

6. Механичко понашање монолита и дисконтинуитета

Корисно је размотрити понашање узорка интактне стијене тј. монолита у следећим условима оптерећивања:

- Монолит изложен хидростатичком притиску
- Монолит изложен девијаторском оптерећењу

Било који тензор напона се може раздвојити на сферни и девијаторски дио:

$$T\sigma = T_S(\sigma) + D\sigma$$

Хидростатички притисак или средњи нормални притисак (сферни напон, енгл. *mean stress*):

$$p = \sigma_m = 1/3 (\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}) = 1/3 (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$$

Ова вриједност је инваријантна величина, независна од орјентације оса система. Пошто је њена вриједности иста за све правце постоји аналогија са хидростатичким притиском који се једнако преноси у свим правцима. Онда се сферни тензор може дефинисати као:

$$T_{S(\sigma)} = \begin{pmatrix} \sigma_m & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_m & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_m \end{pmatrix}$$

Девијаторски дио тензора напона

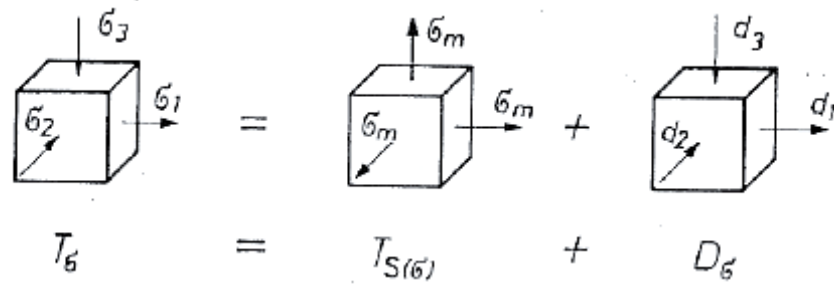
$$\begin{aligned} D\sigma &= T\sigma - T_{S(\sigma)} = \\ &= \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \sigma_m & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_m & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_m \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} (\sigma_x - \sigma_m) & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & (\sigma_y - \sigma_m) & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & (\sigma_z - \sigma_m) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & d_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & d_z \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Дијагоналне компоненте девијаторског дијела:

$$d_x = \sigma_x - \sigma_m ; d_y = \sigma_y - \sigma_m ; d_z = \sigma_z - \sigma_m$$

Уколико су у питању главни напони:

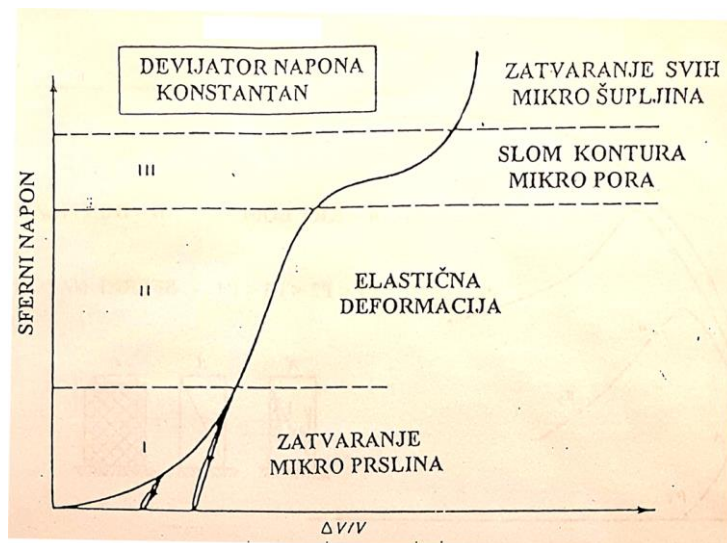
$$D\sigma = \begin{pmatrix} d_1 & 0 & 0 \\ 0 & d_2 & 0 \\ 0 & 0 & d_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (\sigma_1 - \sigma_m) & 0 & 0 \\ 0 & (\sigma_2 - \sigma_m) & 0 \\ 0 & 0 & (\sigma_3 - \sigma_m) \end{pmatrix}$$



Слика 1: Шематски приказ разлагања напона

6.2. Монолит изложен хидростатичком притиску

Монолит изложен хидростатичком притиску (p) који се постепено повећава, у првој фази, постепено смањује запремину на рачун промјене у порозности и микро-испуцалости (*fissure*), све док не дође до промјене у конфигурацији минералних агломерација што води неповратном смањивању порозности (фаза III), а затим долази до скоро потпуне нестишљивости узорка који се испитује, као што је случај код стијена које не садрже микро-прслине и поре, па је понашање узорка слично понашању крутог тијела.

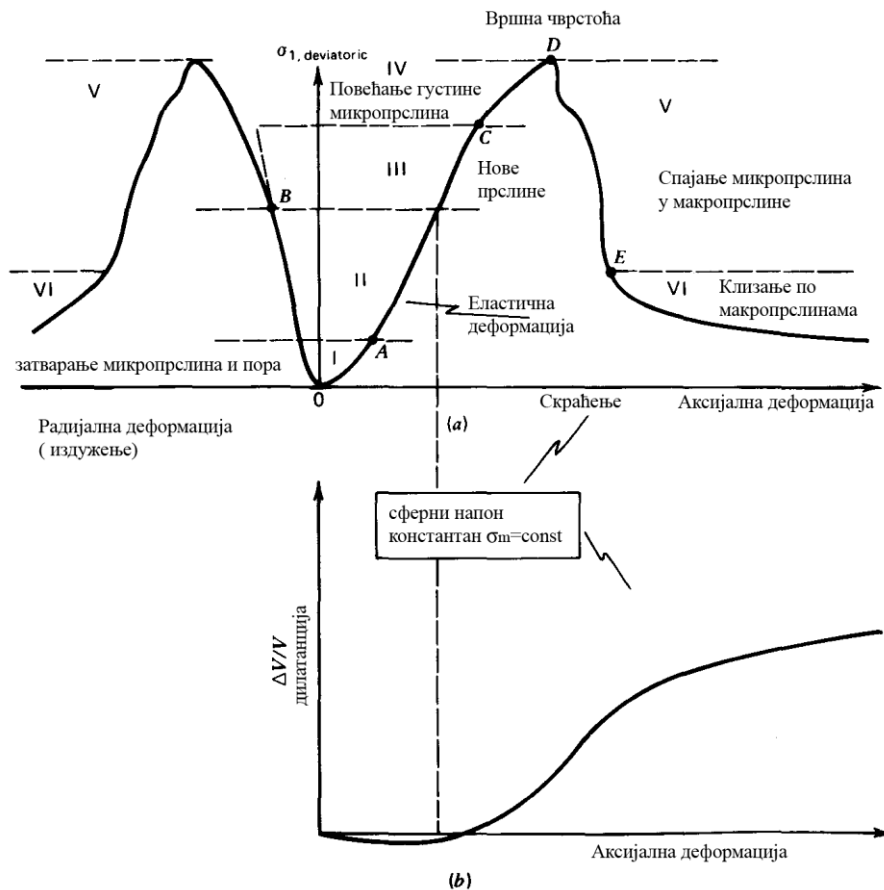


Слика 2: Запреминска компресија узорка интактне стијене при порасту сверног напона

