

**Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet**

Preddiplomski studij

GEOTEHNIČKO INŽENJERSTVO

3. predavanje

Laboratorijski istražni radovi



SADRŽAJ PREDAVANJA

ZAVOD ZA
GEOTEHNIKU

- Ultrazvučna ispitivanja
- Sklerometar – Schimdt hammer
- PLT
- Jednoosna vlačna čvrstoća
- Pokus jednoosnog tlaka
- Pokus troosnog tlaka
- Sadržaj karbonata
- Trajnost – slake durability test

Ovim se ispitivanjem određuje brzina širenja elastičnih valova na laboratorijskim uzorcima.



PRIMJENA

- Ispitivanje homogenosti stijene
- Mjerenje brzine širenja uzdužnog vala u stijeni
- Određivanje modula elastičnosti pri malim deformacijama
- Procjena jednoaksijalne tlačne čvrstoće stijene

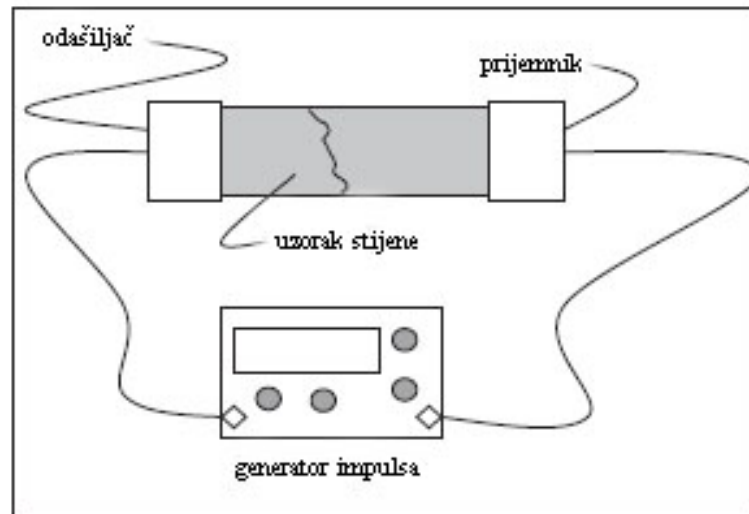
PRINCIP

Generator impulsa preko odašiljača (T_x) impulsa generira uzdužni val koji prolazi kroz uzorak stijene dužine L , i registrira se u prijemniku (R_x).

Vremenski interval od trenutka kada impuls napušta odašiljač, pa do trenutka prijema impulsa, predstavlja vrijeme prolaska impulsa (t). Brzina širenja uzdužnih valova (v) dana je izrazom:

$$v = \frac{L}{t}$$

Kada se ultrazvuk koristi za procjenu tlačne čvrstoće stijene, mjerenje vremena prolaska vala izvodi se samo izravnim prolazom impulsa.



Za razne debljine uzoraka uređaj mora imati sonde čije su frekvencije dane izrazom:

$$f_0 > 7000 / a$$

gdje je:

a - debljina uzorka u mm

f_0 - vlastita frekvencija u kHz

Pri izboru mjernog mjesta odaberu se ravne, čiste i suhe površine, a ako to nije moguće tada se brušenjem i čišćenjem dovodi u takovo stanje.

Zbog postizanja dobrog kontakta sonda-stijena neophodno je površinu ispitnog mjesta u tankom sloju premazati sredstvom za podmazivanje.

Ako je površina stijene jako hrapava, a nije moguće brušenje, koristi se za kontakt između sonde i stijene sredstvo veće gustoće od sredstva za podmazivanje.

PRORAČUN

Modul elastičnosti stijene pri malim deformacijama određuje se koristeći prethodno izmjerenu gustoću uzorka:

$$E = \rho \times v^2$$

Tlačna čvrstoća se procjenjuje uspostavljanjem korelacijske ovisnosti sa brzinom širenja uzdužnog vala:

$$\sigma_c = A \times e^{Bv}$$

gdje je:

σ_c – tlačna čvrstoća u MPa

v – brzina prolaza uzdužnog vala u km/s

A – konstanta u MPa

B – konstanta u s/km

PRIMJENA

- procjena jednoaksijalne tlačne čvrstoće stijene

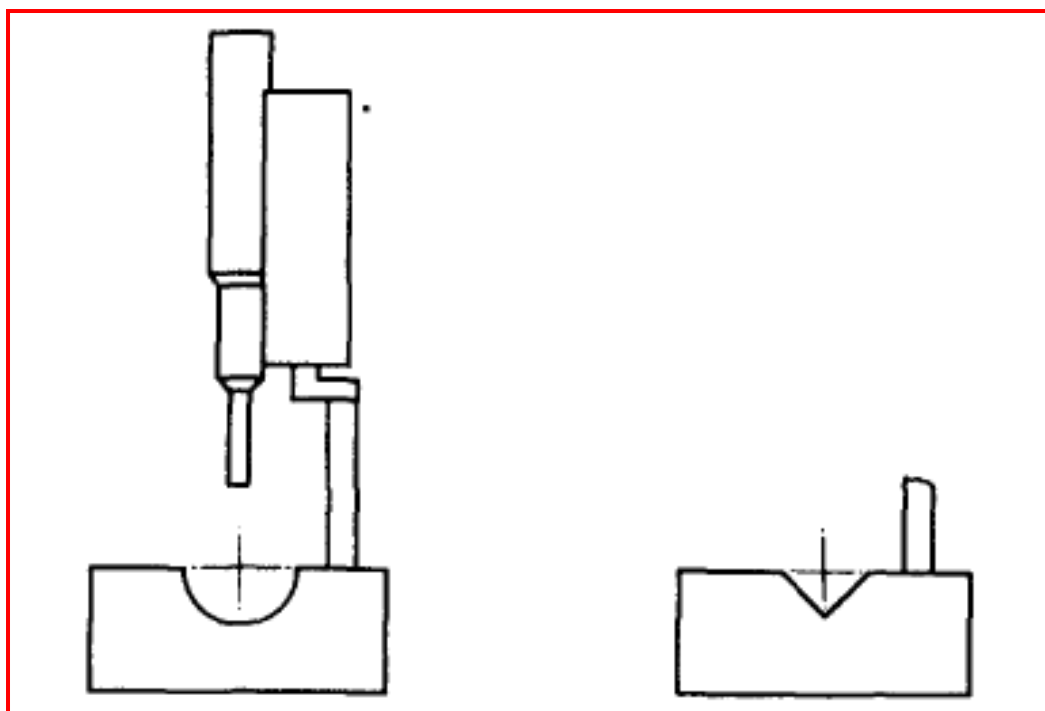
PRINCIP

Sklerometrom se mjeri veličina odskoka utega koja ovisi o površinskoj tvrdoći i elastičnosti stijenske mase.

Sklerometrom se određuje *indeks sklerometra* na ispitanom mjestu.

Započinje se s provjerom ispravnosti sklerometra na metalnom kalibratoru-etalonu. Za ispitivanje se biraju ravne, čiste i suhe površine. Ukoliko na ispitivanim elementima takvih površina nema, ispitane površine se moraju brušenjem, čišćenjem i sušenjem pripremiti.

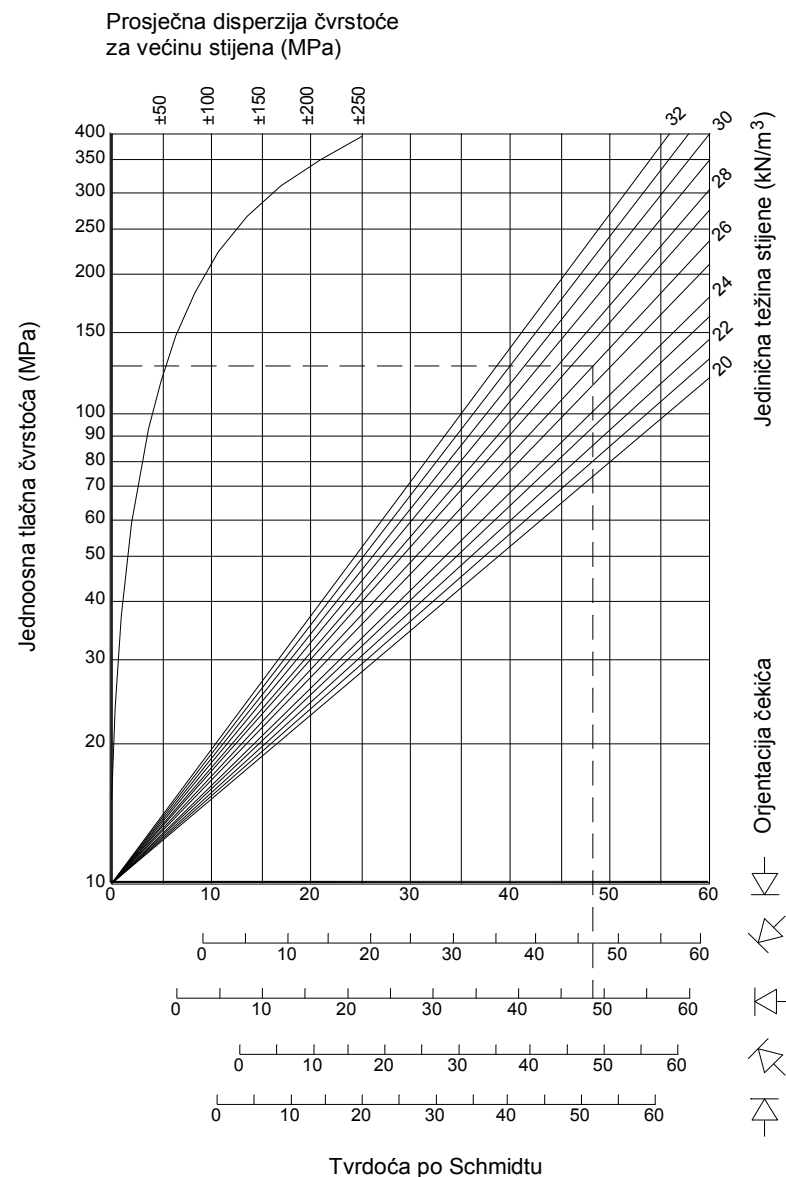
Uzorci koji se ispituju moraju biti pričvršćeni na kruto postolje kako bi se zaštili od vibracija i pomaka tijekom ispitivanja. Postolje je smješteno na ravnu podlogu.



Shematski prikaz postolja za
ispitivanje sklerometrom

Od izmjerenih odskoka odredi se srednja vrijednost i od tako formiranog skupa odbacuju se svi odskoci koji se od srednje vrijednosti razlikuju za više od 4 jedinice. Broj odbačenih odskoka ne smije biti više od 30% od ukupnog broja odskoka, u protivnom se ispitno mjesto odbacuje. Od preostalog skupa odredi se srednja vrijednost koja je za ispitano mjesto indeks sklerometra.

