

1. ПРЕДМЕТ И МЕТОДЕ МЕХАНИКЕ СТИЈЕНА

1.1. Увод

У грађевинарству се под појмом стијене подразумевају само чврсте камените стијене, а шљункови, пијескови и глине и њихове комбинације се сврставају у категорију тла. Терзаги је дефинисао разлику између тла и стијене према растварању у води односно губитку кохезије. Наиме, уколико се кохезија потапањем узорка у воду губи ради се о тлу, а уколико се она задржава ради се о стијенама.

Под стијенском масом се подразумева стијена одређеног обима као природна и радна средина са својим природним особинама – општим, физичким и структурним.

ПРЕДМЕТ ИЗУЧАВАЊА

Предмет изучавања механике стијена је механичко понашање стијенске масе као природне радне средине изложене датом систему сила и доведене у одређено стање напона. Могу се издвојити следеће пјелине изучавања:

- физичка својства и карактеристике	специфична тежина, запреминска тежина, порозност, водопропустљивост, топлотна и друга својства
- испуцалост	утицај испуцалости на механичко понашање
- природна напрегнутост	природна или примарна напрегнутост као последица гравитације, тектонике и ерозије
- деформабилност	изражава се квантитативно
- механичка отпорност	на притисак, затезање, смицање и тд.
- подземни притисци	механизам настајања, видови испољавања, одређивање правца и интензитета дјеловања на подградне конструкције подземних објеката
- дејство воде	статичко и динамичко
- дејство алата експлозива	проблем резања стијене тј. камена, ископ, бушење, дробљење и хабање
- напони и деформације	код фундарања великих објеката (броне и сл.)
- стабилност падина	Природних падина и вјештачких косина у стијени

- подземни објекти и подземни радови	интеракција стијенске масе и подградне конструкције
- геотехничке мелиорације	побољшање квалитета стијенске масе (ињектирање, сидрење, дренарање)

Побољшање стијенске масе тј. геотехничке мелиорације обухвата:

- сидрење стијенске масе примјеном стијенских сидара – анкера (*rock bolts, anchors*)
- ињектирање стијенских маса (*grouting*)
- дренарање
- коришћење прсканог бетона – торкрета (*shotcrete, gunite*)

1.2. МЕТОДЕ МЕХАНИКЕ СТИЈЕНА

Експерименталне методе имају изузетан значај при истраживању феномена у стијенској маси и генерално се дијеле на: статичке и динамичке са једне стране и лабораторијске и теренске методе са друге стране.

Теренска испитивања имају примаран значај и треба што више да подражавају услове у којима ће се наћи с.маса. након завршетка објекта тј. требају да представљају методе стања напона и деформација у односу на проблем о коме се ради.

За разлику од механике тла, лабораторијска испитивања се начелно не сматрају погодним испитивањем и механике стијена због очигледне разлике у механичком понашању стијенске масе и монолита (неиспуцалог узорка, интактне стијене) при чему се обично у лабораторијама добијају оптимистички резултати. Нека лабораторијска испитивања имају пуни смисао, као што су: одређивање тврдоће и хабања камена чије је познавање неопходно за рјешавање проблема бушења, минирања и резања стијенске масе.

Моделска испитивања се користе за рјешавање практичних проблема и у научно-истраживачке сврхе.

- механички и геотехнички модели се израђују од материјала тако да што више подражавају дисконтинуалност, анизотропију и хетерогеност.
- фотоеластична метода се примјењује када се на терену установи да се стијенска маса може сматрати еластичном средином
- бародинамичка метода у којој центрифуга замјењује дејство земљине теже.

Теоријска метода се ослања на експерименталне резултате и води уопштавању резултата, постављању и описивању математичких законитости и модела. Омогућава се примјена нумеричких метода прорачуна а са тим и увођење већег броја параметара у односу на класичне методе прорачуна. У примјени су највише метода коначних елемената-МКЕ (Finite Element Method) и метода коначних разлика МКР.

1.3. ОСНОВНЕ РАЗЛИКЕ ИЗМЕЂУ ТЛА И СТИЈЕНСКЕ МАСЕ

- | | |
|---------------------------|--|
| 1. СТАРОСТ | - стијенске масе су старе формације а тла су много млађа |
| 2. МЕХАНИЧКА
ОТПОРНОСТ | - за тла је врло мала у односу на стијене |
| 3. ДЕФОРМАБИЛНОСТ | - за тла је врло велика у односу на с.м. |
| 4. УТИЦАЈ ВОДЕ | - на тла је врло велики у односу на с.м. |
| 5. ПРИРОДНО НАПОНСКО | а) квантитативна и б) квалитативна разлика |

а) у тлу су због мале дебљине примарни напони мали у односу на накнадно нанијето оптерећење док су код стијенске масе обично велики због велике дубине.

б) у тлу влада релативно једноставно примарно стање напона индуковано дејством гравитације и Poisson-овим ефектом (бочна деформација услед вертикалног оптерећења). У стијенској маси примарни напони (или природни напони) нису индуковани само дејством гравитације већ и значајним дејством тектонике и ерозије

1.4. Физичка својства стијена

Физичка својства слично као у Механици тла:

- Специфична тежина монолита γ_s
- Запреминска тежина монолита γ_m
- Запреминска тежина стијенске масе γ
- Запреминска тежина стијенске масе под водом γ'
- Порозност n
- Коefицијент порозности e

Топлотна својства стијена

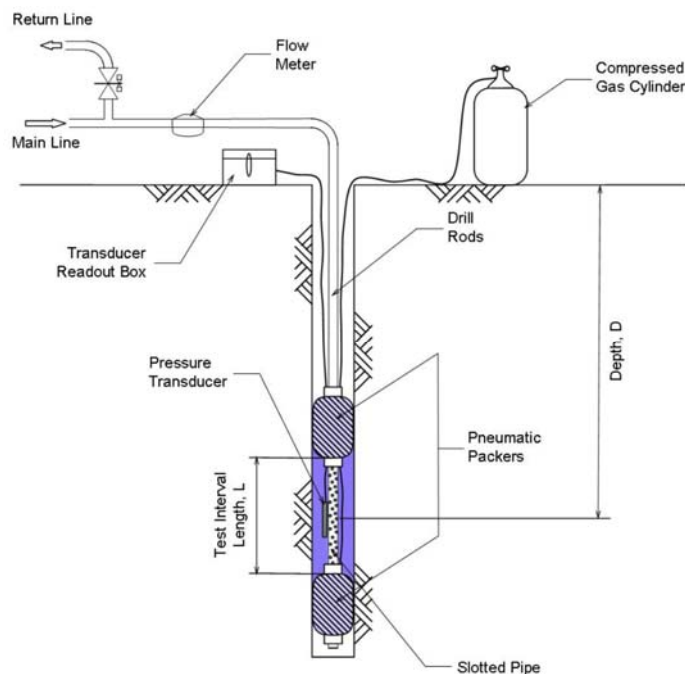
- Специфична топлота стијена c
- Проводљивост топлоте λ
- Термичко ширење стијенске масе-коefицијент линеарне дилатације α

Електрична својства стијена

- Електрична отпорност ρ
- Диелектрична пропустљивост стијенски маса ϵ

1.4.1 Водопропустљивост стијенских маса

Испитивање водопропустљивости стијенске масе се обично обавља теренским опитом наливања - Лижонов опит (Lugeon, 1933). Ради се о теренском опиту водопропустљивости стијенске масе при константном притиску. Тест се спроводи на дијелу бушотине тзв. етажи (*test interval length*) која је изолована коришћењем пнеуматских гумених пакера (бртва, *pneumatic packer*). Прије почетка текста одређује се максимални опитни притисак P_{max} тако да не пређе бочни напон σ_3 на одговарајућој дубини.



Слика 1: Диспозиција за Лижонов тест

Тест се спроводи у 5 фаза (етапа), са одговарајућом вриједношћу притиска воде за сваку фазу. У оквиру једне фазе се пумпањем одговарајуће количине воде одржава константан притисак воде у времену од 10 минута. У првој фази се одржава низак притисак који се у свакој наредној фази повећава до максималне вриједности P_{max} .

Табела 9.1. Типична висина притиска за поједине фазе теста водопропустљивости

Test Stage	Description	Pressure Step
1 st	Low	$0.50 \cdot P_{MAX}$
2 nd	Medium	$0.75 \cdot P_{MAX}$
3 rd	Maximum (peak)	P_{MAX}
4 th	Medium	$0.75 \cdot P_{MAX}$
5 th	Low	$0.50 \cdot P_{MAX}$

Након достизања максималне вриједности, на исти начин се притисак у следећим фазама смањује. Током једне фазе теста, сваког минута се мјере *притисак воде* P и *проток* q . Просјечне вриједности ових величина се користе за мјерење водопропустљивости у свакој фази. Водопропустљивост се изражава кроз јединицу једна лижон 1 LUG који се емпиријски дефинише

као проток од једног литра по минути по метру дужном тестиране етаже при референтном притиску од 1MPa:

$$1 \text{ LUG} = q/L P_0/P$$

гдје је q [lit/min], L [m], P [MPa], $P_0=1 \text{ MPa}$

При идеалним условима (хомогена и изотропна средина) 1 Lug је еквивалентан $1.3 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$.