6.3. Монолит изложен девијаторском оптерећењу

Монолит изложен девијаторском оптерећењу које се стално повећава, има понашање слично претходном случају у фази затварања микро-прслина и пора (I), и у фази еластичне деформације (II), а донекле и у фази кад прслине мијењају облик али не и запремину (III). У фази IV настаје нови облик деформације у којем долази до ломова у чврстој минералној супстанци уз настајање нових прслина које се спајају у систем који омогућава формирање “руптурне површине у узорку” дуж које се узорак смиче или разлама, што се када се достигне максимални девијатор напона, или вршина чврстоћа. Овакво понашање узорка је слично како у аксијалном тако и у радијалном правцу тј. у бочној деформацији. Након достизања вршне

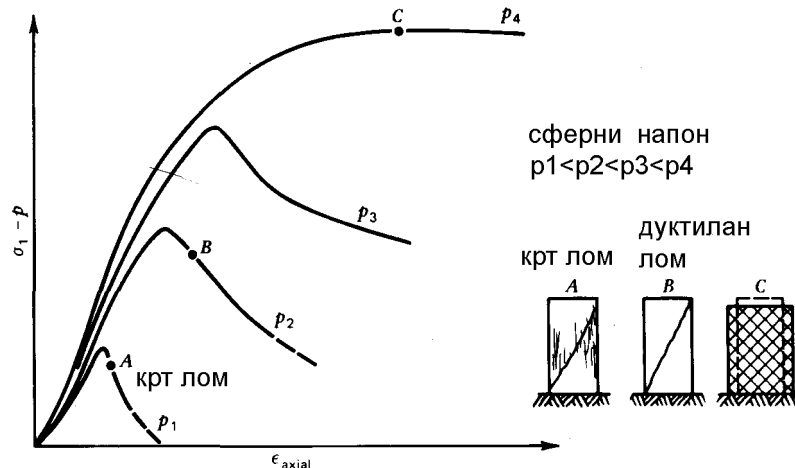
чврстоће, долази до наглог пада напона уз малу деформацију (V) а затим у фази VI до поновног деформисања узорка клизањем дуж руптурне површине када је пад напона ублажен. У фази еластичног понашања монолита, запреминска деформација је контракција (смањење запремине). Затим се запремина постепено повећава при чему се највећи прираштај јавља у фази настанка нових прелина (V) док се у фази клизања дуж површи лома (руптурна површина) прираштај запреминске деформације не мијења. Ово повећање запремине при лому у фази након постизања вршне чврстоће назива се „дилатанца“.



Слика 3: Деформације узорка интактне стијене (монолита) при порасту девијатора напона

6.4.. Утицај бочног притиска (најмањи главни напон)

Величина бочног притиска (сферног напона) значајно утиче на облик понашања монолита након достизања вршне чврстоће. При повећању бочног притиска облик понашања се помјера од „кртог понашања“ гдје постоји пад напона, према „дуктилном понашању“ тј. без пада напона смицања након постизања вршне чврстоће. Дуктилан облик понашања се може јавити у проблемима грађевинских објеката само код „меких стијена“ као што су лапори и глинци или код изразито метаморфисаних стијена. Код чврстих стијена нема практичних услова да се постигне за дуктилан лом потребан ниво бочног напона.



Слика 4: Утицај величине сферног напона на начин лома монолита (интактне стијене)

6.5. Механичко понашање дисконтинуитета

Најбитније механичко својство дисконтинуитета је његова смичућа чврстоћа (*joint shear strength*) јер од ње зависи и чврстоћа стијенске масе.

Смичућа чврстоћа дисконтинуитета зависи од површинске храпавости дисконтинуитета. 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. Добијени профил се упоређује са типичним профилима храпавости ради оцјене индекса храпавости у опсегу од 0 до 20.

Алтернативно, индекс храпавости се може емпиријски процијенити на основу једноставног теста клизања блока на стрмој равни тзв. *tilt test*. На хоризонталну раван се поставе два дијела узорка један на други тако да је између њих површ дисконтинуитета. Раван се нагиње док не дође до релативног помјерања горњег дијела узорка преко доњег. Измјерени угао нагиба равни α (*tilt angle*) се повезује са индексом храпавости преко следећег израза:

$$JRC = \frac{\alpha - \varphi_R}{\text{Log}(JCS/\sigma)}$$

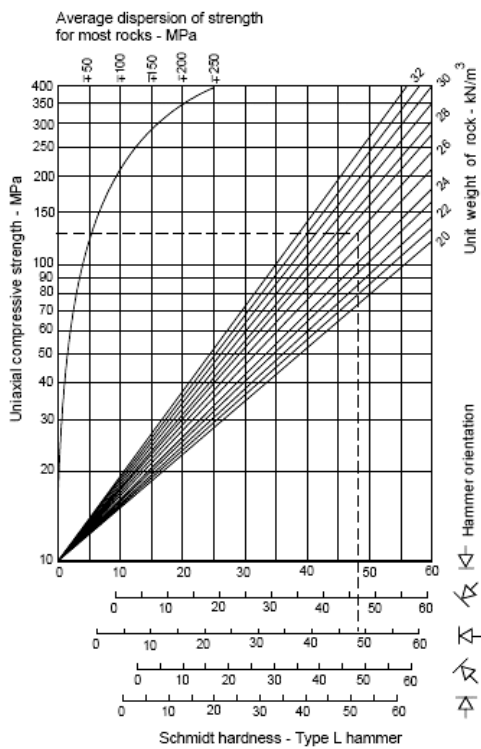
φ_R – угао резидуалне смичуће чврстоће – добија се из тестова директног смицања;

