4540.93	1.19
10	64.6	54.3	59.45	56.9	4306.99	1.05
11	69.6	75.9	72.75	56.9	5270.54	1.28
12	58.4	51.8	55.1	45.2	3171.03	1.22
13	61.5	55.4	58.45	44.8	3334.05	1.30

Tablica 9: Parametri izračuna pokusa na nepravilnim uzorcima

Uzorak	Parametri izračuna						
	P [kN]	Is [MPa]	F	Is ₅₀ [MP]	C	UCS	Lom
1	7.44	3.41	0.97	3.31	24	79.34	Pravilan
2	9.6	3.89	1	3.88	24	93.13	Pravilan
3	7.77	2.38	1.06	2.52	24	60.59	Pravilan
4	8.72	2.69	1.06	2.85	24	68.46	Pravilan

5	13.31	4.03	1.06	4.29	24	103.04	Pravilan
6	10.92	3.31	1.06	3.52	24	84.54	Pravilan
7	13.84	4.44	1.05	4.67	24	112.02	Pravilan
8	16.22	4.88	1.07	5.20	24	124.92	Pravilan
9	5.77	1.27	1.14	1.45	24	34.88	Pravilan
10	17.9	4.16	1.13	4.70	24	112.73	Pravilan
11	19.04	3.61	1.18	4.28	24	102.54	Pravilan
12	10.01	3.16	1.05	3.33	24	79.92	Pravilan
13	18.74	5.62	1.07	6,00	24	143.93	Pravilan

Zaključak: Svi uzorci ispitivani testom nepravilnih uzoraka su puknuli pravilnim lomom. Odbacuju se uzorci pod rednim brojem 3 i 9 zbog najniže vrijednosti I_{S50} te uzorci 8 i 13 zbog najviše vrijednosti I_{S50} . Preostali rezultati za daljnji izračun konačnih vrijednosti su rezultati uzoraka 1, 2, 4, 5, 6, 7, 10, 11 i 12 te daju sljedeće vrijednosti:

$$UCS = \frac{79.34 + 93.13 + 68.46 + 103.04 + 84.54 + 112.02 + 112.73 + 102.54 + 79.92}{9}$$

$$UCS = 92.86 [MPa]$$

$$I_{S(50)} = \frac{3.31 + 3.88 + 2.85 + 4.29 + 3.52 + 4.67 + 4.70 + 4.28 + 3.33}{9}$$

$$I_{S(50)} = 3.87 [MPa]$$

Na slici 16 nalaze se uzorci 1, 3, 4, 6 i 10, ispitivani ovom metodom.



a)



b)



c)



d)



e)

Slika 16: Fotografije a), b), c), d) i e) predstavljaju uzorke pokusa na nepravilnim uzorcima, nakon sloma

6 ZAKLJUČAK

U radu su prikazani načini određivanja tlačne čvrstoće intaktne stijene. U ovome radu provedeno je ispitivanje tlačne čvrstoće intaktne stijene u PLT uređaju na uzorcima vapnenaca s lokacije Velog vrha. Uzorci korišteni pri ispitivanju su vapnenci koji čine geološku građu riječkog prstena. Provedeno je testiranje na 23 uzorka, od kojih je 6 bilo ispitivano dijametralnim testom, 4 aksijalnim te 13 testom nepravilnih uzoraka.

U tu namjenu koriste se i terenske procjene, geološki čekić ili Schmidtov čekić ali provedeno je Point Load Test ispitivanje upravo iz razloga što je navedena metoda jedna od metoda dobivanja čvrstoće uzorka koja je jednostavnija te praktičnija u smislu prenosivosti uređaja (mala težina samog uređaja). Radi se o laboratorijskoj metodi provedenoj u skladu s normom propisanom od strane ISRM-a, brža je te ekonomičnija od ostalih.

