

**Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet**

Preddiplomski studij

GEOTEHNIČKO INŽENJERSTVO

7. predavanje

Opis i čvrstoća diskontinuiteta



- Opis diskontinuiteta
- Čvrstoća diskontinuiteta

ISRM predlaže sljedećih 10 elemenata opisivanja diskontinuiteta te način njihovog određivanja:

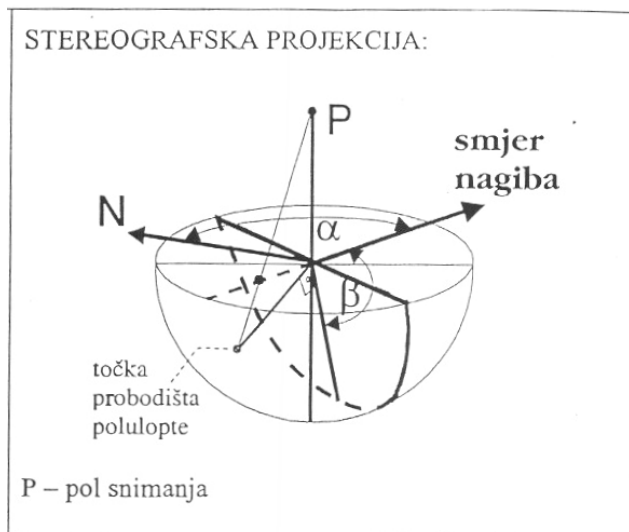
1. Orijentacija diskontinuiteta
2. Razmak diskontinuiteta
3. Neprekinutost
4. Hrapavost stijenki diskontinuiteta
5. Čvrstoća zidova diskontinuiteta
6. Širina diskontinuiteta
7. Ispuna diskontinuiteta
8. Voda u diskontinuitetima
9. Broj grupa diskontinuiteta
10. Veličina blokova

Prema ISRM-u **orijentacija diskontinuiteta** u prostoru određena je sljedećim kutevima:

- nagibom diskontinuiteta
- smjerom nagiba diskontinuiteta

Nagib diskontinuiteta predstavlja kut koji najveći nagib zatvara sa površinom.

Smjer nagiba je azimut kuta koji zatvara smjer najvećeg nagiba sa sjeverom pri čemu se kao referentna uzima horizontalna ravnina. Smjer nagiba mjeri se u smjeru kazaljke na satu.



Orijentacija diskontinuiteta na geološkim kartama označava se:

smjer nagiba/nagib.

Smjer nagiba treba se izraziti troznamenkastim brojem (npr. 025°), a nagib diskontinuiteta treba se izraziti dvoznamenkastim brojem (npr. 45°). Nagib diskontinuiteta može biti od 00° do 90°, dok se smjer nagiba diskontinuiteta može kretati od 000° do 360°.

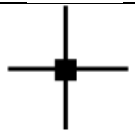
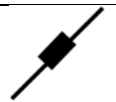
Smjer nagiba i nagib definira **vektor nagiba**.

Orijentacija diskontinuiteta može se mjeriti kompasom i klinometrom te fotogrametrijskim metodama.

Dostupne su različite metode prezentiranja orijentacije diskontinuiteta:

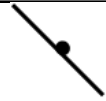
- *simboli ucrtani u geološke karte,*
- *perspektivne skice,*
- *rozete diskontinuiteta,*
- *stereografska projekcija.*

• simboli ucrtani u geološke karte

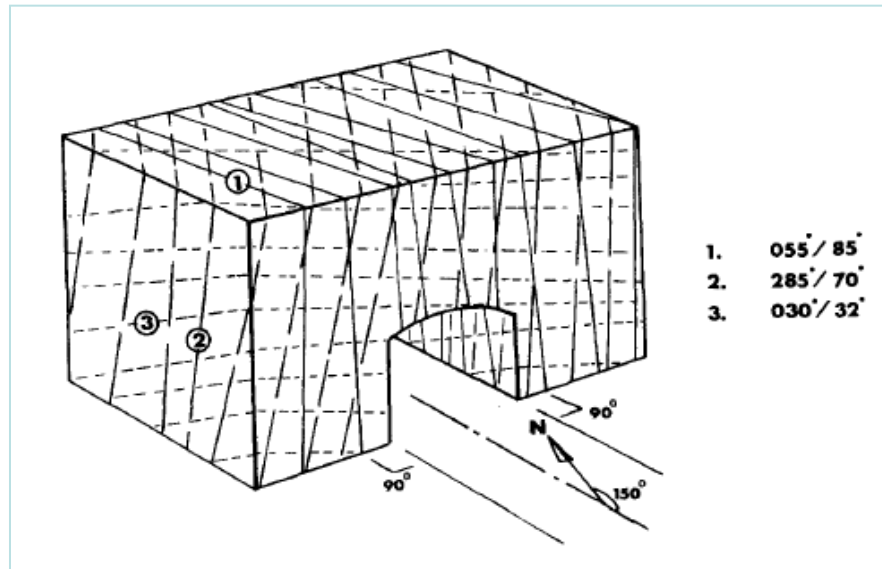
	Reprezentira diskontinuitet s nagibom od 45° i pravcem pružanja diskontinuiteta kako je prikazano linijom. Smjer nagiba naznačen je simbolom (down-dip symbol) .
	Reprezentira horizontalni diskontinuitet.
	Reprezentira vertikalni diskontinuitet s pravcem pružanja prikazanim linijom.

Ograničenost prostorom na geološkoj mapi ograničuje broj diskontinuiteta koji se mogu prikazati na ovakav način.

Dodatni detalji mogu se prikazati korištenjem različitih simbola koji su dani u sljedećoj tablici.

		
pukotine	slojevitost	folijacija

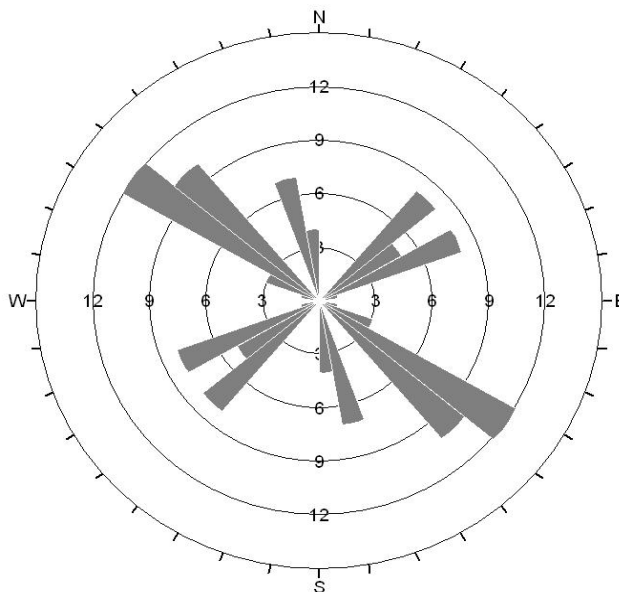
- perspektivne skice



Mnogi tipovi konstrukcija mogu se prikazati na ovakav idealiziran način, kao što su portali tunela, poprečni presjeci tunela ili velikih kaverni, stijenski pokosi, upornjaci brana.

Na ovakvim prikazima, preporučuje se numerirati grupe diskontinuiteta, prikazati orijentaciju relativno u odnosu na sjever, te popisati nagib i smjer nagiba pokraj skice. Ove karakteristike mogu se prikazati i na fotografijama diskontinuiteta.

- rozete diskontinuiteta



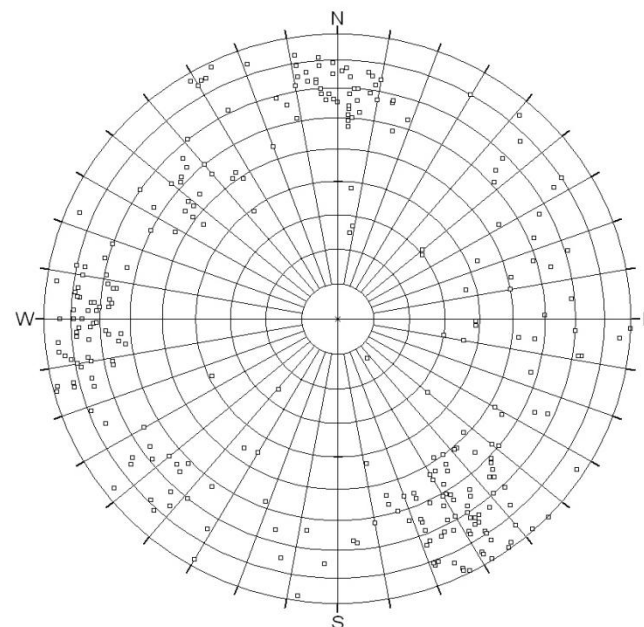
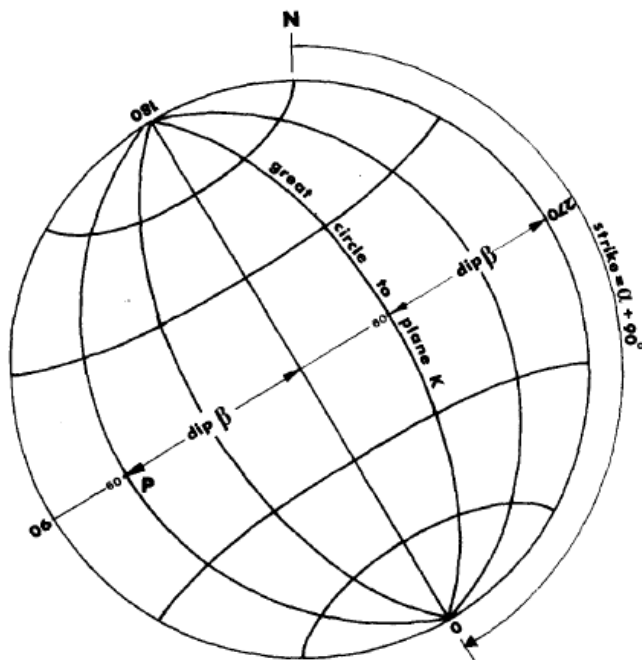
Uobičajena metoda prikaza velikog broja orijentacija diskontinuiteta je pomoću rozeta. Mjerenja se prikazuju na jednostavnoj ruži kompasa, označenoj od 0 do 360°.

Broj opažanja prikazan je uzduž radijalnih osi, koristeći se numeriranim koncentričnim kružnicama koje prikazuju 3, 6, 9 opažanja ili po potrebi. Raspon nagiba za svaki diskontinuitet ne može se prikazati unutar rozete pa se stoga prikazuje izvan kružnice.

