S V E U Č I L I Š T E U Z A G R E B U
RUDARSKO - GEOLOŠKO - NAFTNI FAKULTET

Petar Hrženjak
Zlatko Briševac

UPUTE I PREDLOŠCI ZA LABORATORIJSKE VJEŽBE I PROGRAME IZ MEHANIKE STIJENA

Zagreb, 2009.

Upute i predlošci za laboratorijske vježbe i programe iz mehanike stijena

Doc. dr. sc. Petar Hrženjak
Zlatko Briševac, dipl. ing. rud.

PREDGOVOR

Prema usvojenom nastavnom planu i programu na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu predmeti „Mehanika stijena“ i „Mehanika stijena I“ sastoje se od predavanja i vježbi te izrade nekoliko programa. Predmet „Mehanika stijena“ predaje se na smjeru Hidrogeologija i inženjerska geologija na diplomskom studiju geološkog inženjerstva, a predmet „Mehanika stijena I“ na preddiplomskom studiju rudarstva. Vježbe i programi iz oba predmeta sastoje se većim dijelom od laboratorijskih vježbi, odnosno provedbi laboratorijskih ispitivanja te manjim dijelom od auditornih vježbi koje su uglavnom vezane uz izradu predviđenih programa.

Općenito gledano, laboratorijska ispitivanja predstavljaju jedan od vrlo značajnih i nezaobilaznih segmenata u proučavanju svojstava i ponašanja materijala u različitim uvjetima kod mnogih tehničkih disciplina. Zbog toga je usvajanje znanja i vještina primjene određenih postupaka laboratorijskih ispitivanja od velikog značaja, kako za proučavanje značajki promatranih materijala tako i opće razumijevanje materije iz određenog predmeta.

S ciljem što boljeg i jednostavnijeg savladavanja materije iz spomenutog područja, odnosno utvrđivanja fizikalno mehaničkih značajki stijena, izrađene su ove radne upute i predlošci za laboratorijske vježbe i programe iz mehanike stijena. One bi trebale studentima pružiti sve osnovne informacije o postupcima ispitivanja, mjernoj opremi, načinu prikupljanja podataka, obradi dobivenih rezultata te njihovoj osnovnoj primjeni u inženjerskim zadacima. Uz navedeno dane su i neke opće informacije o radu ispitnih laboratorija, sustavu mjernih jedinica, mjeriteljskoj tehnici te osnovne smjernice o radu i ponašanju u laboratoriju za vrijeme provedbe laboratorijskih vježbi.

Zagreb, ožujak 2009. Autori

SADRŽAJ

1. UVOD 1
1.1. Općenito o radu ispitnih laboratorija 1
1.2. Sustav mjernih jedinica 1
1.3. Mjerenja i mjerne pogreške 3
1.4. Mjerni instrumenti i metode ispitivanja 4
1.5. Priprema, postupak i obrada rezultata ispitivanja 7

2. ODREĐIVANJE SADRŽAJA VODE, POROZNOSTI I GUSTOĆE 9
2.1. Svrha 9
2.2. Potrebni uređaji 9
2.3. Postupak određivanja 9
2.4. Obrada podataka 10
2.5. Zapis rezultata 11

3. ISPITIVANJE JEDNOOSNE TLAČNE ČVRSTOĆE 13
3.1. Svrha 13
3.2. Potrebni uređaji 13
3.3. Postupak ispitivanja 13
3.4. Obrada podataka 14
3.5. Zapis rezultata 14

4. ODREĐIVANJE DEFORMABILNOSTI MATERIJALA 15
4.1. Svrha 15
4.2. Potrebni uređaji 15
4.3. Postupak ispitivanja 15
4.4. Obrada podataka 16
4.5. Zapis rezultata 18

5. ISPITIVANJE VLAČNE ČVRSTOĆE 19
5.1. Svrha 19
5.2. Potrebni uređaji 19
5.3. Postupak ispitivanja 19
5.4. Obrada podataka 20
5.5. Zapis rezultata 20

6. TROOSNO ISPITIVANJE 21
6.1. Svrha 21
6.2. Potrebni uređaji 21
6.3. Postupak ispitivanja 21
6.4. Obrada podataka 22
6.5. Zapis rezultata 23

7. ISPITIVANJE POSMIČNE ČVRSTOĆE DIREKTNIM SMICANJEM 25
7.1. Svrha 25
7.2. Potrebni uređaji 25
7.3. Postupak ispitivanja 26
7.4. Obrada podataka 26
7.5. Zapis rezultata 27

8. ODREĐIVANJE BRZINA PROLAZA ULTRAZVUČNIH ELASTIČNIH VALOVA 29
8.1. Svrha 29
8.2. Potrebni uređaji 29

8.3. Postupak ispitivanja 30
8.4. Obrada podataka 30
8.5. Zapis rezultata 31

9. ODREĐIVANJE INDEKSA ČVRSTOĆE OPTEREĆENJEM U TOČKI 33
9.1. Svrha 33
9.2. Potrebni uređaji 33
9.3. Postupak određivanja 34
9.4. Obrada podataka 36
9.5. Zapis rezultata 37

10. DETERMINACIJA JEZGRE ISTRAŽNIH BUŠOTINA 39
10.1. Svrha 39
10.2. Potrebna oprema 39
10.3. Postupak determinacije 40
10.4. Obrada podataka 40
10.5. Zapis rezultata 41

11. OBRADA I PRIKAZIVANJE PODATAKA STRUKTURNIH ELEMENATA 43
11.1. Uvod 43
11.2. Orijentacija diskontinuiteta 43
11.3. Obrada i prikazivanje podataka 44
11.3.1. Izrada dijagrama polova 44
11.3.2. Izrada konturnog dijagrama 45
11.3.3. Utvrđivanje orijentacija dominantnih familija 46
11.3.4. Iscrtavanje trasa diskontinuiteta 46
11.4. Određivanje kuta između ravnina diskontinuiteta 47

12. KLASIFIKACIJA I ČVRSTOĆA STIJENSKE MASE 49
12.1. Uvod 49
12.2. GSI klasifikacija 49
12.3. Čvrstoća stijenske mase 51

13. ANALIZE STABILNOSTI KOSINA 53
13.1. Uvod 53
13.2. Proračunske metode analize 53
13.3. Proračun faktora sigurnosti kosine za ravni oblik loma 54
13.3.1. Slučaj kosine bez vlačne pukotine 54
13.3.2. Slučaj kosine s vlačnom pukotinom 55

14. NAPREZANJA U STIJENSKOJ MASI 59
14.1. Uvod 59
14.2. Primarno stanje naprezanja 59
14.3. Sekundarno stanje naprezanja 60
14.4. Glavna naprezanja 60
14.5. Odnos naprezanja i čvrstoće materijala 61

LITERATURA 63

PRILOZI 65

1. UVOD

1.1. Općenito o radu ispitnih laboratorija

Ispitivanje je tehnička radnja koja se sastoji u određivanju jednog ili više svojstava određenog materijala, proizvoda ili procesa u skladu s točno određenim postupkom. Ispitivanja uglavnom provode ispitni laboratoriji. Rad ispitnih laboratorija propisan je zahtjevima norme HRN EN ISO/IEC 17025 koje oni moraju ispunjavati ako žele dokazati da provode sustav upravljanja kvalitetom, da su tehnički osposobljeni te da mogu davati tehnički valjane rezultate. Postupak utvrđivanja osposobljenosti nekog laboratorija da radi u skladu s normom HRN EN ISO/IEC 17025 zove se akreditacija. Laboratoriji koji provode ispitivanja iz područja koje je zakonom regulirano moraju biti akreditirani. U slučaju ispitivanja iz područja koje nije zakonom regulirano akreditacija nije nužna nego su bitni zahtjevi i povjerenje kupaca. Akreditaciju kod nas provodi Hrvatska akreditacijska agencija (HAA).

Norma HRN EN ISO/IEC 17025 sastoji se od 5 poglavlja koja čine: Područje primjene, Upućivanje na druge normativne dokumente, Nazivi i definicije, Zahtjevi koji se odnose na upravljanje i Tehnički zahtjevi. Osnovu svih zahtjeva predstavljaju tehnički zahtjevi koji su postavljeni isključivo radi osiguranja kvalitete samih rezultata mjerenja i ispitivanja.

Općenito mnogi čimbenici imaju utjecaja na ispravnost i pouzdanost ispitivanja koja provode laboratoriji. Oni obuhvaćaju utjecaje ljudskih čimbenika, uvjeta smještaja i okoliša, metoda ispitivanja i umjeravanja te metode utvrđivanja prihvatljivosti (validacije), opreme, mjerne sljedivosti, uzorkovanja kao i rukovanja predmetima za ispitivanje i umjeravanje. Stupanj u kojemu ti čimbenici pridonose ukupnoj mjernoj nesigurnosti znatno se razlikuje od jedne do druge vrste ispitivanja i umjeravanja. Laboratoriji moraju te čimbenike uzimati u obzir pri razvoju metoda ispitivanja i umjeravanja i razvoju postupaka, pri izobrazbi i osposobljavanju osoblja te pri odabiru opreme koju upotrebljavaju za ispitivanja i umjeravanja.

Obzirom na spomenuto, sve aktivnosti u laboratoriju mora biti planirane, propisane te strogo nadzirane. Studenti kao i svi gosti promatrači moraju se strogo pridržavati uputa voditelja laboratorija ili voditelja pojedinih postupaka ispitivanja. Nikakve svojevoljne aktivnosti nisu dozvoljene kao ni diranje ili rukovanje mjernom opremom, uređajima i instrumentima. U svrhu edukacije voditelj može dozvoliti rukovanje pojedinim instrumentima ili mjernom opremom, ali samo onom koja je namijenjena upravo za tu svrhu. U slučaju nepridržavanja svih primljenih uputa, neodgovorne osobe će biti isključene iz procesa nastave te im se može i zabraniti buduće prisustvovanje.

1.2. Sustav mjernih jedinica

Pristupom međunarodnim asocijacijama Republika Hrvatska je potpisala i preuzela obvezu korištenja određenih normi i standarda pa tako i primjenu Međunarodnog sustava mjernih jedinica (SI). Od 1971. godine Međunarodni sustav mjernih jedinica (SI) ima sedam osnovnih mjernih jedinica od kojih se mogu tvoriti mjerne jedinice za sva područja fizike i znanosti uopće (Ražnjević, 1985). Osnovne mjerne jedinice Međunarodnog sustava prikazane su tablicom 1.1. Dopunske mjerne jedinice Međunarodnog sustava (SI) su za ravninski kut radijan (rad) te za prostorni kut steradijan (sr). Na temelju ovih su jedinica izvedene sve ostale koje se koriste u svim područjima znanosti i tehnologije. Neke izvedene mjerne jedinice Međunarodnog sustava (SI) koje će se koristiti na vježbama iz mehanike stijena prikazane su tablicom 1.2.

TABLICA 1.1. Osnovne mjerne jedinice Međunarodnog sustava (SI)

Redni broj	Fizikalna veličina		Mjerna jedinica	
	Naziv	Oznaka	Naziv	Oznaka
1	duljina	l	metar	m
2	masa	m	kilogram	kg
3	vrijeme	t	sekunda	s
4	jakost električne struje	I	amper	A
5	termodinamička temp.	T	kelvin	K
6	svjetlosna jakost	I_v	candela (kandela)	cd
7	količina tvari	n	mol	mol

TABLICA 1.2. Neke izvedene mjerne jedinice Međunarodnog sustava (SI)

Redni broj	Fizikalna veličina		Mjerna jedinica	
	Naziv	Oznaka	Naziv	Oznaka
1	površina	A, S	četvorni metar	m^2
2	obujam	V	kubni metar	m^3
3	gustoća	ρ	kilogram po kubnom metru	kg/m^3
4	sila	F	newton (njutn)	N
5	tlak	p	pascal (paskal)	Pa
6	brzina	v	metar u sekundi	m/s
7	frekvencija	f	hertz (herc)	Hz, s^{-1}

Osim osnovnih i izvedenih mjernih jedinica Međunarodnog sustava (SI) mogu se koristiti neke iznimno dopuštene mjerne jedinice izvan sustava (SI). Isto tako prilikom laboratorijskih vježbi, a obzirom na opremu laboratorija koja potječe iz država koje ne primjenjuju (SI), mogu se koristiti i drugi sustavi mjernih jedinica. Iznimno dopuštene mjerne jedinice izvan Međunarodnog sustava (SI) kao i mjerne jedinice drugih sustava koje se mogu koristiti prilikom laboratorijskih vježbi prikazane su tablicom 1.3.

TABLICA 1.3. Iznimno dopuštene i mjerne jedinice drugih sustava

Redni broj	Fizikalna veličina		Mjerna jedinica		Jedinica iskazana vrijednostima SI jed.
	Naziv	Oznaka	Naziv	Oznaka	
1	duljina	l, h, d	inch (col, palac)	in (″)	in=0,0254 m
2	duljina	l, h, d	foot (stopa)	ft	ft=0,3048 m
3	masa	m	pound (funta)	lb	lb=0,45359237 kg
4	vrijeme	t	minuta	min	min=60 s
5	vrijeme	t	sat	h	$h=3,6\times10^3$ s
6	sila	F	pound force	lbf	lbf=4,44822 N
7	tlak	p	bar	bar	$bar=10^5$ Pa
8	tlak	p	kilopond po kvad. centimetru	kp/cm^2, at	$kp/cm^2=98066,5$ Pa

Mjerne jedinice Međunarodnog sustava (SI) nisu uvijek prikladne za iskazivanje kvantitativnih vrijednosti različito velikih ili pak malih fizikalnih veličina s kojima se susrećemo u svakodnevnom životu i znanosti. Da bi se izbjeglo neprikladno prikazivanje veličina jedinicama kojima brojčani iznosi imaju mnogo znamenaka, množenjem imenovanih osnovnih i izvedenih jedinica (SI) brojčanim faktorima $10^{\pm k}$ (gdje je k=1,2,3,6,9...) tvore se decimalni dijelovi ili pak višekratnici. Nazivi i znakovi tih jedinica tvore se tako da se imenovanoj jedinici umjesto brojčanog iznosa ispred naziva jedinice doda odgovarajući predmetak, a ispred oznake jedinice odgovarajuća oznaka predmetka, tablica 1.4.

TABLICA 1.4. Međunarodni predmeci za tvorbu decimalnih jedinica

Redni broj	Predmetak		Brojčani faktor	Brojčana vrijednost
	Naziv	Oznaka		
1	piko	p	10^{-12}	0,000 000 000 001
2	nano	n	10^{-9}	0,000 000 001
3	mikro	μ	10^{-6}	0,000 001
4	mili	m	10^{-3}	0,001
5	centi	c	10^{-2}	0,01
6	deci	d	10^{-1}	0,1
7	deka	da	10^{1}	10
8	hekto	h	10^{2}	100
9	kilo	k	10^{3}	1 000
10	mega	M	10^{6}	1 000 000
11	giga	G	10^{9}	1 000 000 000
12	tera	T	10^{12}	1 000 000 000 000

1.3. Mjerenja i mjerne pogreške

U većini slučajeva pri ispitivanju potrebna su određena mjerenja fizikalnih veličina. Mjerenje predstavlja skup djelovanja radi određivanja vrijednosti fizikalne veličine. To zapravo znači usporediti neku fizikalnu veličinu s jediničnom mjerom te fizikalne veličine. Da bi ispitivanja bila valjana, osim strogog pridržavanja propisanog postupka ispitivanja, potrebno je osigurati visoku kvalitetu rezultata mjerenja. Kvaliteta rezultata mjerenja uglavnom ovisi o mjernoj tehnici, odnosno o ispravnosti mjerila te njegove sukladnosti sa specifikacijama proizvođača. Dokazivanje ove ispravnosti i sukladnosti provodi se postupkom uspoređivanja s boljim mjerilom što se zove umjeravanje. Postupak umjeravanja mora provoditi nepristrano tijelo koje izdaje dokument koji se zove umjernica. Uobičajeni period umjeravanja iznosi godinu dana.

Međutim, izmjerena vrijednost praktički nikada nije prava vrijednost, već od nje odstupa u većoj ili manjoj mjeri. Vrijednost odstupanja najčešće ovisi o mjernoj metodi, točnosti mjerne opreme te o stručnosti samog mjeritelja. Odstupanje izmjerenog rezultata od prave vrijednosti mjerene veličine zovemo mjerna pogreška.

Prema uzroku nastajanja mjerne se pogreške mogu podijeliti na grube, sustavne i slučajne. Grube pogreške nastaju nepažnjom mjeritelja, primjenom neodgovarajuće mjerne opreme ili neprimjerene mjerne metode te pogrešnog očitavanja. U slučaju grube pogreške mjerenje treba obavezno ponoviti na ispravan način. Sustavne pogreške nastaju zbog niza malih, a predvidljivih promjena, koje se događaju u mjernom objektu, okolini ili mjeritelju. One su poznate i moguće je uzeti u obzir njihov utjecaj na mjerni rezultat. Slučajne pogreške nastaju zbog niza malih, nepredvidljivih i neizbježnih

promjena u mjernom objektu, okolini ili mjeritelju. Zbog njih dolazi do rasipanja mjernih rezultata pri uzastopno ponavljanim mjerenjima. Da bi se smanjio utjecaj sustavnih i slučajnih pogrešaka na mjerne rezultate, na istom se objektu pod jednakim uvjetima provodi više uzastopnih istovrsnih mjerenja. Konačnu vrijednost mjerenja predstavlja aritmetička sredina rezultata svih mjerenja.

Procjena širine raspona oko izmjerene vrijednosti u kojem se očekuje da se s nekom vjerojatnošću nalazi prava vrijednost mjerene veličine nazivamo mjerna nesigurnost. Ona se računa primjenom statističkih metoda, a brojčano iskazuje kvalitetu mjernog rezultata. Mjerna se nesigurnost obično označava oznakom *u* i iskazuje se jedinicom mjerne veličine. Cjelovit mjerni rezultat zapravo se sastoji od izmjerene vrijednosti, mjerne nesigurnosti te mjerne jedinice.

1.4. Mjerni instrumenti i metode ispitivanja

Najčešća mjerenja prilikom provedbi postupaka ispitivanja na utvrđivanju fizikalno mehaničkih značajki stijena odnose se na mjerenja dimenzija i mase uzoraka, mjerenja vezana uz određivanje tlaka i sile te vrijednosti deformacija uzoraka prilikom ispitivanja.

Dimenzije uzoraka određuju se pomoću pomičnog mjerila (radioničkog mjerila), slika 1.1. Pomično mjerilo je naprava za mjerenje duljina ili raspona s mogućnošću čitanja promjene duljine najčešće od 5 ili 2 stotinke milimetra. U našem slučaju koristi se pomično mjerilo nazivne (najveće) duljine mjerenja od 300 mm s mogućnošću čitanja promjene od 2 stotinke mm. Proizvođač je MEBA iz Zagreba. Kod uobičajenih određivanja dimenzija uzoraka najčešće se mjerenja provode s preciznošću očitanja od jedne desetinke milimetra.

Slika 1.1. Pomično mjerilo MEBA

Deformacije uzoraka, bilo kao odstupanje dimenzija ili oblika od nekog zadanog idealnog oblika, bilo kao promjene koje nastaju uslijed promjene opterećenja na uzorku, mogu se mjeriti mikrourama. Mikroura je naprava za precizno mjerenje pomaka, najčešće s mogućnošću čitanja promjene od jedne stotinke ili čak tisućinke milimetara. U našem slučaju koriste se mikroure marke SCHUT (Schut Geometrische Meettechniek iz Nizozemske) s mogućnošću čitanja promjene od jedne stotinke milimetara u mjernom rasponu od 10 mm, slika 1.2. Mjerni dio mikroure sastoji se od dvije kazaljke. Manja kazaljka služi za očitavanje vrijednosti pomaka u milimetrima, a velika za očitavanje vrijednosti pomaka od stotinke milimetra.

Slika 1.2. Mikroura SCHUT

Masa uzoraka najčešće se određuje vaganjem koje se može provesti klasičnim ili vagama posebnih izvedbi. U našem slučaju koristi se vaga marke ADAM nazivne vrijednost od 30 kg s mogućnošću očitanja promjene od jednog grama, slika 1.3.

Slika 1.3. Digitalna vaga ADAM

Tlak fluida u nekom sustavu mjeri se uređajima koji se zovu manometri. Mjerno područje kao i preciznost mjerenja ovisi najčešće o izvedbama (konstrukciji) samog manometra. Najčešće je slučaj da kod neke izvedbe što je veći mjerni opseg to je manja rezolucija i obratno. Zbog toga izbor mjerila treba provesti na temelju raspona tlakova koji se mogu očekivati i zahtijevane preciznosti mjerenja. U našem slučaju tlak fluida (ulja u sustavima preša za ispitivanje) mjeri se manometrom WIKA s mogućnošću čitanja promjene od 10 bara u mjernom rasponu od 0 do 600 bara.

Slika 1.4. Manometar WIKA

Mjerni uređaj za mjerenje sile zove se dinamometar. U primjeni postoje najrazličitije moguće izvedbe. U našem slučaju sila kojom preša marke SOLITEST CT-732 djeluje na uzorak mjeri se dinamometrom, koji zapravo radi na principu manometra, a koji je umjeren u vrijednostima sile i može se koristiti samo za taj tip i tu izvedbu preše. Sila kojom preša djeluje ostvaruje se djelovanjem hidrauličnog potisnog cilindra pri čemu se sila zapravo mjeri posredno preko tlaka fluida u sustavu uređajem CT-732, slika 1.5. Uređaj je konstruiran za područje od 0 do 400.000 lbf (pound force) s mogućnošću čitanja promjene od 1000 lbf. Kod uređaja za direktno smicanje Robertson Research postoje mjerni uređaji s mogućnošću čitanja vrijednosti sile u kN ili lbf. Mjerni opsezi ovih uređaja kreću se od 0 do 25 kN i od 0 do 50 kN s preciznošću mjerenja od 1 kN.

Slika 1.5. Dinamometar CT-732

Sva ostala mjerenja koja se provode uglavnom se temelje na digitalnoj ili računalnoj mjernoj tehnologiji kod kojih se fizikalne veličine mjernim pretvornicima pretvaraju u električni signal koji se zatim obrađuje i konačno prikazuje kao brojčana vrijednost na zaslonu ekrana, slika 1.6.

Slika 1.6. Brojčani prikaz vrijednosti sile na preši ELE ADR 2000

U laboratoriju za mehaniku stijena ispitivanja se najčešće provode prema preporukama o ispitivanju koje su izrađene od strane Međunarodnog društva za mehaniku stijena (International Society for Rock Mechanicis, ISRM). Za sva značajna ispitivanja u mehanici stijena postoje upute ISRM-a koje se zovu preporučene metode (Suggested Methods, SM). One se ujedno mogu tretirati i kao norme. Na temelju ovih preporuka pojedine nacionalne, regionalne ili međunarodne normirne organizacije izradile su svoje norme kao što je na primjer ASTM (American Society for Testing and Materials), BS (British Standard) ili međunarodna normirna organizacija ISO (International Organization for Standardization). Zahtjevi pojedinih normi mogu biti blaži ili nešto stroži u odnosu na zahtjeve koje su dane preporučenim metodama ISRM-a. Ispitni laboratoriji mogu na temelju svojih istraživanja razviti i vlastite metode ispitivanja. U svim slučajevima, bilo da se ispitivanja provode prema normiranim metodama ili vlastitim, postupci ispitivanja moraju biti validirani.

1.5. Priprema, postupak i obrada rezultata ispitivanja

S obzirom na prirodu samog materijala (stijena) priprema uzoraka za laboratorijska ispitivanja u mehanici stijena predstavlja jedan od vrlo zahtjevnih segmenata. Ona naravno započinje s uzorkovanjem na terenu, transportom do laboratorija, po potrebi skladištenjem, uzorkovanjem u laboratoriju te konačnom pripremom uzoraka prema zahtjevima normi po kojima se provode određena ispitivanja. Uzorkovanje na terenu najčešće se provodi odabirom odgovarajućih komada jezgri iz istražnih bušotina ili odabirom pogodnih blokova kamena. Prilikom transporta treba voditi računa da se uzorci ne oštete te da im se ne promijeni vlažnost. Uzorkovanje u laboratoriju treba provesti tako da odabrani uzorci predstavljaju prosjek kvalitete dobivenog materijala uz naravno uvjet da oni zadovoljavaju propisane zahtjeve norme po kojoj se provodi određeno ispitivanje.

Konačna priprema uzoraka najčešće se sastoji od jezgrovanja, piljenja i brušenja. S obzirom da norme po kojima se provode laboratorijska ispitivanja u mehanici stijena imaju vrlo velike zahtjeve u pogledu preciznosti obrade, ova radnja može biti vrlo složena i mukotrpna, naročito kod lošijih materijala gdje je to teško postići. Priprema se provodi najčešće sa strojevima koji koriste dijamantne rezne segmente (pila s dijamantnim diskom, uređaj za jezgrovanje s dijamantnom jezgrenom cijevi i brusilica s običnim

ili dijamantnim brusom). Ukoliko se posebno ne zahtijeva provođenje ispitivanja u stanju prirodne vlažnosti, priprema se može provoditi uz upotrebu vode. Inače priprema se mora provoditi na suho, bez upotrebe vode kao sredstva za hlađenje dijamantnih segmenta i iznošenja praha iz reza. Nakon pripreme slijedi kontrola i provjera uzoraka prema zahtjevima norme po kojoj se provode ispitivanja.

Postupak ispitivanja koji se provodi prema odabranoj metodi mora biti detaljno razrađen te jasno obrazložen kroz radne upute. Na temelju zahtjeva metode ispitivanja i radne upute izrađuje se obrazac putem kojeg se provodi zapis svih podataka o uzorku, uvjetima i postupku ispitivanja, izmjerenim vrijednostima te ostalim zapažanjima i sl. Na temelju zapisa ispitivanja provodi se obrada podataka te se na kraju izrađuje izvještaj o ispitivanju. Prije provedbe određene laboratorijske vježbe potrebno je, kao prvo, detaljno se upoznati sa postupkom ispitivanja te priloženim obrascem. Za sve eventualne nejasnoće potrebno je konzultirati voditelja ispitivanja. Prilikom provedbe određene laboratorijske vježbe potrebno se strogo pridržavati svih uputa voditelja ispitivanja. Nakon provedenog ispitivanja obrađuju se podaci te prikazuje rezultat ispitivanja.