Korelacijski dijagram za Schmidtov L-čekić





Vrijednosti odskoka variraju u rasponu od 10 do 60 što se pokazalo u praksi. Najmanji broj odgovara slaboj stijeni ($\sigma_c < 20$ MPa), dok najveći broj odgovara vrlo čvrstoj i izrazito čvrstoj stijeni ($\sigma_c > 150$ MPa).

- **Prednost** metode je u brzini i nerazornom načinu ispitivanja. Uređaj je malen i lako prenosiv pa se osim u laboratoriju ispitivanja mogu vršiti i na terenu.
- **Ograničenje** je u tome što se rezultati odnose samo na površinski sloj (< 30 mm dubine).

Point Load Test – Indeks točkaste čvrstoće

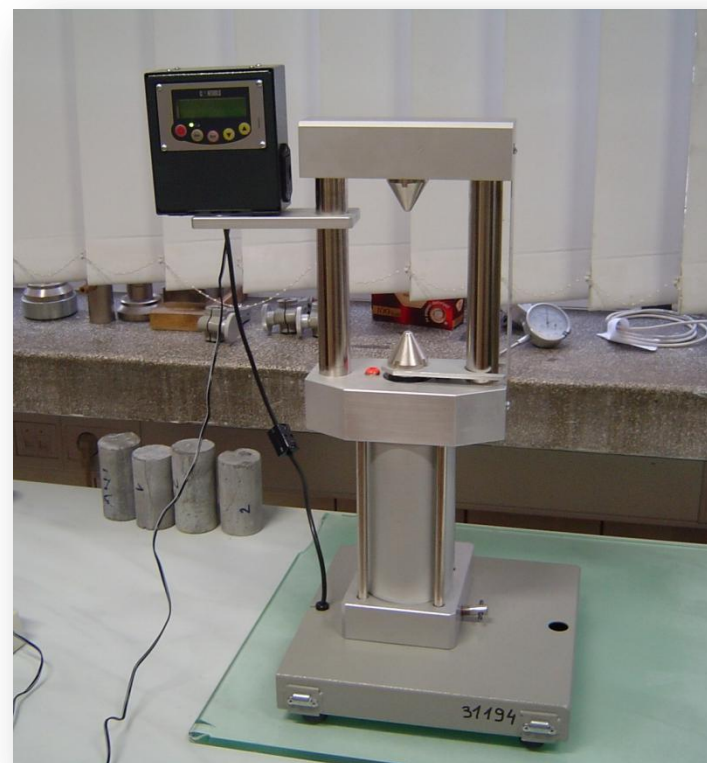
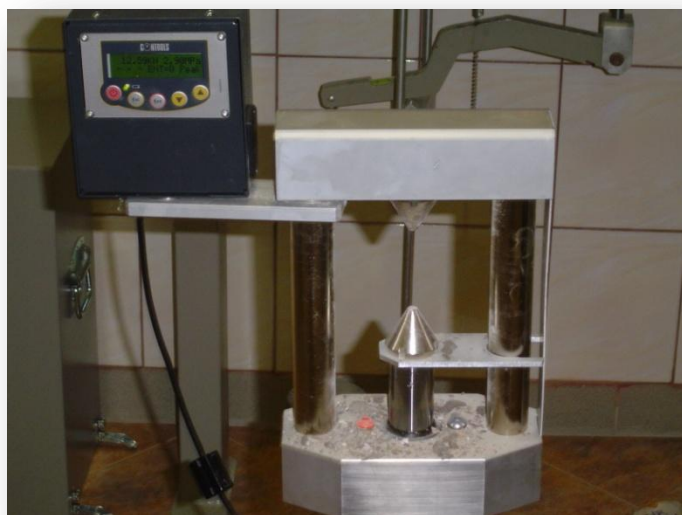
Point load test (PLT) predstavlja metodu za određivanje čvrstoće stijene pri opterećenju u točki. PLT je zamišljen kao indeksni test za klasifikaciju stijenske mase izravno ili u korelaciji s jednoosnom tlačnom čvrstoćom.

Princip PLT testa sastoji se u tome da se uzorci stijene lome primjenom koncentriranog opterećenja preko para zaobljenih konusnih šiljaka. Ako je uzorak stijene u obliku jezgre tada se vrše takozvani *“dijametralni”* i *“aksijalni”* testovi, ako je u obliku rezanih blokova ili je nepravilan vrši se *“blok test”* ili *“test nepravilnih uzoraka”*.

Ispitivanje je moguće u laboratoriju i na terenu. Standardizirani prijenosni uređaj idealan je za brzo izvođenje pokusa na jezgri iz bušotina i to izravno na terenu.

Uređaj za ispitivanje

Uređaj za provedbu ispitivanja sastoji se od dijela za nanošenje opterećenja, uređaja za mjerenje sile P potrebne za slom uzorka i dijela za mjerenje udaljenosti D između dva kontaktna šiljka.



Uređaj za ispitivanje – sustav za nanošenje opterećenja

Dio za nanošenje opterećenja sastoji se od okvira, konusnih šiljaka od tvrdog metala te hidraulične pumpe i potisnog cilindra. Konusni šiljci služe za prijenos opterećenja na uzorak. Šiljci moraju biti izvedeni pod kutom od 60° te radijusom zakrivljenosti od 5 mm na samom vrhu, pri čemu centriranost mora biti dobro osigurana.

Razmak između zaobljenih šiljaka mora biti 15-100 mm tako da se omogući testiranje uzoraka u traženom rasponu dimenzija. Kapacitet opterećenja mora biti dovoljan da slomi najveće i najčvršće uzorke.

Stroj za testiranje mora biti konstruiran tako da ne dođe do njegove deformacije prilikom ponavljanog maksimalnog opterećenja. Šiljci moraju biti izrađeni od tvrdog materijala tako da ostanu neoštećeni prilikom testiranja.



Uređaj za ispitivanje – sustav za mjerenje sile

Sustav za mjerenje sile, npr. ćelija ili hidraulička preša, bi trebao omogućiti fiksiranje sile P kod loma, a mjerenje sile ne smije odstupati više od 5 % bez obzira na veličinu i čvrstoću uzorka koji se testira.

Sustav treba biti otporan na hidraulička opterećenja i vibracije tako da ponavljanje testiranja ne utječe na preciznost očitanih rezultata. Lom je najčešće iznenadan i uređaj za maksimalnu silu je bitan tako da se sila loma može zadržati i očitati nakon svakog testiranja.



Uređaj za ispitivanje – sustav za mjerenje razmaka

Sustav za mjerenje razmaka između šiljaka treba omogućiti mjerenje udaljenosti D između dodirnih točaka uzorka i šiljka. Mjerenje razmaka mora biti sa točnošću od 2 % bez obzira na dimenzije uzorka. Sustav treba biti otporan na hidraulička opterećenja i vibracije tako da ponavljanje testiranja ne utječe na preciznost očitanih rezultata. Također treba omogućiti provjeru vrijednosti *nultog pomaka* kada su šiljci u kontaktu.

Osim toga potrebno je posjedovati mjerni instrument (na primjer šestar ili čelično ravnalo) za određivanje širine uzorka W za svaki test, osim za dijametralni.



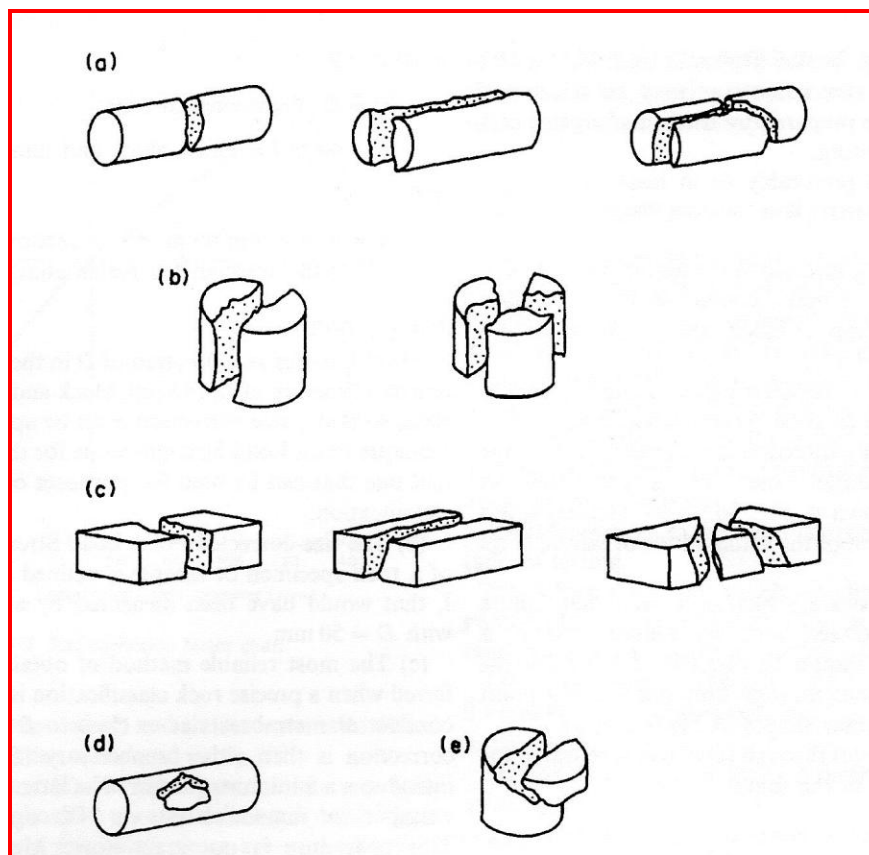
POSTUPAK

Ispitivanje se provodi na uzorcima pravilnih ili nepravilnih oblika. Standardno ispitivanje provodi se na valjkastim uzorcima s promjerom D od 50 mm.

Ispitivanje se može provesti kao: poprečno (dijametralno) ispitivanje, osno (aksijalno) ispitivanje i ispitivanje uzoraka nepravilnih oblika.



Modovi loma pri ispravnim (a,b,c) i neispravnim (d,e) ispitivanjima



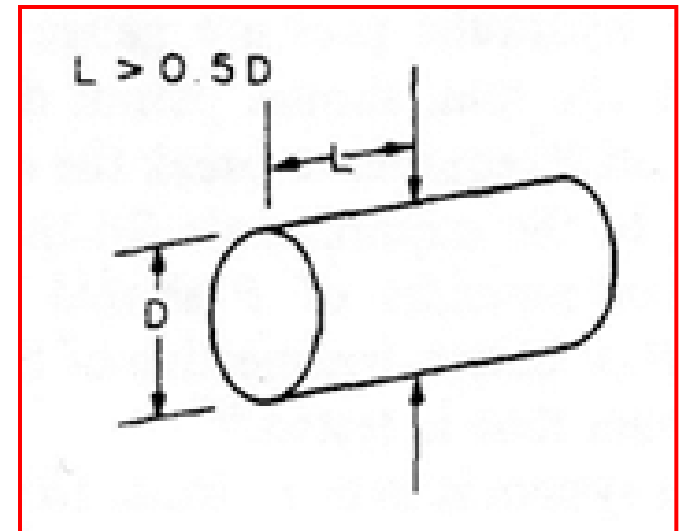
Dijametralni test

Za dijametralni test pogodni su uzorci jezgre kod kojih je omjer dužine i širine veći od 1.