- **stereografska projekcija**

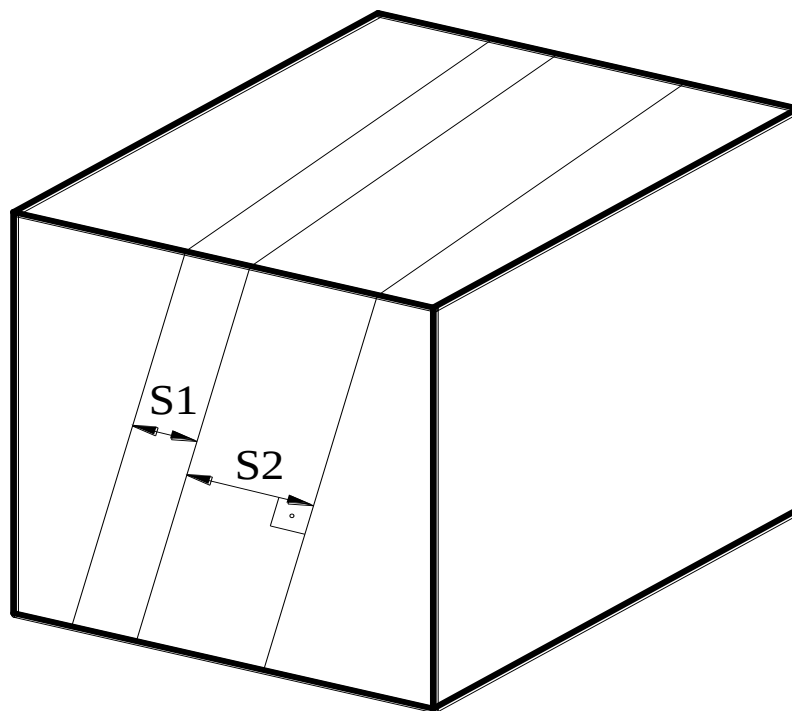
Za precizno prikazivanje orijentacije diskontinuiteta u stereografskoj projekciji koriste se različite vrste stereografskih mreža:

- ekvatorijalna mreža,
- polarna mreža – Schmidtova mreža ili mreža jednakih površina.



Razmak diskontinuiteta određuje se kao udaljenost između susjednih ravnina diskontinuiteta mjerena okomito na susjedne ravnine.

Frekvencija diskontinuiteta je inverzna razmaku diskontinuiteta, a označava broj diskontinuiteta po metru.



OPIS	RAZMAK
izrazito mali razmak	$< 20\text{mm}$
vrlo mali razmak	20 – 60 mm
mali razmak	60 – 200 mm
srednji razmak	200 – 600 mm
veliki razmak	600 – 2000 mm
vrlo veliki razmak	2000 – 6000 mm
izrazito veliki razmak	$> 6000\text{ mm}$

Razmak diskontinuiteta prema ISRM-u

Cilj određivanja razmaka diskontinuiteta je utvrđivanje veličine blokova stijenskih pokosa što utječe na cjelokupnu stabilnost stijenskih pokosa.

Ako je stijenska masa prožeta većim brojem diskontinuiteta, njihov je prosječni razmak manji, a veličina bloka također je manja što ukazuje na razlomljeniju stijensku masu.

Razmak diskontinuiteta može se mjeriti mjernom trakom koja mora biti postavljena tako da površinski trag diskontinuiteta koji mjerimo bude okomit na mjernu traku. Ako mjerna traka nije okomita, treba napraviti korekciju razmaka s obzirom na nagib mjerne trake. Duljina mjerenja udaljenosti susjednih diskontinuiteta ne smije biti manja od 3 metra i trebala bi biti deset puta veća od procijenjenog razmaka diskontinuiteta. Udaljenosti se trebaju mjeriti s točnošću od 5 % od njihove apsolutne vrijednosti.

Najmanji kut između mjerne trake i promatrane grupe diskontinuiteta mjeri se kompasom. Bilježi se kut zaokružen na 5°.

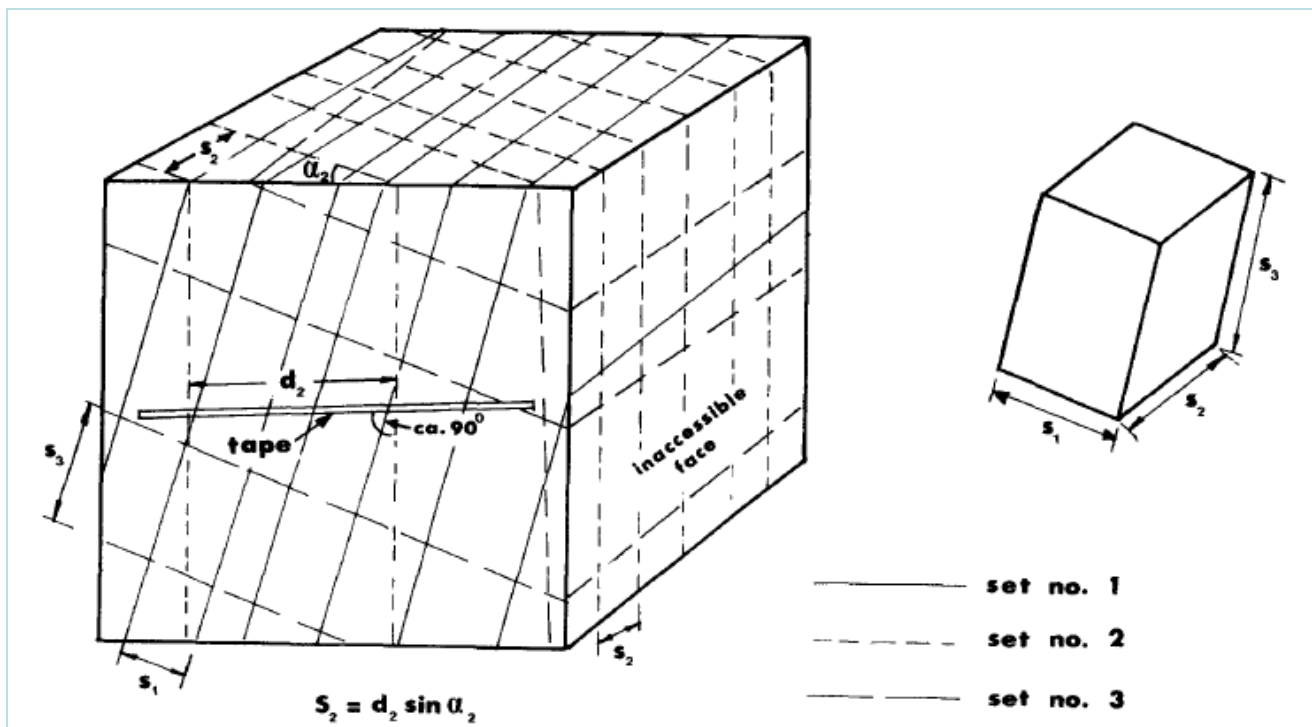
Razmak diskontinuiteta izračuna se prema izrazu:

$$S = d_m \sin \alpha$$

d_m – izmjerena udaljenost,

α – nagib mjerne trake u odnosu na diskontinuitet.

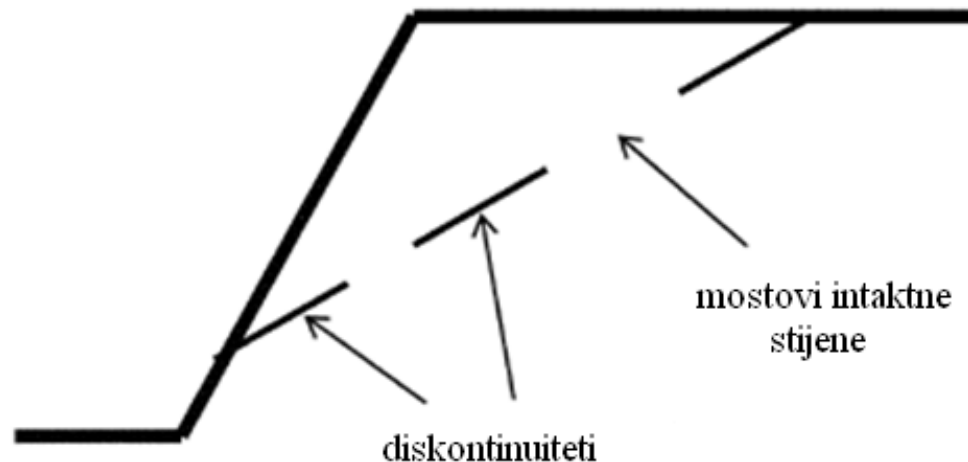
Ako se pretpostavi neprekinutost, prosječna vrijednost razmaka za određenu grupu diskontinuiteta (S_1 , S_2), predstavlja prosječnu dimenziju tipičnog stijenskog bloka.



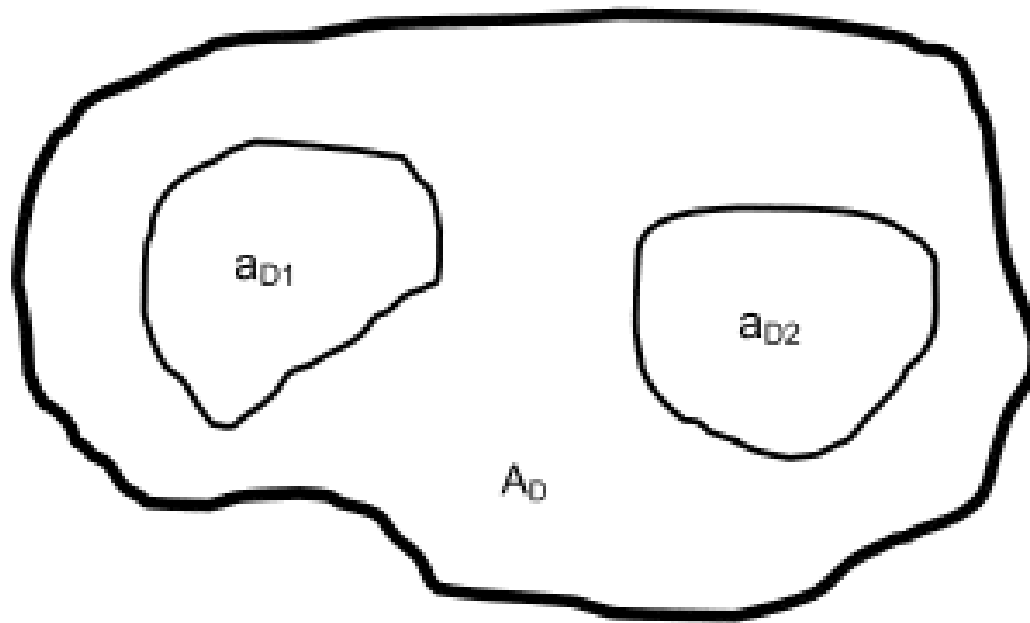
Mjerenje razmaka diskontinuiteta prema ISRM-u

Različite definicije neprekinutosti

- Neprekinutost predstavlja mjeru veličine površine diskontinuiteta unutar promatrane ravnine.
- Neprekinutost je omjer ukupne duljine diskontinuiteta i ukupne duljine klizne plohe, ako se pretpostavi da se slom događa duž ravne linije.