S obzirom na način postanka, specifičnu građu te svojstva stijena, rezultati provedenih ispitivanja na uzorcima od istog materijala (stijene) mogu se prilično razlikovati. Na temelju te činjenice norme unaprijed propisuju minimalan broj ispitivanja, koje je potrebno provesti na uzorcima od istog materijala, da bi se mogla uz određenu pouzdanost dobiti valjana prosječna ili očekivana vrijednost ispitivane značajke materijala. Tako se na temelju rezultata ispitivanja daju osnovna statistička obilježja ispitivane značajke od kojih se najčešće iskazuje prosječna vrijednost, standardna devijacija te koeficijent varijacije. Prosječna vrijednost predstavlja aritmetičku sredinu vrijednosti rezultata ispitivanja koja je dana izrazom:

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_i x_i \ , \tag{1.1}$$

gdje je:

x_i – vrijednost pojedinog rezultata ispitivanja,
n – broj provedenih ispitivanja.

Mjera rasipanja vrijednosti rezultata ispitivanja oko aritmetičke sredine najbolje se predočuje standardnom devijacijom koja je dana izrazom:

$$s = \pm\sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \ . \tag{1.2}$$

Prema definiciji standardna devijacija zapravo predstavlja najmanje kvadratno odstupanje i kao takva predstavlja najbolju mjeru rasipanja individualnog skupa. Za usporedbu mjera rasipanja različitih skupova ili obilježja (značajki istog ili različitih materijala, što je naročito korisno u proučavanju značajki materijala stijena) najbolje se pokazuje koeficijent varijacije koji je dan izrazom:

$$v = \frac{s}{\bar{x}} \ . \tag{1.3}$$

2. ODREĐIVANJE SADRŽAJA VODE, POROZNOSTI I GUSTOĆE

2.1. Svrha

Općepoznato je da gustoća predstavlja jednu od osnovnih fizikalnih značajki kod svih materijala. Uz to, kod stijena je posebno karakteristična poroznost, a time i stupanj ispunjenosti pora vodom, što sve ima vrlo značajnog utjecaja na ostala, naročito mehanička svojstva stijena. Zbog toga određivanje sadržaja vode, poroznosti i gustoće predstavlja jedno od temeljnih postupaka ispitivanja. Ispitivanje se provodi prema preporučenim metodama Međunarodnog društva za mehaniku stijena za određivanje sadržaja vode, poroznosti i gustoće na uzorcima pravilnih oblika (ISRM, 1977a). Metoda se koristi samo kod čvrstih koherentnih, strojno obradivih uzoraka stijena pravilne geometrije koji pri sušenju ili potapanju u vodi značajno ne bubre i ne raspadaju se. Metoda je naročito pogodna kod pravilnih uzoraka na kojima se provode i druge metode ispitivanja.

2.2. Potrebni uređaji

Za provedbu određivanja potrebni su sljedeći uređaji:
a) Sušionik koji ima mogućnost da najmanje 24 sata održava temperaturu od 105℃ s dopuštenim odstupanjem od 3℃, slika 2.1;

Slika 2.1. Sušionik za uzorke

b) Eksikator koji može primiti uzorke da ostanu suhi tijekom hlađenja, slika 2.2;
c) Pomično mjerilo za određivanje dimenzija uzoraka s mogućnošću očitanja vrijednosti od 0,1 mm;
d) Oprema za saturaciju (zasićenje vodom) koja omogućuje da uzorci barem jedan sat budu potopljeni u vodi pri tlaku manjim od 800 Pa;
e) Vaga odgovarajućeg kapaciteta kojom se masa uzorka može odrediti s točnošću od 0.01% mase uzorka.

2.3. Postupak određivanja

Za ovo određivanje potrebna su najmanje tri reprezentativna uzorka stijene koji se mogu strojno tako obraditi da zadovoljavaju geometriju pravilnoga valjka ili prizme. Minimalne dimenzije svakog uzorka

moraju biti takve da masa uzorka bude ili najmanje 50 g ili takve da najmanja dimenzija bude najmanje deset puta veća od dimenzije najvećeg zrna.

Slika 2.2. Eksikator za uzorke

Postupak određivanja:
1) Prvo se na temelju nekoliko mjerenja pomičnim mjerilom s točnošću od 0,1 mm određuju prosječne vrijednosti dimenzija iz kojih se računa obujam uzorka V. Uzorak se zatim važe na temelju čega se dobije ukupna masa M;
2) Uzorak se suši minimalno 24 sata na temperaturi od 105 ℃ ili tako dugo da između dva perioda sušenja nema promjene mase veće od 0,1 %, dakle do konstantne mase. Prije svakog vaganja uzorak je potrebno ostaviti 30 min u Eksikatoru da se ohladi. Ovim se određuje masa čvrstih čestica M_s. Kod ovih ispitivanja uzorci moraju biti dovoljno čvrsti da ne zahtijevaju uporabu posuda za uzorke. Posude se koriste ako je stijena malo trošna ili se raspada a uzorci nepravilnih oblika;
3) Uzorak se nakon toga saturira (zasićuje vodom) najmanje 1 sat potapanjem u vodi pri tlaku ne većem od 800 Pa (6 tora) uz periodično protresanje (agitacijom) kako bi se oslobodio uhvaćeni zrak. Drugi mogući način je postepenim potapanjem u vodi pri atmosferskom zrakom koje minimalno treba trajati tri sata;
4) Nakon toga uzorak se vadi iz vode, površine se suše vlažnom krpom pri čemu se mora voditi briga da se odstrani samo površinska voda i osigura kompaktnost uzorka (ne smije se izgubiti ni jedan komadić uzorka). Zatim se vaganjem određuje saturirana masa uzorka M_{sat}.

2.4. Obrada podataka

Na temelju izmjerenih vrijednosti osnovnih značajki (suhe gustoće, sadržaja vode i poroznosti) moguće je dobiti sve ostale vrijednosti značajki materijala. Gustoća ρ, često se još naziva i obujamna gustoća materijala, predstavlja gustoću u prirodnom stanju vlažnosti što prema definiciji predstavlja omjer ukupne mase M (zbroj mase čvrstih čestica M_s i mase vode M_w) i ukupnog volumena $\boldsymbol{V}$ koji uzorak zauzima sa svim porama i pukotinama:

$$\rho = \frac{M}{V} \text{ (kg/m}^3\text{)}. \tag{2.1}$$

Gustoća u suhom stanju predstavlja omjer mase čvrstih čestica M_s i ukupnog volumena V:

$$\rho_d = \frac{M_s}{V} \text{ (kg/m}^3\text{)}. \tag{2.2}$$

Masa vode koja je sadržana u uzorku M_w koji se nalazi u prirodnom stanju vlažnosti računa se iz razlike ukupne mase M i mase čvrstih čestica M_s ($M_w = M - M_s$). Postotni sadržaj vode u uzorku w dobiva se preko omjera mase vode M_w i mase čvrstih čestica M_s izrazom:

$$w = \frac{M_w}{M_s} \times 100 \text{ (\%)}. \tag{2.3}$$

Ukupni volumen pora u uzorku V_v dobije se na temelju mase potpuno saturiranog uzorka M_{sat} i mase čvrstih čestica M_s te gustoće vode izrazom:

$$V_v = \frac{M_{sat} - M_s}{\rho_w} \text{ (m}^3\text{)}. \tag{2.4}$$

Na temelju dobivene vrijednosti za ukupni volumen pora V_v može se konačno izračunati poroznost materijala n preko izraza:

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100 \text{ (\%)} \tag{2.5}$$

te stupanj saturiranosti (stupanj ispunjenosti svih pora u uzorku vodom) preko izraza:

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100 \text{ (\%)}, \tag{2.6}$$

gdje V_w predstavlja volumen vode u uzorku koji se dobije na temelju omjera mase vode M_w i gustoće vode ρ_w. Osim ovih postoje i druge veličine koje se mogu izvesti iz ovih. U uobičajenoj inženjerskoj praksi ovo su osnovne veličine koje se najčešće računaju.

2.5. Zapis rezultata

Svi potrebni podaci o uzorku (karakteristike uzorka, dimenzije, tijek ispitivanja, vrijednosti mjerenja) kao i rezultati nakon obrade upisuju se u obrazac Zapisa određivanja sadržaja vode, poroznosti i gustoće, prilog br. 1.

U izvještaju o ispitivanju, osim standardnih podataka o uzorku (lokacija, podaci o uzorkovanju, vrsta materijala i slično) mora biti svakako naznačeno da je ukupni volumen uzorka određen pomičnim mjerilom, a volumen pora saturacijom (zasićenjem) u vodi. Rezultate mjerenja potrebno je prikazati pojedinačno za svaki ispitivani uzorak, a prosječnu vrijednost izračunati na temelju najmanje tri ispitana uzorka. Vrijednosti gustoće potrebno je odrediti do najbliže vrijednosti od 10 kg/m^3, a poroznost do najbliže vrijednosti od 0,1 %. Isto tako udio vode potrebno je odrediti do najbliže vrijednosti od 0,1 % s naznakom odgovara li ta vrijednost udjelu vode na terenu.

3. ISPITIVANJE JEDNOOSNE TLAČNE ČVRSTOĆE

3.1. Svrha

Jednoosna tlačna čvrstoća materijala predstavlja jednu od najčešće korištenih značajki stijena. Zbog toga i postupak ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće predstavlja jedan od najčešćih postupaka ispitivanja u mehanici stijena. Ispitivanje se provodi prema preporučenoj metodi Međunarodnog društva za mehaniku stijena na valjkastim ili prizmatičnim uzorcima pravilnih dimenzija uz dopušteno bočno širenje (ISRM, 1979).

3.2. Potrebni uređaji

Za provedbu ispitivanja potrebni su sljedeći uređaji i pribor:
a) Hidraulična preša dovoljnog kapaciteta, slika 3.1;
b) Čelične ploče u obliku diskova koje moraju imati: tvrdoću po Rockwell-u od minimalno HRC58 (postavljaju se na krajeve uzorka), promjer između D i D+2 mm (gdje D predstavlja promjer uzorka), debljinu minimalno 15 mm ili D/3 te površinu bez nepravilnosti većih od 0,005 mm;
c) Uređaj u obliku sferičnog (polu kugličnog) ležaja namijenjen za prijenos opterećenja na gornju bazu uzorka, koji mora biti lagano podmazan mineralnim uljem tako da se dobro namjesti. Isti mora biti precizno centriran u odnosu na uzorak i čelične ploče te uređaj za nanošenje osnog opterećenja (os ležaja mora koincidirati sa središtem gornje baze uzorka).

Slika 3.1. Hidraulična preša ELE ADR 2000

3.3. Postupak ispitivanja

Ispitivanje se provodi na uzorcima koji moraju biti pravilni valjci ili prizme s odnosom visine i promjera od 2,5 do 3,0 : 1, odnosno promjerom ne manjim od NX promjera jezgre, približno 54 mm. Pri tome promjer uzorka mora biti najmanje 10 puta veći od promjera najvećeg zrna u uzorku. Baze uzorka

moraju biti bez nepravilnosti većih od 0,02 mm pri čemu ne smiju odstupati od okomitosti na os više od 0,001 radian ili 0,05 mm u 50 mm promjera uzorka. Plašt (bočne stranice) uzorka mora biti gladak, bez nepravilnosti većih od 0,3 mm po cijeloj duljini uzorka. Uporaba materijala za čepljenje i poravnavanje neravnina nije dozvoljena kao ni nestrojna obrada površine uzorka. Promjer uzorka ne smije odstupati više od 0,1 mm od prosjeka dva međusobno okomita promjera mjerena na gornjem, sredini i donjem kraju uzorka. Prosječni promjer koristi se za izračunavanje poprečnog presjeka uzorka. Visina uzorka mora biti određena do približno 1,0 mm. Uzorci ne smiju biti skladišteni duže od 30 dana, a trebaju biti skladišteni na takav način da im se zadrži prirodna vlažnost koliko je god to moguće. Vlažnost mora biti utvrđena prema postupku određivanja sadržaja vode, poroznosti i gustoće (ISRM, 1977). Broj potrebnih uzoraka za ispitivanje može se odrediti praktičnom procjenom, ali se preporuča ispitivanje najmanje pet uzoraka. Ispitivanje jednoosne tlačne čvrstoće provodi se na preši ELE ADR 2000, slika 3.1.

Postupak ispitivanja:
1. Određivanje dimenzija i mase uzorka;
2. Uzorak se nakon toga stavlja između dvije čelične ploče i centrira ispod uređaja za prijenos opterećenja i potisnog klipa preše;
3. Opterećenje na uzorak prilikom ispitivanja mora se nanositi kontinuirano s konstantnim prirastom tako da se slom dogodi unutar 5 do 10 min ili tako da vrijednost prirasta opterećenja bude između 0,5 i 1,0 MPa/s;
4. Maksimalna sila na uzorak mora biti zabilježena u njutnima (kilonjutnima) unutar granica točnosti od 1 %.

3.4. Obrada podataka

Jednoosna tlačna čvrstoća uzorka dobije se dijeljenjem maksimalno ostvarene sile na uzorak s prosječnom površinom poprečnog presjeka.

$$\sigma_C = \frac{F}{A} \text{ (N/m}^2\text{, Pa, MPa)}, \tag{3.1}$$

gdje je:

F – maksimalna sila kod koje nastupa slom (N),
A – površina poprečnog presjeka uzorka (m^2).

3.5. Zapis rezultata

Svi potrebni podaci o uzorku (karakteristike uzorka, dimenzije, tijek ispitivanja, vrijednosti mjerenja) kao i rezultati nakon obrade upisuju se u obrazac Zapisa ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće, prilog br. 2. U izvještaju o ispitivanju potrebno je dati: litološki opis uzorka; orijentaciju osi obzirom na anizotropiju uzoraka; izvor uzorka koji uključuje geografsku lokaciju, dubinu i orijentaciju; datum i način uzrokovanja te skladišnu povijest i okolinu; broj ispitivanih uzoraka; promjer i visinu uzoraka; sadržaj vode i stupanj zasićenosti u vrijeme ispitivanja; trajanje ispitivanja i vrijednost maksimalne sile; datum ispitivanja i vrstu uređaja za ispitivanje te način loma. Svako drugo opažanje ili raspoloživ fizički podatak, kao što je gustoća čvrstih čestica, poroznost i sl., potrebno je također navesti. Jednoosnu tlačnu čvrstoću za svaki uzorak potrebno je izraziti u tri značajne znamenke, zajedno s prosječnom vrijednošću za set uzoraka istog materijala. Kao mjerna jedinica za naprezanje i čvrstoću koristi se Pa (paskal) ili najčešće MPa (mega paskal). U slučajevima kada uzorci ne odgovaraju nekim od propisanih zahtjeva to je potrebno posebno zabilježiti.

4. ODREĐIVANJE DEFORMABILNOSTI MATERIJALA

4.1. Svrha

Deformabilnost uz jednoosnu tlačnu i vlačnu čvrstoću materijala predstavlja jednu od osnovnih mehaničkih značajki stijena. Deformabilnost materijala definira se preko dviju konstanti elastičnosti, Youngovog modula elastičnosti i Poissonovog koeficijenta. Određivanje se najčešće provodi u postupku ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće kod kojeg se dodatno provode mjerenja osnih i poprečnih deformacija uzorka. Svrha tog mjerenja je određivanje dijagrama naprezanja i deformacija, na temelju kojeg se zapravo dobivaju vrijednosti za Youngov modul elastičnosti E i Poissonov koeficijenta ν. Ispitivanje se provodi prema preporučenoj metodi Međunarodnog društva za mehaniku stijena (ISRM, 1979)

4.2. Potrebni uređaji

Koriste se svi uređaji kao i kod ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće uz to da je još potreban jedan od sustava za mjerenja deformacija materijala od kojih mogu biti: sustav za mjerenja relativnih deformacija pomoću elektrootpornih mjernih traka, induktivni pretvornici LVDT-i (Linear Variable Differential Transformers), optički mjerni uređaji ili neki drugi prikladni uređaji. Ovi uređaji moraju biti tako konstruirani da mogu dati prosječne vrijednosti mjerenja od minimalno na dva mjesta mjerenja osnih i dva mjesta mjerenja poprečnih deformacija, dijametralno postavljenih u odnosu na os uzorka s jednakim mjernim vrijednostima. Uređaji moraju biti robusni i stabilni uz osjetljivost od 5×10^{-6}. Osne i poprečne deformacije moraju biti određene s točnošću od 2 % i preciznošću od 0,2 % na cijelom mjernom području.

Ako se koristi sustav s elektrootpornim mjerenim trakama, dužina mjerenja (aktivna dužina elektrootpornih mjernih traka) mora biti najmanje deset puta veća od promjera zrna i ne smije ući unutar područja D/2 od krajeva baza uzorka. Kod induktivnih pretvornika za mjerenje osnih deformacija podjela mjerne skale mora omogućiti čitanje od 0,002 mm s točnošću od 0,002 mm unutar svakog mjernog raspona od 0,02 mm te s točnošću od 0,005 mm u mjernom rasponu od 0,25 mm. Raspon obuhvata na kojem se mjere deformacije ovim pretvornicima također ne smije ući unutar područja D/2 od krajeva baza uzorka.

4.3. Postupak ispitivanja

Uzorak treba biti pripremljen na isti način kao i kod određivanja jednoosne tlačne čvrstoće. Ispitivanje se provodi na preši SOILTEST CT-732, slika 4.1.

Postupak ispitivanja:
1. Određivanje dimenzija i mase uzorka;
2. Na uzorak se montiraju uređaji za mjerenje osnih i poprečnih deformacija te se uzorak stavlja između dvije ploče i centrira ispod klipa preše;
3. Opterećenje na uzorak mora se nanositi kontinuirano s konstantnim prirastom opterećenja, tako da se slom uzorka dogodi unutar 5 do 10 min od početka opterećivanja ili tako da vrijednost prirasta opterećenja bude od 0,5 do 1,0 MPa/s;
4. Ako se vrijednosti opterećenja, osnih i poprečnih deformacija ne bilježe kontinuirano, one moraju biti zapisane u jednakim vremenskim intervalima tijekom postupka ispitivanja. Za dobivanje korektnih dijagrama prirasta deformacija u odnosu na prirast naprezanja potrebno je najmanje deset očitanja

vrijednosti tijekom ispitivanja. Uz to preporuča se izvođenje nekoliko ciklusa opterećivanja i rasterećivanja.

Slika 4.1. Preša SOILTEST CT-732

4.4. Obrada podataka

Relativna deformacija predstavlja omjer promjene duljine u odnosu na njenu početnu duljinu. Relativna deformacija materijala može biti direktno mjerena ukoliko se na primjer koristi sustav mjerenja s elektrootpornim mjernim trakama. Ako se upotrebljava neki drugi, kojim se prvo mjere pomaci između određenih točaka, tada je potrebno izračunati vrijednosti relativnih deformacija. U tom slučaju osne relativne deformacije ε_o računaju se izrazom:

$$\varepsilon_o = \frac{\Delta l}{l_0}, \tag{4.1}$$

gdje je:

Δl - promjena osne duljine (određena kao pozitivna pri smanjenju duljine),

l_0 - početna osna duljina.

Poprečna relativna deformacija može biti određena ili mjerenjem promjena promjera uzorka ili mjerenjem cirkularne deformacije (deformacije opsega). U slučaju mjerenja promjena promjera, relativne poprečne deformacije računaju se izrazom:

$$\varepsilon_d = \frac{\Delta d}{d_0}, \tag{4.2}$$

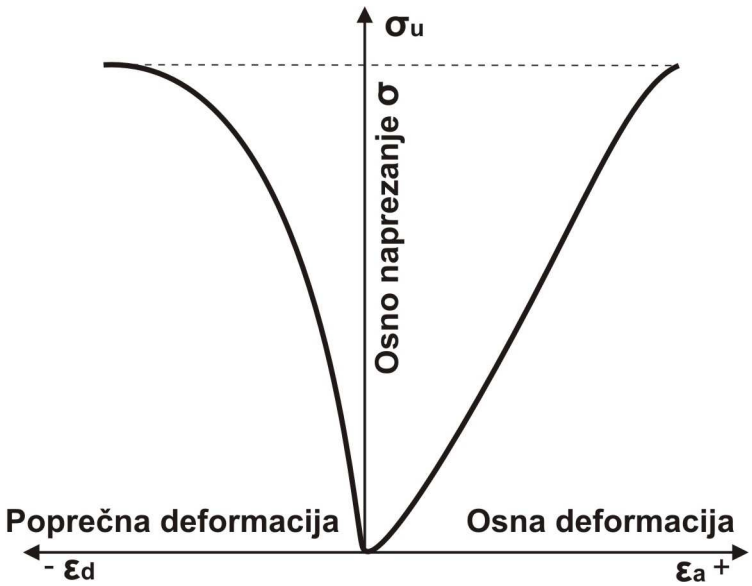
gdje je:

Δd - promjena promjera (određena kao negativna pri povećanju promjera),
d_0 - početni nedeformirani promjer uzorka.

U slučaju određivanja relativne poprečne deformacije preko promjene opsega, a obzirom da je opseg uzorka $C=d\times\pi$, promjena opsega iznosi $\Delta C=\Delta d\times\pi$. Iz toga slijedi da je relativna cirkularna deformacija ε_C upravo jednaka poprečnoj deformaciji ε_d. Tlačno naprezanje u uzorku σ dobiva se dijeljenjem tlačno sile F na uzorak s početnom prosječnom površinom poprečnog presjeka A_0, dakle:

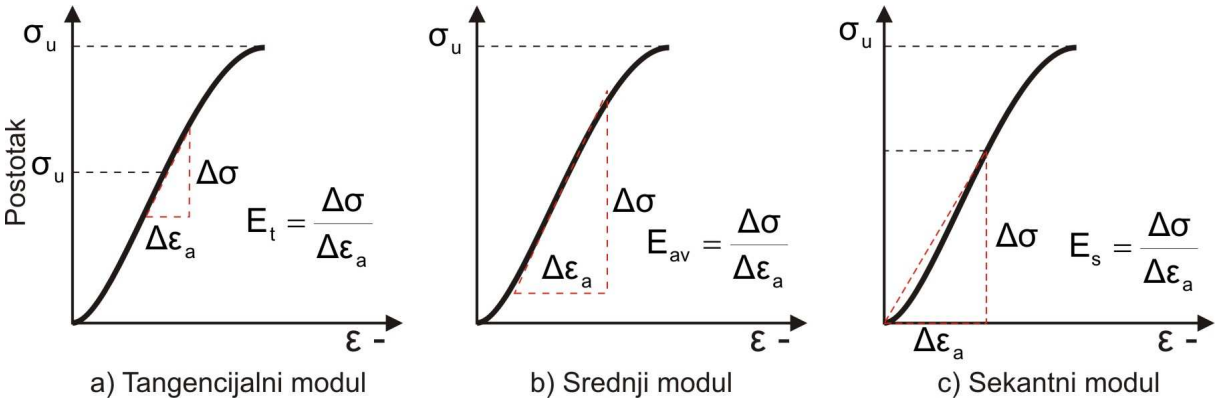
$$\sigma = \frac{F}{A_0} \text{ (MPa).} \tag{4.3}$$

Rezultat mjerenja i izračuna relativnih deformacija prikazuje se pomoću dvije krivulje u σ-ε dijagramu, slika 4.2. Jednom se prikazuju osne, a drugom poprečne relativne deformacije u odnosu na postignuto naprezanje σ. Kompletan dijagram daje najbolji opis deformacijiskih karakteristika materijala u cijelom području naprezanja s karakterističnim linearnim i nelinearnim odnosima.



Slika 4.2. Dijagram deformacija

Youngov modul elastičnosti E, koji se definira kao omjer promjene osnog naprezanja i promjene relativne osne deformacije, može biti određen na više načina. Na temelju inženjerske prakse on se definira kao tangentni, sekantni te prosječni modul linearnog dijela krivulje, slika 4.3. Tangenti Youngov modul predstavlja nagib tangente na krivulju u σ-ε dijagramu postavljene najčešće kod 50 % vrijednosti jednoosne tlačne čvrstoće (slika 4.3a). Prosječni Youngov modul elastičnosti E_{av} predstavlja prosječni nagib manje-više linearnog djela krivulje osnog naprezanja i osne relativne deformacije (slika 4.3b). Sekantni Youngov modul E_s, se obično mjeri od nulte vrijednosti naprezanja do određenog postotka maksimalne čvrstoće, obično 50 %. (slika 4.3c). Youngov modul se izražava u jedinicama kao i naprezanje, u paskalima (Pa), ali je puno prikladnije izražavanje u gigapaskalima (GPa).



Slika 4.3. Načini određivanja Youngovog modula elastičnosti

Poissonov koeficijent ν dobiva se na temelju relacije:

$$\nu = -\frac{\frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_a}}{\frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_d}} = -\frac{E}{\frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_d}} = -\frac{\Delta\varepsilon_d}{\Delta\varepsilon_a}, \tag{4.4}$$

gdje se nagib krivulje poprečne relativne deformacije mora odrediti na isti način kao i u slučaju određivanja Youngovog modula elastičnosti. Potrebno je napomenuti da se ovom jednadžbom dobiva pozitivna vrijednost Poissonovog koeficijenta, budući da su po dogovoru vrijednosti krivulje poprečnih deformacija negativne.

4.5. Zapis rezultata

Svi potrebni podaci o uzorku (karakteristike uzorka, dimenzije, tijek ispitivanja, vrijednosti mjerenja) kao i osnovni rezultati nakon obrade upisuju se u obrazac Zapisa ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće i deformabilnosti materijala, prilog br. 3. Podaci o deformacijama i naprezanju obrađuju se kroz obrazac Zapisa mjerenja deformacija materijala, prilog br. 4. Krivulje osnih i poprečnih relativnih deformacija u odnosu na postignuto naprezanje materijala iscrtavaju se na obrascu Dijagrama deformabilnosti materijala, prilog br. 5. Na temelju prosječnog nagiba linearnog dijela dobivenih krivulja određuju se vrijednosti za Youngov modul elastičnosti *E* i Poissonov koeficijent ν.