Веза водопропустљивости и услова испуцалости стијенске масе

Lug	Класификација водопропустљивости	Опсег коефицијента пропустљивости (<i>hydraulic conductivity</i>) cm/sec	Опис пукотина
<1	Врло ниска	<1 x 10 ⁻⁵	Врло стиснуте
1-5	Ниска	1 x 10 ⁻⁵ - 6 x 10 ⁻⁵	Стиснуте
5-15	Умјерена	6 x 10 ⁻⁵ - 2 x 10 ⁻⁴	Поједине дјелимично отворене
15-50	Средња	2 x 10 ⁻⁴ - 6 x 10 ⁻⁴	Неке отворене
50-100	Висока	6 x 10 ⁻⁴ - 1 x 10 ⁻³	Многе отворене
>100	Врло висока	>1 x 10 ⁻³	Отворене на блиском растојању или шупљине

Када се једном утврде вриједности водопропустљивости за сваку фазу, репрезентативна вриједност се усваја на основу у тесту ученог тренда промјене водопропустности. Резултати посредно описују режим тока воде и карактеристике дисконтинуитета.

2. Општа физичко-структурна својства стијенске масе

Стијенска маса је у природи испуцала (дисконтинуална), хетерогена, анизотропна и већ се налази у неком природном стању напрегнутости. Отуда су и основна физичко-структурна својства стијенске масе:

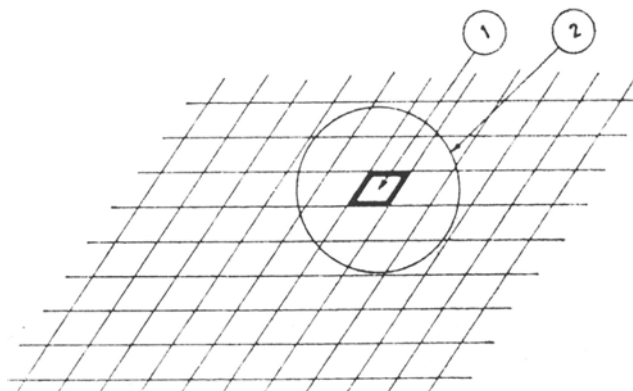
- дисконтинуалност
- природна напрегнутост
- хетерогеност и
- анизотропија

и представљају битна и суштинска својства стијенске масе те се при формирању геотехничког и математичког модела при рјешавању конкретних проблема јављају као неизоставне улазне величине. Сви проблеми механике стијена као реалне средине морају се посматрати имајући у виду параметре општих физичко-структурних својстава, што се уводи као метод у механици стијена.

2.1. ДИСКОНТИНУАЛНОСТ(ИСПУЦАЛОСТ)

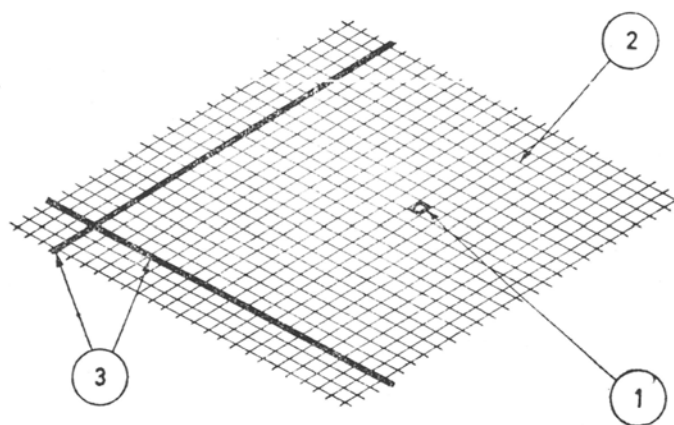
Својство стијенске масе да је прожета пукотинама назива се испуцалост. Са механичког становишта та особина стијенске масе сврстава у групу дисконтинуалних средина, те је отуда и

дисконтинуалност основна структурна особина стијенске масе и та карактеристика је битно разликује од тла које се може сматрати континуумом.



Слика 2: Дисконтинуитет стијенске масе, (1) монолит – јендочлани, неиспуцали дио стијенске масе, (2) вишечлани дио стијенске масе

Дисконтинуитети се јављају као релативна величина у односу на величину посматраног подручја. Наиме, ако се дисконтинуум приказан на слици 3 посматра као велико подручје у оквиру већих дисконтинуитета (3) онда се тада подручје унутар великих дисконтинуитета може сматрати континуумом. Унутар квазиконтинуалног подручја значај мањих дисконтинуитета опада у односу на велике и утицај малих дисконтинуитета се у прорачунски модел уноси кроз просјечне вриједности механичких параметара.

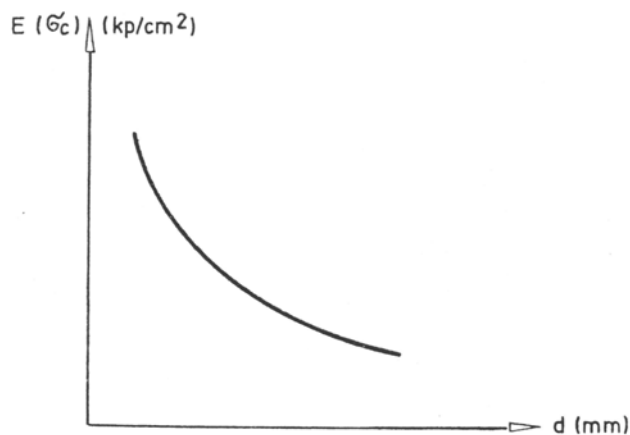


Слика 3: Дисконтинуитет стијенске масе, (1) монолит – континуум, (2) квазиконтинуум, (3) дисконтинуитет вишег реда

Механичка својства монолита битно се разликује од механичких својстава стијенске масе. У првом реду модул еластичности (E), модул деформација (D) и механичка чврстоћа (β) знатно су већи за монолит због утицаја: оштећења, пукотина и прслина, као и утицаја пукотинске испуне на понашање стијенске масе.

Закон по коме се вриједност механичких карактеристика стијенске масе смањује тј. мијења у функцији од посматраног подручја не може се изразити једном континуалном кривом. Дијаграм

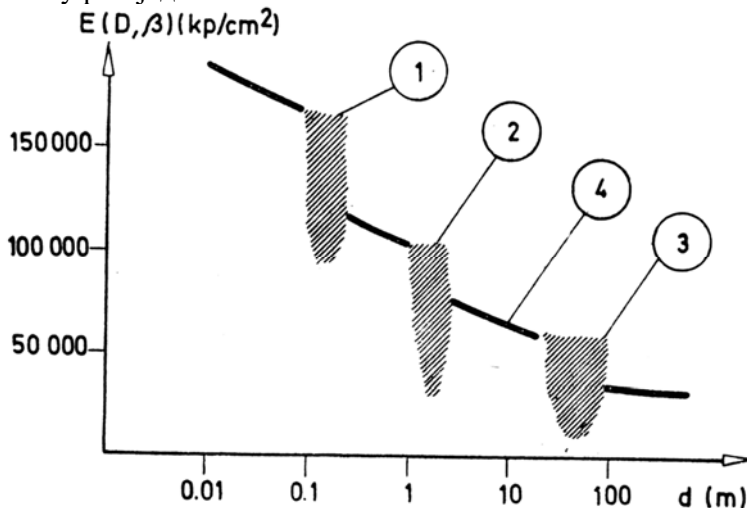
на слици 4 приказује генерални облик зависности механичких карактеристика (E, D, β) одређених на монолиту у зависности од величине узорка (ефекат размјере).



Слика 4: Ефекат размјере

Величина и број оштећења не расте континуално са повећањем посматраног подручја; наиме, постоје подручја која се могу тачно дефинисати у којима долази до јављања нових елемената дисконтинуитета (слика 5). По Müller-у ред величине подручја лежи на око 20-30 цм у вези појаве малих пукотина, или при 10-20 цм при појави великих пукотина (даље се границе могу наћи у реду величине расједа или величине кристала).

Може се говорити о сљедећој законитости: уколико је веће посматрано подручје утолико на механичка својства утиче више кинематичких механизма, почев од помјерања кристалне решетке до помјерања у расједима.



Слика 5: Механичке карактеристике E, D, β у функцији ред величине посматраног подручја. (1) мале пукотине, (2) велике пукотине, (3) врло велике пукотине, (4) квазинконтинуум

2.2. ЕФЕКАТ РЕЛАЦИЈЕ

Уводи се у разматрање релативна величина објекта и величина монолита у испуцалој стијенској маси у којој се гради објекат, и дефинише се као:

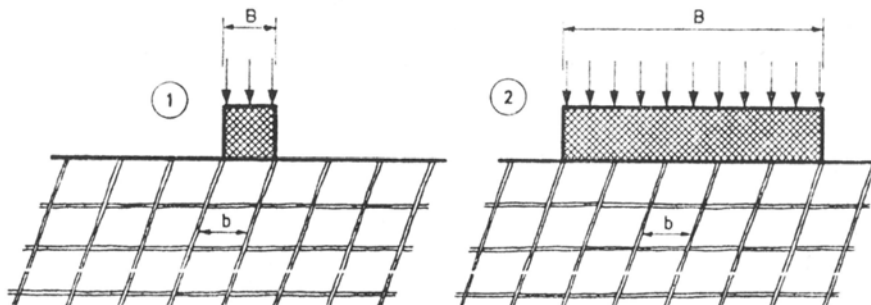
$$r = \frac{b}{B}$$

b – карактеристична димензија монолита;

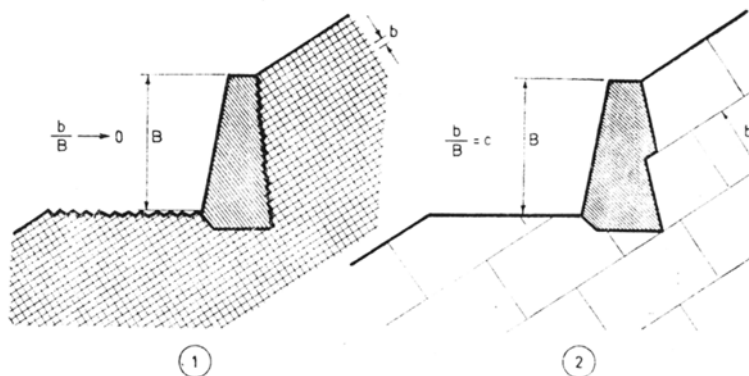
B – карактеристична димензија објекта;

У зависности од величине објекта и величине монолита једна стијенска маса се може посматрати као континуум или дисконтинуум.