➤ U odnosu na ravninu diskontinuiteta (ravnina u stijenskoj masi koja se sastoji od diskontinuiranog dijela i intaktnih dijelova stijenske mase), neprekinutost diskontinuiteta se definira kao onaj dio površine koji je diskontinuiran.



Neprekinutost se može samo ugrubo kvantificirati promatranjem duljine tragova diskontinuiteta na izloženoj površini. Razlog tome je što izdanci obuhvaćaju mali dio stijenske mase te su dvodimenzionalni.

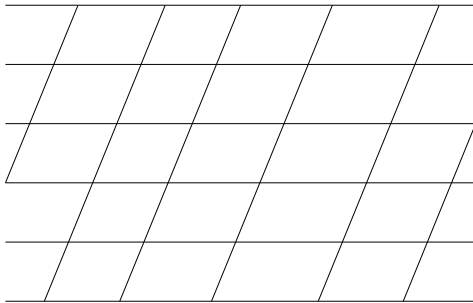
Neprekinutost diskontinuiteta na temelju izmjerenih tragova može se opisati za svaku grupu diskontinuiteta prema sljedećoj tablici.

Vrlo mala neprekinutost	$< 1 \text{ m}$
Mala neprekinutost	$1 - 3 \text{ m}$
Srednja neprekinutost	$3 - 10 \text{ m}$
Velika neprekinutost	$10 - 20 \text{ m}$
Vrlo velika neprekinutost	$> 20 \text{ m}$

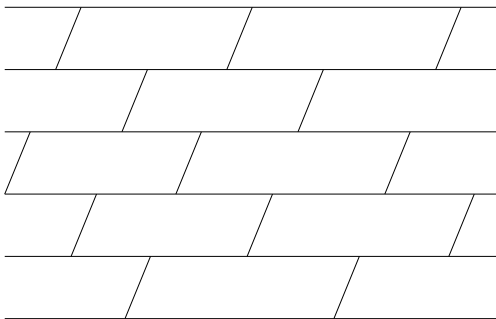
Određivanje neprekinutosti diskontinuiteta važno je za analize stabilnosti stijenskih pokosa zbog toga što ima veliki utjecaj na čvrstoću diskontinuiteta. Konzervativno se pretpostavlja 100 % neprekinutosti.

Grupe diskontinuiteta mogu biti:

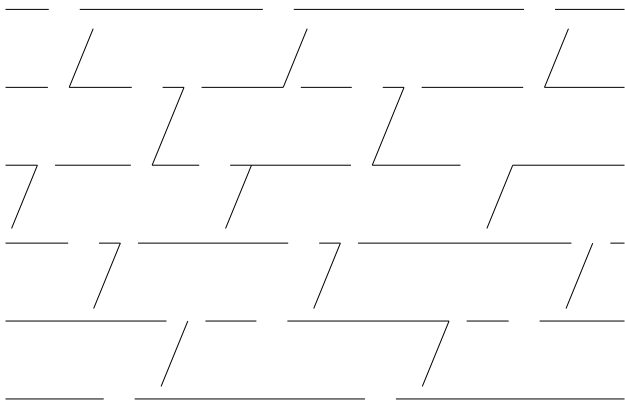
- neprekinute
- poluprekinute i
- prekinute



U oba smjera prostiru se u potpunosti neprekinuti diskontinuiteti.

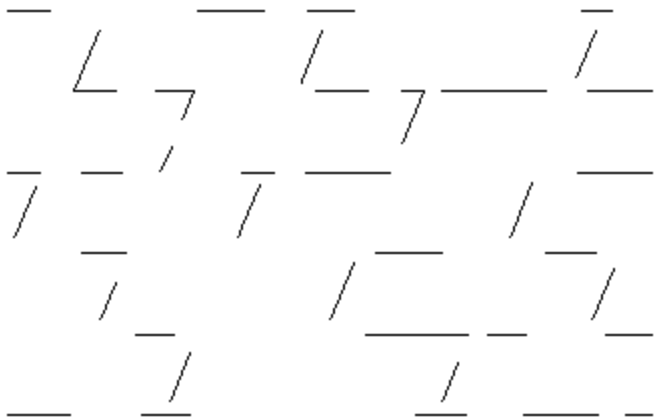


U jednom smjeru neprekinuti diskontinuitet, a u drugom smjeru prekinuti diskontinuitet.



Poluprekinuti u uzdužnom smjeru - u slučaju analize klizanja duž ovakvih diskontinuiteta, treba se pretpostaviti neprekinutost budući da su mostovi relativno kratki u odnosu na diskontinuirani dio.

Prekinuti u poprečnom smjeru.



U oba smjera prekinuti diskontinuiteti.



O hrapavosti stijenki diskontinuiteta potencijalno ovisi posmična čvrstoća diskontinuiteta, pogotovo u slučaju neispunjenih diskontinuiteta.

Prema ISRM-u pojam hrapavosti diskontinuiteta može se opisati pomoću:

Valovitosti – „veliki vrhovi“ uzrokuju dilatanciju, tj. izdizanje kod smicanja jer su preveliki da bi došlo do drobljenja.

Neujednačenosti - hrapavost manjih razmjera, tj. „neravnine“ koje se drobe kod smicanja. Osim ako je čvrstoća zidova diskontinuiteta velika ili su naprezanja mala može doći do dilatancije.

Procjena hrapavosti diskontinuiteta može se podijeliti na dva opća pristupa koja uključuju subjektivni opis diskontinuiteta te kvalitativna mjerenja.



HRAPAVOST ZIDOVA DISKONTINUITETA

ZAVOD ZA
GEOTEHNIKU

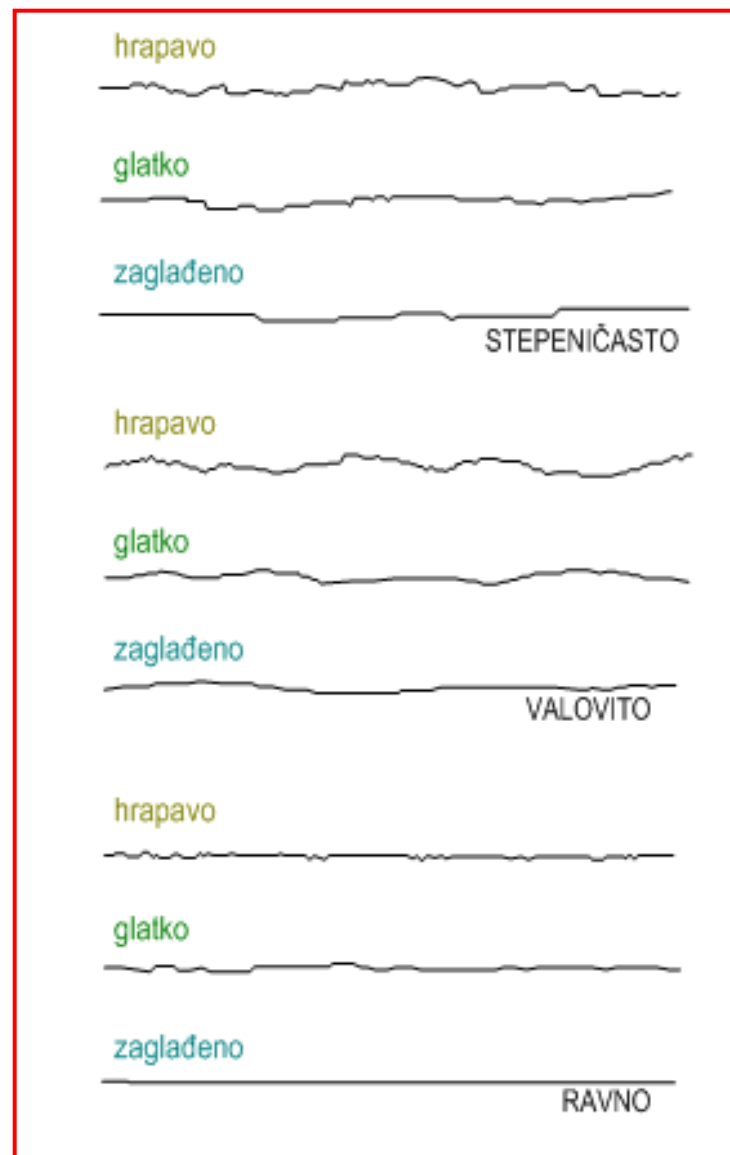
U preliminarnoj fazi kartiranja terena hrapavosti se određuje opisnim metodama koje se temelje na dva mjerila opažanja:

- centimetarsko mjerilo,
- metarsko mjerilo.