U izvještaju o ispitivanju, pored sadržaja opisanog u poglavlju ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće, potrebno je dati vrijednosti Youngovog modula elastičnosti te Poissonovog koeficijenta. Njih je potrebno izraziti na tri značajne znamenke za svaki ispitani uzorak, zajedno sa prosječnim vrijednostima za ispitivani materijal. Isto tako potrebno je prikazati način određivanja Youngovog modula elastičnosti te pri kojem je iznosu ili iznosima osnog naprezanja određen.

5. ISPITIVANJE VLAČNE ČVRSTOĆE

5.1. Svrha

Određivanje vlačne čvrstoće materijala može se provesti direktnim i indirektnim postupkom. Zbog jednostavnosti postupka, ispitivanje vlačne čvrstoće najčešće se provodi indirektno pomoću Brazilskog testa. Opravdanost ovog postupka temelji se i na eksperimentalnoj činjenici da se većina stijena koje se nalaze u stanju dvoosnog naprezanja najčešće lomi uslijed prekoračenja vlačne čvrstoće, u uvjetima kada je jedno glavno naprezanje vlačno, a drugo tlačno, s veličinom koja po iznosu ne prelazi trostruku vrijednost vlačnog naprezanja. Ispitivanje se provodi prema preporučenoj metodi za indirektni postupak Međunarodnog društva za mehaniku stijena (ISRM, 1978)

5.2. Potrebni uređaji

Za provedbu ispitivanja potrebni su sljedeći uređaji i pribor:
a) Hidraulična preša (ELE ADR 2000) slika 3.1;
b) Dvije čelične čeljusti za prijenos opterećenja, izrađene tako da dodiruju kružno oblikovani uzorak stijene na dijametralno suprotnim stranama pod kutom kontakta oko 10° kod sloma. Polumjer zakrivljenosti čeljusti mora biti 1,5 puta veći od polumjera uzorka. Širina čeljusti mora biti 1,1 puta veća od debljine uzorka. Gornja čeljust mora imati polukuglični ležaj polumjera 25 mm;
c) Papirnata ljepljiva traka, dvostruke debljine, čija širina mora biti jednaka ili neznatno veća od debljine uzorka.

5.3. Postupak ispitivanja

Ispitivanje se provodi na uzorcima koji moraju biti u obliku pravilnih diskova. Broj uzoraka za ispitivanje može se odrediti praktičnom procjenom, ali se preporuča najmanje deset uzoraka. Cilindrične plohe trebale bi biti bez vidljivih zareza reznih segmenata i nepravilnosti u debljini uzorka većih od 0,025 mm. Baze moraju biti ravne, bez izbočina većih od 0,25 mm, pravokutne i paralelne unutar 0,25°. Orijentacija uzorka mora biti poznata kao i sadržaj vode. Promjer uzoraka ne smije biti manji od NX promjer jezgre, odnosno približno 54 mm, a debljina bi trebala biti približno jednaka polumjeru uzorka. Uzorci moraju oko plašta biti zamotani slojem trake te postavljeni pravilno u uređaj za ispitivanje, tako da ih čeljusti opterete dijametralno. Osi uzorka i preše moraju biti usklađene. Ispitivanje se provodi na preši ELE ADR 2000, slika 3.1.

Postupak ispitivanja:
1. Određivanje dimenzija i mase uzorka;
2. Uzorak se nakon toga stavlja između dvije čeljusti i centrira ispod uređaja za prijenos opterećenja i potisnog klipa preše;
3. Opterećenje na uzorak prilikom ispitivanja potrebno je nanositi kontinuirano s konstantnim prirastom opterećenja tako da se slom dogodi unutar 5 do 10 sekundi ili tako da vrijednost prirasta opterećenja bude oko 200 N/s;
4. Maksimalna sila na uzorak mora biti zabilježena u njutnima (kilonjutnima) unutar granica točnosti od 1 %.

5.4. Obrada podataka

Vlačna čvrstoća uzorka dobije se iz izraza:

$$\sigma_t = \frac{0{,}636 \cdot F}{D \cdot t}\text{, (MPa)} \tag{5.1}$$

gdje je:

F – maksimalna sila kod koje nastupa slom (N),
D – promjer uzorka (m).
t – debljina uzorka mjerena kroz središte (m).

5.5. Zapis rezultata

Svi potrebni podaci o uzorku (karakteristike uzorka, dimenzije, tijek ispitivanja, vrijednosti mjerenja) kao i rezultati nakon obrade upisuju se u obrazac Zapisa ispitivanja indirektne vlačne čvrstoće Brazilskim testom, prilog br. 6.

U izvještaju o ispitivanju potrebno je dati: litološki opis uzorka; orijentaciju osi obzirom na anizotropiju uzoraka; izvor uzorka koji uključuje geografsku lokaciju, dubinu i orijentaciju; datum i način uzrokovanja te skladišnu povijest i okolinu; broj ispitivanih uzoraka; promjer i debljinu uzoraka; sadržaj vode i stupanj zasićenosti u vrijeme ispitivanja; trajanje ispitivanja i vrijednost maksimalne sile; datum ispitivanja i vrstu uređaja za ispitivanje te način loma. Svako drugo opažanje ili raspoloživ fizički podatak, kao što je gustoća čvrstih čestica, poroznost i sl., potrebno je također navesti. Vlačnu čvrstoću za svaki uzorak potrebno je izraziti u tri važne znamenke, zajedno s prosječnom vrijednošću za set uzoraka istog materijala. Kao mjerna jedinica za naprezanje i čvrstoću koristi se Pa (paskal) ili najčešće MPa (mega paskal). U slučajevima kada uzorci ne odgovaraju nekim od propisanih zahtjeva to je potrebno također posebno zabilježiti.

6. TROOSNO ISPITIVANJE

6.1. Svrha

Troosno ispitivanje namijenjeno je za određivanje tlačne čvrstoće materijala u troosnom stanju naprezanja u kojem se u prirodi stijenska masa najčešće i nalazi. Na temelju rezultata troosnih ispitivanja dobivaju se podaci potrebni za određivanje Mohrove anvelopa sloma, a iz nje kuta unutarnjeg trenja φ i kohezije c Mohr-Coulombovog kriterija čvrstoće. Postupak ispitivanja provodi se prema preporučenoj metodi Međunarodnog društva za mehaniku stijena (ISRM, 1978)

6.2. Potrebni uređaji

Osnovni sustav uređaja za ispitivanje sastoji se od tri dijela: 1) troosne ćelije, 2) uređaja za nanošenje i kontroliranje osnog opterećenja te 3) uređaja za nanošenje i mjerenje ćelijskog (bočnog) tlaka.

1) Troosna ćelija mora imati:
a) Kućište u koje se postavlja uzorak na koji djeluje bočni tlak. Ono mora imati ispušni zračni ventil i hidrauličnu vezu s pumpom. Prilikom ispitivanja ćelija mora biti u potpunosti ispunjena hidrauličnim uljem odgovarajućih karakteristika;
b) Nepropusnu membranu koja sprečava ulazak hidrauličnog ulja u uzorak, a da pri tome značajno ne ulazi u pore na površini uzorka;
c) Čelične ploče u obliku diska koje se stavljaju na krajeve uzorka koji moraju imat tvrdoću po Rockwell-u od minimalno HRC58. Promjer ploča mora biti između D i D+2 mm (gdje je D promjer uzorka) te debljine minimalno 15 mm ili D/3. Površina mora biti glatka i bez nepravilnosti većih od 0.005 mm;
d) Polukuglični ležaj čije se središte zakrivljenosti mora podudarati s centralnom osi uzorka.

2) Uređaj za nanošenje, kontroliranje i mjerenje osnog opterećenja mora biti dovoljnog kapaciteta i sposobnosti nanošenja kontinuiranog opterećenja do sloma uzorka u odgovarajućem vremenskom periodu.

3) Uređaj za nanošenje i mjerenje ćelijskog (bočnog) tlaka sastoji se od sljedećih dijelova:
a) Hidraulične pumpe dovoljnog kapaciteta i sposobnosti održanja konstantne vrijednosti bočnog tlaka unutar 2 % od željenog iznosa za vrijeme ispitivanja;
b) Uređaja za mjerenje tlaka (tlakomjera ili mjernog pretvornika za tlak) koji mora biti dovoljne točnosti i rezolucije u potrebnom mjernom području.

6.3. Postupak ispitivanja

Broj uzoraka za ispitivanje, kao i vrijednosti ćelijskog tlaka, može se odrediti praktičnom procjenom. Preporuča se najmanje pet uzoraka po vrsti materijala. Uzorci za ispitivanje moraju biti pravilni valjci s odnosom visine i promjera od 2,0 do 3,0 : 1 pri čemu promjer ne bi smio biti manji od NX promjera jezgre, približno 54 mm. Uz to promjer uzoraka mora biti najmanje deset puta veći od promjera najvećeg zrna u uzorku stijene.

Baze uzorka moraju biti bez nepravilnosti većih od 0.02 mm te se ne smiju naginjati od okomitosti na os za više od 0.001 radijana (približno 0.05 mm za promjer uzorka od 50 mm). Bočne stranice (plašt uzorka) moraju biti glatke bez nepravilnosti većih od 0.3 mm na cijeloj duljini uzorka. Uporaba materijala za čepljenje i ravnanje neravnina nije dozvoljena kao ni nestrojna obrada površine uzoraka.

Promjer uzoraka ne smije odstupati više od 0,1 mm od prosjeka dva međusobno okomita promjera mjerena na gornjem kraju, sredini i donjem kraju uzorka, pri čemu se prosječni promjer koristi za izračunavanje poprečnog presjeka uzorka. Visina uzorka mora bit određena s točnošću od približno 1,0 mm. Uzorci ne smiju biti skladišteni duže od 30 dana, pri čemu moraju biti skladišteni na takav način da im se zadrži prirodna vlažnost koliko god je to moguće. Nakon njihove pripreme, a neposredno prije ispitivanja, uzorci moraju biti uskladišteni 5 do 6 dana na temperaturi od 20 ℃ ± 2 ℃ te vlažnosti od 50 % ± 5 %. Ispitivanje se provodi na preši SOILTEST CT-732, slika 6.1.

Slika 6.1. Sustav preše SOILTEST CT-732 za troosno ispitivanje

Postupak ispitivanja:
1) Uzorak se obavija nepropusnom membranom te se zajedno s međusobno centriranim čeličnim pločama na krajevima uzorka smješta u ćeliju;
2) Zatvaranje troosne ćelije te punjenje hidrauličnim uljem tako da zrak potpuno izađe kroz otvoreni zračni ventil nakon čega se on zatvara;
3) Smještanje ćelije u uređaj za nanošenje osnog opterećenja;
4) Nanošenje osnog opterećenja i bočnog tlaka do unaprijed određene vrijednosti, koje se mora provesti tako da budu istog intenziteta do postizanja željene vrijednosti bočnog tlaka. Nakon toga bočni tlak se mora održavati unutar 2 % zadane vrijednosti;
5) Slijedi osno opterećenje koje se mora povećavati kontinuirano s konstantnim prirastom opterećenja, tako da se slom dogodi unutar 5 do 10 min ili tako da prirast opterećenja bude unutar granica od 0.5 do 1.0 MPa/s.

6.4. Obrada podataka

Tlačna čvrstoća stijene dobiva se dijeljenjem maksimalno nanesene osne sile na uzorak s prosječnom površinom poprečnog presjeka. Na temelju vrijednosti bočnog tlaka (naprezanja σ_3) i odgovarajuće vrijednosti maksimalnog osnog opterećenja (naprezanja σ_1) za niz ispitanih uzoraka konstruira se krivulja u σ_3-σ_1 dijagramu (vrijednost bočnog naprezanja σ_3 nalazi se na apscisi a osnog σ_1 na ordinati). Anvelopa čvrstoće dobiva se crtanjem krivulje srednje vrijednosti na temelju rasporeda

podataka. Zbog praktičnosti, preporučljivo je aproksimirati anvelopu ravnom linijom na najreprezentativnijem dijelu krivulje.

Svaka ravna linija karakterizirana je gradijentom *m* (nagibom) i odsječkom na y osi što predstavlja veličinu *b*. Na temelju dobivenih veličina za *m* i *b* dobivaju se vrijednosti za kut unutarnjeg trenja φ i vrijednosti kohezije *c* Mohr-Coulombovog kriterija čvrstoće izrazima:

$$\varphi = \arcsin\frac{m-1}{m+1}\ (^\circ) \qquad c = b\frac{1-\sin\varphi}{2\cos\varphi}\ (\text{MPa}). \tag{6.1}$$

6.5. Zapis rezultata

Svi potrebni podaci o uzorku (karakteristike uzorka, dimenzije, tijek ispitivanja, vrijednosti mjerenja) kao i rezultati nakon obrade upisuju se u obrazac Zapisa ispitivanja čvrstoće materijala u troosnom stanju naprezanja, prilog br. 7. Krivulja dobivenih vrijednosti na temelju podataka za maksimalna osna naprezanja pri slomu σ_1 u odnosu na zadana bočna naprezanja σ_3 za set ispitanih uzoraka konstruira se na obrascu Dijagrama odnosa tlačne čvrstoće i zadanog bočnog naprezanja pri troosnom ispitivanju, prilog br. 8. Na temelju nagiba pravca na krivulju u najreprezentativnijem dijelu određuju se vrijednosti za *m* i *b*, a iz njih kohezija *c* i kut unutarnjeg trenja φ.

U izvještaju o ispitivanju potrebno je dati: litološki opis uzorka; orijentaciju osi obzirom na anizotropiju uzoraka; izvor uzorka koji uključuje geografsku lokaciju, dubinu i orijentaciju; datum i način uzrokovanja te skladišnu povijest i okolinu; broj ispitivanih uzoraka; promjer i visinu uzoraka; sadržaj vode i stupanj zasićenosti u vrijeme ispitivanja; trajanje ispitivanja i vrijednost maksimalne sile; datum ispitivanja i vrstu uređaja za ispitivanje te način loma. Svako drugo opažanje ili raspoloživ fizički podatak, kao što je gustoća čvrstih čestica, poroznost i sl. potrebno je također navesti. Bočni tlak i pripadajuće osno opterećenje potrebno je izraziti u tri značajne znamenke. Vrijednost kohezije *c* i kuta unutarnjeg trenja φ potrebno je iskazati zajedno s područjem bočnog naprezanja u kojem su one valjane. U slučajevima kada uzorci ne odgovaraju nekim od propisanih zahtjeva to je potrebno posebno naznačiti.

7. ISPITIVANJE POSMIČNE ČVRSTOĆE DIREKTNIM SMICANJEM

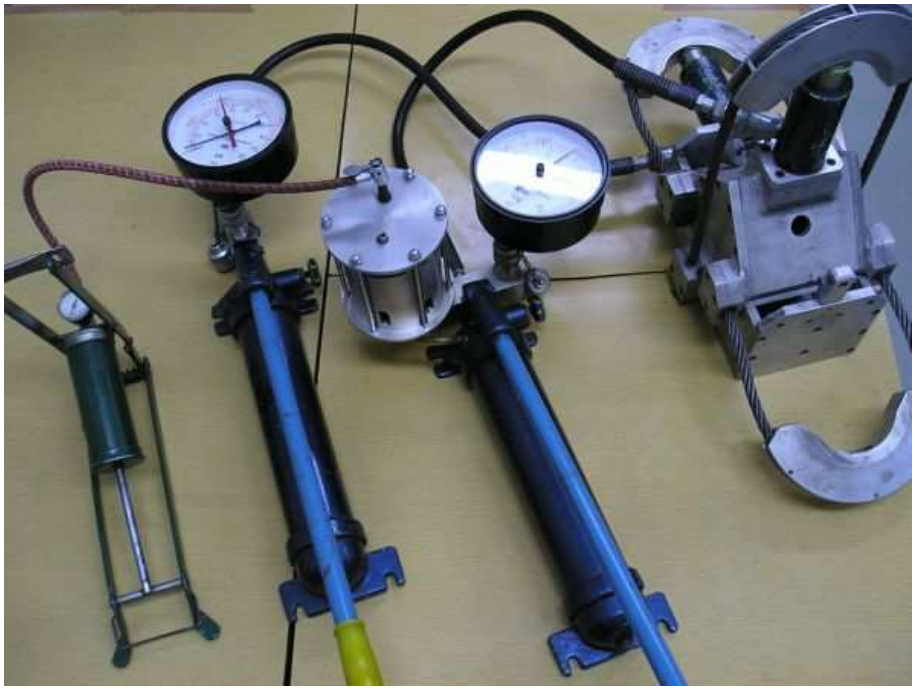
7.1. Svrha

Svrha ovog ispitivanja, kao jednog od prvih uopće razvijenih postupaka ispitivanja, je određivanje vršnih i rezidualnih vrijednosti veličina posmične čvrstoće kohezije i kuta unutarnjeg trenja. Ispitivanje posmične čvrstoće direktnim smicanjem provodi se primjenom posmičnog naprezanja na uzorak u smjeru ravnine sloma na koju djeluje konstantno normalno naprezanje. S obzirom da se na uzorak direktno djeluje posmičnom silom, time je zapravo određena ploha smicanja po kojoj dolazi do sloma. To omogućuje da se unaprijed odredi ploha (kod ispitivanja stijena, na primjer, ploha diskontinuiteta) po kojoj se želi izvršiti slom tj. da se baš za tu plohu dobiju vrijednosti veličina posmične čvrstoće kohezije i kuta unutarnjeg trenja. Postupak ispitivanja provodi se prema preporučenoj metodi Međunarodnog društva za mehaniku stijena (ISRM, 1974)

7.2. Potrebni uređaji

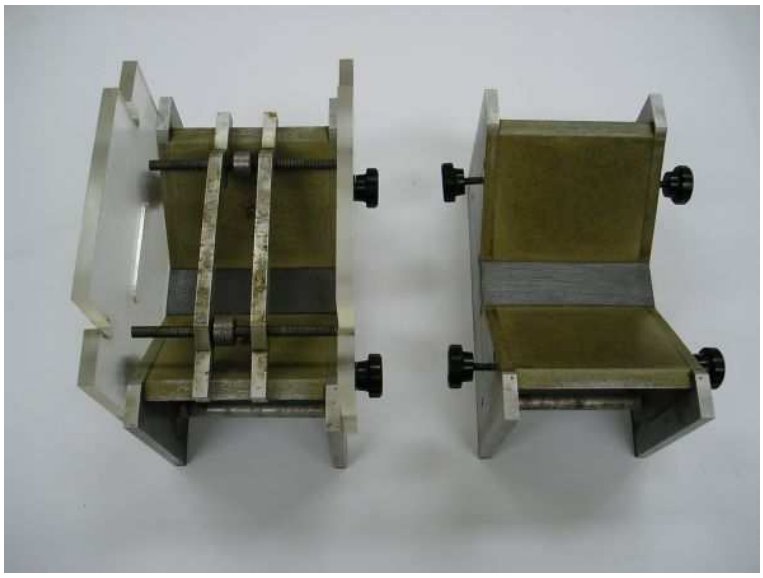
Ispitivanje posmične čvrstoće provodi se na uređaju "Robertson Research" koji je namijenjen za ispitivanja nešto manjih dimenzija uzoraka, slika 7.1.

Uređaj se sastoji od:
a) Kalupa za pripremu (cementiranje) uzorka, slika 7.2;
b) Uređaja za smicanje koji se sastoji od dva dijela, donjeg nepomičnog i gornjeg pomičnog dijela u koji se smješta zacementirani uzorak. Donji nepomični i gornji pomični dio su preko hidrauličnih potisnih cilindara međusobno upeti;
c) Hidrauličnih ručnih pumpi, spojnih crijeva i manometara;
d) Jedinice za održavanje stalnog normalnog naprezanja. Jedinica se sastoji od zračne i uljne komore međusobno odijeljene pomičnim klipom.



Slika 7.1. Uređaj za direktno smicanje "Robertson Research"

Dimenzije uređaja su takve da posebno pripremljeni uzorak može biti približnih dimenzija od 45 × 45 mm ili jezgre kojoj promjer ne prelazi 50 mm. Visina uzorka može biti do stotinjak mm.



Slika 7.2. Kalupi za pripremu (cementiranje) uzoraka

7.3. Postupak ispitivanja

Za postupak ispitivanja potrebno je prvo piljenjem obraditi uzorak na zahtijevane dimenzije nakon čega se krajevi cementiraju brzovežućom cementnom smjesom. Kod cementiranja mora se paziti na pravilnu ugradnju u kalup tako da željena ploha smicanja bude slobodna između dva odljevka. Prije samog zalijevanja cementom potrebno je kalup premazati uljem kako bi se lakše odvojio odljevak.

Postupak ispitivanja:
1) Pripremljeni uzorak stavlja se u uređaj za smicanje te se namještaju potisni cilindri i mikroura za praćenje pomaka;
2) Normalno naprezanje nanosi se vertikalnim potisnim cilindrom i ono mora biti konstantne vrijednosti u tijeku ispitivanja jednog uzorka. Nakon nanošenja željene normalne sile vrši se nulto čitanje na mikrouri;
3) Posmično naprezanje nanose se postepeno horizontalnim potisnim cilindrom sve do sloma pri čemu se pomaci mjere mikrourom;
4) Nakon sloma materijala, uz znatno nižu vrijednost posmičnog naprezanja, nastavlja se smicanje po formiranoj smičnoj plohi uz praćenje pomaka sve do pomaka od desetak mm. Iz ovog se dobiva podatak za vrijednost posmične rezidualne čvrstoće materijala.

Preporuča se provesti 5 ili najmanje 3 ispitivanja na uzorcima istog materijala uz različite vrijednosti normalnih naprezanja.

7.4. Obrada podataka

Podaci dobiveni tijekom ispitivanja unose se u tablicu zapisa u kojoj se na temelju izmjerenih vrijednosti sila računaju naprezanja te pomaci nastali uslijed posmičnog naprezanja. Normalno naprezanje računa se izrazom:

$$\sigma_n = \frac{F_n}{A} \text{ (MPa)}, \tag{7.1}$$

gdje je:

F_n – vrijednost normalne sile,

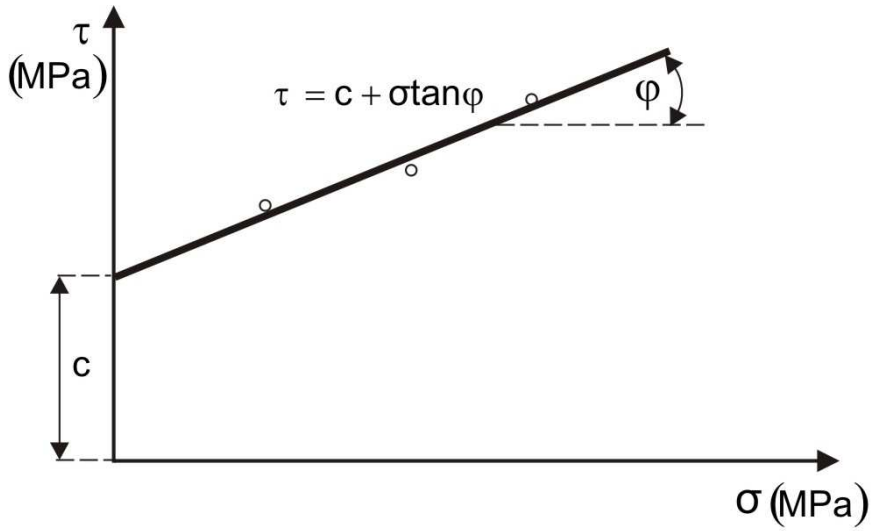
A – površina poprečnog presjeka u području smične plohe,

a vrijednost posmičnog naprezanja izrazom:

$$\tau = \frac{F_s}{A} \text{ (MPa)}, \tag{7.2}$$

gdje F_s predstavlja vrijednost posmične sile.

Iz ovih se podataka u δ-τ dijagramu može konstruirati krivulja koja najbolje opisuje odnos ostvarenih pomaka za vrijednosti posmičnih naprezanja. Na temelju dobivenih podataka, provedbom ispitivanja na setu uzoraka, u σ-τ dijagramu linearnom korelacijom dobiva se pravac koji predstavlja Coulombov zakon čvrstoće, čijim su položajem ujedno određene vrijednosti kohezije *c* i kuta unutarnjeg trenja *φ*, slika 7.3.



Slika 7.3. Prikaz rezultata ispitivanja posmične čvrstoće u σ-τ dijagramu

7.5. Zapis rezultata

Svi potrebni podaci o uzorku (karakteristike uzorka, dimenzije, tijek ispitivanja, vrijednosti mjerenja) kao i rezultati nakon obrade upisuju se u obrazac Zapisa ispitivanja posmične čvrstoće direktnim smicanjem, prilog br. 9. Na temelju dobivenih vrijednosti maksimalnih posmičnih naprezanja u odnosu na zadana normalna naprezanja za set ispitanih uzoraka konstruira se kriterij (pravac) čvrstoće na obrascu Dijagrama odnosa posmične čvrstoće i zadanog normalnog naprezanja, prilog br. 10. Na temelju položaja konstruiranog pravca određuju se vrijednosti za koheziju *c* i kut unutarnjeg trenja *φ*.

U izvještaju o ispitivanju potrebno je dati: litološki opis uzorka; orijentacija uzorka obzirom na anizotropiju; izvor uzorka koji uključuje geografsku lokaciju, dubinu i orijentaciju; datum i način uzrokovanja te skladišnu povijest i okolinu; broj ispitivanih uzoraka; promjer i visinu uzoraka; sadržaj vode i stupanj zasićenosti u vrijeme ispitivanja; trajanje ispitivanja; vrijednost normalne sile; vrijednosti

posmičnih sila i ostvarenih pomaka; vrijednost maksimalne posmične sile; datum ispitivanja te vrstu uređaja za ispitivanje.

8. ODREĐIVANJE BRZINA PROLAZA ULTRAZVUČNIH ELASTIČNIH VALOVA

8.1. Svrha

Svrha ovog ispitivanja je određivanje brzina prolaza ultrazvučnih elastičnih valova kroz uzorak stijene u laboratoriju. Postupak ispitivanja provodi se prema preporučenoj metodi Međunarodnog društva za mehaniku stijena (ISRM, 1977b). U primjeni postoje tri različite metode ispitivanja: visokofrekventna ultrazvučna metoda, niskofrekventna ultrazvučna metoda i rezonantna metoda. Osim određivanja brzina prolaza ultrazvučnih elastičnih valova najčešće se određuju i dinamičke konstante elastičnosti, dinamički Youngov modul elastičnosti i Poissonov koeficijent te dinamički modul smicanja.