Treba izvršiti najmanje deset testova po uzorku, i više ako je stijena heterogena ili anizotropna.

Uzorak se umetne u stroj za ispitivanje, a šiljci se približe da stvore kontakt duž promjera jezgre.

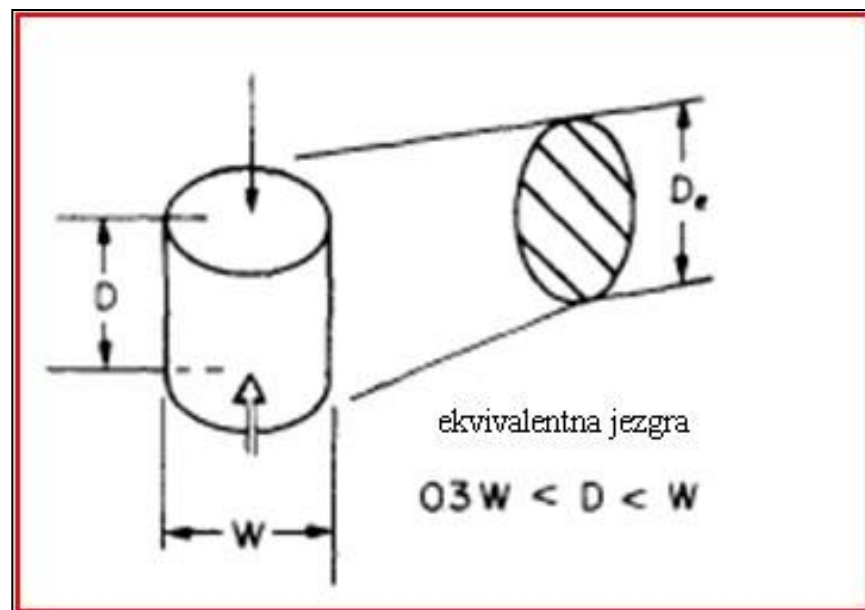
Udaljenost između dodirne točke šiljka i uzorka do najbližeg slobodnog ruba treba biti najmanje polovica promjera jezgre. Udaljenost D između šiljaka se mjeri sa točnošću 2 %. Nakon toga se nanosi sila do konačnog sloma uzorka koji nastaje nakon 10-60 sec. Kad se uzorak slomi, bilježi se maksimalna sila P .



Aksijalni test

Za aksijalni test pogodni su uzorci jezgre s omjerom dužine i širine 0.3-1. Dugi komadi jezgre se pile ili odvajaju dijetlom, a mogu se testirati dijametralno da daju tražene dužine uzoraka za sljedeće aksijalno testiranje. Treba izvršiti najmanje 10 testova po uzorku, a po potrebi i više.

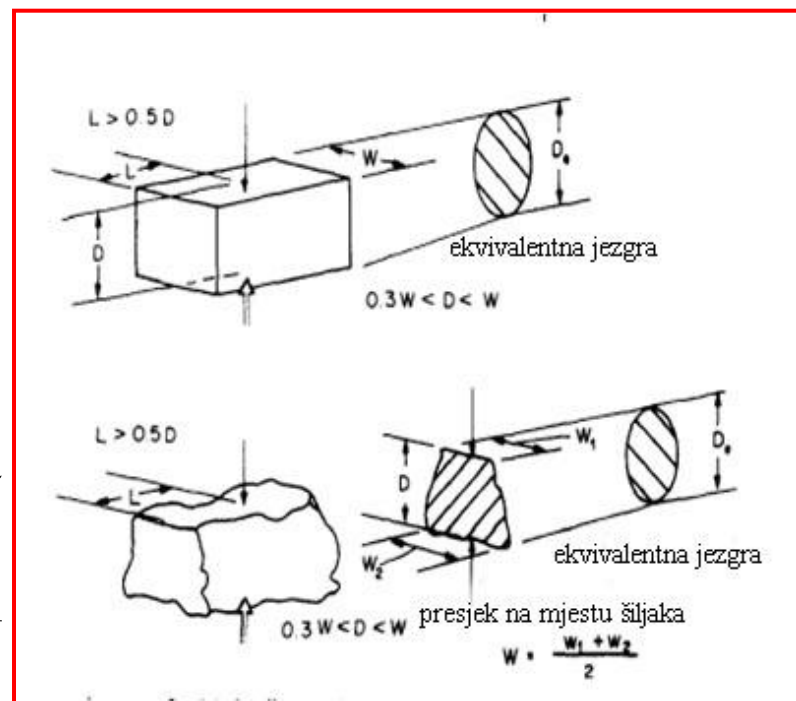
Uzorak se umetne u stroj za testiranje, a šiljci se primaknu tako da čine kontakt duž linije koja je okomita na krajnje površine jezgre. Udaljenost D se zabilježi sa točnošću od 2 %, a širina W okomita na smjer nanošenja opterećenja sa točnošću od 5 %. Nakon toga se nanosi sila do konačnog sloma uzorka koji nastaje nakon 10-60 sec. Kad uzorak pukne, bilježi se maksimalna sila P .



Blok test i test na nepravilnom uzorku

Za ove testove pogodni su blokovi ili komadi stijena veličine 50 ± 35 mm. Omjer dužine D i širine W trebao bi biti 0.3-1.0, a najbolje blizu 1.0. Udaljenost L treba biti barem $0.5 D$. Potrebno je izvršiti najmanje 10 testova po uzorku, i više ako je stijena nehomogena i anizotropna.

Uzorak se umetne u stroj za testiranje, a šiljci se primaknu tako da čine kontakt sa najmanjom dimenzijom bloka, odmaknuto od rubova i krajeva. Udaljenost D se zabilježi sa točnošću od 2 %, a širina W okomita na smjer nanošenja opterećenja sa točnošću od 5 %. Nakon toga se nanosi sila do konačnog sloma uzorka koji nastaje nakon 10-60 sec. Kad uzorak pukne, bilježi se maksimalna sila P .

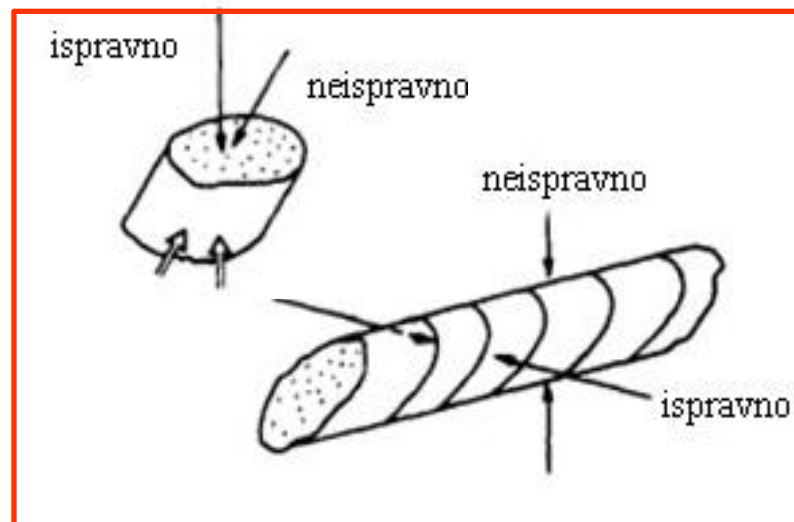


Anizotropna stijena

Kada je uzorak stijene uslojen, škriljast ili na drugi način očito anizotropan, treba ga ispitati u smjerovima koji daju najveće i najmanje vrijednosti čvrstoće. Ako se uzorak sastoji od jezgre bušene kroz ravninu sloma, prvo se mora dovršiti niz dijametralnih testova i to tako da se dobiju komadi koji se mogu testirati aksijalno.

Najbolji rezultati dobiju se kada je os jezgre okomita na ravnine sloma. Zato bi, kad god je to moguće, jezgru trebalo bušiti u tom smjeru. Kut između osi jezgre i okomice do ravnine sloma ne bi trebao biti veći od 30° .

Kada se mjere vrijednosti indeksa čvrstoće u pravcu najmanje čvrstoće, treba paziti da je opterećenje prisutno duž jedne ravnine sloma, a kada se mjere vrijednosti indeksa čvrstoće u pravcu najveće čvrstoće da opterećenje bude raspoređeno okomito na ravnine sloma.



PRORAČUN

➤ *nekorigirana čvrstoća*

Nekorigirana čvrstoća pri opterećenju u točki računa se po formuli:

$$I_s = \frac{P}{D_e^2}$$

P – maksimalna sila zabilježena u trenutku sloma

D_e – ekvivalentni promjer jezgre

Dijametralni test	Aksijalni test, blok test i test nepravilnog uzroka
$D_e^2 = D^2$	$D_e^2 = 4A/\pi$ $A = W \times D$

A – minimalna površina presjeka kroz uzorak u ravnini točaka kontakta zaobljenih šiljaka

PRORAČUN

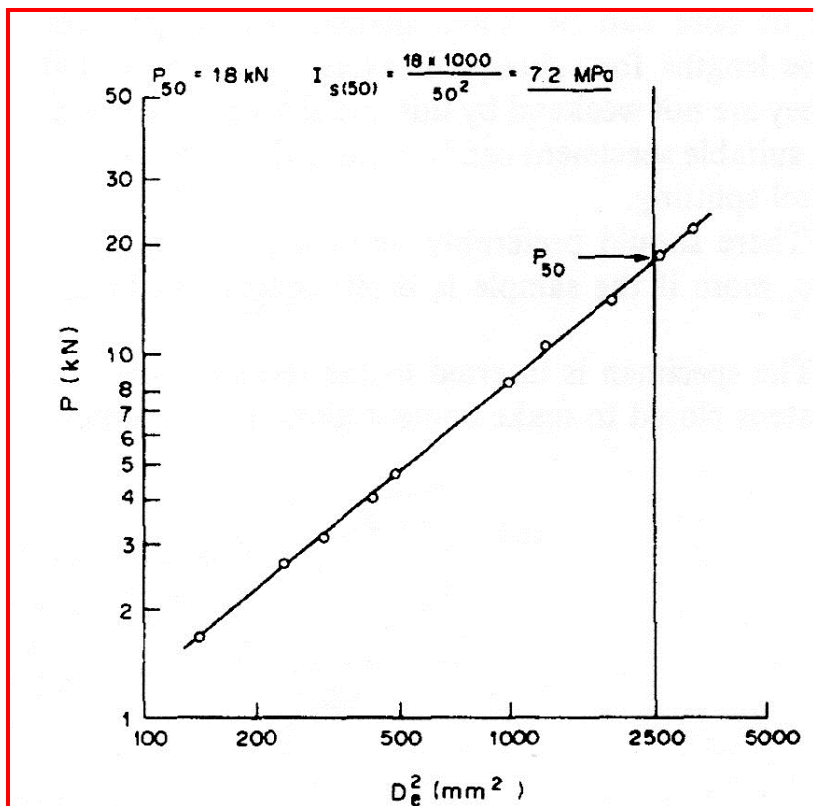
➤ *Korekcija vrijednosti indeksa čvrstoće u odnosu na dimenzije uzorka*

Vrijednost I_s -a varira kao funkcija od D u dijametralnom testu i kao funkcija od D_e u aksijalnom testu, blok testu ili testu nepravilnih uzoraka. Zbog toga se mora izvršiti korekcija u odnosu na dimenzije uzoraka kako bi se dobila unificirana vrijednost PLT-a.