I	Hrapavo, stepeničasto
II	Glatko, stepeničasto
III	Zaglađeno, stepeničasto
IV	Hrapavo, valovito
V	Glatko, valovito
VI	Zaglađeno, valovito
VII	Hrapavo, ravno
VIII	Glatko, ravno
IX	Zaglađeno, ravno

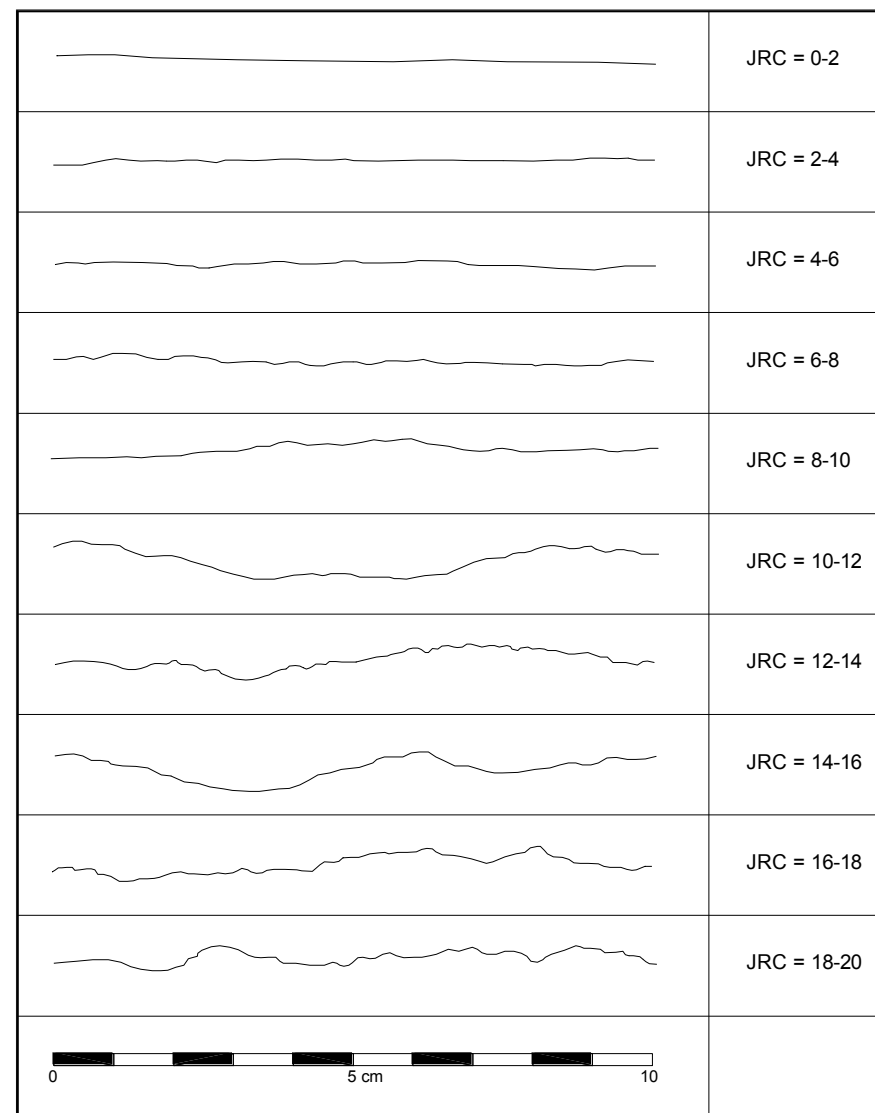
Hrapavost prema ISRM-u

Profili hrapavosti karakteristični za svaki od navedenih 9 razreda u prethodnoj tablici prikazani su na slici.



Koeficijent hrapavosti diskontinuiteta **JRC** je broj koji se može dobiti iz usporedbe stanja površine diskontinuiteta sa standardiziranim profilima.

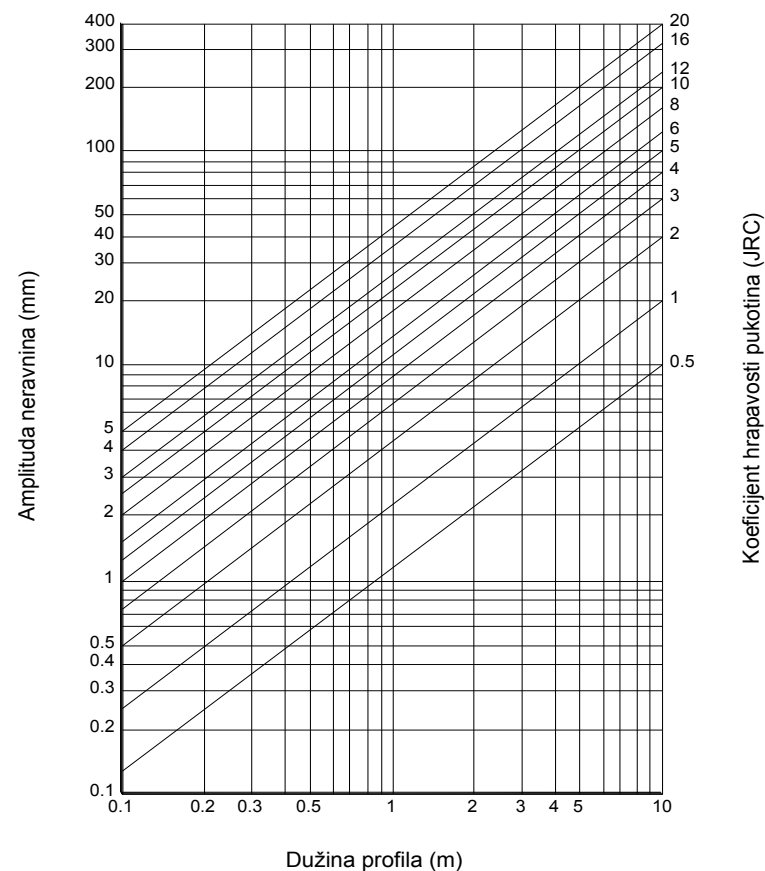
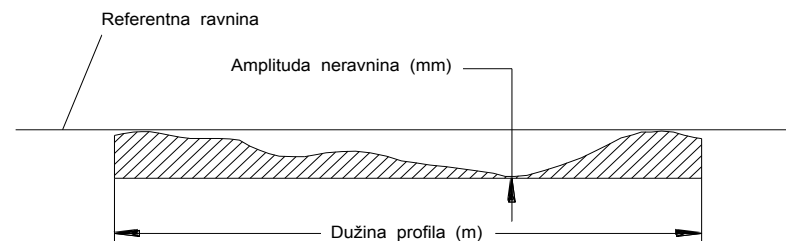
Postupak se provodi **vizualnom usporedbom** hrapavosti diskontinuiteta i standardiziranih profila diskontinuiteta s pridruženim vrijednostima JRC. Pri usporedbi je problematična reprezentativnost odabranog uzorka diskontinuiteta, što predstavlja glavni problem pri procjeni i usvajanju posmične čvrstoće diskontinuiteta. Mjerodavni diskontinuitet *in situ* može biti dugačak više metara ili desetina metara, a vrijednost JRC mora predstavljati cijelu dužinu diskontinuiteta.



Profili hrapavosti i odgovarajuće vrijednosti JRC

➤ Alternativna metoda određivanja JRC.

Metoda se svodi na određivanje amplitude neravnine u odnosu na referentnu liniju diskontinuiteta i duljinu mjernog profila kojeg reprezentira određeni JRC.





Tlačna čvrstoća stijenske mase koja čini zidove diskontinuiteta utječe na posmičnu čvrstoću diskontinuiteta, pogotovo u slučaju diskontinuiteta bez ispune kada su zidovi diskontinuiteta u neposrednom kontaktu.

U pravilu za sve stijenske mase čvrstoća zidova stijenske mase manja je u odnosu na čvrstoću intaktne stijene.

Uzrok smanjenja čvrstoće zidova u odnosu na intaktnu stijenu je izloženost zidova atmosferilijama odnosno kemijskom i mehaničkom trošenju koje je izraženije na površini, nego u unutrašnjosti stijenske mase. Debljina sloja smanjene čvrstoće može varirati od mikroskopskih veličina pa sve do nekoliko centimetara.

Opis stanja trošenja intaktne stijene i cijele stijenske mase bitan je pri opisu čvrstoće zidova diskontinuiteta.



ČVRSTOĆA ZIDOVA DISKONTINUITETA

ZAVOD ZA
GEOTEHNIKU

Pojam	Opis	
svježa	nema vidljivog znaka trošenja; moguća manja promjena boje na površinama glavnih diskontinuiteta	I
slabo trošna	promjena boje ukazuje na trošenje intaktne stijene i površine diskontinuiteta; promjena boje zbog trošenja može zahvatiti svu intaktnu stijenu, koja je nešto slabija nego u svojem svježem stanju	II
srednje trošna	manje od polovice intaktne stijene raspadnuto je u tlo; svježa stijena, eventualno promijenjene boje, prisutna je samo kao okvir diskontinuiteta	III
jako trošna	više od polovice intaktne stijene raspadnuto je u tlo. svježa stijena, eventualno promijenjene boje, prisutna je kao okvir diskontinuiteta	IV
potpuno trošna	sva intaktna stijena raspadnuta je u tlo; originalna struktura stijenske mase je još uvijek većinom netaknuta	V
rezidualno tlo	sva intaktna stijena raspadnuta je u tlo; struktura i tekstura stijenske mase potpuno je uništena; velika promjena volumena, ali nije došlo do transporta tla	VI

Stupanj trošenja stijenske mase

Pojam	Opis
svježa	nema vidljivih znakova trošenja intaktne stijene
gubitak boje	boja svježe intaktne stijene je promijenjena; treba se naznačiti stupanj promjene boje u odnosu na početnu; ako je došlo do promjene boje pojedinačnih mineralnih konstituenata također treba spomenuti
dekompozirana	originalna tekstura intaktne stijene ostala je netaknuta, ali su neka ili sva mineralna zrna dekompozirana
dezintegrirana	originalna tekstura intaktne stijene ostala je netaknuta; stijena je rastrošena, ali mineralna zrna nisu dekompozirana

Stupanj trošenja intaktne stijene

Stupnjevi trošenja intaktne stijene dani u prethodnoj tablici mogu se dalje podijeliti koristeći kvalitativne opise (npr. neznatno dekompozirana, umjereno dekompozirana, potpuno dekompozirana).



Prethodno navedeni postupci koji su vezani uz trošenje intaktne stijene i stijenske mase opisnog su karaktera.

Tlačna čvrstoća zidova diskontinuiteta koja utječe na posmičnu čvrstoću i deformabilnost diskontinuiteta može se ispitivati pomoću jednostavnih indeksih testova:

- geološkim čekićem,
- Schimdtovim čekićem.

Indeksne metode ispitivanja čvrstoće zidova diskontinuiteta kvantitativnog su karaktera.

Schmidtov čekić preporučuje se za dobivanje čvrstoće zidova koja se koriste za proračun posmične čvrstoće prema Bartonovom kriteriju.