8.2. Potrebni uređaji

U ovom ispitivanju provodi se postupak visokofrekventne ultrazvučne metode kod koje se traži da generirani signal bude sinusnog ili pravokutnog oblika, frekvencije od 100 kHz do 2 MHz. Sustav za mjerenje brzina elastičnih valova sastoji se od slijedećih uređaja, slika 8.1:
a) Generator ultrazvuka tipa Seizmic Analyser, model 2007H, s instrumentom za mjerenje potrebnog vremena da generirani val prođe s odašiljača preko uzorka na primač;
b) Uređaj za prijenos elastičnih valova koji se sastoji od cilindra s ugrađenim odašiljačem i primačem. U odašiljaču je smješten pretvornik (kristal koji radi na principu piezoelektričnog efekta) koji napon iz generatora ultrazvuka pretvara u mehaničke valove. Generiraju se P-valovi (primarni ili longitudinalni) i S-valovi (sekundarni ili transverzalni). U primaču se mehanički valovi natrag pretvaraju u električni signal;
c) Dvokanalni osciloskop, kao univerzalni instrument za mjerenje električnih veličina, ima mogućnost istovremenog prikaza dva kanala od kojih jedan prikazuje generirani signal koji se šalje na odašiljač te drugi koji prikazuje primljeni signal na primaču;
d) Kablovi za međusobno povezivanje uređaja.

Slika 8.1. Sustav uređaja za mjerenje brzina prolaza ultrazvučnih elastičnih valova

8.3. Postupak ispitivanja

Ispitivanje se provodi na uzorcima koji mogu biti u obliku pravilnih valjaka ili prizmi s odnosom visine i njegove širine koji bi trebao biti od 2 : 1 do najmanje 1 : 1. Ispitivanje se provodi na uzorcima s prirodnom vlažnošću. Da bi se ostvario prijenos elastičnih valova pretvornici moraju biti određeno u kontaktnom opterećenju s uzorkom od približno 10 N/cm^2. Uz to baze uzorka moraju biti dobro obrađene da se osigura dobar prijenos elastičnih valova. Za poboljšanje prijenosa valova površina uzorka može se premazati tankim slojem fine masti, glicerina ili ulja.

Postupak ispitivanja:
1. Određivanje dimenzija i mase uzorka;
2. Povezivanje instrumenata za mjerenje P-valova. Primač i odašiljač se premažu tankim slojem ulja, zatim se postavljaju tako da dođu u međusobni kontakt. Uključuju se instrumenti te se na ekranu osciloskopa dobivaju slike dviju krivulja, koje se dovode u središnji položaj na ekranu, a zatim se pomiče donja krivulja (primljeni signal) dok se ne poklopi prvi nailazak vala s markerom generiranog signala na gornjoj krivulji. Na digitalnom brojčaniku očitava se vrijeme u ms i to predstavlja prvo čitanje;
3. Uzorak se nakon toga stavlja između primača i odašiljača te se na gore opisani način provodi drugo čitanje P-valova;
4. Isti postupak provodi se i za S-valove s tim da je potrebno prethodno prespojiti pretvornike za to mjerenje.

8.4. Obrada podataka

Vrijeme prolaska valova kroz uzorak predstavlja razliku između drugog i prvog čitanja kako za P-val tako i za S-val. Iz tako dobivenih vremena i izmjerene dužine (visine) uzorka računaju se brzine valova kroz uzorak:

$$v_P = \frac{h}{t_P} \text{ (m/s)}, \qquad v_S = \frac{h}{t_S} \text{ (m/s)}, \tag{8.1}$$

gdje je:

h – visina uzorka (m),
t_P – vrijeme prolaska P-vala kroz uzorak (s),
t_S – vrijeme prolaska S-vala kroz uzorak (s).

Na temelju utvrđenih brzina i gustoće materijala računaju se dinamičke konstante elastičnosti i to: dinamički modul smicanja, dinamički modul elastičnosti, dinamički Poissonov koeficijent te Lameova konstanta. Dinamički modul smicanja G_{din} računa se pomoću izraza:

$$G_{din} = \rho \cdot v_S^2 \text{ (MPa)}, \tag{8.2}$$

gdje je ρ (kg/m^3) gustoća materijala. Dinamički modul elastičnosti E_{din} računa se pomoću izraza:

$$E_{din} = \frac{\rho \cdot v_S^2 \cdot (3v_P^2 - 4v_S^2)}{v_P^2 - v_S^2} \text{ (MPa)}, \tag{8.3}$$

a dinamički Poissonov koeficijent ν_{din} izrazom:

$$\nu_{din} = \frac{v_P^2 - 2v_S^2}{2(v_P^2 - v_S^2)} \,. \tag{8.4}$$

Lameova konstanta λ, koja prema teoriji elastičnosti predstavlja jednu od konstanti u matrici koeficijenata koja direktno povezuje komponente naprezanja s komponentama deformacija, računa se preko izraza:

$$\lambda = \rho \cdot (v_P^2 - 2v_S^2) \text{ (MPa)}, \tag{8.5}$$

8.5. Zapis rezultata

Svi potrebni podaci o uzorku (karakteristike uzorka, dimenzije, tijek ispitivanja, vrijednosti mjerenja) kao i rezultati nakon obrade upisuju se u obrazac Zapisa određivanja brzina prolaza ultrazvučnih elastičnih valova, prilog br. 11.

U izvještaju o ispitivanju potrebno je dati: litološki opis uzorka; orijentacija osi obzirom na anizotropiju uzoraka; izvor uzorka koji uključuje geografsku lokaciju, dubinu i orijentaciju; datum i način uzrokovanja te skladišnu povijest i okolinu; broj ispitivanih uzoraka; promjer i debljinu uzoraka; sadržaj vode i stupanj zasićenosti u vrijeme ispitivanja te podatke o vrsti uređaja za ispitivanje. Svako drugo opažanje ili raspoloživ fizički podatak, kao što je gustoća čvrstih čestica, poroznost, stanje naprezanja materijala u stijenskoj masi i sl. Potrebno je također navesti: podatke o stanju okoline gdje se obavlja mjerenje, sobna temperatura, tlak i vlažnost; brzinu primarnih i sekundarnih valova; gustoću te izračunate dinamičke konstante elastičnosti za svaki uzorak zajedno s prosječnom vrijednošću za set uzoraka istog materijala. U slučajevima kada uzorci ne odgovaraju nekim od propisanih zahtjeva to je potrebno posebno naznačiti.

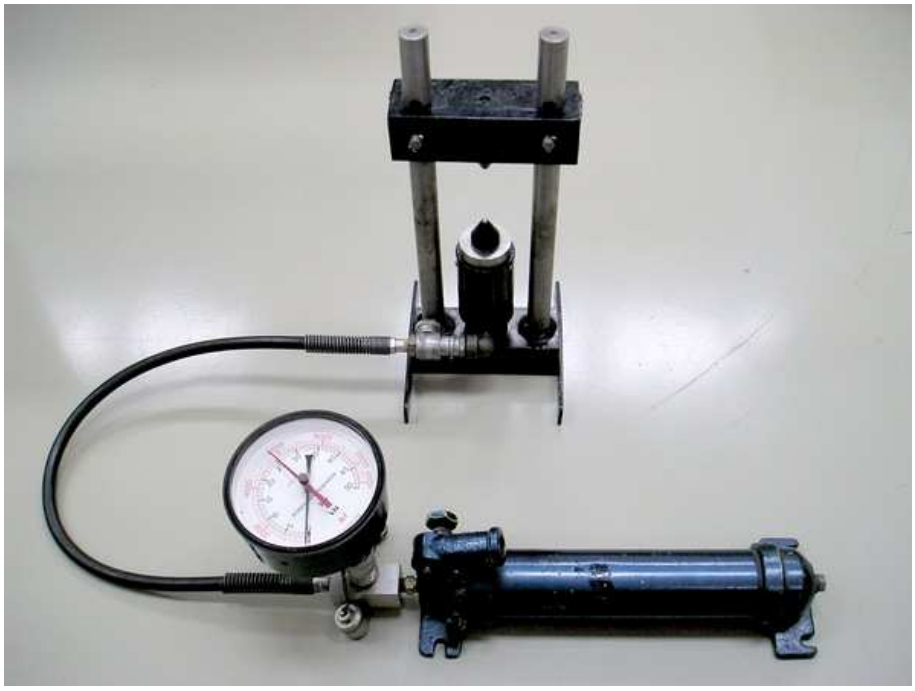
9. ODREĐIVANJE INDEKSA ČVRSTOĆE OPTEREĆENJEM U TOČKI

9.1. Svrha

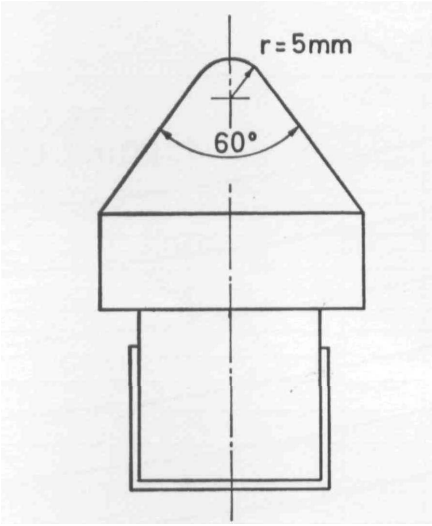
Određivanje indeksnih veličina u mehanici stijena koristi se najčešće zbog nemogućnosti provedbe standardnih postupaka ispitivanja zbog samih karakteristika uzoraka ili zbog mogućnosti jednostavne primjene ispitivanja direktno na terenu. Određivanje indeksa čvrstoće postupkom opterećenja u točki, jedan je od takvih postupaka kod kojega se ispitivanja mogu provoditi na pravilnim ili nepravilnim uzorcima stijene što predstavlja jednu od osnovnih prednosti metode. Ispitivanje se provodi prema preporučenoj metodi Međunarodnog društva za mehaniku stijena (ISRM, 1985). Osnovna svrha ispitivanja je određivanje indeksa čvrstoće za standardnu veličinu uzorka $I_{S(50)}$, koji se kasnije može koristiti u procjeni vrijednosti jednoosne tlačne čvrstoće, klasifikacijama ili drugim procjenama.

9.2. Potrebni uređaji

Uređaj za provedbu ispitivanja sastoji se od: dijela za nanošenje opterećenja, uređaja za mjerenje sile potrebne za slom uzoraka i dijela za mjerenje udaljenosti između dva kontaktna šiljka, slika 9.1.
a) Dio za nanošenje opterećenja sastoji se od: okvira; konusnih šiljaka od vrlo tvrdog metala te hidraulične pumpe i potisnog cilindra. Konusni šiljci služe za prijenos opterećenja na uzorak. Šiljak mora biti zašiljen pod kutom od 60º i radijusom od 5 mm, slika 9.2. Centriranost šiljaka mora biti osigurana tako da jedan bude iznad drugoga.
b) Mjerni uređaj sile mora imati točnost od 5 % od najveće mjerene sile. Mora imati mogućnost registriranja najveće sile kod koje se dogodio slom uz to da mora biti otporan na vibracije i hidraulički šok.
c) Sustav za mjerenje udaljenosti između dva kontaktna šiljka mora imati mogućnost mjerenja udaljenosti s točnošću od ± 2 % mjerene vrijednosti. Mora biti također robusne izvedbe otporan na vibracije i hidraulički šok.



Slika 9.1. Uređaj za postupak ispitivanja opterećenjem u točki



Slika 9.2. Prikaz dimenzija šiljka

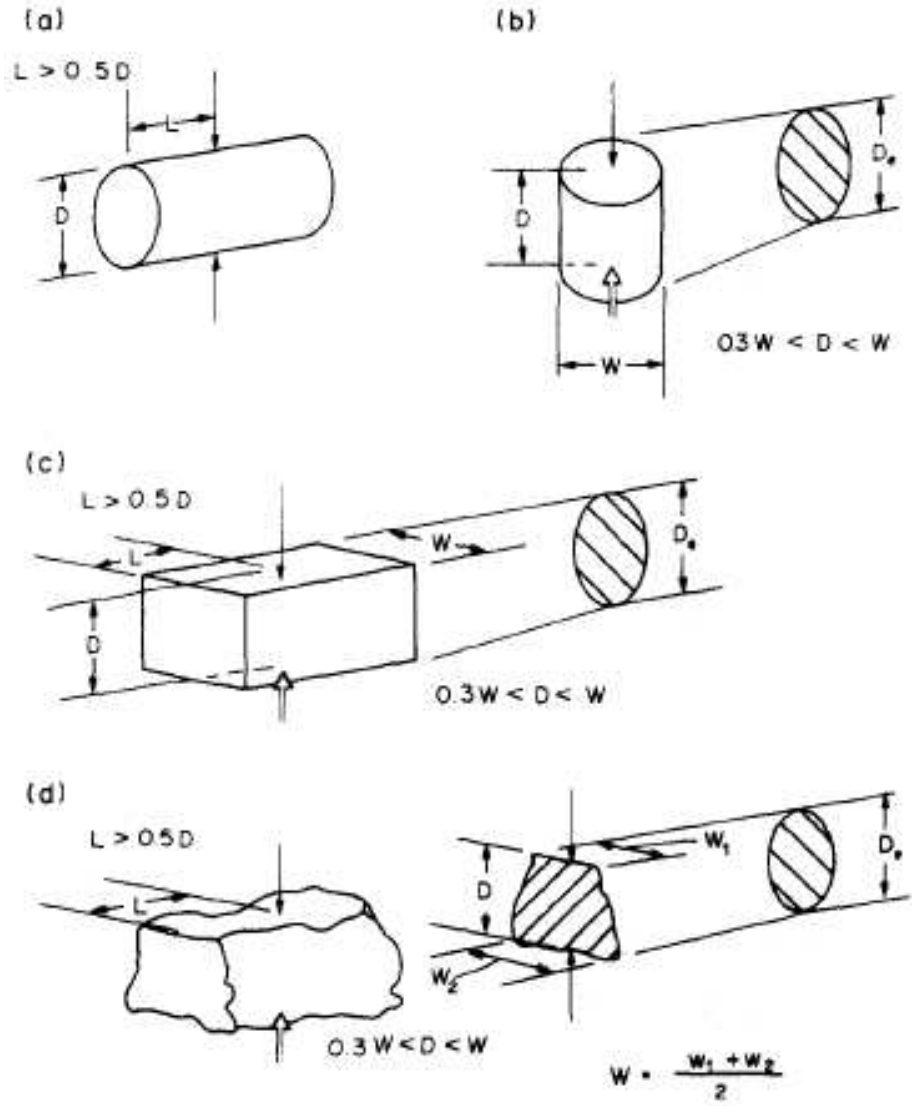
9.3. Postupak određivanja

Ispitivanje se provodi na uzorcima pravilnih ili nepravilnih oblika. Za točnije određivanje bolje je upotrijebiti valjkaste uzorke. Za bolju usporedbu vrijednosti uzorke je potrebno prije ispitivanja držati 5-6 dana na temperaturi od 20 ºC (± 2 ºC) i vlažnosti 50 % (±5 %). Standardno ispitivanje provodi se na valjkastim uzorcima s promjerom *D* od 50 mm. Ispitivanje se može provesti kao: poprečno ispitivanje, osno ispitivanje i ispitivanje uzorka nepravilnog oblika.

a) **Poprečno ispitivanje** provodi se na uzorcima koji imaju odnos duljina/promjer veći od 1. Potrebno je napraviti deset i više ispitivanja ovisno o kvaliteti jezgre i ujednačenosti uzorka. Uzorak se stavlja u uređaj nakon čega se primiču šiljci do kontakta na uzorak. Mora se osigurati da udaljenost od kraja uzorka do kontaktne točke L bude najmanje 0,5 *D*, slika 9.3 a). Razmak točaka opterećenja potrebno je odrediti s točnošću ± 2 %. Opterećenje se nanosi kontinuirano tako da se slom dogodi između 10 i 60 s pri čemu je potrebno zabilježiti najveću silu.

b) **Osno ispitivanje** provodi se na uzorcima koji imaju odnos duljina/promjer od 0,3 do 1, slika 9.3 b). Potrebno je napraviti deset i više ispitivanja ovisno o kvaliteti jezgre i ujednačenosti uzorka. Uzorak se stavlja u uređaj nakon čega se primiču šiljci do kontakta na uzorak. Razmak točaka opterećenja potrebno je odrediti s točnošću ± 2 %. Opterećenje se nanosi kontinuirano tako da se slom dogodi između 10 i 60 s pri čemu je potrebno zabilježiti najveću silu.

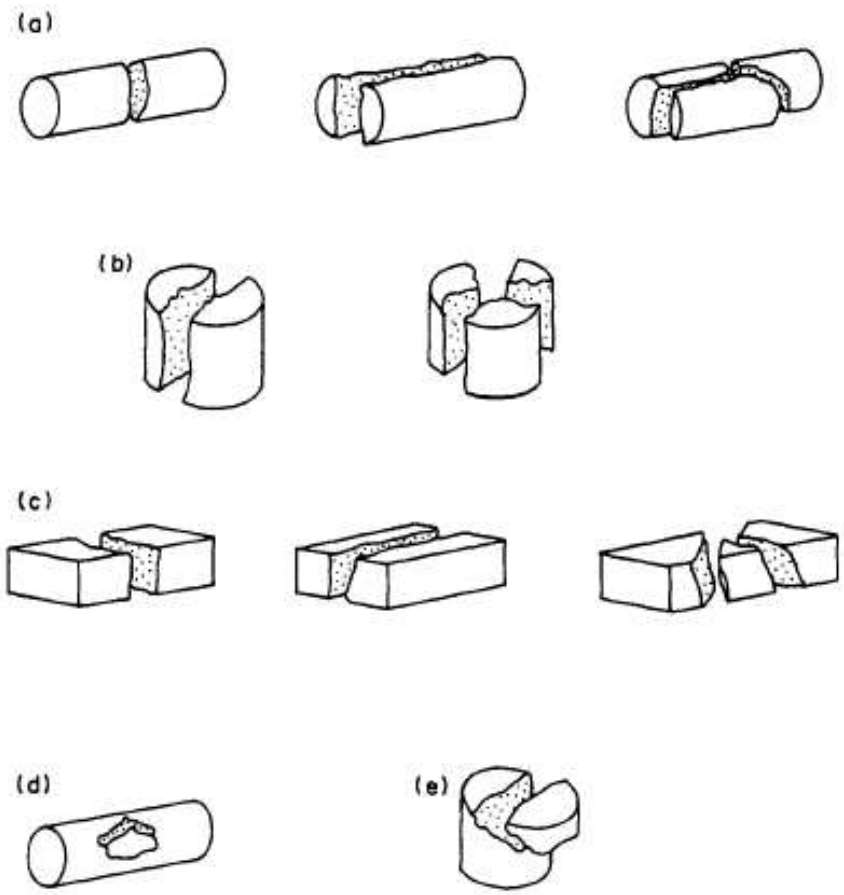
c) **Ispitivanje uzorka nepravilnog oblika** provodi se na uzorcima koji imaju približnu širinu 50 ± 35 mm te odnos debljine i širine *D*/*W* približno između 0,3 i 1, slika 9.3 d). Potrebno je napraviti najmanje deset i više ispitivanja ovisno o kvaliteti jezgre i ujednačenosti uzorka. Uzorak se stavlja u uređaj nakon čega se primiču šiljci do kontakta na uzorak. Razmak točaka opterećenja potrebno je odrediti s točnošću ± 2 %. Ako stranice nisu paralelne širina *W* se određuje na temelju prosjeka od izmjerenih širina stranica $(W_1+W_2)/2$. Opterećenje se nanosi kontinuirano tako da se slom dogodi između 10 i 60 s pri čemu je potrebno zabilježiti najveću silu.



Slika 9.3. Dimenzije uzoraka za: a) poprečno ispitivanje; b) osno ispitivanje; c) ispitivanje na bloku; d) ispitivanje uzoraka nepravilnih oblika

Kod određivanja indeksa čvrstoće anizotropnih stijena kao i samog indeksa anizotropije materijala, ispitivanje je potrebno provesti u najjačem i najslabijem smjeru, što zapravo znači okomito i paralelno plohama oslabljenja. Kod valjkastih uzoraka najbolji se rezultati pri tome dobivaju ako je os uzoraka okomita na plohe oslabljenja.

Nakon sloma uzorka ocjenjuje se valjanost ispitivanja koja se provodi na temelju izgleda lomnih ploha. Ako se uzorak slomio na način kako je to prikazano na slici 9.4 a) za poprečno ispitivanje valjkastih uzoraka, 9.4 b) za osno ispitivanje te 9.4 c) za ispitivanje na blokovima ili uzorcima nepravilnih oblika, ispitivanje se smatra valjanim. Ako se uzorak slomio na način kako je to prikazano na slici 9.4 d) i 9.4 e) ili sličan njima ispitivanje se smatra nevaljanim.



Slika 9.4. Skice lomova za valjanost ispitivanja: a) valjano poprečno ispitivanje; b) valjano osno ispitivanje; c) valjano ispitivanje na blokovima i uzorcima nepravilnog oblika; d) nevaljano poprečno ispitivanje; e) nevaljano osno ispitivanje

9.4. Obrada podataka

Indeks čvrstoće opterećenjem u točki $I_{S(50)}$ za uzorke različitih oblika i dimenzija računa se preko izraza:

$$I_{S(50)} = F\frac{P}{D_e^{\,2}}, \tag{9.1}$$

gdje je:

F – korekcijski faktor,
P – sila loma (N),
D_e – efektivni promjer uzorka (m).

Korekcijski faktor uveden je iz razloga ako se ispitivanja provode na uzorcima čiji efektivni promjeri ne iznose 50 mm. Korekcijski faktor računa se izrazom:

$$F = \left(\frac{D_e}{50}\right)^{0,45} . \tag{9.2}$$

Efektivni promjer za uzorke nepravilnog oblika računa se relacijom:

$$D_e = \sqrt{\frac{4WD}{\pi}} , \tag{9.3}$$

gdje je:

W - prosječna širina uzorka (m),

D - razmak točaka opterećenja, tj. debljina uzorka na mjestu ispitivanja (m).

Na temelju mnogobrojnih ispitivanja ustanovljeni su različiti korelacijski odnosi za različite materijale. Općenito, za širi raspon vrsta stijena, jednoosna tlačna čvrstoća može se izraziti relacijom (Brook, 1993):

$$\sigma_c = 22 \cdot I_{S(50)} \text{ (MPa).} \tag{9.4}$$

9.5. Zapis rezultata

Svi potrebni podaci o uzorku (karakteristike uzorka, dimenzije, tijek ispitivanja, vrijednosti mjerenja) kao i rezultati nakon obrade upisuju se u obrazac Zapisa određivanja indeksa čvrstoće opterećenjem u točki, prilog br. 12.

U izvještaju o ispitivanju potrebno je dati: litološki opis uzorka; orijentaciju osi obzirom na anizotropiju uzoraka; izvor uzorka koji uključuje geografsku lokaciju, dubinu i orijentaciju; datum i način uzrokovanja te skladišnu povijest i okolinu; broj ispitivanih uzoraka; promjer i debljinu uzoraka; vrijednost maksimalne sile; datum ispitivanja i vrstu uređaja za ispitivanje. Potrebno je naznačiti da li se radi o poprečnom, osnom ili ispitivanju na nepravilnim uzorcima s točnim prikazom smjera djelovanja sile u odnosu na anizotropiju, odnosno plohe oslabljenja. U slučajevima kada uzorci ne odgovaraju nekim od propisanih zahtjeva potrebno je to posebno zabilježiti.

10. DETERMINACIJA JEZGRE ISTRAŽNIH BUŠOTINA

10.1. Svrha

Može se sasvim slobodno reći, da od svih metoda istraživanja na terenu, istražno bušenje s kontinuiranim jezgrovanjem predstavlja jednu od najznačajnijih metoda, jer se upravo na izvađenim jezgrama dobivaju najvažniji podaci o rasporedu naslaga te o njihovim osnovnim značajkama. Osim rasporeda naslaga po dubini i njihovog litološkog opisa na izvađenoj jezgri determinacijom se želi dobiti: modificirani postotak jezgre ili *RQD* (Rock Quality Designation); linijski broj pukotina ili *FF* (Fracturing Factor); osnovne značajke diskontinuiteta kao što je njihov nagib, međusobni razmak susjednih ploha iste familije te hrapavost i čvrstoća stijenki diskontinuiteta; određivanje čvrstoće intaktnog materijala pomoću Schmidtovog čekića ili indeksa čvrstoće postupkom opterećenja u točki te uzimanje reprezentativnih uzoraka za provedbu svih mogućih laboratorijskih ispitivanja.

10.2. Potrebna oprema

Naravno, za provedbu istražnog bušenja na jezgru kao prvo potrebna je prikladna bušača garnitura i odgovarajući pribor za željenu izvedbu istražne bušotine. Bušenje s kontinuiranim jezgrovanjem uglavnom se izvodi rotacijskim bušenjem pomoću dijamantnih kruna i jezgrenih cijevi različitih izvedbi pomoću kojih se nabušena jezgra izvlači van iz bušotine. Osim jednostrukih danas postoje i višestruke jezgrene cijevi kod kojih isplaka direktno ne struji oko nabušene jezgre radi njezina očuvanja. Bušenje se može izvesti i s orijentiranom jezgrom što je naročito bitno pri utvrđivanju orijentacije pukotina. Nakon vađenja, jezgra se pažljivo slaže u za to pripremljene i po dubini označene sanduke, slika 10.1.

Slika 10.1. Odložena jezgra istražnog bušenja

Naročitu pozornost potrebno je posvetiti upravo slaganju jezgre po odgovarajućoj dubini iz koje je ona izvađena. Jezgra se obično odlaže u sanduke idući odozgo prema dolje i s lijeva na desno kako je to prikazano na slici 10.1. Pri determinaciji jezgre potreban je jednostavan pribor kao što je metar, kompas, povećalo, fotoaparat, geološki čekić, Schmidtov čekić, uređaj za postupak ispitivanja opterećenjem u točki i sl.