Korigirana vrijednost PLT-a definira se kao čvrstoća uzorka izmjerena u dijametralnom testu na uzorku promjera 50 mm ($D=50$ mm) i označava se kao I_{s50} .

PRORAČUN

➤ *Korekcija vrijednosti indeksa čvrstoće u odnosu na dimenzije uzorka*



Najpouzdanija metoda korekcije veličine I_s je testiranje uzorka različitog D ili D_e , te grafički prikaz odnosa P i D_e^2 . Ako se koristi log-log krivulja, odnos između P i D_e^2 je najčešće ravna crta.

Korištenjem dijagrama dobije se pravac preko kojeg se određuje vrijednost P_{50} , koja odgovara $D_e^2 = 2500 \text{ mm}^2$.

Postupak grafičkog određivanja $I_{s(50)}$ iz skupa vrijednosti D_e^2

PRORAČUN

➤ *Korekcija vrijednosti indeksa čvrstoće u odnosu na dimenzije uzorka*

Ako se ispituje uzorak koji ne odgovara promjeru od 50 mm korekcija vrijednosti I_s može se izvršiti i pomoću formule:

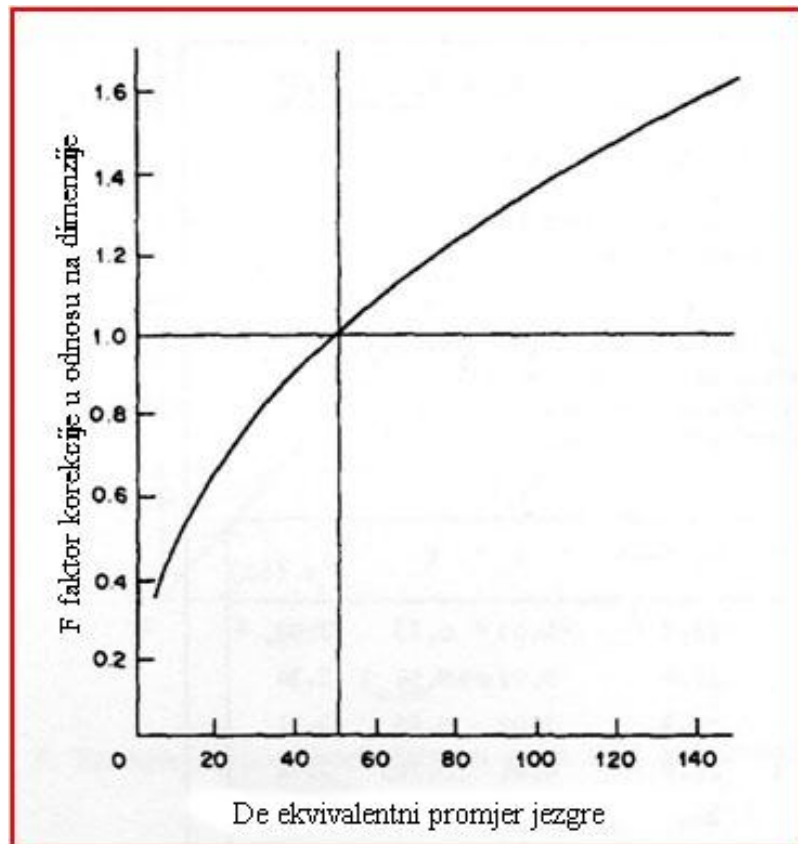
$$I_{s(50)} = F \times I_s$$

F – faktor korekcije u odnosu na dimenzije, može se dobiti iz dijagrama ili pomoću sljedeće jednadžbe:

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

PRORAČUN

➤ *Korekcija vrijednosti indeksa čvrstoće u odnosu na dimenzije uzorka*



Graf faktora korekcije s obzirom na dimenziju

Opisani postupci korekcije veličina primjenjivi su bez obzira na stupanj anizotropije (I_a) i pravac opterećenja s obzirom na ravnine sloma.

PRORAČUN

➤ *Proračun srednje vrijednosti*

Prosječna vrijednost računa se izbacivanjem po dvije najveće i najmanje vrijednosti od 10 ili većeg broja pokusa i izračunavanjem srednje vrijednosti ostalih rezultata. Kada se raspolaže malim brojem pokusa odbacuje se samo po jedna najveća i najmanja vrijednost, a prosjek se računa od preostalih rezultata.

Na taj način dobivene prosječne vrijednosti koriste se za klasifikaciju stijena prema PLT-u i za proračun indeksa anizotropije stijena .

PRORAČUN

➤ *Indeks anizotropije*

Indeks anizotropije $I_{a(50)}$ definira se kao omjer srednjih vrijednosti mjerenih okomito i paralelno s ravninama sloma, tj. omjer najvećih i najmanjih indeksa PLT-a.

$I_{a(50)}$ ima vrijednost blizu 1.0 za kvazi izotropne stijene, a veće vrijednosti kada je stijena anizotropna.

br.	uzorak	tip	W (mm)	D (mm)	P (kN)	D_e^2 (mm ²) $D_e^2 = \frac{4}{\pi}(W \times D)$	D_e (mm)	I_s (Mpa) $I_s = \frac{P}{D_e^2}$	F $F = \left(\frac{D_e}{50}\right)^{0.45}$	$I_{s(50)}$ (Mpa) $I_{s(50)} = F \times I_s$
1	B-1	d	-	78,80	16,85	-	78,80	2,71	1,23	3,33
2	B-1	d	-	78,80	14,65	-	78,80	2,36	1,23	2,90
3	B-1	a	78,80	41,00	5,83	4115,67	64,15	1,42	1,12	1,58
4	B-1	a	78,80	56,00	12,00	5621,40	74,98	2,13	1,20	2,56
5	B-1	a	78,80	61,50	10,72	6173,50	78,57	1,74	1,23	2,13

dijametralni test

aksijalni test

ekvivalentni promjer

Indeks čvrstoće

korigirani indeks
čvrstoće



Jednoosna vlačna čvrstoća jednaka je najvećem vlačnom naprezanju koje stijenska masa može preuzeti neposredno prije sloma, odnosno opisuje otpor stijenske mase vlačnom naprezanju.

Za određivanje jednoosne vlačne čvrstoće na raspolaganju su izravne i neizravne metode. Neizravne metode popularnije su zahvaljujući jednostavnoj pripremi uzoraka i relativno jednostavnom postupku izvođenja.

IZRAVNA METODA

Uzorci moraju biti cilindričnog oblika, ne manjeg promjera od 54 mm sa ravnim i glatkim površinama.

Oba kraja cilindričnog uzorka zacementiraju se za metalne ploče. Promjer metalnih ploča ne smije biti manji od promjera uzorka, ali ne smije biti niti veći od 2 mm. Debljina ploča treba biti 5 mm.

Ploče moraju biti povezane s uređajem za nanošenje opterećenja.

Debljina cementnog sloja ne smije biti veća od 1.5 mm.

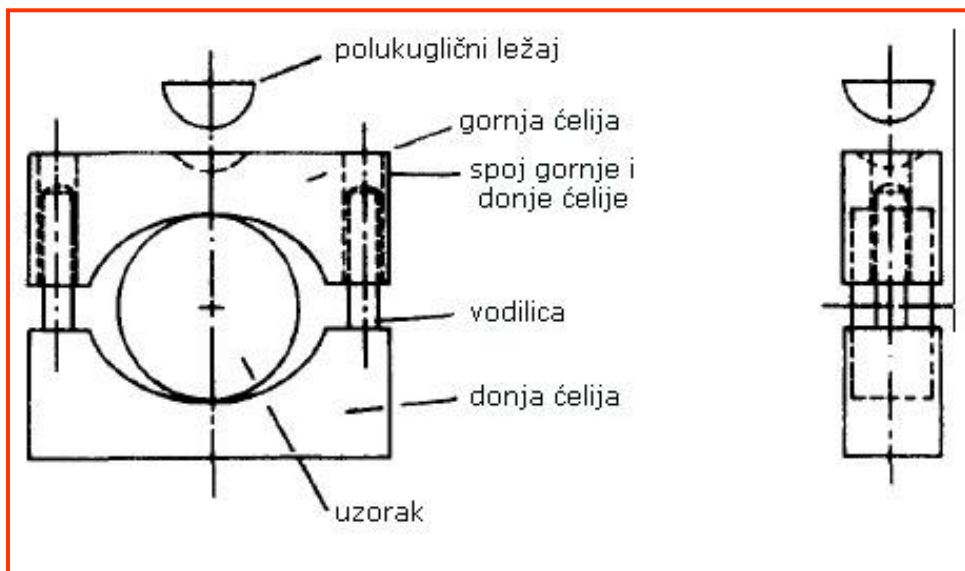
Kada taj sloj dovoljno očvrsne da prekorači vlačnu čvrstoću stijene, može se započeti ispitivanje.

Vlačna čvrstoća uzorka izračuna se kao omjer najveće vlačne sile koju uzorak može preuzeti neposredno prije sloma i površine poprečnog presjeka uzorka.

NEIZRAVNA METODA – BRAZILSKI TEST

Brazilskim testom na neizravan način može se odrediti jednoosna vlačna čvrstoća stijene podvrgavanjem stijene tlačnom opterećenju.

Opravdanost ove metode leži u činjenici da većina stijena u dvoosnom stanju naprezanja popušta vlačno kada je jedno glavno naprezanje vlačno, a drugo glavno naprezanje je tlačno i njegova veličina nije tri puta veća od vlačnog glavnog naprezanja.



NEIZRAVNA METODA – BRAZILSKI TEST

Ispituje se cilindrični uzorci čije površine moraju biti ravne, čiste i suhe. Promjer uzorka ne smije biti manji od 54 mm.

Sila se nanosi konstantnom brzinom tako da do sloma najslabijih stijena dođe unutar 15-30 sekundi od početka ispitivanja (preporučuje se brzina od 200 N/s).

Jednoosna vlačna čvrstoća [MPa] izračuna se prema sljedećoj formuli:

$$\sigma_t = 0.636P / Dt$$

P - sila u trenutku sloma [N]

D – promjer uzorka [mm]

t – širina uzorka mjerena u središtu [mm]

Uniaxial Compressive Strength

Pokus je primarno namijenjen za klasifikaciju čvrstoće i karakterizaciju intaktne stijene.

Postupak ispitivanja, odgovarajuća oprema te proračun modula elastičnosti na temelju rezultata mjerenja detaljno su prikazani u ASTM D 3148 – 02.