Rezultati dobiveni na temelju provedenih ispitivanja ukazuju na razlike u vrijednostima između čvrstoće dobivene u različitim vrstama pokusa opterećenja u točki, odnosno između aksijalnog, dijametralnog i pokusa nepravilnih uzoraka. Najveća vrijednost jednoosne tlačne čvrstoće dobivena je pokusom na uzorcima nepravilnog oblika. Za pouzdanije rezultate i mogućnost izvođenja korelacije potrebno je provesti veći broj ispitivanja i smanjiti utjecaj ispitivača, oblika uzorka i drugih faktora na rezultate ispitivanja.

7 LITERATURA

- [1] Mihalić, Snježana: Osnove inženjerske geologije, Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb 2007.
- [2] S. Dugonjić Jovančević: Čvrstoća i deformabilnost stijenske mase; kolegij: Mehanika tla i stijena, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, interna skripta
- [3] S. Dugonjić Jovančević: Neke od metoda ispitivanja u stijenskoj masi; kolegij: Mehanika tla i stijena, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, interna skripta
- [4] Laboratorijski istražni radovi, skripta, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, https://www.grad.unizg.hr/download/repository/GI_3.predavanje_Laboratorijski_istrazni_radovi.pdf, 27. 6. 2021.
- [5] Hudson, J.A. and Harrison J.P. (1997) Engineering Rock Mechanics, An introduction to the principles, Pergamon, p.444.
- [6] Szavits – Nossan V.: Mehanika tla i stijena, 7. predavanje, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu
- [7] Wyllie D.C., Mah C.W.(2004) Rock slope engineering in civil and mining, 4th edition, The Institute of Mining and Metallurgy and E. Hoek and J. W. Bray, Spoon Press, New York, p. 431.
- [8] Hoek E., Brown, E.T. (1980a) Underground Excavations in Rock, Institution of Mining and Metallurgy, London.
- [9] Hoek E., Brown E.T. (1988) The Hoek-Brown Failure Criterion – A 1988 Update, Proceedings of 15th Canadian Rock Mech. Symp., Toronto, Canada, (Ed. Curran J.C.), Dept. Civ. Engineering, University of Toronto, pp. 31-38
- [10] Hoek E., Kaiser P.K., Bawden W.F. (1995) Support of Underground Excavations in Hard Rock, Rotterdam: A.A. Balkema, 215 p
- [11] Singh, B., Goel, R.K., 2011. Engineering rock mass clasification. Elsevier, Oxford.
- [12] Mišćević, P., 2004. Uvod u inženjersku mehaniku stijena. Poljica, Split.

- [13] International Society for Rock Mechanics: Suggested Methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials
- [14] Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 15., ppt 47-51
- [15] C.E. Fairhurst, J.A. Hudson / International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 36 (1999) 279±289
- [16] ISRM (1978) Quantitative description of discontinuities in rock masses, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical Abstract, 15, 89-97.
- [17] Basu A., Aydin A.: A method for normalization of Schmidt hammer rebound values, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 41 (2004) 1211–1214
- [18] Aydin A., Basu A.: The Schmidt hammer in rock material characterization, Engineering Geology 81 (2005) 1 – 14
- [19] Nazir R., Momeni E., Armaghani D. J. i drugi: Prediction of Unconfined Compressive Strength of Limestone Rock Samples Using L-Type Schmidt Hammer, 2013.
- [20] Dobrilović I., Gulam V., Hrženjak P.: Primjena indeksnih metoda ispitivanja u određivanju mehaničkih značajki intaktnog stijenskog materijala , Zagreb 2010.
- [21] Suggested Methods for Determining Point Load Strength, International Society for Rock Mechanics Commission on Testing Methods, Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. and Geomechanical Abstr., Vol 22, No. 2, 1985, pp. 51–60
- [22] Istražni radovi, <https://www.geotech.hr/laboratorijska-ispitivanja-cvrstoce-stijenske-mase/>, pristup: 31. 5. 2021.
- [23] ASTM D5731-16, Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Indeks of Rock and Application to Rock Strength Classifications, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org