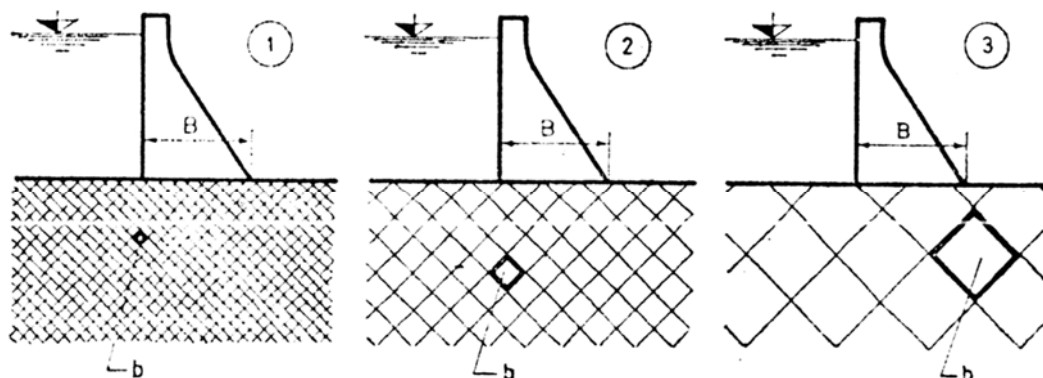
За случај на слици 6-1 адекватно је прорачун провести као да је стијенска маса континуална, односно графички или аналитички како је уобичајено у механици тла. Дисконтинуитету се у прорачун уведе кроз просјечан утицај на механичке параметре (E, D, β или ϕ и ψ). За случај под 2) прорачун је адекватно провести за дисконтинуалну средину. У овом случају поједини монолити се сматрају крутим са међусобним утицајем преко дисконтинуитета или у дискретним тачкама додира.



Слика 6: Ефекат релације-примјер темеља

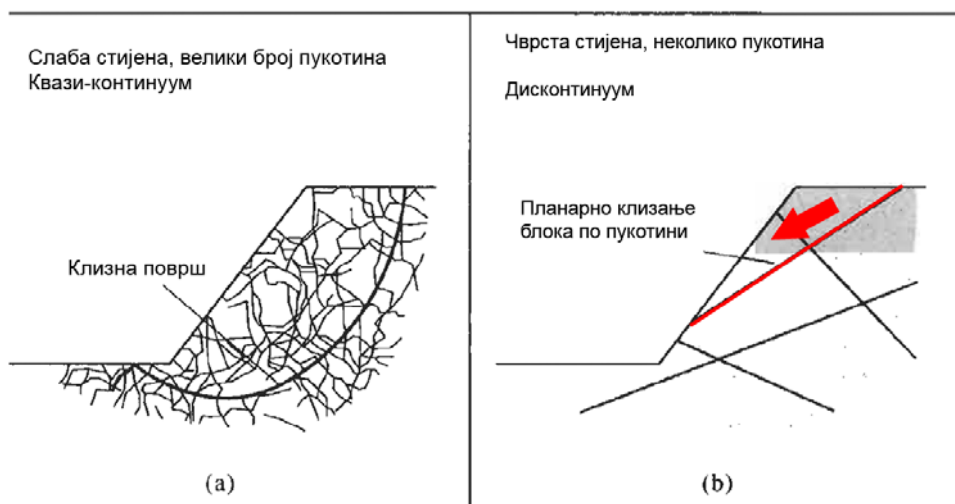


Слика 7: Ефекат релације за случај потпорног зида: (1) квазиконтинуум, (2) дисконтинуум



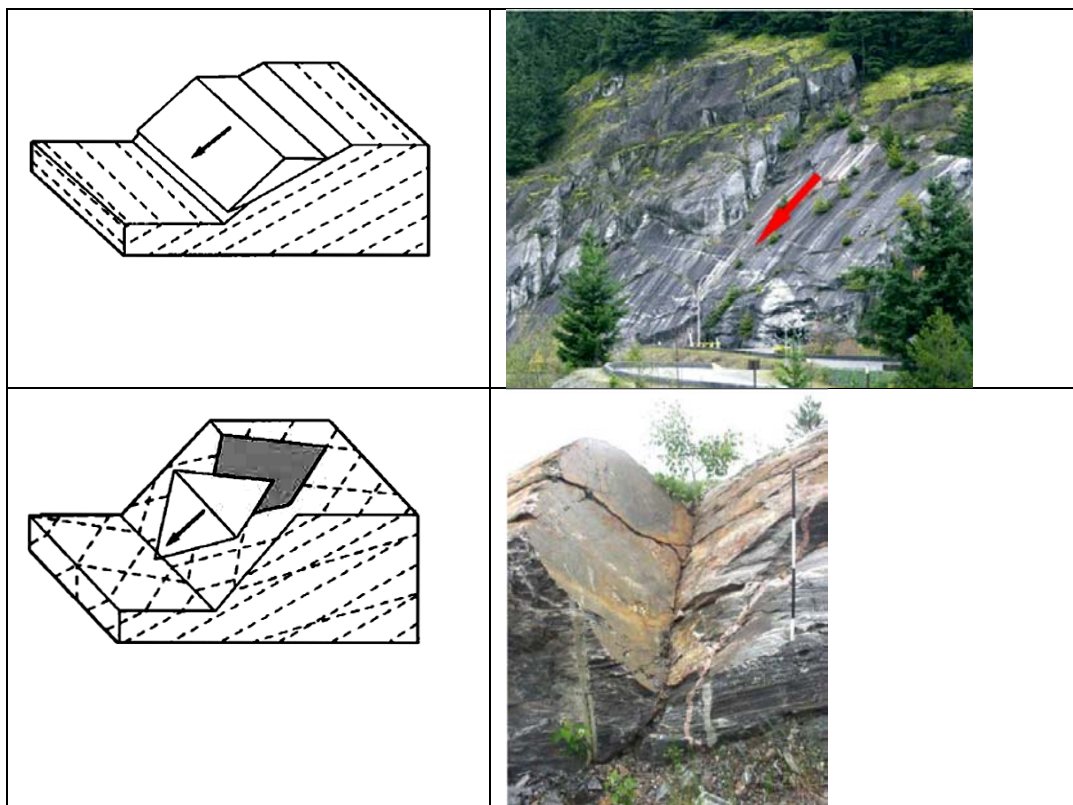
Слика 8: Ефекат релације за случај гравитационе бране: (1) квазиконтинуум, (2) гранично подручје квазиконтинуума и дисконтинуума, (3) дисконтинуум

Различити облици нестабилности камених косина су приказани на доњим сликама. Ако је стијена веома испуцала, слаба или деградирана онда су облици нестабилности слични онима који се јављају у тлу. Стилјена се понаша као квази-континуална средина и јављају се криволинијске клизне површи (слика 9а).



Слика 9: Облици лома у каменој косини: (а) Слаба стијена-квазиконтинуум, клизна површ (б) чврста стијена, лом клизањем по пукотини

Уобичајено је да у стијени постоји једна, двије или три фамилије пукотина па други облик нестабилности је клизање блокова стијене по једном (слика 10, горе) или два дисконтинуитета (слика 10, доле). Овдје је стијену потребно модлеирати као дисконтинуум.



Слика 10: Ефекат релације за случај гравитационе бране: (1) квазиконтинуум, (2) гранично подручје квазиконтинуума и дисконтинуума

2.3. ПРИРОДНА НАПРЕГНУТОСТ

Основни узроци постојања природне напрегнутости тј. примарних напона у стијенској маси су утицај:

- гравитације
- тектонике и
- ерозије земљине коре

Најчешће су максимални напони притиска који се јављају у стијенској маси *вертикални напони* (или напони блиски вертикалном. Могућа је ситуација у којој је хоризонтални напон највећи напон притиска као последица дјеловања тектонских сила или ерозије.

Ред величине примарних напона у стијенској маси је такав да се скоро редовно мора узети у обзир код пројектовања и грађења у стијенској маси. Основна су два приступа при квантификацији тј. дефинисању поља примарних напона у стијенској маси: теоретски приступ и мјерење *in situ*.