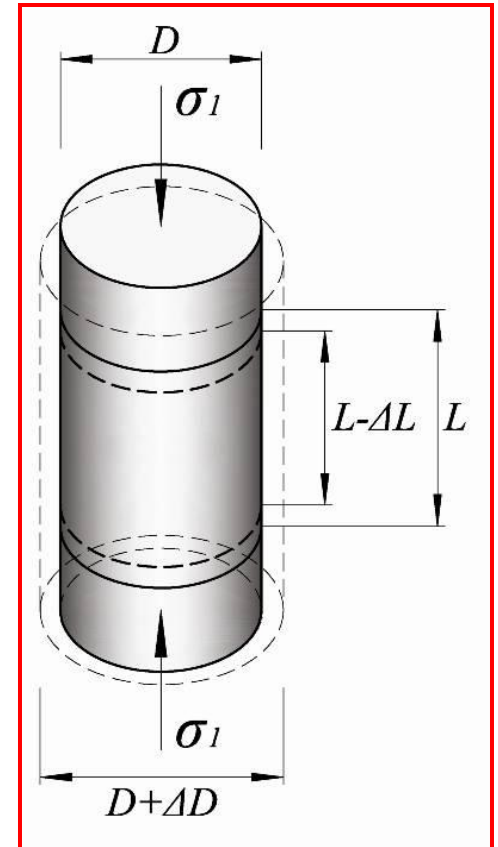
POSTUPAK

Prije početka ispitivanja izbušeni uzorak cilindričnog oblika rezanjem i brušenjem se dovodi u oblik nužan za dobivanje reprezentativnih mehaničkih parametara stijene.

Promjer uzorka treba biti veći od 47 mm. Visina uzorka treba biti 2.0-2.5 puta veća od njegovog promjera. Ravnost plašta uzorka treba biti manja od 0.5 mm, a ravnost baze manja od 0.025 mm.

Nakon postavljanja u uređaj za ispitivanje uzorak se opterećuje uzdužnom silom uz istovremeno mjerenje uzdužnih i radijalnih deformacija.

Deformacije uzorka u jednoosnom
stanju naprezanja



POSTUPAK

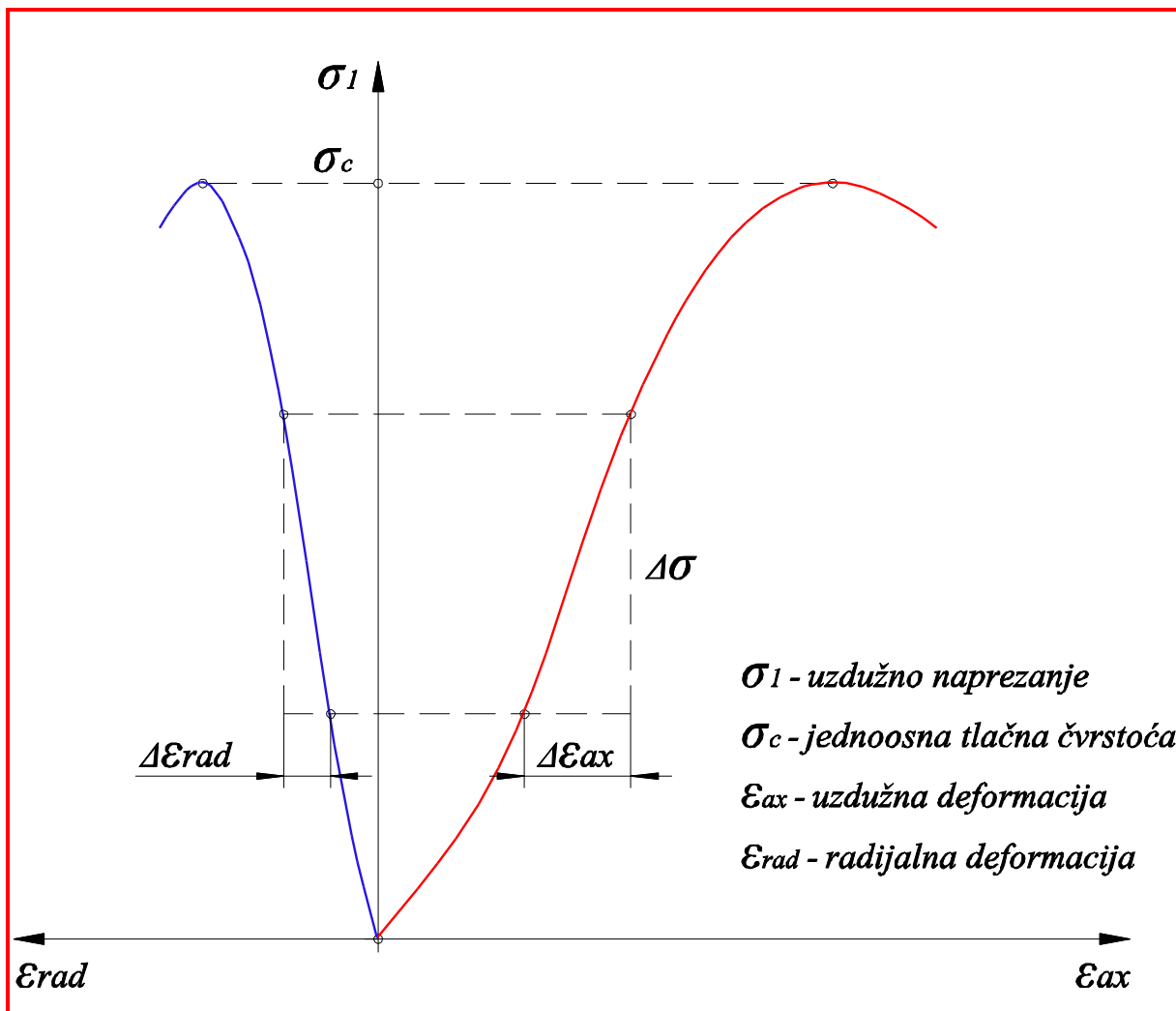
Opterećivanje uzorka može se provoditi kontinuiranim prirastom sile odnosno naprezanja ili kontinuiranim prirastom pomaka odnosno deformacija. Prirast naprezanja ili deformacija treba biti takav da se slom uzorka ostvari u vremenu između 2 i 15 minuta.

Promjena visine uzorka (ΔL) odnosno uzdužna deformacija mjeri se na način da se na uzorak pričvrste nosači senzora za mjerenje pomaka. Razmak između nosača senzora je početna visina uzorka (L) koja se uzima u proračun modula. Mjerenja se obavljaju na najmanje dva senzora, ravnomjerno raspoređena oko uzorka, a u proračun se uzima prosječna vrijednost izmjerenih pomaka.

POSTUPAK

Promjena promjera uzorka (ΔD) odnosno radijalna deformacija uzorka vrši se na način da se na uzorak pričvrsti senzor za mjerenje promjene opsega uzorka ili najmanje dva senzora za mjerenje promjene promjera uzorka, ravnomjerno raspoređena oko uzorka promjera (D), kod kojih se u proračun uzima prosječna vrijednost izmjerenih pomaka.

Obzirom da do sloma intaktnih uzoraka stijene dolazi kod vrlo malih deformacija postavljeni su vrlo visoki zahtjevi na mjerne senzore. Deformacije se moraju mjeriti sa rezolucijom od barem 25×10^{-6} i točnošću unutar 2% za vrijednosti deformacija većih od 250×10^{-6} odnosno sa rezolucijom i točnošću unutar 5×10^{-6} za vrijednosti deformacija manjih od 250×10^{-6} .



$$\sigma_1 = \frac{P}{A}$$

$$(A = D^2 \cdot \pi / 4)$$

$$\epsilon_{ax} = \frac{\Delta L}{L}$$

$$\epsilon_{rad} = \frac{\Delta D}{D}$$

Naponsko-deformacijske krivulje u jednoosnom stanju naprežanja

- Uzdužna deformacija (ε_{ax}) izračunava se prema izrazu:

$$\varepsilon_{ax} = \frac{\Delta L}{L}$$

- Radijalna deformacija (ε_{rad}) izračunava se prema izrazu:

$$\varepsilon_{rad} = \frac{\Delta D}{D}$$

- Uzdužno tlačno naprezanje (σ_1) izazvano djelovanjem sile (P) na površinu uzorka izračunava se prema izrazu:

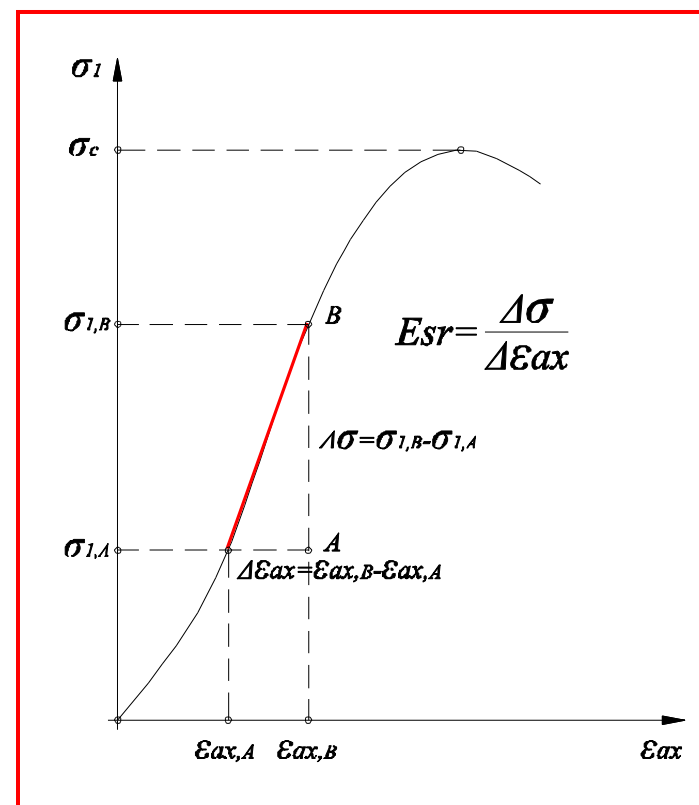
$$\sigma_1 = \frac{P}{A}$$

• Određivanje modula elastičnosti

Modul elastičnosti može se odrediti na više načina koji se koriste u inženjerskoj praksi. Razlikuju se srednji, tangentni i sekantni modul elastičnosti.