ČVRSTOĆA ZIDOVA DISKONTINUITETA

ZAVOD ZA
GEOTEHNIKU

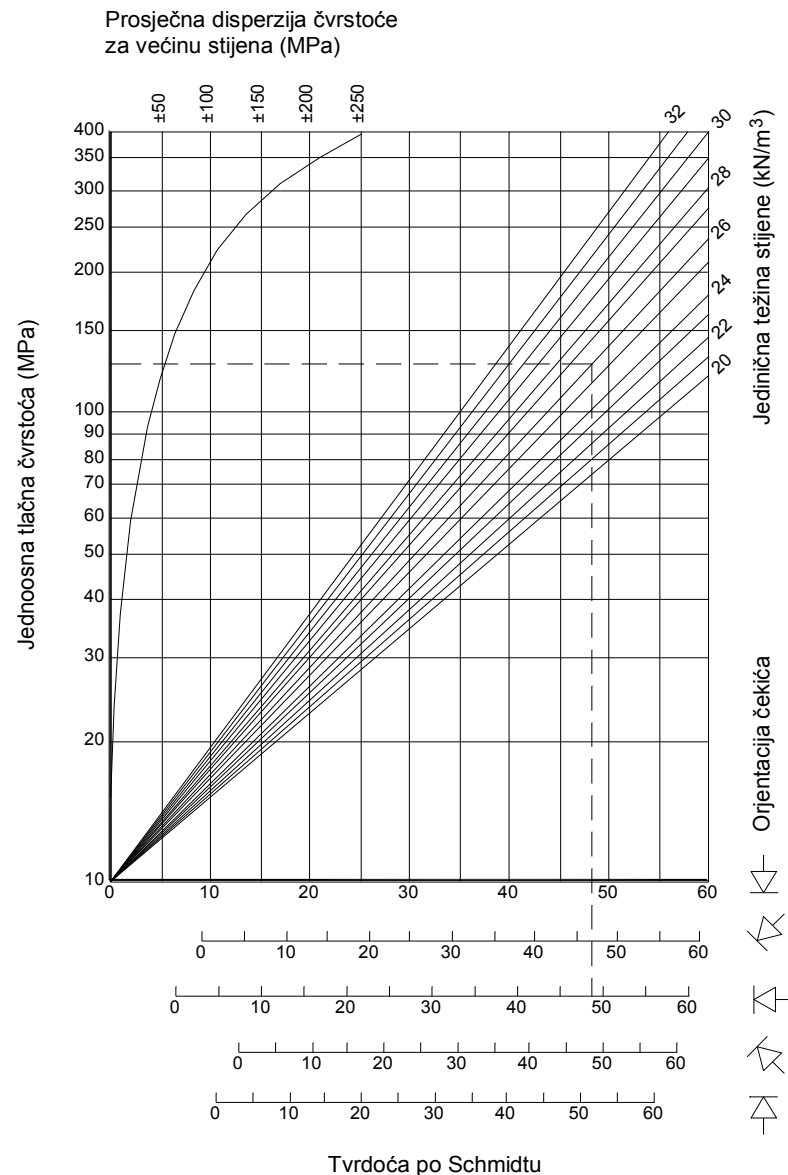
Razred	Opis	Terenska identifikacija	Jednoaksijalna tlačna čvrstoće [MPa]
S1	vrlo meka glina	lak utisak šakom nekoliko centimetara	< 0.025
S2	meka glina	lak utisak palcem nekoliko centimetara	0.025 – 0.05
S3	očvrsnuta glina	palac se može utisnuti nekoliko centimetara uz umjeren napor	0.05 – 0.10
S4	tvrda glina	palac ostavlja udubinu ali može se utisnuti samo uz veliki napor	0.10 – 0.25
S5	vrlo tvrda glina	nokat palca ostavlja udubinu	0.25 – 0.50
S6	čvrsta glina	nokat palca ostavlja udubinu samo uz veliki napor	> 0.50
R0	izrazito meka stijena	nokat palca ostavlja udubinu	0.25 – 1.00
R1	vrlo meka stijena	mrvi se pod udarcima šiljka geološkog čekića; može se guliti džepnim nožićem	1.00 – 5.00
R2	meka stijena	može se guliti džepnim nožićem uz poteškoće; plitko udubljenje može se napraviti čvrstim udarcem šiljkom geološkog čekića	5.00 – 25
R3	srednje čvrsta stijena	ne može se strugati ili guliti džepnim nožićem; uzorak se može slomiti jednim čvrstim udarcem geološkim čekićem	25 – 50
R4	čvrsta stijena	kako bi se slomio uzorak, potrebno je više od jednog udaraca geološkim čekićem	50 – 100
R5	vrlo čvrsta stijena	kako bi se slomio uzorak, potrebno je puno udaraca geološkim čekićem	100 – 250
R6	izrazito čvrsta stijena	udarcem geološkim čekićem uzorak se može samo okrhnuti	> 250

➤ *Procjena čvrstoće zidova diskontinuiteta ispitivanjem geološkim čekićem*

➤ Određivanje tlačne čvrstoće zidova diskontinuiteta Schmidtovim čekićem (sklerometrom)

Schmidtov čekić postavlja se okomito na ispitivani zid diskontinuiteta. Površina stijenske mase treba se ispitivati u saturiranim uvjetima što daje najkonzervativnije rezultate.

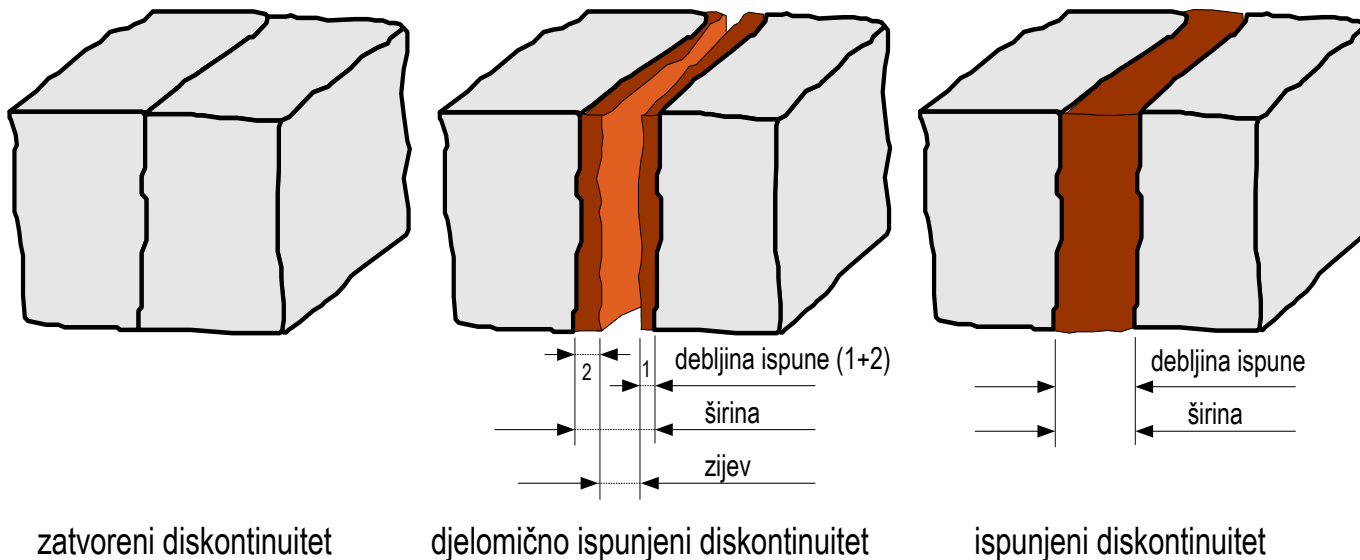
Ovim ispitivanjem određuje se tlačna čvrstoća zidova diskontinuiteta **JCS**. JCS je jedan od parametara posmične čvrstoće diskontinuiteta prema Bartonu.



Širina diskontinuiteta definira se kao okomita udaljenost između zidova otvorenog diskontinuiteta. Prostor između zidova može biti ispunjen zrakom ili vodom.

Diskontinuiteti s ispunom pripadaju skupini zatvorenih diskontinuiteta te se govori o širini zatvorenih diskontinuiteta ili debljini ispune.

Zijev diskontinuiteta je onaj dio širine diskontinuiteta koji ne zauzima ispuna.



ŠIRINA	OPIS
< 0.1 mm	Vrlo uski
0.1 – 0.25 mm	Uski
0.25 – 0.5 mm	Djelomično otvoreni
0.5 – 2.5 mm	Otvoreni
2.5 – 10 mm	Umjereno široki
> 10 mm	široki
1 – 10 cm	Vrlo široki

Širina diskontinuiteta prema ISRM-u

U većini potpovršinske stijenske mase širina diskontinuiteta je vrlo mala, najčešće manja od pola milimetra, uspoređujući s desetinama, stotinama ili tisućama milimetara širine diskontinuiteta nastalih ispiranjem ili drugim vanjskim utjecajem. Osim ako diskontinuiteti nisu iznimno glatki i ravni širina diskontinuiteta od 0.1 do 1 mm neće imati veliko značenje na posmičnu čvrstoću diskontinuiteta. Unatoč tome, indirektno kao posljedica propusnosti, čak i najtanji diskontinuiteti mogu imati utjecaj na promjenu efektivnih normalnih naprezanja, a time i na posmičnu čvrstoću.

Ispuna je naziv za materijal koji ispunjava prostor između stijenki diskontinuiteta, npr. kalcit, klorit, glina, breče i sl.

Diskontinuiteti su obično ispunjeni materijalom loše kvalitete, nekoherentnim (pijesak, šljunak) ili koherentnim (prah, glina) tlima koji mogu biti odneseni vodom ili gravitacijskim silama te materijalom koji je rezultat mehaničkog i kemijskog trošenja okolnih stijenskih blokova.

Fizikalno ponašanje ispune ovisi o mnogo faktora od kojih su najvažniji sljedeći:

- mineraloški sastav materijala ispune,
- veličina i vrsta čestica,
- OCR,
- sadržaj vode i propusnost,
- prethodni pomak,
- hrapavost zidova,
- širina ispune,
- mrvljenje zidova.



Voda u diskontinuitetu proučava se kod stijenskih masa kod kojih je primarna vodopropusnost stijene daleko manja od procjeđivanja kroz diskontinuitete.

Procjeđivanje kroz diskontinuitete ovisi o tome da li su diskontinuiteti otvoreni ili zatvoreni, a ako su ispunjeni o vrsti materijala ispune.

Procjeđivanje također ovisi i o pritiscima u stijenskoj masi oko pukotine, otpornosti materijala ispune na unutrašnju eroziju, te o pritisku vode.