2.3.1. Теоретски приступ дефинисања поља примарних напона

Због великог броја феномена који су били од утицаја на стијенску масу у току геолошке историје, реално поље примарних напона је могуће одредити једино теренским мјерењима. Међутим, у појединим случајевима могуће је на основу идеализованих рачунских модела добити

употребљиву слику примарног поља напона. Општа теорија за дефинисање примарних напона у стијенској маси није још увијек формулисана.

Heim-ова теорија (1878)

Према Хаим-овој теорији вертикална компонента напона σ_v зависи од тежине надслоја:

$$\sigma_v = \gamma \times h = \sigma_h \quad \lambda = \sigma_h / \sigma_v = 1.0$$

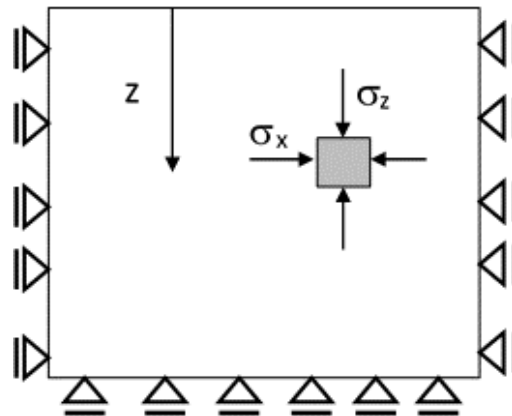
тј. притисак је једнак у свим правцима, па је и напон смицања једнак нули.

Генерално је доказано да са дужином напон смицања опада, па за дубоке ископе ова идеја има свој смисао.

Tercaghi-јев приступ

Tercaghi даје тумачење примарних напона на основу претпоставке о континуалности, еластичности, хомогености и изотропији стијенске средине. У једној сасвим регуларној геолошкој ситуацији (слика 11), у којој честице стијенске средине немају хоризонталне компоненте помјерања тј. $u_x = u_y = 0$ (спријечено бочно помјерање), из једначина равнотеже у еластичном, хомогеном и изотропном полупростору, вертикални напон на дубини z може се изразити као:

$$\sigma_v = \sigma_z = \gamma \times z$$



Слика 11: Терцагијев приступ дефинисању примарних напона

Одговарајући бочни-хоризонтални напон, са обзиром на преузету хомогеност, једнак је у свим правцима, а када се механичко понашање слојева унутар једне запреминске тежине може описати генералисаним Hooke-овим законом, износи:

$$\sigma_h = \sigma_x = \sigma_y = \frac{\nu}{1-\nu} \times \sigma_v = \lambda_o \times \sigma_v \quad \nu - \text{Poisson-ов коефицијент}$$

Теоретски за еластичну, изотропну континуалну средину λ_o се креће од 0 до 1.

Међутим за реалну стијенску масу креће се од 0.30 до чак 3.5. Ово значи да у стијени бочни притисак може услед тектонике да буде и 3.5 пута већи од вертикалног притиска.

2.3.2. Дефинисање поља примарних напона мјерењима на терену

Методe мјерења примарних напона на терену могу се сврстати у статичке и динамичке методе. *Статичке методе* омогућују мјерење напона у апсолутним износима и заснивају се на ослобађању напона и њиховом поновном успостављању. *динамичке методе* дају увид у расподјелу напона у функцији од удаљености од ископа али не њихове апсолутне величине.

Комбиновањем статичких и динамичких метода могуће је успоставити корелационе везе и њих користити за израду инжињерско геолошких модела по параметру напона.

2.4. ХОМОГЕНОСТ

Под хомогеним тијелом се подразумева оно тијело које је у свим својим тачкама саграђено на исти начин. Појам хомогености у механици стијена је релативан у односу на размјеру посматрања, те се може говорити о статистичкој или квазихомогености у односу на поједина и одређена својства.

Хетерогеност стијенске масе условљена је првенствено литолошким саставом. Проблем хетерогености стијенске масе обично се рјешава на тај начин што се хетерогена стијенска маса подијели на поддомене у којима се може сматрати хомогеном. Сваки подомен стијенске масе се даље дио по дио третира као хомогена.

2.5. ИЗОТРОПИЈА

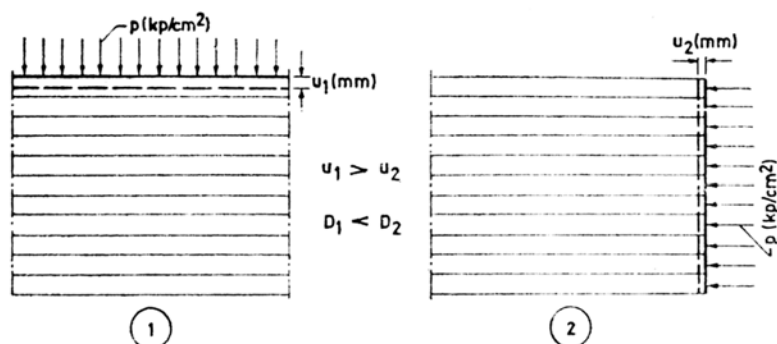
Под изотропијом се подразумева онај материјални систем чије су физичко механичке карактеристике (деформабилност, кохезија, ширење при промјени температуре, електропроводљивост, и тд.) једнаке у свим правцима. Стилјенска маса је по правилу изузетно анизотропна што је условљено у првом реду испуцалошћу, слојевитошћу и шкриљавошћу.

Слојевитост је својство стијенских маса да се у склопу терена јављају издијелене приближно паралелним генетским дисконтинуитетима, у виду плоча или табли које називамо слојевима. Слојевитост је типично својство седиментних стијена. Слојеви имају велико пружање а веома малу дебљину. Према дебљини слојева постоји следећа подјела:

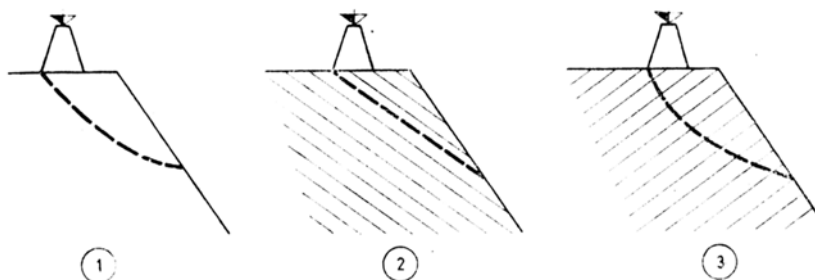
- масивна (псеудомасивна) > 200cm,
- банковита < 200 cm
- слојевита < 60cm,
- плочаста < 5cm,
- листаста < 0,5 cm.

Слојевитост доминантно утиче на анизотропност:

- деформација
- смичуће чврстоће
- водопропустљивости



Слика 12: Анизотропија у односу на деформабилност



Слика 13: Анизотропија смицања

Утицај анизотропије стијенске масе се без већих тешкоћа може укључити у нумеричке моделе при рјешавању напонских зависних феномена у механици стијена.

3. КРИТЕРИЈУМ ЛОМА СТИЈЕНСКЕ МАСЕ

Задатак теорије или хипотезе слома је да се на основу једноставних тестова на узорку материјала (једноаксијална компресија, тест једноаксијалног затезања, триаксијални тест, тест директног смицања) предвиди понашање тј. слом материјала у условима произвољног тродимензионалног оптерећења тј. напрезања. Још увијек није постављена општа теорија слома стијенске масе. Најчешће коришћени критеријуми за дефинисање чврстоће стијенске масе су Mohr-ova теорија слома и критеријум који су предложили Hoek и Brown.

Мохр-ова теорија слома (или Mohr-Kulonov zakon loma)

Према Mohr-Кулон-овој теорији (Coulomb, 1776) лом настаје када кругови напона додирну Mohr-ову обвојницу. Општи облик Mohr-ове обвојнице (анvelope) има облик:

$$\tau = c + \sigma_n \operatorname{tg} \phi$$

гдје су:

τ - величина смичућег напона у равни смицања при нормалној сили σ_n

c – кохезија материја

ϕ - угао унутрашњег смицања материјала

Coulon-Mohr-Terzagijev zakon loma

Coulomb-Mohr-ov закон лома значајно је модификовао Terzagі (1923) који је први уочио значај ефективних напона и потребу увођења величине порног притиска.

$$\tau = c' + (\sigma_n - u)tg\phi' = c' + \sigma_n' tg\phi'$$

Критеријум лома Ноек-а і Вrawn-а (Хек-Браун)

Ноек і Вrawn (1980) су свој нелінеарни критеријум лома развили из експерименталних истраживања понашања интактне стијенске масе и стијенских дисконтинуитета и заснива се на односу екстремних главних нормалних напона у тренутку лома према Ноек-у и Вrawn-у имају следећи облик:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_c} = \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + \sqrt{m \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s}$$

σ_1 - већи главни напон у тренутку лома,

σ_3 - мањи главни напон у тренутку лома,

σ_c - једноаксијална чврстоћа интактног стијенског материјала

m и s – константе које зависе од особина стијене и степена разломљености прије дјеловања σ_1 и σ_3 ;

Емпиријски параметри m и s према Ноек-у і Вrawn-у могу се добити из упоредних табела за квалитет стијенске масе према Норвешком институту за геотехнику (Q-класификација) или индекса квалитета стијенске масе по Bieniawskom (RMR – класификација).