➤ *Srednji modul elastičnosti*

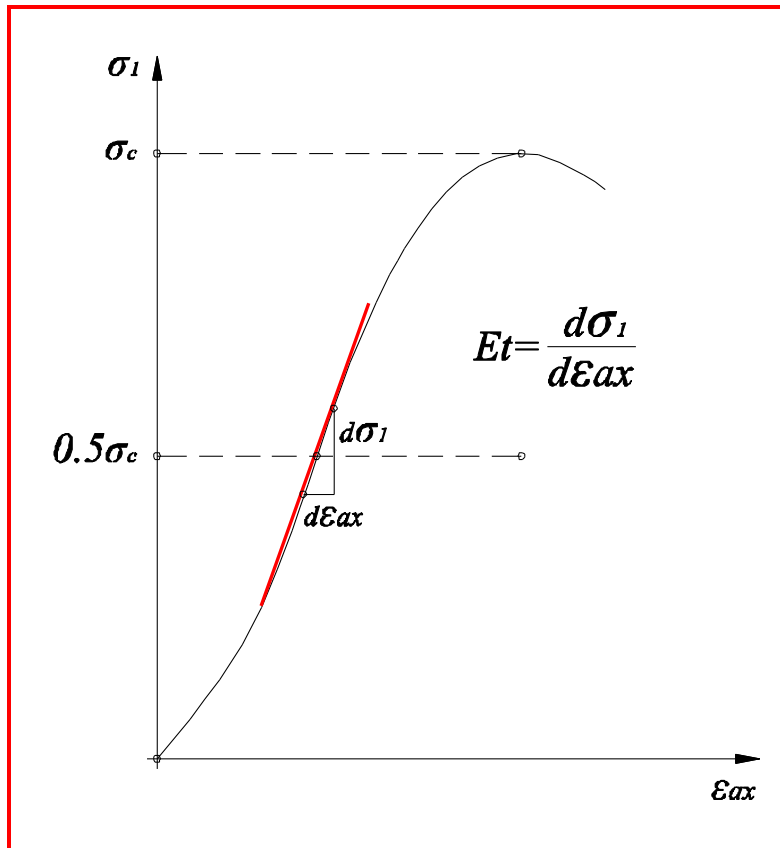
predstavlja omjer razlike naprezanja i pripadnih razlika deformacija za odabrano područje naponsko-deformacijske krivulje.



Srednji modul elastičnosti pri jednoosnom tlaku

- **Određivanje modula elastičnosti**

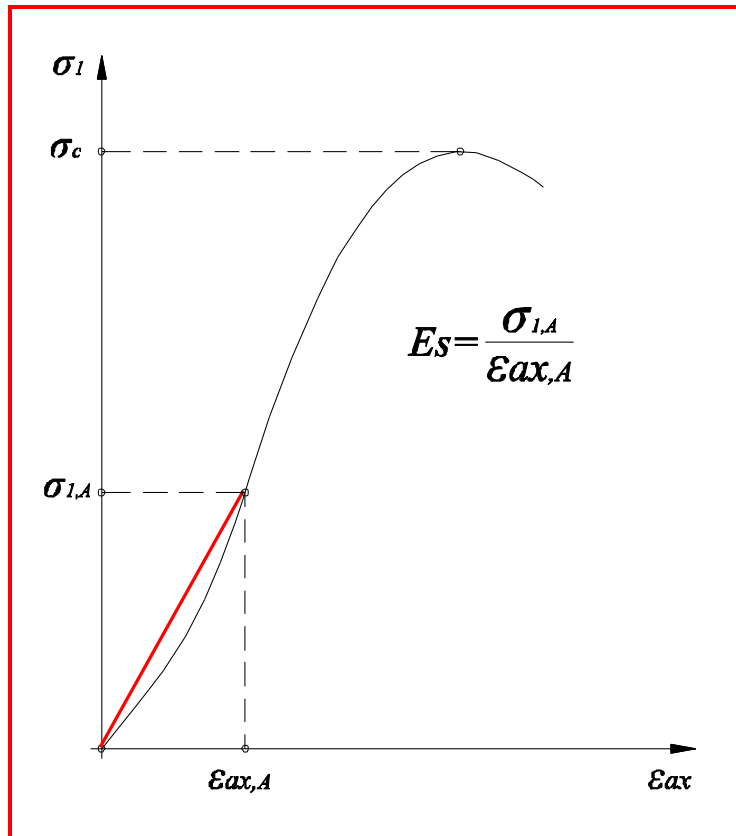
➤ *Tangentni modul elastičnosti* predstavlja omjer prirasta naprežanja i pripadnog prirasta deformacija za vrijednost naprežanja od $0.5\sigma_c$



Tangentni modul elastičnosti pri jednoosnom tlaku

- **Određivanje modula elastičnosti**

➤ *Sekantni modul elastičnosti* predstavlja omjer naprezanja i pripadne deformacije u željenoj točki naponsko-deformacijske krivulje.



Sekantni modul elastičnosti pri jednoosnom tlaku

- Poissonov koeficijent (ν) izračunava se prema izrazu:

$$\nu = - \frac{\text{nagib krivulje aksijalna deformacija – naprezanje}}{\text{nagib krivulje radijalna deformacija – naprezanje}}$$
$$= - \frac{E}{\text{nagib krivulje radijalna deformacija – naprezanje}}$$

Nagib krivulje radijalna deformacija-naprezanje odredi se na isti način kao modul elastičnosti.

Poissonov koeficijent ima pozitivnu vrijednost.

- Volumska deformacija (ε_v) izračunava se prema izrazu:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_a + 2\varepsilon_d$$



Triaxial Compression Test

Postupak ispitivanja, odgovarajuća oprema za ispitivanje te proračun modula elastičnosti na temelju rezultata mjerenja detaljno su prikazani u ASTM D 5407-95.

Pokusom se mjeri čvrstoća valjkastog stijenskog uzorka podvrgnutog troosnom pritisku.

POSTUPAK

Prije početka ispitivanja izbušeni uzorak cilindričnog oblika rezanjem i brušenjem se dovodi u oblik nužan za dobivanje reprezentativnih mehaničkih parametara stijene.

Promjer uzorka treba biti veći od 47 mm. Visina uzorka treba biti 2.0-2.5 puta veća od njegovog promjera. Ravnost plašta uzorka treba biti manja od 0.5 mm, a ravnost baze manja od 0.025 mm.

Zbog potrebe za nametanjem troosnog stanja naprezanja ispitivanja se provode u specijalnoj troosnoj ćeliji koja pomoću ulja prenosi hidrostatsko naprezanje na uzorak. Uzorak se od ulja štiti nepropusnom membranom.

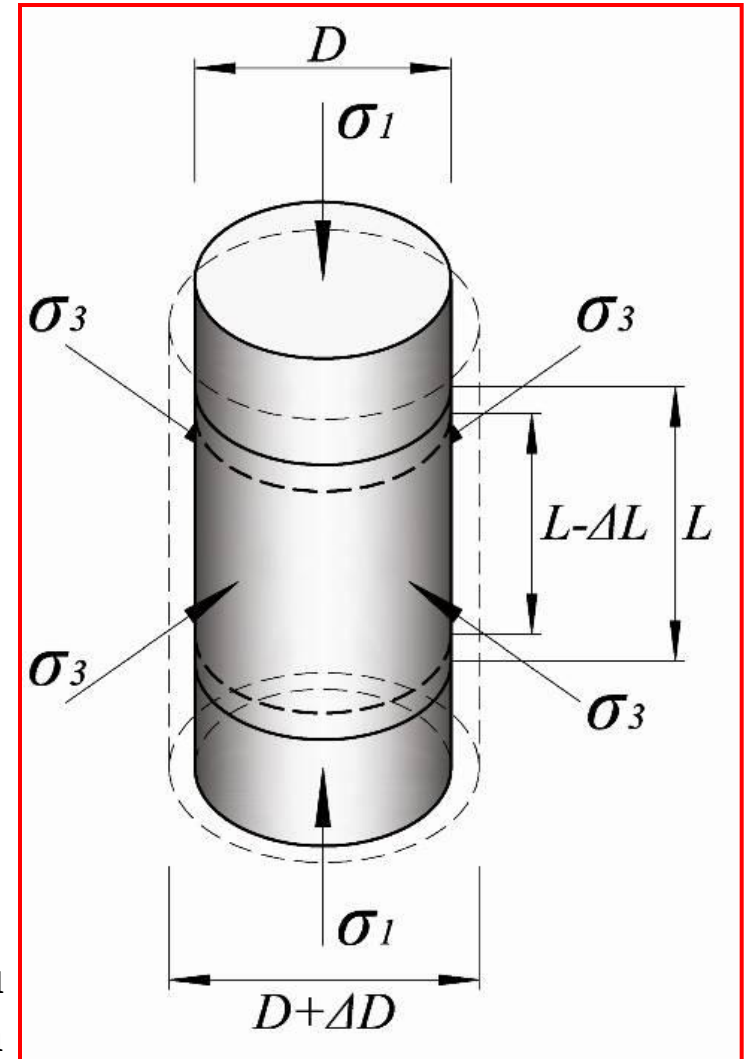
Hoek-ova ćelija za provođenje troosnih ispitivanja



POSTUPAK

Nakon što je postavljen u troosnu ćeliju i doveden u hidrostatsko stanje naprezanja nametanjem tzv. ćelijskog tlaka (σ_3), uzorak se kontinuirano opterećuje uzdužnom silom uz istovremeno mjerenje uzdužnih i radijalnih deformacija.

Deformacije uzorka u troosnom stanju naprezanja



POSTUPAK

Opterećivanje uzorka može se provoditi kontinuiranim prirastom sile odnosno naprezanja ili kontinuiranim prirastom pomaka odnosno deformacija. Prirast naprezanja ili deformacija treba biti takav da se slom uzorka ostvari u vremenu između 2 i 15 minuta. Za čitavo vrijeme prirasta sile odnosno pomaka ćelijski tlak se drži konstantnim.

Promjena visine uzorka (ΔL) odnosno uzdužna deformacija mjeri se na način da se na uzorak pričvrste nosači senzora za mjerenje pomaka. Razmak između nosača senzora je početna visina uzorka (L) koja se uzima u proračun modula. Mjerenja se obavljaju na najmanje dva senzora, ravnomjerno raspoređena oko uzorka, a u proračun se uzima prosječna vrijednost izmjerenih pomaka.

POSTUPAK

Promjena promjera uzorka (ΔD) odnosno radijalna deformacija uzorka vrši se na način da se na uzorak pričvrsti senzor za mjerenje promjene opsega uzorka ili najmanje dva senzora za mjerenje promjene promjera uzorka, ravnomjerno raspoređena oko uzorka promjera (D), kod kojih se u proračun uzima prosječna vrijednost izmjerenih pomaka.

Obzirom da do sloma intaktnih uzoraka stijene dolazi kod vrlo malih deformacija postavljeni su vrlo visoki zahtjevi na mjerne senzore. Deformacije se moraju mjeriti sa rezolucijom od bar 25×10^{-6} i točnošću unutar 2% za vrijednosti deformacija većih od 250×10^{-6} odnosno sa rezolucijom i točnošću unutar 5×10^{-6} za vrijednosti deformacija manjih od 250×10^{-6} .