Otvoreni diskontinuiteti	
Razred	Opis
I	diskontinuitet je vrlo uzak i suh, tok vode duž diskontinuiteta ne čini se vjerojatnim
II	diskontinuitet je suh bez naznaka tečenja vode
III	diskontinuitet je suh, ali postoje naznake tečenja vode, npr. hrđave mrlje
IV	diskontinuitet je vlažan, ali nije prisutna slobodna voda
V	diskontinuitet ukazuje na procjeđivanje, prisutne povremene kapljice vode, ali nema kontinuiranog protoka
VI	prisutan je kontinuirani protok vode (procjeniti u l/min i opisati pritisak kao slab, srednji ili visok)

Voda u otvorenim diskontinuitetima

Ispunjeni diskontinuiteti	
Razred	Opis
I	Materijal ispune je prekonsolidiran i suh, značajan protok nije vjerojatan zbog male propusnosti
II	Materijal ispune je vlažan, ali nije prisutna slobodna voda.
III	Materijal ispune je mokar, povremene kapi vode
IV	Materijal ispune pokazuje znakove ispiranja, kontinuiran protok vode (l/min)
V	Materijal ispune lokalno je ispran, značajan protok vode uzduž ispranih kanala (l/min, pritisak:slab, srednji ili visok)
VI	Materijal ispune potpuno je ispran, veliki pritisci vode (l/min, pritisak:slab, srednji ili visok)

Voda u ispunjenim diskontinuitetima

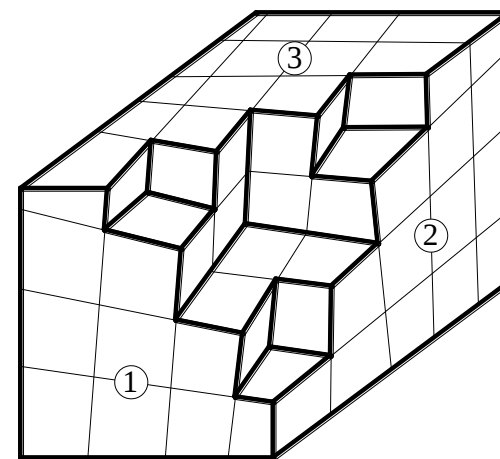
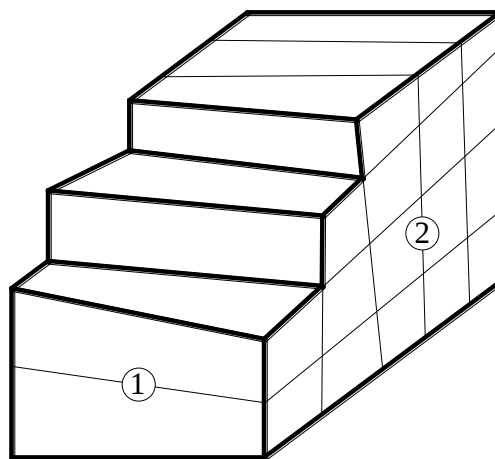
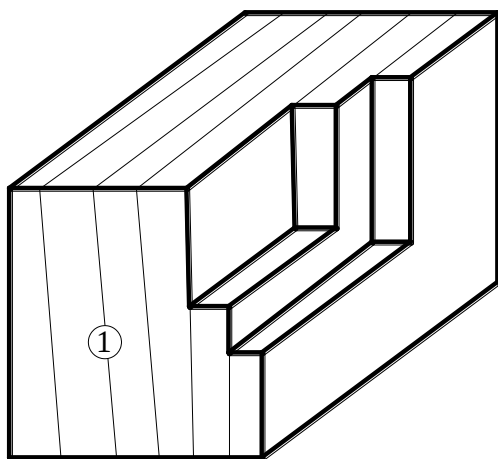
U slučaju inženjerskih konstrukcija u stijeni koje djeluju kao drenaža za stijensku masu, npr. tunel, od velike je pomoći procjena ukupnog protoka za pojedine dijelove konstrukcije.

Razred	Opis
I	suhi zidovi, nema procjeđivanja
II	manje procjeđivanje, odrediti kapanje iz pojedinih diskontinuiteta
III	srednji dotok, odrediti diskontinuitete s kontinuiranim protokom (procijeniti u l/min/10 m duljine iskopa)
IV	veliki dotok, odrediti diskontinuitete s velikim protokom (procijeniti u l/min/10 m duljine iskopa)
V	iznimno veliki dotok, odrediti izvor iznimnog dotoka (procijeniti u l/min/10 m duljine iskopa)

Mehaničko ponašanje i izgled stijenske mase izrazito ovisi o broju grupa diskontinuiteta koji presijecaju jedni druge. Broj grupa diskontinuiteta posebno utječe na mehaničko ponašanje budući da određuje do koje mjere se stijenska masa može deformirati bez loma u samoj stijeni .

Broj grupa diskontinuiteta može se opisati prema sljedećoj shemi:

I	Masivna stijena, povremene slučajne pukotine
II	Jedna grupa diskontinuiteta
III	Jedna grupa diskontinuiteta sa slučajnim pukotinama
IV	Dvije grupe diskontinuiteta
V	Dvije grupe diskontinuiteta uz povremene slučajne pukotine
VI	Tri grupe diskontinuiteta
VII	Tri grupe diskontinuiteta uz povremene slučajne pukotine
VIII	Četiri ili više grupa diskontinuiteta
IX	Razlomljena stijena



Primjer stijenske mase s jednim , dva i tri sustava diskontinuiteta

Broj grupa diskontinuiteta funkcija je veličine promatranog područja. Treba razlikovati grupu diskontinuiteta u odnosu na pojedinačni slučajni diskontinuitet. Ovisno o promatranom inženjerskom problemu, određeni diskontinuiteti mogu se javljati u grupi ili se moraju promatrati kao pojedinačni diskontinuiteti.

Individualne grupe diskontinuiteta obično se određuju mjerenjem orijentacije pojedinačnih diskontinuiteta. Potrebno je mjeriti i do 150 diskontinuiteta, a broj grupa može se odrediti iz polarnih konturnih dijagrama. Ako je orijentacija diskontinuiteta konzistentna, pažljivo uzorkovanje može reducirati potreban broj diskontinuiteta koji se trebaju mjeriti kako bi se odredio broj grupa diskontinuiteta.

Vizualno prepoznavanje broja grupa diskontinuiteta treba biti popraćeno nekim sustavom numeriranja radi identifikacije. Na primjer, numeriranje po utjecaju na stabilnost.

Veličina bloka može se opisati pomoću indeksa veličine bloka I_b , tj. prosječne dimenzije tipičnih blokova ili pomoću volumetrijskog broja pukotina J_v , tj. ukupnog broja diskontinuiteta koji presijecaju jedinični volumen stijenske mase.

➤ **Indeks veličine bloka** može se procijeniti vizualnim odabirom nekoliko tipičnih veličina blokova te uzimanjem prosječnih dimenzija tih blokova. Budući da indeks može biti u rasponu od nekoliko milimetara do nekoliko metara, točnost mjerenja od 10% trebala bi biti dovoljna.

U slučaju sedimentnih stijena, dvije međusobno okomite grupe diskontinuiteta i podloga često čine oblik kocke ili prizme. U tom slučaju, I_b može se izraziti na sljedeći način:

$$I_b = \frac{S_1 + S_2 + S_3}{3}$$

gdje su:

S_1 , S_2 i S_3 –razmaci međusobno paralelnih diskontinuiteta.

➤ **Volumetrijski broj pukotina** označava broj pukotina unutar jediničnog volumena stijenske mase, a može se izračunati prema sljedećem izrazu:

$$J_v = \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \frac{1}{S_3} + \dots$$

gdje su

S_1 , S_2 i S_3 – razmaci međusobno paralelnih diskontinuiteta.

Opis	J_v [pukotina/m ³]
Vrlo veliki blokovi	< 1.0
Veliki blokovi	1 – 3
Srednji blokovi	3 – 10
Mali blokovi	10 – 30
Vrlo mali blokovi	> 30
Razlomljena stijenska masa	> 60

*Klasifikacija stijenskih blokova u ovisnosti o
volumetrijskom broju pukotina*

Veličina blokova uvjetovana je razmakom diskontinuiteta, brojem grupa diskontinuiteta i njihovom neprekinutošću.

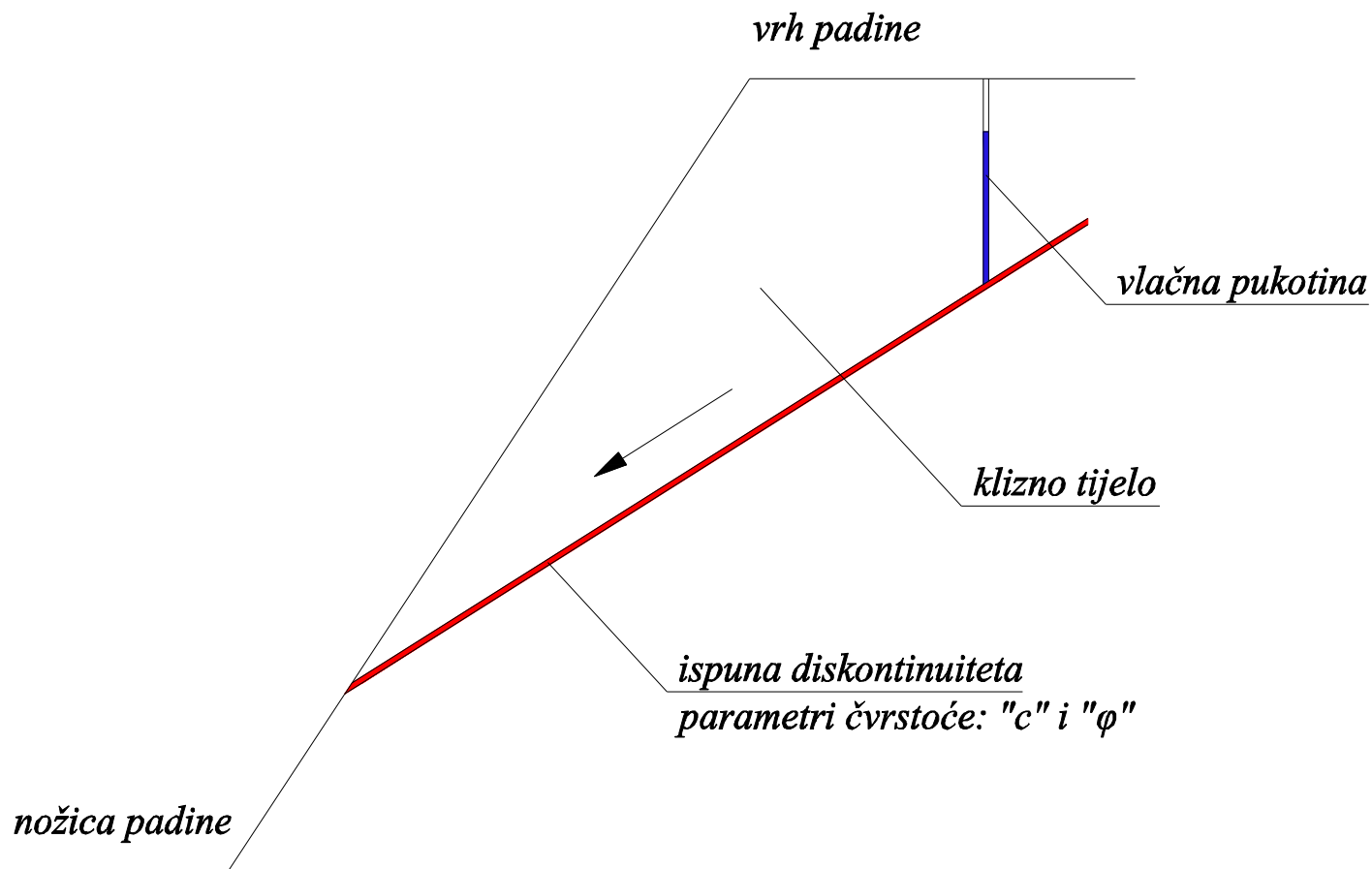
Broj grupa i orijentacija diskontinuiteta određuju oblik bloka, koji može formirati kocku, romboedar, tetraedar. Pravilni geometrijski oblici ipak su izuzetak budući da su diskontinuiteti bilo koje grupe rijetko paralelni. Najpravilniji oblici javljaju se u sedimentnim stijenama.