10.3. Postupak determinacije

Prvo se na temelju pregleda cjelokupne jezgre određuju intervali značajka i kvalitete jezgre. Granice intervala moraju biti tako postavljene da stijenska masa unutar istog intervala pripada istom litološkom članu, istoj ili sličnoj trošnosti materijala, istom intenzitetu razlomljenosti i strukturnim značajkama te istoj kvaliteti jezgre obzirom na izvedbu bušenja. Zatim se daje jednostavan litološki opis materijala. Nakon toga se pažljivo mjeri svaki komad jezgre po dubini, pri čemu se za cijele komade jezgre daje njihova prosječna duljina, a za zdrobljenu jezgru duljina intervala. Isto tako potrebno je dati duljinu intervala bez jezgre. Dužina pojedinih komada mjeri se po njegovoj osi a ne po obodu. Uz ovo potrebno je na intervalu određivanja dati ukupan broj pukotina, vidljivih diskontinuiteta na jezgri. Pri tome potrebno je razlikovati svježe slomljena mjesta na jezgri od ranije postojećih pukotina ili diskontinuiteta. Oštri bridovi i svježi lom stijene ukazuju na lom jezgre prilikom bušenja. Glatke i istrošene, zaglinjene površine ukazuju na plohe diskontinuiteta. Nakon ovoga određuju se nagibi diskontinuiteta te njihove ostale značajke: razmaci između ploha diskontinuiteta istog nagiba; hrapavost i čvrstoća stijenki diskontinuiteta te ako postoji mogućnost zijev i ispuna diskontinuiteta. Na kraju se označuju uzorci namijenjeni za laboratorijska ispitivanja nakon čega se fotografira jezgra. Odabrani uzorci moraju biti reprezentativni za materijal, a opet takvi da ispunjavaju zahtjeve metoda ispitivanja. Ukoliko se radi o slabim stijenama, podložnim raspadanju pod utjecajem atmosferilija ili je važno stanje njihove prirodne vlažnosti, uzorci se trebaju posebno zaštititi što se najčešće radi parafiniranjem.

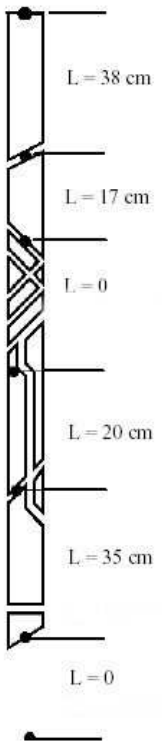
10.4. Obrada podataka

Na temelju podataka mjerenja prvo se određuje ukupni postotak jezgre *CR* (Core Recovery), što predstavlja omjer ukupne duljine izvađene jezgre i duljine intervala određivanja izraženo u postotnom iznosu. Modificirani postotak ili indeks kvalitete jezgre *RQD* dobiva se tako da se u zbroj uzimaju samo komadi jezgre dulji od 10 cm koji se zatim podijeli s duljinom intervala prema izrazu:

$$RQD = \frac{\sum X_{10}}{\sum L} \cdot 100 \ \ \%, \tag{10.1}$$

gdje X_{10} predstavlja duljina komada koja je veća od 10 cm, a L duljina svih komada ili segmenata bez jezgre u intervalu određivanja. Obzirom na različite mogućnosti izgleda jezgre, na slici 10.2 prikazan je kriterij odabira valjanih uzoraka. Linijski broj pukotina *FF* dobiva se dijeljenjem ukupnog broja pukotina s duljinom intervala određivanja. Hrapavost stijenki diskontinuiteta najčešće se određuje usporedbom njihovih ploha sa standardnim profilima hrapavosti, za koeficijent hrapavosti JRC_{10} (Joint Roughness Coefficient) u deset centimetarskom mjerilu, koji je predložen od strane Bartona i Choubeya (Barton & Choubey, 1977), prilog br. 14. Čvrstoća stijenki diskontinuiteta, ako je moguće, određuje se pomoću Schmidtovog čekića ili pomoću priručnih sredstava za terensko identifikacijsko određivanje tlačne čvrstoće materijala. Schmidtovim čekićem moguće je odrediti tlačnu čvrstoće stijenki diskontinuiteta ali i jednoosnu tlačnu čvrstoću intaktnog materijala. Na temelju dobivenog odskoka Schmidtovim čekićem procjena tlačne čvrstoće provodi se najčešće pomoću dijagrama koji je predložio Miller (Miller, 1965), prilog br. 15, odnosno na temelju preporuka o ispitivanju (Aydin, 2008).

U slučaju terenske identifikacije pomoću priručnih sredstava (nokat, nož, geološki čekić) procjena tlačne čvrstoće provodi se na temelju opisa pokusa koji se nalazi u tablici priloga br. 16.



Slika 10.2. Kriterij odabira valjanih komada za određivanje *RQD*-a

10.5. Prikaz rezultata

Svi opći podaci o istražnoj bušotini kao i podaci mjerenja na jezgri upisuju se u obrazac Zapisa determinacije jezgre istražne bušotine, prilog br. 13. Na temelju zapisa i obrade podataka izrađuje se tzv. profil istražne bušotine.

U profilu istražne bušotine, uz opće podatke o izvođaču bušenja, tipu bušaće garniture, oznaci bušotine, dubini i koordinatama ušća bušotine, datumu bušenja i osobama koje su provele determinaciju, potrebno je za svaki interval određivanja dati: granice intervala, promjer jezgre, ukupni postotak izvađene jezgre *CR*, *RQD*, *FF* te litološki opis uz sve vrijednosti određivanih značajki diskontinuiteta. Osim toga potrebno je naznačiti dubine i intervale uzimanja uzoraka za laboratorijska ispitivanja te za njih prikazati dobivene vrijednosti rezultata ispitivanja. Ukoliko pri bušenju dođe do pojave podzemne vode to je potrebno točno označiti na profilu istražne bušotine kao i sva eventualna druga zapažanja.

11. OBRADA I PRIKAZIVANJE PODATAKA STRUKTURNIH ELEMENATA

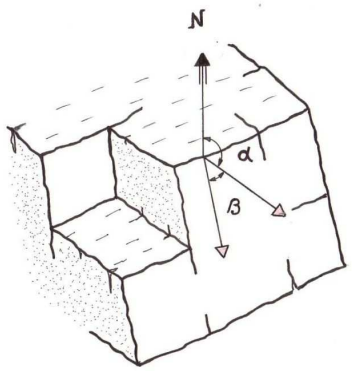
11.1. Uvod

Pod pojmom strukture stijena općenito se podrazumijevaju obilježja koja su vidljiva uglavnom na izdanku, a rjeđe na uzorku i preparatu. Postoje tri grupe osnovnih struktura: geološki kontakti, primarne strukture i sekundarne strukture. Geološki kontakti su granice, plohe dodira, između stijena različitog tipa. Primarne strukture predstavljaju strukture koje nastaju u stijeni tijekom njezina nastanka. Tipični primjeri primarnih struktura su strukture koje nastaju kod sedimentnih stijena prilikom njezina taloženja ili deformacijskim procesima prije litifikacije, a kod magmatskih stijena strukture koje nastaju prilikom tečenja magme te kasnije u fazi zgušnjavanja magme. Sekundarne strukture čine strukture koje nastaju kod sedimentnih i magmatskih stijena u procesima nakon njihove litifikacije, a kod metamorfnih stijena za vrijeme i poslije njihova nastanka. Dakle, sekundarne strukture vezane su uz postgenetske procese koji se uglavnom odnose na tektonske procese ili metamorfoze. Posljedica tektonskih procesa je nastajanje niza različitih prslina, pukotina, rasjeda, bora i sl. dok se posljedica metamorfoze najčešće očituje kao posljedica prekristalizacije koja uzrokuje stvaranje strukture folijacije, a najčešće je to škriljavost. Prema tome, plohe (ravnine) prslina, pukotina, rasjeda, folijacija i sl. predstavljaju osnovne elemente struktura.

Prema usvojenim definicijama Međunarodnog društva za mehaniku stijena pojam diskontinuitet uzet je kao najbolji općeniti izraz kojim se obuhvaćaju svi prekidi, lomovi u stijenskoj masi na kojima je došlo do potpunog prekida međumolekularnih sila (ISRM, 1978c). Diskontinuitetima se dakle smatraju sve prsline, pukotine, slojevitost, folijacije, rasjedi, geološki kontakti i sl. Diskontinuiteti koji su međusobno paralelni, istog vremena nastanka, kinematike i porijekla čine familiju diskontinuiteta. Sve familije koje se međusobno presijecaju na promatranom području čine pukotinski sustav, pukotinski sklop ili tektonski sklop. Osnovna obrada i prikazivanje podataka strukturnih elemenata provodi se prema preporukama Međunarodnog društva za mehaniku stijena za kvantitativni opis diskontinuiteta u stijenskim masama (ISRM, 1978c).

11.2. Orijentacija diskontinuiteta

Orijentacija diskontinuiteta predstavlja jedan od osnovnih podataka o strukturnim elementima. Ona u prostoru nije slučajna, nego ovisi o orijentaciji elipsoida deformacije određene tektonske faze, odnosno tektonskih osi. Orijentacija svake ravnine ili diskontinuiteta u prostoru određena je azimutom horizontalne projekcije vektora nagiba mjereći od stvarnog sjevera i kutom pada tj. nagiba diskontinuiteta. Azimut horizontalne projekcije vektora pada označuje se sa α, a kut pada sa β, kako je prikazano na slici 11.1, a zajedno se piše u obliku α/β.



Slika 11.1. Orijentacija diskontinuiteta

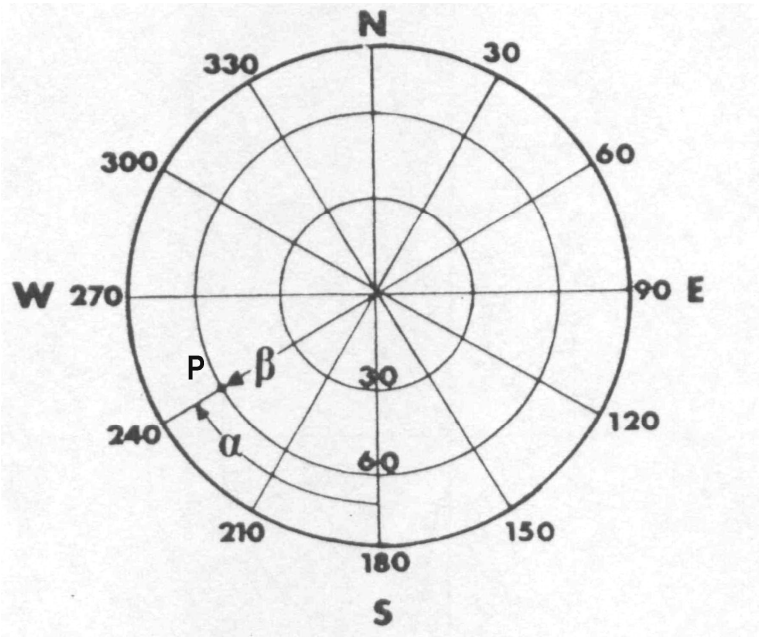
Za prikazivanje podataka strukturnih elemenata u praksi se najviše koristi sferna projekcija. Najčešće se upotrebljava projekcija jednakih površina (Lambertova projekcija, Schmidtova mreža) na donju polovicu kugle. To znači da se na mjestu mjerenja postavi kugla kroz čije središte prolazi mjereni diskontinuitet te se promatra presjek diskontinuiteta i donje polovice kugle. Tom presječnicom najbolje se daje prostorni prikaza diskontinuiteta. Radi lakše obrade podataka u sfernoj se projekciji još definira i položaj probodišta normale diskontinuiteta i donje polovice kugle, označava se sa P što predstavlja pol ravnine, čime je prostorni položaj diskontinuiteta također potpuno određen.

11.3. Obrada i prikazivanje podataka

Obrada i prikazivanje podataka strukturnih elemenata sastoji se od nekoliko faza. Prvo se za niz snimljenih podataka o orijentaciji (prostornom položaju) diskontinuiteta α/β izrađuje dijagrama polova. Nakon toga se podaci prebrojavaju, odnosno određuju područja istih gustoća, na temelju čega se izrađuje konturni dijagram. Iz konturnog dijagrama određuju se položaji dominantnih familija diskontinuiteta te na kraju iscrtavaju njihove trase.

11.3.1. Izrada dijagrama polova

Dijagram polova izrađuje se označavanjem polova ravnina na paus papiru uz pomoć polarne mreže koja se nalazi na prilogu br. 17. Kao prvo, potrebno je list pausa, providnog papira, postaviti na polarnu mrežu na kojem se izvuče središte mreže, vanjski krug mreže te strelicom označi smjer sjevera N. Nakon toga se ucrtavaju točke, polovi ravnina snimljenih diskontinuiteta. Kako pol ravnine diskontinuiteta predstavlja probodište normale diskontinuiteta s donjom polovicom kugle, što znači da je pod kutom od 90° u odnosu na vektor nagiba s koj im u horizontalnoj projekciji zatvara kut od 180°, odnosno nalazi se na suprotnoj strani projekcije, točke pola se na pausu nanose sa azimutom α+180°, idući od sjevera te nagibom β idući od središta polarne mreže prema periferiji, slika 11.2.



Slika 11.2. Nanošenje pola ravnine diskontinuiteta

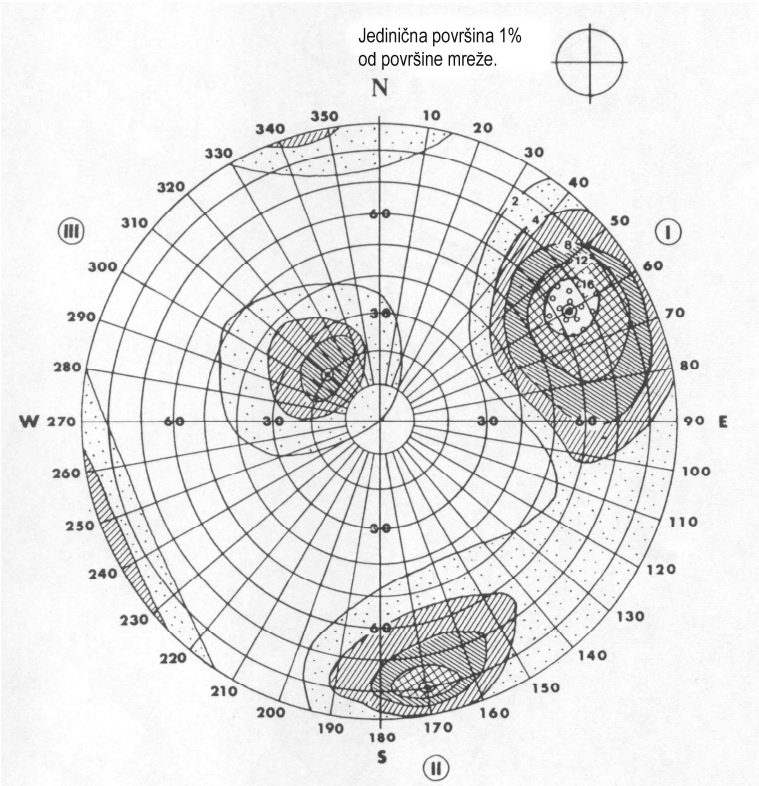
Radi pojednostavljenja ovog postupka, nakon što se na pausu označi središte mreže, smjer sjevera i izvuče vanjski krug, paus papir se zaokreće za 180° oko središta, a zatim se normalno nanose polovi s azimutom α idući od sjevera i β idući od središta polarne mreže prema periferiji. Ukoliko padne više podataka u istu točku, pokraj točke potrebno je upisati ukupan broj podataka za tu točku.

11.3.2. Izrada konturnog dijagrama

Konturni dijagram dobiva se izvlačenjem izolinija područja istih gustoća podataka, koje se dobivaju prebrojavanjem podataka dijagrama polova pomoću brojačke mreže koja se nalazi na prilogu br. 18. Ovaj se postupak može podijeliti u tri faze: prebrojavanje podataka, određivanje grupa odnosno klasa istih gustoća i izvlačenja izolinija.

a) Prebrojavanje podataka. Kao prvo, uzima se novi paus papir na kojem se isto izvuče krug te označi središte kruga i smjer sjevera. Zatim se stavi preko dijagrama polova te zajedno preko brojačke mreže pazeći da se sve dobro poklapa. Brojanje se obavlja pomoću kruga veličine 1% od površine brojačke mreže koji se iscrta na jednom manjem pausu, slika 11.3. Taj se krug (središte kruga) stavlja na presjecišta brojačke mreže, nakon čega se provodi brojanje točaka (podataka) koje upadaju u njega, a nakon toga se olovkom na presjecištu upisuje broj podataka koji upadaju. Na periferiji brojačke mreže, na dijametralno suprotnim stranama, upisuje se broj koji predstavlja zbroj podataka utvrđen na dijametralno suprotnim presjecištima brojačke mreže.

b) Određivanje grupa odnosno klasa istih gustoća. Najprije se utvrdi najveći i najmanji broj pobrojanih podataka u brojačkim presjecištima. Zatim se na osnovu raspona broja podataka određuju obično četiri grupe i to tako da svaka grupa ima podjednaki raspon broja podataka. Na osnovi ukupnog broja podataka određuju se njihovi pripadni postoci. Tako raspoređeni podaci u grupe s pripadnim postocima predstavljaju klase podataka od I do IV. Prema tome IV klasa ima najveći postotak podataka, a I klasa najmanji. Na primjer; za ukupan broj od 50 podataka utvrđen je najmanji broj od 1 te najveći broj od 16 pobrojanih podataka. Podaci se razvrstavaju u četiri klase od kojih I klasa ima raspon 1-4 podatka ili 2-8 %, II klasa 5-8 podataka ili 10-16 %, III klasa 9-12 podataka ili 18-24 % te IV klasa ima raspon 13-16 podataka ili 26-32 %, slika 11.4.



Slika 11.3. Brojačka mreža i konturni dijagram

c) Izvlačenje izolinija. U ovom postupku, prvo se umjesto pripadnih brojeva podataka upisuju prethodno utvrđeni brojevi klasa, nakon čega se pristupa izvlačenju izolinija. Izolinije se izvlače prvo

za IV klasu pa redom prema prvoj. U izvlačenju mora postojati kontinuitet, a to znači da ne smije doći do presijecanja izolinija. Dodir određenih izolinija s vanjskim perifernim krugom dijagrama mora biti produžen na dijametralno suprotnu stranu jer su to u biti isti dijelovi površine brojačkog polukruga. Same izolinije izvlače se na osnovi jediničnog kruga i brojačke mreže za najveću klasu, dok se druge izvlače interpolacijom. Kontinuitet od veće klase prema manjoj mora postojati redom iako možda i nije bilo određene klase između njih. Osnovna ili početna linija I klase obično se izvlači deblje od ostalih. Pojas IV klase, tj. najveće gustoće podataka, potpuno se oboji crno, sljedeći III pojas ima šarfuru vertikalnih linija, zatim II pojas se ispuni točkicama dok se I pojas ne šarfira. Uz ovaj dijagram, koji ima naslov "Konturni dijagram", u donjem se dijelu prilaže legenda, tj. tablica s označenim klasama, pripadnim brojem podataka i postotnim vrijednostima te oznakom šarfure, kako je to prikazano primjerom na slici 11.4.

Klasa	Broj točaka	%	Oznaka
I	1-4	2-8	
II	5-8	10-16	
III	9-12	18-24	
IV	13-16	26-32	

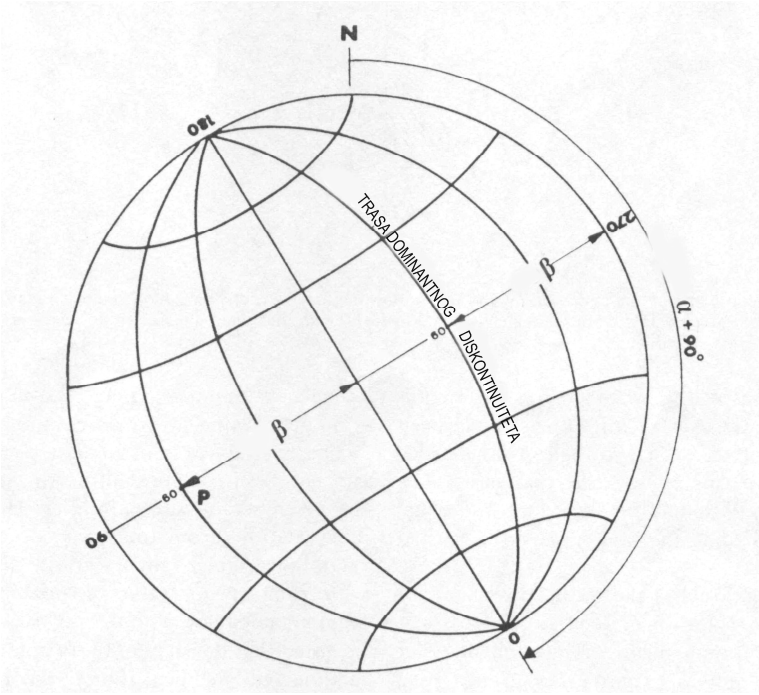
Slika 11.4. Oznake i vrijednosti klasa

11.3.3. Utvrđivanje orijentacija dominantnih familija

Orijentacije dominantnih familija diskontinuiteta predstavljaju zapravo statistički najvjerojatnije položaje familija diskontinuiteta koje se određuju upravo na temelju konturnog dijagrama. Pri određivanju mogu se izdvajati maksimumi položaja, koje čine klase najvećih gustoća i submaksimumi položaja koje čine klase manjih gustoća podataka. Postupak se sastoji u tome da se uzme novi paus papir, na kojem se također izvuče središte i vanjski krug te smjer sjevera, koji se zatim položi na konturni dijagram pazeći da se dobro poklapaju sve oznake. Na tom se pausu ucrtavaju novi polovi na način da ih se smjesti u središta klasa najvećih gustoća ili središta klasa manjih gustoća ako izdvajamo i submaksimume položaja. Za klase najvećih gustoća (IV klasa) potrebno je izvući sve polove dok za ostale samo ako klasa najvećih ima manje od tri. Prema tome, potrebno je imati najmanje tri orijentacije dominantnih familija ili statistički najvjerojatnijih položaja familija diskontinuiteta. Nakon toga pristupa se iscrtavanju trasa dominantnih familija diskontinuiteta.

11.3.4. Iscrtavanje trasa diskontinuiteta

Trase diskontinuiteta (presječnice ravnina diskontinuiteta s donjom polovicom kugle) iscrtavaju se pomoću ekvatorijalne mreže koja se nalazi u prilogu br. 19. Iscrtavanje trasa diskontinuiteta izvodi se na paus papiru s ucrtanim polovima dominantnih familija diskontinuiteta koji se postavi preko ekvatorijalne mreže. Pri tome se paus papir tako zaokrene da ucrtani pol ravnine padne točno na ekvator (nulta paralela) pri čemu se kut nagiba diskontinuiteta za taj pol mjeri od središta prema periferiji, slika 11.5. Trasa diskontinuiteta se iscrtava po meridijanu koji se nalazi na drugoj polovici s utvrđenim kutom koji se tada mjeri od periferije prema središtu. Nakon iscrtavanja trase očitava se azimut diskontinuiteta. Azimut predstavlja kutnu udaljenost na periferiji nulte paralele na strani trase diskontinuiteta od smjera sjevera.



Slika 11.4. Iscrtavanje trasa dominantnih familija diskontinuiteta

Nakon iscrtavanja svih trasa određuju se položaji presječnica ravnina te međusobni kutovi koje zatvaraju ravnine. Presječnicu ravnina predstavlja točka presjeka trasa diskontinuiteta koju je potrebno posebno označiti. Položaj presječnice najlakše se određuje pomoću polarne mreže tako da se međusobno poklope oznake središta i sjevera nakon čega se određuje azimut prema oznakama polarne mreže i kut nagiba brojeći od periferije prema središtu. Ovaj položaj moguće je odrediti isto i pomoću ekvatorijalne mreže.

11.4. Određivanje kuta između ravnina diskontinuiteta

Osim prikazanog, sferna projekcija je naročito pogodna za određivanje kuta između dviju ravnina. Prema tome izvlačenjem trasa dominantnih familija diskontinuiteta mogu se odrediti svi međusobni kutovi koje zatvaraju njihove ravnine. Obzirom da dvije ravnine u prostoru međusobno zatvaraju dva komplementarna kuta postoje i dva načina određivanja ovih kutova. Kao prvo, paus papir se sa iscrtanim trasama diskontinuiteta stavi na ekvatorijalnu mrežu na način da polovi ravnina između kojih želimo odrediti kut padnu na jednu merdijalnu ravninu. Zatim se po tom meridijanu odbroji lučno rastojanje između polova diskontinuiteta za prvi kut te lučno rastojanje između polova diskontinuiteta brojeći preko periferije za drugi kut. Kutovi između ravnina kao i položaji presječnica ispisuju se u donjem lijevom prostoru dijagrama trasa diskontinuiteta s oznakama γ_{12}, γ_{21}.