PRORAČUN

Uzdužno tlačno naprezanje ($\Delta\sigma$) izazvano djelovanjem sile (P) na površinu uzorka ($A=D^2\cdot\pi/4$) izračunava se prema izrazu:

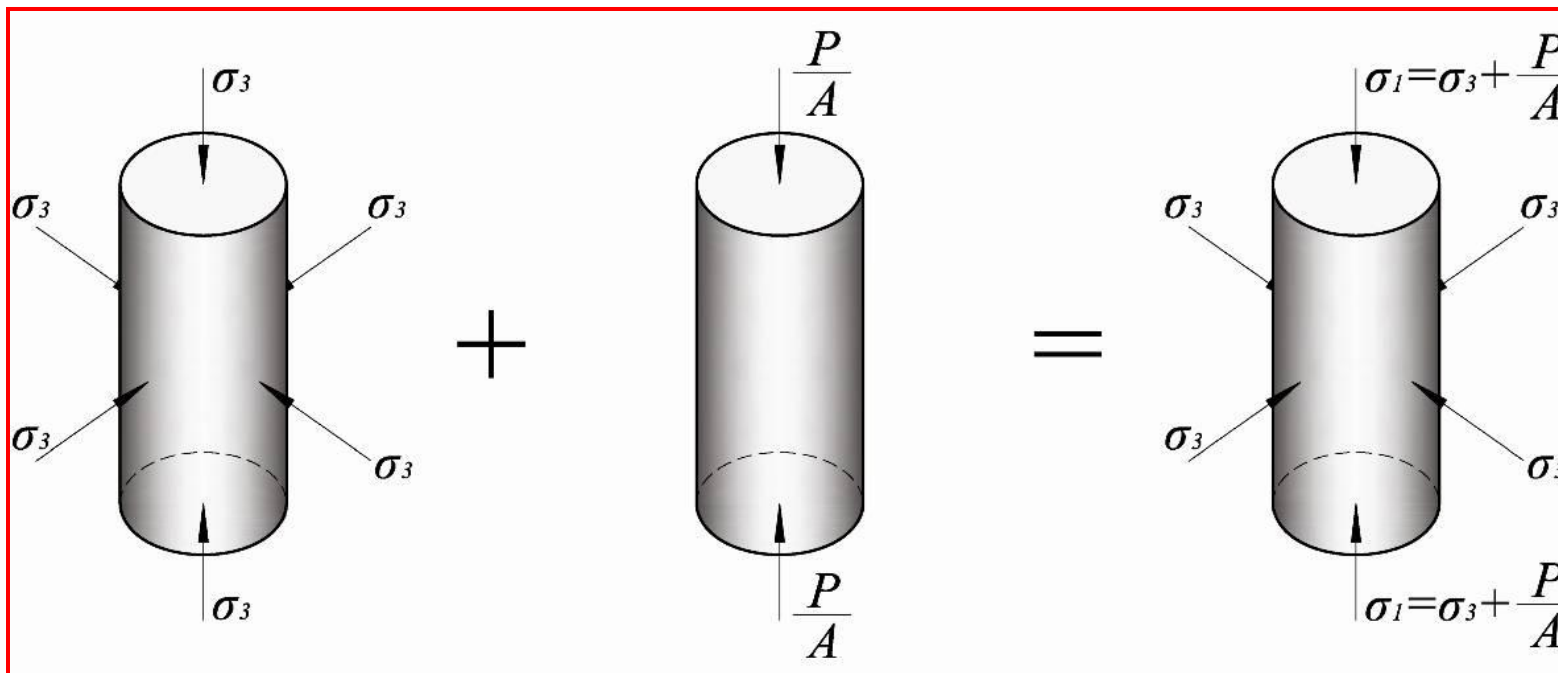
$$\Delta\sigma = \frac{P}{A}$$

Obzirom da osim nametnute sile na uzorak djeluje i hidrostatsko stanje naprezanja odnosno ćelijski tlak veće glavno naprezanje izračunava se prema izrazu:

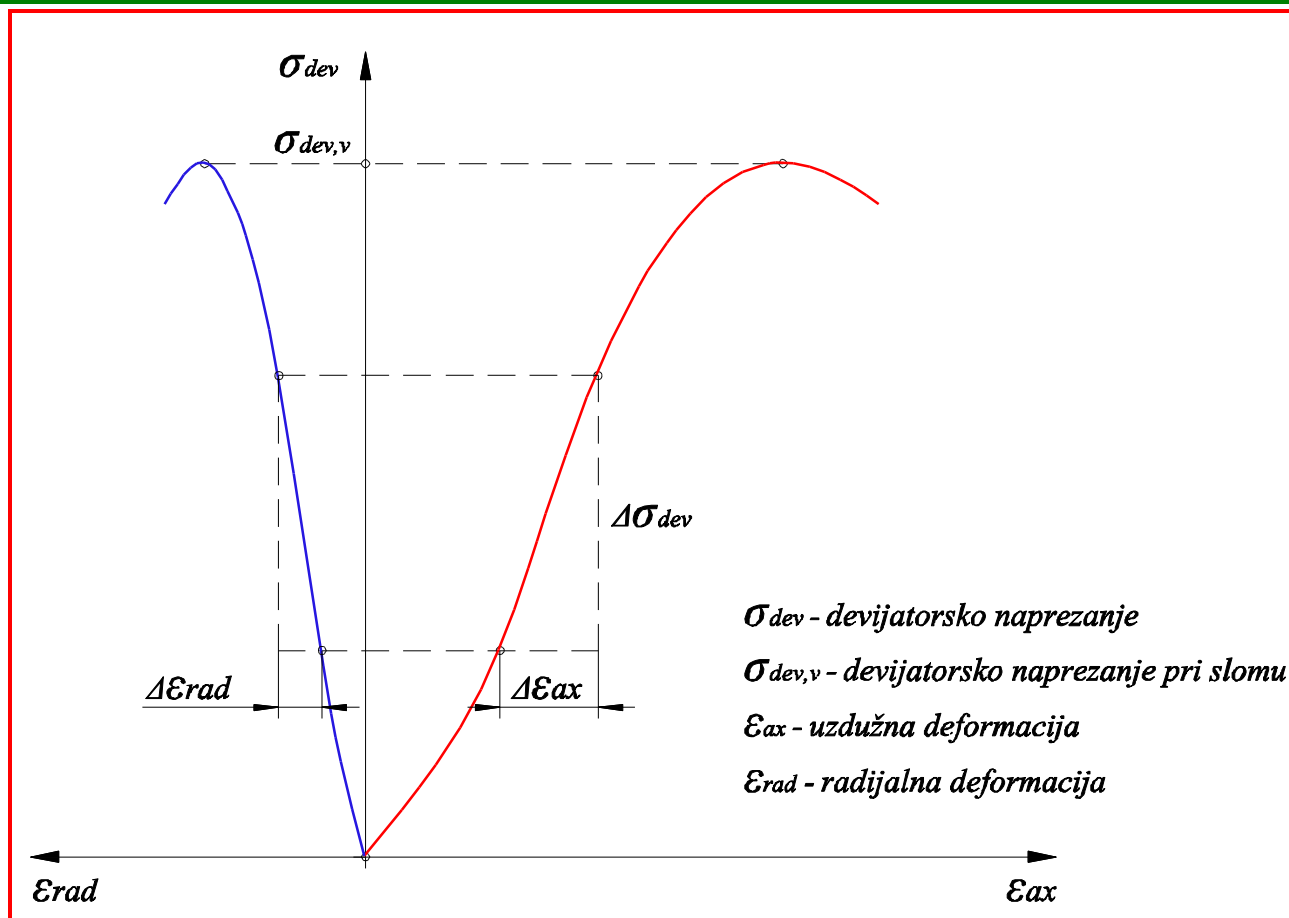
$$\sigma_1 = \Delta\sigma + \sigma_3$$

Kako je manje glavno naprezanje na uzorak jednako ćelijskom tlaku (σ_3) devijatorsko naprezanje je:

$$\sigma_{dev} = \sigma_1 - \sigma_3 = \Delta\sigma$$



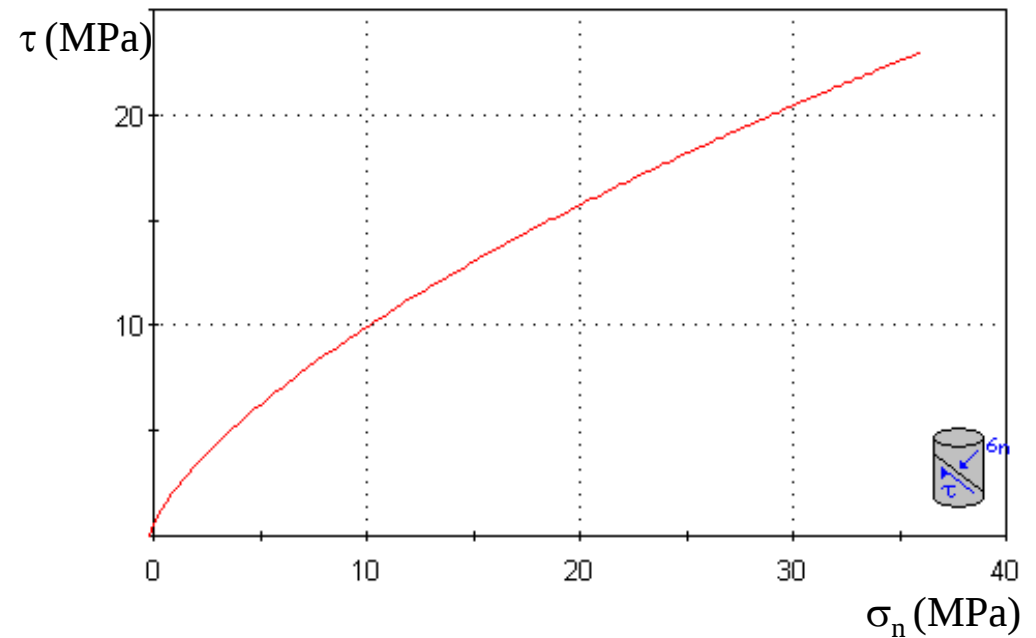
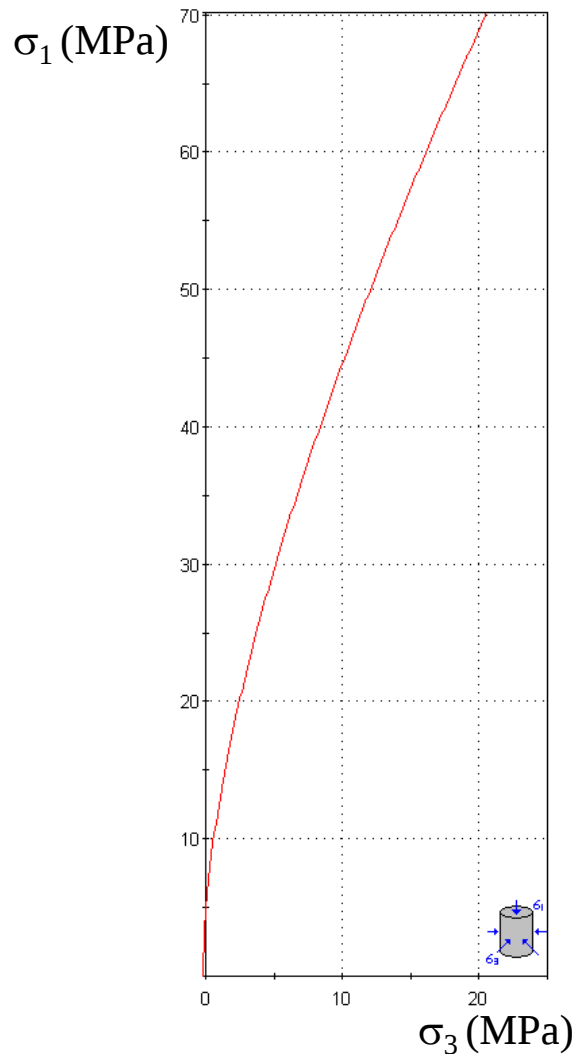
Naprezanja stijenskog uzorka u troosnom pokusu



Naponsko-deformacijske krivulje u troosnom stanju naprezanja

Modul elastičnosti može se odrediti na više načina koji se koriste u inženjerskoj praksi. Razlikuju se srednji, tangentni i sekantni modul elastičnosti.