Kod podzemnih iskopa, veličina bloka određuje hoće li se stijenska masa ponašati kao kontinuum ili diskontinuirani materijal na koji utječu svojstva i geometrija diskontinuiteta.

Kod stijenskih pokosa, mali blokovi mogu uzrokovati tip sloma koji nalikuje slomu tla umjesto translacije ili prevrtanja koji su vezani uz diskontinuiranu stijensku masu.

Stijenska masa može biti opisana na sljedeći način kako bi se dobio dojam o veličini i obliku blokova:

- **masivna** – nekolicina pukotina na vrlo širokom razmaku,
- **blokovita** – blokovi podjednake veličine,
- **tabličasta** – jedna dimenzija puno manja od ostalih dviju,
- **stupičasta** – jedna dimenzija puno veća od ostalih dviju,
- **nepravilna** – velike razlike u veličinama i obliku blokova,
- **razlomljena** – velik broj pukotina .



Ukupna posmična čvrstoća stijenske mase funkcija je čvrstoće diskontinuiteta i čvrstoće mostova u intaktnoj stijenskoj masi koji razdvajaju diskontinuitete. U analizama čvrstoće stijenske mase i čvrstoće diskontinuiteta presudnu ulogu ima veličina normalnih naprezanja na plohu sloma, odnosno na plohu diskontinuiteta.

Na malim dubinama, gdje su naprezanja u stijenskoj masi mala, slom intaktne stijenske mase je rijedak, a ponašanje stijenske mase u pravilu je određeno čvrstoćom diskontinuiteta. Pri analizi ponašanja sustava pojedinačnih blokova intaktne stijene, nužno je poznavanje faktora koji utječu na posmičnu čvrstoću diskontinuiteta, koji razdvajaju predmetne blokove stijenske mase.

Posmična čvrstoća potpuno ravnog diskontinuiteta linearna je funkcija normalnih naprezanja na plohi diskontinuiteta i odgovara *Mohr-Coulombovom* kriteriju čvrstoće:

$$\tau = c + \sigma_N \cdot \operatorname{tg} \varphi$$

gdje su:

τ – vršna posmična čvrstoća diskontinuiteta,

σ_N – efektivno normalno naprezanje,

c – kohezija ispune diskontinuiteta,

φ – kut unutrašnjeg trenja diskontinuiteta.

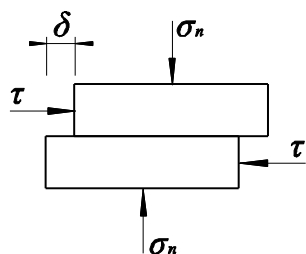
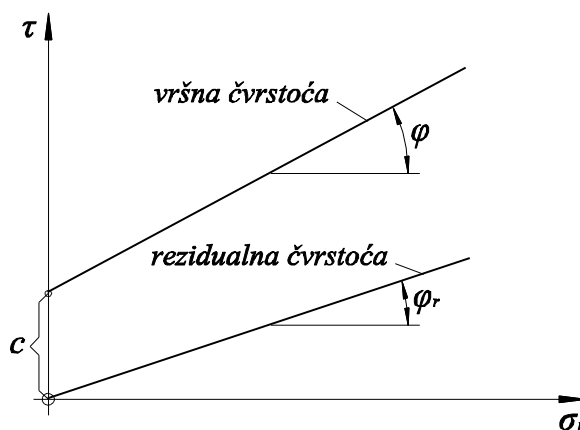
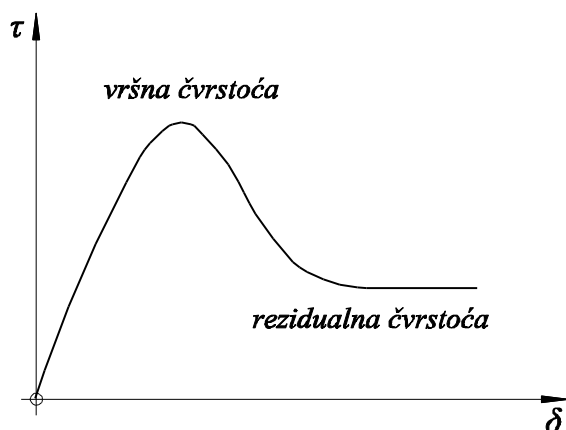
Stvarna kohezija postoji jedino kod diskontinuiteta s ispunom koja posjeduje koheziju ili kod međuslojnih diskontinuiteta sa cementnim vezivom.

Kad se uslijed smicanja po diskontinuitetu dosegne vršna čvrstoća, posmična naprezanja padaju na vrijednost **rezidualne posmične čvrstoće**, uz pad vrijednosti kohezije na vrijednost '0' prema izrazu:

$$\tau = \sigma_N \cdot \operatorname{tg} \varphi_r$$

gdje je:

φ_r – rezidualni kut unutrašnjeg trenja



δ - pomak

σ_n - efektivno normalno naprezanje

τ - posmično naprezanje

c - kohezija

φ - kut unutrašnjeg trenja

φ_r - rezidualni kut unutrašnjeg trenja

*Ispitivanje posmične
čvrstoće
diskontinuiteta*

Bazični kut trenja ' φ_b ' predstavlja osnovni pojam za razumijevanje posmične čvrstoće diskontinuiteta. Bazični kut trenja ' φ_b ' približno je jednak rezidualnom kutu trenja ' φ_r ', ali se isti određuje pokusom smicanja, na prerezanoj plohi intaktne stijene. Kriterij čvrstoće za bazični kut trenja glasi:

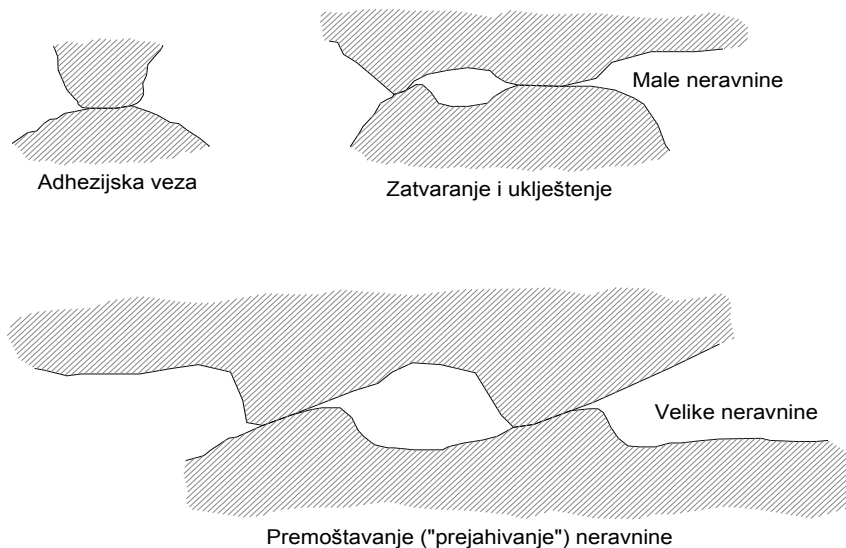
$$\tau = \sigma_N \cdot \operatorname{tg} \varphi_b$$

gdje je: φ_b – bazični kut unutrašnjeg trenja.

Prirodne površine diskontinuiteta u stijenskoj masi nikad nisu potpuno glatke kao one dobivene rezanjem ili zaglađivanjem intaktne stijene za potrebe određivanja bazičnog kuta trenja stijenske mase. Valovitost i neravnine prirodne površine diskontinuiteta imaju značajan utjecaj na ponašanje diskontinuiteta pri smicanju. Površinska hrapavost značajno utječe na povećanje posmične čvrstoće diskontinuiteta. Pri tome ne postoji značajna ovisnost ovih veličina o tipu i litologiji stijenske mase.

Faktori koji utječu na posmičnu čvrstoću diskontinuiteta su:

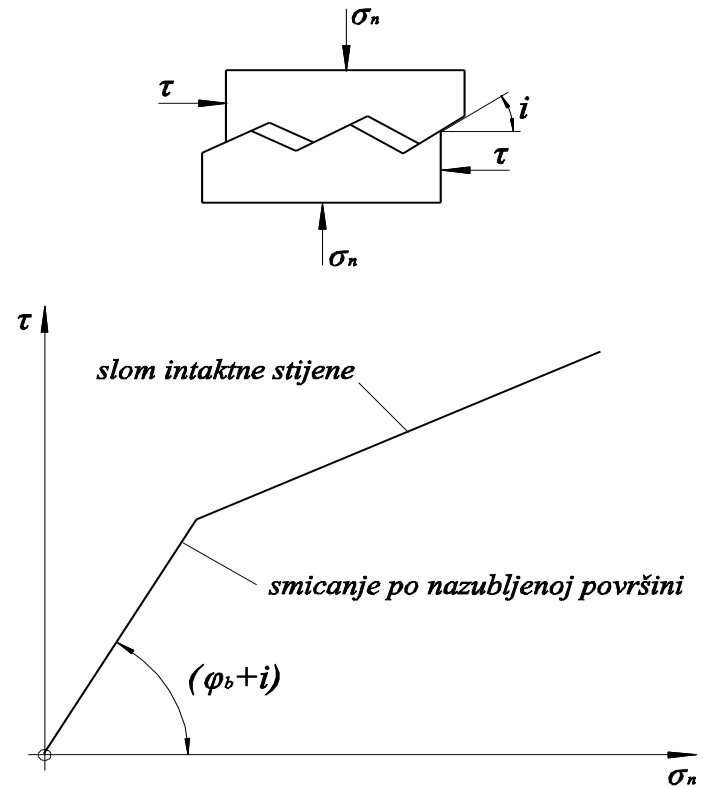
1. adhezijske veze
2. zatvaranje i uklještenje uslijed manjih neravnosti pukotina
3. premoštavanje (prejahivanje) većih neravnina pukotina zonama kontakta pukotina
4. premoštavanje između pukotina prostorom intaktne stijenske mase ili zatvorenih neravnina u pukotini



Adhezijske veze u stijenskoj masi u pravilu su malih vrijednosti. Uklještenja u pukotinama uslijed malih neravnina površina pukotina i oštećenje istih pri smicanju pridonose vrijednosti posmične čvrstoće diskontinuiteta. Premošćavanje većih neravnina značajna su u razmatranjima posmične čvrstoće površine diskontinuiteta većih razmjera.