12. KLASIFIKACIJA I ČVRSTOĆA STIJENSKE MASE

12.1. Uvod

Složenost stanja u kojem se stijenska masa nalazi je takvo da ne postoji jednostavan način kojim bi se u potpunosti mogla predstaviti kvaliteta kao ni ponašanje stijenske mase u određenim uvjetima. Zbog toga su razvijani različiti sustavi klasifikacija, temeljeni na sistematizaciji stečenih iskustava i kvaliteta stijenske mase, upravo s namjerom dovođenja u odnos značajki stijenske mase s ponašanjem prilikom izrade određenih inženjerskih objekata. Osnovni zadatak svake klasifikacije prema tome je podjela stijenske mase u grupe, kategorije ili klase sličnih karakteristika, pomoću kojih se pružaju osnove za razumijevanje interakcije između kvalitete i ponašanja, izražavajući to kroz kvantitativni podatak za potrebe inženjerskih proračuna. Klasifikacije stijenskih masa uspješno su primjenjivane duži niz godina u različitim inženjerskim zadacima, a naročito u tunelogradnji. Od njih najčešće primjenjivane klasifikacije u praksi su Geomehanička klasifikacija Bieniawskog ili RMR sustav (Rock Mass Rating), (Bieniawski, 1973, 1976) te Bartonov Q sustav klasifikacije (Barton et al., 1974). Obzirom na pokazane nedostatke pojedinih klasifikacija, a s ciljem bolje numeričke procijene pojedinih veličina, predložen je kasnije RMi sustav (Rock Mass index) od strane Palmstroma (Palmstrom, 1995). Praktičnom primjenom došlo se do spoznaje da bi klasifikacije trebale biti nelinearne za lošije stijene, kod kojih čvrstoća znatno opada s trošnošću stijenske mase, kao i prikladnije zahtjevima numeričkih proračuna zbog čega je razvijen GSI sustav klasifikacije (Geological Strenght Index), (Hoek and Brown, 1997). GSI klasifikacija se danas uglavnom koristi za izračun čvrstoće stijenske mase prema Hoek-Brownovom nelinearnom kriteriju, čime je klasifikacija postala nezaobilaznom kod mnogih numeričkih proračuna u mehanici stijena.

12.2. GSI klasifikacija

U početku GSI klasifikacija je zamišljena kao jednostavna klasifikacija koja se temeljila na vizualnom pregledu geološkog stanja stijenske mase. Bodovanje prema GSI-u, prvotno je izvedeno na temelju dviju relacija, korelacijom bodova RMR_{76} i modificirane Q klasifikacije pomoću izraza:

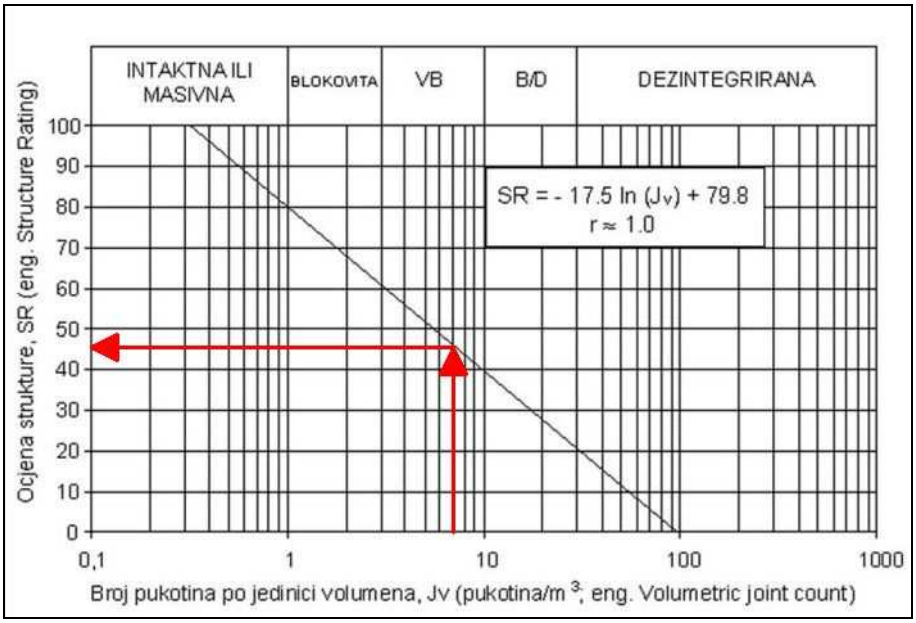
$$GSI = RMR_{76}, \text{ za } GSI \geq 18,$$
$$GSI = 9 \log_e Q' + 44, \text{ za } GSI < 18, \qquad (12.1)$$

gdje se RMR_{76}, odnosi na bodove RMR klasifikacije Bieniawskog koja je objavljena 1976. godine, a Q' na vrijednosti modificirane Q klasifikacije Bartona koja se dobije izrazom: $Q'=(RQD/Jn)\times(Jr/Ja)$.

Kasnije su na temelju dobivenih vrijednosti korelacijama konstruirani dijagrami za neposredno određivanje GSI vrijednosti (Hoek and Brown, 1997). Osnovu dijagrama za određivanje GSI vrijednosti čine dva temeljna kriterija: struktura stijenske mase te površinski uvjeti na plohama diskontinuiteta. Dijagrami su naknadno nadograđivani i razvijani za složenija stanja, a naročito lošije i heterogene stijenske mase (Marinos and Hoek, 2001). Uvedene su zatim numeričke veličine pomoću kojih se preciznije određuje površinsko stanje kao i strukturna obilježja (Sonmez and Ulusay, 1999; Sonmez et al., 2003). Predloženi dijagram za određivanje vrijednosti GSI klasifikacije dan je na prilogu br. 20.

Osnovu dijagrama za određivanje GSI vrijednosti čine dva temeljna kriterija: ocjena strukture stijenske mase te ocjena stanja površinskih uvjeti na plohama diskontinuiteta. Pri tome naglasak se stavlja na to da se kod procjene ne vodi toliko računa o preciznosti, već o mogućem rasponu vrijednosti koji bi bio reprezentativniji za stanje stijenske mase.

a) Ocjena strukture stijenske mase SR provodi se pomoću dijagrama ili relacije na temelju broja pukotina po jedinici volumena (J_v) koje su prikazane na slici 12.1.



Slika 12.1. Postupak ocjene strukture stijenske mase

b) Ocjena stanja površinskih uvjeta na plohama diskontinuiteta SCR provodi se na temelju zbroja bodova prema relaciji:

$$SCR=R_r+R_w+R_f, \tag{12.2}$$

gdje je:

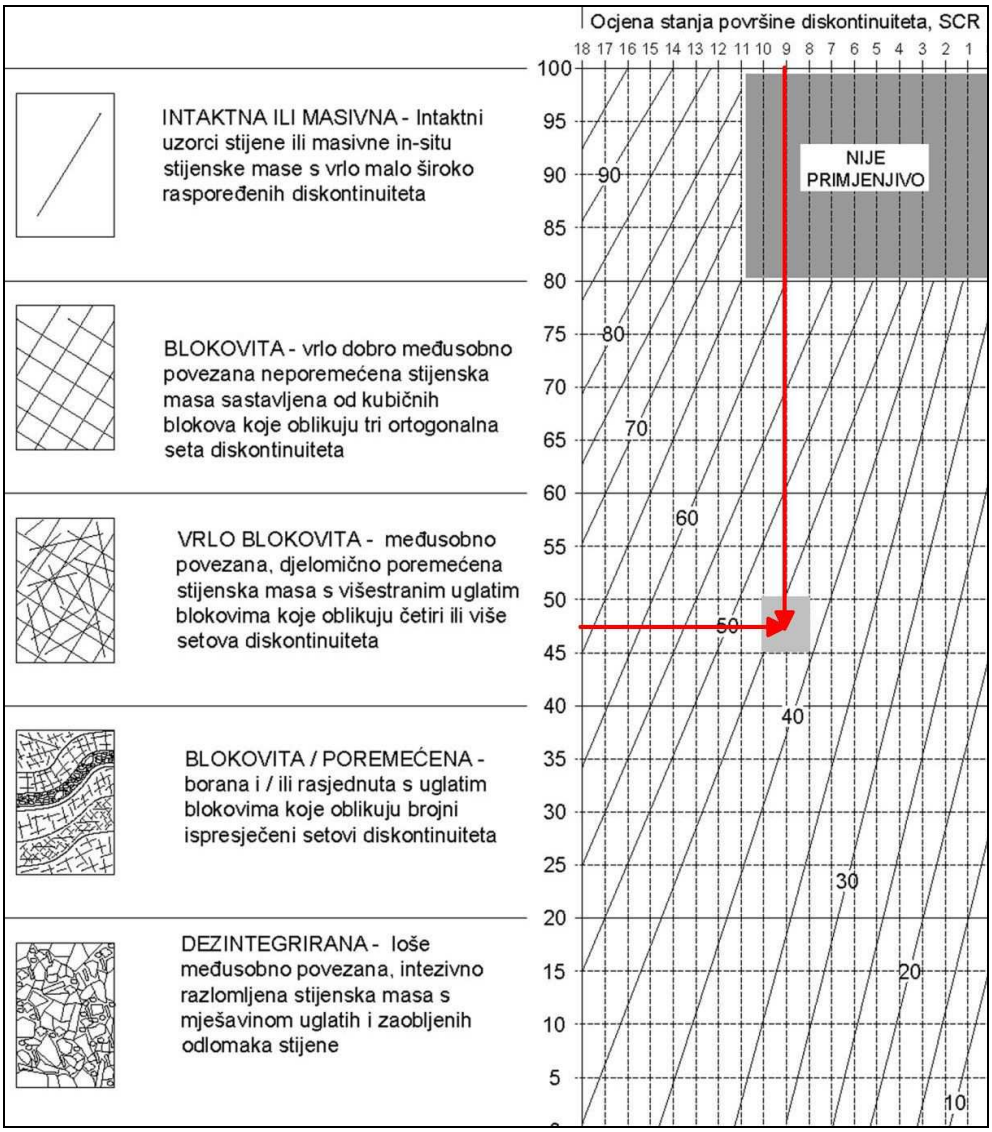
R_r – ocjena hrapavosti diskontinuiteta,
R_w – ocjena trošnosti diskontinuiteta,
R_f – ocjena ispune diskontinuiteta.

Vrijednosti veličina za ocjenu hrapavosti, trošnosti i ispune diskontinuiteta dobivaju se na temelju opisa stanja u kojem se one nalaze pomoću tablice 12.1.

TABLICA 12.1. Vrijednosti veličina za ocjenu hrapavosti, trošnosti i ispune diskontinuiteta

Ocjena hrapavosti (R_r)	Vrlo hrapavo 6	Hrapavo 5	Neznatno hrapavo 3	Glatko 1	Zaglađeno 0
Ocjena trošnosti (R_w)	Nerastrošeno 6	Neznatno trošno 5	Umjereno trošno 3	Izrazito trošno 1	Raspadnuto 0
Ocjena ispune (R_f)	Bez 6	Tvrda < 5 mm 4	Tvrda > 5 mm 2	Meka < 5 mm 2	Meka > 5 mm 0

Nakon određivanja ocjene strukture stijenske mase te ocjene stanja površinskih uvjeta na plohama diskontinuiteta određuje se vrijednost za GSI (raspon vrijednosti) postupkom prikazanim na slici 12.2.



Slika 12.2. Postupak određivanja vrijednosti za GSI

12.3. Čvrstoća stijenske mase

Prema općoj nelinearnoj jednadžbi Hoek-Brownovog kriterija (Hoek et al., 2002) čvrstoća stijenske mase dana je izrazom:

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci}\left(m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s\right)^a \text{ (MPa)}, \tag{12.3}$$

gdje su σ_1' i σ_3' efektivna glavna naprezanja prilikom loma, σ_{ci} je jednoosna tlačna čvrstoća intaktnog materijala, m_b je reducirana m_i konstanta materijala koja se dobije izrazom:

$$m_b = m_i \cdot \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right), \tag{12.4}$$

s i *a* su konstante za stijensku masu koje se dobiju putem izraza:

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right),$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6}\left(e^{\frac{-GSI}{15}} - e^{\frac{-20}{3}}\right). \tag{12.5}$$

Faktor *D* u gornjim izrazima ovisi o stupnju poremećenosti stijenske mase uslijed iskopa. On se kreće od 0 za neporemećenu do 1 za jako poremećenu stijensku masu. Za određivanje ovog faktora dane su okvirne preporuke: za vrlo dobro i kontrolirano miniranje kod izrade tunela ili izrade pomoću tunelske krtice faktor poremećenosti može biti 0; kod normalnog miniranja ili mehaničkog otkopavanja faktor se može kretati od 0,7 do 0,8; a kod lošeg, proizvodnog miniranja na površinskim kopovima, vrijednost faktora poremećenosti može iznositi 1. Uvrštavajući vrijednost za σ_3'=0 u izraz 12.3 dobiva se relacija za izračun jednoosne tlačne čvrstoće stijenske mase:

$$\sigma_c = \sigma_{ci} \cdot s^a \text{ (MPa)}, \tag{12.6}$$

a na temelju biaksialnog stanja pri vlačnom naprezanju dobiva se relacija za vlačnu čvrstoću stijenske mase:

$$\sigma_t = -\frac{s\sigma_{ci}}{m_b} \text{ (MPa)}. \tag{12.7}$$

13. ANALIZE STABILNOSTI KOSINA

13.1. Uvod

Osnovna svrha analiza stabilnosti je utvrđivanje stanja stabilnosti kosina s ciljem osiguranja potrebne sigurnosti i funkcionalnosti kako projektiranih tako i prirodnih kosina u stijenskim masama. Obzirom na specifični, diskontinuirani karakter stijenskih masa, pojave nestabilnosti mogu se prema osnovnim oblicima pokretanja mase na kosini podijeliti na: obrušavanje, prevrtanje, kliženje, puzanje te kompleksna pokretanja (Giani, 1992).

Obrušavanje je pojava odvajanja i rušenja slobodnih blokova različitih veličina na vrlo strmim stijenskim kosinama, prilikom čega može istovremeno doći do rotacije i kliženja. Svrha analiza ovakvih nestabilnosti je utvrđivanje mogućih brzina pojedinih blokova te dosezi njihovog kretanja koji se najčešće provode za slučaj strmih kosina gdje ovakve pojave mogu imati značajne posljedice. Prevrtanje je pojava nestabilnosti koju izaziva moment sile vlastite težine oko neke točke na bazi bloka. Ovakve se nestabilnosti javljaju na strmim kosinama s vrlo strmim i suprotno nagnutim diskontinuitetima. Kliženje je pojava nestabilnosti koja se događa prilikom prekoračenja posmične čvrstoće na kliznoj plohi, jednostavnog ili složenog oblika, duž koje se odvija pokretanje u obliku kliženja. Kliženja u osnovi mogu biti translacijska ili rotacijska. Translacijska se opet mogu podijeliti na kliženja duž jedne, dvije ili više ploha. Rotacijska kliženja se odnose na opće zakrivljene i konveksne oblike kliznih ploha. Osim navedenih postoje i složeni oblici kliženja, najčešće kombinirani od translacije duž ravnog i rotacije duž zakrivljenog dijela klizne plohe, koji su karakteristični upravo za stijenske kosine. Puzanje je oblik nestabilnosti uglavnom vezan uz reološka svojstva materijala; karakterističan je za nekonsolidirane materijale ili stijensku masu izrazite razlomljenosti mikro pukotinama. Kompleksna pokretanja predstavljaju moguće kombinacije dva ili više oblika pokretanja nestabilne mase.

Obzirom na svrhu i karakteristike metoda analize stabilnosti stijenskih kosina mogu se podijeliti na: klasifikacijske, grafičke, proračunske i statističke. Klasifikacijske analize temelje se ili na postojećim sustavima klasifikacija stijenskih masa ili na posebno razrađenim sustavima klasifikacije za stabilnost. Svrha ovih analiza je određivanje mjere opće stabilnosti kosina, koja se izražava preko određenog raspona bodova, slično kao što se izražava stanje stijenske mase kod klasifikacijskih sustava. Od grafičkih analiza stabilnosti najpoznatija je grafička analiza na sfernoj projekciji kojom se na temelju orijentacija diskontinuiteta i položaja kosina preliminarno utvrđuju potencijalni oblici nestabilnosti. Proračunske analize imaju za svrhu izračun mjere stabilnosti koja se najčešće izražava ili preko faktora sigurnosti (stabilnosti) ili preko općeg stanja naprezanja i deformacija materijala. One predstavljaju glavnu okosnicu u procjeni stanja stabilnosti stijenskih kosina. Statističke analize su utemeljene na statističkoj obradi karakteristika, uvjeta i stanja većeg broja obrađenih kosina, na temelju čega se radi projekcija stanja za promatranu kosinu.

13.2. Proračunske metode analize

Kako je već spomenuto, osnovna svrha proračunskih metoda analiza stabilnosti je izračun mjere stabilnosti koja se najčešće izražava faktorom sigurnosti (stabilnosti) ili općim stanjem naprezanja i deformacija materijala. Prema matematičkim postavkama, metode se mogu podijeliti na statičke i dinamičke. Statičke metode razmatraju raspored djelovanja sila za promatrani model, na temelju kojeg se utvrđuje određena mogućnost kinematike klizanja. Dinamičke metode razmatraju stvarno stanje naprezanja i deformacija, na temelju kojeg se utvrđuje kinematika, tj. pomaci i brizne promatranih točaka modela. Kod statičkih metoda proračuna daleko je pojednostavljen postupak izračuna sila koje

djeluju na model. Grupu statičkih metoda predstavljaju metode granične ravnoteže dok se pod dinamičkim metodama podrazumijevaju numeričke metode proračuna.

Koncepcija faktora sigurnosti originalno je izvedena na temelju metoda granične ravnoteže kao mjera stanja stabilnosti (Hoek and Bray, 1977). Pri tome je faktor sigurnosti definiran kao omjer sila otpora i aktivnih sila, tj. sila koje izazivaju nestabilnost. Proračun faktora sigurnosti u postupcima analiza stabilnosti stijenskih kosina uglavnom ovisi o obliku nestabilnosti, odnosno mehanici loma stijenske mase. Obzirom na diskontinuirani karakter stijenskih masa, postoji čitav niz oblika nestabilnosti koji se mogu pojaviti prema kojima su razvijene pojedine metode proračuna. Općenito gledano, metode se mogu podijeliti na metode mehanike kontinuuma, slučaj kad se stijenska masa ponaša kao kontinuirana ili kvazikontinuirana geotehnička sredina i na metode mehanike diskontinuuma, kad se stijenska masa ponaša kao diskontinuirana geotehnička sredina. Ponašanje stijenske mase uglavnom ovisi o stupnju razlomljenosti, geometrijskim značajkama kosine i diskontinuiteta te o stanju naprezanja.

U uvjetima kad se stijenska masa ponaša kao diskontinuirana geotehnička sredina, slom se kosine dešava isključivo po plohama diskontinuiteta, a oblik sloma ovisi o međusobnim odnosima orijentacije kosine i diskontinuiteta. Najčešći oblici sloma za koje se provode proračuni faktora sigurnosti su ravni i klinasti lom. Utvrđivanje potencijalno mogućih oblika loma provodi se grafičkom metodom stabilnosti. U uvjetima kad se stijenska masa ponaša kao kvazikontinuirana geotehnička sredina, slom se kosine dešava po zakrivljenim kliznim plohama kroz stijensku masu. Proračuni faktora sigurnosti obično se provode metodama opće granične ravnoteže i kružne klizne plohe. U slučaju složenijih zadataka (složenih uvjeta, stanja stijenske mase i veličine objekata) rješenja metodama granične ravnoteže mogu upitna. U tim slučajevima provode se i numeričke metode proračuna, nekom od metoda za izračun punog stanja naprezanja i deformacija zadanog modela. Nakon toga uspoređuju se rezultati dobiveni metodama granične ravnoteže i numeričkim metodama te se donose konačni zaključci.

Da bi se objasnio princip proračunskih metoda analize stabilnosti metodama granične ravnoteže, u nastavku se prikazuje postupak izračuna faktora sigurnosti za ravni oblik loma prema metodi Hoeka i Braya (Hoek and Bray, 1977) za koju se može slobodno reći da ima jedno od najvećih primjena u praksi.

13.3. Proračun faktora sigurnosti kosine za ravni oblik loma

Analiza stabilnosti stijenskih kosina prema ovoj metodi ima smisla u slučaju da je pružanje diskontinuiteta približno paralelno pružanju kosine s dužinom diskontinuiteta koja može formirati ovakav oblik sloma. Proračun faktora sigurnosti za ravni oblik sloma prema metodi Hoeka i Braya može biti proveden za slučaj kosine bez vlačne pukotine i za slučaj kosine s vlačnom pukotinom.

13.3.1. Slučaj kosine bez vlačne pukotine

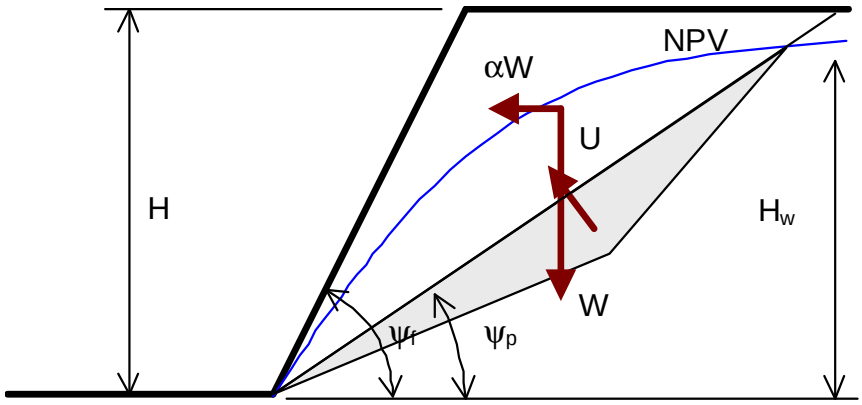
Prikaz dimenzija pojedinih veličina za slučaj modela kosine bez vlačne pukotine dan je na slici 13.1. Opća relacija za proračun faktora sigurnosti kosine uz djelovanje vode i seizmičkih opterećenja za kosinu bez vlačne pukotine dana je izrazom:

$$F = \frac{c \cdot A + \left[W \cdot \left(\cos\psi_P - \alpha \cdot \sin\psi_P\right) - U\right] \cdot \tan\varphi}{W \cdot \left(\sin\psi_P + \alpha \cdot \cos\psi_P\right)}, \tag{13.1}$$

gdje je:

c - vrijednost kohezije na diskontinuitetu (N/m^2),
A - površina klizne plohe (m^2),

W - težina kliznog bloka (N),
ψ_p - nagib klizne plohe (°),
α - koeficijent za izračun horizontalne sile uslijed seizmičkih opterećenja,
U - sila uzgona vode na kliznoj plohi (N),
φ - kut unutarnjeg trenja (°).



Slika 13.1. Model ravnog loma bez vlačne pukotine

Površina klizne plohe po metru dužnom pružanja kosine A računa se izrazom:

$$A = \frac{H}{\sin\psi_P}, \text{ (m}^2\text{)} \tag{13.2}$$

gdje H (m) predstavlja ukupnu visinu kosine. Kod kosina jednostavnih geometrija težina kliznog bloka W može se izračunati prema izrazu:

$$W = \frac{\gamma_r \cdot H^2}{2} \cdot \left(\cot\psi_P - \cot\psi_f\right), \text{ (N)} \tag{13.3}$$

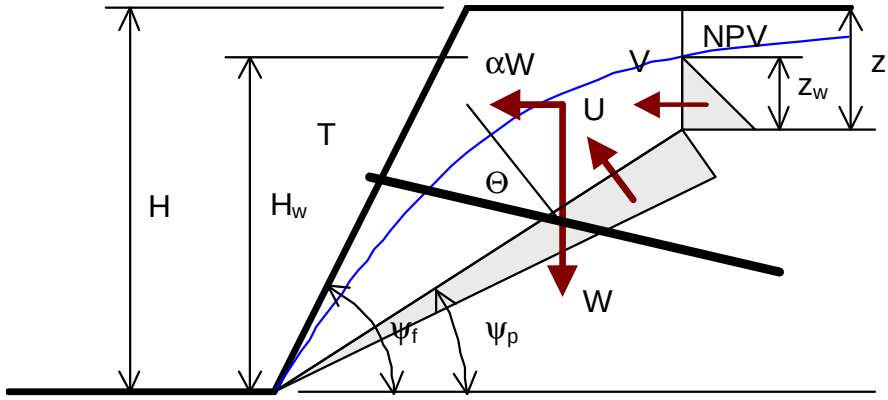
gdje γ_r (N/m^3) predstavlja jediničnu težina stijenskog materijala, a ψ_f (°) nagib kosine. Za kosine složenije geometrije, težina kliznog bloka računa se na temelju umnoška površine formiranog stijenskog bloka, jedinične težine stijenskog materijala te dužnog metra računajući prostorno pružanje kosine. Sila uzgona koja djeluje na stijenski blok uslijed tlaka vode duž klizne plohe računa se izrazom:

$$U = \frac{\gamma_W \cdot H_W^2}{4 \cdot \sin\psi_P}, \text{ (N)} \tag{13.4}$$

gdje γ_w (N/m^3) predstavlja jediničnu težinu vode, a H_w (m) visinu vode na diskontinuitetu kosine. Ovaj slučaj izračuna djelovanja sile uzgona na nestabilni blok vrijedi kad se voda u potpunosti drenira u nožištu kosine kako je prikazano na modelu kosine, slika 13.1.

13.3.2. Slučaj kosine s vlačnom pukotinom

Prikaz dimenzija pojedinih veličina za slučaj modela kosine s vlačnom pukotinom i djelovanjem sidra dan je na slici 13.2.