Rezultati troosnih ispitivanja u $\tau - \sigma_n$ i $\sigma_1 - \sigma_3$ dijagramu:



Glavni oblik pojavljivanja karbonata u stijeni je kalcijev karbonat.

U postupku određivanja sadržaja karbonata solna kiselina djeluje sa karbonatima, formira se klorid i oslobađa ugljični dioksid:



Oslobodeni ugljični dioksid sakuplja se i mjeri mu se volumen, iz čega se zatim određuje masa ugljičnog dioksida ako se zna temperatura i atmosferski tlak.

Tempe- ratura °C	Barometarski tlak u mm													
	742	744,5	747	749	751	753,5	756	758	760	762,5	765	767	769	771
28	1778	1784	1791	1797	1804	1810	1817	1823	1828	1833	1837	1842	1847	1852
27	1784	1790	1797	1803	1810	1816	1823	1829	1834	1839	1843	1848	1853	1858
26	1791	1797	1803	1809	1816	1822	1829	1835	1840	1845	1849	1854	1859	1864
25	1797	1803	1810	1816	1823	1829	1836	1842	1847	1852	1856	1861	1866	1871
24	1803	1809	1816	1822	1829	1835	1842	1848	1853	1858	1862	1867	1872	1877
23	1809	1815	1822	1828	1835	1841	1848	1854	1859	1864	1868	1873	1878	1883
22	1815	1821	1828	1834	1841	1847	1854	1860	1865	1870	1875	1880	1885	1890
21	1822	1828	1835	1841	1848	1854	1861	1867	1872	1877	1882	1887	1892	1897
20	1828	1834	1841	1847	1854	1860	1867	1873	1878	1883	1888	1893	1898	1903
19	1834	1840	1847	1853	1860	1866	1873	1879	1884	1889	1894	1899	1904	1909
18	1840	1846	1853	1859	1866	1872	1879	1885	1890	1895	1900	1905	1910	1915
17	1846	1853	1860	1866	1873	1879	1886	1892	1897	1902	1907	1912	1917	1922
16	1853	1860	1866	1873	1879	1886	1892	1898	1903	1908	1913	1918	1923	1928
15	1859	1866	1872	1879	1886	1892	1899	1905	1910	1915	1920	1925	1930	1935
14	1865	1873	1878	1885	1892	1899	1906	1912	1917	1922	1927	1932	1937	1942
13	1872	1878	1885	1892	1899	1906	1913	1919	1924	1929	1934	1939	1944	1949

Masa ugljičnog dioksida u ovisnosti o temperaturi i atmosferskom tlaku

Iz mase ugljičnog dioksida i težinskog odnosa prema kalcijevom karbonatu proračuna se masa karbonata u uzorku tla i izrazi se u postotku od početne suhe mase.

Sadržaj karbonata u stijeni je odnos mase karbonata prema suhoj masi stijene.



Uređaj za određivanje sadržaja karbonata

PRORAČUN:

Rezultat pokusa je količina oslobođenog ugljičnog dioksida. Za poznatu temperaturu i atmosferski pritisak postoje tabele sa podatkom o masi 1 cm³ ugljičnog dioksida.

Sadržaj ugljičnog dioksida izražava se u postocima u odnosu na ukupnu suhu masu uzorka, a može se izračunati prema sljedećoj formuli:

$$D = \frac{B \cdot C}{A \cdot 1000} \cdot 100 [\%]$$

pri čemu je:

A – težina suhog uzorka [g]

B – količina oslobođenog CO₂ [cm³]

C – težina 1 cm³ CO₂ [mg]

D – ugljični dioksid u postotku od suhe mase uzorka [%]

PRORAČUN:

Iz odnosa težina ugljičnog dioksida i kalcijevog karbonata, može se iz poznatog postotka CO_2 izračunati sadržaj kalcijeva karbonata u postotku od mase suhog uzorka prema sljedećoj formuli:

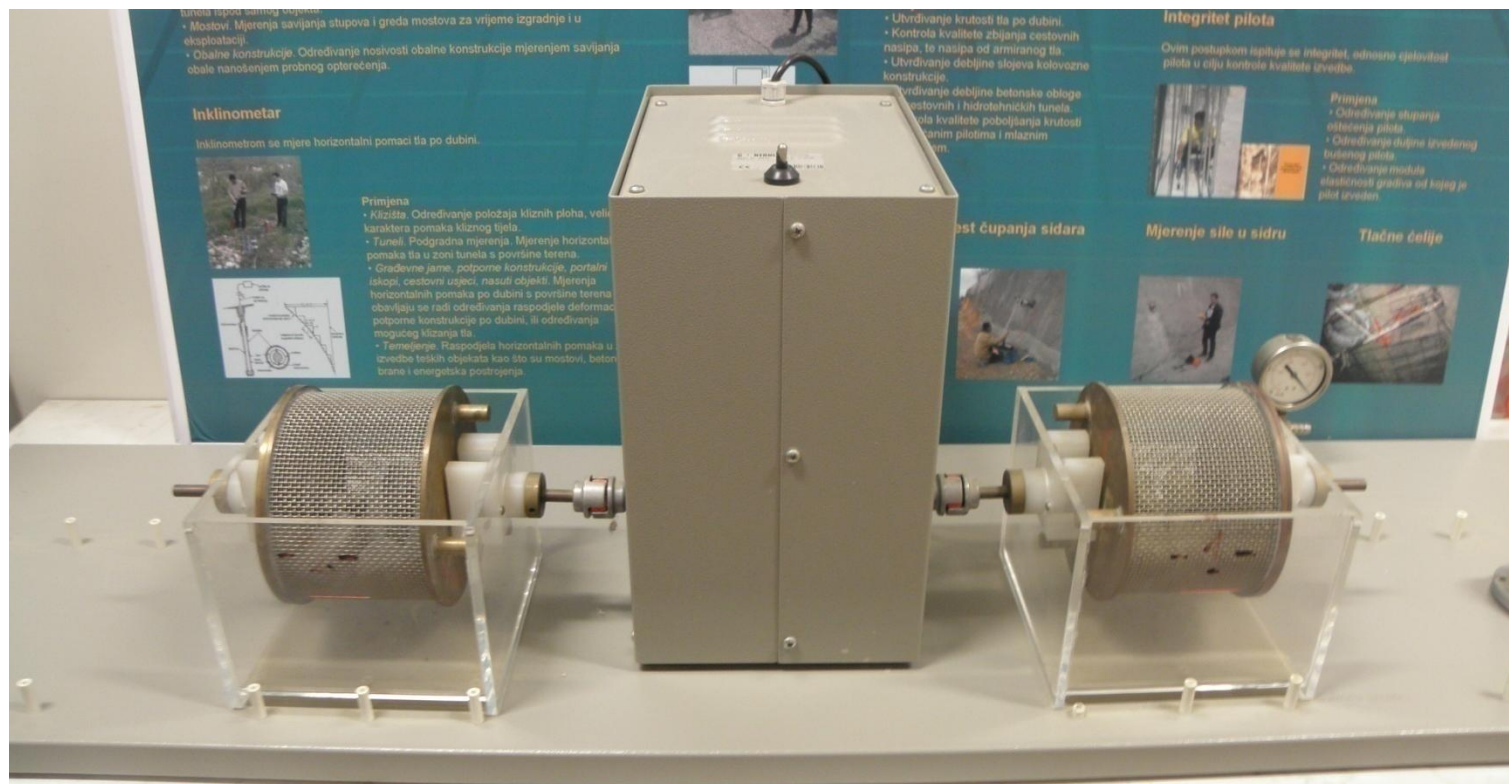
$$E = D \cdot 2.274 [\%]$$

gdje je

E – kalcijev karbonat u postotku od mase suhog uzorka

Ova metoda ispitivanja koristi se za kvalitativno određivanje trajnosti stijena.

Ispitivanjem se određuje otpornost stijene slabljenju i dezintegraciji (trošenju) pri cikličkom vlaženju i sušenju.





POSTUPAK

Deset uzoraka stijene težine 40 – 60 g (ukupno cca 500 g stijene) stave se u uređaj koji sadrži dva bubnja duljine 100 mm i promjera 140 mm.

Mora se zabilježiti točna početna masa ispitivanih uzoraka (m_A).

Bubnjevi se rotiraju u posudama s vodom pri čemu razina vode mora biti 20 mm ispod osi bubnjeva.

Bubnjevi rotiraju konstantnom brzinom od 20 okretaja u minuti.

Nakon rotacije koja traje 10 minuta, uzorci stijene koji su ostali u bubnju osuše se na temperaturi od 105°C te se zatim ustanovi njihova masa (m_B) čime je završen prvi ciklus ispitivanja.

Test se provodi u dva ciklusa pri čemu preostala masa iz prvog ciklusa (m_B) čini početnu masu za drugi ciklus ispitivanja. Konačna preostala masa (m_C) nakon drugog ciklusa ispitivanja odredi se prema istom postupku kao i na kraju prvog ciklusa čime je ispitivanje završeno.



PRORAČUN

Postotak stijene koja je ostala u bubnju, pri suhoj masi, predstavlja "slake durability" indeks I_d .

Nakon prvog ciklusa , odredi se indeks I_{d1} prema sljedećem izrazu:

$$I_{d1} = \frac{m_B}{m_A} \times 100$$

Nakon drugog ciklusa , odredi se indeks I_{d2} prema sljedećem izrazu:

$$I_{d2} = \frac{m_C}{m_A} \times 100$$

Usvaja se ona vrijednost indeksa I_d koja daje nižu klasifikaciju trajnosti.



TRAJNOST – SLAKE DURABILITY TEST

ZAVOD ZA
GEOTEHNIKU

Manja vrijednost indeksa I_d znači da se veća količina stijene razbila u komade i izgubila kroz sito.

U sljedećoj tablici dana je klasifikacija trajnosti s obzirom na dobiveni slake durability indeks.

Ime grupe	% -ak stijene zadržan nakon jednog 10 min ciklusa I_{d1}	% -ak stijene zadržan nakon dva 10 min ciklusa I_{d2}
Veoma visoka trajnost	>99	> 98
Visoka trajnost	98-99	95-98
Srednje visoka trajnost	95-98	85-95
Srednja trajnost	85-95	60-85
Niska trajnost	60-85	30-60
Veoma niska trajnost	< 60	< 30