σ – нормални напон на површину дисконтинуитета

JCS – отпорност површине дисконтинуитета на притисак
 (мјери се Шмитовим чекићем)



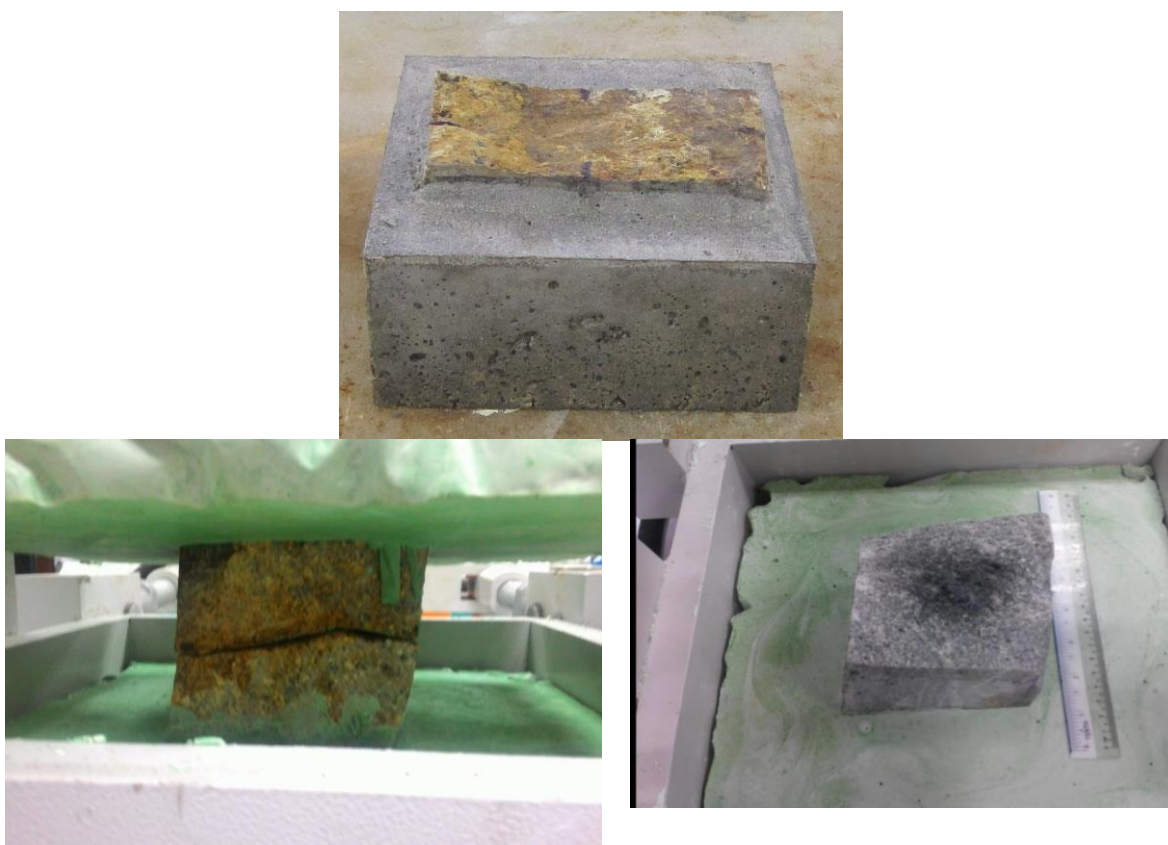
Слика 5: Мјерење хрававости дисконтинуитета – tilt test



Слика 6: Пројена притисне чврстоће зида дисконтинуитета коришћењем Шмитовог чекића

Опит директног смицања по дисконтинуитету

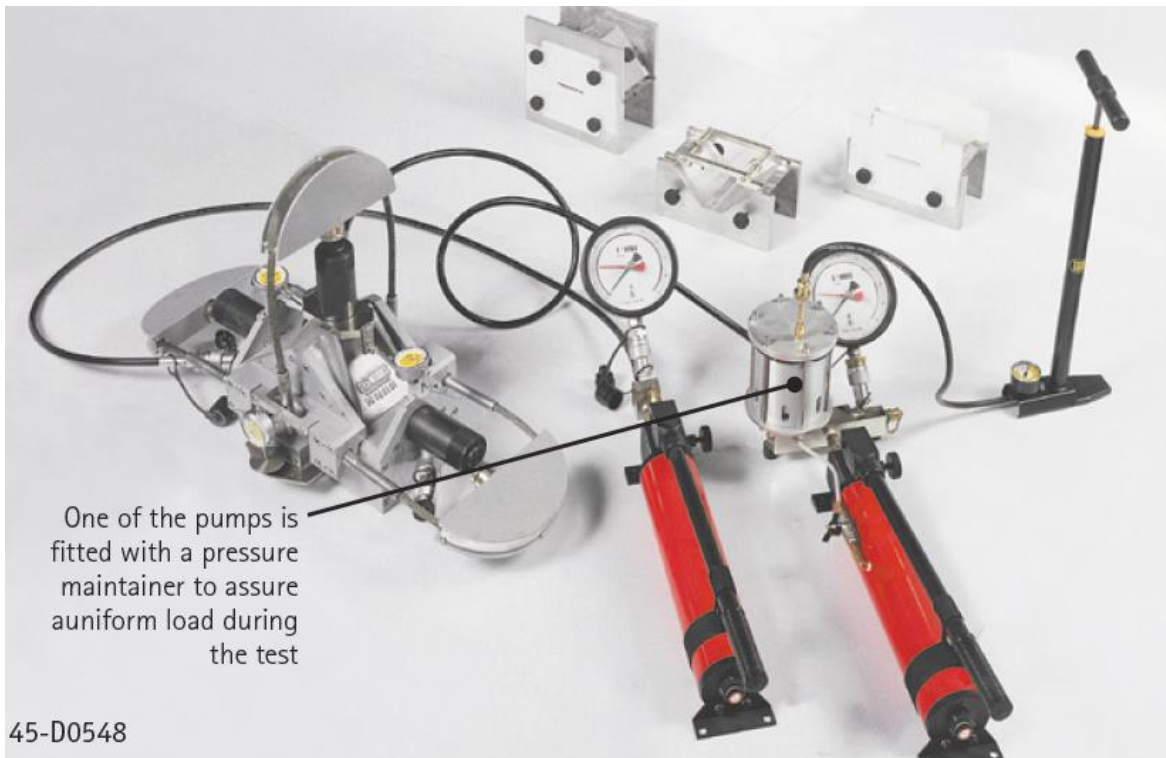
Опит директног смицања се врши у посебном уређају у који се смјештају два дијела узорка стијене са дисконтинуитетом. Пошто су дјелови узорка ријетко исјечени тако да се савршено уклапају у држач узорка (кутија, прстен) онда се преостали простор испуни цементом или смолом (енгл. *encapsulation*), слика 7.