Генерализовани критеријум лома Ноек-Вrawn (2002)

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

σ_1, σ_3 - максимални и минимални ефективни главни напон,

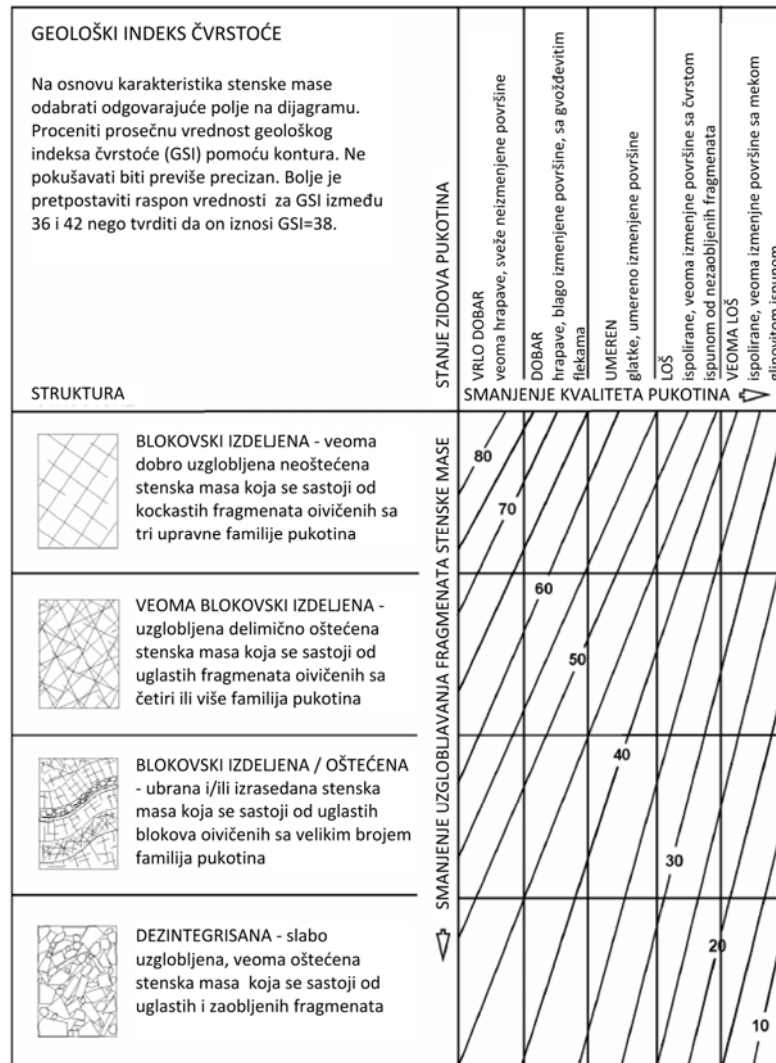
σ_{ci} - једноаксијална чврстоћа на притисак монолитног узорка
(интактног стијенског материјала)

m_b, s и a – константе које зависе од особина стијенске масе

Константе m_b, s и a се срачунавају на основу вриједности параметра m_i , геолошког индекса чврстоће GSI (*geological strength index*) и фактора D који зависи од поремећености стијенске масе услед мињања. Тако се рецимо параметар m_i који се добија из триаксијалних тестова на интактној (неиспуцалој) стијени редукује на вриједност m_b за испуцалу стијенску масу по формули:

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

Овај приступ омогућава да се за случај кад стијенску масу третирамо као квази-континуум резултати лабораторијских тестова на монолитима искористе за опис понашања стијенске масе. Геолошки индекс чврстоће су увели Ноек & Brown (1998) за процјену својстава стијенских маса на основу визуелне процјене стања дисконтинуитета и структуре стијенске масе. Користи се дијаграм као на слици 14.



Слика 14: Основни GSI дијаграм (Ноек и Браун, 1997)

ФАКТОР СИГУРНОСТИ

Од практичног интереса за рјешења која базирају на теорији еластичности је провјера локалних фактора сигурности. Уопште фактор сигурности се дефинише као однос између граничног тј. максималног могућег смичућег напона и мобилизованог смичућег напона, тј.:

$$F_s = \frac{\tau(\text{maksimalni} \cdot \text{moguci})}{\tau(\text{mobilizovani})}$$

У механици тла и механици стијени уобичајено је да се локални фактори сигурности при критеријуму Koulon-Mohr-а дефинише као:

$$F_s = \frac{\tau^f}{\tau_m} = \frac{c + \sigma_n \text{tg} \phi}{\tau_m}, \quad \text{а за } \sigma_n^f = \sigma_n^m$$

гдје су :

σ_n^f - нормални напон који одговара смичућем напону при лому

σ_n^m - нормални напон који одговара смичућем напону при τ_m

τ^f - смичући напон у лому

τ_m - мобилисани смичући напон у стијенској маси

Када се напон дефинише преко величине главних напона еквивалентни фактор сигурности у тачки за коју су одрђене вриједности главних напона може се срачунати из израза (Максимовић, 1979):

$$F_s = \frac{2 \text{tg} \phi \sqrt{(\sigma_1 + c \text{tg} \phi)(\sigma_3 + c \text{tg} \phi)}}{\sigma_1 - \sigma_3}$$

Када је $F_s \geq 1.0$ стање напона у стијенској маси је могуће, док када је $F_s < 1.0$ стање напона није могуће тј. наступио је лом стијенске масе.

Треба напоменути да се овако израчунати фактори сигурности односе само на поједине тачке у стијенској маси и да је могуће да у некој зони стијенске масе наступи слом (појава локалне пластификације) а да остали дио масе остане стабилан тј. за кинематички стабилан систем.

4. ЕМПИРИЈСКЕ КЛАСИФИКАЦИЈЕ СТИЈЕНСКИХ МАСА

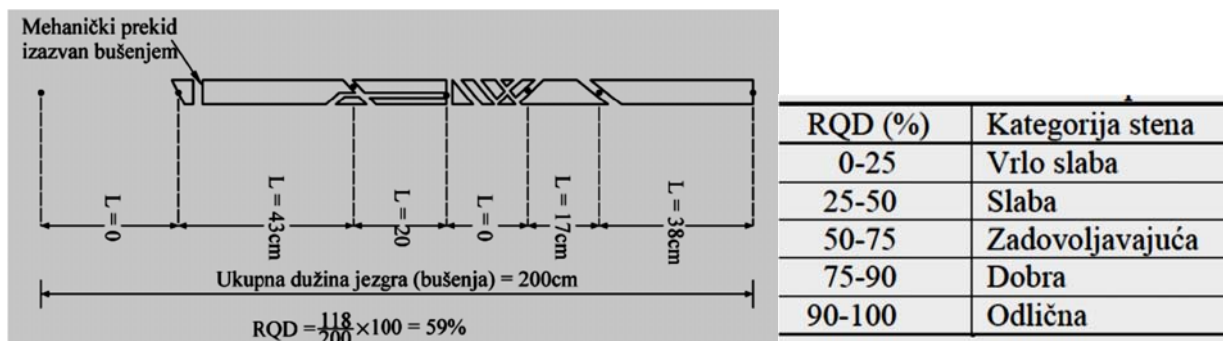
Емпиријски приступ пројектовању подземних објеката у стијенским масама темељи се на искуству стеченом приликом реализације претходних пројеката у сличним условима. Основа таквог приступа састоји се у инжењерској класификацији стијенских маса, која омогућава систематизацију стечених искустава у погледу односа између квалитета стијенске масе, начина ископа и подграђиваљу подземних објеката.

До сада је развијен велики број класификација стијенске масе од којих, у складу са данашњим начином грађења подземних објеката, треба издвојити класификацију Bieniawskog (RMR) и Bartonov Q-sistem.

Класификација Deer-а

Један од првих поступака рангирања стијенске масе на основу мјерења је тзв. RQD – индекс квалитета стијенске масе (Deer, 1963) који се добија као количник збира дјелова узорка – језгра

стијенске масе по дужини већих од 10цм (4 инча) и укупне дужине узорка стијене који се добија при бушењу са узорковањем-језгровањем.



Слика 15: Прорачун RQD вриједности и категоризација на основу RQD

Geomehaničku klasifikaciju ili RMR sistem (Rock Mass Rating System) razvio je Bieniawski (1973) за примјену при рјешавању инжињерских проблема у механици стијена. Класификација се заснива на бодовању, при чему се различитим параметрима додјељују различите нумеричке вриједности у зависности од њихове важности за цјелокупну класификацију стијенске масе. Класификација садржи следећих шест параметара који се могу добити бушењем или мјерењем на терену:

- једноаксијална притисна чврстоћа стијенског материјала
- индекс квалитета језгра (RQD),
- размак дисконтинуитета (пукотина),
- својства дисконтинуитета (пукотина)
- стање подземне воде и
- оријентација дисконтинуитета (пукотина)

Збир бодова у RMR класификацији је мањи или једнак 100 и представља параметар на основу ког се врши рангирање стијенске масе у једну од 5 категорија.