Patton je dokazao utjecaj površinske hrapavosti diskontinuiteta na povećanje posmične čvrstoće pokusom na uzorcima kojima su površine nazubljene u obliku pile.

Pattonov pokus na uzorcima nazubljene površine



Smicanje ovog uzorka izaziva pomak i izdizanje po kosini nagnutim površinama, što u krajnosti rezultira pojavom dilatiranja (povećanja volumena) uzorka. Posmična čvrstoća *Pattonovog* uzorka može se prikazati kao:

$$\tau = \sigma_N \cdot \operatorname{tg}(\varphi_b + i)$$

gdje su: φ_b – bazični kut unutrašnjeg trenja,
 i – nagib nazubljene površine,

Gornja jednačba vrijedi pri maloj vrijednosti normalnih naprezanja, kad posmični pomak nastupa kao posljedica pomaka po nagnutoj nazubljenoj površini. Pri većim vrijednostima normalnih naprezanja može biti dosegnuta posmična čvrstoća intaktne stijene, pa slom nastupa slomom zuba, a ne smicanjem po nazubljenoj površini. To je ponašanje stoga bliže ponašanju pri slomu intaktne stijenske mase nego značajkama trenja diskontinuiteta.

Patton sugerira da se pri većim vrijednostima normalnih naprezanja koristi *Mohr–Coulombov* kriterij čvrstoće s rezidualnim kutom unutarnjeg trenja i prividnom kohezijom.

Kao proširenje *Pattonovog* kriterija sloma, na osnovi rezultata istraživanja predloženo je više drugih kriterija posmične čvrstoće diskontinuiteta. *Jaeger* je predložio kriterij koji se svojom krivuljom bolje slaže s rezultatima pokusa smicanja, ali nije obrazložio mehanizam smicanja. *Ladanyi i Archambault* predložili su kriterij koji je zavisn od stupnja dilatiranja i odnosa aktivne površine smicanja u odnosu na ukupnu površinu uzorka. *Barton i drugi* na osnovi brojnih analiza ponašanja prirodnih diskontinuiteta stijenske mase razvili su empirijski kriterij posmične čvrstoće diskontinuiteta koji uključuje **hrapavost površine diskontinuiteta** i **tlačnu čvrstoću zidova diskontinuiteta**. *Bartonov* kriterij posmične čvrstoće diskontinuiteta glasi:

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan \left[JRC \cdot \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \varphi_b \right]$$

gdje su: *JRC*– koeficijent hrapavosti diskontinuiteta (*Joint Roughness Coefficient*),

JCS – tlačna čvrstoća zidova diskontinuiteta (*Joint Wall Compressive Strength*).

Na osnovi brojnih rezultata ispitivanja pukotina, modela pukotina i rezultata objavljenih u literaturi *Barton i Bandis* predložili su korekciju vrijednosti **koeficijenta hrapavosti diskontinuiteta JRC** koja uzima u obzir veličinu promatrane površine.

$$JRC_n = JRC_0 \cdot \left(\frac{L_n}{L_0} \right)^{-0.02 \cdot JRC_0}$$

gdje su: JRC_0 i L_0 – vrijednosti koje se odnose na veličinu laboratorijskog uzorka od 100 mm, gdje je L dužina diskontinuiteta,
 JRC_n i L_n – vrijednosti koje se odnose na veličinu *in situ* bloka.

Zbog veće vjerojatnosti oslabljenja na većoj površini diskontinuiteta, vjerovatna je i pojava smanjenja prosječne čvrstoće zidova diskontinuiteta, JCS , proporcionalno povećanju površine diskontinuiteta.

Barton i Bandis predložili su korekciju vrijednosti **tlačne čvrstoće zidova diskontinuiteta JCS** koja uzima u obzir veličinu promatrane površine.

$$JCS_n = JCS_0 \cdot \left(\frac{L_n}{L_0} \right)^{-0.02 \cdot JCS_0}$$

gdje su: JCS_0 i L_0 – vrijednosti koje se odnose na veličinu laboratorijskog uzorka od 100 mm, gdje je L dužina diskontinuiteta
 JCS_n i L_n – vrijednosti koje se odnose na veličinu *in situ* bloka

Bandis je predložio empirijski izraz koji korigira vrijednosti koeficijenta hrapavosti diskontinuiteta JRC i tlačne čvrstoće zidova diskontinuiteta JCS s porastom veličine promatranog područja. Obje veličine, JRC i JCS , se s porastom veličine diskontinuiteta smanjuju, što znači da se efekti premoštavanja i neravnina diskontinuiteta smanjuju s porastom veličine promatranog područja diskontinuiteta.

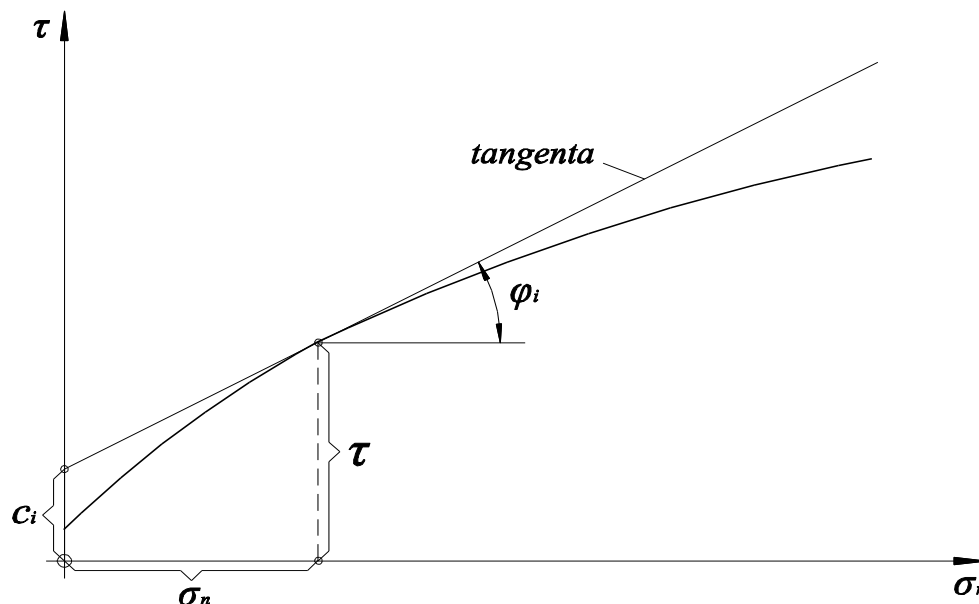
Za diskontinuitete koji ne sadržavaju pukotinsku ispunu, stvarna vrijednost kohezije je jednaka nuli. Stvarna kohezija je efekt koji nastaje kao posljedica ispune diskontinuiteta npr. glinovitom ispunom, ispucalih mostova u stijenskoj masi između diskontinuiteta ili zatvorenih neravnina na površini diskontinuiteta.

Slom u mostovima stijenske mase između diskontinuiteta znatno je manje analiziran od ponašanja smicanja duž diskontinuiteta. Postoji opće slaganje da do sloma u mostovima stijenske mase između diskontinuiteta uglavnom dolazi zbog prekoračenja tlačne čvrstoće. Slom smicanjem javlja se kao sekundarni fenomen koji formira smičuće diskontinuitete koji mogu povezati odvojene diskontinuitete. Kriterij čvrstoće za ovakve mehanizme sloma u stijenskoj masi nije u potpunosti razvijen, što zahtijeva dodatna istraživanja.

Ukoliko je u stijenskoj masi prisutan pritisak vode, smanjuju se normalna naprezanja na površini diskontinuiteta. U uvjetima stalne razine vode bez tečenja, normalna naprezanja smanjuju se za veličinu pornog tlaka na veličinu efektivnih naprezanja, a vrijede prethodno uspostavljeni odnosi s vrijednostima efektivnih naprezanja.

Iako je odnos normalnih i posmičnih naprezanja u kriteriju čvrstoće diskontinuiteta točnije opisan *Bartonovim* nelinearnim kriterijem, pri analizama u mehanici stijena često se koriste vrijednosti parametara čvrstoće linearnog *Mohr–Coulombovog* kriterija, kohezija ‘ c ’ i kut unutarnjeg trenja ‘ φ ’. Stoga je nužno odrediti ekvivalentne vrijednosti parametra čvrstoće linearnog *Mohr–Coulombovog* kriterija, kohezije i kuta unutarnjeg trenja u odnosu na nelinearni *Bartonov* kriterij čvrstoće, a u zavisnosti od vrijednosti normalnih naprezanja ‘ σ_n ’.

Na slici je prikazan odnos ekvivalentnih vrijednosti parametara čvrstoće, kohezije ' c ' i kuta unutarnjeg trenja ' φ ', za *Bartonov* kriterij čvrstoće diskontinuiteta za vrijednost normalnih naprezanja ' σ_n '. Vrijednosti parametara čvrstoće, kohezije i kuta unutarnjeg trenja određene su tangentom na *Bartonovu* krivulju za vrijednost normalnih naprezanja ' σ_n '.



Ekvivalentna vrijednost parametara čvrstoće, kohezije ' c ' i kuta unutarnjeg trenja ' φ ' za vrijednost normalnih naprezanja ' σ_n '

Vrijednost kuta unutarnjeg trenja ‘ φ ’, za vrijednost normalnih naprezanja ‘ σ_n ’, dobiva se iz izraza:

$$\phi_i = \arctan\left(\frac{\partial \tau}{\partial \sigma_n}\right)$$

gdje je:

$$\frac{\partial \tau}{\partial \sigma_n} = \tan\left(JRC \cdot \log_{10} \frac{JCS}{\sigma_n} + \varphi_b\right) - \frac{\pi \cdot JRC}{180 \cdot \ln 10} \left[\tan^2\left(JRC \cdot \log_{10} \frac{JCS}{\sigma_n} + \varphi_b\right) + 1 \right]$$

Ekvivalentna vrijednost kohezije, ‘ c_i ’, određuje se iz izraza:

$$c_i = \tau - \sigma_n \cdot \tan \varphi_i$$

Potrebno je voditi računa da gornji izraz ne vrijedi za $\sigma_n = 0$ i nema uporabnu vrijednost za:

$$\left[JRC \cdot \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \varphi_b \right] > 70^\circ$$

Gornja granica vrijednosti za ‘ σ_n ’, je $\sigma_n = JCS$.