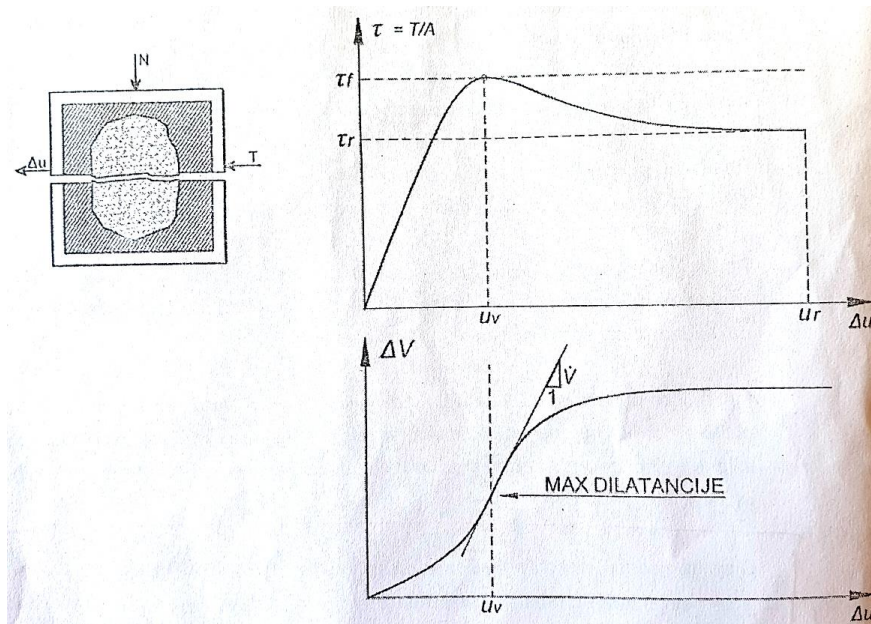
Слика 7: Узорак стијене за директно смицање по дисконтинуитету

Узорак се оптерећује нормалном и смичућом силом у односу на раван смицања, а резултат се приказује у графицима смичући напон-помјерање за поједине величине константног нормалног напона (слика 9). Са дијаграма се види да се максимално повећање запремине (дилатанција) дешава у тренутку достизања вршне чврстоће.

Величина и облик узорка се прилагођавају димензијама апарата за испитивање. Најчешће су површине смицања реда величине 100 до 1600 cm^2 (од 10×10 до 40×40 cm)



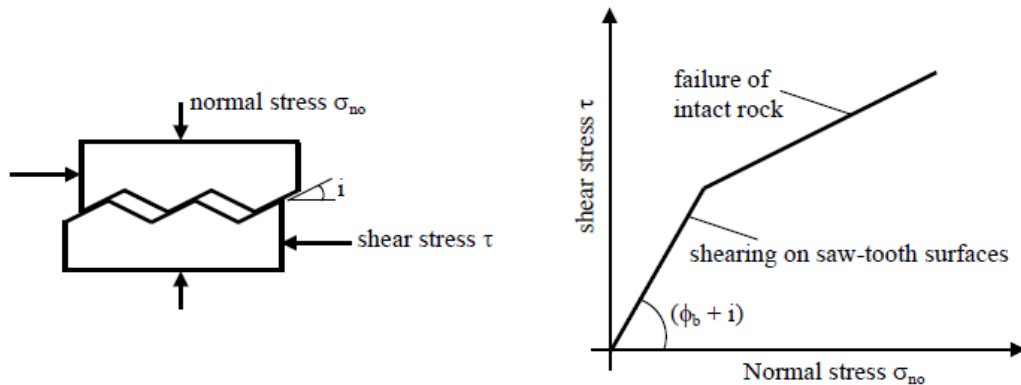
Слика 8: Мјерење сличуће чврстоће узорка стијене – директно смицање



Слика 9: Опит директног смицања на узорку са дисконтинуитетом

Смичућа чврстоћа дисконтинуитета (*joint shear strength*)

Смицање по тестерастом дисконтинуитету (*Patton,1966*)



Слика 10: Тест директног смицања по тестерастом дисконтинуитету (*Patton,1966*)

Ово је билинеарна апроксимација нелинеарне Мор-Кулонове анvelope лома. При нижем нивоу нормалног напона смичућа помјерања су резултата помјерања уз нагибе зубаца што изазива повећање запремине тј. дилатанцију. Према овом тзв. **тестерастом моделу**, смичућа чврстоћа дисконтинуитета је:

$$\sigma_n = \tan(\phi_b + i)$$

гдје су

i – угао нагиба зубаца (еквивалентни угао неравнина)

ϕ_b – базни угао трења ($\phi_b \sim \phi_r$)

Други дио анvelope се постиже при постизању смичућих помјерања без дилатирања (повећања запремине при смицању).