Slika 13.2. Model ravnog loma s vlačnom pukotinom i djelovanjem sidra

Opća relacija za izračun faktora sigurnosti uz djelovanje vode i seizmičkih opterećenja za kosinu s vlačnom pukotinom i djelovanjem sidra dana je izrazom:

$$F = \frac{c \cdot A + \left[W \cdot \left(\cos\psi_P - \alpha \cdot \sin\psi_P\right) - U - V \cdot \sin\psi_P + T \cdot \cos\theta\right] \cdot \tan\varphi}{W \cdot \left(\sin\psi_P + \alpha \cdot \cos\psi_P\right) + V \cdot \cos\psi_P - T \cdot \sin\theta}, \tag{13.5}$$

gdje uz definirane veličine u prethodnom slučaju V (N/m') predstavlja horizontalnu silu koja djeluje na stijenski blok uslijed djelovanja hidrostatskog tlaka vode u vlačnoj pukotini, T (N) silu djelujućeg sidra, a θ (°) kut djelovanja sidra u odnosu na diskontinuitet. Površina klizne plohe A po metru dužnom pružanja kosine u ovom slučaju računa se izrazom:

$$A = \frac{H - z}{\sin\psi_P}, \text{ (m}^2\text{)} \tag{13.6}$$

gdje H (m) predstavlja ukupnu visinu kosine, a z (m) dubinu vlačne pukotine na kosini. Dubina vlačne pukotine može biti zadana obzirom na situaciju na terenu ili se može za najnepovoljniji slučaj računati izrazom:

$$z = H \cdot \left(1 - \sqrt{\cot\psi_f \cdot \tan\psi_P}\right), \text{ (m)} \tag{13.7}$$

gdje ψ_f (°) predstavlja nagib kosine. Kod kosina jednostavnih geometrija težina kliznog bloka W može se izračunati prema izrazu:

$$W = \frac{\gamma_r \cdot H^2}{2} \cdot \left[\left(1 - \left(\frac{z}{H}\right)^2\right) \cdot \cot\psi_P - \cot\psi_f\right]. \text{ (N)} \tag{13.8}$$

Za kosine složenije geometrije, težina kliznog bloka računa se na temelju umnoška površine formiranog stijenskog bloka, jedinične težine stijenskog materijala te dužnog metra računajući prostorno pružanje kosine. Sila uzgona U koja djeluje na stijenski blok uslijed tlaka vode duž klizne plohe računa se izrazom:

$$U = \frac{\gamma_W \cdot z_W \cdot A}{2}, \text{ (N)} \tag{13.9}$$

gdje z_W (m) predstavlja visinu vode u vlačnoj pukotini koja se računa izrazom:

$$z_W = \left(H_W - \left(H - z\right)\right), \text{ (m)} \tag{13.10}$$

gdje H_w (m) predstavlja visinu vode na kosini u području vlačne pukotine. Horizontalna sila V, koja djeluje na stijenski blok uslijed djelovanja hidrostatskog tlaka vode u vlačnoj pukotini, računa se izrazom:

$$V = \frac{\gamma_W \cdot z_W^2}{2} \text{ . (N)} \tag{13.11}$$

Slučaj izračuna sile uzgona, kao i horizontalne sile uslijed djelovanja hidrostatskog tlaka vode u vlačnoj pukotini, vrijedi u slučaju da se voda u potpunosti drenira u nožištu kosine, a najveća njena visina nalazi upravo u području vlačne pukotine kako je prikazano na modelu kosine, slika 13.2.

14. NAPREZANJA U STIJENSKOJ MASI

14.1. Uvod

Naprezanja u stijenskoj masi uglavnom su izazvana težinom materijala koji se nalazi iznad točke promatranja kao posljedica djelovanja zemljine gravitacije. U zemljinoj kori, osim djelovanja gravitacijskog polja, postoje i druga djelovanja od kojih su najznačajnije sile koje nastaju uslijed tektonskih pokreta. Uz spomenuto, na ukupno stanje naprezanja veliki utjecaj ima i morfologija terena, raspored slojeva i nehomogenosti te položaji pukotina, rasjeda i ostalih oslabljenja u stijenskoj masi. Stanje naprezanja stijenske mase prije nekog inženjerskog zahvata obično se zove prirodno ili primarno stanje naprezanja dok se stanje naprezanja nakon određenog inženjerskog zahvata ili izgradnje objekata zove sekundarno stanje naprezanja.

14.2. Primarno stanje naprezanja

Da bi se odredilo puno stanje naprezanja u nekoj točki potrebno je poznavati šest komponenti naprezenja te pravce njihovog djelovanja. Rješavanje ovog zadatka za primjere u praksi vrlo je složeno i jedino moguće uz primjenu numeričkih metoda. U najjednostavnijem slučaju za horizontalno uslojene naslage i ravan teren vrijednost vertikalnog naprezanja σ_v može se jednostavno izračunati pomoću izraza:

$$\sigma_v = \sum_{i=1}^{n} \rho_i \cdot g \cdot z_i \text{ , (N/m}^2\text{, MPa)} \tag{14.1}$$

gdje je ρ_i (kg/m^3) gustoća materijala pojedinog sloja, g (m/s^2) je gravitacija, a z_i (m) debljina pojedinog sloja. Uz pretpostavku da za komponente naprezanja vrijede odnosi $\sigma_x=\sigma_y=\sigma_h$ i $\sigma_z=\sigma_v$ prema linearnoj teoriji elastičnosti može se dobiti fizička jednadžba koja povezuje komponentu horizontalne deformacije ε_h i komponente horizontalnog σ_h i vertikalnog σ_v naprezanja u obliku:

$$\varepsilon_h = \frac{1}{E}\left[\sigma_h - \nu(\sigma_h + \sigma_v)\right], \tag{14.2}$$

gdje je E Youngov modul elastičnosti, a ν Poissonov koeficijent materijala. Uvođenjem koncepta spriječenog bočnog širenja, što znači da je ε_h=0, koji se s dovoljnom točnošću može primijeniti za jednostavne uvjete i izotropnu sredinu, sređivanjem jednadžbe 14.2 dobiva se relacija za izračun horizontalnog naprezanja koja glasi:

$$\sigma_h = \frac{\nu}{(1-\nu)} \cdot \sigma_v \text{ . (MPa)} \tag{14.3}$$

Prema ovoj relaciji odnos između horizontalnog i vertikalnog naprezanja teoretski ovisi samo o karakteristikama materijala, odnosno o omjeru $\nu/(1-\nu)$. Taj omjer najčešće se izražava koeficijentom k koji dakle predstavlja odnos između horizontalnog i vertikalnog naprezanja. U stvarnosti taj koeficijent može biti znatno drugačijih vrijednosti od teoretski dobivenih koji se tada određuje na temelju „in situ“ metoda ispitivanja. U tom slučaju horizontalno naprezanje jednostavno se računa izrazom:

$$\sigma_h = k \cdot \sigma_v \text{ . (MPa)} \tag{14.4}$$

14.3. Sekundarno stanje naprezanja

Inženjerskim zahvatima i izgradnjom objekata u stijenama uvelike se utječe na promjenu stanja naprezanja, naročito u neposrednoj blizini oko zahvata ili objekta. U nekim slučajevima promjena se očituje u dodatnim naprezanjima uslijed težine izgrađenog objekta, a u nekim samo u preraspodjeli naprezanja. Karakteristični primjer takvih promjena je sekundarno stanje naprezanje oko podzemnih prostorija. Kod podzemnih prostorija intenzitet naprezanja kao i smjer djelovanja jako ovisi o obliku podzemne prostorije, odnosno o obliku konture i veličini podzemne prostorije, naročito u stijenskoj masi na samoj konturi.

Za podzemne prostorije okruglog presjeka, koje se mogu promatrati kao linijski objekti s konstantnim poprečnim presjekom u beskonačnom prostoru, vrijede uvjeti ravninskog stanja deformacija koji su jednaki otvoru u ploči. U tim uvjetima može se primijeniti rješenje Kirscha za stanje naprezanja u ploči od homogenog, izotropnog i linearno elastičnog materijala s kružnim otvorom u dvoosnom stanju naprezanja. Rješenja za radijalno naprezanje σ_r i tangencijalno naprezanje σ_θ te posmično naprezanje $\tau_{r\theta}$ dana su u polarnom koordinatnom sustavu relacijama:

$$\sigma_r = \frac{1}{2}(\sigma_h + \sigma_v)\cdot\left(1-\frac{a^2}{r^2}\right)+\frac{1}{2}(\sigma_h - \sigma_v)\cdot\left(1+\frac{3a^4}{r^4}-\frac{4a^2}{r^2}\right)\cdot\cos 2\theta\,, \tag{14.5}$$

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2}(\sigma_h + \sigma_v)\cdot\left(1+\frac{a^2}{r^2}\right)-\frac{1}{2}(\sigma_h - \sigma_v)\cdot\left(1+\frac{3a^4}{r^4}\right)\cdot\cos 2\theta\,, \tag{14.6}$$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{1}{2}(\sigma_h - \sigma_v)\cdot\left(1-\frac{3a^4}{r^4}+\frac{2a^2}{r^2}\right)\cdot\sin 2\theta\,, \tag{14.7}$$

gdje je *a* (m) radijus podzemne prostorije okruglog presjeka, *r* (m) je udaljenost točke u kojoj se računa naprezanje od ishodišta polarnog koordinatnog sustava, a θ (°) polarni kut mjeren od pozitivne x osi u obrnutom smjeru od kazaljke na satu. U izračunu ovih komponenti naprezanja, za zadano primarno stanje naprezanja i veličinu podzemne prostorije okruglog presjeka radijusa *a*, najčešće se naprezanja računaju na udaljenostima *r* od 1a, 2a, 3a, 4a i ∞ za neki odabrani kut θ.

Da bi se stekao uvid u promjene naprezanja koje su nastale kod sekundarnog u odnosu na primarno stanje naprezanja zgodno je dobivene komponente normalnih naprezanja σ_r i σ_θ podijeliti s najvećom komponentom normalnog naprezanja kod primarnog stanja naprezanja. Tako dobivene vrijednosti najčešće se prikazuju na dijagramu odnosa vrijednosti počevši od konture podzemne prostorije prema unutrašnjosti stijenske mase za računske točke.

14.4. Glavna naprezanja

Prema definiciji glavna naprezanja predstavljaju maksimalna naprezanja koja djeluju u pravcima okomitim na međusobno okomite ravnine na kojima su posmična naprezanja jednaka nuli. S druge pak strane postoje i ravnine u prostoru napregnutog tijela u kojima djeluju maksimalna posmična naprezanja. Poznavajući komponente normalnih i posmičnih naprezanja u nekoj točki glavna naprezanja $\sigma_{1,2}$ kao i maksimalna posmična naprezanje $\tau_{1,2}$ te smjerove njihovog djelovanja mogu se izračunati pomoću izraza:

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_y + \sigma_x}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_y - \sigma_x}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \ , \tag{14.8}$$

$$\tau_{1,2} = \pm\sqrt{\left(\frac{\sigma_y - \sigma_x}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \ , \tag{14.9}$$

$$\tan 2\alpha_0 = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_y - \sigma_x} \ , \tag{14.10}$$

gdje σ_x, σ_y i τ_{xy} predstavljaju zadane komponente naprezanja u xy koordinatnom sustavu, a α_0 kut zaokreta pravca djelovanja većeg glavnog naprezanja od y-osi. Obzirom na primjer rješenja za naprezanja oko podzemnih prostorija okruglog presjeka, koja su dana u polarnom koordinatnom sustavu, izračun glavnih naprezanja odvija se postavljanjem lokalnog xy koordinatnog sustava na način da se x-os okrene u smjeru radijalnih naprezanja, a y-os u smjeru tangencijalnih naprezanja, što u konačnici znači da je $\sigma_x=\sigma_r$, $\sigma_y=\sigma_\theta$ te $\tau_{xy}=\tau_{r\theta}$ za tako postavljeni koordinatni sustav.

14.5. Odnos naprezanja i čvrstoće materijala

Poznavajući glavna naprezanja, kriterij čvrstoće i karakteristike materijala u nekoj točki može se izračunati maksimalno naprezanje koje materijal može podnijeti u tom stanju naprezanja. Na temelju rješenja za maksimalno naprezanje koje materijal može podnijeti i stvarnog naprezanja u promatranoj točki računa se njihov omjer koji zapravo predstavlja faktor stabilnosti za tu točku materijala. Utvrđivanje ovih veličina predstavlja jedan od ključnih segmenata u rješavanju inženjerskih zadataka.

U primjeru ovog zadatka, za izračunate vrijednosti glavnih naprezanja po točkama proračuna, uzimaju se rješenja za σ_2 koja se uz zadane vrijednosti karakteristike materijala uvrštavaju u opću jednadžbu Hoek-Brownovog nelinearnog kriterija čvrstoće, izraz 12.3, čime se dobivaju vrijednosti za maksimalna naprezanja koja materijal može podnijeti σ_1'. Pri tome vrijedi da je $\sigma_3'=\sigma_2$. Na temelju dobivene vrijednosti za maksimalno naprezanje koja materijal može podnijeti σ_1' i izračunate vrijednosti većeg glavnog naprezanja σ_1 iskazuje se njihov omjer σ_1'/σ_1.

LITERATURA

Aydin, A. (2008): ISRM Suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness: Revised version. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences.* Vol. 45, pp.

Barton, N., Choubey, V. D. (1977): The shear strength of rock joints in theory and practice. Rock Mechanics. Springer-Verlag, No. ½, pp. 1-54.

Barton, N., Lien, R., Lunde., (1974): Engineering classification of rock masses for the desing of tunnel support. *Rock Mechanics*. Vol. 6, No. 4, pp. 183-236.

Bieniawski, Z. T. (1973): Engineering classification of jonted rock masses. *The Civil Engineer in South Africa*, Vol. 15, pp. 335-344.

Bieniawski, Z. T. (1976): Rock mass classification in rock engineering applications. Proc. Symposium on Exploration for Rock Engineering (Z. T. Bieniawski, editor), Johannesburg, Vol. 1, pp. 97-106.

Giani, G. P. (1992): Rock Slope Stability Analysis. A. A. Balkema, Rotterdam.

Hoek, E., Bray, J.W. (1977): Rock Slope Engineering. The Institution of Mining and Metallurgy, London.

Hoek, E., Brown, E. T. (1997): Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. Vol. 34, pp. 1165-1186.

Hoek, E., Carranza-Torres, C., Corkum, B. (2002): Hoek-Brown failure criterion-2002 edition. Proc. NARMS-TAC Conference, Toronto, Vol. 1, pp. 267-273.

ISRM (1974): Suggested Methods for Determining Shear Strength. Part 2: Suggested method for laboratory determination of direct shear strength.

ISRM (1977a): Part1: Suggested Methods for Determining Water Content, Porosity, Density, Absorption and Related Properties; Method 1: Suggested method for determination of the water content of a rock sample; Method 2: Suggested method for porosity/density determination using saturation and caliper techniques.

ISRM (1977b): Suggested Methods for Determining Sound Velocity.

ISRM (1978a): Suggested Methods for Determining Tensile Strength of Rock Materials; Part 2: Suggested method for determining indirect tensile strength by the Brazil test.

ISRM (1978b): Suggested Methods for Determining the Strength of Rock Materials in Triaxial Compression.

ISRM (1978c): Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses. Rock Characterization Testin & Monitoring (E. T. Brown, editor). Pergamon press, Oxford.

ISRM (1979): Suggested Methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials; Part 1: Suggested method for determination of the uniaxial

compressive strength of rock materials; Part 2: Suggested method for determining deformability of rock materials in uniaxial compression.

ISRM (1985): Suggested Method for Determining Point Load Strength.

Marinos, P., Hoek, E. (2001): Estimating geotechnical properties heterogeneous rock masses such as flysch. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. Vol. 60, pp. 85-92.

Miller, R.P. (1965): Engineering classification and index properties for intact rock. Ph.D. thesis. University of Illinois, Illinois.

Palmstrom, A. (1995): RMi – rock mass characterization system for rock engineering purposes. Ph.D. Thesis. Oslo University, Oslo.

Ražnjević, K. (1985): Fizikalne veličine i mjerne jedinice Međunarodnog sustava (SI). Znanje, Zagreb.

Sonmez, H., Gokceoglu, C., Ulusay, R. (2003): An application of fuzzy sets to the Geological Strength Index (GSI) systems used in rock engineering. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. Vol. 16, pp. 251-269.

Sonmez, H., Ulusay, R. (1999): Modification to the geological strength index (GSI) and their applicability to stability of slopes. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. Vol. 36, pp. 743-760.

P R I L O Z I

Prilog br. 1

ZAPIS ODREĐIVANJA SADRŽAJA VODE, POROZNOSTI I GUSTOĆE

(ISRM Suggested method for determination of the water content of a rock sample, Method 1, 1977.)
(ISRM Suggested method for porosity/density determination using saturation and caliper techniques, Method 2, 1977.)

Laboratorijska oznaka		Datum zaprimanja	

Litološki opis materijala, karakteristike uzorka i pripreme

Uzorkovanje proveo		Datum lab. uzorkovanja	

Visina h (mm)	Promjer d_1 (mm)	Promjer d_2 (mm)	Masa M (g)
Volumen V			(mm^3)

Tijek procesa sušenja

Masa čvrstih čestica M_s		(g)

Tijek procesa saturacije

Saturirana masa M_{sat}		(g)
Volumen pora V_v		(mm3)

Sadržaj vode w		(%)
Poroznost n		(%)
Stupanj saturiranosti S_r		(%)
Gustoća u suhom stanju ρ_d		(kg/m^3)
Gustoća u prirod. stanju vlažnosti ρ		(kg/m^3)

Ispitivanje proveo		Kontrolu proveo	
(datum)	(potpis)	(datum)	(potpis)

Prilog br. 2

ZAPIS ISPITIVANJA JEDNOOSNE TLAČNE ČVRSTOĆE

(ISRM Suggested method for determination of the uniaxial compressive strength of rock materials, Part 1, 1979.)

Laboratorijska oznaka		Datum zaprimanja	

Litološki opis materijala, karakteristike uzorka i pripreme

Uzorkovanje proveo		Datum lab. uzorkovanja	

Visina h (mm)	Promjer d_1 (mm)	Promjer d_2 (mm)	Masa M (g)

Površina poprečnog presjeka A		(mm^2)
Volumen V		(mm^3)

Tijek ispitivanja

Sila sloma F		

Vrijeme trajanja		(min)	Skica loma
Zadani prirast naprezanja		(MPa/s)	
Ispitni uređaji i oprema			
Model sloma			

Napomene uz eventualna odstupanja postupka ispitivanja od zahtjeva preporuka

Gustoća ρ		(kg/m^3)
Jednoosna tlačna čvrstoća σ_c		(MPa)

Ispitivanje proveo		Kontrolu proveo	
(datum)	(potpis)	(datum)	(potpis)

Prilog br. 3

ZAPIS ISPITIVANJA JEDNOOSNE TLAČNE ČVRSTOĆE I DEFORMABILNOSTI MATERIJALA

(ISRM Suggested method for determining deformability of rock materials in uniaxial compression, Part 2, 1979.)

Laboratorijska oznaka		Datum zaprimanja	

Litološki opis materijala, karakteristike uzorka i pripreme

Uzorkovanje proveo		Datum lab. uzorkovanja	

Visina h (mm)	Promjer d_1 (mm)	Promjer d_2 (mm)	Masa M (g)

Površina poprečnog presjeka A		(mm^2)
Volumen V		(mm^3)

Tijek ispitivanja

Duljina obuhvata uzorka senzorom l_0		(mm)
Sila sloma F		

Vrijeme trajanja		(min)	Skica loma
Zadani prirast naprezanja		(MPa/s)	
Zadani prirast deformacija			
Ispitni uređaji i oprema			
Model sloma			

Napomene uz eventualna odstupanja postupka ispitivanja od zahtjeva preporuka

Gustoća ρ		(kg/m^3)
Jednoosna tlačna čvrstoća σ_c		(MPa)
Youngov modul elastičnosti E		(GPa)
Poissonov koeficijent ν		

Ispitivanje proveo		Kontrolu proveo	
(datum)	(potpis)	(datum)	(potpis)

Prilog br. 4

ZAPIS MJERENJA DEFORMACIJA MATERIJALA

(ISRM Suggested method for determining deformability of rock materials in uniaxial compression, Part 2, 1979.)

Red. br.	Osne deform.		Poprečne deform.		Sila *F*	Naprezanje (6)/*A*	Relativne deform.	
	G_o (mm)	Kor. (mm)	G_d (mm)	Kor. (mm)	(N)	(MPa)	ε_o (3)/l_0	ε_d (5)/*d*
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
0	0,0008		0,0008					
1	0,0056		0,0016		5436			
2	0,0113		0,0024		21747			
3	0,0145		0,0032		36978			
4	0,0169		0,0041		50829			
5	0,0209		0,0048		58425			
6	0,0249		0,0056		66971			
7	0,0298		0,0064		79947			
8	0,0354		0,0080		94506			
9	0,0403		0,0088		109381			
10	0,0451		0,0104		132802			
11	0,0499		0,0113		148943			
12	0,0555		0,0129		165085			
13	0,0621		0,0137		183758			
14	0,0676		0,0153		198633			
15	0,0733		0,0169		212876			
16	0,0789		0,0177		226169			
17	0,0877		0,0209		247690			
18	0,0942		0,0233		265414			
19	0,1015		0,0290		282189			
20	0,1055		0,0338		289152			
21	0,1070		0,0411		291684			
22	0,1112		0,0749		292950			

Sila sloma *F*		(N)
Jednoosna tlačna čvrstoća σ_c		(MPa)

Prilog br. 5

DIJAGRAM DEFORMABILNOSTI MATERIJALA

(ISRM Suggested method for determining deformability of rock materials in uniaxial compression, Part 2, 1979.)

Youngov modul elastičnosti E		(GPa)
Poissonov koeficijent ν		

Prilog br. 6

ZAPIS ISPITIVANJA INDIREKTNE VLAČNE ČVRSTOĆE BRAZILSKIM TESTOM

(ISRM Suggested method for determining indirect tensile strength by the Brazil test, Part 2, 1978.)

Laboratorijska oznaka		Datum zaprimanja	

Litološki opis materijala, karakteristike uzorka i pripreme			
Uzorkovanje proveo		Datum lab. uzorkovanja	

Debljina t (mm)	Promjer d_1 (mm)	Promjer d_2 (mm)	Masa M (g)
Volumen V			(mm^3)

Tijek ispitivanja		
Sila sloma F		

Vrijeme trajanja		(s)	Skica loma
Zadani prirast naprezanja		(N/s)	
Ispitni uređaji i oprema			
Model sloma			

Napomene uz eventualna odstupanja postupka ispitivanja od zahtjeva preporuka

Gustoća ρ		(kg/m^3)
Vlačna čvrstoća σ_t		(MPa)

Ispitivanje proveo		Kontrolu proveo	
(datum)	(potpis)	(datum)	(potpis)

Prilog br. 7

ZAPIS ISPITIVANJA ČVRSTOĆE MATERIJALA U TROOSNOM STANJU NAPREZANJA

(ISRM Suggested method for determining the strength of rock materials in triaxial compression, 1978.)

Laboratorijska oznaka		Datum zaprimanja	

Litološki opis materijala, karakteristike uzorka i pripreme

Uzorkovanje proveo		Datum lab. uzorkovanja	

Visina h (mm)	Promjer d_1 (mm)	Promjer d_2 (mm)	Masa M (g)

Površina poprečnog presjeka A		(mm^2)
Volumen V		(mm^3)

Tijek ispitivanja

Ćelijski (bočni) tlak P		(bar)
Sila sloma F		

Vrijeme trajanja		(min)	Skica loma
Zadani prirast naprezanja		(MPa/s)	
Ispitni uređaji i oprema			
Model sloma			

Napomene uz eventualna odstupanja postupka ispitivanja od zahtjeva preporuka

Gustoća ρ		(kg/m^3)
Tlačna čvrstoća σ_c		(MPa)

Ispitivanje proveo		Kontrolu proveo	
(datum)	(potpis)	(datum)	(potpis)

Prilog br. 8

DIJAGRAM ODNOSA TLAČNE ČVRSTOĆE I ZADANOG BOČNOG NAPREZANJA PRI TROOSNOM ISPITIVANJU

Nagib krivulje *m*		
Odsječak na y osi *b*		(MPa)

Kohezija *c*		(MPa)
Kut unutarnjeg trenja φ		(°)

Prilog br. 9

ZAPIS ISPITIVANJA POSMIČNE ČVRSTOĆE DIREKTNIM SMICANJEM

(ISRM Suggested method for laboratory determination of direct shear strength, 1974.)

Laboratorijska oznaka		Datum zaprimanja	

Litološki opis materijala, karakteristike uzorka i pripreme			
Uzorkovanje proveo		Datum lab. uzorkovanja	

Visina h (mm)	Promjer d_1 (mm)	Promjer d_2 (mm)	Masa M (g)
Površina poprečnog presjeka A			(mm^2)

Tijek ispitivanja						
R.br.	Norm. sila F_n (kN)	Posm. sila F_s (kN)	Očitanje mikroure (mm)	Ostvareni pomak (mm)	Normalno naprezanje (MPa)	Posmično naprezanje (MPa)
0						
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						

Vrijeme trajanja		(min)	Skica loma
Ispitni uređaji i oprema			

Napomene uz eventualna odstupanja postupka ispitivanja od zahtjeva preporuka

Posmična čvrstoća τ		(MPa)

Ispitivanje proveo		Kontrolu proveo	
(datum)	(potpis)	(datum)	(potpis)

Prilog br. 10

DIJAGRAM ODNOSA POSMIČNE ČVRSTOĆE I ZADANOG NORMALNOG NAPREZANJA

Kohezija *c*		(MPa)
Kut unutarnjeg trenja φ		(°)

Prilog br. 11

ZAPIS ODREĐIVANJA BRZINA PROLAZA ULTRAZVUČNIH ELASTIČNIH VALOVA

(ISRM Suggested methods for determining sound velocity, 1978.)

Laboratorijska oznaka		Datum zaprimanja	

Litološki opis materijala, karakteristike uzorka i pripreme

Uzorkovanje proveo		Datum lab. uzorkovanja	

Visina h (mm)	Promjer d_1 (mm)	Promjer d_2 (mm)	Masa M (g)
Površina poprečnog presjeka A			(mm^2)
Obujam V			(mm^3)

Tijek ispitivanja			
P-val	t_I =	t_{II} =	t_P =
Brzina prolaza v_P			(m/s)
S-val	t_I =	t_{II} =	t_S =
Brzina prolaza v_S			(m/s)

Ispitni uređaji i oprema	

Napomene uz eventualna odstupanja postupka ispitivanja od zahtjeva preporuka

Gustoća ρ		(kg/m^3)
Modul smicanja G_{din}		(MPa)
Modul elastičnosti E_{din}		(MPa)
Poissonov koeficijent ν_{din}		
Lameova konstanta λ		(MPa)

Ispitivanje proveo		Kontrolu proveo	
(datum)	(potpis)	(datum)	(potpis)

Prilog br. 12

ZAPIS ODREĐIVANJA INDEKSA ČVRSTOĆE OPTEREĆENJEM U TOČKI

(ISRM Suggested method for determining point load strength, 1985.)