КЛАСИФИКАЦИЈА СТЕНА НА ОСНОВУ ЗБИРНЕ ОЦЕНЕ					
ЗБИРНА ВРЕДНОСТ RMR ΣRMR	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20
КЛАСА	I	II	III	IV	V
ОПИС	Врло добра стена	Добра стена	Задовољавајућа стена	Слаба стена	Јако слаба стена
ЗНАЧЕЊЕ КАТЕГОРИЈЕ СТЕНСКЕ МАСЕ У ОДНОСУ НА УГАО УНУТРАШЊЕГ ТРЕЊА ϕ И КОХЕЗИЈУ c И ВРЕМЕ СТАБИЛНОСТИ НЕПОДГРАЂЕНОГ ОТВОРА					
КОХЕЗИЈА СТЕНСКЕ МАСЕ c [кПа]	> 400	300 - 400	200 - 300	100 - 200	< 100
УГАО УНУТРАШЊЕГ ТРЕЊА СТЕНСКЕ МАСЕ ϕ [°]	> 45°	35° - 45°	25° - 35°	15° - 25°	< 15°
ПРОСЕЧНО ВРЕМЕ СТАБИЛНОСТИ НЕПОДГРАЂЕНОГ ОТВОРА	20 година за отвор распона 15 m	12 месеци за отвор распона 10 m	1 недеља за отвор распона 5 m	10 сати за отвор распона 2.5 m	30 минута за отвор распона 1.0 m

Недостатак класификације је што не садржи параметар постојаности стијенског материјала. Постојаност је отпорност изложене површине стијенског материјала на спољне утицаје као што су: промјена влаге, температуре и сл.

Q – sistem (Норвешки геотехнички институт, 1974) представља једну од најкомплетнијих класификација стијенских маса за подземне радове. Темелји се на нумеричкој процјени квалитета стијенске масе "Q" употребом шест параметара:

RQD – индекс квалитета језгра (Deer, 1963),

J_n – број скупова пукотина,

J_r – индекс храпавости пукотина,

J_a – индекс пукотинске испуне,

J_w – фактор редуције пукотинске воде и

SRF – фактор редуције напона,

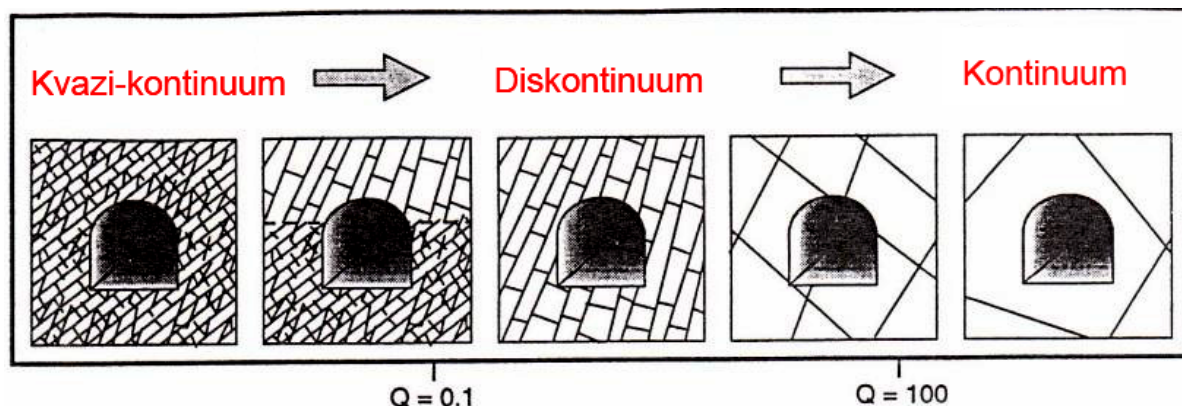
који комбиновани дају квалитет стијенске масе:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \frac{J_r}{J_a} \frac{J_w}{SRF}$$

Могућа вриједност Q креће се од 0,001 до 1000 и теоретски обухвата више од 300000 различитих геолошких ситуација, од потпуног згњеченог тла до стијенске масе без пукотина. Квалитет стијенске масе Q могуће је искористити за дефинисање различитих параметара при грађењу и пројектовању објекта у стијенској маси. Тако је вриједност Q повезана са подградом подземне грађевине тј. могуће је дефинисати јачину подграде за дату стијенску масу преко еквивалентне димензије ископа:

$$\text{Еквивалентна димензија ископа} = \frac{\text{распон, дијаметар или висина ископа}}{\text{индекс подграде (ESR)}}$$

Q класификацију је такође могуће искористити за дефинисање чврстоће стијенске масе (Hoek i Brown, 1980, преко параметара *s* и *m*) или деформабилности стијенске масе (Pereira 1983, Barton 1983 и други).



Слика 16: Начин моделирања стијенске масе у зависности од вриједности Q

5. Пукотине (Дисконтинуитети)

5.1. Врсте механичких дисконтинуитета

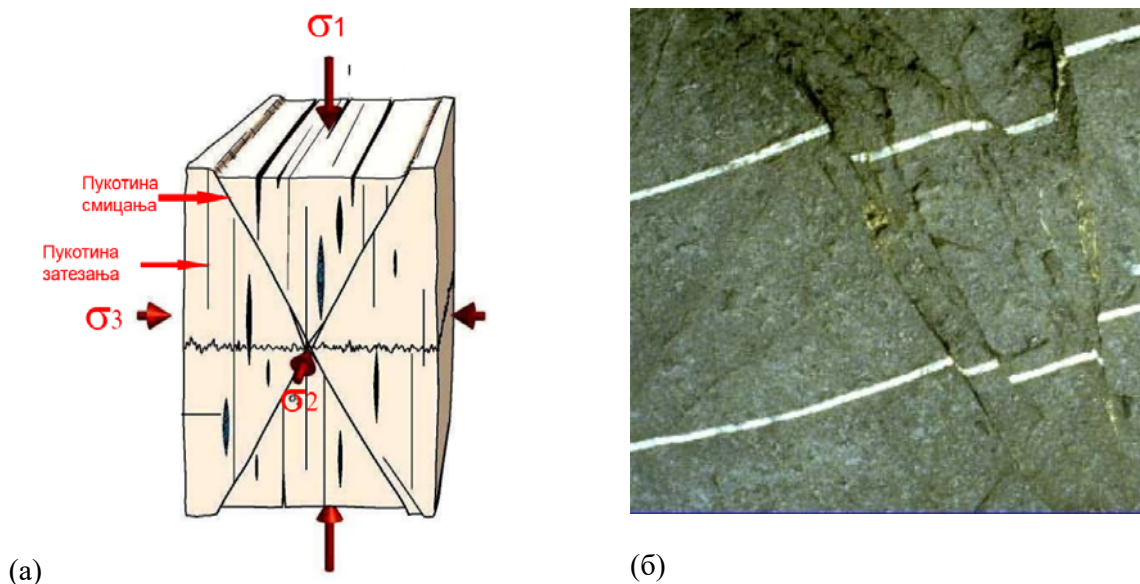
Најчешће и најдоминантније врсте дисконтинуитета:

- Дијаклазе
- Пукотине смицања
- Пукотине клизања
- Пукотин затезања
- Међуслојне пукотине (*bedding joints*)
- Шкриљавост, кливаж
- Цепљивост
- Пукотине лучења
- Пукотине растерећења
- Пукотине усљед гравитационог клижења
- Раседи
- Сврвљене зоне
- Карстне појаве и облици
- Вјештачке пукотине

Дијаклазе су типични представници кртих ломова који настају у троосном напонском стању притиска, у материјалима зрнасте структуре. *Дијаклазе су храпаве и без трагова трења*. Настају када је чврстоћа на смицање релативно велика а чврстоћа на затезање мала или када је брзина деформисања тако велика да се стијена понаша као крт материјал. По правилу се у стијенским масама јавља више фамилија дијаклаза. У многим случајевима густина дијаклаза је толика да стијенској маси даје квалитет шкриљавости (пукотинска шкриљавост).

Пукотине смицања се најчешће испољавају као крти ломови. Увијек су храпаве и не ријетко показују трагове трења на свјежој површини лома (“стрије”, углачане површине-“огледала”). Најчешће су паралелне правцу средњег главног напона σ_2 а са правцем највећег главног напона σ_1 заклапају оштар угао. Обично се јављају као двије фамилије коњугованих пукотина симетрично у односу на паравац σ_1 . Пукотине клизања настају у материјалима који се под дејством оптерећења понашају пластично и који имају релативно малу чврстоћу на смицање. У природи се јављају често.

Пукотине затезања су орјентисане управно на правац мањег главног напона.



Слика 17: *Настанак пукотина смицања и затезања (а), пукотине смицања (б)*

Међуслојне пукотине су механички дисконтинуитети у седиментним стијенским масама до којих долази услед релативно ниске отпорности на затезање и смицање у слојним површинама. Узроци настанака: скупљање и слегање услед сушења и релативног помјерање услед тектонских покрета. Величина међусобних растојања ових пукотина представља параметар према коме се седиментне стијенске масе дијеле на: банковите, плочасте и листасте.