$$\sigma_n = \tan(\phi_r)$$

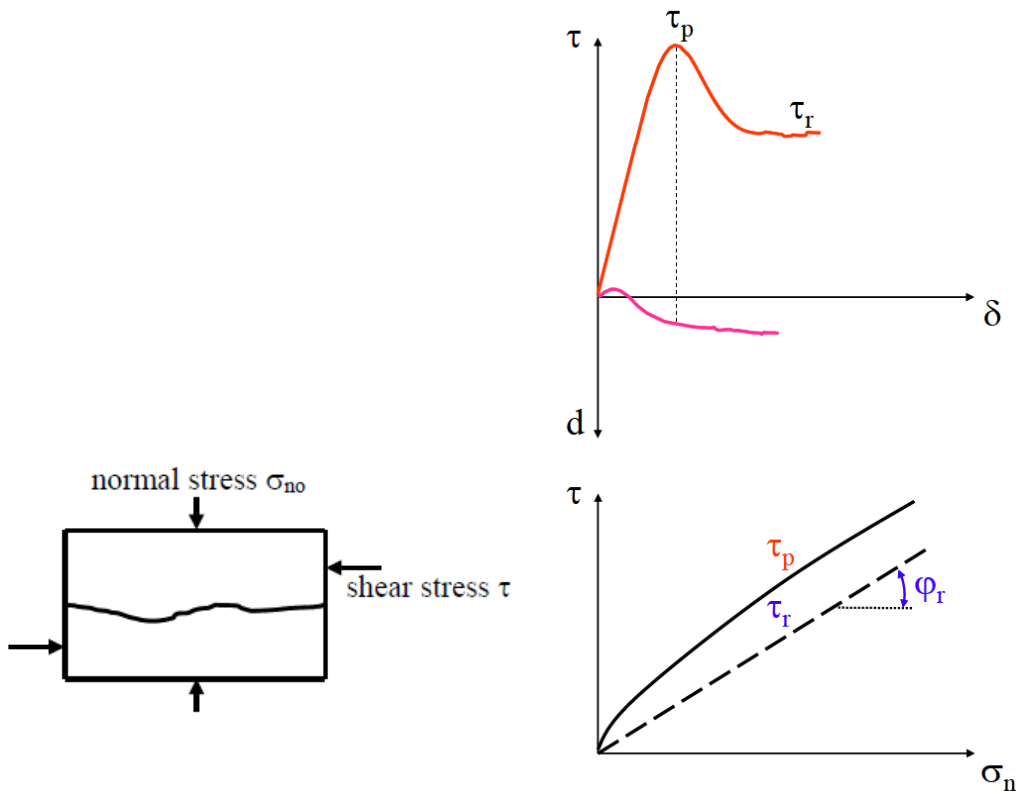
гдје је ϕ_r – резидуални угао трења

Ово се објашњава сломом врхова неравнина (зубаца тестерастог модела) чиме се губи утицај који се манифестује преко еквивалентног угла неравнина – i .

Смицање по дисконтинуитету реалне хрпавости (*Barton,1973*)

Бартон је дао нелинеарни емпиријски критеријум лома гдје се вршна смичућа чврстоћа дисконтинуитета описује изразом:

$$\tau_p = \sigma_n \tan\left(JRC \log_{10} \frac{JCS}{\sigma_n} + \tau_r \right)$$



Слика 11: Тест директног смицања по хрпавом дисконтинуитету

Најчешће коришћења модификација овог критеријума се назива Burton-Bandis критеријум којим се даје вршна смичућа чврстоћа дисконтинуитета као:

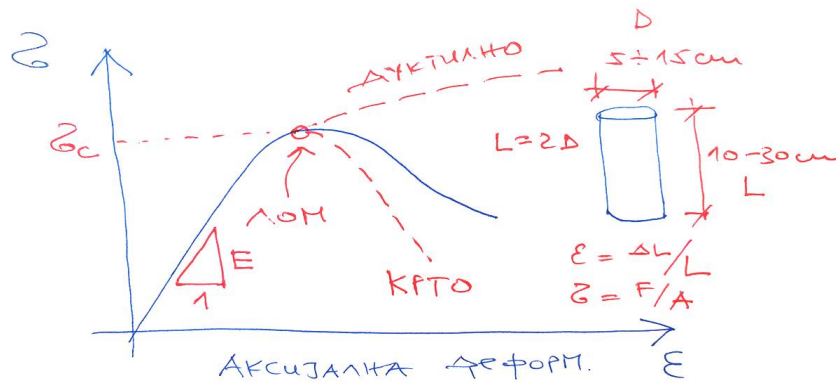
$$\tau = \sigma_n \tan \left[JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_r \right]$$

7. Мјерење механичких својстава монолита

На монолиту тј. узорку интактне стијене врше се испитивања која су највећим дијелом стандардизована или препоручена од стране Међународног друштва за механику стијена (ISRM).

7.1. Опит једноаксијалне компресије

Опит једноаксијалне компресије (притисне чврстоће) се врши најчешће на узорцима облика ваљка пречника 5 до 15цм са висином која је једнака двострукој вриједности пречника. Добија се дијаграм напон-дилатација (аксијална и бочна) који се користи за одређивање модула деформабилности. Сила слома узорка подијељена са површином попречног пресека дефинише вршну притисну чврстоћу монолита. Јунгов модуо еластичности се добија из тангенте на криву напон-деформација у тачки гдје је аксијални напон једнак половини вршне притисне чврстоће, што најбоље одговара условима еластичног понашања стијене.



Слика 12: Опит притисне чврстоће

7.2. Опит тачкастим оптерећењем (*Point load test*)

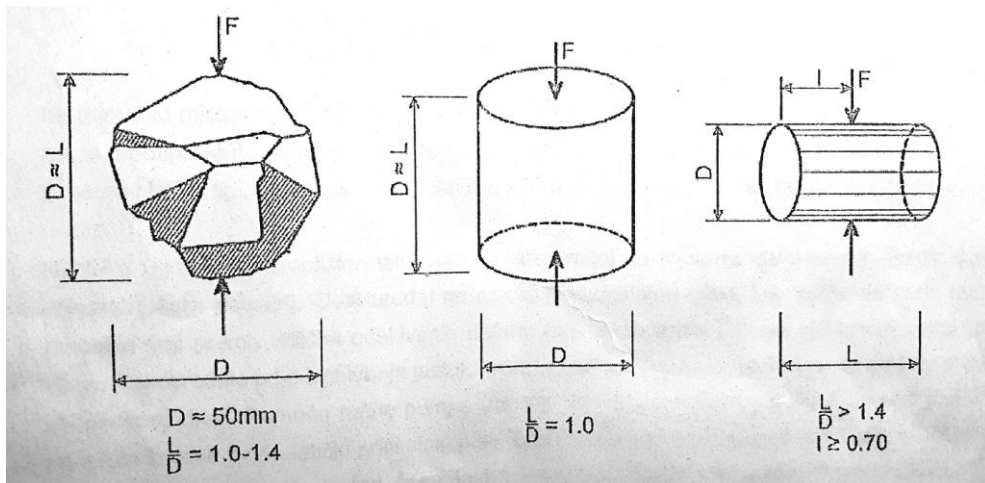
Опит тачкастим оптерећењем се врши на монолиту неправилног облика који је лоптаст са пречником од 5 до 15cm и односом највеће и најмање димензије који није већи од 1.40 или је узорак ваљкаст са дужином која је већа од 1.4 пречника ваљка при чему се аксијално оптерећење преноси преко двије граничне тачке узорка на истој вертикали кроз средину узорка. Региструје се укупна сила при сломању монолита, која се онда корелативним везама повезује са чврстоћом на затезање, пошто се узорак разлама по вертикалној равни. За неправилан – лоптаст узорак се одређује