Laboratorijska oznaka		Datum zaprimanja	

Litološki opis materijala, karakteristike uzorka i pripreme

Uzorkovanje proveo		Datum lab. uzorkovanja	

Duljina L (mm)	Širina W_1 (mm)	Širina W_2 (mm)	Masa M (g)

Prosječna širina W		(mm)
Razmak točaka opterećenja D		(mm)

Tijek ispitivanja

Sila sloma P		

Ispitni uređaji i oprema	

Napomene uz eventualna odstupanja postupka ispitivanja od zahtjeva preporuka

Efektivni promjer uzorka D_e		(m)
Korekcijski faktor F		
Indeks čvrstoće $I_{S(50)}$		(MPa)

Ispitivanje proveo		Kontrolu proveo	
(datum)	(potpis)	(datum)	(potpis)

Prilog br. 13

ZAPIS DETERMINACIJE JEZGRE ISTRAŽNE BUŠOTINE

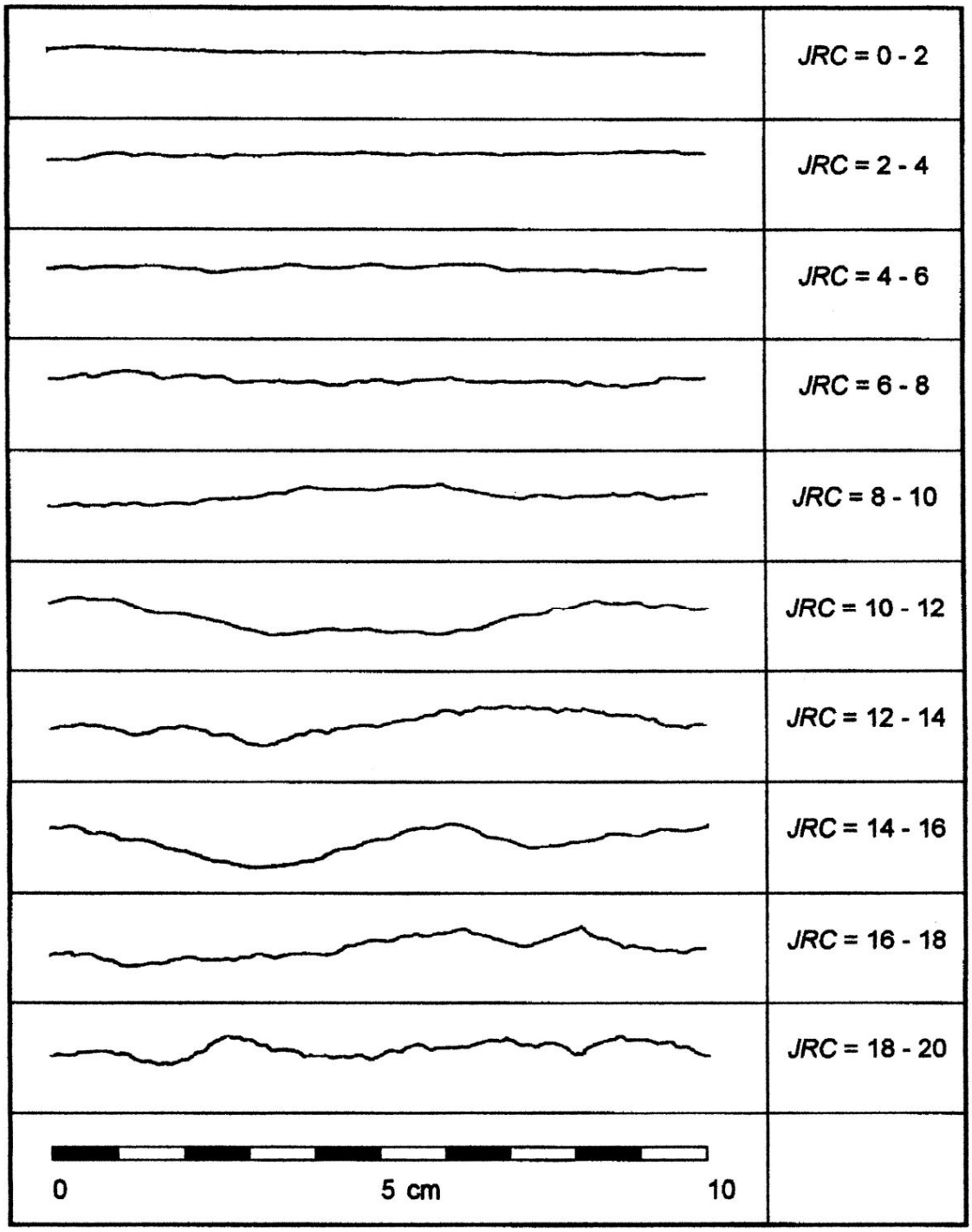
Oznaka bušotine		Dubina	
Koordinate ušća	Y=	X=	Z=
Bušača garnitura		Datum završetka	
Izvođač bušenja			

Gran. interv. (m)	Prom. jezgre (mm)	Duljine komada, *CR*, *RQD* i *FF* (cm, %, n/m')	Litološki opis i vrijednosti svih određivanih značajki diskontinuiteta (β, razmak, *JRC*, *JCS*, zijev i ispuna)	Vrijednosti ispitivanja na uzorcima jezgre (kg/m^3, MPa, m/s)

Determinaciju proveo		Kontrolu proveo	
(datum)	(potpis)	(datum)	(potpis)

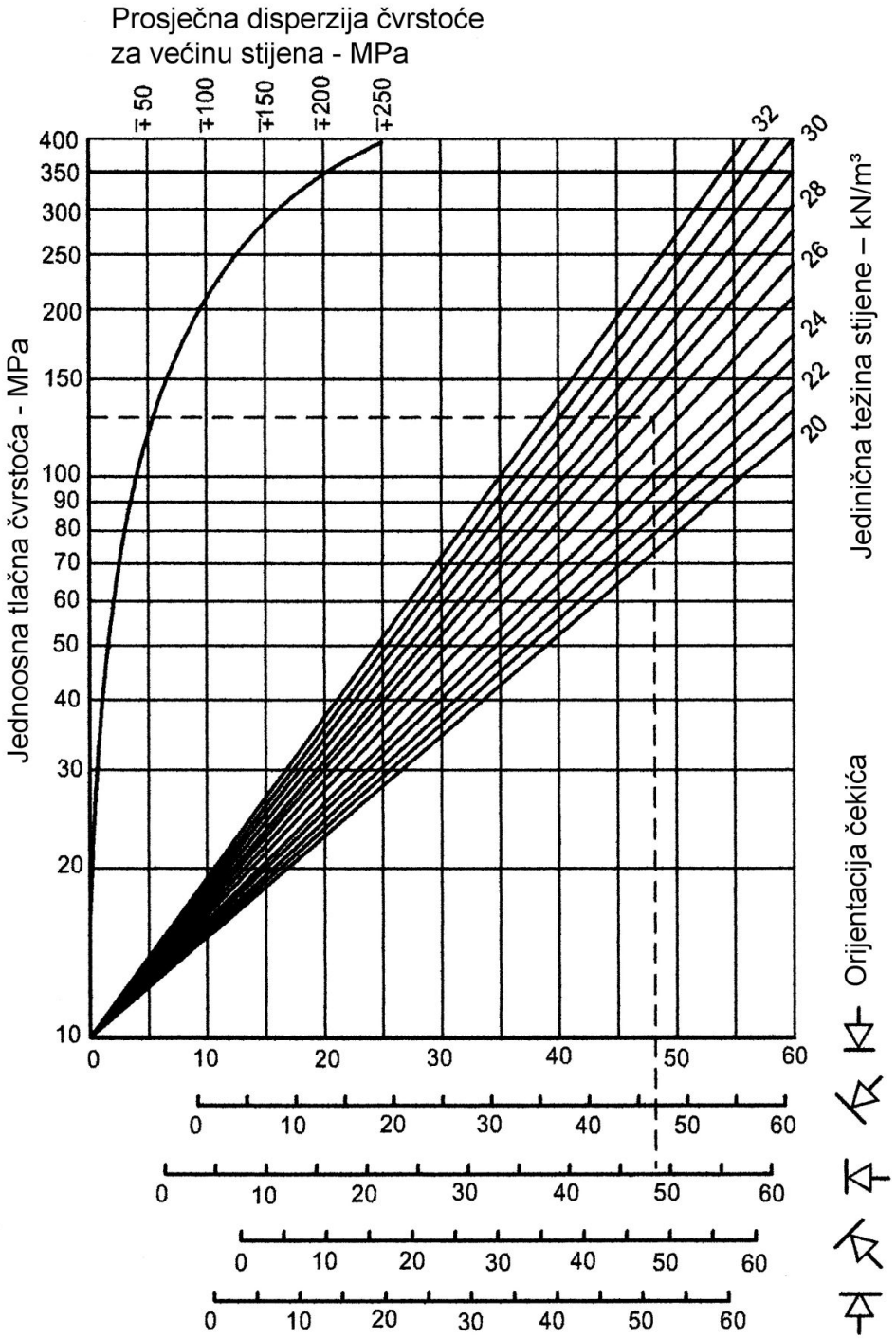
Prilog br. 14

PROFILI HRAPAVOSTI ZA ODREĐIVANJE KOEFICIJENTA HRAPAVOSTI *JRC*$_{10}$



Prilog br. 15

DIJAGRAM ZA PROCJENU TLAČNE ČVRSTOĆE MATERIJALA NA TEMELJU ISPITIVANJA SCHMIDTOVIM ČEKIĆEM



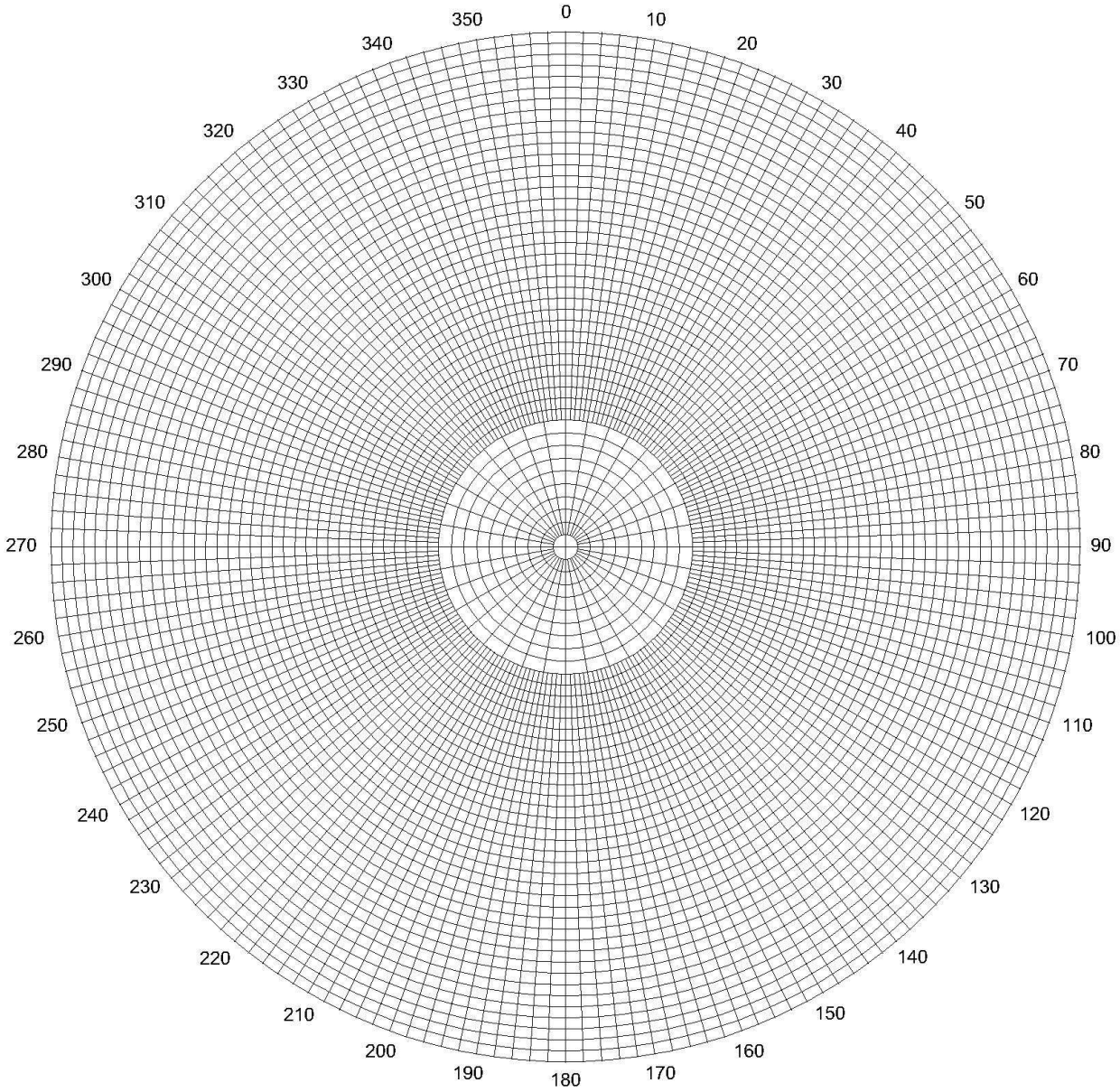
Prilog br. 16

PROCJENA TLAČNE ČVRSTOĆE MATERIJALA NA TEMELJU TERENSKE IDENTIFIKACIJE

Stupanj	Opis čvrstoće stijene	Jednoosna tlačna čvrstoća (MPa)	Indeks čvrstoće opt. u točki (MPa)	Terenska identifikacija	Primjeri
R6	Ekstremno čvrsta	> 250	> 10	Komad materijala je moguće otkinuti jedino uz pomoć geološkog čekića	Svježi bazalt, čert, dijabaz, gnajs, granit, kvarcit
R5	Vrlo čvrsta	100 – 200	4 – 10	Za slomiti materijal potrebno je mnogo udaraca geološkim čekićem	Amfibolit, pješčenjak, bazalt, gabro, gnajs, granodiorit, peridotit, riolit, tuf
R4	Čvrsta	50 – 100	2 – 4	Za slomiti materijal potrebno je više od jednog udarca geološkim čekićem	Vapnenac, mramor, pješčenjak, škriljavac
R3	Srednje čvrsta	25 – 50	1 – 2	Materijal se ne može zagrepsti ili ljuštiti džepnim nožem, jedino ga je moguće razlomiti jednim udarcem geološkim čekićem	Filit, škriljavc, prahovnjak
R2	Slaba	5 – 25	-	Materijal se teško može ljuštiti džepnim nožem, čvrstim udarcem s vrhom geološkog čekića nastaju plitke udubine	Kreda, glinjak, lapor, prahovnjak, škriljavac, kamena sol
R1	Vrlo slaba	1 – 5	-	Materijal se mrvi uslijed jakog udarca geološkim čekićem, može ga se ljuštiti džepnim nožem	Jako istrošene ili alterirane stijene, škriljavac
R0	Ekstremno slaba	0,25 - 1	-	Materijal se može grepsti i udubljivati noktom	Tvrda ispuna diskontinuiteta

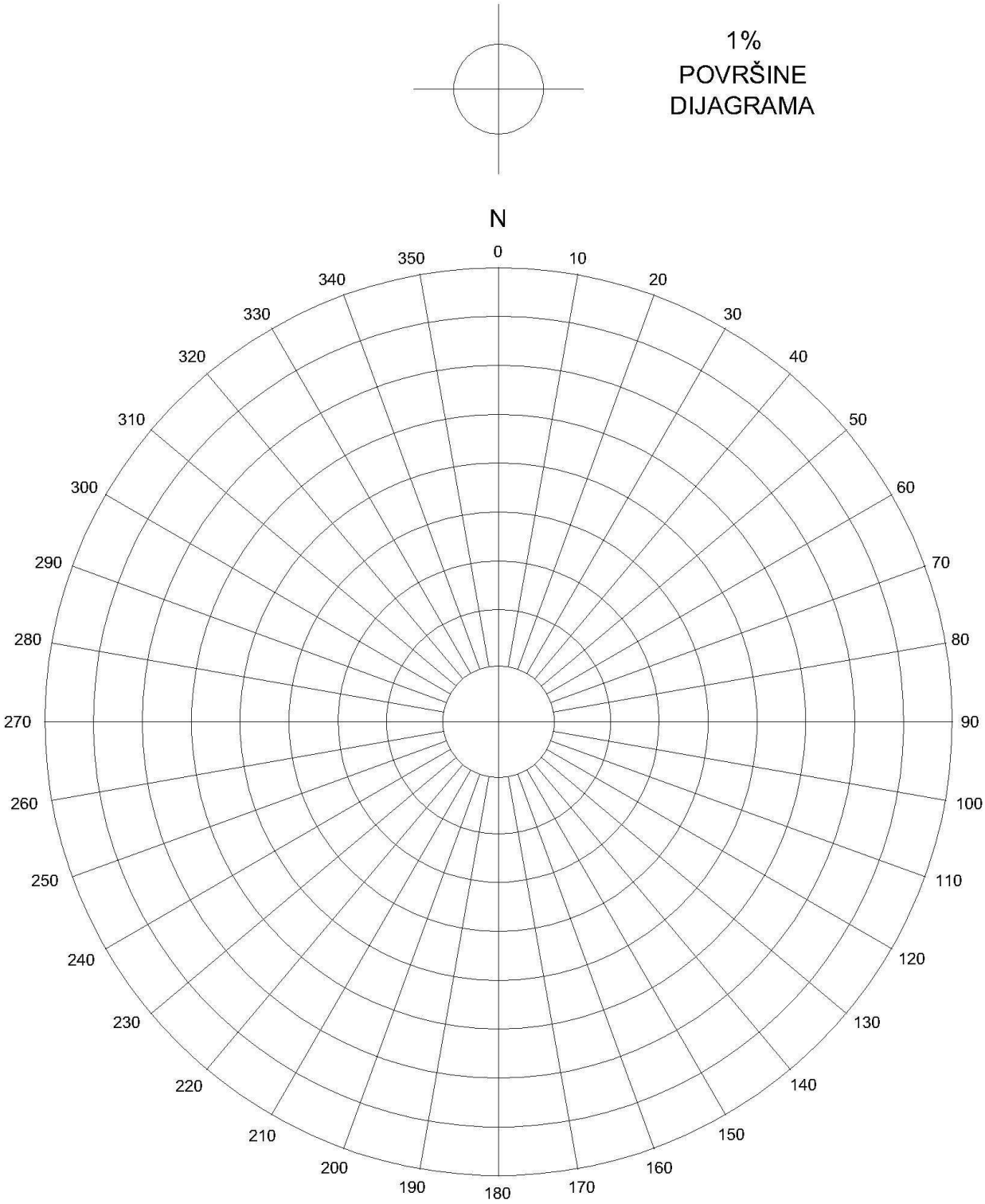
Prilog br. 17

POLARNA MREŽA



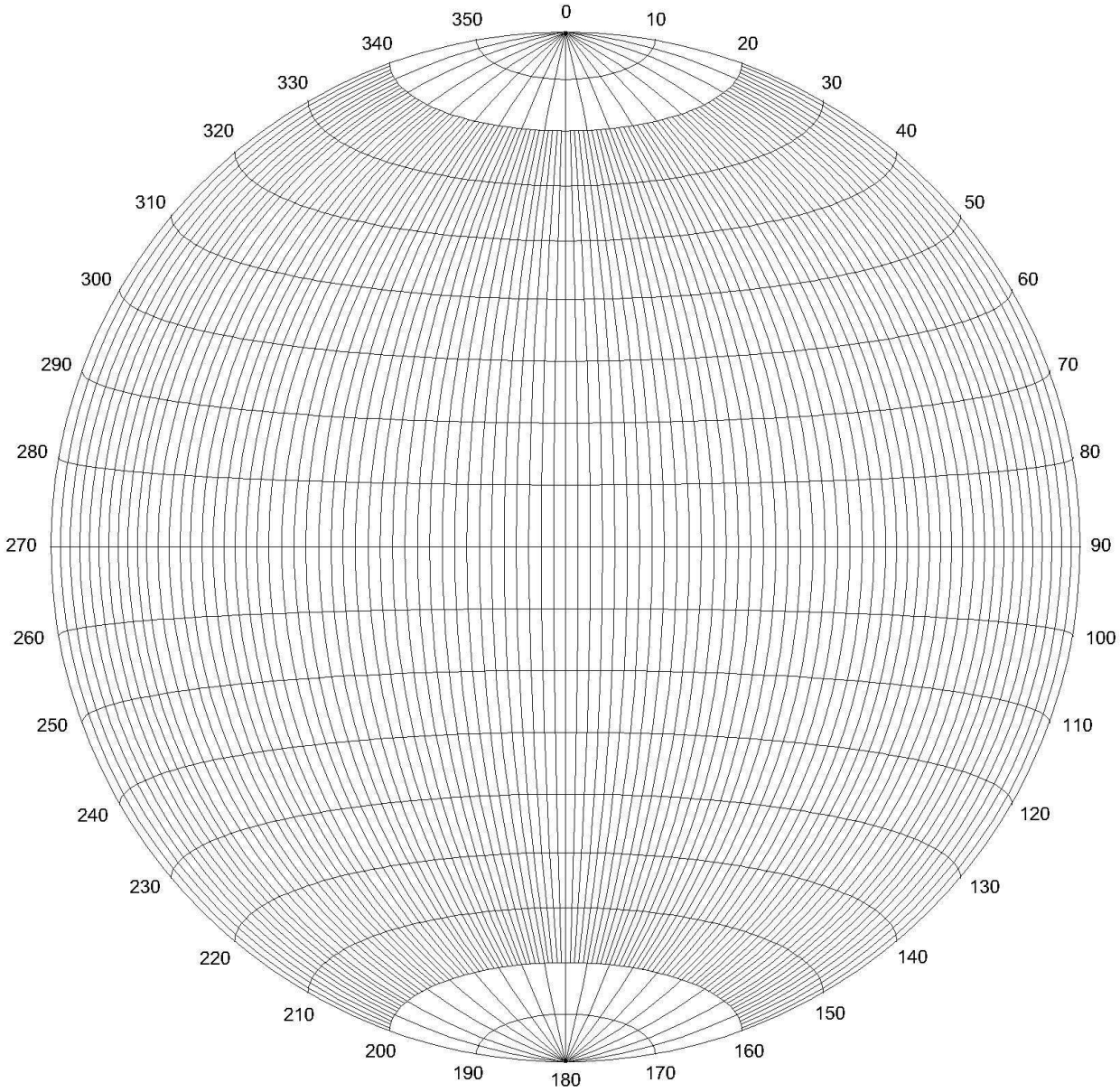
Prilog br. 18

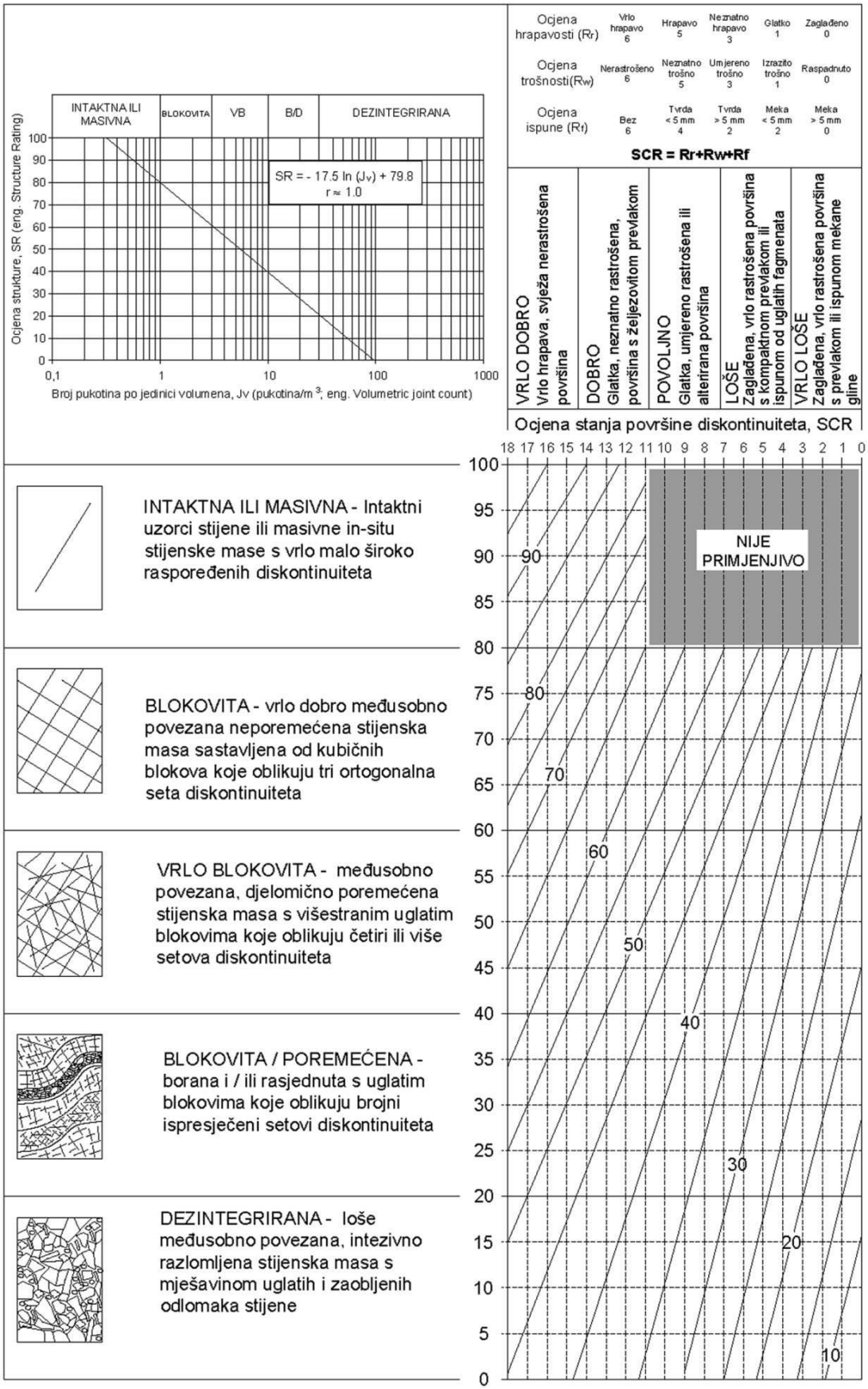
BROJAČKA MREŽA



Prilog br. 19

EKVATORIJALNA MREŽA



Prilog br. 20

DIJAGRAM ZA ODREĐIVANJE VRIJEDNOSTI GSI KLASIFIKACIJE