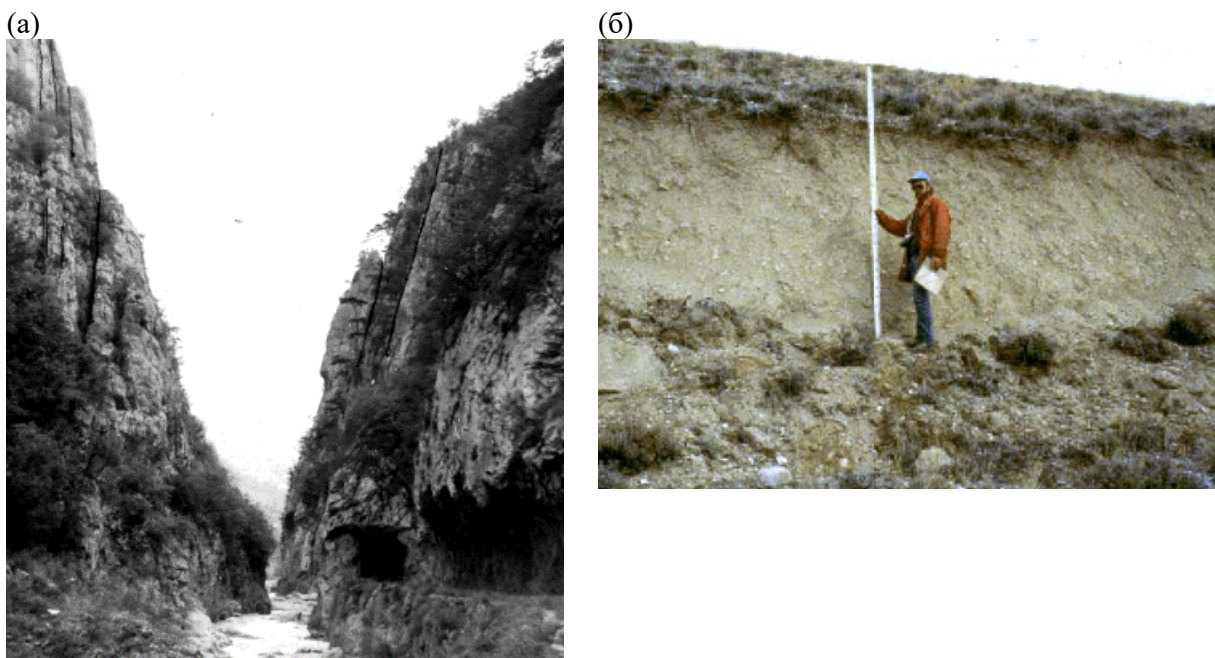
Шкриљавост, кливаж је врста дисконтинуалности која се изражава у могућности цепања или одвајања стијенске масе по међусобно паралелним раздјелницама, по правилу на малим међусобним растојањима милиметарског и сантиметарског реда величине. Ову дисконтинуалност је стијенска маса добила накнадно (секундарно) дејством напона притиска. Дисконтинуитети ове накнадне шкриљавости могу да се покlope са већ претходно постојећом слојевитиошћу или оријентацијом зрна тј. линеацијом и фолиацијом (листавост), али то не мора да буде случај. Све док су раздјелнице у слојевитим и шкриљавим стијенским масама затворене њихов механички утицај је мали. Међутим, уколико је дуж ових раздјелница веза разлабављена или сасвим уништена, онда ове раздјелнице играју улогу фамилије оријентисаних великих пукотина.

Цепљивост је потенцијална испуцалост и представља посебну врсту латентне дисконтинуалности и анизотропије. Она се огледа у смањеној отпорности на затезање или смицање у правцу једне или више равни. Код седиментних стијена се цепљивост јавља дуж слојница, тј. дуж површина које формиране промјеном висте материјала који се таложио или прекидима процеса исталожавања. Код шкриљаца и гнајсева потенцијалну дисконтинуалност представљају површине шкриљавости које се испољавају у изразито оријентисаној текстури стабличастих или листастих минерала. Код магматских стијена текстура тј. распоред минералних зрна има битан утицај на потенцијалну цепљивост.

Пукотине лучења настају код магматских стијена услед хлађења и груписања минералних састојака. Лучење је најчешће паралелопипедно, плочасто, стубасто и кугласто.

Пукотине растерећења. У процесу формирања долина насталих дејством ерозије, односно усијецања водног тока у стијенску масу, долази у боковима долине до појаве ослобађања напона. Као последица декомпресије јављају се у боковима фамилије пукотина паралелне току. Ова појава је нарочито изражена у теснацима односно клисурама (слика 18а). Услед ослобађања напона и формирања пукотина, бокови долине се помјерају према простору долине.

Расједи су пукотине смицања гдје је видљиво помјерање дјелова стијене, по правилу веће од неколико цм (најчешће више метара или километара)



Слика 18: Пукотине растерећења (а), Расјед (б)

Смрвљене зоне се одликују великим бројем ломова тако да се ти ломови по њиховој просторној оријентацији више не могу статистички обрађивати. Стијенска маса у овим зонама може бити смрвљена до финозрног материјала – *милонита*. Милонит у додиру са водом добија својства течности.

Карстне појаве и облици - шупљине у карбонатним и гипсним стијенским масама створене дејством воде која продир екроз пукотине и врши растварање стијенског материјала. Најчешће су то подземне каверне и различити подземни канали.

Вјештачке пукотине настају у процесу инжењерске дјелатности човјека, услед дејства експлозива при минирању стијенске масе и услед ослобађања напона при подземном и надземном ископу. При наглом ослобађању напона у случају њихових великих концентрација, у кртим стијенским масама се јавља и *горски удар*.

5.2. Параметри описивања пукотина

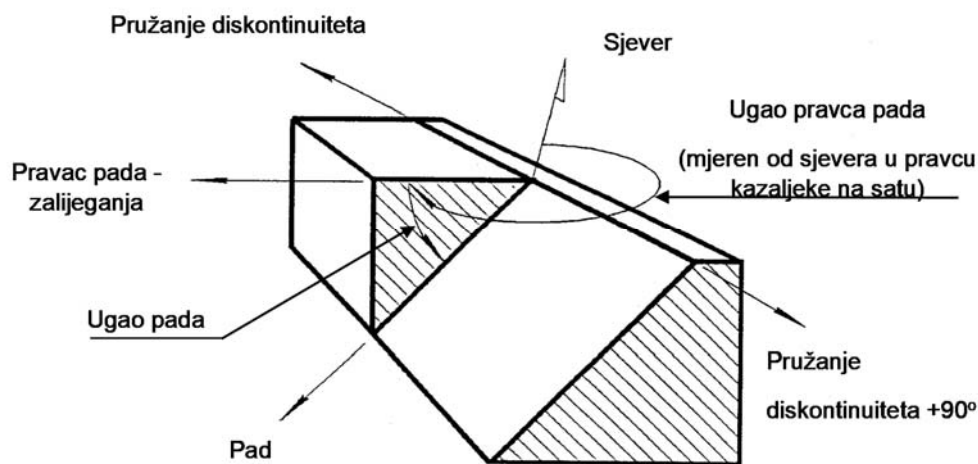
- Положај
- Елементи пада
- Простирање пукотина
- Ширина дисконтинуитета. Величина зева
- Изглед зидова пукотина
- Пукотинске испуне

5.2.1 Дефинисање дисконтинуитета у простору - Положај и елементи пада

Положај равни дисконтинуитета у простору се дефинише елементима пада:

- Падни угао (*dip*)
- Азимут (*dip direction*) тј. угао правца пада

Пресјек равни дисконтинуитета са хоризонталном равни се зове пружање (*strike direction*). Елементи пада се на терену мјере коришћењем геолошког компаса са клинометром (Брунтонов компас).



Слика 19: Геометријски елементи дисконтинуитета

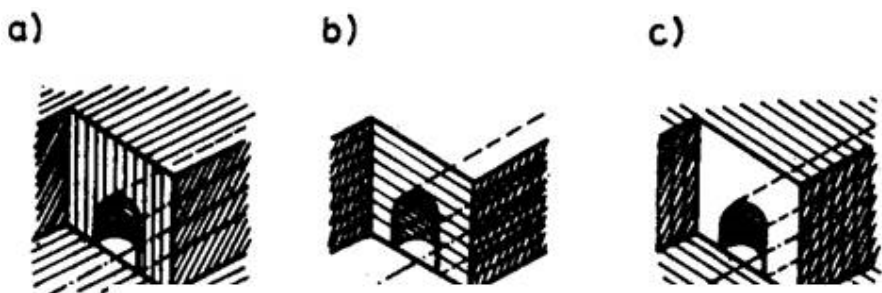


Слика 20: Геолошки компас са клинометром за мјерење пружања, азимута и падног угла (Брунтонов компас)



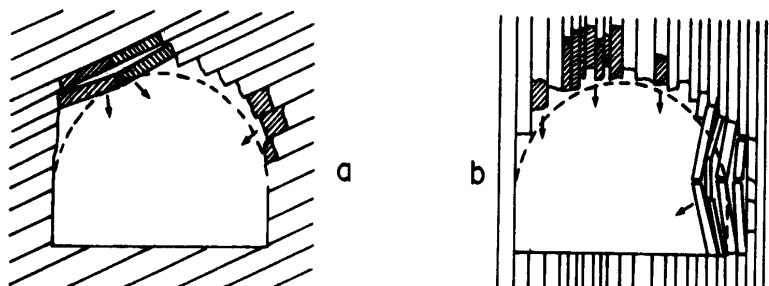
Слика 21: Мјерење падног угла равни слоја геолошким компасом

Познавање оријентације слојева, пукотинских система и шкриљавости је веома битно код пројектовања и извођења тунела. На примјер зависно од просторног положаја осе тунела и оријентације пукотина и слојева могу настати три различита случаја приказана на слици 22.