$$I_s = P/D$$

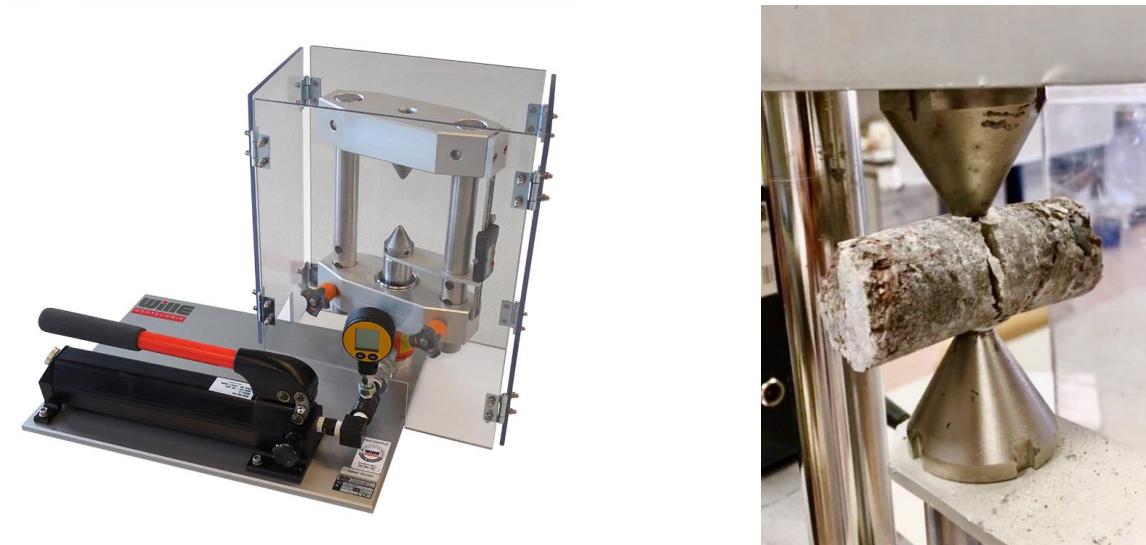
гдје су P – сила при сломању

D – пречник узорка на линији дјеловања силе

Обично се усваја веза за притисну чврстоћу $\sigma_c = 24I_s$ односно $\sigma_t = 0.10I_s$ за затезну чврстоћу монолита.



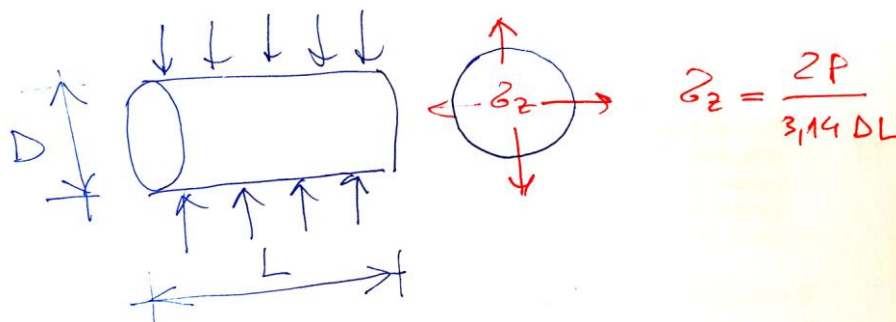
Слика 13: Узорци стијене за тест тачкастим оптерећењем



Слика 14: Уређај за опит тачкастим оптерећењем

7.3. Бразилски тест цијепања (*Point load test*)

Бразилски тест је сличан са опитом тачкастог оптерећења с тим да се овдје користи узорак у облику ваљка правилног облика да дужиномкоја није мања од 1.50 пречника.



Слика 15: Шема бразилског теста цијепања

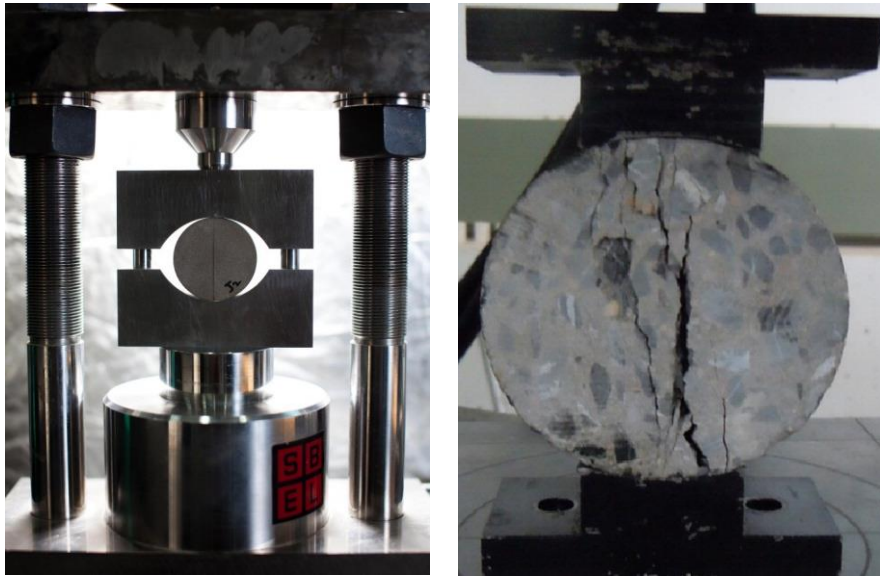
Резултат опита се добија када се укупна сила доја дјелује по изводници ваљка, а при којој долази до слома узорка, повеже са чврстоћом интактне стијене на затезање преко израза:

$$\sigma_t = 2P / (3.14 DL)$$

гдје су $P(N)$ - сила која дјелује на узорак

$D(mm)$ - пречник узорка

$L(mm)$ - дужина узорка.