Слика 22: Шема положаја слојева у односу на осу тунела

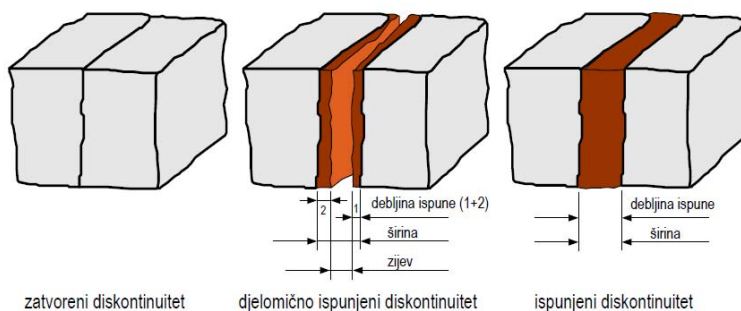
Најнеповољнији је случај на слици 22а. Када су равни слојевитости, пукотина и шкриљавости паралелне оси тунела, а слојеви падају вертикално или под неким стрмим углом. Ово може да изазове високе и неравномјерне притиске на подграду тунела (слика 23б). Нешто повољнији је случај приказан на слици 23а.



Слика 23: *Правац тунела се поклапа са равнима слојевитости*

5.2.2 Ширина дисконтинуитета. Величина зева

Зев дисконтинуитета је онај дио дио ширине дисконтинуитета који не заузима испуна.



Слика 24: *Ширина дисконтинуитета и величина зева*

Подјела дисконтинуитета према ширини
(International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering ISRM, 1978)

Ширина [мм]	Опис
<0,1	Врло уски
0,1-0,25	Уски
0,25-0,5	Дјелимично отворени
0,5-2,5	Отворени
2,5-10	Умјерено широки
>10	Широки
1-10	Врло широк

5.2.3 Изглед зидова пукотине (морфологија пукотина) односно храпавост пукотина (*roughness*)

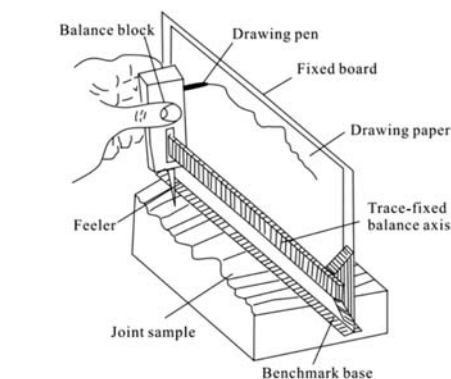
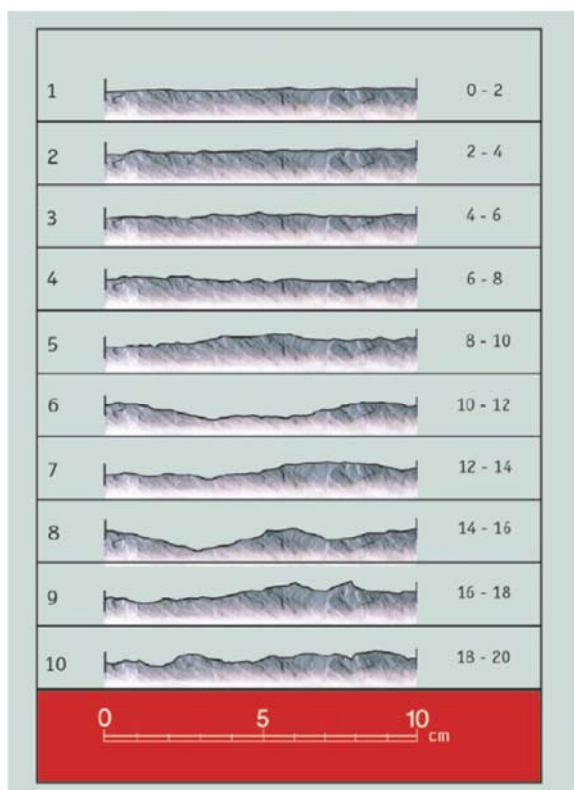
Храпавост прије свега битно утиче на параметре отпорности на смицање дисконтинуитета. Према облику зидова пукотине јављају се следеће врсте пукотина:

- са равним површинама
- са кривим површинама (таласасте, витоперне итд.)
- са изломљеним површинама

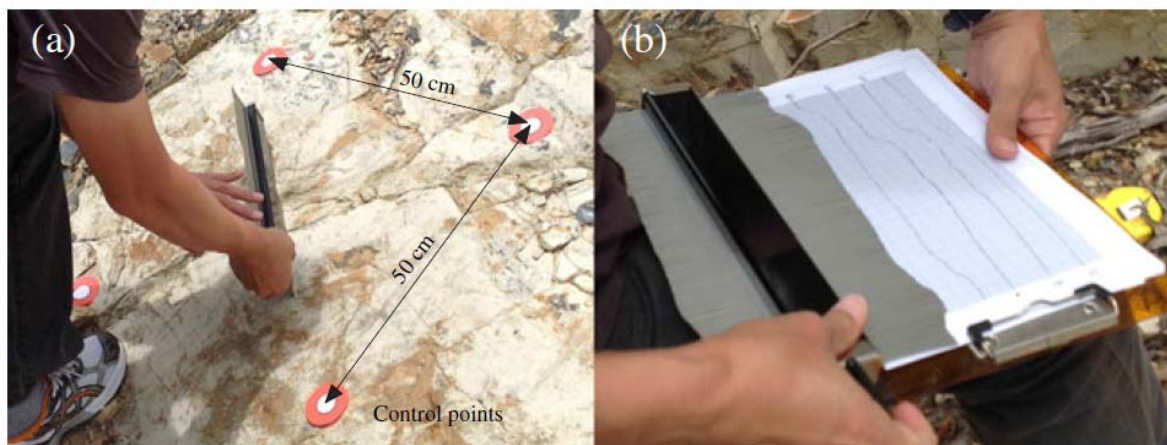
Према храпавости пукотине се могу подијелити на:

- са глатким површинама
- са неуједначеном рапавошћу
- са текстурном рапавошћу

Као мјера храпавости пукотина у пракси се често користи индекс храпавости пукотина *JRC* (*Joint Roughness Coefficient*). За репродукцију профила храпавости пукотине на терену користи се профилометар – Бартонов чешаљ (слика 25,26). Добијени профил се упоређује са типичним профилима храпавости ради оцјене индекса храпавости у опсегу од 0 до 20 (слика 25).



Слика 25: Типични профили храпавости, Мјерење храпавости дисконтинуитета – профилометар (Бартонов чешаљ)



Слика 26: Мјерење храпавости пукотина (а) и добијени профили храпавости пукотина.

Један од параметара којим се користи у Q класификацији је индекс храпавости пукотине J_r (joint roughness number).

Пукотинске испуне су материјали којима је пукотина потпуно или дјелимично испуњена или којима су зидови пукотина потпуно или дјелимично обложени. Материјал пукотинских испуна може да буде донијет подземном водом која га исталожава у пукотини а може да буде и смрвљени материјал стијенске супстанције настао при формирању саме пукотине. Може да буде искристалисан из раствора у подземној води. Пукотине су отворене ако је међупростор између зидова пукотине празан или испуњен водом. При већем зеву то су тзв. *зјанеће пукотине*. Ако су испуњене кристализационом испуном често се зову „залијечене“ или „жилице“. Од врсте и карактеристика пукотинских испуна зависи покретљивост појединих монолита а тиме и деформабилност стијенске масе.

Од механичких карактеристика пукотинских испуна зависи водопропустљивост масе као и дејство воде на стијенску масу. Погодност с.м. за геотехничке мелиорације тј. дренарање, ињектирање и сидрење такође зависи од својстава и карактеристика пукотинске испуне.

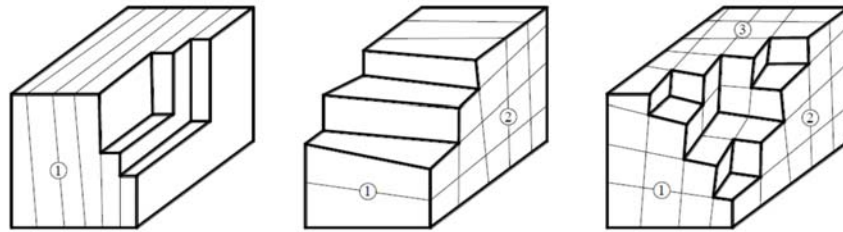
Условна класификација:

- пукотине без испуне – отворене
- пукотине са трошном испуном – испирају се прије ињектирања
- пукотине са глинеом испуном – испирају се само у случају консолидационог или напонског ињектирања.
- пукотине са кристализационом испуном (калцит, кварц) тзв. затворене пукотине у механичком смислу не представљају дисконтинуитете али могу да представљају потенцијалне дисконтинуитете.

У Q класификацији се као један од параметара користи индекс пукотинске испуне J_a (Joint alteration number).

Фамилије (скупови) пукотина (*Joint sets*)

Равни пукотина се обично јављају у облику фамилија пукотина са сличним елементима пада као што је приказано на доњој слици. Један од параметара којим се користи у Q класификацији је и број фамилија (скупова) пукотина J_n .



Слика 27: Стијенска маса са 1,2 и 3 система пукотина