Слика 16: Уређај за бразилски тест и узорак при лому

8. Мјерење механичких својстава стијенске масе

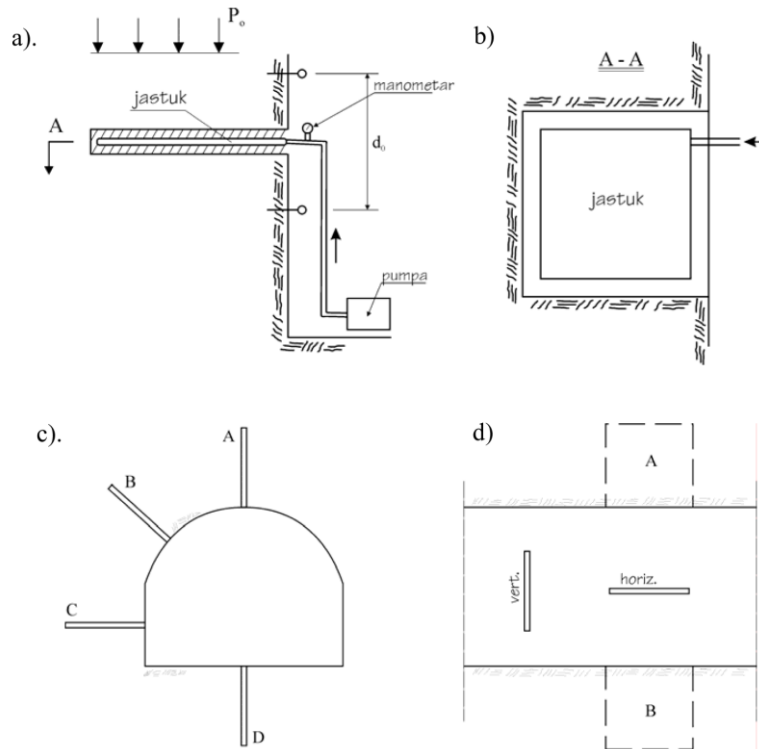
При проучавању механичког понашања стијенске масе, полази се од тога да се стијенска маса састоји од чврсте-интактне, окамењене материје, која је у већој или мањој мјери прожета дисконтинуитетима тј. да постоји „блоковска издијељеност“ стијенске масе. Ова издијељеност у многоме одређује деформациона својства стијенске масе као цјелине. Да би се установили основни облици деформационог понашања стијене користе се теренски опити – „in situ“ опити. Међутим ови опити захтијевају продужено вријеме, специфичну опрему и већа финансијска средства иако њихово коштање никад није значајно у односу на коштање грађевинских објеката због којих се ти опити раде. Посебно ограничење које се истиче за теренске опите је њихова умањена репрезентативност у статистичком погледу, обзиром на мањи број таквих опита и генерално хетерогену природну средину гдје се они спроводе.

8.1. Метода хидрауличког јастука

Н амјерном мјесту изради се у стијени специјални прорез у који се постави лимени јастук пречника 1м до 2м, а међупростор између јастука и стијене се испуни бетоном. Прорез у стијени се оријентише према томе под којим углом према слојевитости или испуцалости стијене жели да се изазове оптерећење.

На тако уграђени јастук прикључи се уређај за мјерење деформација, конструисан на волуметријском принципу. Овај се уређај састоји из водостајне цијеви, која може да буде различитих пречника зависно од величине очекиваних деформација, снадбјевен једном стакленом водоказном цијеви. Непосредно прије испитивања јастук и водостајна цијев напуне се водом до нуле на стакленој водоказној цијеви. Помоћу ручне пумпе убацује се вода из водостајне цијеви у лимени јастук и на тај начин се изазива хидростатички притисак који се, преко бетонске испуне, преноси на стијену. Стијена се под притиском деформише услед чега јастук повећава своју запремину. Повећање запремине јастука изазива спуштање нивоа воде у водоказној и водостајној цијеви. Из величине овог спуштања, која се мјери на водоказној

цијеви, и познате површине попречног пресјека водостајне и водоказне цијеви, може се срачунати укупна промјена запремине јастука, а из ње просјечна деформација стијене.



Слика 17: Диспозиција методе хидрауличког јастука

Прорачун модула еластичности и модула деформације врши се помоћу Boussinesque-овог рјешења за еластични полупростор оптерећен једнако подијељеним оптерећење, преко кружне површине:

$$E = 0.54 P (1 - \nu^2) / (u_s a)$$

гдје су:

P - укупно оптерећење у килограмима

ν - Poisson-ов коефицијент

u_s – средња деформација у цм

a – полупречник оптерећења кружне површине у цм

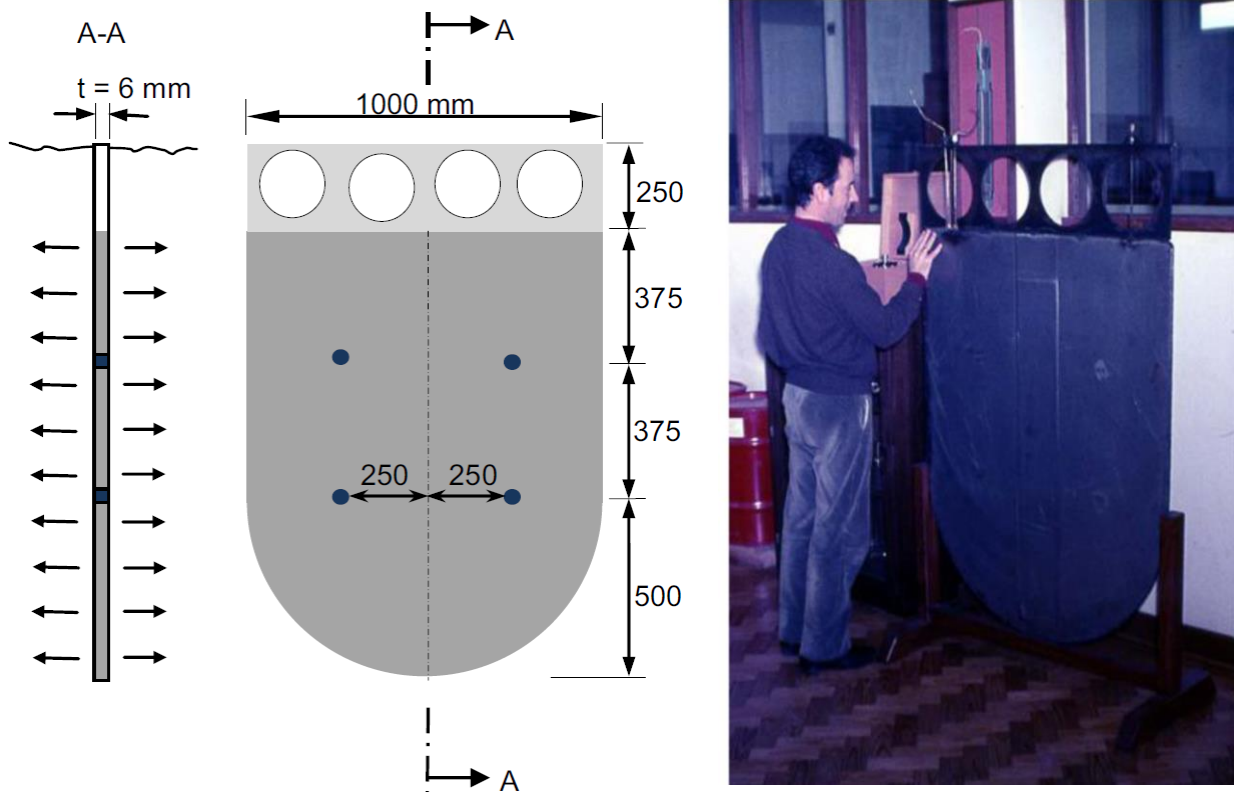
Метода хидрауличног јастука веома се успјешно користи, уз одговарајуће диспозиције, и као упоредна метода за квантитативна испитивања ефеката испирања пукотина у стијенској маси водом, као и за испитивање ефеката консолидационог ињектирања. Користи се и као упоредна метода за статичка и динамичка упоредна испитивања стијенске масе.

Предности ове методе су:

- уређаји за испитивање су робустни али и релативно лагани, што омогућује лак транспорт и на иначе тешко приступачне терене,
- процес мјерења је једноставан и очигледан и омогућава лако графичко праћење

- релативно велика површина оптерећења од 3m^2 омогућује изазивање сила и до 5000 тона
- независно од било какве погонске енергије омогућава примјену на сваком мјесту на које може да допре и људска снага

На слици 18 је приказана савремена варијанта хидрауличног јастука (енгл. Large Flat Jack – LFT)



Слика 18: Облик савременог хидрауличног јастука

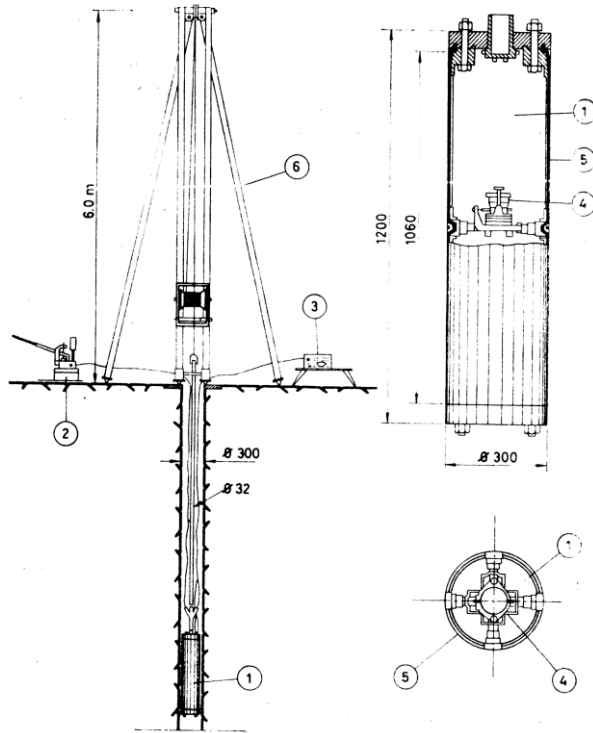
8.2. Метода сондажног дилатометра

Испитивања сондажним дилатометром врше се у бушотини пречника 200 или 300мм до дубине преко 200м. У овакву бушотину спушта се сондажни дилатометар, специјални уређај у облику цилиндра, помоћу кога се сукцесивно и на жељеним дубинама стијена може оптерећивати хидростатичким оптерећењем до 70 kg/cm^2 (7 МПа) и мјерити одговарајуће радијалне деформације.

Сами сондажни дилатометар се састоји из једног цилиндра са гуменим омотачем, објешеним о носач састављен из цијеви које се при спуштању у бушотину сукцесивно настављају. Читав уређај је објешен о специјални треножац изнад бушотине. Дилатометар се пуни водом и ставља под притисак обичном ручном пумпом посредством доводне цијеви састављене из низа краћих бакарних цијеви за високе притиске.

Хидростатички притисак, изазаван у дилатометру, преноси се преко гуменог омотача на зидове бушотине, који се под оптерећењем деформишу. Деформације се мјере у два правца, на

половини висине дилатометра, помоћу електричних инструмената са преношењем читања на површину.



Слика 19: Сондажни дилатометар: (1) тело дилатометра, (2) пумпа, (3) инструмент за регистровање деформација, (4) инструмент за мјерење деформација, (5) гумени омотач, (6) треножац



Слика 20: Сондажни дилатометар (borehole dilatometer)

Дужина дилатометра изабрана је тако да се избјегну утицаји граничних услова неоптерећене стијене, изнад и испод дилатометра, на величину деформација које се мјере на средини оптерећене дионице. На основу измјерених деформација, за сваки положај дилатометра, могу се израчунати вриједности модула деформације и модула еластичности по Ламеовом обрасцу:

$$E = pD/u (m+1)/m$$

гдје су u - промјена дужине пречника бушотине у цм
 m - Poisson-ov број

Резултати испитивања омогућују квантитативну оцјену промјене деформабилности стијенске масе у функцији дубине.